計畫編號：SWCB-108-200

拱型固床工之力學性質探討
Discussion on the mechanics properties of arched type groundsill

執 行 單 位：國立臺灣大學

執 行 期 間：108 年 02 月 20 日至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：黃宏斌 教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 108 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

拱型固床工之力學性質探討

摘要

水土保持局積極推動創新工法與近自然工法，治理工程中採用多樣化的固床工，藉由拱型的特性，穩固河床，導正流心，維持河川基流量，營造出深潭、淺灘、急流與緩流等多樣性的流況，提供生態補償。本計畫接續去年度之野溪固床工水理機制試驗分析計畫，繼續探討拱型固床工水理現象，作為現地工程施作依據。透過模擬分析，包括 ABAQUS、ANSYS-FLUENT、SRH2D 以及 Riverflow2D 等四套數值模擬軟體，並進行水槽試驗，以探討拱型固床工之水理現象，提供後續工程設計之依據，並提升治理功效，初步得到以下結論。

(一)透過數值模擬能夠較快速且較經濟的試驗水工構造物於水流中之變化、流況以及流場等。

(二)此次數值模擬認為在弧長與兩岸之距離之比值為 1.11639412 時之上拱型固床工為較好之固床工構造。

(三)拱型固床工之最大應力、最大位移均隨拱度增加而上升，最大力矩值則是於拱度較小時隨拱度增加下降，而後於拱度達一定值後急遽上升。

(四)現今常使用之含低水河槽固床工經模擬能有效降低水流流速，降低沖刷。

關鍵詞：拱型固床工、應力、力矩、位移、流場、流線、沖淤

Discussion on the mechanics properties of arched type groundsill

Abstract

The Soil and Water Conservation Bureau actively promotes innovative construction methods and near-natural construction methods. The groundsill adopted in the governance projects are used to stabilize the river bed, guide the flow center, and maintain the basement of the river. The plan is to continue the experimental analysis of the hydraulic mechanism of the groundsill laborer last year, and continue to explore the hydraulic phenomenon of the arched type groundsillsolid. As a local project, it will be simulated and analyzed, including ABAQUS, ANSYS-FLUENT, SRH2D and Riverflow2D Set of numerical simulation software and water tank test to carry out the hydrological phenomenon of the arched type groundsill project, provide the basis for subsequent project design, and improve the governance efficiency, and initially obtain the following indicators.

(1) Through numerical simulation, it is possible to test the changes, flow conditions, and flow fields of hydraulic structures in water flow faster and more economically.

(2) This numerical simulation considers that the upper arched type grounsill works better when the ratio of the arc length to the distance between the banks is changed to 1.1639412.

(3) The maximum stress and maximum displacement of arched type groundsill increase with the increase of the arch, and the maximum torque value decreases with the increase of the arch when the arch is small, and then increases sharply after the arch reaches a certain value.

(4) Simulation of low-water channel groundsillscommonly used today

can effectively reduce water flow rate and reduce erosion.

Keywords：Arched type groundsill, Stress, Moment, Displacement, Flow field, Streamline, Erosion, Deposition

目錄

目錄 I

圖目錄 III

表目錄 XX

第一章 前言 1-1

第一節 緣起與目的 1-1

第二節 工作項目與內容 1-1

第三節 預期成果 1-2

第二章 固床工水理機制相關文獻與資料收集 2-1

第一節 水流特性 2-2

第二節 影響因子 2-8

第三節 深度評估 2-13

第四節 設計參數 2-17

第五節 分析模式 2-22

第三章 蒐集現地系列固床工布置資料 3-1

第一節 工程配置 3-1

第二節 水理演算 3-2

第三節 河床質分析 3-4

第四章 數值模擬力學性質 4-1

第一節 ABAQUS 4-1

第二節 ANSYS-FLUENT 4-72

第五章 數值模擬輸砂性質 5-1

第一節 SRH2D 5-1

第二節 Riverflow2d 5-33

第六章 拱型固床工水槽試驗 6-1

第一節 試驗規劃佈置 6-1

第二節 試驗內容 6-4
第三節 水槽與模型試驗之結果與討論 6-11
第七章 製作圖說及設計準則 7-1
第一節 圖說 7-1
第二節 拱型固床工理論分析 7-17
第三節 不同拱度之上拱型固床工、下拱型固床工分析比較 7-22
第八章 結論與建議 8-1
第一節 結論 8-1
第二節 建議 8-3
第九章 工作進度 9-1
附錄一、參考文獻 附錄一-1
附錄二、期初審查意見回覆 附錄二-1
附錄三、期中審查意見回覆 附錄三-1
附錄四、期末審查意見回復 附錄四-1

圖目錄

圖 2-1 綜合沖刷坑深度無因次模式圖 2-14
圖 2-2 帶工下游淘刷坑幾何形狀與水理參數關係(摘自 Wu et al.，2002) 2-17
圖 3-1 水仙溪下游野溪治理工程之整體配置圖(1) 3-1
圖 3-2 水仙溪下游野溪治理工程之整體配置圖(2) 3-2
圖 3-3 水仙溪下游 0k+194 處之固床工橫斷面圖 3-2
圖 3-4 水仙溪河床質採樣位置 3-4
圖 4-1 上拱型固床工固定底部之應力分布情形 4-5
圖 4-2 上拱型固床工無固定底部之應力分布情形 4-5
圖 4-3 上拱型固床工固定底部之力矩分布情形 4-6
圖 4-4 上拱型固床工無固定底部之力矩分布情形 4-7
圖 4-5 上拱型固床工固定底部之位移分布情形 4-8
圖 4-6 上拱型固床工固定側邊之位移分布情形 4-8
圖 4-7 下拱型固床工固定底部之應力分布情形 4-9
圖 4-8 下拱型固床工無固定底部之應力分布情形 4-10
圖 4-9 下拱型固床工固定底部之力矩分布情形 4-11
圖 4-10 下拱型固床工無固定底部之力矩分布情形 4-11
圖 4-11 下拱型固床工固定底部之位移分布情形 4-12
圖 4-12 下拱型固床工無固定底部之位移分布情形 4-13
圖 4-13 水深 1 公尺之應力分布情形 4-14
圖 4-14 水深 1 公尺之力矩分布情形 4-14
圖 4-15 水深 1 公尺之位移分布情形 4-15
圖 4-16 水深 1.5 公尺，固定底部、側邊之應力分布情形 4-15
圖 4-17 水深 1.5 公尺，固定底部、側邊之力矩分布情形 4-16

圖 4-18 水深 1.5 公尺，固定底部、側邊之位移分布情形 4-16
圖 4-19 水深 2.056 公尺，固定底部、側邊之應力分布情形 4-17
圖 4-20 水深 2.056 公尺，固定底部、側邊之力矩分布情形 4-17
圖 4-21 水深 2.056 公尺，固定底部、側邊之位移分布情形 4-18
圖 4-22 不同水位下之最大應力比較 4-19
圖 4-23 不同水位下之最大力矩比較 4-19
圖 4-24 不同水位下之最大位移比較 4-20
圖 4-25 各比值下動水壓加上靜水壓之總力 4-21
圖 4-26 各比值下最大受力情形 4-21
圖 4-27 各比值下最大力矩 4-21
圖 4-28 各比值下最大位移 4-22
圖 4-29 上拱型固床工不同水深下受力分布 4-23
圖 4-30 上拱型固床工不同水深下最大應力關係圖 4-24
圖 4-31 上拱型固床工不同水深下力矩分布 4-25
圖 4-32 上拱型固床工不同水深下最大力矩關係圖 4-25
圖 4-33 上拱型固床工不同水深下位移分布 4-27
圖 4-34 上拱型固床工不同水深下最大位移關係圖 4-27
圖 4-35 模擬尺寸示意圖 4-28
圖 4-36 弧長 34.6513m 上拱型固床工應力分布情形 4-29
圖 4-37 弧長 34.6513m 上拱型固床工力矩分布情形 4-29
圖 4-38 弧長 34.6513m 上拱型固床工力位移分布情形 4-30
圖 4-39 弧長 35.4552m 上拱型固床工應力分布情形 4-30
圖 4-40 弧長 35.4552m 上拱型固床工力矩分布情形 4-31
圖 4-41 弧長 35.4552m 上拱型固床工位移分布情形 4-31
圖 4-42 弧長 36.5625m 上拱型固床工應力分佈情形 4-32

圖 4-43 弧長 36.5625m 上拱型固床工力矩分佈情形 4-33
圖 4-44 弧長 36.5625m 上拱型固床工位移分佈情形 4-33
圖 4-45 弧長 37.6574m 上拱型固床工應力分布情形 4-34
圖 4-46 弧長 37.6574m 上拱型固床工力矩分布情形 4-34
圖 4-47 弧長 37.6574m 上拱型固床工位移分布情形 4-35
圖 4-48 弧長 39.6188m 上拱型固床工應力分布情形 4-35
圖 4-49 弧長 39.6188m 上拱型固床工力矩分布情形 4-36
圖 4-50 弧長 39.6188m 上拱型固床工位移分布情形 4-36
圖 4-51 上拱型固床工最大應力與弧長關係圖 4-37
圖 4-52 上拱型固床工最小應力與弧長關係圖 4-38
圖 4-53 上拱型固床工最大力矩值與弧長關係圖(1) 4-39
圖 4-54 上拱型固床工最大力矩值與弧長關係圖(2) 4-39
圖 4-55 上拱型固床工最大位移與弧長關係圖 4-40
圖 4-56 弧長 34.6513m 下拱型固床工應力分布情形 4-41
圖 4-57 弧長 34.6513m 下拱型固床工力矩分布情形 4-42
圖 4-58 弧長 34.6513m 下拱型固床工位移分布情形 4-42
圖 4-59 弧長 35.4552m 下拱型固床工應力分布情形 4-43
圖 4-60 弧長 35.4552m 下拱型固床工力矩分布情形 4-43
圖 4-61 弧長 35.4552m 下拱型固床工位移分布情形 4-44
圖 4-62 弧長 36.5625m 下拱型固床工應力分布情形 4-45
圖 4-63 弧長 36.5625m 下拱型固床工力矩分布情形 4-45
圖 4-64 弧長 36.5625m 下拱型固床工位移分布情形 4-46
圖 4-65 弧長 37.9574m 下拱型固床工應力分布情形 4-47
圖 4-66 弧長 37.9574m 下拱型固床工應力分布情形 4-47
圖 4-67 弧長 37.9574m 下拱型固床工位移分布情形 4-48

圖 4-68 弧長 39.6188m 下拱型固床工應力分布情形 4-48
圖 4-69 弧長 39.6188m 下拱型固床工力矩分布情形 4-49
圖 4-70 弧長 39.6188m 下拱型固床工位移分布情形 4-49
圖 4-71 下拱形固床工最大應力與弧長關係圖 4-50
圖 4-72 下拱型固床工最小應力與弧長關係圖 4-51
圖 4-73 上下拱型固床工應力與弧長關係圖 4-51
圖 4-74 下拱型固床工最大力矩與弧長關係圖 4-52
圖 4-75 上下拱最大力矩與弧長關係圖 4-52
圖 4-76 最大位移與弧長關係圖 4-53
圖 4-77 上下拱型固床工位移與弧長關係圖 4-54
圖 4-78 兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工應力分布 4-55
圖 4-79 兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工力矩分布 4-55
圖 4-80 兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工位移分布 4-56
圖 4-81 兩側翼牆斜角為 30 度上拱型固床工應力分布 4-57
圖 4-82 兩側翼牆斜角為 30 度上拱型固床工力矩分布 4-58
圖 4-83 兩側翼牆斜角為 30 度上拱型固床工位移分布 4-59
圖 4-84 兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工應力分布 4-60
圖 4-85 兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工力矩分布 4-60
圖 4-86 兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工位移分布 4-61
圖 4-87 兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工應力分布 4-62
圖 4-88 兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工力矩分布 4-63
圖 4-89 兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工位移分布 4-64
圖 4-89 上拱型固床工最大應力與兩岸翼牆斜角角度關係圖 4-65
圖 4-90 上拱型固床工最大力矩與兩岸翼牆斜角角度關係圖 4-65
圖 4-91 上拱型固床工最大位移與兩岸翼牆斜角角度關係圖 4-66

圖 4-92 下拱型固床工最大應力與兩岸翼牆斜角角度關係圖 4-66
圖 4-93 下拱型固床工最大力矩與兩岸翼牆斜角角度關係圖 4-67
圖 4-94 下拱型固床工最大位移與兩岸翼牆斜角角度關係圖 4-67
圖 4-95 上下拱型固床工最大應力與角度關係圖 4-68
圖 4-96 上下拱型固床工力矩與角度關係圖 4-68
圖 4-97 上下拱型固床工位移與角度關係圖 4-69
圖 4-98 下拱型流線分布情形俯視圖 4-75
圖 4-99 下拱型流線分布情形仰視圖 4-75
圖 4-100 設定剖面位置圖 4-76
圖 4-101 下拱形 z=0 剖面之流速分布圖 4-76
圖 4-102 下拱形 z=8.5 剖面之流速分布圖 4-77
圖 4-104 下拱形 z=0 剖面之流線分布圖 4-78
圖 4-105 下拱形 z=8.5 剖面之流線分布圖 4-78
圖 4-106 下拱形 z=16.9 剖面之流線分布圖 4-79
圖 4-107 拱型流線分布情形俯視圖 4-80
圖 4-108 上拱型流線分布情形仰視圖 4-80
圖 4-109 上拱型 z=0 剖面之流速分布圖 4-81
圖 4-110 上拱型 z=8.5 剖面之流速分布圖 4-81
圖 4-111 上拱型 z=16.9 剖面之流速分布圖 4-81
圖 4-112 上拱型 z=0 剖面之流線分布圖 4-82
圖 4-113 上拱型 z=8.5 剖面之流線分布圖 4-82
圖 4-114 上拱型 z=16.9 剖面之流線分布圖 4-83
圖 4-115 1.5m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況 4-83
圖 4-116 1m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況 4-84
圖 4-117 0.5m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況 4-84

圖 4-118　1.5m 高上拱型固床工於剖面 z=0 之流況 4-85
圖 4-119　1m 高上拱型固床工於剖面 z=0 之流況 4-85
圖 4-120　0.5m 高上拱型固床工於剖面 z=0 之流況 4-86
圖 4-121 弧長 34.6513m 下拱型固床工流線分布 4-87
圖 4-122 弧長 34.6513m 下拱型固床工向量分布 4-88
圖 4-123 弧長 34.6513m 下拱型固床工 X=0 流速分布 4-88
圖 4-124 弧長 34.6513m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-89
圖 4-125 弧長 34.6513m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-89
圖 4-126 弧長 35.4552m 下拱型固床工流線分布 4-90
圖 4-127 弧長 35.4552m 下拱型固床工向量分布 4-90
圖 4-128 弧長 35.4552m 下拱型固床工 X=0 流速分布 4-91
圖 4-129 弧長 35.4552m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-91
圖 4-130 弧長 35.4552m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-92
圖 4-131 弧長 36.5625m 下拱型固床工流線分布 4-92
圖 4-132 弧長 36.5625m 下拱型固床工向量分布 4-93
圖 4-133 弧長 36.5625m 下拱型固床工 X=0 流速分布 4-93
圖 4-134 弧長 36.5625m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-94
圖 4-135 弧長 36.5625m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-94
圖 4-136 弧長 37.9574m 下拱型固床工流線分布 4-95
圖 4-137 弧長 37.9574m 下拱型固床工向量分布 4-95
圖 4-138 弧長 37.9574m 下拱型固床工 X=0 流速分布 4-96
圖 4-139 弧長 37.9574m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-96
圖 4-140 弧長 37.9574m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-97
圖 4-141 弧長 39.6188m 下拱型固床工流線分布 4-97
圖 4-142 弧長 39.6188m 下拱型固床工向量分布 4-98

圖 4-143 弧長 39.6188m 下拱型固床工 X=0 流速分布 4-98
圖 4-144 弧長 39.6188m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-99
圖 4-145 弧長 39.6188m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-99
圖 4-146 流速與下拱型固床工弧長關係圖 4-100
圖 4-147 上拱型固床工弧長 34.6513m 流線分布 4-101
圖 4-148 上拱型固床工弧長 34.6513m 向量分布 4-101
圖 4-149 上拱型固床工弧長 34.6513m X=0 流速分佈 4-102
圖 4-150 上拱型固床工弧長 34.6513m X=8.3 流速分佈 4-102
圖 4-151 上拱型固床工弧長 34.6513m X=16.6 流速分佈 4-103
圖 4-152 上拱型固床工弧長 5.4552m 流線分佈 4-103
圖 4-153 上拱型固床工弧長 35.4552m 向量分佈 4-104
圖 4-154 上拱型固床工弧長 35.4552m X=0 流速分佈 4-104
圖 4-155 上拱型固床工弧長 35.4552m X=8.3 流速分佈 4-105
圖 4-156 上拱型固床工弧長 35.4552m X=16.6 流速分佈 4-105
圖 4-157 上拱型固床工弧長 36.5625m 流線分佈 4-106
圖 4-158 上拱型固床工弧長 36.5625m 向量分佈 4-106
圖 4-159 上拱型固床工弧長 36.5625m X=0 流速分佈 4-107
圖 4-160 上拱型固床工弧長 36.5625m X=8.3 流速分佈 4-107
圖 4-161 上拱型固床工弧長 36.5625m X=16.6 流速分佈 4-108
圖 4-162 上拱型固床工弧長 37.9574m 流速分布 4-108
圖 4-163 上拱型固床工弧長 37.9574m 向量分布 4-109
圖 4-164 上拱型固床工弧長 37.9574m X=0 流速分布 4-109
圖 4-165 上拱型固床工弧長 37.9574m X=8.3 流速分布 4-110
圖 4-166 上拱型固床工弧長 37.9574m X=16.6 流速分布 4-110
圖 4-167 上拱型固床工弧長 39.6188m 流線分佈 4-111

圖 4-168 上拱型固床工弧長 39.6188m 向量分佈 4-111
圖 4-169 上拱型固床工弧長 39.6188m X=0 流速分佈 4-112
圖 4-170 上拱型固床工弧長 39.6188m X=8.3 流速分佈 4-112
圖 4-171 上拱型固床工弧長 39.6188m X=16.6 流速分佈 4-113
圖 4-172 流速與弧長關係圖 4-114
圖 4-173 上下拱固床工流速與弧長關係圖 4-114
圖 4-174 含低水河槽上拱型固床工流線分布 4-115
圖 4-175 含低水河槽上拱型固床工向量分布 4-115
圖 4-176 含低水河槽上拱型固床工 X=0 流速分布 4-116
圖 4-177 含低水河槽上拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-116
圖 4-178 含低水河槽上拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-117
圖 4-179 含低水河槽下拱型固床工流線分布 4-117
圖 4-180 含低水河槽下拱型固床工向量分布 4-118
圖 4-181 含低水河槽下拱型固床工 X=0 流速分布 4-118
圖 4-182 含低水河槽下拱型固床工 X=8.3 流速分布 4-119
圖 4-183 含低水河槽下拱型固床工 X=16.6 流速分布 4-119
圖 5-1 Strickler function 5-4
圖 5-2 SRH2D 之曼寧 n 值分區 5-5
圖 5-3 SRH2D 最大沖刷深度之設定 5-6
圖 5-4 SRH2D 之輸砂條件設定 5-6
圖 5-5 曼寧 n 值分區 5-8
圖 5-6 輸砂分區 5-8
圖 5-7 粒徑分布 5-9
圖 5-8 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-9
圖 5-9 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-10

圖 5-10 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-11
圖 5-11 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之剪應力分布 5-11
圖 5-12 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-12
圖 5-13 Q=73.59cms, 上拱型固床工(高=1.5m)上的流速分布 5-13
圖 5-14 Q=73.59cms, 上拱型固床工(高=1.5m)與下游高程 5-13
圖 5-15 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-14
圖 5-16 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-15
圖 5-17 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-16
圖 5-18 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-17
圖 5-19 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布
..... 5-18
圖 5-20 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-19
圖 5-21 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-20
圖 5-22 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-21
圖 5-23 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之剪應力分布 5-22
圖 5-24 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-23
圖 5-25 Q=73.59cms 上拱型固床工(高=1.5m)側視圖切面示意圖
..... 5-24
圖 5-26 Q=73.59cms,水位高、上拱型固床工(高=1.5m)與底床高程
..... 5-24
圖 5-27 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-25
圖 5-28 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-26
圖 5-29 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-27
圖 5-30 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-28
圖 5-31 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布
..... 5-29

圖 5-32　Q=73.59cms 上拱型固床工(高=1.5m)側視圖切面示意圖 5-30
圖 5-33　Q=73.59cms 水位高、上拱型固床工(高=1.5m)與底床高程 5-30
圖 5-34　RF2D 泥砂運移公式之設定界面 5-34
圖 5-35　RF2D 輸砂參數設定之界面 5-34
圖 5-36　RiverFlow2D 模擬構造物於河面俯視圖 5-36
圖 5-37　RiverFlow2D 模擬構造物於河面側視圖 5-36
圖 5-38　RiverFlow2D 模擬合面網格 5-36
圖 5-39 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-37
圖 5-40 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-38
圖 5-41 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-39
圖 5-42 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布 5-40
圖 5-43 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-41
圖 5-44 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-41
圖 5-46 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-43
圖 5-47 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布 5-44
圖 5-48 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-44
圖 5-49 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-45
圖 5-50 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-46
圖 5-51 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布 5-47
圖 5-53 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布 5-48
圖 5-54 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布 5-49
圖 5-55 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布 5-50

圖 5-56 下拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之沖淤分布 5-51
圖 5-57 下拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之底床剪應力分布
....5-52
圖 5-58 下拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之福祿數分布 5-52
圖 6-1 現場試驗渠槽(1) 6-1
圖 6-2 現場試驗渠槽(2) 6-2
圖 6-3 現場渠槽平面配置圖 6-2
圖 6-4 步階式馬達控制機板 6-3
圖 6-5 離心式抽水泵浦 6-3
圖 6-7 水仙溪 0k+194 之固床工橫斷面圖 6-4
圖 6-8 固床工試驗之水槽率定曲線 6-7
圖 6-9 固床工之水槽與模型試驗之俯視配置圖 6-8
圖 6-10 固床工之水槽與模型試驗之側視配置圖 6-8
圖 6-11 弧長 1.0192 公尺固床工模型 6-10
圖 6-12 弧長 1.0428 公尺固床工模型 6-10
圖 6-13 弧長 1.0754 公尺固床工模型 6-10
圖 6-14 弧長 1.1164 公尺固床工模型 6-11
圖 6-15 上拱型應力量測位置與沖刷深度量測位置 6-11
圖 6-16 下拱型應力量測位置與沖刷深度量測位置 6-11
圖 6-17 直尺 6-20
圖 6-18 各固床工形式之流量與刷坑尾部水深 6-21
圖 6-19 相同流量下下拱形固床工不同拱度沖淤深度 6-23
圖 6-20 相同流量下上拱形固床工不同拱度沖淤深度 6-23
圖 6-21 下拱固床工在 0.0047cms 流量下不同位置的沖淤深度 623
圖 6-22 上拱固床工在 0.0047cms 流量下，不同位置的沖淤深度 24
..... 6-24

圖 6-24 上拱形固床工在 0.0071cms 流量下，不同位置的沖淤深度 6-25
圖 6-25 下拱形固床工在 0.0095cms 流量下，不同位置的沖淤深度 6-25
圖 6-26 上拱形固床工在 0.0095cms 流量下，不同位置的沖淤深度 6-26
圖 6-27 下拱固床工流量與渠道中心的沖淤深度 6-26
圖 6-28 上拱固床工流量與渠道中心的沖淤深度 6-27
圖 6-29 下拱固床工之流量與兩岸平均沖刷坑深度 6-27
圖 6-30 上拱固床工之流量與兩岸平均沖刷坑深度 6-28
圖 6-31 不同流量下，下拱固床工之拱高與兩岸平均沖刷坑深度 6-28
圖 6-32 不同流量下，上拱固床工之拱高與兩岸平均沖刷坑深度 6-29
圖 6-33 不同流量下，下拱固床工之拱高與渠道中心沖刷坑深度 6-29
圖 6-34 不同流量下，上拱固床工之拱高與渠道中心沖刷坑深度 6-30
圖 6-35 下拱固床工之流量與沖刷坑長 6-30
圖 6-36 上拱固床工之流量與沖刷坑長 6-31
圖 6-37 不同流量下，下拱型固床工拱高與沖刷坑長 6-31
圖 6-38 不同流量下，上拱型固床工拱高與沖刷坑長 6-32
圖 6-39 小型拉壓兩用式荷重計 6-32
圖 6-40 無因次單寬垂直沖擊力與跌水數關係圖 6-33
圖 6-41 不同下拱固床工拱度下，流量與固床工上游兩岸平均應力. 6-34
圖 6-42 不同上拱固床工拱度下，流量與固床工上游兩岸平均應力 6-34
圖 6-43 不同下拱固床工拱度下，流量與固床工上游渠道中心應力. 6-35

圖 6-44 不同上拱固床工拱度下，流量與固床工上游渠道中心應力.
..... 6-35
圖 7-1 固床工橫斷面示意圖 7-2
圖 7-2 拱型固床工平面圖 7-3
圖 7-3 固床工剖面圖(S：1/50，U：cm)..... 7-4
圖 7-4 拱型排砌塊石固床工之平面圖 7-4
圖 7-5 拱型排砌塊石固床工之剖面圖 7-5
圖 7-6 拱型排砌塊石固床工立面圖 7-5
圖 7-7 既有護岸基礎修補標準示意圖(S：1/25，U：cm)..... 7-6
圖 7-8 既有石籠基礎修補標準示意圖(S：1/25，U：cm)..... 7-6
圖 7-9 混凝土護岸之剖面圖 7
圖 7-10 乾砌石護岸之剖面圖 7-7
圖 7-11 箱籠護岸之剖面圖 7-8
圖 7-12 預鑄槽框式護岸之平面圖 7-8
圖 7-13 預鑄槽框式護岸之剖面圖-1..... 7-9
圖 7-15 預鑄槽框式護岸之立面圖 7-10
圖 7-16 預鑄槽框式護岸之立面圖詳圖 A..... 7-10
圖 7-17 預鑄塊平面圖 7-11
圖 7-18 預鑄塊斷面圖 7-11
圖 7-19 預鑄塊正面圖 7-12
圖 7-20 預鑄塊立體圖 7-12
圖 7-21 頂端蓋板預鑄塊斷面圖 7-13
圖 7-22 混凝土砌石護岸(三明治式)剖面圖 7-13
圖 7-23 格框式護岸剖面圖與鋼筋示意圖..... 7-14
圖 7-24 客土袋標準示意圖 7-15

圖 7-25 模板組立示意圖 7-15
圖 7-26 鋼筋配置圖 7-16
圖 7-27 φ3”PVC 洩水管示意圖 7-16
圖 7-32 上拱型固床工實驗、模擬沖刷比較斷面圖 7-25
圖 7-33 下拱型固床工實驗、模擬沖刷比較斷面圖 7-25
圖 7-34 上拱型固床工實驗、模擬應力比較斷面圖 7-26
圖 7-35 下拱型固床工實驗、模擬應力比較斷面圖 7-27
圖 7-36 上拱型固床工底部掏刷情形 7-28
圖 7-37 上拱型固床工下游面掏刷情形 7-29
圖 7-38 上拱型固床工下游面淤積情形 7-30

表目錄

表 3-1 水仙溪主流及支流建議採用之洪峰流量值 3-2
表 3-2 孔號 5(斷面 22)之河床質代表粒徑分析成果 3-4
表 4-1 含低水河槽之上拱型固床最大應力、力矩和位移比較 4-18
表 4-2 固床工與水深比值不同下其最大內部受力、力矩以及位移之比較 4-20
表 4-3 上拱型固床工厚度與最大應力比較表 4-69
表 4-4 下拱型固床工厚度與最大應力比較表 4-69
表 4-5 上拱型固床工最大力矩與厚度比較表 4-70
表 4-6 下拱型固床工最大力矩與厚度比較表 4-70
表 4-7 上拱型固床工最大位移與厚度比較表 4-71
表 4-8 下拱型固床工最大位移與厚度比較表 4-71
表 5-1 水力粗糙度係數表 5-4
表 5-2 SRH2D 上拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較 5-31
表 5-4 Riverflow2D 上拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較 5-53
表 5-5 Riverflow 2D 下拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較 5-53
表 6-1 試驗條件總整理 6-9
表 6-2 沖刷坑實驗結果照片 6-12
表 6-3 下拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑深度 6-36
表 6-4 上拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑深度 6-36
表 6-5 下拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑長度 6-37
表 6-6 上拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑長度 6-37
表 9-1 工作進度表 9-1

第一章 前言

第一節 緣起與目的

水土保持局積極推動創新工法與近自然工法，治理工程中採用多樣化的固床工，藉由拱型的特性，穩固河床，導正流心，維持河川基流量，營造出深潭、淺灘、急流與緩流等多樣性的流況，提供生態補償。本計畫接續去年度之野溪固床工水理機制試驗分析計畫，繼續探討拱型固床工水理現象，作為現地工程施作依據。預計透過模擬分析以及水槽試驗，探討拱型固床工之水理現象，提供後續工程設計之依據，並提升治理功效。

第二節 工作項目與內容

一、固床工相關文獻與資料收集

本團隊蒐集歐美日及國內與固床工之水流特性、沖刷類型、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等有關之文獻資料，了解其設計應用以及模式分析時所需考慮之水理機制與設計因子估算方法，並針對其設計可能遭遇的問題進行分析。

二、蒐集現地系列固床工布置資料

本團隊蒐集固床工現地布置之資料，包括設計圖，上下游邊界流速，輸砂量，土壤性質分布等，以建置適當之數值模擬模型，使模擬能有更佳準確的結果。

三、數值模擬力學性質

本項目建置力學之數值模擬，針對拱型固床工進行水理分析與探討，考量工程設計所需之水理重要因子，驗證之項目包括：

固床工附近之流速分布、壓力分佈、流線分布、力矩、固床工之位移等 5 項。

四、數值模擬輸砂性質

本項目建置輸砂之數值模擬，針對拱型固床工工法進行水理分析與探討，考量工程設計所需之水理重要因子，驗證之項目包括：固床工附近之水深、流速、底床剪應力與沖刷深度等 4 項。

五、水槽試驗

本團隊針對拱型固床工進行分析，針對 2 種形式拱型固床工進行水槽試驗，水槽試驗以明渠試驗進行，進行試驗之水槽考量可能之模型縮比與入口渦流及下游邊界控制對試驗結果的影響，試驗條件包括：不同之水深特性、不同之水流流速及所造成之底床沖淤變化等進行探討，考量野溪河道遭遇洪水時多為紊流流況，試驗過程以觀測儀器記錄結構物附近之流場進行水理分析，藉由渠槽試驗精確分析拱型固床工水理機制，分析結果包括：流速、水深、與沖刷深度等 3 項成果，提供後續工程設計之依據，提升治理效益。

六、製作圖說與設計準則

依據驗證後之水理機制等模擬以及分析數據，製作相關固床工設計圖說，以及研擬自然工法設計之固床工改善方案及設計準則。

第三節 預期成果

一、完成固床工相關文獻與資料收集

二、完成蒐集現地系列固床工布置資料

三、完成數值模擬力學性質

四、完成數值模擬輸砂性質

五、完成現地調查與室內實驗

六、完成製作圖說及設計準則

第二章 固床工水理機制相關文獻與資料收集

本團隊蒐集歐美日及國內有關固床工的文獻資料，其中包括水流特性、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等資料，以瞭解其設計應用時所需考慮的水理機制、設計因子估算方法以及模式分析方法，並針對其設計可能遇到的問題進行分析。

水土保持局 2005 年所出版之水土保持手冊有關固床工之定義為：固床工為一個橫向構造物，可以與河床齊平或略高於河床面，同時常採用連續施設方式而構成一系列固床工，以擴大河道的保護區段。其目的有下列二項：

(一)有效抑制河床面泥砂的輸移，防止河床產生嚴重沖刷現象。

(二)可以緩和床面及兩岸的流速，具有整流、導流、減緩沖刷、調整河床坡度等功能。

而 2017 年正在修訂的水土保持手冊則有：固床工(ground sill)為保護溪床免於被洪水沖刷下切的一種橫向阻水構造物，可以略低於溪床、或與溪床齊平、或略高於溪床面(有效高度以不超過 1.0m 為原則)。因固床工上游僅有小規模的土砂蓄積，具有調降溪床坡度，以調節水流流速，惟其主要功能在於洪水時得以控制溪床高程，免於被洪水持續沖刷而影響兩岸構造物或土地之安全。

拱型固床工有下列議題值得探討：

(一)拱型固床工將水流集中在固床工中央下游處排放，增加沖擊力，其沖刷坑會較直線型固床工深，基礎深度必須比直線型固床工深。

(二)拱型固床工係利用圓弧之特性將應力由兩側拱腳張力分擔，因此，拱型固床工拱腳與護岸界面之結構需要依圓拱之角度重新分析設計。

(三)河水溢流過拱型固床工之水壓力需要分段計算，避免傾倒或滑動等安定分析不足問題產生。

(四)當水深小於拱型固床工頂高時，水流會順著圓弧往兩側流動，拱腳與護岸界面在水流沖擊下需要加強保護，避免界面處被沖擊崩壞。

(五)依據水土保持手冊，設計之拱型固床工和直線型者一樣，可以達成調整河床坡度之目的。

(六)目前許多直線型固床工因為不同規劃設計原因而有基礎淘空現象，在未解決這些肇因之前，拱型固床工淘空之可能性會更大。

(七)營造生態棲地並非固床工規劃設計之目的，任何型式固床工都可以在其下游處營造深潭，適當之複式斷面設計亦可方便魚類溯游。

本研究整理前人之研究並分類為水流特性、影響因子、深度評估、設計參數及模式分析等五大類，茲分述如下：

第一節 水流特性

一、張則安(1994)

證實河床面若構築固床工可有效降低水流總剪力強度以減少泥砂起動，因固床工增加了河床糙度，減緩斷面平均流速。並發現在河床坡度較陡或河寬較狹窄之河道處，就整流工程效果而

言固床工所形成之連續式低壩群較單一防砂壩來得經濟有效。

二、陳聖文(2000)

透過水槽試驗結果，以跌水高 H 將沖刷坑長度 L 無因次化與跌水數 D 之關係，經迴歸得到無因次沖刷坑長度之經驗模式。

$$\frac{L}{H} = 2.99D^{0.442}e^{3.042S}$$

其中L 為沖刷坑長度，H 為跌水高度，D 為跌水數，S 為坡度，e 為自然對數。

三、林雲晃，黃宏斌(2002)

以不同固床工間距之設置情形，就臨界流量之試驗結果得知，有固床工之設置時泥砂需較大之水流強度才能起動，且固床工之間距愈短時，所需增加之水流強度愈大，證明固床工的確有減緩流速、穩定溪床之效能。

根據試驗結果發現固床工設置會增加渠床之阻力，且固床工之設置密度越高，其阻力係數越大。

試驗結果顯示固床工設置能夠降低河川輸砂量，且隨著固床工之設置密度越高，其輸砂量越少。當流量越大與坡度越陡時其降低輸砂量之效能越高，表示固床工具穩定河床、防止沖刷之功用。

四、郭昌樺(2002)

因固床工設置於河床底而增加底床的糙度，故當固床工間距越小，其加糙效應愈顯著，使泥砂流出量越低。

(一)藉由平均沖刷率與固床工數量之關係，可以看出固床工間距愈小，數量愈多，床面泥砂平均沖刷率越低的

總體趨勢，顯現河道全區保護段內均設置固床工有穩定河床之效果。

(二)由泥砂沖刷分配率可得知，固床工在保護河段內所發揮的作用是將由上游而來的沖刷能力往下游傳遞，以減少保護段內的沖刷量來達到保護的作用，而其對降低全河段之泥砂沖刷量的效用，並不如預期。

(三)帶工間距為渠寬的2~7倍時有激增的現象且接近巔峰值，似乎在 L=32cm 時接近最高值，故在本研究帶工間距中，L=32cm 可作為最適間距之考量。即是帶工間距為渠寬的 4 倍時,對保護段河床沖刷現象的轉移,以及讓水流功率消耗而達到抑制挾砂能力的作用，有最佳的效果。

五、何國勇(2007)

針對近直線弧形開口式固床工進行水工模型試驗,試驗結果得知：

(一)固床工開口數量的增加，得以分散水流對開口下游底床的衝擊，使淘刷坑範圍縮小，淘刷深度變淺，且由於水流的分散而使開口下游淘刷坑水流形成漩渦，以致流速減緩。

(二)床型高程歧異度為淘刷坑深度變化之指標，其值隨著固床工開口數量的增加、床質粒徑的粗化、渠道坡度的減緩及流量的降低而減少。

六、孫崇育(2015)

(一)不透水固床工基礎點沖刷與流量關係具有一個轉折點，原因與跌水衝擊底床的位置和能量有關，當衝擊底床的位置愈遠，對於基礎點受到影響的時間愈慢，而衝擊底床的能量愈小，對基礎點受到沖刷力度愈小。

(二)水流流經透水性固床工時會分成形成跌水之“溢頂流”，和從透水材料穿過後再從固床工下游立面邊緣流出之“穿透流”；穿透流分散原流量，進而減少了溢頂流之流量，使溢頂流之流量撞擊河床之能量小於不透水固床工之跌水能量。此外，穿透流也會讓溢頂流之跌水位置更往下游。

(三)透水性固床工之孔隙率愈大，減少溢頂流愈大，其溢頂流之流量會愈小，而穿透流之流量會愈大，使基礎點沖刷深度減緩。

(四)不同流量對相同孔隙率之透水性固床工之基礎點沖刷深度的相對大小為 1.6q>2q>1.3q。其原因在 1.6q 時，溢頂流和穿透流會合二為一，往更下游沖刷，所以只會有一個沖刷坑；而 2q 時因溢頂流跌水較遠，其衝擊到河床面往上游方向之水流會與穿透流相互消能，所以有兩個沖刷坑形成。

(五)本研究中透水性固床工孔隙率不同對於溢頂流減少之差異如下：孔隙率 0.27(K≈1.25 cm/s) 的溢頂流減少 7%、孔隙率 0.34(K≈10 cm/s) 的溢頂流減少 20%。

七、吳嘉俊(2016)

(一)透水式固床工改變了溢流水深及渠床淘刷的機制，使

淘刷規模得以減緩，但透水式固床工趾部的局部淘刷深度及其規模仍以渠槽坡降的影響最為明顯。當流量逐漸增加時，不同透水式固床工之間通透率的差異對於固床工趾部及渠床的局部淘刷的影響差異則逐漸縮減。

(二)水工試驗的結果顯示，高通透率的透水式固床工較適用於流量小、渠床坡度較緩的環境。當渠床坡度陡時，則較容易因為穿透射流作用，造成固床工趾部局部淘刷深度的發生位置較貼近於固床工，對固床工基礎造成隱憂，因此不建議用於渠床床質粒徑偏細、渠床坡降陡的溪床。

(三)低通透率的透水式固床工，雖然通透率僅 7%，但設置初期對於上游溪水的通透有優於傳統式固床工的現象，使得原本應該固床工頂部的溢流水深明顯下降，對於溢流水的投潭潛能降低有著正面的幫助。此外，格柵內因為填充塊石的緣故，增加了其對於通透水流的摩擦水頭損失，進而減緩了通透水流對於下游渠床床砂的淘刷作用。

(四)水工試驗結果顯示，低通透率的透水式固床工較適合應用於渠床坡度小於 6%的環境，其降低固床工趾部局部淘刷深度的效益可達傳統式固床工的 69%，亦可將最大淘刷深度發生位置推離固床工基礎，且亦具備降低溢流水深水頭落差的功能。

八、D’Agostino(1994)(歐)

當固床工下游產生局部淘刷現象時，於淘刷坑的下游會形成淤積砂丘。D'Agostino 將淤積砂丘分成兩類；即長砂丘和短砂丘。高泥砂產量之淘刷坑往往於其下游發展出長砂丘，由於高泥砂產量，使得長砂丘之長度往往朝下游方向延伸到下一個障礙物，即相鄰的固床工，導致所得到的砂丘外貌通常與固床工頂部齊平。長砂丘之發展，有助於降低回水效應(backwater effect)；另一方面，低泥砂產量的淘刷坑則產出短砂丘，而短砂丘的形成，可侷限回水效應的傳播。

九、Bennett et al.(2000)(歐)

研究指出，當水流通過固床工時，水流於投潭過程中會形成兩股方向相反的循環渦流；其中一股渦流朝下游方向觸及渠床，而另一股渦流朝上游方向溢流而出。朝向上游方向的渦流，其主要的作用在於侵蝕渠床床砂及抵抗投潭水流，使淘刷坑上游滑動面維持動態平衡(dynamic equilibrium)。另一方面，朝下游方向的渦流，其大部分能量消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂，同時保持淘刷坑下游滑動面的平衡。

十、Pagliara(2007)(美)

沖刷時間(t)與沖刷達平衡所需時間(t_c)之比值影響固床工局部沖刷行為。於清水沖刷，局部沖刷深度隨時間緩慢增加；至於濁水沖刷，達到平衡沖刷深度時間則較清水沖刷迅速。

十一、Farhoudi-Smith(1985)及 Oliveto 等(2008)(歐)

於試驗室溢洪道沖刷試驗中，相繼指出尾水深影響水躍發生之位置及結構物下游之最大沖刷深度。

十二、道上正規、鈴木幸一(1979)(日)

其對固定床面工程結構物之功能進行研究，將無任何構造物保護之河床與河床上構築固定床面等保護工程在沖刷後相比較，發現固床構造物上游側之河床刷深程度得到控制；但是固床結構物下游側之河床刷深程度卻因此變大。

從以上十二篇論文之試驗以及理論推導成果得知，構築固床工後，固床工上游側之河床沖刷可以得到控制，而且經常是淤積狀態；但是固床工下游側之河床刷深程度會因此變大。且隨著建構固床工之設置密度設越高，其輸砂量越少。當流量越大與坡度越陡時其降低輸砂量之效能越高。

而由於流經固床工水流於投潭過程中會形成兩股方向相反的循環渦流；朝上游的渦流會侵蝕渠床床砂，甚至淘空固床工底部。朝下游的渦流會攜帶淘刷坑中的泥砂形成長短不一的淤積砂丘，可以降低或侷限回水效應。

此外也可看到透水性固床工之成效，其降低固床工趾部局部淘刷深度的效益可達傳統式固床工的 69%，亦可將最大淘刷深度發生位置推離固床工基礎，且亦具備降低溢流水深水頭落差的功能。然而其適用範圍僅限於坡度 6 度以下之地型，因此較不適用於多數台灣之野溪以及河川。

第二節 影響因子

一、張則安(1994)

假設阻力係數為可加性，而將阻力係數劃分為二，一為溪床阻力係數、二為固床工群之阻力係數，探討阻力係數與固床工個數的關係，從中推導固床工間距之推估式如下：

$$\left(\frac{L}{L_0}\right)=10^{9.8}\left(\frac{h_e}{R}\right)^{-3.46}\left(\frac{\nu}{UR}\right)^{5.1}\left(\frac{gR}{U^2}\right)^{-3}\left(\frac{\tau_g}{\rho U^2}\right)^{-3.9}$$

式中，

L為固床工間距；L_0為試驗區總長；h_e為固床工有效高度；R為水力半徑；ν為運動黏滯係數；U為水流速度；g 為重力加速度；τ_g為固床工產生之形狀阻力；ρ為流體密度。

由於此公式中所假設之條件與現場實際狀況並不相符，造成理論間距有高估之情形，因此其適用之對象、適用之範圍有必要再予以檢討。

二、黃政達(1995)

利用動態平衡理論、室內動床試驗以及野外實地調查將資料予以修正，得到固床工間距與河道下游總輸砂率、含砂水流之流速、雷諾數及福祿數等泥砂水理參數間之關係，由此得知最佳固床工密度所造成之水理特性並推導出現場動床固床工間距之公式。

$$L=4.67d_{65}^{0.14}H_1^{-0.73}S^{-0.45}$$

式中，

L 為固床工間距(m)；d_{65}為河床質代表粒徑(m)；H_1為設計流動水深(m)；S 為原河床坡度(%)。

由上式得知當流動水深增加或河床坡度較陡時，固床工之間距應縮小。

三、游繁結(1995)

在滲流影響極小之情況下，以清水流對三組均勻砂及兩組非均勻砂進行水槽試驗。試驗結果認為D_{50}為一適宜之代表粒徑，且固床工間距之減少的確有降低水流剪力及減少淘刷量之功能。

四、吳尚訓(2000)

(一) 藉由分析泥砂臨界起動功率與固床工間距變化之關係，得知臨界起動功率將因為固床工間距減小而逐漸下降，如此將會減低固床工抑制沖刷以及穩定河床之功效。

(二)因為固床工在適當之間距下可以有效抑制河床泥砂的輸送，但若在粒徑大小不一、水流條件及固床工間距不適當之情況下，則會造成固床工之功效削減，更可能會造成河床下游沖刷加劇。所以由相對沖刷率得知，河道中保護段愈長則對於整個河床的穩定作用也就愈明顯。

(三)依照局部區域保護試驗和未設置固床工試驗所得之數據資料，再根據日本學者道上、鈴木之研究，而確切證明了固床工設置時對於上游河床面下降得到控制，但是對於下游一側的河床則產生劇烈沖刷。此外針對局部保護區域之下游沖刷進行觀測，發現隨著固床工間距的縮短對於下游河床沖刷有減緩之趨勢，此結果證明在局部地區構築固床工依然可對下游河床有一定之保護效果。

(四)試驗中採用臨界起動功率與水流功率之觀念，由已知固床工之設計間距推求平均沖刷率及其他相關因子之關係式。由試驗結果得知河床上泥砂平均沖刷率、水流功率、泥砂顆粒之臨界起動功率、固床工間距與鋪設坡度等參數相關，可表示如下：

$$S''_{ra} = S''_{rco} - 8 \times 10^{-5} \left(\frac{W - W_c}{W_c}\right)^{0.83} \left(\frac{L_0 - L}{L_0}\right)^{2.81} (S)^{1.23}$$

式中，

相關係數 r＝0.90；S''_{ra}為全區段設置固床工時之保護無因次沖刷率；S''_{rco}為半區段設置固床工保護時之無因次沖刷率；S 為河床坡度；W水流功率； W_c臨界起動功率；L為固床工間距；L_0為試驗區段總長度。

五、柴紡武(2001)

透過清水流之渠槽試驗，探討溪床上系列固床工設置前後之泥砂運移情形，以解析系列固床工抑制床面泥砂沖刷之效果。經研究結果指出，系列固床工可以有效抑制床面泥砂沖刷量，並隨著固床工間距縮小，相對平均沖刷率亦隨之減小，抑制泥砂沖刷效果越佳；同時，從全區試驗及半區試驗結果顯示，雖系列固床工可以減少泥砂的沖刷外移，但其所減少的土砂量，總會在其下游側無固床工保護的溪床上獲得補充。

六、黃彥文，黃宏斌(2003)

藉由渠槽試驗，利用兩種河床質，配合五種固床工間距，三種坡度，在每特定間距與坡度下再施以四種不同之試驗流量來做試驗。其研究成果如下：

(一)經試驗流量沖刷過後，固床工下游端均會沖出一個明顯之沖刷坑，但其大小不一。在同一間距與坡度下，沖刷坑會隨流量之增加而遞增，且沖刷深度最大之位置也隨之往下游移動。沖刷坑之深度亦會隨坡度增加而遞增，但其增加之趨勢並不因固床工間距不同而有其相關性；然而在間距較大者會產生深度較大之沖刷坑。

(二)由試驗結果所推求之臨界流量可看出，大多會隨著坡度的增加而明顯的減少，亦會伴隨著固床工間距的增加而明顯的減少，但是在部份數據上，卻無此性質，主要原因在於試驗組數太少，且在經由線性迴歸後所求的趨勢線，其斜率大小差異過大，使得試驗數據所推估出之臨界流量值呈現不規則的跳動。

(三)在同一間距下，輸砂量隨著流量的增加而逐漸增加，且增加的程度，也伴隨著坡度的不同而有所差異，在坡度較緩的情況下，其增加之程度較緩慢，在坡度較陡的情況下，其增加之程度較為劇烈。

(四)固床工在坡度較緩之情況下確實能有效保護河床避免淘刷，減低泥砂輸砂量，但在坡度較陡時，則需再加以討論，尤其是針對細顆粒而言。

七、Aderibigbe 等(1998)(歐)

於研究中發現福祿數與淘刷坑長度及深度之相關性，並提出中值粒徑大小為影響河床質發展及淘刷坑變化的因子，同時渠道傾斜程度及漸變水深變化亦是另一決定因子，尤其是漸變水深變化的程度直接影響了淘刷變化的過程，其原因是構造物設置後所產生水躍程度與類型之沖擊角度直接對淘刷坑深度產生作用。

八、Melville-Coleman(2000)(美)

底床特性影響因子包括底床質中值粒徑(D_{50})、幾何標準偏差(σ_g)、底床質密度(ρ_s)等。若已知底床質中值粒徑(D_{50})且溫度與顆粒變化不大時，即可由 Shields 臨界啟動曲線(Shields,1936)，推求其相對之臨界啟動剪力速度(critical shear velocity,u_{*_c})。

Melville-Coleman 重新迴歸臨界啟動試驗數據獲得下式：

$$u_{*_c} = 0.0115 + 0.0125{D_{50}}^{1.4} \qquad 0.1\text{mm} < D_{50} < 1\text{mm}$$

$$u_{*_c} = 0.0305{D_{50}}^{0.5} - 0.0065{D_{50}}^{-1} \quad 1\text{mm} < D_{50} < 100\text{mm}$$

可由水深(y)推求底床質臨界啟動速度，如下式：

$$\frac{V_c}{u_{*_c}} = 5.75\log(5.53\frac{y}{D_{50}})$$

其中，V_c為底床質臨界啟動速度，u_{*_c}與V_c之單位為 m/s。

從以上探討影響因子的論文可以看出，影響沖刷坑以及固床工間距設定包括河床質代表粒徑、為設計流動水深、河床坡度、無因次沖刷率、水流功率、臨界起動功率、試驗區段總長度、固床工高度、重力加速度，其中代表粒徑又以中值粒徑最為合適。

而當固床工之設置密度越高，其阻力係數越大，而且能夠降低輸砂量；在開口數量增加的設計下，可以使沖刷坑範圍縮小，沖刷深度變淺。在低流量狀況時，固床工高度越高，沖刷坑越深；當水深到達某一高度時，固床工的功能會歸於 0。而高透水率固床工較適用於流量小、河床坡度較緩的野溪。當渠床坡度陡時，則較容易造成固床工底部淘空之情形。

第三節 深度評估

一、黃宏斌(2016)

綜合前人公式與本研究之沖刷坑深度無因次模式(如圖 2-1)得下述公式：

$$\frac{\mathrm{h}_s}{H} = 1.301\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)^{0.4004}\left(\frac{d}{H}\right)^{-0.5019}$$

式中：

h_s 為沖刷坑深度(m)；H 為壩高(m)；q 為單寬流量(cms/m)；d 為渠床粒徑(m)；g 為重力加速度(m/s^2)。

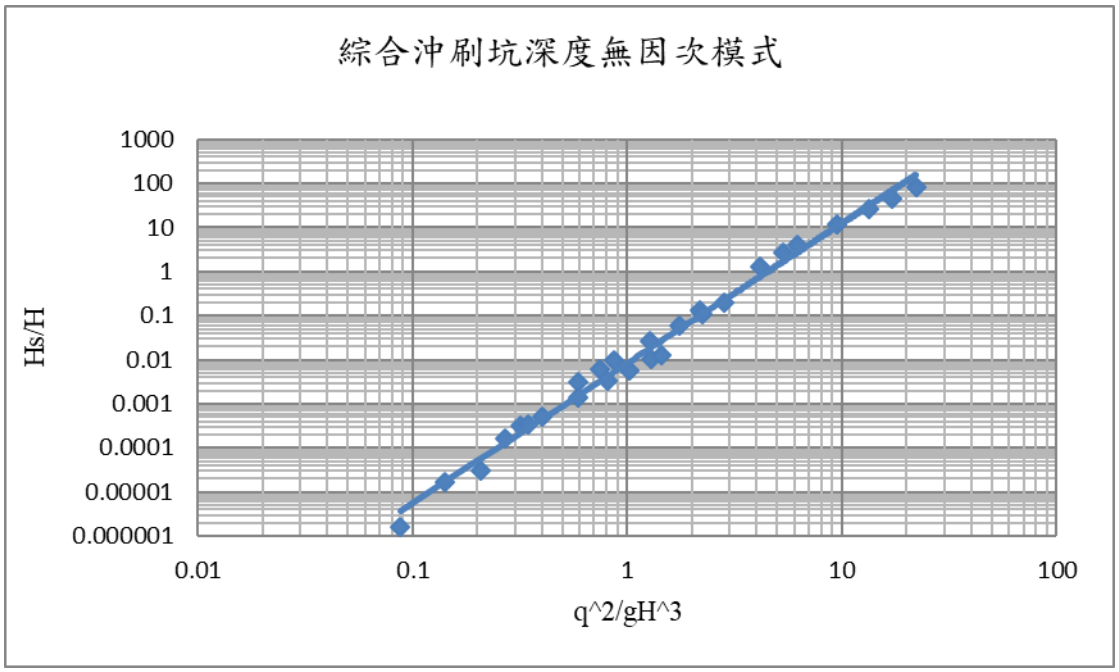


圖 2-1 綜合沖刷坑深度無因次模式圖

資料來源：黃宏斌，2016，105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討

二、Dietz(1972)(歐)

提出以淘刷坑斷面流速描述淘刷坑之平衡深度：

$$\frac{y_m}{y_{m,e}} = \frac{\omega(U_0 - U_C)}{U_C}$$

式中，

y_m為最大淘刷深度(m)；$y_{m,e}$為平均淘刷深度(m)；U_C：臨界流流速(m/s)；U_0：斷面平均流速(m/s)、$U_0 = Q/A$，Q 為固定流量(m^3/s)、A 為通水斷面(m^2)；ω=1+3γ_0，γ_0：紊流強度係數。

但Dietz 所提出的公式中僅探討淘刷坑的平衡淘刷深度，並

未將構造物間距、溪床床質與溪床坡降等因子納入考量，因此其實用性還需依不同之區域進行調整。

三、Gaudio et.al(2000)(美)

以清水流方式進行水工模型試驗，探討固床工下游淘刷坑形成之機制，在連續兩固床工間距不影響其間淘刷坑發展之前提下，認為固床工下游淘刷坑所產生之最大淘刷深度(y_s)與下列參數有關：

$$y_s = f(g, \nu, \rho_s, \rho_w, q, y_n, D, a_1)$$

式中：

g 為重力加速度(m/s2)；ν 為水之黏滯度(m2/s)；ρ_s為床質粒徑密度(kg/m^3)；ρ_w為水之密度(kg/m^3)；q 為單寬流量(m2/s)；y_n為正交水深(m)；D 為床質代表粒徑(m)；a_1為型態水躍(morphological jump) $= (S_0 - S_{eq})$L。

同時，Gaudio et.al 利用固床工下游淘刷坑的量測結果，應用 Buckingham π 理論，以臨界比能H_s代替均勻流之正交水深y_n，同時，選擇重力加速度 g、水之密度ρ_w及單寬流量 q 之變化，作為基本的變量指標，得到以下公式：

$$\frac{y_s}{H_s} = \emptyset\left[\frac{q}{\nu}, \Delta, \frac{a_1}{\Delta D}, \frac{a_1}{H_s}\right]$$

若忽略紊流流速的影響並假設床質密度為常數，則上式簡化為：

$$\frac{y_s}{H_s} = \emptyset\left[\frac{a_1}{H_s}, \frac{a_1}{\Delta D}\right]$$

式子中$\frac{a_1}{H_s}$可表達因固床工設置產生不同型態水躍能量間的損失比例，而$\frac{a_1}{\Delta D}$則呈現型態水躍與床質代表粒徑(D)之關係，Δ為

床質之比密度($\Delta = \rho_s/\rho_w$)。據此，推估出固床工下游淘刷深度及淘刷坑長度之無因次公式：

$$\frac{y_s}{H_s} = 0.18\frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 0.369$$

$$\frac{l_s}{H_s} = 1.87\frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 4.02$$

四、Wu et al.(2002)(美)

將吳嘉俊(2000)之研究資料進行彙整分析，獲得帶工下游淘刷坑之幾何形狀公式如下，而淘刷坑幾何形狀(Y)與相關水理參數(II)之關係圖如圖 2-5 所示。

$$Y = \left(\frac{d_{sc}}{L_{sc}}\right) = f(\mathit{II}) = 2.7046\left(\frac{1}{(S_g - 1)D_{50}SL_I}\sqrt[3]{\frac{q^4}{g^2}}\right)^{-0.3384}$$

其中，d_{sc}=帶工下游溪床最大淘刷深度(m)、L_{sc}=帶工構造物下游面至下游淘刷坑最大淘刷深度的水平距離(m)、q=整治段之單寬流量(cms/m)、S_g=溪床床質比密度、g=重力加速度、S=溪床水力坡降、D_{50}=溪床床質中值粒徑(m)。

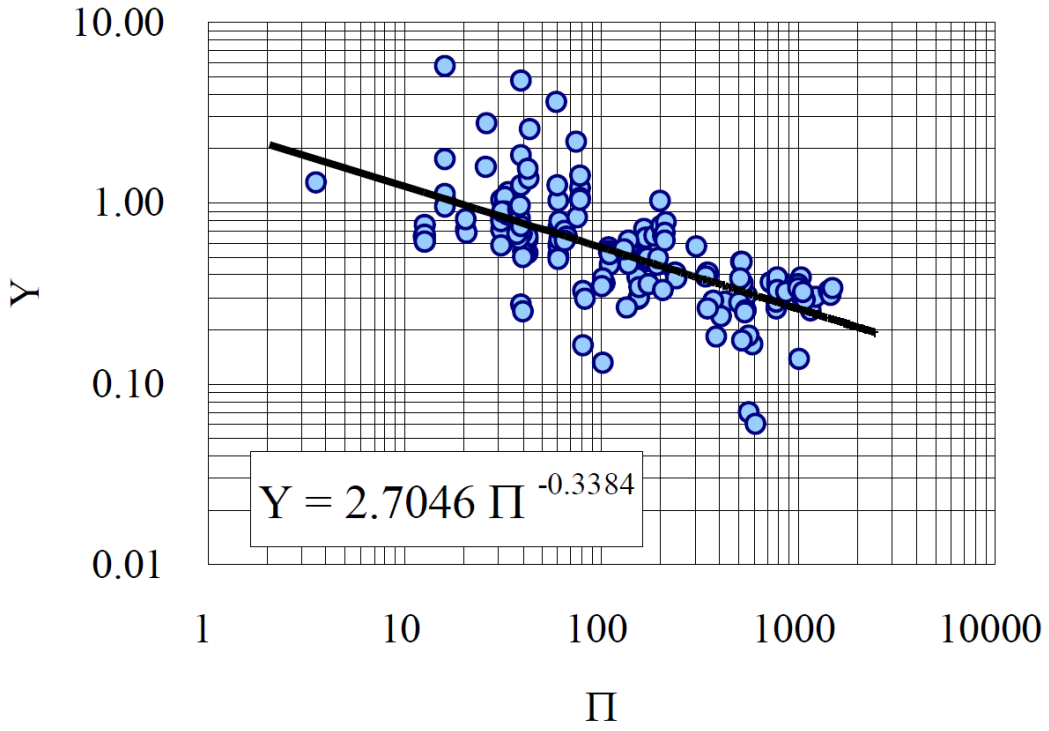


圖 2-2 帶工下游淘刷坑幾何形狀與水理參數關係(摘自 Wu et al.，2002)

資料來源：Wu C.-C., C.-H. Hou, C.N. Chen, and C.-Y. Shih (2002) Determination of groundsills interval for stream training, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. 4(6)

第四節 設計參數

一、游繁結、黃政達(1996)

以長 300cm，寬 21cm，高 25cm 之矩形斷面渠槽進行試驗，試驗流量為 40、60、80 及 100(1/min)，試驗坡度為 5%及 10%，試材均勻砂之粒徑分別為 1.5、3、5mm，混合砂之中值粒徑為 2.3 及 4.1mm。經由 320 組之試驗數據求出固床工之推估式如下：

$$\frac{H}{L} = 0.042\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{-0.1994}\left(\frac{u}{\sqrt{gh}}\right)^{-0.3846} S^{0.4818}$$

式中：H 為固床工有效高度(m)；L 為固床工間距(m)；D_{50}為

中值粒徑(m)；h 為水深(m)；u 為平均流速(m/s)；g為重力加速度(m/s^2)；S 為水力坡降。

二、連惠邦(2001)

採三種混合砂樣從事渠槽試驗，試驗所使用之循環渠槽長5.76m，寬 0.08m，深 0.25m，渠槽升降最大坡度為 30 度，固床工間距分別為 20、40、80 及 160cm，渠槽坡度為 2、3、4 度，水流流量為 0.5403、0.2897 及 0.0892(1/s)。其試驗結果得到下列公式：

$$\frac{S_r}{\sqrt{gh}} = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{W - W_c}{W_c}\right)^{0.86} \left(\frac{L}{L_0}\right)^{0.37} S^{1.28}$$

式中，

S_r為設置固床工後之平均沖刷率；W 為水流功率；W_c為臨界水流功率；L_0為河段長度；L 為固床工間距；S 為坡降。

三、林雲晄，黃宏斌(2002)

利用試驗之資料與其相關之因子進行迴歸分析，結果固床工設置後渠槽之阻力係數可表示成：

$$f = 8.272 \times 10^{-5} \times \left(\frac{q_s}{q - q_c}\right)^{-0.00753} \times \left(\frac{B}{L}\right)^{-0.00318} \times \left(\frac{h}{D_s}\right)^{0.0302} \times \left(\frac{B}{h}\right)^{0.715} \times (S)^{2.03} \times \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}}\right)^{-1.97}$$

式中，

f：Darcy-Weisbach 阻力係數；q_s：單寬輸砂量(cms/m)；q：單寬流量(cms/m)；q_c：單寬臨界流量(cms/m)；B：渠槽寬度(m)；L：固床工間距(m)；h：水深(m)；D_s：泥砂粒徑(m)；S：坡度(%)；

g：重力加速度(m/s²)

利用此式可推得固床工設置後所增加之阻力$\tau_{固}$為：

$$\tau_{固}=\frac{f}{8}\rho v^2=\frac{\rho v^2}{8}8.272\times10^{-5}\times(\frac{q_s}{q-q_c})^{-0.00753}\times(\frac{B}{L})^{-0.00318}$$
$$\times(\frac{h}{D_s})^{0.0302}\times(\frac{B}{h})^{0.715}\times(S)^{2.03}\times(\frac{q}{\sqrt{gh^3}})^{-1.97}$$

由上式可知其阻力會隨著單寬輸砂量、坡度以及重力加速度增加而增加，其中又受坡度影響最為劇烈。

四、黃彥文，黃宏斌(2003)

藉由渠槽試驗，利用兩種河床質，配合五種固床工間距，三種坡度，在每特定間距與坡度下再施以四種不同之試驗流量來做試驗。其試驗結果顯示，固床工的設置的確能穩定河床並減少河川輸砂量的產生，最後藉由 120 組輸砂試驗結果進行迴歸分析，分別求得臨界流量模式及輸砂量模式：

(一)臨界流量模式

$$q_c=0.01689\times10^{-6}\left(\frac{L}{B}\right)^{-0.4590}(D_g)^{3.1429}(S)^{-1.4771}$$
$$D_g=D/[v^2/(\rho_s/(\rho-1))g]^{1/3}$$

相關係數R^2=0.49127

(二)輸砂量模式

$$\frac{q_s}{q-q_c}=0.0786\left(\frac{L}{B}\right)^{0.8115}\left(\frac{h}{D}\right)^{1.3503}(D_g)^{-0.0729}(S)^{2.5320}$$

相關係數R^2=0.82367

式中：

q_c：單位河寬之河床載起動流量(m³/s/m)；q：單位河寬流量

($m^3/s/m$)；q_s：單位河寬之河床載運移量($m^3/s/m$)；L：固床工間距(m)；B：河道寬度(m)；D_g：河床質之無因次粒徑；D：河床質之代表粒徑(m)；S：河床坡度；ν：動力黏滯係數(m^2/s)；ρ_s：河床質密度(kg/m^3)；ρ：流體密度(kg/m^3)；g：重力加速度(m/s^2)；h：斷面水深(m)。

五、水土保持手冊(2005)

早期固床工間距之決定，是以累積之經驗為設計之依據，常使用之公式如下：

$$L = \frac{100}{S - S_P} h_e$$

式中，

L為固床工間距(m)；S_P為計畫河床之坡度(%)；S為原河床坡度(%)；h_e為固床工之有效高度。

上式於緩坡時利用幾何分析所推導之公式，工程人員須按其經驗決定計畫河床坡度及固床工之有效高度，而依臺灣工程施工設計標準，一般以 3%作為計畫河床坡度。

六、池谷浩(1977)(日)

由河床安定坡降探討固床工間距 L，根據野外量測資料提出固床工間距與計畫坡度之關係為：

$$L = \frac{(1\sim2)}{S_P} \quad , \left(\frac{1}{30} > S_P > \frac{1}{60}\right)$$

$$L = \frac{(1\sim1.5)}{S_P} \quad , \left(\frac{1}{60} > S_P\right)$$

式中，

L為固床工間距；S_p為計畫河床坡降

七、泉岩男(1984)(日)

為了有效穩定河床，利用不同間距、高度、流量及河床粒徑級配等，來探討固床工效果，由試驗得知河床泥砂輸出量隨固床工高度及數量而遞減，並由試驗中得到試驗區間內固床工之防治效率E_n為：

$$E_n = \frac{q_0 - q_n}{q_0} = 1 - e^{-0.60[1+0.2029(n-1)]\frac{H}{h_0}}$$

式中，

q_0為未設置固床工時之下游沖刷量(kg)；q_n為設置 n 座固床工時之下游沖刷量(kg)；H 為固床工下游最大沖刷深度(cm)；h_0為最大洪水波高(cm)；n 為固床工的支數。

八、木村喜代治等(1990)(日)

針對野外蜿蜒溪流之水理特性進行矩形河道之理論推得固床工間距公式：

$$\frac{L}{B} = (\emptyset \cdot \pi)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{-\frac{1}{3}}$$

式中，

L為固床工間距(m)；$\emptyset = \frac{U}{U_*}$為流速係數，$U_*$為摩擦速度(m/s)；$B$為河道寬度(m)；$h$為斷面水深(m)。

由以上相關文獻可以看到對於固床工之計算式多為經由回歸或是經驗式得到，然其不同之計算式均有不同之設定條件，因此於參考或採用公式時需注意其設定條件與自身設定之合適性以及相符性，且也能看到影響最劇為河床本身之坡度，然改變其坡度也連帶改變其流速，勢必會影響其水流生態，也導致部分水滲流之情形。

第五節 分析模式

一、王傳益等人(2004)

藉由 SMS 模式，針對不同水力條件下之固床工形式與設置間距進行模擬，並以 RMA2 模式模擬流場情況，其結果顯示鋸齒式固床工較傳統式固床工之消能與整流效果為佳。

二、李豐佐等人(2017)

運用無人飛行載具(UAV)於中沙大橋下游固床工拍攝之影像，提供固床工變動及周圍流場分析使用，經研究結果顯示固床工辨識軟體應用於現地，輔以人工辨識後能成功計算固床工各別面積及比較面積差異，以及固床工中心位移量。且所提出之大尺度粒子影像分析法亦已證實能應用於現地固床工周圍流場分析，然分析流速時則需要佈設地面控制點，將影像進行校正後才能進行流速分析。

由於無人飛行載具以及電腦數值模擬軟體之進步，透過模擬能大幅降低實際實驗所需之時間以及經費，且可以依模擬情況隨時調整參數，並能有一定之準確度。

三、楊廣培(2015)

透過 COMSOL Multiphysics 軟體進行河道水理條件以及卵礫石在水流中運動之數值模擬。可預測固床工受河床卵石撞擊機率較高之區域，補強混凝土抗衝擊強度，改變固床工之幾何布置。

四、張程凱(2016)

運用三維模擬軟體 Fluent 針對固床工下游側平衡前後沖刷

坑，進行流場數值模擬，分析項目包刮平均速度剖面、紊流強度以及雷諾應力。經過模擬得出水躍以及平均流速剖面均與實測資料相當一致，以及得到紊流強度與流量呈正相關。

本團隊統整上述各文獻並整理主要參考文獻如表 2-1 所示。

表 2-1 主要參考文獻統整表

類別	作者	結論
水流特性	林雲晃，黃宏斌(2002)	固床工設置會增加渠床之阻力，且能夠降低河川輸砂量，且隨著固床工之設置密度越高，其輸砂量越少。當流量越大與坡度越陡時其降低輸砂量之效能越高。
	郭昌樺(2002)	由泥砂沖刷分配率可得知，固床工在保護河段內所發揮的作用是將由上游而來的沖刷能力往下游傳遞，以減少保護段內的沖刷量來達到保護的作用，而其對降低全河段之泥砂沖刷量的效用，並不如預期。
	道上正規、鈴木幸一(1979)	對固定床面工程結構物之功能進行研究，將無任何構造物保護之河床與河床上構築固定床面等保護工程在沖刷後相比較，發現固床構造物上游側之河床刷深程度得到控制；但是固床結構物下游側之河床刷深程度卻因此變大。
沖刷類型	盧昭堯等(2012)	將固床工下游沖刷分為三個階段，分別為初始沖刷(initial)、發展沖刷(developing)和平衡沖刷(equilibrium)，而平衡階段已包含 Zanke (1978)中的穩定階段(stabilization)及平衡階段(equilibrium)。
影響因子	柴鈁武(2001)	系列固床工可以有效抑制床面泥砂沖刷量，並隨著固床

		工間距縮小，相對平均沖刷率亦隨之減小，抑制泥砂沖刷效果越佳。雖系列固床工可以減少泥砂的沖刷外移，但其所減少的土砂量，總會在其下游側無固床工保護的溪床上獲得補充。
	黃彥文，黃宏斌(2003)	在同一間距與坡度下，沖刷坑會隨流量之增加而遞增，且沖刷深度最大之位置也隨之往下游移動。沖刷坑之深度亦會隨坡度增加而遞增，但其增加之趨勢並不因固床工間距不同而有其相關性。 在同一間距下，輸砂量隨著流量的增加而逐漸增加，且增加的程度，也伴隨著坡度的不同而有所差異，在坡度較緩的情況下，其增加之程度較緩慢，在坡度較陡的情況下，其增加之程度較為劇烈。
深度評估	黃宏斌(2016)	沖刷坑深度無因次模式： $$\frac{h_s}{H}=1.301\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)^{0.4004}\left(\frac{d}{H}\right)^{-0.5019}$$ h_s 為沖刷坑深度(m)；H 為壩高(m)；q 為單寬流量(cms/m)；d 為渠床粒徑(m)；g 為重力加速度(m/s^2)。
設計參數	游繁結、黃政達(1996)	固床工之推估式： $$\frac{H}{L}=0.042\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{-0.1994}\left(\frac{u}{\sqrt{gh}}\right)^{-0.3846}S^{0.4818}$$ H 為固床工有效高度(m)；L 為固床工間距(m)；D_{50}為中值粒徑(m)；h 為水深(m)；u 為平均流速(m/s)；g為重力加速度(m/s^2)；S 為水力坡降。
分析模式	李豐佐等人(2017)	運用無人飛行載具(UAV)於中沙大橋下游固床工拍攝之

		影像，提供固床工變動及周圍流場分析使用，經研究結果顯示固床工辨識軟體應用於現地，輔以人工辨識後能成功計算固床工各別面積及比較面積差異，以及固床工中心位移量。

由以上文獻可得知較適合台灣野溪的固床工型式為固床工高度以接近平衡狀態的河床底部為原則。其中流量小、河床坡度緩的野溪適合採用高透水性的固床工，而流量大、河床坡度陡的野溪適合採用連續傳統式固床工。為了營造生態環境，上拱式固床工是較為合適的選擇，但是要注意固床工高度盡量和平衡狀態的河床底部齊平為原則。下拱式固床工適合分散水流，但是要注意固床工下游的投潭水流不要直接衝擊兩側的護岸，否則在其速度較快的情況下接受持續衝擊可能導致掏空之情形。

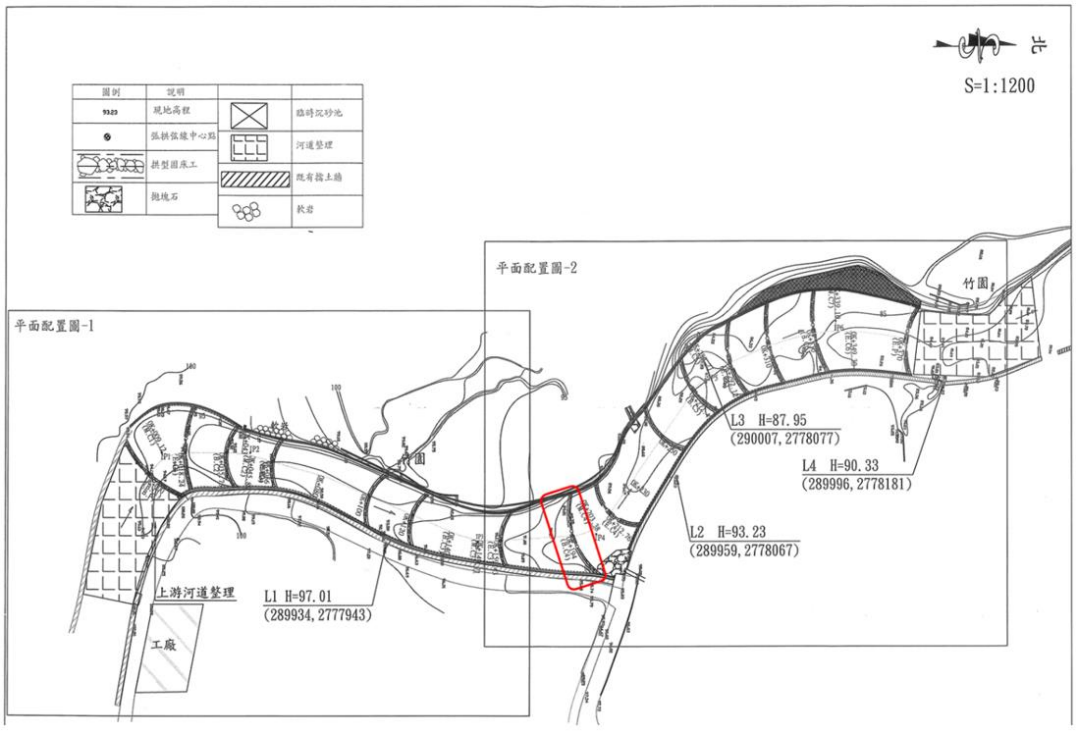
第三章 蒐集現地系列固床工布置資料

本團隊蒐集已構築之拱型固床工現地布置資料，包括設計圖，上下游邊界流速，土壤性質等，以建置適當之數值模擬模型，使模擬能有更佳準確的結果。此次計畫收集新北市八里區水仙溪之工程布置資料，並以此進行數值模擬。

水仙溪之詳細工程布置資料如下。

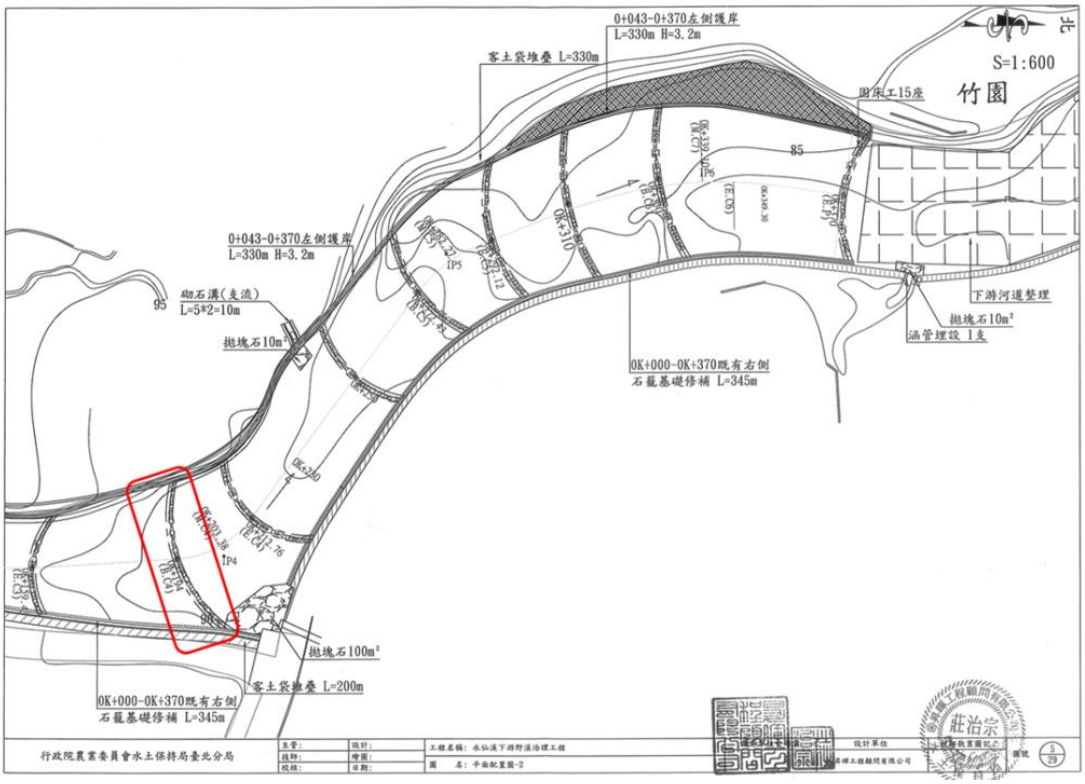
第一節 工程配置

水保局臺北分局於 2016 年時，藉由 15 座的系列拱型固床工，將水仙溪下游整治完成，而本團隊所參考之試驗對象，為位於水仙溪 0k+194 處之上拱型且具低水河槽的固床工(紅色方框處)，其工程配置圖如圖 3-1、圖 3-2，橫斷面圖如圖 3-3。



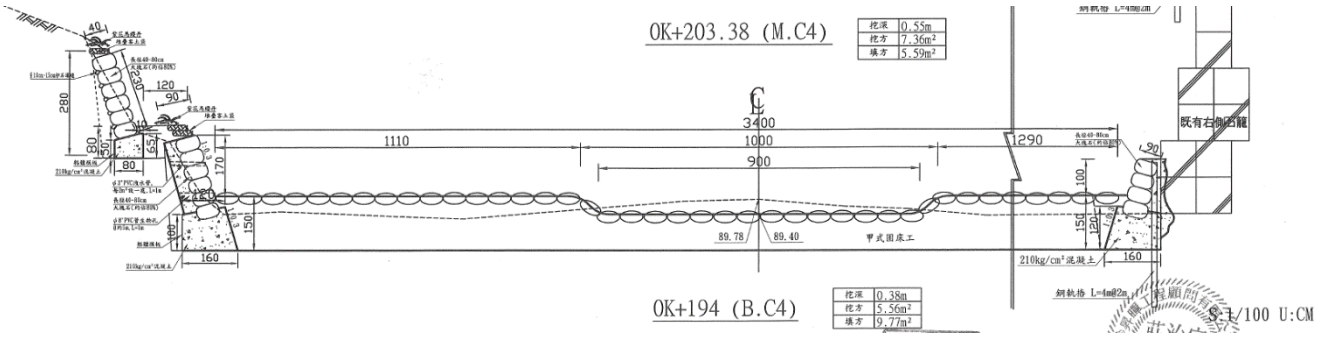
資料來源：水仙溪下游野溪治理工程-圖檔，2015

圖 3-1 水仙溪下游野溪治理工程之整體配置圖(1)



資料來源：水仙溪下游野溪治理工程-圖檔，2015

圖 3-2 水仙溪下游野溪治理工程之整體配置圖(2)



資料來源：水仙溪下游野溪治理工程-圖檔，2015

圖 3-3 水仙溪下游 0k+194 處之固床工橫斷面圖

第二節 水理演算

水仙溪主流及其支流採用三角形單位歷線法配合 Horner 雨型所推估之洪峰流量，如表 3-1。其中，0k+194 之上拱型固床工位於水仙溪與長道坑溪匯流處前。

表 3-1 水仙溪主流及支流建議採用之洪峰流量值

控制點			流域面積 (km^2)	重現期(年)					
				2	5	10	25	50	100
主流	1	水仙溪分界點前	2.88	19	41	56	75	89	105
				6.6	14.24	19.44	26.04	30.9	36.46
	2	水仙溪與長道坑溪匯流前	4.89	26	58	80	108	128	150
				5.32	11.86	16.36	22.09	26.18	30.67
	3	水仙溪與楓林坑溪匯流前	8.52	36	82	114	156	187	219
				4.23	9.62	13.38	18.31	21.95	25.7
	4	水仙溪與菴阡坑溪匯流前	12.05	47	107	149	203	243	284
				3.9	8.88	12.37	16.85	20.17	23.57
	5	水仙溪河口	15.48	58	132	184	251	302	353
				3.75	8.53	11.89	16.21	19.51	22.8
支流	2.1	長道坑溪與水仙溪匯流前	1.07	7	16	21	28	33	39
				6.54	14.95	19.63	26.17	30.84	36.45
	3.1	楓林坑溪與水仙溪匯流前	1.91	15	34	47	62	75	87
				7.85	17.8	24.61	32.46	39.27	45.55
	4.1	菴阡坑溪與水仙溪匯流前	2.92	24	54	74	100	119	139
				8.22	18.49	25.34	34.25	40.75	47.6

資料來源：縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，2011

註：1. 灰底為單位面積流量。

2.流量單位：cms：單位面積流量單位：cms/km^2。

3.採用方法：三角形單位歷線配合 Horner 雨型。

此外，再以不同重現期洪峰流量輸入 CWSE 程式演算，推求各重現期之水理因素，輸入參數如下：

(一)曼寧係數

1. Lane's 公式：$n = 0.015 d_{75}^{1/6}$

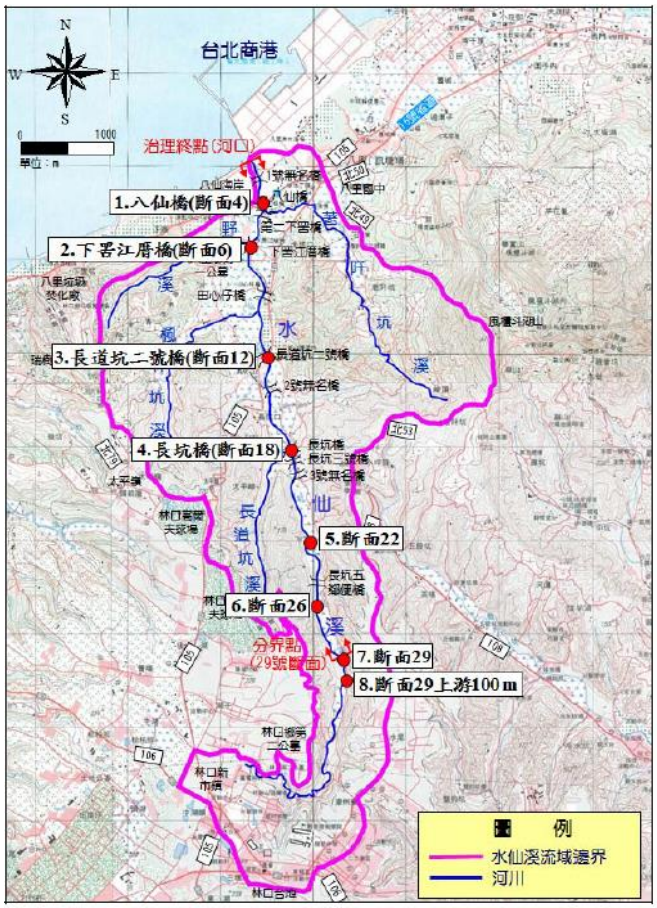
2. 理論公式：$R^{\frac{1}{6}}/(\sqrt{g} \times V/V^*)$

式中，n=粗糙係數，R=水力半徑(m)，$V^* = \sqrt{gRS}$(摩擦速度)，V=平均流速(m/sec)，g=重力加速度(m/s^2)，S=能量坡降。

依上述二式計算成果並考慮實際河相決定採用之粗糙係數，推估 0k+194 處之 n 值為 0.035。並以淡海站最大暴潮位 E.L.+2.7m 為起算水位。

第三節 河床質分析

本團隊參考縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告(2011)，其 8 個採樣位置如圖 3-4 所示，而 0K+194 之固床工恰位於圖中 5 號採樣孔，故依據規劃報告成果，顯示 5 號孔的平均粒徑為 126.62mm，屬小卵石，中值粒徑為 100.01mm，砂質含量為 11.52%，該孔號之粒徑分析表詳表 3-2。



資料來源：縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，2011

圖 3-4 水仙溪河床質採樣位置

表 3-2 孔號 5(斷面 22)之河床質代表粒徑分析成果

斷面號	孔號	平均粒徑 (mm)	代表粒徑(mm)									最大石徑 (mm)	砂質含量 (%)
			d10	d20	d30	d35	d40	d50	d65	d75	d90		
22	5	126.62	1.34	18.56	40	54.71	71.31	100.01	161.32	224.77	293.1	400	11.52

資料來源：縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，2011

第四章 數值模擬力學性質

第一節 ABAQUS

經參考相關結構分析文獻，如翡翠大壩壩體長期變形趨勢研究(許玓君，2018)，多有使用 Abaqus 此套數值模擬軟體進行研究，因此本計畫使用 Abaqus 有限元素分析軟體建立固床工結構模型並進行分析，Abaqus 是一套功能強大的工程模擬的有限元軟件，提供高精度、可靠、高效的解決方案，可應用在水利、地質、勘查、測繪、環境、等多重領域，其解決問題的範圍從相對簡單的線性分析到許多複雜的非線性問題。能解決大型結構（應力／位移）問題，土壤力學分析（流體滲透／應力耦合分析）及流體力學分析等。

Abaqus 與本團隊較相關之功能明列如下：

(一)水下衝擊分析：對沖擊載荷作用下的水下結構進行分析

(二)耦合分析：流/力耦合

(三)靜態應力/位移分析：包括線性，材料和幾何非線性，以及結構斷裂分析等

(四)非線性動態應力/位移分析:可以模擬各種隨時間變化的大位移、接觸分析等

固床工為河溪整治常見之工法，然若在水流衝擊力量較大的情況下有毀損之可能，本研究透過數值模擬以較經濟且快速的方法初步評估幾何形狀不同對於固床工之影響，並歸納一較穩定之形狀以及水深拱度彼此間的關係。

一、ABAQUS 之數值求解方法

在處理非線性問題時,最後結果是否收斂或收斂結果是否合理是其分析重點。ABAQUS 程式於非線性分析中使用牛頓-瑞福生收斂法。此為二階收斂法，其中 P 為外力，I_a 為內力，收斂之殘餘力為 R_a，收斂勁度矩陣為 K_a ，其關係式如下：

$R_a=P-I_a$

利用此收斂法，會使殘餘力迅速減少以達到靜力平衡，最後變位是由每一循環增加之力量 dP 所造成之微小變位累積而成 $C_1+C_2+C_3+\ldots$

每一次疊加過程包含：組成剛性矩陣 K_i、得出變位 C_i 、計算在變位 C_i 時之內力向量 $I(u_i)$、得出殘餘力為 $R_a=P-I_a$。

並重複上述過程，最後判斷是否收斂其條件如下：

(一)是否在容許範圍內

(二)$C_i \langle\langle \sum_{j=1}^{\#iter} Cj$

需同時滿足上述兩條件才算收斂。

另針對其塑性降伏準則此次研究使用 Modified Drucker-Prager/Cap model 降伏準則，其具有下列特性:

1.其可模擬大地材料中受壓力作用而降伏的凝聚性質材料，如岩石與土壤等。

2.可用於模擬材料受剪力及壓力作用下的長期非彈性力學行為，如潛變等。

3.與 CAP 降伏區結合，可控制材料在剪力作用下的體積剪膨脹性，及表現材料於壓實過程中硬化狀態下的非彈性力學

行為。

4.剪力破壞區與 CAP 降伏區提供了合理的較大變形行為。

二、模擬參數設定

本團隊利用 ABAQUS，針對現地已構築上拱型、下拱型之固床工進行結構分析。材料參數參考混凝土壩之參數，渠道設定依照現地情形設定，設定如下：密度為 2400kg/m^3，彈性模數為 23GPa，蒲松比為 0.17，曼寧 n 值為 0.035，能量坡降為 0.027，河道寬度為 34m，流量為 50 年回歸週期下之流量，為 73.59cms，並透過計算可得固床工上水深為 0.556m。

水流方向均假設+Y 方向為水流方向，並以徑向座標求解，假設力分布均為為垂直於固床工上游面表面。

水流力量計算公式如下所示：

靜水壓力: $P=\frac{1}{2}\gamma_w C_d(2h+H)(N/m^2)$

$$C_d = H\sqrt{1+m^2}$$

作用點: $h_c = \frac{H}{3} \cdot \frac{H+3h}{H+2h}$

動水壓力: $F=2\rho QV=2\rho V^2 HL(N) or 2\rho V^2(N/m^2)$

式中，P：靜水壓；

γ_w：水流比重；

C_d：係數；h：溢流水深；

H：固床工高度；

m：固床工上游面坡度(1：M)；

h_c：靜水壓力作用點；

F：動水壓力；

ρ：水流密度；

V：水流速度；

L：固床工長度。

在 50 年回歸週期下，流量為 73.59cms，而透過上述之公式可以估計出作用在固床工上的力，動水壓力約為 1,090,676(N)，作用在固床工上游面上之靜水壓力約為 653,412 (N)，加總為 1,744,088(N)。

此次模擬以計算出之數值及邊界條件輸入，可以得到固床工之應力、力矩以及位移的分佈情況，以下分述分項模擬情形。

三、現地上拱型固床工模擬結果

此部分之模擬將依據現地固床工之實際大小以及上述所計算之力進行上拱型固床工模擬，並分別呈現假設固床工兩側翼均固定下，底部為固定邊界以及不固定底部共兩種結果，以代表在地基穩固以及地基被淘刷下之情形。

(一)應力:

從圖 4-1、4-2 可以看出在固定底部之情況下，受力最大為上游面全段底部，約為 250(kN)，而在無固定底部之情形下，受力最大為上游面兩側，約為 1,400(kN)。

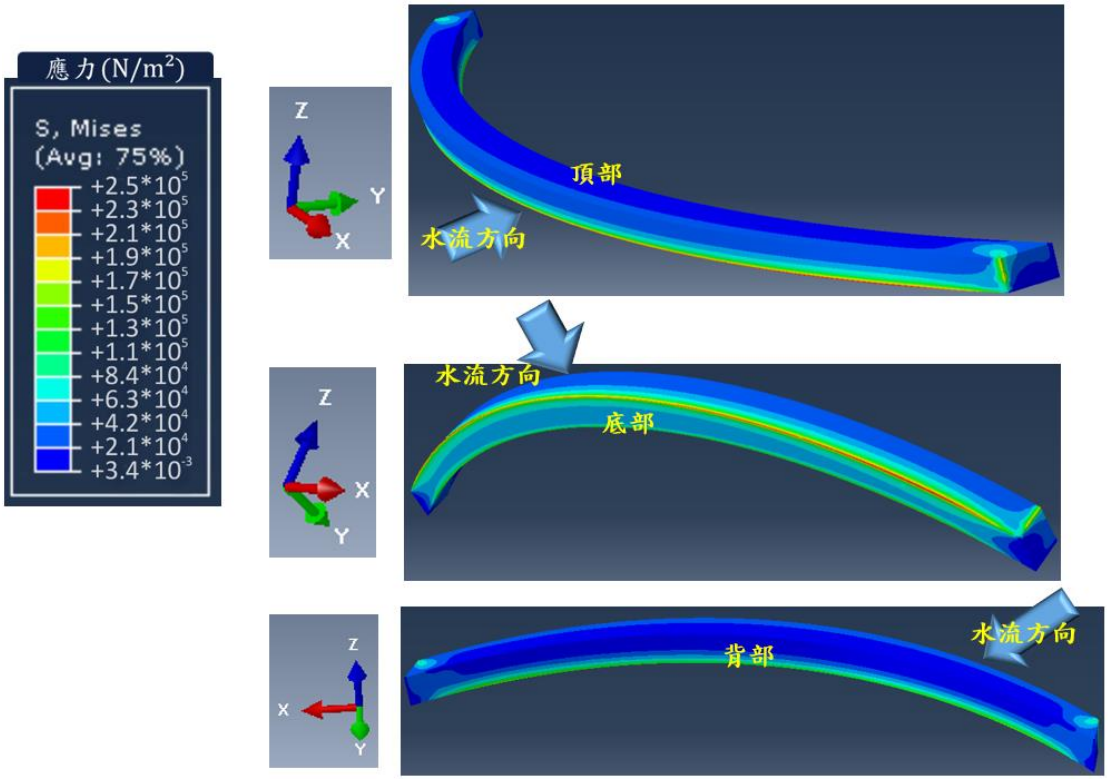


圖 4-1 上拱型固床工固定底部之應力分布情形

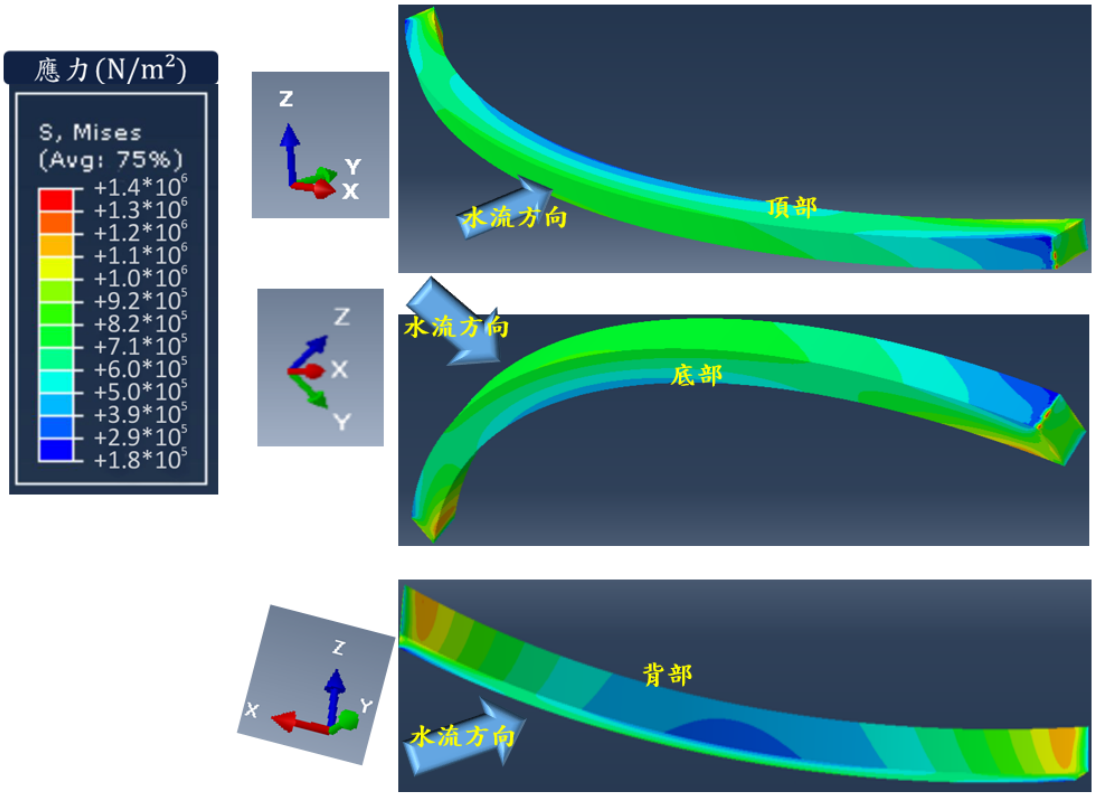


圖 4-2 上拱型固床工無固定底部之應力分布情形

(二)力矩:

從圖 4-3、4-4 可以看出在固定底部之情況下，力矩最大為上游面全段底部，約為 1,400(N·m)，而在無固定底部之情形下，力矩最大為固床工下游面底部兩側，約為 8,300(N·m)。

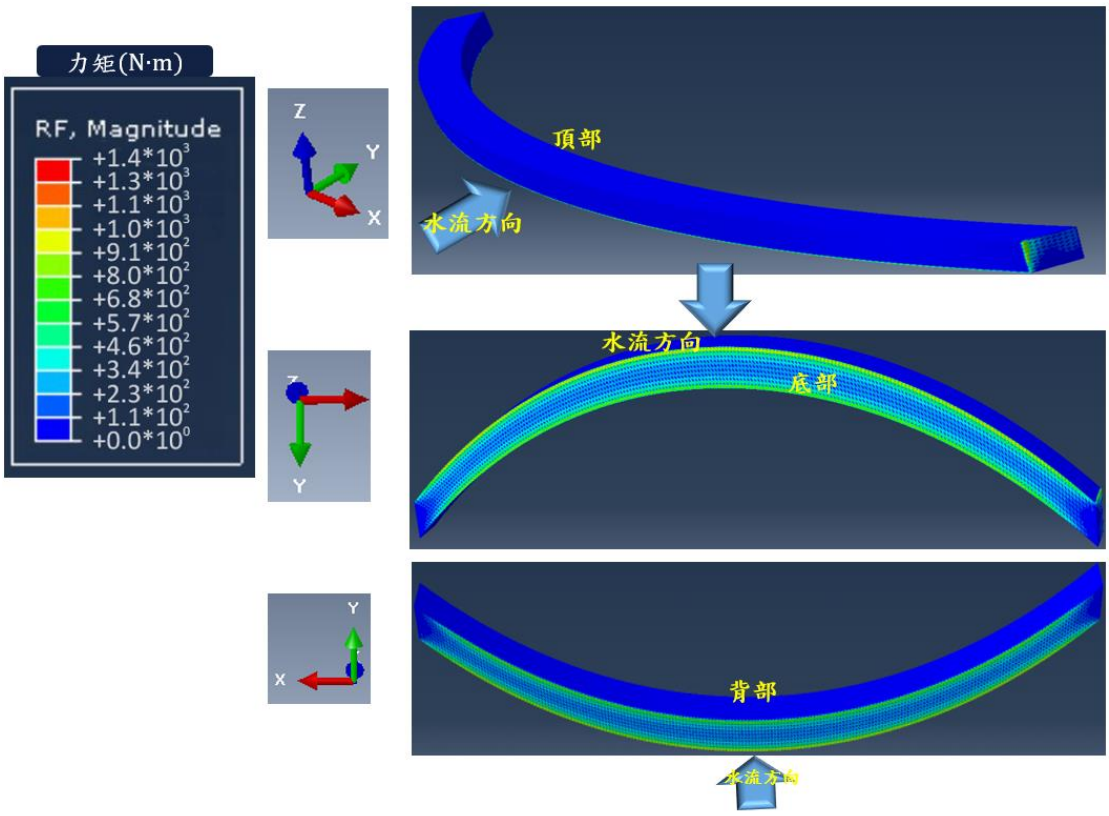


圖 4-3 上拱型固床工固定底部之力矩分布情形

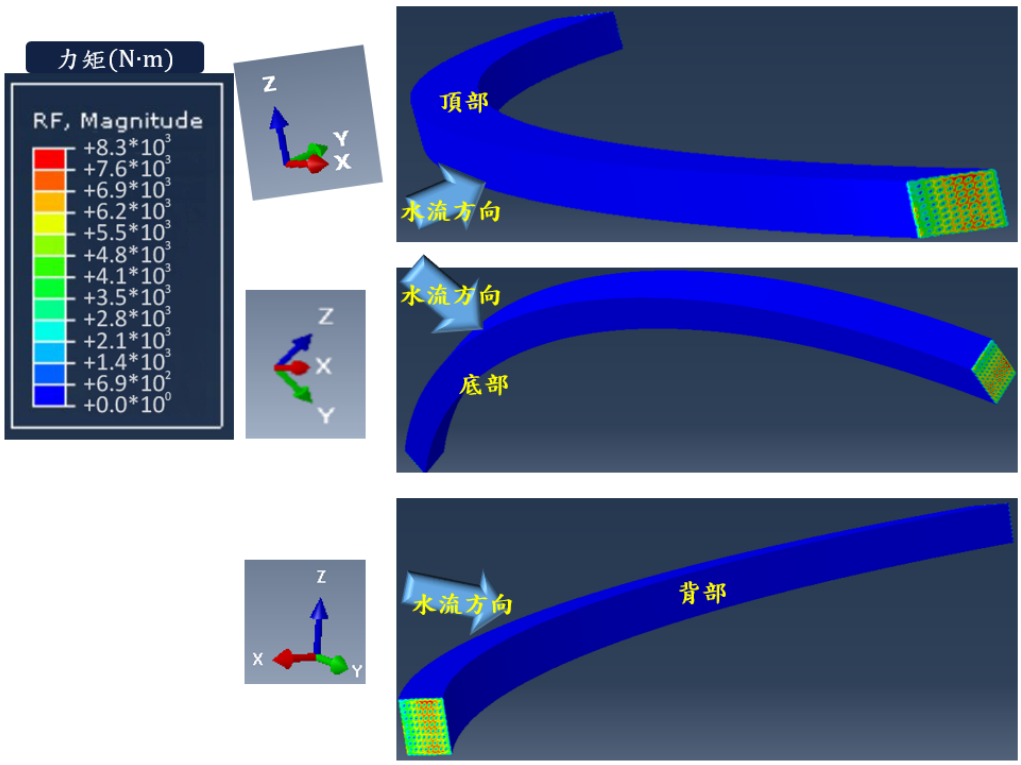


圖 4-4 上拱型固床工無固定底部之力矩分布情形

(三)位移:

從圖 4-5、4-6 可以看出在固定底部之情況下，位移最大為近兩側之頂部處，約為 $8.2*10^{-6}$(m)，判斷是因為在固定底部下，力分散而其為水壓力和衝擊力最大合力處，而在無固定底部之情形下，位移最大為固床工中段全部，最大值約為 $1.4*10^{-3}$(m)，係因為在底部無固定之情況下，力集中於中間處而不分散，使得位移為最大。

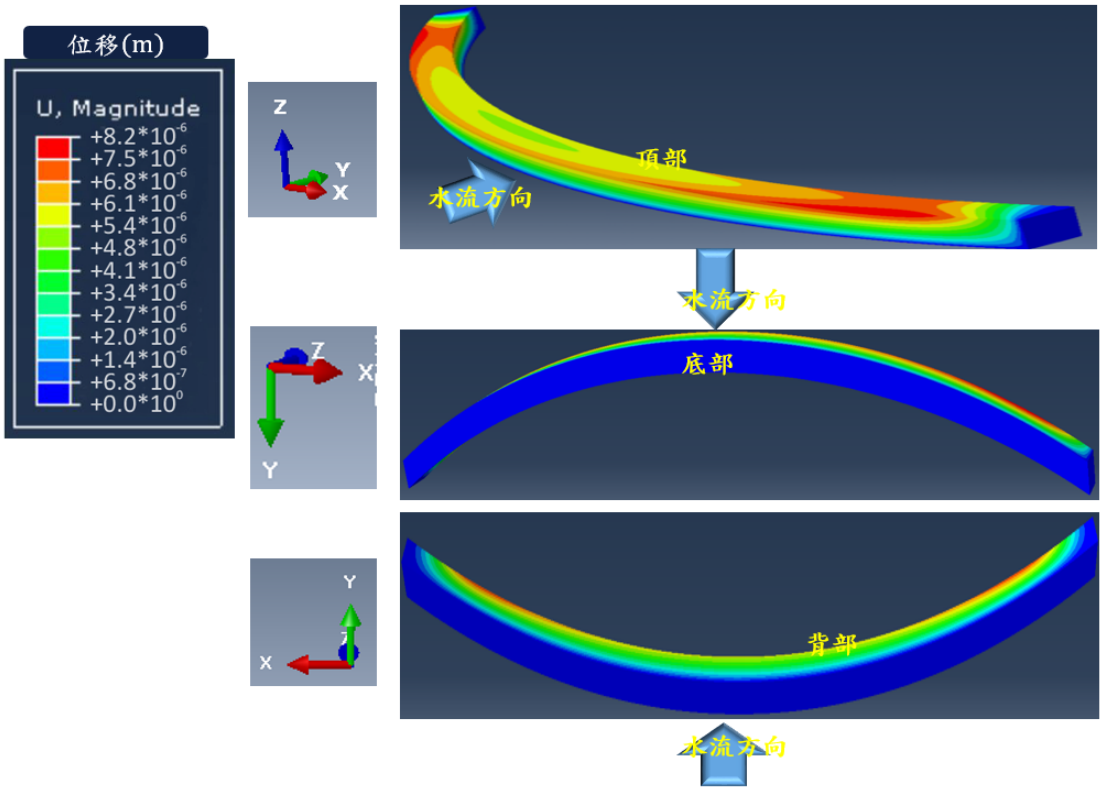


圖 4-5 上拱型固床工固定底部之位移分布情形

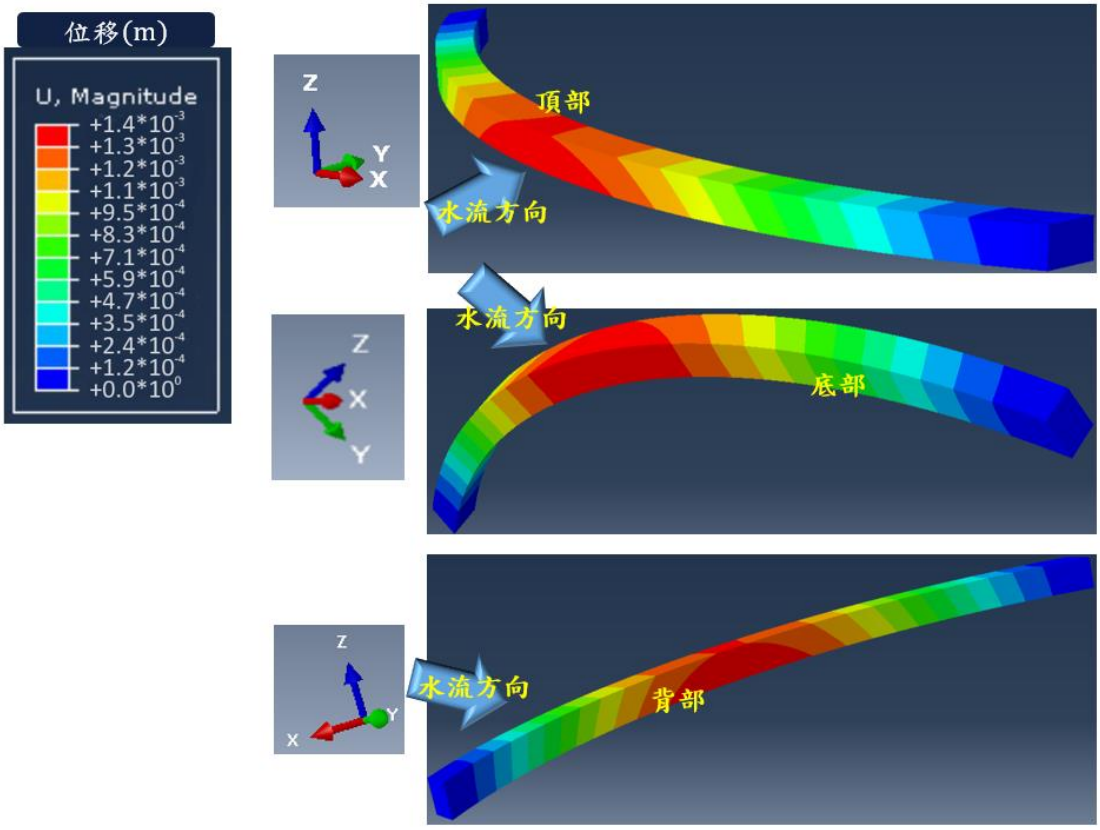


圖 4-6 上拱型固床工固定側邊之位移分布情形

四、現地下拱型固床工模擬結果

此部分之模擬將依據現地固床工之實際大小進行下拱型固床工模擬，並分別呈現假設固床工兩側翼均固定下，底部為固定邊界以及不固定底部共兩種結果，以代表在地基穩固以及地基被淘刷下之情形。

(一)應力:

從圖 4-7、4-8 可以看出在固定底部之情況下，受力最大為上游面全段底部，約為 250(kN)，而在無固定底部之情形下，受力最大為下游面兩側底部，約為 1,400(kN)。

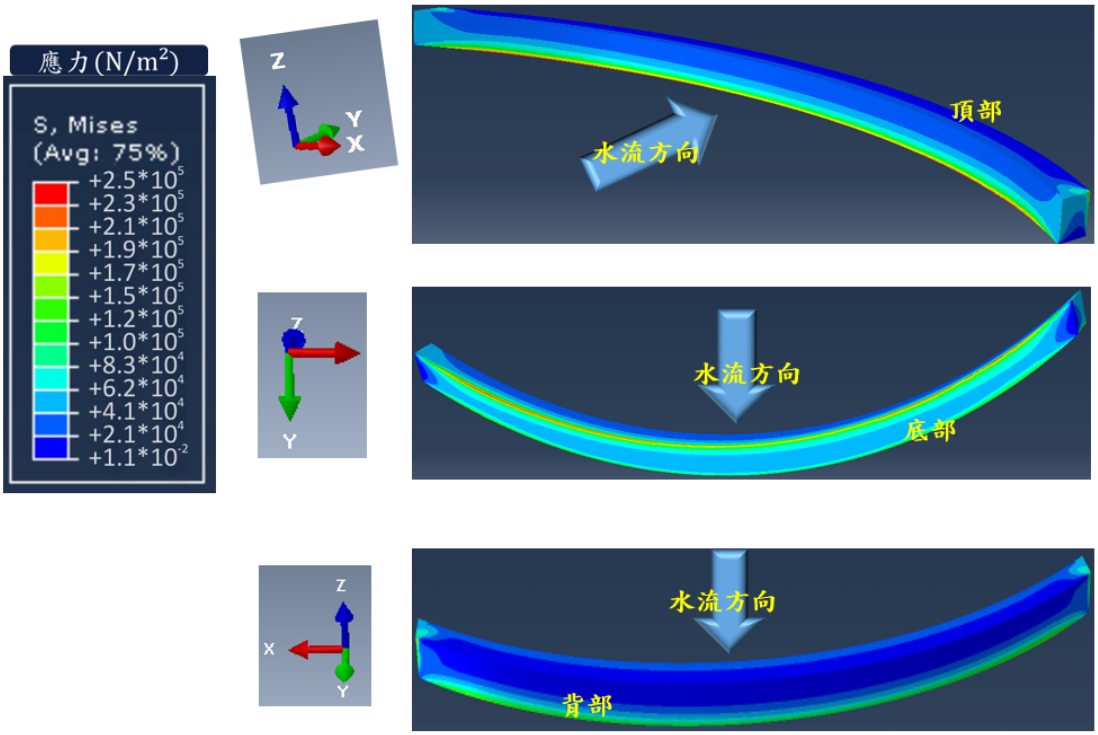


圖 4-7 下拱型固床工固定底部之應力分布情形

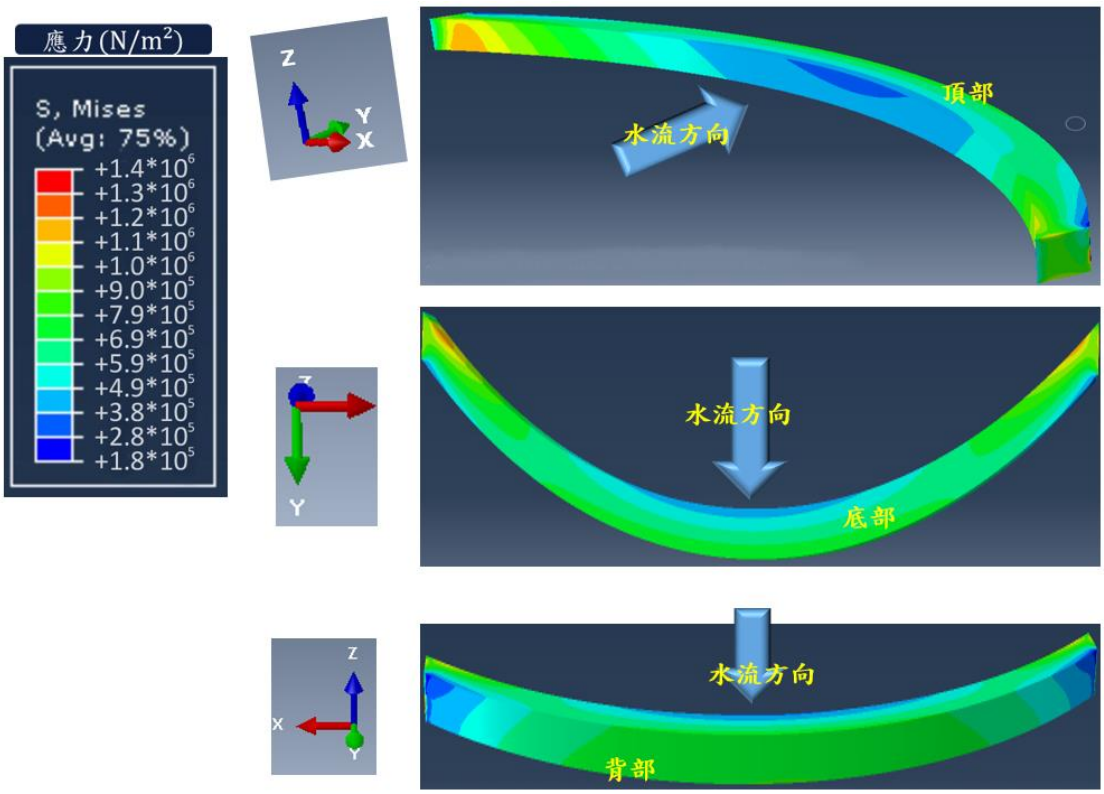


圖 4-8 下拱型固床工無固定底部之應力分布情形

(二)力矩:

從圖 4-9、4-10 可以看出在固定底部之情況下，力矩最大為上游面全部底部，約為 1,400(N·m)，而在無固定底部之情形下，力矩最大為上游面兩側，約為 7,900(N·m)。

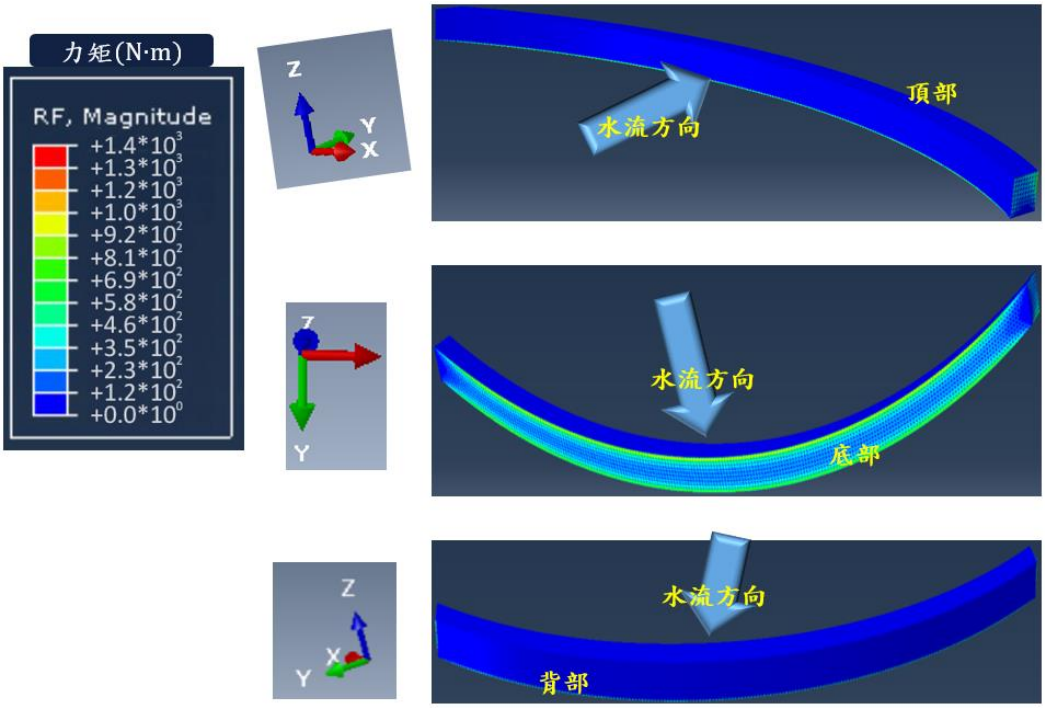


圖 4-9 下拱型固床工固定底部之力矩分布情形

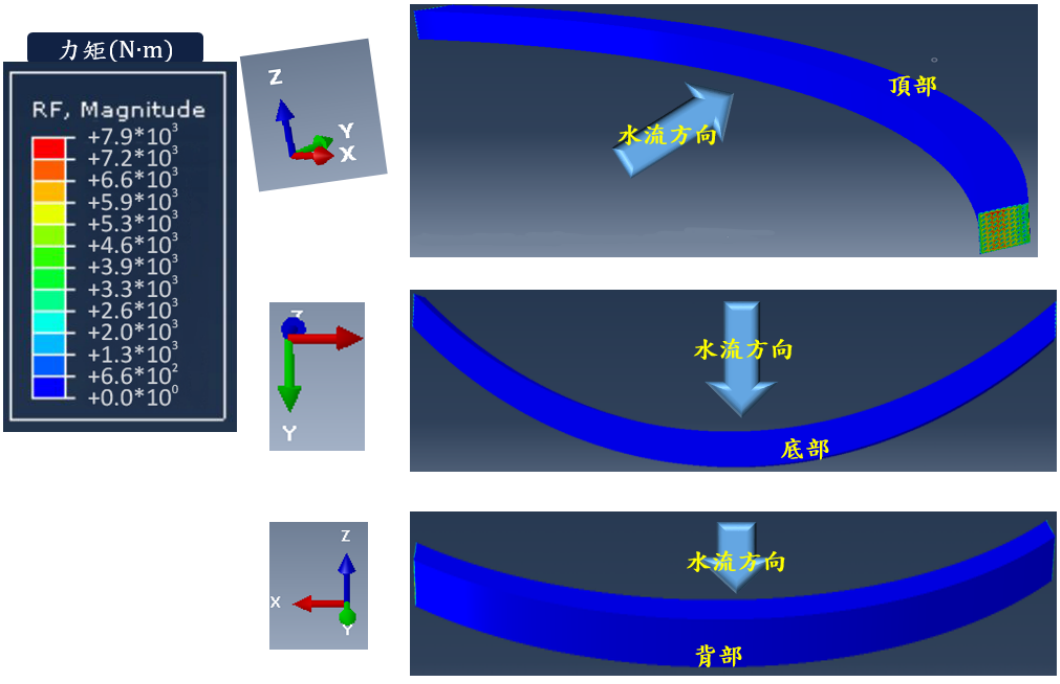


圖 4-10 下拱型固床工無固定底部之力矩分布情形

(三)位移:

從圖 4-11、4-12 可以看出在固定底部之情況下，位移最大為上游面靠近兩側之上方頂部，約為 $7.9*10^{-6}$(m)，係因為

力分散而其為水壓力和衝擊力最大合力處，而在無固定底部之情形下，位移朝固床工中間之部份增加，到最大值約為 $1.4*10^{-3}$(m)，係因為在底部無固定之情況下，力會集中於中間處而不分散。

