

計畫編號：SWCB-111-048

由坍流試驗進行現地量測土石流
流變參數之研究

**Application of Slump Test in Measurement of
Rheological Parameters of Debris Flow**

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

執行期間：111 年 01 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：徐郁超 副研究員

顧問：詹錢登 特聘教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 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）

由坍流試驗進行現地量測土石流流變參數之研究

摘要

土石流是泥、沙、礫及巨石等顆粒材料與水混合後之流動體，在重力作用下，沿著傾斜坡面或溝渠，自高處向低處移動的現象。按照不同的組成物質及流動條件，土石流有不一樣的流動特性與特徵。部分研究將這複雜的固液混合之兩（多）相體視為單相流的賓漢流體，並進一步透過流變模式來描述土石流體之流動特性。本計畫首先蒐集研究區域基本資料並至現地進行泥沙採樣，由不同粒徑大小之泥沙與水混和配置不同濃度的泥沙漿體，分別以流變試驗分析泥沙漿體的流變參數（屈服應力與黏滯度）及利用坍流試驗分析泥沙漿體的坍流參數（高度及坍流直徑），最終進行流變參數與坍流參數的關聯性分析，

試驗結果顯示，漿體內細粒料之組成多寡對於流變及坍流參數之影響較粗粒料顯著，流變參數（屈服應力與黏滯係數）之間存在正相關的對數型變化關係，而屈服應力與坍流度呈現負相關的對數變化關係，黏滯係數由於較易受擾動故與坍流參數呈現較為分散的關係。上述結果顯示，透過坍流參數與流變參數之關聯性，可應用坍流度-屈服應力-黏滯係數之順序快速推估流變參數。

關鍵詞：土石流、坍流試驗、賓漢流體、流變參數

Application of Slump Test in Measurement of Rheological Parameters of Debris Flow

Abstract

Debris flow is a natural phenomenon in which granular materials such as mud, sand, gravel, and boulders are mixed with water and move along an inclined slope or a ditch due to gravity. The flow characteristics of debris flow vary depending on the components and flow conditions. Some studies regard this complex solid-liquid mixed two- (multi-) phase body as a single-phase Bingham fluid, and further describe the flow characteristics of debris flow through rheological models. This project began by gathering basic data about the study area and then conduct on-site sediment sampling. Different particle sizes of sediment are mixed with water to form slurry in various concentrations. The rheological parameters (yield stress and viscosity) of the slurry were analyzed by the rheological test and the slump-flow parameters (slump and spread) of the slurry were measured by the slump test. Finally, a correlation analysis between the rheological and slump flow parameters was performed.

The results exhibited that the fine aggregates in the slurry have a greater impact on rheological and slump parameters than coarse aggregates. Yield stress and viscosity coefficient have a positive logarithmic relationship, while yield stress and slump have a negative logarithmic relationship. The relationship between the viscosity and the slump-flow parameters is more inconsistent because it is more easily disturbed. The correlation will enable in rapid estimating the rheological parameters in the order of slump-yield stress-viscosity parameters.

Keywords: Debris flow, Slump test, Bingham fluid, Rheological parameters

目次

摘要	I
Abstract	II
目次	III
表次	VI
圖次	VIII
第壹章 前言	1-1
1.1 計畫緣起與目的	1-1
1.2 計畫研究範圍	1-1
1.3 工作項目及內容	1-9
1.4 整體工作架構及流程	1-11
1.5 計畫研究組織	1-12
1.6 工作預定進度	1-12
第貳章 前人研究	2-1
2.1 土石流流變特性	2-1
2.2 坍流試驗簡介	2-6
第參章 計畫研究方法	3-1
3.1 泥沙粒徑資料蒐集與現地採樣	3-1
3.1.1 研究區域泥沙粒徑蒐集	3-1
3.1.2 研究區域泥沙粒徑採樣	3-2
3.2 流變試驗儀器與方法	3-5
3.2.1 流變試驗設備	3-5
3.2.2 流變計校正	3-7
3.2.3 試驗方法及步驟	3-8

3.3 坍流試驗儀器與方法	3-9
3.3.1 坍流試驗設備.....	3-9
3.3.2 改良坍流試驗裝置.....	3-10
3.3.3 試驗方法及步驟.....	3-11
3.4 試驗材料與分析項目	3-12
3.4.1 試驗泥沙材料.....	3-12
3.4.2 試驗分析項目.....	3-14
第肆章 計畫研究結果與分析	4-1
4.1 泥沙粒徑採樣分析	4-1
4.2 流變試驗結果與分析	4-5
4.2.1 水庫淤泥（泥沙粒徑小於 0.044 mm）.....	4-5
4.2.2 土石流集水區現地沙（角埔溪集水區）.....	4-7
4.2.3 土石流集水區現地沙（愛玉子溪集水區）.....	4-13
4.3 坍流試驗結果與分析	4-19
4.3.1 水庫淤泥（泥沙粒徑小於 0.044 mm）.....	4-19
4.3.2 土石流集水區現地沙（角埔溪集水區）.....	4-22
4.3.3 土石流集水區現地沙（愛玉子溪集水區）.....	4-29
4.4 流變參數與坍流參數之關聯性分析	4-36
4.4.1 屈服應力.....	4-36
4.4.2 黏滯係數.....	4-38
4.4.3 屈服應力與黏滯係數之推估.....	4-42
第伍章 結論與建議	5-1
5.1 研究結論	5-1
5.2 研究建議	5-2
參考文獻	參-1

附錄一	期初審查會議委員意見回覆及辦理情形.....	附錄一-1
附錄二	期中審查會議委員意見回覆及辦理情形.....	附錄二-1
附錄三	期末審查會議委員意見回覆及辦理情形.....	附錄三-1

表次

表 1.1	計畫工作項目之預定進度.....	1-12
表 3.1	剪切率計算轉換因子.....	3-7
表 3.2	水庫淤泥漿體試驗濃度條件設定.....	3-13
表 3.3	土石流現地泥沙漿體試驗濃度條件設定.....	3-14
表 4.1	河床質粒徑調查點位座標與位置概述.....	4-2
表 4.2	愛玉子溪、角埔溪及內社溪泥沙粒徑分布型態之參數比較	4-3
表 4.3	水庫淤泥漿體於不同體積濃度的流變參數.....	4-6
表 4.4	角埔溪通過#100 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數	4-9
表 4.5	角埔溪通過#200 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數	4-9
表 4.6	角埔溪通過#300 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數	4-9
表 4.7	愛玉子溪通過#100 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數	4-14
表 4.8	愛玉子溪通過#200 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數	4-15
表 4.9	愛玉子溪通過#300 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數	4-15
表 4.10	水庫淤泥漿體於不同體積濃度的坍流參數.....	4-20
表 4.11	角埔溪現地沙通過#100 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果	4-23
表 4.12	角埔溪現地沙通過#200 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果	4-23
表 4.13	角埔溪現地沙通過#300 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果	4-23

表 4.14	愛玉子溪現地通過#100 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果	4-30
表 4.15	愛玉子溪現地通過#200 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果	4-30
表 4.16	愛玉子溪現地通過#300 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果	4-30
表 4.17	愛玉子溪集水區之現地漿體坍流試驗結果	4-43
表 4.18	愛玉子溪集水區之現地漿體流變參數之推估結果	4-44

圖次

圖 1.1	計畫研究範圍的區域位置圖	1-2
圖 1.2	愛玉子溪集水區之 地理位置圖	1-3
圖 1.3	愛玉子溪集水區於 莫拉克颱風後之崩塌分布圖	1-3
圖 1.4	愛玉子溪集水區地質分布圖	1-4
圖 1.5	愛玉子溪集水區及其周圍水系空拍圖	1-5
圖 1.6	角埔溪集水區之地理位置圖	1-6
圖 1.7	角埔溪集水區於莫拉克颱風後之崩塌分布圖	1-6
圖 1.8	角埔溪集水區地質分布圖	1-6
圖 1.9	角埔溪集水區土壤分布圖	1-6
圖 1.10	角埔溪集水區現地勘查與空拍圖	1-7
圖 1.11	內社溪集水區之地理位置圖	1-8
圖 1.12	內社溪集水區於莫拉克颱風後之崩塌分布圖	1-8
圖 1.13	內社溪集水區地質分布圖	1-8
圖 1.14	內社溪集水區土壤分布圖	1-8
圖 1.15	內社溪集水區現地勘查與空拍圖	1-9
圖 1.16	計畫整體作業流程圖	1-11
圖 2.1	細粗顆粒混和漿體之示意圖	2-4
圖 2.2	不同粗粒料比例之混和漿體，屈服應力（左圖）及黏滯係數（右圖） 與混和體積濃度之關係圖(Dey et al., 2020).....	2-5
圖 2.3	不同粗粒料大小與比例之混和漿體之流變參數（左）與無因次坍流 參數（右）之關係圖(Jan and Dey, 2022).....	2-5
圖 2.4	平截圓錐試驗桶及圓柱座標	2-6
圖 2.5	坍流試驗中漿體坍流前後之垂直斷面示意圖	2-6

圖 2.6	坍落度隨時間變化圖 (摘自 Chidiac et al. 2000).....	2-9
圖 2.7	改良式坍流試驗中記錄坍落度隨時間變化之示意圖.....	2-9
圖 2.8	利用改良式坍流試驗計算屈服應力與黏滯係數之圖(摘自 Ferraris et al. 1998).....	2-10
圖 2.9	改良式坍度桶裝置圖.....	2-10
圖 2.10	實際與理論屈服應力之比較.....	2-10
圖 2.11	實際與理論黏滯係數之比較(摘自胡小芳、蘇志學，2006).....	2-11
圖 2.12	坍流度與屈服應力關係圖.....	2-11
圖 2.13	黏滯係數與坍落度關係圖.....	2-11
圖 2.14	高嶺土進行流變參數與坍度參數之關聯性分析結果（詹錢登等，2018）.....	2-12
圖 3.1	蒐集土石流河床質泥沙粒徑之分布資料.....	3-2
圖 3.2	河床質粒徑調查示意圖.....	3-3
圖 3.3	本試驗採用之流變分析儀器.....	3-5
圖 3.4	本試驗採用之樣品槽.....	3-5
圖 3.5	DV-III 流變計及資料擷取系統之整體試驗配置圖.....	3-6
圖 3.6	矽礦油標準液之剪應力與剪切率關係圖.....	3-7
圖 3.7	本試驗採用之平截圓錐試驗桶.....	3-10
圖 3.8	坍流試驗中漿體坍流前後之垂直斷面示意圖.....	3-10
圖 3.9	坍落試驗後，試體無偏移(左)與向左下偏移(右)之現象.....	3-11
圖 3.10	坍流試驗操作鐵架.....	3-11
圖 3.11	兩側加設滑輪之坍落桶.....	3-11
圖 3.12	水庫淤泥體積濃度 20%之流變關係圖.....	3-12
圖 3.13	體積濃度 37.5%靜置後之現地沙漿分層現象.....	3-12
圖 4.1	信義鄉愛玉子溪集水區河床質粒徑調查.....	4-1

圖 4.2	甲仙區角埔溪集水區河床質粒徑調查.....	4-1
圖 4.3	來義鄉內社溪集水區河床質粒徑調查.....	4-1
圖 4.4	土石流現地採樣之河床質泥沙粒徑分布.....	4-4
圖 4.5	水庫淤泥漿體之泥沙粒徑分布圖.....	4-6
圖 4.6	水庫淤泥不同體積濃度(C_{vt})之流變關係圖	4-6
圖 4.7	水庫淤泥漿體的體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖	4-7
圖 4.8	水庫淤泥漿體的體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖	4-7
圖 4.9	角埔溪現地泥沙漿體之泥沙粒徑分布圖.....	4-8
圖 4.10	角埔溪通過#100 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖 ..	4-8
圖 4.11	角埔溪通過#200 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖...	4-9
圖 4.12	角埔溪通過#300 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖 ..	4-9
圖 4.13	角埔溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖	4-10
圖 4.14	角埔溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖	4-10
圖 4.15	水庫淤泥與角埔溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖	4-11
圖 4.16	水庫淤泥與角埔溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖	4-11
圖 4.17	水庫淤泥與角埔溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與屈服應力(τ_y)之 關係圖	4-12
圖 4.18	水庫淤泥與角埔溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與黏滯係數(μ_B)之 關係圖	4-12
圖 4.19	愛玉子溪現地泥沙漿體之泥沙粒徑分布圖.....	4-14
圖 4.20	愛玉子溪通過#100 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖	4-14
圖 4.21	愛玉子溪通過#200 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖	

.....	4-14
圖 4.22 愛玉子溪通過#300 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖	4-14
.....	4-14
圖 4.23 愛玉子溪現地沙體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖	4-15
圖 4.24 愛玉子溪現地沙體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖	4-15
圖 4.25 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖	4-16
圖 4.26 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖	4-16
圖 4.27 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與屈服應力(τ_y)之關係圖	4-17
圖 4.28 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與黏滯係數(μ_B)之關係圖	4-17
圖 4.29 水庫淤泥漿體於不同體積濃度的坍流俯視圖	4-19
圖 4.30 水庫淤泥漿體的體積濃度與無因次坍流度之關係圖	4-20
圖 4.31 水庫淤泥漿體的體積濃度與無因次坍落度之關係圖	4-20
圖 4.32 不同體積濃度的水庫淤泥漿體之坍流結果縱剖面圖	4-21
圖 4.33 角埔溪通過#100 篩泥沙漿體於不同體積濃度的坍流俯視圖	4-24
圖 4.34 角埔溪現地沙通過#200 篩泥沙漿坍流結果俯視圖	4-24
圖 4.35 角埔溪現地沙通過#300 篩泥沙漿坍流結果俯視圖	4-25
圖 4.36 角埔溪現地沙體積濃度(C_{vt})與無因次坍流度之關係圖	4-25
圖 4.37 不同體積濃度的角埔溪現地沙通過#100 篩漿體之坍流結果縱剖面圖	4-27
圖 4.38 不同體積濃度的角埔溪現地沙通過#200 篩漿體之坍流結果縱剖面圖	4-27

圖 4.39	不同體積濃度的角埔溪現地沙通過#300 篩漿體之坍流結果縱剖面圖	4-27
圖 4.40	角埔溪現地沙體積濃度(C_{vt})與無因次坍落度之關係圖	4-28
圖 4.41	愛玉子溪現地沙通過#100 篩泥沙漿坍流結果俯視圖	4-31
圖 4.42	愛玉子溪現地沙通過#200 篩泥沙漿坍流結果俯視圖	4-31
圖 4.43	愛玉子溪現地沙通過#300 篩泥沙漿坍流結果俯視圖	4-32
圖 4.44	愛玉子溪現地沙體積濃度與無因次坍流度之關係圖	4-32
圖 4.45	不同體積濃度的愛玉子溪現地沙通過#100 篩漿體之坍流結果縱剖面圖	4-34
圖 4.46	不同體積濃度的愛玉子溪現地沙通過#200 篩漿體之坍流結果縱剖面圖	4-34
圖 4.47	不同體積濃度的愛玉子溪現地沙通過#300 篩漿體之坍流結果縱剖面圖	4-34
圖 4.48	愛玉子溪現地沙體積濃度(C_{vt})與無因次坍落度之關係圖	4-35
圖 4.49	無因次坍流度與無因次屈服應力之關係圖	4-37
圖 4.50	無因次坍落度與無因次屈服應力之關係圖	4-37
圖 4.51	土石流集水區現地沙無因次坍流度與無因次屈服應力之關係圖	4-38
圖 4.52	無因次坍流度與無因次黏滯係數之關係圖	4-40
圖 4.53	無因次坍落度與無因次黏滯係數之關係圖	4-40
圖 4.54	土石流集水區現地沙無因次坍流度與無因次黏滯係數之關係圖	4-41
圖 4.55	土石流集水區現地沙無因次坍流試體高度與無因次黏滯係數之關係圖	4-41
圖 4.56	土石流集水區現地沙無因次無因次屈服應力與無因次黏滯係數之	

關係圖	4-41
圖 4.57 愛玉子溪集水區現地坍流試驗操作情況.....	4-42
圖 4.58 愛玉子溪集水區現地坍流試驗量測情況.....	4-42
圖 4.59 愛玉子溪集水區現地坍流試驗漿體之泥沙粒徑分布.....	4-43
圖 4.60 流變參數試驗值與推估值之分布情況.....	4-44

第壹章 前言

1.1 計畫緣起與目的

土石流(Debris flow)係泥、沙、礫及巨石等顆粒材料與水混合後之流動體，在重力作用下，沿著傾斜坡面或溝渠，自高處向低處移動的現象。因此土石流的流動特性介於固體與流體之間，按照不同的組成物質及流動條件，土石流有許多不一樣的特徵。然而針對這複雜的固體和液體混合的兩(多)相體的流動特性，部分研究將土石流視為單相流體(賓漢流體)，並進一步透過流變模式來描述土石流體的流動特性。

因此為了瞭解土石流流動特性，需進一步分析其流變性質，以評估土石流的流動及其淹沒範圍。針對過往大部份之研究是透過流變量測儀器(例如：旋轉式流變計)直接量測流體或漿體的流變參數，但流變儀器時常受到試體尺度大小之影響，則需要考量漿體中的顆粒尺寸，當漿體中包含較大的粗顆粒時，傳統流變量測儀器的可信度及可重複性就相對降低。因此為了克服漿體內含有粗顆粒之問題，後續透過間接方法來推求漿體的流變參數，將傳統用於評估混凝土特性的坍度試驗(Slump test)或坍流試驗(Slump-flow test)轉換用於評估土石流的流變特性。本研究計畫期待未來可在土石流潛勢溪流現場，透過坍流試驗(Slump flow/spread test)快速掌握土石流體的流變參數(屈服應力及黏滯度)，進而評估其流動之特性。

1.2 計畫研究範圍

本計畫為了能更有效且快速的評估土石流的流動及其淹沒範圍，因此需透過分析土石流的流變性質，以瞭解土石流之流動特性。本案將以臺灣中南部地區(南投縣、高雄市與屏東縣)的3個重大土石流災害地區為主

要研究區域，如圖 1.1 所示，其中包含：信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區。

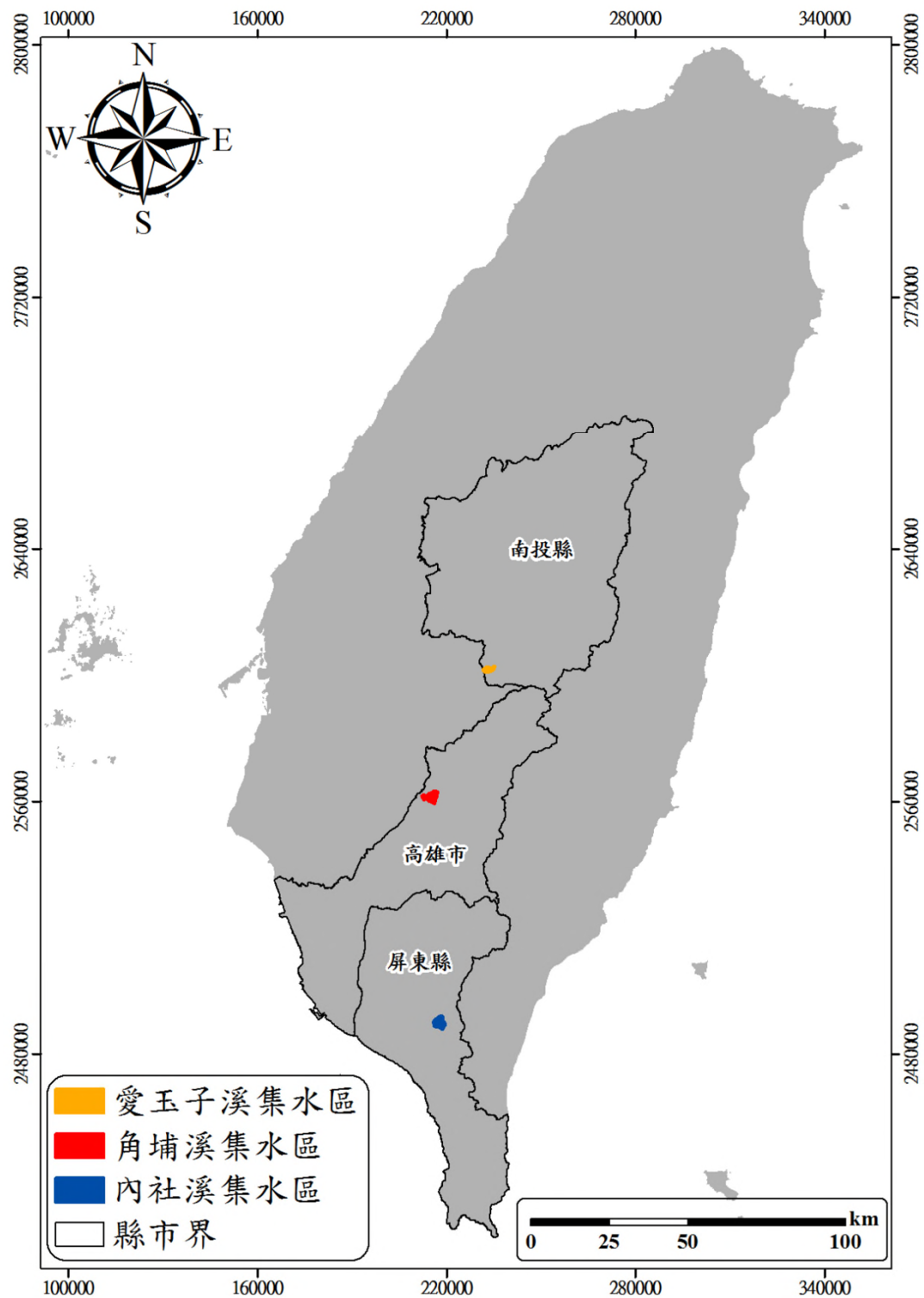


圖 1.1 計畫研究範圍的區域位置圖

後續針對研究區域的基本資料進行簡要說明如下：

一、信義鄉愛玉子溪集水區

愛玉子溪集水區位於南投縣信義鄉神木村，位處於濁水溪集水區上游的神木子集水區之南端，西接香林子集水區，東鄰鹿林子集水區，南毗長谷川溪子集水區，而集水區內之水系以愛玉子溪為主，最終與霍薩溪及出水溪組成並匯流入和社溪（請參見圖 1.2），集水區面積約 405.0 公頃，集水區高程約介於 1,200 公尺至 2,500 公尺之間，其整體的地形大致為西向東遞減，整體平均坡度約 39.3%，愛玉子溪集水區相關相對位置及崩塌地分布，如圖 1.2 與圖 1.3 所示。