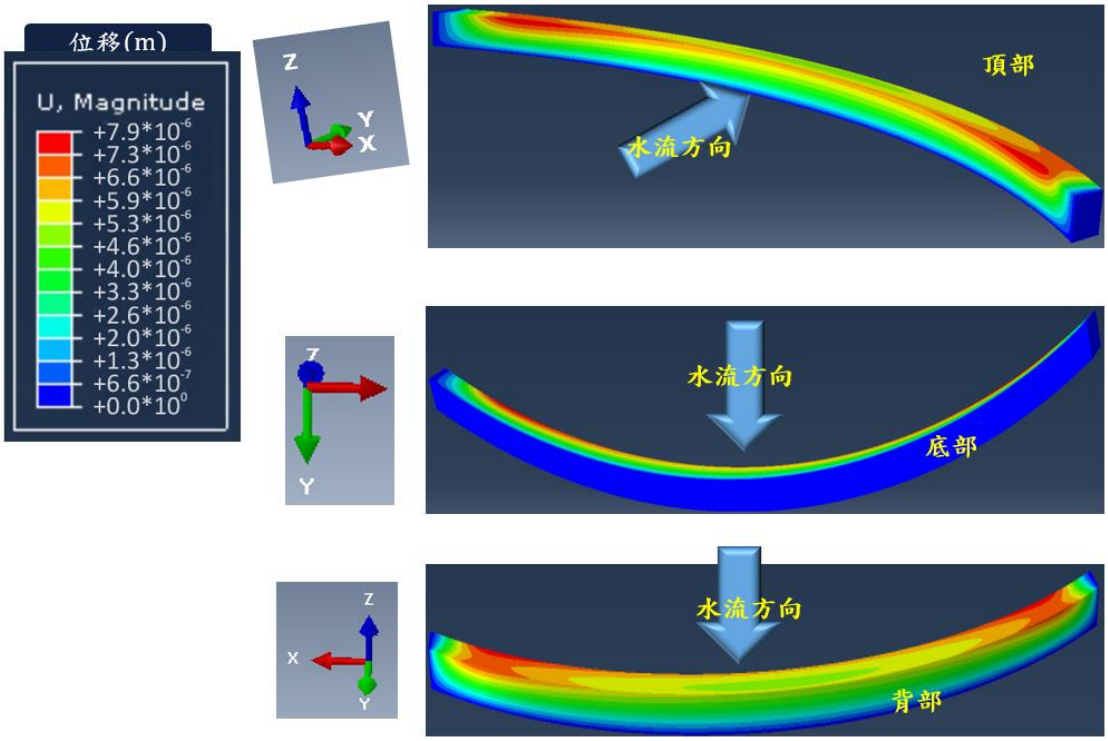


圖 4-11 下拱型固床工固定底部之位移分布情形

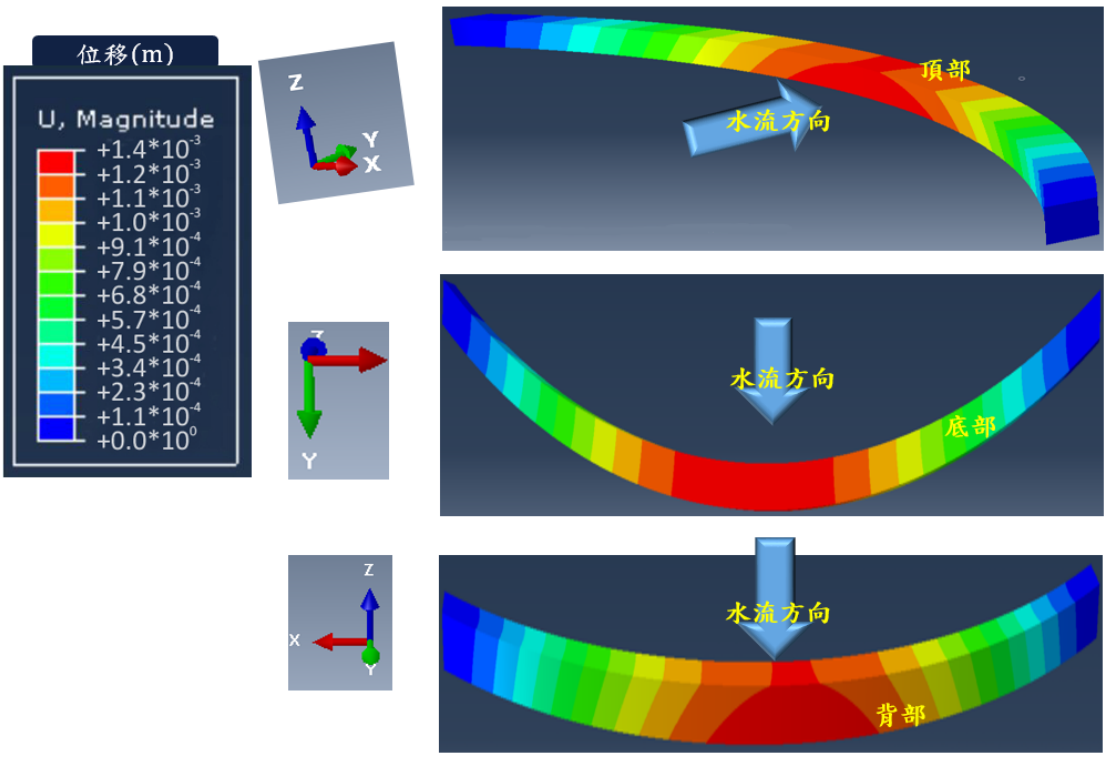


圖 4-12 下拱型固床工無固定底部之位移分布情形

五、不同高度下含低水河槽之受力情形

此章節透過模擬水仙溪已構築之含低水河槽之上拱型固床工在水位不同情形下瞭解其受力、力矩以及位移情形以及變化之趨勢，此部分模擬均設定地基為穩固之情形。

(一)水位為設定為 1m 高時模擬結果:

從圖 4-13~4-15 可以看到，作用在固床工上游面之衝擊力約為 1,300(N)，靜水壓力約為 166,770(N)，其所受之力不大，透過分析可以看出其受力最大部份位於上游面全段底部，約為 33(kN/m^2)，而力矩最大之部份也位於上游面全段底部，約為 54(N・m)，最大位移的部份位於上下游面近兩側之頂部，約為 3*10^{-7}(m)。

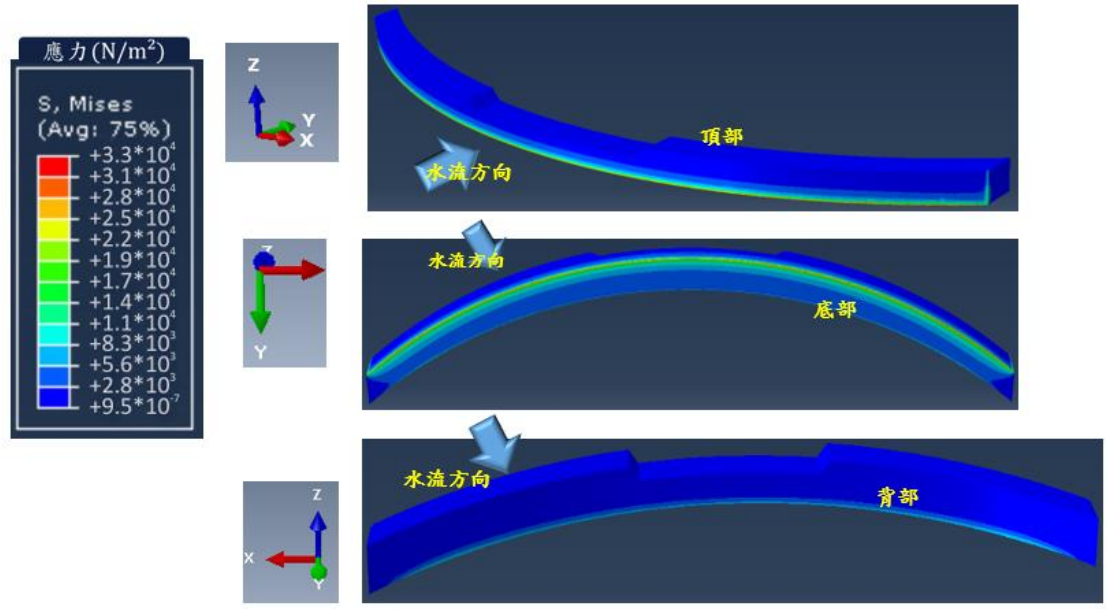


圖 4-13 水深 1 公尺之應力分布情形

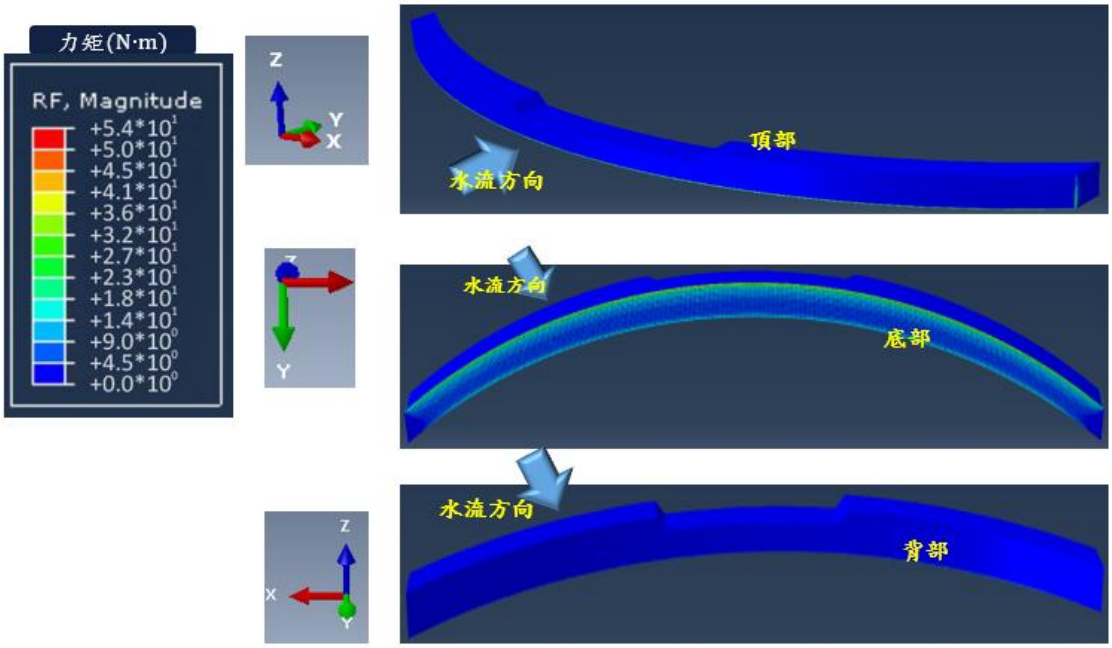


圖 4-14 水深 1 公尺之力矩分布情形

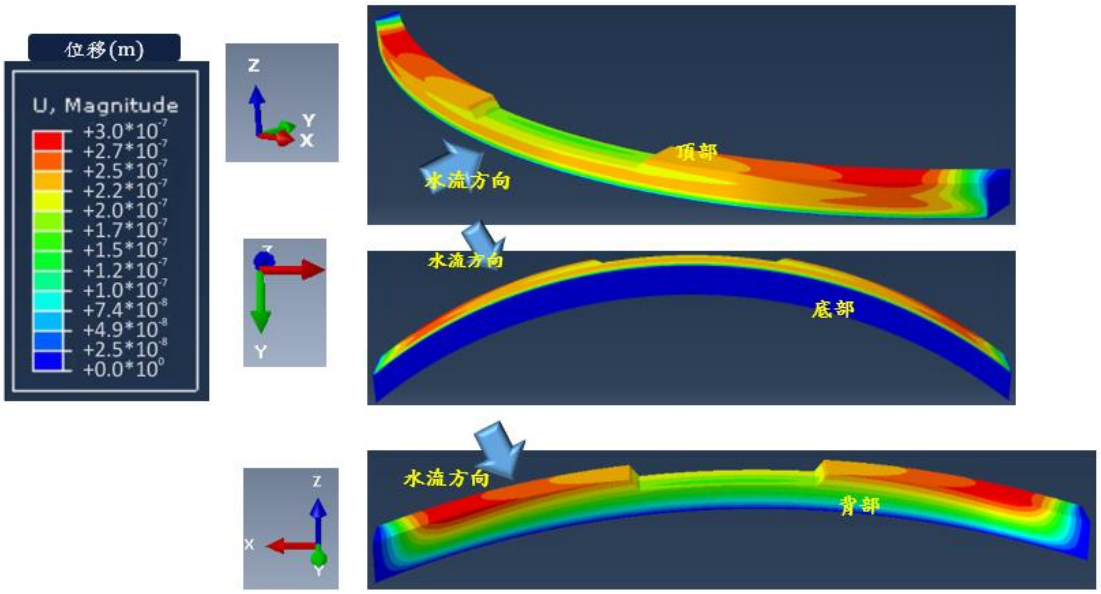


圖 4-15 水深 1 公尺之位移分布情形

(二)水位設定為 1.5m 高時模擬結果

作用在固床工上游面之衝擊力約為 3,800(N)，靜水壓約為 374931.5(N)，透過分析可以看出其受力最大部份位於上游面全段底部，約為 67.7(kN/m^2)，而力矩最大之部份也位於上游面全段底部，約為 111.7(N·m)，最大位移的部份位於上下游面近兩側之頂部，約為 1.14*10^{-6}(m)。

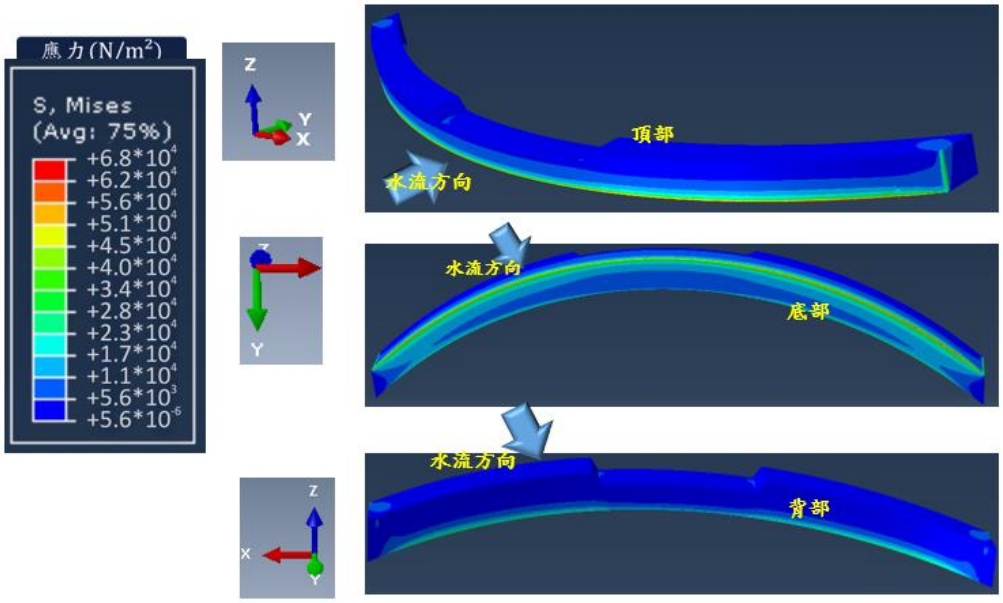


圖 4-16 水深 1.5 公尺，固定底部、側邊之應力分布情形

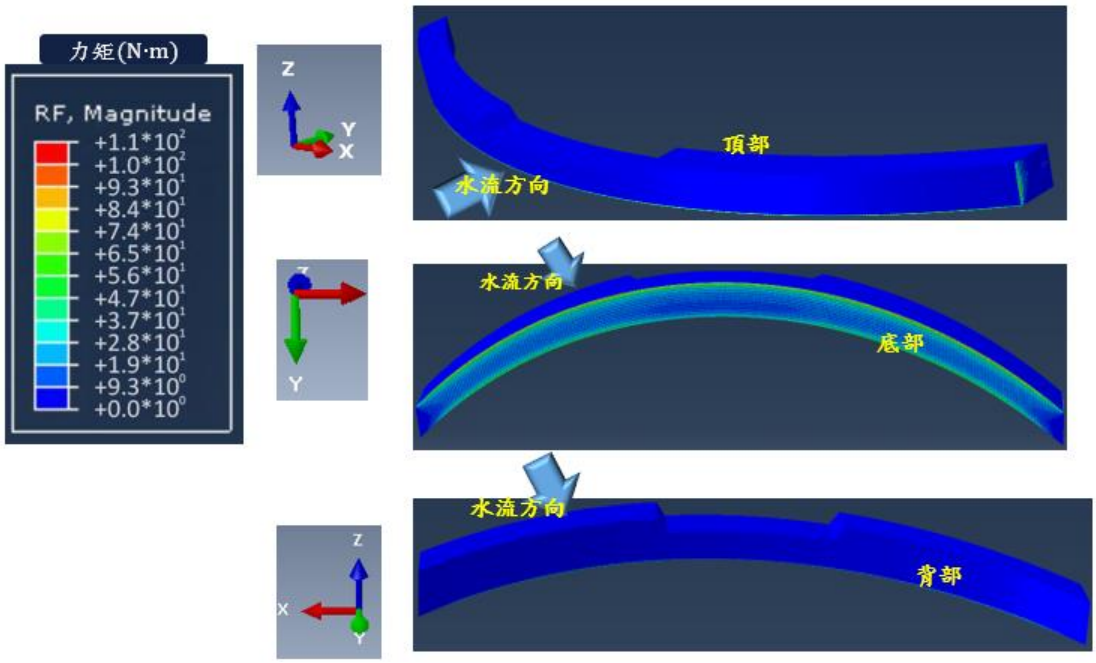


圖 4-17 水深 1.5 公尺，固定底部、側邊之力矩分布情形

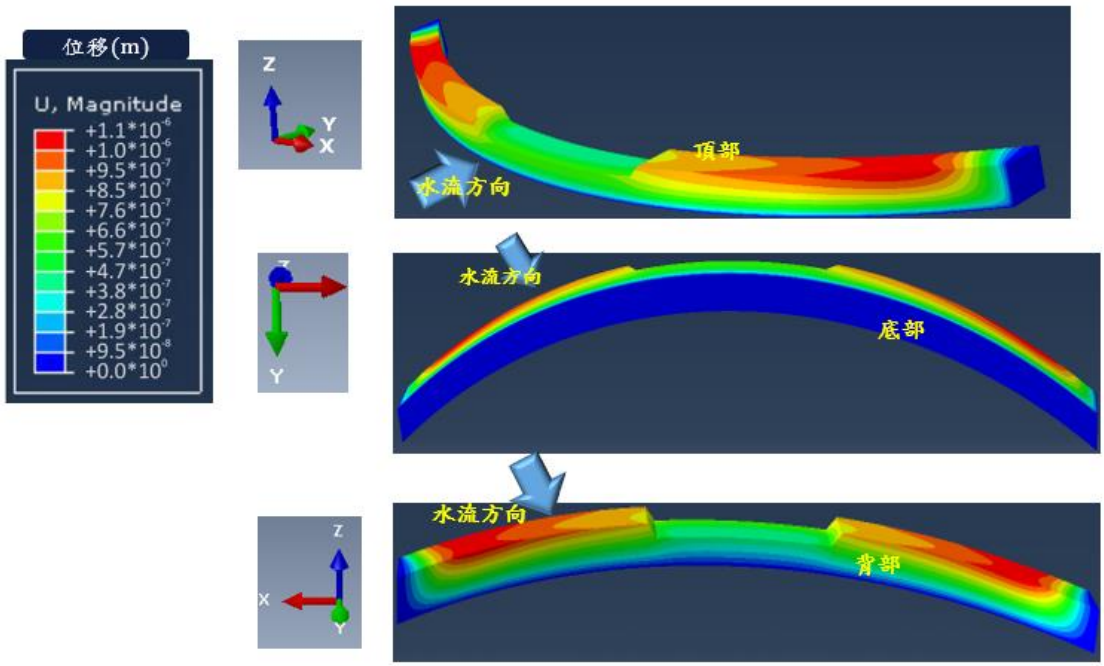


圖 4-18 水深 1.5 公尺，固定底部、側邊之位移分布情形

(三)設定流量為 50 年回歸周期時，其流量為 73.59cms，水位高為 2.056(m)

此時作用於固床工上游面之衝擊力約為 1,090,676(N)，靜

水壓力約為 652715(N)，受力最大部份位於上游面全段底部以及上游面連接兩岸之端點，約為 300(kN)，力矩最大部分位於上游面全段底部，約為 560(N·m)，而最大位移的部份位於上游面近兩側之頂部，約為 $8.6*10^{-6}$，推估為水流經拱頂分散，與前兩組模擬類似。

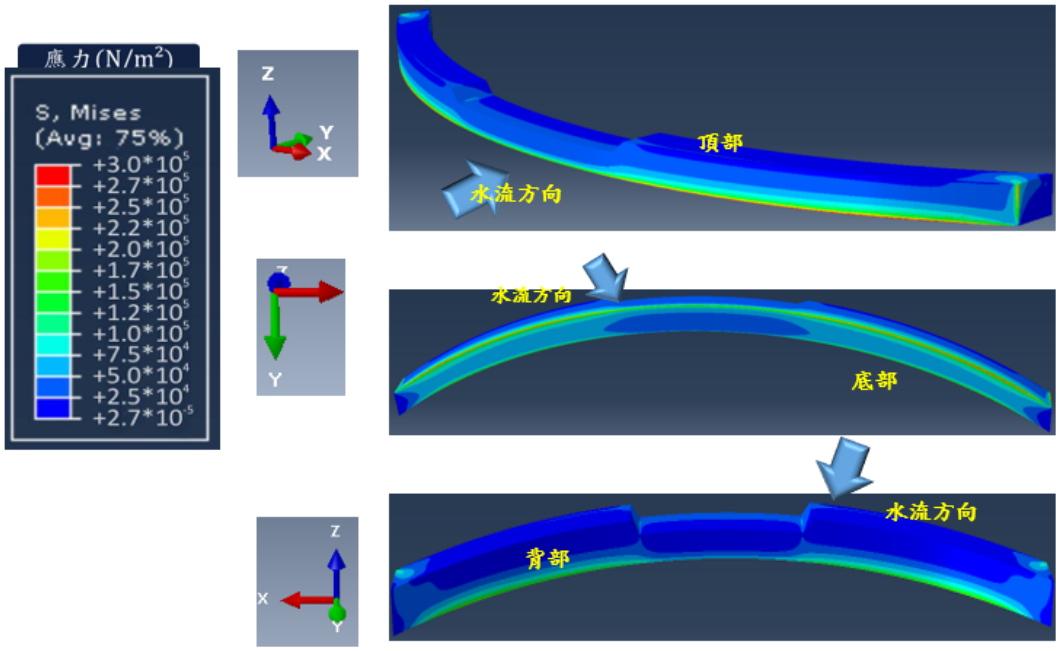


圖 4-19 水深 2.056 公尺，固定底部、側邊之應力分布情形

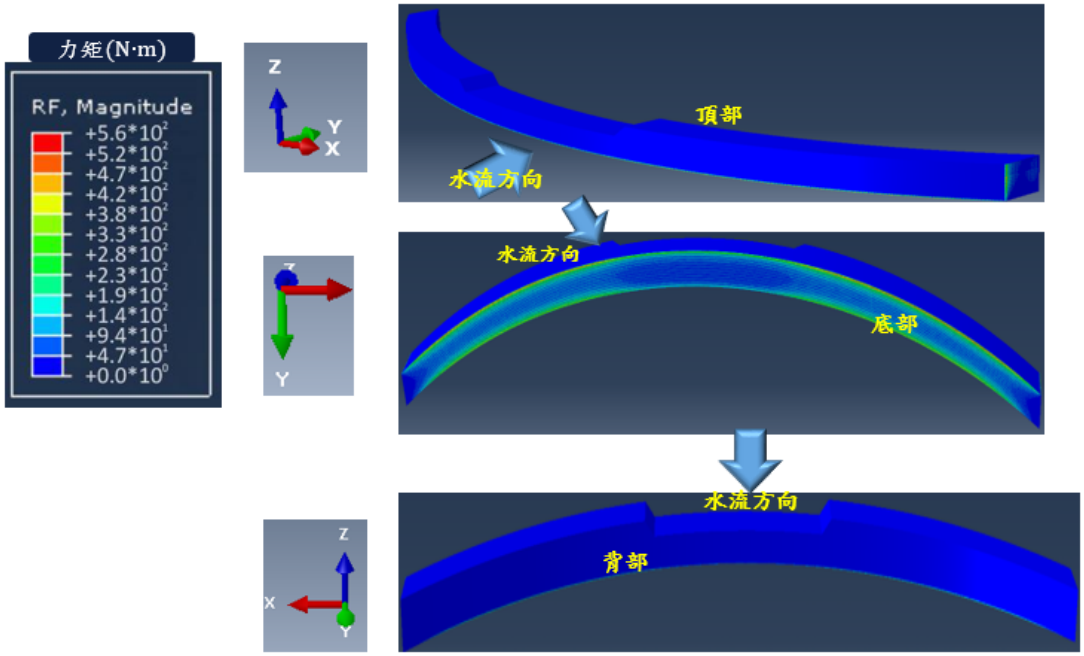


圖 4-20 水深 2.056 公尺，固定底部、側邊之力矩分布情形

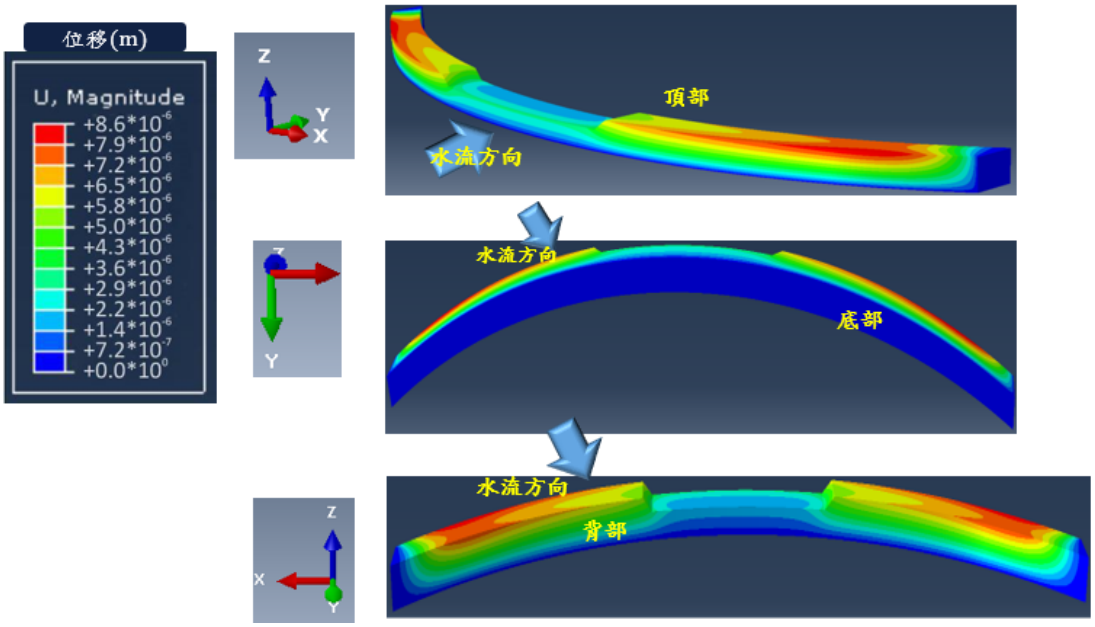


圖 4-21 水深 2.056 公尺，固定底部、側邊之位移分布情形

表 4-1 含低水河槽之上拱型固床最大應力、力矩和位移比較

水位 (m)	最大應力 (kN/m^2)	最大應力位置	最大力矩(N·m)	最大力矩位置	最大位移(m)	最大位移位置
1	33	上游面全段底部	54	上游面全段底部	$3*10^{-7}$	上游面近兩側之頂部
1.5	67.7	上游面全段底部	111.7	上游面全段底部	$1.14*10^{-6}$	上游面近兩側之頂部
1.75	132	上游面全段底部	227	上游面全段底部	$3.54*10^{-6}$	上游面近兩側之頂部
2.056	300	上游面全段底部以及上游面連接兩岸之端點	560	上游面全段底部	$8.6*10^{-6}$	上游面近兩側之頂部

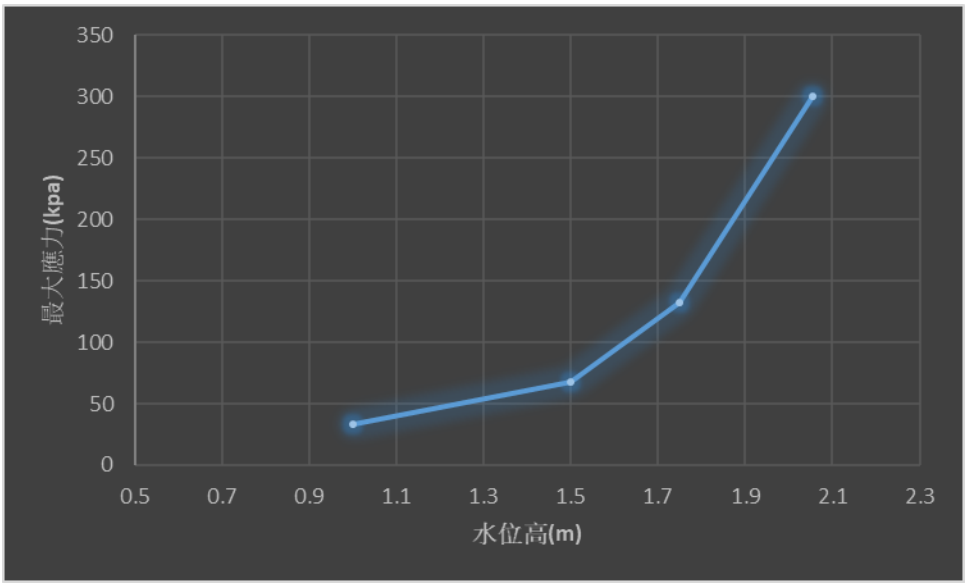


圖 4-22 不同水位下之最大應力比較

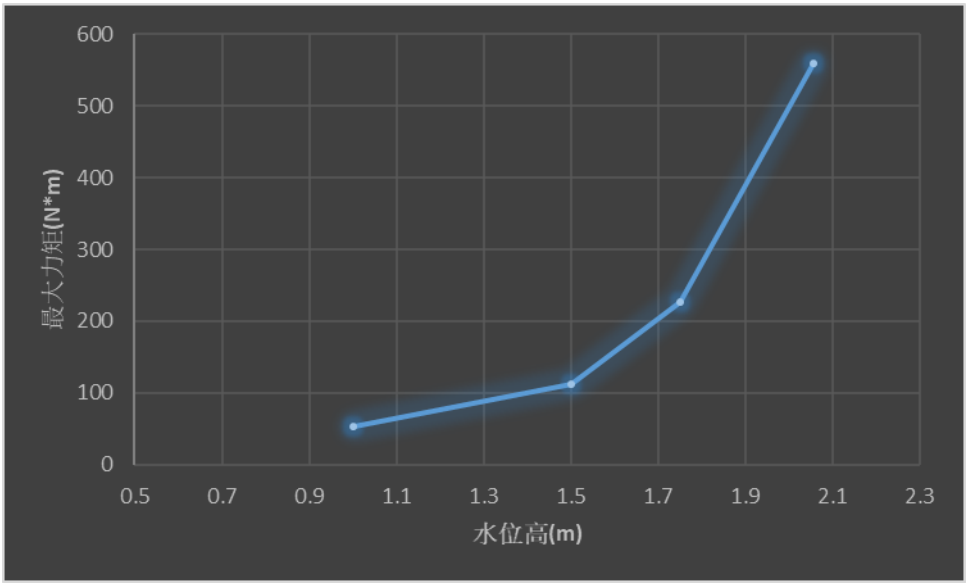


圖 4-23 不同水位下之最大力矩比較

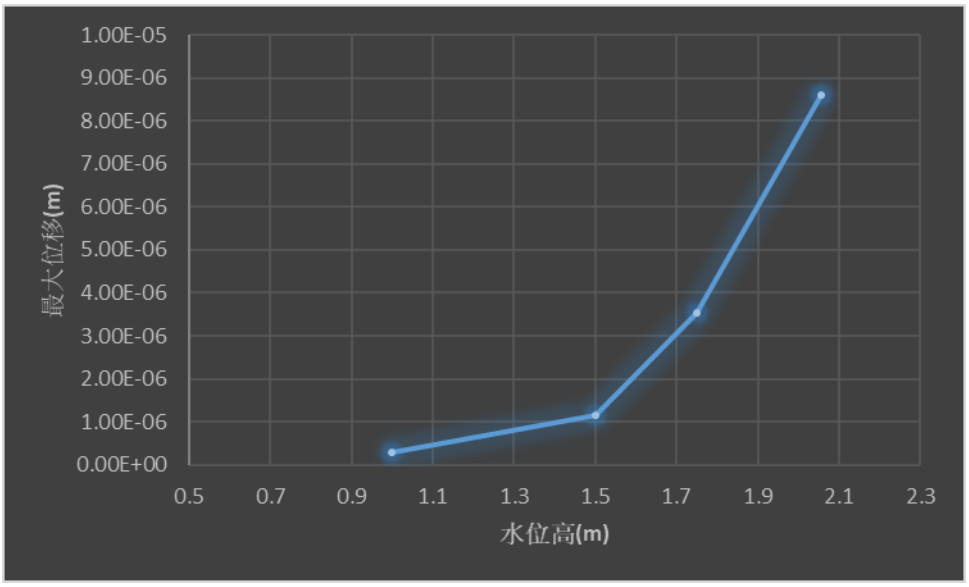


圖 4-24 不同水位下之最大位移比較

表 4-2 為模擬在固床工與水深比值不同下其最大內部受力、力矩以及位移之比較

表 4-2 固床工與水深比值不同下其最大內部受力、力矩以及位移之比較

水深與固床工高度之比值 (h/H)	動水壓 (kN)	靜水壓 (kN)	總作用力 (kN)	最大內部受力(kN/m^2)	最大力矩($N \cdot m$)	最大位移(m)
1	14.707	375.233	389.939	51.65	246.3	$9.29*10^{-7}$
1.5	281.634	750.465	1032.099	99.51	485.9	$2.57*10^{-6}$
2	968.554	1125.692	2094.252	264.3	1310	$8.20*10^{-6}$
2.3	2200.998	1350.837	3551.835	446.5	2255	$1.44*10^{-5}$

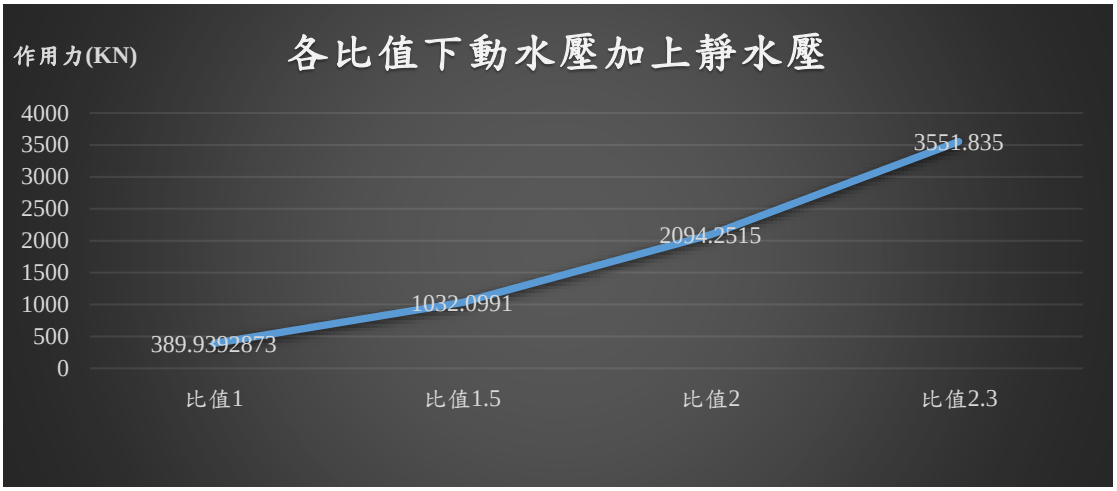


圖 4-25 各比值下動水壓加上靜水壓之總力

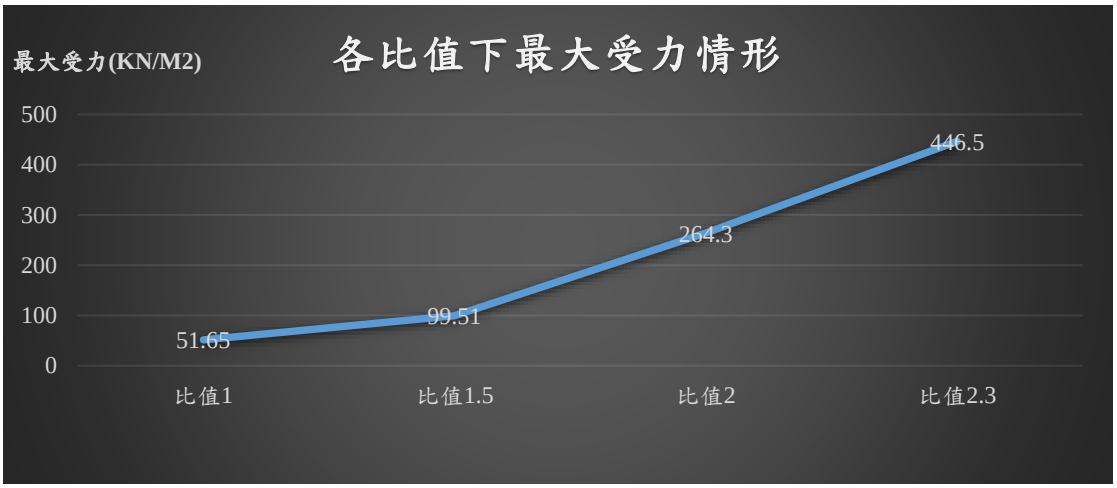


圖 4-26 各比值下最大受力情形

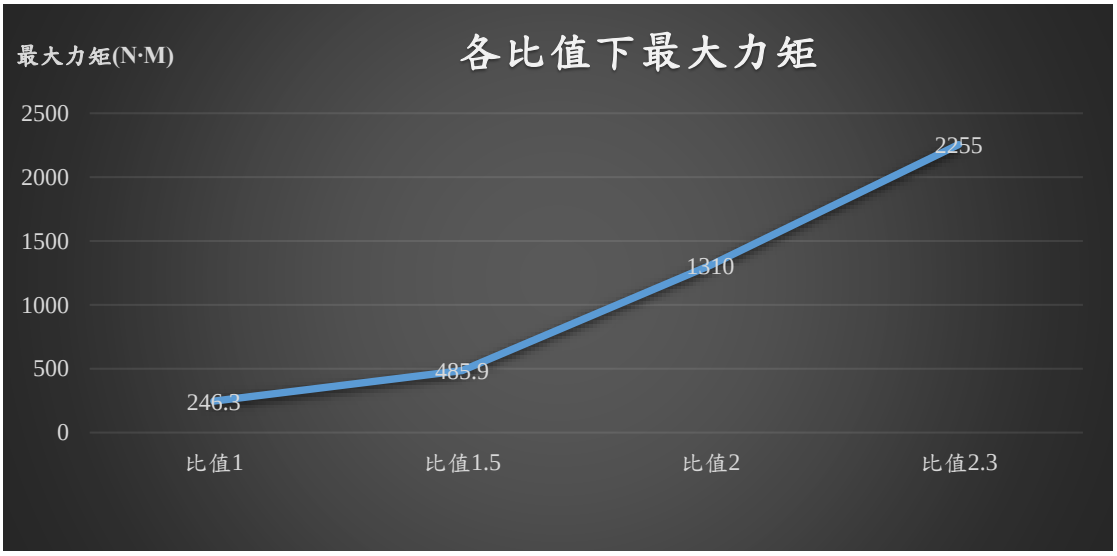


圖 4-27 各比值下最大力矩

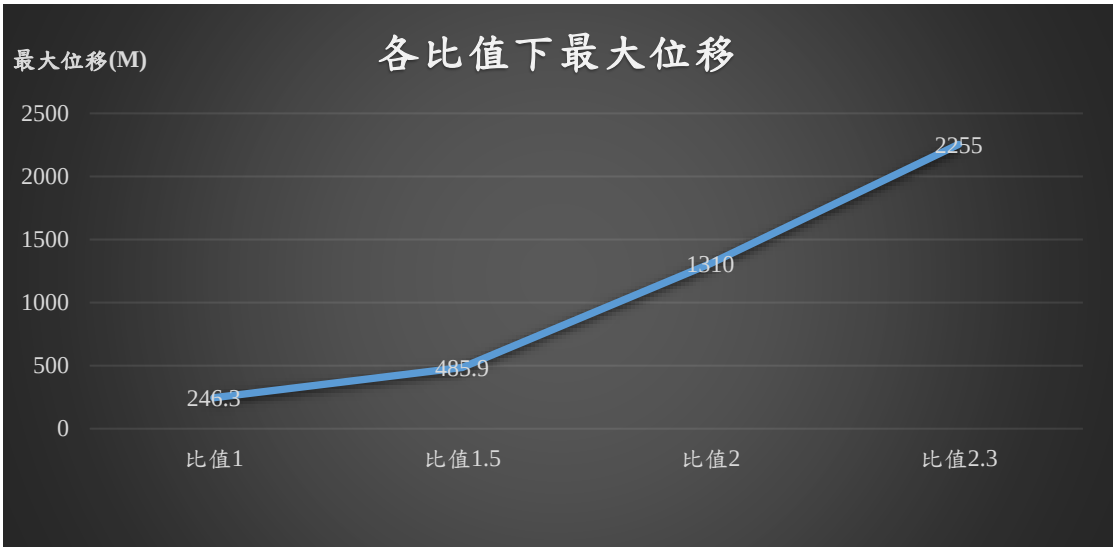
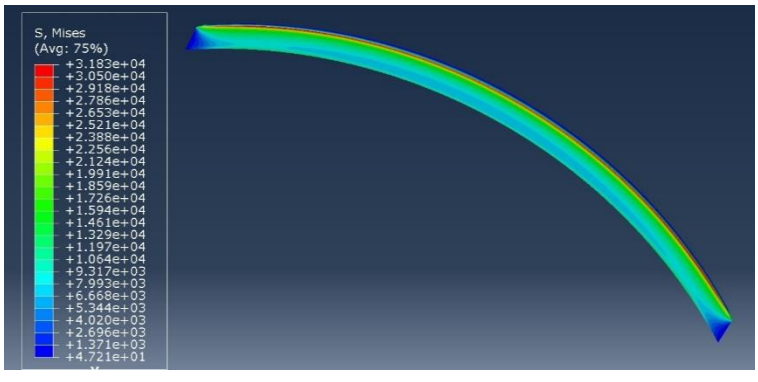
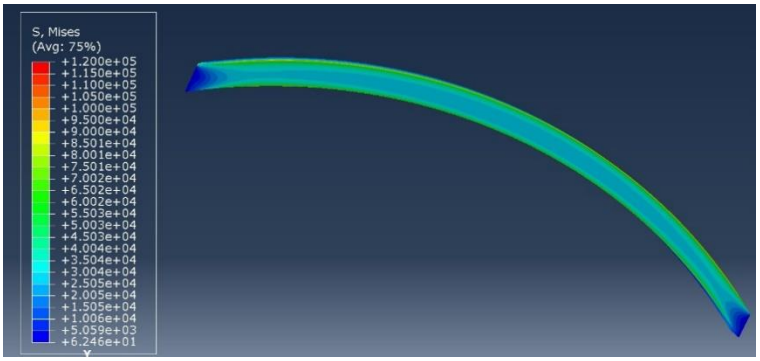
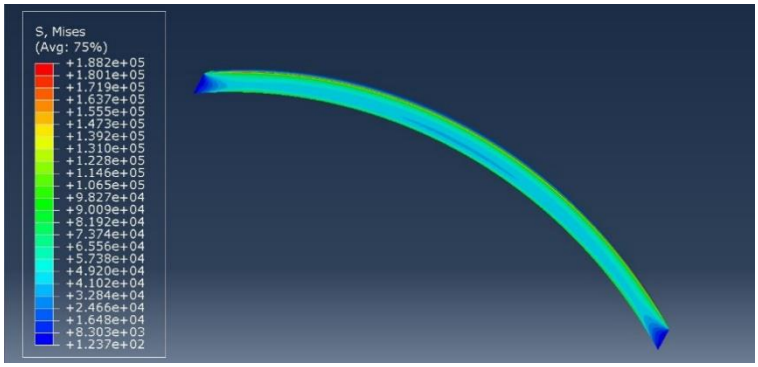


圖 4-28 各比值下最大位移

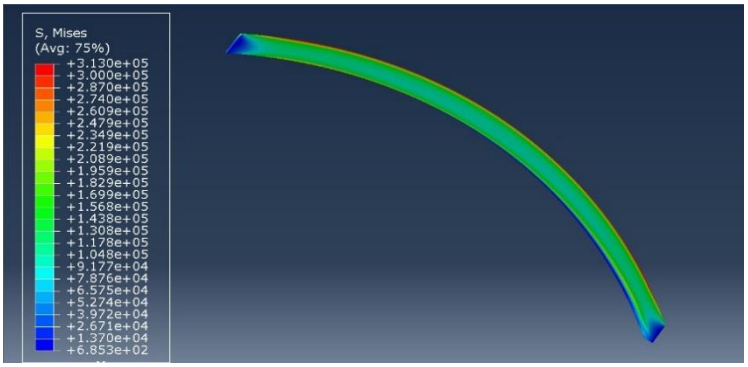
由圖 4-26~4-28 可以看到隨著水深與固床工高度之比值增加，最大應力、最大力矩以及最大位移之數值增加幅度也會增加，

本研究另針對水位不同高度模擬了水深在 1m、1.5m、2m、3m、4m、4.5m、5m、6m 等八種不同情況下上拱型固床工之受力、力矩及位移情形變化。

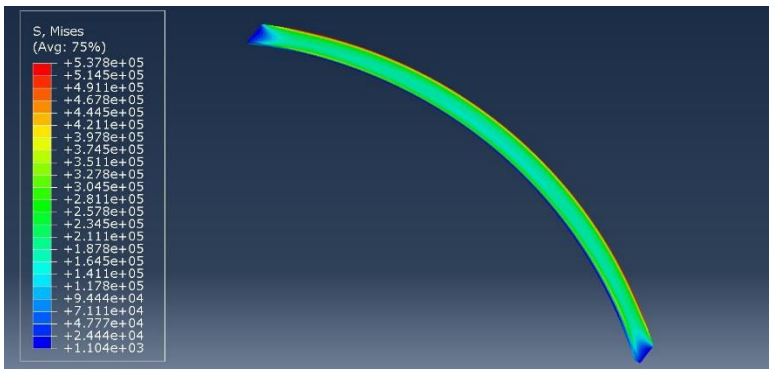
水深 1m	水深 1.5m
	
水深 2m	水深 3m



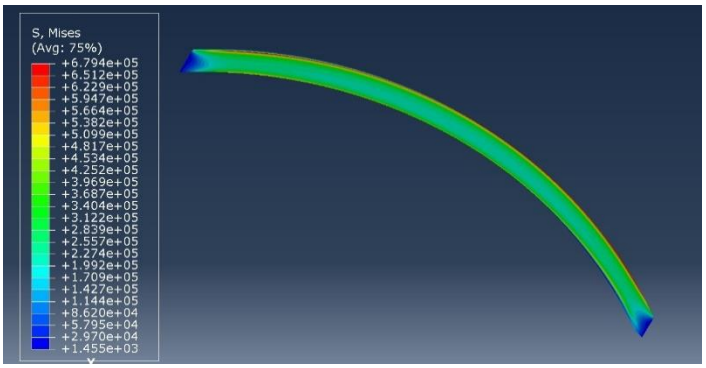
水深 4m



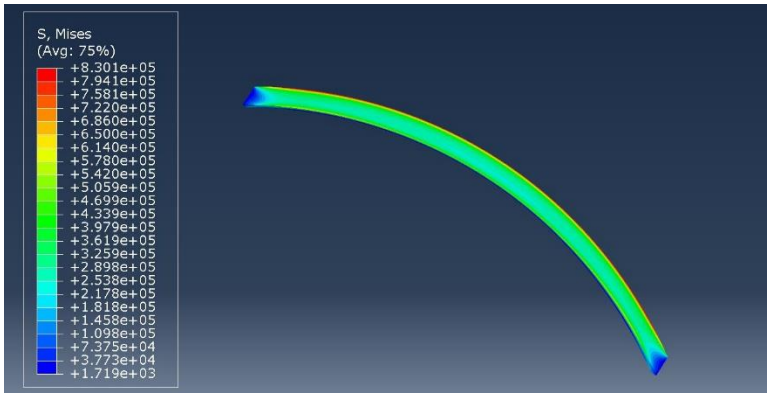
水深 4.5m



水深 5m



水深 6m



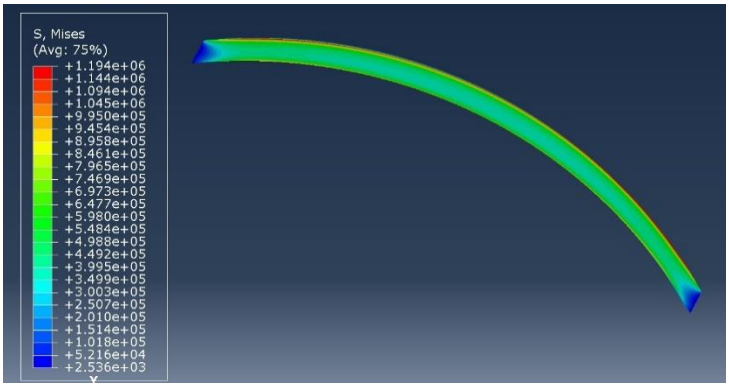


圖 4-29 上拱型固床工不同水深下受力分布

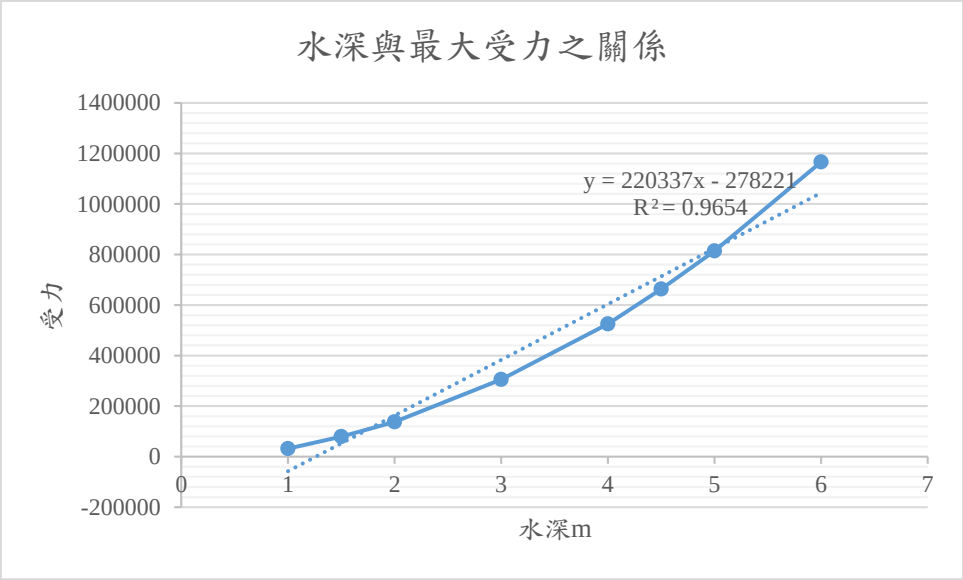
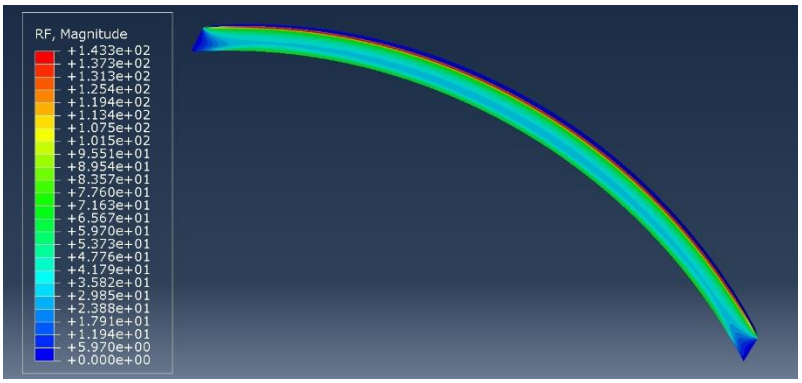
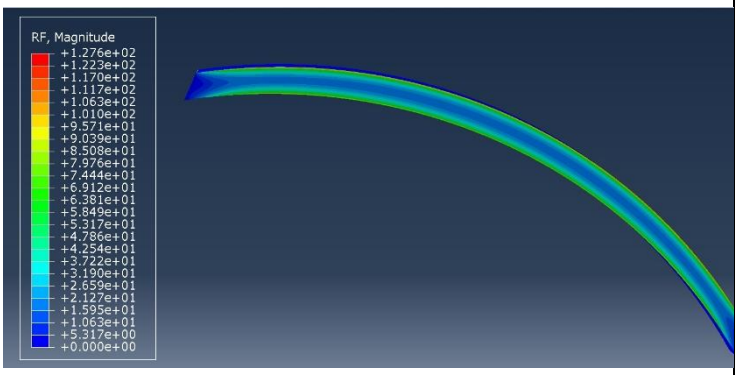
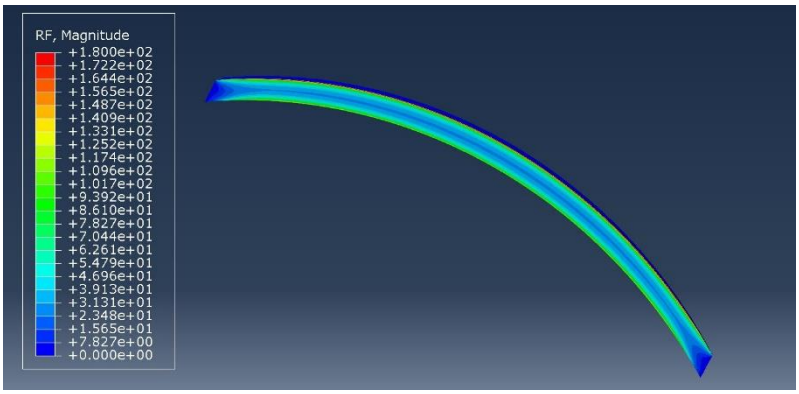
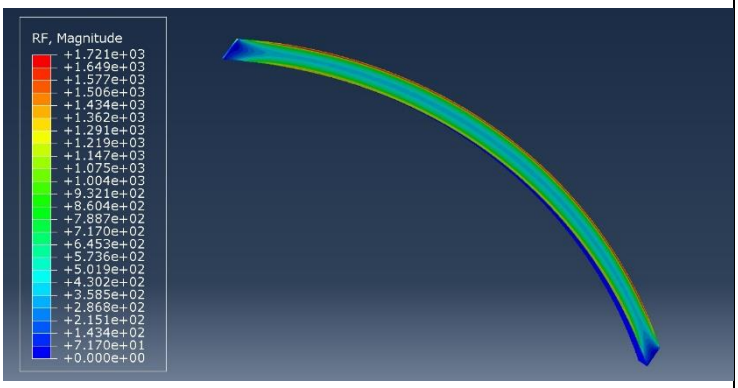
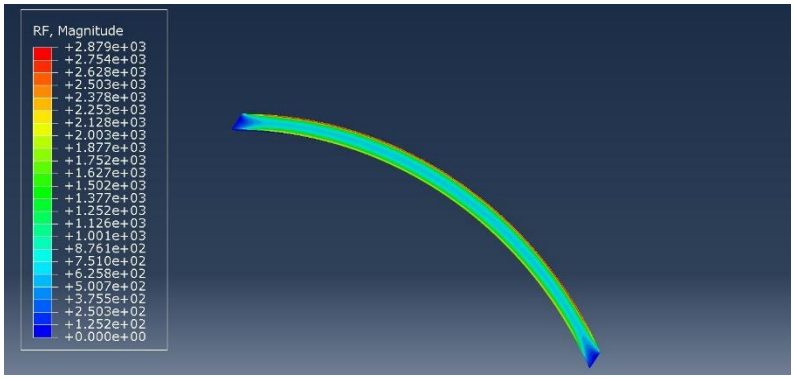
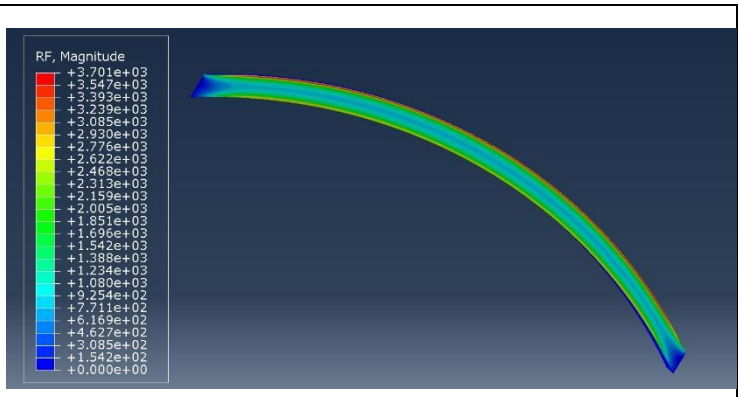


圖 4-30 上拱型固床工不同水深下最大應力關係圖

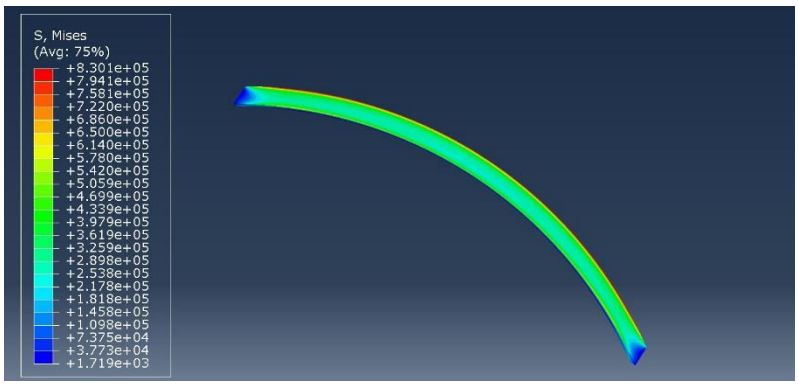
水深 1m	水深 1.5m
	
水深 2m	水深 3m
	
水深 4m	水深 4.5m



水深 5m



水深 6m



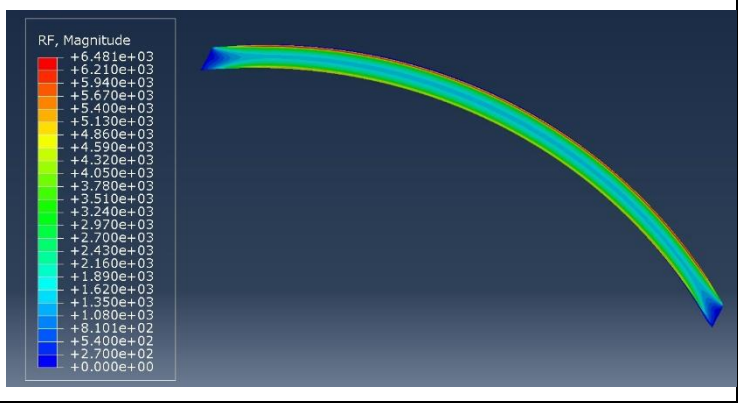


圖 4-31 上拱型固床工不同水深下力矩分布

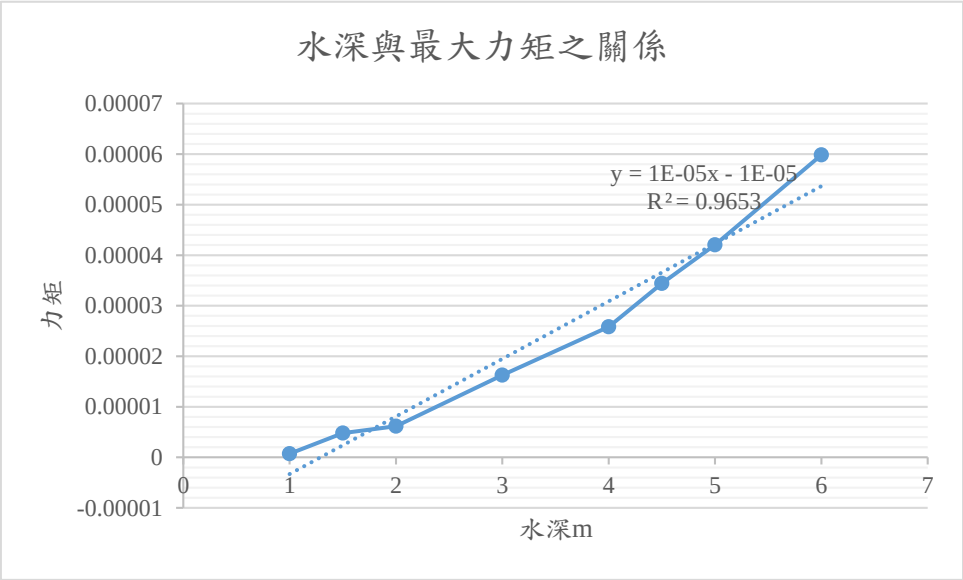
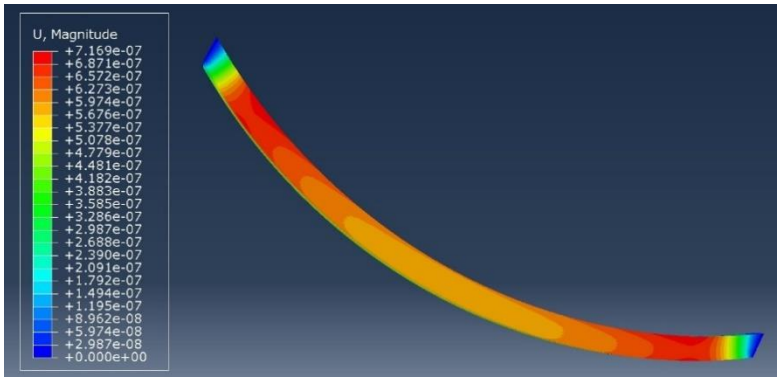
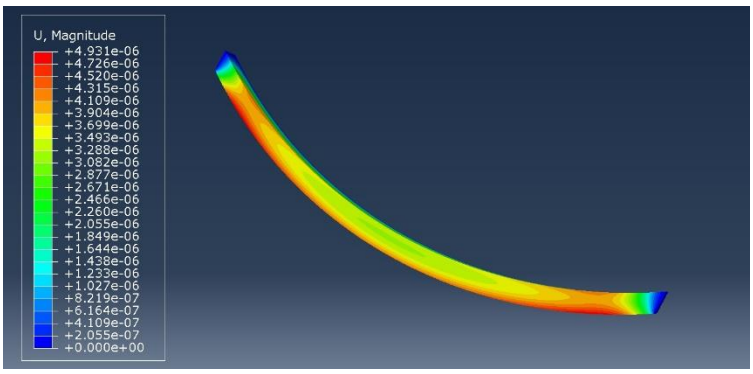
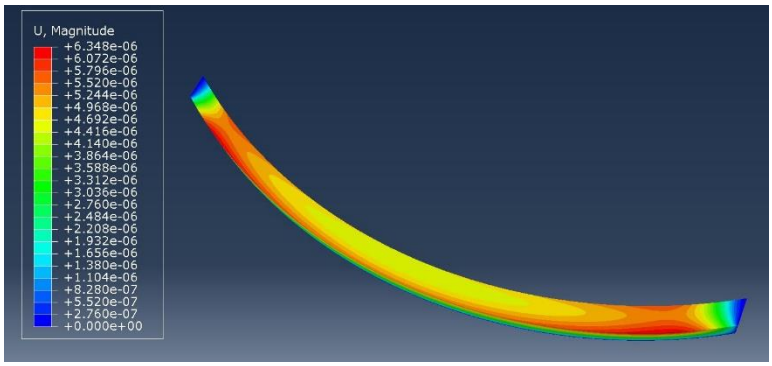
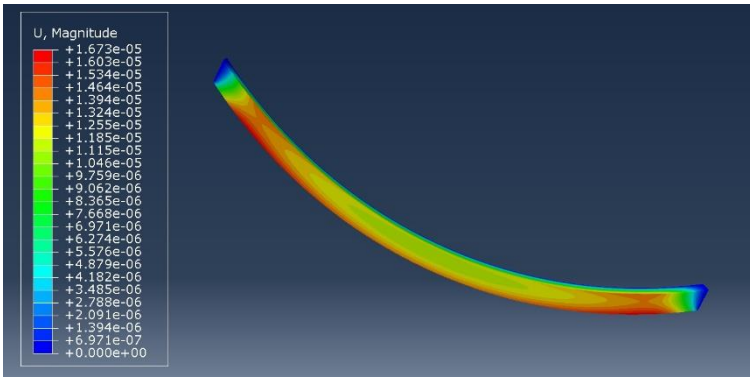
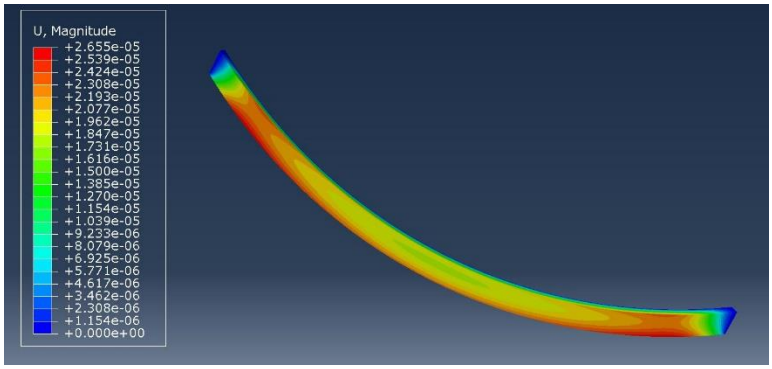
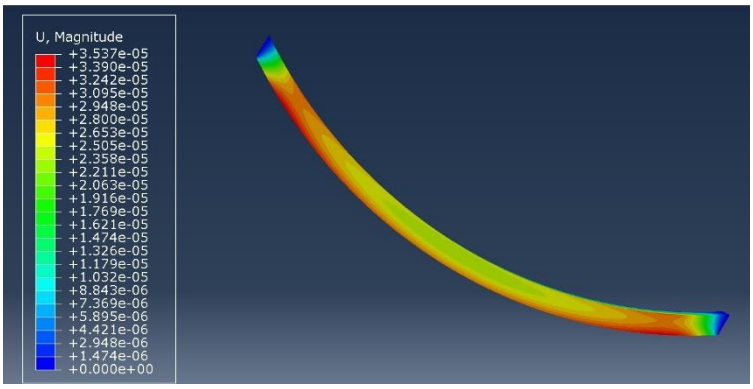
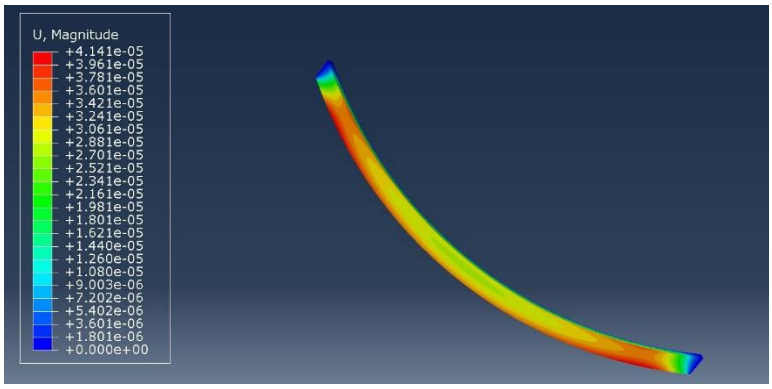


圖 4-32 上拱型固床工不同水深下最大力矩關係圖

水深 1m	水深 1.5m
	
水深 2m	水深 3m
	
水深 4m	水深 4.5m
	
水深 5m	水深 6m



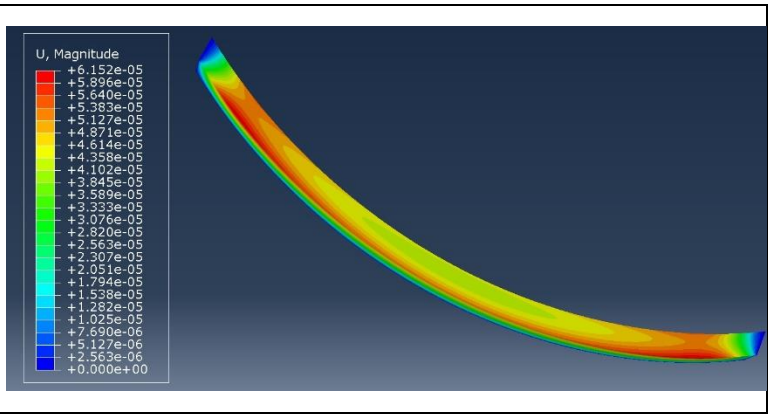


圖 4-33 上拱型固床工不同水深下位移分布

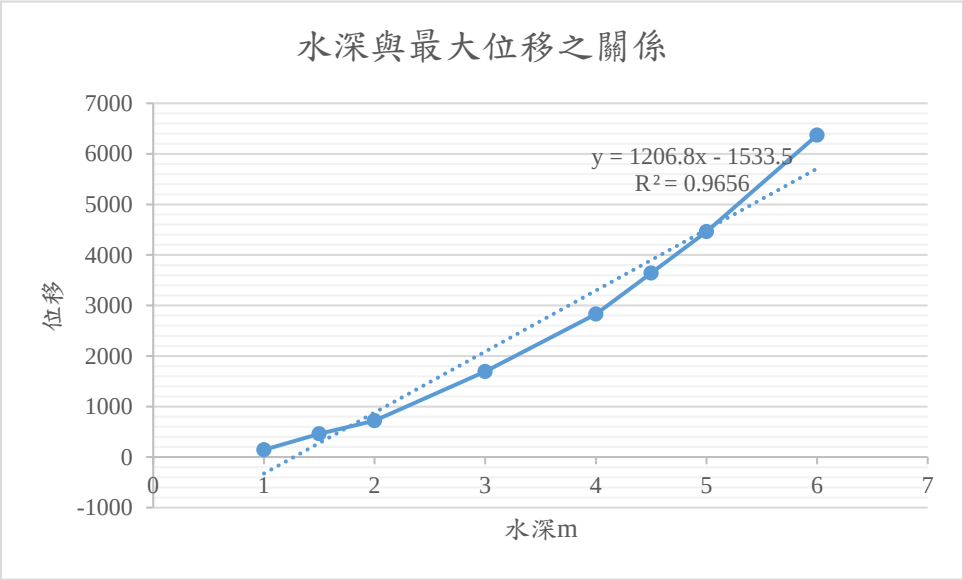


圖 4-34 上拱型固床工不同水深下最大位移關係圖

六、模擬不同拱度之上拱型固床工

此部分模擬針對不同拱度之上拱型固床工進行分析比較，透過數值模擬分析在相同外在條件下，因拱度不同而造成的影響以及變化，除原現地尺寸之固床工外，此部份額外模擬尺寸如圖 4-35 所示，依原現地之固床工進行拱度之調整，弧長分別為 34.6513m、35.4552m、37.9574m 以及 39.6188m。

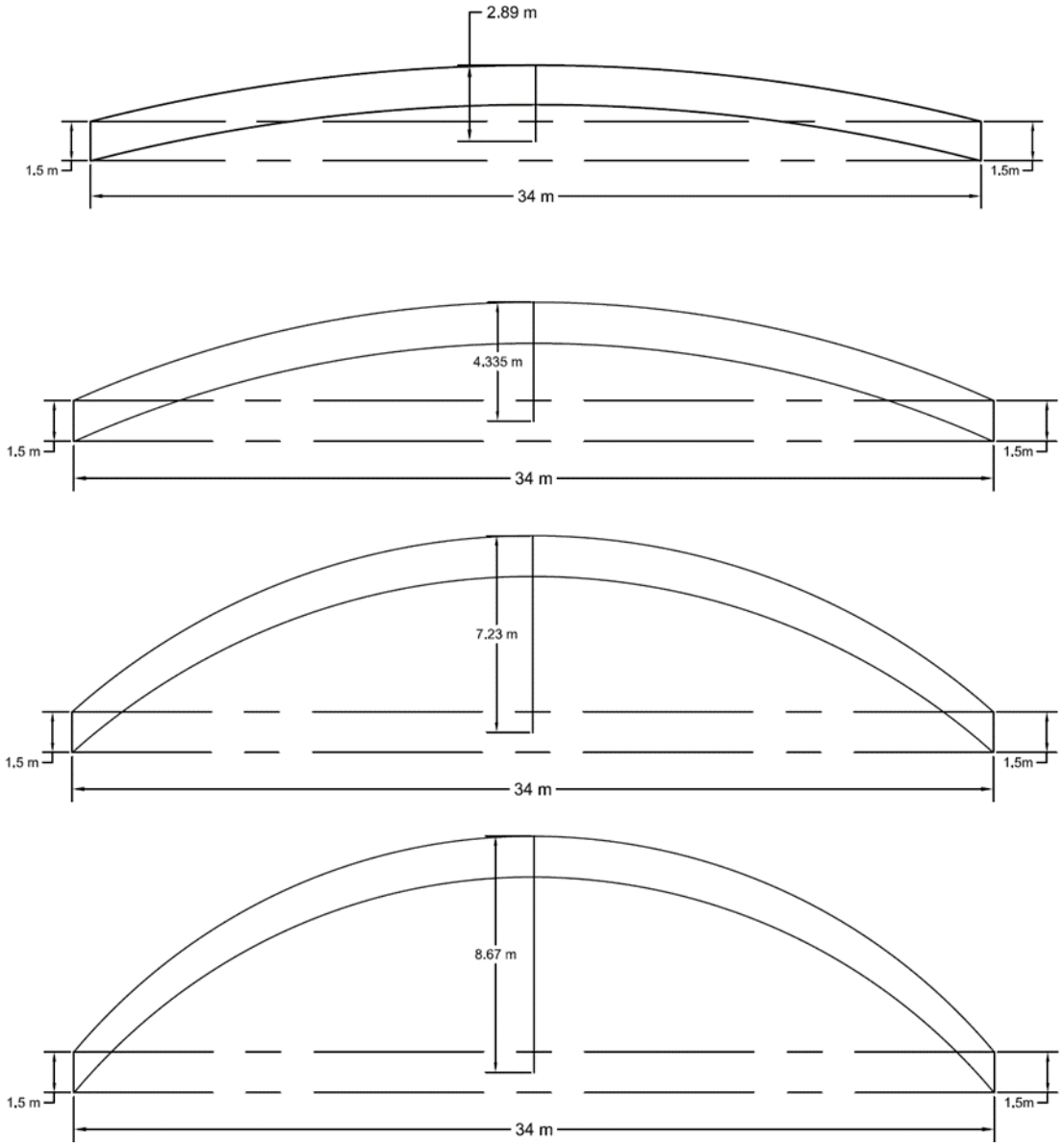


圖 4-35 模擬尺寸示意圖

(一)弧長為 34.6513m 上拱型固床工模擬結果

1.應力:

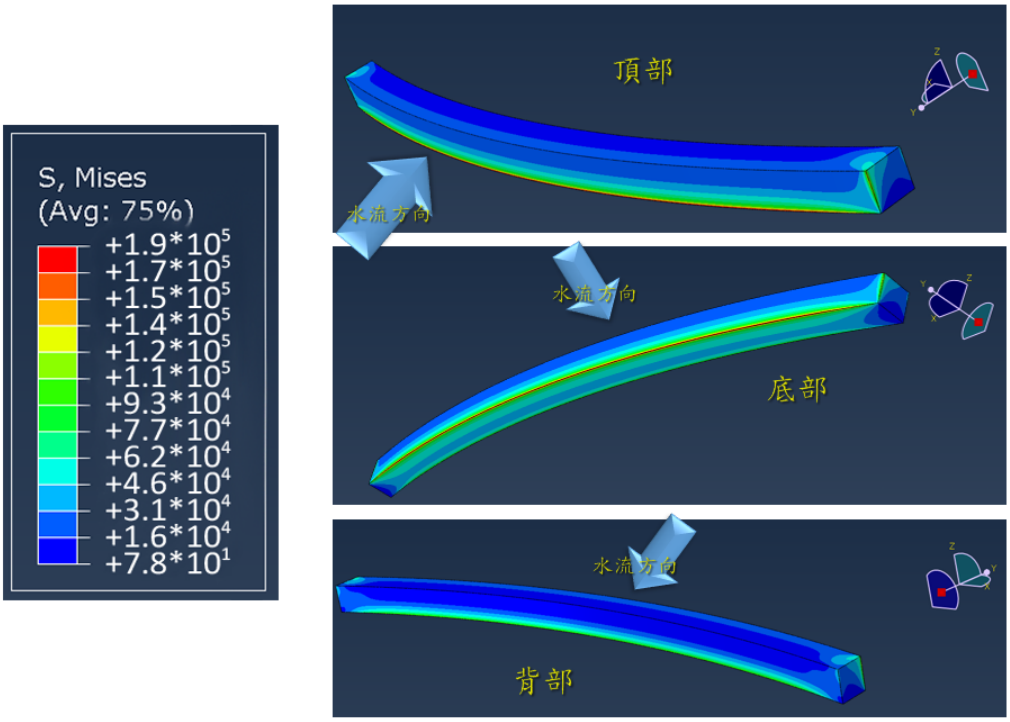


圖 4-36 弧長 34.6513m 上拱型固床工應力分布情形

2.力矩:

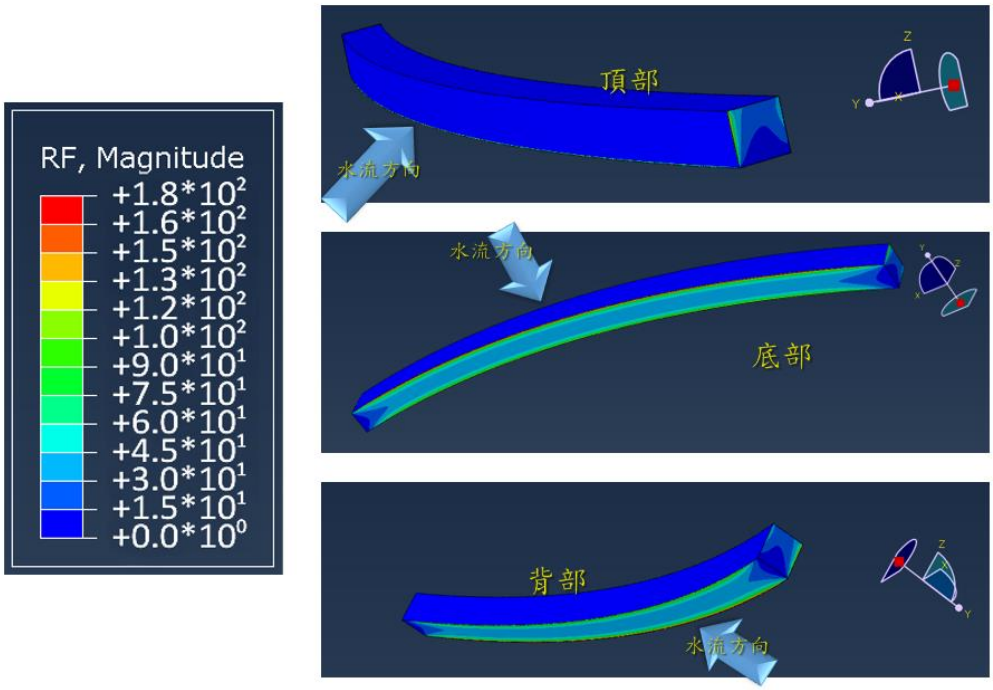


圖 4-37 弧長 34.6513m 上拱型固床工力矩分布情形

3.位移:

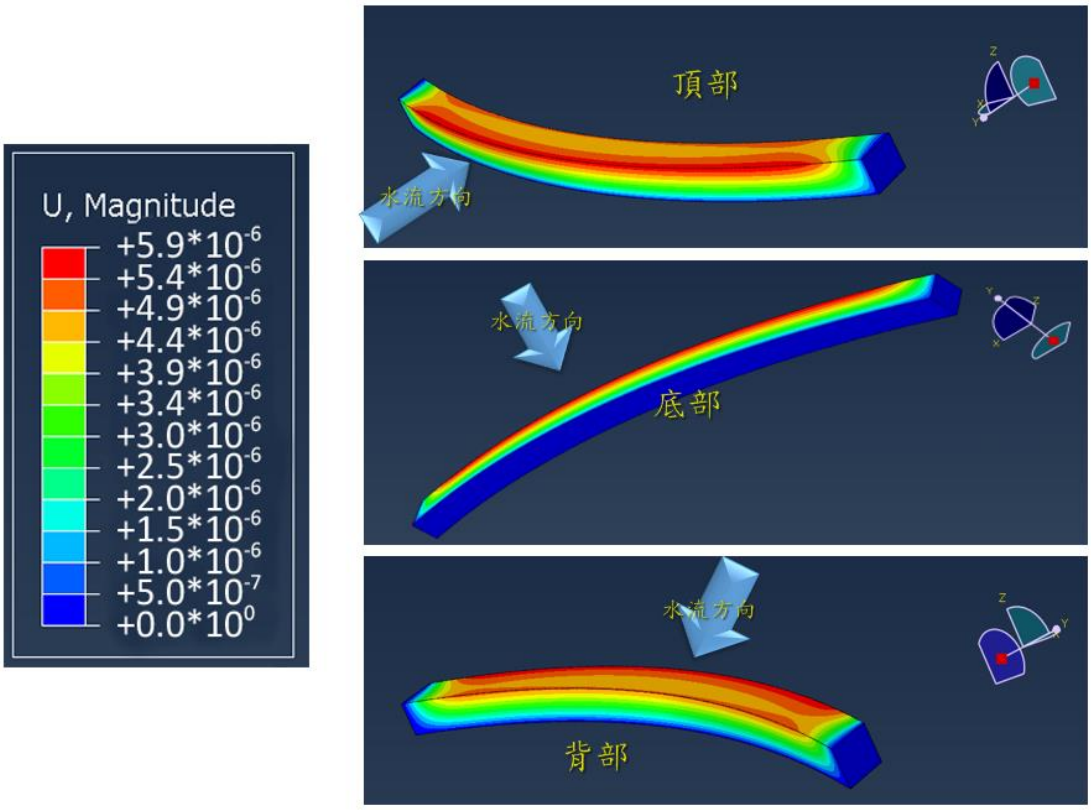


圖 4-38 弧長 34.6513m 上拱型固床工力位移分布情形

(二)弧長為 35.4552m 上拱型固床工模擬成果

1.應力:

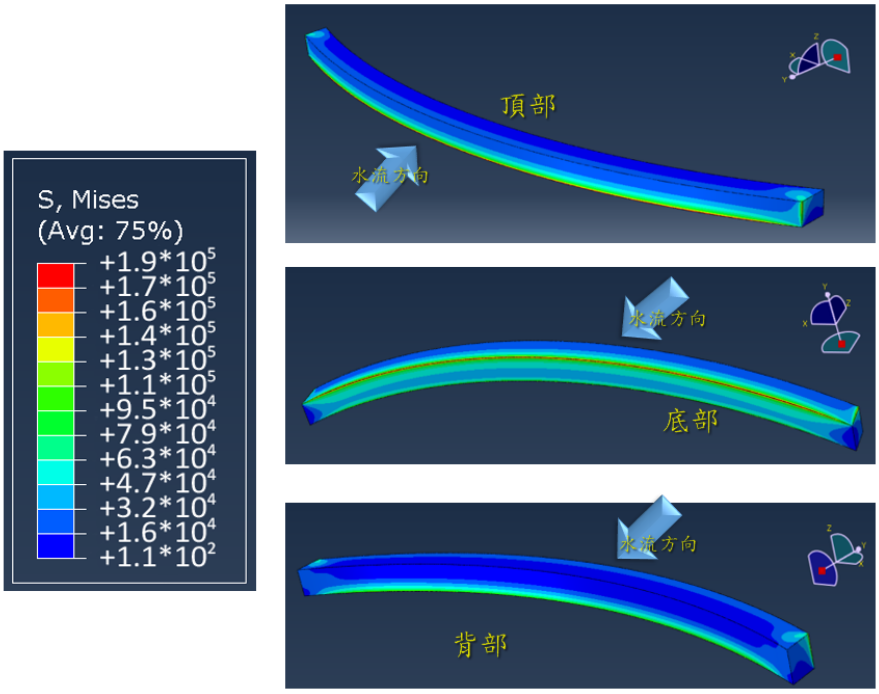


圖 4-39 弧長 35.4552m 上拱型固床工應力分布情形

2.力矩:

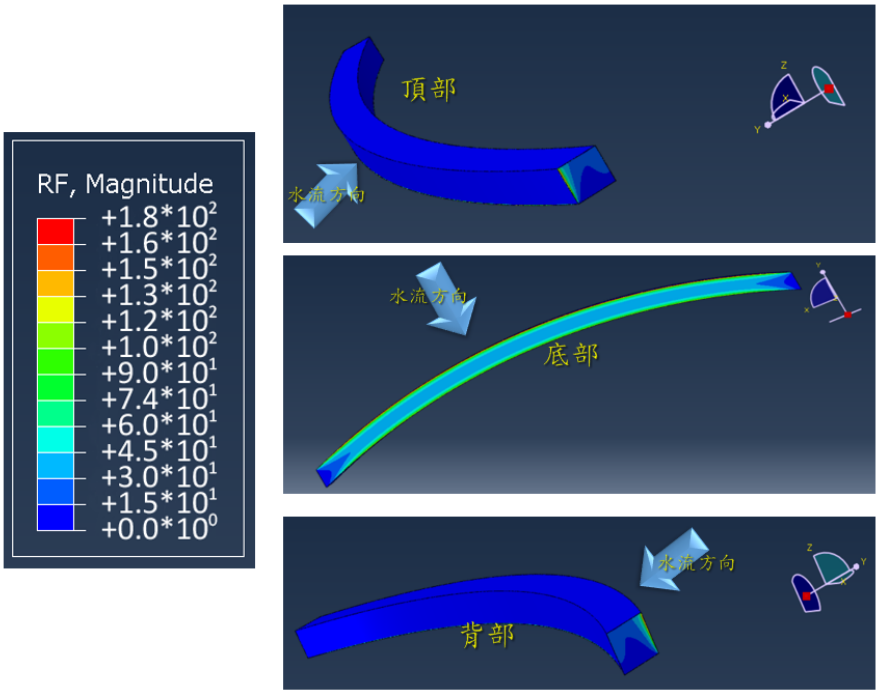


圖 4-40 弧長 35.4552m 上拱型固床工力矩分布情形

3.位移:

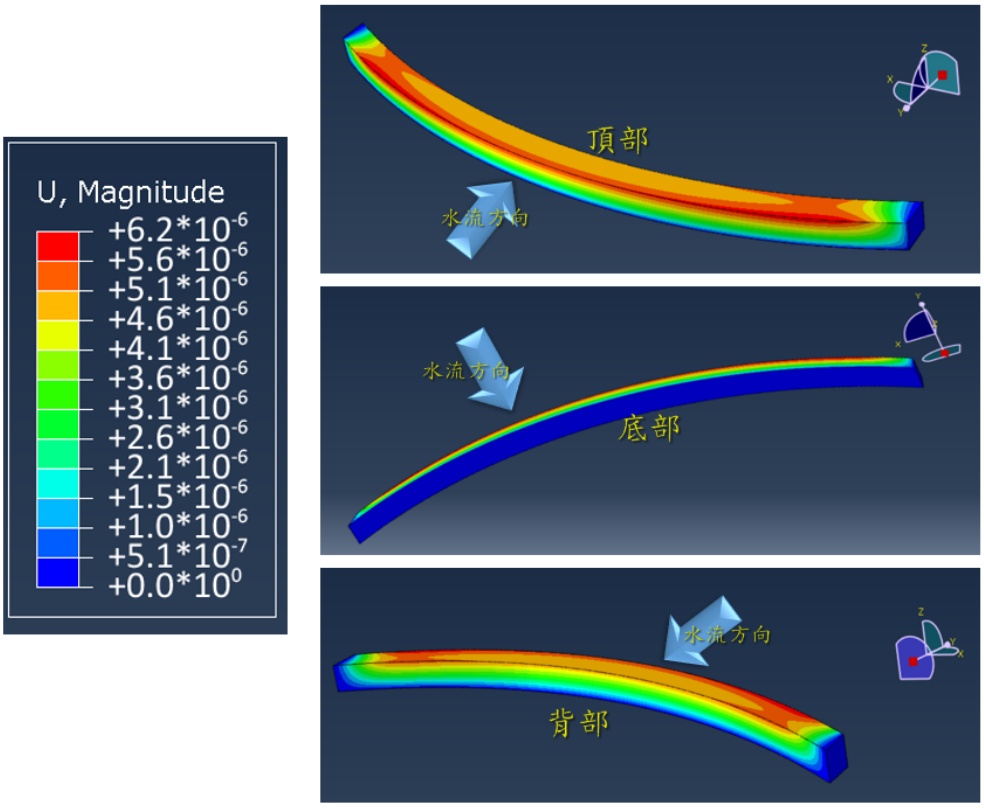


圖 4-41 弧長 35.4552m 上拱型固床工位移分布情形

(三)弧長為 36.5625m 上拱型固床工模擬結果

1.應力

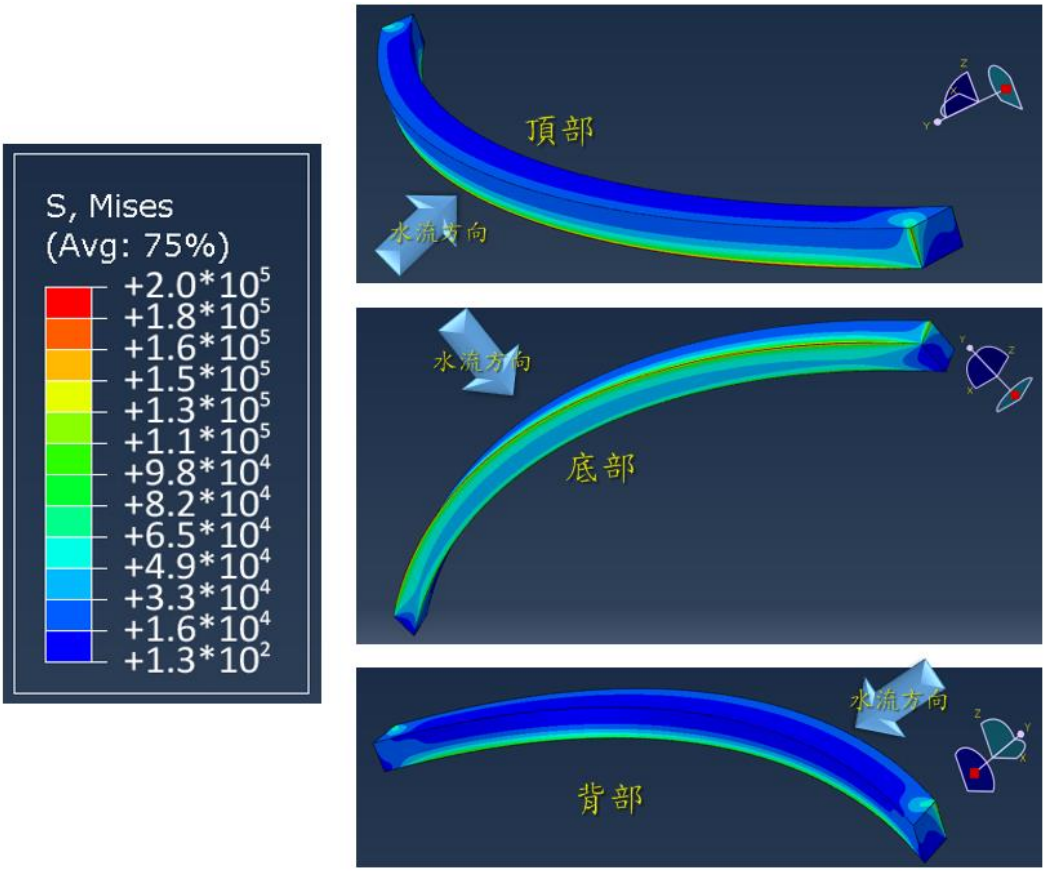


圖 4-42 弧長 36.5625m 上拱型固床工應力分佈情形

2.力矩

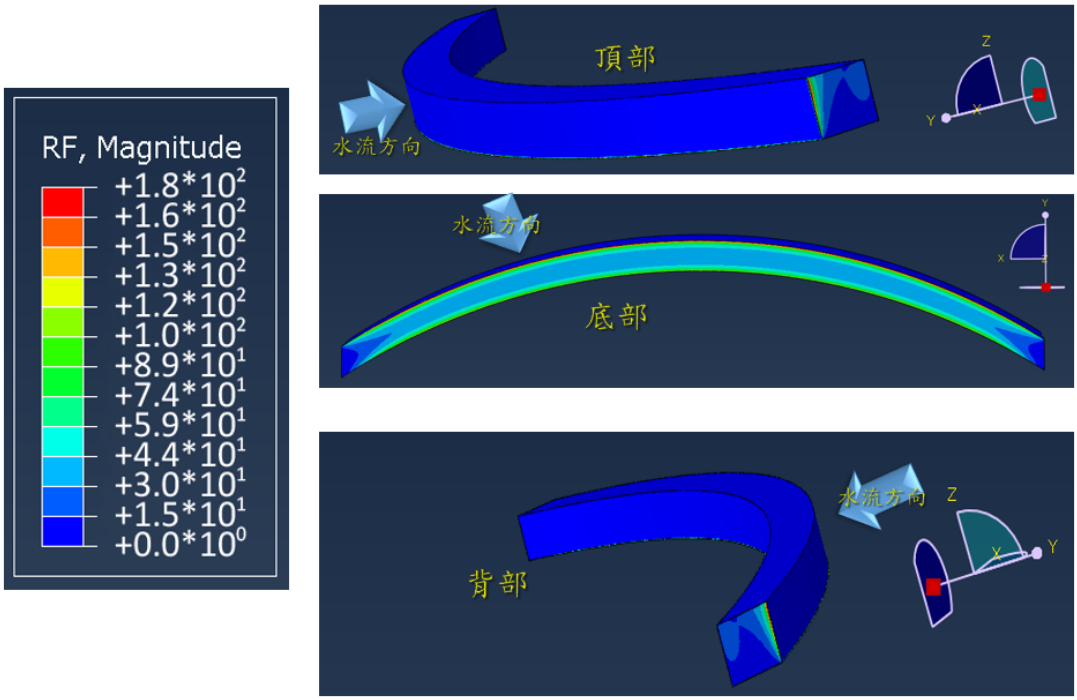


圖 4-43 弧長 36.5625m 上拱型固床工力矩分佈情形

3.位移

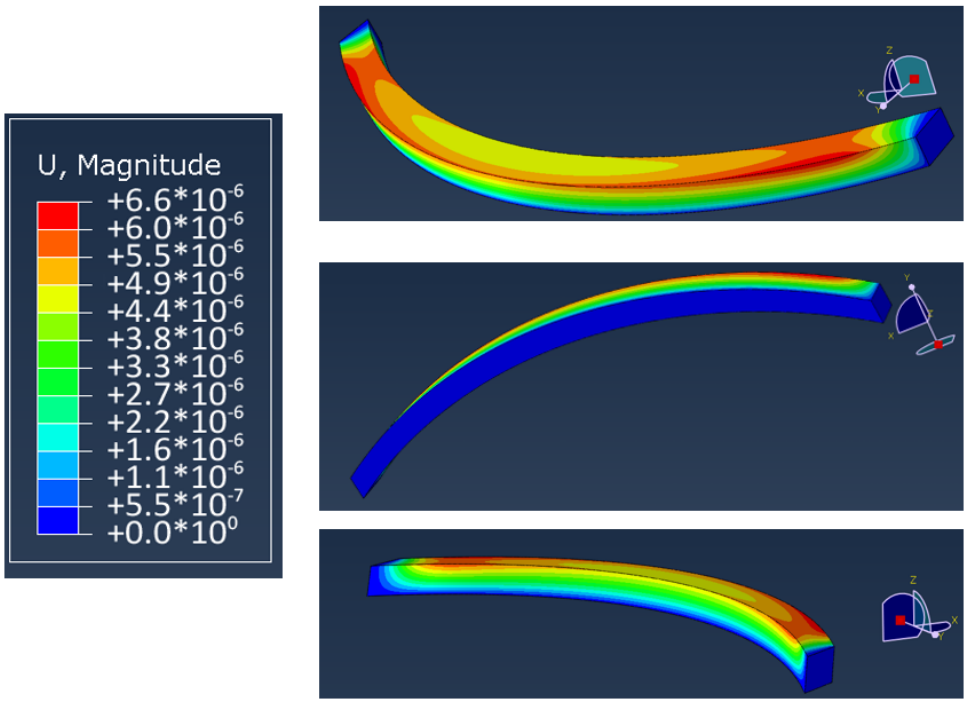


圖 4-44 弧長 36.5625m 上拱型固床工位移分佈情形

(四)弧長為 37.6574m 之上拱型固床工模擬成果

1.應力:

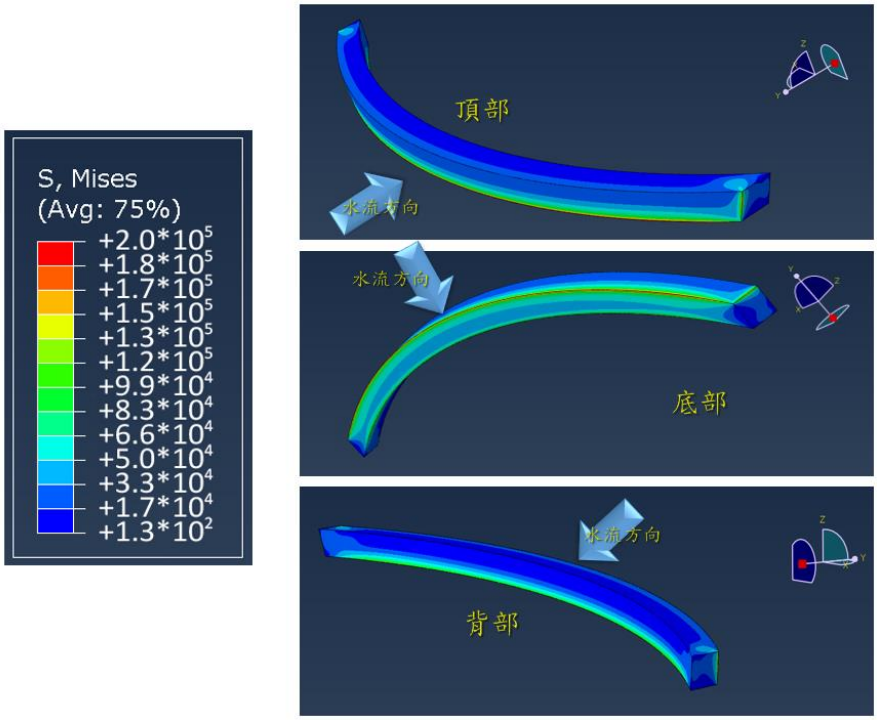


圖 4-45 弧長 37.6574m 上拱型固床工應力分布情形

2.力矩:

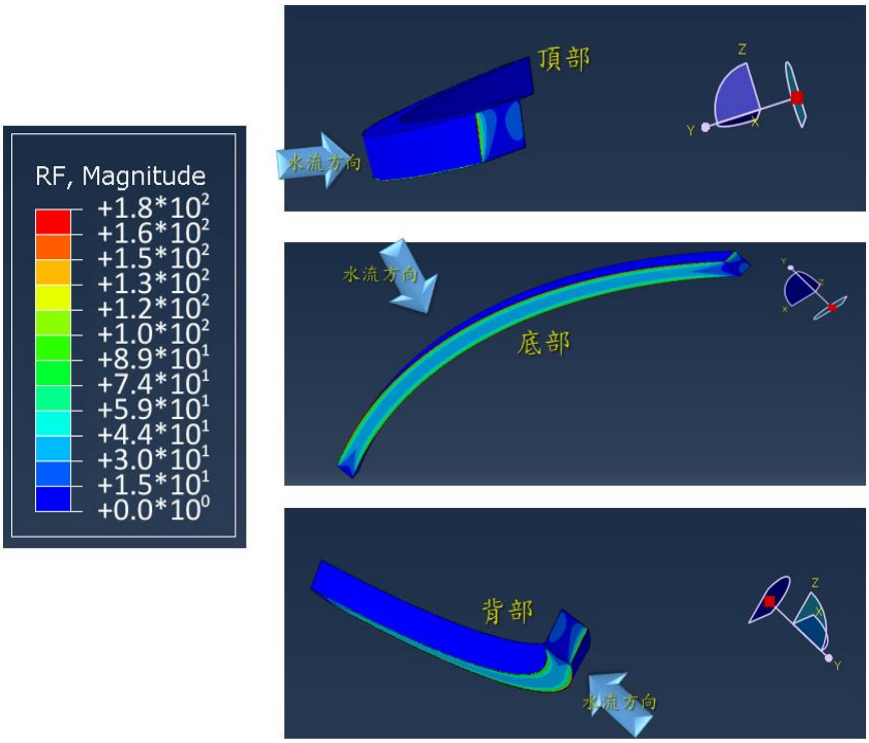


圖 4-46 弧長 37.6574m 上拱型固床工力矩分布情形

3.位移:

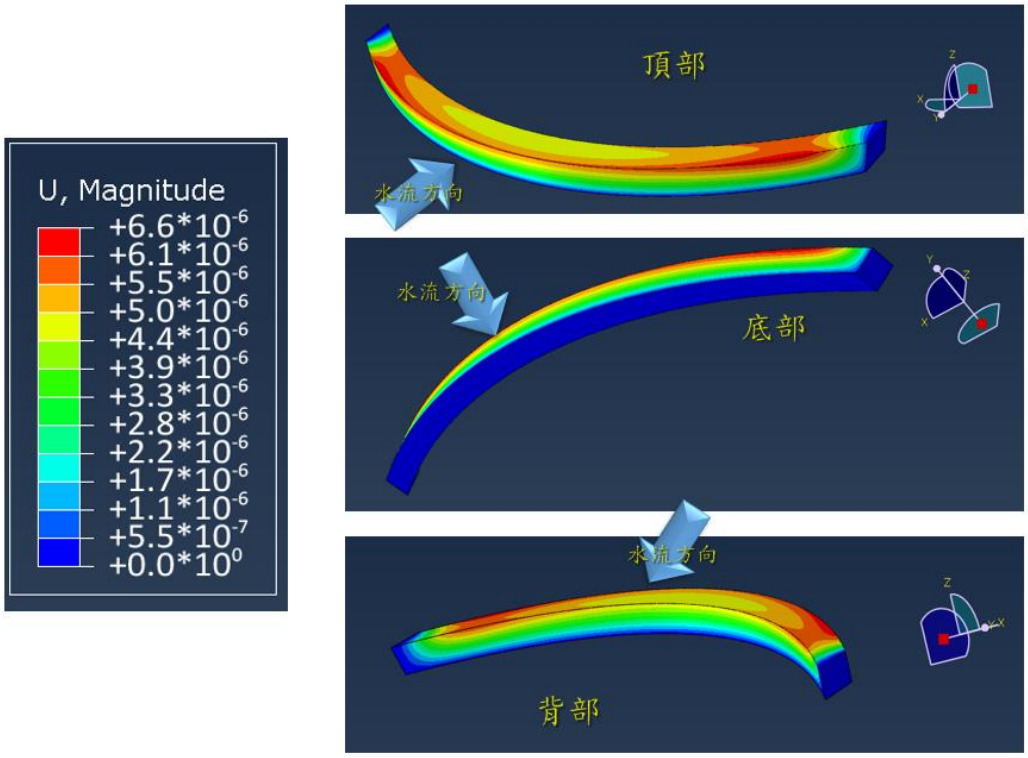


圖 4-47 弧長 37.6574m 上拱型固床工位移分布情形

(五)弧長為 39.6188m 之上拱型固床工模擬成果

1.應力:

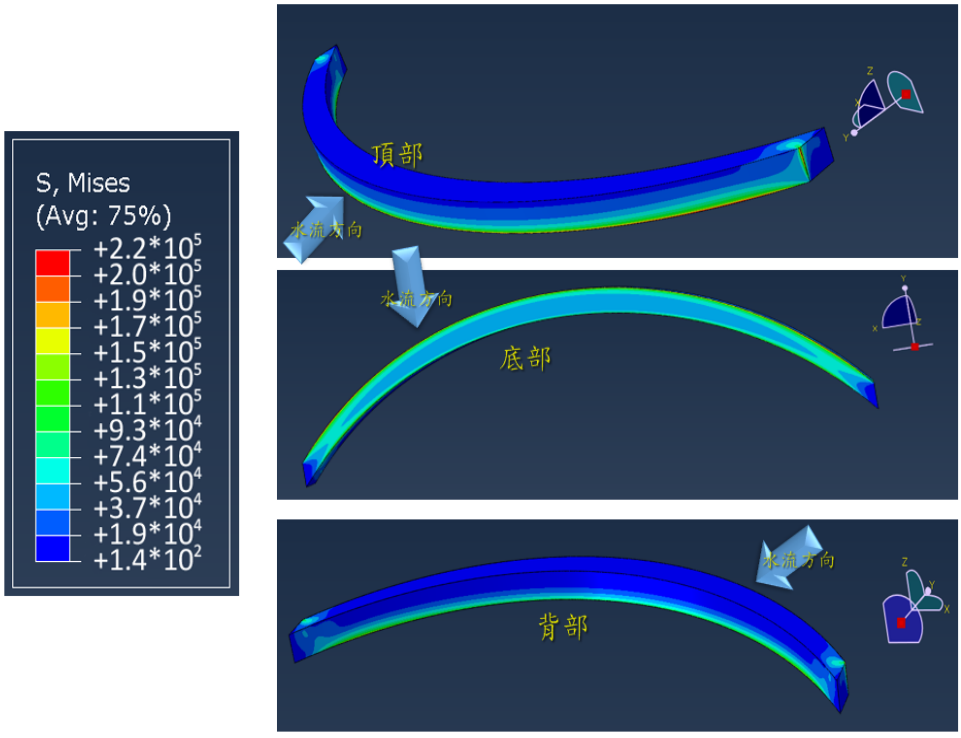


圖 4-48 弧長 39.6188m 上拱型固床工應力分布情形

2.力矩:

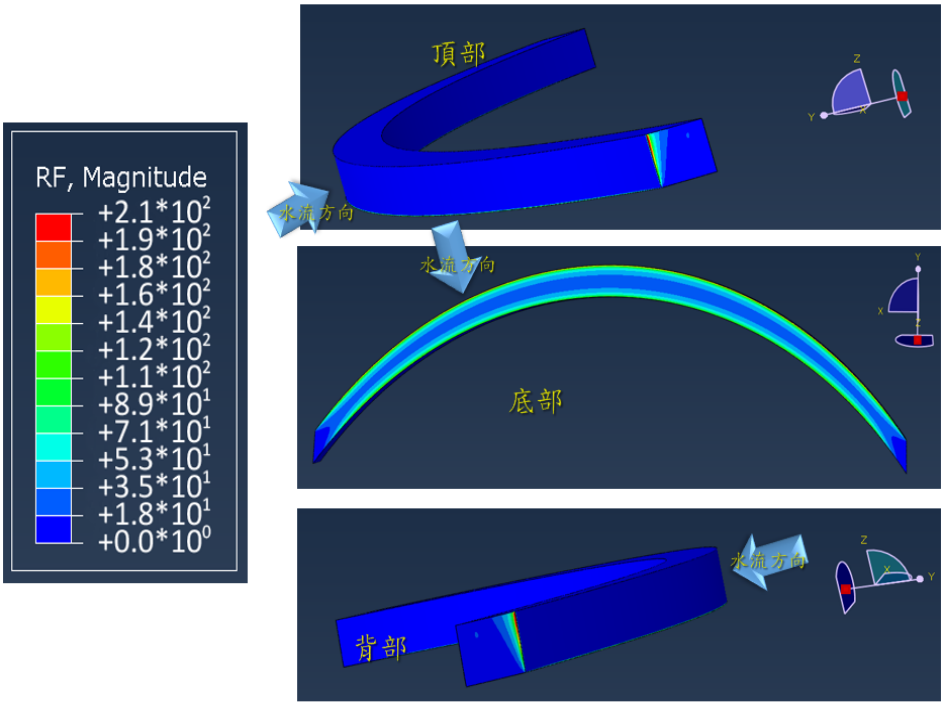


圖 4-49 弧長 39.6188m 上拱型固床工力矩分布情形

3.位移:

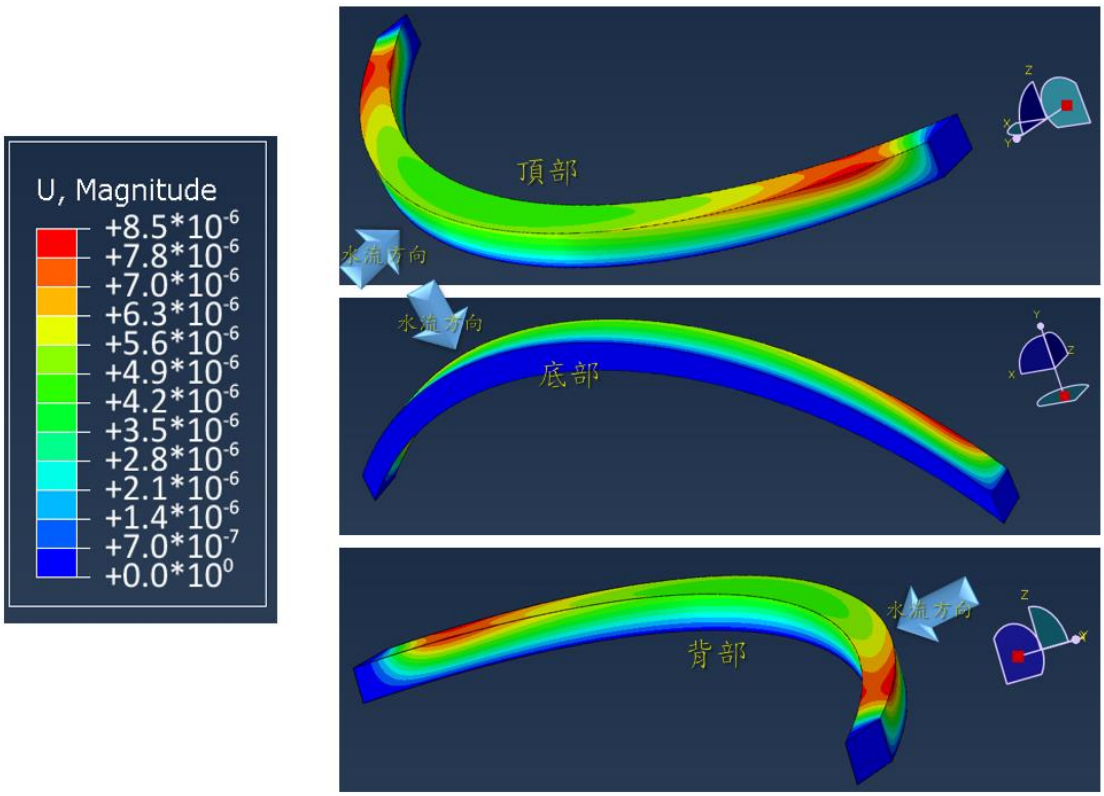


圖 4-50 弧長 39.6188m 上拱型固床工位移分布情形

(六)上拱型固床工應力模擬結果討論

從圖 4-36、4-39、4-42、4-45 以及 4-48 可以看出，針對上拱型固床工，其最大應力會隨著拱度增加而上升，其上升趨勢如圖 4-51 所示，隨著弧長的增加其應力變化也增加。

而其最小應力與弧長關係如圖 4-52 所示，其趨勢也為隨著拱度增加而上升，隨著弧長的增加其應力變化趨緩，值得注意的是弧長為 39.6188 的固床工，其最小應力是較弧長為 37.9574 的固床工為小的。

此外並可由上方之模擬圖觀察到固床工其背部之受力較大區域也隨拱度增加而上升，且分布位置也隨之較靠近固床工中間處，而其底部之受力情形分布則隨著拱度增大而顯得更加平均。

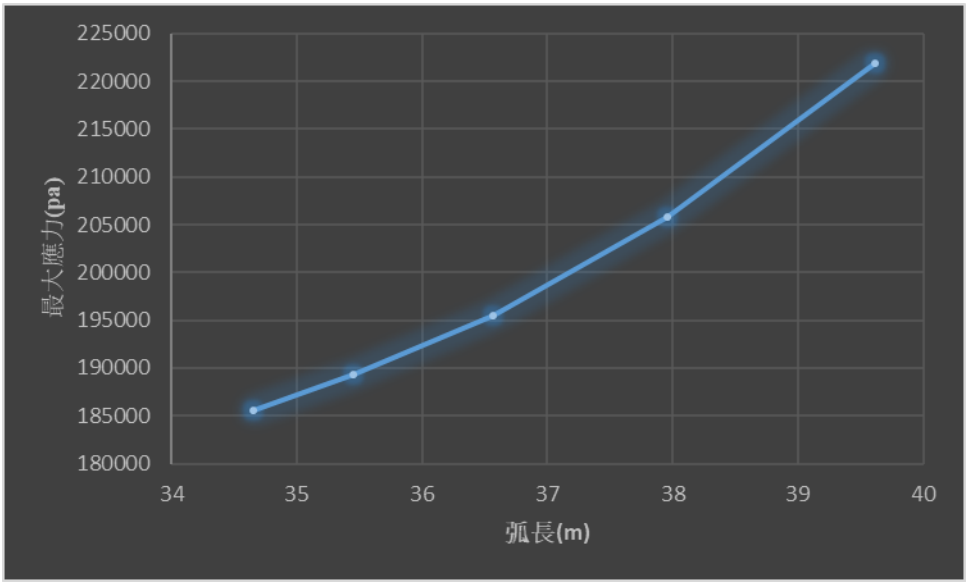


圖 4-51 上拱型固床工最大應力與弧長關係圖

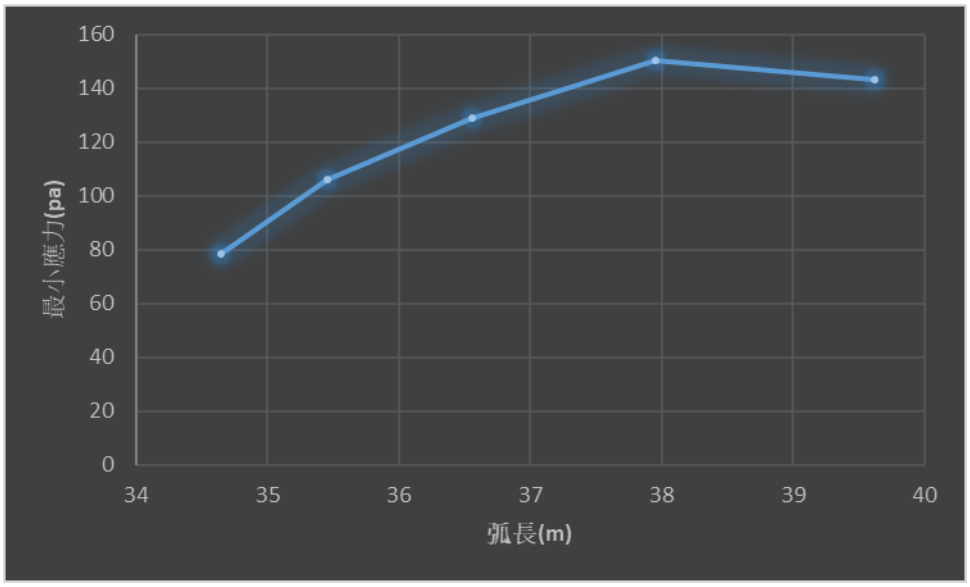


圖 4-52 上拱型固床工最小應力與弧長關係圖

(七)上拱型固床工力矩模擬結果討論

從圖 4-37、4-40、4-43、4-46 以及 4-49 可以看出，隨著拱度增加固床工之最大力矩其有輕微變小之趨勢，如圖 4-53 所示，然而在弧長由 37.9524m 變成 39.6188m 時可以看到其力矩急遽增加，初步判斷為其拱度已到達一臨界值而導致固床工上游面之兩岸處有較大之力矩值產生，但為了更了解其細部變化趨勢，本團隊增加模擬三組不同弧長之試驗，弧長分別為 38.7584m、40.5408m 以及 41.5217m 共三組，模擬結果如圖 4-54，從圖可以看到力矩最小是弧長為 36.5625m 之固床工，而於後方急遽增加之力矩值上升之趨勢近乎相同。

此外也有觀察固床工底部之力矩分布會隨著拱度增加而會有力矩分布較大處往上下游面集中之情形，較不均勻的情形產生。

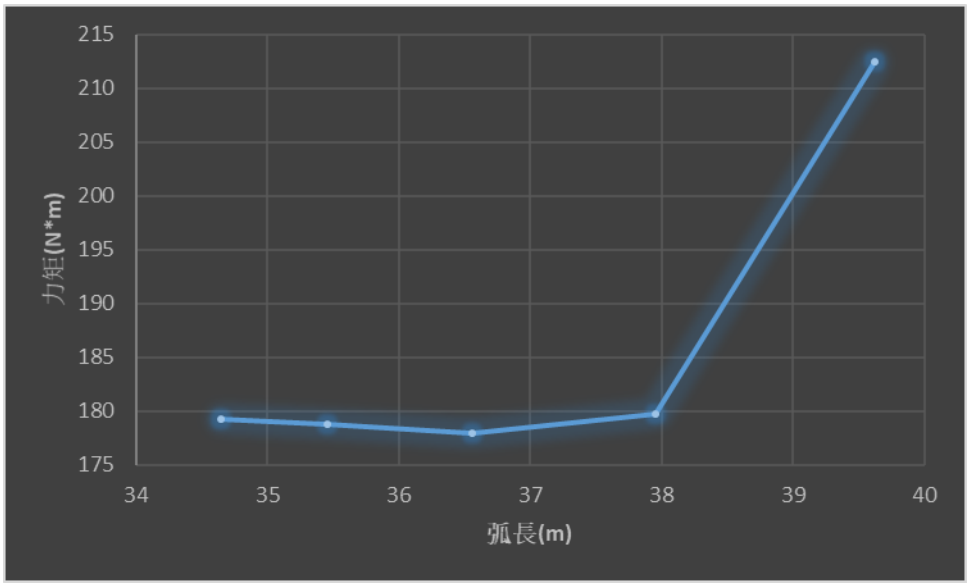


圖 4-53 上拱型固床工最大力矩值與弧長關係圖(1)

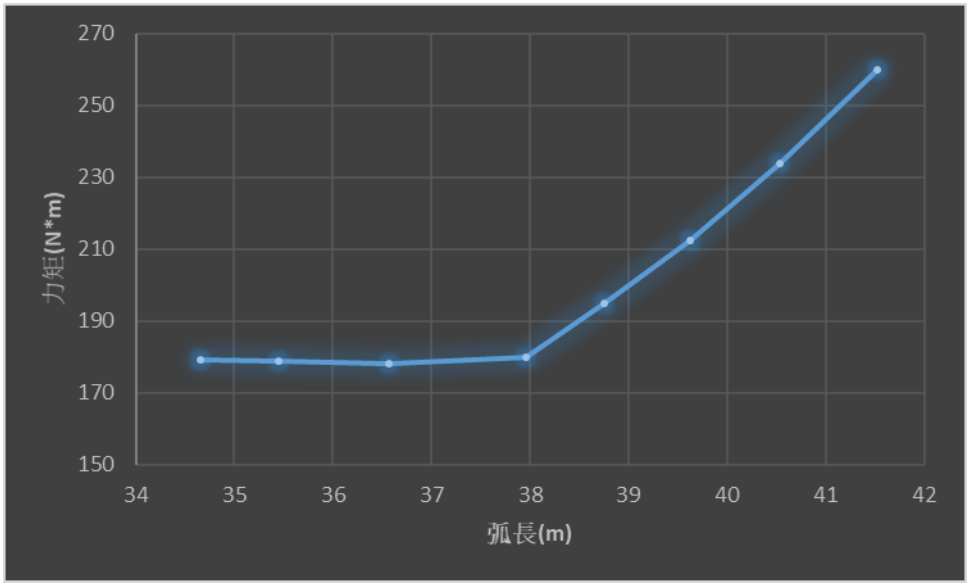


圖 4-54 上拱型固床工最大力矩值與弧長關係圖(2)

(八)上拱型固床工位移模擬結果討論

從圖 4-38、4-41、4-44、4-47 及 4-50 可以看出，其最大位移之數值會隨著拱度而增加，如圖 4-56 所示，可以發現增加的趨勢微小但可以看出其變化量是隨拱度增加而上升的。