圖 1.2 愛玉子溪集水區之地理位置圖

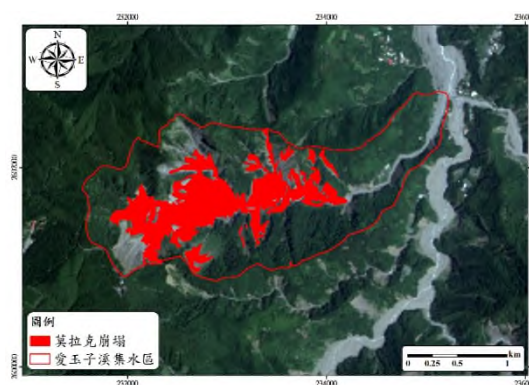


圖 1.3 愛玉子溪集水區於莫拉克颱風後之崩塌分布圖

依經濟部中央地質調查所二十五萬分之一地質圖幅，愛玉子溪集水區之地質主要由瑞芳群及其相當地層組成，岩性為沙岩及頁岩，集水區上游部分之地層則由三峽群及其相當岩層構成，岩性亦為沙岩及頁岩，地質分布圖，如圖 1.4 所示；另查詢經濟部農業委員會水土保持局山坡地土壤分布圖層，本集水區過往並無土壤調查之資料。

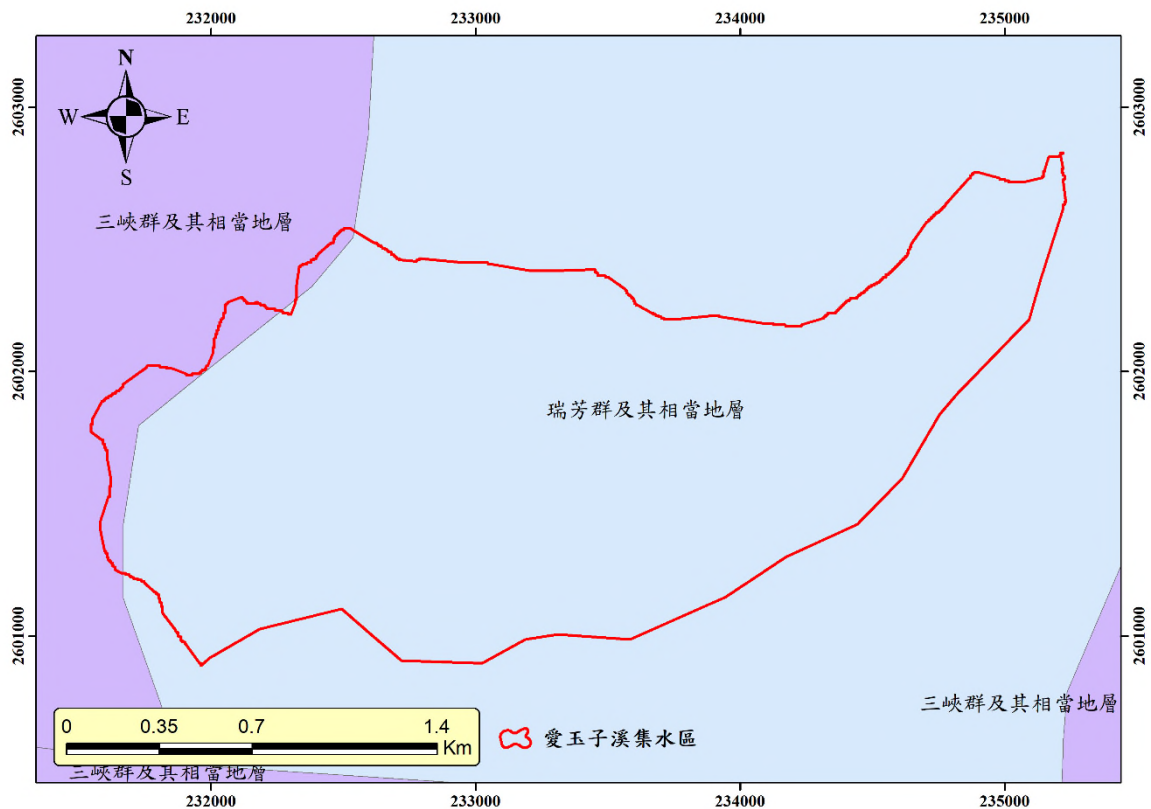


圖 1.4 愛玉子溪集水區地質分布圖

本研究區域愛玉子溪於 1996 年受到賀伯颱風期間所帶來之超大豪雨（當日於阿里山雨量站即降下 1,094 mm，降雨強度為 74 mm/hr），導致神木村上游出水溪、霍薩溪及愛玉子溪發生多處大規模之崩塌，而崩塌所產生的大量土石（約 450,000 立方公尺）往下游運移，並集中堆積於匯流處的神木村，造成整體河床的大規模抬升情況，其淤積深度最高可達 10m 以上，公尺，並造成神木國小周遭住戶受到土石流嚴重之衝擊。而 1999 年集集地震使臺灣地區中部地區地質結構受到擾動，並發生大範圍之崩塌，且造成崩落土石堆積於河道中，致使地震後每年颱風豪雨季節，此區域就會因為大量降雨而形成土石流，於三溪匯流處之神木村民宅及神木國小即受土石流災害影響，大量之土石匯集也造成溪床升高嚴重危及橋樑道路安全。愛玉子溪集水區及其周圍水系空拍，如圖 1.5 所示。



(a)愛玉子溪與上游崩塌地



(b)神木村集水區三條子河道空拍圖



(c)霍薩溪與愛玉子溪空拍圖



(d)匯流處至和社溪河段空拍圖

圖 1.5 愛玉子溪集水區及其周圍水系空拍圖

二、甲仙區角埔溪集水區

角埔溪集水區位於高雄市甲仙區，位處於旗山溪集水區中上游的錫安山子集水區之南端，西接甲仙子集水區，東鄰寶來子集水區，南毗荖濃子集水區，而集水區內之水系以角埔溪為主，最終匯流入旗山溪(請參見圖 1.6)，集水區面積約 1,038 公頃，集水區高程介於 355 至 1,665 公尺，其整體的地形大致為東南向西北遞減，整體平均坡度約 67.3%，角埔溪集水區相關相對位置及崩塌地分布，如圖 1.6 與圖 1.7 所示。

依經濟部中央地質調查所二十五萬分之一地質圖幅，角埔溪集水區之地質主要由三峽群及其相當岩層組成，集水區下游部分之地層則由台地堆積層及沖積層構成，地質分布圖，如圖 1.8 所示；依經濟部農業委員會水土

保持局山坡地土壤分布圖層，角埔溪集水區土壤分布分別由石質土與崩積土及紅壤組成，其中又以崩積土為主體，集水區上游區域則無土壤組成資料紀錄，土壤分布圖，如圖 1.9 所示。



圖 1.6 角埔溪集水區之地理位置圖

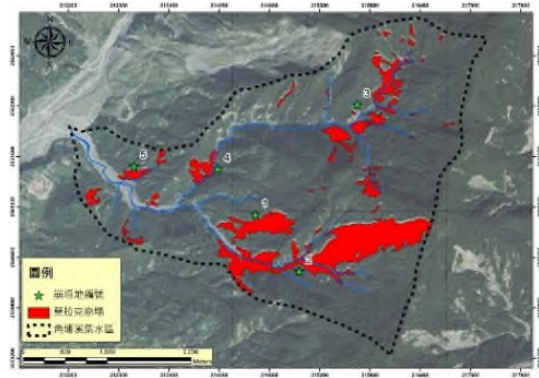


圖 1.7 角埔溪集水區於莫拉克颱風後之崩塌分布圖



圖 1.8 角埔溪集水區地質分布圖

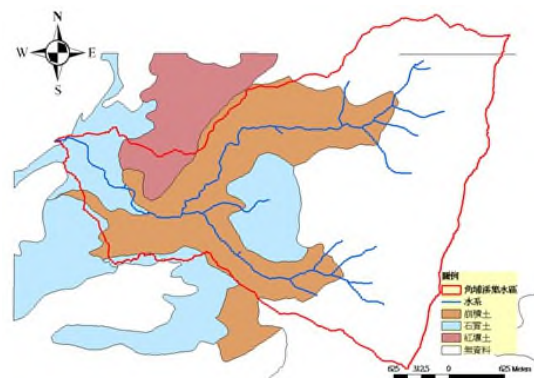


圖 1.9 角埔溪集水區土壤分布圖

本研究區域角埔溪於 2009 年受到莫拉克颱風之影響產生約 121.5 公頃之崩塌面積，而崩塌所產生的大量土沙於角埔溪集水區產生大規模之土石流災害。經由現地勘查資料顯示，在臺 21 線上之第八號橋遭受大量土沙淤埋與破壞，而角埔溪第八號橋遺址處之河道寬增加約為 60 至 80 公尺，並產生約數十公尺之土沙堆積現象（高程約為 386 公尺），顯示莫拉克颱風對於角埔溪集水區產生大規模之地貌變化，莫拉克風災後於角埔溪集水區現地勘查照片及相關航空影像資料，如圖 1.10 所示。



(a)角埔溪下游處現地勘查泥沙淤積情況



(b)角埔溪下游處空拍圖



(c)匯流處至旗山溪河段空拍圖

圖 1.10 角埔溪集水區現地勘查與空拍圖

三、來義鄉內社溪集水區

內社溪集水區位於屏東縣來義鄉，位處於林邊溪流域區中上游的來社溪子集水區之西南端，西接來義子集水區，東鄰七佳溪子集水區，而集水區內之水系以內社溪為主，最終匯流入來社溪（請參見圖 1.11），集水區面積約 999.8 公頃，集水區高程約介於 200 公尺至 1,470 公尺之間，其整體的地形大致為南向北遞減，整體平均坡度約 75.3%，內社溪集水區相關相對位置及崩塌地分布，如圖 1.11 與圖 1.12 所示。

依經濟部中央地質調查所二十五萬分之一地質圖幅，內社溪集水區之地質主要由廬山層組成，岩性以硬頁岩、板岩及千枚岩為主，地質分布圖如圖 1.13 所示；依經濟部農業委員會水土保持局山坡地土壤分布圖層，內社溪集水區土壤部分由板岩棕灰色石質土及裸岩或崩崖有樹草組成，部分無

資料紀錄，土壤分布圖如圖 1.14 所示。



圖 1.11 內社溪集水區之地理位置圖

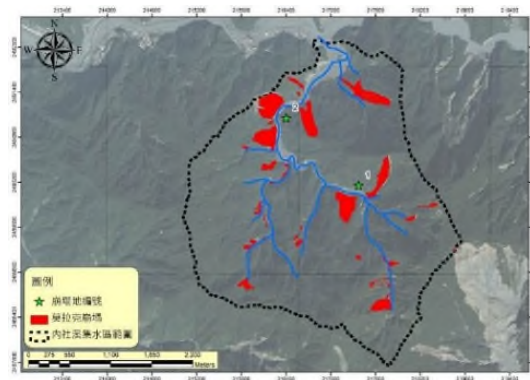


圖 1.12 內社溪集水區於莫拉克颱風後之崩塌分布圖



圖 1.13 內社溪集水區地質分布圖



圖 1.14 內社溪集水區土壤分布圖

本研究區域內的內社溪於 2009 年莫拉克颱風期間所帶來之超大豪雨（發生災害時之累積雨量約為 798 mm），導致來社溪及內社溪山洪暴發，來義部落上游集水區內產生多處大規模之崩塌，於內社溪集水區上游產生約 59.2 公頃之崩塌面積，而崩塌所產生的大量土石於內社溪集水區產生大規模之土石流災害，在大量土石運移下掩埋與來社溪合流處之來社大橋，整體河床的大規模抬升之嚴重淤積情形，其淤積深度最高可達 10 公尺以上，顯示莫拉克颱風亦對於內社溪集水區產生大規模之地貌變化，莫拉克風災後於內社溪集水區現地勘查照片及相關航空影像資料，如圖 1.15 所示。



(a)內社溪與來社溪匯流處現地勘查泥沙淤積情況



(b)內社溪下游處空拍圖



(c)匯流處至來社溪河段空拍圖

圖 1.15 內社溪集水區現地勘查與空拍圖

1.3 工作項目及內容

本年度的工作項目及內容說明如下：

一、研究區域的基本資料蒐集與泥沙粒徑採樣分析

本計畫首先針對 3 個重大土石流災害地區為主要研究區域（信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區）進行基本資料蒐集。此外，本研究亦將同時進行部分現地調查與粒徑取樣之工作，以瞭解土石流事件所造成研究區域之影響程度與土石流的致災原因，進而針對研究區域內的泥沙粒徑進行分析，並進一步透過現地之泥沙進行後續的流變

試驗與坍流試驗，以分析探討相關之流變參數與坍流參數。

二、研究區域內土石流的泥沙流變試驗分析

本研究將進行研究區域(信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區)的現地泥沙顆粒取樣，進而透過流變試驗分析研究區域內泥沙漿體的流變參數(例：屈伏應力與黏滯度)。

三、研究區域內土石流的泥沙坍流試驗分析

因此本研究後續將針對研究區域(信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區)的現地泥沙顆粒取樣，進而透過坍流試驗分析研究區域內泥沙漿體的坍流參數(例：坍落度與坍流度)，進行後續的分析探討。

四、研究區域流變參數與坍流參數之關聯性分析

經過上述的流變試驗與坍流試驗後，為了瞭解是否能利用坍流試驗所獲得的參數推估流變參數。因此本案後續將針對研究區域內泥沙漿體的流變參數(例：屈伏應力與黏滯度)與坍流參數(例：坍落度與坍流度)進一步分析，以探討泥沙漿體之流變參數對於坍度參數之關聯性，有利於未來利用簡易操作的坍流試驗，以獲得其相關之參數，並快速推估泥沙漿體的屈服應力與黏滯度，進而瞭解其流動特性。

1.4 整體工作架構及流程

本委託案「由坍流試驗進行現地量測土石流流變參數之研究」的工作內容分為四大項目，計畫整體作業流程，請參見圖 1.16。其內容包含：研究區域的基本資料蒐集與泥沙粒徑採樣分析、土石流的泥沙流變試驗分析、土石流的泥沙坍流試驗分析、流變參數與坍流參數之關聯性分析等。本案透過上述四大工作項目的調查與分析結果，期待後續可在土石流潛勢溪流現場，透過坍流試驗(Slump flow/spread test)快速掌握土石流體的流變參數(屈服應力及黏滯度)，進而評估其流動之特性。

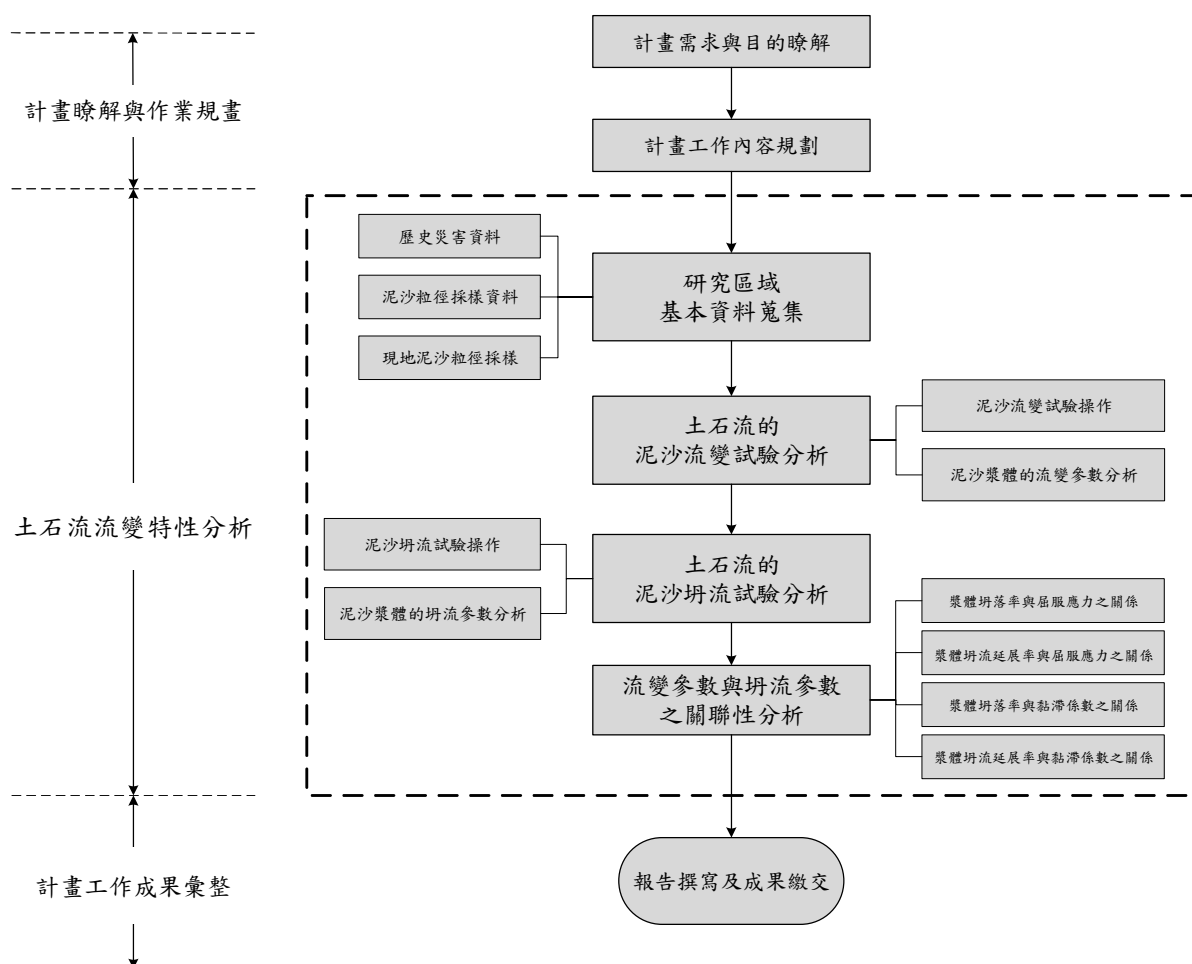


圖 1.16 計畫整體作業流程圖

1.5 計畫研究組織

本計畫「由坍流試驗進行現地量測土石流流變參數之研究」由財團法人成大研究發展基金會執行，參與計畫之研究團隊為「財團法人成大研究發展基金會」、「水土保持生態工程研究中心」與「成功大學水利及海洋工程學系」，研究成員均具備水利、水土保持、土石流防災等專業知識技能，擁有豐富資歷以及完備技術，能夠共同完成本研究計畫之工作項目與要求成果。

1.6 工作預定進度

本研究計畫之預定執行期程為自民國一百一拾一年一月十八日起至民國一百一拾一年十二月三十一日完成，並依農業委員會水土保持局審查認可之工作計畫進度執行。計畫之各項工作預定進度，如表 1.1 所示。

表 1.1 計畫工作項目之預定進度

期 程 工作項目	111 年											
	01 月	02 月	03 月	04 月	05 月	06 月	07 月	08 月	09 月	10 月	11 月	12 月
資料蒐集與泥沙粒徑採樣分析												
土石流的泥沙流變試驗分析												
土石流的泥沙坍流試驗分析												
流變與坍流參數之關聯性分析												
建立由坍流試驗結果評估流變參數之方法												
期初報告提交												
期中報告提交												
期末報告提交												
成果報告提交												
預定進度累計(%)	1.6	6.5	11.3	21.0	35.5	50.0	59.7	69.4	79.0	88.7	98.4	100.0

第貳章 前人研究

臺灣因為山脈高峻，河川距離短且坡度陡，因此每當豪雨發生時，造成河川流量暴漲，當河水夾帶大量土沙材料順流而下，則易形成土石流。土石流(Debris flow)係泥、沙、礫及巨石等顆粒材料與水混合後之流動體，且在重力作用下，沿著傾斜坡面或溝渠，高處向低處移動的現象。然而按照不同的成因、地貌條件、組成物質、泥石來源、流體特性、激發因素、力學特徵及發育階段等不同指標（水土保持手冊，2017），可將土石流區分為不同之類型，其中以地貌條件可分為溪流型與坡面型土石流；以土沙材料來源可分為崩塌型、潰壩（臨時壩）型、溪床冲刷型、地滑型以及混合型土石流；以土沙顆粒組成可分類為礫石型、泥流型及一般型土石流，依據其分類的顆粒組成特徵中，礫石型土石流的固體物質中礫石含量大而泥沙含量少，其泥沙含量佔 10%以下；一般型土石流中的顆粒分佈很廣，含有黏土、粉土、沙、礫石甚至巨石，其固體物質中泥沙含量約介於 10%至 50%；泥流型土石流的固體物質中泥沙含量大而礫石含量少，其泥沙含量佔 50%以上。因此土石流的流動特性介於固體與流體之間，然而針對這複雜的固體和液體混合的兩(多)相體的流動特性，部分研究將土石流視為單相流體，並進一步透過流變模式來描述土石流體的流動特性。

2.1 土石流流變特性

探討分析土石流的運動行為時，首先需了解土石流體的流變特性(Jan and Shen, 1997; Major and Pierson, 1992; O' Brien and Julien, 1988; 詹錢登，2000)，其用於描述土石流流體在運動過程中所產生應力與應變之關係，表示此特性之方程式，則稱之為流變方程式、流變模式或本構關係式。

土石流為固態物質與水混合的流動現象，其流變特性已非一般牛頓流

體可描述，因此有許多學者針對土石流的流變特性進行研究，其中不論是以試驗或理論推導，已提出多種的土石流流變模式，唯各模式皆有其適用範圍。Jan 及 Shen (1993) 依據黏滯度、摩擦力、碰撞力與紊動等四動量交換的主要因素，將現有的土石流流變模式大致分為六大類：摩擦模式(Friction model)、碰撞模式(Collision model)、摩擦-碰撞模式(Friction-Collisional model)、高黏性模式(Macro-Viscous model)、黏塑性模式(Visco-Plastic model)、及黏塑性-碰撞模式(Visco-Plastic-Collisional model)等六類。

若就數學的表示式來看可大致區分為：牛頓流體模式(Newton fluid model)、賓漢流體模式(Bingham model)、冪定理模式(Power law model)、以及赫許布雷模式(Herschel-Bulkly model)等四類。

其中，賓漢流體模式是 Bingham and Green 於 1920 年時提出之流變關係式，此模式與牛頓流體模式之差異在於屈服應力；也稱賓漢屈服應力，表示當流體所受的剪應力大於屈服應力時才會產生流動，其流變關係式如下：

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} \quad (1)$$

其中， τ_y 為賓漢屈服應力， η 為賓漢黏滯度。然而流變參數 τ_y 及 η 之值並非常數，且會受到漿體之含沙濃度、顆粒粒徑、礦物性質、PH 值及溫度等因子的影響。根據前人研究發現，在剪切率較小的情況下，賓漢流體之特性與泥性土石流之流變特性相似，因此 Johnson (1970)、O' Brein and Julien (1988)、Major and Pierson (1992)、王志賢(2007)、張雅雯(2008)及郭峰豪(2010)等人，皆以賓漢流體模式分析土石流之流變特性。其中，O' Brien and Julien (1988)利用同軸圓柱旋轉式流變計量測科羅拉多洛磯山區的泥流沉積物，泥沙成分多為粉土，泥沙粒徑小於 0.07 mm，試驗體積濃度 10 至 45%，實驗

結果顯示，其漿體的流變特性符合賓漢模式，且賓漢屈服應力與賓漢黏滯係數，接隨著體積濃度的增加而增加，而相同濃度但不同泥沙粒組成之漿體，其流變參數值不相同。

由於土石流材料組成之粒徑分布甚廣，後續學者在細粒料漿體中加入粗粒料，進一步探討漿體中粗細粒料之組成對於流變參數的影響。細粒料（體積以 V_f 表示）與水（體積以 V_w 表示）充分混和之漿體體積濃度(C_{vf})可表示為：

$$C_{vf} = \frac{V_f}{V_f + V_w} \quad (2)$$

該關係亦可表示為：

$$V_f = \frac{C_{vf}}{1 - C_{vf}} V_w \quad (3)$$

在細粒料漿體中加入粗粒料後充分混和之漿體組成示意，如圖 2.1 所示，粗粒料（體積以 V_g 表示）在混和漿體所占之體積濃度(C_{vg})可表示為：

$$C_{vg} = \frac{V_g}{V_f + V_w + V_g} \quad (4)$$

該關係亦可表示為：

$$V_g = \frac{C_{vg}}{1 - C_{vg}} (V_f + V_w) \quad (5)$$

混和漿體之體積濃度(C_{vt})可表示為：

$$C_{vt} = \frac{V_f + V_g}{V_f + V_w + V_g} \quad (6)$$

將式(3)及式(5)代入，可將混和漿體體積濃度整理為與細粒料漿體濃度及粗粒料所占濃度之關係：

$$C_{vt} = C_{vf}(1 - C_{vg}) + C_{vg} \quad (7)$$

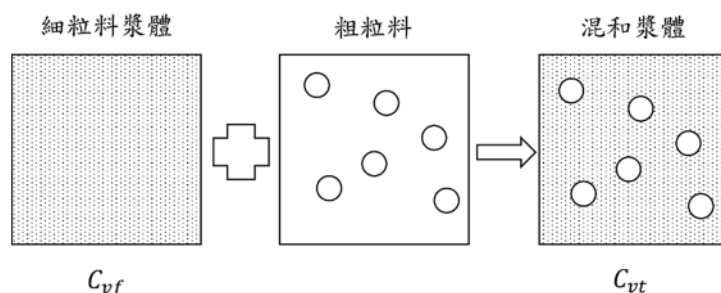


圖 2.1 細粗顆粒混和漿體之示意圖

王志賢(2007)由分析漿體中的粗顆粒含量，與粒徑對其流變特性的影響，探討土石流的流變特性。結果顯示當粗顆粒加入細泥漿體時，所加入的粗顆粒含量須大於 15% 之後其屈服應力與黏滯係數增量較為明顯。當粗顆粒含量大於 15% 以後，隨粗顆粒的增加屈服應力有顯著的增加，但粗顆粒含量的增加對黏滯係數的增率不如屈服應力的增率來的大。除了受粗顆粒含量影響外，同時也受到粒徑大小影響，當粗顆粒粒徑越小，對於屈服應力的影響也就越大。當土石流體中含粗顆粒時，與相同含沙濃度的純細泥漿體的賓漢屈服應力跟黏滯係數都來的小；張雅雯(2008)曾以 Carbopol 940 粉末與水混合成高黏稠的半透明將體，此漿體流變行為穩定且符合賓漢流變模式，因此減少細泥漿體流變特性變化的不確定性，在此漿體當中混和圓形玻璃珠（ $d = 5 \text{ mm}$ 和 $d = 10 \text{ mm}$ ）分析混和漿體之流變特性。混和漿體的賓漢屈服應力與賓漢黏滯係數隨顆粒濃度增加而增加，但賓漢屈服應力的變化較為顯著。在相同體積濃度下，粒徑較小的混合漿體屈服應力與黏滯係數均大於粒徑較大者。Dey et al. (2020)於細粒料漿體內加入玻璃珠（直徑 1 mm，用於代表粗粒料），探討不同體積及粗粒料比例之混和漿體流變參數的變化情

形（圖 2.2），結果顯示增加細粒料濃度相較於增加粗粒料濃度對於流變參數之增加量較為顯著，於屈服應力之增加比例約為 8.8 至 10.1 倍，於黏滯係數則約為 18 倍。

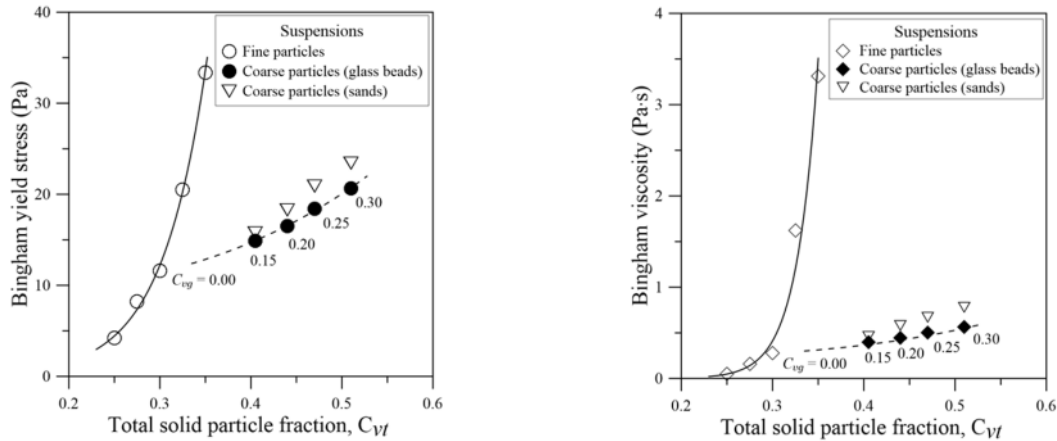


圖 2.2 不同粗粒料比例之混和漿體，屈服應力（左圖）及黏滯係數（右圖）與混和體積濃度之關係圖(Dey et al., 2020)

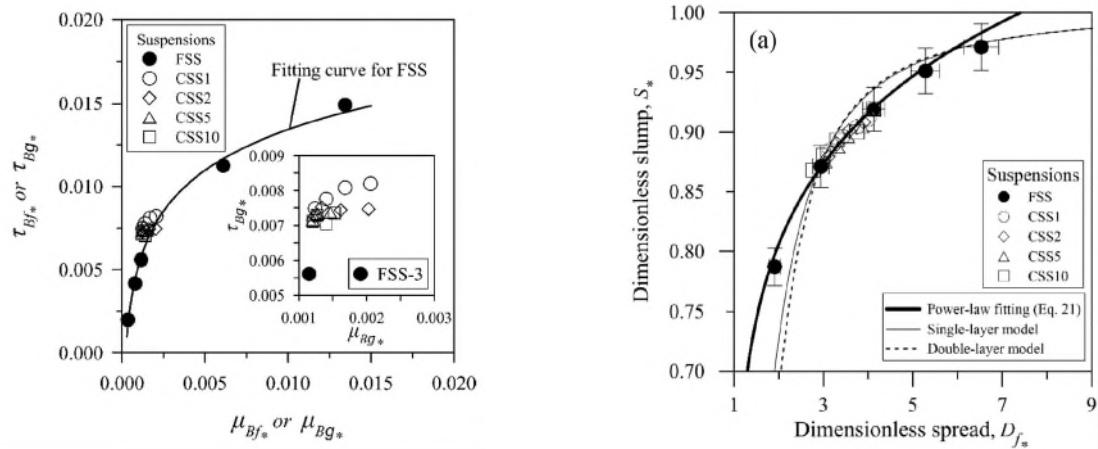


圖 2.3 不同粗粒料大小與比例之混和漿體之流變參數（左）與無因次坍流參數（右）之關係圖(Jan and Dey, 2022)

Jan and Dey (2022)進一步以不同大小之玻璃珠（直徑 1 mm 至 10 mm）作為粗粒料，探討不同粗細組成之混和漿體其流變參數與坍流試驗結果之關聯性，研究結果顯示（圖 2.3）屈服應力與黏滯係數及無因次坍流與無因次坍落皆有良好之關聯性，後者更與經驗公式相當（詳可參閱 Jan and Dey, 2022 及李丹等人，2022），並將試驗結果建構無因次坍流度與無因次屈服

應力之關係，即可透過坍流試驗結果，推估屈服應力以及黏滯係數。

前人研究顯示，在含粗礫石土石流體的研究上，土石流體之流變特性大致可以賓漢模式來表示（詹錢登與王志賢，2000；詹錢登，2001），且細粒料含量多寡對於流變行為之影響較粗粒料含量顯著，是故本研究在進行現地土石流流變試驗時，首先將採集研究區域細粒材料，並透過不同細粗粒料組成，瞭解將流變以及坍流試驗應用於現地河道之可行性。

2.2 坍流試驗簡介

坍流試驗(Slump-flow test)是營建工程施工常見的試驗，用以量測新混凝土(Fresh concrete)的坍落度(Slump)或是坍流度(Slump flow)，然後藉此量測得到的參數來判斷新混凝土施工的工作性(Workability)，然而施工的工作性是指混凝土拌合物易於施工操作（例如：攪拌、運輸、澆築與振搗），並能獲得均勻密實的混凝土性能（Murata, 1984；胡小芳和蘇志學，2006；鄒初首和夏勇，2006；Tregger et al., 2012）。



圖 2.4 平截圓錐試驗桶及圓柱座標

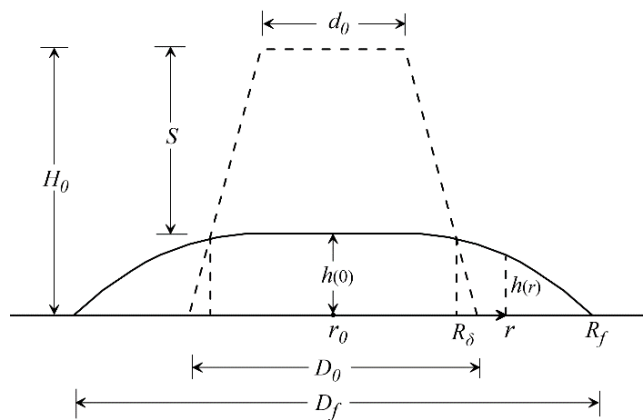


圖 2.5 坍流試驗中漿體坍流前後之垂直斷面示意圖

坍流試驗需要一個坍流試驗桶，在施工現場常見的標準混凝土坍流度

試驗桶是一個頂端開口直徑(d_0)為 10 公分、底端開口直徑(D_0)為 20 公分、桶高(H_0)為 30 公分的平截圓錐桶狀試驗桶(Truncated cone)，如圖 2.4 所示，標準試驗桶內的容積(V)約為 5.5 公升。在進行坍流試驗時， $V = \pi H_0 (D_0^2 + D_0 d_0 + d_0^2) / 12$ 將混凝土分三次填裝灌入試驗桶，每次填裝后用搗槌沿桶壁均勻由外向內擊 25 下搗實，填裝滿後抹平，然後垂直拔起桶，混凝土因自重產生塌落現象(請參見圖 2.5)，用桶高減去塌落後混凝土頂部高度(H_f)，稱為坍落度($S = H_0 - H_f$)；如果差值為 80 公厘，則表示坍落度 $S = 80$ 。坍落度大小可作為試體的流動指標，當坍落度較大時，表示試體的黏稠性較低，流動性較好；當坍落度較小時，表示試體的黏稠性較大，流動性較差。因此依據坍落度的差異，可將混凝土拌合物區分為五大類：低塑性混凝土（坍落度介於 10 至 40 之間）、塑性混凝土（坍落度介於 40 至 90 之間）、流動性混凝土（坍落度介於 90 至 150 之間）及高流動性混凝土（坍落度 ≥ 150 ）。當坍落度過大（例如：大於 220），坍落度不能有效反映試體的流動性，此時可用試體坍落擴展後的平均直徑，稱之為坍流直徑，即坍流度(D_f)，作為試體的流動指標。

目前坍流試驗大多用於土體或新拌混凝土特性之量測，並藉此來評估是否符合施工標準，因此目前相關研究多為與混凝土之間的關係，其相關研究說明彙整如下：

Kurokawa et al. (1994)利用坍流試驗結果去估算新拌混凝土的屈服應力與黏滯係數，其分別提出了坍落度與屈服應力及坍流度與屈服應力的關係式，並於坍流試驗當中紀錄了當坍流直徑到達 500 mm 的時間，建立黏滯係數與坍落度與時間、黏滯係數與坍落度與時間、黏滯係數與坍落度與坍流度與時間的關係式，並進一步利用數值模擬所得來的結果與他所提出的關係式去做比較，其結果顯示其理論關係式與數值模擬的結果相當相近。

Komura et al. (1994)依據 Hohenemser and Prager 的賓漢塑性流體理論，推導出坍落度隨時間的變化與坍流度隨時間的變化，利用理論公式得到坍流度及時間與坍落度及時間之曲線關係。因此從理論值曲線得知，當坍落度相同時，黏滯係數越高時達到最終坍落所需的時間就越長，而理論值計算出的坍落隨時間的曲線，在一開始坍落速率是最快的，隨時間增加速率越來越慢直到到達最終坍落度。其研究顯示理論值所計算之坍落隨時間的曲線與試驗值是相當吻合。

$$sl = Sl - \frac{1}{\frac{\alpha \rho G}{600\mu} t + \frac{1}{Sl}} \quad (8)$$

Chidiac et al. (2000)使用自製的自動坍落試驗測量新拌混凝土的流變性質，在整個坍落試驗過程中，由電腦操作與記錄整個試驗數據，包含：坍落桶拉起的速度與坍落度隨時間之變化。其透過最終坍落度去計算新拌混凝土的屈服應力，使用 Tanigawa (1994)所提出的理論式與其修改 Tanigawa (1994)的理論式，而得出半經驗公式去計算新拌混凝土的黏滯係數。針對兩公式所計算出坍落隨時間之變化，可以看出來試驗值的曲線與 Tanigawa 所提出的理論曲線有所差距，而 Chidiac 所提出的半經驗公式曲線是較為平緩（圖 2.6），而 Chidiac 所提出的半經驗公式 method B 較貼近實際坍落過程。

$$sl = Sl - \frac{1}{\frac{\alpha \rho G}{600\mu} t + \frac{1}{Sl}} \quad (9)$$

$$sl = H - \frac{1}{\frac{\alpha \rho G}{600\mu} t + \frac{1}{H}} \quad (10)$$

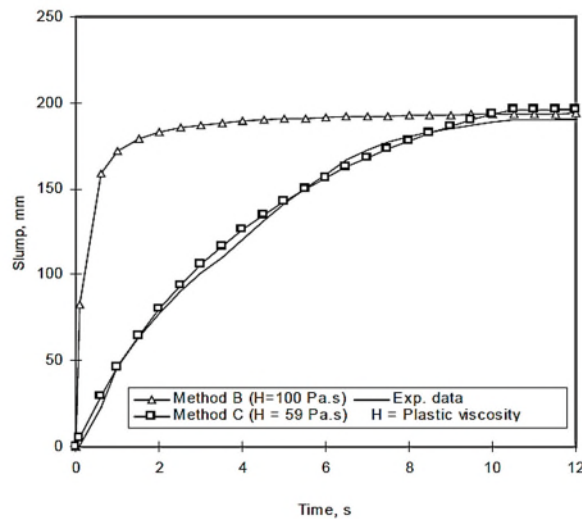


圖 2.6 坍落度隨時間變化圖
(摘自 Chidiac et al. 2000)

Ferraris and Francois (1998)以改良式的坍流試驗測量新拌混凝土的流變特性。過去坍流試驗最常用於估算屈服應力，他則利用改良式的坍度試驗，記錄試體坍落至 100 mm 的時間，如圖 2.7 所示，用以建立黏滯係數與坍落度與時間的關係式。其透過改良式坍流試驗確定試體坍落時間和坍落度，並將其結果與旋轉式黏度計試驗結果比較，以推算混凝土的屈服應力與黏滯係數。然而此方法較適用於坍落度介於 120 至 260 公厘之間的混凝土流變特性試驗。其結果顯示，透過試驗所得的黏滯係數及屈服應力與關係式所計算出來的值去做比較，兩者所得到的數據非常相近。其利用坍落度及坍落時間在圖上找出所對應之屈服應力與黏滯係數之關係，如圖 2.8 所示。