另外也可以由模擬結果觀察到的是隨著拱度增加，其位移最大分布處是由均佈於固床工中段部分往左右兩岸靠近的，

且佔整體面積之比重也減少許多，推估是因為拱頂將力往兩邊分散以及邊壁施予反作用力之緣故。

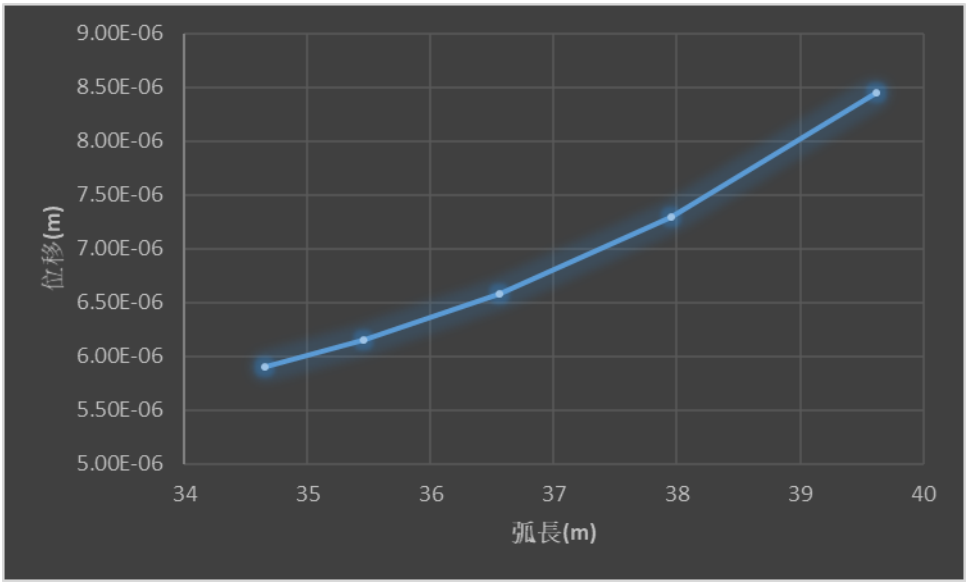


圖 4-55 上拱型固床工最大位移與弧長關係圖

七、模擬不同拱度之下拱型固床工

此部分模擬針對不同拱度之下拱型固床工進行分析比較，透過數值模擬分析在相同外在條件下，因拱度不同而造成的影響以及變化，除原現地尺寸之固床工外，此部份額外模擬尺寸如圖 4-35 所示

(一)弧長為 34.6513m 之下拱型固床工模擬成果

1.應力

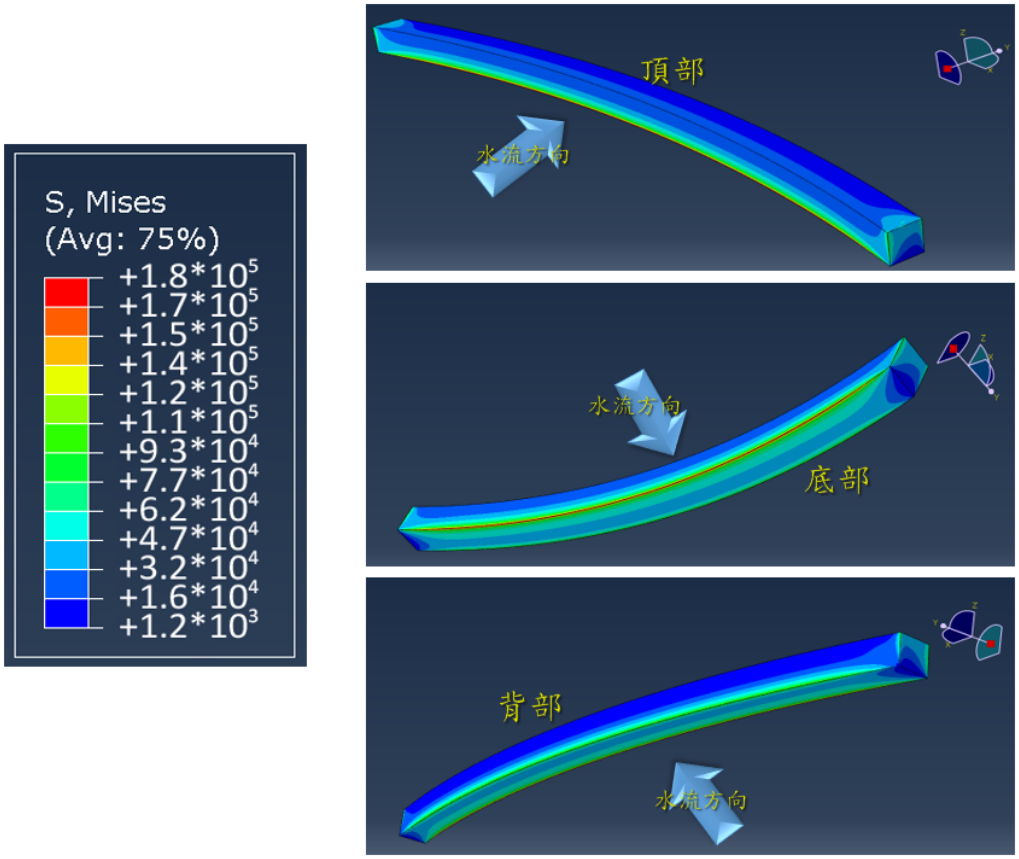


圖 4-56 弧長 34.6513m 下拱型固床工應力分布情形

2.力矩

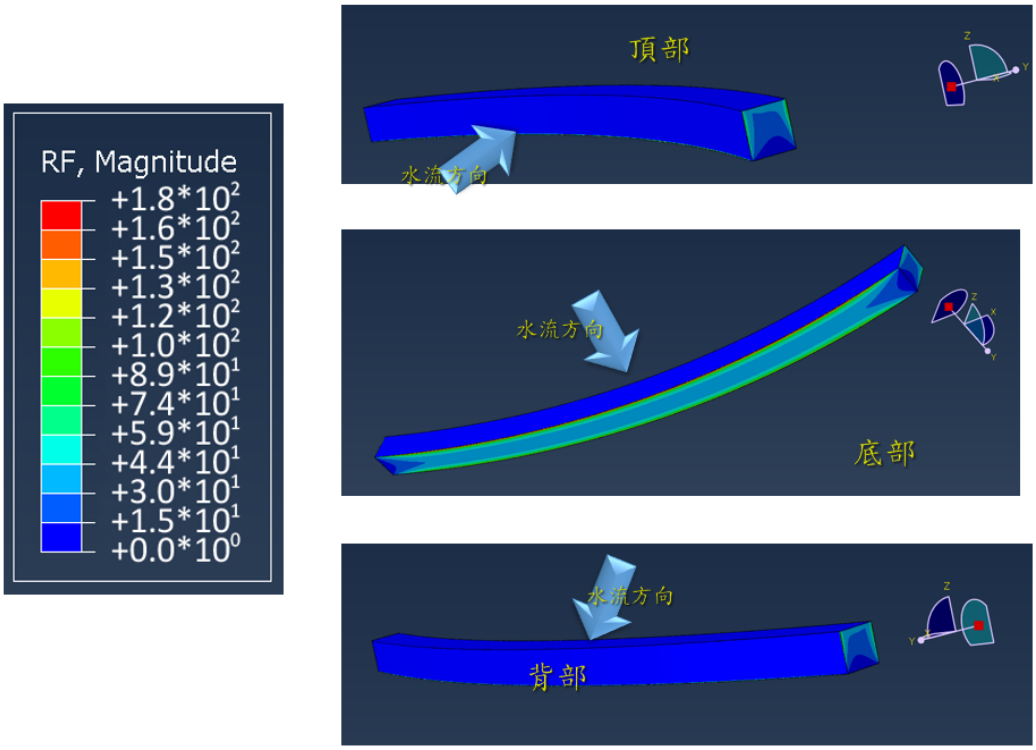


圖 4-57 弧長 34.6513m 下拱型固床工力矩分布情形

3.位移

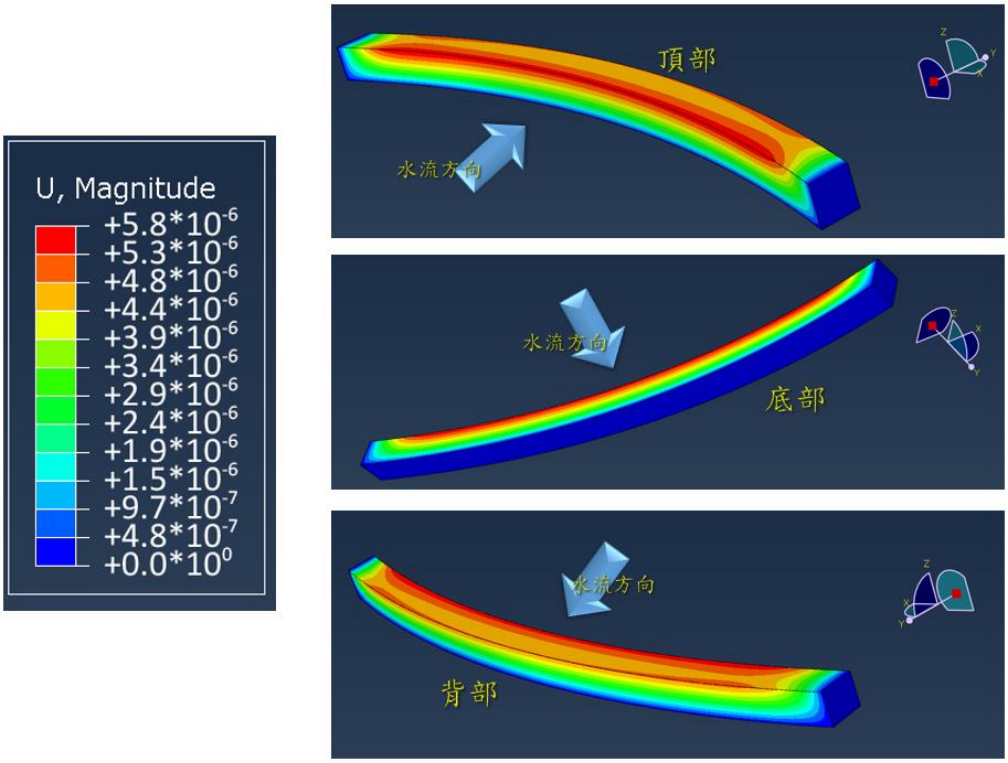


圖 4-58 弧長 34.6513m 下拱型固床工位移分布情形

(二)弧長為 35.4552m 之下拱型固床工模擬成果

1.應力

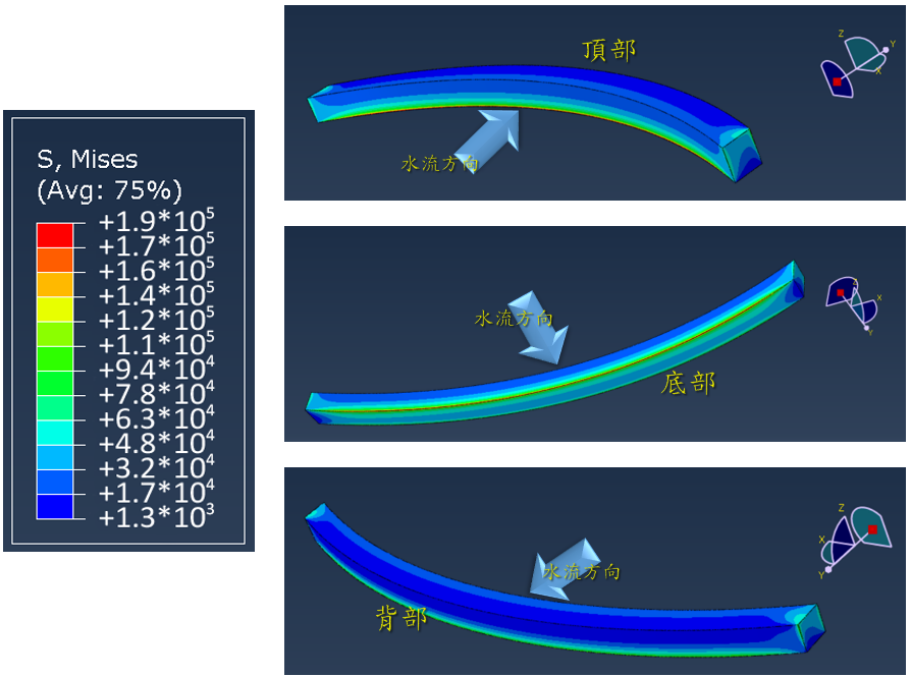


圖 4-59 弧長 35.4552m 下拱型固床工應力分布情形

2.力矩

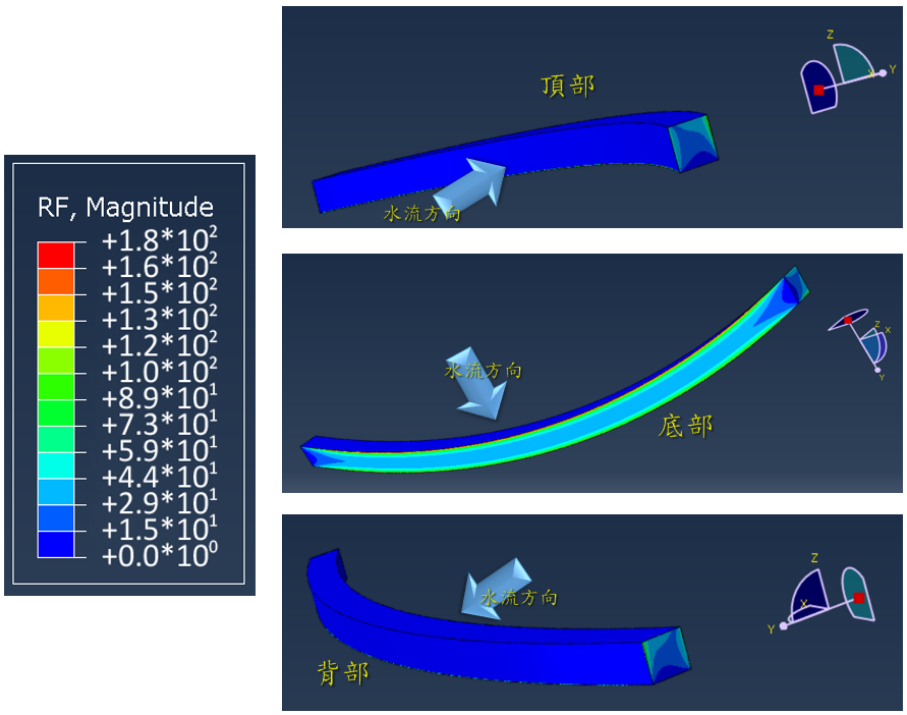


圖 4-60 弧長 35.4552m 下拱型固床工力矩分布情形

3.位移

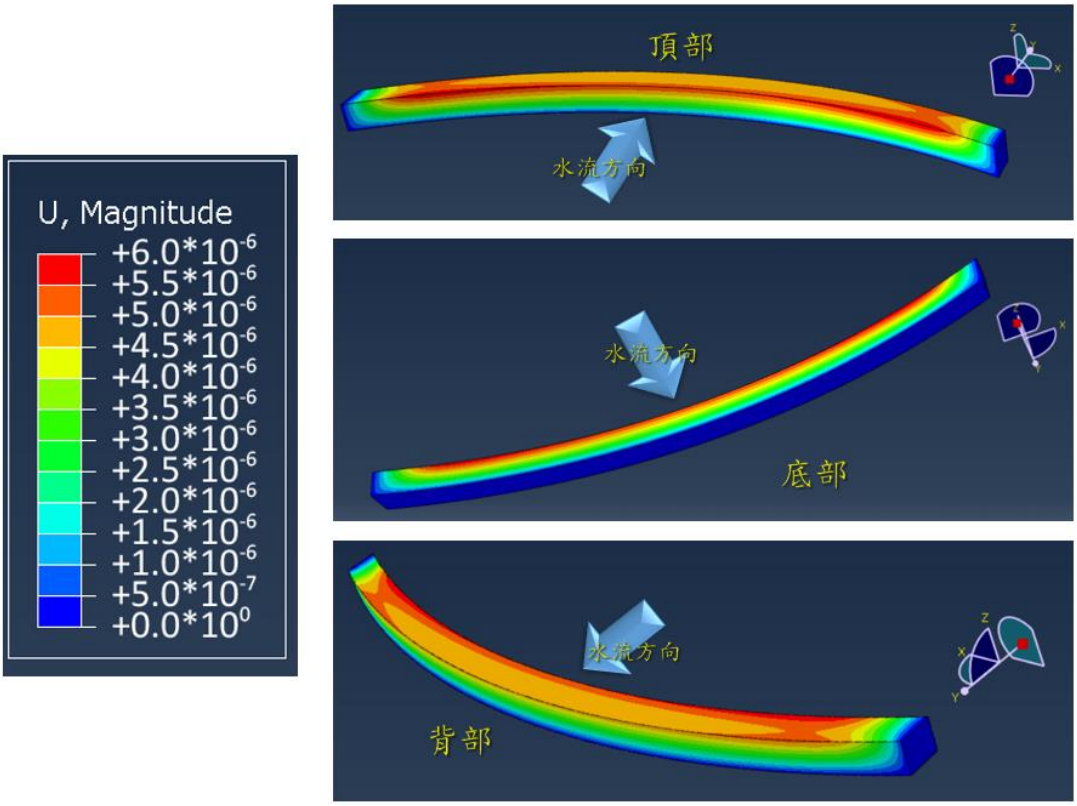


圖 4-61 弧長 35.4552m 下拱型固床工位移分布情形

(三)弧長為 36.5625m 之下拱型固床工模擬成果

1.應力

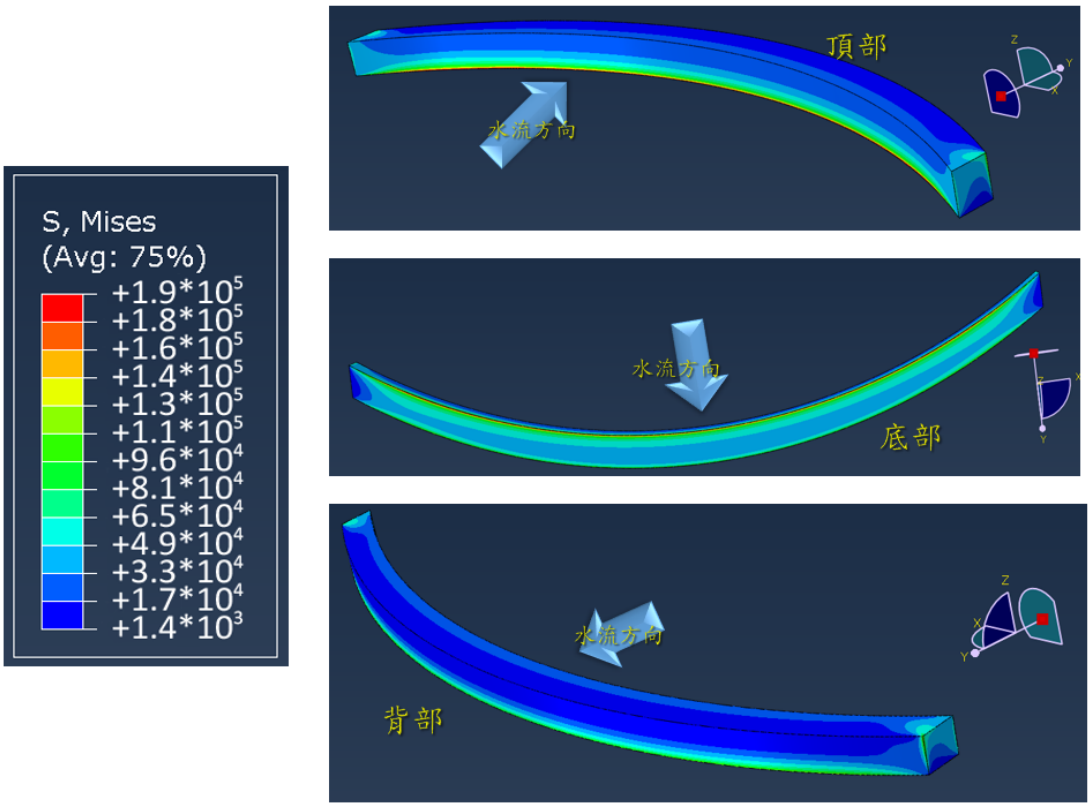


圖 4-62 弧長 36.5625m 下拱型固床工應力分布情形

2.力矩

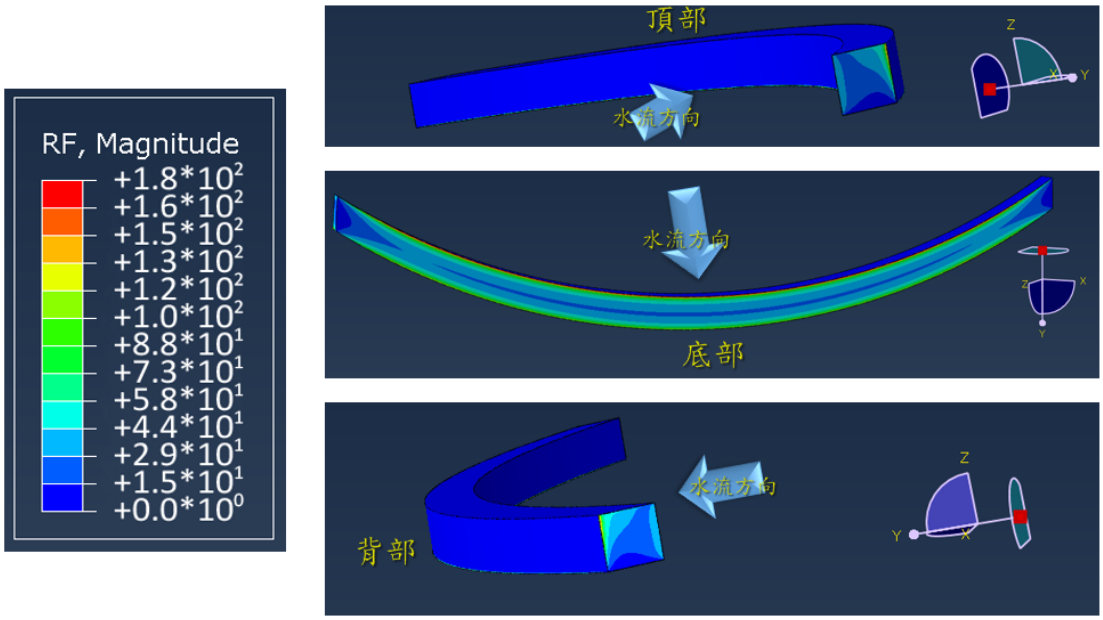


圖 4-63 弧長 36.5625m 下拱型固床工力矩分布情形

3.位移

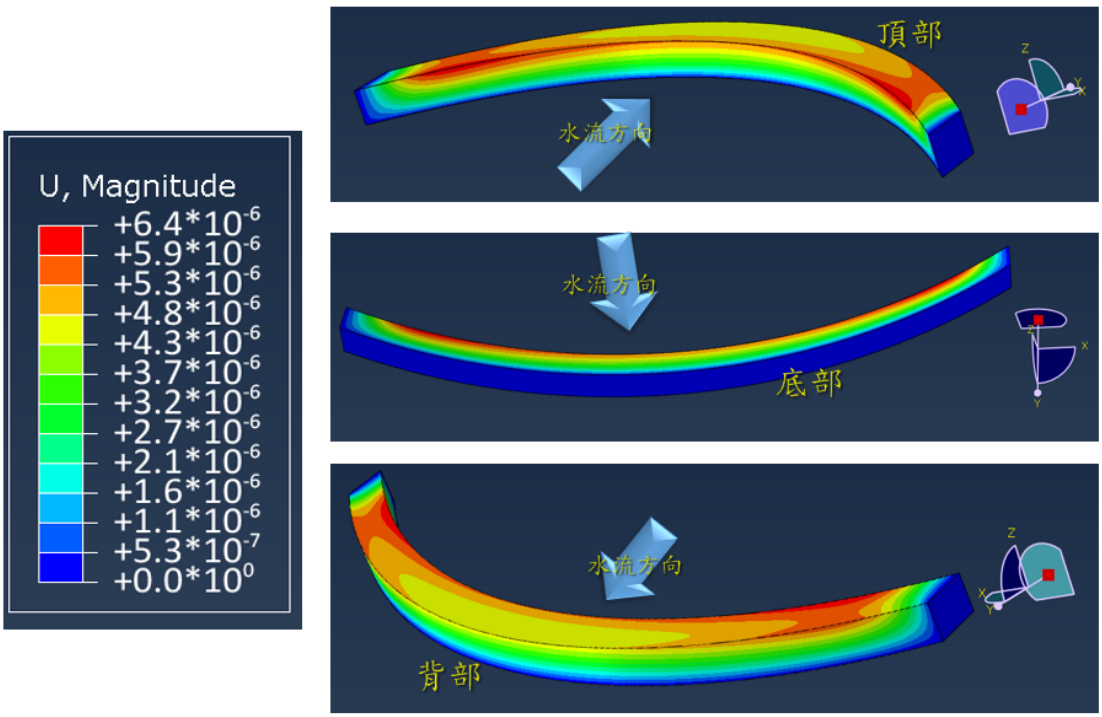


圖 4-64 弧長 36.5625m 下拱型固床工位移分布情形

(四)弧長為 37.9574m 之下拱型固床工模擬成果

1.應力

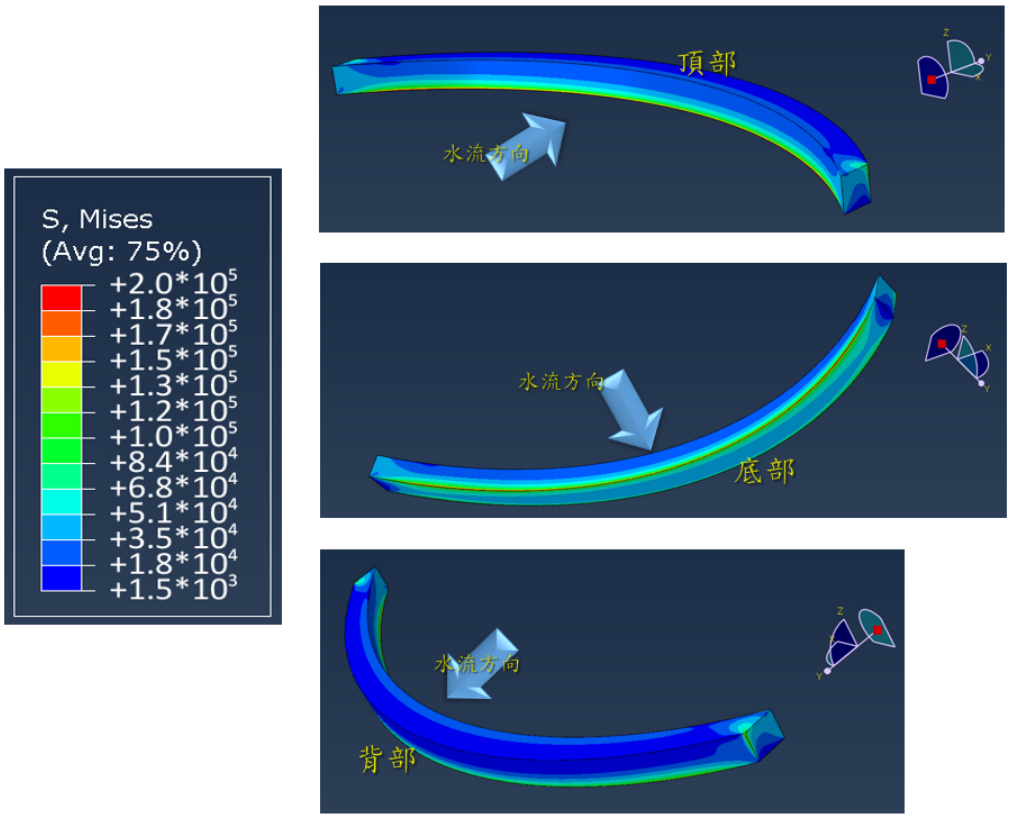


圖 4-65 弧長 37.9574m 下拱型固床工應力分布情形

2.力矩

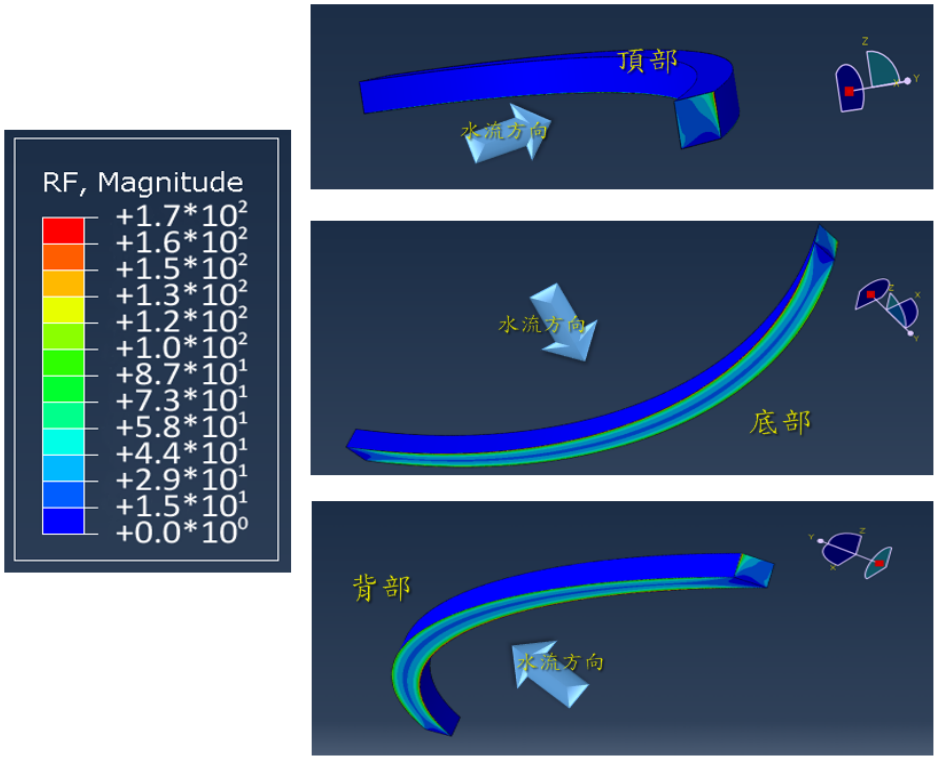


圖 4-66 弧長 37.9574m 下拱型固床工應力分布情形

3.位移

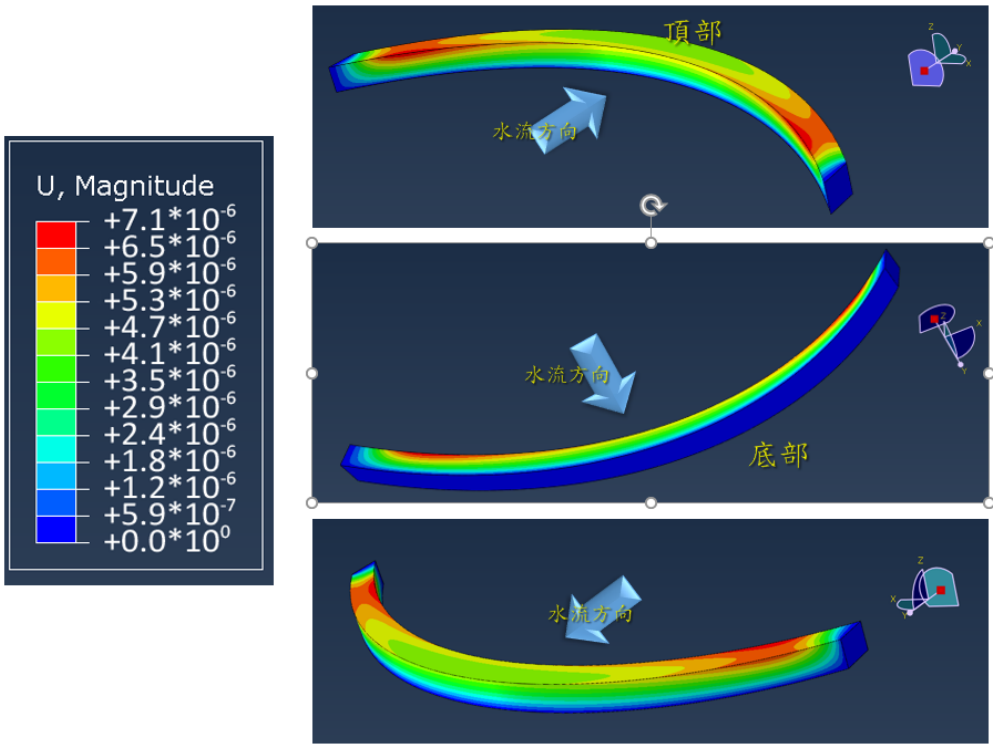


圖 4-67 弧長 37.9574m 下拱型固床工位移分布情形

(五)弧長為 39.6188m 之下拱型固床工模擬成果

1.應力

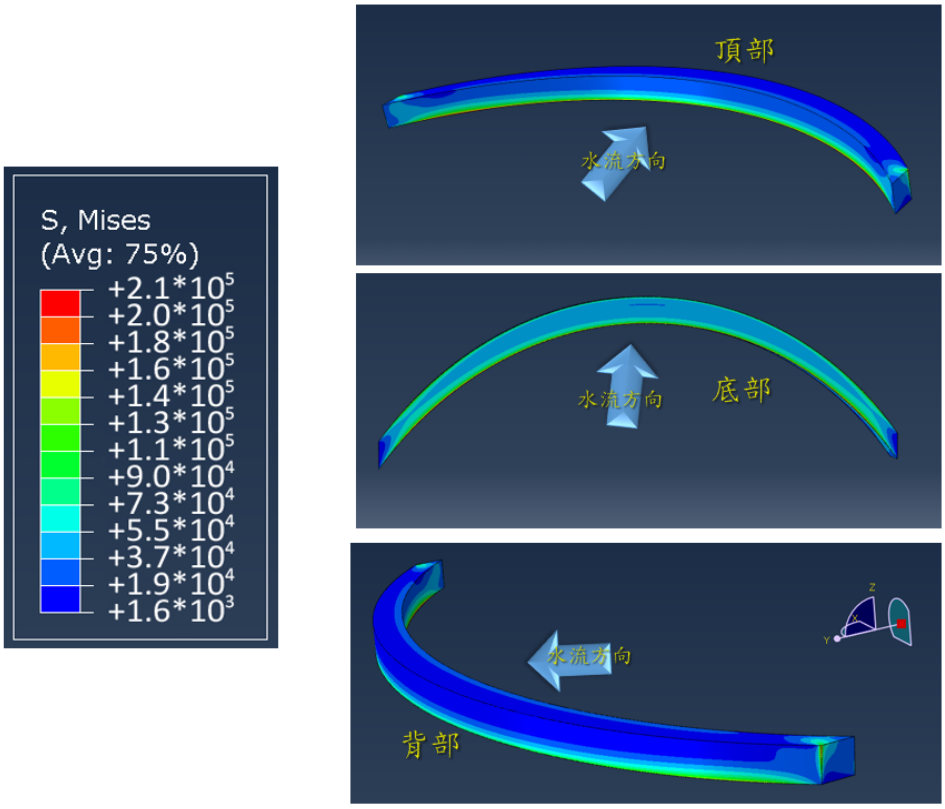


圖 4-68 弧長 39.6188m 下拱型固床工應力分布情形

2.力矩

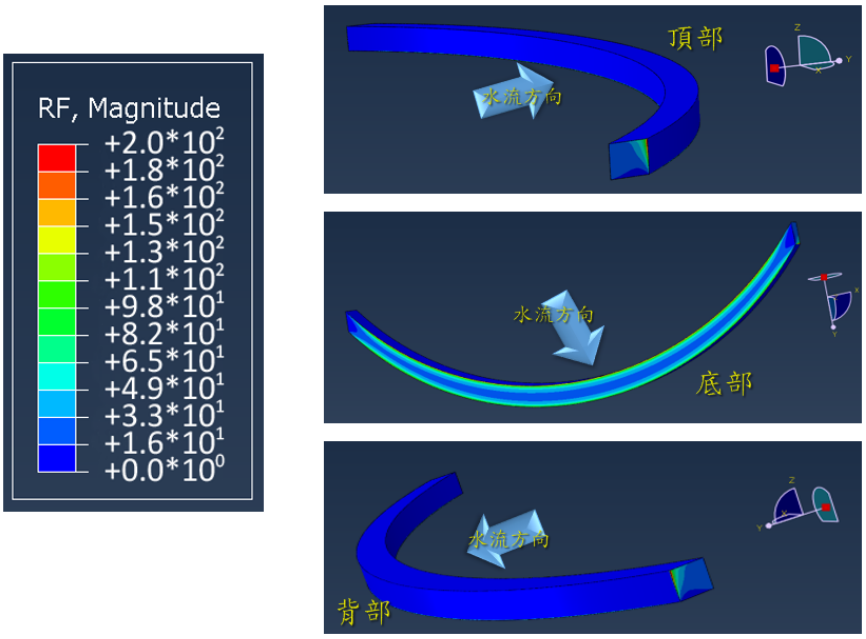


圖 4-69 弧長 39.6188m 下拱型固床工力矩分布情形

3.位移

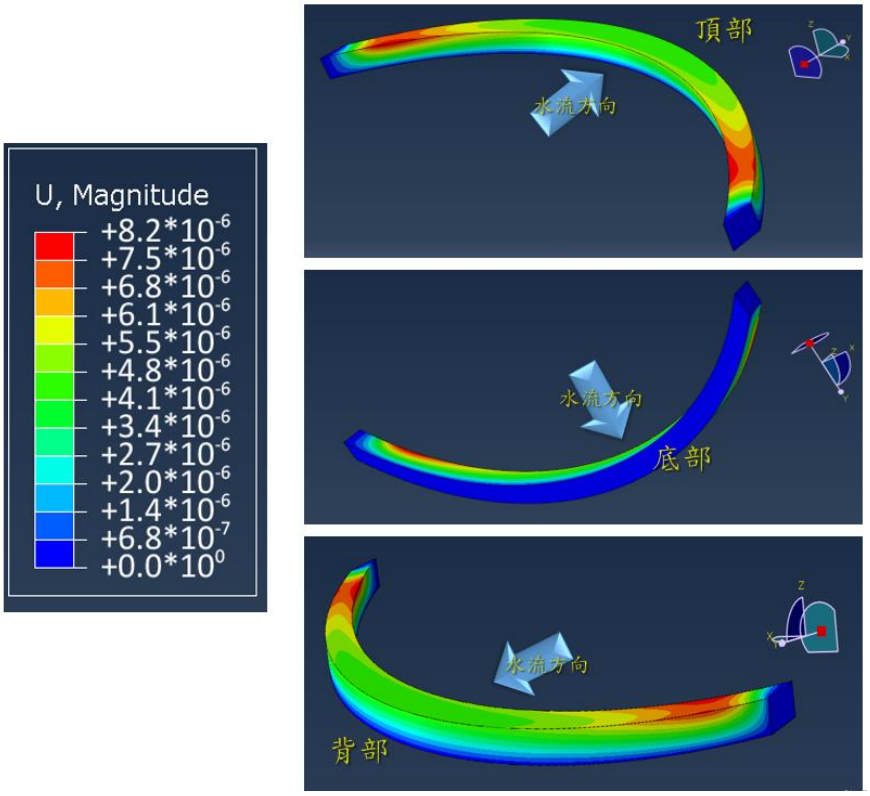


圖 4-70 弧長 39.6188m 下拱型固床工位移分布情形

(六)下拱型固床工應力模擬結果討論

從圖 4-56、4-59、4-62、4-65 和 4-68 可以看到，對於下

拱型固床工，其最大之等效應力均分布於上游面底部且數值會隨著拱度增加而上升，如圖 4-71 所示，且可以看到隨著拱度增加其最大等效應力增加之幅度也較大，而最小等效應力的部分則可以看到也隨著拱度增加而上升，然而其在拱度增加下增加之幅度會趨緩如圖 4-72。

而其底部之受力情形分布則隨著拱度增大也顯得更加平均。

與上拱型相比，相同拱度之下拱型固床工其最大等效應力較小。如圖 4-73 所示，而上下拱之差值會隨著拱度增加而上升。

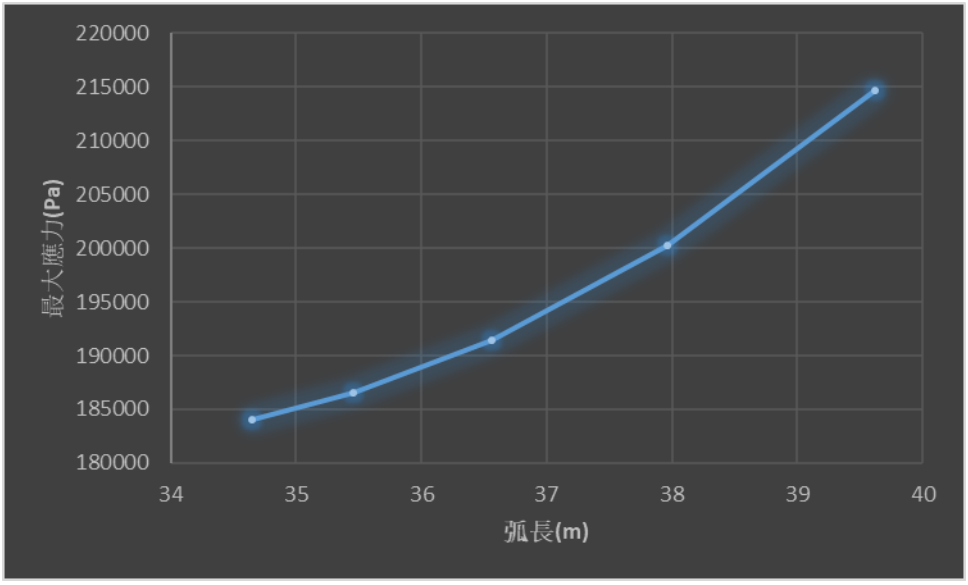


圖 4-71 下拱形固床工最大應力與弧長關係圖

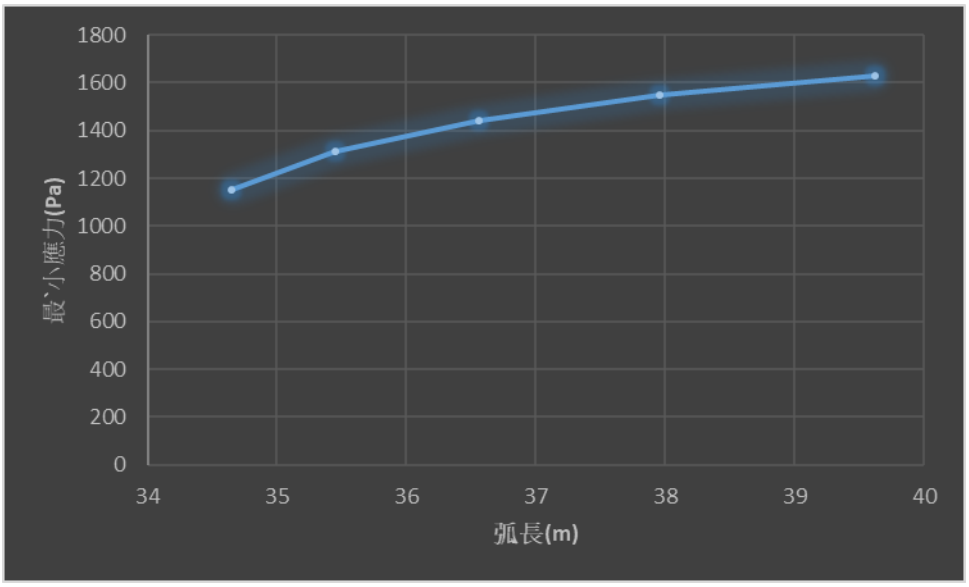


圖 4-72 下拱型固床工最小應力與弧長關係圖

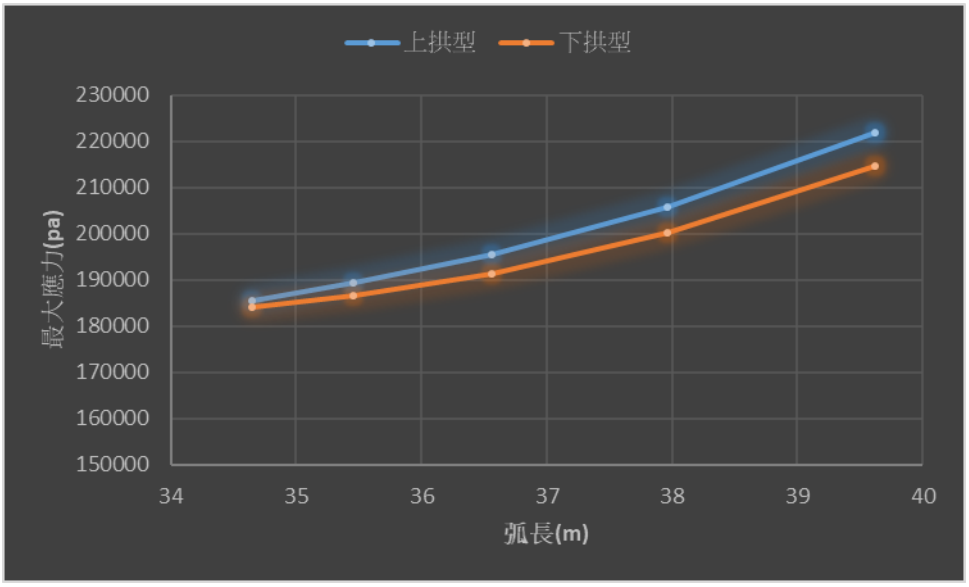


圖 4-73 上下拱型固床工應力與弧長關係圖

(七)下拱型固床工力矩模擬結果討論

從圖 4-57、4-60、4-63、4-66 以及 4-69 可以看出，其力矩變化較少趨勢不大，但隨著拱度增加固床工之最大力矩其有變小之趨勢，如圖 4-74 所示，然而如同上拱型固床工之情形，在弧長由 37.9574m 變成 39.6188m 時可以看到其力矩值急遽增加，初步判斷為其拱度已到達一臨界值而導致固床工

上游面之兩岸處有較大之力矩值產生。

與上拱型相似其底部之力矩分布隨著拱度增加而會有力矩較大處往上下游面集中之情形，並顯得較不均勻。

與上拱型相比，相同拱度之下拱型固床工其力矩也較小，如圖 4-75 所示，並都於弧長為 39.6188m 之固床工有急遽增大值產生。

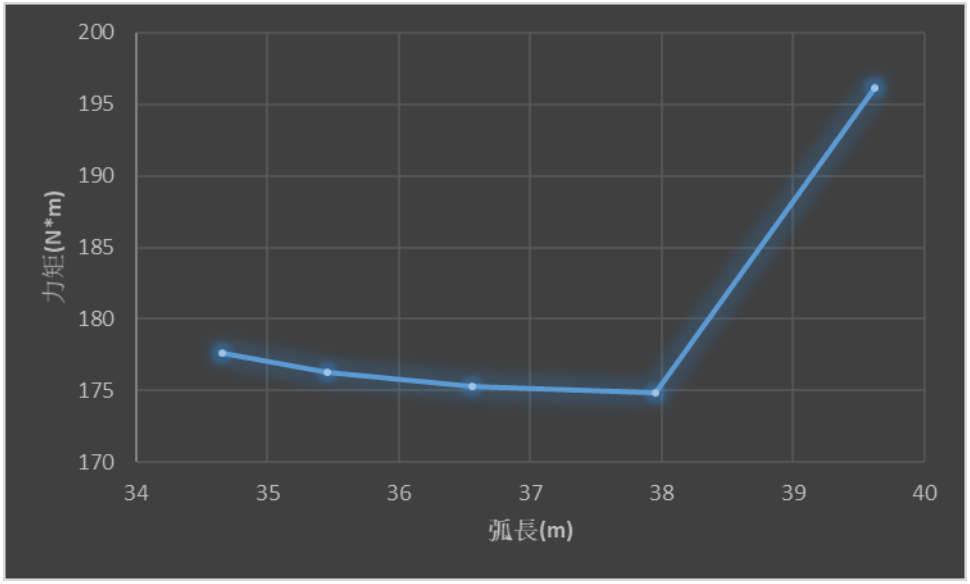


圖 4-74 下拱型固床工最大力矩與弧長關係圖

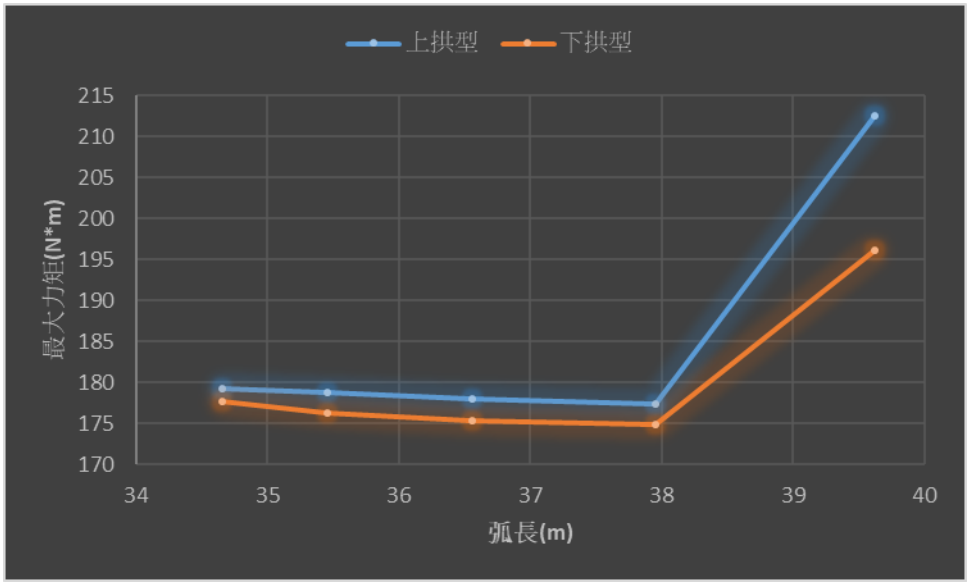


圖 4-75 上下拱最大力矩與弧長關係圖

(八)下拱型固床工位移模擬結果討論

從圖 4-58、4-61、4-64、4-67 以及 4-70 可以看出，其最大位移會隨著拱度而增加，如圖 4-76 所示，並可看到其增加之趨勢是正向的，也從模擬圖可以發現到隨著拱度增加，其位移最大分布處是往左右兩岸靠近的且佔面積之比重減少許多，推估是因為拱頂將力往兩邊分散以及兩岸邊壁之反作用力作用之緣故，與上拱型固床類似。

與上拱型相比，相同拱度之下拱型固床工其位移量也較小，如圖 4-77 所示，但於弧長為 39.6188m 時，卻會出現下拱型固床工之數值大於上拱型固床工之情形產生，可以發現下拱型固床工在弧長為 37.9574m 至 39.6188 時其變化較大。

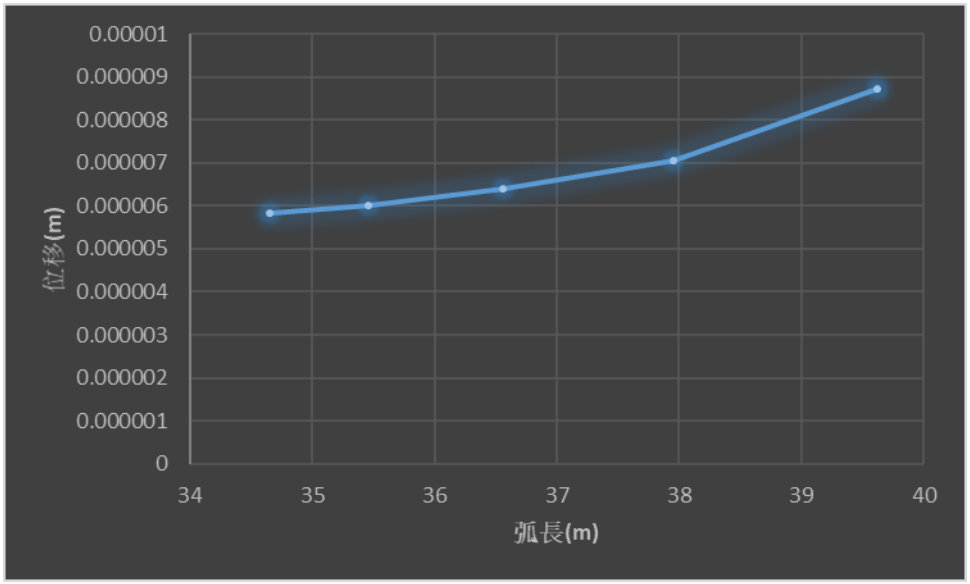


圖 4-76 最大位移與弧長關係圖

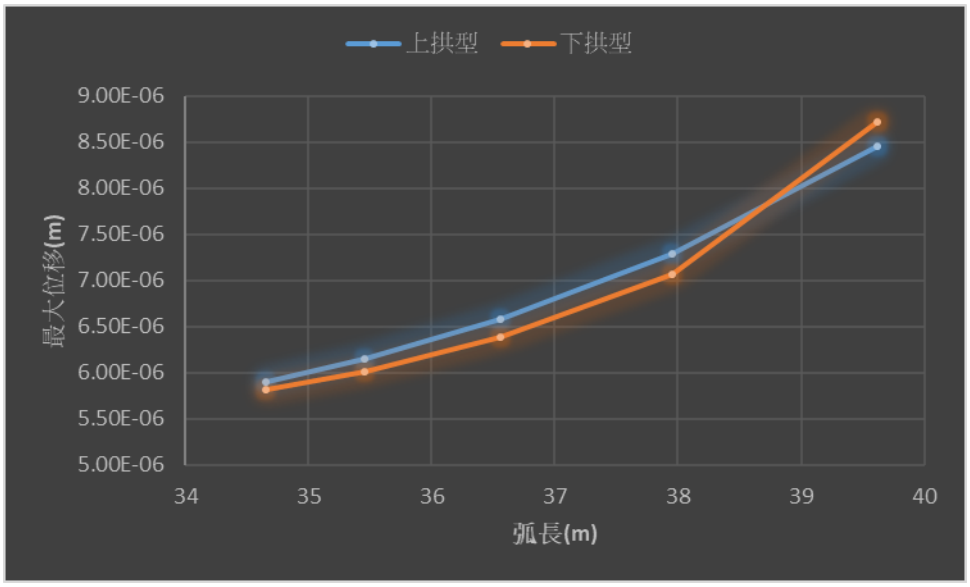


圖 4-77 上下拱型固床工位移與弧長關係圖

八、模擬兩岸為斜坡之固床工受力情形

本次計畫另依建議模擬固床工兩側翼牆斜角為 15 度以及 30 度之情形，模擬成果如下。

(一)兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工模擬成果

1.應力

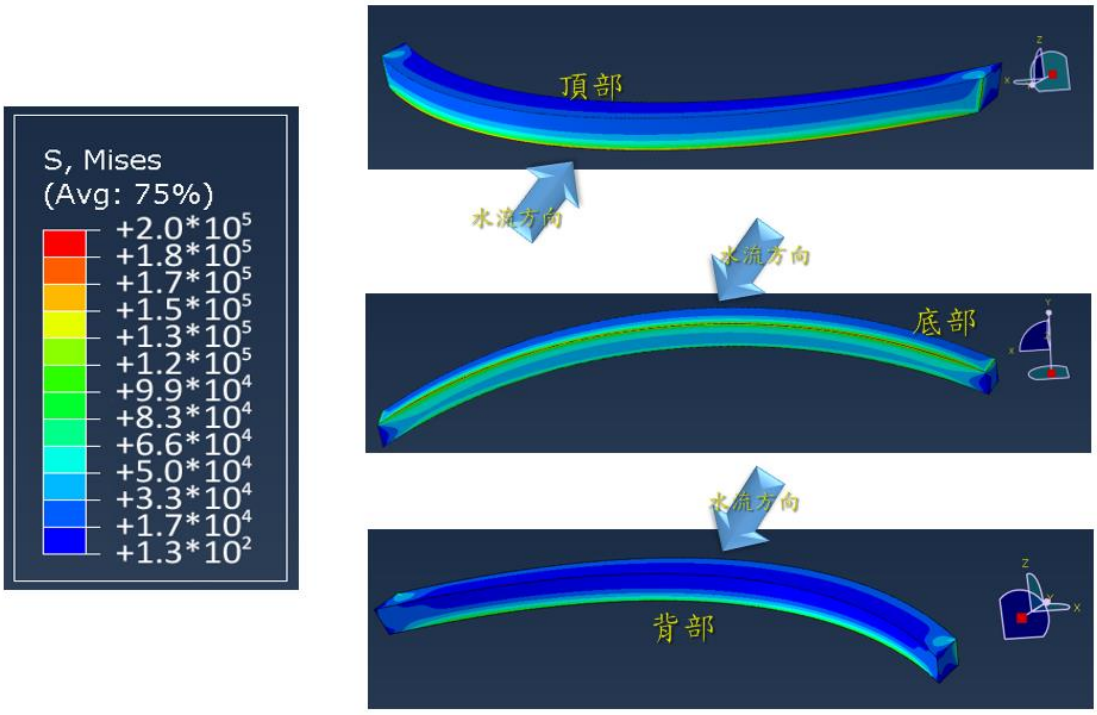


圖 4-78 兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工應力分布

2.力矩

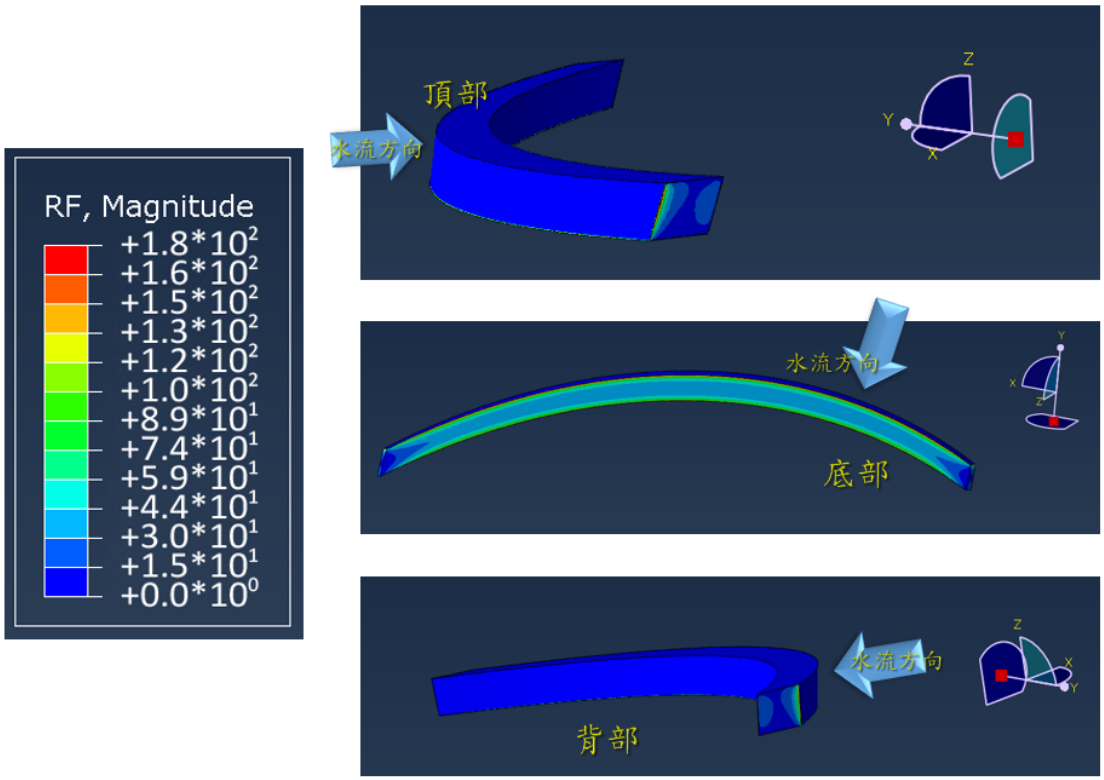


圖 4-79 兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工力矩分布

3.位移

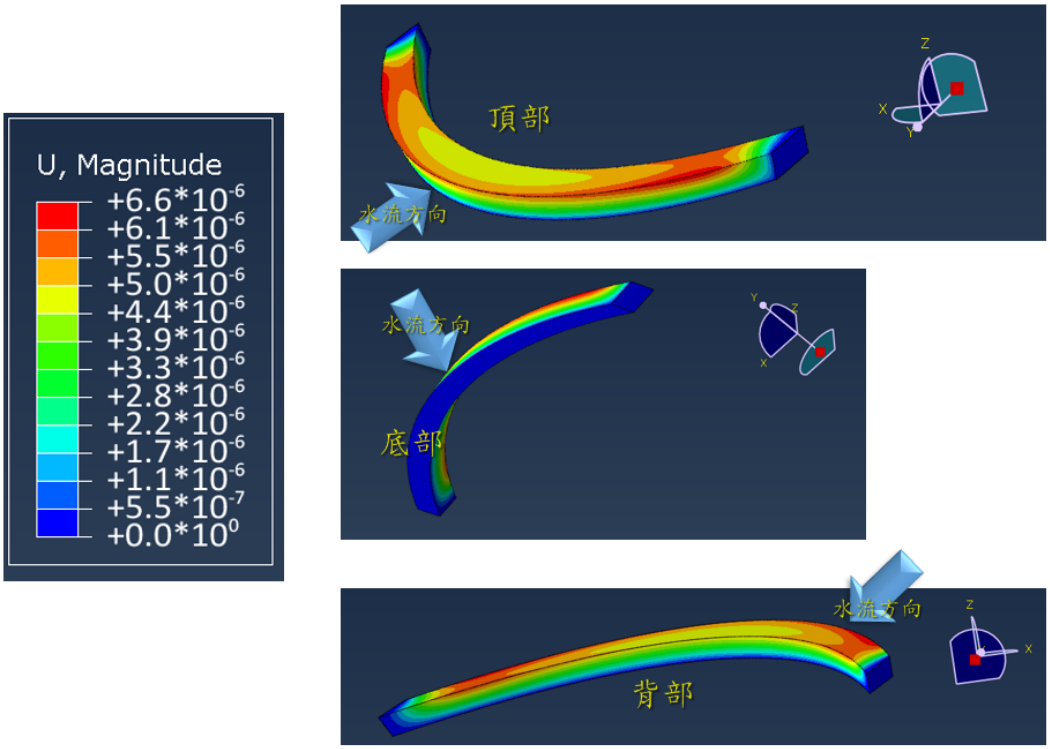


圖 4-80 兩側翼牆斜角為 15 度上拱型固床工位移分布

(二)兩側翼牆斜角斜角為 30 度上拱型固床工模擬成果

1.應力

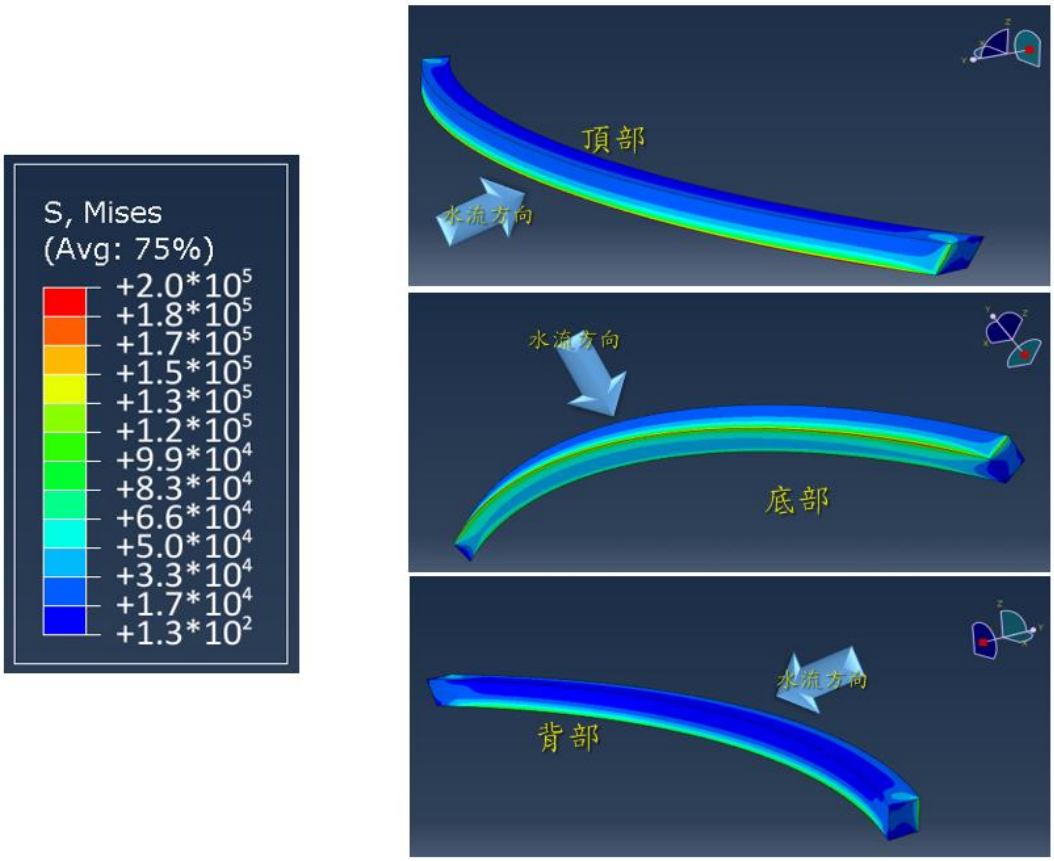


圖 4-81 兩側翼牆斜角為 30 度上拱型固床工應力分布

2.力矩

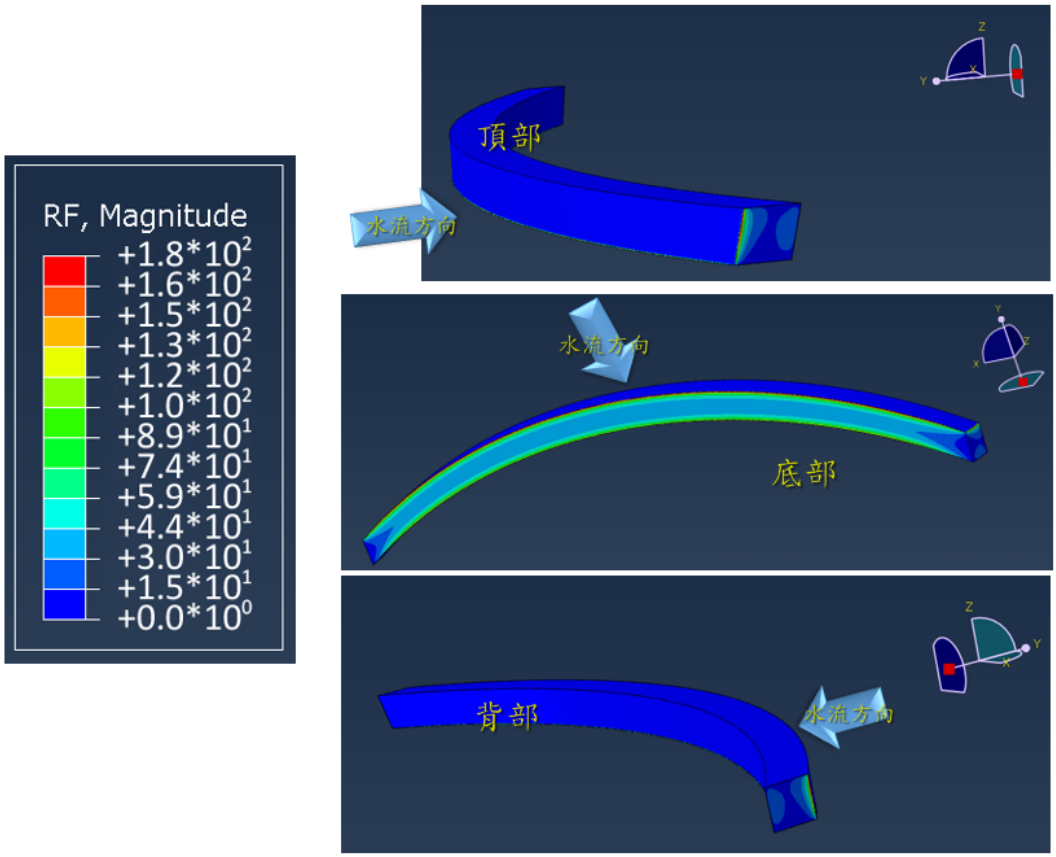


圖 4-82 兩側翼牆斜角為 30 度上拱型固床工力矩分布

3.位移

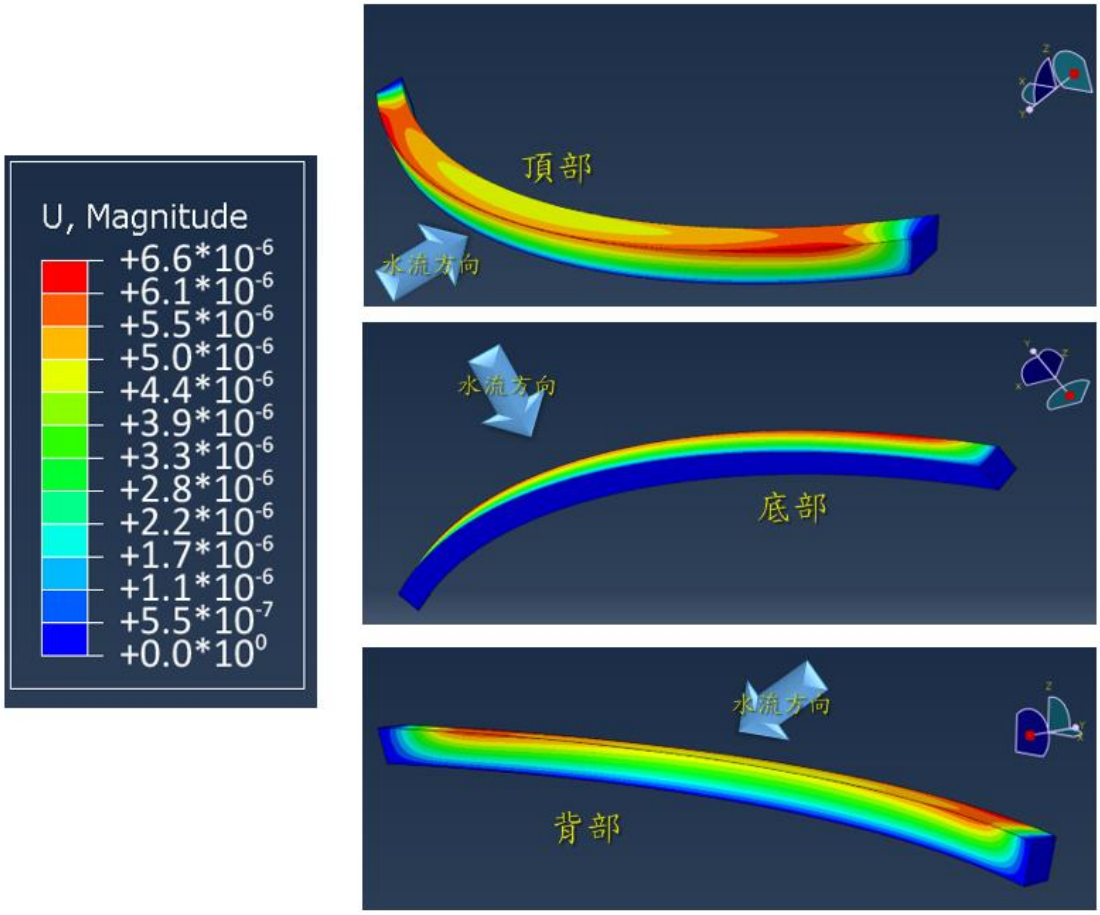


圖 4-83 兩側翼牆斜角為 30 度上拱型固床工位移分布

(三)兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工模擬成果

1.應力

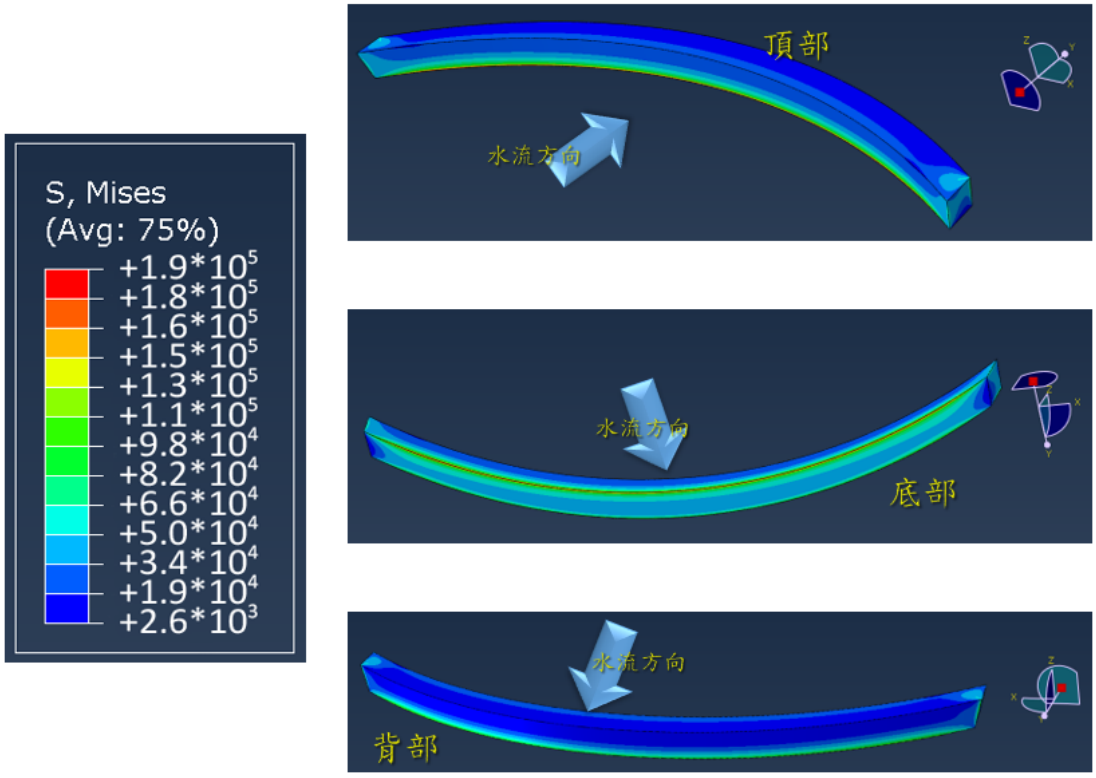


圖 4-84 兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工應力分布

2.力矩

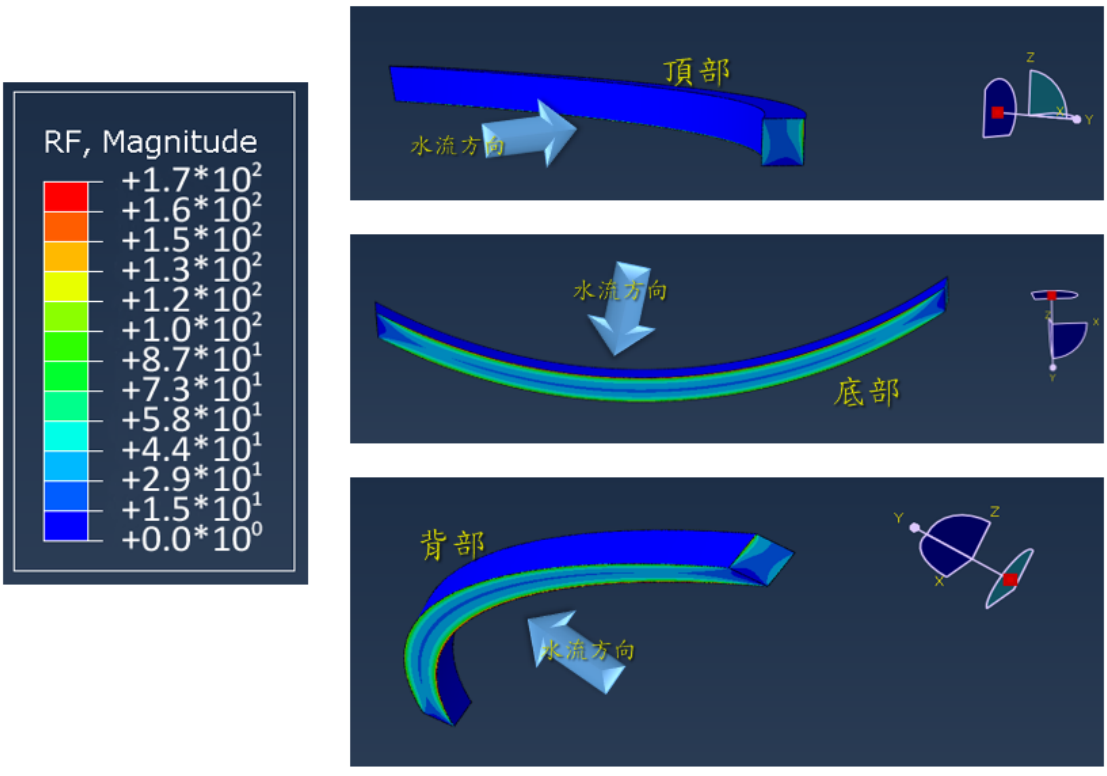


圖 4-85 兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工力矩分布

3.位移

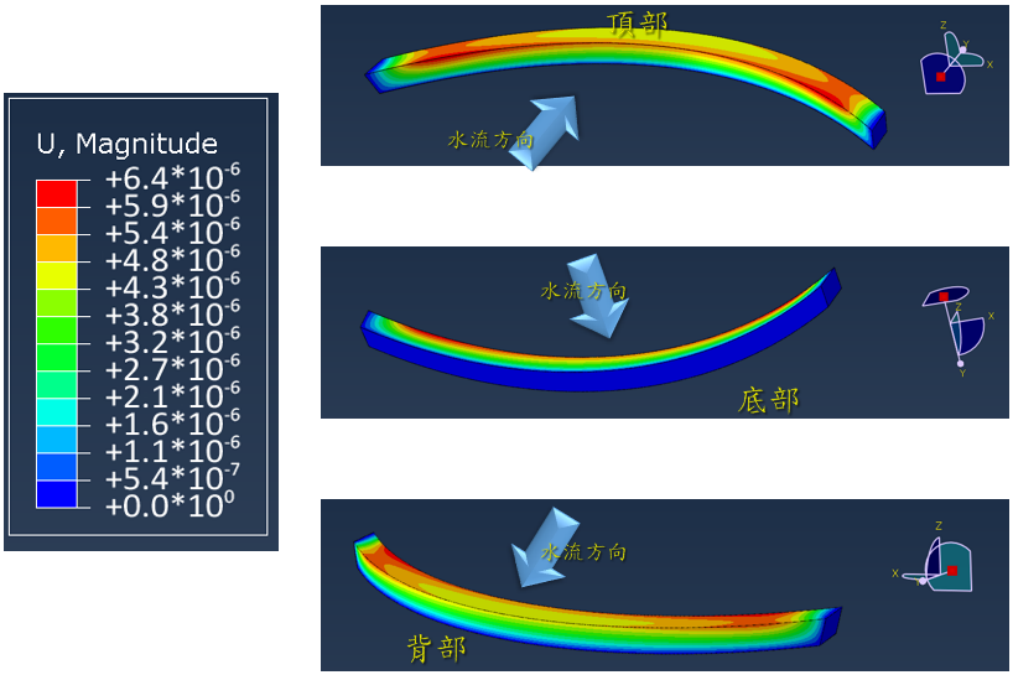


圖 4-86 兩側翼牆斜角為 15 度下拱型固床工位移分布

(四)兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工模擬成果

1.應力

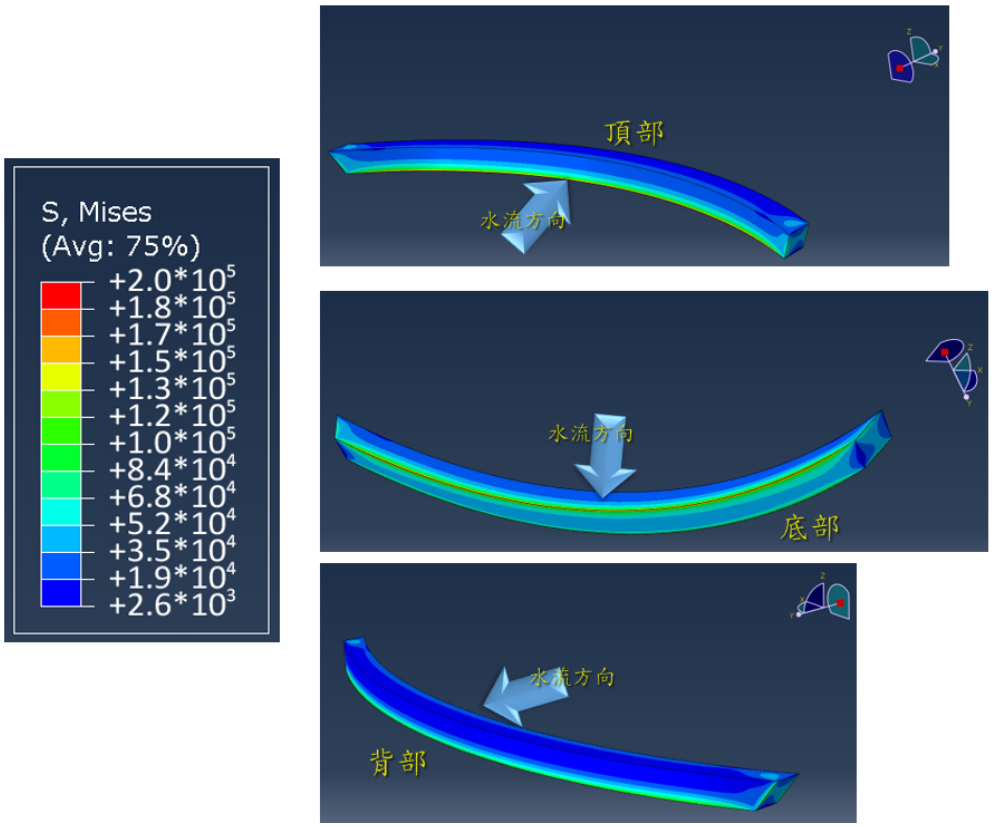


圖 4-87 兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工應力分布

2.力矩

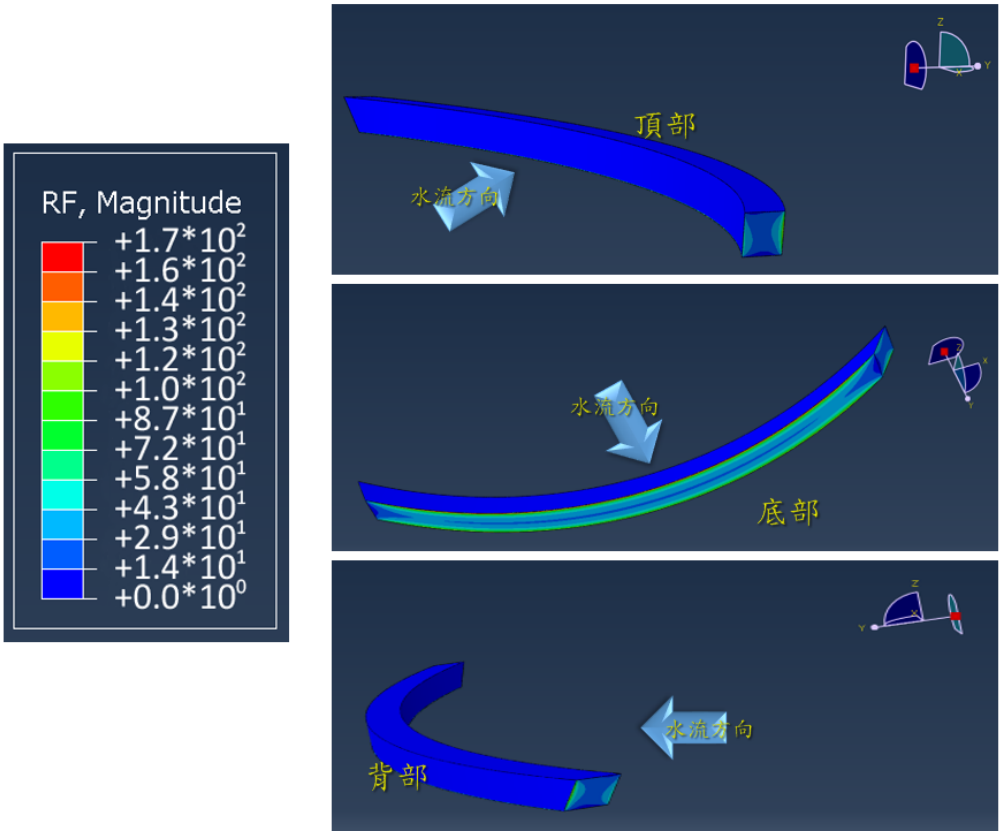


圖 4-88 兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工力矩分布

3.位移

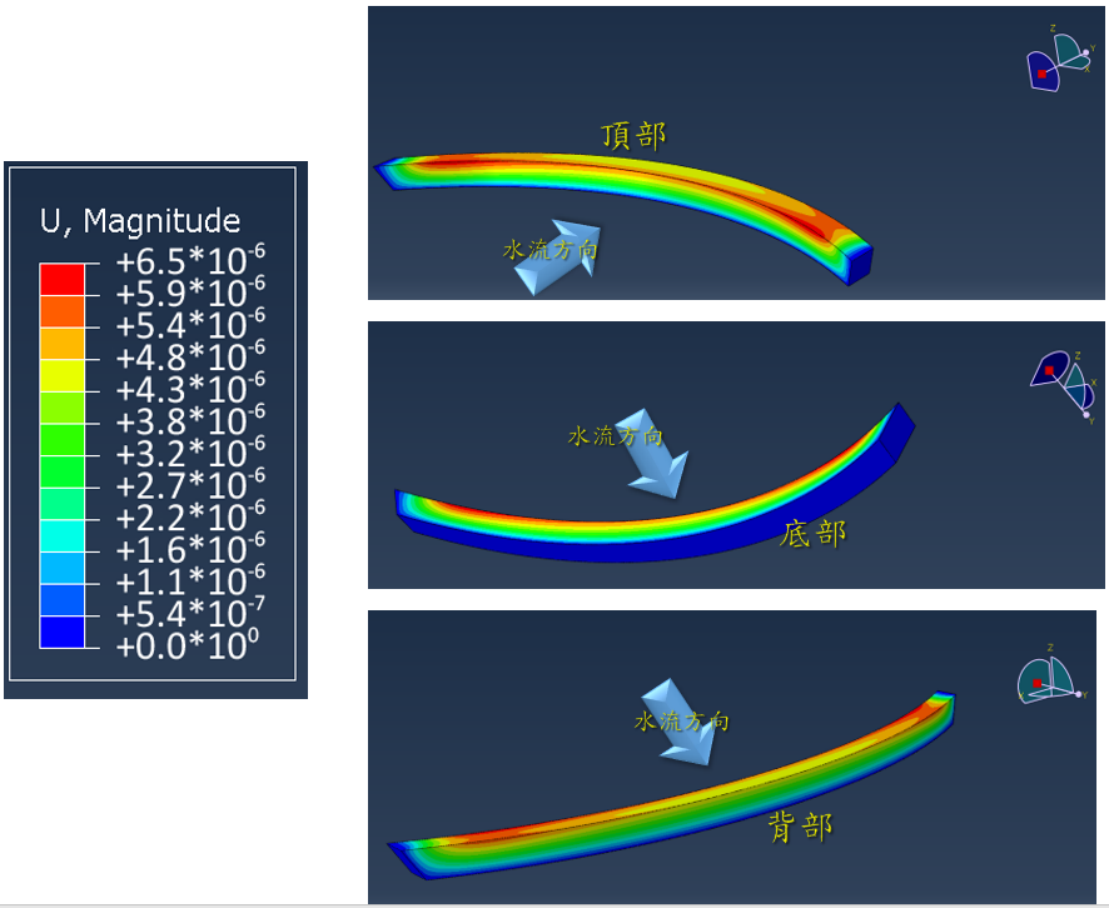


圖 4-89 兩側翼牆斜角為 30 度下拱型固床工位移分布

從上列圖可以看出對於上拱型固床工，兩岸緩斜的角度由 15 度至 30 之改變對於固床工本身之內部受力、力矩以及位移之數值並無影響，如下方圖表示，研判是由於此次模擬是建立在力均垂直於表面作用，然而對於下拱型固床工，其最大應力以及位移是隨著兩岸緩斜角度增加而增加，力矩則是隨著角度增加而減少，如下圖所示。

而對於相同斜角之上下拱比較數值則是下拱之各項數值較小，惟於角度為 30 度時其等效應力值會超過上拱型，如圖 4-89~4-97 所示。

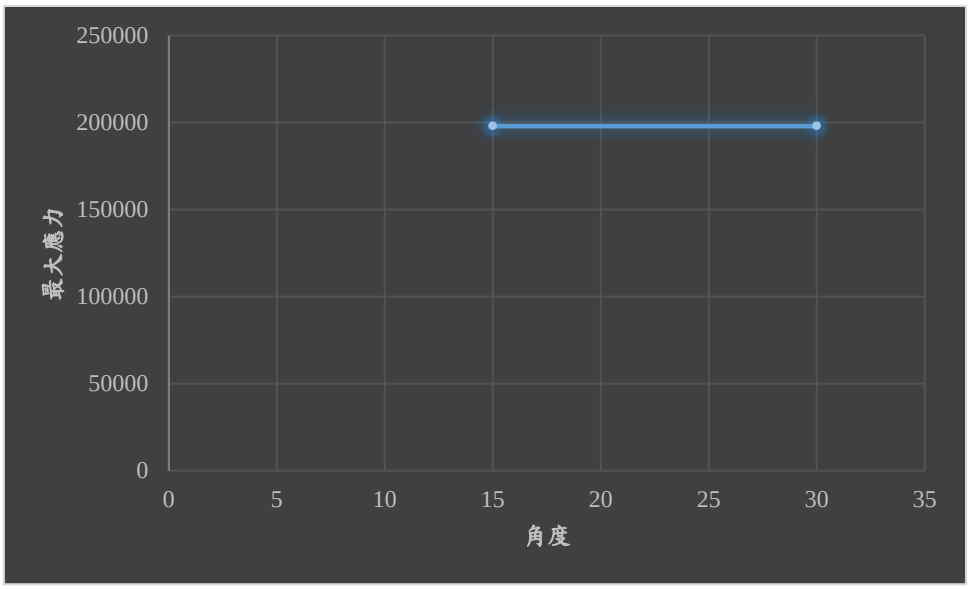


圖 4-89 上拱型固床工最大應力與兩岸翼牆斜角角度關係圖

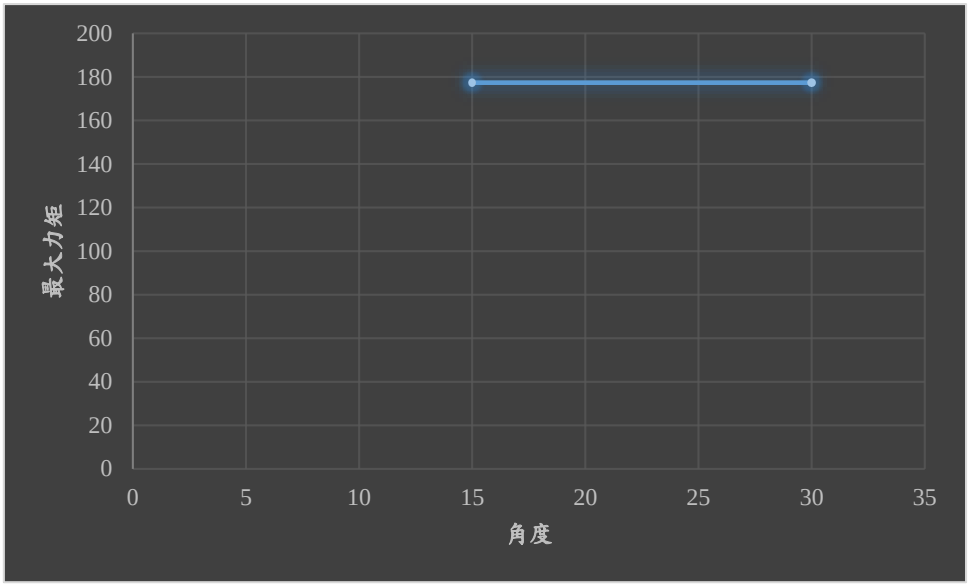


圖 4-90 上拱型固床工最大力矩與兩岸翼牆斜角角度關係圖

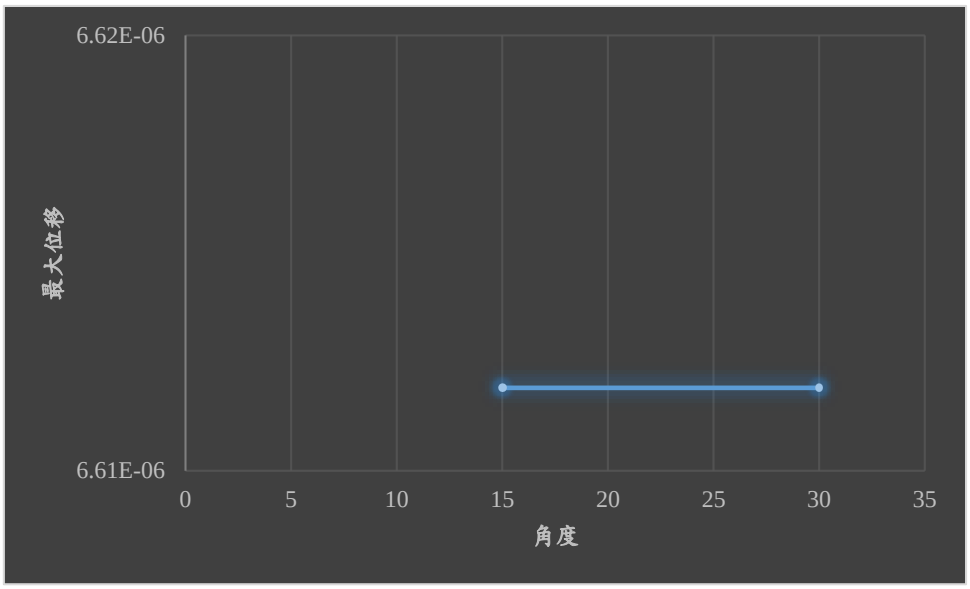


圖 4-91 上拱型固床工最大位移與兩岸翼牆斜角角度關係圖

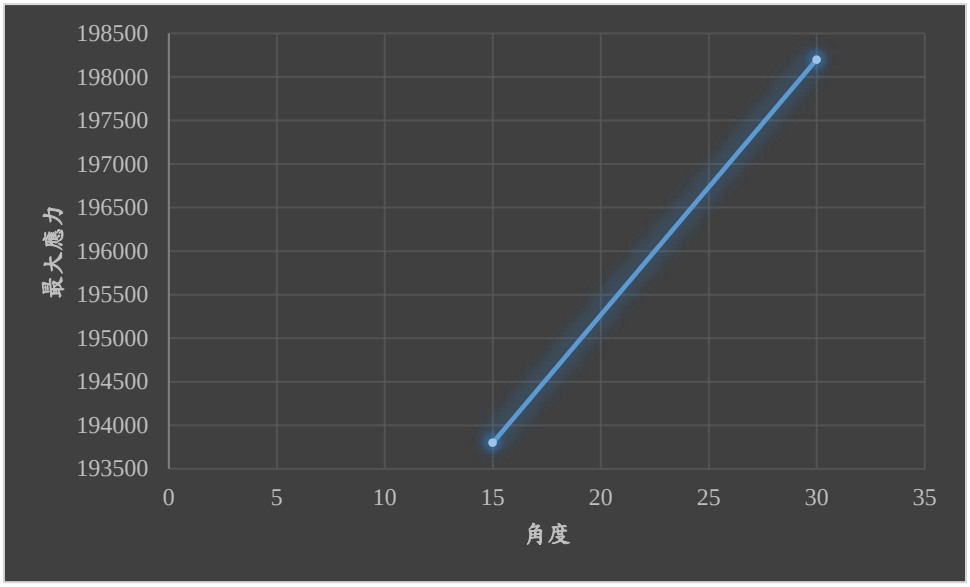


圖 4-92 下拱型固床工最大應力與兩岸翼牆斜角角度關係圖

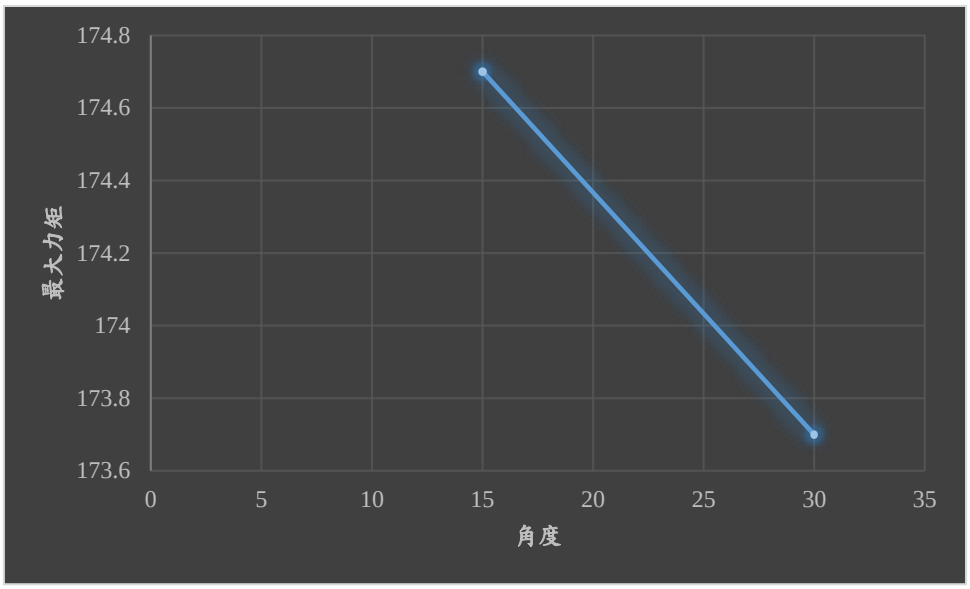


圖 4-93 下拱型固床工最大力矩與兩岸翼牆斜角角度關係圖

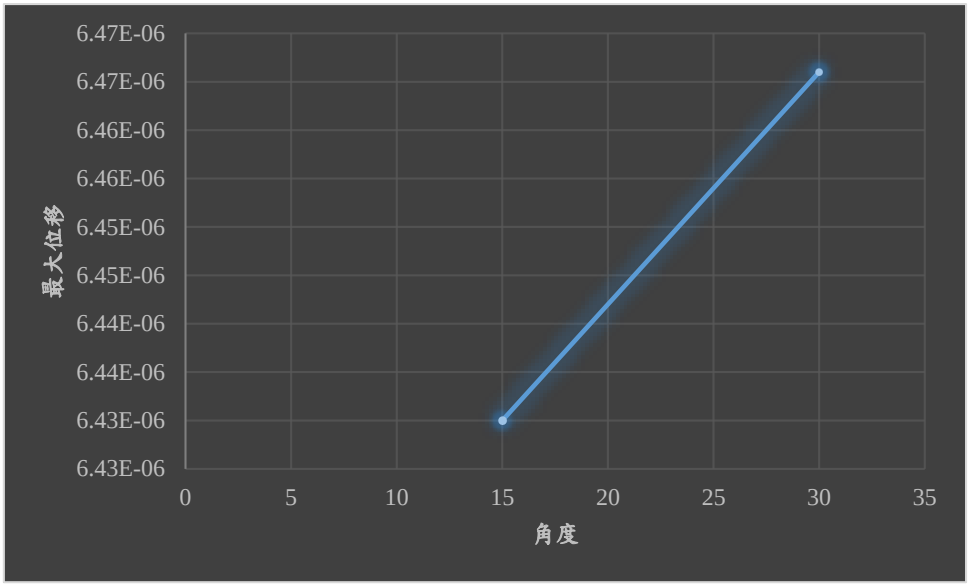


圖 4-94 下拱型固床工最大位移與兩岸翼牆斜角角度關係圖

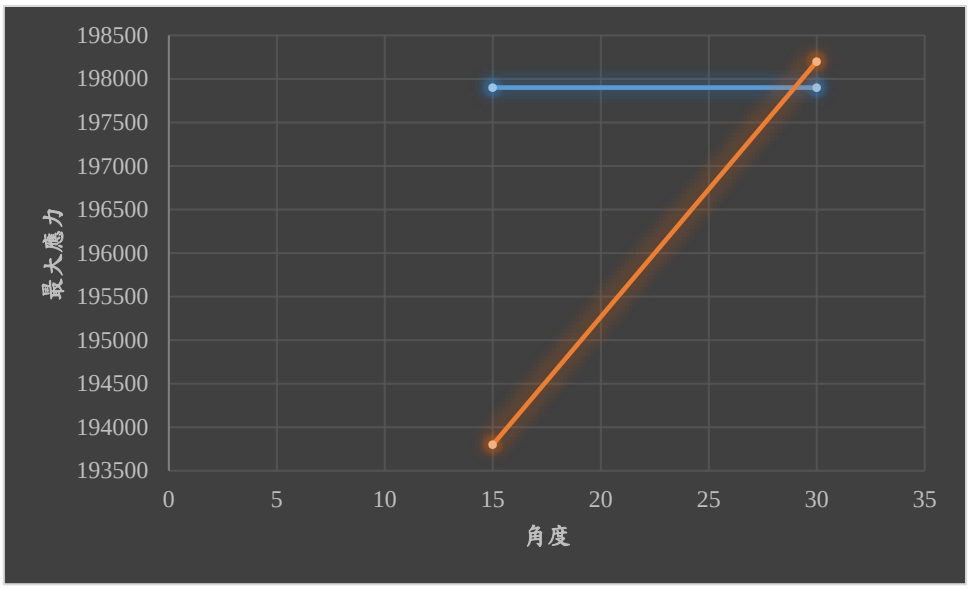


圖 4-95 上下拱型固床工最大應力與角度關係圖

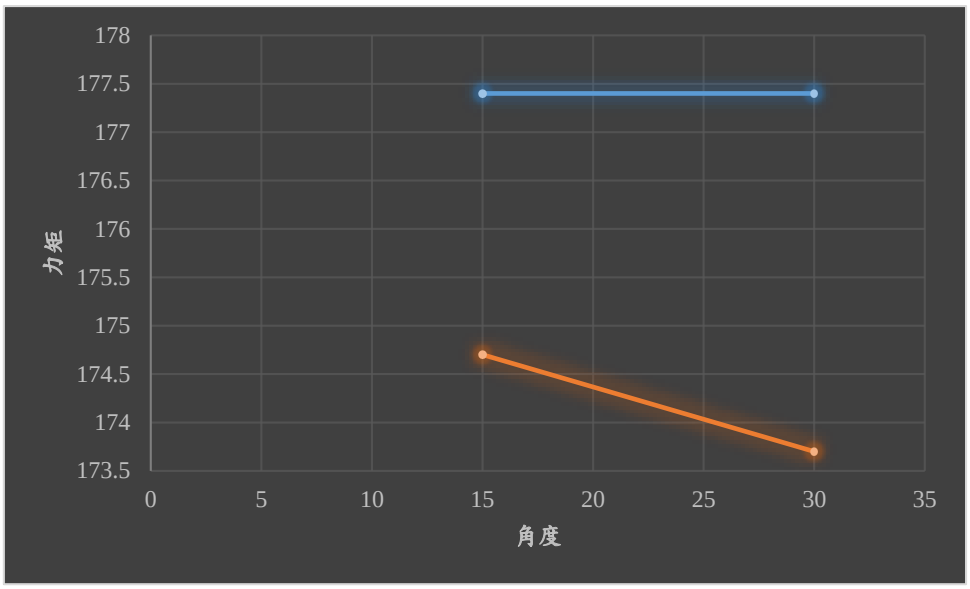


圖 4-96 上下拱型固床工力矩與角度關係圖

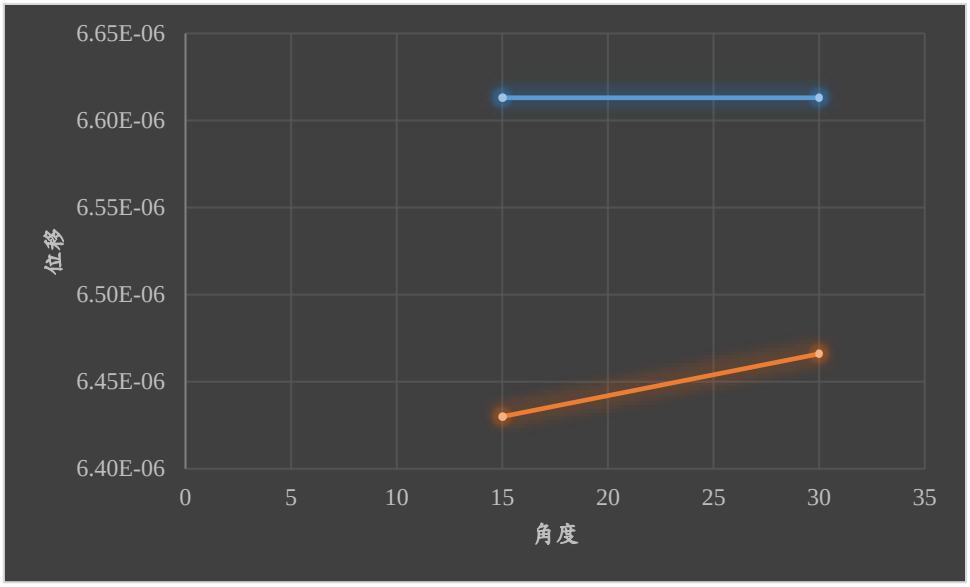


圖 4-97 上下拱型固床工位移與角度關係圖

九、不同厚度固床工比較

本計畫依照建議對不同厚度之固床工進行模擬分析，成果如下。

(一)應力比較

表 4-3 上拱型固床工厚度與最大應力比較表

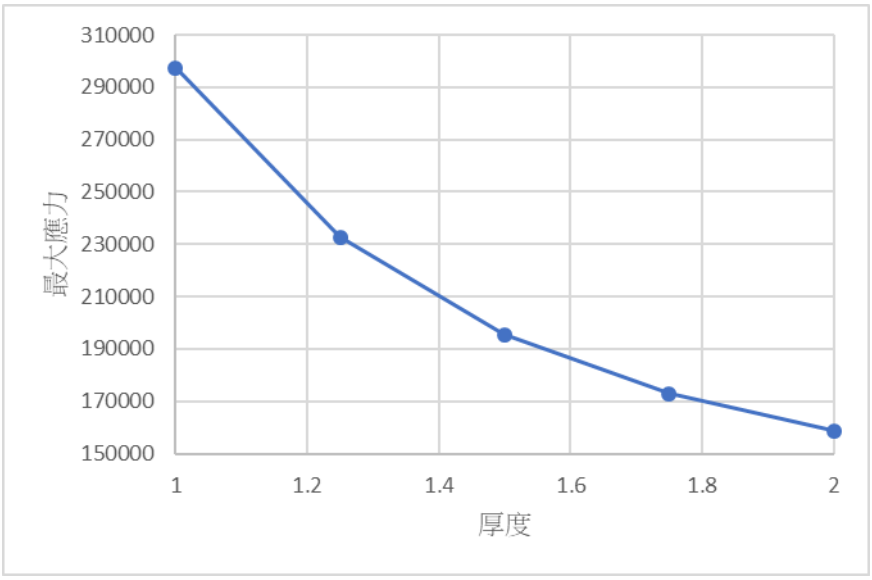
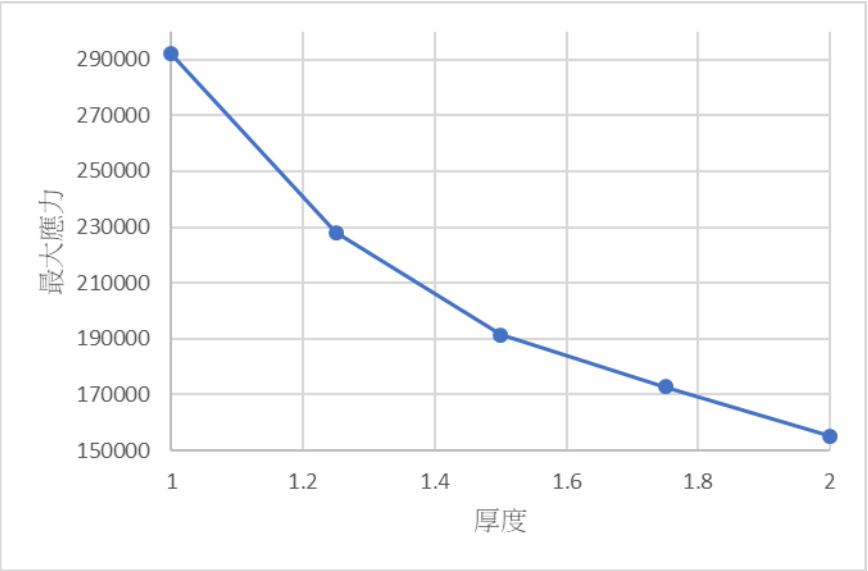


表 4-4 下拱型固床工厚度與最大應力比較表



從表可以看到上拱型與下拱型固床工之最大應力均隨著厚度增加而降低，而下降之趨勢隨著厚度增加而降低。

(二)力矩比較

表 4-5 上拱型固床工最大力矩與厚度比較表

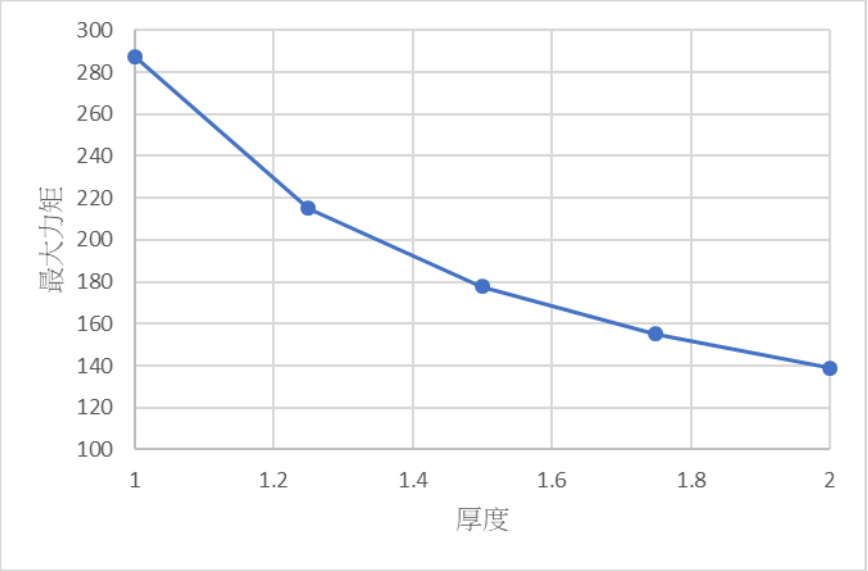
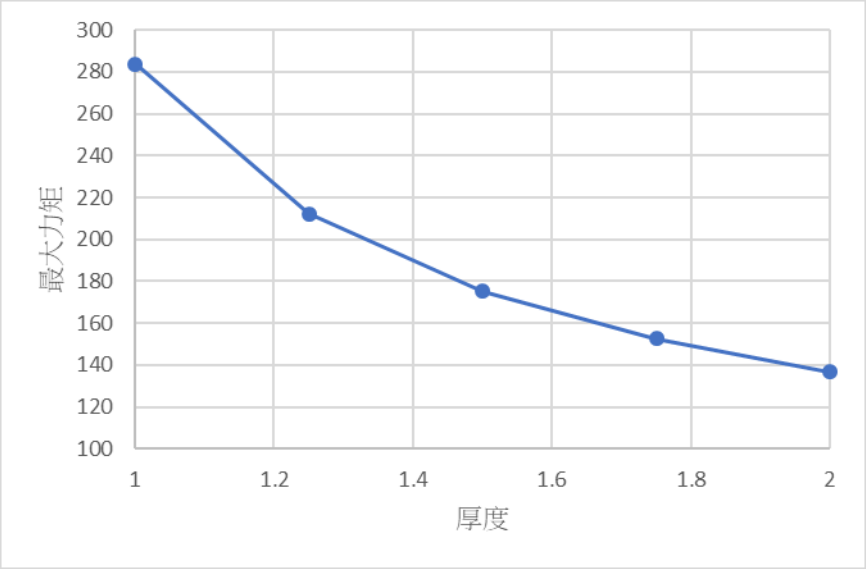


表 4-6 下拱型固床工最大力矩與厚度比較表



從表可以看到上拱型與下拱型固床工之最大力矩均隨著厚度增加而降低，而下降之趨勢隨著厚度增加而降低。

(三)位移比較

表 4-7 上拱型固床工最大位移與厚度比較表

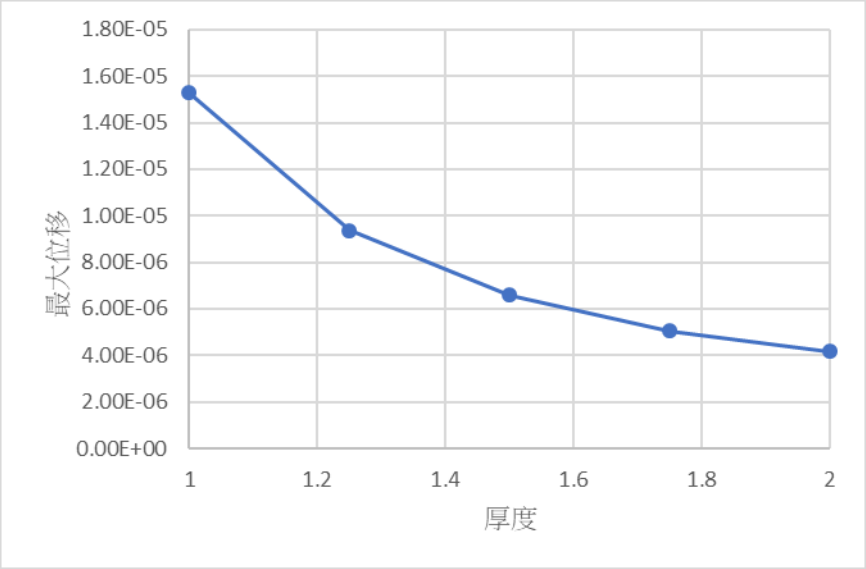
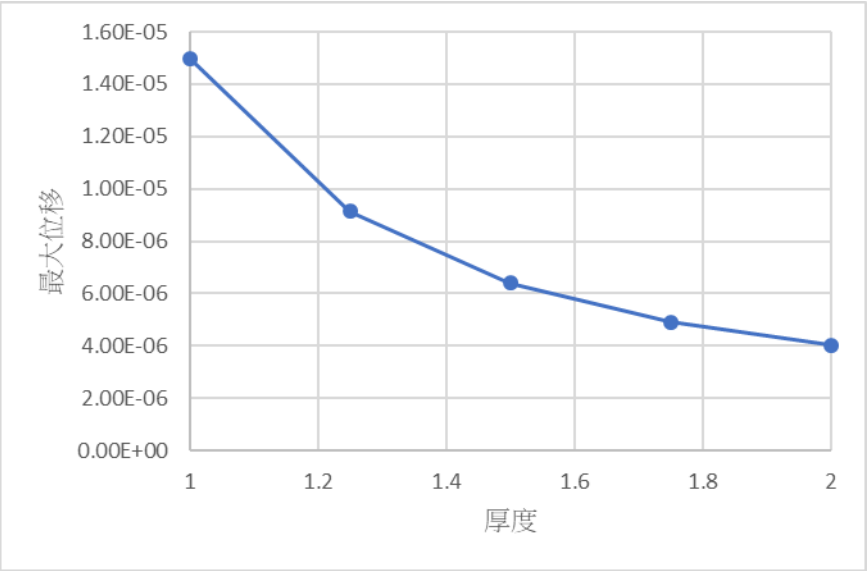


表 4-8 下拱型固床工最大位移與厚度比較表



從表可以看到上拱型與下拱型固床工之最大力矩均隨著厚度增加而降低，而下降之趨勢隨著厚度增加而降低。

十、數值模擬合適度

如頁次 4-3，由理論式計算，固床工所受之動壓為 1090676N，靜水壓力約為 653,412 (N)，加總為 1,744,088(N)，而相同條件下透過 ABAQUS 模擬其所受平均壓力為 $2.9*10^4(N/m^2)$，將其乘上固床工之面積可得總力為 2,027,216(N)，差值為 283128N，經推斷，由於兩者均為在無損失影響進行計算，此計算值為較大值。

第二節 ANSYS-FLUENT

另由於希望觀察固床工周圍之三維流場變化以觀察可能對固床工之力學相關影響，本計畫另使用 ANSYS-FLUENT 模式來模擬流速、流線以及流場，國內已有諸多相關研究使用 Fluent 以進行水工構造物模擬之先例，FLUENT 是美國 FLUENT 公司所發展的三維計算流體力學軟體，並以有限體積法為基礎，此軟體已廣泛地被用在空氣動力學、工業工程及建築通風設計、多相流場等。其結構性、非結構網格

以及根據求得之解自動細化或粗化網格技術，可讓求得之解獲得更好的精度並提高程式運算效率。在邊界的設定方面，可定義多種邊界條件，如上游、下游流速或壓力邊界、壁面邊界條件等，並可採用卡式座標和圓柱座標系分量方式輸入進口條件。在模式運算方面可以透過平行處理，大幅提高運算效率，改善以往三維模式需要長時間運算的缺點，在較短的時間中得到最佳之解。

模式理論方程式如下所示:

1.連續方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=0$$

2.動量方程式

3.*x*-方向

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{\partial p}{\partial x}=\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)+\rho g_x$$

4.*y*-方向

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)+\frac{\partial p}{\partial y}=\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)+\rho g_y$$

5.z-方向

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\rho\left(u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\partial p}{\partial z}=\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\rho g_z$$

6.紊流動能 k 方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uk)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho vk)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho wk)=G_k\text{-}\rho\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right)$$

7.紊流動能消散率 ε 方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w\varepsilon)=\frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}G_k\text{-}C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right)$$

$$G_k = \mu\left\{2\left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right)^2\right\}$$

上列式子中，u、v、w 分別為 x、y、z 方向速度；p 為流場壓力；ρ 為流體密度；μ為動力黏滯係數；k 為紊流動能；ε為紊流動能消散係數；σ_k為 k 方程式紊流 Prandtl 數；σ_ε為ε方程式紊流 Prandtl 數；G_k 表示紊流動能之產生項；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$則為常數

由於拱型之幾何特性可能導致水流流況不易計算以及評估，透過 ANSYS-Fluent 進行模擬能在於短時間初步計算出固床工周圍流場、流線以及壓力分布情形。

模擬條件設定為依照現地工程資料將一寬度為 34m、厚度為 1.5m、高度為 1.5m 之拱型固床工，放置於一長為 40m，寬為 34m，高為 2.056 之流場，並設定上游邊界條件入流流速為 3.5m/s，出流邊界為自由出流，以下分述分向之模擬情形。

一、現地下拱型固床工模擬情形

從圖 4-98、圖 4-49 可以看到流線經下拱型分散後，會集中於下游面兩岸之邊壁，並產生較大之流速，最大到達 15.48m/s，若經長時間沖蝕而沒有進行補強工作可能會導致河堤掏空，河岸崩落等情形。

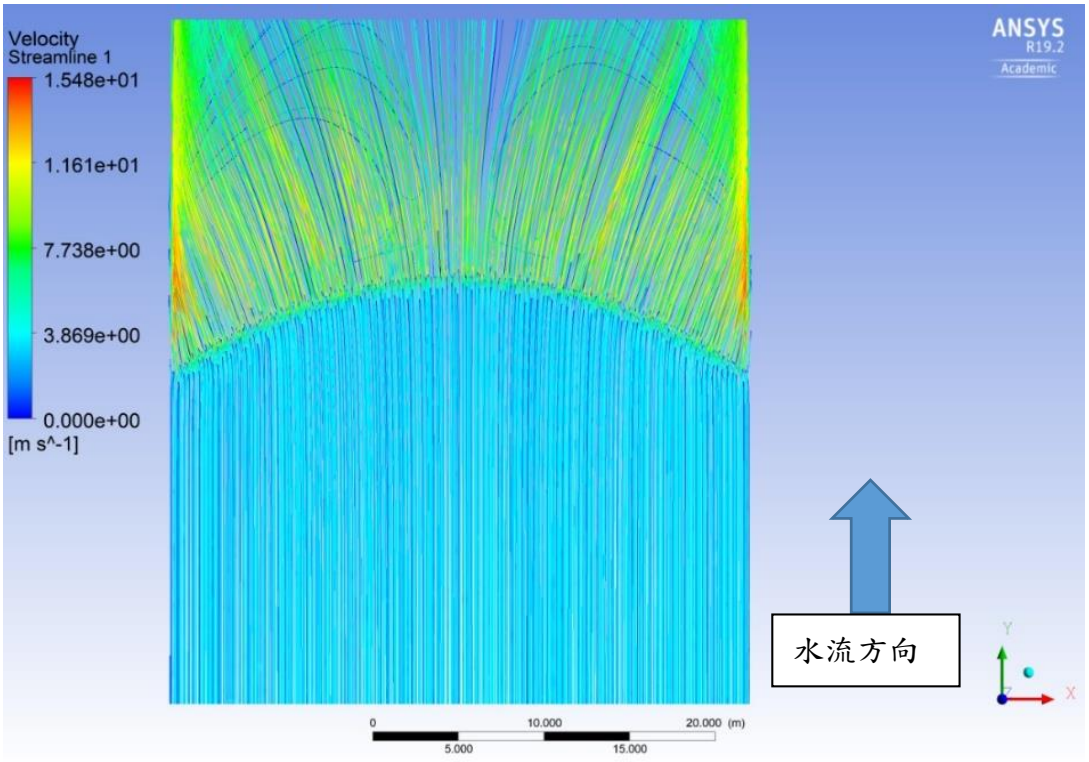


圖 4-98 下拱型流線分布情形俯視圖

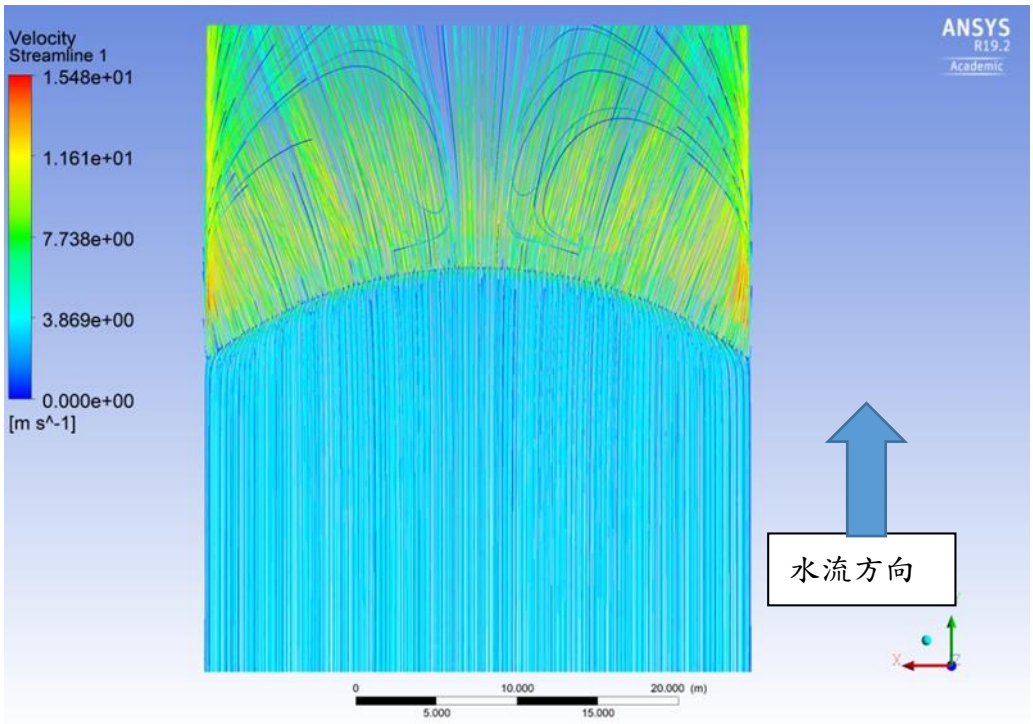


圖 4-99 下拱型流線分布情形仰視圖

模擬另透過剖面觀察於流場不同位置下之變化，設定剖面位置如圖 4-38 所示，為在 z=0、z=8.、z=16.9 之位置。

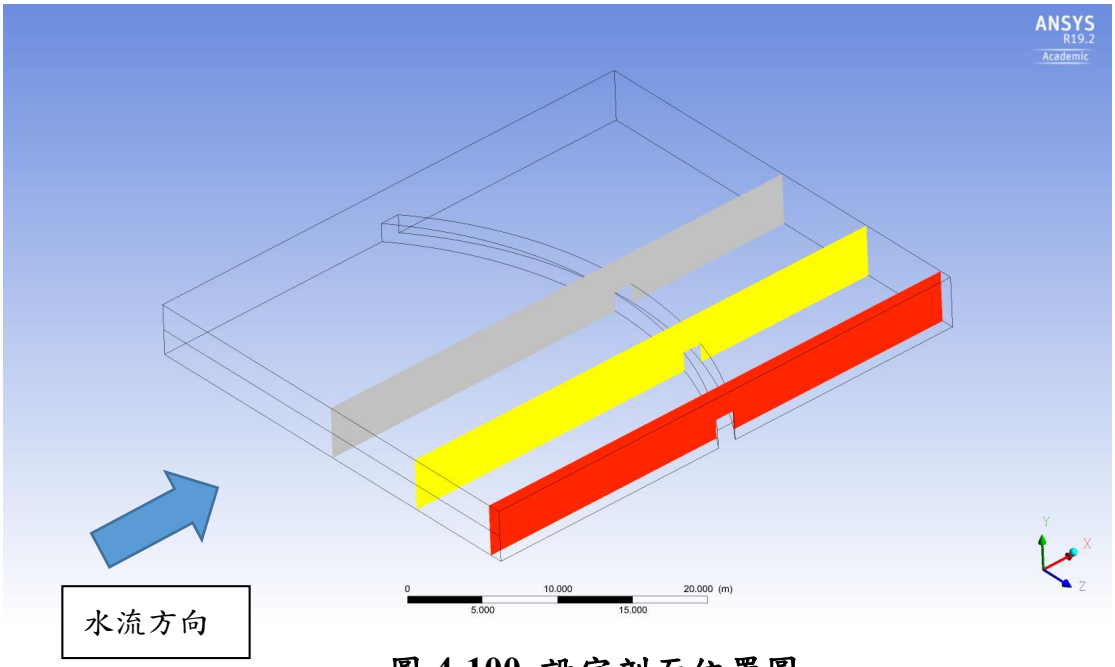


圖 4-100 設定剖面位置圖

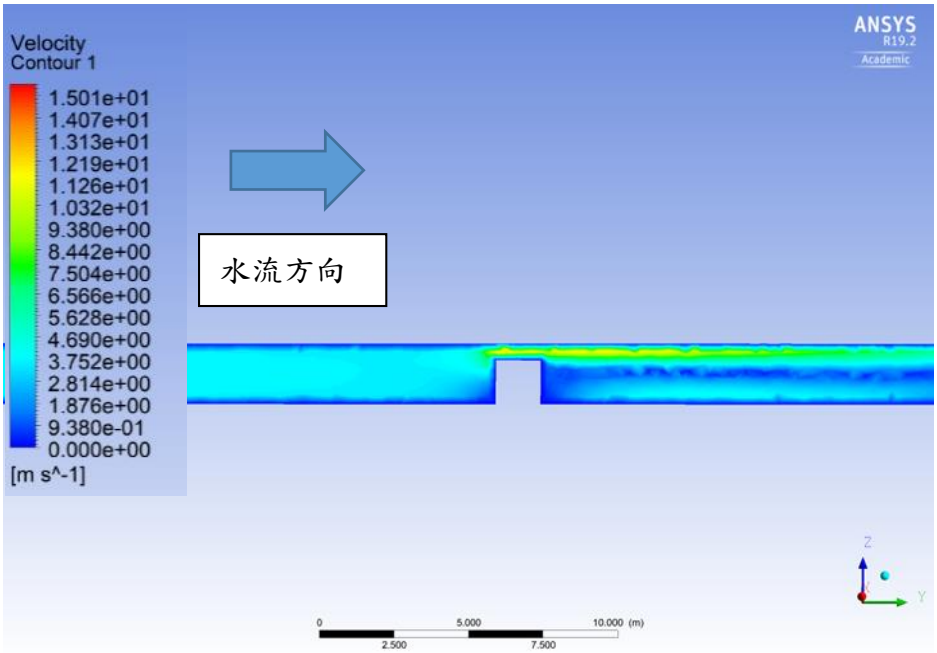


圖 4-101 下拱形 z=0 剖面之流速分布圖

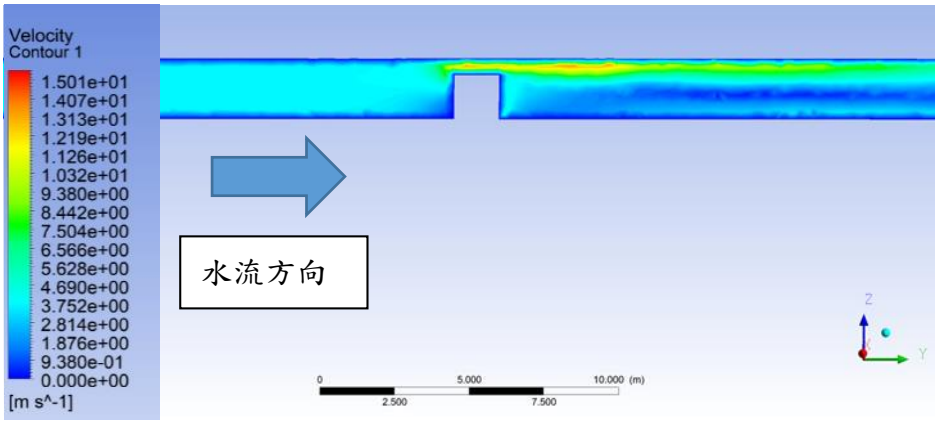


圖 4-102 下拱形 z=8.5 剖面之流速分布圖

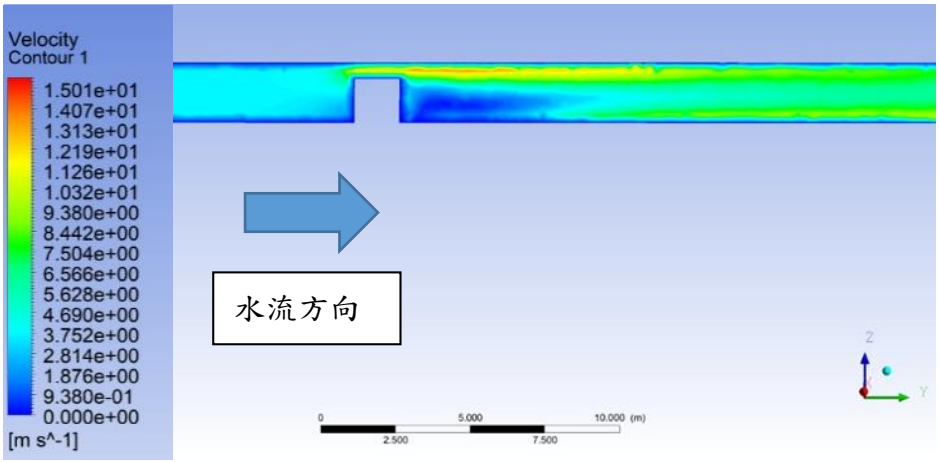


圖 4-103 下拱形 z=16.9 剖面之流速分布圖

從圖 4-101~4-103 可以看出越靠近兩岸，其於下游處的緩速區會由水深之中間段移動至靠近固床工之底部處，而其平均流速越靠近兩岸有增加之趨勢，最高達 15.01m/s。

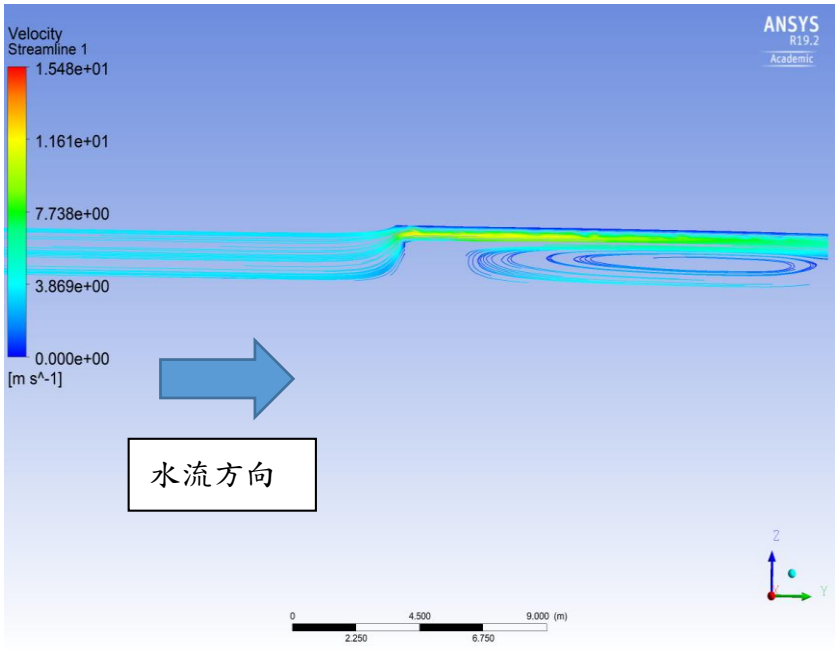


圖 4-104 下拱形 z=0 剖面之流線分布圖

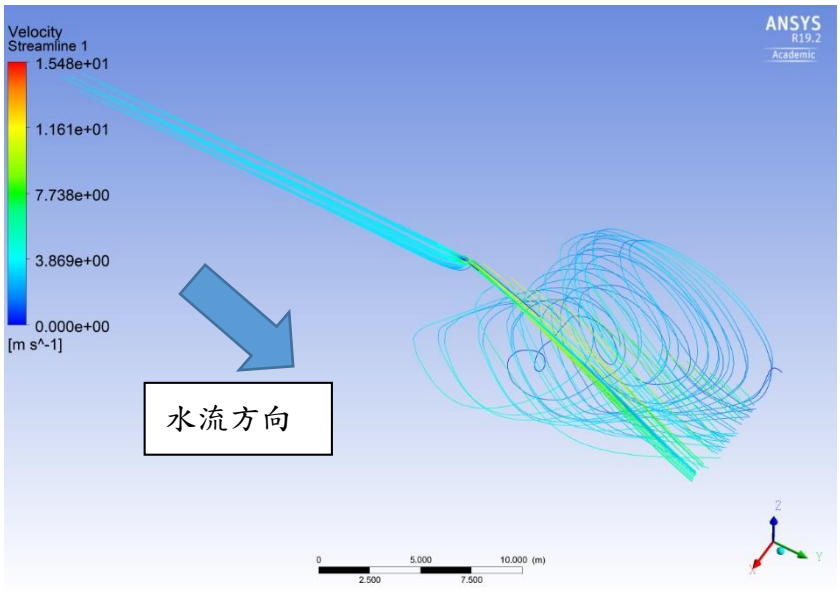


圖 4-105 下拱形 z=8.5 剖面之流線分布圖

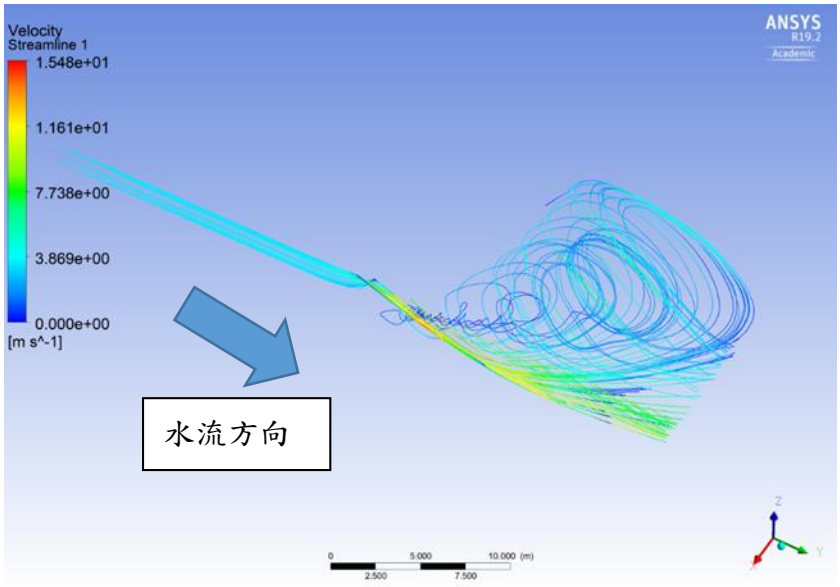


圖 4-106 下拱形 z=16.9 剖面之流線分布圖

從流線分布圖 4-104 ~ 4-106 會看到流線因被下拱之形狀而分散，而後撞擊邊壁導致紊流產生，紊流之大小隨著越靠近兩岸而增加，而從圖也可以看到其會於下游之兩岸處有最大流速，經長時間沖刷可能導致護岸毀損，與現實之情形相符合。

二、現地上拱型固床工模擬情形

從圖 4-107、圖 4-108 可以看到流線經上拱型固床工集中後，會集中於渠道中央，並產生較大之流速，最大到達 15.48m/s，流線相較於下拱型固床工不穩定，可以看到其下游面底部有許多紊流，其會持續掏刷河道底部以及固床工地基，若經長時間掏刷而沒有進行補強工作可能會導致固床工傾倒或不穩定等情形。

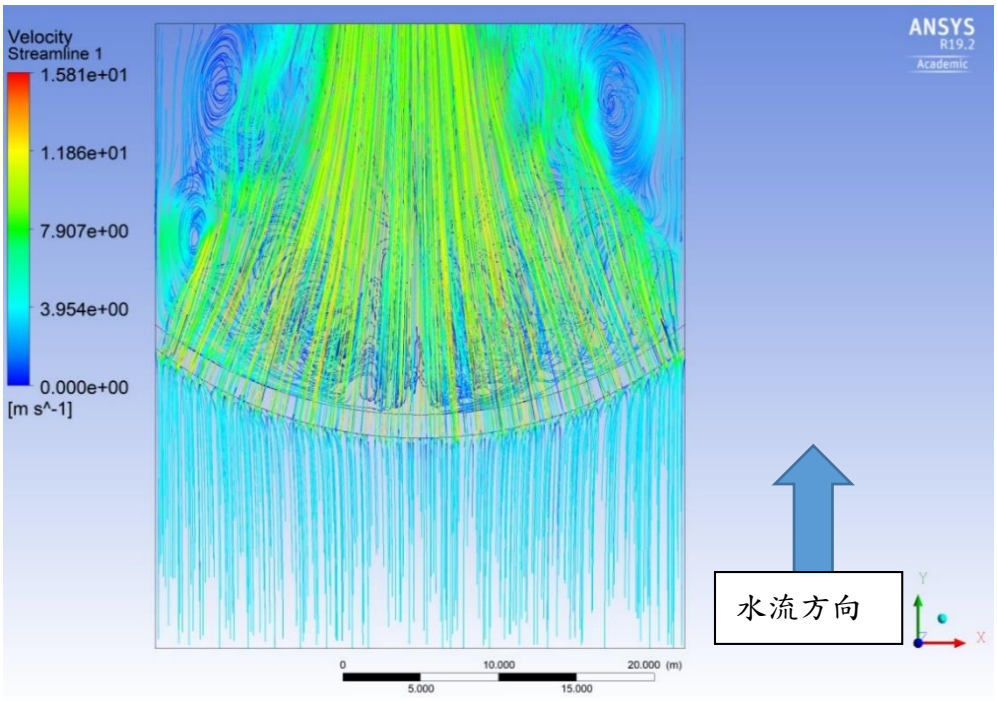


圖 4-107 拱型流線分布情形俯視圖

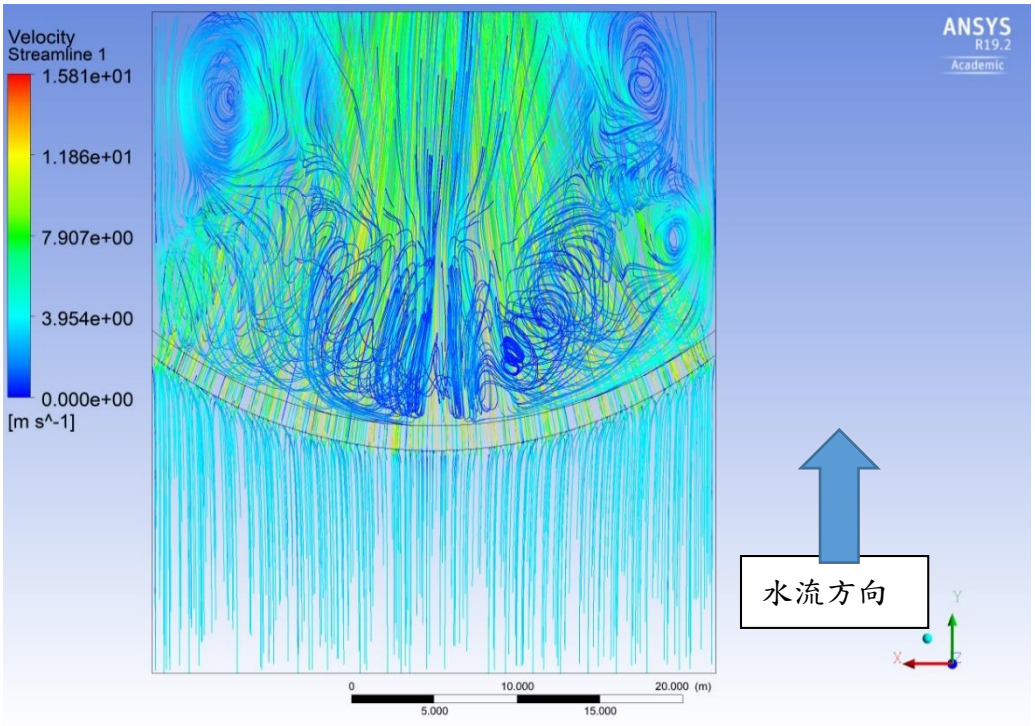


圖 4-108 上拱型流線分布情形仰視圖

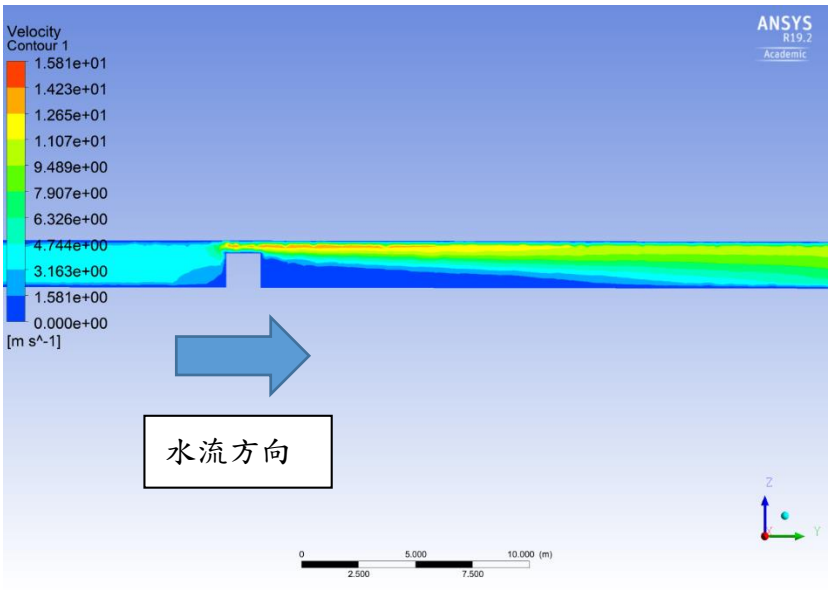


圖 4-109 上拱型 z=0 剖面之流速分布圖

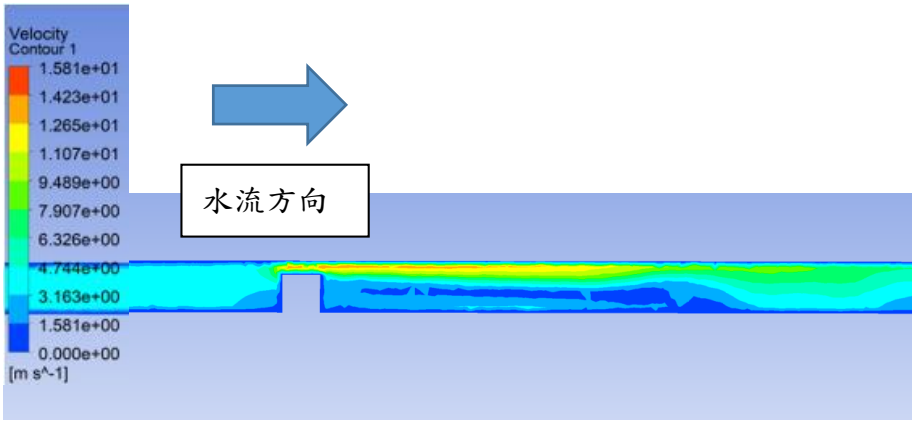


圖 4-110 上拱型 z=8.5 剖面之流速分布圖

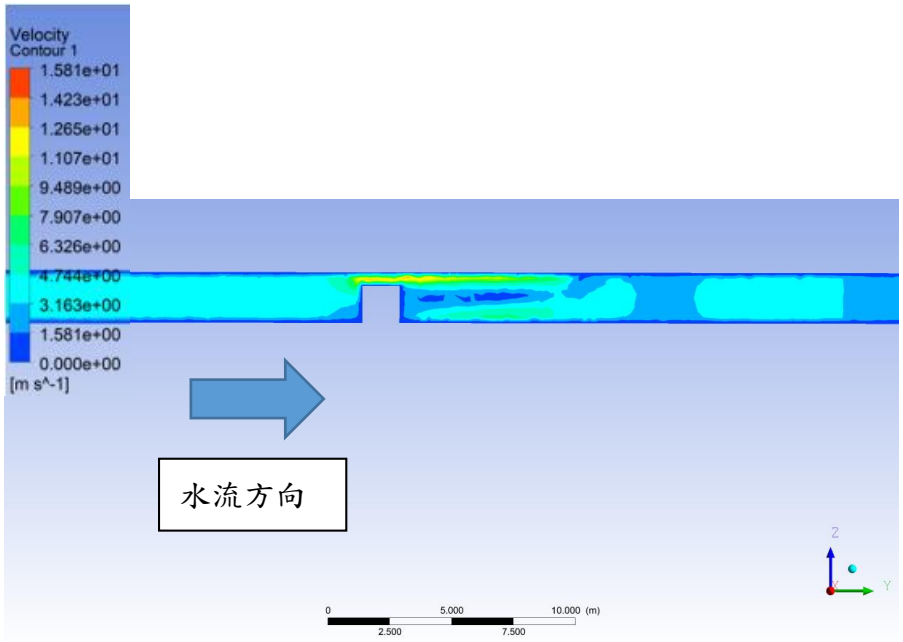


圖 4-111 上拱型 z=16.9 剖面之流速分布圖

從圖 4-109～4-111 可以發現上拱型固床工其下游之紊流情況在因拱型集中下比下拱型固床工混亂許多，而透過剖面可以看到於河道正中間之位置，其下游面有一範圍較大之低速區，而越往兩岸處其速度分布越混亂且平均流速下降，另一值得注意的是其於上游面有一低速區，可能構成一令水生生物棲息之空間。

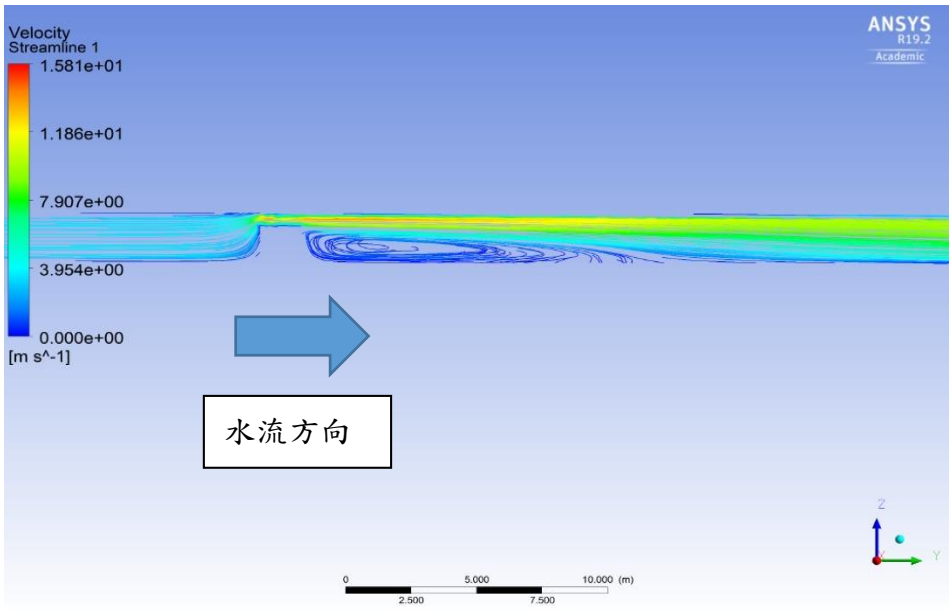


圖 4-112 上拱型 z=0 剖面之流線分布圖

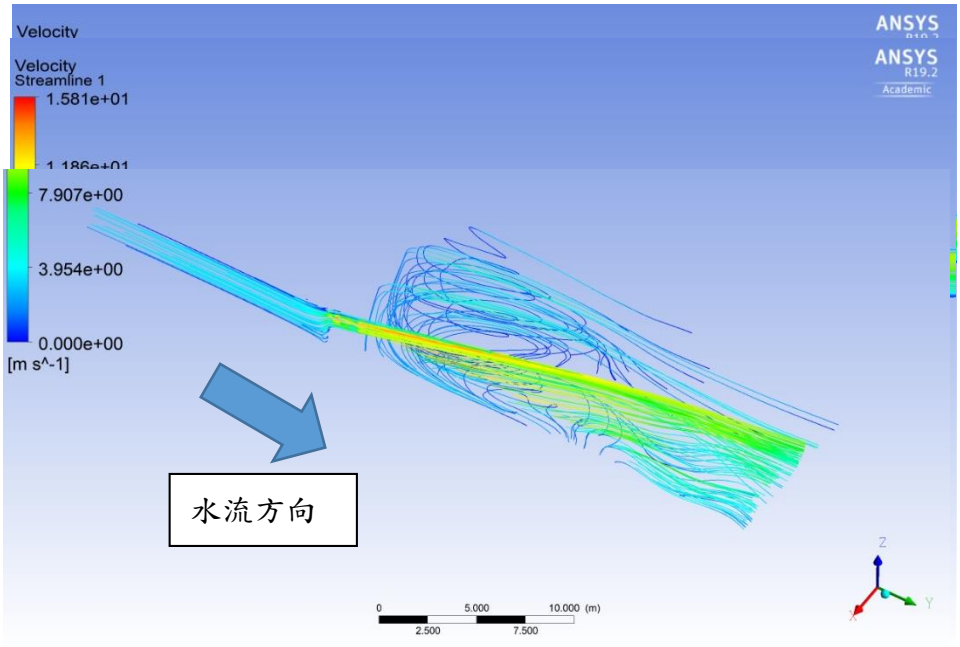


圖 4-113 上拱型 z=8.5 剖面之流線分布圖

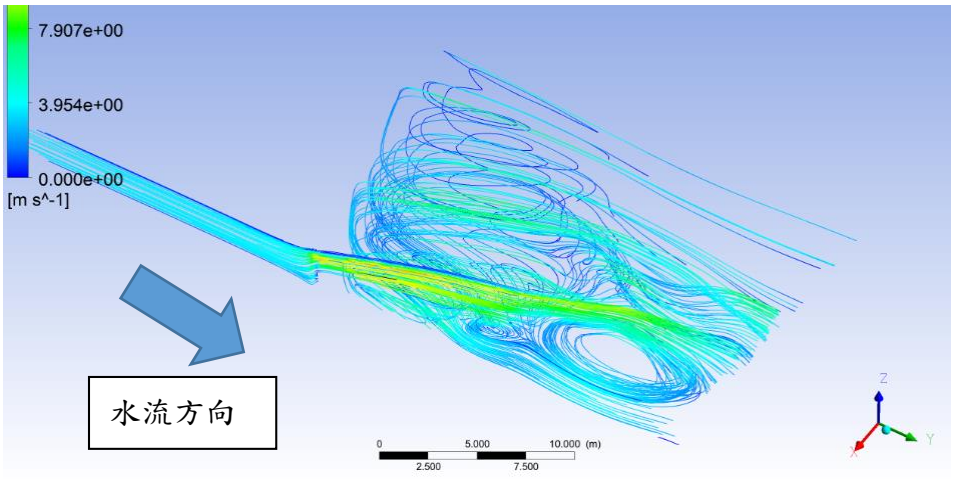


圖 4-114 上拱型 z=16.9 剖面之流線分布圖

從圖 4-112~4-114 可以看到其紊流混亂程度隨著靠近兩岸增加，且流下之流線受邊壁影響變得較不穩定。

三、不同高度之固床工於相同流場下之變化

此次模擬也進行固床工不同高度下之流況差異，敘述及圖說如下。

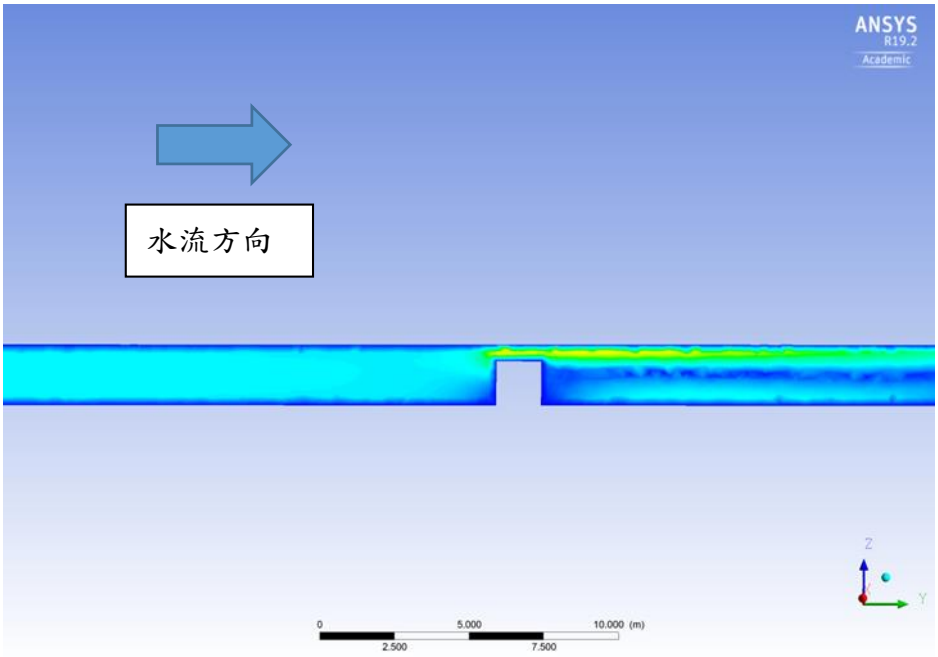


圖 4-115 1.5m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況

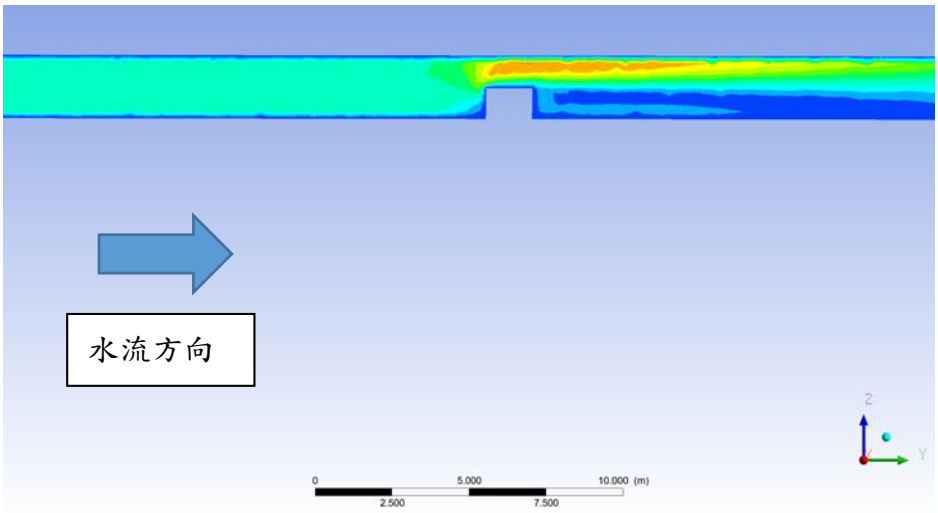


圖 4-116　1m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況

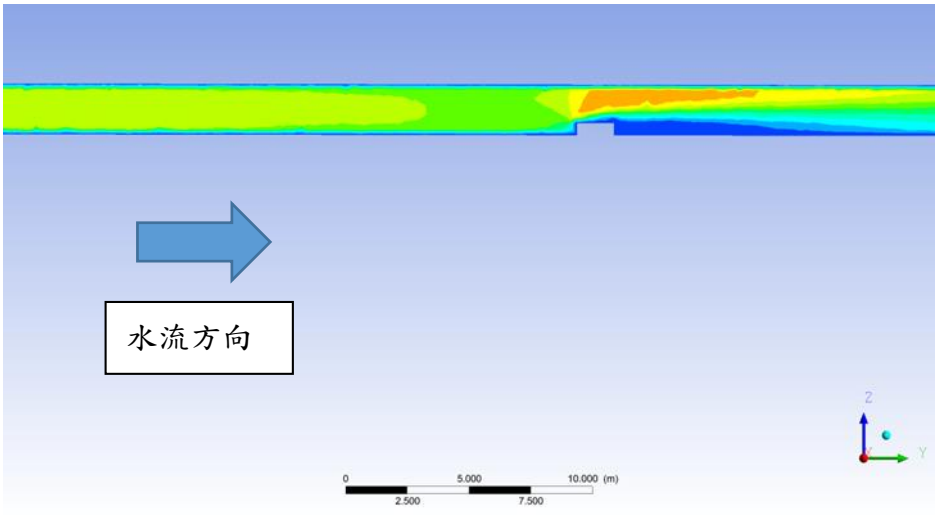


圖 4-117　0.5m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況

從圖 4-115~ 4-117 可以看到隨著下拱型固床工高度下降，其會於下游面漸漸形成一迴遊區，最大流速也會隨著高度下降而減少，且於下游處其極速區之範圍會逐漸增加並可看出其為一三角形之區域。

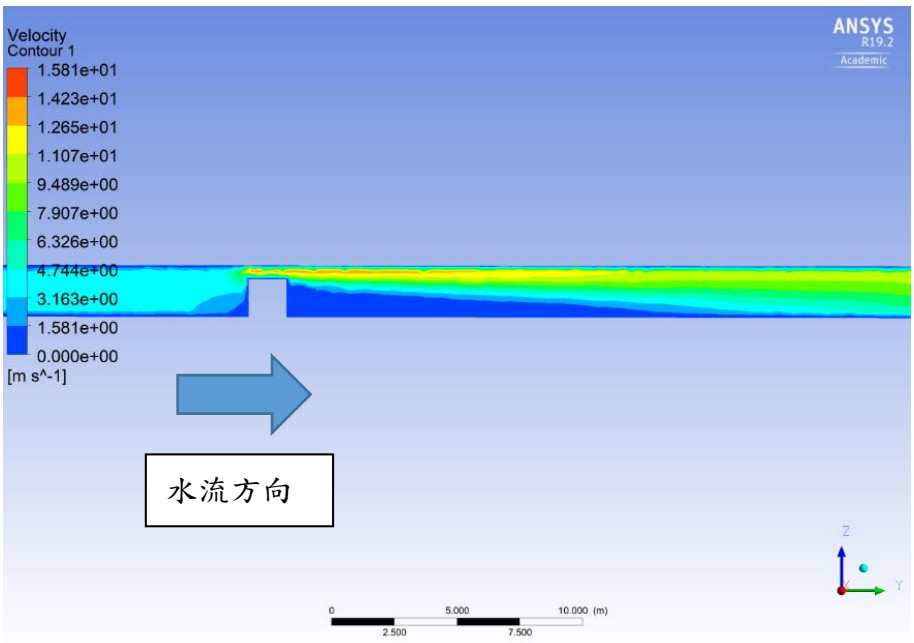


圖 4-118　1.5m 高上拱型固床工於剖面 z=0 之流況

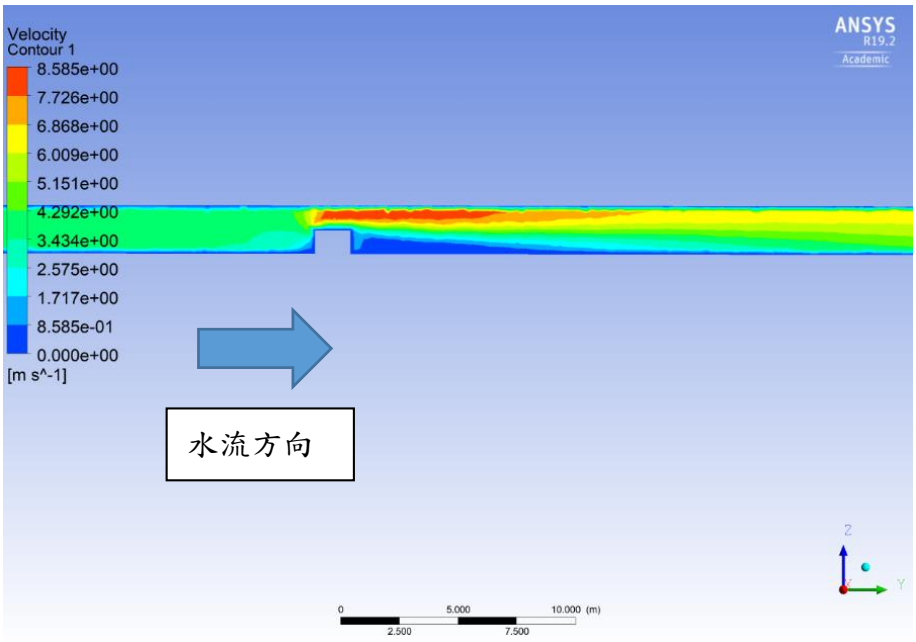


圖 4-119　1m 高上拱型固床工於剖面 z=0 之流況

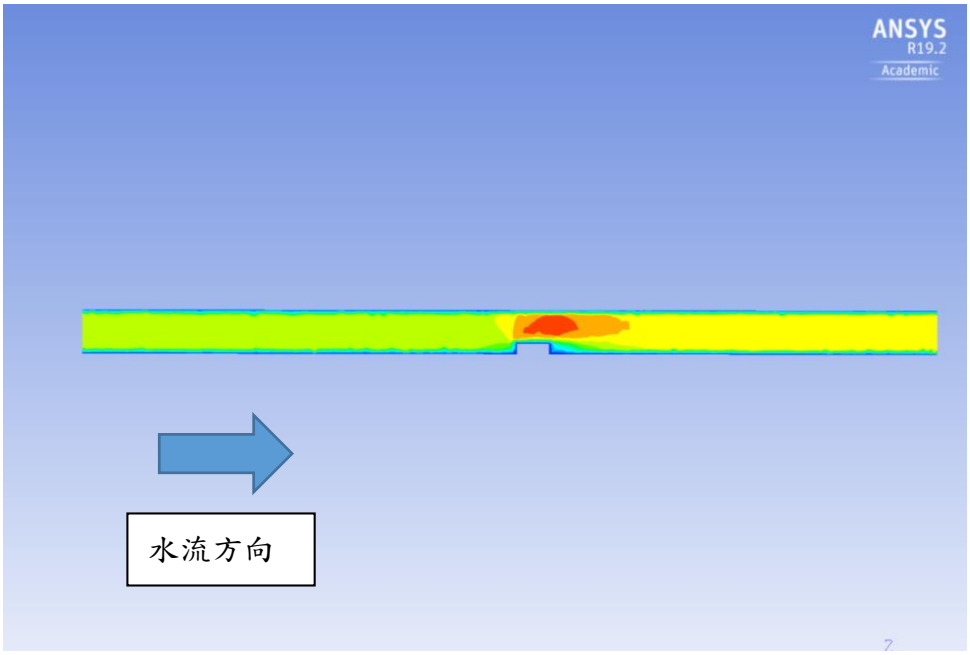


圖 4-120　0.5m 高上拱型固床工於剖面 z=0 之流況

從圖 4-118~4-120 可以看出隨著固床工高度下降，迴游區域隨之變小，上游面之低速區也有變小之趨勢，流速也呈現下降，然其最大流速之區域範圍增加。

四、不同拱度下拱型固床工模擬情形

此部分模擬針對不同拱度之下拱型固床工進行分析比較，透過數值模擬分析在相同外在條件下，因拱度不同而造成的影響以及變化，除原現地尺寸之固床工外，此部份額外模擬尺寸如圖 4-35 所示

(一)下拱固床工弧長 34.6513m

1.流線:

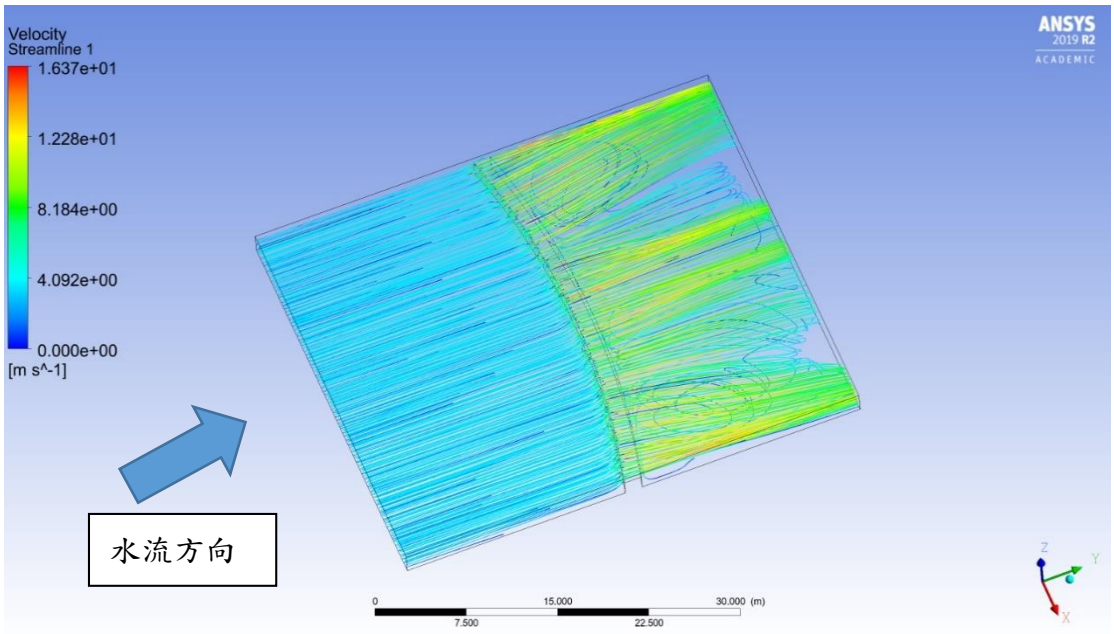


圖 4-121 弧長 34.6513m 下拱型固床工流線分布

2.向量:

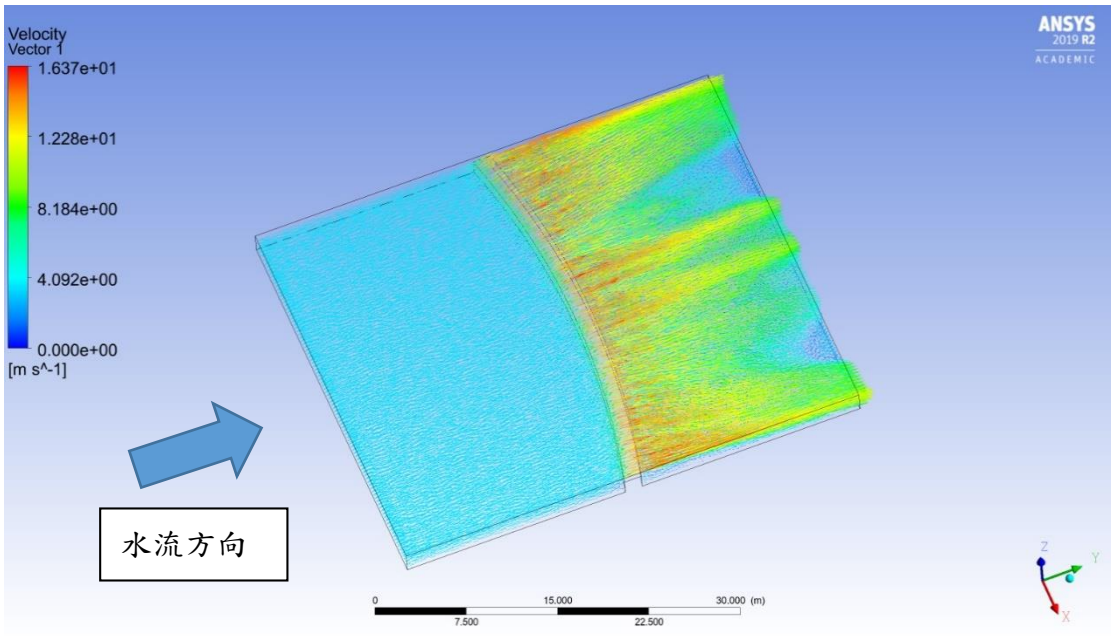


圖 4-122 弧長 34.6513m 下拱型固床工向量分布

3.X=0 流速分布圖

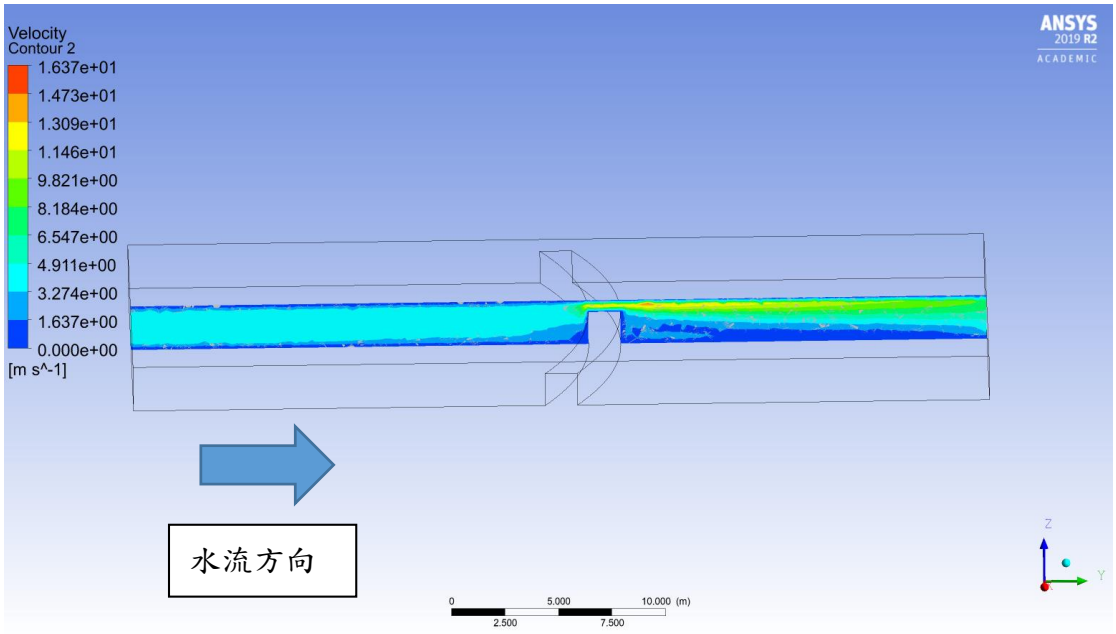


圖 4-123 弧長 34.6513m 下拱型固床工 X=0 流速分布

4.X=8.3 流速分布圖

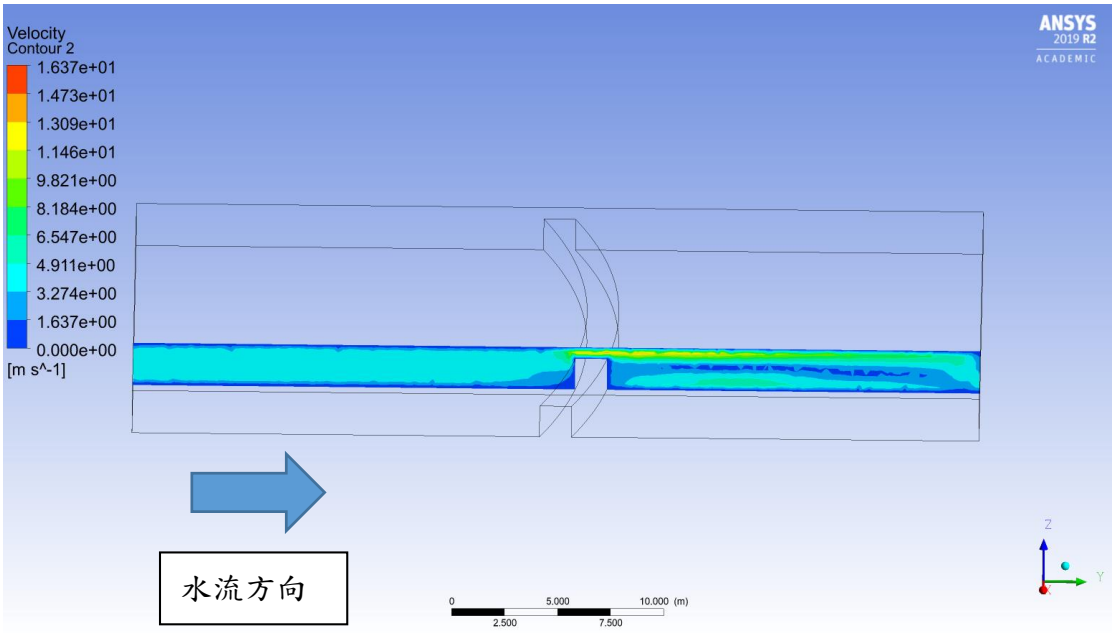


圖 4-124 弧長 34.6513m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速分布圖

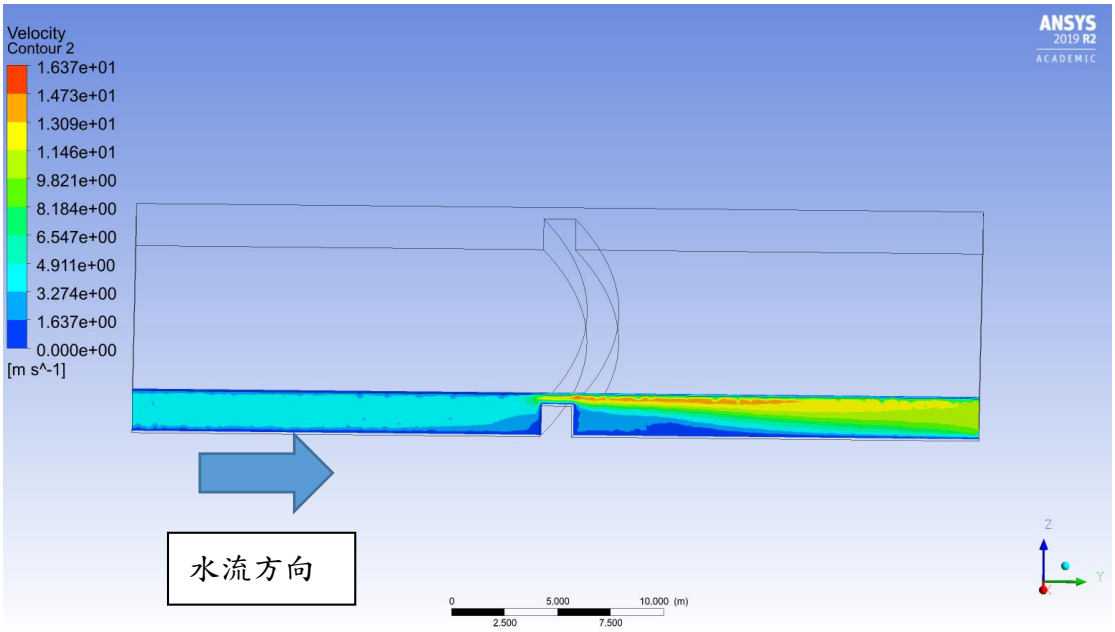


圖 4-125 弧長 34.6513m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布

(二)下拱型固床工弧長 35.4552m

1.流線

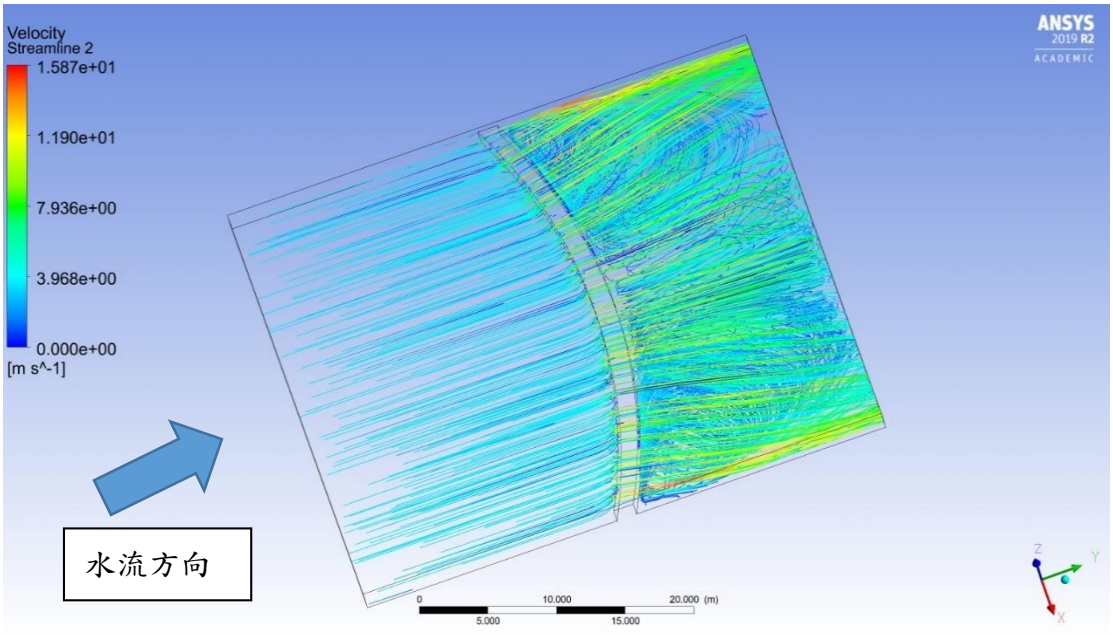


圖 4-126 弧長 35.4552m 下拱型固床工流線分布

2.向量

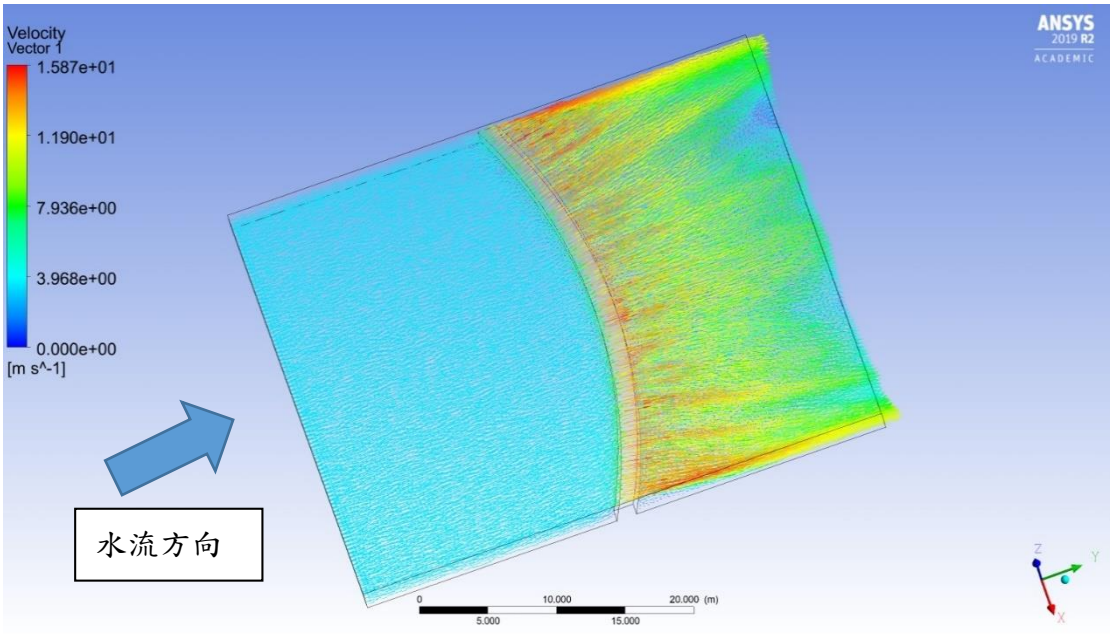


圖 4-127 弧長 35.4552m 下拱型固床工向量分布

3.X=0 流速分布圖

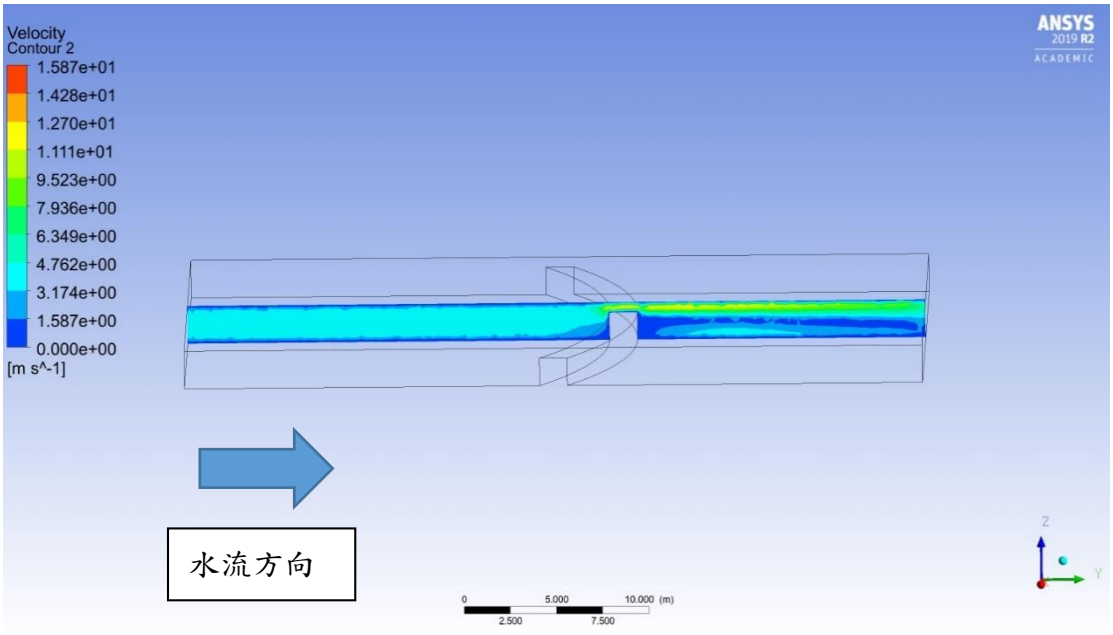


圖 4-128 弧長 35.4552m 下拱型固床工 X=0 流速分布

4.X=8.3 流速分布圖

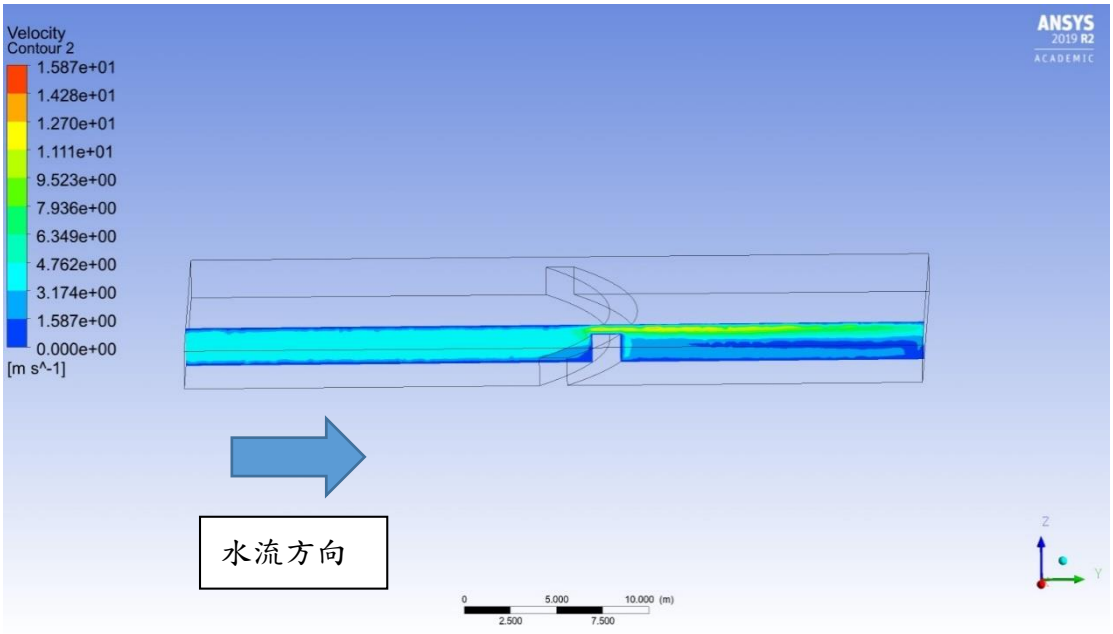


圖 4-129 弧長 35.4552m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速分布圖

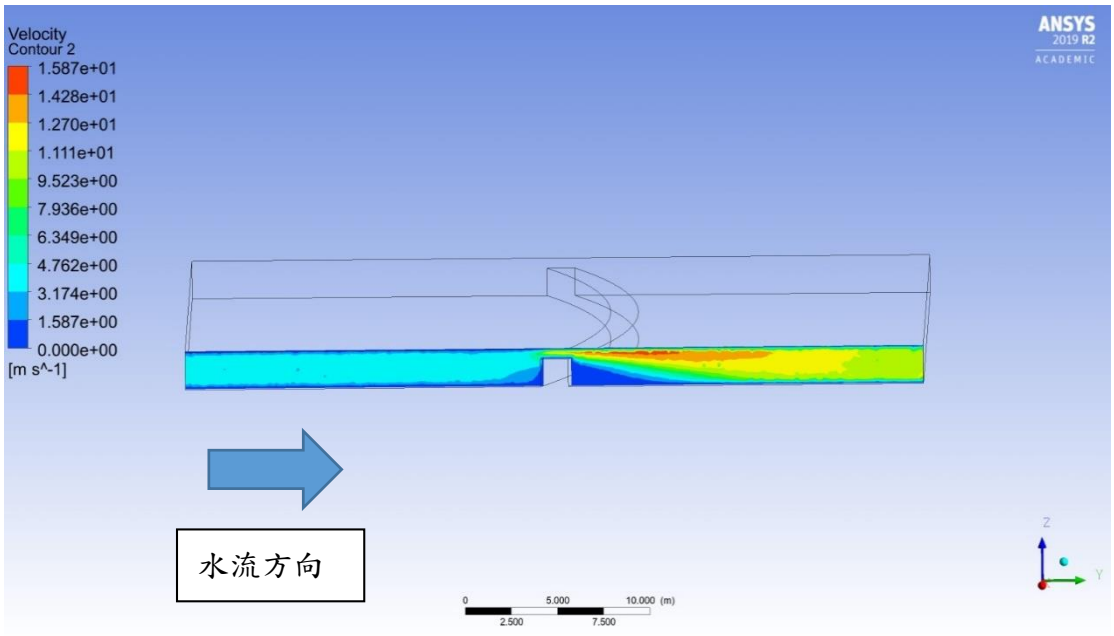


圖 4-130 弧長 35.4552m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布

(三)下拱型固床工弧長 36.5625m

1.流線

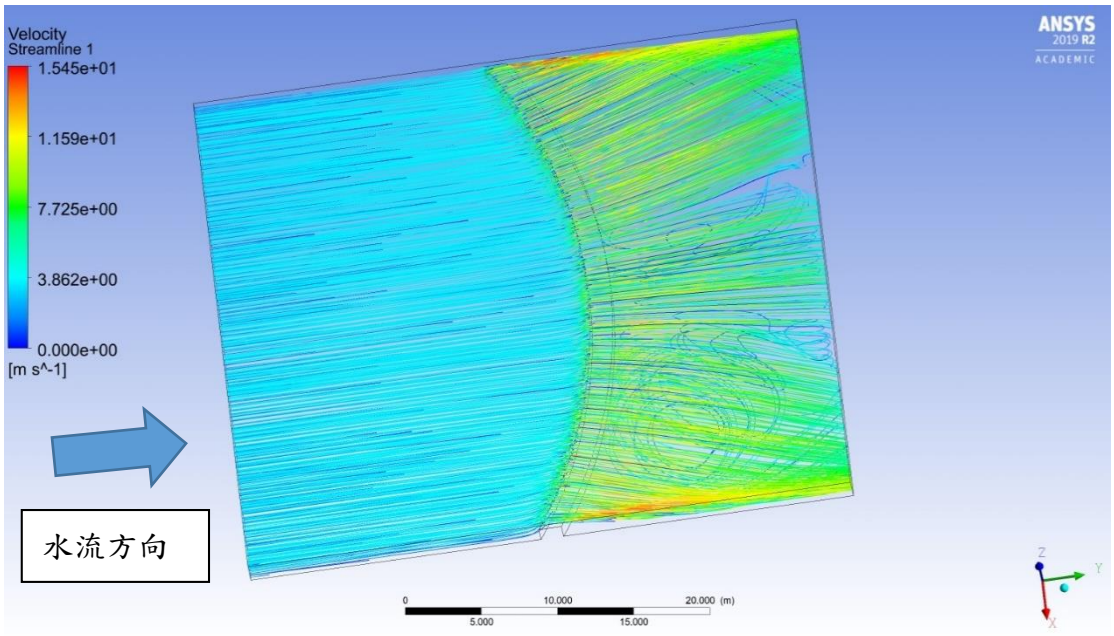


圖 4-131 弧長 36.5625m 下拱型固床工流線分布

2.向量

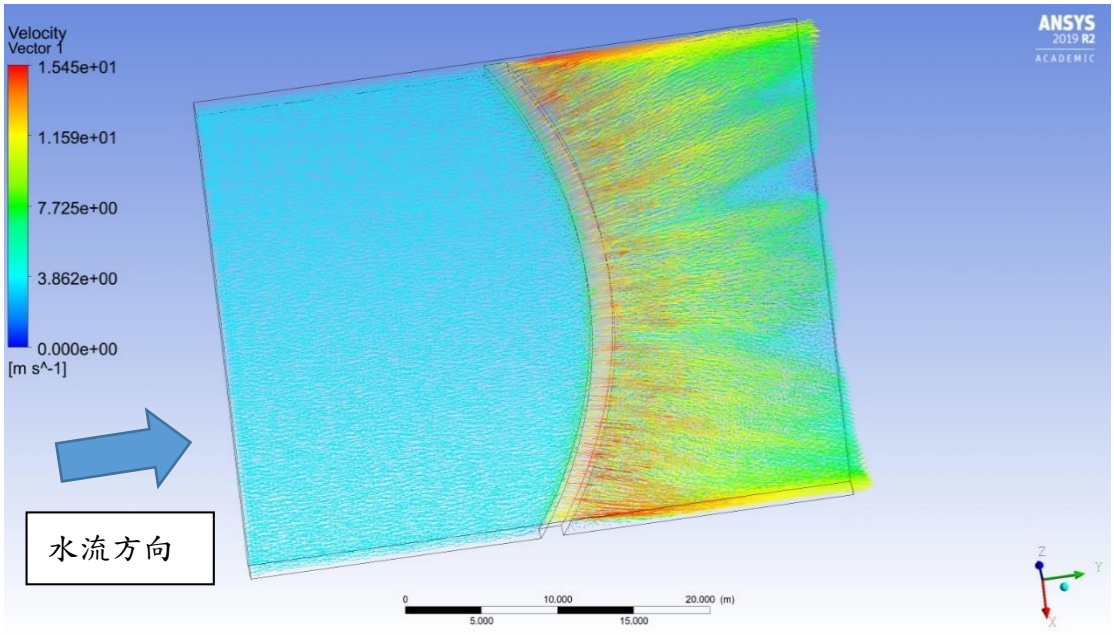


圖 4-132 弧長 36.5625m 下拱型固床工向量分布

3.X=0 流速分布圖

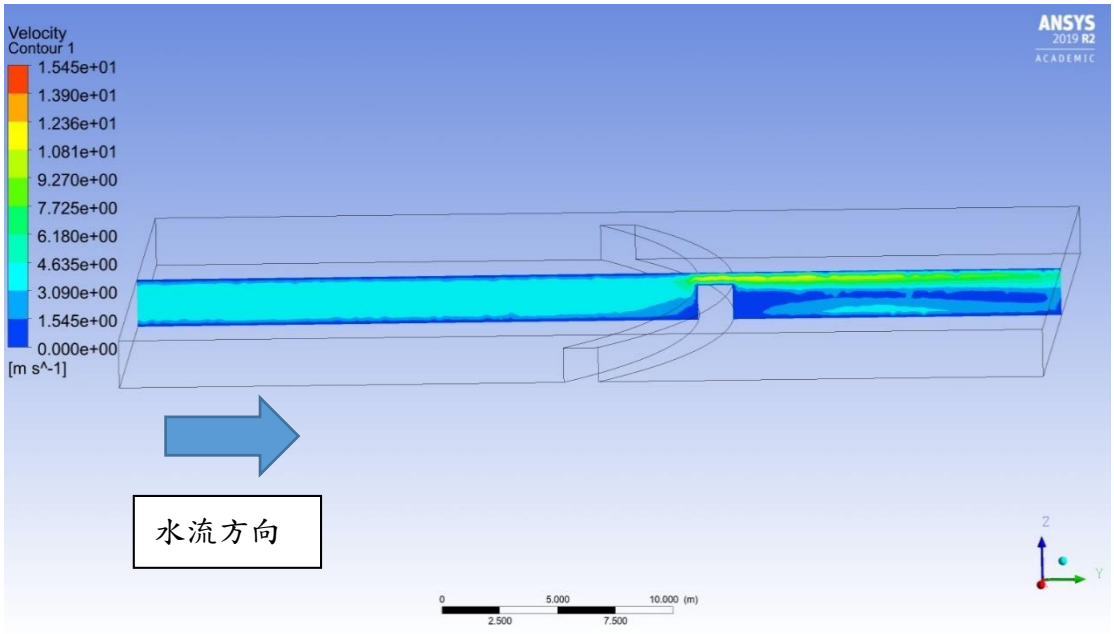


圖 4-133 弧長 36.5625m 下拱型固床工 X=0 流速分布

4.X=8.3 流速分布圖

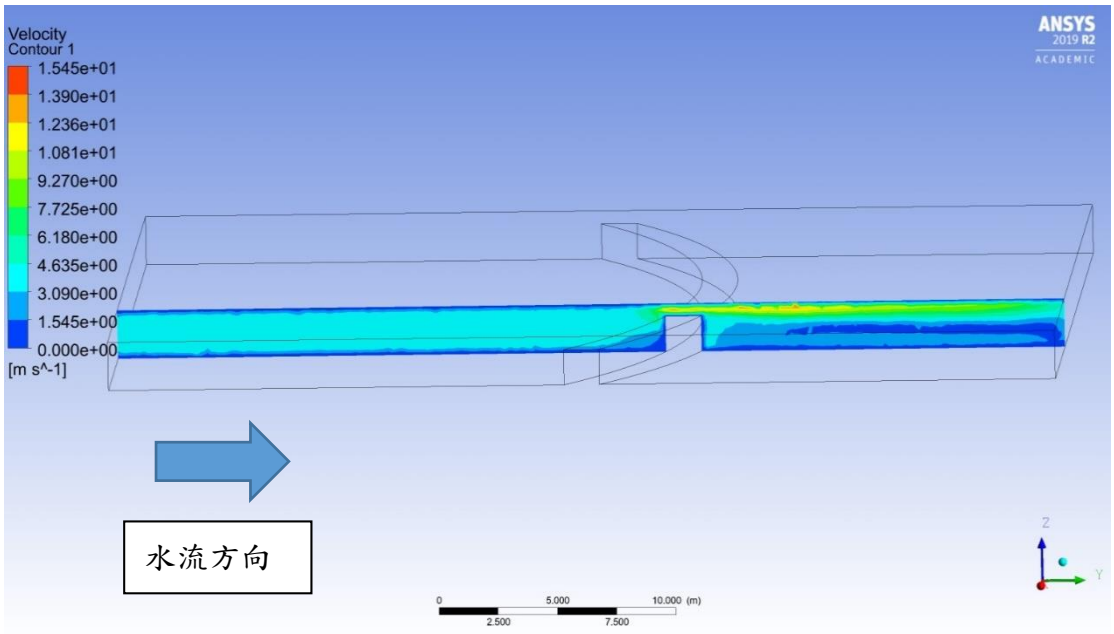


圖 4-134 弧長 36.5625m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速分布圖

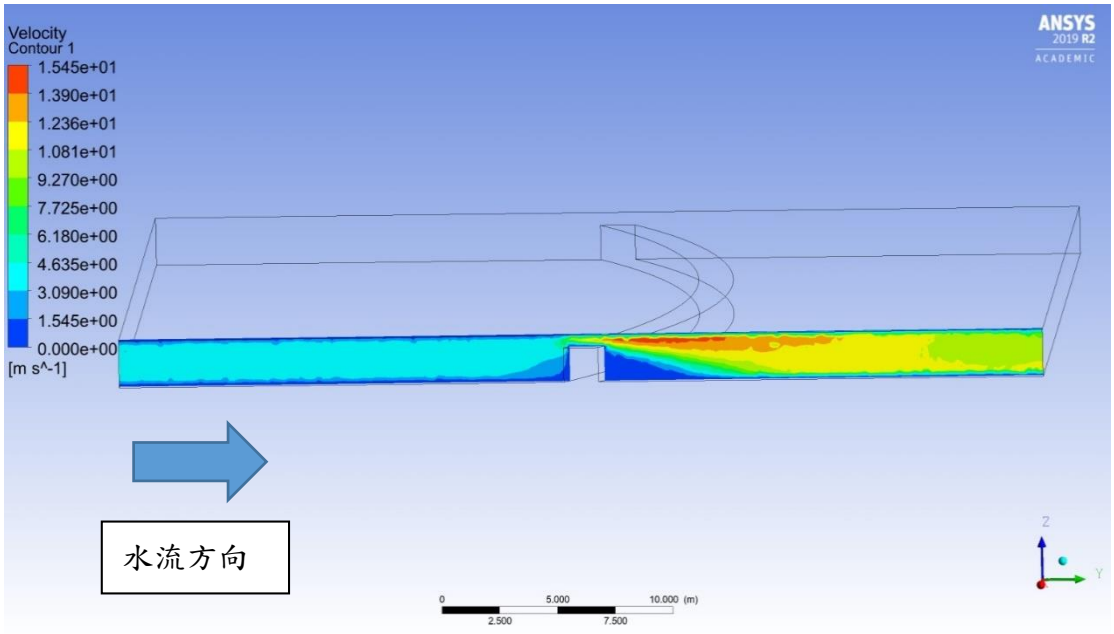


圖 4-135 弧長 36.5625m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布

(四)下拱型固床工弧長 37.9574m

1.流線

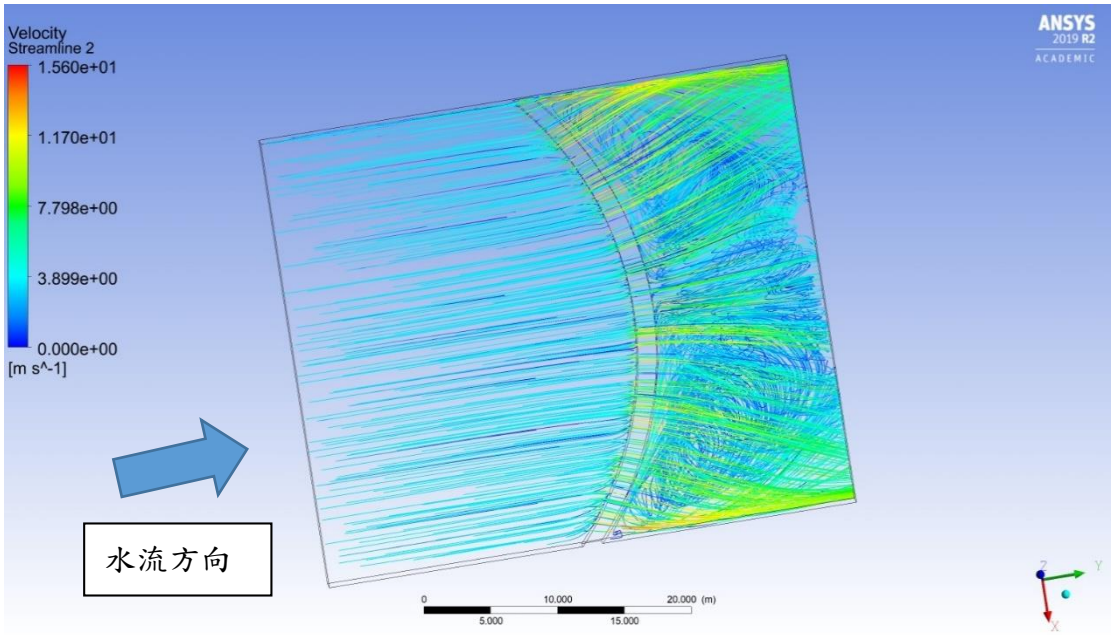


圖 4-136 弧長 37.9574m 下拱型固床工流線分布

2.向量

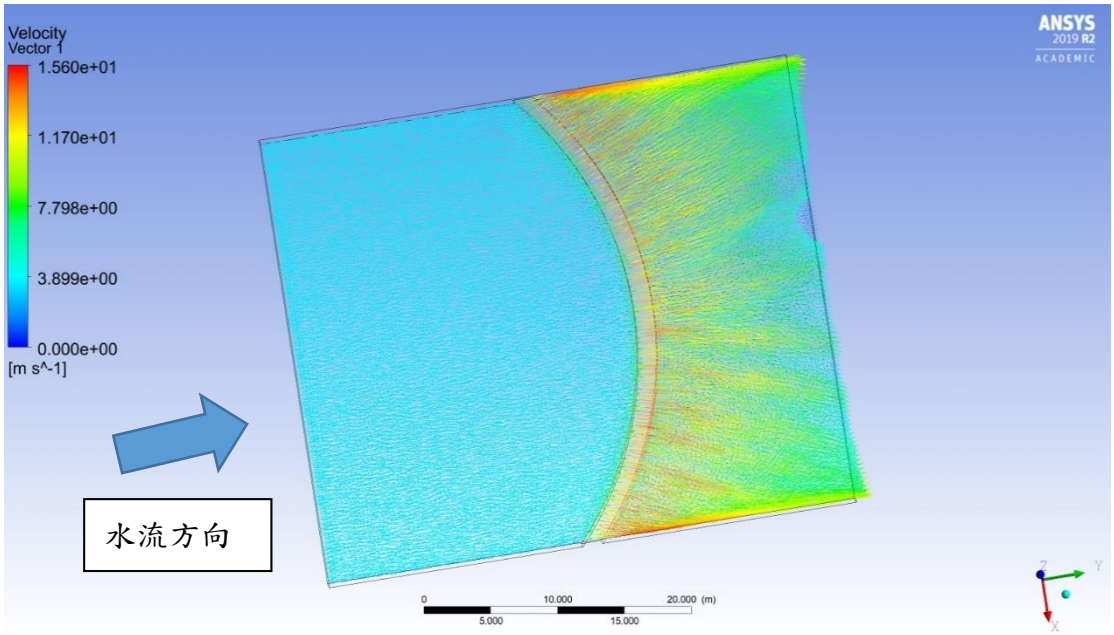


圖 4-137 弧長 37.9574m 下拱型固床工向量分布

3.X=0 流線分布圖

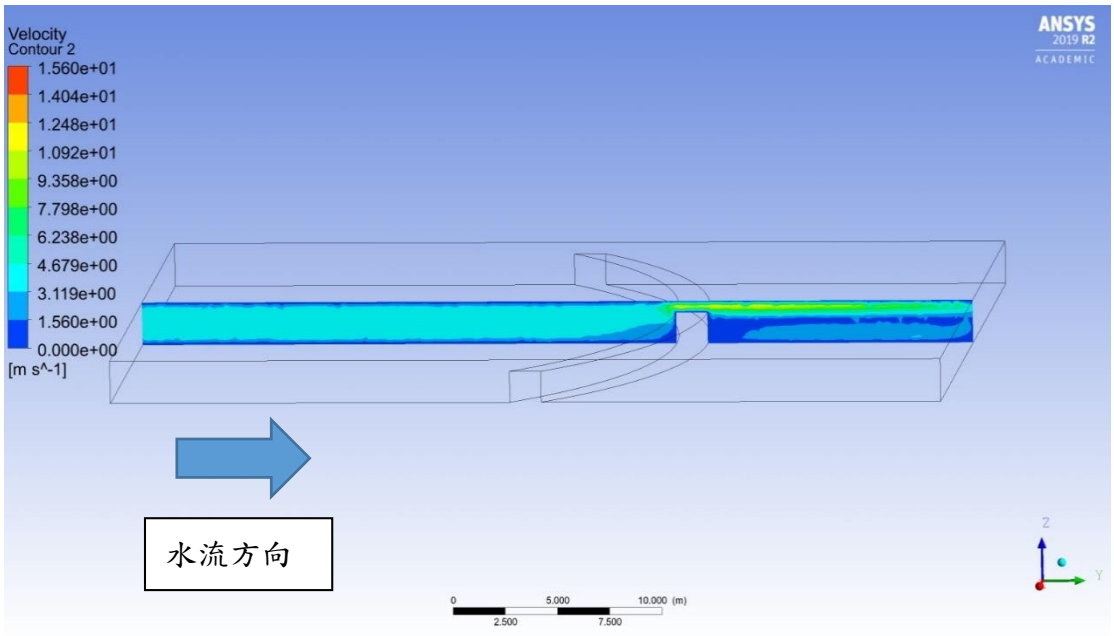


圖 4-138 弧長 37.9574m 下拱型固床工 X=0 流速分布

4.X=8.3 流線分布圖

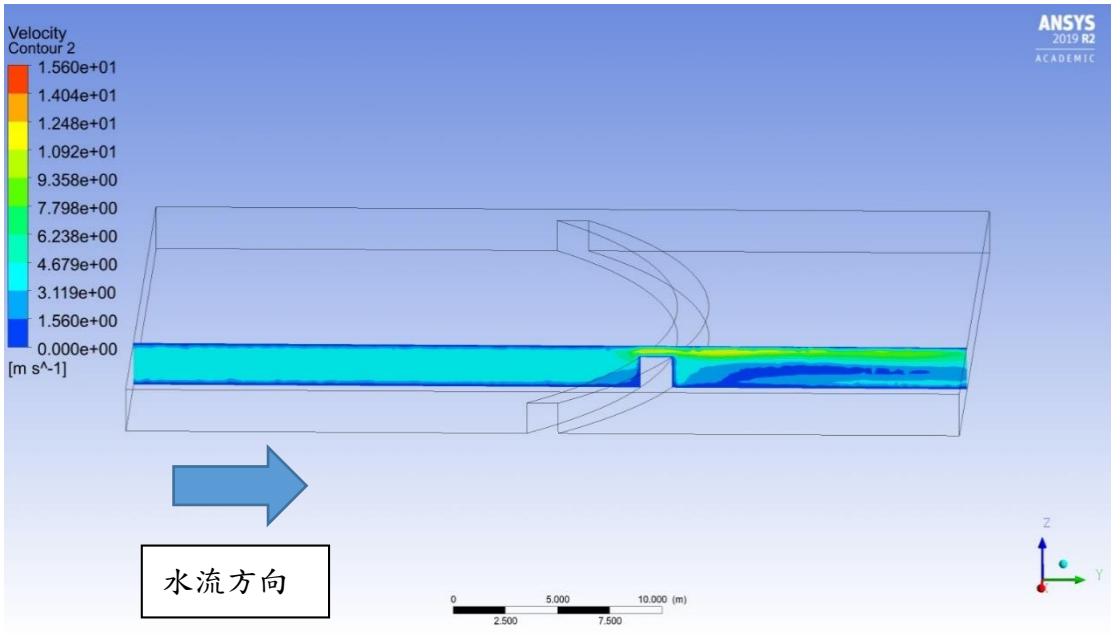


圖 4-139 弧長 37.9574m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流線分布圖

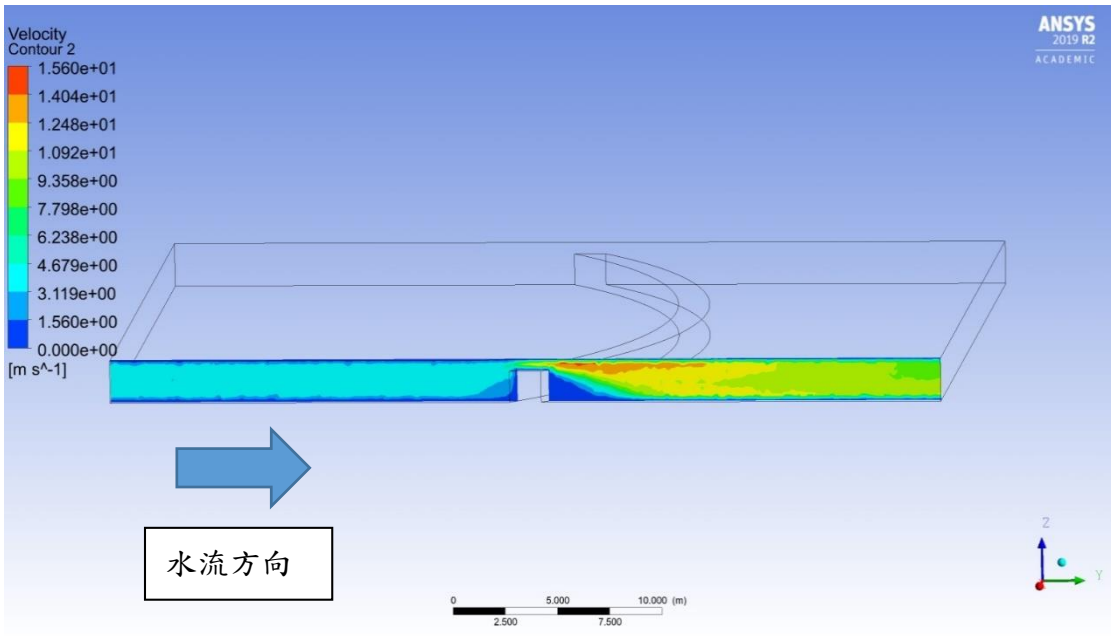


圖 4-140 弧長 37.9574m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布

(五)下拱型固床工弧長 39.6188m

1.流線

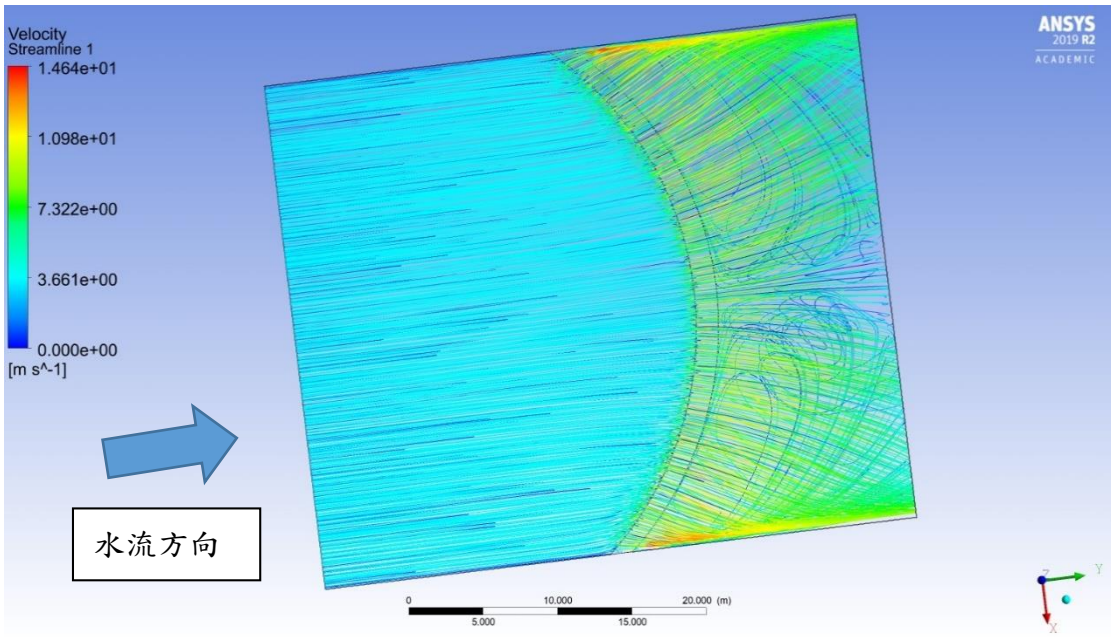


圖 4-141 弧長 39.6188m 下拱型固床工流線分布

2.向量

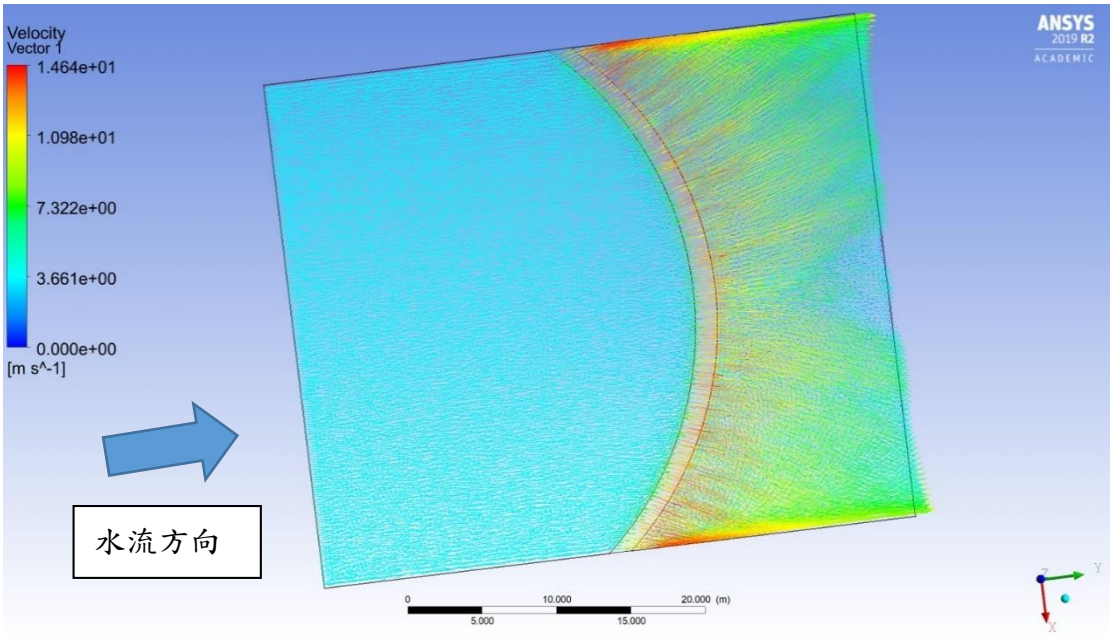


圖 4-142 弧長 39.6188m 下拱型固床工向量分布

3.X=0 流速分布圖

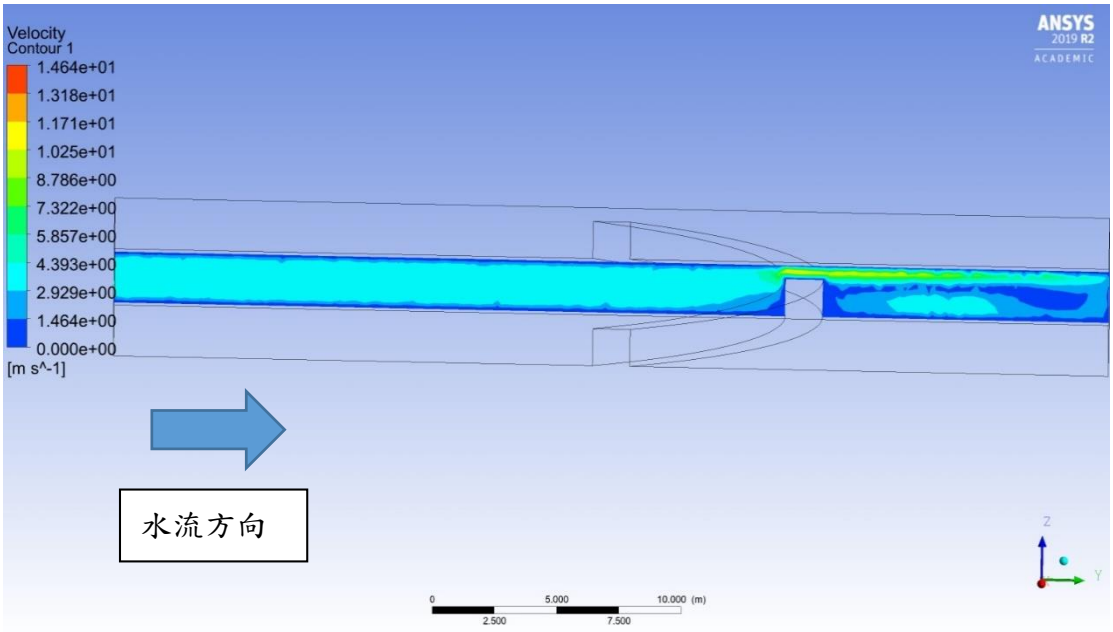


圖 4-143 弧長 39.6188m 下拱型固床工 X=0 流速分布

4.X=8.3 流速分布圖

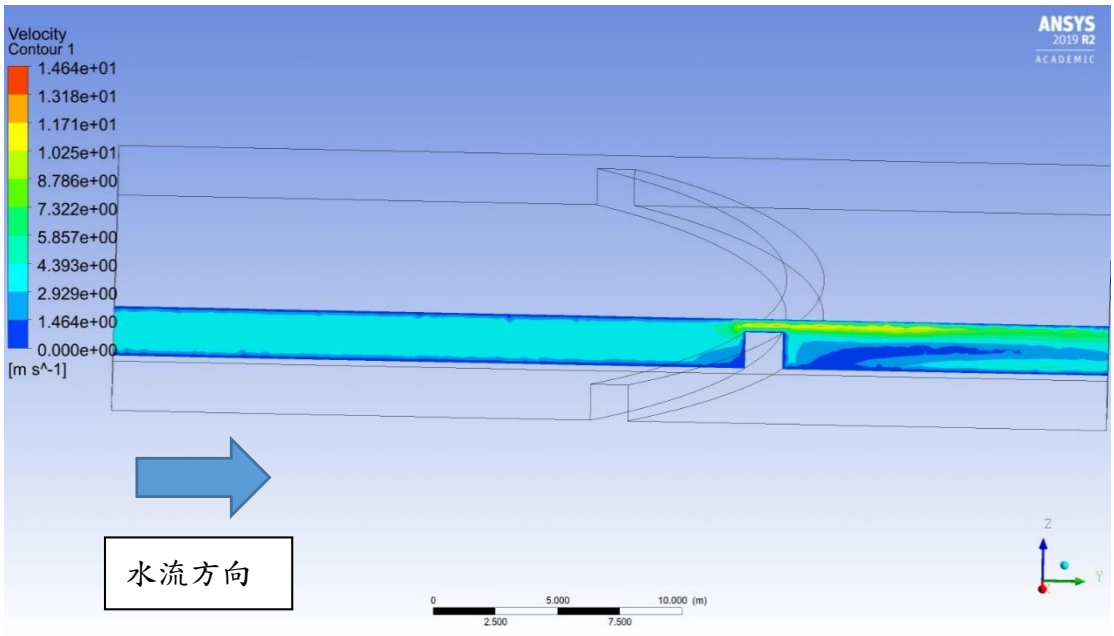


圖 4-144 弧長 39.6188m 下拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速分布圖

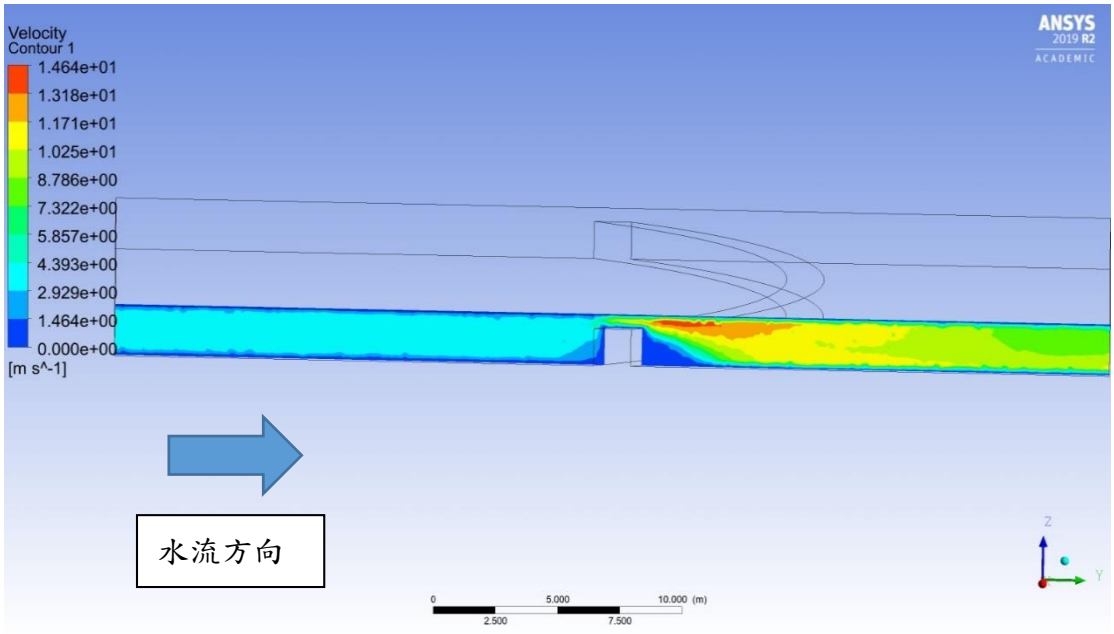


圖 4-145 弧長 39.6188m 下拱型固床工 X=16.6 流速分布

從圖 4-121~4-145 可以看到針對下拱型固床工，其最大流速會隨著拱度增加而減少，然而其於弧長為 37.9574m 時有稍微增大之情形產生，增加約 0.2m/s，如圖 4-146 所示。

因下拱分散水流之特性，可以看到 x=16.6 之流速剖面圖，

不同拱度之固床工在固床工下游面之邊壁處均有最大流速產生。

而從流線可以看到，於拱度最小時，其流線於下游面會主要匯集成三條主要流向，而此情形會隨著拱度增大而消失。

從 x=0 之流速剖面圖可以看到，於下游面之流場下方會有一低速區域產生，而隨著拱度的增加，低速區會向流場上方移動，在下方處產生較大之流速。

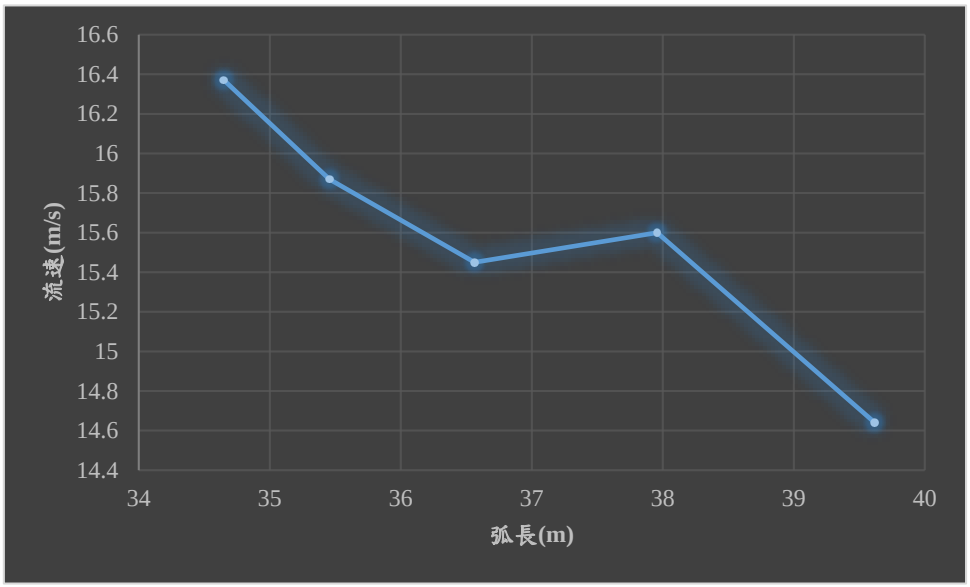


圖 4-146 流速與下拱型固床工弧長關係圖

五、不同拱度上拱型固床工模擬結果

此部分模擬針對不同拱度之上拱型固床工進行分析比較，透過數值模擬分析在相同外在條件下，因拱度不同而造成的影響以及變化，除原現地尺寸之固床工外，此部份額外模擬尺寸如圖 4-35 所示