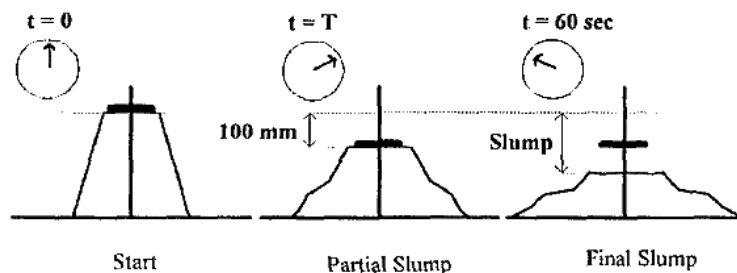


圖 2.7 改良式坍流試驗中記錄坍落度隨時間變化之示意圖

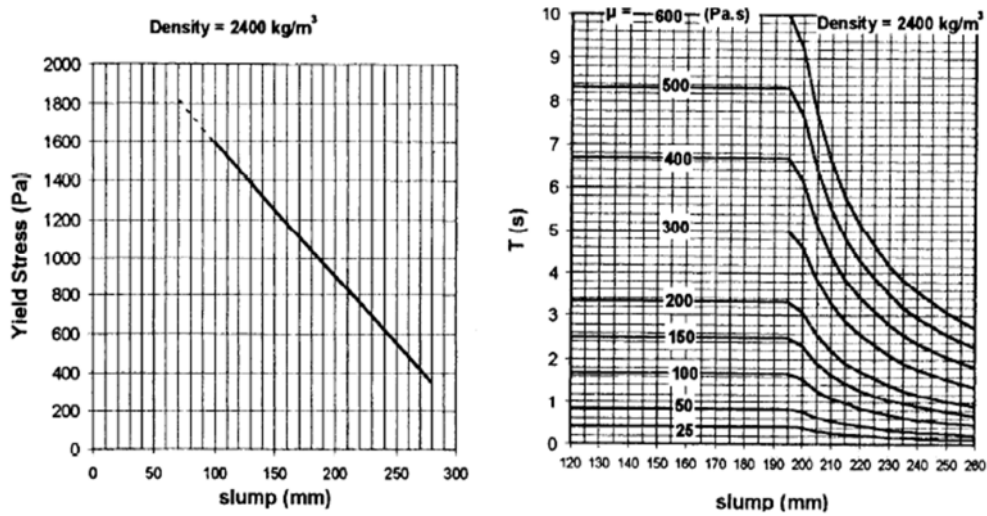


圖 2.8 利用改良式坍流試驗計算屈服應力與黏滯係數之圖
(摘自 Ferraris et al. 1998)

胡小芳和蘇志學(2006)同樣也使用改良式的坍流試驗測量新拌混凝土的流變特性，如圖 2.9 所示。其將改良式坍落桶量測新拌混凝土的坍落度與混凝土錐體表面的坍落距離(50mm、100mm)所經歷的時間(t_{50} 、 t_{100})，與 NXS-11A 旋轉黏度計所測得的屈服應力和黏度係數值做結合，並利用試驗數據建立黏滯係數與屈服應力之經驗公式，進一步將經驗公式計算的黏值係數與屈服應力與實驗值做比較，其研究結果顯示經驗式的計算值與實驗結果有相當的一致性，如圖 2.10 與圖 2.11 所示。

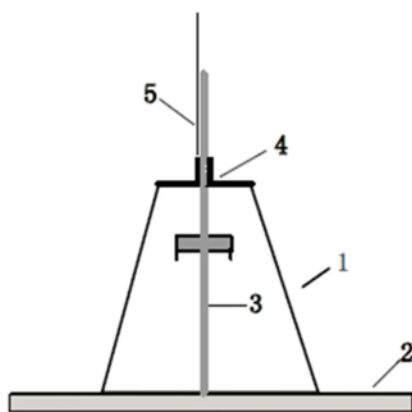


圖 2.9 改良式坍度桶裝置圖

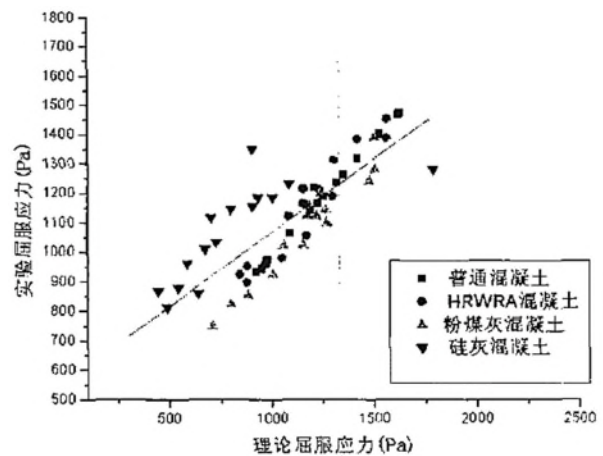


圖 2.10 實際與理論屈服應力之比較

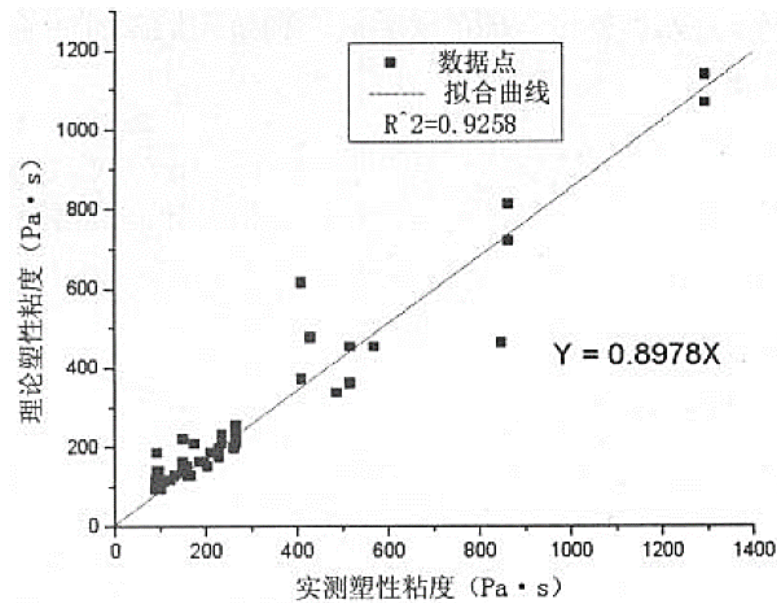


圖 2.11 實際與理論黏滯係數之比較(摘自胡小芳、蘇志學，2006)

Aminul Islam Laskar (2009)利用流變試驗與坍流試驗去探討混凝土的流變特性與坍流度之關聯性，透過了 30 組不同成分組成的混凝土進行試驗，其結果顯示屈服應力與坍落度與坍流度有高度之關聯性，隨著屈服性力增加坍流度或坍落度也會呈線性減少（請參見圖 2.12），而屈服應力與坍落時間則毫無關聯性。在黏滯係數的方面，其結果顯示黏滯係數與坍落度、坍流度及坍落時間皆具有一定之關聯性，如圖 2.13 所示。

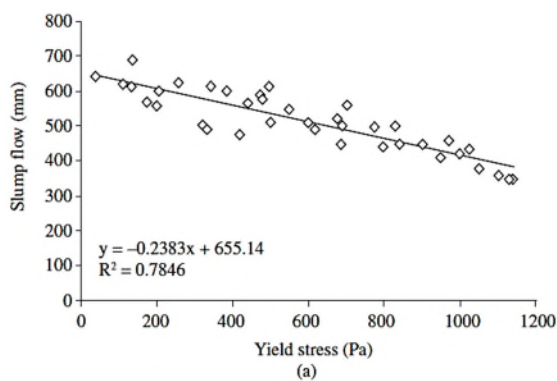


圖 2.12 坍流度與屈服應力關係圖

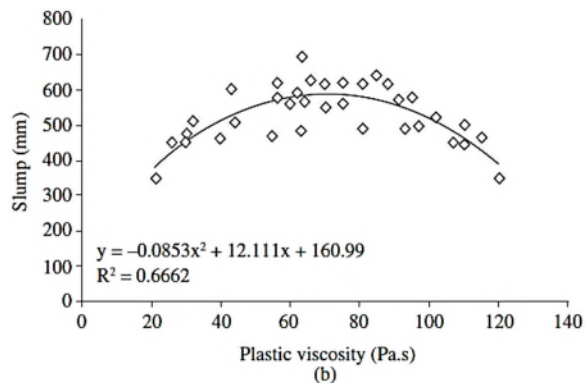
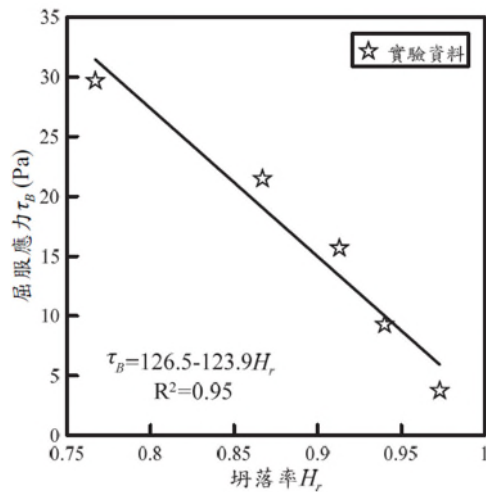
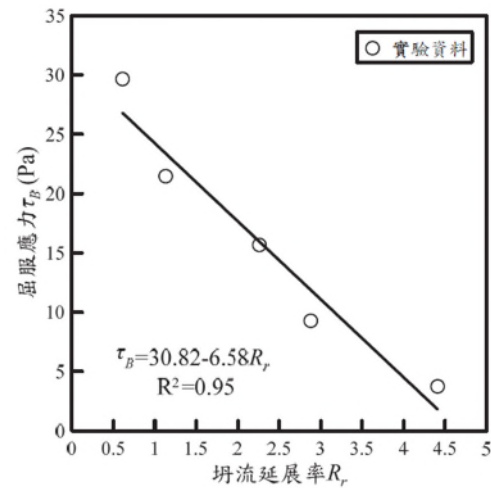


圖 2.13 黏滯係數與坍落度關係圖

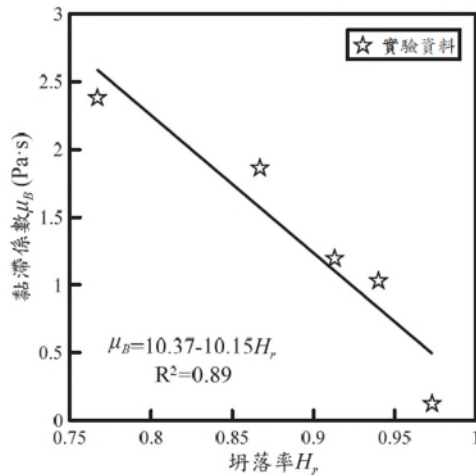
(摘自 Aminul Islam Laskar, 2009)



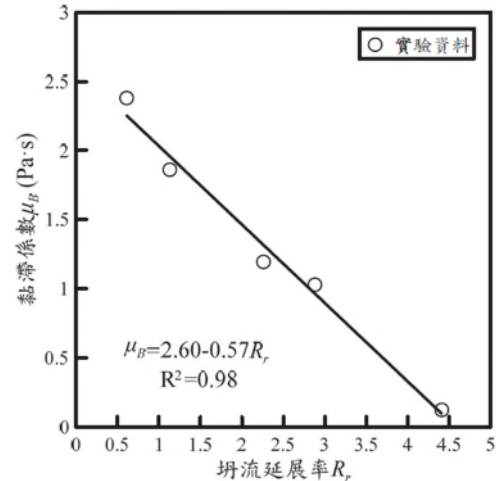
(a) 漿體坍落率與屈服應力之關係



(b) 漿體坍流延展率與屈服應力之關係



(c) 漿體坍落率與黏滯係數之關係



(d) 漿體坍流延展率與黏滯係數之關係

圖 2.14 高嶺土進行流變參數與坍度參數之關聯性分析結果
(詹錢登等，2018)

在詹錢登等(2018)曾針對高嶺土漿體的流變參數及坍度參數進行探討，其試驗結果顯示高嶺土漿體的流變參數及坍度參數與高嶺土漿體的含沙濃度有高度的相關性，請參見圖 2.14，而漿體濃度愈高，屈服應力及黏滯度愈大，坍落高度及坍流直徑則愈小，但其並說明高嶺土畢竟不是天然土石流中所常見的細顆粒泥沙材料，倘若後續針對實際應用層面考量，可採用土石流區域或溝道中常見的細顆粒泥沙材料進行分析探討，較能適用於一般土石流之分析。

根據前人的研究初步瞭解，漿體的坍塌度及坍塌度的大小主要與漿體的流變特性息息相關，尤其是漿體的屈服應力。然而漿體的屈服應力與其坍塌度及坍塌度關係之分析方法大致上區分為三大類：1.固體延展變形理論：以固體性質為主，漿體受重力作用，漿體內除了正向應力 σ (Normal stress) 之外，也產生對應之側向剪應力 τ (Shear stress)，例如：范米賽斯準則(Von Mises criteria)， $\tau = \sigma/\sqrt{3}$ ；崔斯卡準則(Tresca criterion)， $\tau = \sigma/2$ 。當側向剪應力 τ 大於漿體屈服應力 τ_y 時，漿體產生延展變形流動(elongation flow)，坍塌流動停止時，側向剪應力 τ 恰好等於屈服應力 τ_y ，由此建構屈服應力與其坍塌度或坍塌度之關係式(Murata, 1984; Kurokawa et al., 1994; Pashias et al., 1996)；2.流體剪力流：以流體性質為主，將試體的坍塌流動視為純剪力流(Pure shear flow)，垂直方向視為靜水壓，由徑向壓力梯度等於剪應力垂直方向的梯度，推求屈服應力與試體坍塌度或坍塌度之關係(Roussel & Coussot, 2005)；3.綜合前述兩種方法，將試體上層視為不變形區以固體模式處理，下層視為可變形區以流體模式處理(Roussel and Coussot, 2005; Pierre et al., 2013)。

第參章 計畫研究方法

本研究案首先會針對研究區域內的基本資料進行蒐集，並配合現地泥沙粒徑採樣進行分析，進一步透過流變試驗分析研究區域內泥沙漿體的流變參數（例：屈伏應力與黏滯度），且搭配坍流試驗分析研究區域內的坍流參數（例：坍落高度及坍流直徑），最終針對研究區域內泥沙漿體的流變參數與坍流參數進行關聯性分析，有利未來可透過簡易操作的坍流試驗，以獲得其相關參數，並快速推估泥沙漿體的屈服應力與黏滯度，進而瞭解其流動特性。

3.1 泥沙粒徑資料蒐集與現地採樣

3.1.1 研究區域泥沙粒徑蒐集

本研究後續將針對研究區域（信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區）內的過往泥沙粒徑資料進行蒐集。目前已蒐集 1998 年、1999 年、2001 年神木村集水區（愛玉子溪）內的 3 處河床質粒徑採樣資料，如圖 3.1(a)所示，其中值粒徑(d_{50})則分別約為 64 mm、10.63 mm 及 23.4 mm，而沙質含量分別約為 20%、34%與 29%，其中小於 1.0mm 之泥沙粒徑分別約為 19%、29.6%與 22%；而角埔溪集水區內已蒐集 2014 年 3 月中游與下游處的 2 處河床質粒徑採樣資料，如圖 3.1(b)所示，其中值粒徑(d_{50})則分別約為 6.01 mm 及 18.30 mm，而沙質含量分別約為 33.7%與 15.1%，其中小於 1.0mm 之泥沙粒徑分別約為 22.2%與 10.0%；而內社溪集水區內則已蒐集 2012 年 3 月、2014 年 7 月、2015 年 3 月（2 處）與 2022 年 4 月的河床質粒徑採樣資料，共計 5 處（圖 3.1(c)），其中值粒徑(d_{50})則分別約為 29.9 mm、2.4 mm、14.9 mm、32.5 mm 與 21.6 mm，而沙質含量分別約為 10.6%、50.2%、16.7%、18.2%與 16.5%，其中小於 1.0mm 之泥沙粒

徑分別約為 5.3%、32.5%、8.9%、11.5%與 9.5%。本計畫案亦會逐步蒐集相關泥沙粒徑資料進行分析並針對研究區域內之泥沙粒徑進行採樣，亦將透過河床質採樣調查之樣本進行土石流泥沙流變特性之分析探討。

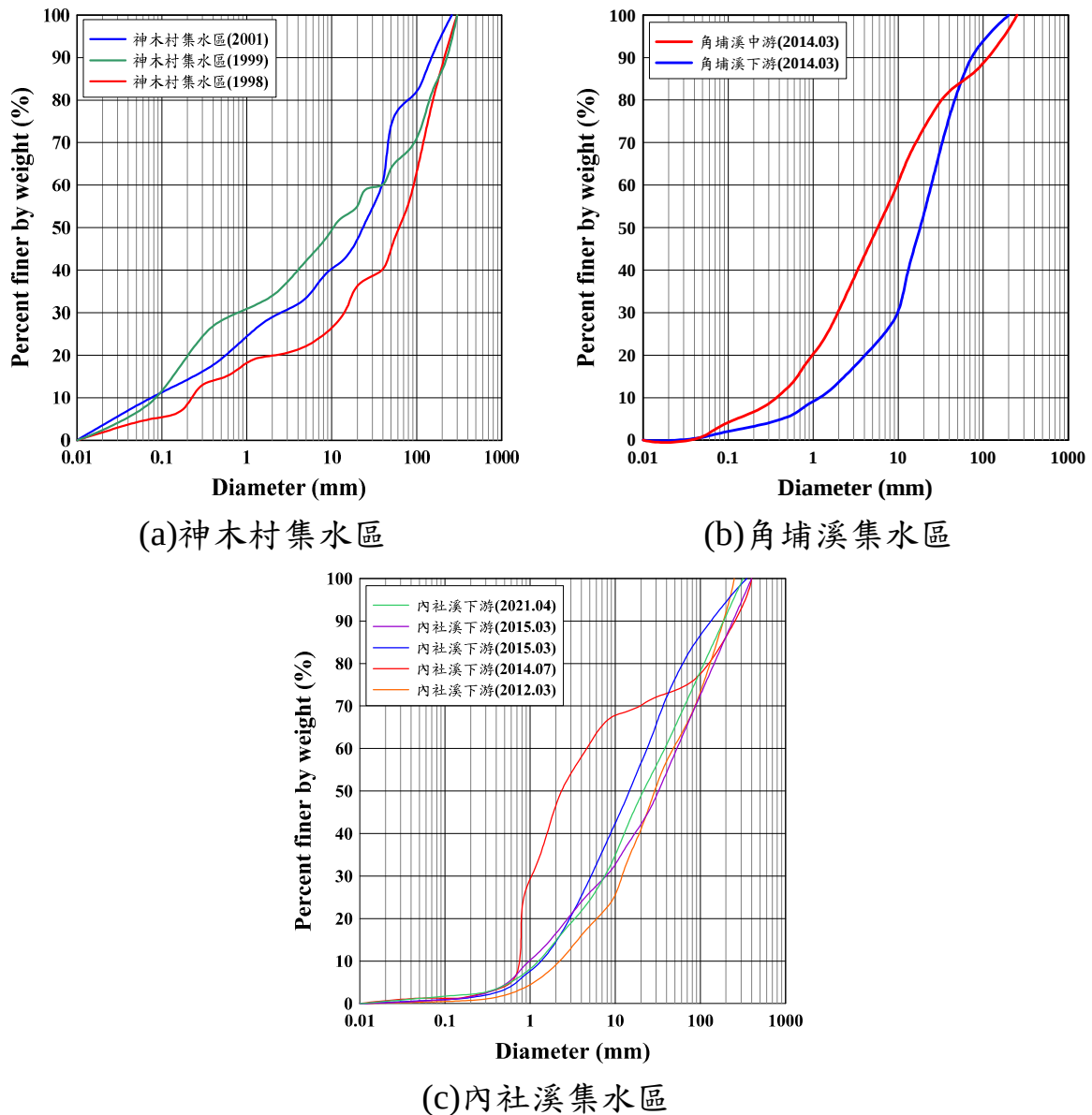


圖 3.1 蒐集土石流河床質泥沙粒徑之分布資料

3.1.2 研究區域泥沙粒徑採樣

本計畫將針對研究區域（信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區）過往河床質採樣點位進行河床質泥沙粒徑的現地篩