(一)上拱型固床工弧長 34.6513m

1.流線

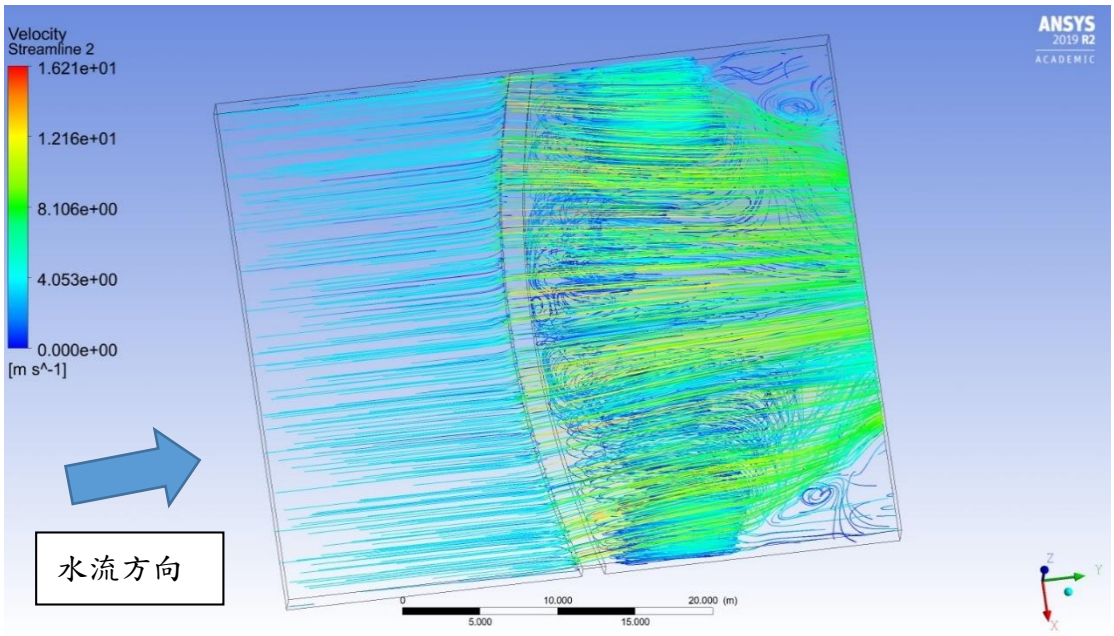


圖 4-147 上拱型固床工弧長 34.6513m 流線分布

2.向量

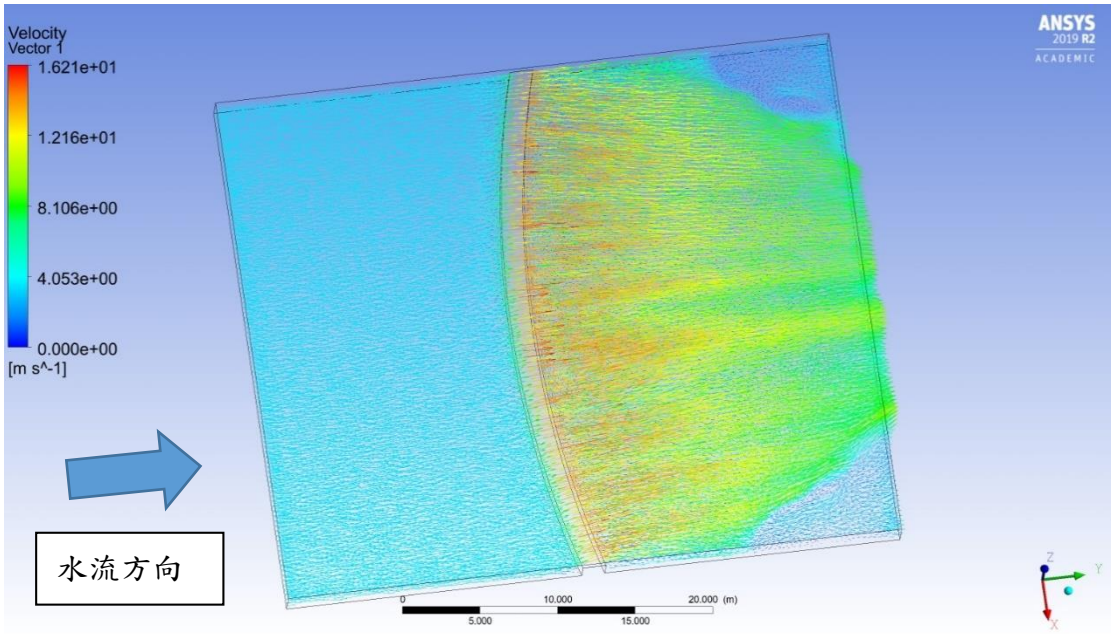


圖 4-148 上拱型固床工弧長 34.6513m 向量分布

3.X=0 流速分布圖

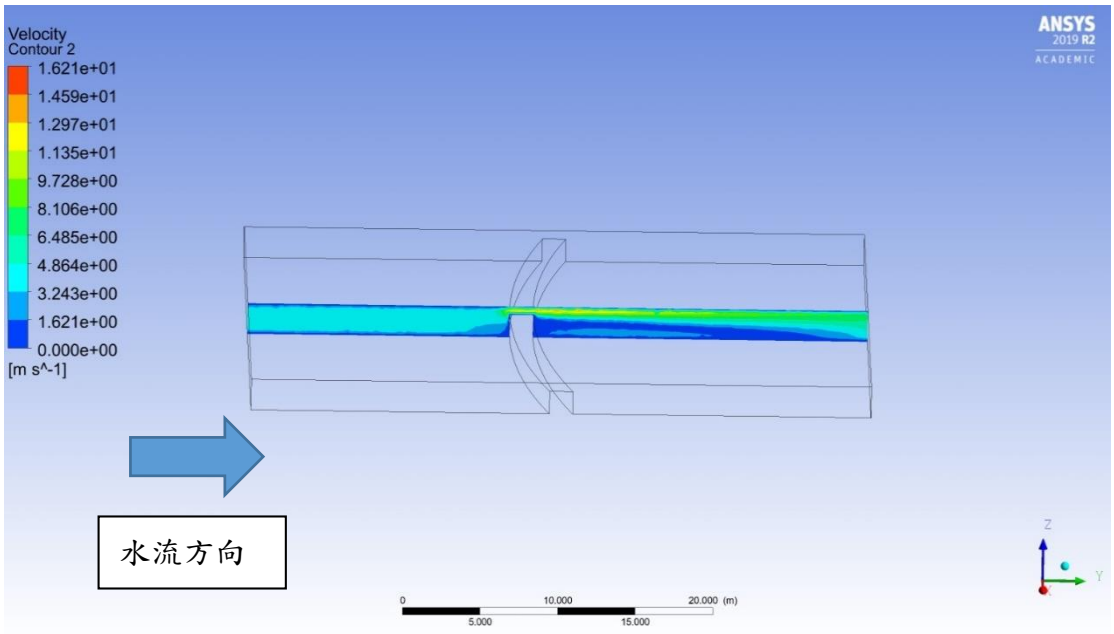


圖 4-149 上拱型固床工弧長 34.6513m X=0 流速分佈

4.X=8.3 流速分布圖

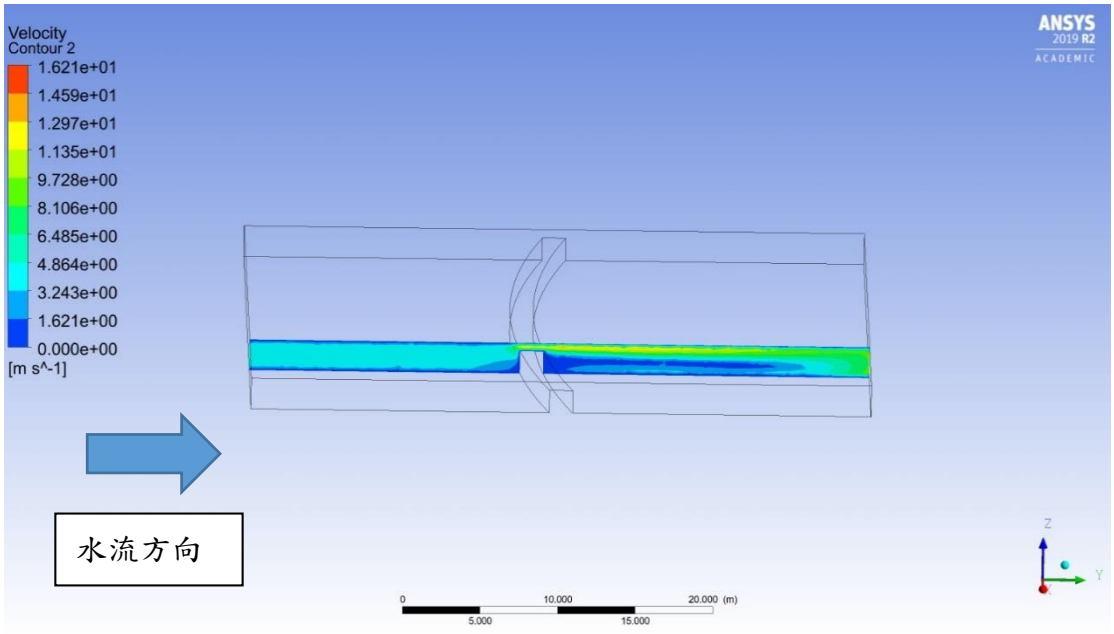


圖 4-150 上拱型固床工弧長 34.6513m X=8.3 流速分佈

5.X=16.6 流速分布圖

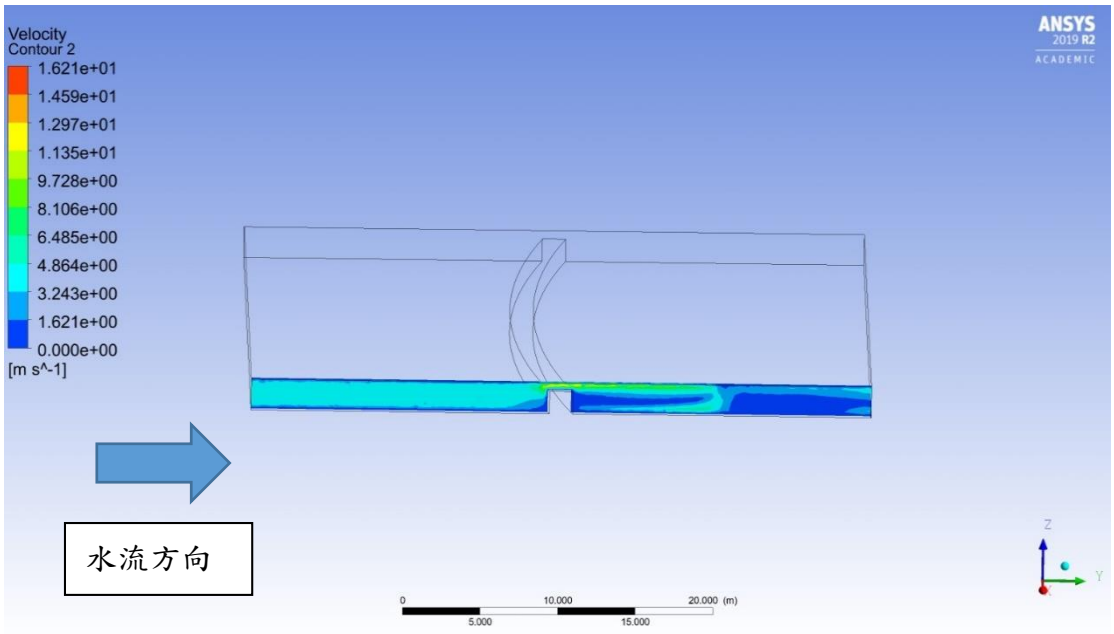


圖 4-151 上拱型固床工弧長 34.6513m X=16.6 流速分佈

(二)上拱型固床工弧長 35.4552m

1.流線

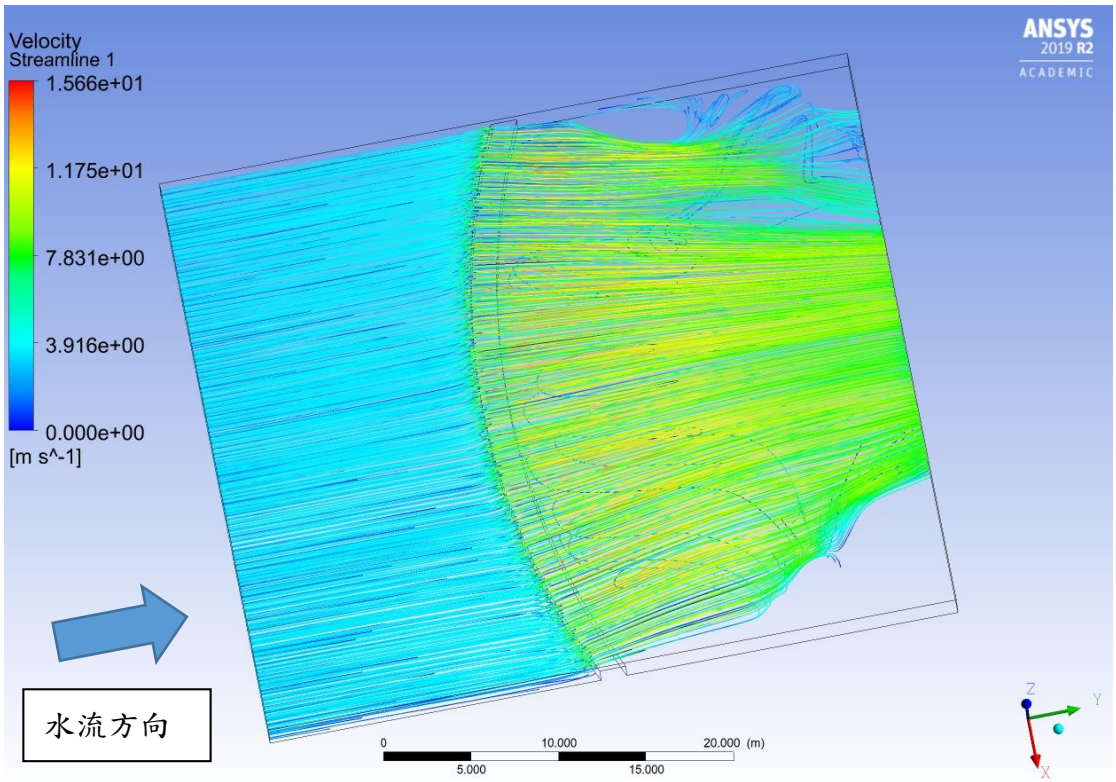


圖 4-152 上拱型固床工弧長 5.4552m 流線分佈

2.向量

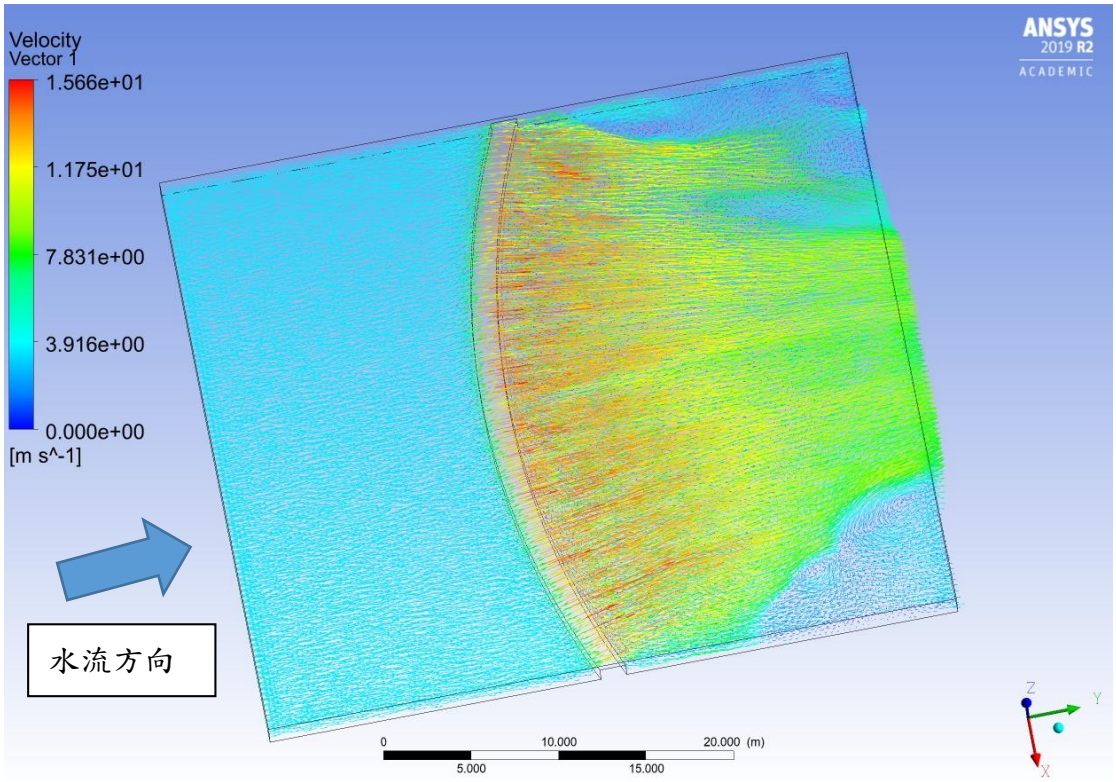


圖 4-153 上拱型固床工弧長 35.4552m 向量分佈

3.X=0 流速分布圖

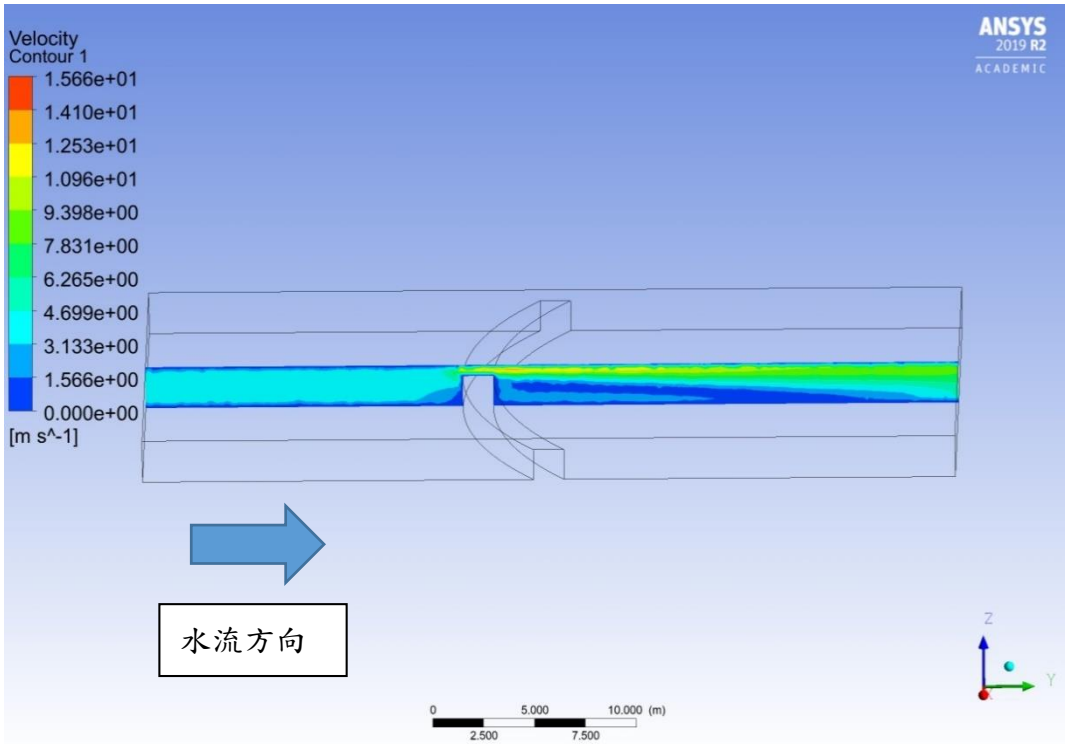


圖 4-154 上拱型固床工弧長 35.4552m X=0 流速分佈

4.X=8.3 流速分布圖

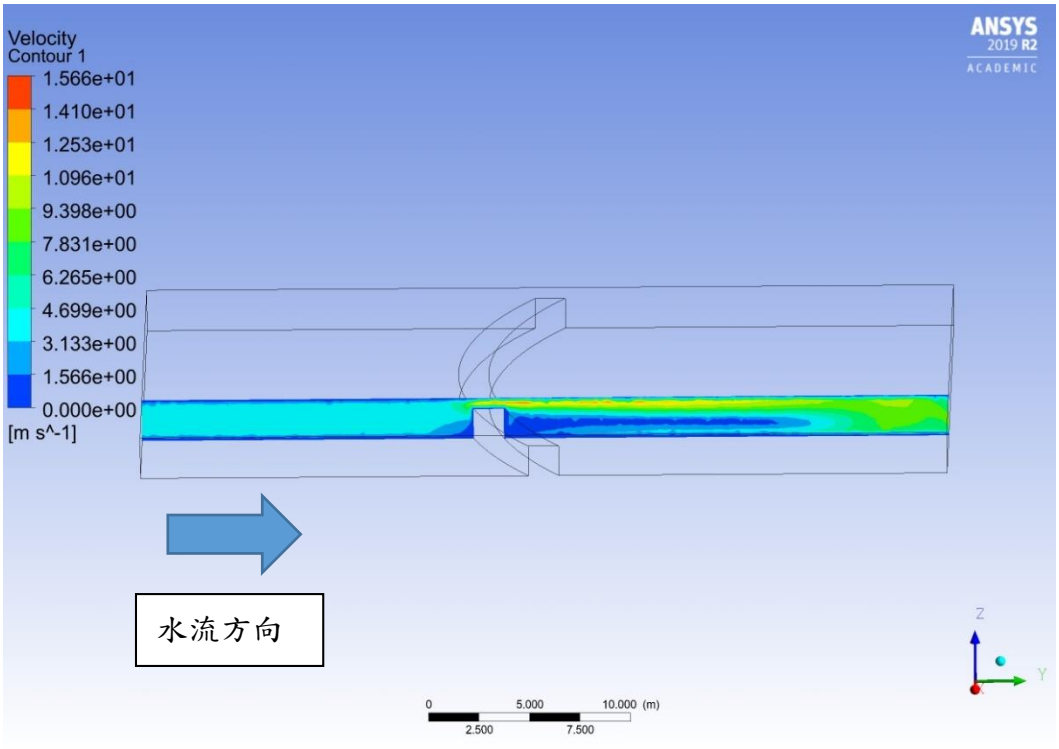


圖 4-155 上拱型固床工弧長 35.4552m X=8.3 流速分佈

5.X=16.6 流速分布圖

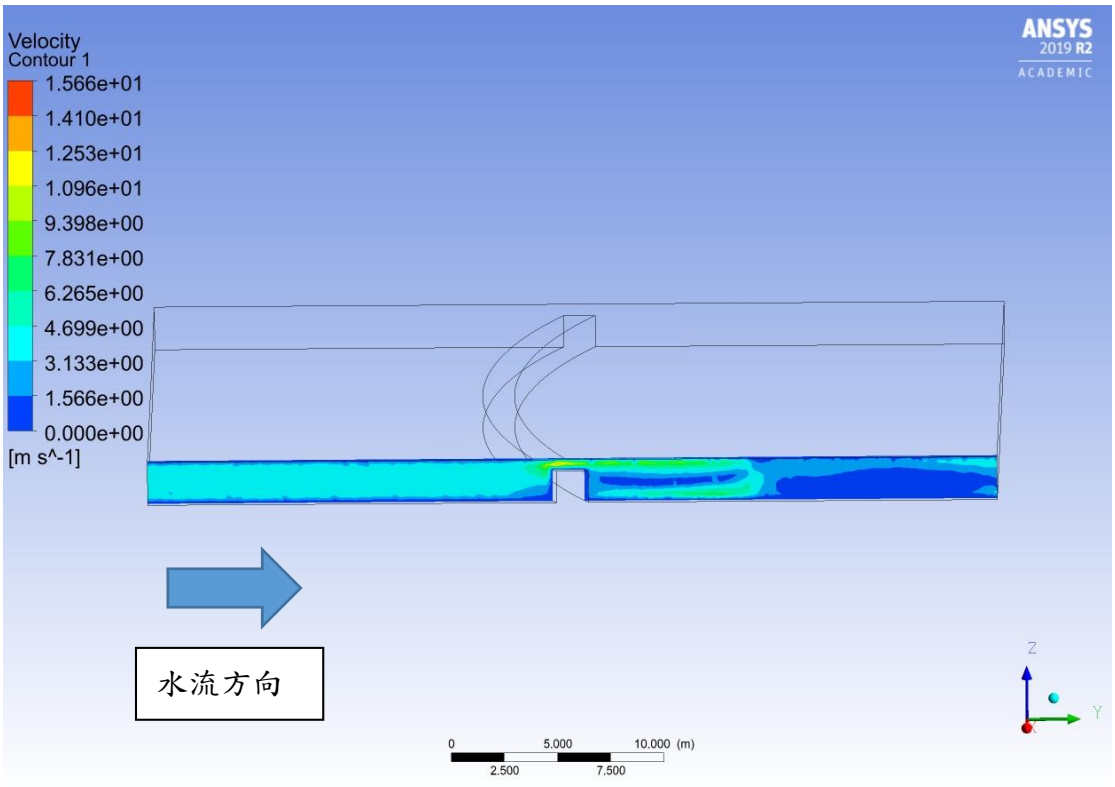


圖 4-156 上拱型固床工弧長 35.4552m X=16.6 流速分佈

(三)上拱型固床工弧長 36.5625m

1.流線

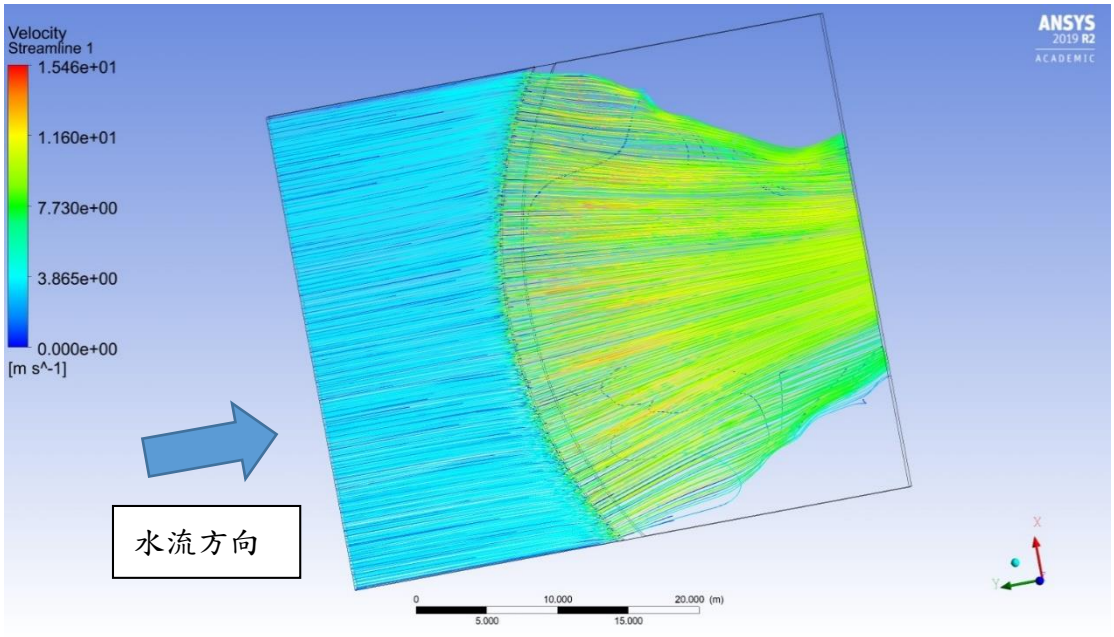


圖 4-157 上拱型固床工弧長 36.5625m 流線分佈

2.向量

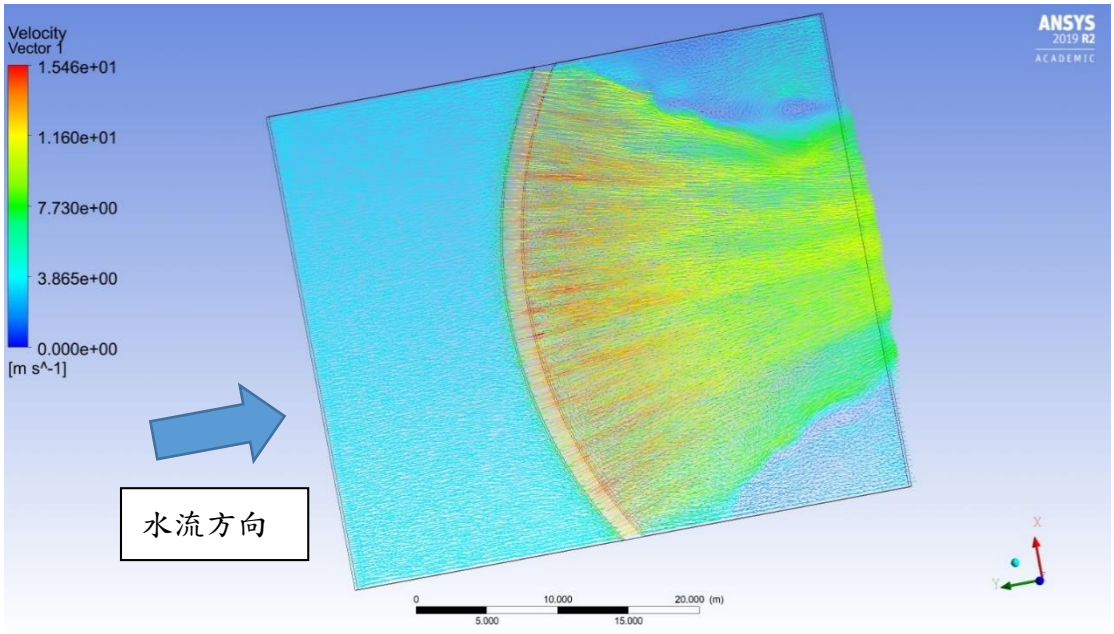


圖 4-158 上拱型固床工弧長 36.5625m 向量分佈

3.X=0 流速分布圖

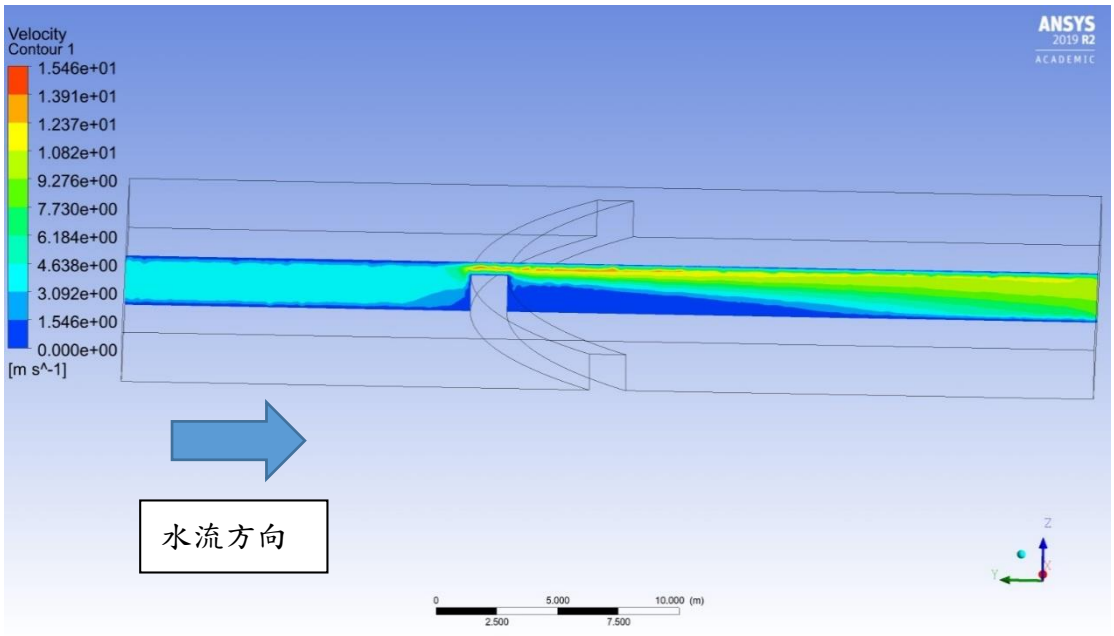


圖 4-159 上拱型固床工弧長 36.5625m X=0 流速分佈

4.X=8.3 流速分布圖

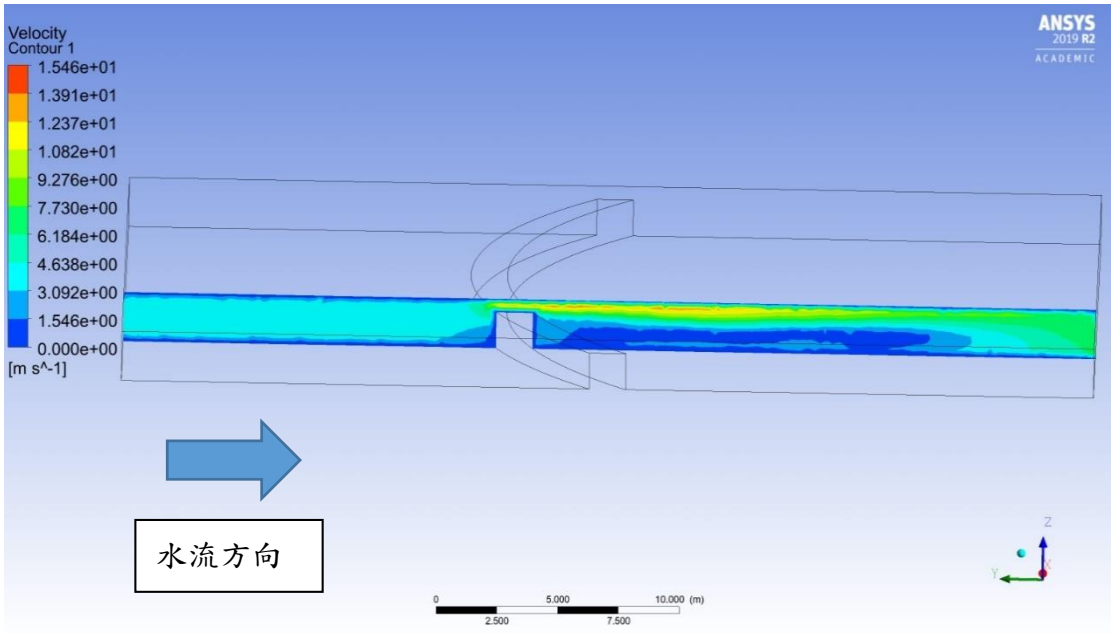


圖 4-160 上拱型固床工弧長 36.5625m X=8.3 流速分佈

5.X=16.6 流速分布圖

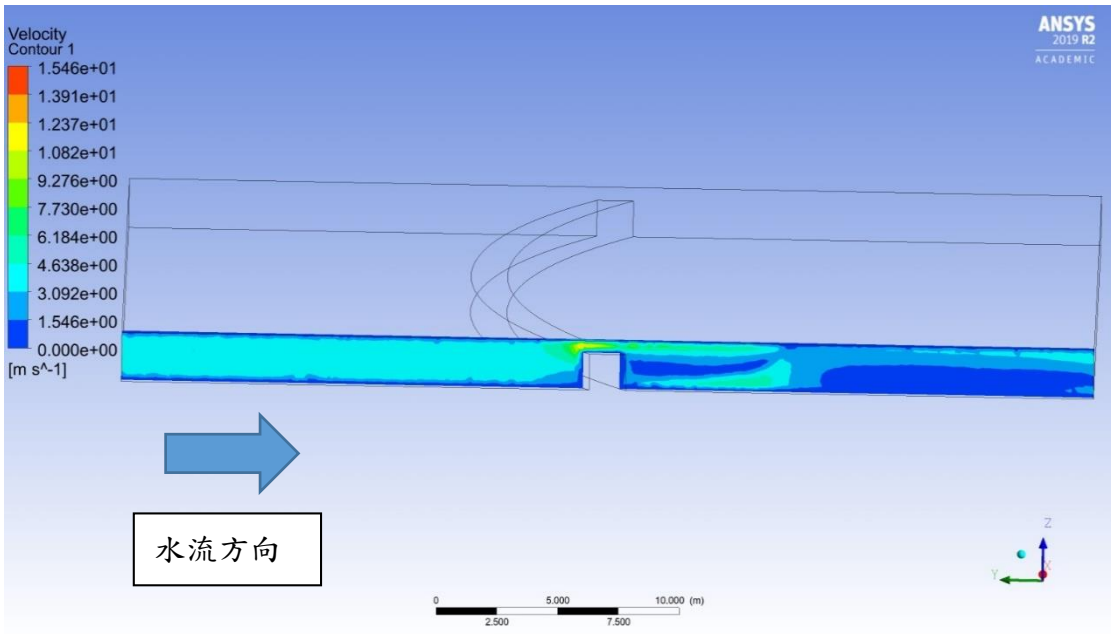


圖 4-161 上拱型固床工弧長 36.5625m X=16.6 流速分佈

(四)上拱型固床工弧長 37.9574m

1.流線

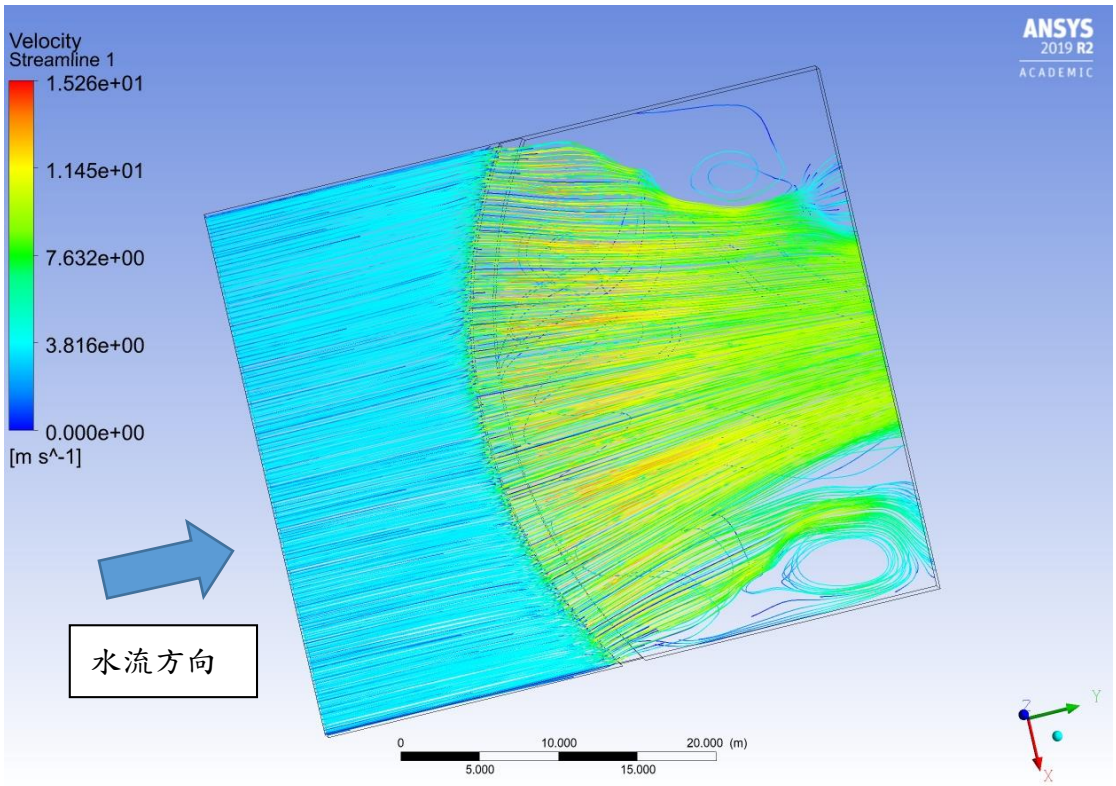


圖 4-162 上拱型固床工弧長 37.9574m 流速分布

2.向量

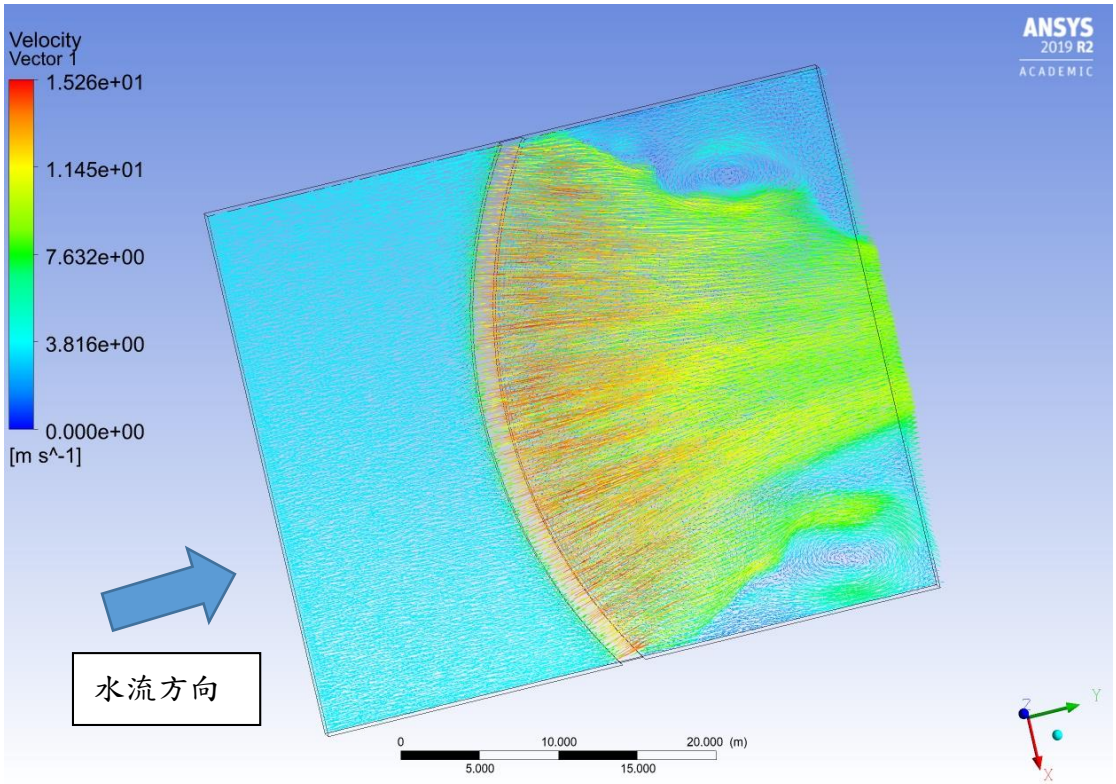


圖 4-163 上拱型固床工弧長 37.9574m 向量分布

3.X=0 流速分布圖

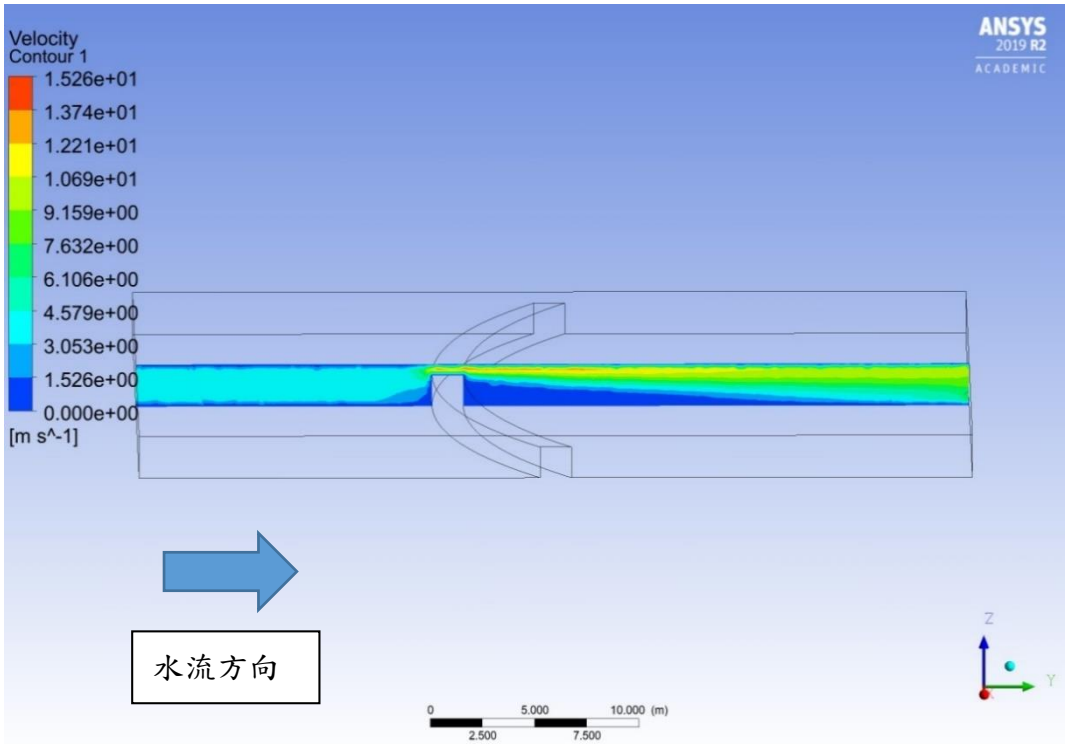


圖 4-164 上拱型固床工弧長 37.9574m X=0 流速分布

4.X=8.3 流速分布圖

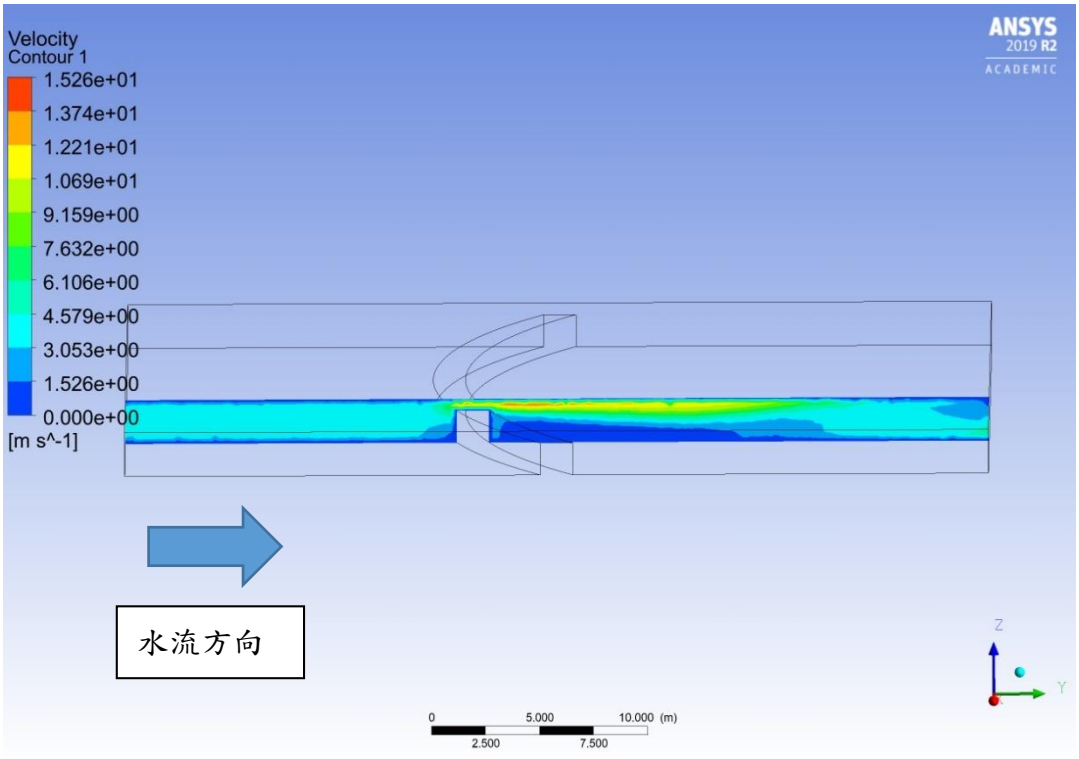


圖 4-165 上拱型固床工弧長 37.9574m X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速分布圖

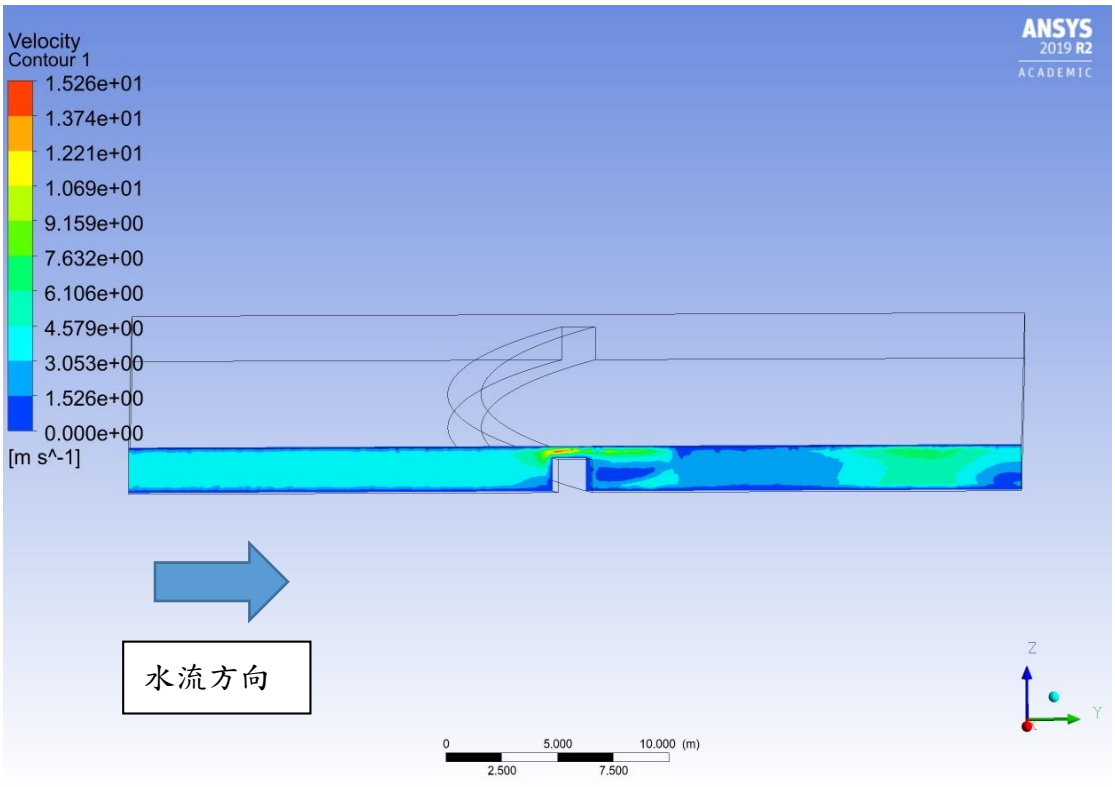


圖 4-166 上拱型固床工弧長 37.9574m X=16.6 流速分布

(五)上拱型固床工弧長 39.6188m.

1.流線

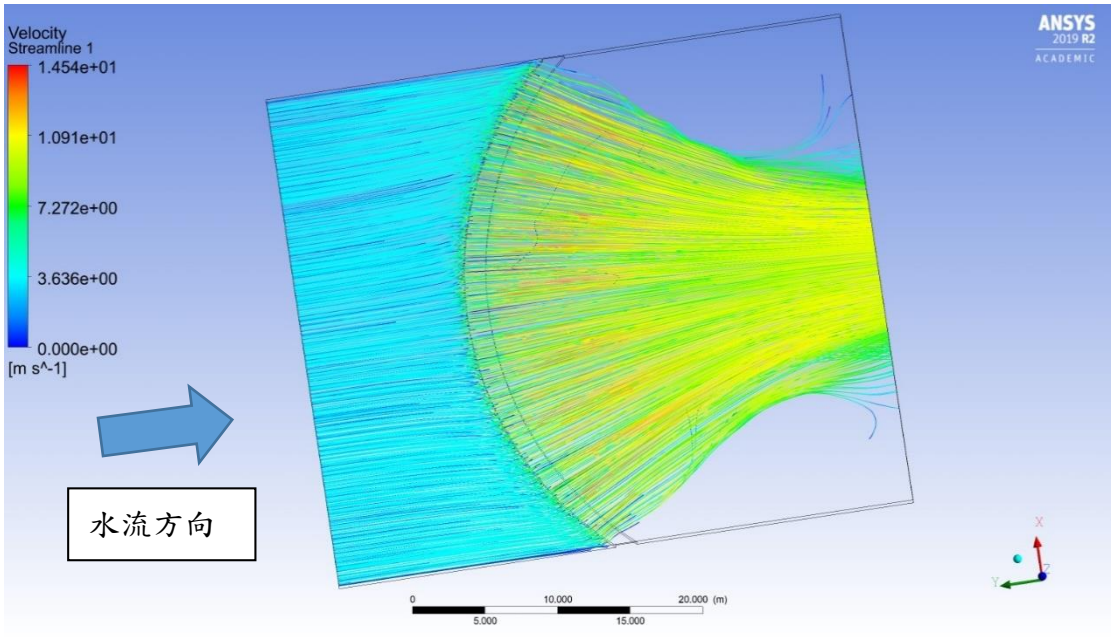


圖 4-167 上拱型固床工弧長 39.6188m 流線分佈

2.向量

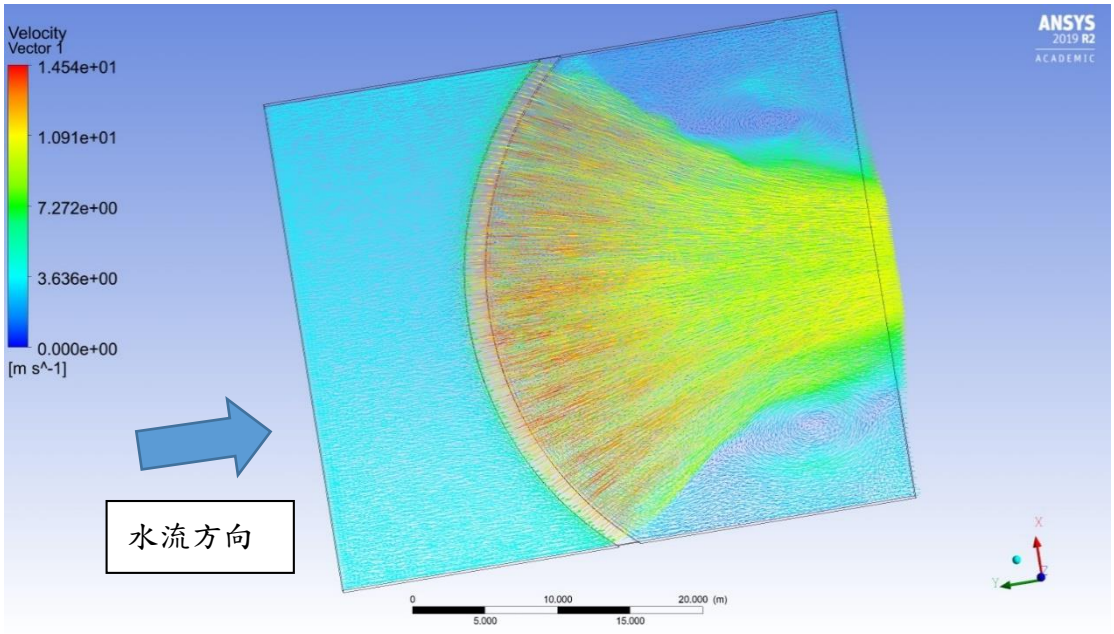


圖 4-168 上拱型固床工弧長 39.6188m 向量分佈

3.X=0 流速分布圖

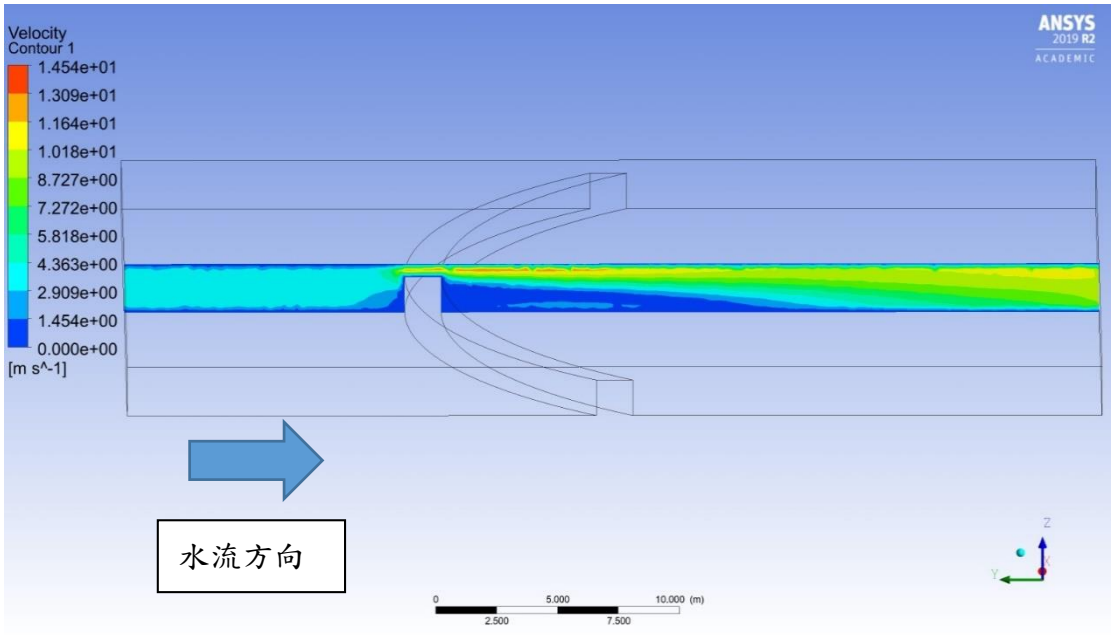


圖 4-169 上拱型固床工弧長 39.6188m X=0 流速分佈

4.X=8.3 流速分布圖

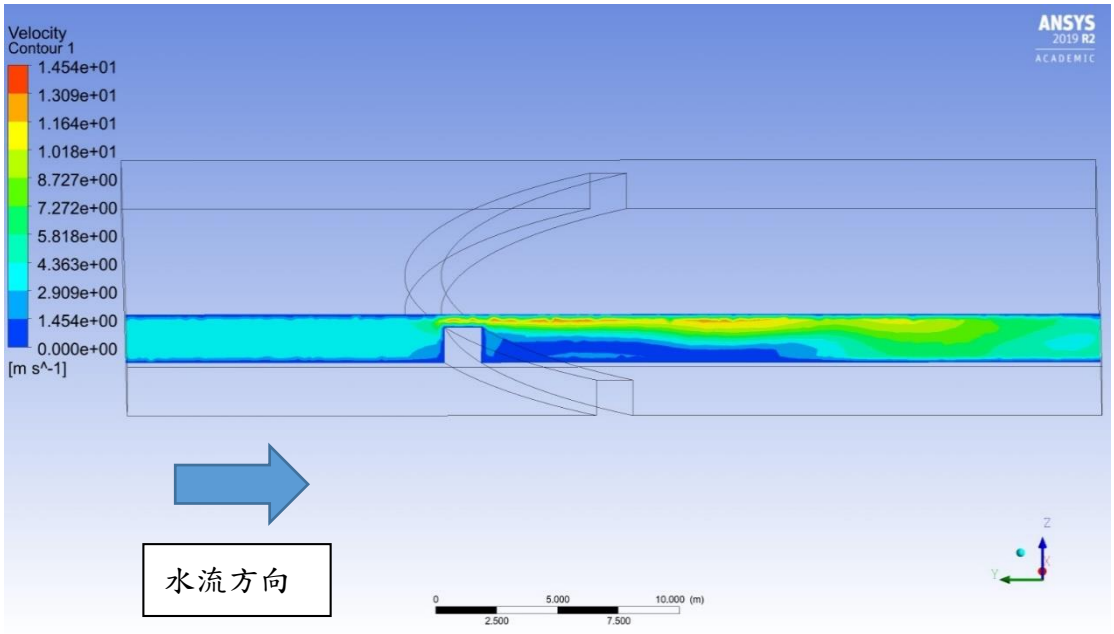


圖 4-170 上拱型固床工弧長 39.6188m X=8.3 流速分佈

5.X=16.6 流速分布圖

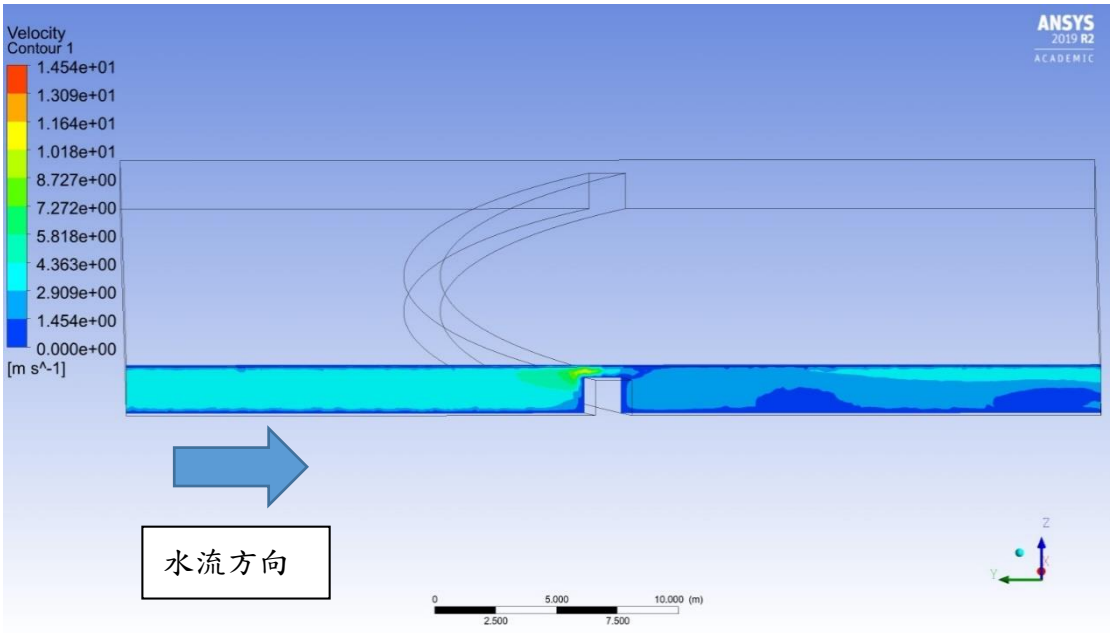


圖 4-171 上拱型固床工弧長 39.6188m X=16.6 流速分佈

從圖 4-147~4-171 可以看到針對上拱型固床工，其最大流速會隨著拱度增加而減少，如圖 4-172 所示。另也可以看到在隨著拱度增加，於下游面不穩定之紊流現象會增加。

因上拱集中水流之特性，可以看到 x=0 之流速剖面圖，在固床工下游面有最大流速產生，且其下方均有一大範圍之低速區。

而上拱型固床工與相同拱度之下拱型固床工比較可以發現其最大流速略小於下拱型固床工，如圖 4-173 所示，可以看到其差距不大，差距最大的是於弧長為 37.9574 時，相差約 0.34m/s，且從模擬圖之流速剖面圖可以看到上拱型固床工流速分布較穩定。

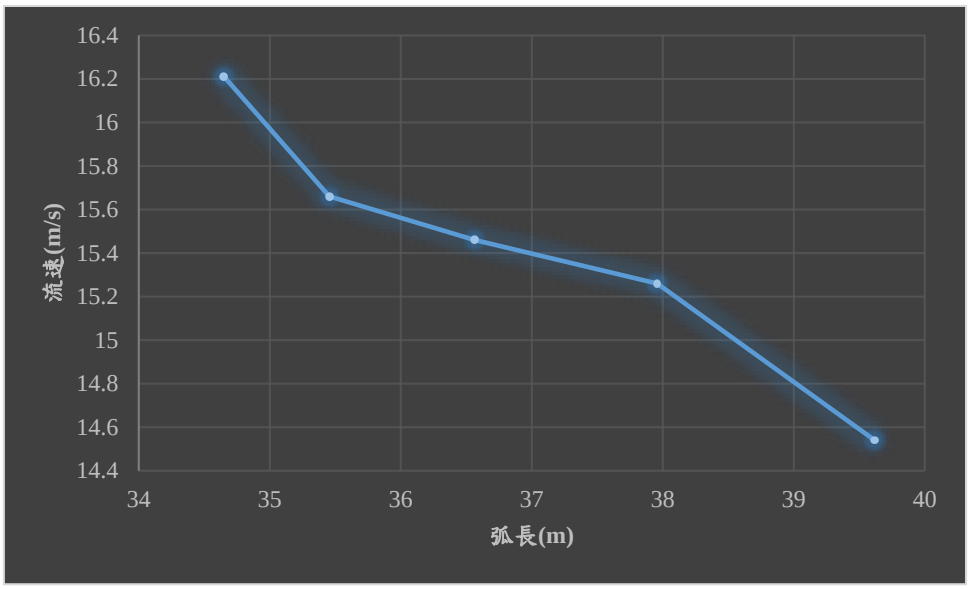


圖 4-172 流速與弧長關係圖

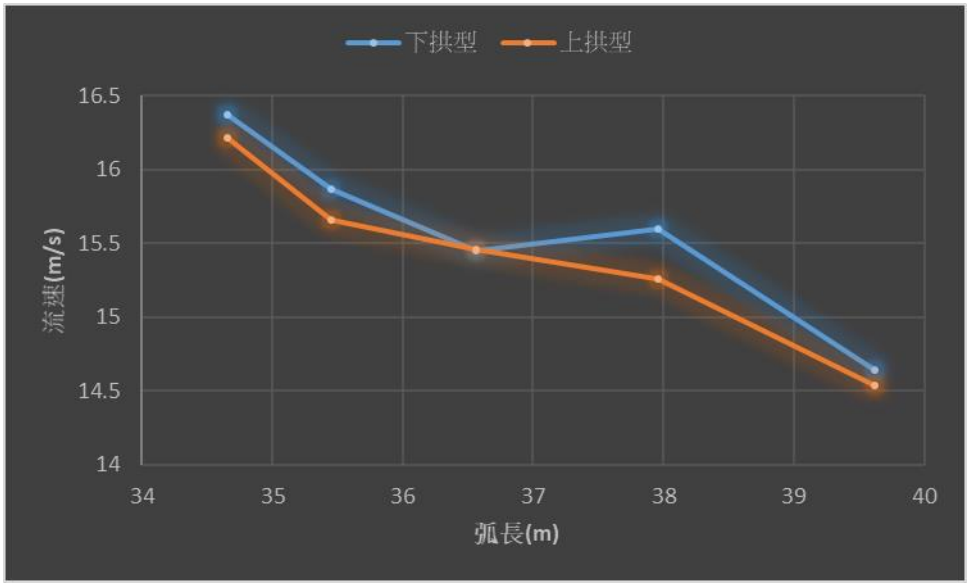


圖 4-173 上下拱固床工流速與弧長關係圖

六、含低水河槽之上下拱型固床工模擬情形

本部分模擬含低水河槽之上拱型以及下拱型固床工，透過數值模擬觀察其流線以及流速變化。

(一)上拱型模擬情形

1.流線

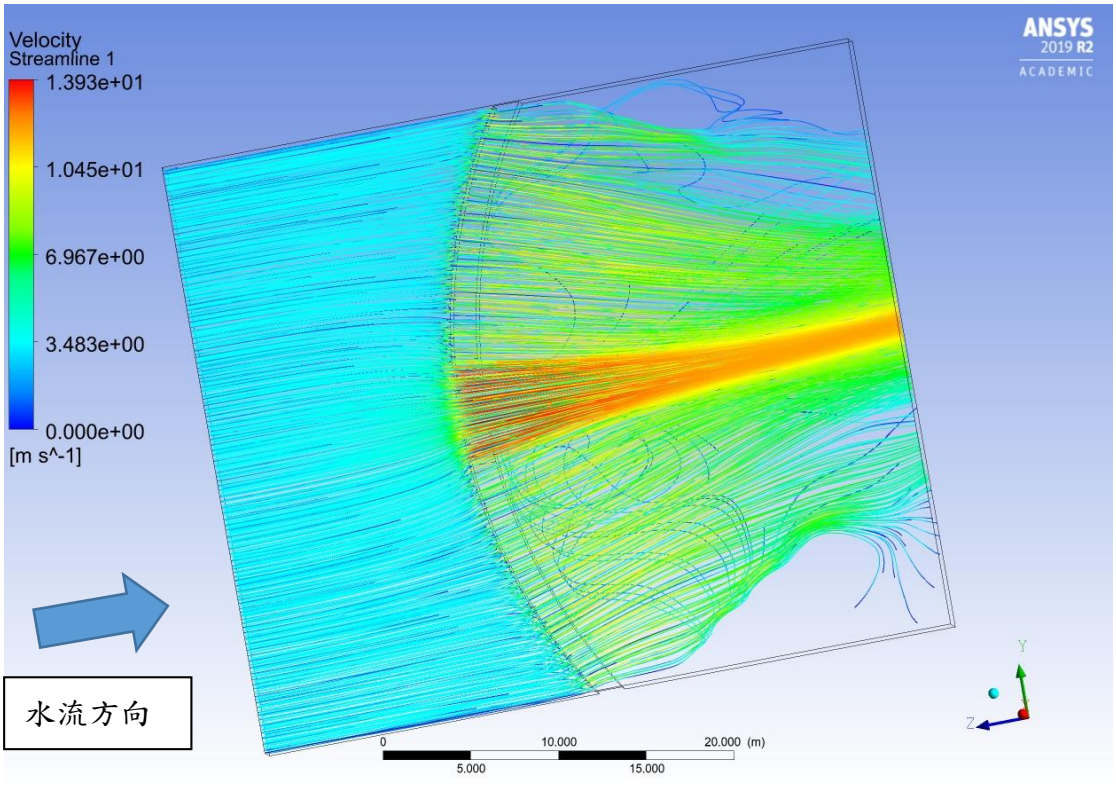


圖 4-174 含低水河槽上拱型固床工流線分布

2.向量

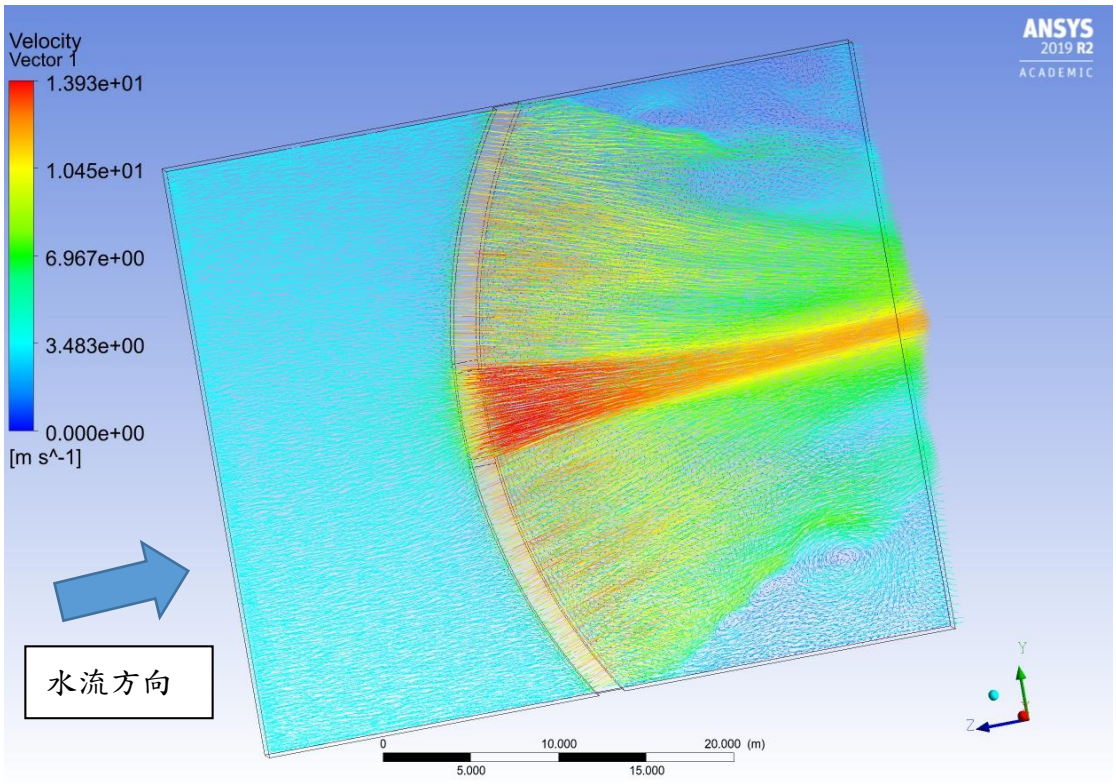


圖 4-175 含低水河槽上拱型固床工向量分布

3.X=0 流速剖面圖

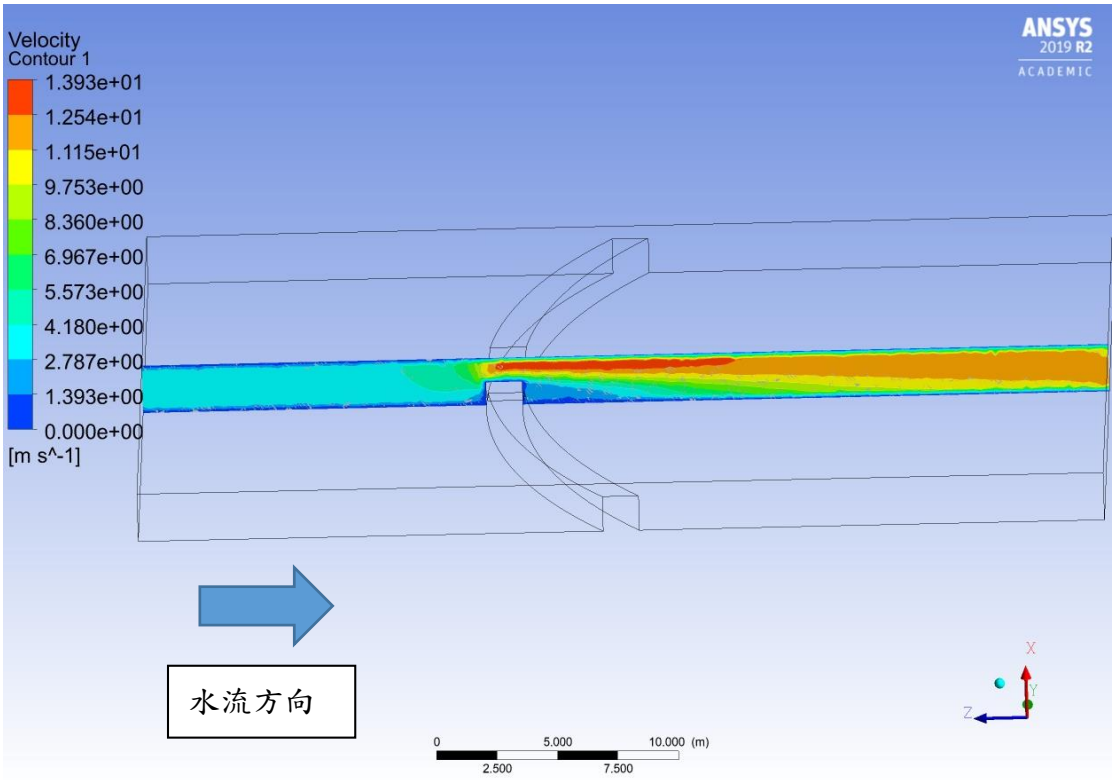


圖 4-176 含低水河槽上拱型固床工 X=0 流速分布

4.x=8.3 流速剖面圖

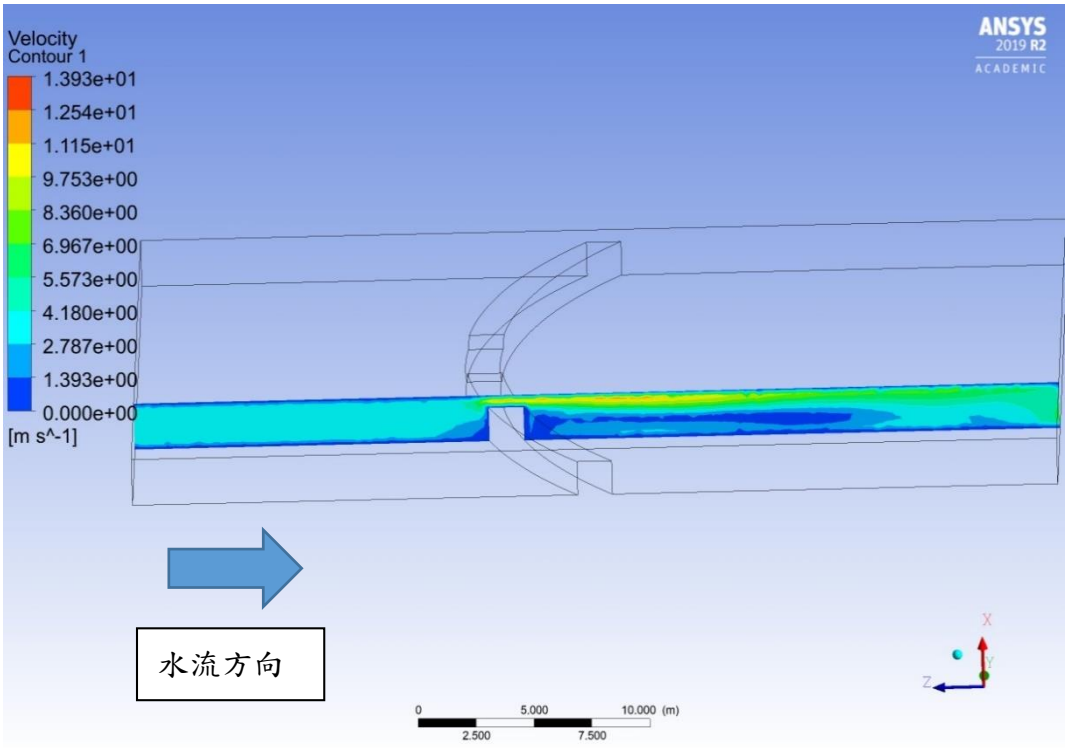


圖 4-177 含低水河槽上拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速剖面圖

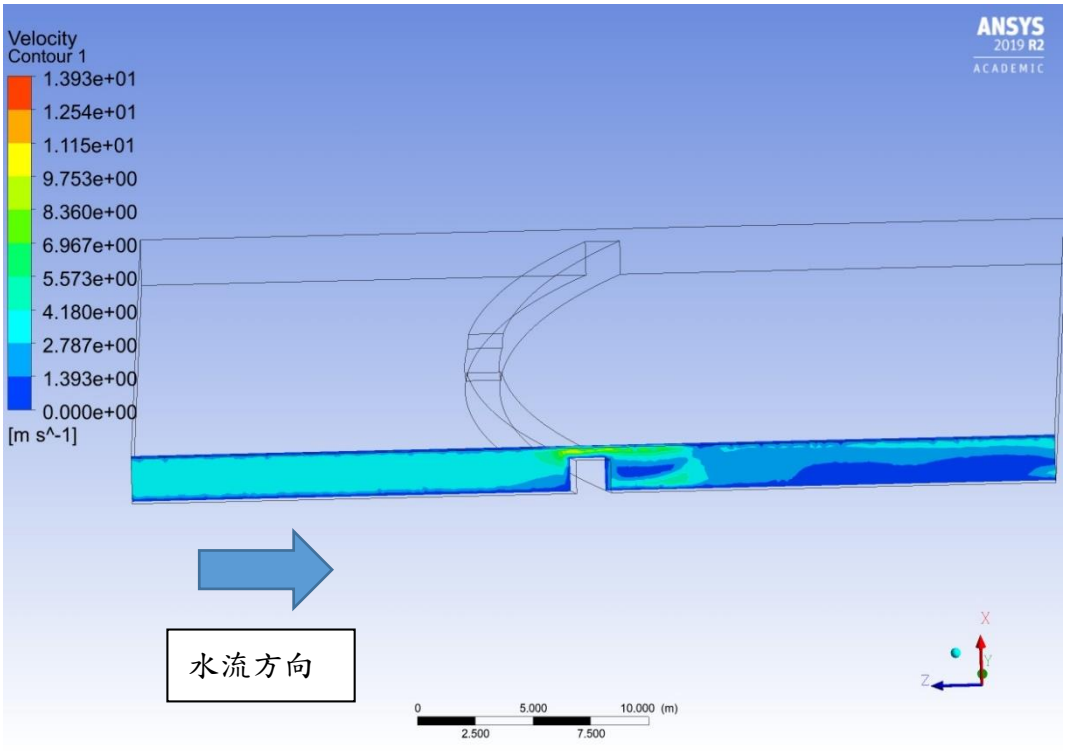


圖 4-178 含低水河槽上拱型固床工 X=16.6 流速分布

(二)下拱型模擬情形

1.流線

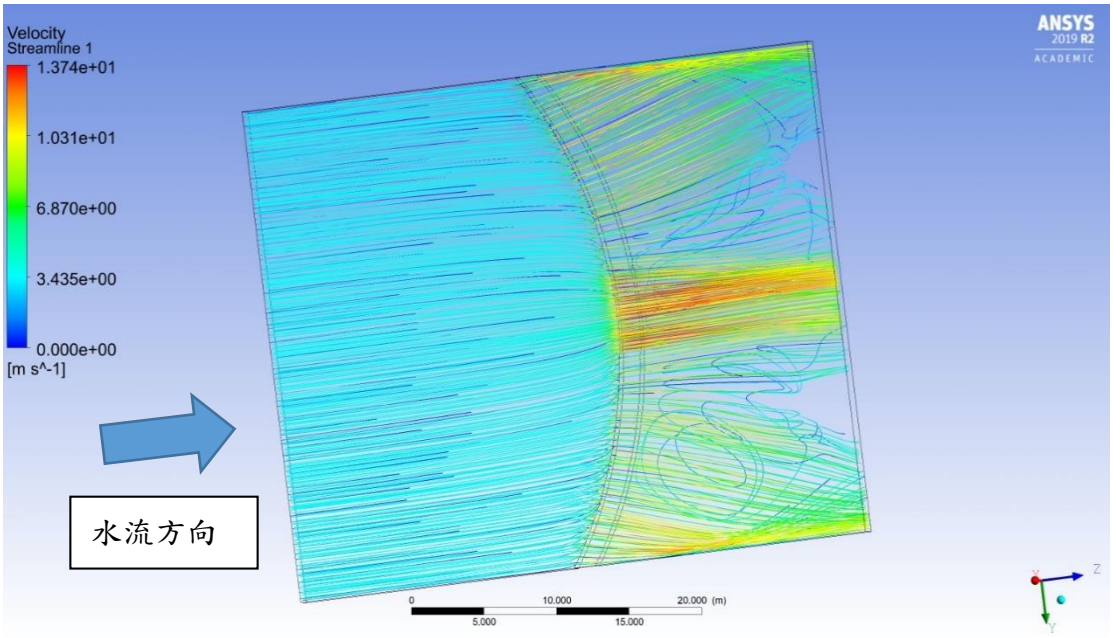


圖 4-179 含低水河槽下拱型固床工流線分布

2.向量

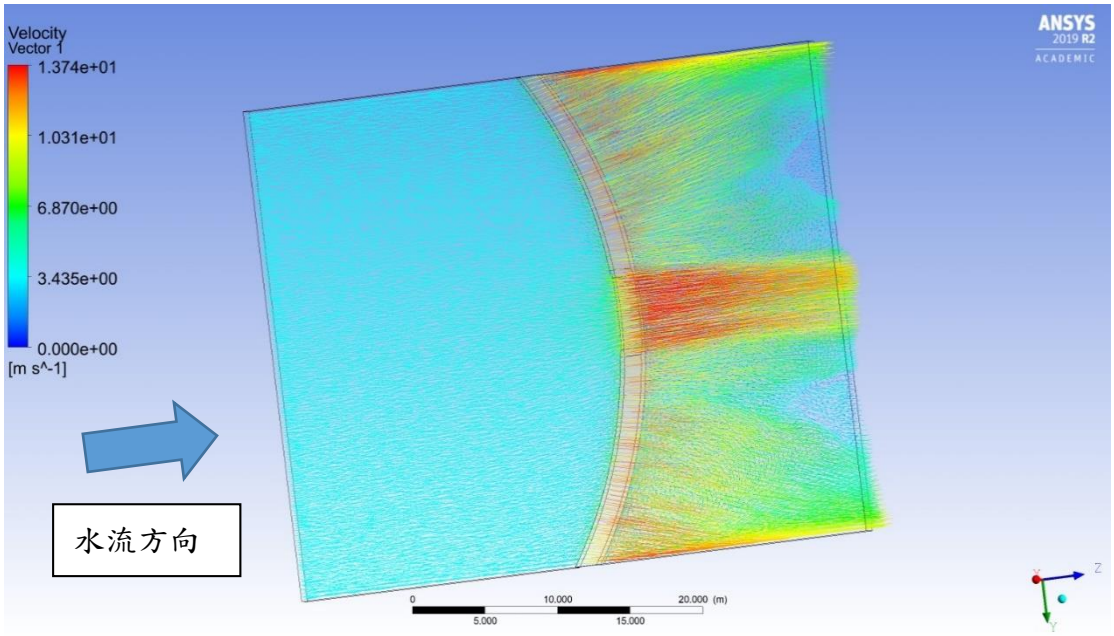


圖 4-180 含低水河槽下拱型固床工向量分布

3.X=0 流速剖面圖

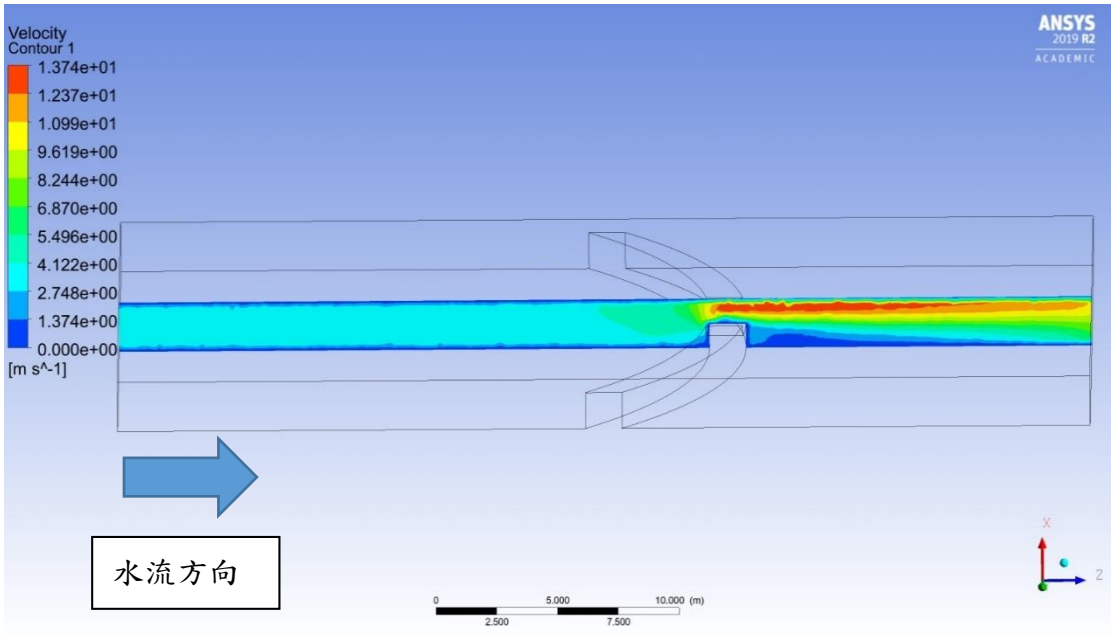


圖 4-181 含低水河槽下拱型固床工 X=0 流速分布

4.X=8.3 流速剖面圖

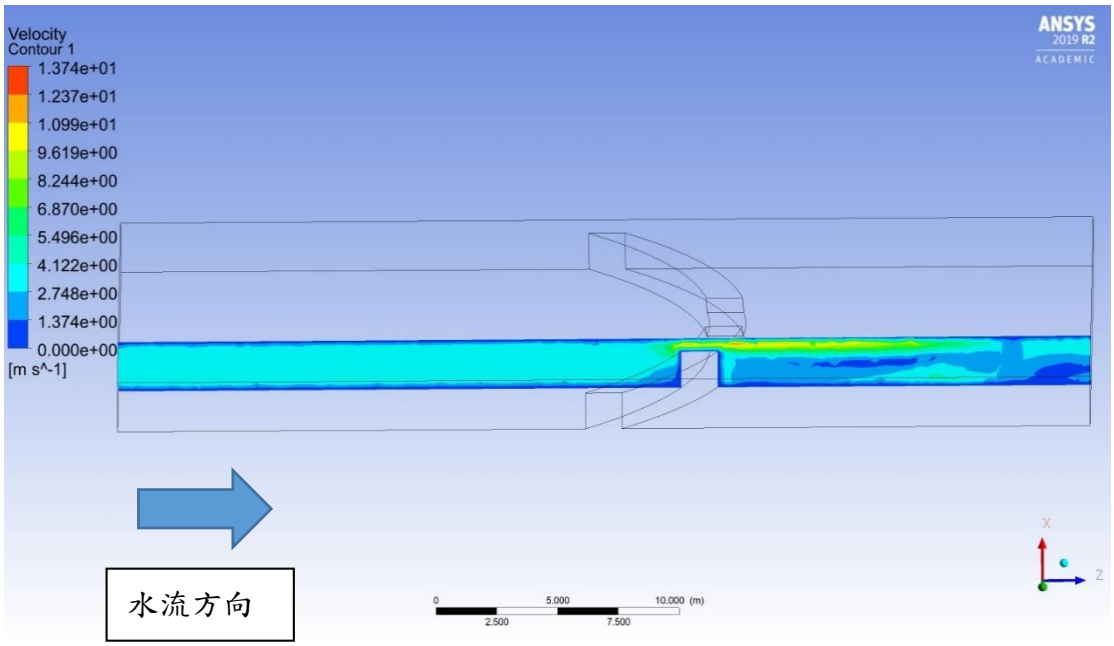


圖 4-182 含低水河槽下拱型固床工 X=8.3 流速分布

5.X=16.6 流速剖面圖

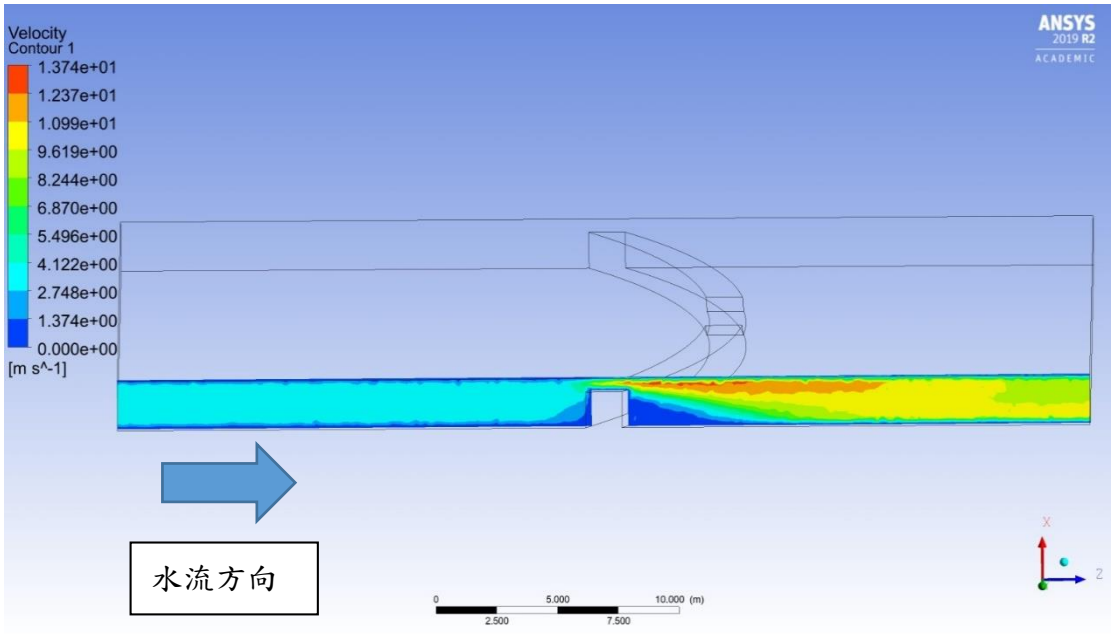


圖 4-183 含低水河槽下拱型固床工 X=16.6 流速分布

從圖 4-174~4-183 可以看到，與無低水河槽相比，上拱型與下拱型固床工在相同拱度下其流速均較低，下拱型固床工流速降低了 1.71m/s，上拱型固床工則降低了 1.53m/s，另也可看到其流線均集中低水河槽處，且中央段之流速與周圍之流速有較大之差

距，相差大約 3m/s。並且可以看到於下游面，上拱型固床工於流場下方之低速區已幾乎消失，而下拱型固床工於流場下方依然有一低速區。

第五章 數值模擬輸砂性質

第一節 SRH2D

本團隊於二維模式輸砂模擬以美國墾務局所研發之 SRH-2D 模式為主，其相對於其他二維模式有一定的程度優越性，在計算因採用有限體積法，收斂相對穩定可靠，SRH-2D 模式係由流域模型 SRH-W 演進而來。SRH-2D 改進 SRH-W 許多特性，SRH-2D 能處理二維動態的波動方程式，即水深方向平均的 Saint Venant 方程式。就模型建構擴充性上，SRH-2D 可以與很多現有的模型結合，具有其操作的便捷性，故本研究擬利用 SRH-2D 二維水理及輸砂模式模擬分析固床工之水流特性與沖淤情形。

水流控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=e$$

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t}+\frac{\partial (hu^2)}{\partial x}+\frac{\partial (huv)}{\partial y}=\frac{\partial (hT_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial (hT_{xy})}{\partial \mathrm{y}}-gh\frac{\partial (z_b+h)}{\partial x}-\frac{\partial (\tau_{bx})}{\partial \rho}+\overline{D}_{xx}+\overline{D}_{xy}$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t}+\frac{\partial (huv)}{\partial x}+\frac{\partial (hv^2)}{\partial y}=\frac{\partial (hT_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial (hT_{yy})}{\partial \mathrm{y}}-gh\frac{\partial (z_b+h)}{\partial y}-\frac{\partial (\tau_{by})}{\partial \rho}+\overline{D}_{yx}+\overline{D}_{yy}$$

式中 t 為時間；h 為水深；u 為 x 方向之水深平均流速分量；v 為 y 方向之水深平均流速分量；e 為過量降雨率；g 為重力加速度；T_{xx}，T_{xy}，T_{yy} 為水深平均紊流應力；$\overline{D}_{xx}$，$\overline{D}_{xy}$，$\overline{D}_{yx}$，$\overline{D}_{yy}$ 為水深平均延散項；z_b 為底床高程；ρ 為密度；τ_{bx}，τ_{by} 為底床剪應力。

計算底床摩擦阻力之方式為使用曼寧粗糙度方程式，方程式如下所示：

$$\begin{pmatrix}\tau_{bx}\\ \tau_{by}\end{pmatrix}=\rho C_f\begin{pmatrix}U\\ V\end{pmatrix}\sqrt{U^2+V^2}\quad ;\quad C_f=\frac{gn^2}{h^{1/3}}$$

其中n為曼寧粗糙係數。

紊流剪應力則以 Boussiesq 方程計算，方程式如下所示：

$$T_{xx}=2(\upsilon+\upsilon_t)\frac{\partial U}{\partial x}-\frac{2}{3}k$$

$$T_{xy}=(\upsilon+\upsilon_t)(\frac{\partial U}{\partial y}-\frac{\partial V}{\partial x})$$

$$T_{yy}=2(\upsilon+\upsilon_t)\frac{\partial V}{\partial y}-\frac{2}{3}k$$

其中ν為水之動能黏滯係數，ν_t為紊流渦流旋黏滯係數，k為紊流動能。

紊流模式為計算紊流動能之用，常用為雙方程紊流模式：水深平均拋物線模式和雙方程$k-\varepsilon$模式，ν_t之計算為$\nu_t=C_tU_*h$，其中U_*為底床摩擦速度。模式的C_t常數範圍從 0.3 至 1.0，而 SRH-2D 之預設值為C_t=0.7。

若使用$k-\varepsilon$模式，則紊流黏滯度之計算為$\nu_t=C_\mu k^2/\varepsilon$，其方程式如下：

$$\frac{\partial hk}{\partial t}+\frac{\partial hUK}{\partial x}+\frac{\partial hVK}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{h\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{h\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y})+P_h+P_{kb}-h\varepsilon$$

$$\frac{\partial hk}{\partial t}+\frac{\partial hU\varepsilon}{\partial x}+\frac{\partial hV\varepsilon}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{h\upsilon_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{h\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y})+C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_h+P_{\varepsilon b}-C_{\varepsilon 2}h\frac{\varepsilon^2}{k}$$

其中變數定義和係數使用如下：

$$P_h = h\upsilon_t\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2\right]$$

$$P_{kb} = C_f^{-1/2}U_*^3 \text{ ； } P_{\varepsilon b} = C_{\varepsilon\Gamma}C_{\varepsilon 2}C_\mu^{1/2}C_f^{-3/4}U_*^4/h$$

其中 $C_\mu = 0.09$ ； $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ； $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ； $\sigma_k = 1$ ； $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ； $C_{\varepsilon\Gamma} = 1.8 \sim 3.6$ 。

P_{kb} 和 $P_{\varepsilon b}$ 項用來描述因均勻流底床剪應力產生的紊流動能和其消散。

接著依序討論曼寧粗糙係數，在 SRH-2D 中，曼寧係數為區域常數，並不隨流動而改變，但會隨底床型式的改變而呈區間上的差異分佈。除了曼寧係數外，另一個用來表示流動糙度的參數為底床之等效粗糙高度 k_s 。對鬆散河床，等效粗糙高度和曼寧係數應包含底床物質粒徑和底床形式之效應。以上兩個參數可以用以下 Strickler's 公式轉換：

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{A}$$

其中 A 之值約 26 左右，視泥砂粒徑、底床形式、植生和渠道地形而定。其較通用之係數設定為:

(一)在其河床為拋石且 k_s 採用 D_{90} 計算時為 29.41

(二)對於其渠道為劈石渠道且 k_s 採用 D_{90} 計算時為 26.32

(三)對於正常淤積且 k_s 採用 D_{50} 計算石為 29.41

其公式分析如圖 5-1 所示，

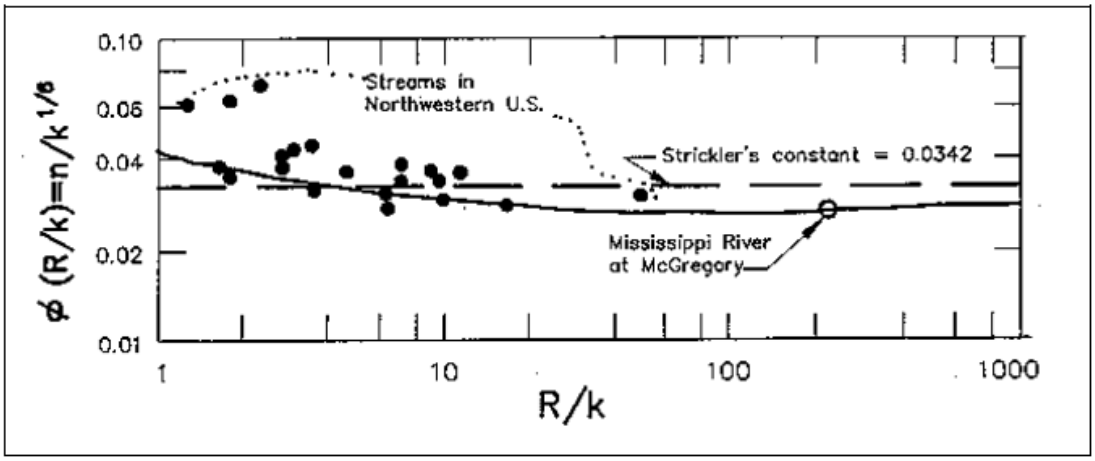


圖 5-1　Strickler function

以及從表 5-1 可以看到其對於表面不規則、斷面差異、構造物、直升均有不同之加權係數。

表 5-1 水力粗糙度係數表

Reference	m	n_b	n_1	n_2	n_3	n_4	n
USDT (Arcement and Schneider 1989), pp 4 & 7	1.0	0.024	0.002	0.002	0.001	0.005	0.034
Barnes (1967), p 78	-	0.037	-	-	-	-	0.034
Chow (1959), p 109, Table 5-5, Fine Gravel	1.0	0.024	0.005	0.0	0.0	0.00	0.034
Chow (1959), p 112, Table 5-6, D-1a3	-	0.040	-	-	-	-	0.040
Chow (1959), p 120, Figure 5-5(14)	-	0.030	-	-	-	-	0.030
Brater and King (1976), p 7-17, Natural	-	0.035	-	-	-	-	0.035
Mean							0.035
Standard deviation							0.003

Note:
$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$

where

n_b = base n-value
n_1 = addition for surface irregularities
n_2 = addition for variation in channel cross section
n_3 = addition for obstructions
n_4 = addition for vegetation
m = ratio for meandering

對於平坦底床，k_s (單位：m)可根據底床物質直徑取$2d_{90}$，較高值則可取$3d_{90}$。對於底床砂石和波浪交互作用之底床，其k_s和浪高有關。

建置 SRH2D 的步驟簡述如下，匯入背景圖以描繪河川邊界，再匯入 UAV 產製之 DSM，檢查座標系統與單位，接著分配節點、切網

格，接著，製造邊界條件之圖層、材料性質之圖層(即曼寧 n 值)，再將圖層定義給 SRH-2D Simulation，並進行 Model Control，此步驟主要是要給定模式計算的時間間距及輸出檔案格式。另外，建立動床的邊界條件，設定其粒徑分布，建置完上述步驟，便可開始讓模式進行模擬。SRH2D 目前尚無法進行超臨界流之模擬，因此模擬亞臨界流況並均假設為清水流，在入流部份應給定上游邊界流量，設計流量可以透過水保手冊之計算方式將其降雨量轉換為逕流量，並透過疊加得到流量歷線以進行設定，在出流部份則應給定下游邊界水位或率定曲線。曼寧 n 值分區、最大沖刷深度設定，及輸砂條件之設定界面如圖 5-2~圖 5-4。

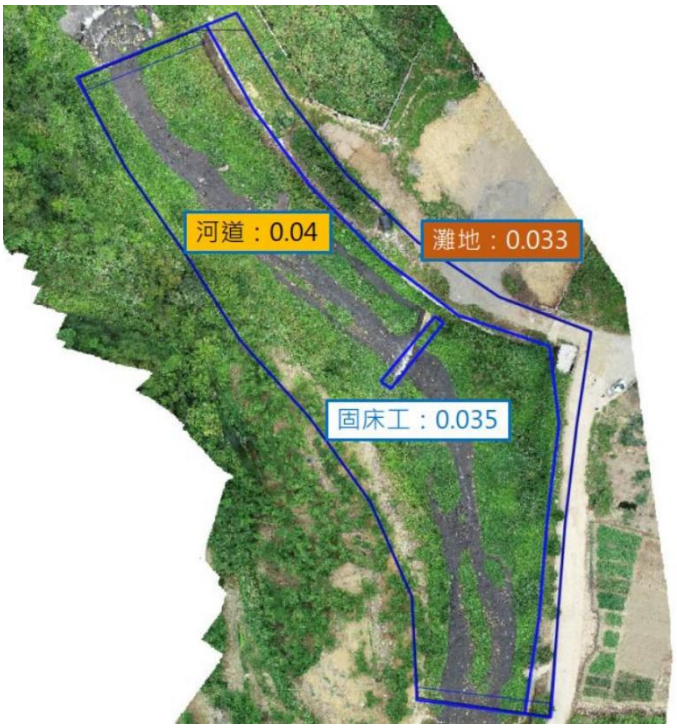


圖 5-2　SRH2D 之曼寧 n 值分區

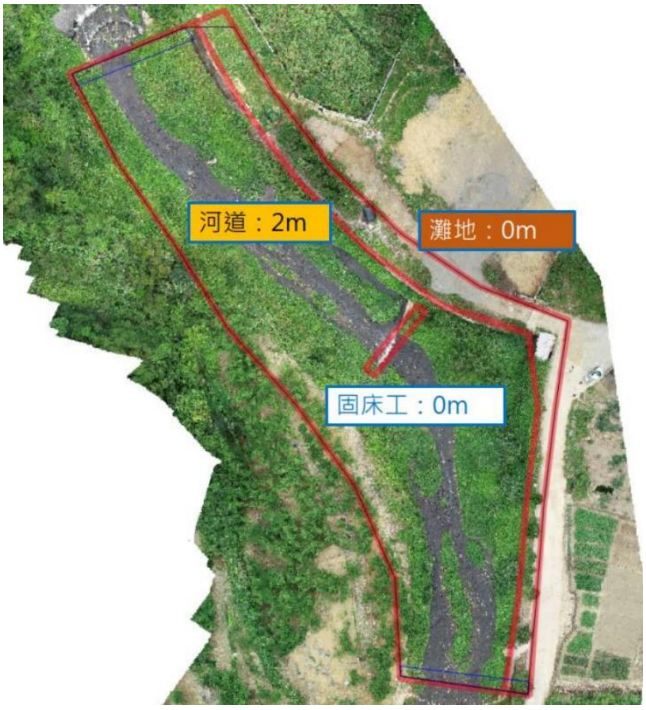


圖 5-3　SRH2D 最大沖刷深度之設定

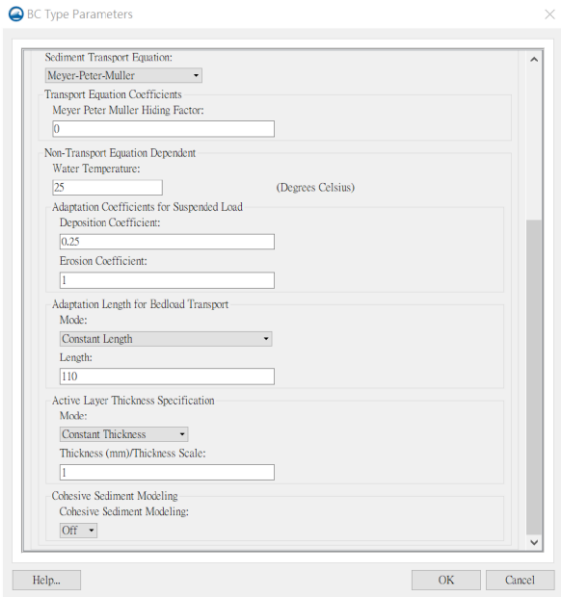


圖 5-4　SRH2D 之輸砂條件設定

本團隊使用 SRH2D 模式針對固床工附近之因子進行初步驗證，包括流速、水深、底床剪應力、沖刷深度等。SRH2D 模式所需要的資料有上下游邊界條件 BC、三角網格 Mesh、曼寧 n 值 materials、輸砂分區 sediment materials(內有可沖刷深度及粒徑分區)。

上下游邊界 BC 的設定上，本計畫預計採取是亞臨界流邊界定量流模擬，輸入上游流量，下游採取正常水深進行動床模擬。流量主要設定為五十年重現期流量 73.59cms 並預計取第二小時的資訊來進行分析。由於礫質河床緣故，因此輸砂公式採用的是 Meyer-Peter & Muller 公式，活動層厚度選用 1 倍的d_{90}，輸砂調適長度設定為 110 公尺(約 5 倍的河道寬)。在網格上的設定，整體上來說，網格平均 0.77m 設定一個節點，而在固床工上為了使固床工上模擬精準，因此平均間距 0.25m 設定一個節點。影響水理模式最關鍵因素-曼寧 n 值，本計畫固床工設定為 0.035，固床工右堤路面設定 n 值為 0.033，其餘 n 值設定為 0.04，如圖 5-5。

在輸砂上，輸砂有設定可沖刷沖度、礫徑分布及土體密度(使用常見預設值 1600kg/m^3)。使用紅線圈出來的範圍為人工構造物的地方，因此將其設定為不可沖刷區，如圖 5-6，而粒徑分布如圖 5-7。

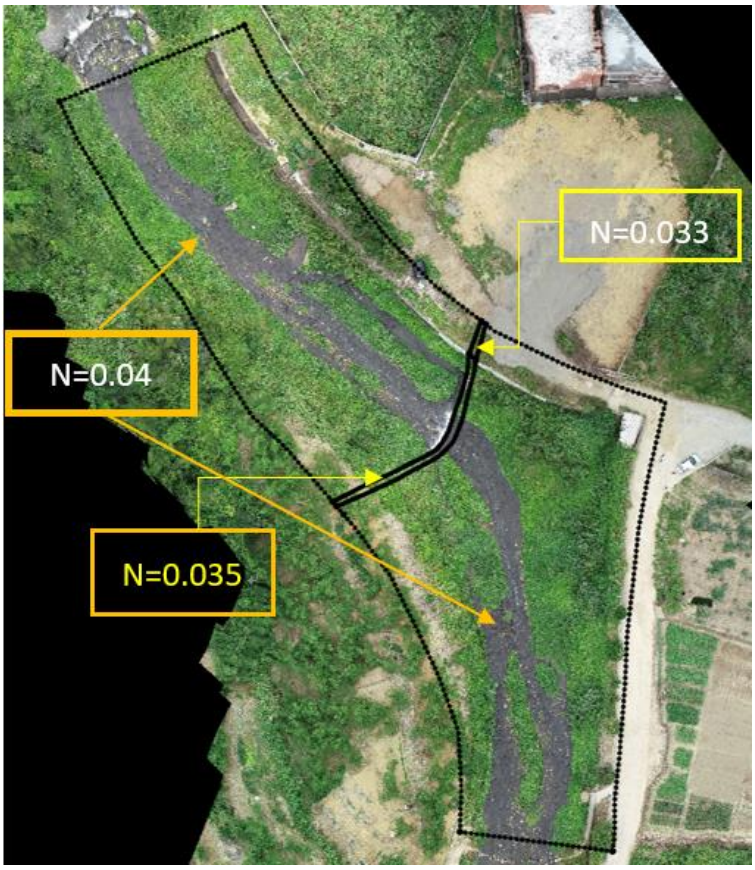


圖 5-5 曼寧 n 值分區

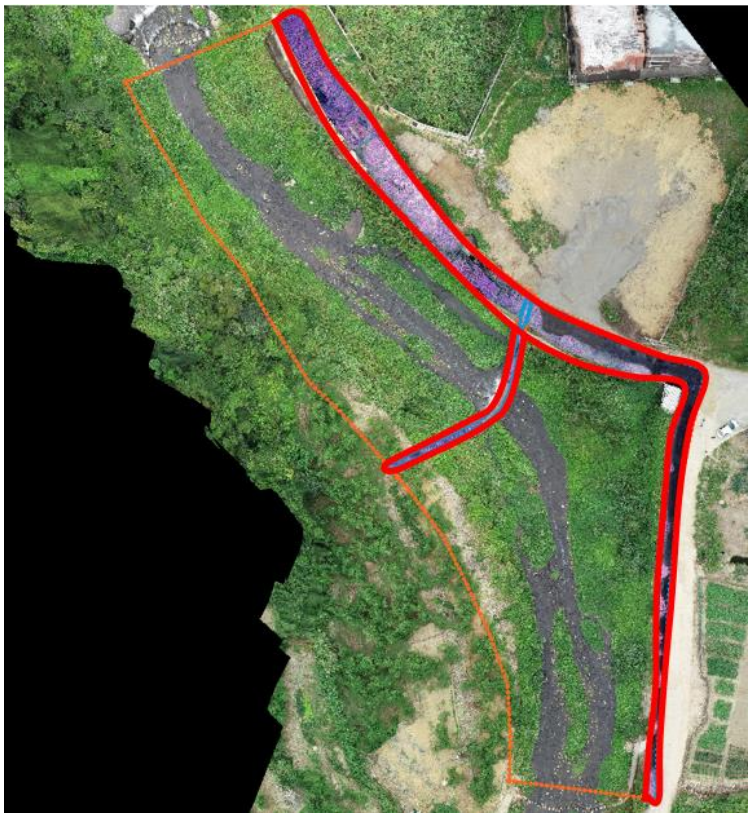


圖 5-6 輸砂分區

diameter(mm)	finer(%)
0.01	0
1.34	10
18.56	20
40	30
54.71	35
71.34	40
100.01	50
161.32	65
224.77	75
293.1	90
400	100

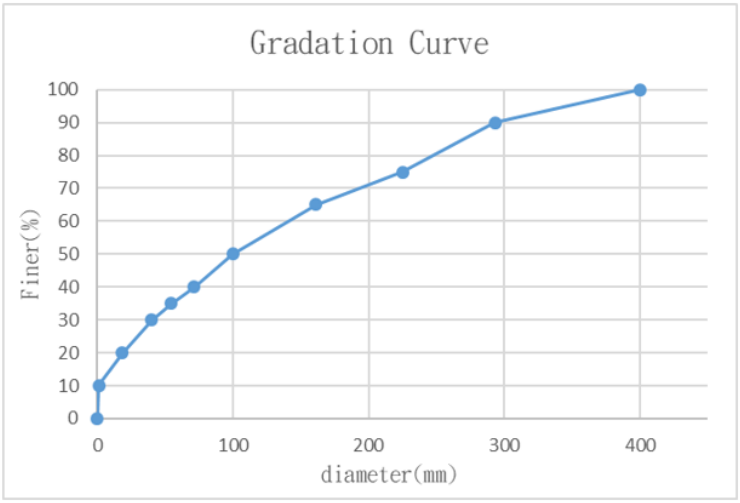


圖 5-7 粒徑分布

一、於河道彎道段，五十年重現期流量 73.59cms，上拱型固床工高 1.5m 模擬結果

(一)速度模擬結果：

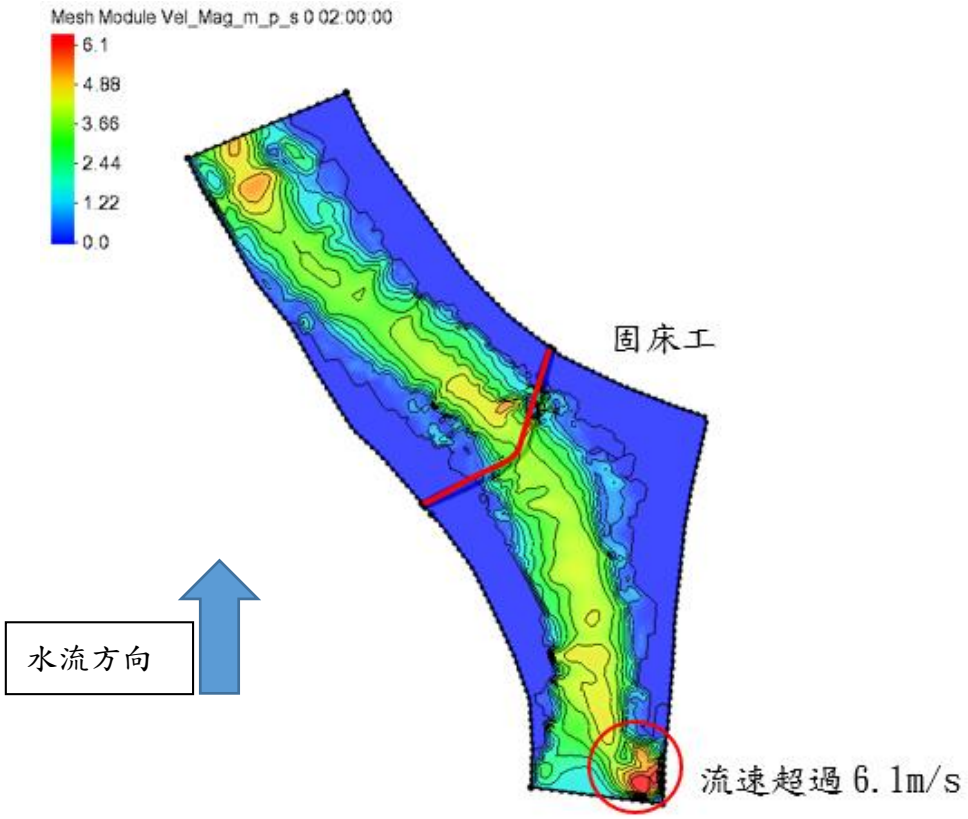


圖 5-8 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

入流邊界屬於窄縮段，因此流速超過 6.1 m/s 只有在入流邊界區，在此處有可能造成邊坡淘刷。而在出流邊界處也因逐漸束縮，因此流速提高。上拱型固床工下游流速最高為 4.2m/s，如圖 5-8 所示。

(二)水深模擬結果：

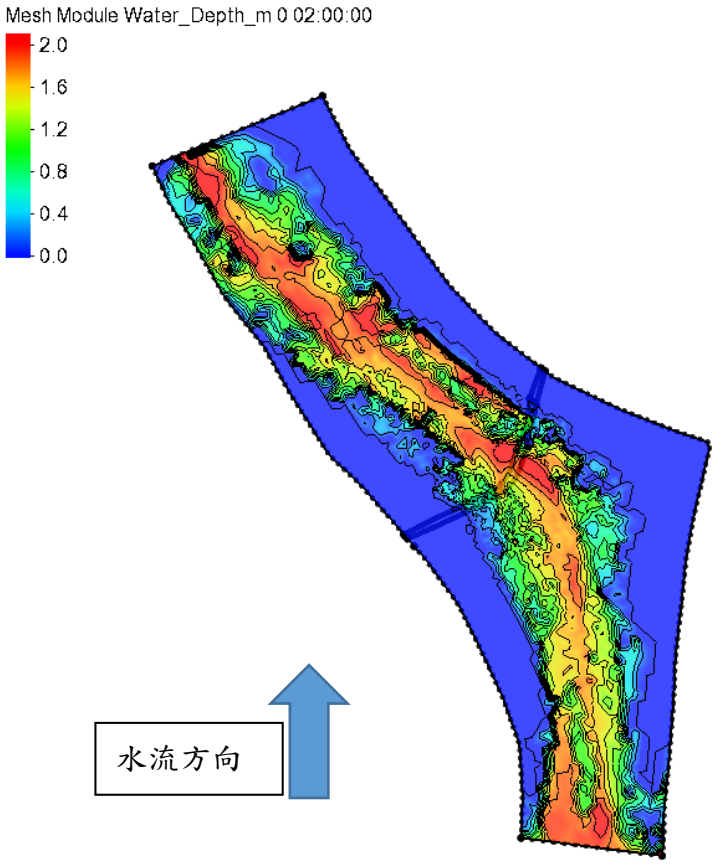


圖 5-9 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

從圖 5-9 發現，在流量為 73.59cms 下，上拱型固床工下游水深較深，水深達 2m。

（三） 福祿數模擬結果：

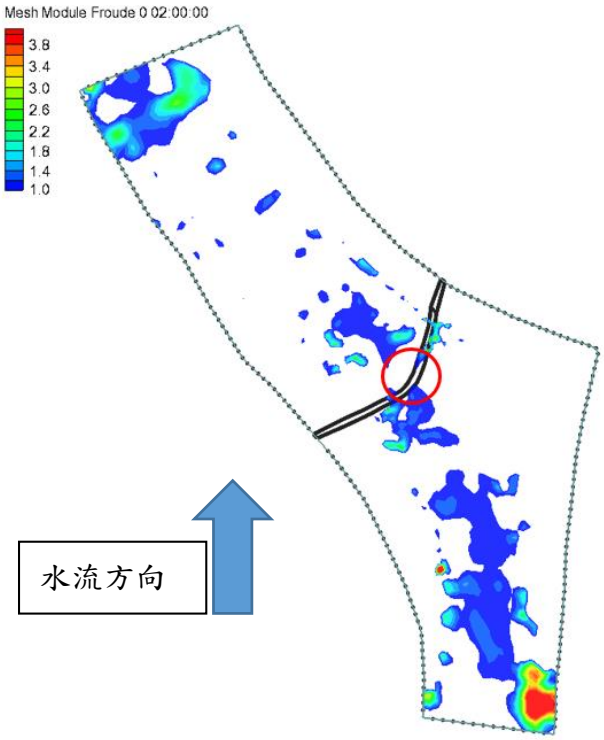


圖 5-10 上拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之福祿數分布

(四)剪應力模擬結果：

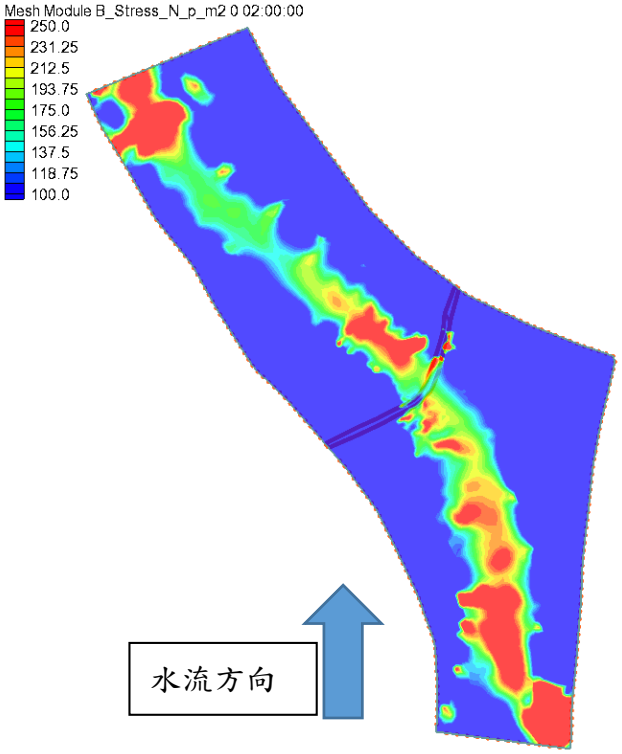


圖 5-11 上拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之剪應力分布

(五)沖淤深度及分布：

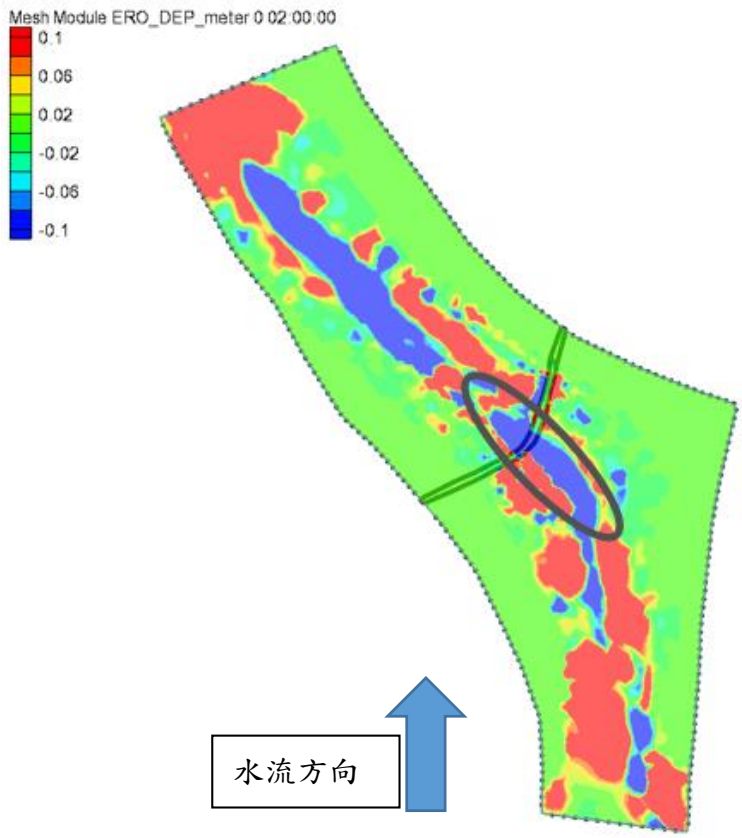


圖 5-12 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-12 可看出，在上拱型固床工的上游處大多為淤積，而在固床工的下游處則有沖有淤(左側淤右側沖)，沖刷坑面積僅約 4.6m^2，推測原因可能是流量在 73.59 cms 的情況下，固床工主深槽附近的水深約 2m，而固床工低水河槽底與下游渠底的高程差最多約為 37cm，從數值上看來，在高流量情境下固床工對於流況影響並不大，因此通過固床工時，水流加速的效果並不明顯(如圖 5-8)，因此較無法使底床淘刷。

固床工上流速最快發生在 27.5m 的位置(此處近凹岸處且與下游底床落差最大)，因此下游沖刷的位置也大約在 26m~28m 處，如圖 5-13。

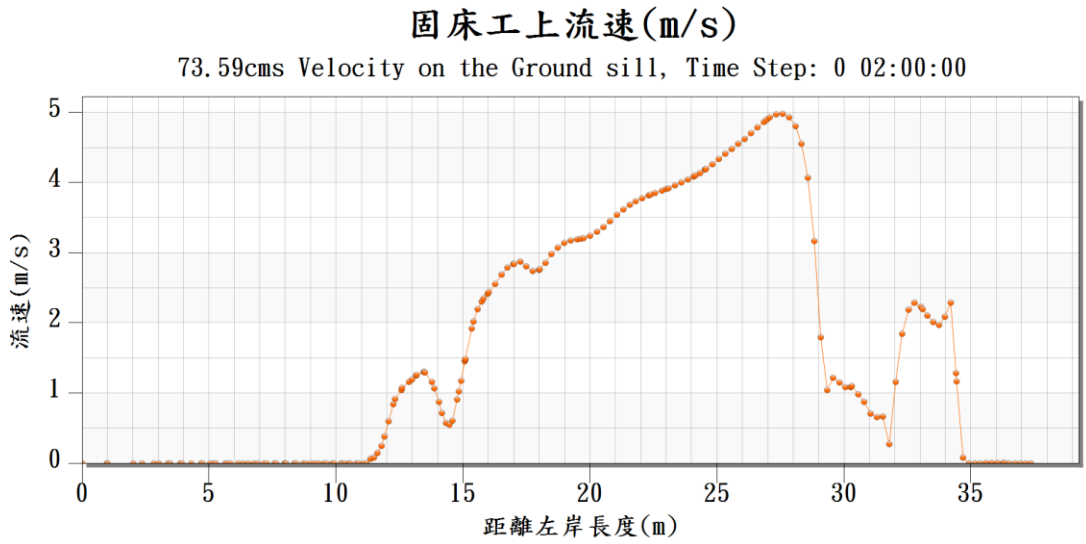


圖 5-13　Q=73.59cms, 上拱型固床工(高=1.5m)上的流速分布

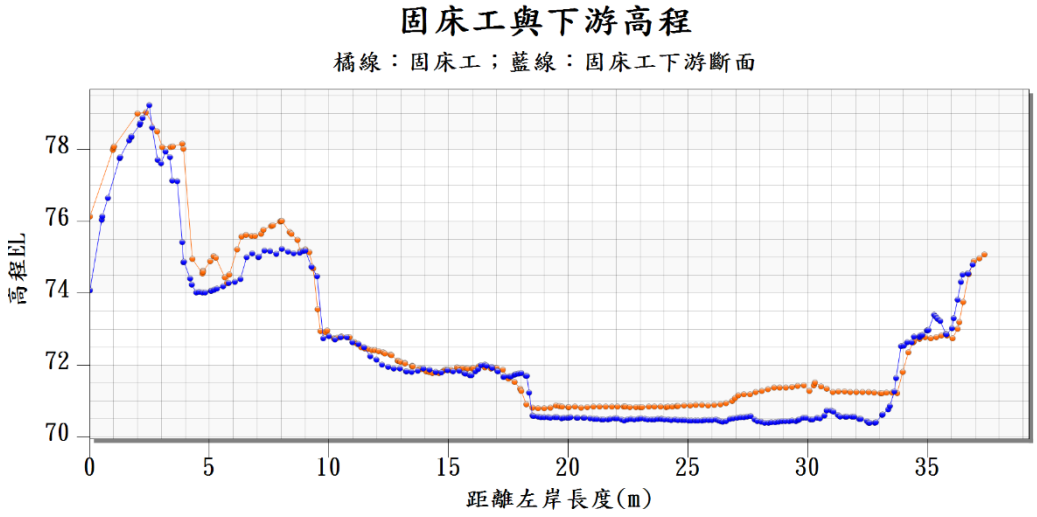


圖 5-14　Q=73.59cms, 上拱型固床工(高=1.5m)與下游高程

二、於河道彎道段，五十年重現期流量 73.59cms，下拱型固床工高 1.5m 模擬結果

(一)速度模擬結果:

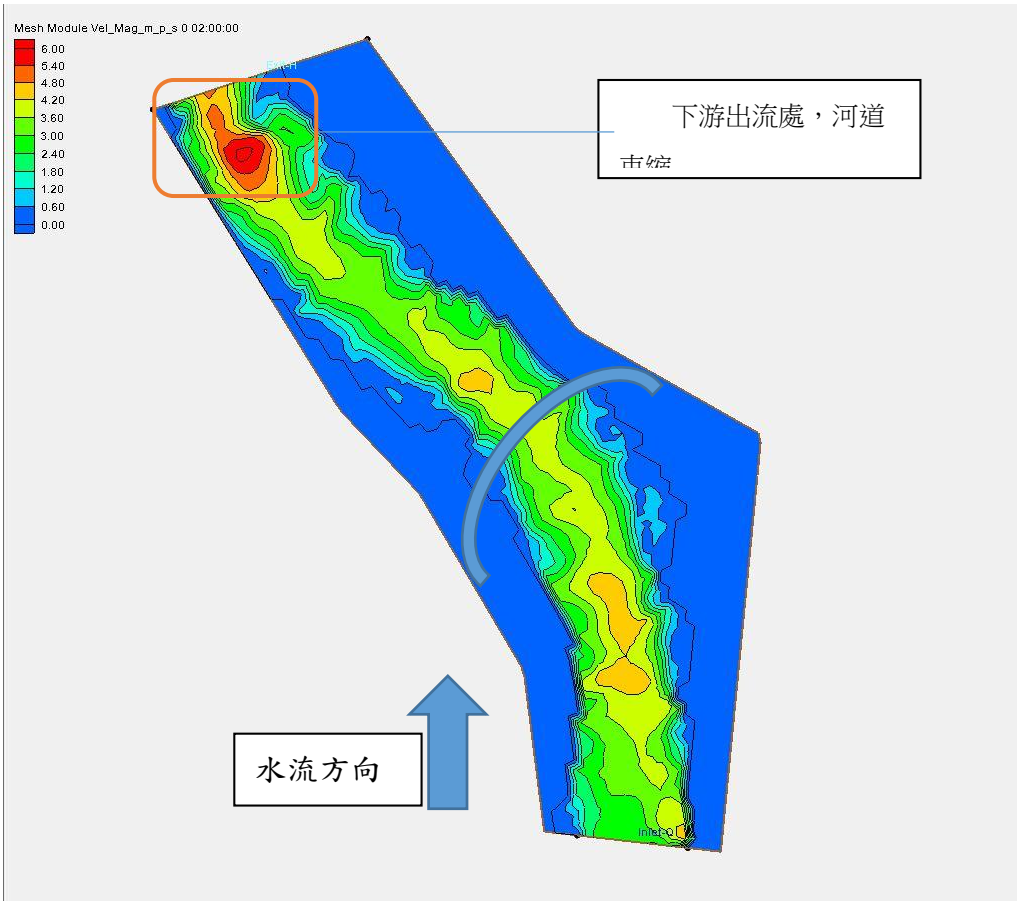


圖 5-15 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

由圖 5-15 可以看到其最大流速位於下游出流處，判斷為因河道束縮而使流速增加。

(二)水深模擬結果:

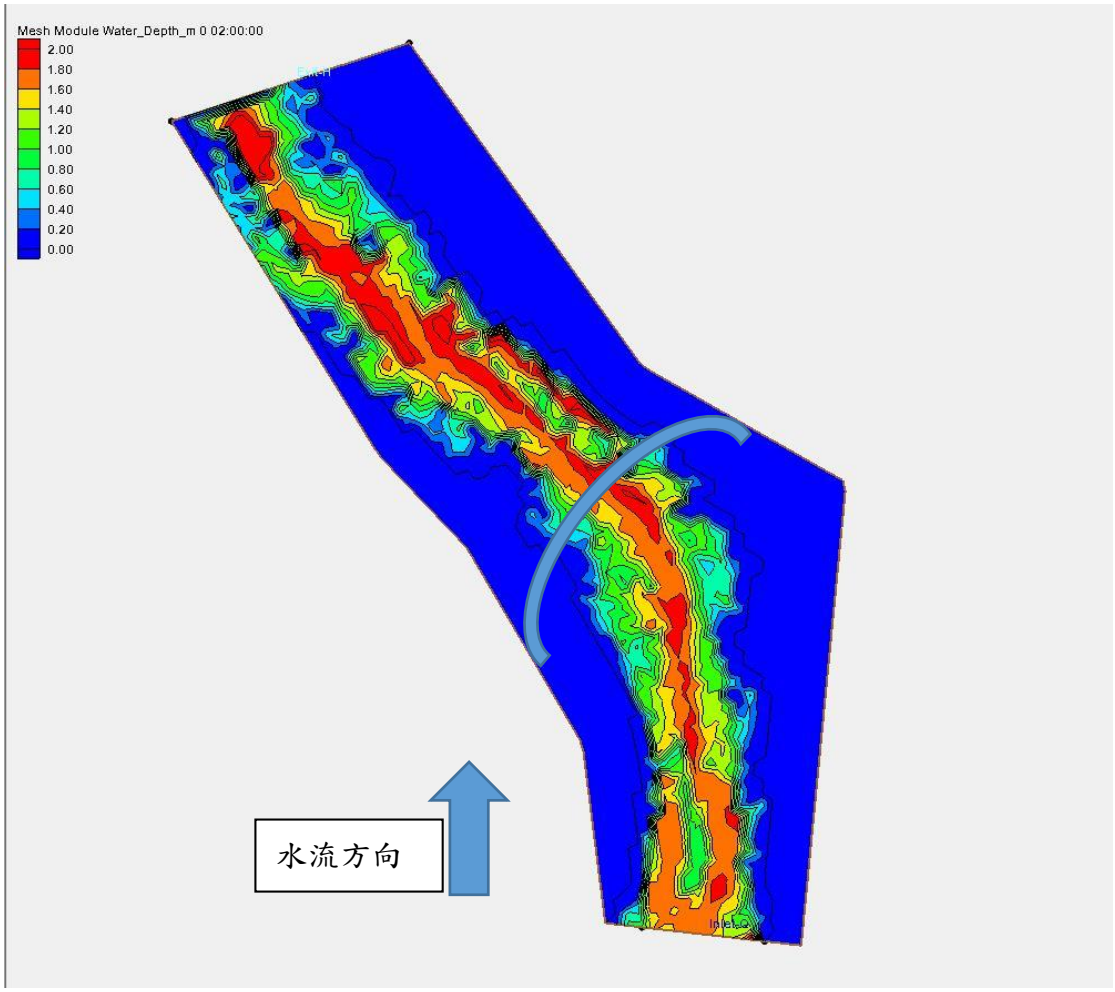


圖 5-16 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

從圖 5-16 可以看到，其水深分布與上拱型相似，然而其於固床工上游面有較深之水深產生。

(三)沖淤模擬結果

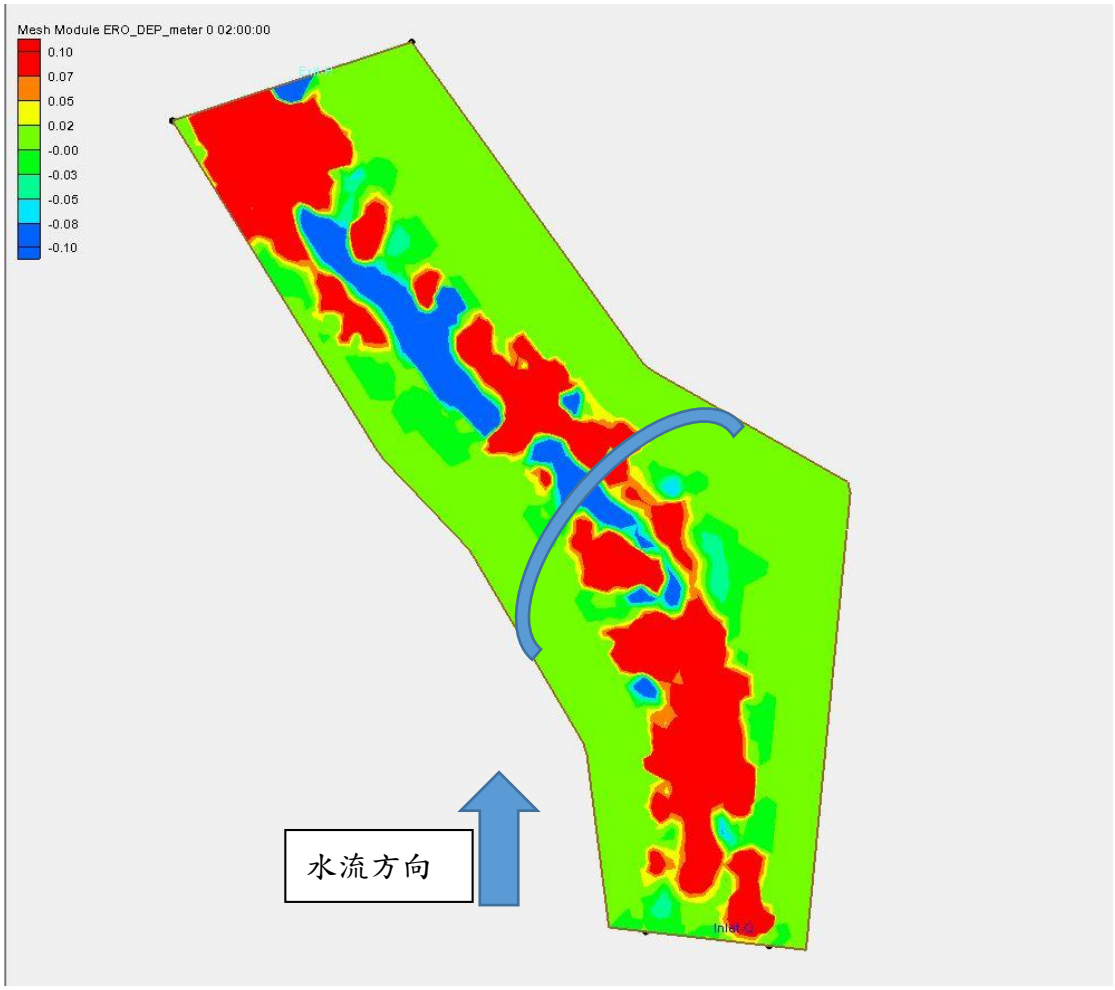


圖 5-17 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-17 可以看到，在下拱型固床工的上游處大多為淤積，而在固床工的下游處則有沖有淤(左側淤右側沖)，與上拱型類似，但其沖刷坑總面積較大。