分析調查作業，如圖 3.2 所示。其中，河床質調查方法係依據水土保持技術規範，各採樣點試坑面積大小約為一平方公尺的正方形，垂直深度至少 60 公分（如遇岩盤左右移動量測），所挖掘之土石以 3 吋、1.5 吋、1 吋、1/2 吋、3/4 吋及 3/8 吋標準方孔篩進行採樣土石之篩分析，並紀錄停留在各篩網上之土石重量，而大於 3 吋之礫石則直接量測粒徑的大小（包含最大石徑）並記錄其重量。此外，通過 3/8 吋之底盆泥沙，以四分法取回重量約 2.0 公斤之採樣樣品進行室內篩分析作業。現地取回之土石樣品需經過烘箱烘乾後，再以 #4、#8、#16、#20、#30、#50、#100 及 #200 號標準方孔篩進行室內篩分析，並依各篩網之停留百分率及取回樣品重與底盆泥沙總重之比例，換算各篩網實際停留泥沙重量後，再與 3/8 吋以上之土石分析結果合併；重新計算各篩網之停留百分率及通過百分率，即可得調查研究區域之河床質粒徑分布情形。

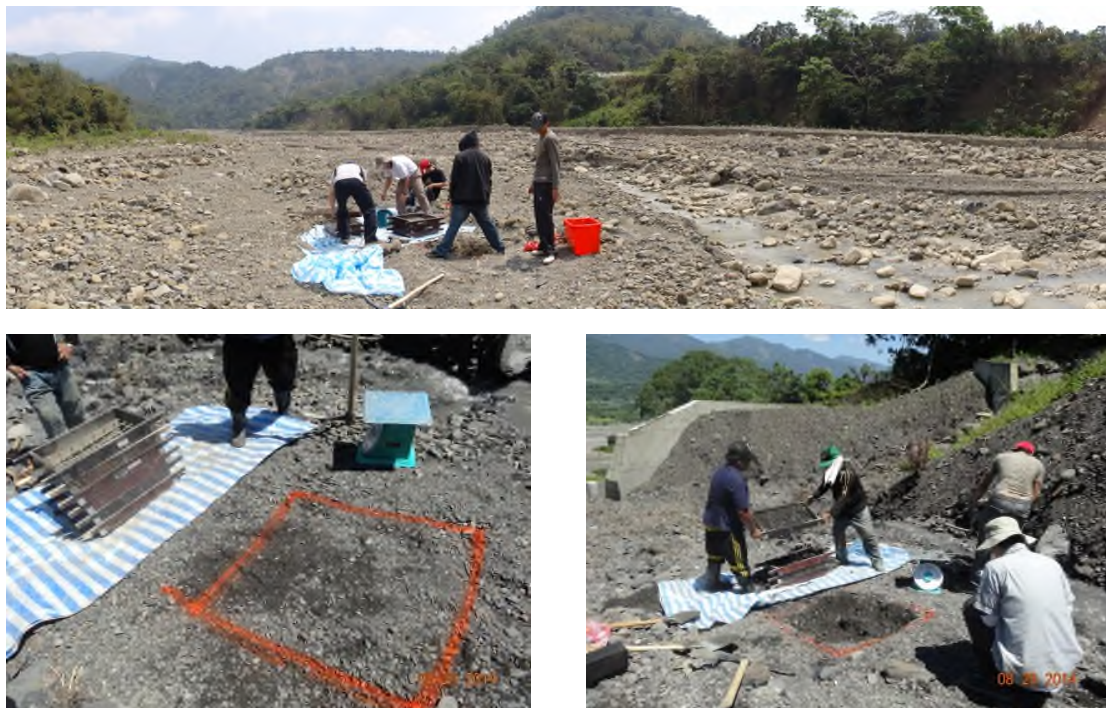


圖 3.2 河床質粒徑調查示意圖

針對泥沙粒徑分布常用的表示方法有梯級頻率圖(Histogram)、頻率

曲線(Frequency curve)及累積頻率曲線(Cumulative frequency curve)。本研究將採用累積頻率曲線方式表示，其縱坐標為累積重量百分比(%)，橫坐標為粒徑大小(mm)並以 10 為基底之對數刻度繪製，而粒徑大小之範圍介於 0.01 mm 至 1,000 mm。然而常見泥沙粒徑的分布型態參數有分選係數 S_c (Sorting coefficient)、幾何偏度係數 S_{sk} (Skewness)及峰態係數 S_k (Arithmetic quartile kuutosis)。其中，分選係數 S_c 用來表示粒徑之分散程度，當分選係數越大，代表粒徑分散程度較大；幾何偏度係數 S_{sk} 用來表示粒徑分布之對稱性，當幾何偏度係數越大，代表粒徑分布越對稱；峰態係數 S_k 用來表示粒徑分布的集中性，當峰態係數越大，代表粒徑分布越集中，因此後續亦將針對採樣之泥沙粒徑分布型態參數進行說明。

3.2 流變試驗儀器與方法

3.2.1 流變試驗設備

本計畫所採用的流變計為美國 Brookfield 公司所製造的 DV-III 型水平旋轉式流變計及 RV 系列之 RV6 圓盤式轉子(Spindle)，利用 DV-III 專用軟體(Rheocalc)進行數據資料的讀取並傳送至電腦進行運算，如圖 3.3 所示。DV-III 型水平旋轉流變計可量測泥漿體與礫石泥漿體之流變特性，其量測的最大黏度為 40,000,000 cP，最大轉速為 250 r.p.m 之間，最大轉矩為 7,187 dyne-cm。其在量測漿體濃度時，漿體必須裝在容器裡以進行量測，而 Brookfield 公司所建議之容器內徑為 3.25 in(83 mm)或更大之 600 ml 容器，因此可配合一般口徑為 9 cm 的 500 ml 或 600 ml 的燒杯，對於粗粒徑漿體的量測彈性較大（王志賢，2007），本研究所使用的容器為符合 Brookfield 公司所建議之容器規範，所採用之容器為口徑為 8.6 mm，容量為 600 ml 的燒杯，如圖 3.4 所示。因此將 RV6 圓盤轉子與 DV-III 型水平旋轉式流變計相連後，置入試驗漿體中，並設定不同轉速進行量測，即可得知剪應力及轉速之關係，進而推求漿體之黏滯度，整體試驗儀器配置，請參見圖 3.5。

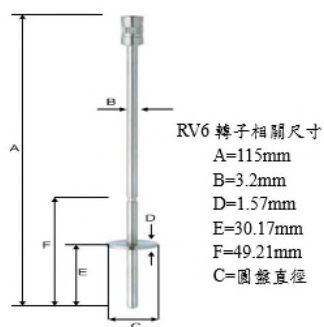


圖 3.3 本試驗採用之流變分析儀器



圖 3.4 本試驗採用之樣品槽



圖 3.5 DV-III 流變計及資料擷取系統之整體試驗配置圖

由於 DV-III 型水平旋轉式流變計的記錄數據單位是採用 R.P.M.，因此從流變計所測得之數據資料，需要再透過下列步驟進行處理，其步驟如下：

1. 將試驗中所測得各轉速所相對應之扭矩帶入下式中，可推求剪應力。

$$\tau_i = k_{aT} \times \alpha_i \quad (11)$$

式中， τ_i 為第*i*組數據之剪應力； k_{aT} 為不同型號 RV 轉子之修正係數； α_i 為流變計上輸出的扭矩值。

2. 以雙對數座標點繪剪應力(τ_i)與轉速(N_i)之關係曲線，可得一斜率*n*，則剪切率 $\dot{\gamma}$ 可由下式計算之，式中 $k_{Nr}(n)$ 可由 n_s 值查表得之，請參見表 3.1。

$$\dot{\gamma} = k_{Nr}(n) \times N_i \quad (12)$$

3. 最終將兩式所推求得之剪應力及剪切率進行點繪，即可得漿體之流變特性曲線。

表 3.1 剪切率計算轉換因子

spindle S		1	2	3	4	5	6	7
		k_{aT}						
k_{Nr}	0.1	1.728	1.431	1.457	1.492	1.544	1.366	1.936
	0.2	0.967	0.875	0.882	0.892	0.907	0.851	1.007
	0.3	0.705	0.656	0.656	0.658	0.663	0.629	0.681
	0.4	0.576	0.535	0.530	0.529	0.528	0.503	0.515
	0.5	0.499	0.458	0.449	0.445	0.442	0.421	0.413
	0.6	0.449	0.404	0.392	0.387	0.382	0.363	0.346
	0.7	0.414	0.365	0.350	0.343	0.338	0.320	0.297
	0.8	0.387	0.334	0.317	0.310	0.304	0.286	0.261
	0.9	0.367	0.310	0.291	0.283	0.276	0.260	0.232
	1.0	0.351	0.291	0.270	0.262	0.254	0.380	0.209

(資料來源：Mitschka, P.)

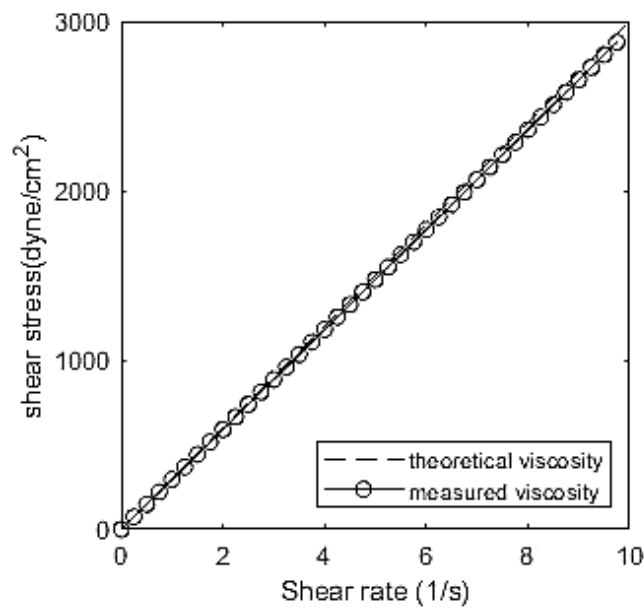


圖 3.6 矽礦油標準液之剪應力與剪切率關係圖

3.2.2 流變計校正

在進行試驗前，首先針對 Brookfield 公司的 DV-III 型水平旋轉式流變計進行校正，本計畫採用 Brookfield 公司所生產之矽礦油標準液進行黏度校

正，其黏度為 30,000cP。使用矽礦油標準液進行試驗所得剪切率與剪應力之關係，如圖 3.6 所示，針對校正結果顯示試驗測量得之黏度略低於標準液所標示的黏度，但試驗量測值與標示值得差異並不顯著，兩者差距範圍在 2% 至 5% 之間，尚符合該儀器之額定誤差範圍內。

3.2.3 試驗方法及步驟

本試驗主要是為了測量泥沙漿體的屈服應力與黏滯係數，因此透過 RV6 轉子於各轉速下的扭矩值，將試驗數據轉換成剪應力及剪切率之關係圖，進一步透過其關係即可取得泥沙漿體於不同濃度下之屈服應力與黏滯係數。而試驗步驟如下：

1. 架設流變計，並將流變計與電腦連接
2. 調配試驗所需的泥沙漿體濃度
3. 調整流變計的水平氣泡，使其保持在水平狀態，並將流變計歸零
4. 在將 RV6 轉子安裝於儀器上，並開始啟動流變計進行數據測量
5. 試驗完成，並取得試驗相關數據

除上述步驟外，在試驗前調整不同濃度的漿體時，需再將流變計歸零以減少試驗誤差，而在調配不同漿體濃度時，需一邊攪拌一邊分次將泥沙顆粒放置燒杯中與水進行攪拌，減少攪拌不均勻等問題。

3.3 坍流試驗儀器與方法

3.3.1 坍流試驗設備

坍流試驗是簡單操作又經濟便宜的試驗，試驗結果可以反映出試體的塑性流變特徵，因此除了用在混凝土的測試之外，漸漸地也被用來測試其他流體或混合體的流變特徵(Pashias et al., 1996; Roussel and Coussot, 2005)。由於原先用於混凝土坍度（或坍流）試驗所使用的標準坍落試驗桶的尺寸較大，每次試驗需要試體體積約 5.5 公升。當坍落試驗在試驗室用於其他材料的試驗時，為了減少試體的準備量，進行試驗時常使用較小的試驗桶，稱為小型試驗桶(Mini-Slump cone)，例如：美國試驗與材料協會的 ASTM C230 試驗桶的尺寸為 $d_0 = 70 \text{ mm}$ 、 $D_0 = 100 \text{ mm}$ 、 $H_0 = 50 \text{ mm}$ （容積 $V = 0.267$ 公升）；歐洲專業建築化學品和混凝土系統聯合會(EFNARC, European federation of specialist construction chemicals and concrete systems)建議的分析混凝土坍流特性的試驗桶尺寸為 $d_0 = 70 \text{ mm}$ 、 $D_0 = 100 \text{ mm}$ 、 $H_0 = 60 \text{ mm}$ （容積 $V = 0.344$ 公升），它與 ASTM C230 試驗桶的差別主要是桶高多 10 mm (Sakir et al., 2020)。Bouvet et al. (2010)使用小型試驗桶（ $d_0 = 70 \text{ mm}$ 、 $D_0 = 80 \text{ mm}$ 、 $H_0 = 40 \text{ mm}$ ，容積 $V = 0.177$ 公升），進行水泥漿體的坍流行為的理論分析及數值模擬。詹錢登等人(2018)使用小型試驗桶（ $d_0 = 50 \text{ mm}$ 、 $D_0 = 100 \text{ mm}$ 、 $H_0 = 150 \text{ mm}$ ，容積 $V = 0.687$ 公升）進行高嶺土泥沙漿體的坍度試驗，分析坍落度與坍流度與漿體含沙濃度之關係。Collins et al. (2012)使用更小型的試驗桶（ $d_0 = 19 \text{ mm}$ 、 $D_0 = 38 \text{ mm}$ 、 $H_0 = 57 \text{ mm}$ ，容積 $V = 0.038$ 公升）來探討添加物對奈米碳管(Carbon nanotube)和普通波特蘭水泥(OPC)混合漿體的工作性及強度的加強效果。Murugan et al. (2016)使用和 Collins et al. (2012)相同之試驗桶來研究氧化石墨烯對波特蘭水泥混合漿體的工作性及強度的加強效果。

本研究後續試驗所使用之泥沙材料將針對研究區域（信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區）的現地泥沙顆粒取樣（小於 1.0 mm），因此後續將依照詹錢登等人(2018)所使用的小型試驗桶（ $d_0 = 5$ 公分、 $D_0 = 10$ 公分、 $H_0 = 15$ 公分， $V = 0.687$ 公升），請參見圖 3.7，並於無吸水性之鋼板（厚度為 0.6 mm，長度為 78 cm，寬度為 78 cm）平面上進行後續的坍流試驗，進而分析探討研究區域內泥沙漿體的坍流參數（例：坍落度與坍流度）。針對本研究的坍流參數（坍落度與坍流度）中，因試驗桶的形狀為平截圓錐狀，如圖 3.8 所示，其頂端開口直徑為 d_0 、底端開口直徑為 D_0 、桶高為 H_0 。在試驗中垂直拉起試驗桶時，漿體因自重產生坍落之現象，用桶高減去坍落後漿體頂部高度(H_f)，稱為坍落度($S = H_0 - H_f$)；當漿體坍落後，漿體底度直徑變為 D_f ，則稱之為坍流度。

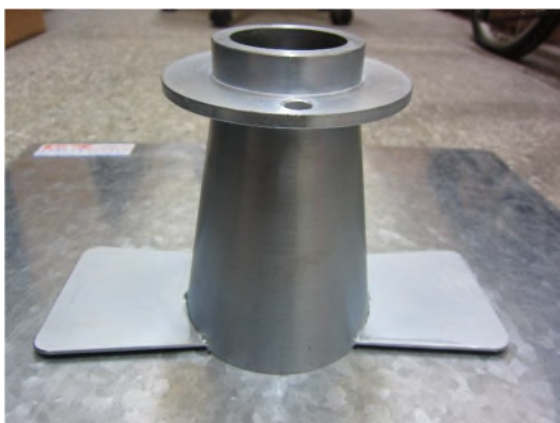


圖 3.7 本試驗採用之平截圓錐試驗桶

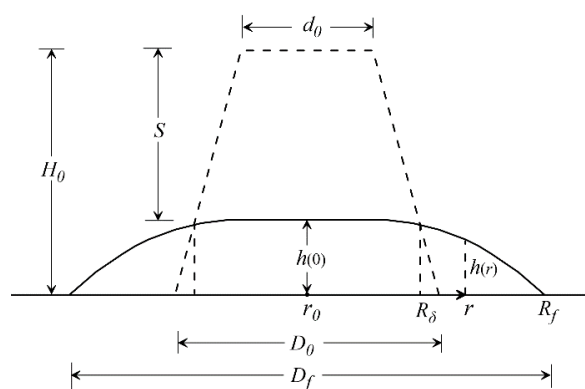


圖 3.8 坍流試驗中漿體坍流前後之垂直斷面示意圖

3.3.2 改良坍流試驗裝置

在坍流試驗操作過程中，因坍落試驗桶須由操作人員將其提起，使其內部泥沙漿體坍落完成試驗。然而針對試驗人員提起的部分，其試驗過程當中常受到人為操作之差異影響，於提起坍落桶過程中會有前後左右偏擺的現象，因此造成坍落的漿體會有較不對稱之問題，進而產生試驗量測數據的誤

差，如圖 3.9 所示。本計畫後續為了降低此情況發生，進一步設計架設一個操作鐵架（長 80 cm、寬 22 cm、高 70 cm），如圖 3.10 所示，鐵架上設置滑軌並在坍落桶左右兩側加設滑輪，如圖 3.11 所示，使其能穩定平均的垂直向上提升，以降低因人為操作因素所造成前後左右偏擺之問題。

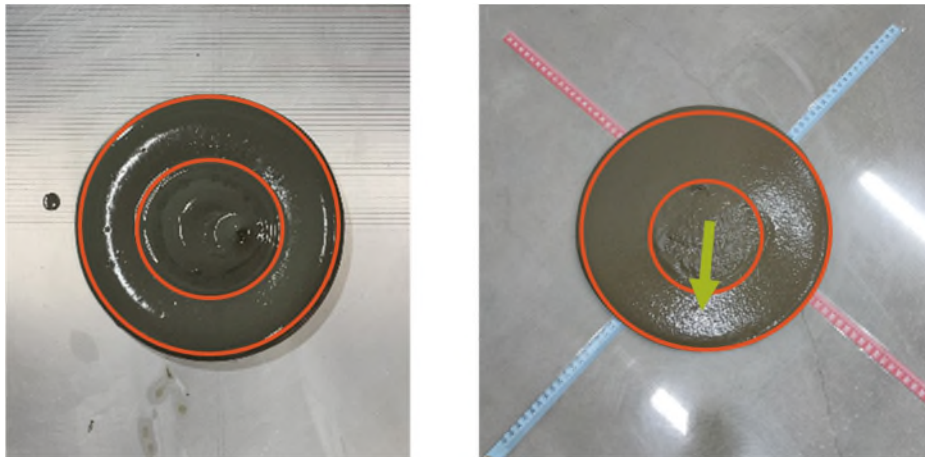


圖 3.9 坍落試驗後，試體無偏移(左)與向左下偏移(右)之現象



圖 3.10 坍流試驗操作鐵架

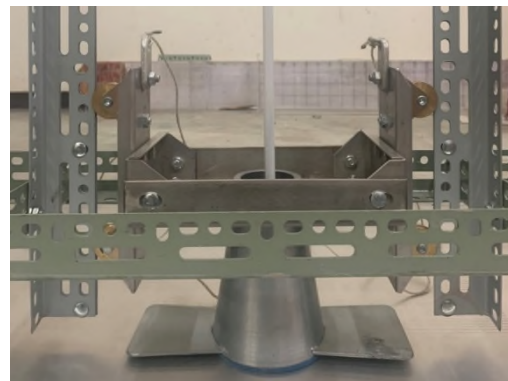


圖 3.11 兩側加設滑輪之坍落桶

3.3.3 試驗方法及步驟

本試驗主要是為了測量泥沙漿體的坍落度及坍流度，因此首先須調配試驗所需的漿體濃度，以觀測最終漿體的坍落度、坍流直徑與紀錄坍落度及坍流度隨時間的變化，進而分析探討坍落度及坍流度與流變參數之關係。在觀測紀錄漿體材料於各配置下的試驗步驟相同，而試驗步驟如下：

1. 調配實驗所需的漿體濃度
2. 將坍度儀與鐵架架設於鐵板之上
3. 將實驗樣本坍入坍度儀中
4. 刮除多餘之實驗樣本，將坍度儀垂直拉起
5. 在拉起坍度儀的同時，高速攝影機開始拍攝
6. 測量其坍落度及坍流度
7. 重複步驟 1~5 直到所有體積濃度實驗皆完成

3.4 試驗材料與分析項目

3.4.1 試驗泥沙材料

過往流變試驗大多使用高嶺土的混合漿體為主，而少數是使用水庫淤泥漿體進行研究，上述之兩種材料皆屬於粒徑較小且具有凝聚性之泥沙顆粒。本研究首先會透過水庫淤泥的現地泥沙作為試驗材料（中值粒徑為 0.0036 mm ），分別進行流變試驗與坍度試驗。過往研究顯示，其漿體體積濃度低於 20% 時，其流動性質較接近牛頓流體，其屈服應力接近於 0，如圖 3.12 所示，因此試驗之體積濃度範圍設定在 27.5% 至 37.5% 之間（表 3.2）。

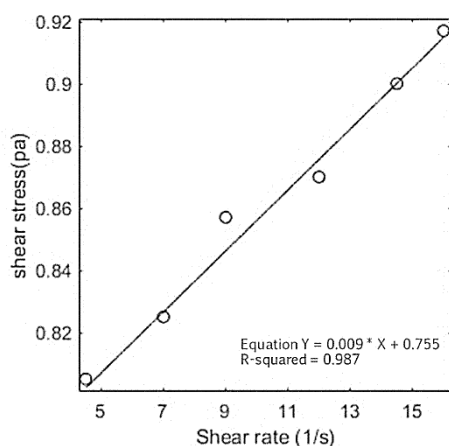


圖 3.12 水庫淤泥體積濃度 20% 之流變關係圖



圖 3.13 體積濃度 37.5% 靜置後之現地沙漿分層現象

表 3.2 水庫淤泥漿體試驗濃度條件設定

細泥漿體材料	水庫淤泥				
體積濃度(%)	27.5	30	32.5	35	37.5

參考資料：本計畫彙整

然而現地土石流河道內之粒徑組成較大且分布較廣，細粒料含量較少，由本研究現地採樣資料可瞭解，過#18 號篩(1.0 mm)之粒料約占整體之 8% 至 27%，過#100 號篩(0.150 mm)之粒料僅占整體之 1%至 7%。倘若直接只用現地材料，將較難配置出具「漿體」特性之混和試體。因此為瞭解應用現地泥沙於流變試驗之適用性，本研究以震擺式篩沙機將現地沙分別以通過#100 號(0.150mm)篩網、#200 號(0.075mm)篩網及#300 號(0.048mm)篩網進行過篩分類，以細粒料進行漿體配置，以執行後續流變與坍塌試驗。

由於試驗材料與前人研究較為不同，故本研究首先瞭解不同粒徑大小之材料，於配置成「漿體」，所需要之體積濃度，漿體體積濃度(C_{vt})之定義是細顆粒體積與混合後漿體體積之比值，其公式如下：

$$C_{vt} = \frac{V_f}{V_f + V_w} \quad (13)$$

上式中， V_f 為泥沙顆粒所佔之體積； V_w 為水體積。

因此於前置試驗中，從通過#100 號篩網之泥沙開始試驗，發現使用現地泥沙調配之漿體，在體積濃度約小於 40%時，將會有「固液分離」的現象，如圖 3.13 所示，其將造成混合漿體之上層含沙濃度較低，而下層之含沙濃度較高之情況，因此並不是濃度均勻混合分布之漿體，倘若以此漿體進行流變試驗，其試驗結果將與給定之漿體濃度不相符合，因此於體積濃度的選擇上，本試驗將採用體積濃度(C_{vt})大於 40%之漿體進行後續流變與坍塌試驗，因此試驗之體積濃度範圍設定在 40%至 50%之間，如表 3.3 所示。

表 3.3 土石流現地泥沙漿體試驗濃度條件設定

泥沙漿體材料	體積濃度(%)				
通過#100 號篩之泥沙	40	42.5	45	47.5	50
通過#200 號篩之泥沙					
通過#200 號篩之泥沙					

參考資料：本計畫彙整

3.4.2 試驗分析項目

本試驗所使用的坍度桶為國家標準 CNS 規格之縮小尺寸，而縮小尺寸之用意在於方便試驗的操作與量測。然而坍落桶有著不同的大小及形狀，為了有助於後續的分析與統一性，因此將坍落試驗桶的形狀、漿體的坍落度及坍流度與漿體的屈服應力及黏滯係數之關係，進一步以用無因次的方法來表示，相關分析項目說明如下：

$$S_* = \frac{S}{H_0} = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \quad (14)$$

式中， S_* 為無因次坍落度； S 為坍落度； H_0 為坍落桶高； H_f 為坍落後試體高度。

$$H_{f*} = \frac{H_f}{H_0} = \frac{H_0 - S}{H_0} \quad (15)$$

式中， H_{f*} 為無因次坍落試體高度； H_f 為坍落後試體高度； S 為坍落度； H_0 為坍落桶高。

$$D_{f*} = \frac{D_f}{D_0} \quad (16)$$

式中， D_{f*} 為無因次坍流度； D_f 為坍落後式體底部直徑； D_0 為試驗桶底部開口直徑。

$$\tau_{y*} = \frac{\tau_y}{\rho_m g H_0} \quad (17)$$

式中， τ_{y*} 為無因次屈服應力； τ_y 為屈服應力； ρ_m 為試體密度； H_0 為坍落桶高； g 為重力加速度。

$$\mu_{B*} = \frac{\mu_B}{\rho_m \sqrt{H_0 g} \times H_0} \quad (18)$$

式中， μ_{B*} 為無因次黏滯係數； μ_B 為黏滯係數； ρ_m 為試體密度； H_0 為坍落桶高； g 為重力加速度。

第肆章 計畫研究結果與分析

4.1 泥沙粒徑採樣分析

本計畫針對研究區域（信義鄉愛玉子溪集水區、甲仙區角埔溪集水區、來義鄉內社溪集水區）過往河床質採樣點位進行河床質泥沙粒徑的現地篩分析調查作業，如圖 4.1 至圖 4.3 所示，採樣點位座標如表 4.1 所示。



圖 4.1 信義鄉愛玉子溪集水區河床質粒徑調查



圖 4.2 甲仙區角埔溪集水區河床質粒徑調查



圖 4.3 來義鄉內社溪集水區河床質粒徑調查

表 4.1 河床質粒徑調查點位座標與位置概述

集水區	取樣日期	TWD97 座標		取樣位置概述
		X	Y	
愛玉子溪	3 月 31 日	235138	2602464	愛玉子溪鋼便橋上游
內社溪	4 月 27 日	217868	2491790	內社溪與來社溪匯流處上游
角埔溪	4 月 28 日	213482	2561181	小林村紀念公園旁河道上游

參考資料：本計畫彙整

一、信義鄉愛玉子溪集水區

本研究針對愛玉子溪現地泥沙粒徑採樣之分析結果，如圖 4.4(a)所示，其中值粒徑(d_{50})為 3.82 mm，而沙質含量約為 38.7%，其中小於 1.0mm 之泥沙粒徑約為 26.8%。進一步將泥沙粒徑分布型態以參數來表示，其分選係數 S_c 為 3.88、幾何偏度係數 S_{sk} 為 0.915 以及峰態係數 S_k 為 0.259。本年度與 1998 年、1999 年及 2001 年的河床質泥沙粒徑進行比對瞭解，本年度之中值粒徑為最小（約 3.82 mm），而 1998 年的中值粒徑為最大（約 64 mm）；於 1999 年及 2001 之採樣資料的中值粒徑介於 10 至 25 mm，因泥沙粒徑採樣時間相隔較久，其整體泥沙粒徑的採樣資料差異較大。

二、甲仙區角埔溪集水區

本研究針對角埔溪現地泥沙粒徑採樣之分析結果，如圖 4.4(b)所示，其中值粒徑(d_{50})為 4.59 mm，而沙質含量約為 33.8%，其中小於 1.0mm 之泥沙粒徑約為 25.3%。進一步將泥沙粒徑分布型態以參數來表示，其分選係數 S_c 為 4.99、幾何偏度係數 S_{sk} 為 1.11、峰態係數 S_k 為 0.0430。本年度與 2014 年的河床質泥沙粒徑進行比對瞭解，於角埔溪中游的中值粒徑(d_{50})分別約為 4.59 mm 與 6.01 mm，其泥沙粒徑分布並無太大的差異情況。

三、來義鄉內社溪集水區

本研究針對內社溪現地泥沙粒徑採樣之分析結果，如圖 4.4(c)所示，其中值粒徑(d_{50})為 16.8 mm，而沙質含量約為 14.4%，其中小於 1.0mm 之泥沙粒徑約為 8.1%。進一步將泥沙粒徑分布型態以參數來表示，其分選係數 S_c 為 3.18、幾何偏度係數 S_{sk} 為 0.780、峰態係數 S_k 為 0.132。本年度與 2012 年、2014 年、2015 年及 2021 年的河床質泥沙粒徑進行比對瞭解，於 2014 年之中值粒徑為最小（約 2.4 mm）；其他年份之中值粒徑均皆介於 15 至 30 mm。本研究進一步將本年度之粒徑分布資料與往年資料（2012 年、2014 年、2015 年、2021 年）進行比對，可得到 2014 年粒徑分布曲線形狀大致呈現殘缺級配，其他年份之粒徑分布曲線形狀大致呈現優良級配。

本研究進一步比較不同研究區域之泥沙粒徑分布情況，如表 4.2 所示，首先在中值粒徑(d_{50})方面，以內社溪之中值粒徑為最大（16.8 mm），其次為角埔溪（4.59 mm）與愛玉子溪（3.82 mm），於細顆粒材料方面（小於 0.15 mm，通過#100 號篩）佔整體粒徑分布之百分比，分別約為 1%、7%及 5%；在分選係數(S_c)方面，以角埔溪的泥沙粒徑分散程度最大（ S_c 為最大），而內社溪泥沙粒徑分散程度最小（ S_c 為最小）；幾何偏度係數(S_{sk})方面，以角埔溪泥沙粒徑分布最為對稱（ S_{sk} 為最大）；峰態係數(S_k)方面，以愛玉子溪之泥沙粒徑分布最為集中（ S_k 為最大）。

表 4.2 愛玉子溪、角埔溪及內社溪泥沙粒徑分布型態之參數比較

	愛玉子溪	角埔溪	內社溪
中值粒徑(d_{50})	3.82 mm	4.59 mm	16.8 mm
分選係數(S_c)	3.88	4.99	3.18
幾何偏度係數(S_{sk})	0.915	1.11	0.779
峰態係數(S_k)	0.259	0.0430	0.132

參考資料：本計畫彙整

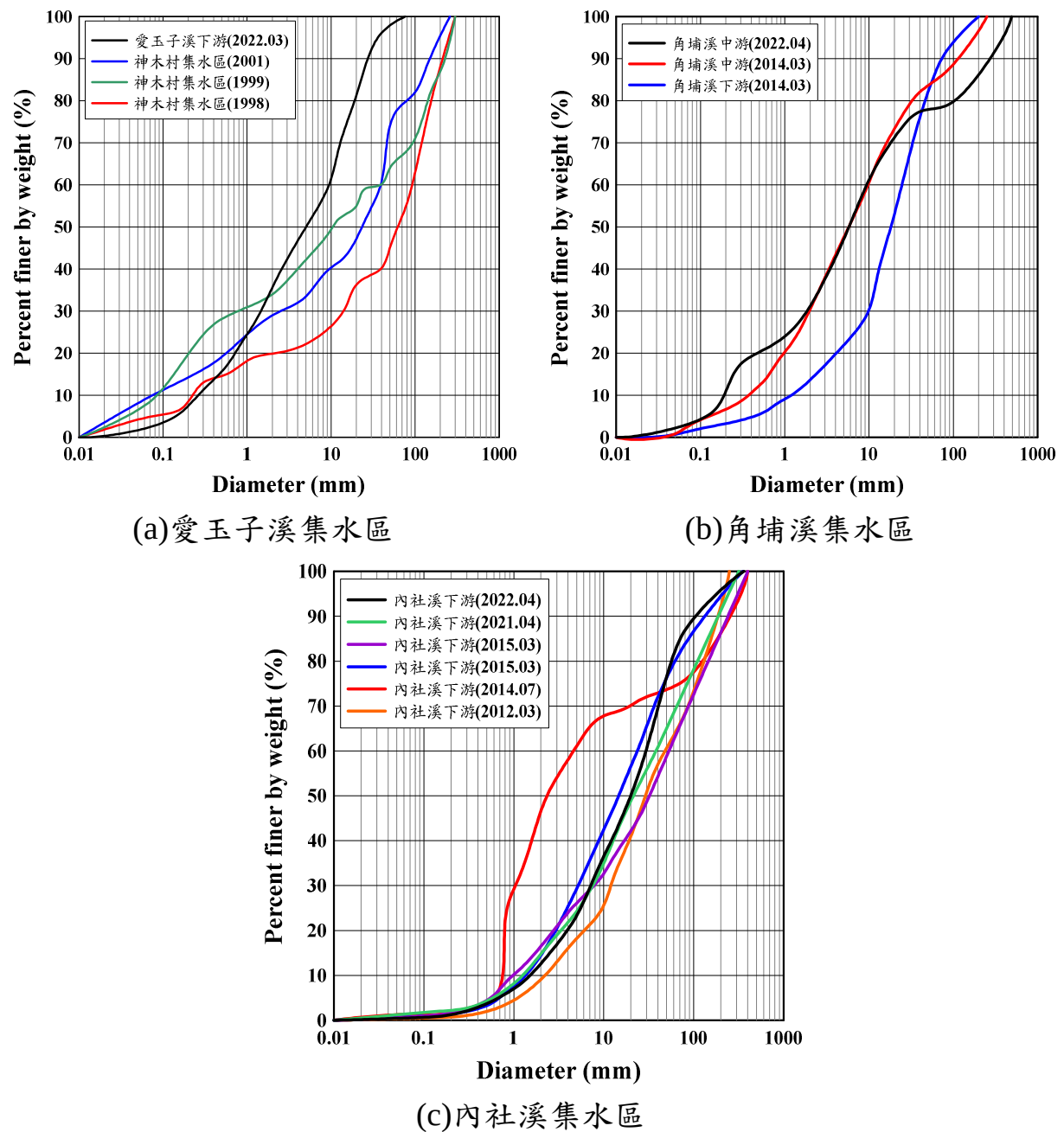


圖 4.4 土石流現地採樣之河床質泥沙粒徑分布

4.2 流變試驗結果與分析

本計畫針對現地粒徑進行初步的分析了解，其中愛玉子溪與角埔溪小於 1.0mm 之泥沙粒徑分別約占 26.8%與 25.3%，而內社溪小於 1.0mm 之泥沙粒徑則僅約為 8.1%，進一步分析於通過#100 號篩（粒徑小於 0.15 mm）之泥沙粒徑佔整體粒徑分布之百分比，分別約為 5%、7%、1%，而內社溪內的泥砂粒徑分布以沙質(Sand)以上粒徑組成為主，於後續的流變試驗中易產生現地沙漿分層現象，因此本研究後續分別針對水庫淤泥及愛玉子溪與角埔溪的現地沙材料配置泥沙漿體以進行流變試驗，以下依序針對試驗結果進行說明。

4.2.1 水庫淤泥（泥沙粒徑小於 0.044 mm）

本試驗首先透過水庫淤泥的現地泥沙作為試驗初步材料進行流變試驗，其中針對漿體的泥沙粒徑組成（圖 4.5）進行分析了解，其漿體泥沙的中值粒徑(d_{50})約為 0.0037 mm，其中黏土質泥沙(粒徑小於 0.004 mm)占 53.12%，且其都小於 0.062 mm，其組成以粉沙與黏土為主。本研究後續水庫淤泥流變試驗之漿體體積濃度，其範圍設定於 27.5%至 37.5%之間，分別為 27.5%、30%、32.5%、35%及 37.5%。

流變試驗結果顯示（圖 4.6），當體積濃度(C_{vt})為 27.5%時，剪應力介於 10.6 至 12.7 Pa 之間；當體積濃度(C_{vt})為 30%時，剪應力介於 17.4 至 26.0 Pa 之間；當體積濃度(C_{vt})為 32.5%時，剪應力介於 27.1 至 47.4 Pa 之間；當體積濃度(C_{vt})為 35%時，剪應力介於 42.3 至 89.3 Pa 之間；當體積濃度(C_{vt})為 37.5%時，剪應力介於 71.9 至 148.0 Pa 之間。

根據漿體剪應力與剪應變率的關係曲線（圖 4.6）瞭解，其整體趨勢呈

現剪應力隨著剪應變率的增加而增大，但於體積濃度為 27.5%、30% 及 32.5% 的整體變化幅度並不顯著，在體積濃度為 35% 時，其變化幅度就較大於前三者，而體積濃度為 37.5% 時，其整體的變化幅度就更加明顯。然而剪應變率與剪應力之趨勢線代表著各體積濃度的屈服應力與黏滯係數，其趨勢線的斜率即為黏滯係數，因此當趨勢線與 Y 軸相交所對應之值即為屈服應力，其試驗結果彙整於表 4.3。

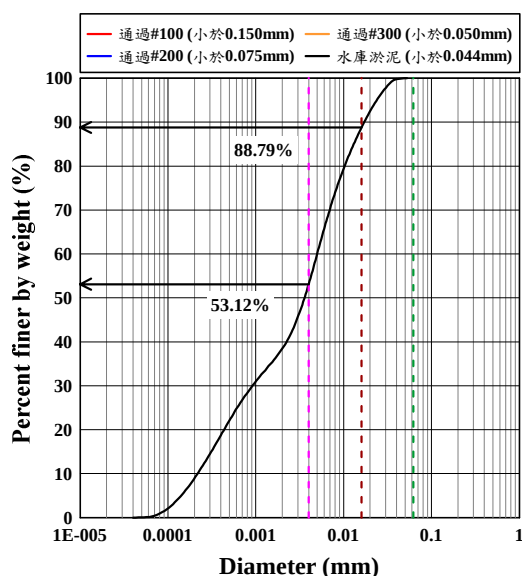


圖 4.5 水庫淤泥漿體之泥沙粒徑分布圖

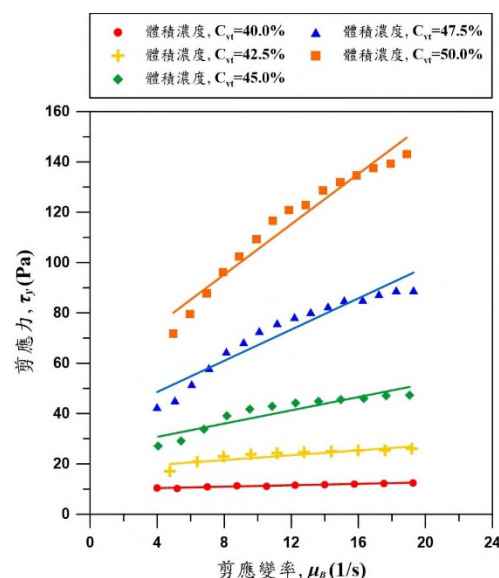


圖 4.6 水庫淤泥不同體積濃度(C_{vt})之流變關係圖

表 4.3 水庫淤泥漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)		27.5	30	32.5	35	37.5
水庫淤泥	屈服應力(pa)	10.06	18.47	26.58	37.50	57.96
	黏滯係數(pa·s)	0.14	0.41	1.20	2.95	4.72
	無因次屈服應力	0.0047	0.0084	0.0118	0.0162	0.0243
	無因次黏滯係數	0.0005	0.0015	0.0043	0.0103	0.016

參考資料：本計畫彙整

根據屈服應力及黏滯係數與體積濃度之關係（圖 4.7 與圖 4.8）顯示，其整體趨勢皆呈現指數變化，屈服應力及黏滯係數隨著體積濃度的增加而增加，其增加的幅度於前三者濃度（27.5%、30%、32.5%）之間並無明顯變