(四)福祿數模擬結果

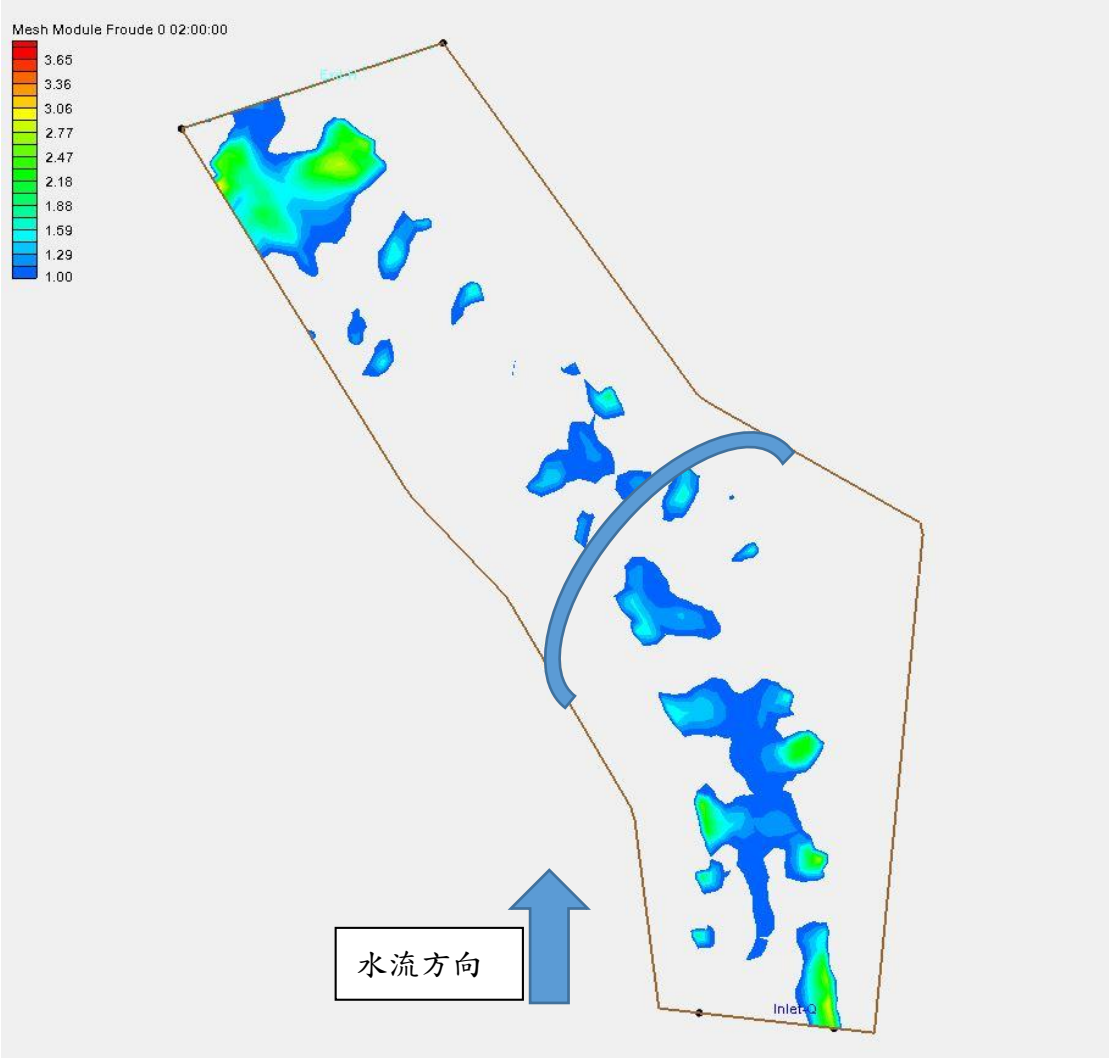


圖 5-18 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布

(五)底床剪應力模擬結果

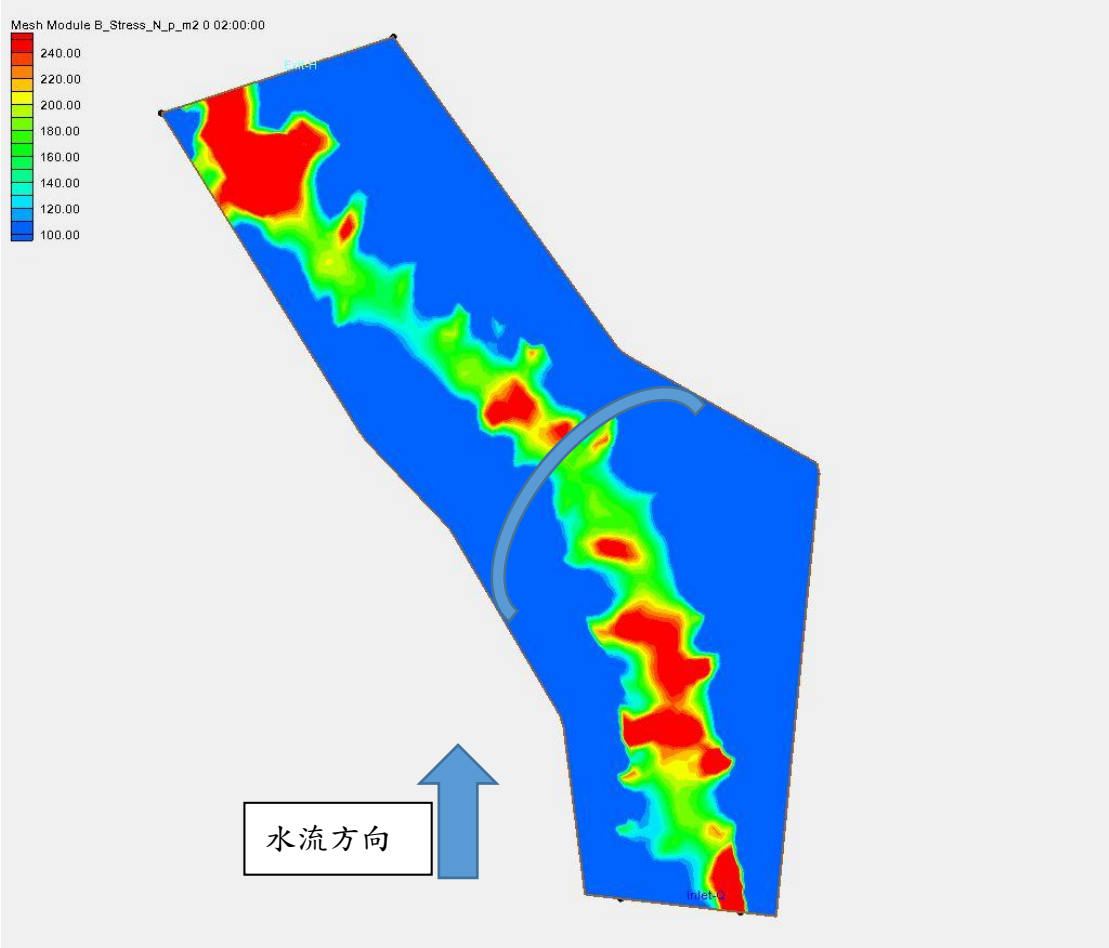


圖 5-19 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布

三、於河道直線段，五十年重現期流量 73.59cms，上拱型固床工高 1.5m 模擬成果

(一)速度模擬結果：

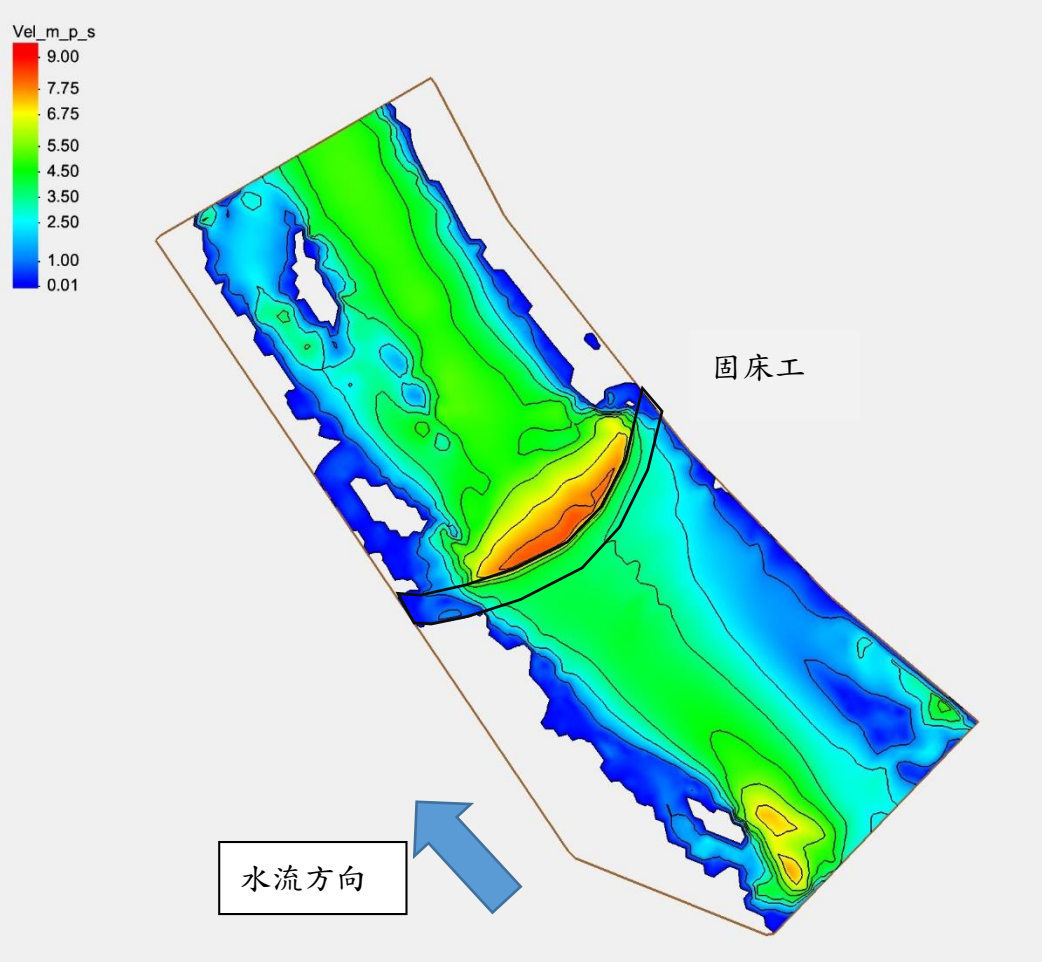


圖 5-20 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

入流邊界河道中有沙洲淤積擾動水流，因此左側局部區域流速較快。此外，河道中心處流速約為 3m/s 至 6 m/s 之間，流速較快的地方為緊鄰上拱型固床工下游處，流速最快可達 8.25m/s，可能會造成固床工基礎侵蝕，如圖 5-20。流速分布模擬結果流速分布較均勻，推測是由於在 73.59 cms 大流量下，底床變化對流速的影響較不顯著。

(二)水深模擬結果：

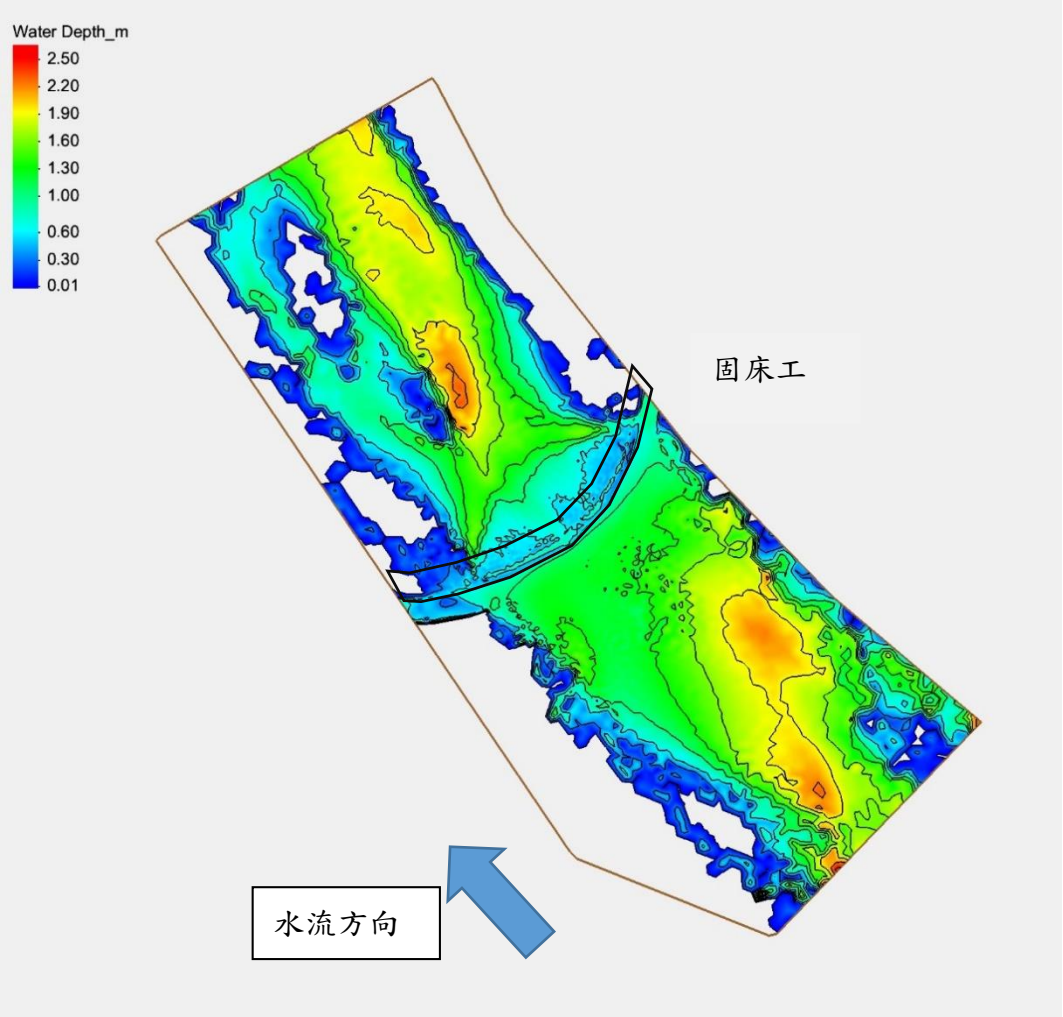


圖 5-21 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

從圖 5-21 發現，在 73.59cms 大流量下，上拱型固床工下游沖刷坑水深約為 0.6 m 至 1.0 m。而最大水深是發生在固床工所產生之沖刷坑下游，推測原因是由於最大水深處之左側有砂洲堆積，導致此河道斷面的左側高程較高，使得水流多由河道右側通過，透過圖 5-24 的上拱型固床工沖淤模擬結果可看到，發生最大水深處明顯受到沖蝕，因此造成此處水深較深。

(三)福祿數模擬結果：

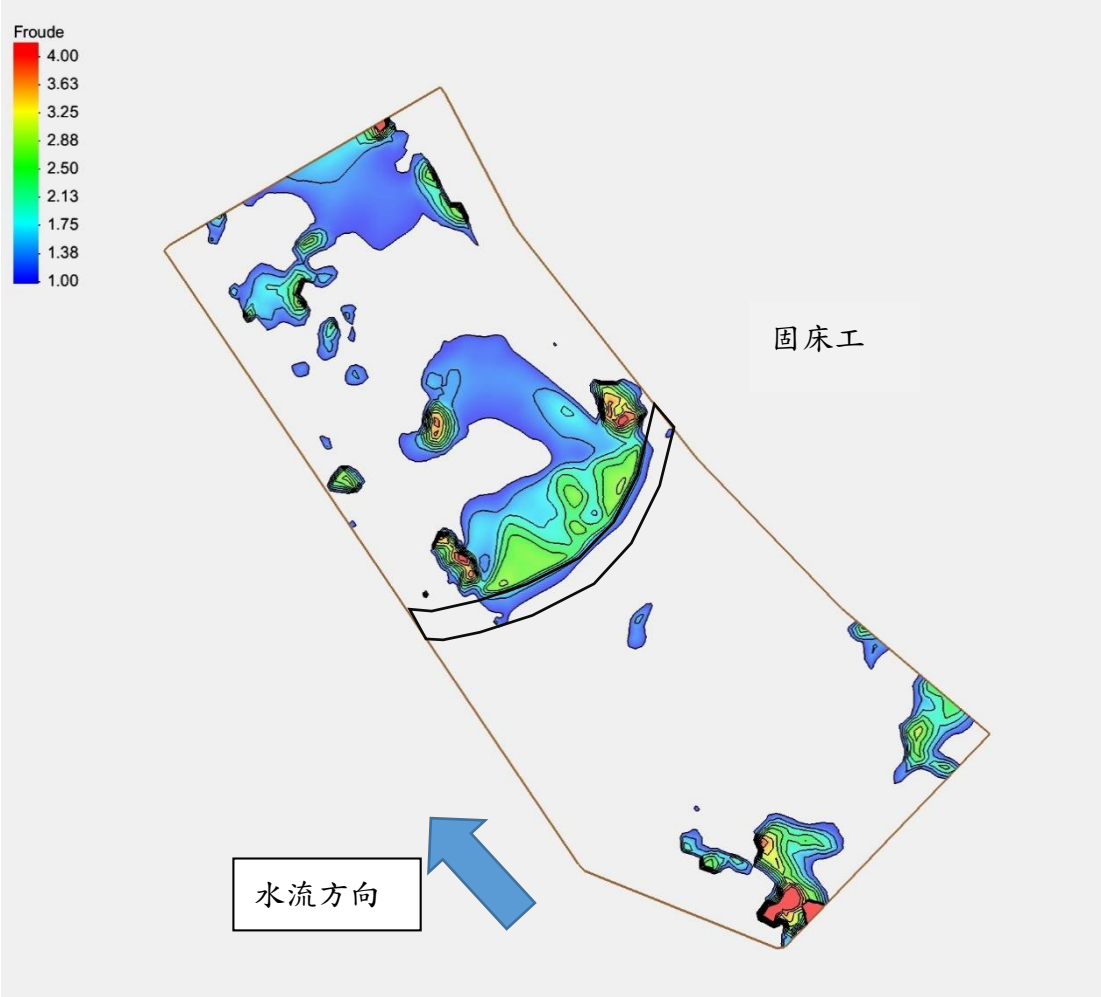


圖 5-22 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布

(四)剪應力模擬結果：

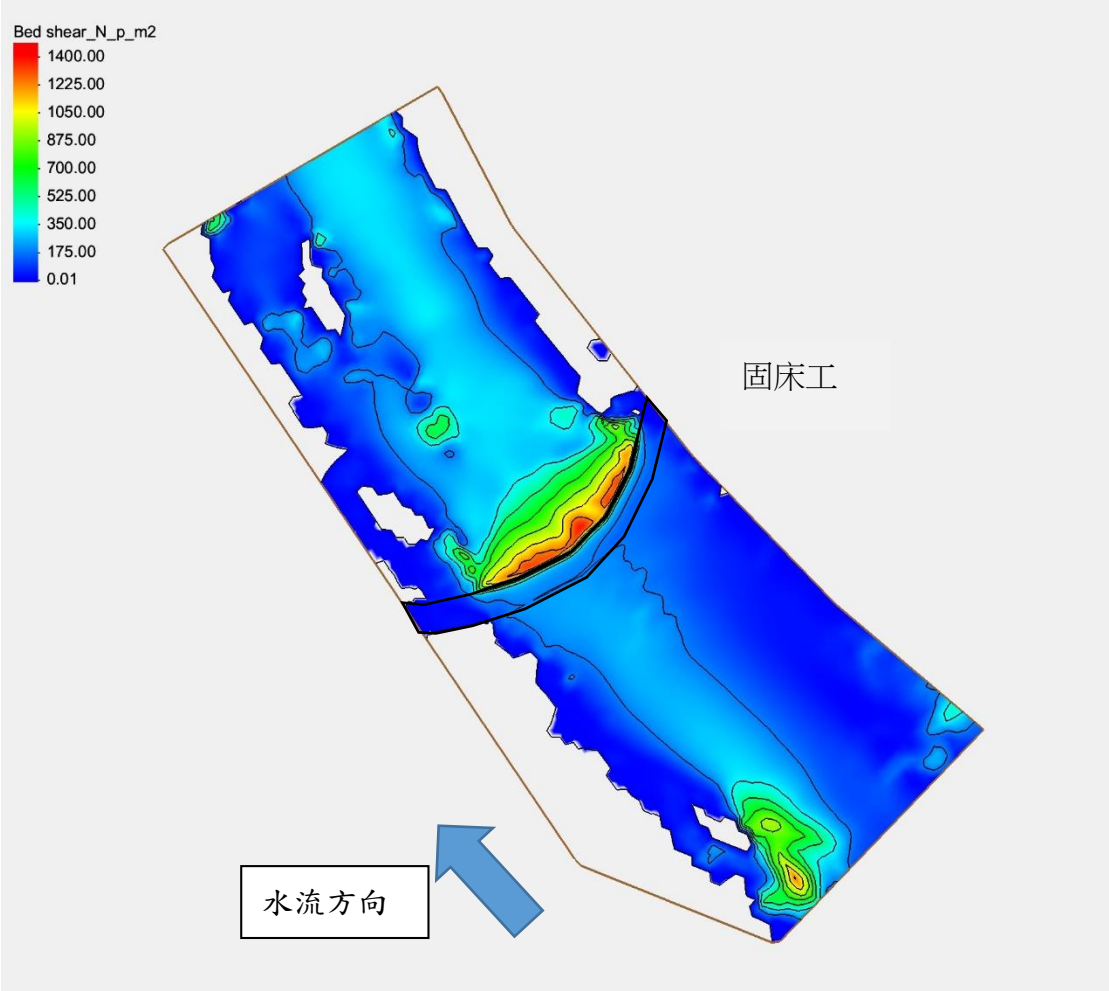


圖 5-23 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之剪應力分布

(五)沖淤深度及分布模擬結果：

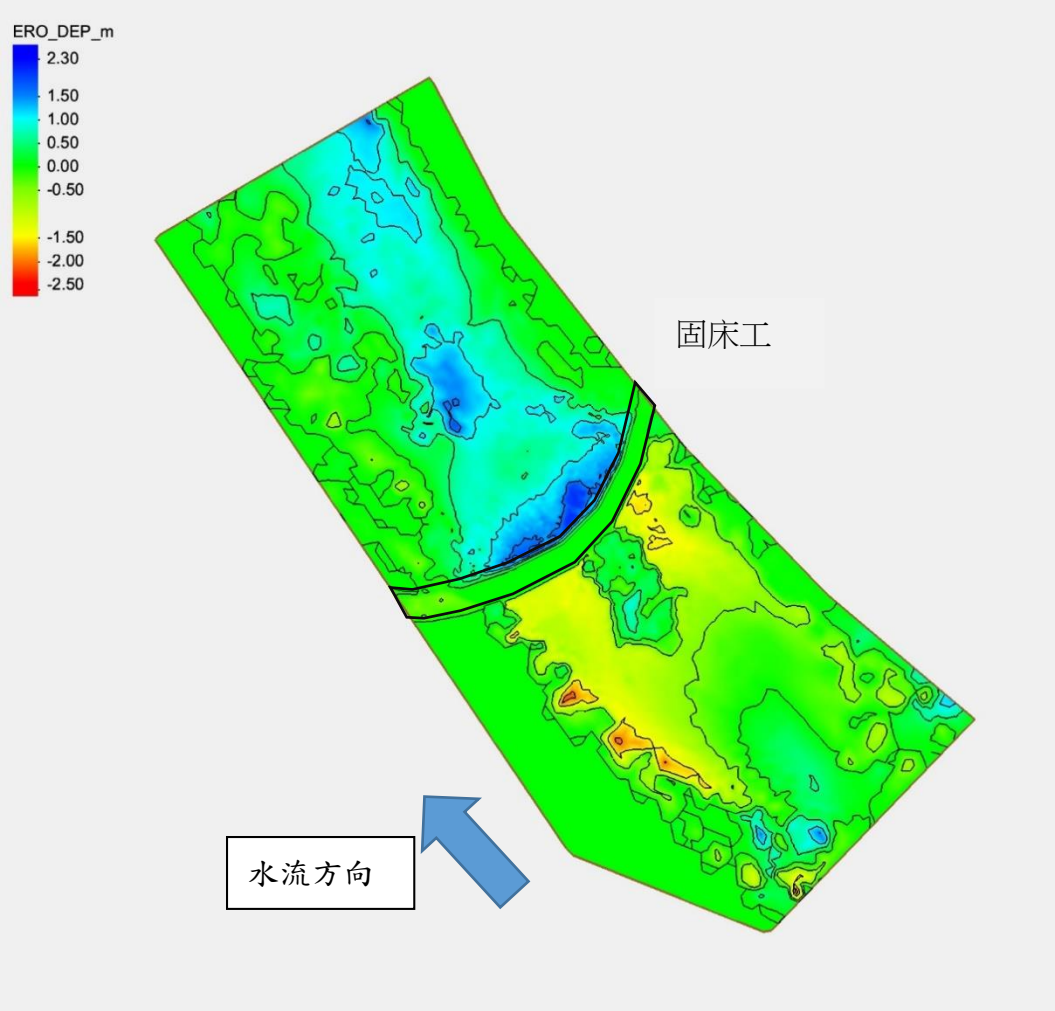


圖 5-24 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-24 可看出,在上拱型固床工的上游處大多為淤積,而在緊鄰固床工下游處則產生集中且深的沖刷，沖刷深度最大達 2 m。若與圖 5-20 上拱型固床工流速分布比較可發現，發生最大沖刷深度與發生最大流速處相同，都在上拱型固床工下游沖刷坑處。

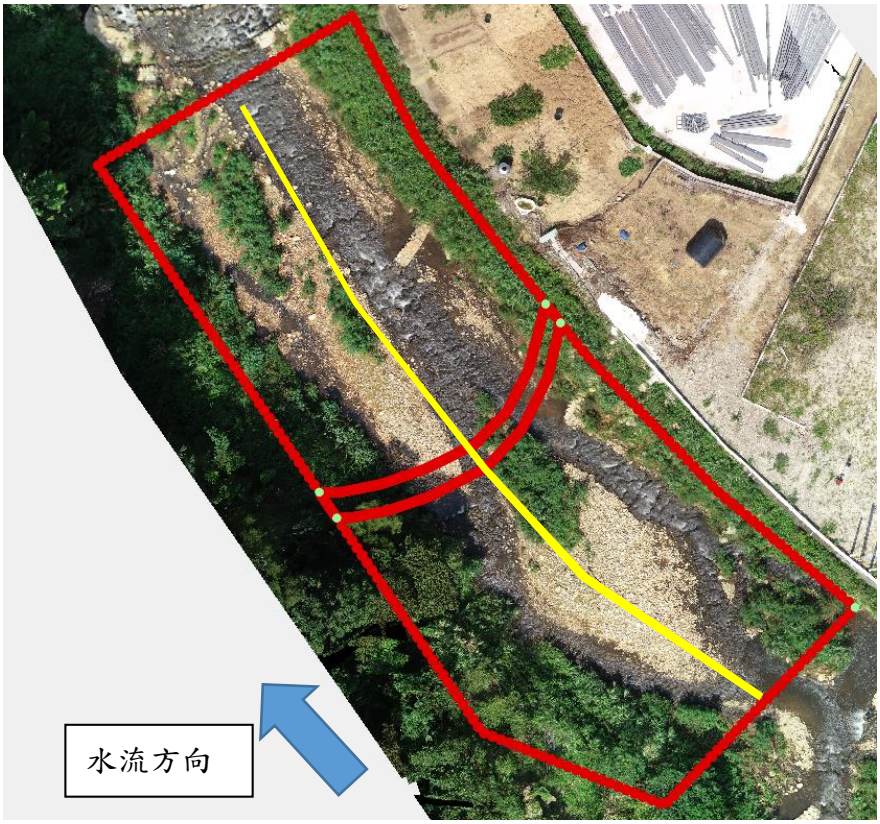


圖 5-25　Q=73.59cms 上拱型固床工(高=1.5m)側視圖切面示意圖

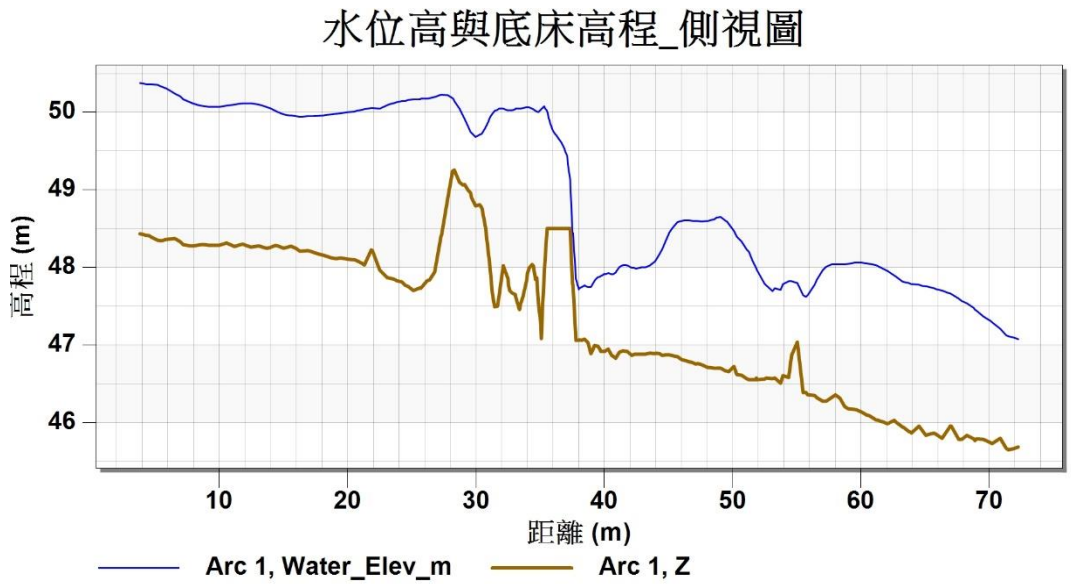


圖 5-26　Q=73.59cms,水位高、上拱型固床工(高=1.5m)與底床高程

四、於河道直線段，五十年重現期流量 73.59cms，下拱型固床工高 1.5m 模擬成果

(一)流速分布模擬結果：

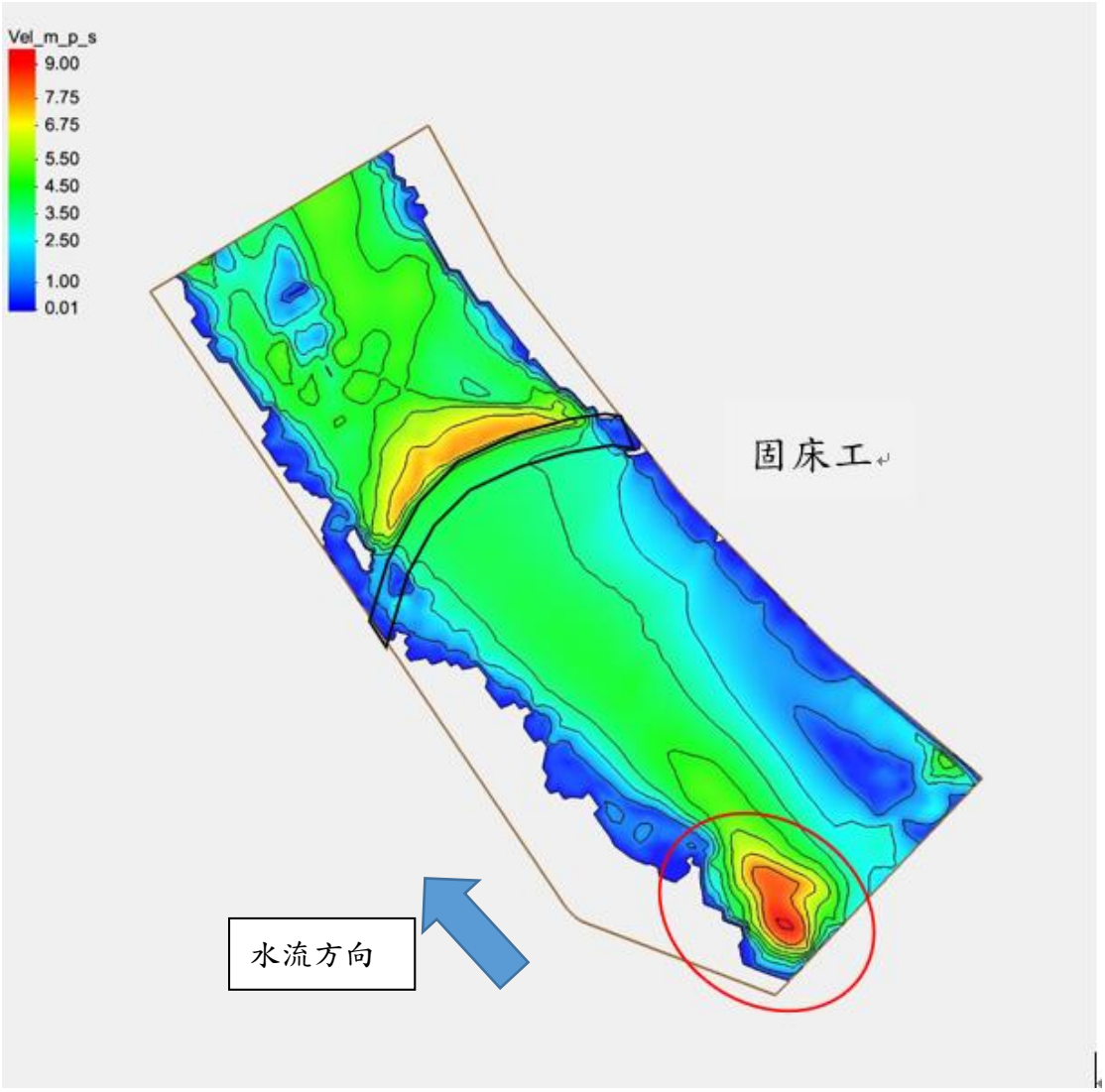


圖 5-27 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

由圖 5-27 可以看到下拱形固床工下游最大流速為 7.7 m/s，而其上游入流處有一處流速達 12.66 m/s，推測是由於入口處的植生干擾所造成的。

(二)水深分布模擬結果：

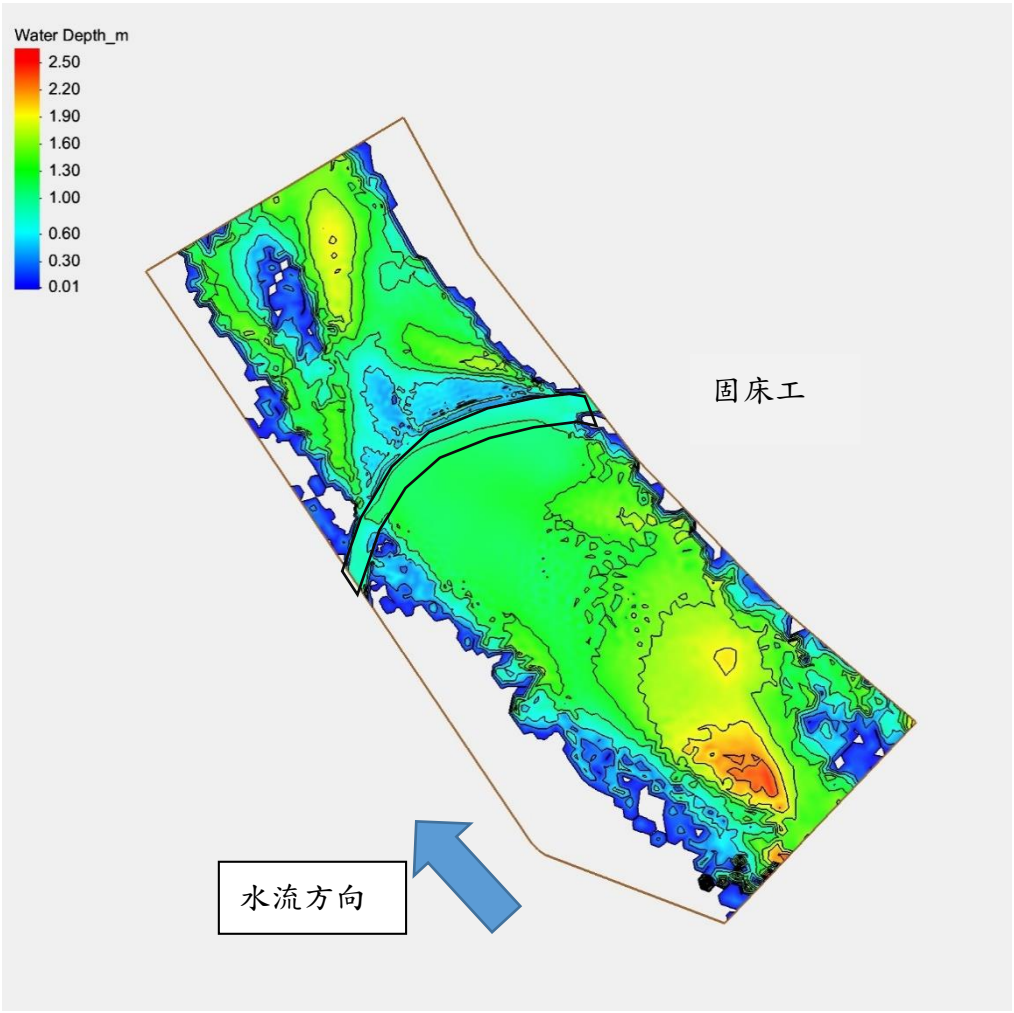


圖 5-28 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

比較上、下拱型固床工之水深分布(圖 5-21、圖 5-28)可以看到，在直線河段，上、下工拱型固床工所產生的水深分布相似。

(三)沖淤分布模擬結果：

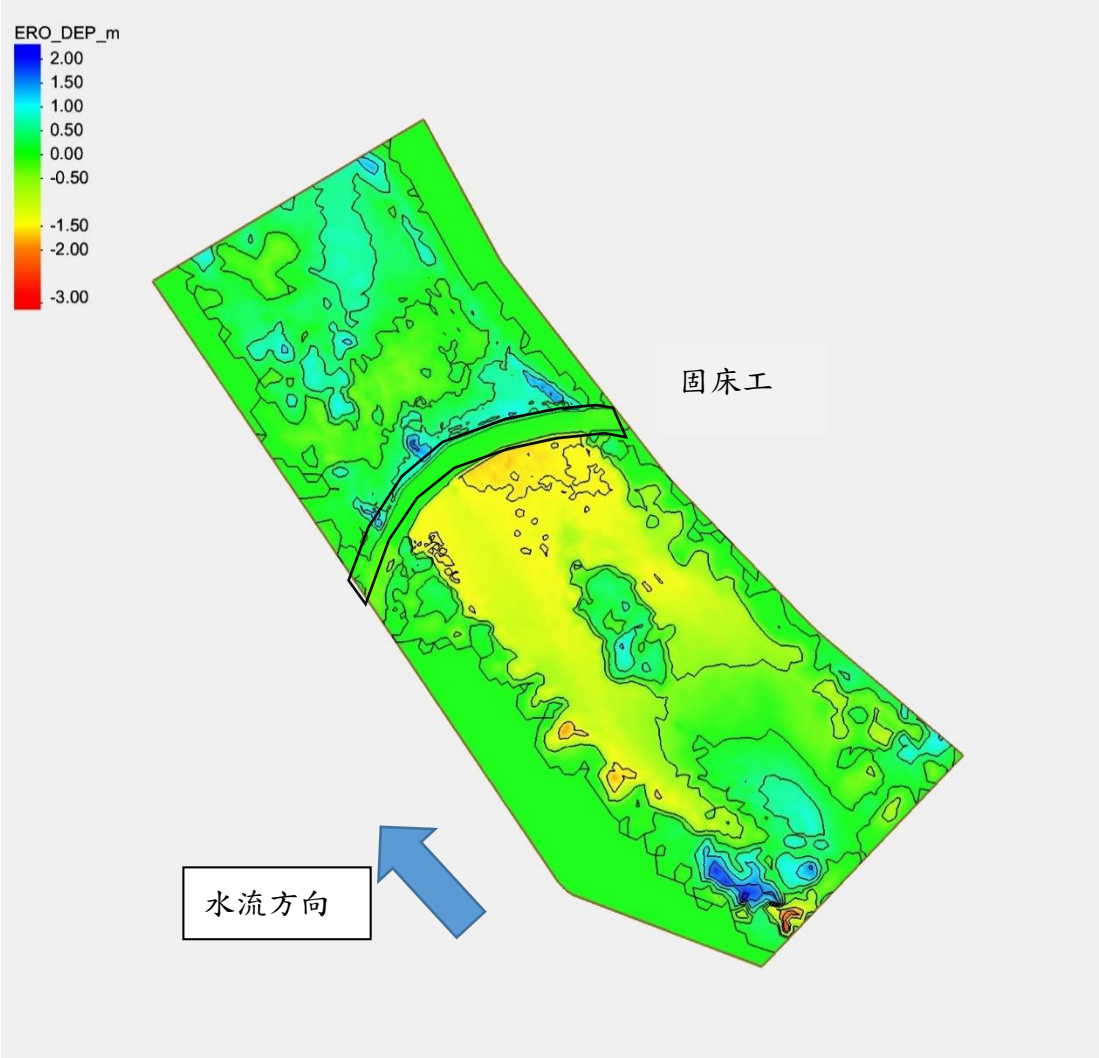


圖 5-29 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

與上拱型固床工之沖淤分布(圖5-25)結果相比，可發現上、下拱型固床工的上游處會產生淤積，而在固床工的下游處，上拱型固床工所產生的沖刷較為集中，而下拱形固床工則較為分散，且沖刷面積相對較小，如圖5-29。

(四)福祿數分布模擬結果：

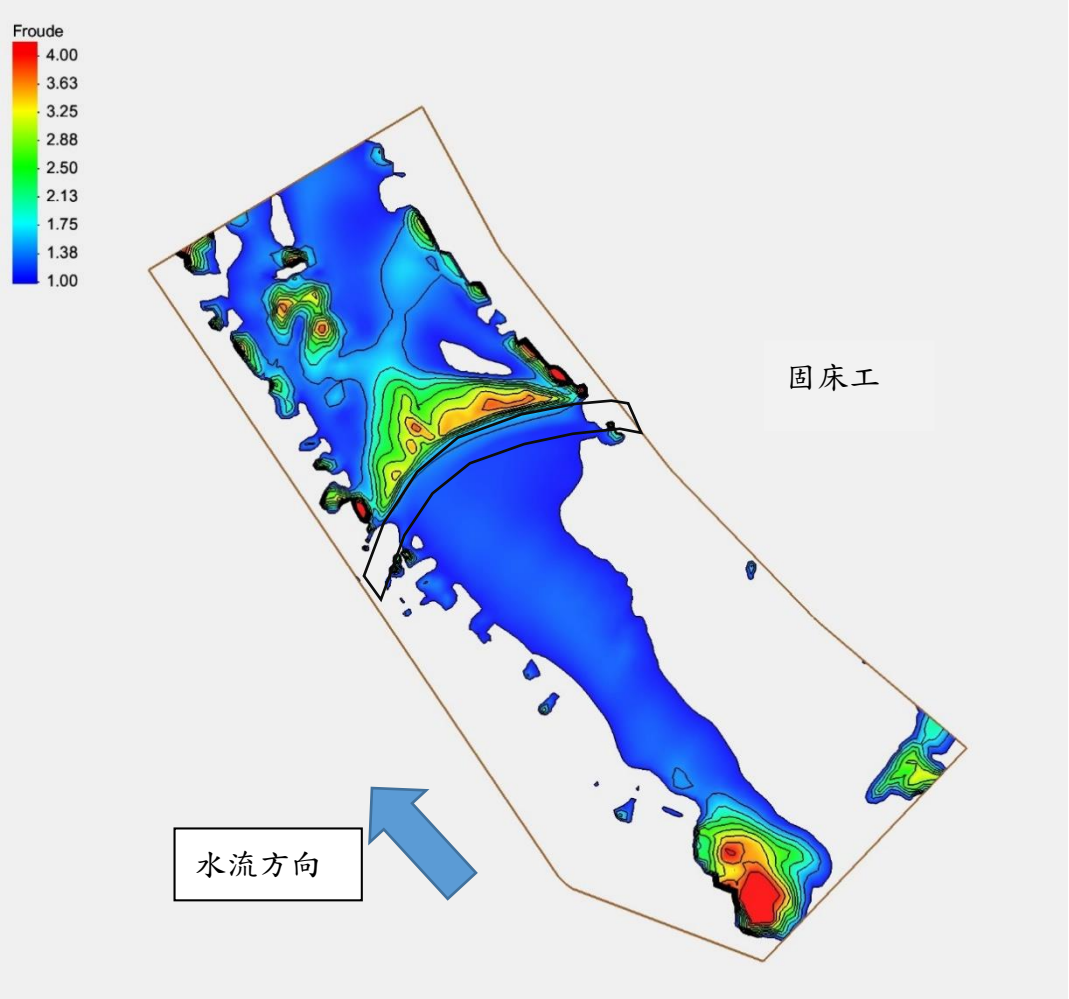


圖 5-30 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布

(五)底床剪應力分布模擬結果：

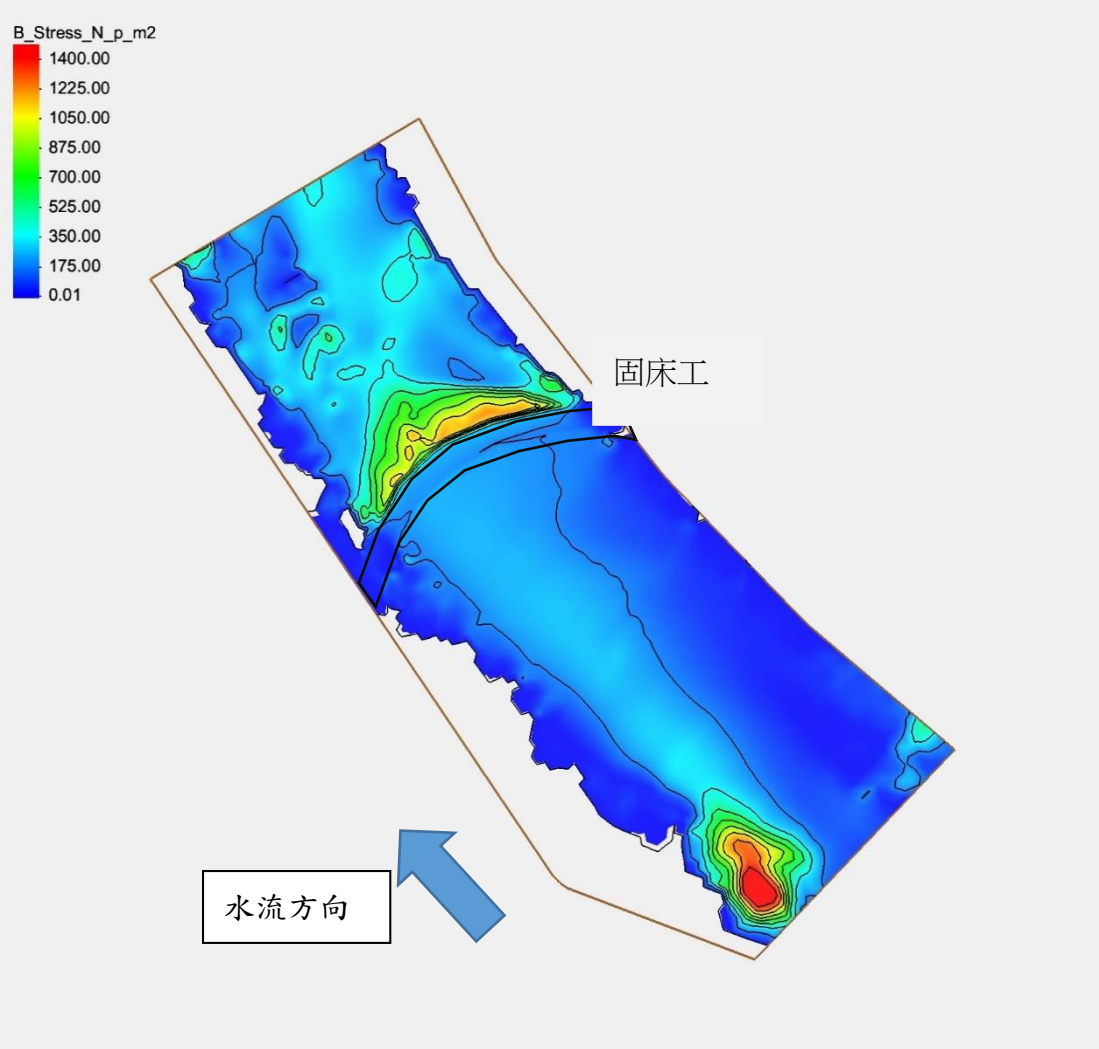


圖 5-31 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布

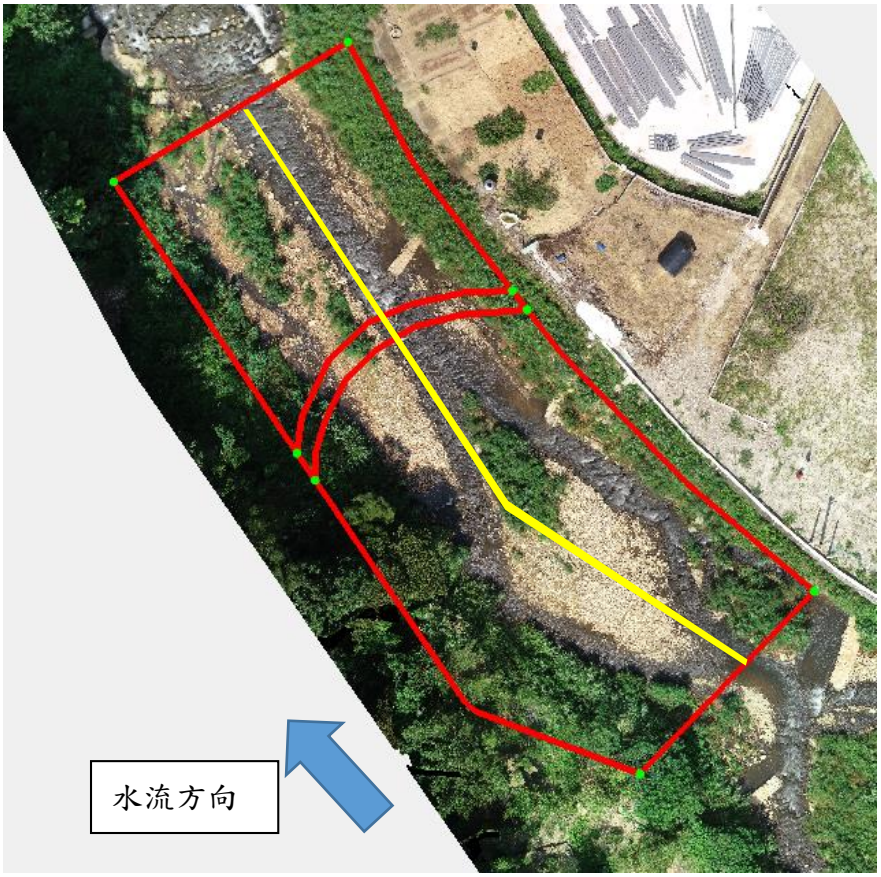


圖 5-32　Q=73.59cms 上拱型固床工(高=1.5m)側視圖切面示意圖

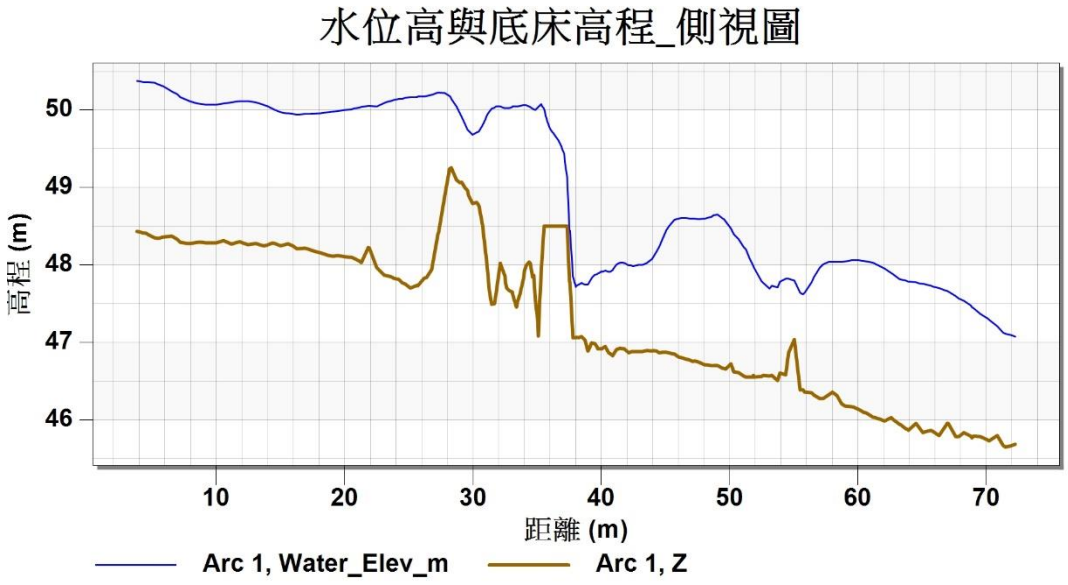


圖 5-33　Q=73.59cms 水位高、上拱型固床工(高=1.5m)與底床高程

表 5-2 SRH2D 上拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較

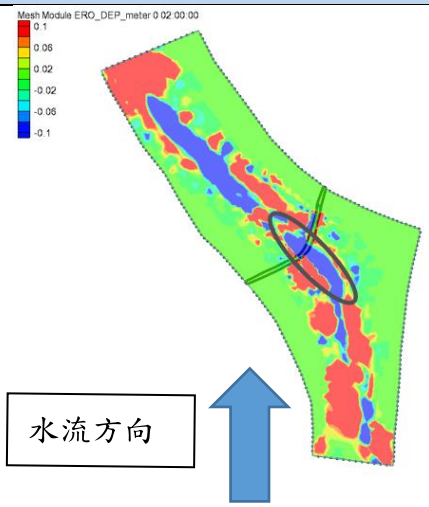
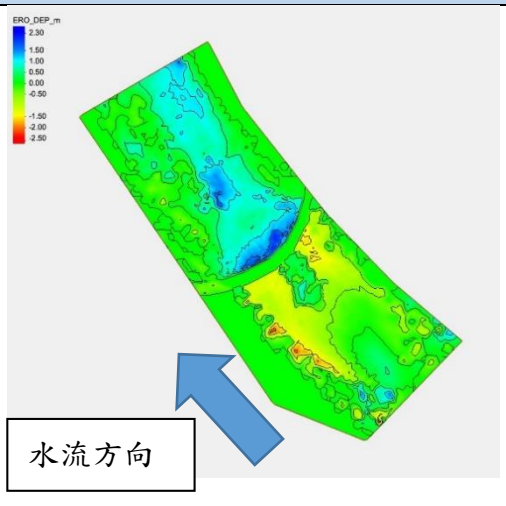
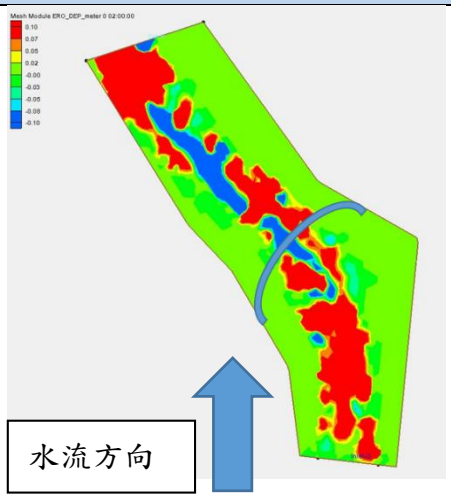
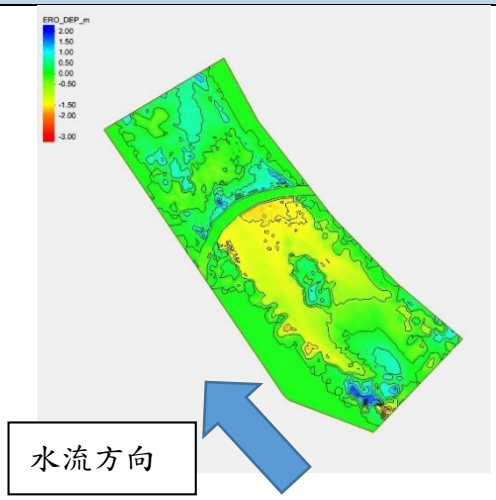
上拱	河道彎曲段	河道直線段
沖淤		
比較	左圖為圖 5-12，右圖為圖 5-24。由兩圖比較可發現，彎曲段下游渠道中心緊鄰固床工處為淤積，推測可能原因是由於彎道段的流速較直線段較慢(彎道段流速約為 3.5m/s，彎道段流速約為 5.0m/s)，因此無法將砂石往下游傳輸，導致固床工下游處淤積。而直線段固床工下游渠道中心處則出現深度最大達 2.3 m 的沖刷坑。在固床工上游段，彎曲段與直線段模擬結果皆為淤積。	

表 5-3 SRH2D 下拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較

下拱	河道彎曲段	河道直線段
沖淤		
比較	左圖為圖 5-18，右圖為圖 5-30。由兩圖比較可發現，彎曲段河道之固床工上游多為沖刷，推測可能是固床工本身位於彎道處;而直線段固床工上游則造成大面積的淤積。下游的部分，彎曲段之河道右岸為沖刷，左岸為淤積，即建置在彎曲斷的固床工所呈現的沖淤分布乃受到河道凹、凸岸的影響。而位於直線段之固床工下游未見如上拱型固床工之集中於河道中央的沖刷坑，而是產生較為分散的沖刷，值得注意的是沖刷依然發生於緊鄰固床工基礎處，沖刷深度約為 1.5-2.0m，設計時須注意固床工基礎掏刷之問題。	

第二節 Riverflow2d

由於 SRH2D 此軟體已發行有數年時間，因此本計畫另外選取並使用較新推出之輸沙模擬軟體以進行比較,本團隊另外使用 RF-2D 模式，此模式輸砂模組控制方程式更為嚴謹，可處理超臨界流況以及亞臨界流況，同時考慮懸浮載與底床載運移程式，並綜合水文和水力在河流中模擬動床和污染物擴散的有限元素模型，可以在河流中佈設洪水，模擬洪水氾濫、洪氾平原和複雜的地形，且其分辨率高，速度快，穩定性好，精度高。使用調整過後的三角網格可以實現在任何河流環境的關鍵特徵周圍解決流場問題，可運用於涵管、橋墩、堰、橋、閘門等構造物及水文事件、潰壩、土石流、泥砂傳輸模擬。

RiverFlow2D 的用戶界面是基於 Aquaveo 開發的 Surface-Water Modeling Solution(SMS)。這個 GIS 集成的軟件系統提供交互功能來生成和改進 RiverFlow2D 使用的柔性網格。SMS 使用熟悉的 GIS 對象，例如點、圓弧、多段線、多邊形來構建模型，以便於分配邊界條件和曼寧粗糙度值，並允許用戶有效地管理整個建模過程。SMS 提供了一整套可視化工具搭配 Autodesk Infraworks 360 可自建構造物，可進行 3D 渲染，動畫和導出到 Google 地球的圖形。因 Riverflow2D 與 SRH2D 的界面均可為 SMS，故建模步驟與 SRH2D 原則上相同，但 RF2D 的運算速度十分快速，可節省許多時間。圖 5-34 為 RF2D 泥砂運移公式之設定界面，圖 5-35 為 RF2D 輸砂參數設定之界面。

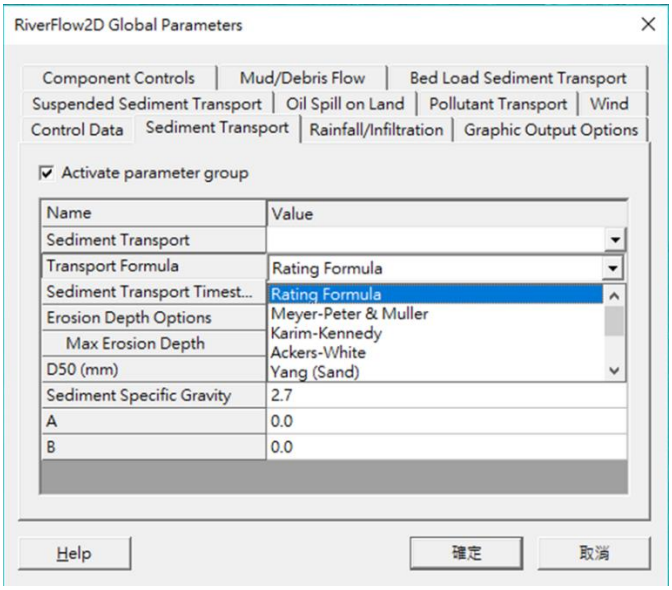


圖 5-34　RF2D 泥砂運移公式之設定界面

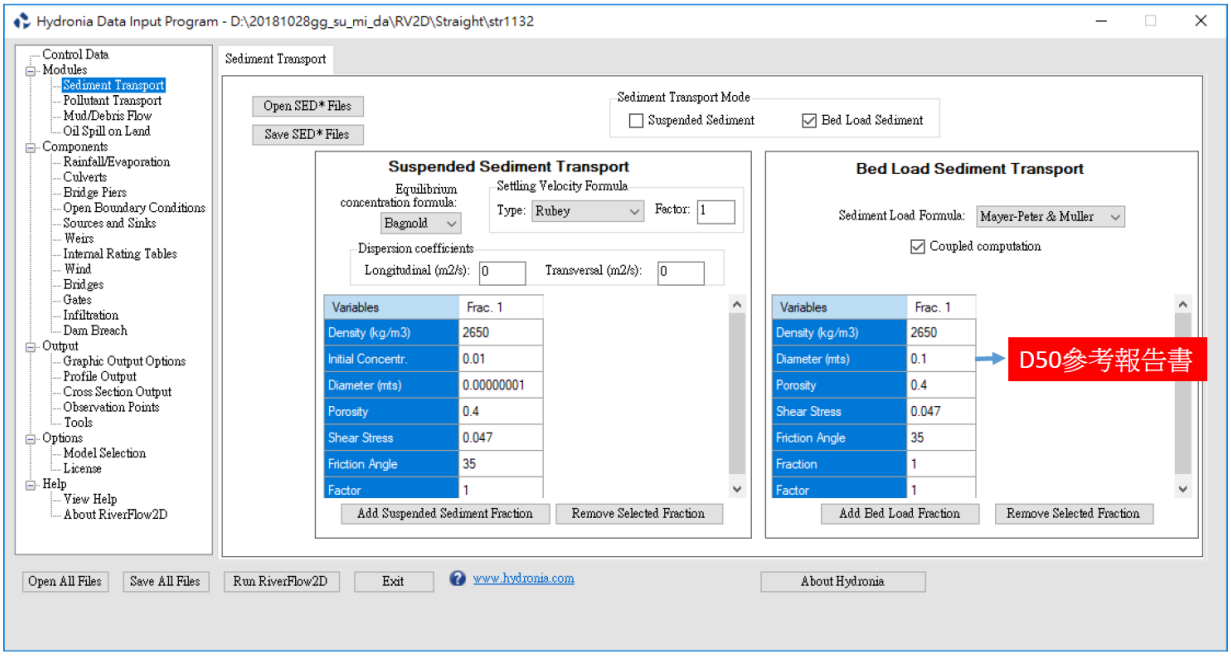


圖 5-35　RF2D 輸砂參數設定之界面

利用 GPU 版本的 RiverFlow2D 彈性網格模型的發布對於許多 2D 模型製作者來說是一個改變遊戲規則的模型，與非平行演算或非並行模型相比，模擬的速度通常快 150 倍，將運行時間從幾天或幾小時減少到幾分鐘。

泥砂輸送模式可顯示的項目，包含了單獨計算懸移質和泥砂輸砂量、動床侵蝕沉積量，並利用 10 個輸砂公式，導出泥砂運送在剛性床上、最大侵蝕深度地區。

底床載控制方程式：

1. 質量守恆方程式：

$$\frac{\partial(\mathrm{h})}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial(\mathrm{hu})}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial(\mathrm{hv})}{\partial \mathrm{y}}=0$$

2. 動量守恆方程式(x 方向)：

$$\frac{\partial(\mathrm{hu})}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial\left[hu^2+\frac{1}{2}gh^2\right]}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial(\mathrm{huv})}{\partial \mathrm{y}}=\frac{p_{bx}}{\rho_w}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_w}$$

3. 動量守恆方程式(y 方向)：

$$\frac{\partial(\mathrm{hu})}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial(\mathrm{huv})}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial\left[hv^2+\frac{1}{2}gh^2\right]}{\partial \mathrm{y}}=\frac{p_{by}}{\rho_w}-\frac{\tau_{by}}{\rho_w}$$

4. 底床高度變化：

$$\frac{\partial\sum_{p=1}^{N_p}\left[z_p\left(1-p_p\right)\right]}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial q_{sx}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial q_{sy}}{\partial \mathrm{y}}=0$$

其中 h(m)代表水深，z(m)代表底床高，u(m/s)為 x 軸方向流速，v(m/s)為 y 軸方向流速，t 為時間，$\mathrm{p}=1\sim N_p$表示搬運過程中懸浮不同種沉積物的數目，p_p代表不同 p 值時底床的孔隙率，z_p為不同種沉積物的底床高，p_{bx}(N/m)和τ_{bx}(N/m)分別為沿著底床的壓力及剪應力，ρ_w($\mathrm{m^3/kg}$)為水的密度，q_{sx}($\mathrm{m^3/s/m}$)和q_{sy}($\mathrm{m^3/s/m}$)為單位寬度之體積流通量，可藉由定律及輸砂公式求得。

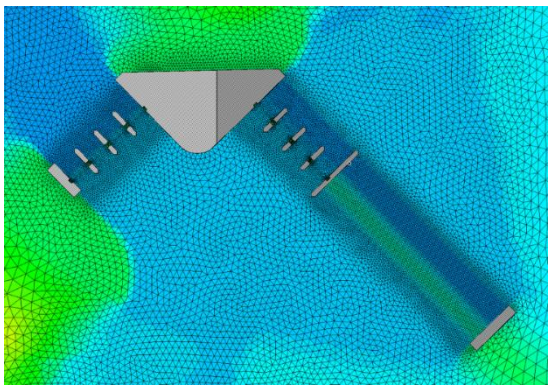


圖 5-36　RiverFlow2D 模擬構造物於河面俯視圖

資料來源: http://www.hydronia.com/riverflow2d/

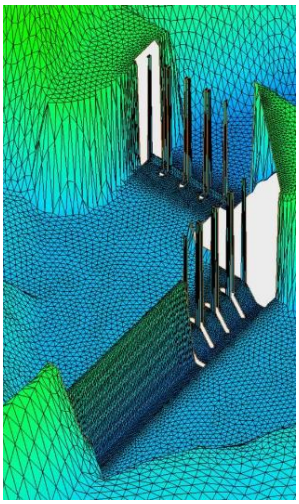


圖 5-37　RiverFlow2D 模擬構造物於河面側視圖

資料來源: http://www.hydronia.com/riverflow2d/

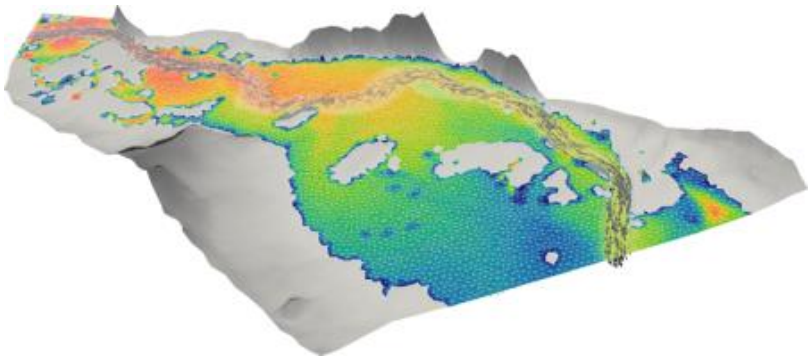


圖 5-38　RiverFlow2D 模擬合面網格

資料來源：http://s377446641.initial-website.com/two-dimensional-

models/riverflow2d-gpu/

本團隊以 RF2D，針對上拱型固床工以及下拱型固床工進行模擬，模擬之邊界條件設定都與 SRH2D 相同。

一、於河道彎道段，五十年重現期流量 73.59cms，上拱型固床工高 1.5m 模擬結果

(一)速度模擬結果:

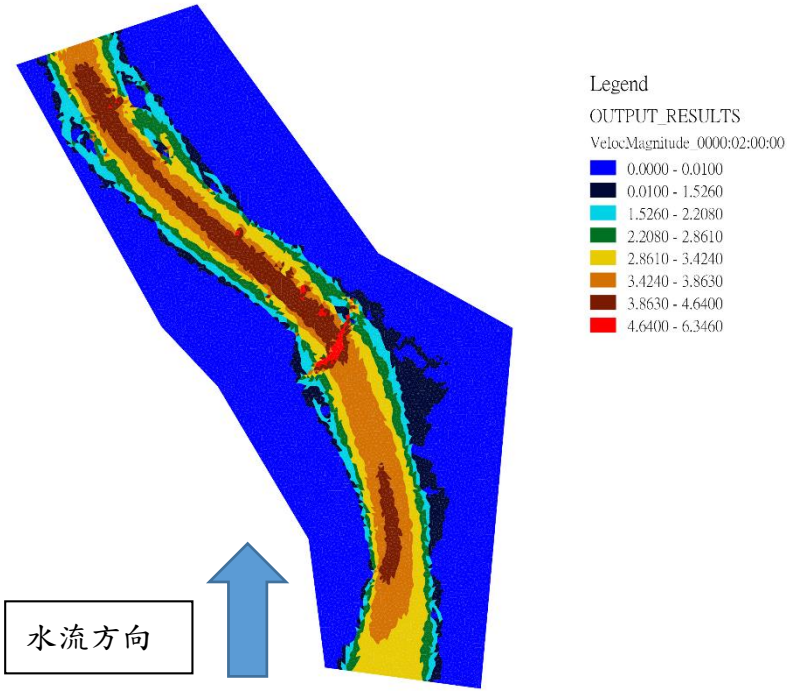


圖 5-39 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

由圖 5-39 可以看到其於固床工上方、下游處有最大之速度產生，大約為 6.3m/s，且下游處流速明顯較上游處大。

(二)水深模擬結果:

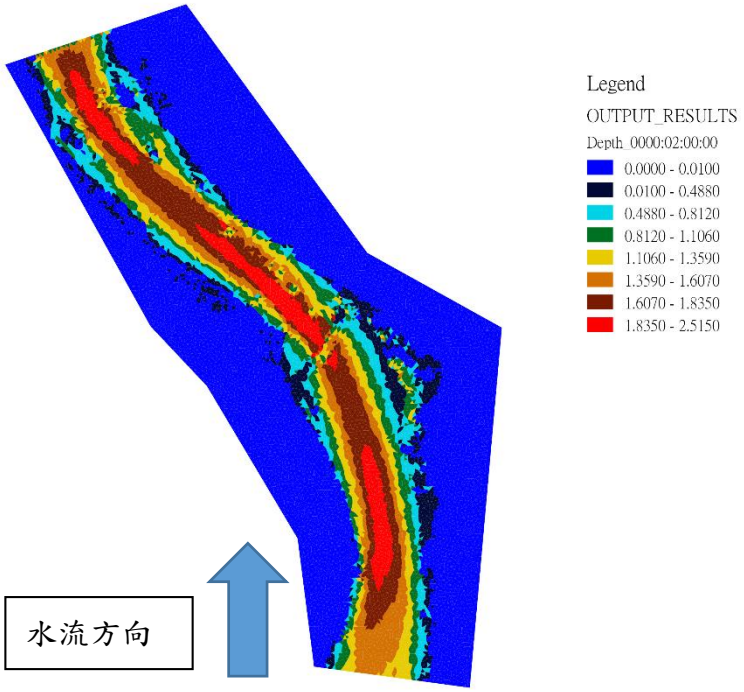


圖 5-40 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

由圖 5-40 可看出固床工下游處，由於沖刷較深而有較大之水深，而上游處由於淤積而水深較小，但依然有一小區域為水深較深。

(三)沖淤模擬結果:

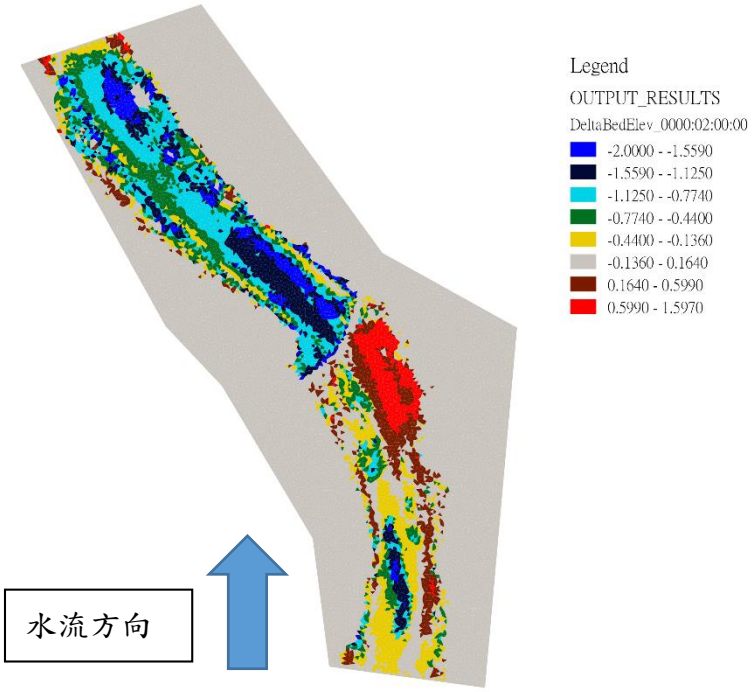


圖 5-41 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-41 可以看到其固床工下游處內沖刷達 1.5m 以上，接近設定之最大可沖刷深度，判斷是河道粒徑較小，導致其在較大的洪水情況下河床質幾乎都被水流帶走，且可能造成基礎掏空之危險。

(四)底床剪應力模擬結果:

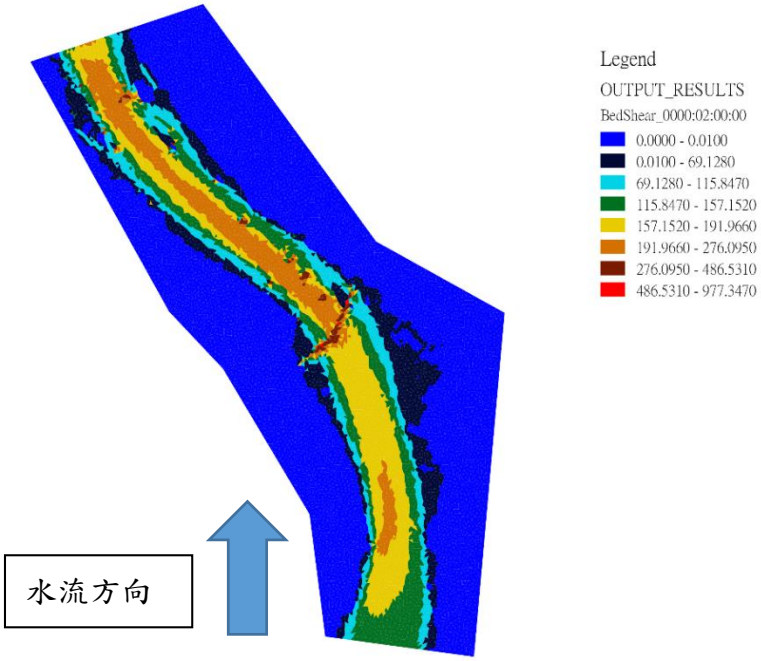


圖 5-42 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布

(五)福祿數模擬結果

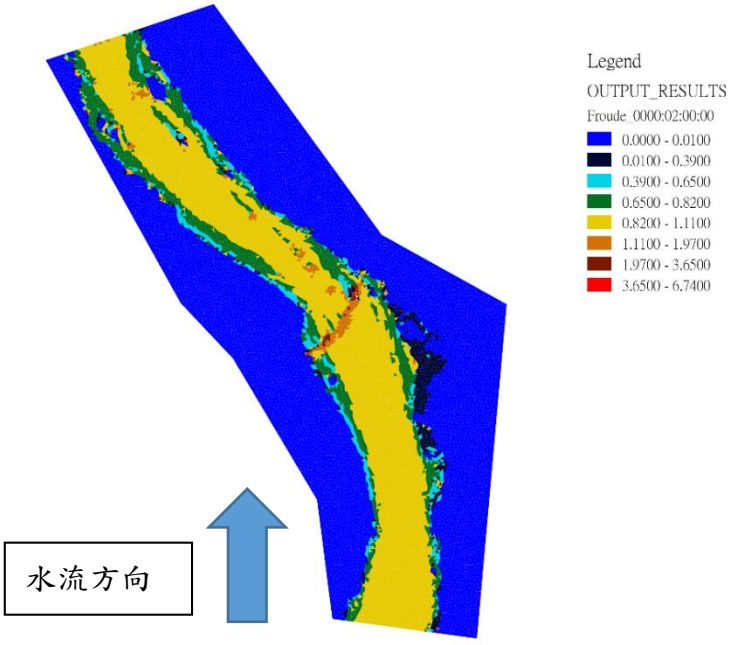


圖 5-43 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布

從圖 5-42、5-43 可以看出其於固床工上方有較大之剪應力以及福祿數，而下游處有部分較大值產生，判斷為河道緊縮導致水流加速因此較大之剪應力，且其水深較淺，導致有較大之福祿數產生。

二、於河道彎道段，五十年重現期流量 73.59cms，下拱型固床工高 1.5m 模擬結果

(一)流速模擬結果:

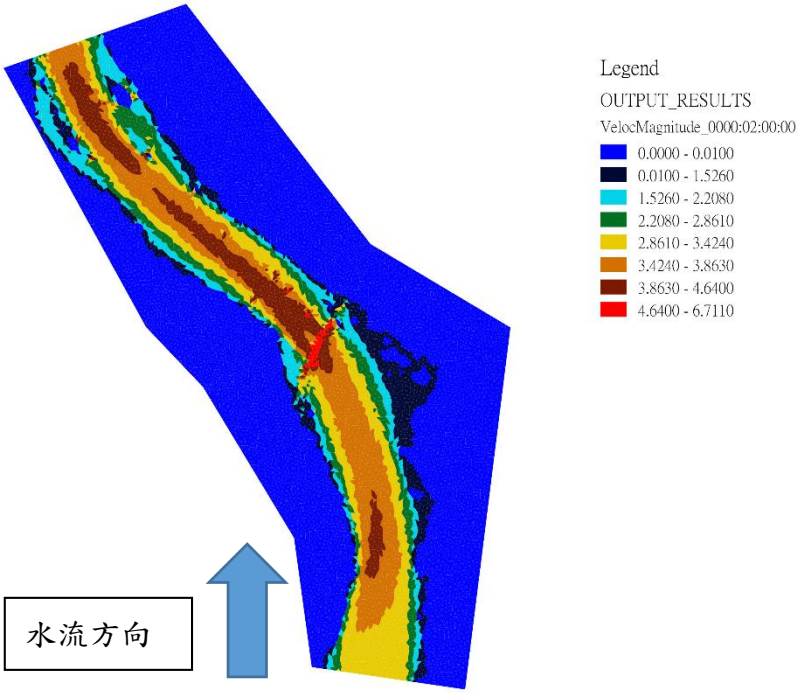


圖 5-44 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

從圖 5-44 可以看到其最大流速位於固床工上方，且其數值要大於上拱型固床工之最大流速，且其下游處之流速分布較上拱型不連續。

(二)水深模擬結果:

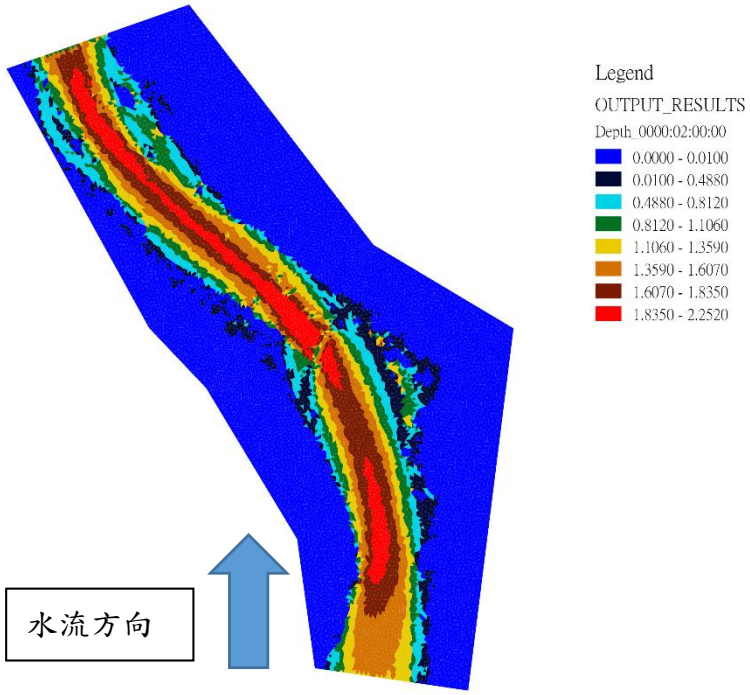


圖 5-45 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

從圖 5-45 可以看到其分布情形與上拱型類似，然而可以看到其固床工上游處之最大水深分布區域較上拱型來得大。

(三)沖淤模擬結果:

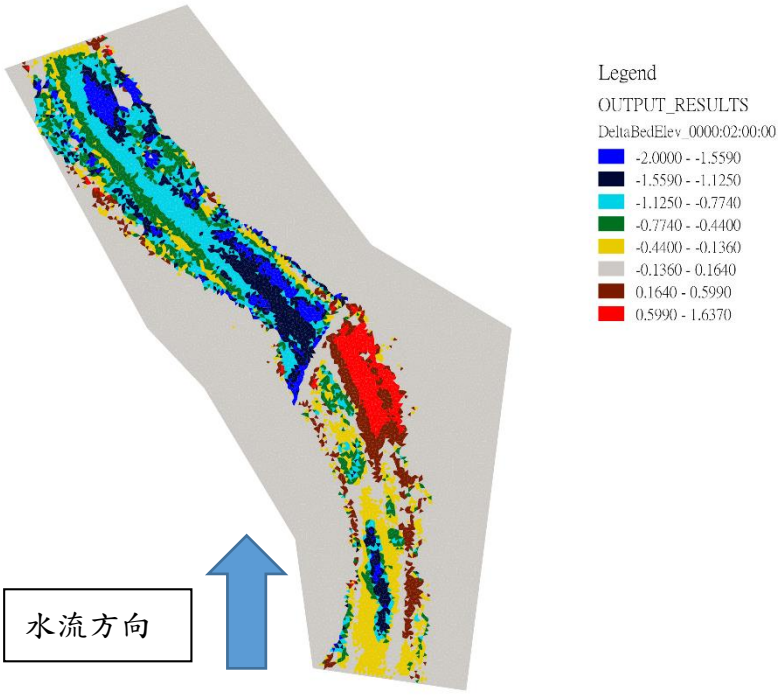


圖 5-46 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-46 可以看到其沖淤分佈與上拱型固床工類似，均為右岸有嚴重淤積之情形，而其下游處之沖刷範圍較上拱型固床工為小。

(四)底床剪應力模擬結果:

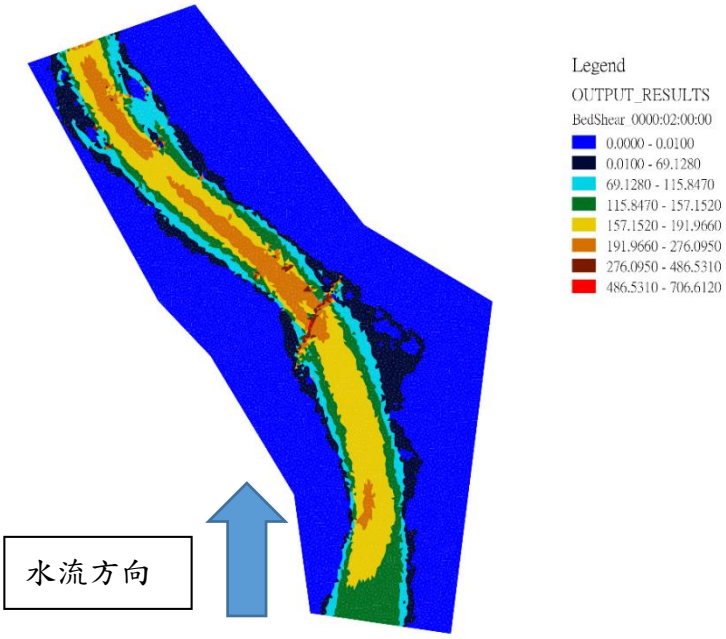


圖 5-47 下拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之底床剪應力分布

(五)福祿數模擬結果

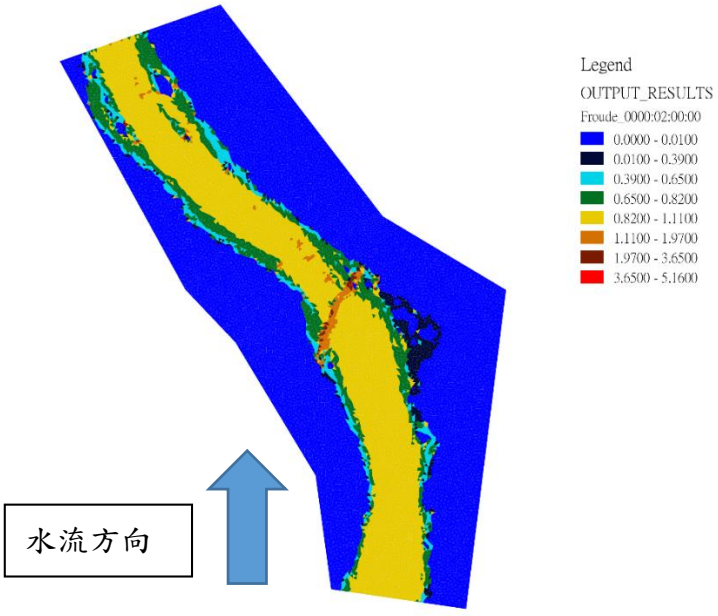


圖 5-48 下拱型固床工(Q=73.59cms，高=1.5m)之福祿數分布

三、於河道直線段，上拱型固床工模擬成果

(一)流速分布模擬結果:

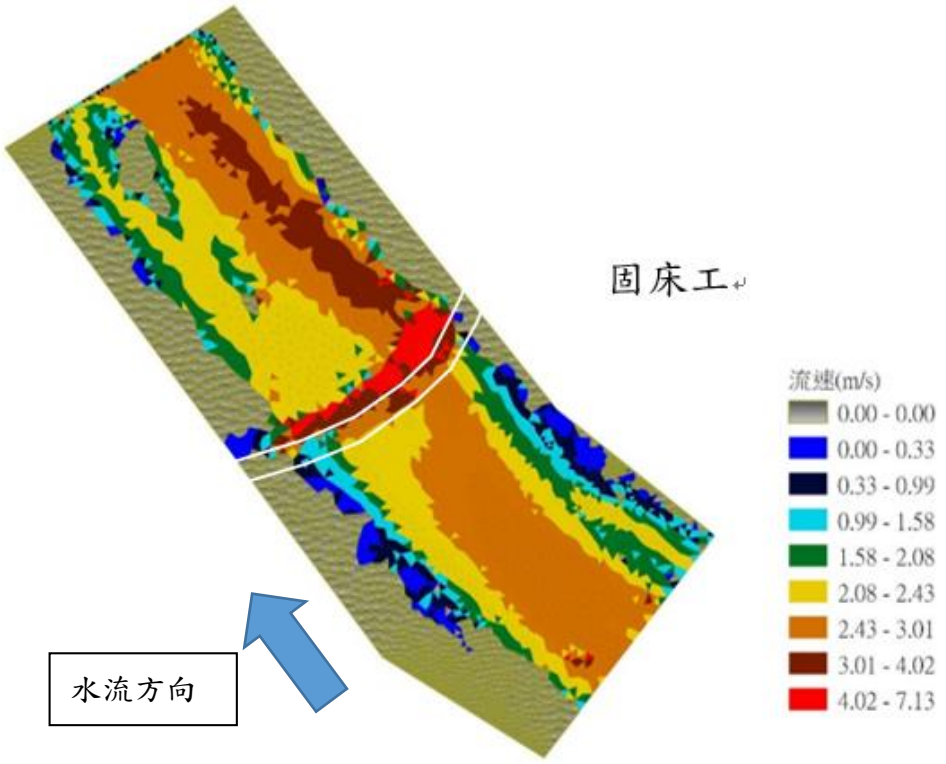


圖 5-49 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

由圖 5-49 可以看到上拱型固床工之下游處有最大之速度產生，且下游處流速明顯較上游處大。此外上拱型固床工之下游處，流速較大的分布集中於河道右岸，此部分推測是由於左岸河道中的沙洲使得水流往右岸集中所致。

(二)水深分布模擬結果:

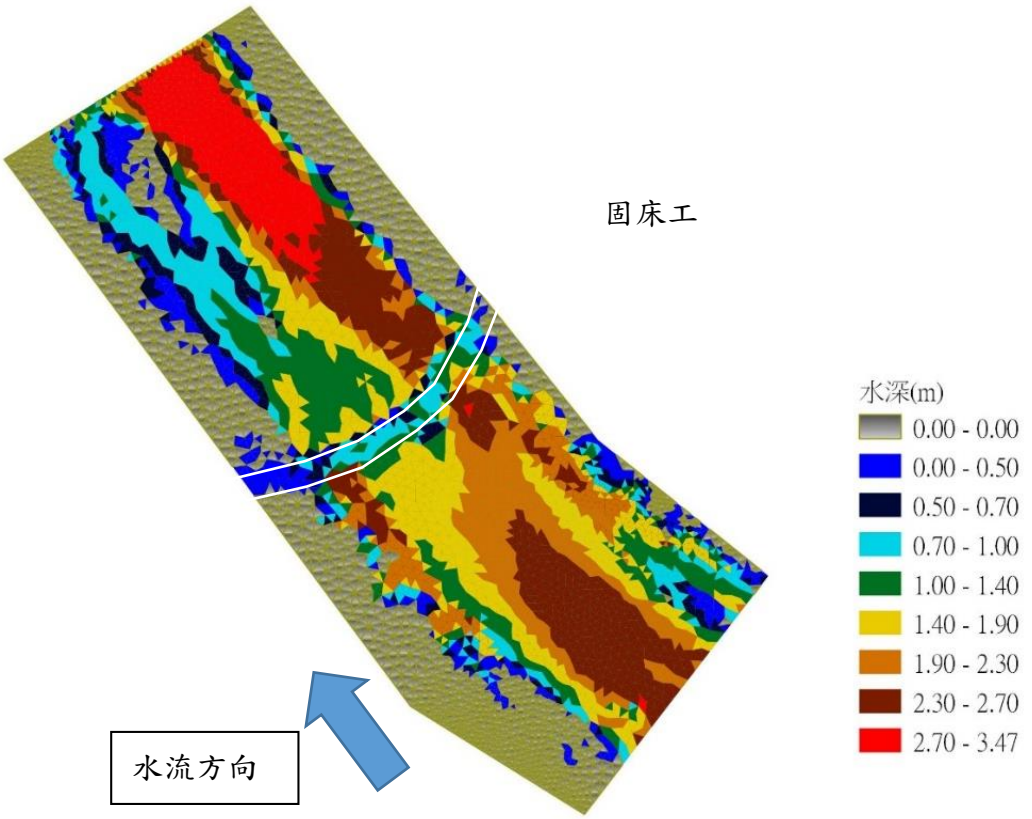


圖 5-50 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

與圖 5-50 進行比較，由 SRH2D 所模擬之水深分布與 SRH2D 之模擬結果(如圖 5-21)相比可看到，兩者所模擬的結果相似。然而，Riverflow2D 之模擬結果，上拱型固床工下游處的水深分布受固床工影響較小。

(三)沖淤分布模擬結果:

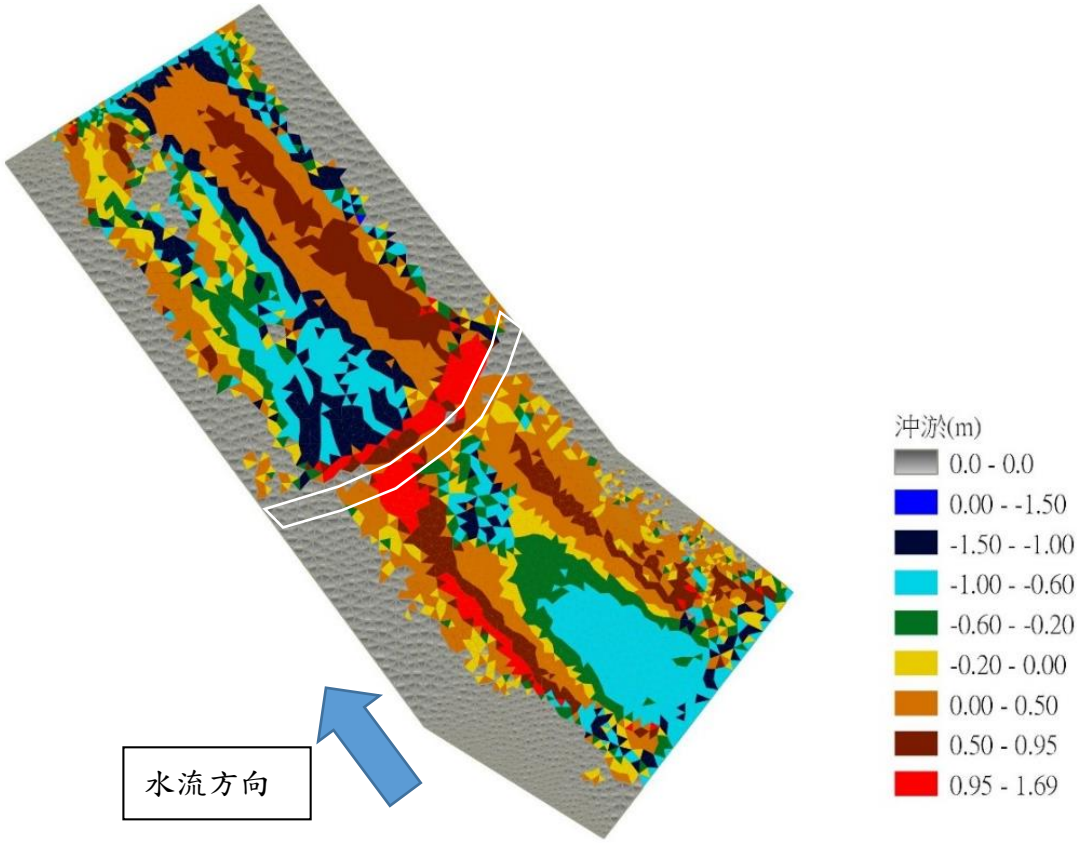


圖 5-51 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-51 可以看到其固床工下游處沖刷達 1.5m，且沖刷處緊鄰固床工，可能造成固床工基礎掏空之危險。

(四)底床剪應力分布模擬結果:

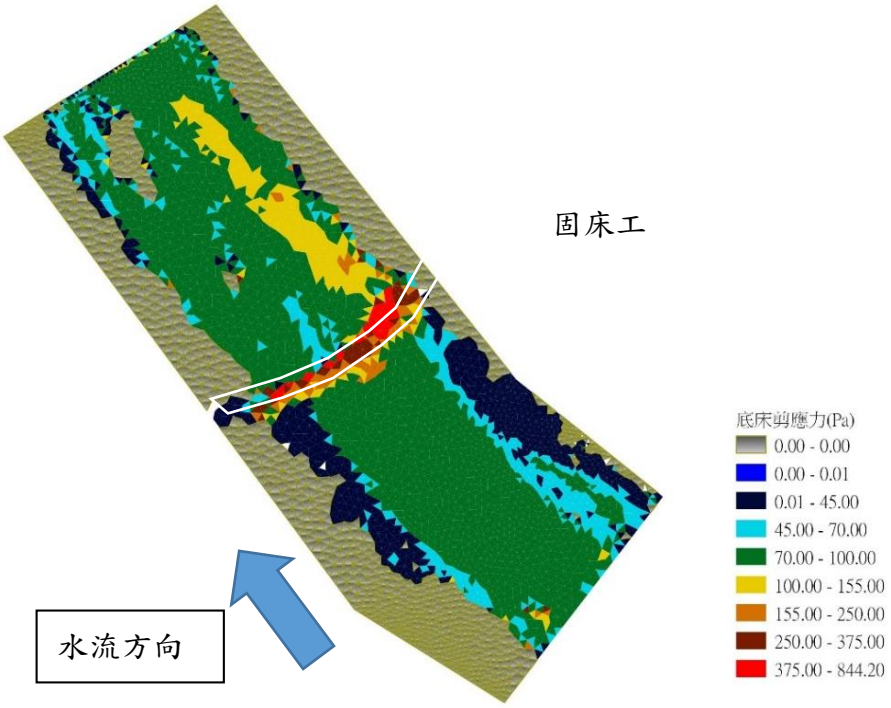


圖 5-52 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布

(五)福祿數分布模擬結果:

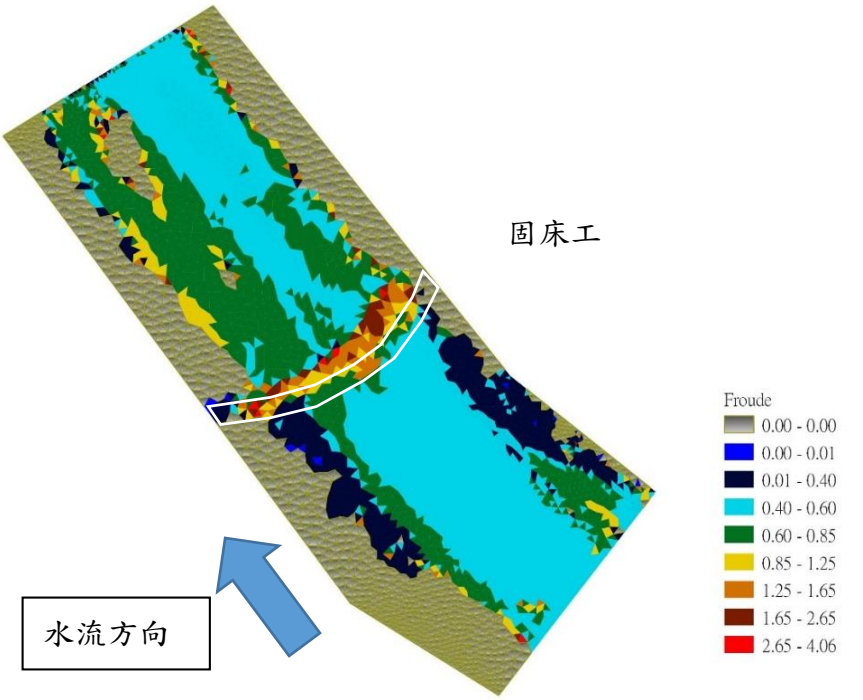


圖 5-53 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布

四、於河道直線段，下拱型固床工模擬成果

(一)流速分布模擬結果:

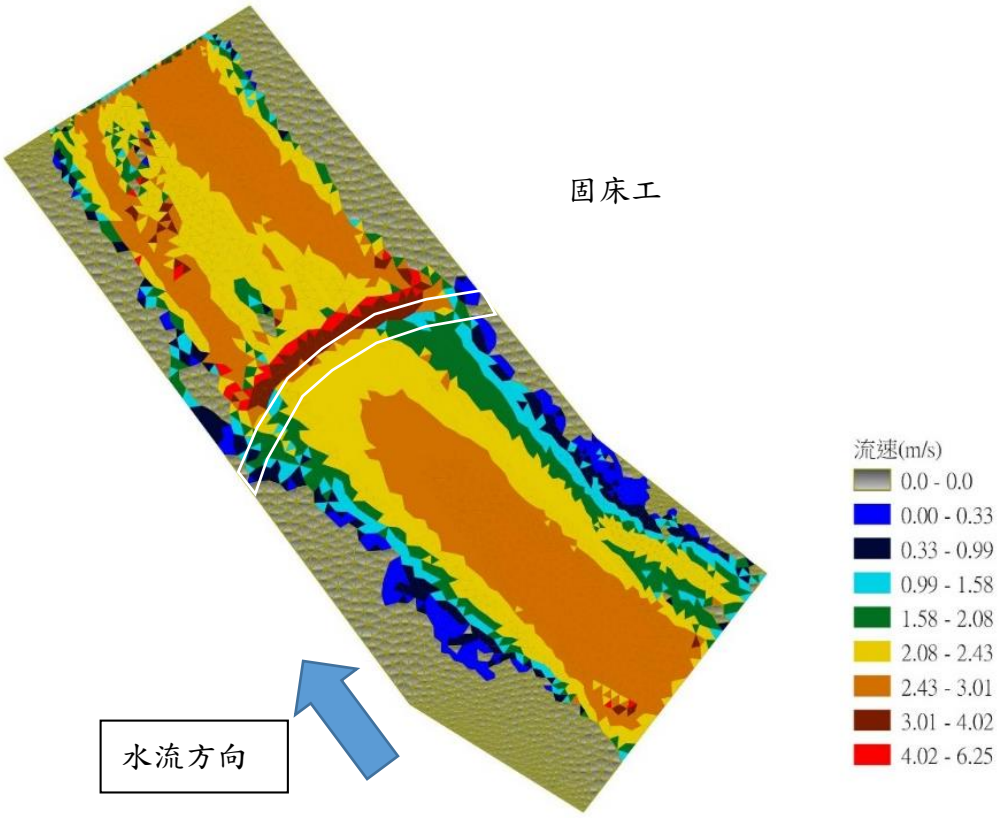


圖 5-54 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之流速分布

比較圖 5-49 與圖 5-54，即比較上、下拱型固床工的流速分布模擬結果，可以看到下拱形固床下由所產生的流速較緩，推測是由於下拱形固床工將水流分散所致，固床工下游水流不再集中於河道右岸。

(二)水深模擬結果:

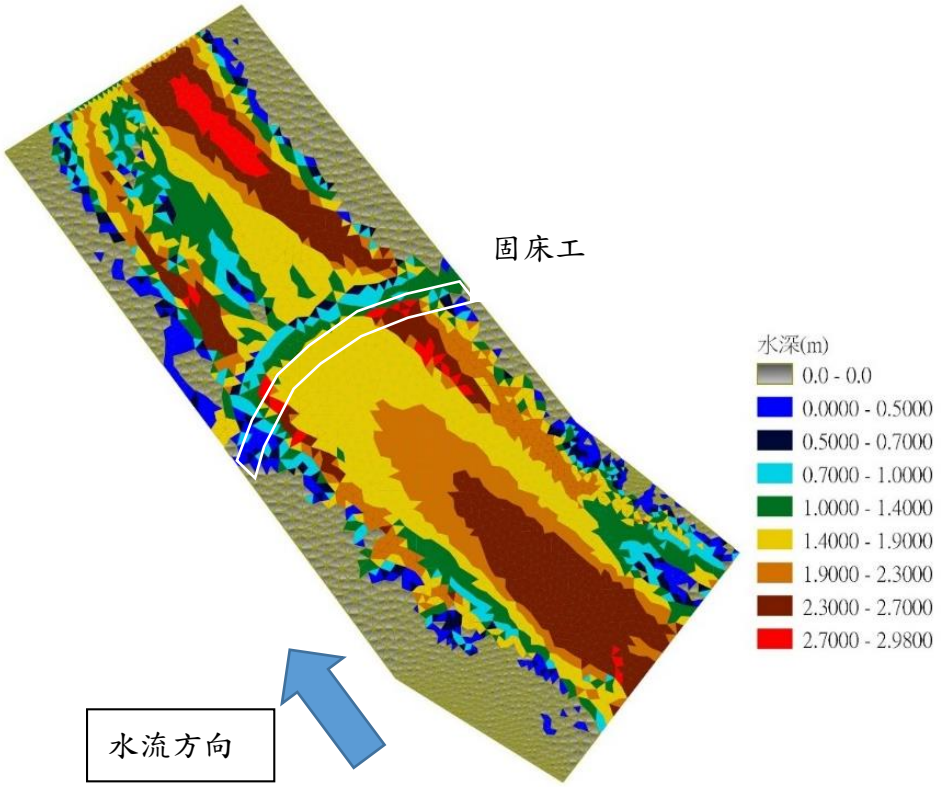


圖 5-55 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之水深分布

比較上、下拱型固床工水深分布(圖 5-50、圖 5-55)，可以看到兩者上游水深分布情形相似，而下拱形固床工相較於上拱型固床工下游水深分布較均勻，判斷是由於下拱形固床工將水流分散所致。

(三)沖淤分布模擬結果:

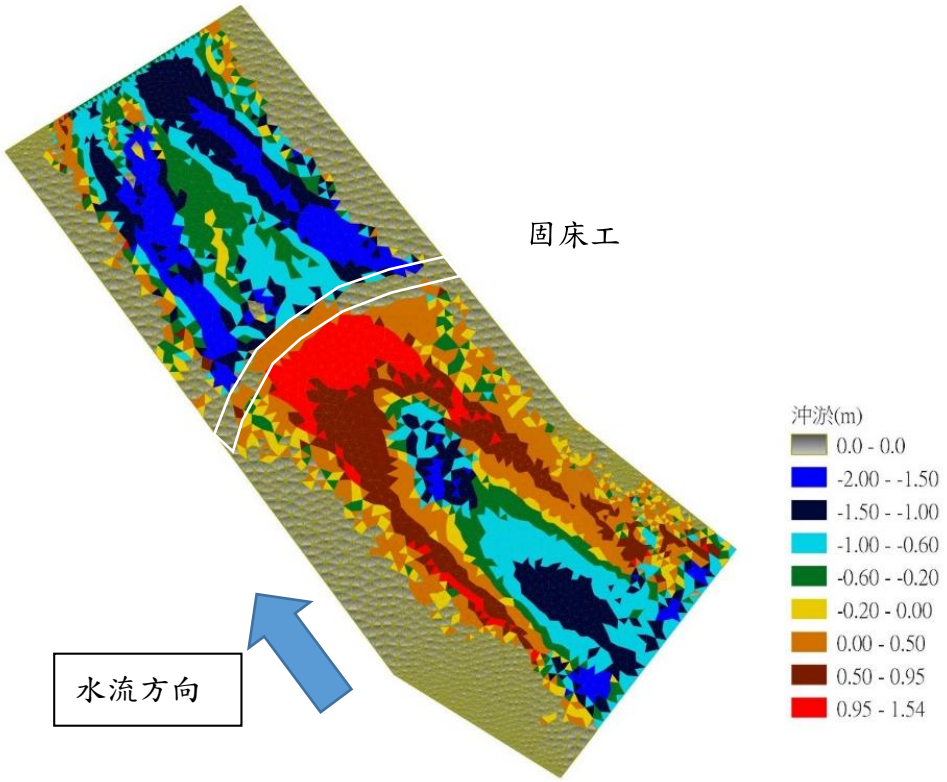


圖 5-56 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

由圖 5-56 可以明顯看到下拱形固床工上游淤積，若與上拱形固床工上游淤積(圖 5-51)相比，下拱形固床工上游淤積淤積效果較上拱型固床工來得大。而在下拱形固床工下游也可看到河道兩岸有達 1.5 m 至 2.0 m 的沖刷，可佐證上述本團隊的推論，即下拱形固床工使得水流分散，致使下拱形固床工下游兩側沖刷。

(四)底床剪應力分布模擬結果:

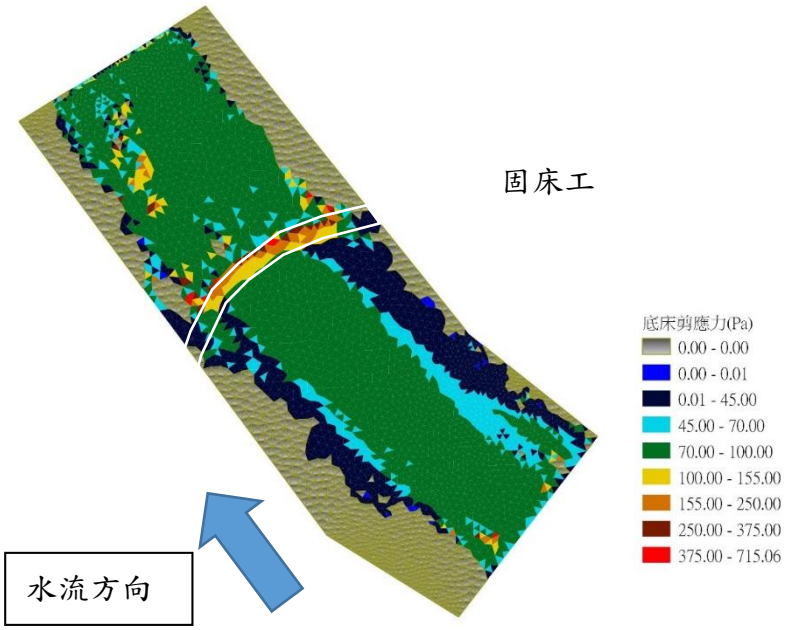


圖 5-57 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之底床剪應力分布

(五)福祿數分布模擬結果:

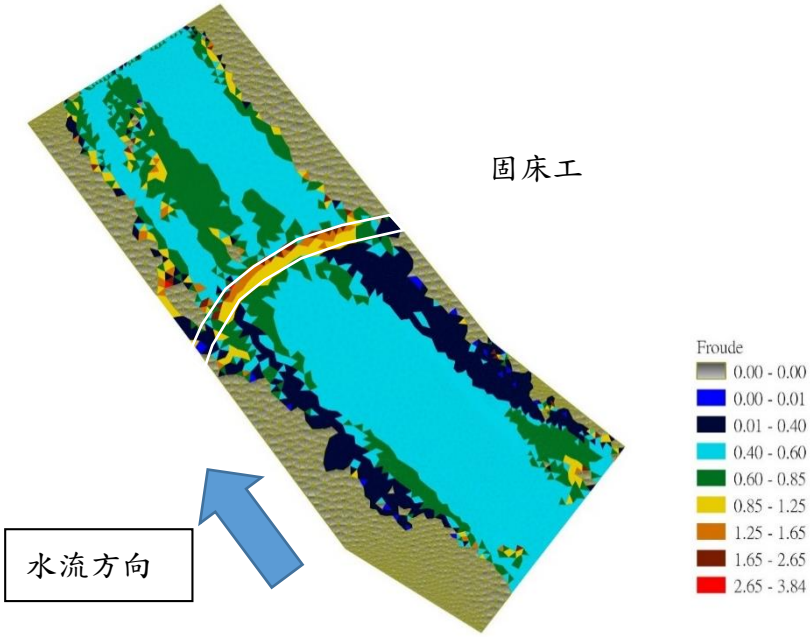


圖 5-58 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之福祿數分布

表 5-4 Riverflow2D 上拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較

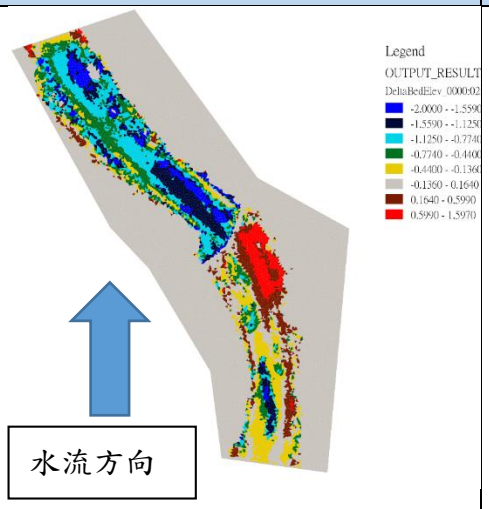
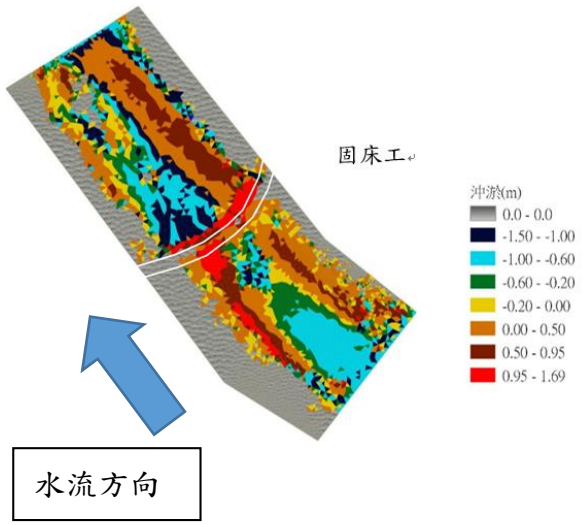
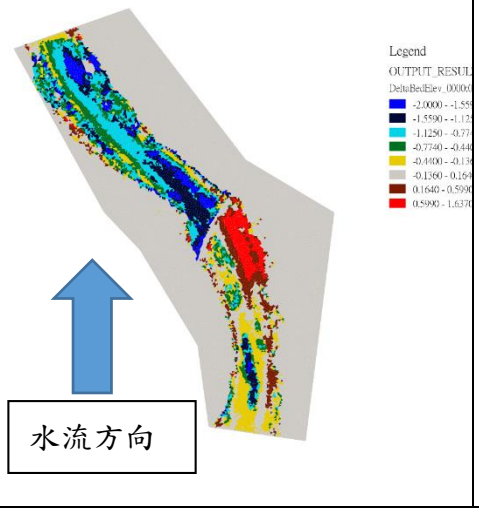
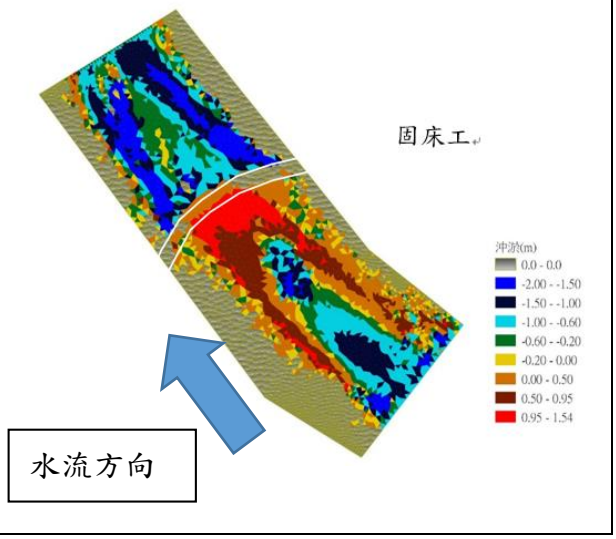
上拱	河道彎曲段	河道直線段
沖淤		
比較	左圖為圖 5-41，右圖為圖 5-51。彎曲段與直線段兩者模擬結果皆顯示固床工上游兩岸處有明顯的淤積，且固床工下游渠道中心皆出現沖刷，彎曲段沖刷深度約在 1.0-2.0 m，直線段沖刷深度約在 1.0-1.5 m。 兩者的沖刷結果不同在於彎曲段之沖刷坑較長，推測亦可能是兩處地形不同的影響造成。	

表 5-5 Riverflow 2D 下拱型固床工彎曲段與直線段沖淤比較

下拱	河道彎曲段	河道直線段
沖淤		

比較	左圖為圖 5-46，右圖為圖 5-56。彎曲線段與直線段模擬結果皆顯示固床工上游皆為淤積，下游皆為沖刷。而直線段的模擬結果清楚看到下拱型固床工下游兩岸處沖刷深度較渠道中心深，兩岸處沖刷深度為 1.5-2.0 m ;渠道中心沖刷深度為 0.6-1.0 m，因此建在設計下拱形固床工時，需特別注意固床工兩岸處的基礎掏刷問題。而在彎曲段固床工下游沖刷同時受到河道彎曲的影響，凸岸處的固床工岸邊沖刷深度較凹岸處小，但仍可看到鄰近固床工下游的沖刷。

第六章 拱型固床工水槽試驗

第一節 試驗規劃佈置

本計畫使用之試驗渠槽位於臺灣大學校總區之水工試驗場，該渠槽為一循環式鋼架試驗渠槽，以步階式馬達系統控制流量，渠槽平面配置圖如圖 6-3，主要配備如圖 6-4~圖 6-6。渠槽相關資料如下：

一、渠槽:包含試驗段、頭水箱、尾水箱和沉砂池等四部分，總長 12m，寬 1m，高 80cm。其中，試驗段泥砂鋪設厚度必須大於可沖刷深度，如圖 6-1、圖 6-2。

二、渠槽設備：包含步階式馬達及其控制面板、離心式泵浦、蜂槽整流箱、尾水控制閘門等。

三、流量：由步進馬達系統控制，經率定後設定最大單寬流量可達 0.025cms/m。



圖 6-1 現場試驗渠槽(1)



圖 6-2 現場試驗渠槽(2)

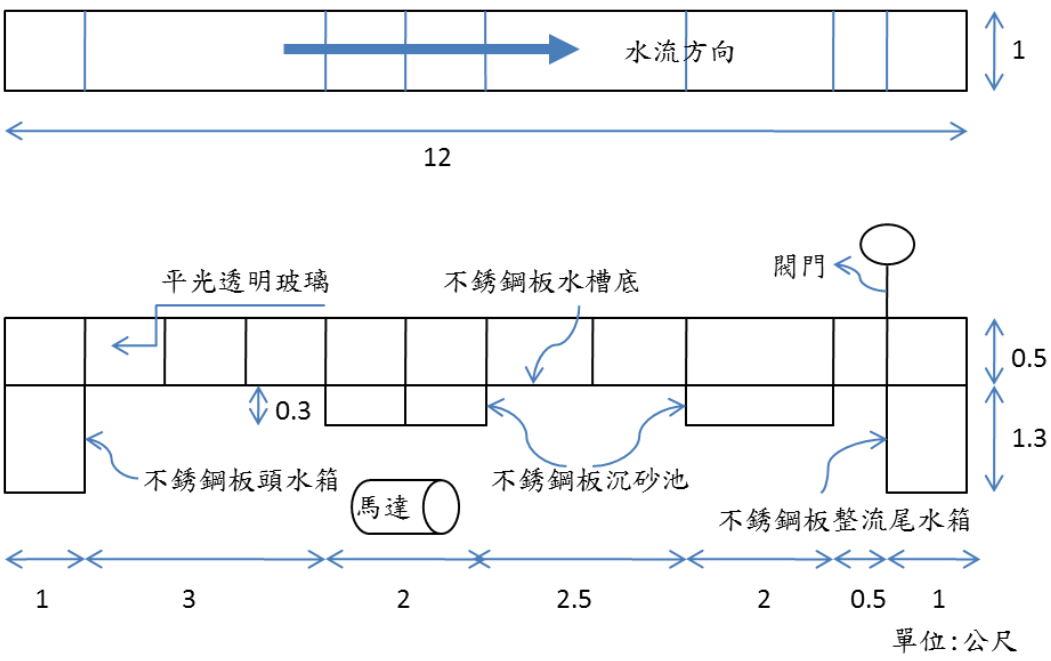


圖 6-3 現場渠槽平面配置圖



圖 6-4 步階式馬達控制機板



圖 6-5 離心式抽水泵浦



圖 6-6 尾水控制閘門

第二節 試驗內容

本團隊分析拱型固床工在水理特性上之差異。其中，拱型固床工將包括四種拱度之上拱、下拱等型式，共計八種形式，每種固床工單次實驗時間為五小時。上拱型固床工將參考新北市八里區水仙溪下游野溪治理工程之設計流量資料及其延伸流量，進行模型試驗。固床工材料則以水泥製作為主。在渠道尾水箱入口處設有尾水控制閘門，本次試驗尾水控制閘門開度保持一致，且本次試驗水深皆未達閘門最小開度，因此未受閘門阻擋水流；試驗過程亦會針對不同之固床工拱度、不同流量所造成之底床沖淤變化進行探討。此外，試驗階段以側視之攝影角度記錄隨時間水流通過固床工所造成的沖刷分布與深度之特性，並進行水理分析，比較拱型固床工的水理特性、沖淤情形之差異。