化，但當體積濃度到達 35%及 37.5%時，屈服應力及黏滯係數的上升幅度就有顯著的增加。

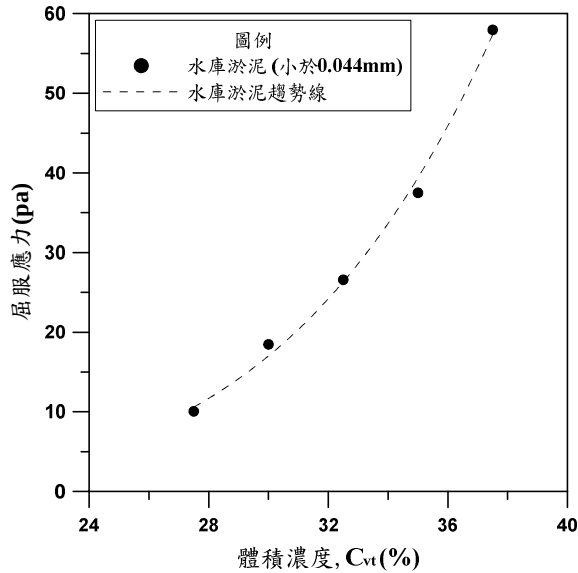


圖 4.7 水庫淤泥漿體的體積濃度 (C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖

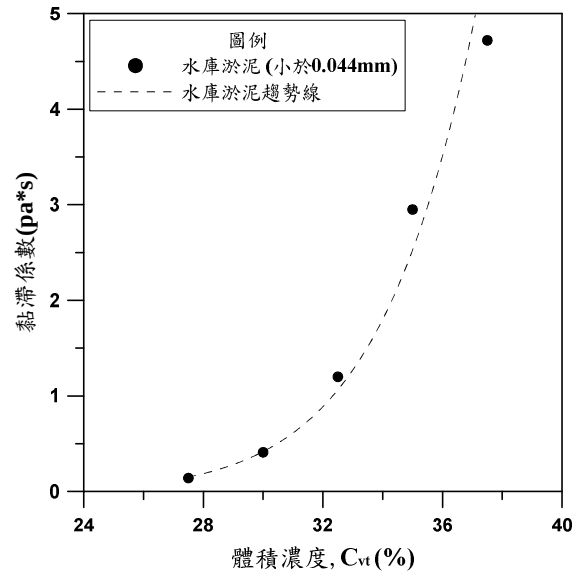


圖 4.8 水庫淤泥漿體的體積濃度 (C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖

4.2.2 土石流集水區現地沙（角埔溪集水區）

本依序針對土石流（角埔溪集水區）現地泥沙進行流變試驗，以過#100號篩、#200號篩及#300號篩之現地泥沙作為試驗初步材料，其中針對漿體的泥沙粒徑組成（圖 4.9）進行分析了解，其漿體泥沙的中值粒徑(d_{50})分別約為 0.069 mm、0.0301 mm 以及 0.0169 mm，其中黏土質泥沙（粒徑小於 0.004 mm）分別約占 8.6%、16.2%與 19.4%，而泥沙(Silt)粒徑介於 0.004mm 至 0.062 mm 的比例分別約為 45.7%、70.4%與 76.6%，因此過#100號篩之泥沙漿體組成將以沙、粉沙為主，而過#200號篩與#300號篩之泥沙漿體組成將以粉沙與黏土為主。本研究後續角埔溪現地泥沙流變試驗之漿體體積濃度，其範圍設定於 40%至 50%之間，而體積濃度(C_{vt})分別為 40%、42.5%、45%、47.5%及 50%。

然而現地泥沙材料之漿體較不同於水庫淤泥之泥砂顆粒組成形態，因此經水平旋轉式流變計試驗所得之剪應力與剪應變率的關係曲線會呈現較為變動的情況，且隨著漿體濃度越高時，其整體的變動幅度就更加明顯。本計畫根據通過#100 號篩的泥沙顆粒漿體進行的流變試驗之結果顯示（圖 4.10），不同濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體經試驗所得之黏滯係數約介於 0.17 Pa·s 至 0.87 Pa·s，而屈服應力約介於 0.77 Pa 至 3.71 Pa，屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)則大致呈現隨漿體濃度(C_{vt})增加而增加之趨勢；通過#200 號篩的泥沙顆粒漿體進行的流變試驗之結果顯示（圖 4.11），不同濃度漿體經試驗所得之黏滯係數約介於 0.14 Pa·s 至 0.89 Pa·s，而屈服應力約介於 1.20 Pa 至 5.31 Pa，流變參數(τ_y 與 μ_B)亦大致呈現隨漿體濃度(C_{vt})增加而增加之趨勢；通過#300 號篩的泥沙顆粒漿體進行的流變試驗之結果顯示（圖 4.12），不同濃度漿體經試驗所得之黏滯係數約介於 0.81 Pa·s 至 1.36 Pa·s，而屈服應力約介於 2.68 Pa 至 8.96 Pa，流變參數(τ_y 與 μ_B)亦大致呈現隨漿體濃度(C_{vt})增加而增加之趨勢，整體流變試驗結果呈現於表 4.4 至表 4.6。

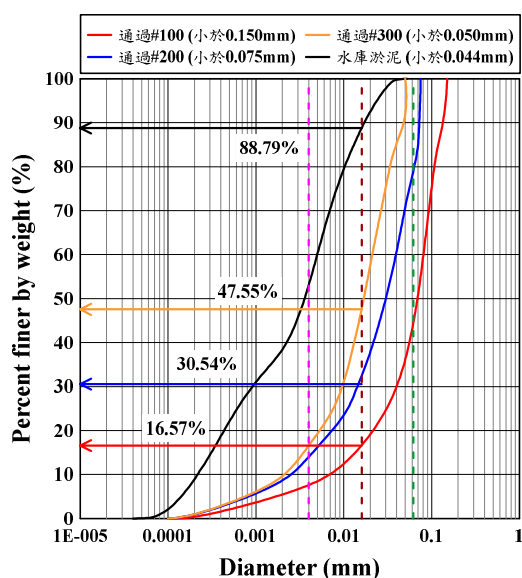


圖 4.9 角埔溪現地泥沙漿體之泥沙粒徑分布圖

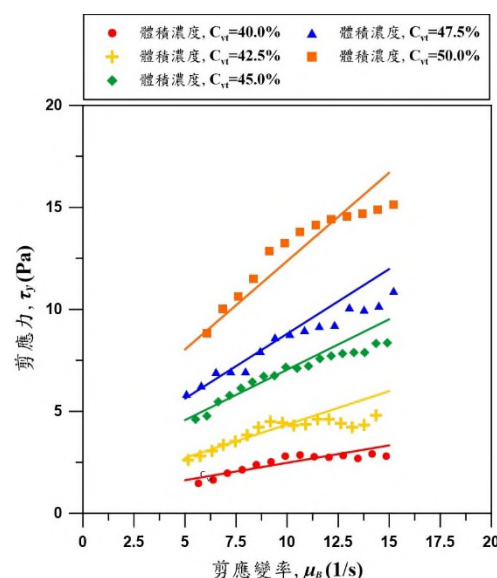


圖 4.10 角埔溪通過#100 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖

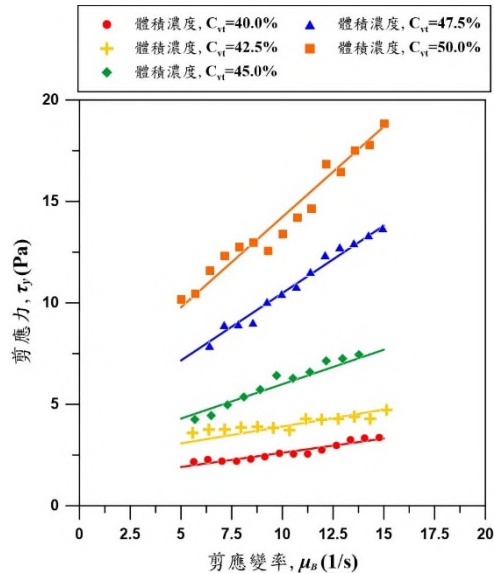


圖 4.11 角埔溪通過#200 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖

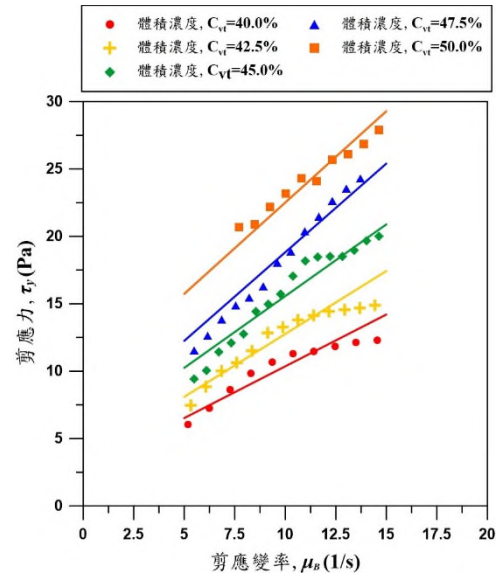


圖 4.12 角埔溪通過#300 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖

表 4.4 角埔溪通過#100 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
屈服應力 (Pa)	0.77	1.08	2.10	2.45	3.71
黏滯係數 (Pa·s)	0.17	0.33	0.49	0.64	0.87
無因次屈服應力	0.0003	0.0004	0.0008	0.0009	0.0014
無因次黏滯係數	0.0006	0.0011	0.0016	0.0020	0.0026

參考資料：本計畫彙整

表 4.5 角埔溪通過#200 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
屈服應力 (Pa)	1.20	2.23	2.59	3.83	5.31
黏滯係數 (Pa·s)	0.14	0.17	0.34	0.67	0.89
無因次屈服應力	0.0005	0.0009	0.0010	0.0015	0.0020
無因次黏滯係數	0.0005	0.0005	0.0011	0.0020	0.0027

參考資料：本計畫彙整

表 4.6 角埔溪通過#300 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
屈服應力 (Pa)	2.68	3.43	4.92	6.67	8.96
黏滯係數 (Pa·s)	0.81	0.93	1.06	1.32	1.36
無因次屈服應力	0.0011	0.0014	0.0019	0.0025	0.0033
無因次黏滯係數	0.0027	0.0030	0.0034	0.0041	0.0041

參考資料：本計畫彙整

然而針對流變試驗結果分析瞭解（圖 4.13 及圖 4.14），屈服應力及黏滯係數於不同粒徑大小（通過#100 號篩、通過#200 號篩與通過#300 號篩）所組成的泥沙漿體隨體積濃度之變化顯示，屈服應力及黏滯係數大致上皆隨泥沙漿體之體積濃度上升而增加，然而於相同體積濃度(C_{vt})下，漿體內細顆粒泥沙所佔比例越高，其流變參數(τ_y 與 μ_B)亦呈現較大之情況，且隨著細顆粒含量較高的泥沙漿體，隨著體積濃度(C_{vt})越大，則屈服應力(τ_y)的上升幅度就有略為顯著之增加。

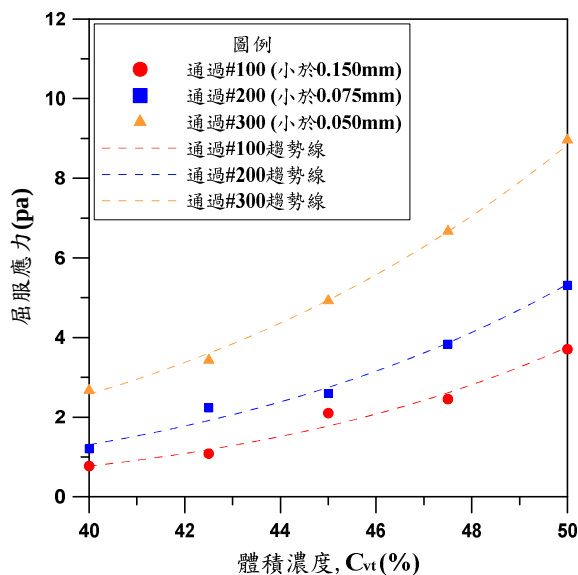


圖 4.13 角埔溪現地沙的體積濃度 (C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖

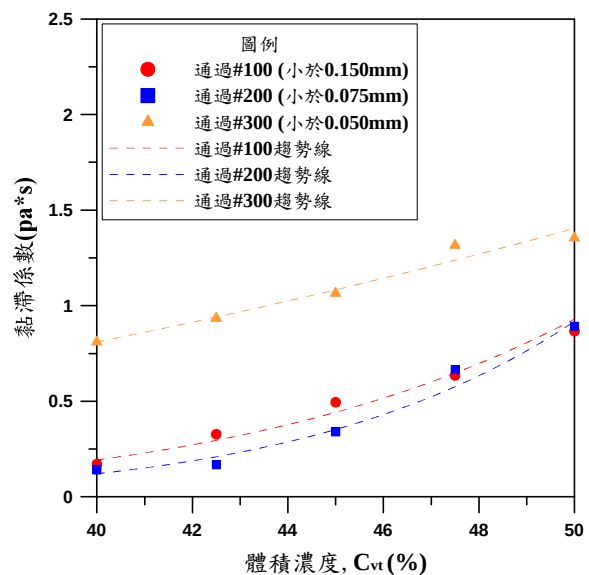


圖 4.14 角埔溪現地沙的體積濃度 (C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖

本計畫進一步針對水庫淤泥漿體與角埔溪現地沙漿體之結果進行探討（圖 4.15 與圖 4.16），其結果顯示當漿體以細顆粒材料組成為主時，其流變參數(τ_y 與 μ_B)隨著體積濃度(C_{vt})逐漸增大，其變化幅度會較細顆粒材料含量較低且粗顆粒材料含量較高時更為顯著，其試驗結果與 Dey et al. (2020)與王志賢(2007)之研究結果相似，其皆顯示增加細顆粒材料濃度相較於增加粗粒料濃度對於流變參數之增加量較為顯著，因此細顆粒材料含量多寡對於流變行為之影響較粗粒料含量更為顯著。

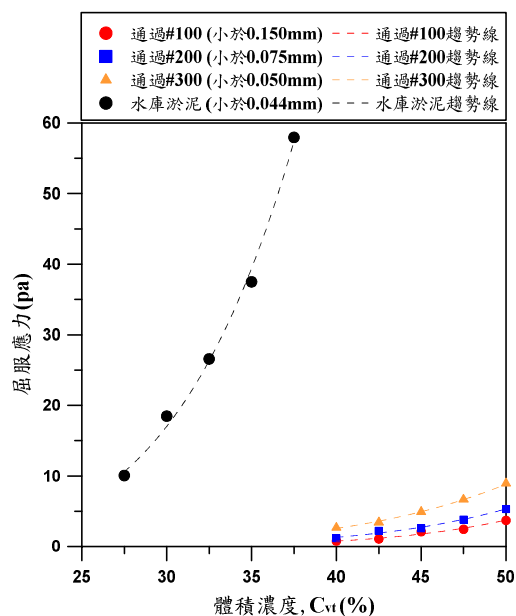


圖 4.15 水庫淤泥與角埔溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖

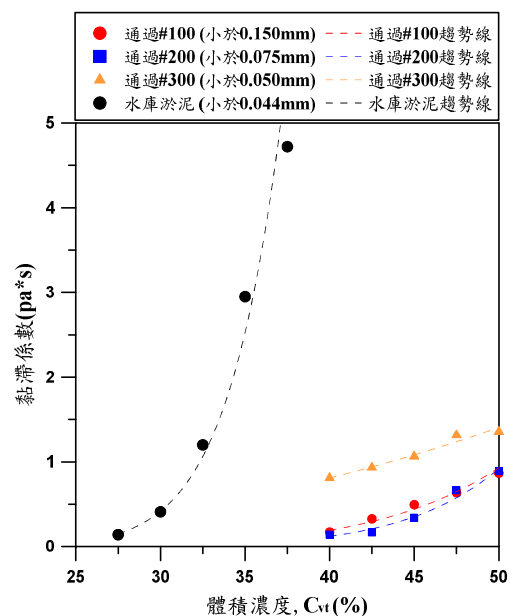
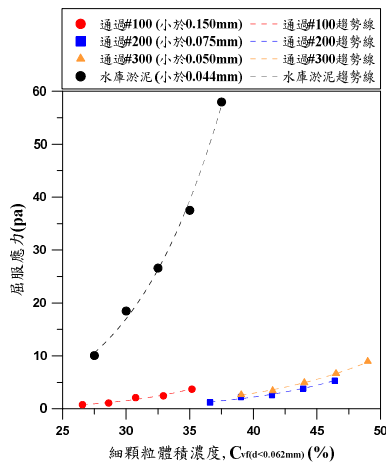
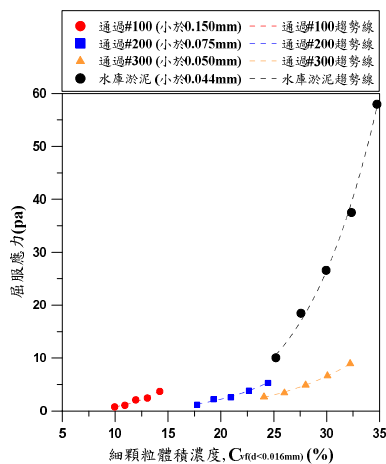
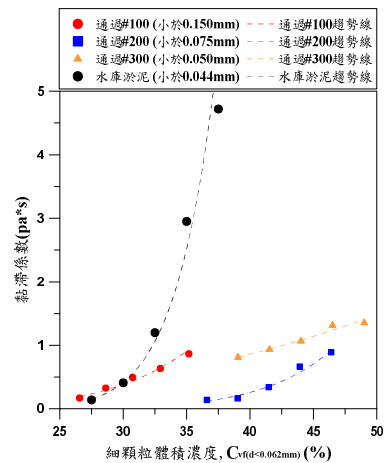


圖 4.16 水庫淤泥與角埔溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖

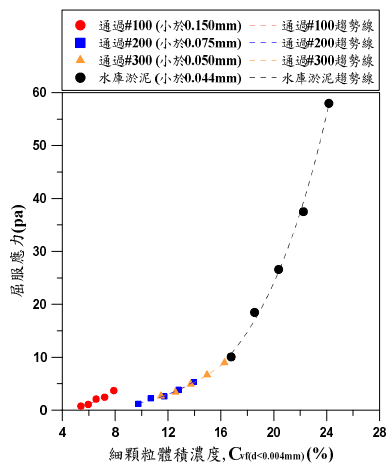
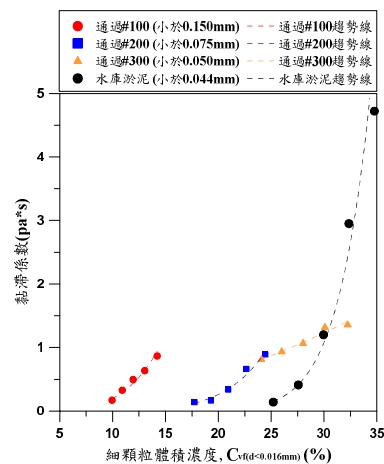
本計畫進一步透過水庫淤泥漿體與角埔溪現地泥沙漿體之泥沙粒徑分布圖(圖 4.5 與圖 4.9)，以分析不同細顆粒粒徑($d < 0.062 \text{ mm}$ 、 0.016 mm 、 0.004 mm)體積濃度(C_{vf})變化下，屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)的流變參數變化情況，如圖 4.17 與圖 4.18 所示，根據泥沙粒徑 $d < 0.062 \text{ mm}$ (小於粉沙顆粒)的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數(τ_y 與 μ_B)的變化情況並無顯著之關係，而泥沙粒徑 $d < 0.016 \text{ mm}$ (小於細粒粉沙顆粒)的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數(τ_y 與 μ_B)的變化情況，則略呈現隨著細顆粒體積濃度的增加，流變參數有逐漸增大的情況，然而當泥沙粒徑 $d < 0.004 \text{ mm}$ (小於黏土顆粒)的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數(τ_y 與 μ_B)的變化情況，其整體會呈現隨著細顆粒體積濃度的增加，流變參數有逐漸增大的情況，且於屈服應力(τ_y)與細顆粒體積濃度(C_{vf})變化上會呈現較為顯著之關係，因此建議未來在探討土石流流變特性中，於細顆粒泥沙材料盡量要小於 0.016 mm 且細顆粒體積濃度(C_{vf})盡量要大於 20%，將有助於分析與探討土石流體之流變行為。



(a) 泥沙粒徑 $d < 0.062$ mm 的細顆粒體積濃度(C_{vf})



(b) 泥沙粒徑 $d < 0.016$ mm 的細顆粒體積濃度(C_{vf})



(c) 泥沙粒徑 $d < 0.004$ mm 的細顆粒體積濃度(C_{vf})

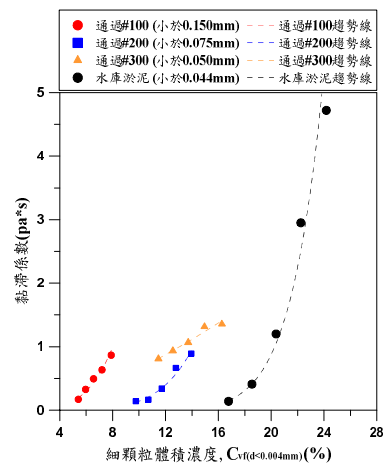


圖 4.17 水庫淤泥與角埔溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與屈服應力(τ_y)之關係圖

圖 4.18 水庫淤泥與角埔溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與黏滯係數(μ_B)之關係圖

4.2.3 土石流集水區現地沙（愛玉子溪集水區）

本依序針對土石流（愛玉子溪集水區）現地泥沙進行流變試驗，以過#100 號篩、#200 號篩及#300 號篩之現地泥沙作為試驗初步材料，其中針對漿體的泥沙粒徑組成（圖 4.19）進行分析了解，其漿體泥沙的中值粒徑(d_{50})分別約為 0.0329 mm、0.0310 mm 以及 0.0171 mm，其中黏土質泥沙（粒徑小於 0.004 mm）分別約占 11.1%、11.5%與 17.9%，而泥沙(Silt)粒徑介於 0.004mm 至 0.062 mm 的比例分別約為 70.8%、74.4%與 78.8%，因此過#100 號篩與#200 號篩之泥沙漿體組成將以粉沙為主，而過#300 號篩之泥沙漿體組成將以粉沙與黏土為主。本研究後續愛玉子溪現地泥沙流變試驗之漿體體積濃度，其範圍設定於 40%至 50%之間，而體積濃度(C_{vt})分別為 40%、42.5%、45%、47.5%及 50%。