本團隊之模型試驗將參考水仙溪下游之上拱型固床工(0K+194)來設計，其雨量站採用淡水測站，降雨強度以頻率 50 年進行計算，得到之洪水量為 73.59cms，溝渠排洪斷面設計流量則為 81.75cms，而橫斷面圖如圖 6-7 所示。並進行福祿數相似及沖刷力相似之兩種模型比。

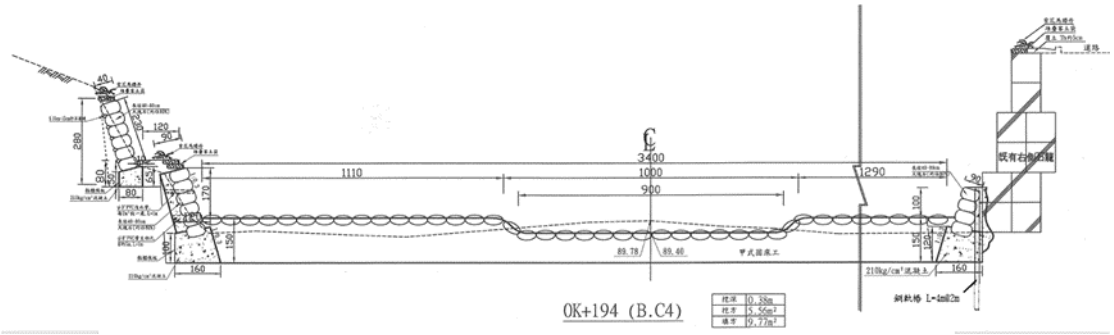


圖 6-7 水仙溪 0k+194 之固床工橫斷面圖

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔

一、福祿數相似原理

(一)長度比尺

$$\frac{L_m}{L_p} = \lambda_L = \frac{1}{34}$$

式中，

L_m為模型長度尺寸；L_p為原型長度尺寸；λ_L為長度比尺。

本團隊渠道試驗的固床工模型尺標準圖如圖 6-11 至圖 6-14 所示。

(二)速度比尺

在動力相似上，模型與原型其對應之受力成比例，本研究考慮『慣性力、重力』的動力相似來探討，也就是福祿數相似之探討，可推求出速度比尺。

$$(F_r)_m = (F_r)_p$$

$$\rightarrow \frac{(V_m)^2}{g_m L_m} = \frac{(V_p)^2}{g_p L_p}$$

$$\rightarrow \frac{(V_m)^2}{(V_p)^2} = \frac{g_m L_m}{g_p L_p}$$

$$\because g_m = g_p$$

$$\rightarrow \lambda_V = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{g_m L_m}}{\sqrt{g_p L_p}} = (\frac{L_m}{L_p})^{1/2} = {\lambda_L}^{1/2} = 0.1715$$

式中，

V_m為模型水流速度；V_p為原型水流速度；

g_m為模型重力加速度；g_p為原型重力加速度；

λ_V為速度比尺。

(三)流量比尺

流量 Q 與水之密度ρ、流速 V 及長度 L 有關，利用柏金漢 (Buckingham) 之 π 定理作因次分析，則可將流量無因次化為：

$$\pi = \frac{Q}{VL^2}$$

$$\rightarrow \lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{V_m {L_m}^2}{V_p {L_p}^2} = \lambda_V \cdot (\lambda_L)^2 = 0.00014836$$

故 $Q_m = 0.00014836 \times 73.59 = 0.010918$ cms

式中，

Q_m為模型流量，Q_p為原型流量，λ_Q為流量比尺。

由圖 3-16 可知率定曲線為$Q = 0.000553X - 0.002105$

式中，

Q 為流量(cms)；X 為赫茲(Hz)。

$$0.010918 = 0.0006X - 0.0025$$

$$\rightarrow X = 23.55$$

因此可求得水槽之頻率約調為 23.55Hz，即能和原型之福祿數相似。

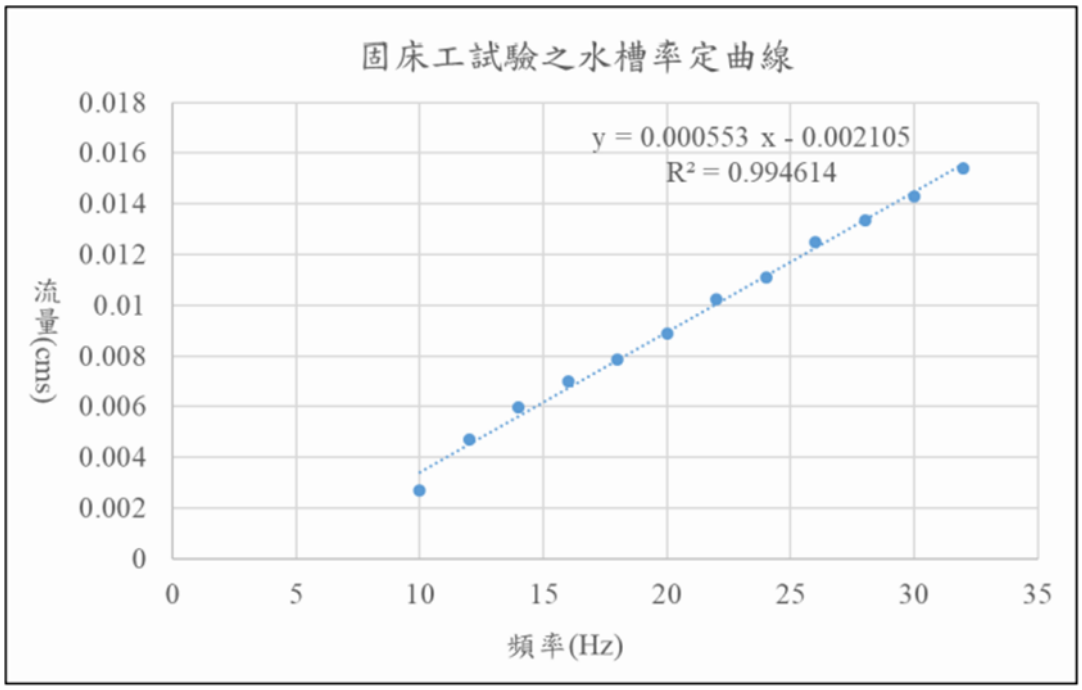


圖 6-8 固床工試驗之水槽率定曲線

因此本團隊以流量為 20Hz 之頻率為基礎，並同時使用流量為 16Hz、12Hz、8Hz 等共 4 種流量進行實驗，實驗流量由小而大分別是 0.0023cms(0.12 頻率年)、0.0045cms(0.55 頻率年)、0.0067cms(2.62 頻率年)、0.0090cms(12.51 頻率年)。探討在不同流量、不同固床工拱度時，所造成之底床沖淤情形。透過水槽與模型試驗，以供後續工程設計之依據，提升野溪治理效益。實驗水槽之俯視圖及側視配置圖如表 6-2。

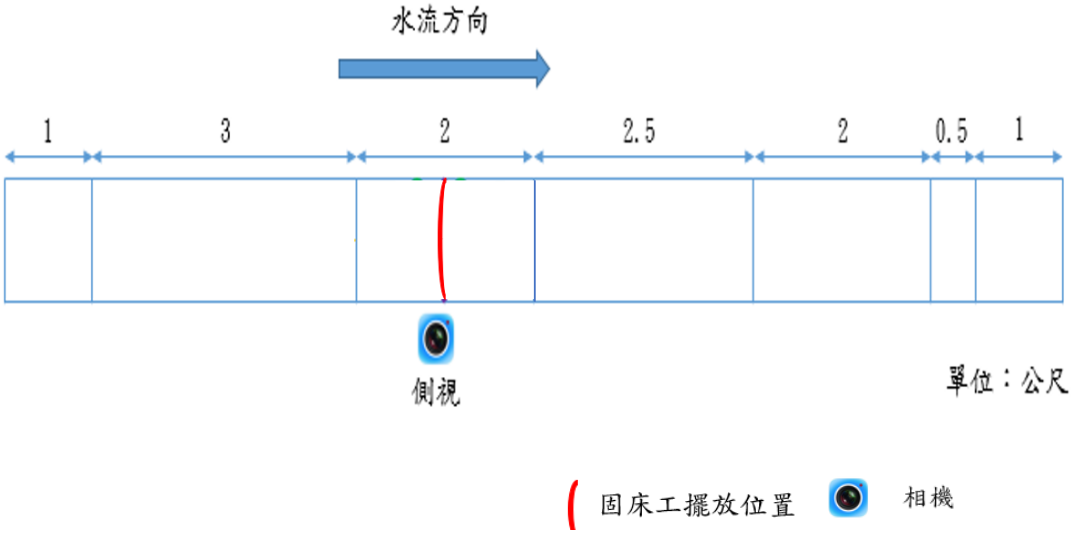


圖 6-9 固床工之水槽與模型試驗之俯視配置圖

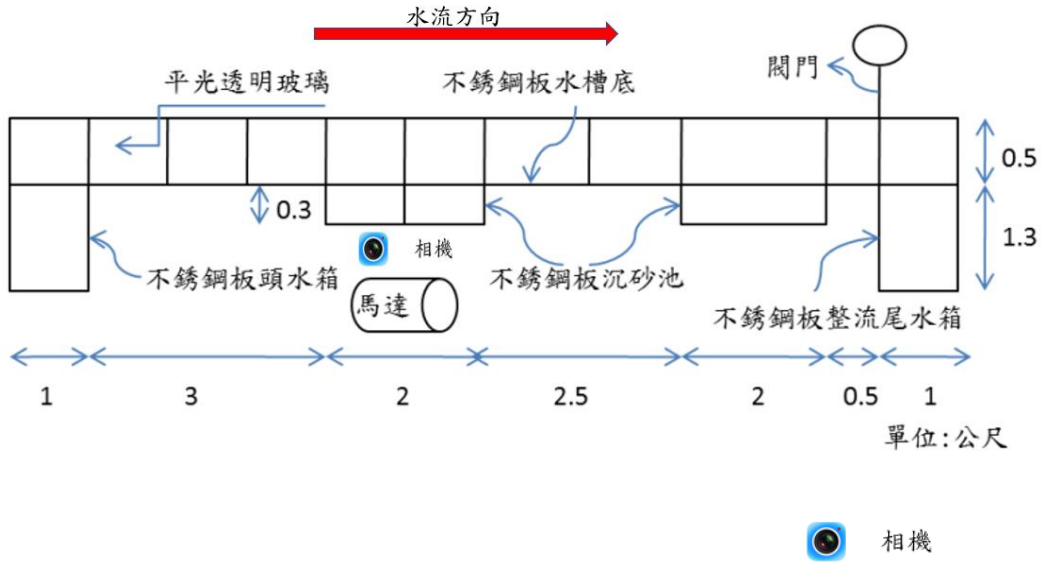


圖 6-10 固床工之水槽與模型試驗之側視配置圖

二、試驗條件統整與數據量測位置

本團隊以上、下拱型與四種拱度，共 8 種固床工形式與 4 種大小之流量，共計 32 組試驗，以固床工下游沖淤情形討論。而固

床工拱度由現地固床工拱形弧長 34.6513m、35.4552m、36.5625m、37.9574m 透過福祿數相似理論中的長度比尺得到固床工模型弧度分別為 1.0192m、1.0428m、1.0754m、1.1164m，表 6-1 為試驗條件總整理。圖 6-11~圖 6-14 為不同尺寸固床工模型示意圖、圖 6-15、6-16 為固床工下游量測水深五處位置標示，以及固床工上游應力量測位置標示。

表 6-1 試驗條件總整理

固床工型式	上拱型、弧長 1.0192 公尺 上拱型、弧長 1.0428 公尺 上拱型、弧長 1.0754 公尺 上拱型、弧長 1.1164 公尺 下拱型、弧長 1.0192 公尺 下拱型、弧長 1.0428 公尺 下拱型、弧長 1.0754 公尺 下拱型、弧長 1.1164 公尺
流量	(1) 0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年) (2) 0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年) (3) 0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年) (4) 0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)

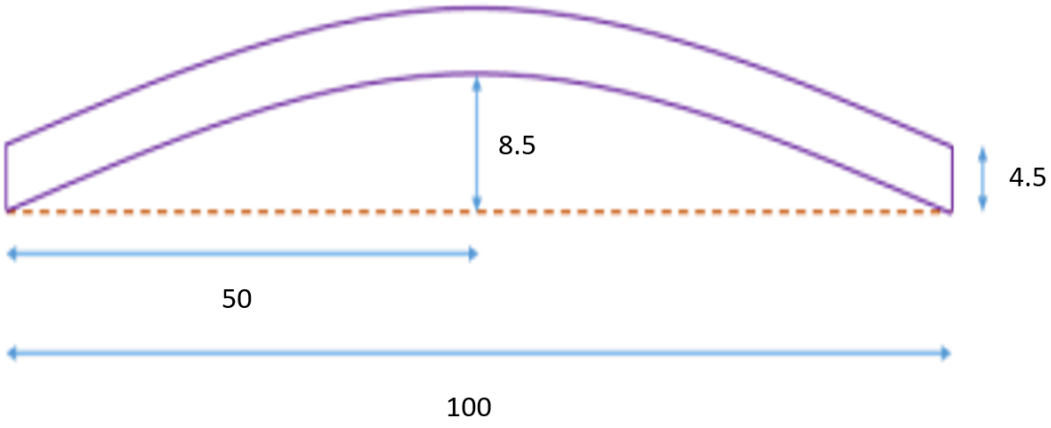


圖 6-11 弧長 1.0192 公尺固床工模型

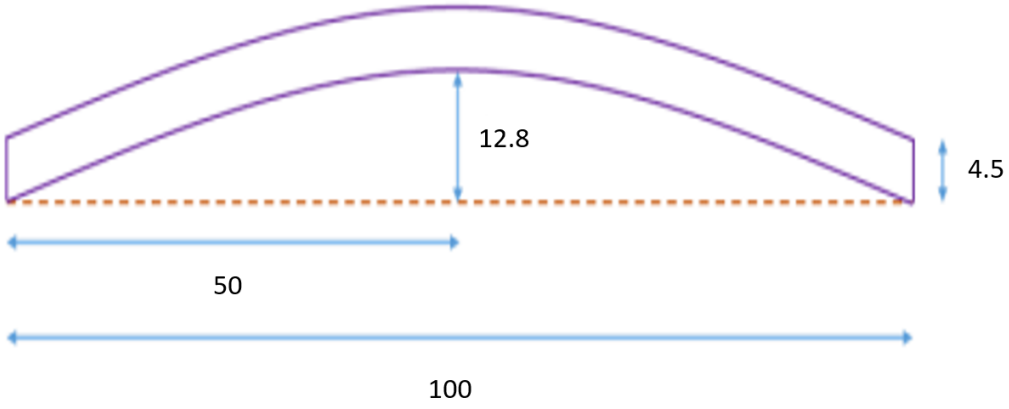


圖 6-12 弧長 1.0428 公尺固床工模型

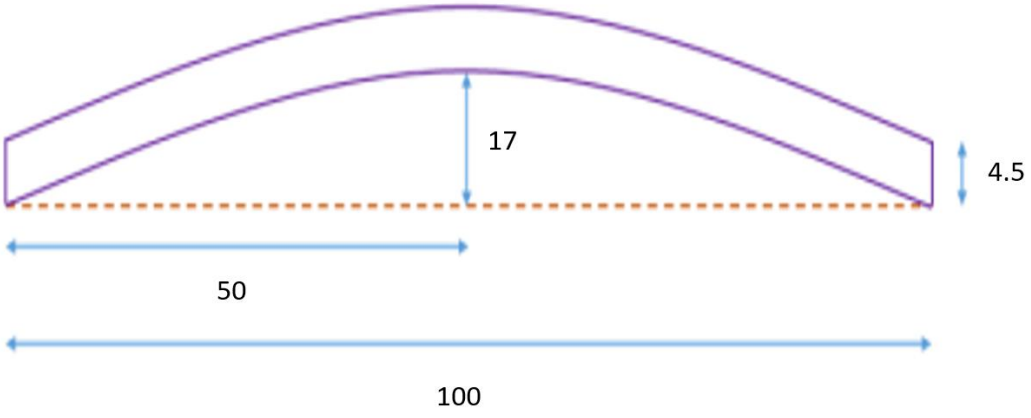


圖 6-13 弧長 1.0754 公尺固床工模型

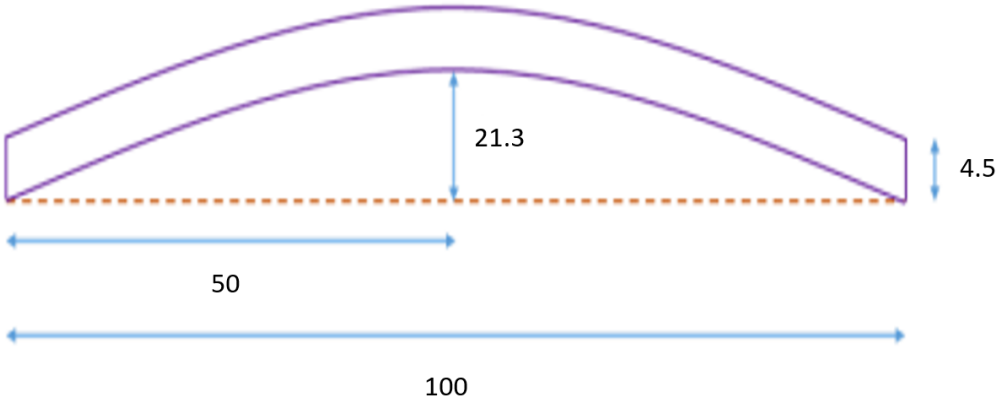


圖 6-14 弧長 1.1164 公尺固床工模型

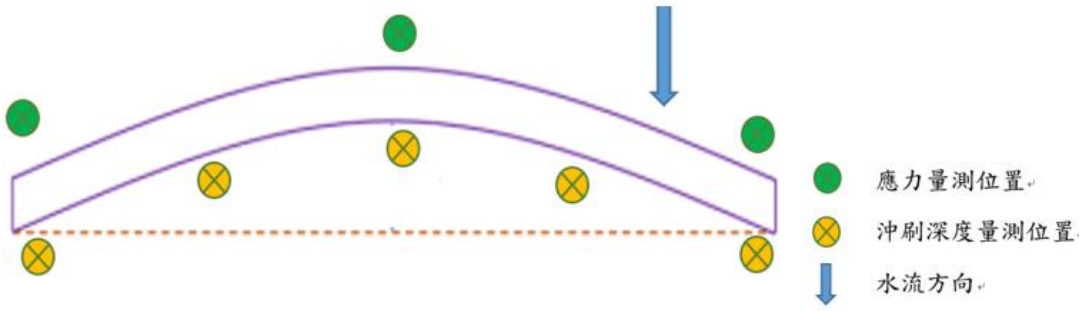


圖 6-15 上拱型應力量測位置與沖刷深度量測位置

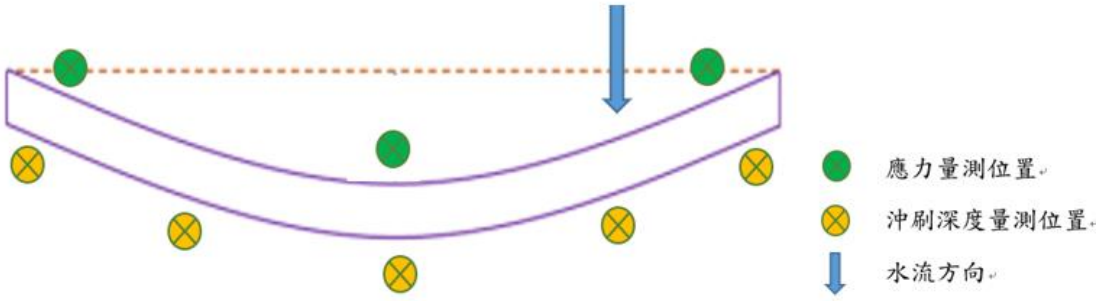


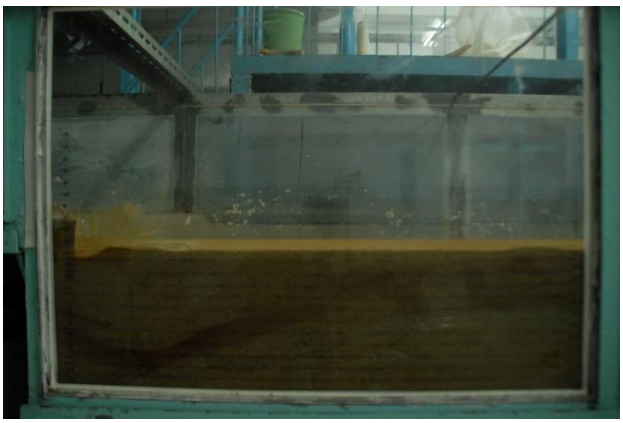
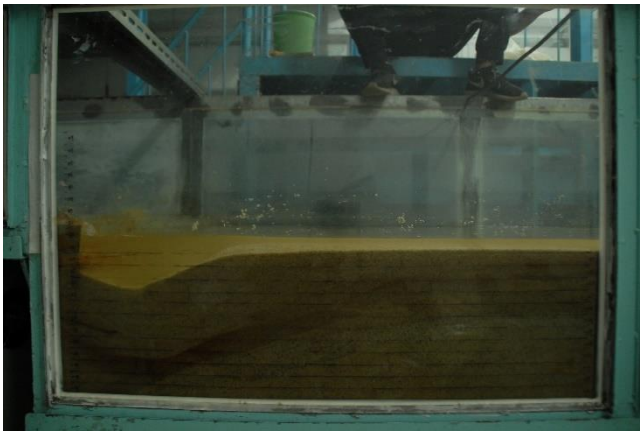
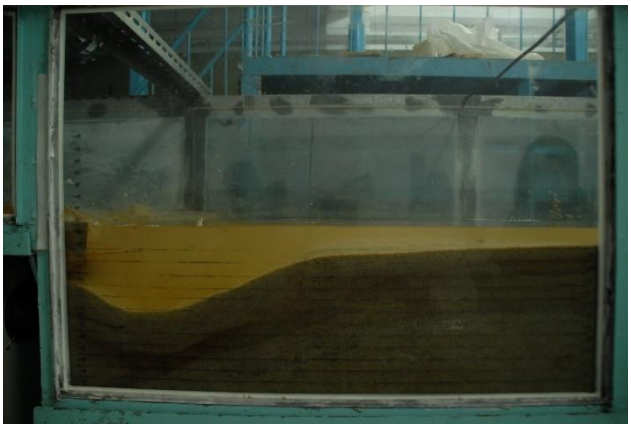
圖 6-16 下拱型應力量測位置與沖刷深度量測位置

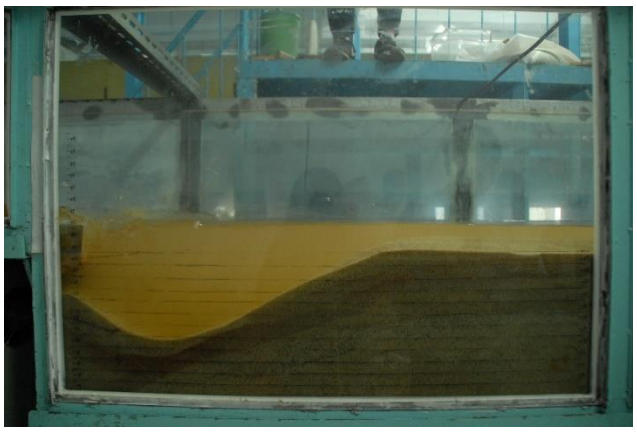
第三節 水槽與模型試驗之結果與討論

本團隊規劃下拱型及對稱型進行水槽試驗，而模型試驗則以水仙溪的上拱型固床工(0k+194)作為試驗之參考，部分沖刷坑實驗結果照

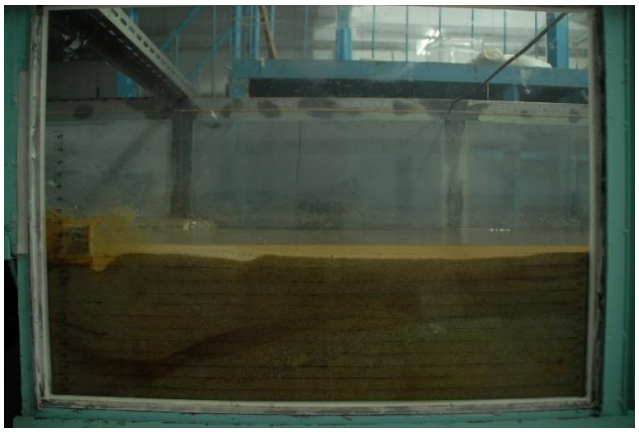
片見表 6-2。

表 6-2 沖刷坑實驗結果照片

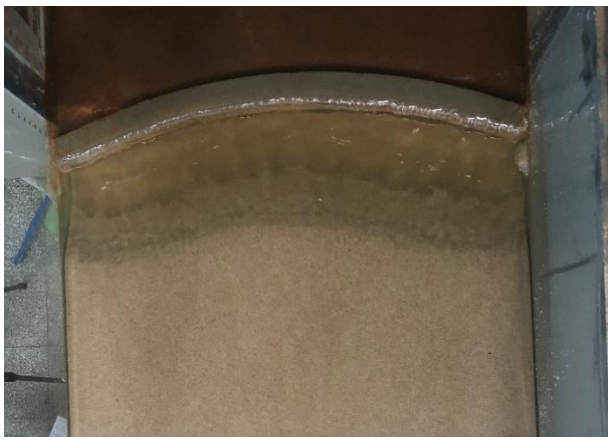
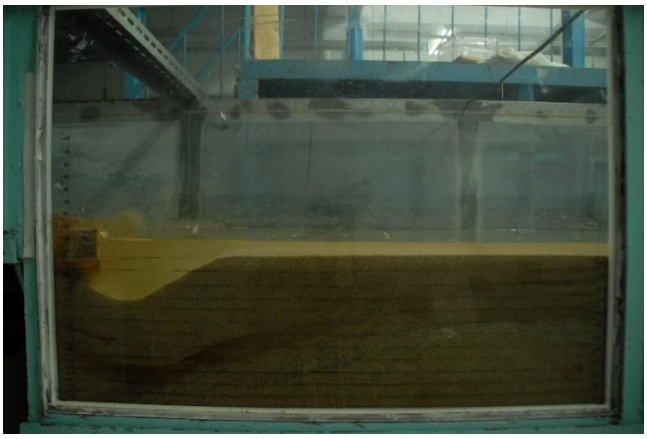
上拱型、弧長 1.0192 公尺、0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年)
 
上拱型、弧長 1.0192 公尺、0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年)
 
上拱型、弧長 1.0192 公尺、0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年)
 
上拱型、弧長 1.0192 公尺、0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)

上拱型、弧長 1.0428 公尺、0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年)

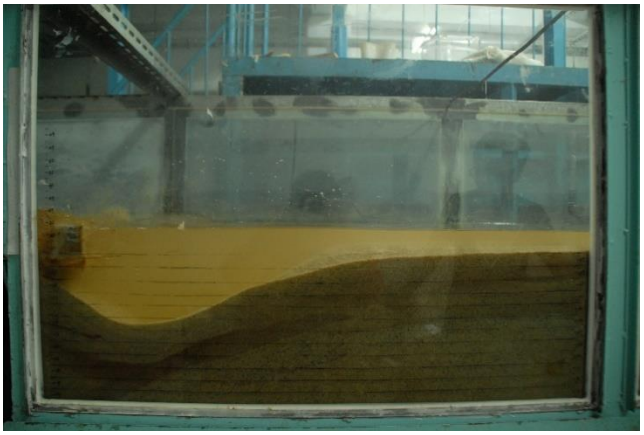



上拱型、弧長 1.0428 公尺、0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年)

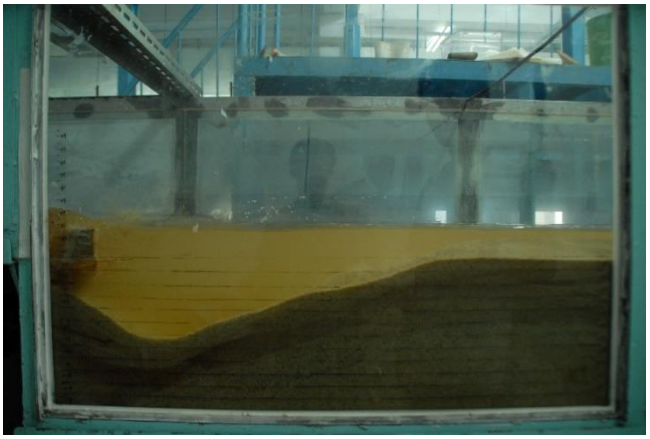
上拱型、弧長 1.0428 公尺、0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年)





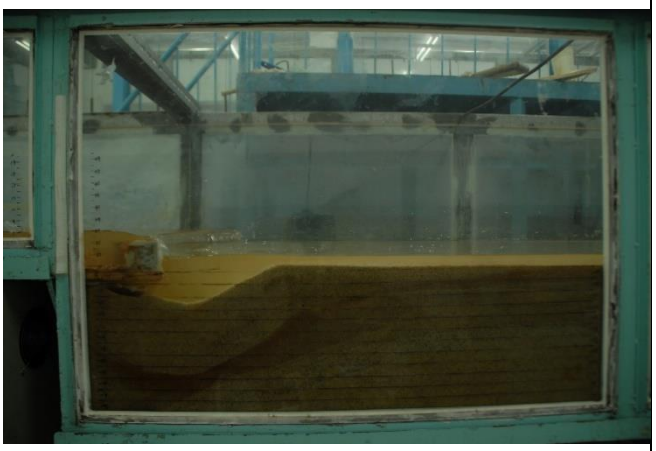
上拱型、弧長 1.0428 公尺、0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)





上拱型、弧長 1.0754 公尺、0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年)

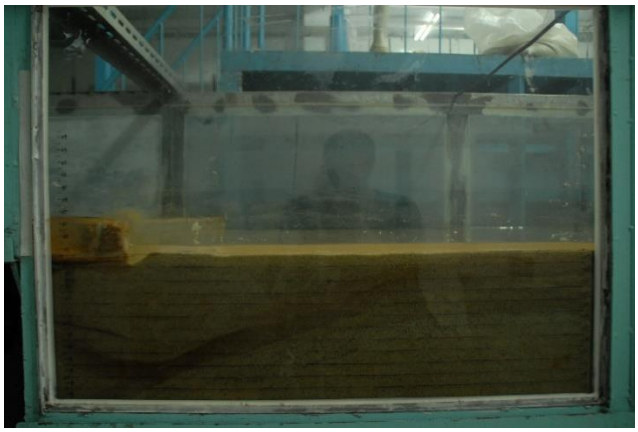




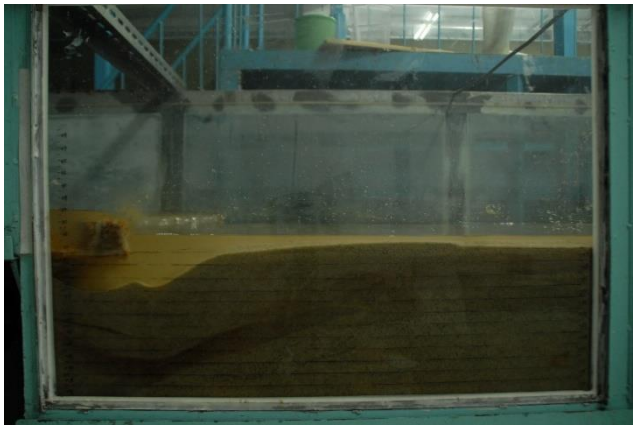
上拱型、弧長 1.0754 公尺、0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年)




上拱型、弧長 1.1164 公尺、0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年)

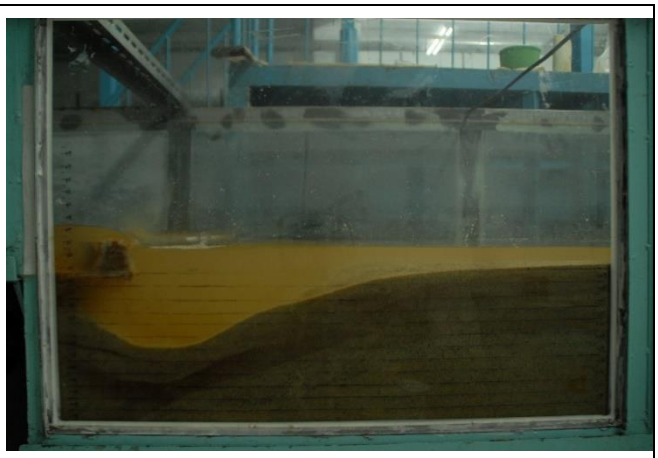



上拱型、弧長 1.1164 公尺、0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年)

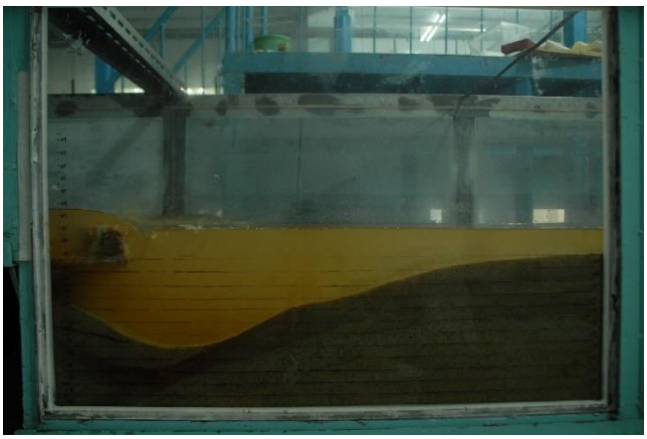
上拱型、弧長 1.1164 公尺、0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年)





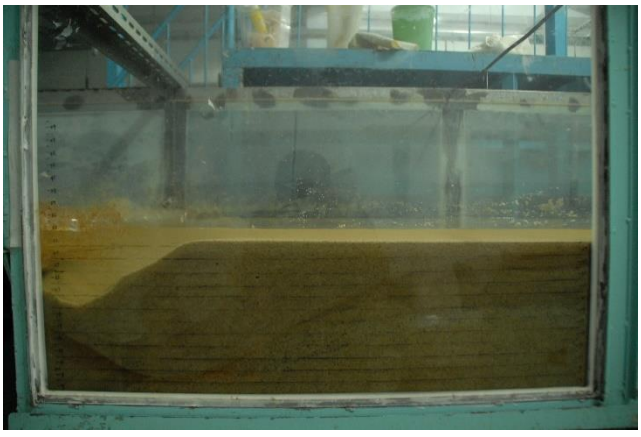
上拱型、弧長 1.1164 公尺、0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)



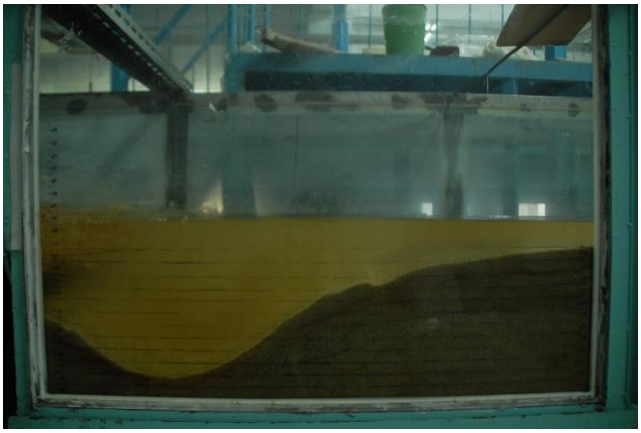


下拱型、弧長 1.0192 公尺、0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年)

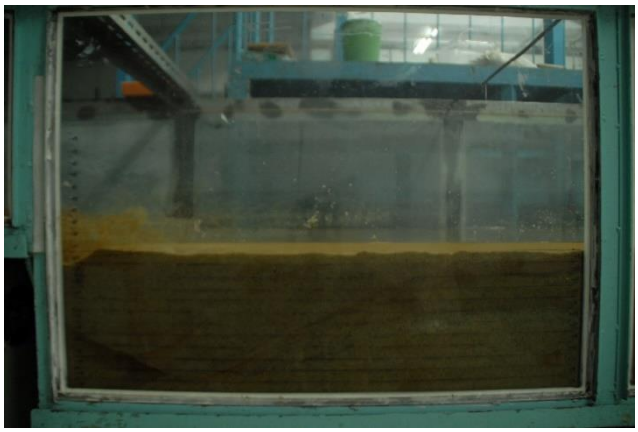




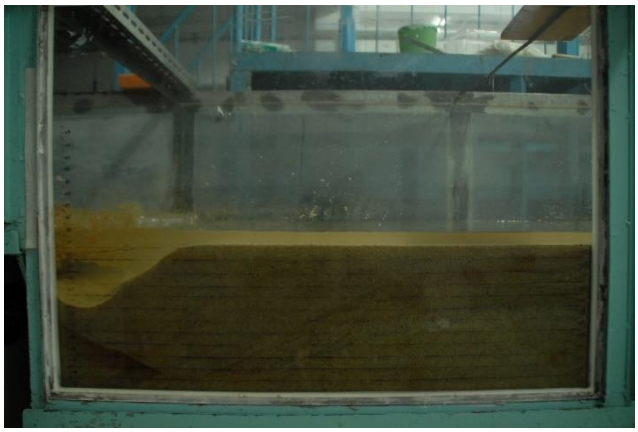
下拱型、弧長 1.0192 公尺、0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)

下拱型、弧長 1.0192 公尺、0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年)

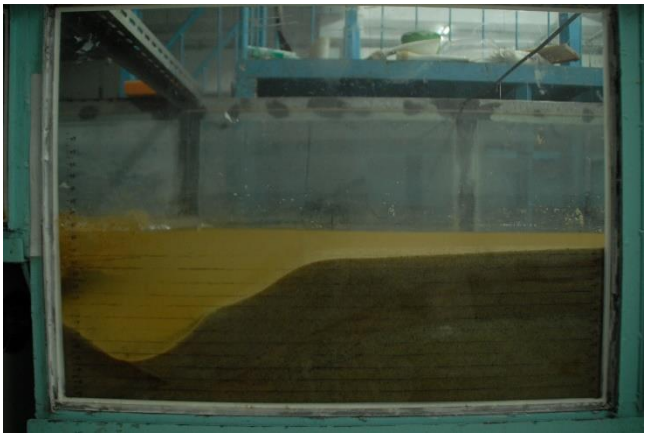



下拱型、弧長 1.0428 公尺、0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年)

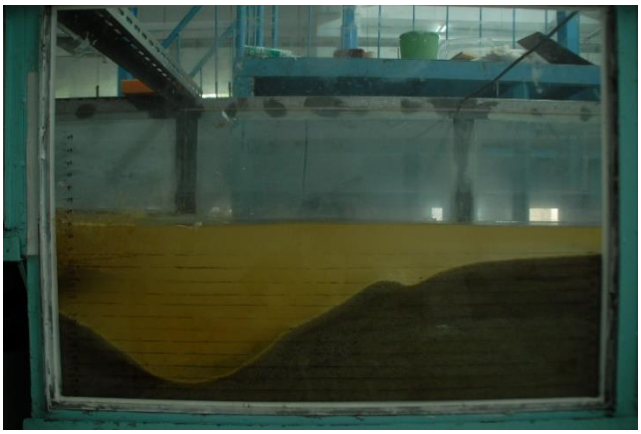
下拱型、弧長 1.0428 公尺、0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年)





下拱型、弧長 1.0428 公尺、0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)



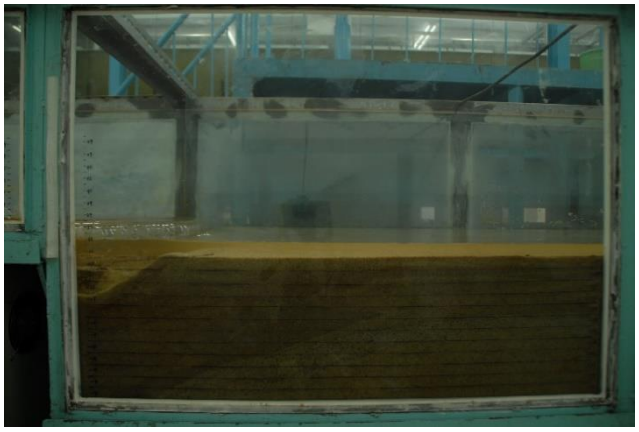


下拱型、弧長 1.0754 公尺、0.002319cms(8Hz) (0.12 頻率年)





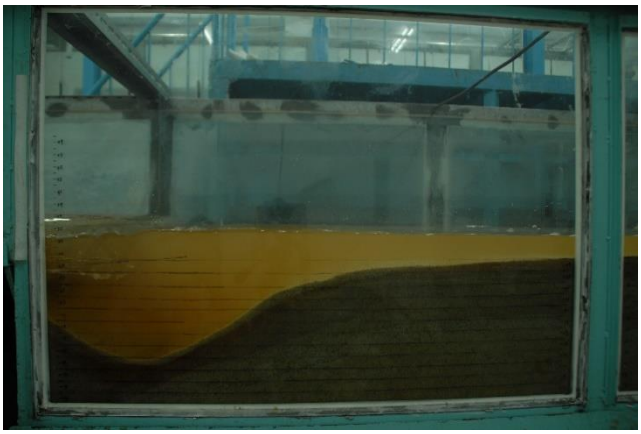
下拱型、弧長 1.0754 公尺、0.004531cms(12Hz) (0.55 頻率年)

下拱型、弧長 1.0754 公尺、0.006743cms(16Hz) (2.62 頻率年)




下拱型、弧長 1.0754 公尺、0.008955cms(20Hz) (12.51 頻率年)

本團隊探討其中水理特性及沖淤情形之變化，其分析依水深、沖刷深度以及水流沖擊力等三點水理機制為主要探討項目，並提供未來工程設計之依據。其結果討論如下：

一、水深

水深乃受到總水頭的影響而有所變化，本研究渠道實驗使用直尺量測在沖刷坑尾部之水深。



圖 6-17 直尺

經由數據結果顯示，不管固床工拱度為何，流量與水深呈正相關，及當流量越大時，沖刷坑尾部水深越深。這表示固床工拱度不同並不會對沖刷坑尾部水深造成太大差異，如圖 6-18。

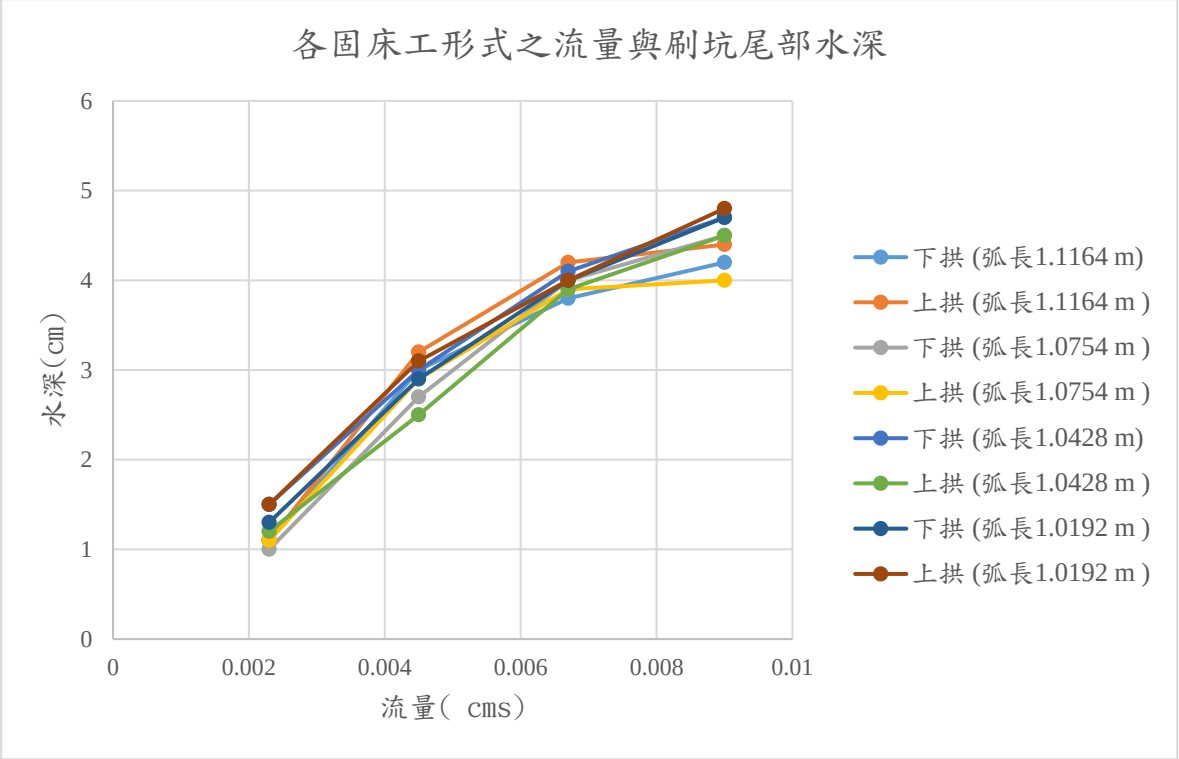


圖 6-18 各固床工形式之流量與刷坑尾部水深

二、沖刷深度

沖刷坑大小乃受流量、跌水高度、粒徑大小、尾水深度、時間及固床工型式等因子影響，而所造成之沖刷深度以直尺進行測量，探討固床工下游之底床之沖刷情形。

三、上、下拱型之沖刷深度討論

圖 6-19 至圖 6-26 為上、下拱型固床工在不同流量下，固床工下游不同橫斷面位置的沖刷深度。比較上、下拱型固床工的圖表，可看出上拱型固床工之渠道中心沖刷坑深度大於渠道兩側沖刷坑深度，且當固床工拱度越高時，差異更加顯著。

而本次實驗結果顯示，下拱型固床工之兩側沖刷坑深度無顯著較渠道中心深。

四、拱度高之沖刷深度討論

由圖 6-19 至圖 6-26 可發現，上拱型固床工拱度越高，固床工下游渠道中心處之沖刷越深，渠道兩側之沖刷反而較拱度低的固床工沖刷的深度淺。這可以表示當上拱型固床工拱度愈大，其水流的能量越趨集中於渠道中心。此外，這個現象在小流量時較顯著，當流量大時，拱度增加並不會造成沖刷更集中於渠道中心。

而在本次實驗中，上拱型固床工在拱度不同的狀況下所產生的沖刷深度分布則無顯著特徵。

五、流量變化之沖刷深度討論

當流量變大時，下拱形固床工兩側沖刷較深的趨勢才逐漸顯現。另外，由圖 6-27 可知，在流量較小時，無論是上拱型或下拱型固床工，流量與渠道中央、兩側之沖刷深度幾乎呈線性關係;流量增加至一定程度後，沖刷深度的增加減緩，流量與渠道中央、兩側之沖刷深度成非線性關係。

由圖 6-37 與圖 6-38 可得知，不論上、下拱形固床工，流量越大時，沖刷坑長度越長。

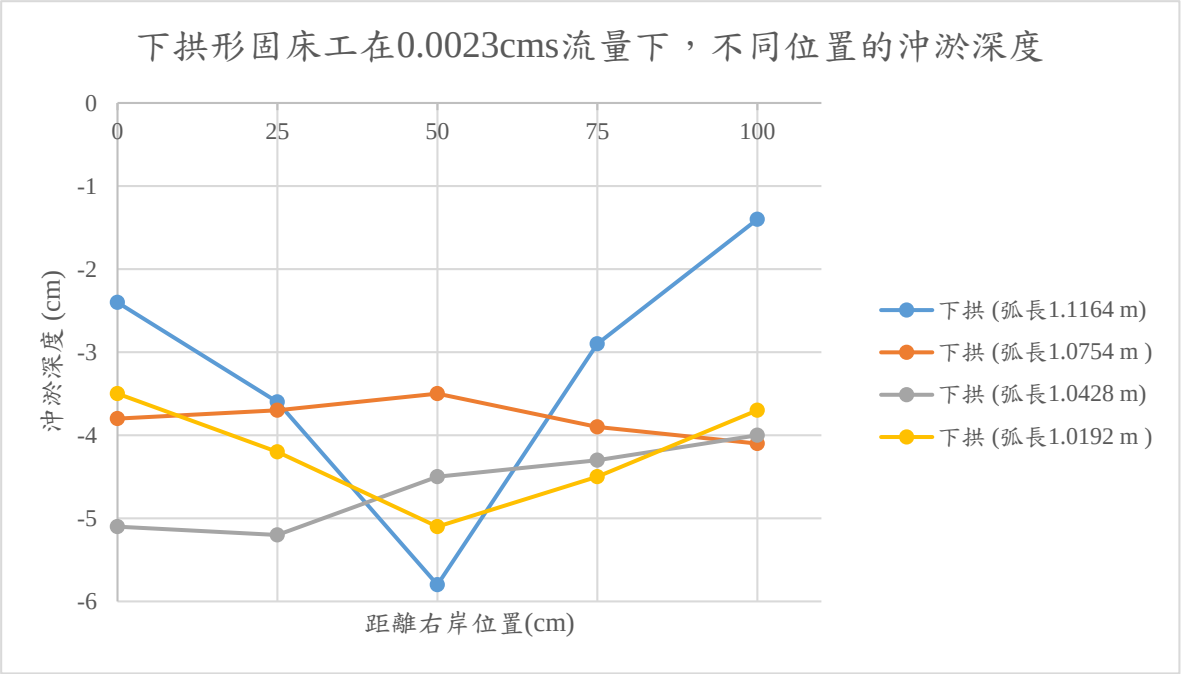


圖 6-19 相同流量下下拱形固床工不同拱度沖淤深度

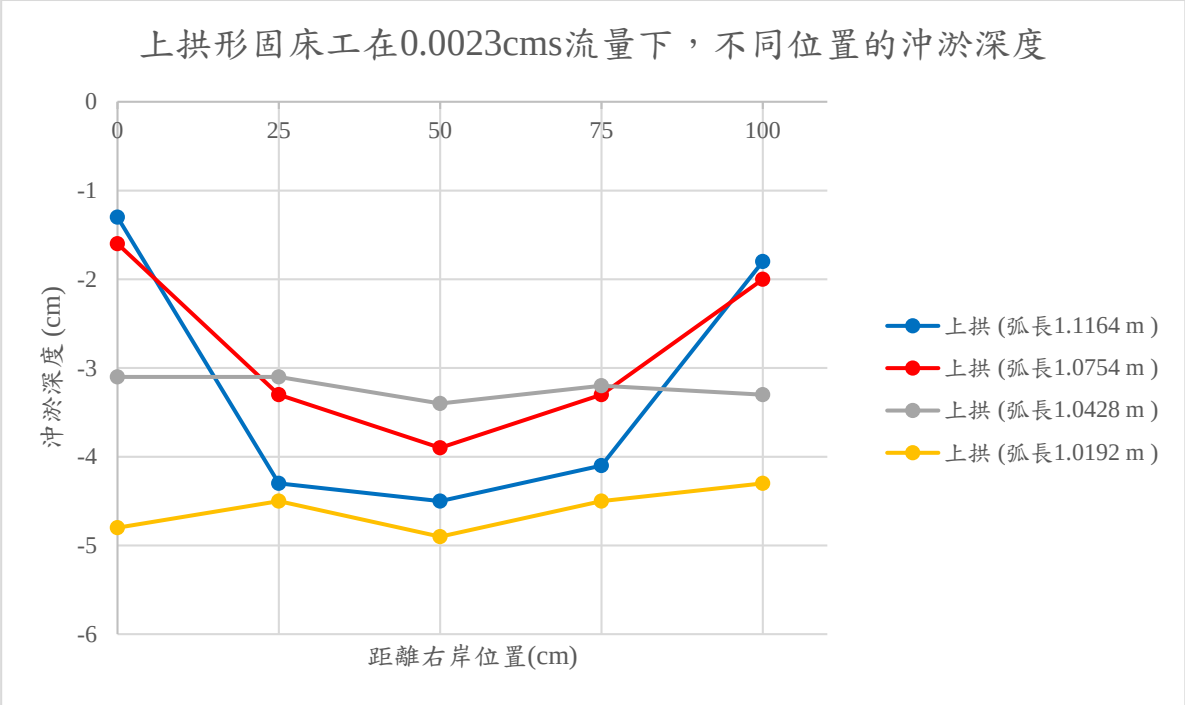


圖 6-20 相同流量下上拱形固床工不同拱度沖淤深度

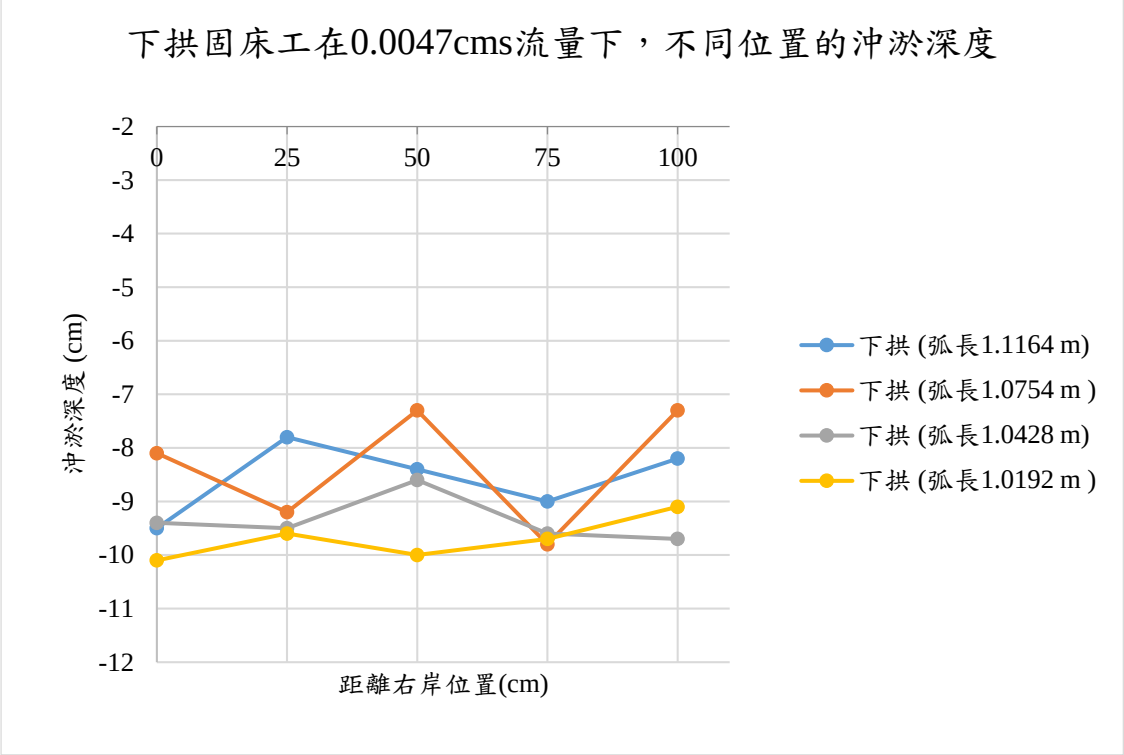


圖 6-21 下拱固床工在 0.0047cms 流量下不同位置的沖淤深度

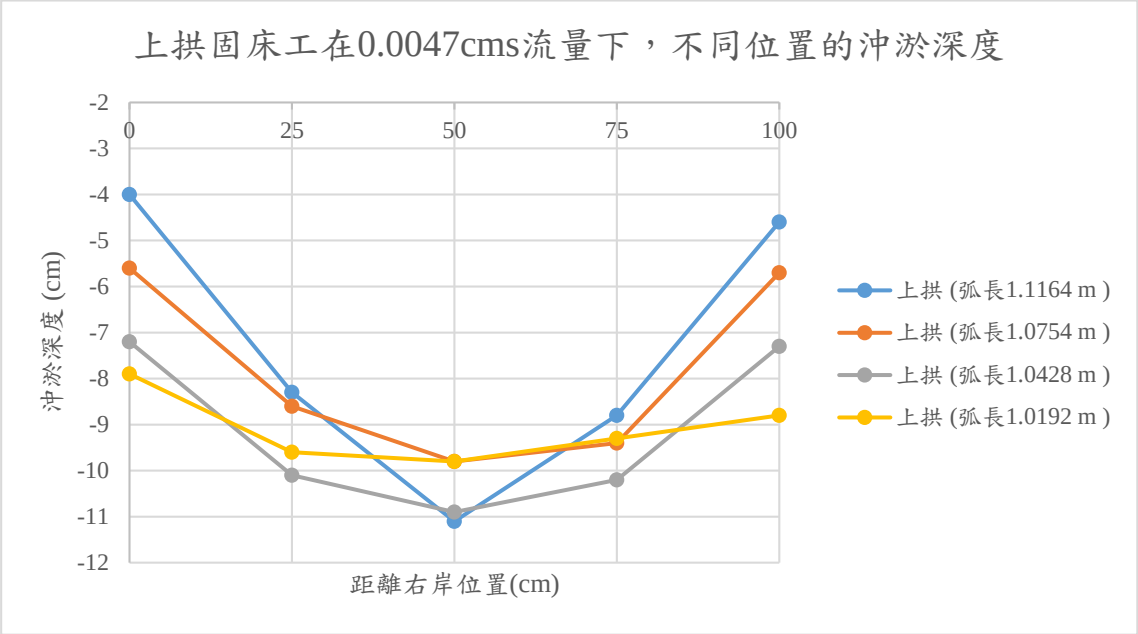
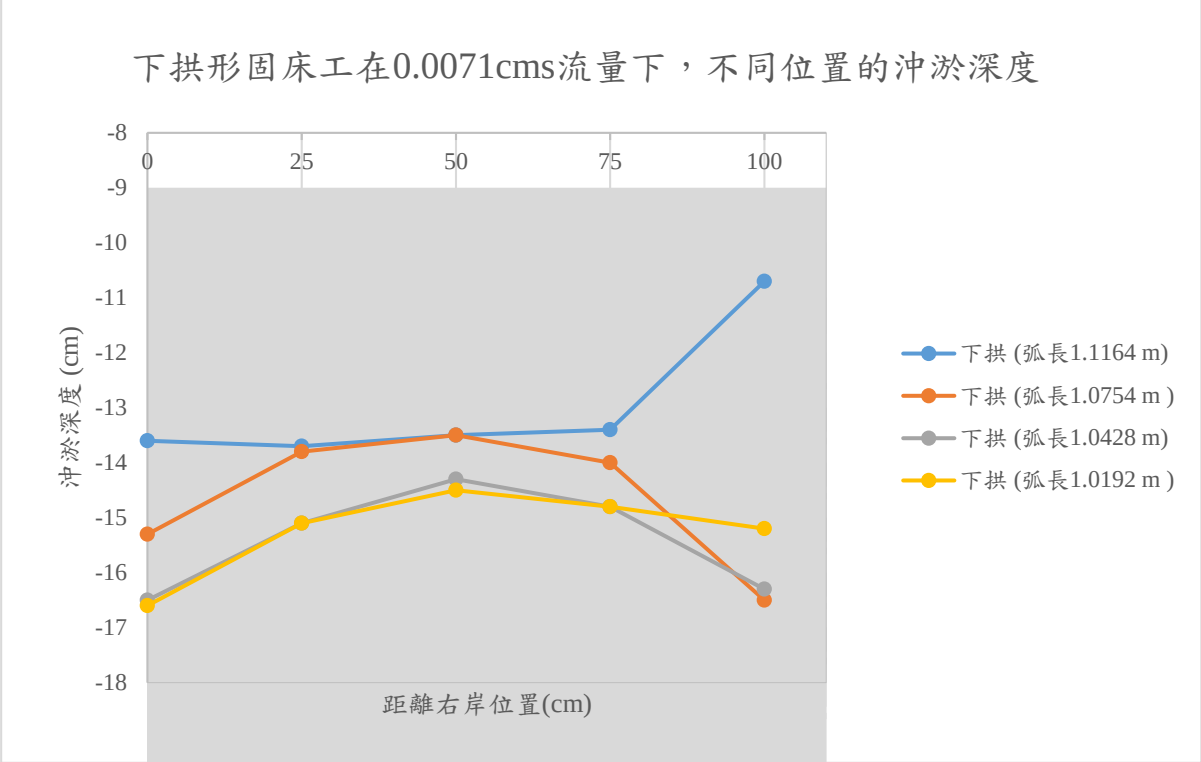


圖 6-22 上拱固床工在 0.0047cms 流量下，不同位置的沖淤深度



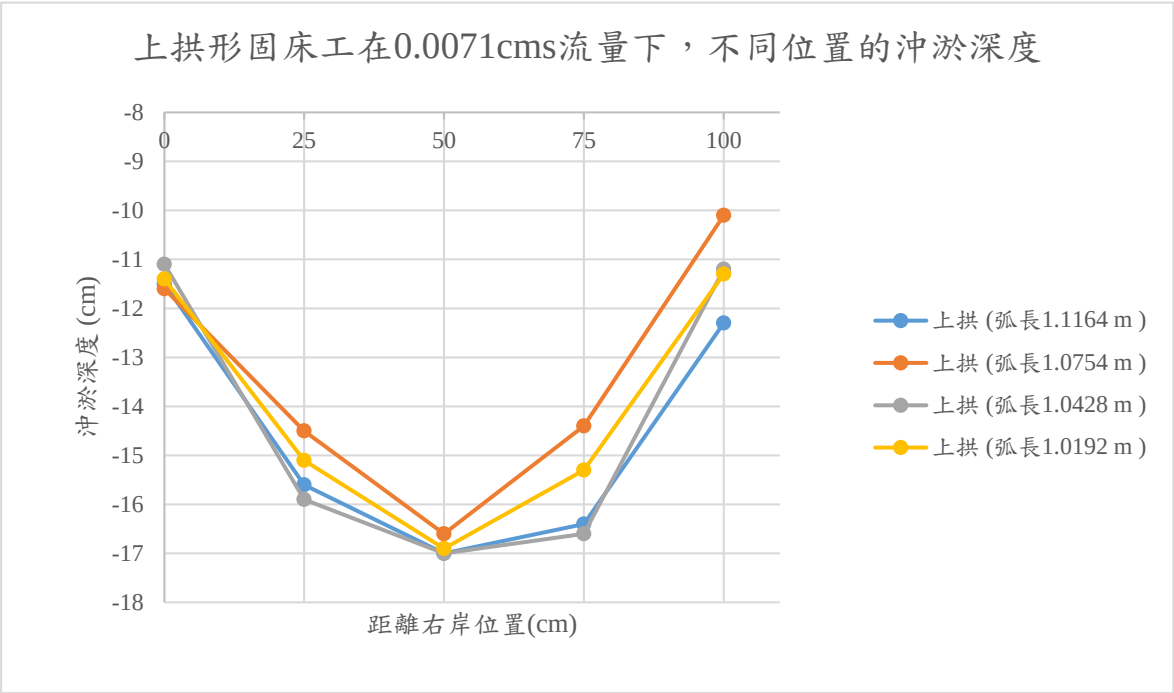


圖 6-24 上拱形固床工在 0.0071cms 流量下，不同位置的沖淤深度

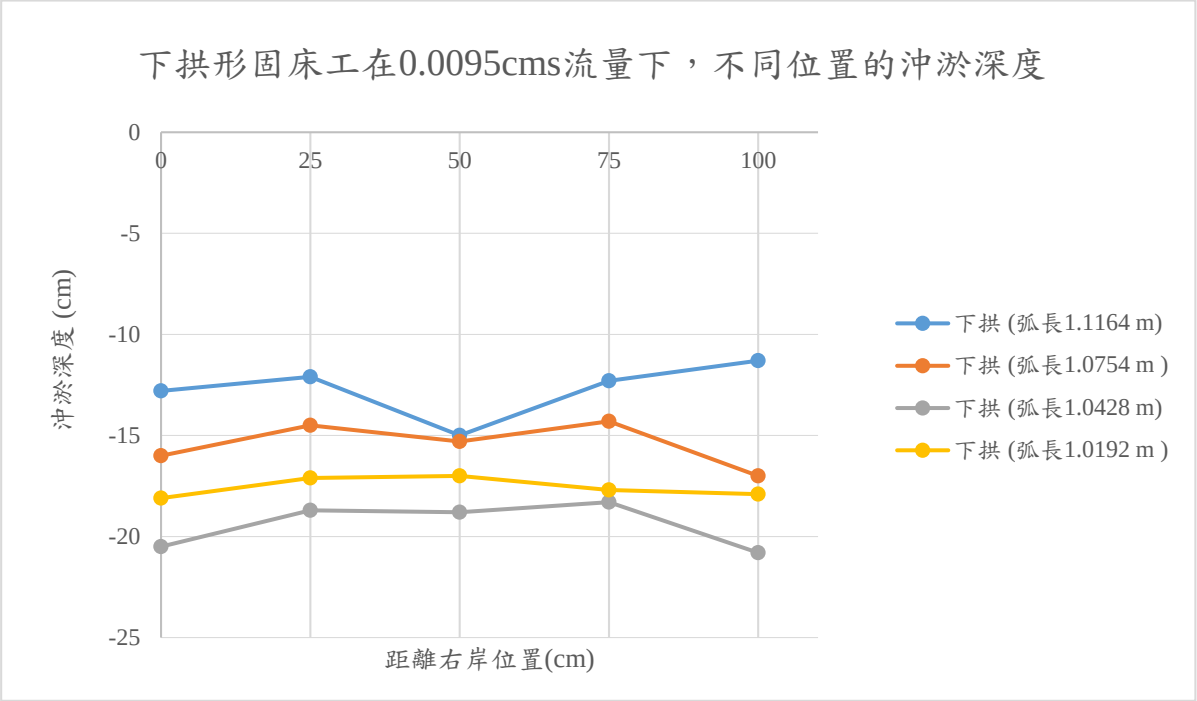


圖 6-25 下拱形固床工在 0.0095cms 流量下，不同位置的沖淤深度

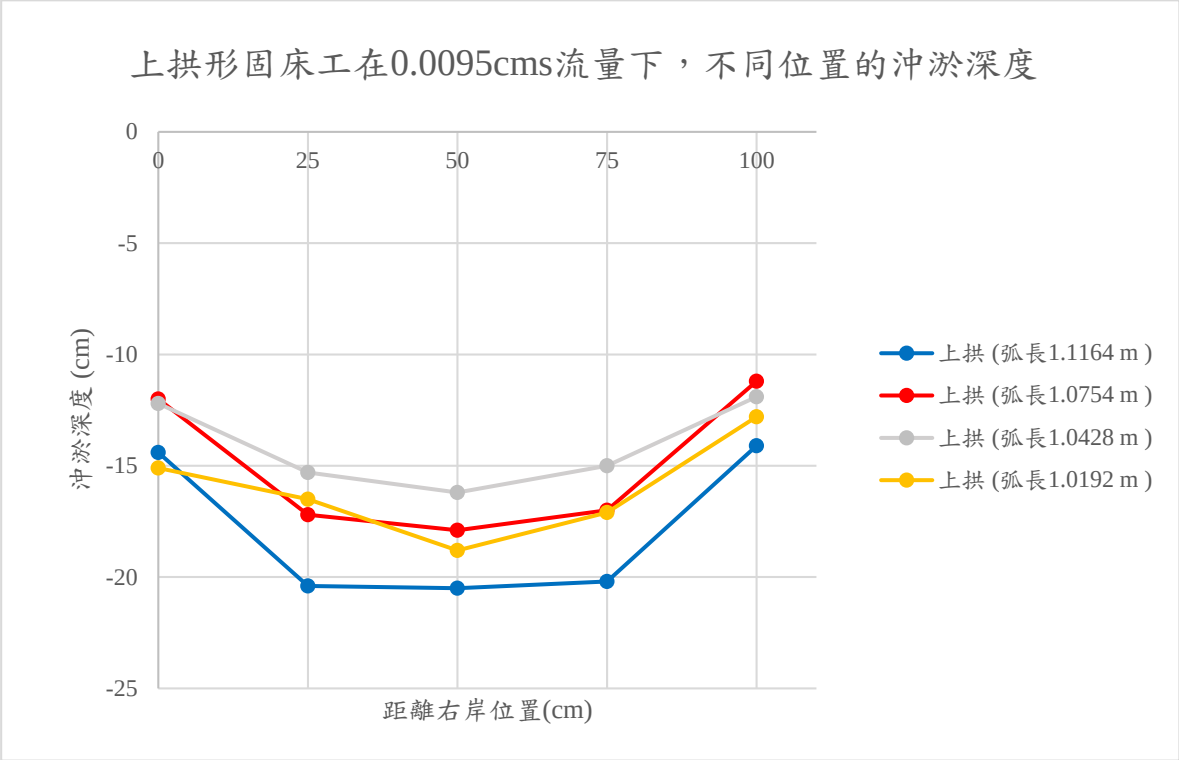


圖 6-26 上拱形固床工在 0.0095cms 流量下，不同位置的沖淤深度

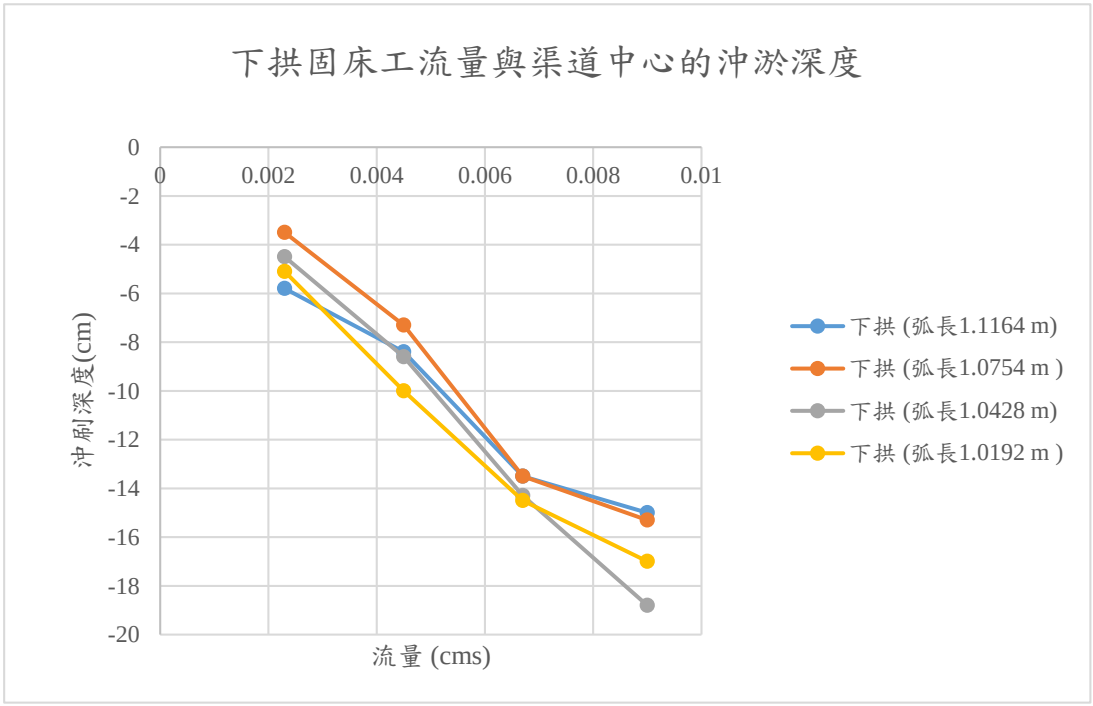


圖 6-27 下拱固床工流量與渠道中心的沖淤深度

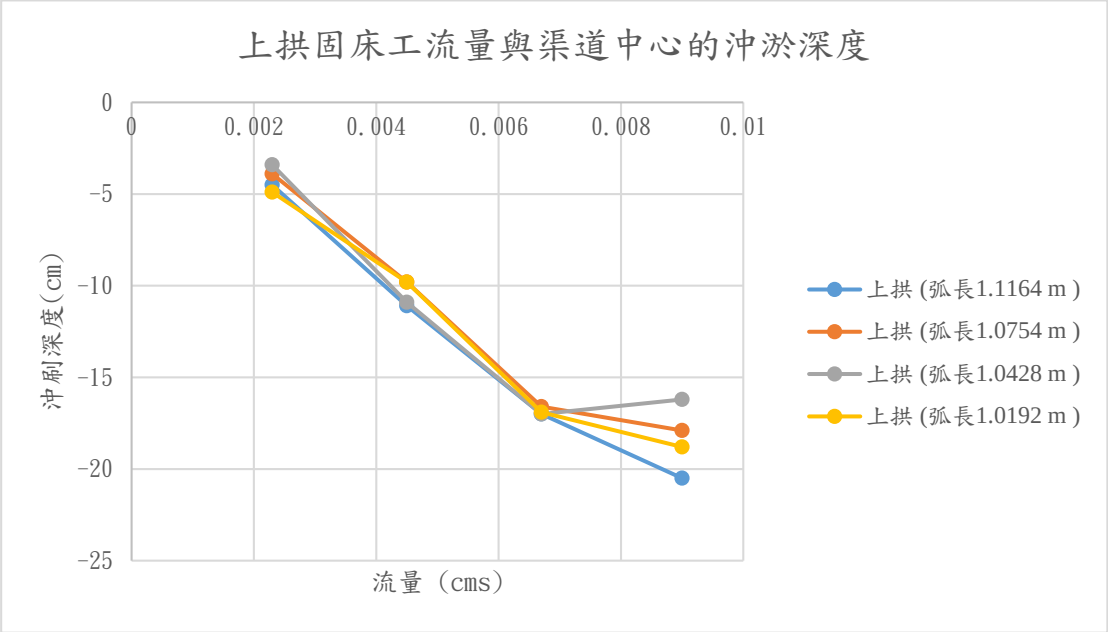


圖 6-28 上拱固床工流量與渠道中心的沖淤深度

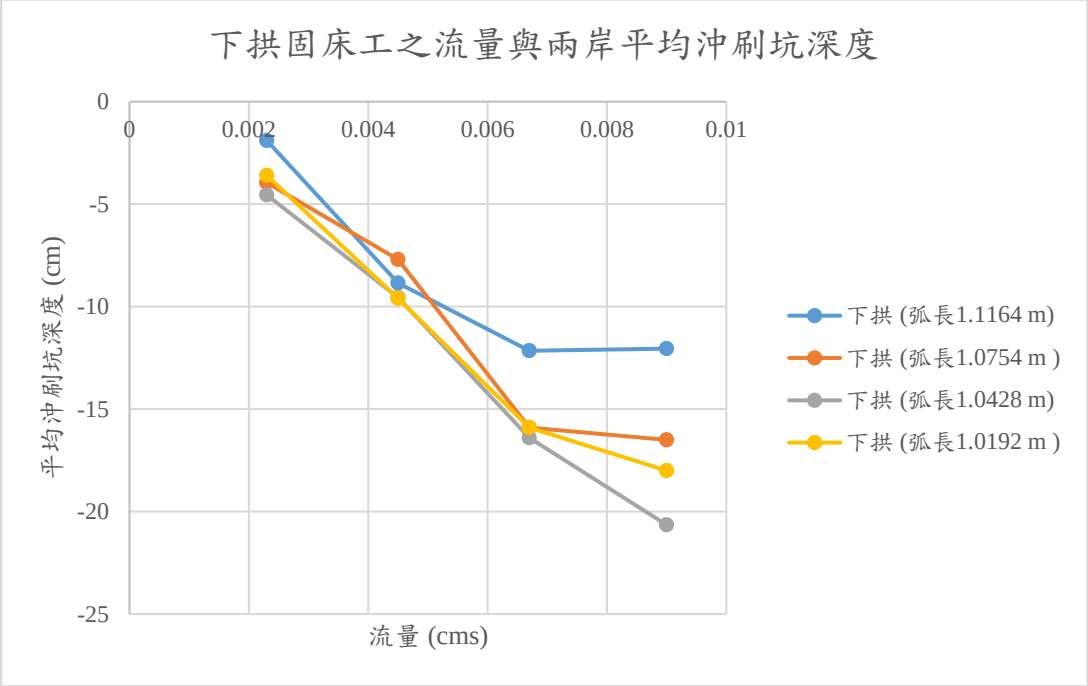


圖 6-29 下拱固床工之流量與兩岸平均沖刷坑深度

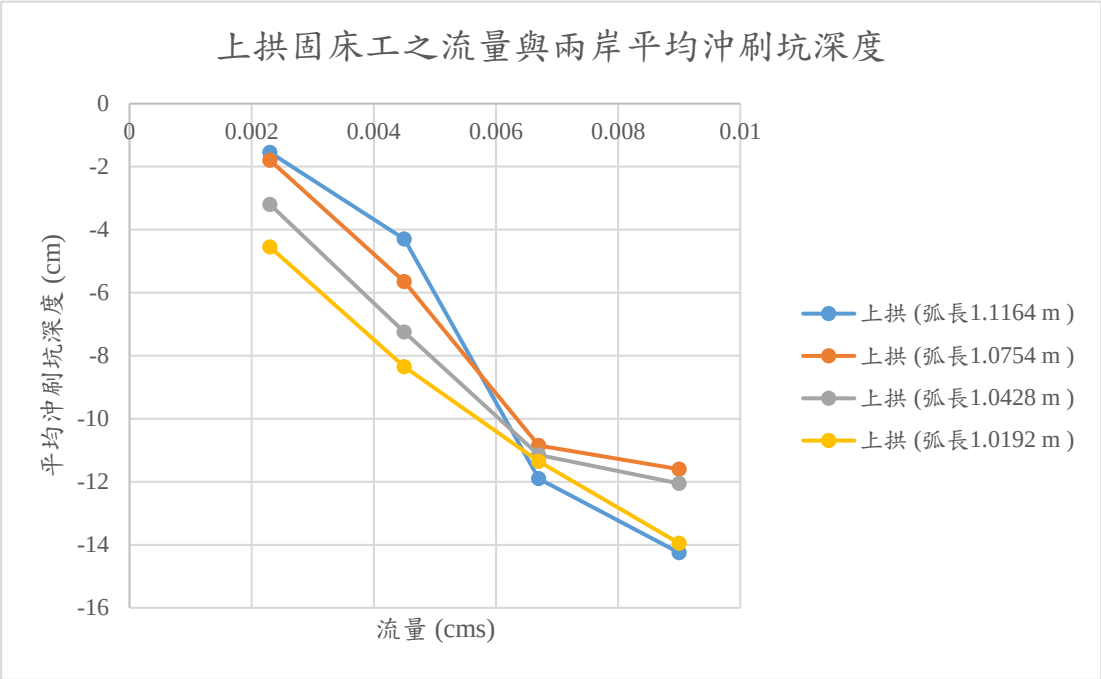


圖 6-30 上拱固床工之流量與兩岸平均沖刷坑深度

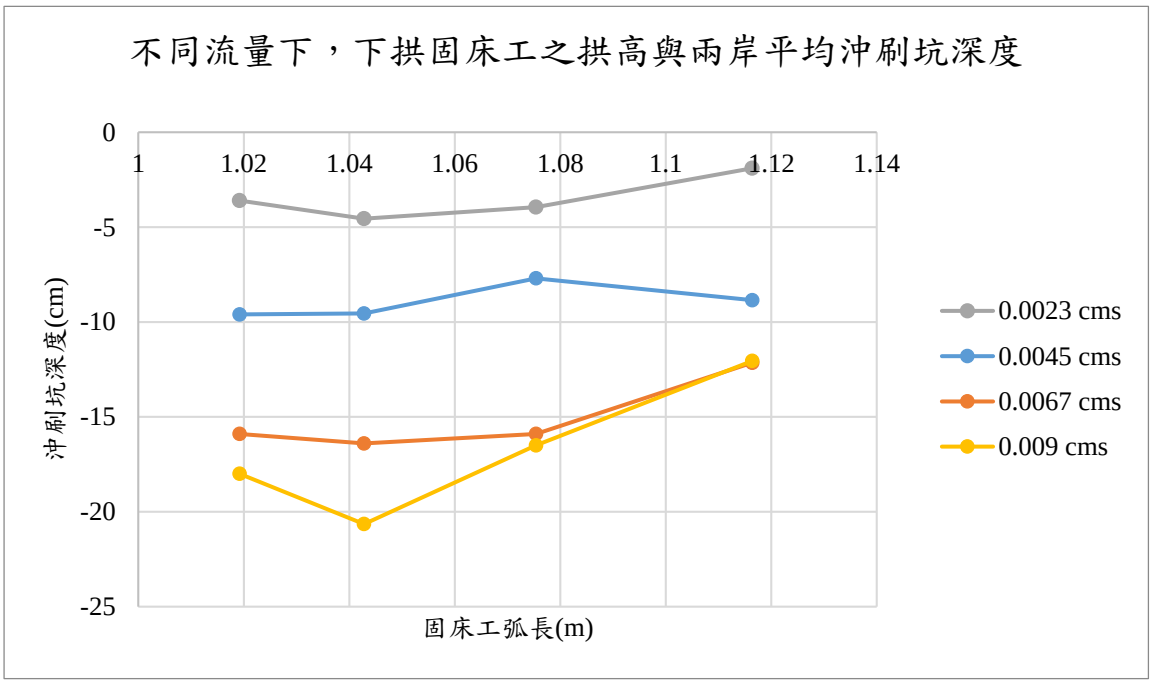


圖 6-31 不同流量下，下拱固床工之拱高與兩岸平均沖刷坑深度

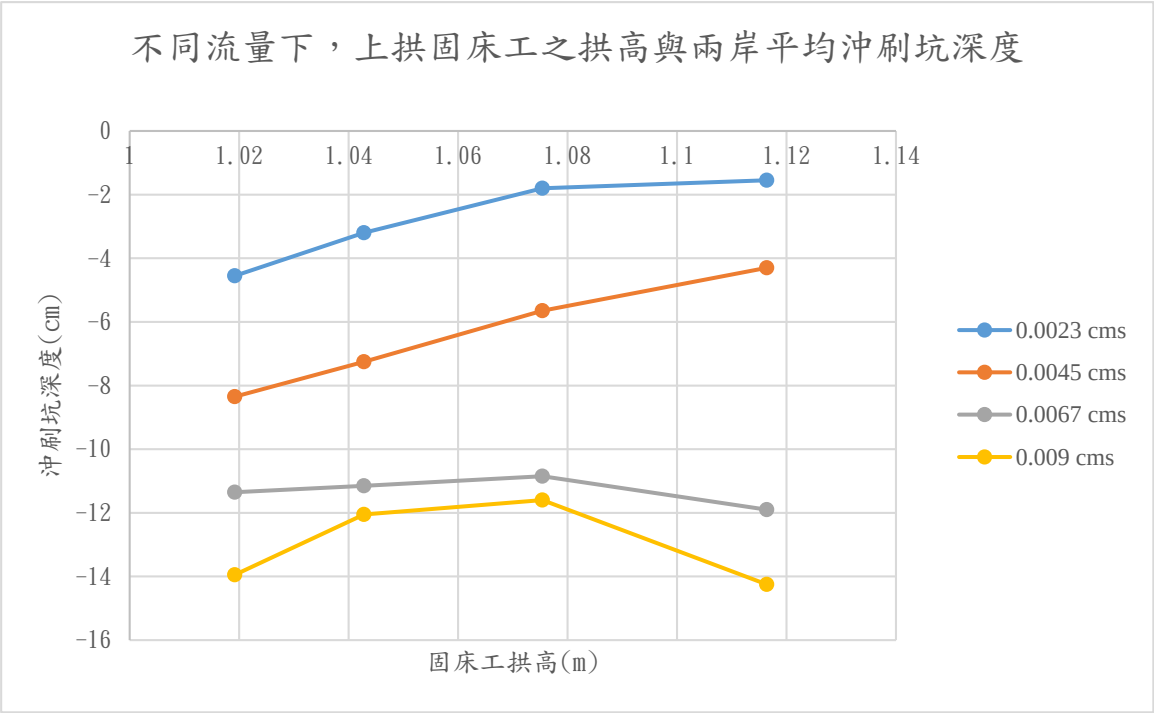


圖 6-32 不同流量下，上拱固床工之拱高與兩岸平均沖刷坑深度

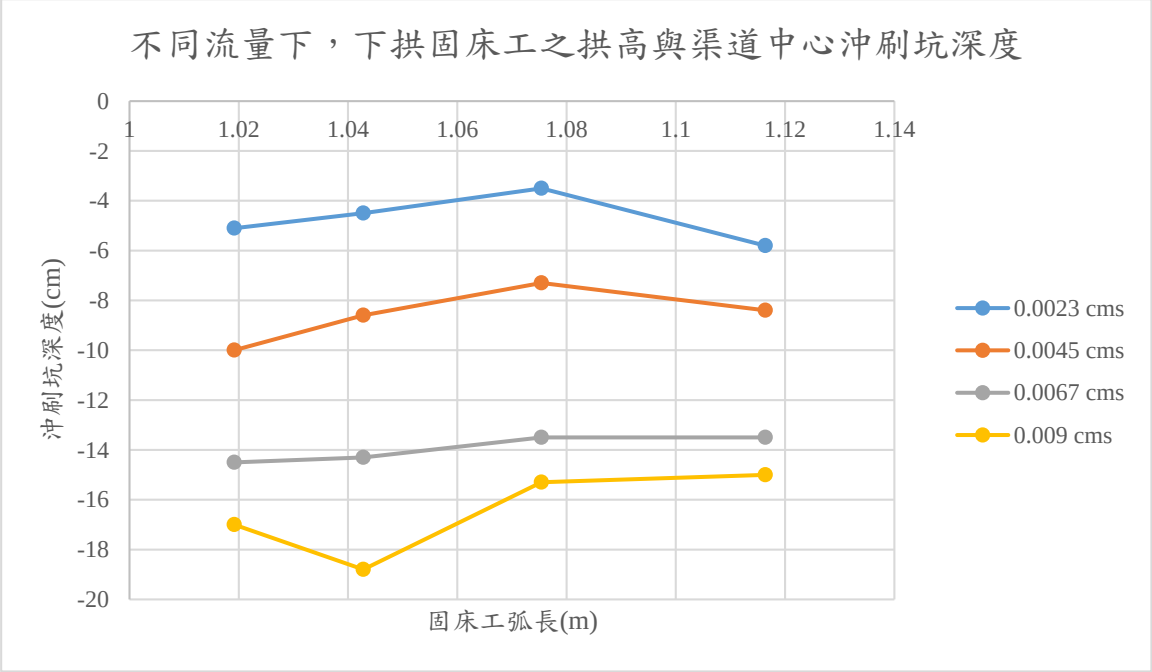


圖 6-33 不同流量下，下拱固床工之拱高與渠道中心沖刷坑深度

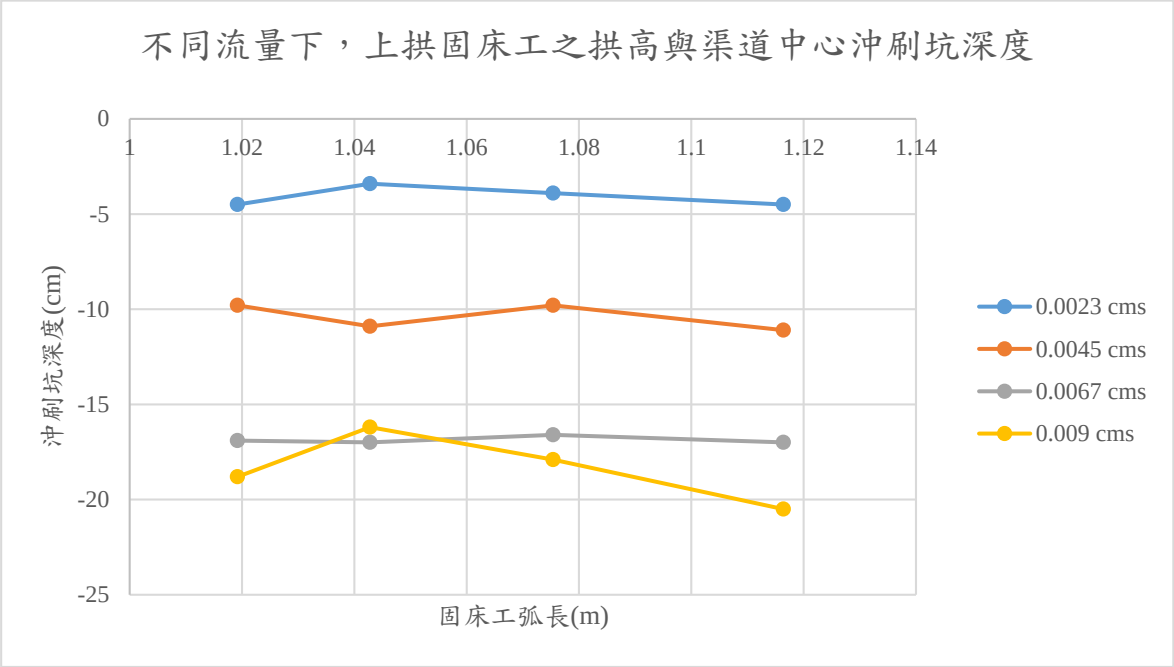


圖 6-34 不同流量下，上拱固床工之拱高與渠道中心沖刷坑深度

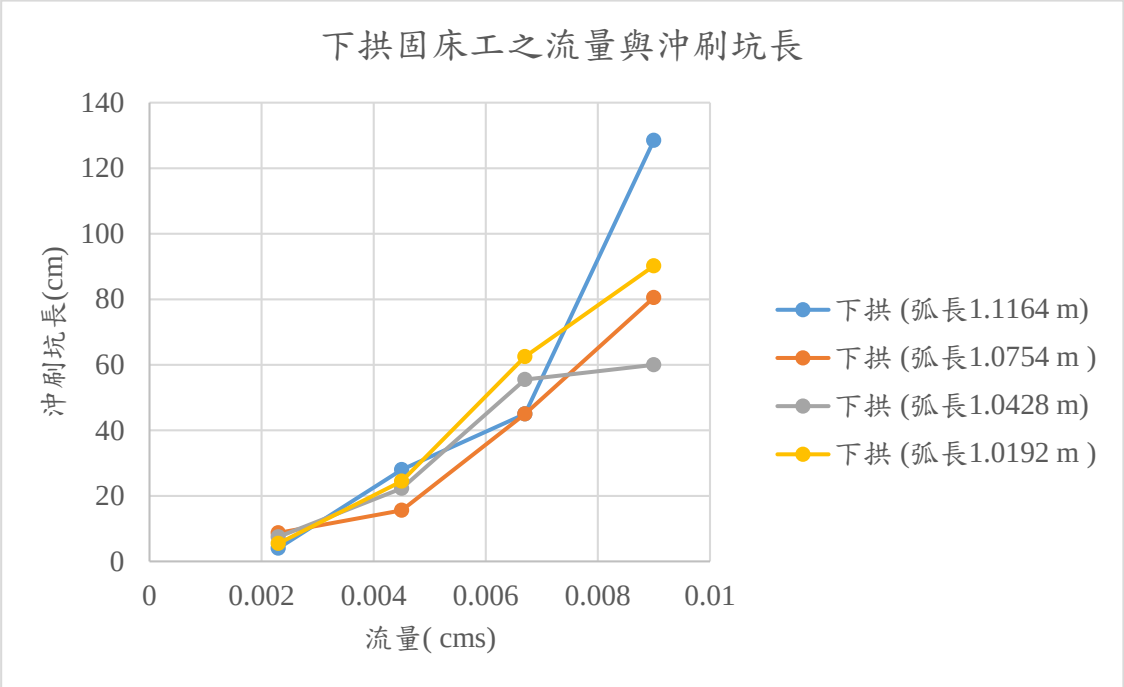


圖 6-35 下拱固床工之流量與沖刷坑長

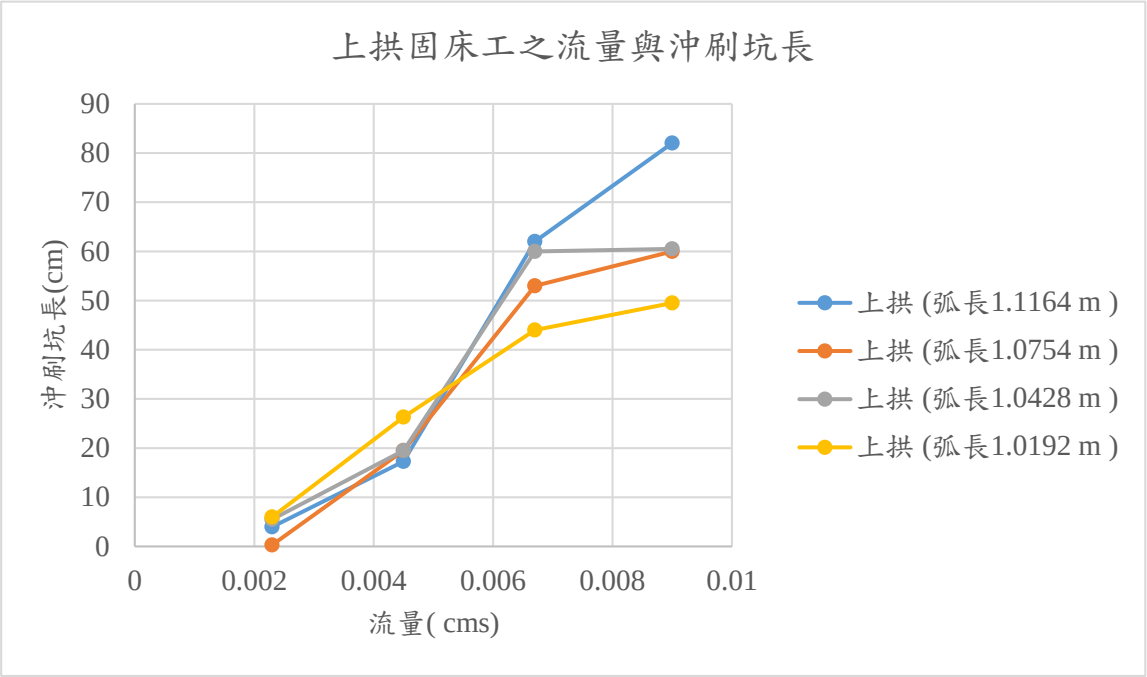


圖 6-36 上拱固床工之流量與沖刷坑長

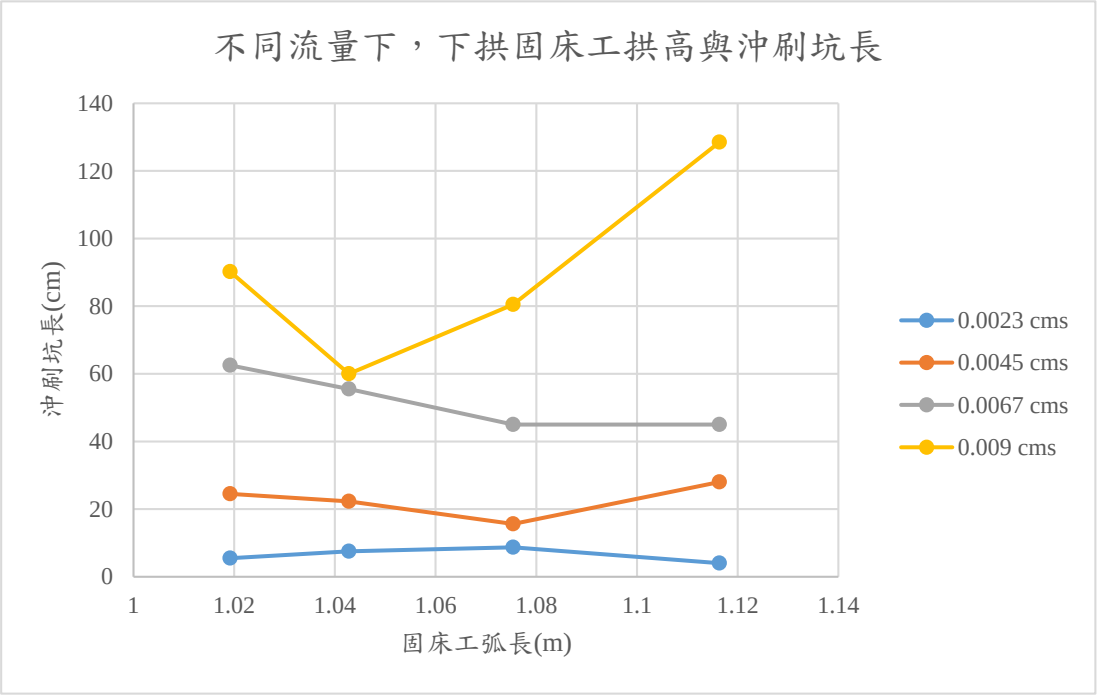


圖 6-37 不同流量下，下拱型固床工拱高與沖刷坑長

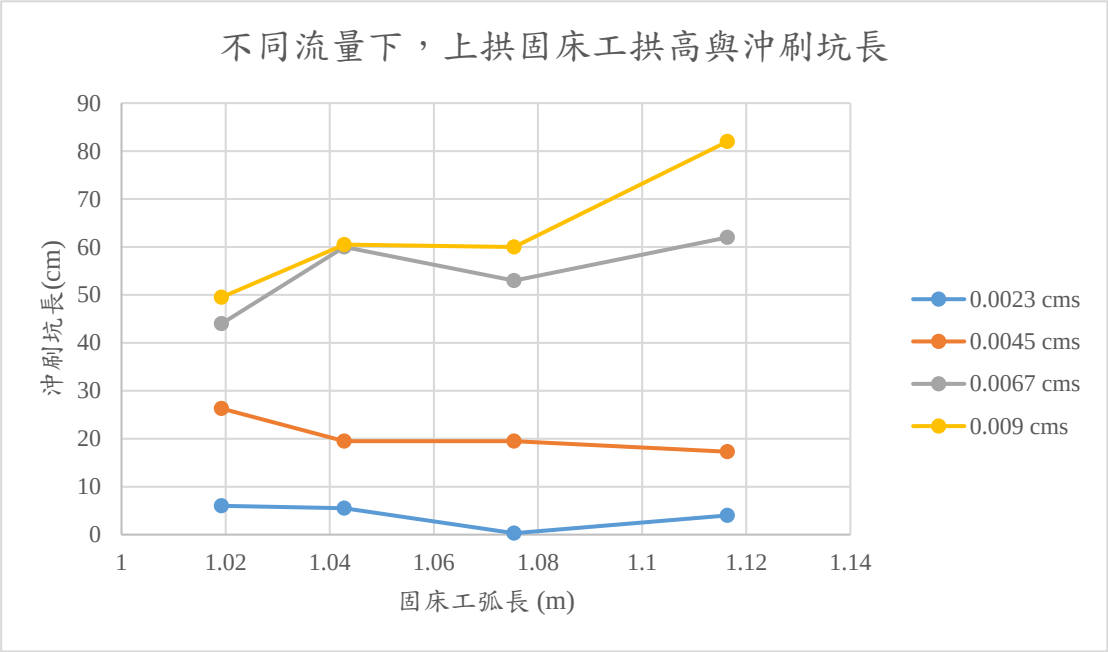


圖 6-38 不同流量下，上拱型固床工拱高與沖刷坑長

六、水流沖擊力

本研究將使用小型拉壓兩用式荷重計進行試驗，量測水流作用於拱型固床工之沖擊力，並比較不同拱度、上下拱形固床工所受之水流沖擊力分布的相異之處。



圖 6-39 小型拉壓兩用式荷重計

單寬垂直沖擊力 F 與單寬流量 q、跌水高 H、水之密度 ρ 與重力 g 有關，利用柏金漢 (Buckingham) π 定理作因次分析，並採用 H、**ρ**、g 當作重覆出現參數，則可得下列組無因次參數群：

$$\pi_1 = \frac{F}{\rho g H^2}, \pi_2 = \frac{q^2}{gH^3}$$

因此，

$$\frac{F}{\rho g H^2} = f\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)$$

依實驗數據(何皓愷，2017)可得單寬垂直沖擊力經驗模式：

$$\frac{F}{\rho g H^2} = 1.538\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)^{0.395}, R^2 = 0.92$$

式中，

F 為單寬垂直沖擊力(N/m)；ρ 為水之密度(kg/m^3)；

g 為重力加速度(m/s^2)；H 為跌水高(m)；

q 為單寬流量(cms/m)。

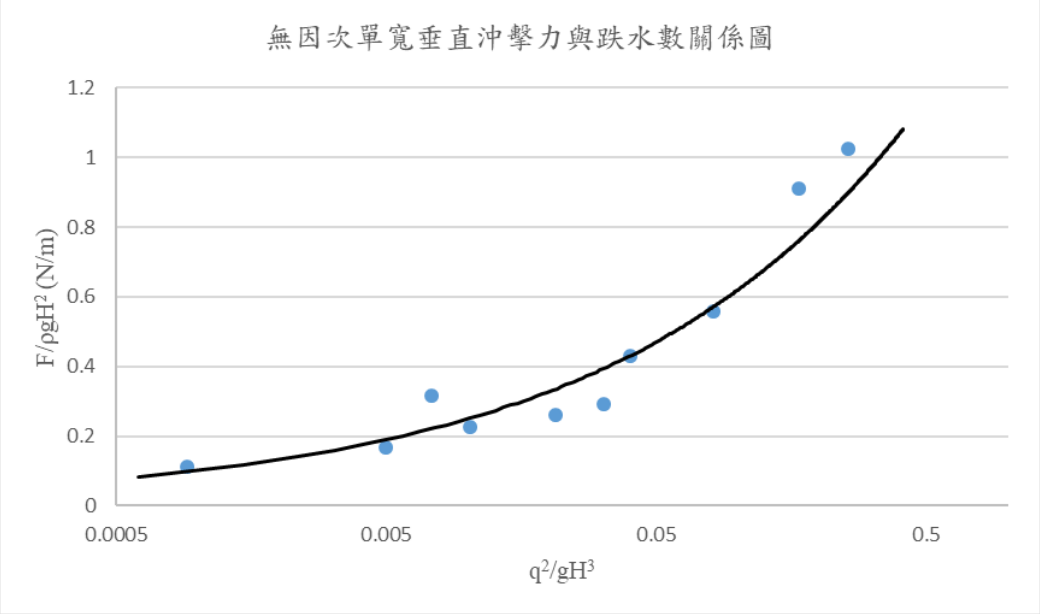


圖 6-40 無因次單寬垂直沖擊力與跌水數關係圖

資料來源：何皓愷，2017，垂直跌水之沖刷探討

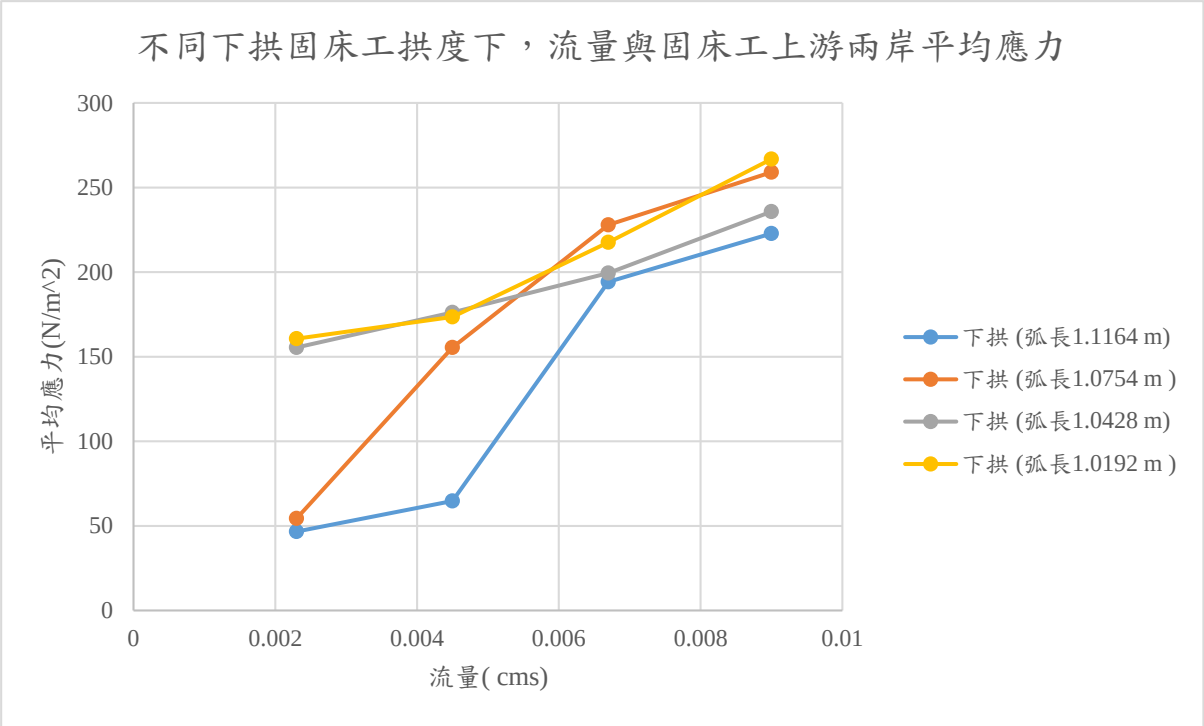


圖 6-41 不同下拱固床工拱度下，流量與固床工上游兩岸平均應力

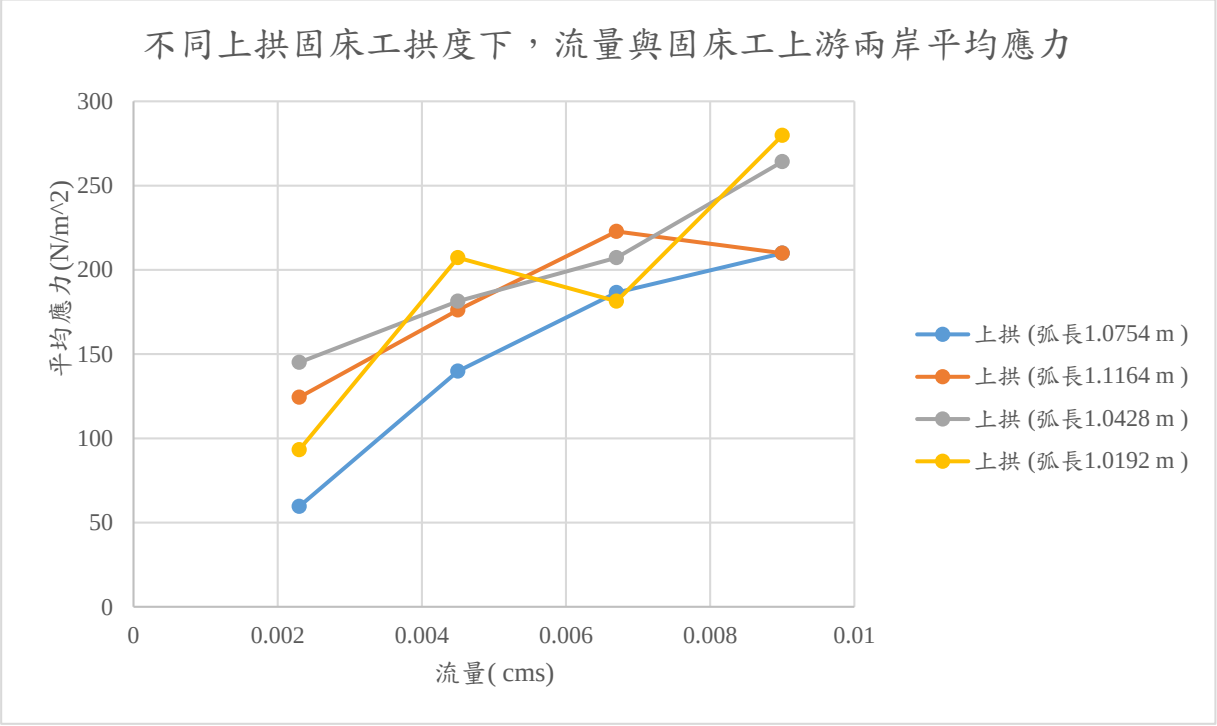


圖 6-42 不同上拱固床工拱度下，流量與固床工上游兩岸平均應力

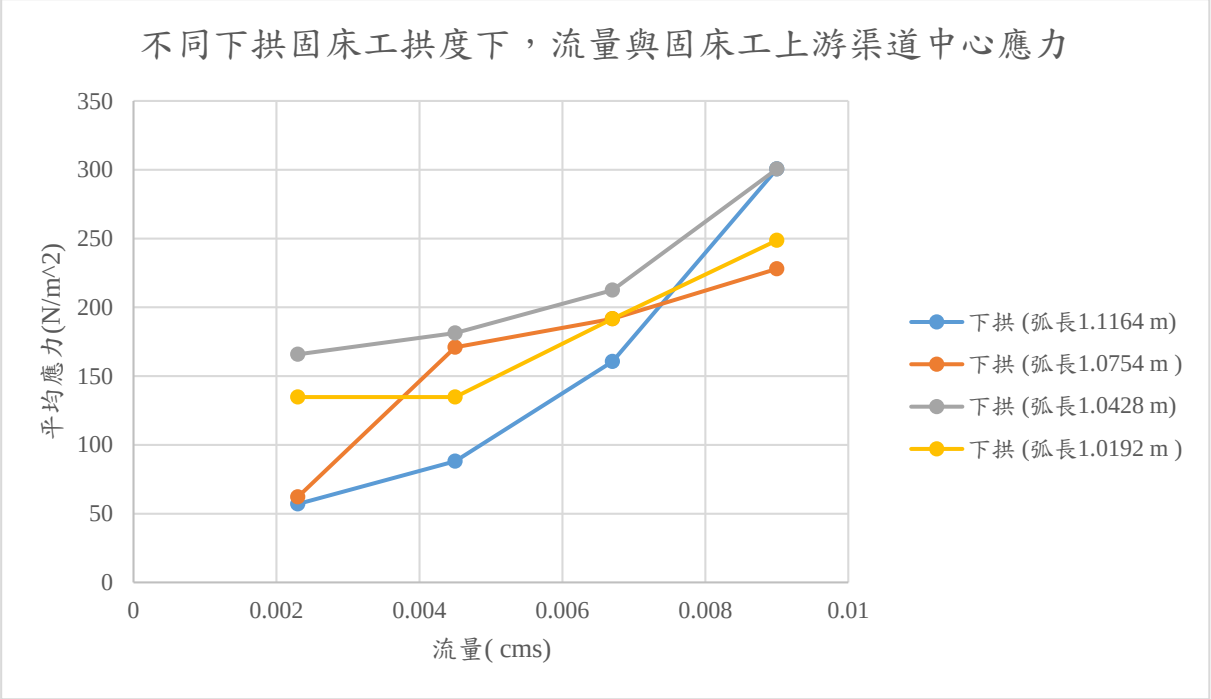


圖 6-43 不同下拱固床工拱度下，流量與固床工上游渠道中心應力

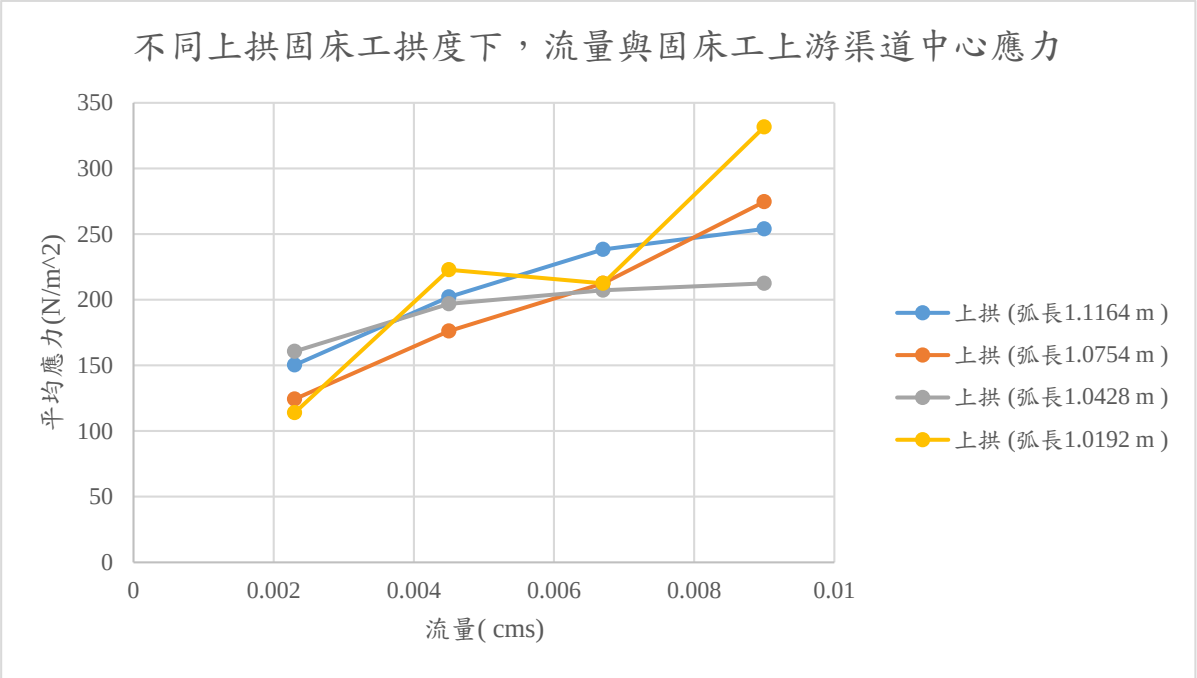


圖 6-44 不同上拱固床工拱度下，流量與固床工上游渠道中心應力

由圖 6-40 中能觀察得知，無因次單寬垂直沖擊力隨跌水數

增加而變大，亦即單寬垂直沖擊力與流量及跌水高度成正相關，而這樣的結果也能從本次的渠道實驗結果看到，如圖 6-41 至圖 6-44。因此在設計固床工時，必須加以考量流量與跌水高。而當有固床工時，部份水流在垂直方向之沖擊力會受到抵消，因此垂向沖擊力變小，所沖刷的沖刷坑深度會較無固床工時小，而原本沖擊渠床的水流作用力將轉成沿固床工水平方向之沖擊力，因此在水平方向之沖擊力會較無固床工時來的大，能將泥砂帶至較遠處，使其沖刷坑呈狹長狀。

七、沖刷坑深度與長度的迴歸公式

本試驗在粒徑於 0.8mm~1.5mm、水平渠坡、固床工高度為 4.5cm，以及流量範圍介於 0.0023cms~0.0090cms 的條件下，以二次多項式擬合各固床工型式之沖刷坑深度與長度，其結果擬合之公式如表 6-3 至表 6-6。公式中 X 為單寬流量(cms)，Y 為沖刷坑深度或沖刷坑長度(cm)。

表 6-3 下拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑深度

下拱型固床工拱度	二次多項式回歸公式	R Square 值
弧長 1.1164 公尺	$y = 359579x^2 - 5573.2x + 8.9991$	$R^2 = 0.9999$
弧長 1.0754 公尺	$y = 171597x^2 - 3991x + 4.9409$	$R^2 = 0.9358$
弧長 1.0428 公尺	$y = 51347x^2 - 3051.9x + 2.4356$	$R^2 = 0.9929$
弧長 1.0192 公尺	$y = 207390x^2 - 4560.3x + 6.0254$	$R^2 = 0.9917$

表 6-4 上拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑深度

上拱型固床工拱度	二次多項式回歸公式	R Square 值
弧長 1.1164 公尺	$y = 33596x^2 - 2426.6x + 4.3779$	$R^2 = 0.9517$

弧長 1.0754 公尺	$y = -670563x^2 + 17096x - 37.581$	$R^2 = 0.9641$
弧長 1.0428 公尺	$y = -742329x^2 + 17583x - 34.428$	$R^2 = 0.9058$
弧長 1.0192 公尺	$y = -775625x^2 + 15401x - 25.816$	$R^2 = 0.9959$

表 6-5 下拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑長度

下拱型固床工拱度	二次多項式回歸公式	R Square 值
弧長 1.1164 公尺	$y = 3E+06x^2 - 15300x + 27.371$	$R^2 = 0.9722$
弧長 1.0754 公尺	$y = 1E+06x^2 - 4466.6x + 10.8$	$R^2 = 0.9947$
弧長 1.0428 公尺	$y = -572817x^2 + 15010x - 26.418$	$R^2 = 0.9421$
弧長 1.0192 公尺	$y = 358976x^2 + 9039.8x - 18.764$	$R^2 = 0.989$

表 6-6 上拱型固床工不同拱度之單寬流量與沖刷坑長度

上拱型固床工拱度	二次多項式回歸公式	R Square 值
弧長 1.1164 公尺	$y = 253313x^2 + 9626.6x - 22.415$	$R^2 = 0.9592$
弧長 1.0754 公尺	$y = -670563x^2 + 17096x - 37.581$	$R^2 = 0.9641$
弧長 1.0428 公尺	$y = -742329x^2 + 17583x - 34.428$	$R^2 = 0.9058$
弧長 1.0192 公尺	$y = -775625x^2 + 15401x - 25.816$	$R^2 = 0.9959$

由表 6-3 至表 6-6 數據顯示，試驗值所回歸出來的數據 R^2值並不高，由於沖刷坑深度與長度亦受到坡度、粒徑、固床工高度等影響，因此建議加入更多參數來得到沖刷坑深度與長度的迴歸公式，能得到更符合不同固床工拱度實驗值之沖刷坑深度與長度的迴歸公式。

八、實驗合適度

如頁次4-3，由理論式計算，固床工所受之動壓為1090676N，靜水壓力約為653,412 (N)，加總為1,744,088(N)，而相同條件下透過比尺縮小之水槽試驗，以測試大約之數據300N/m^2，將其乘上水槽實驗之固床工上面面積0.06047089 m^2並依比尺放大至現地之固床工尺寸後，可得總力約為436799.99N，經評斷由於測量之拉壓兩用式荷重計為透過接觸面之前後移動以測量力，因此其因得出之力因不包含靜水壓，而由於水流撞擊固床工後會產生一回推之力，因此推斷可能有抵銷掉部分之水流沖擊力。

第七章 製作圖說及設計準則

本團隊之計畫主持人具有 30 年輸砂水力學之教授經驗，與深厚的水土保持水理分析學理基礎，及多年於颱風、豪雨災後進行現場勘查的實務經驗，且經由本研究之數值模擬分析以及水槽試驗，依據其數據成果，繪製成相關圖說及設計準則，以供未來水土保持局實務上參考。

本計畫根據研究成果，針對流動特性、沖淤情形、固床工受力、流場等方面，探討以近自然工法施作之固床工，於實際應用時所面臨之困難與缺失，並研提初步改善方案以及設計準則。

第一節 圖說

經本研究整理，固床工之橫斷面圖、平面圖，及剖面圖如圖 7-1~7-5 所示，其中拱型因具有曲率，必須於固床工上標出曲線上之座標及施作相對高程，以便工程施工之順利，如圖 7-2~圖 7-3 所示，而實務上在設計固床工時，均應配合現場之坡度、粒徑、流量、地質等條件，以使固床工能發揮其最大效用，其餘護岸之剖面圖、相關設施之標準圖與示意圖如圖 7-6～7-27 所示。

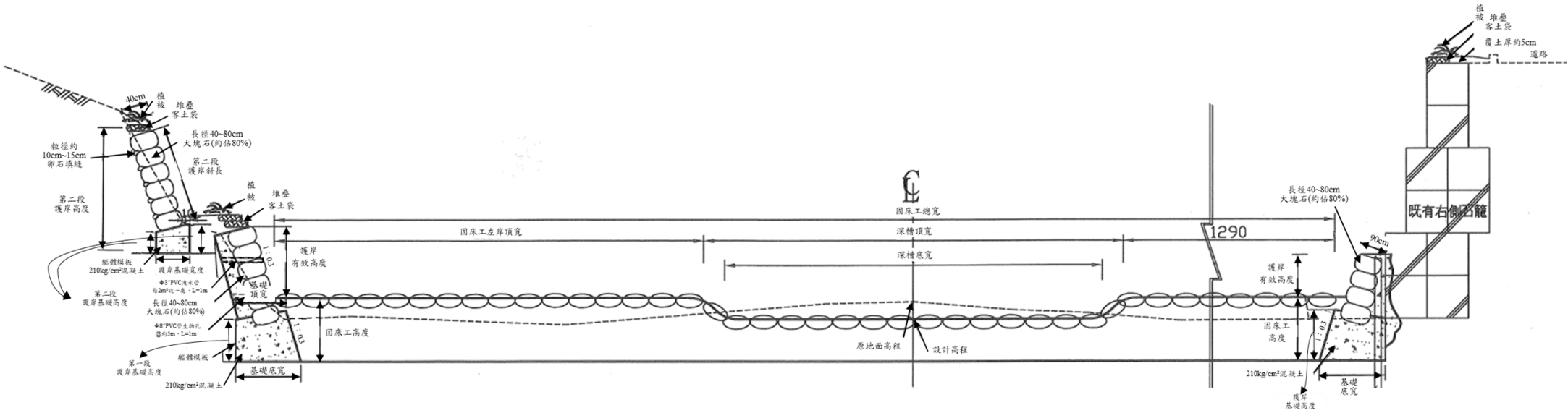


圖 7-1 固床工橫斷面示意圖

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015

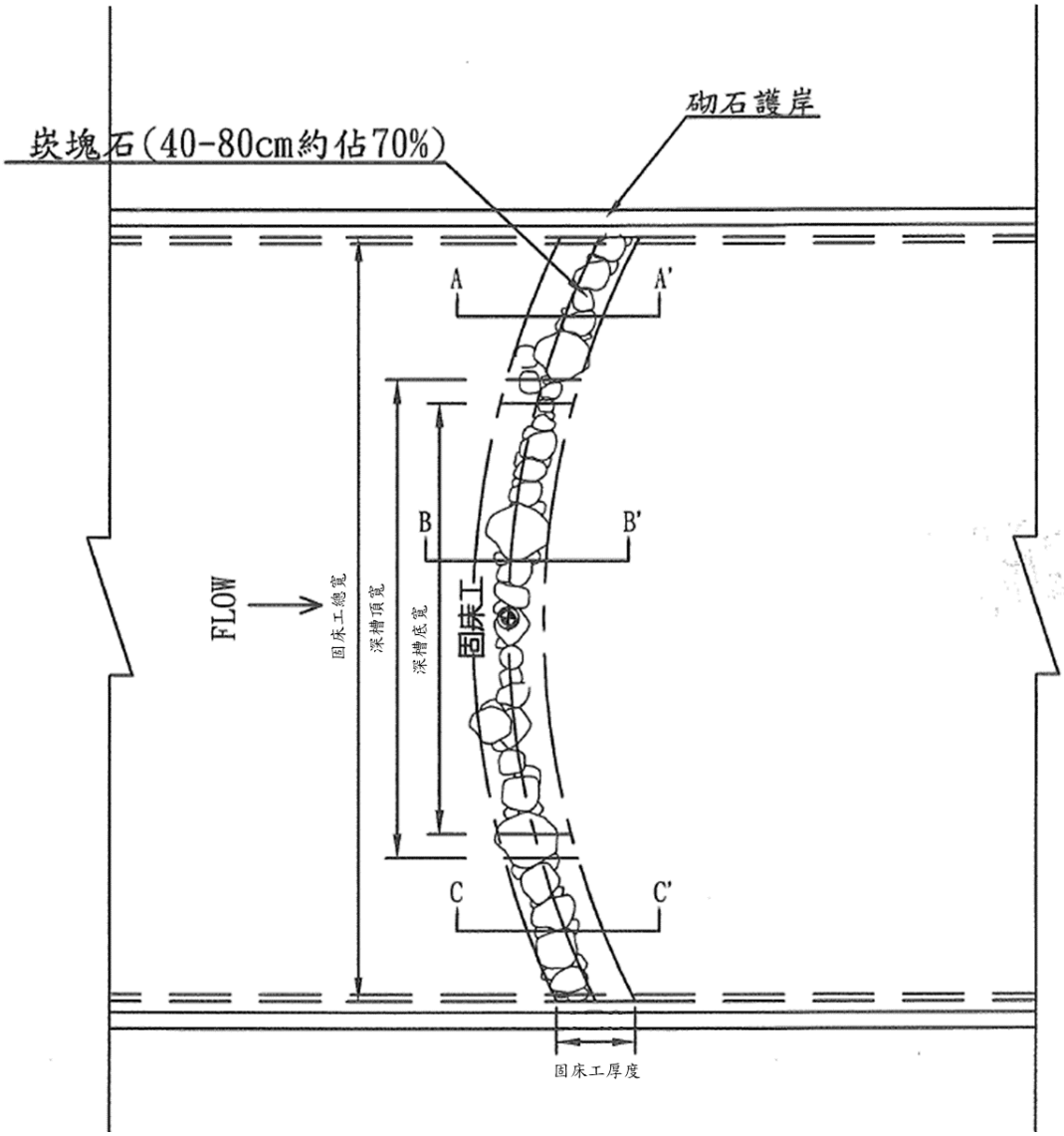


圖 7-2 拱型固床工平面圖

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015

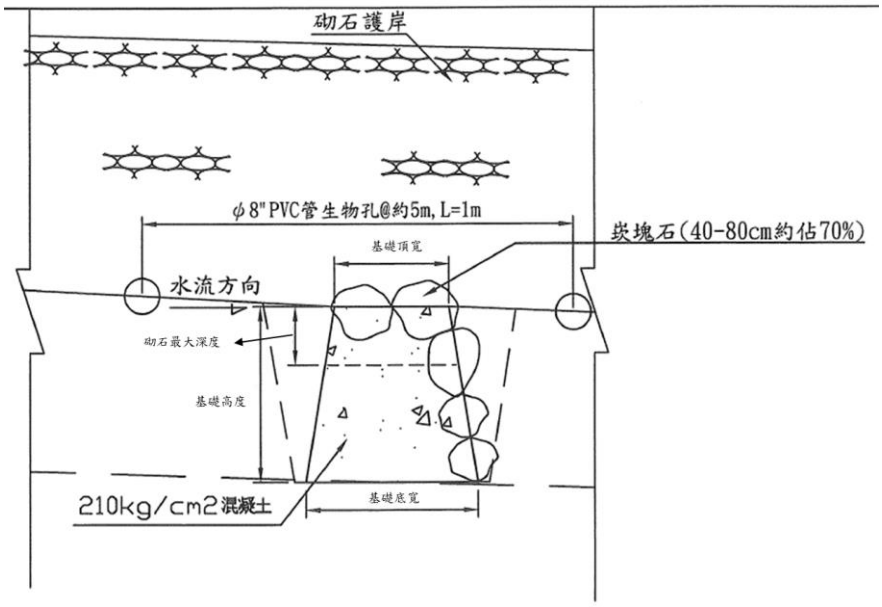


圖 7-3 固床工剖面圖(S：1/50，U：cm)

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015

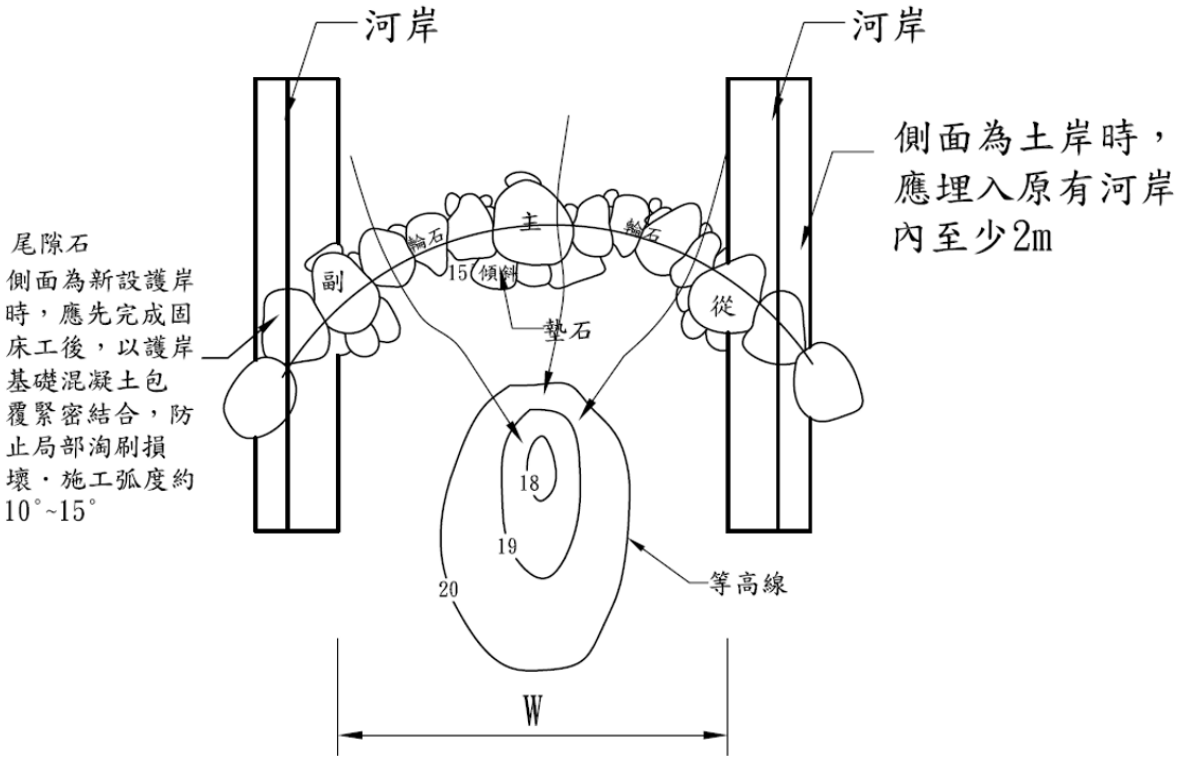


圖 7-4 拱型排砌塊石固床工之平面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

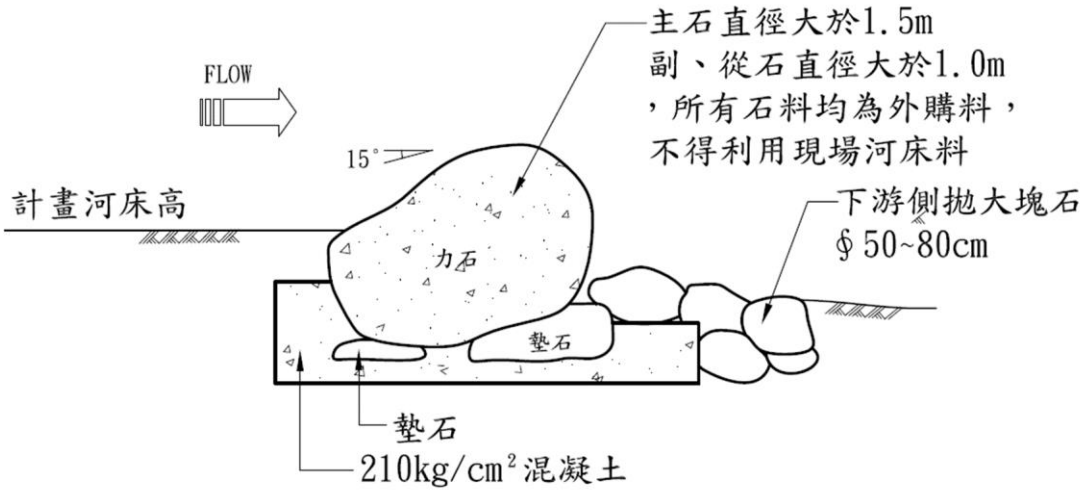


圖 7-5 拱型排砌塊石固床工之剖面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

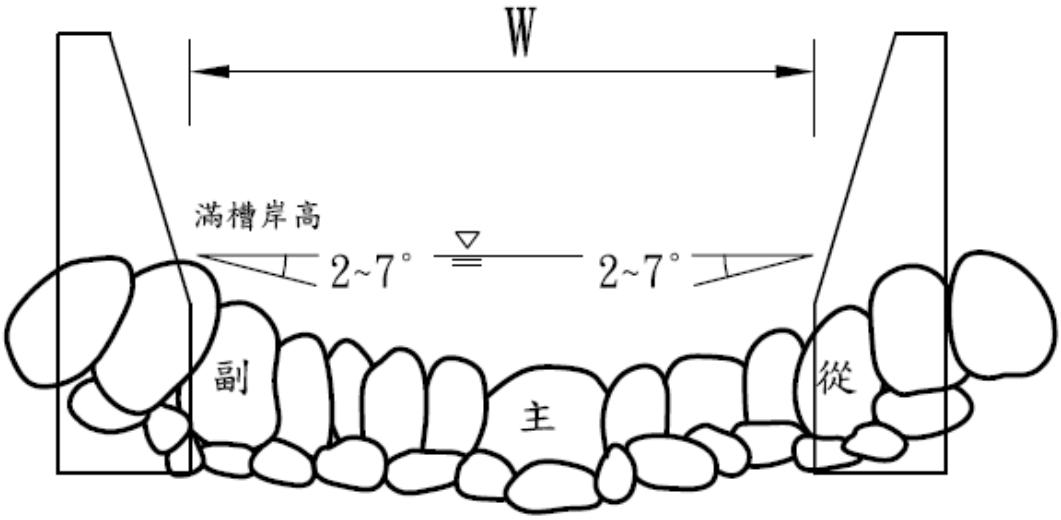


圖 7-6 拱型排砌塊石固床工立面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

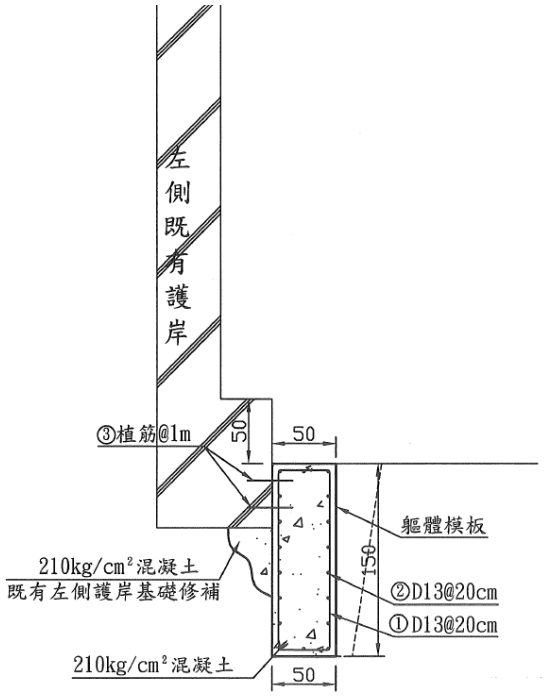


圖 7-7 既有護岸基礎修補標準示意圖(S：1/25，U：cm)

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015

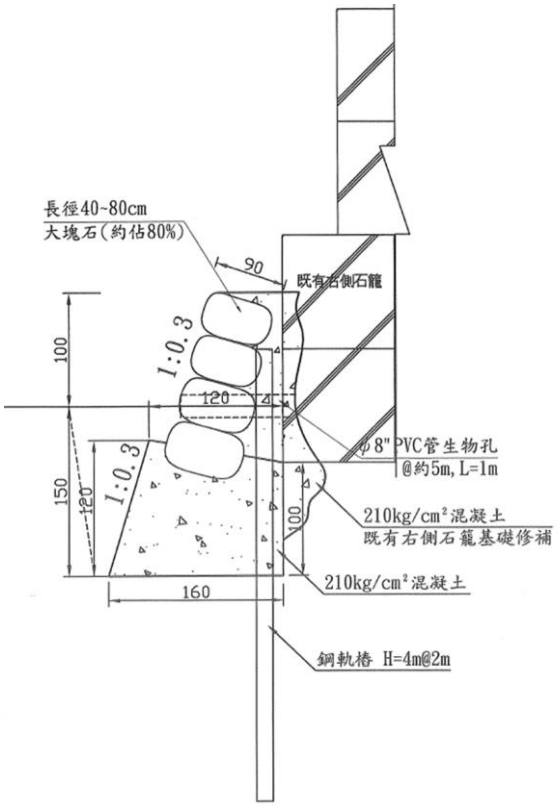


圖 7-8 既有石籠基礎修補標準示意圖(S：1/25，U：cm)

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015

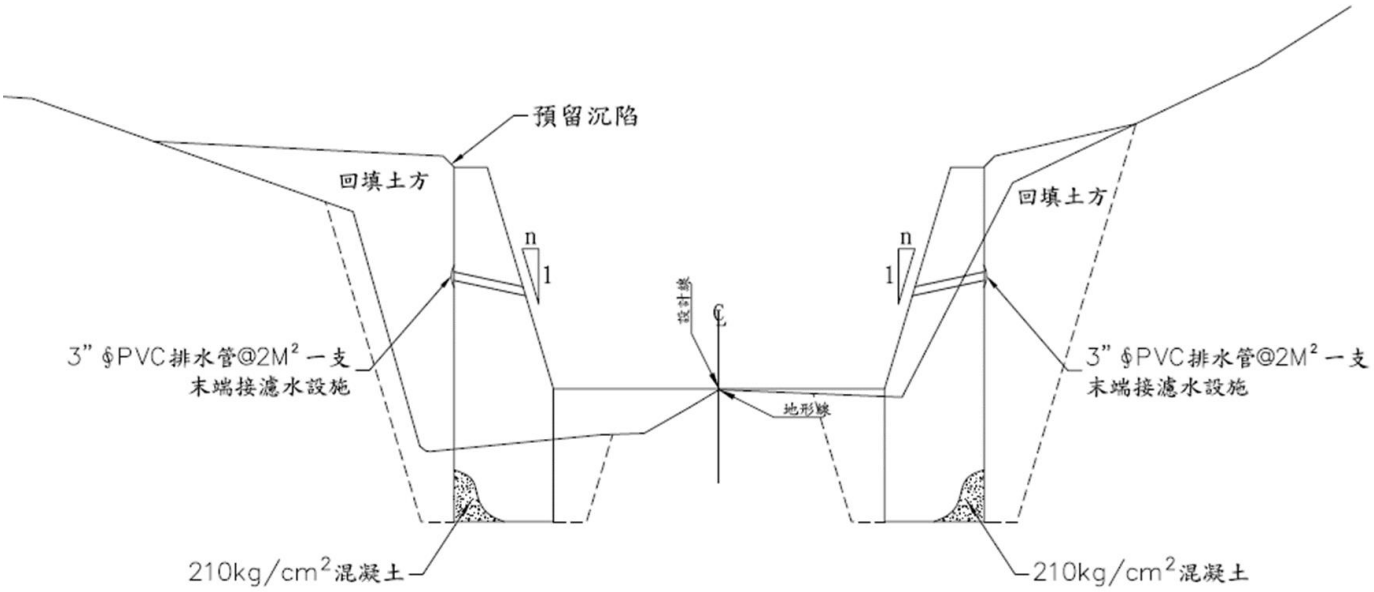


圖 7-9 混凝土護岸之剖面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

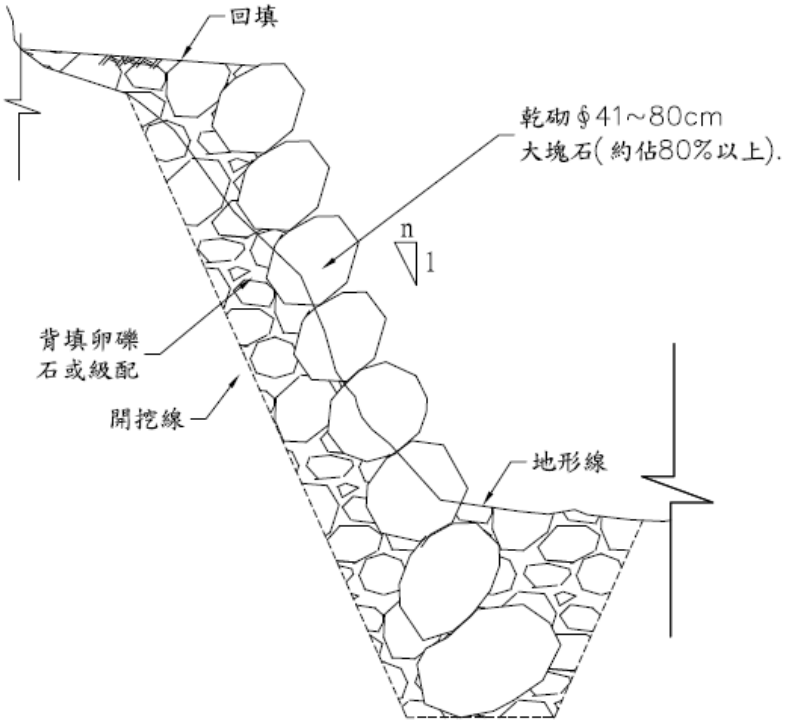


圖 7-10 乾砌石護岸之剖面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

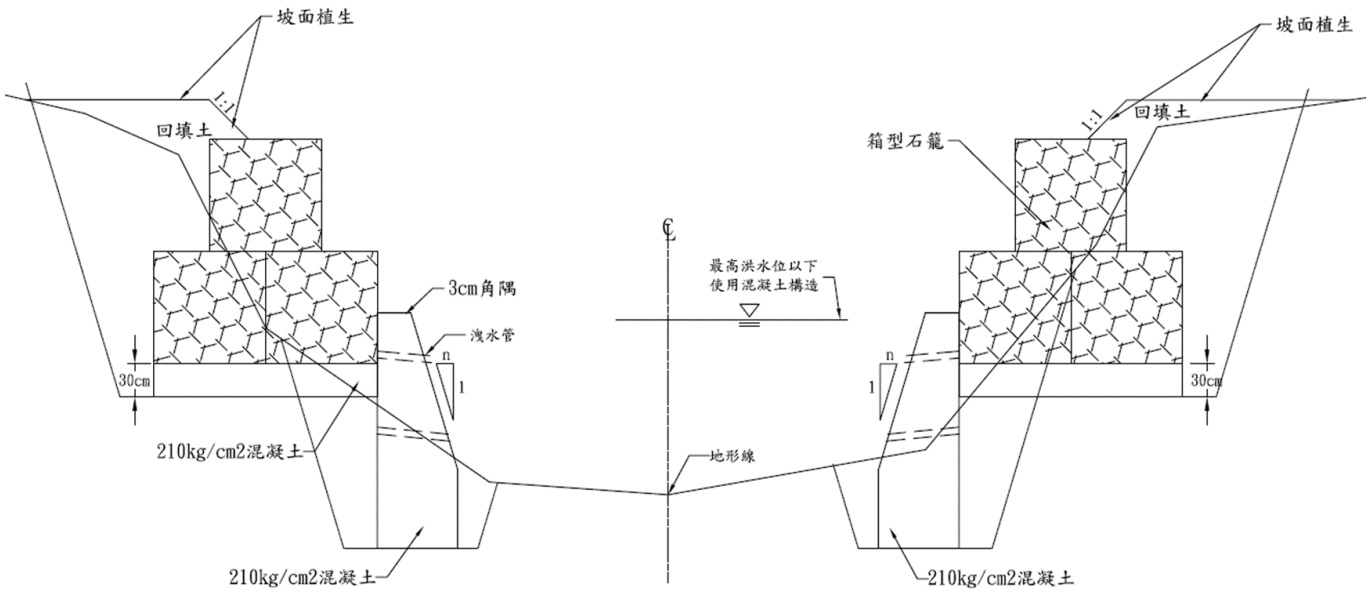


圖 7-11 箱籠護岸之剖面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

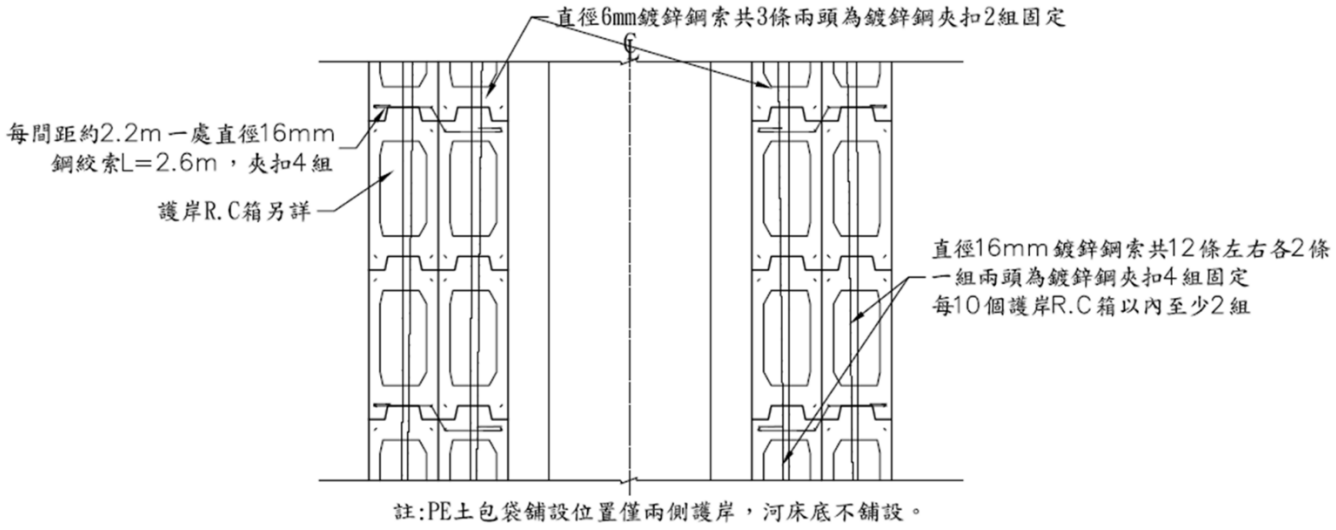


圖 7-12 預鑄槽框式護岸之平面圖

(資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，

2018)

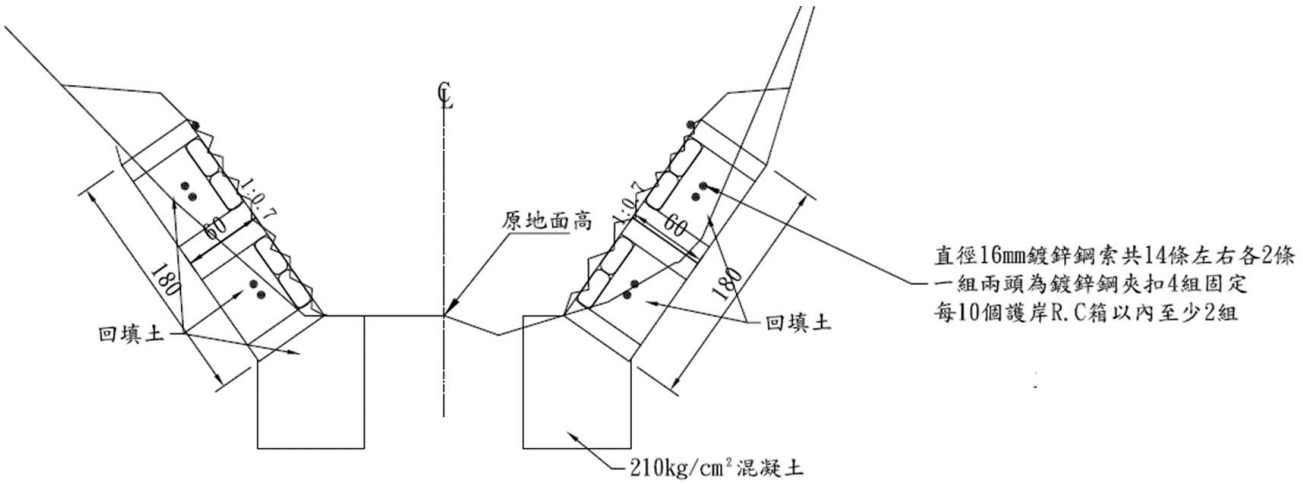


圖 7-13 預鑄槽框式護岸之剖面圖-1

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

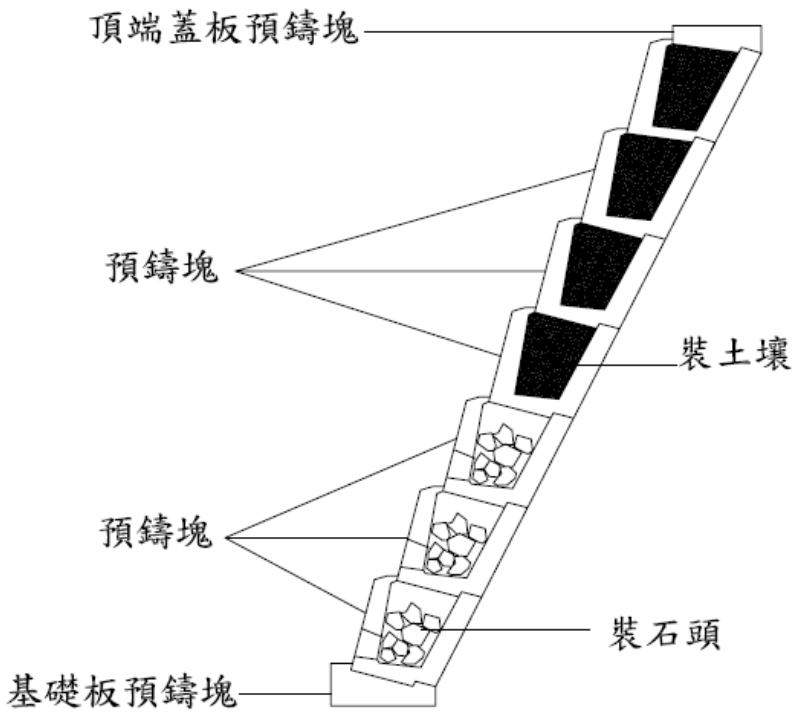


圖 7-14 預鑄槽框式護岸之剖面圖-2

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

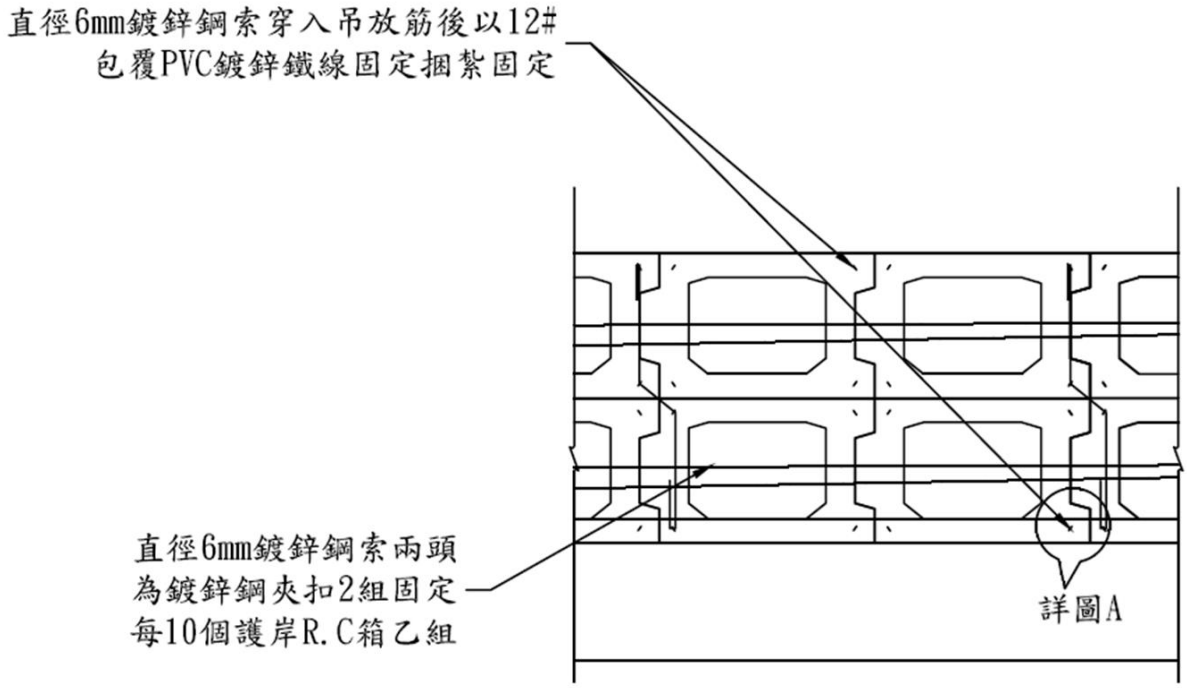


圖 7-15 預鑄槽框式護岸之立面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

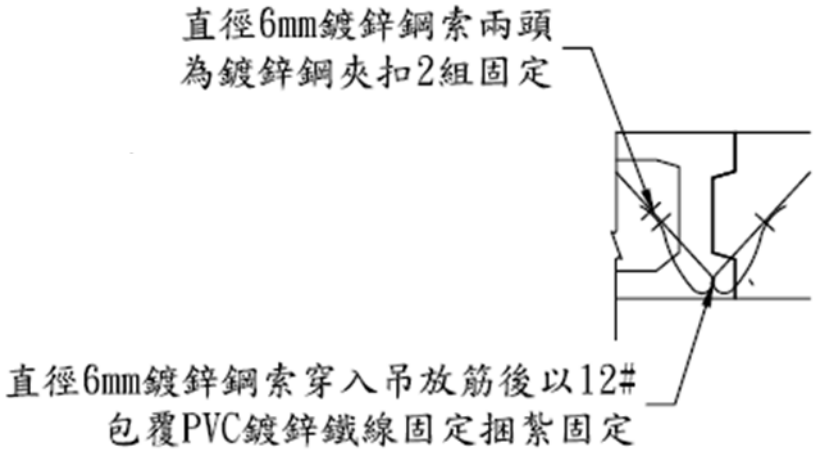


圖 7-16 預鑄槽框式護岸之立面圖詳圖 A

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

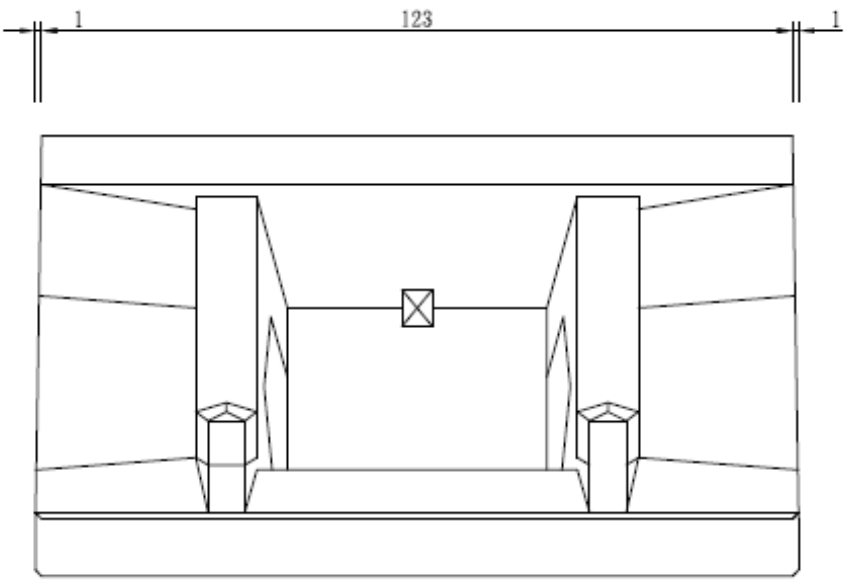


圖 7-17 預鑄塊平面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

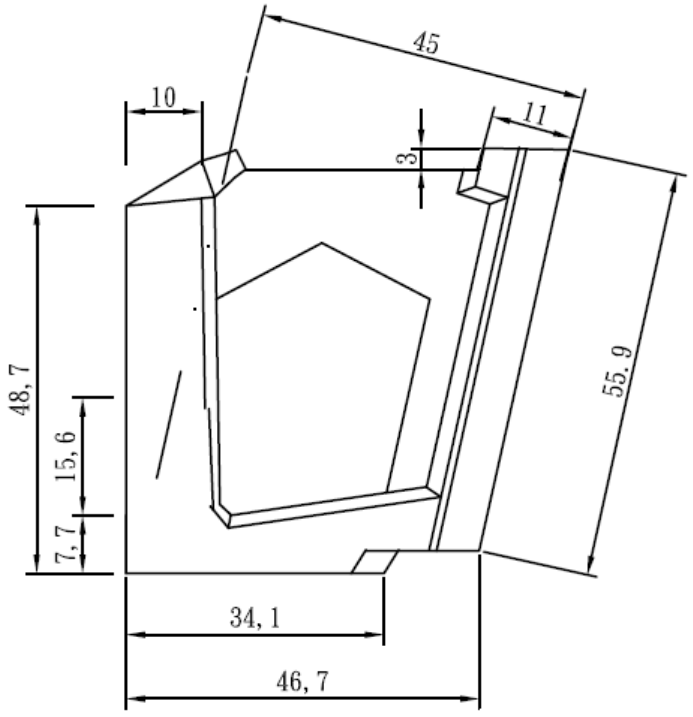


圖 7-18 預鑄塊斷面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

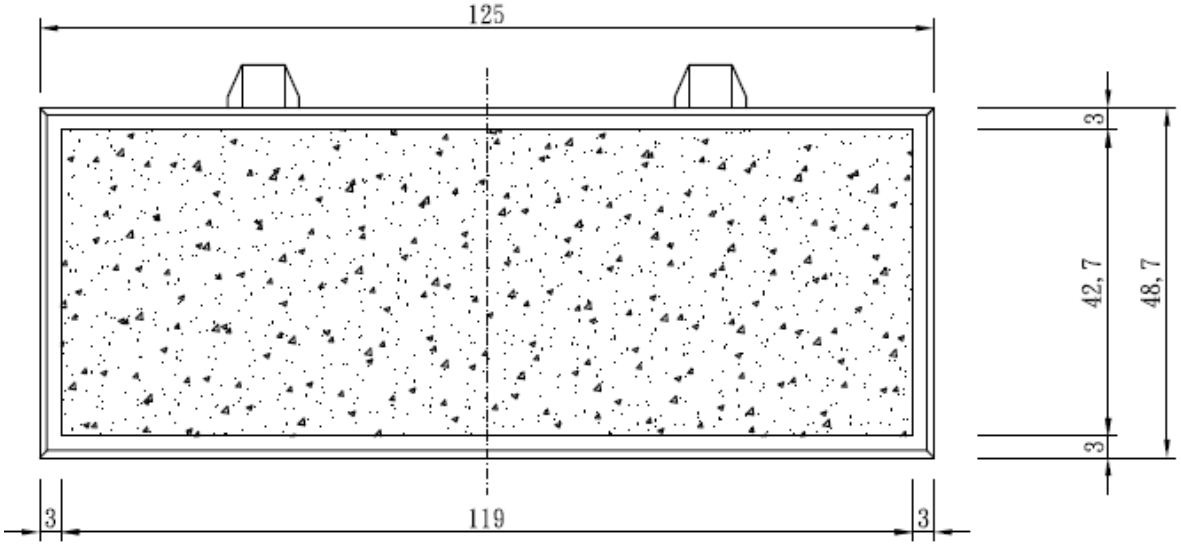


圖 7-19 預鑄塊正面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

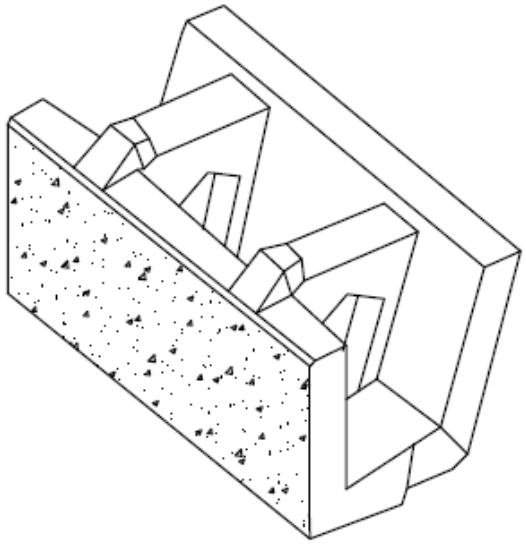


圖 7-20 預鑄塊立體圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

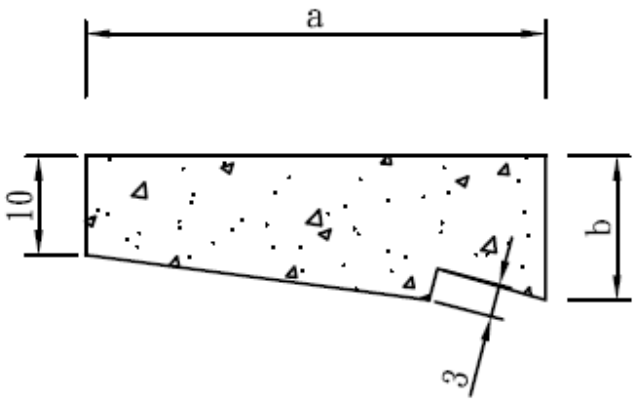


圖 7-21 頂端蓋板預鑄塊斷面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

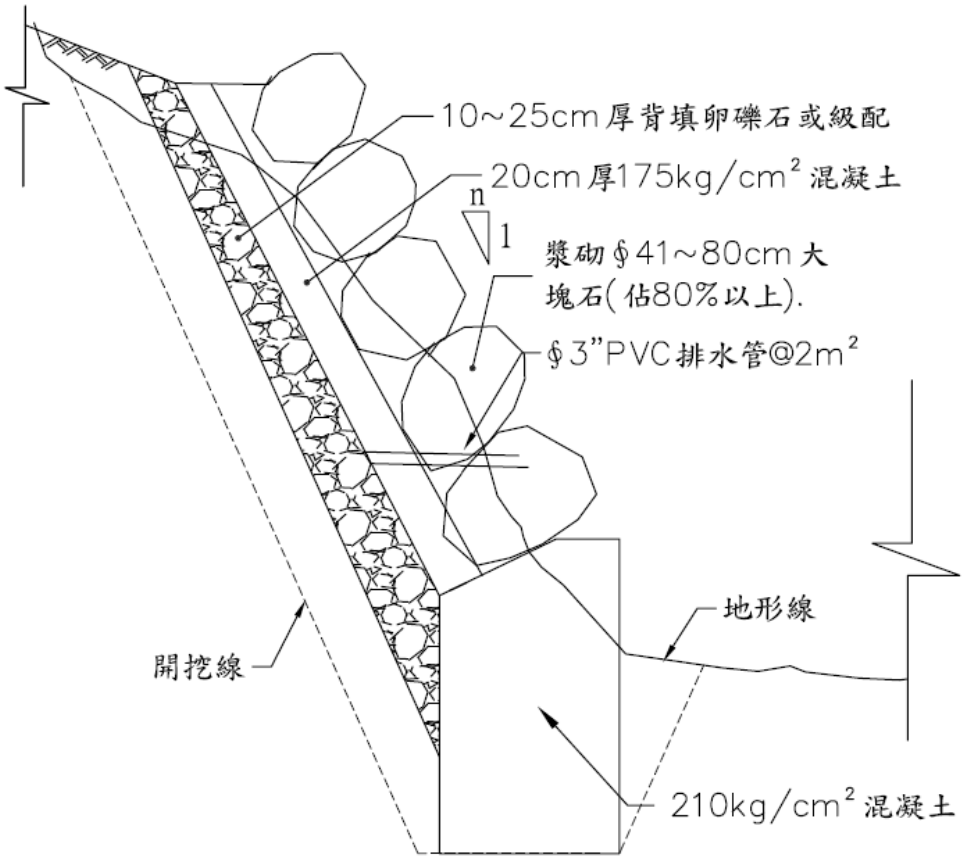


圖 7-22 混凝土砌石護岸(三明治式)剖面圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

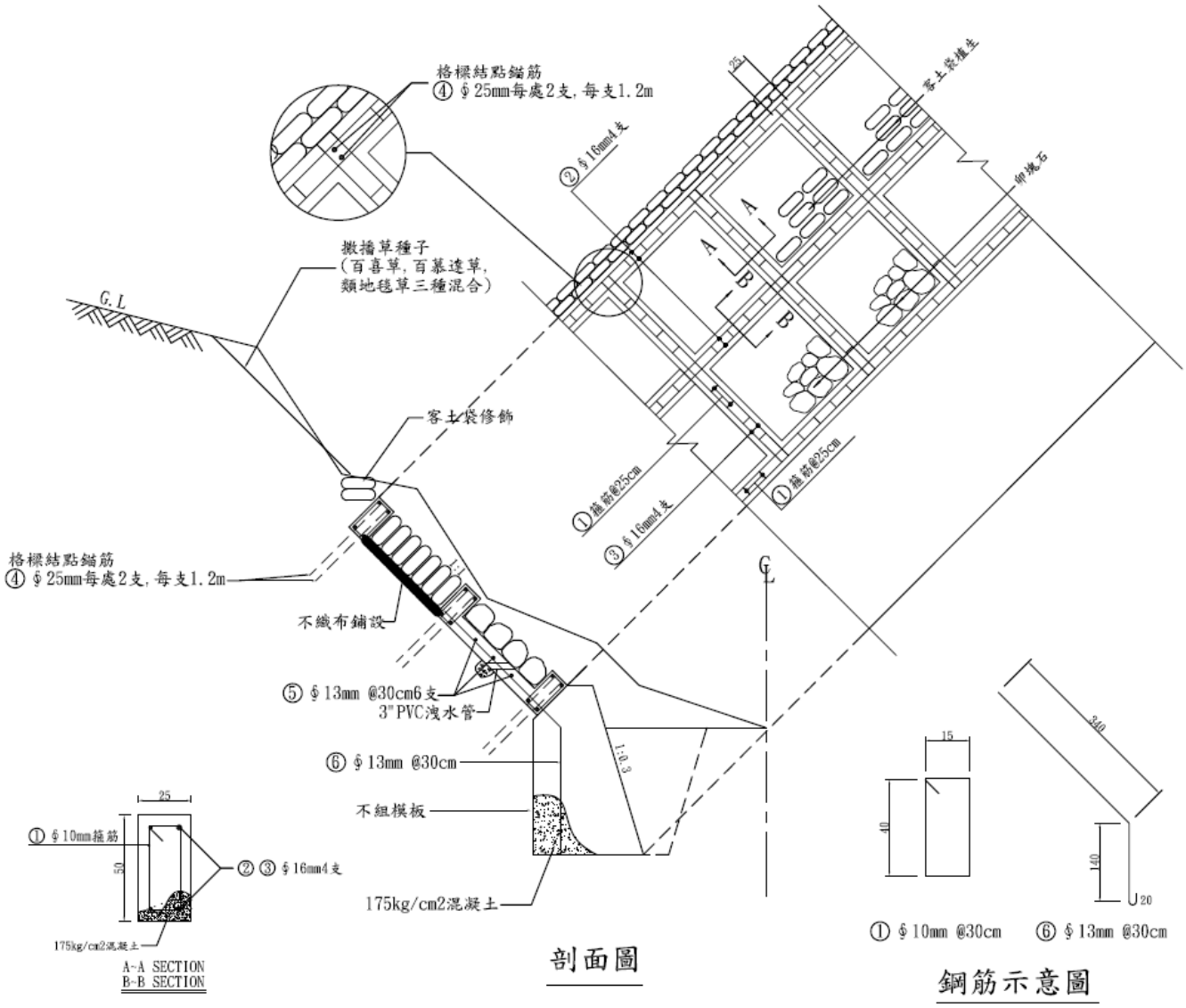


圖 7-23 格框式護岸剖面圖與鋼筋示意圖

資料來源：水土保持工程設計參考圖冊，行政院農業委員會水土保持局，2018

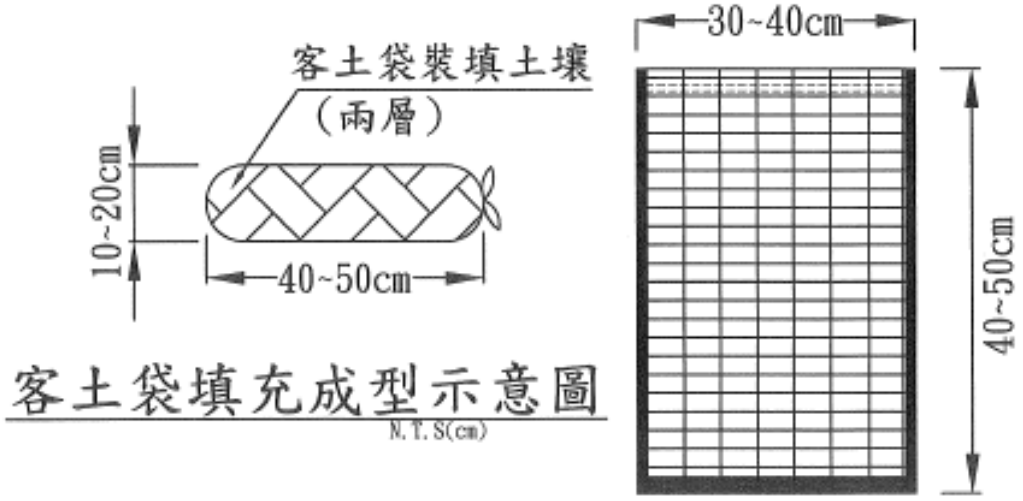


圖 7-24 客土袋標準示意圖

(資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015)

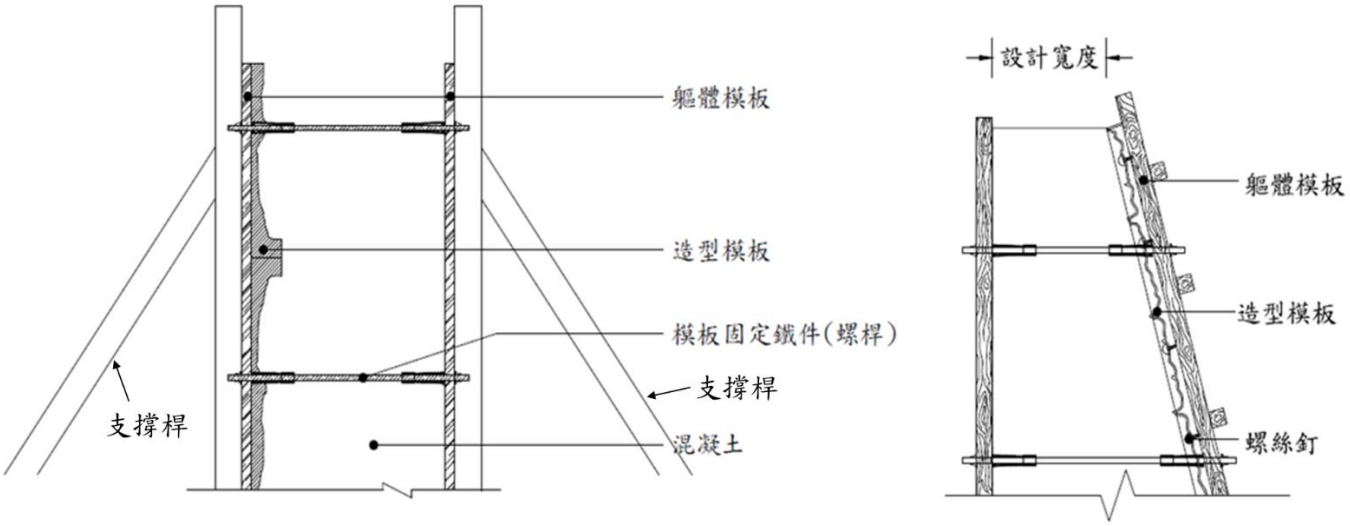


圖 7-25 模板組立示意圖

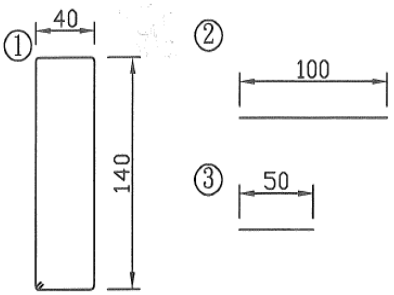
資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015

左側護岸修補每m鋼筋數量表

編號	鋼筋直徑	鋼筋間距	長度	支數	單位重量	重量
1	φ13mm	20cm	3.6m	5支	0.995kg	17.91kg
2	φ13mm	20cm	1.0m	18支	0.995kg	17.91kg
3	φ13mm	30cm	0.5m	2支	0.995kg	0.995kg
					總重量	36.82kg

左側護岸修補每m材料數量表

210kgf/cm2混凝土	修補增量	鋼筋	軀體模板
0.75m3	約0.20m3	36.82kg	1.50m2



右側護岸修補每m材料數量表

210kgf/cm2混凝土	修補增量	軀體模板
1.54m3	約0.40m3	1.2m2

圖 7-26 鋼筋配置圖

(資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015)

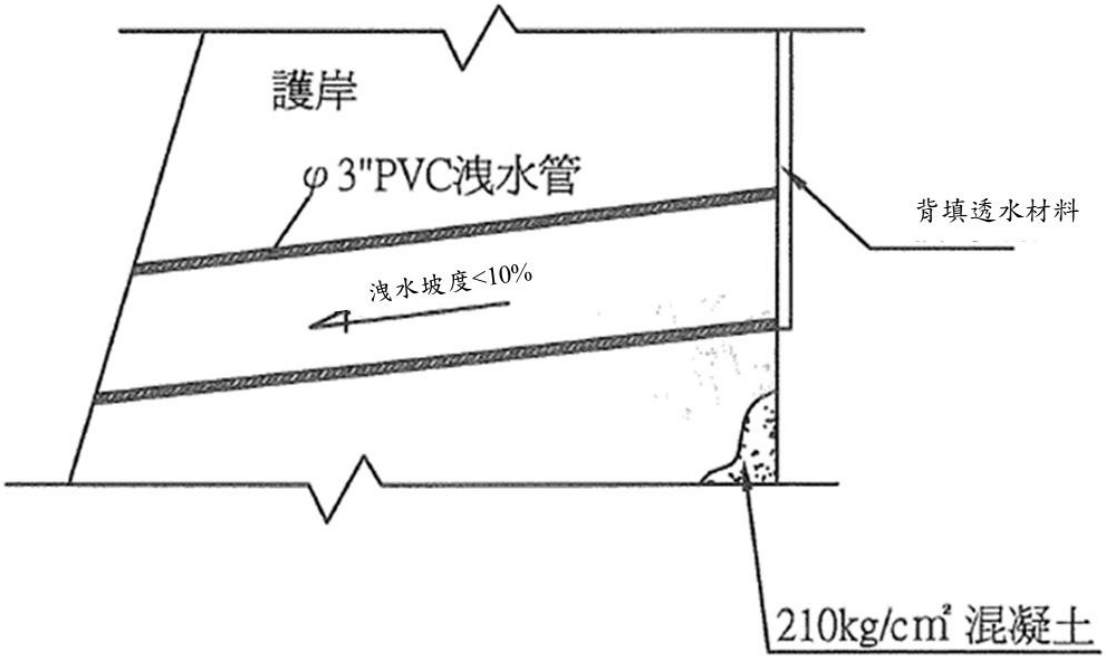


圖 7-27 φ3”PVC 洩水管示意圖

第二節 拱型固床工理論分析

下面討論在水流剛衝擊固床工瞬間之情形，拱型固床工透過其拱型狀的結構能夠將施加於其上游面的衝擊力以及靜水壓力以壓應力的形式順著本身的形狀傳遞至兩岸的銜接處，並由兩岸銜接處產生抵抗推力進而達成穩定。

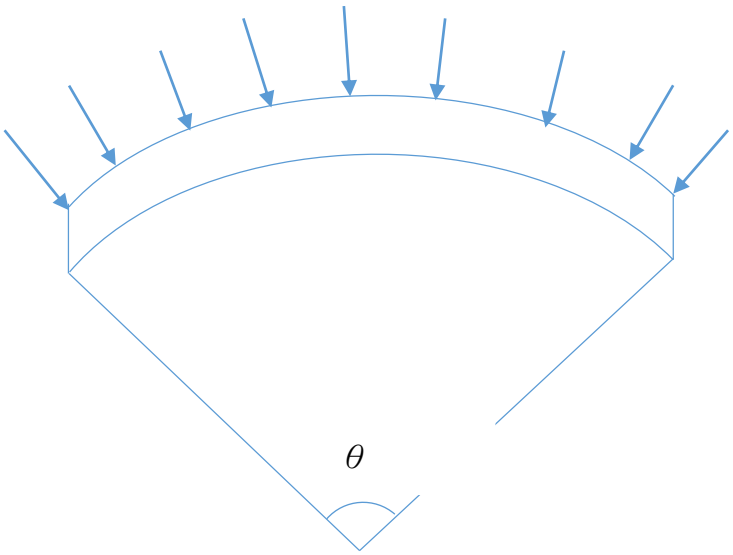
透過抗壓性能良好的構築材料如有良好抗壓能力的混凝土、穩健的基座以及謹慎的評估，拱型固床工可以承受較大的力而不致損壞。

根據牛頓第二運動定律，若為使固床工結構體不移動，則固床工上游面承受之靜水壓力 P_1 施加於固床工結構體的水流方向分力的總和再加上其承受水流流動產生之動壓 P_2 施加於固床工結構體的總力會等於兩岸施於固床工結構體的反作用力的水流方向分力的總和。

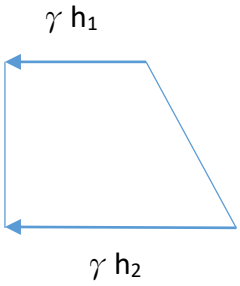
下面分開討論靜壓以及動壓。

一、靜壓

下圖為靜水壓分布在固床工上游面之情形

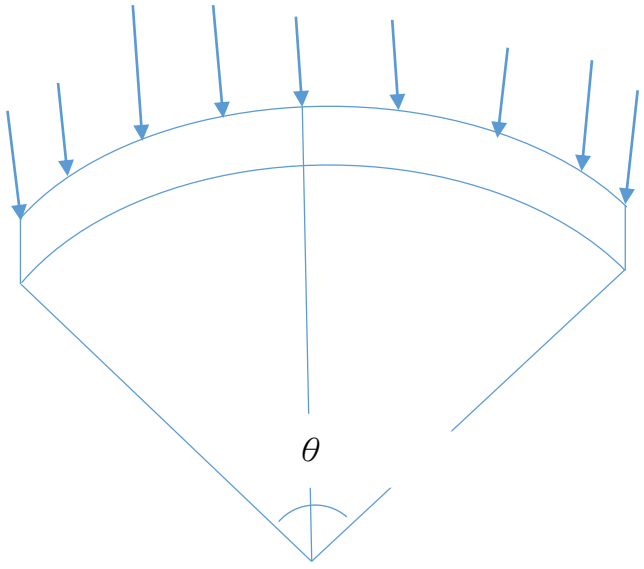


將其切片為無限多剖面而其水壓力剖面如下圖

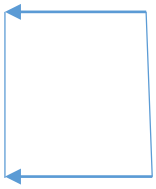


則每一剖面其受靜水壓力總合為$(\gamma h_1+\gamma h_2)$*固床工高度 h/2 但由於每一個剖面其水流方向之分力都不同，因此需考慮角度，平行於水流方向合力以積分表示，$\int_0^{\theta}\frac{(\gamma h1+\gamma h2)*h}{2}\cos\theta d\theta$，垂直於水流方向合力以積分表示為$\int_0^{\theta}\frac{(\gamma h1+\gamma h2)*h}{2}\sin\theta d\theta$，若其 θ 增加，則需加強其結構或著是使固床工本身厚度增加以保證結構之安全。

二、動壓



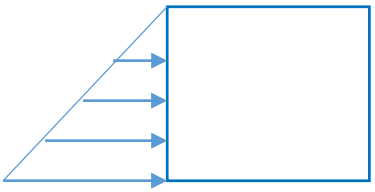
將其切片為無限多剖面而其動壓力剖面如下圖所示



動壓與靜壓相比其作用方向均為水流方向，因此總動壓 $2\rho AV^2$ 可分兩部分分別作用於兩側之邊壁。

此時並假設兩岸邊壁各提供固床工之作用力為 R，而平行於水流之靜壓動壓合力為 $(\int_0^{\theta} \frac{(\gamma h1+\gamma h2)*h}{2}\cos\theta d\theta+2\rho AV^2)$，則其數值會等於 $R\sin\frac{\theta}{2}$，而垂直於水流方向之力 $\int_0^{\theta} \frac{(\gamma h1+\gamma h2)*h}{2}\sin\theta d\theta$ 則會等於 $R\cos\frac{\theta}{2}$。

三、滑動分析

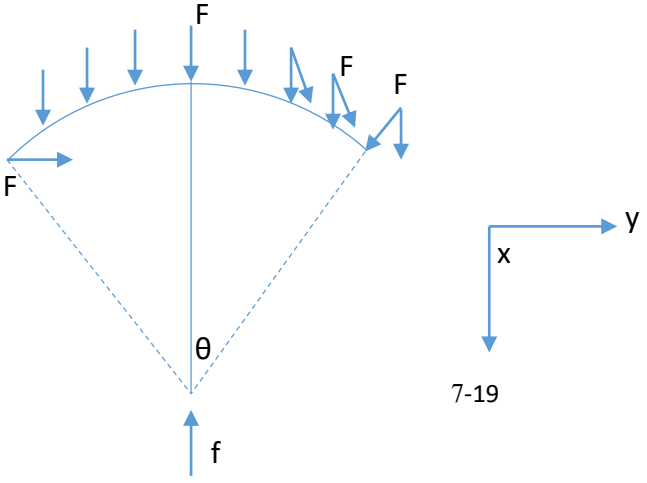


假設水面高度為 h，則可得靜壓之合力如下圖

$$F=\frac{1}{2}\gamma_n\times h^2$$

若水位比固床工高的情況下為，假設水高於固床工 h_1，則靜壓為 $\frac{1}{2}\gamma_n\times h^2-\frac{1}{2}\gamma_n\times h_1^2$

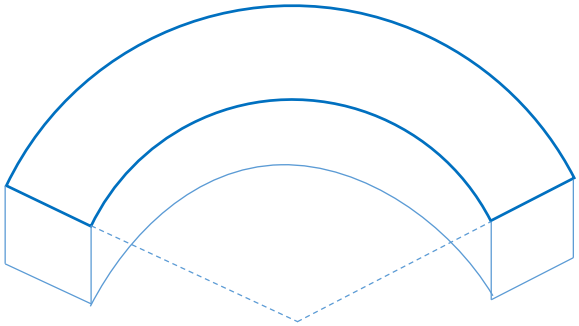
將固床工劃分為多個無限多個小剖面並計算分力如下:



則可得合力 $ZF_X = F_{\cos 1} + \cdots F_{\cos n} \times 2$

$$= F\left(\cos\frac{n+1}{2} \times \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\right)}{\sin\frac{1}{2}}\right) \times 2$$

而摩擦力 f 計算如下:



1.5

$$\forall = \left(\pi R^2 \times \frac{\theta}{360} - \pi(R-1.5)^2 \times \frac{\theta}{360}\right) \times 1.5$$

則 $N = W = 23850 \times \forall(s)$

$f_{s\ max} = M_s \times N$

可得到動$F_S = \frac{F_{s\ max}}{ZF_x}$，並看其數值有無大於 1.5，若是則滑動。

四、翻倒分析

$Fs=\frac{\sum M_R}{\sum M_0}$

$M_0=\frac{1}{3}$*1.5*靜水壓

M_R=0.75*w

則視 Fs 有無大於 3，若是則會翻倒。

五、安定分析

拱型固床工進行安定分析時所需考慮之作用力包括自重、靜水壓力、動水壓力、土壓力以及抗摩擦力。

(一)自重

固床工自重為固床工全部體積與其構築材料單位重之乘積，可表示為：

$$W = \gamma c Vs$$

其中γc=材料單位重量，一般混凝土材料 γc = 2.3~2.4t/$m3$；Vs=固床工體積。

(二)靜水壓力

靜水壓作用於固床工上游面之靜水壓力合力及其合力作用點可寫為：

P_{wh} =$\frac{1}{2}\gamma_w H_o^2$*r$\theta$ ，h_{ce} =$\frac{H0}{3}$

其中 r 為拱型半徑、θ 為張角。

水自重及其作用之位置為：

P_{wv} =$\frac{1}{2}\gamma_w$mH_o^2*rθ ，h_{ce} =L-m*$\frac{H0}{3}$

以及須計算被拱型分散而傳遞至兩岸之力為

$\int_0^{\theta} \frac{(\gamma h1+\gamma h2)*h}{2}$sinθdθ，其會等與邊壁提供之支撐力，針對安定分析須找到其合力作用點以計算力矩。

(三)動水壓力

作用力為ρhv^2，作用點位置為 h/2

(四)土壓力

假設固床工位於底床中之長度為 h

則主動土壓力 $\mathrm{Pa} = \frac{1}{2} ka \times rs \times h^2 \quad \left(ka = tan^2 \left(45° - \frac{\theta}{2} \right) = 1 \right)$

被動土壓力 $\mathrm{Pp} = \frac{1}{2} kp \times rs \times h^2 \quad \left(kp = tan^2 \left(45° - \frac{\theta}{2} \right) = 1 \right)$

(五)抗摩擦力

抗摩擦力之值為自重×tanØ。

則以上述五種力分別計算其力矩以推估拱型固床工之安定性。

第三節 不同拱度之上拱型固床工、下拱型固床工分析比較

本計畫經過收集資料、數值模擬力學性質、數值模擬輸砂性質以及進行水槽實驗得到多樣化不同之數據，分述討論。

數值模擬力學性質章節共模擬了 5 種不同拱度之固床工，模擬之數據顯示在相同流量下，上拱型固床工之受力、力矩以及位移之數值皆略高於下拱型固床工，如圖 7-28~7-30 所示，並且最大應力以及最大位移之數值均隨著拱度增加而上升，惟力矩值較特殊，其最小值是弧長為 37.9574m 的固床工，而由於從模擬圖看到，於相同上游邊界條件下，其結構強度主要差異在於固床工兩岸銜接處發生最大應力以及力矩，上拱型固床工為近上游處，下拱型固床工則為近下游處，若是其數值較大，則可能會發生破損甚至從兩側翼牆斷裂之情形，因此固床工之構建較不建議拱度過大之固床工，並建議兩岸銜接處可以採取局部加厚，或是以漸進增厚之方式降低應力，並加以於銜接處增加鋼筋分布，強化固床工之抵抗力。

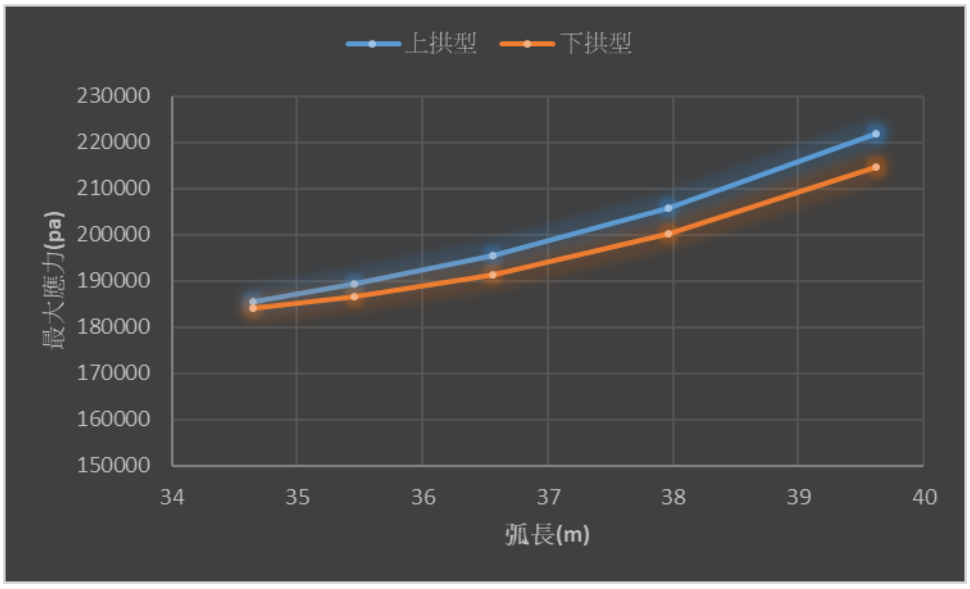


圖 7-28 上下拱型固床工應力與弧長關係圖

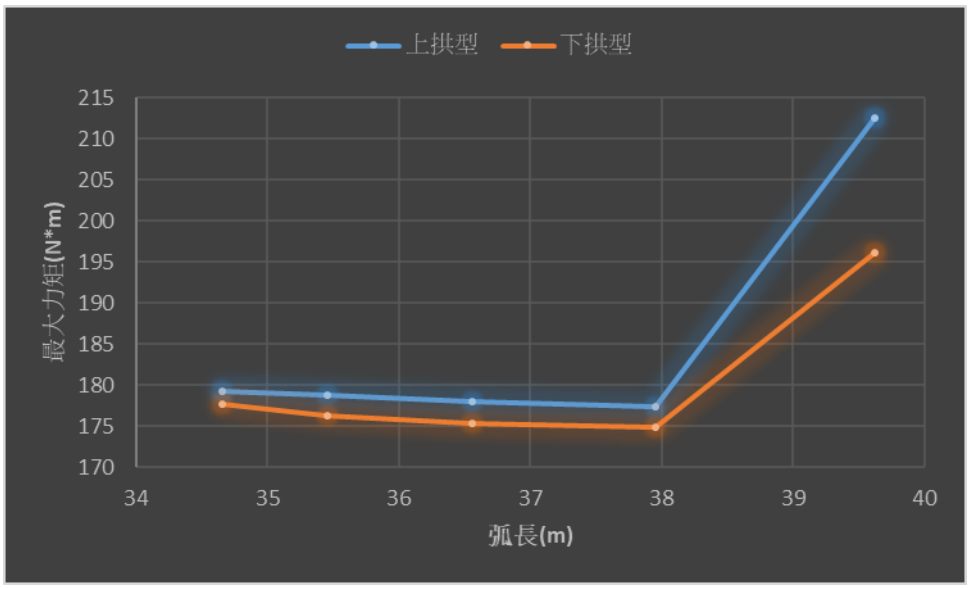


圖 7-29 上下拱最大力矩與弧長關係圖

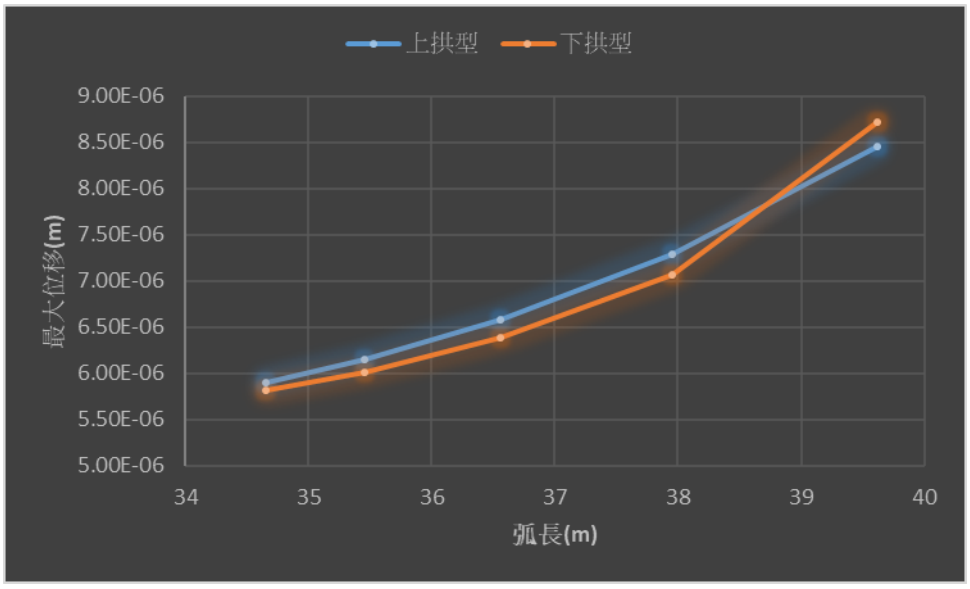


圖 7-30 上下拱型固床工位移與弧長關係圖

另從 ANSYS 之模擬可以看到上拱型固床工在相同拱度下其流速多小於下拱型，且其最大流速是隨著拱度增加而降低，因此從模擬結果，拱度越大其降低的流速越多，然而從前部分之力矩值討論可以得知拱度到達一定後會急遽增大，因此不建議構築拱度較大之固床工。

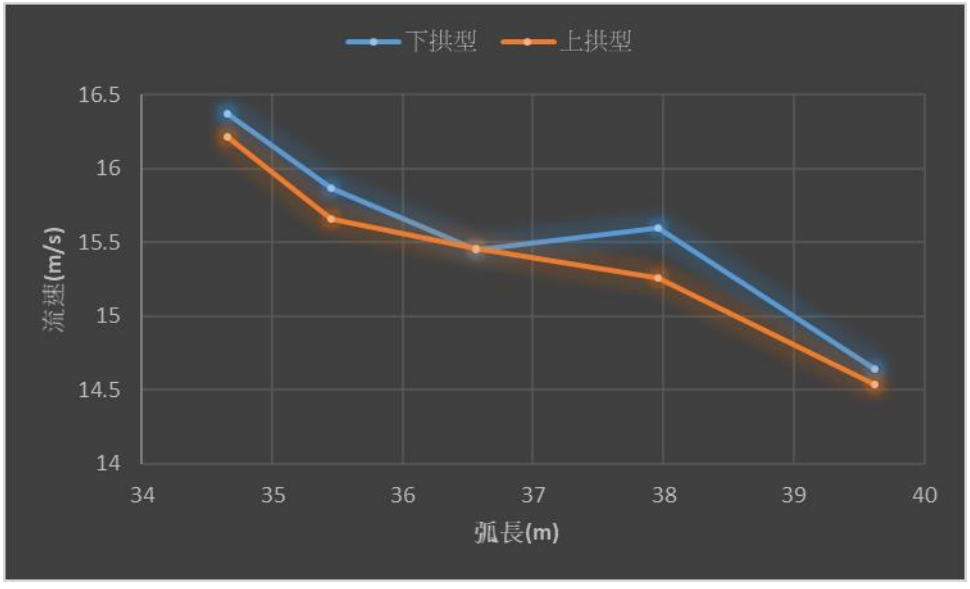


圖 7-31 上下拱固床工流速與弧長關係圖



圖 7-32 上拱型固床工實驗、模擬沖刷比較斷面圖

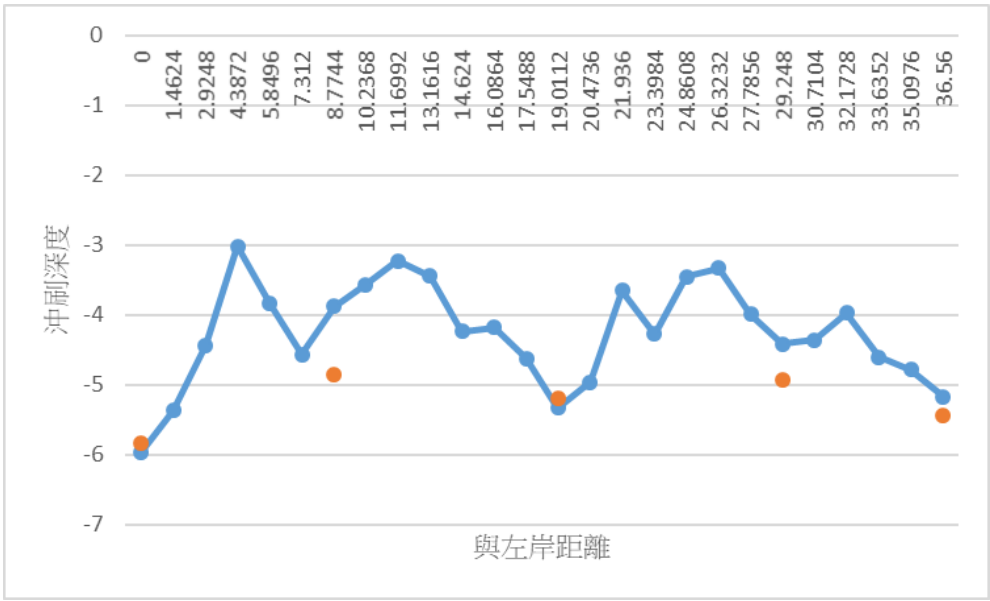


圖 7-33 下拱型固床工實驗、模擬沖刷比較斷面圖

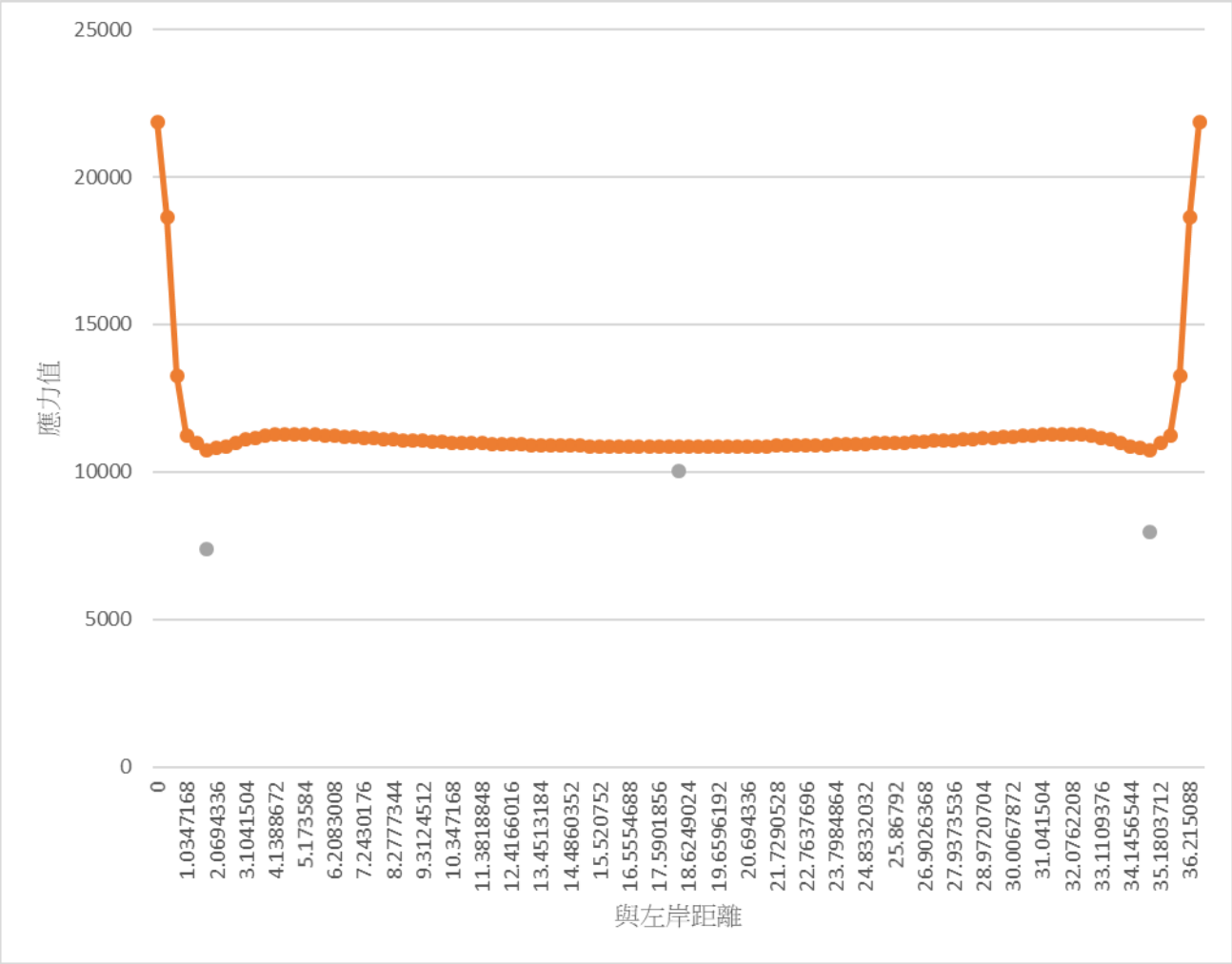


圖 7-34 上拱型固床工實驗、模擬應力比較斷面圖

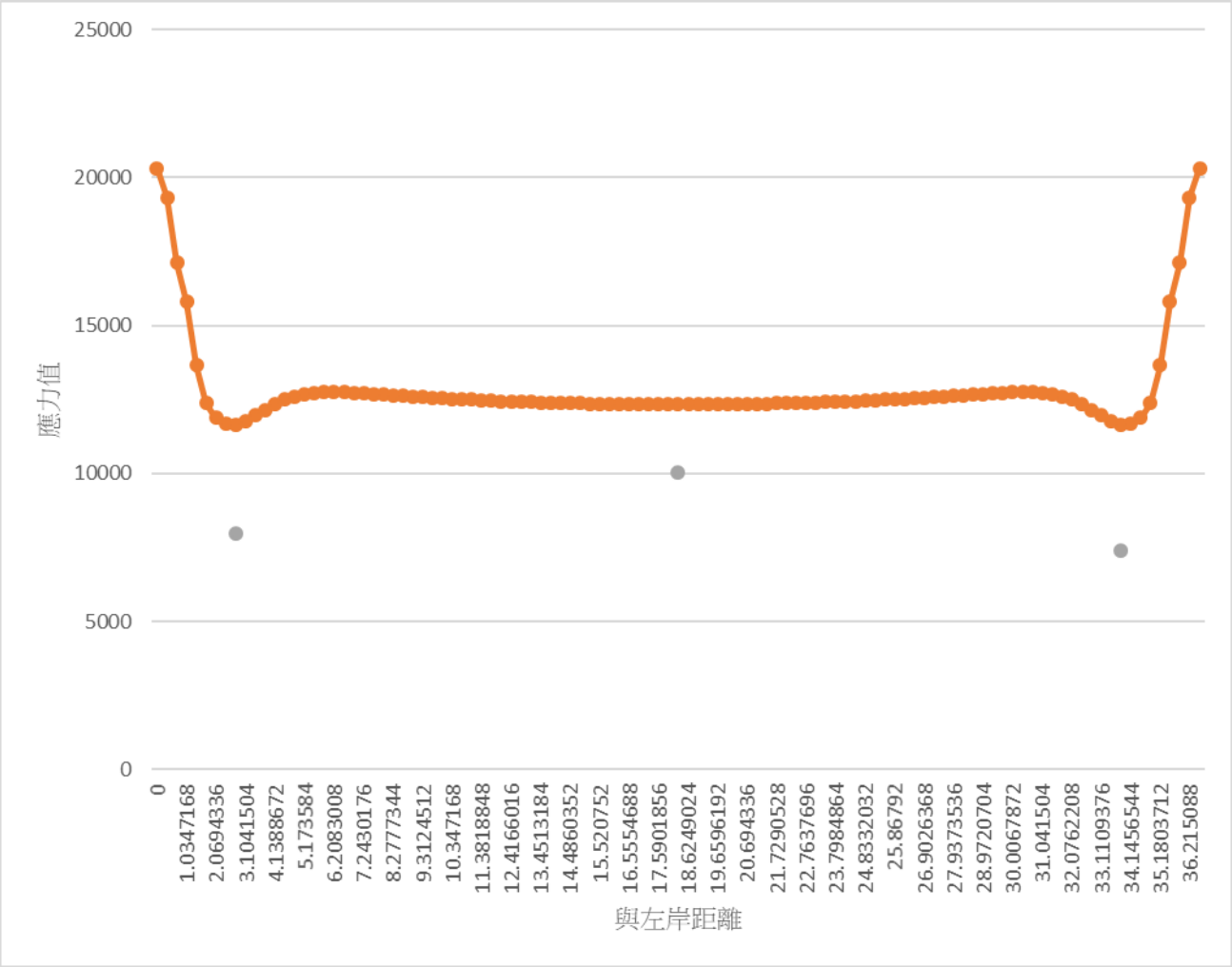


圖 7-35 下拱型固床工實驗、模擬應力比較斷面圖

綜合來說，模擬試驗結果顯示上拱型固床工為較適用之工程，由斷面圖可以看出雖然兩岸銜接處最大應力上拱型固床工大於下拱型固床工，但其餘受力面均較小，而於相同上游邊界條件下，上拱型固床工之上游面之極大流速較下拱型為低，相對穩定性為高，另由於下拱型固床工其分散水流之現象會使下游段邊壁產生較大之影響，長時間沖刷下可能導致損毀，建議可以進行下游兩岸補強作業以降低危險。

而上拱型固床工透過集中水流，能夠於其下游面沖刷出一適合中型水生生物棲息之深潭，而透過模擬分析認為弧長為 37.9574m 時的上拱型固床工有較好的表現，其能有效降低流速，同時其於兩岸處所

造成的力矩值也為最低，產生的位移雖然微高但其過位移模擬可以看到最大位移占比之區塊較小，透過工程補強也能經由小區塊補強以達到目的。

由斷面圖可以看到，上拱型固床工中間處掏刷深度較下拱型固床工為深，而於兩岸銜接處掏刷深度則為下拱型固床工較上拱型固床工深。另由實驗照片以及斷面圖可以看出上拱型較下拱型固床工淘刷較集中、安全性較大，於補強底床作業時較易評估需補強之範圍。

透過水槽實驗也能觀察到其與其他拱度相比其沖刷坑深度較大，能營造一適合水生生物之深潭，但其下方掏刷現象嚴重，大量的洄流現象導致固床工之下方有掏空之情形，如圖所示，於工程時需更加注意其穩定，建議可於掏刷處下方以及固床工下游面進行補強作業，以降低損毀風險，否則若水流沖擊力太大，會產生滑動或傾倒等安定性問題。

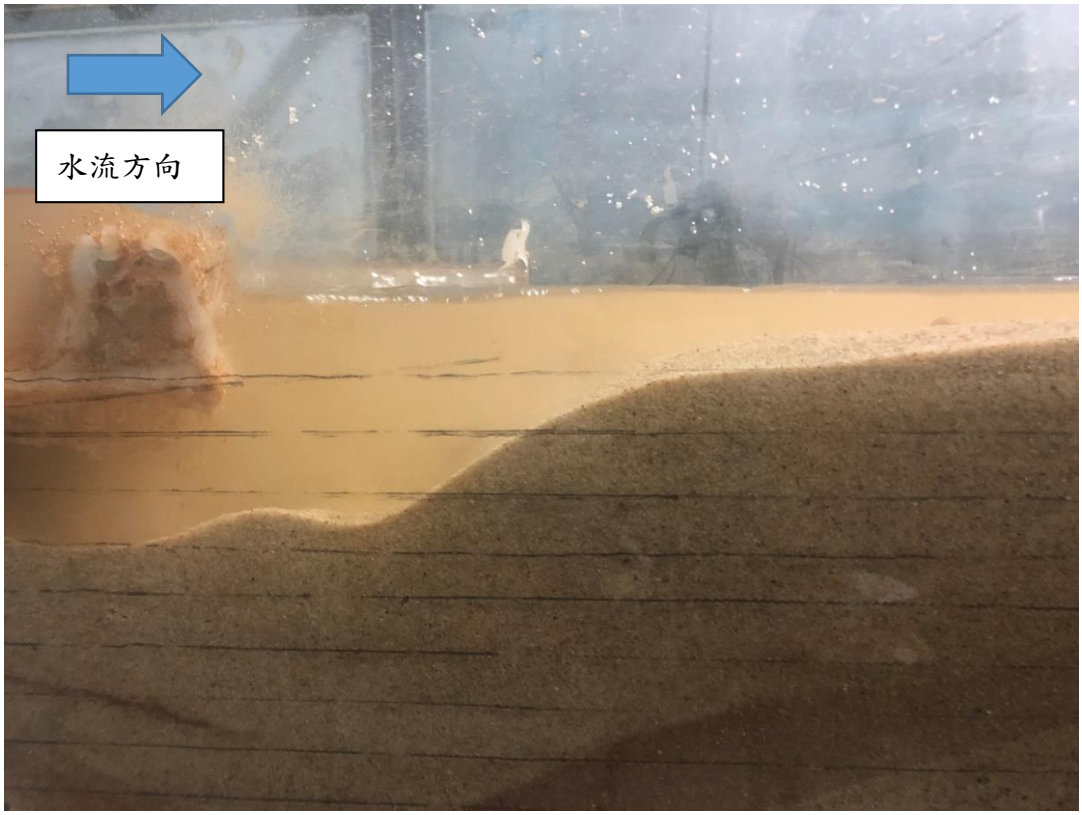


圖 7-36 上拱型固床工底部掏刷情形

於水槽實驗之照片也可看出，上拱型固床工在下游面之兩岸，其掏深均大於中段處，且受水流影響可以看到於水槽後段，掏刷之沙子有較多之部分堆積於中段處，如圖 7-33 所示，若長時間可能會形成一高於水面之區域。



圖 7-37 上拱型固床工下游面掏刷情形

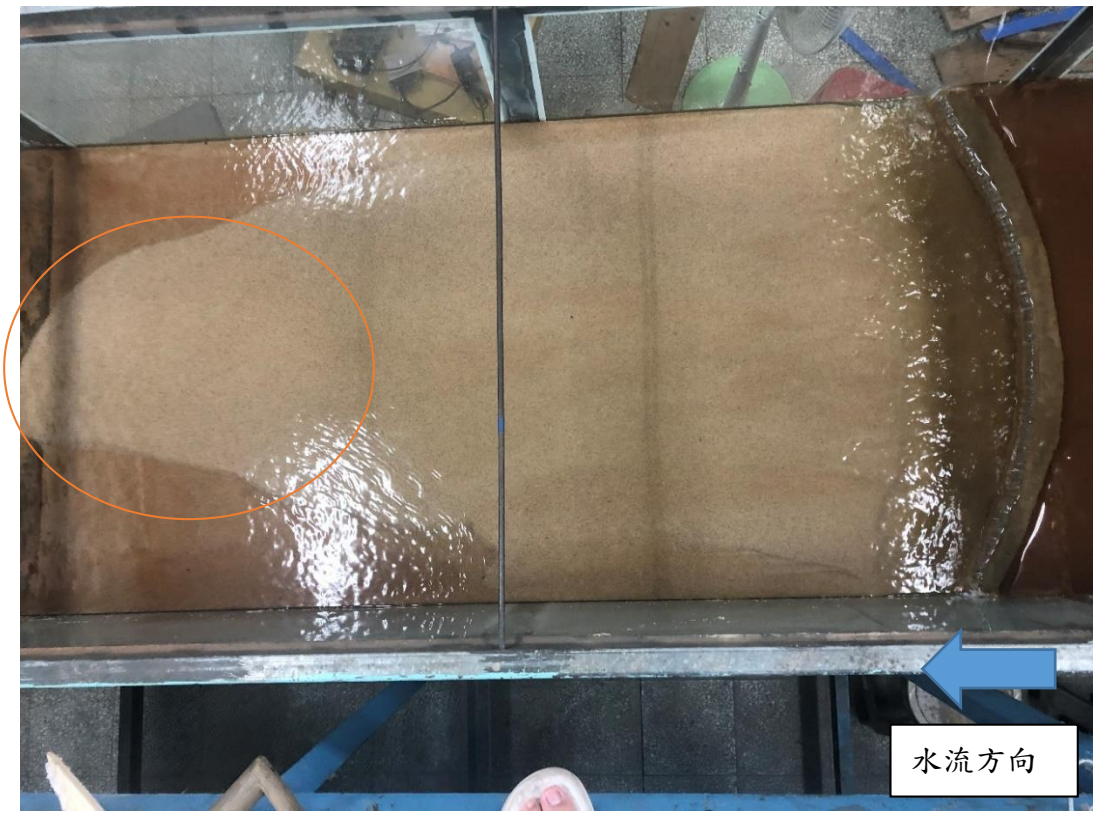


圖 7-38 上拱型固床工下游面淤積情形

而下拱型固床工雖然其於受力、力矩以及位移之數值皆略低於上拱型固床，但其因下拱特性會將水流分散，於下游邊壁產生高流速之情形，從模擬圖可以看到其會對下游邊壁產生嚴重的侵蝕現象，而且流速相較上拱型固床工較快，

而透過水槽實驗數據可以看到其下游之沖刷坑之沖刷現象並不如上拱型固床工穩定，且下游之沖刷分布也不穩定，如下圖所示，較不適合需以穩定為基礎之固床工工程。

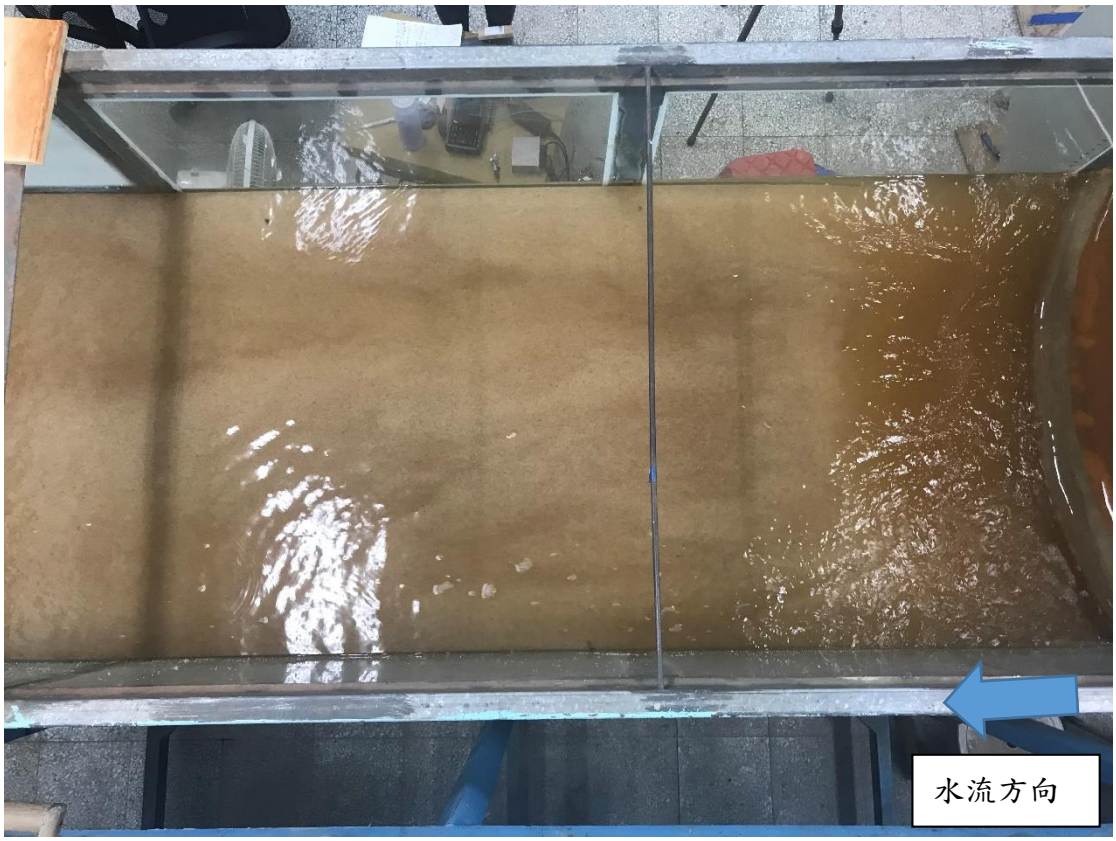


圖 7-39 下拱型固床工下游沖刷現象

而於固床工工程加上一低水河槽，如圖 7-36 所示，經數值模擬能降低流速，透過模擬，能初步得到下拱型固床工流速降低了 1.71m/s，上拱型固床工則降低了 1.53m/s，但要注意的是由於流線會往中間集中的緣故，其所受之沖蝕情形勢必會較嚴重，因此需於工程其必須注重其抗沖蝕之強度。

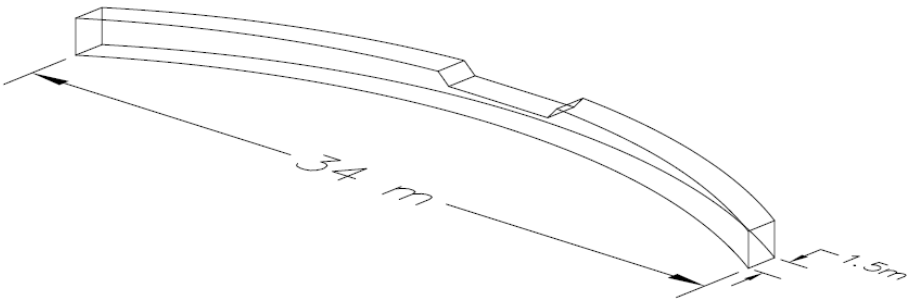


圖 7-40 含低水河槽之拱型固床工

第八章 結論與建議

第一節 結論

一、數值模擬力學性質成果

(一)ABAQUS

1.固床工最大應力會隨著拱度增加而上升，隨著拱度的增加其應力變化也增加。

2.隨著拱度增加固床工之最大力矩其有起初有輕微變小之趨勢，然而在拱度到達一定值後其力矩值急遽增加，初步判斷為其拱度已到達一臨界值而導致固床工上游面之兩岸處有較大之力矩值產生

3.固床工最大位移之數值會隨著拱度而增加，而增加的趨勢微小且隨拱度增加而上升。

(二)ANSYS

1.下拱型固床工之流線經下拱分散後，會集中於下游面兩岸之邊壁，並產生較大之流速，若經長時間沖蝕而沒有進行補強工作可能會導致河堤掏空，河岸崩落等情形。

2.上拱型固床工流線經上拱集中後，會集中於渠道中央，並產生較大之流速，最大流線相較於下拱型固床工不穩定，可以看到其下游面底部有許多紊流，其會持續掏刷河道底部以及固床工地基，若經長時間掏刷而沒有進行補強工作可能會導致固床工傾倒或不穩定等情形。

3.水流之流速會隨著拱度之增加而降低。

4.含低水河槽固床工經模擬能有效降低水流流速，降低沖刷。

二、數值模擬輸砂性質成果

(一)下拱型固床工:

1.彎曲段河道之固床工上游多為沖刷，推測可能是固床工本身位於彎道處;而直線段固床工上游則造成大面積的淤積。下游的部分，彎曲段之河道右岸為沖刷，左岸為淤積，即建置在彎曲斷的固床工所呈現的沖淤分布乃受到河道凹、凸岸的影響。

2.位於直線段之固床工下游未見如上拱型固床工之集中於河道中央的沖刷坑，而是產生較為分散的沖刷，值得注意的是沖刷依然發生於緊鄰固床工基礎處。

(二)上拱型固床工:

1.彎曲段下游渠道中心緊鄰固床工處為淤積，推測可能原因是由於彎道段的流速較直線段較慢，因此無法將砂石往下游傳輸，導致固床工下游處淤積。而直線段固床工下游渠道中有較大之沖刷坑。在固床工上游段，彎曲段與直線段模擬結果皆為淤積。

三、水槽試驗成果

(一)不管固床工拱度為何，流量與水深呈正相關，及當流量越大時，沖刷坑尾部水深越深。這表示固床工拱度不同並不會對沖刷坑尾部水深造成太大差異，且流量

越大時，沖刷坑長度越長。

(二)上拱型固床工拱度越高，固床工下游渠道中心處之沖刷越深，渠道兩側之沖刷反而較拱度低的固床工沖刷的深度淺。這可以表示當上拱型固床工拱度愈大，其水流的能量越趨集中於渠道中心，這個現象在小流量時較顯著。

(三)上拱型固床工之渠道中心沖刷坑深度大於渠道兩側沖刷坑深度，且當固床工拱度越高時，差異更加顯著，而下拱型固床工之兩側沖刷坑深度無顯著差異。

四、總論

(一)透過數值模擬能夠較快速且較經濟的試驗水工構造物於水流中之變化、流況以及流場等。

(二)此次數值模擬認為在弧長與兩岸之距離之比值為 1.11639412 時之上拱型固床工為較好之固床工構造。

(三)拱型固床工之最大應力、最大位移均隨拱度增加而上升，最大力矩值則是於拱度較小時隨拱度增加下降，而後於拱度達一定值後急遽上升。

(四)現今常使用之含低水河槽固床工經模擬能有效降低水流流速，降低沖刷。

第二節 建議

一、溫度也對構造物之結構有一定之影響，建議未來可以加入溫度評估於數值模擬中。

二、未來相關研究建議透過大量之模擬結果以回歸並做一圖表表示河道寬度與上拱、下拱或水平之關係。

三、本次研究尚無歸納出一可供工程使用之設計公式，建議未來若有相關研究可透過在不同流量下之大量模擬情形以回歸出可使用之相關設計公式。

四、本次研究之模擬均使用單一河床質進行模擬討論，建議未來可以納入不同河床質進行模擬分析。

五、若用於初步現地沖刷、流速以及水深模擬，建議可使用Riverflow2D，其建模較容易且模擬時間較快速，可以較容易看出其沖刷、流速、水深之分布以及變化。

六、台灣基於生態考量，構建於坑溝、野溪之固床工工法以砌石(石樑工法) 較為適合，然由於砌石(石樑工法)相關模擬建模相對困難許多，因此此次計畫尚無進行相關分析，但於相同外在因素下，其破壞型式應類似，建議未來若有相關研究可進行分析探討。

第九章 工作進度

工作項目包括拱型固床工文獻與現地工程資料蒐集、固床工數值模擬力學性質、固床工數值模擬輸砂性質、現地調查與室內實驗、製作圖說及設計準則等 5 大項。工作進度如表 8-1。

表 9-1 工作進度表

時間 工作項目	108年12月	108年3~4月	108年5~6月	108年7~8月	108年9~10月	108年11~12月
1.拱型固床工文獻與現地工程資料蒐集						
2.數值模擬力學性質						
3.數值模擬輸砂性質						
4.現地調查與室內實驗						
5.製作圖說及設計準則						
工作進度 百分比(累積數)	10	25	45	65	85	100

附錄一、參考文獻

研究報告與論文

1. “大溪溪鐵路橋上游治理二期工程簡報”，行政院農業委員會水土保持局臺北分局”，2016
2. “水土保持工程設計參考圖冊”，行政院農業委員會水土保持局，2017
3. “水土保持手冊”，行政院農業委員會水土保持局，2005
4. “水仙溪下游野溪治理工程圖檔”，行政院農業委員會水土保持局臺北分局，2015
5. 王傳益，薄榮鋼，張耿偉，李昱廷，“固床工於河川棲地改善之數值研究”，水土保持學報 36(1) ，2004
6. 何國勇，碩士論文，“近直線弧型開口式固床工應用於野溪治理之研究”，國立屏東科技大學水土保持學系，2007
7. 何皓愷，碩士論文，“垂直跌水之沖刷探討”，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2017
8. 吳尚訓，碩士論文，“固床工間距對河床穩定性影響之研究”，逢甲大學土木及水利工程學系，2000
9. 吳紋瑩、盧昭堯，碩士論文，“雙道固床工下游沖刷之室內試驗研究”，國立中興大學土木工程學系，2012
10. 吳嘉俊，“固床工間連續帶工間距之研究”，89 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 66 號，2001
11. 吳嘉俊，“透水式固床工之工法研發與水理特性研究”，行政院農業委員會水土保持局，2016

12. 李木青，“固床工規劃設計理論”，教育訓練講義，2018
13. 李柏葦，碩士論文，“雙道固床工下游沖刷坑流場之紊流特性研究”，國立中興大學土木工程學系，2014
14. 李豐佐，“應用 UAV 影像分析技術於固床工變動及周圍流場之研究”，2017
15. 林原巧，碩士論文，“開口式固床工應用於野溪整治之研究”，國立屏東科技大學水土保持學系，2005
16. 林雲晛，黃宏斌，碩士論文，“固床工水理特性之研究”，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2002
17. 施東榮，“固床工之設計”，教育訓練講義，2018
18. “修訂版水土保持手冊”，行政院農業委員會水土保持局，2017
19. 孫崇育，碩士論文，“以渠槽試驗比較透水與不透水固床工下游之沖刷坑差異”，逢甲大學水利工程與資源保育學系，2015
20. 徐金煌，碩士在職專班論文，“以 Pix4DMapper 進行 UAV 影像快速空間資料產製之探討”，國立臺灣師範大學地理學系第一屆空間資訊，2017
21. 柴紡武，“固床工抑制溪床泥砂沖刷效果之研究”，中華水土保持學報 32(3)，2001
22. 張則安，碩士論文，“固床工間距之研究”，國立中興大學水土保持學系，1994
23. 梁惟喬，碩士論文，“固床工改善對河道底床環境影響之試驗研究”，逢甲大學水利工程學系，2005
24. 連惠邦，“防砂壩下游河床演變及其整流工程配置模式之研究(一)”，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農

委會林業特刊第 50 號，2001

25. 連惠邦，“固床工過流之水理探討”，教育訓練講義，2018
26. 郭昌樺，碩士論文，“固床工間距對河床穩定性影響之研究”，國立中興大學水土保持學系，2002
27. 彭建文，碩士論文，“軟弱岩質河道固床工之破壞機制及穩定分析”，國立交通大學土木工程學系，2014
28. 游繁結，“固床工間距之調查研究 (三) ”，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號，1995
29. 黃宏斌，“105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討”，行政院農業委員會水土保持局，2016
30. 黃宏斌，“107 年流域綜合治理之成效評析之工作執行計畫書”，行政院農業委員會水土保持局，2018
31. 黃宏斌，“不同型式固床工應力分析”，教育訓練講義，2018
32. 黃宏斌，“固床工與沖刷坑”，教育訓練講義，2018
33. 黃宏斌，陳樹群，“台灣水土保持名人錄”，行政院農業委員會水土保持局，2007
34. 黃宏斌，“智慧化土石流預警系統建置(2) ”，行政院農業委員會水土保持局，2017
35. 黃宏斌，“智慧化土石流預警系統建置”，行政院農業委員會水土保持局，2016
36. 黃彥文，黃宏斌，碩士論文，“固床工與輸砂量之相關研究”，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2003
37. 黃政達，碩士論文，“由動床試驗探討固床工之間距”，中興大學水土保持學系，1995

38. 新北市政府，水仙溪治理基本團隊，2011
39. 詹勳全，“固床工下游之沖刷型態”，教育訓練講義，2018
40. “縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告”，新北市政府，2011
41. 謝佩瑜，碩士論文，“斜坡式固床工對減緩河床沖刷效能之研究”，逢甲大學水利工程與資源保育學系，2008
42. 聶志成，2007，應用 Fluent 於土石流對防砂壩衝擊力之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文
43. 郭正壹，2008，河溪固床工配置生態化之研究，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文
44. 吳健賓，2013，丁壩區之三維流場研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文
45. 楊廣培，2015，卵礫河床載衝擊破壞河道固床工之模擬分析，國立交通大學土木工程學系碩士論文
46. 池 谷浩，“砂防流入工之計畫和實務”，1977
47. 泉 岩男，“床固工の溪床侵蝕防止效果について”，新砂防 59，1984
48. 木村喜代治、高橋迪夫、長林久夫，“流路工における床固工の間隔に關する研究”，新砂防，Vol. 43，No.2，1990
49. Aberibigbe, J. and O. Rajaratnam. “Effect of sediment gradation on ersion by plane turbulent wall jets ” , Journal of Hydraulic Engineering.124(10), 1998.
50. Breusers, H. N. C. and Raukivi, A. J. “Scouring” A. A. Balkema, 1991.
51. Bennett, S.J., Alonso, C.V., Prasad, S.N., and Römkens, M.J.M. “Experiments on headcut growth migration in concentrated flows

typical of upland areas.” *Water Resour*. Res, 36(7), 2000.

52. Dietz, J.W. “Ausbildung von langen pfeilern bei Schraganstromung am Beispiel der BAB-Mainbrucke Eddersheim, ” Mitteilungsblatt der BAW,(31), 1972.
53. D’Agostino, V. “Indagine sullo scavo a valle di opera trasversali mediante modello fisico a fondo mobile.’’*Energ.Elettr*: ,71(2), 1994.
54. Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. “Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump’’ J. Hydraul. Res., 23(4), 1985.
55. Gaudio, R.,A. Marion, and V. Bovolin “ Morphological effects of bed sills in degrading rivers,” Journal of Hydraulic Research. 38(2), 2000.
56. Melville, B. W. and Coleman, S. E. “Bridge Scour’’ Water Resources Publications, LLC, 2000.
57. Oliveto, G., Comuniello, V. and Onorati, B. “Temporal development of local scour downstream of positive-step stilling basins” River flow 2008, vol.2, 2008.
58. Pagliara, S. “Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps’’ J. Hydraul. Eng., 133(11), 2007.
59. Wu C.-C., C.-H. Hou, C.N. Chen, and C.-Y. Shih “Determination of groundsills interval for stream training, ” Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. 4(6), 2002.
60. 許玓君，碩士論文，2018，翡翠大壩壩體長期變形趨勢研究

網路資源

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所-規劃工具與知識，

https://www.wrap.gov.tw/pro72.aspx?type=0207000000

2. 行政院農委會水土保持局-水保榮耀，https://www.swcb.gov.tw/form/index-1.asp?m=3&m1=3&m2=694&gp=688&id=3419

3. 花蓮電子報，https://www.ecoast.com.tw/trave/item/3707-2017-12-07-05-36-47

4. 士盟科技股份有限公司，

（1） http://www.simutech.com.tw/product-simulia.php?cid=1&kid=24&id=19

（2） http://www.simutech.com.tw/product-simulia.php?cid=1&kid=25

5. 行政院公共工程委員會，公共工程技術資料庫，石樑固床工之示意圖 http://pcces.pcc.gov.tw/CSInew/Default.aspx?FunID=Fun_5_3

6. RiverFlow2D 官網

（1） http://www.hydronia.com/riverflow2d/

（2） http://s377446641.initial-website.com/two-dimensional-models/riverflow2d-

附錄二、期初審查意見回覆

審查意見	回覆說明	對應章節
拱型固床工對護岸之作力影響程度結果，可提供設計參考及補強對策研擬。	謝謝委員指教，將於未來進行模擬後補充相關結果於報告書中。	第七章第一節
P3-1，建議增加說明上拱型、下拱型固床工之尺寸等資料。	謝謝委員指教，相關施工工程尺寸及資料已補充於第三章。	第三章
P3-1，目前材料選擇以混凝土壩進行應力分析，自然工法的固床工特性可能略有不同。	謝謝委員指教，後續模擬將會進行相關特性探討並於後續補充於第六章。	第七章第一節
P4-4，建議將相關參數選擇方式完整列出，如 A 之值如何根據泥砂粒徑、底床形式、植生和渠道地形決定。	謝謝委員指教，相關參數選擇方式已補充於 P5-4。	第五章第一節
P6-1，製作圖說及設計準則中以自然工法施作的固床工，除本	謝謝委員指教，目前由於相關經費考量，此次計畫主要執行以	第六章

計畫所提之類型、材料外，是否包含其他類別。	近自然工法施作之固床工為主。	
拱型固床工長度是否適合在中大型集水區(比如溪床寬大於 30 公尺以上)應用。	謝謝委員指教，其在透過計算下若為結構穩定以及地基穩固下是合適的。	第六章
P.1-1「近自然工法」與 P.6-1「自然工法」名詞前後不一致。	謝謝委員指教，已修正於 P7-1。	第七章第一節
本案採用的分析軟體有數種，是否為免費？是否有免費軟體，以利於推廣同仁、技師規劃設計應用。	謝謝委員指教，目前使用的四個軟體中，四個均為收費軟體，其中 ANSYS-FLUENT 有研究用途免費試用版可以使用，然其網格數有限制，RIVERFLOW 2D 則是有三十天試用版可提供使用。	第三章、第四章
請補充說明「圖說及設計準則」規劃之章節架構及內容。	謝謝委員指教，已補充內容於第七章。	第七章

附錄三、期中審查意見回覆

審查意見	回覆說明	對應章節
P.2-3 $L/H=2.99D^{0.442}e^{3.042S}$，e 為自然對數？仍請說明。	謝謝委員指教，e 為自然對數，已補充於 P.2-3	第二章 P.2-3
P.3-1 水仙溪下游野溪治理工程，本計畫已搜集現況資料，建議團隊就該工程做更深入探討。 (1) 改變較大與較小上拱曲度。 (2) 固床工深水槽兩側翼牆改為往兩岸緩斜。	謝謝委員指教，會於數值模擬中增加改變較大與較小上拱曲度之模擬以及固床工深水槽兩側翼牆改為往兩岸緩斜之情形於力學性質模擬中，並視時間允許增加於輸砂性質模擬中。	第四章 P.4-1~4.38
P.3-1 固床工除了穩定流心，近來流行中央採低水流路設計，建議可分析其力學性質及水理機制。	謝謝委員指教，會增加含低水河槽之固床工模擬於力學性質模擬中。分析其流場、流速以及流線變化。	第四章 P.4-1～4-38
P.4-1 經數值模擬結果其流線、流速、流況顯示上拱固床工較適合做為水土保持工程設施，因此建議把精力投注於上拱固床工。	謝謝委員指教，會進行較多上拱型固床工之模擬以及性質探討於此次計畫中。	第四章 P.4-1～4-38
P.4-37、P.4-38 0.5m 高下拱型固床工於剖面 z=0 之流況，但缺 0.5m 高上拱型	謝謝委員指教，已補上於 P.4-37、P.4-38。	第四章 P.4-37、P.4-38

部分。		
P.5-8 選擇將固床工設置於如圖 5-5(彎道、束縮)之溪段是否會造成一些不該呈現的問題？	謝謝委員指教，設置於彎道處有造成凹岸處沖刷、凸岸處淤積之情形產生。	第五章 P.5-8
P.5-15 圖 5-16，判斷為因河道束縮而使流速增加，宜更詳細說明。如下游出流處，河道束縮指何處？圖 5-17 上游有較深之水深，似因適逢轉灣段形成凹，如為直線段應無此現象。	謝謝委員指教，已增加標示於圖 5-16，針對圖 5-17 會另外尋找直線段之河段已進行相關模擬並進行分析。	第五章 P.5-15
P.6-1 固床工或河床內橫向構造物損毀，多因基礎掏刷影響，導致斷裂、倒伏而破壞，較少直接因撞擊破壞之情形，經渠槽試驗及各項推論可否得出相關結論？	謝謝委員指教，經由試驗顯示若在瞬間水流較大時，有可能造成固床工中段部分產生撞擊之破壞。在一般情形下則多為受底床基礎掏刷嚴重影響。	第六章 P.6-1
P.7-1 第七章頁碼請修正。	謝謝委員指教，已修正。	第七章 P.7-1 ~ 7-22
P.7-1 第七章圖說設計準則，應與前面分析有因果關連性，亦即應依前面數值模擬分析結果進行分類設計，某種情形下建議應有何種設計模型，惟本案似乎因果關係連接	謝謝委員指教，於有較完整之模擬結果進行分析後，會針對不同形式固床工進行分類以及合適度探討。	第七章 P.7-1 ~ 7-22

性薄弱。		
P.7-1 不論何種形式之固床工，其設計應力要件影響因子主要為水流方向、沖擊力大小、河床懸浮質與洪流期間水流載體、及地質條件，唯本計畫分析地質材料卻為河床質分析，雖可瞭解長流水及豪大雨期間對於壩體之磨耗影響，為壩體基礎之地質要件應夠為重要，屬於壩體穩固之基礎，卻未見考慮為數值模擬力學參數，似有不妥。	謝謝委員指教，由於此次計畫中之數值模擬力學性質為針對拱型固床工之內部及表面受力影響進行分析以及探討，因此主要設定情形為地基完全固定以及完全掏刷下之情形， 另因目前之工程於構築前多有對其地質進行穩定性之考量，目前較無考慮地基之地質性質對於壩體之影響，未來若有相關之研究計畫會納入考量。	第四章 P.4-1～4-38
P.7-7-5、P.7-7-6 拱型排砌塊石固床工平面與立面圖，如是排放可能造成護岸之毀損，得不償失。	謝謝委員指教，目前工程於護岸處均有針對基礎已混凝土進行包覆，使固床工能與護岸有較結實且安全之連結，也較不易產生護岸之毀損。	第七章 P.7-5、7-6

附錄四、期末審查意見回復

審查意見	回覆說明	對應章節
一、在相同拱度下，上拱型固床工最大流速小於下拱型，且最大流量隨著拱度增加而降低，所以設計上為上拱型較佳，而已完工之下拱型固床工有無改善空間。	謝謝委員指教。由斷面圖可以看出雖然兩岸銜接處最大應力上拱型固床工大於下拱型固床工，但其餘受力面均較小，另經模擬實驗結果可以發現由於下拱型的特性分散水流，會導致固床工下游處兩岸有較大之流速產生，長時間沖刷下可能導致損毀，建議可以進行下游兩岸補強作業以降低危險。	第七章第三節 P.7-27
二、對於工程應用很有幫助，但未來若有	謝謝委員指教。待日後進行相關研究時會	第八章第二節 P.8-3

進一步的研究，建議可作一圖示表示河道寬度與上拱、下拱或水平之關係或如何取捨、決定。	做進一步之分析，另需較大量之模擬結果以回歸並整理河道寬度與上拱、下拱或水平之關係。	
三、另外厚度是否有影響？與兩岸銜接建議如何設置以強化，提高應力？ 可於報告書中建議一章補充，供實務之參考。	謝謝委員指教。已補充於第四章第一節 P.4-69、4-70、4-71，經數值模擬後可以看到最大應力、最大力矩、最大位移均隨固床工厚度增加而減少，其下降之趨勢隨厚度增加趨緩。 建議兩岸銜接處可以局部加厚，或是以漸進增厚之方式降低應力，並加以於銜接處增加鋼筋分布，強化	第四章第一節 P.4-69、4-70、4-71 第七章第三節 P.7-28

	固床工之抵抗力。	
四、在相同條件下，上拱型較下拱型固床工淘刷性小、安全性大？對於兩者在結構強度及穩定性上是否有分析其差異？	謝謝委員指教。由斷面圖可以看到，上拱型固床工中間處掏刷深度較下拱型固床工為深，而於兩岸銜接處掏刷深度則為下拱型固床工較上拱型固床工深，另由實驗照片以及斷面圖可以看出上拱型較下拱型固床工淘刷較集中、安全性較大，於補強底床作業時較易評估需補強之範圍。 另透過數值模擬可見，於相同上游邊界條件下，上拱型固床工之上游面之極大流	第七章第三節 P.7-22、7-27、7-28

	速較下拱型為低，相對穩定性為高，其結構強度主要差異在於固床工兩岸銜接處發生最大應力以及力矩，上拱型固床工為近上游處，下拱型固床工則為近下游處，另由斷面圖可以看出雖然兩岸銜接處最大應力上拱型固床工大於下拱型固床工，但其餘受力面之受力均為上拱型固床工較小。	
五、近年許多工程出現拱型固床工，然較缺少相關學理探討，本案對於工程設計實	謝謝委員指教。拱型固床工透過其拱型狀的結構能夠將施加於其上游面的衝擊力以	第七章第二節 P.7-17

務有所助益。	及靜水壓力以壓應力的形式順著本身的形狀傳遞至兩岸的銜接處，並由兩岸銜接處產生抵抗推力進而達成穩定。 透過抗壓性能良好的構築材料如有良好抗壓能力的混凝土、穩健的基座以及謹慎的評估，拱型固床工可以承受較大的力而不致損壞。	
六、本案如能透過相關分析，提出相關設計公式，將更具實用性。	謝謝委員指教。由於相關設計公式需大量在不同流量下之模擬情形以回歸出可使用之設計公式，待日後進行相關研究時會做	第八章第二節 P.8-4

	進一步之分析。	
七、建議未來可以納入不同河床質進行分析。	謝謝委員指教。待日後進行相關研究時會做進一步之分析。	第八章第二節 P.8-4
八、報告內模擬結果圖面,建議可增加流體方向,以利快速判斷模擬情境。	謝謝委員指教。已新增流體方向於報告內之圖面。	第四章、第五章
九、選定 4 種模擬軟體的原因，建議補充說明分析。	謝謝委員指教。已增加相關補充於報告中。	第四章第一節 P.4-1、第二節 4-71、第五章第一節 P.5-1、第二節 P.5-33
十、以水保局大部分的工程尺度範圍內，是否有建議適用之數值模擬軟體。	謝謝委員指教。茲認為若用於初步現地沖刷、流速以及水深模擬，建議可使用 Riverflow2D，其建模較容易且模擬時間較快速，可以較容易看	第八章第二節 P.8-4

	出其沖刷、流速、水深之分布以及變化。	
十一、固床工態樣不同，有砌石(石樑工法)及混凝土構造物等型式，其破壞型式是否不同，那種較適合坑溝、野溪。	謝謝委員指教。由於砌石(石樑工法)相關模擬建模相對困難許多，因此尚無進行相關分析，但於相同外在因素下，其破壞型式應類似，以目前台灣多基於生態考量，砌石(石樑工法) 較適合坑溝、野溪。	第八章第二節 P.8-4
十二、上拱型固床工因下游中間淘刷較嚴重，有否相關解決配套可降低下游淘刷問題。	謝謝委員指教。建議可於掏刷處下方以及固床工下游面進行補強作業，以降低損毀風險。	第七章第三節 P.7-28
十三、在上拱型及下拱型於報告中未提及	謝謝委員指教，其適用流況於數值模擬中	第五章第一節 P.5-5

其適用流況範圍，建議後續分析、補充。又，由於各野溪之設計流量不同，能否補充分析設計時應如何操作。	較無限制，惟 SRH2D 無法進行超臨界流之模擬，而目前數值模擬均假設其水流為清水流。 已補充相關設計操作於報告中，設計流量可以透過水保手冊之計算方式將其降雨量轉換為逕流量，並透過疊加得到流量歷線以設定於 Riverflow2d 以及 SRH2D 中，而透過流量計算出其流速以及應力設定於 ABAQUS 以及 Fluent 中。	