在愛玉子溪現地泥沙材料之漿體於剪應力與剪應變率的關係曲線變化中，與角埔溪的現地泥沙材料之漿體皆會呈現較為變動的情況。其主要因現地泥沙材料之漿體較不同於水庫淤泥之泥砂顆粒組成形態，因此經水平旋轉式流變計試驗所得之剪應力與剪應變率的關係曲線會呈現較為變動的情況，且隨著漿體濃度越高時，其整體的變動幅度就更加明顯。

本計畫根據通過#100 號篩的泥沙顆粒漿體進行的流變試驗之結果顯示（圖 4.20），不同濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體經試驗所得之黏滯係數約介於 0.15 Pa·s 至 0.36 Pa·s，而屈服應力約介於 0.41 Pa 至 3.06 Pa，屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)則大致呈現隨漿體濃度(C_{vt})增加而增加之趨勢；通過#200 號篩的泥沙顆粒漿體進行的流變試驗之結果顯示（圖 4.30），不同濃度漿體經試驗所得之黏滯係數約介於 0.11 Pa·s 至 0.37 Pa·s，而屈服應力約介於 1.04 Pa 至 5.16 Pa，流變參數(τ_y 與 μ_B)亦大致呈現隨漿體

濃度(C_{vt})增加而增加之趨勢；通過#300 號篩的泥沙顆粒漿體進行的流變試驗之結果顯示（圖 4.22），不同濃度漿體經試驗所得之黏滯係數約介於 0.13 Pa·s 至 1.23 Pa·s，而屈服應力約介於 2.53 Pa 至 8.90 Pa，流變參數(τ_y 與 μ_B)亦大致呈現隨漿體濃度(C_{vt})增加而增加之趨勢，整體流變試驗結果呈現於表 4.7 至表 4.9。

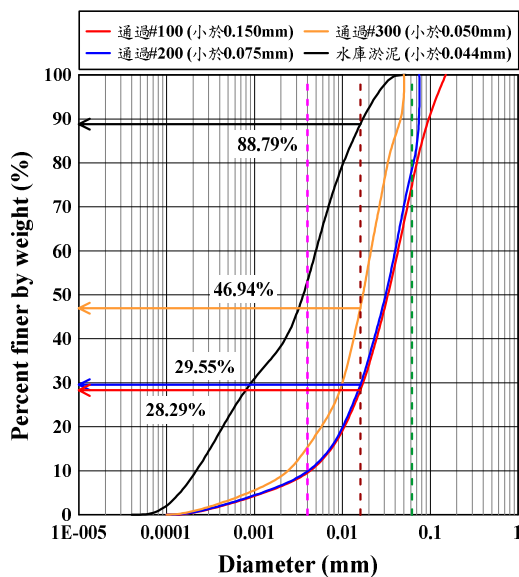


圖 4.19 愛玉子溪現地泥沙漿體之泥沙粒徑分布圖

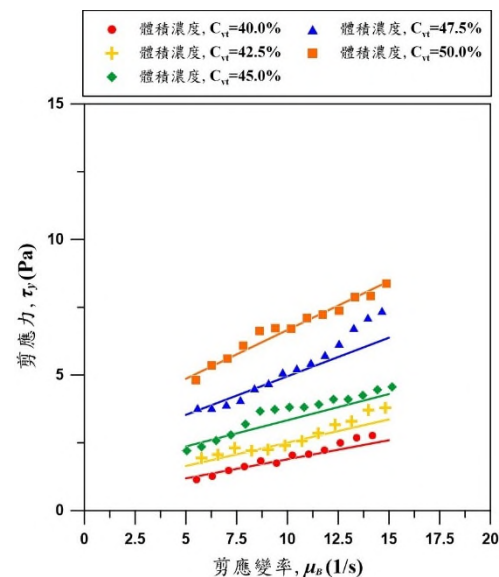


圖 4.20 愛玉子溪通過#100 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖

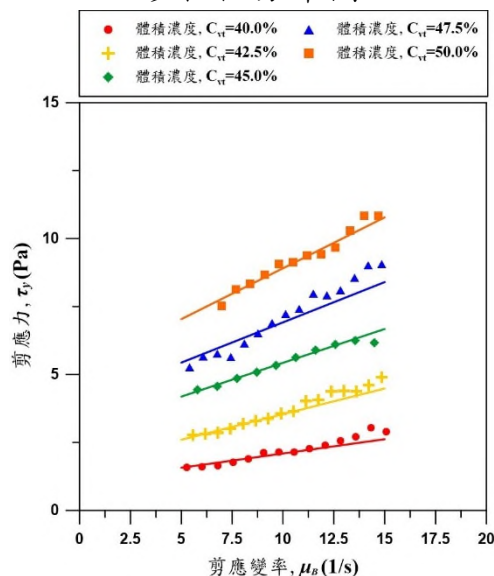


圖 4.21 愛玉子溪通過#200 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖

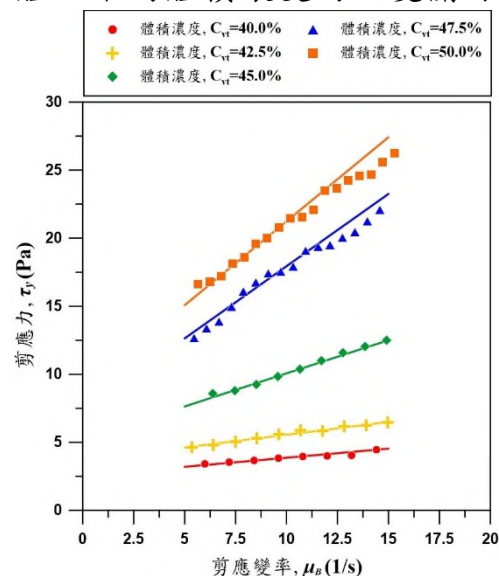


圖 4.22 愛玉子溪通過#300 篩現地沙漿體於不同體積濃度的流變關係圖

表 4.7 愛玉子溪通過#100 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
屈服應力 (Pa)	0.41	0.45	1.40	2.11	3.06
黏滯係數 (Pa·s)	0.15	0.19	0.19	0.28	0.36
無因次屈服應力	0.0002	0.0002	0.0005	0.0008	0.0011
無因次黏滯係數	0.0005	0.0006	0.0006	0.0009	0.0011

參考資料：本計畫彙整

表 4.8 愛玉子溪通過#200 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
屈服應力 (Pa)	1.04	1.66	2.94	3.95	5.16
黏滯係數 (Pa·s)	0.11	0.19	0.25	0.30	0.37
無因次屈服應力	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019
無因次黏滯係數	0.0003	0.0006	0.0008	0.0009	0.0011

參考資料：本計畫彙整

表 4.9 愛玉子溪通過#300 篩現地泥沙漿體於不同體積濃度的流變參數

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
屈服應力 (Pa)	2.53	3.68	5.20	7.33	8.90
黏滯係數 (Pa·s)	0.13	0.19	0.49	1.06	1.23
無因次屈服應力	0.0010	0.0015	0.0020	0.0028	0.0033
無因次黏滯係數	0.0004	0.0006	0.0015	0.0033	0.0037

參考資料：本計畫彙整

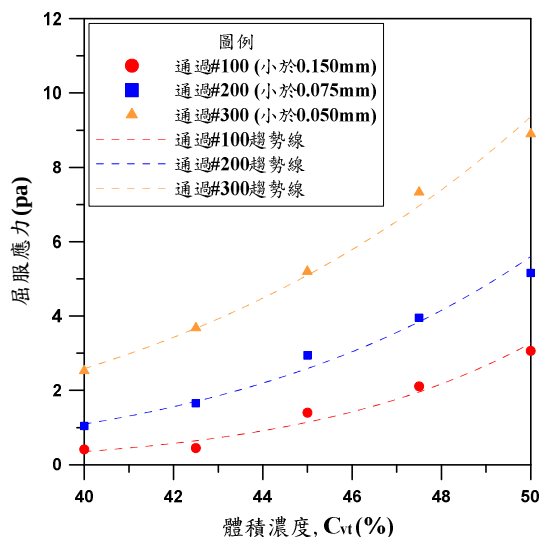


圖 4.23 愛玉子溪現地沙體積濃度 (C_v)與屈服應力(τ_y)之關係圖

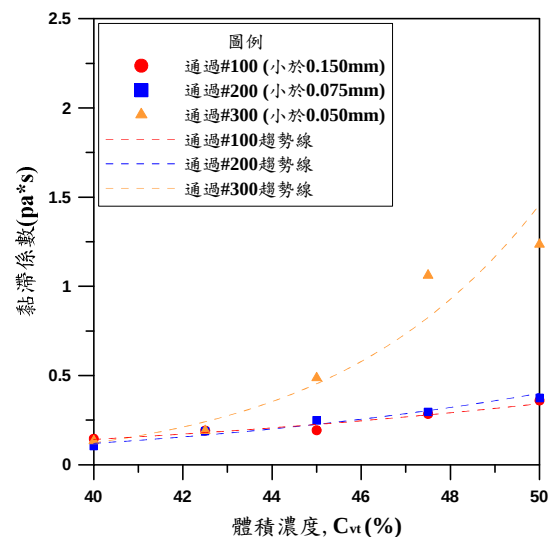


圖 4.24 愛玉子溪現地沙體積濃度 (C_v)與黏滯係數(μ_B)之關係圖

根據圖 4.23 及圖 4.24 可瞭解愛玉子溪現地沙所配置之泥沙漿體，其屈服應力及黏滯係數在不同粒徑大小及體積濃度之變化情況，其試驗結果顯示，屈服應力及黏滯係數大致上皆隨沙漿體之體積濃度上升而增加，然而於相同體積濃度(C_{vt})下，漿體內細顆粒泥沙所佔比例越高，其流變參數(τ_y 與 μ_B)亦呈現較大之情況，然而此區域內過#100 號篩及過#200 號篩之試驗結果相似情況，主要是受到細顆粒泥沙漿體之粒徑組成相似所影響。

本計畫同樣針對水庫淤泥漿體與愛玉子溪現地沙漿體之結果進行探討（圖 4.25 與圖 4.26），其分析結果與水庫淤泥漿體與角埔溪現地沙漿體之結果相似，同樣顯示當漿體以細顆粒材料組成為主時，其流變參數(τ_y 與 μ_B)隨著體積濃度(C_{vt})逐漸增大，其變化幅度會較細顆粒材料含量較低且粗顆粒材料含量較高時更為顯著，因此細顆粒材料含量多寡對於流變行為之影響較粗粒料含量更為顯著。

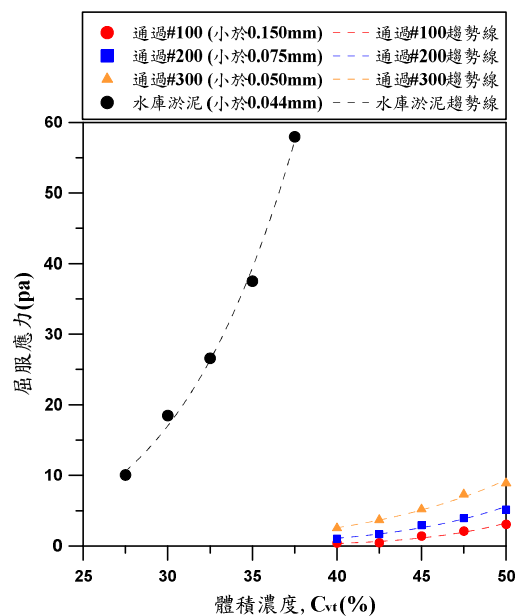


圖 4.25 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與屈服應力(τ_y)之關係圖

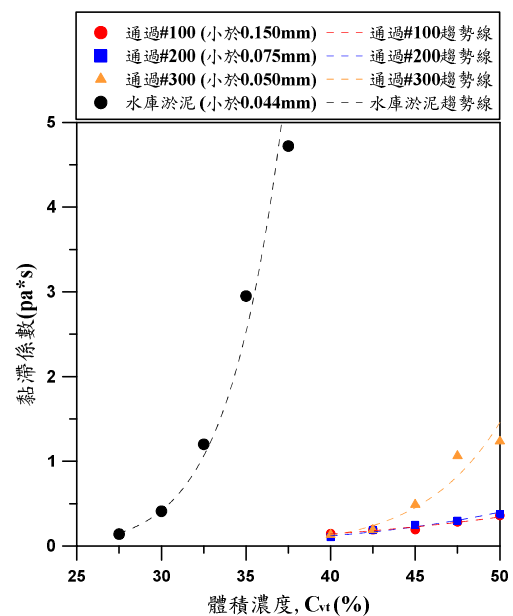


圖 4.26 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的體積濃度(C_{vt})與黏滯係數(μ_B)之關係圖

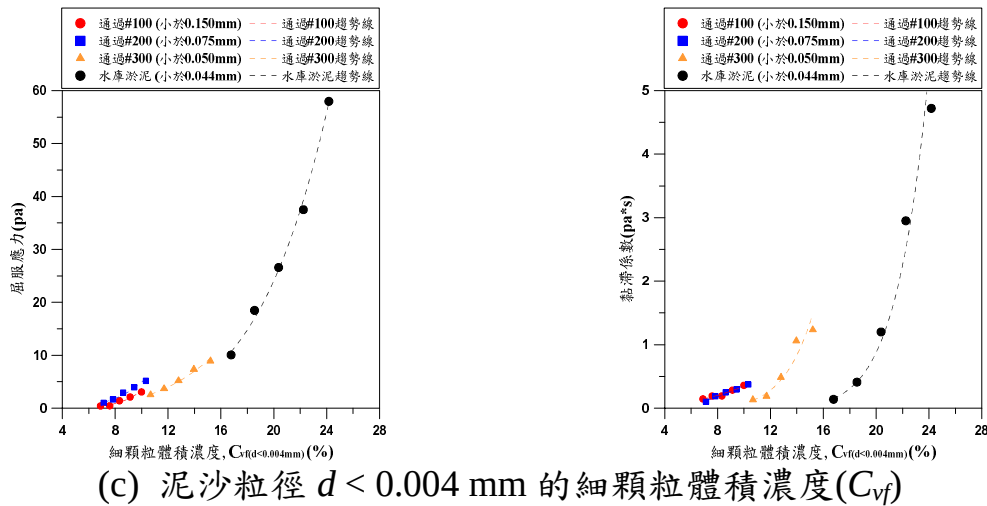
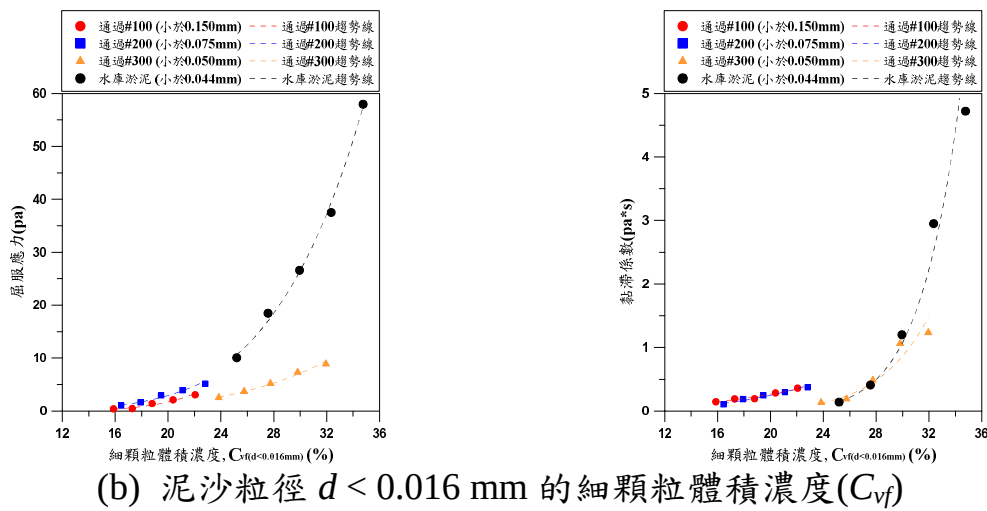
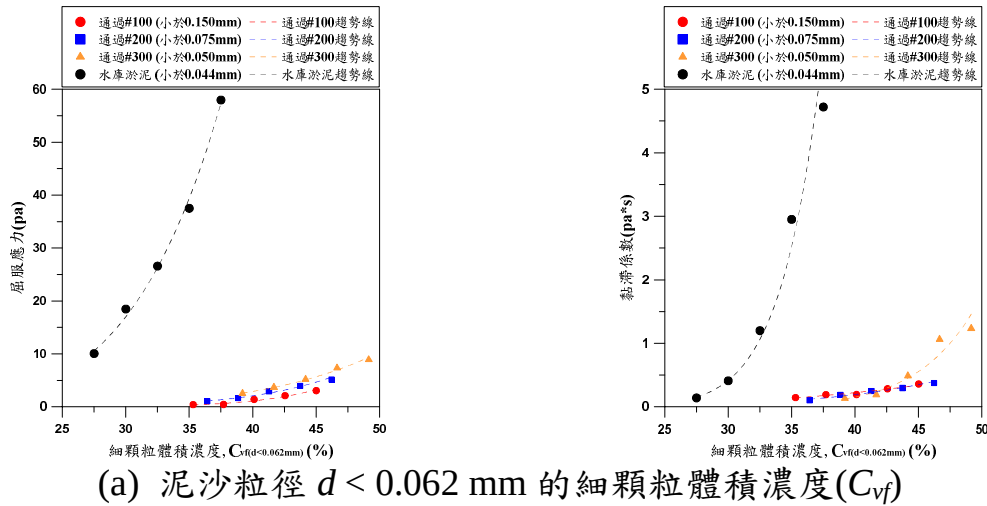


圖 4.27 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與屈服應力(τ_y)之關係圖

圖 4.28 水庫淤泥與愛玉子溪現地沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與黏滯係數(μ_B)之關係圖

本計畫進一步透過水庫淤泥漿體與愛玉子溪現地泥沙漿體之泥沙粒徑分布圖(圖 4.5 與圖 4.19),以分析不同細顆粒粒徑($d < 0.062\text{ mm}$ 、 0.016 mm 、 0.004 mm)體積濃度(C_{vf})變化下,屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)的流變參數變化情況,如圖 4.27 與圖 4.28 所示,根據泥沙粒徑 $d < 0.062\text{ mm}$ (小於粉沙顆粒)的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數(τ_y 與 μ_B)的變化情況並無顯著之關係;而泥沙粒徑 $d < 0.016\text{ mm}$ (小於細粒粉沙顆粒)的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數(τ_y 與 μ_B)的變化情況,則略呈現隨著細顆粒體積濃度的增加,流變參數有逐漸增大的情況,然而於黏滯係數(μ_B)與細顆粒體積濃度(C_{vf})變化上會呈現較為顯著之關係;當泥沙粒徑 $d < 0.004\text{ mm}$ (小於黏土顆粒)的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數(τ_y 與 μ_B)的變化情況,其整體會呈現隨著細顆粒體積濃度的增加,流變參數有逐漸增大的情況,且於屈服應力(τ_y)與細顆粒體積濃度(C_{vf})變化上會呈現較為顯著之關係,綜觀上述之結果與角埔溪現地泥沙的細顆粒體積濃度(C_{vf})與流變參數的關係有相似變化之情況,因此建議未來在探討土石流流變特性中,於細顆粒泥沙材料盡量要小於 0.016 mm 且細顆粒體積濃度(C_{vf})盡量要大於 20% ,將有助於分析與探討土石流體之流變行為。

4.3 坍流試驗結果與分析

本研究後續分別針對水庫淤泥及愛玉子溪與角埔溪的現地沙材料配置泥沙漿體以進行坍流試驗，並於坍流試驗操作後以紀錄坍流度、坍落度以及漿體坍流結果之橫剖面，進而分析探討坍落度及坍流度與流變參數之關係。

4.3.1 水庫淤泥（泥沙粒徑小於 0.044 mm）

本試驗透過水庫淤泥的現地泥沙作為試驗初步材料（中值粒徑為 0.0036 mm）進行坍流試驗，而試驗之漿體體積濃度範圍介於 27.5%至 37.5%。本研究首先針對水庫淤泥漿體的坍流試驗結果的坍流度進行分析說明，坍流度是於漿體坍落後所量測之漿體流動範圍之直徑，而各體積濃度（ $C_{vt} = 27.5\%$ 、30%、32.5%、35%及 37.5%）的坍流情況，請參見圖 4.29，其坍流直徑分別依序約為 55.2 cm、41 cm、31.8 cm、22 cm 及 16.8 cm。

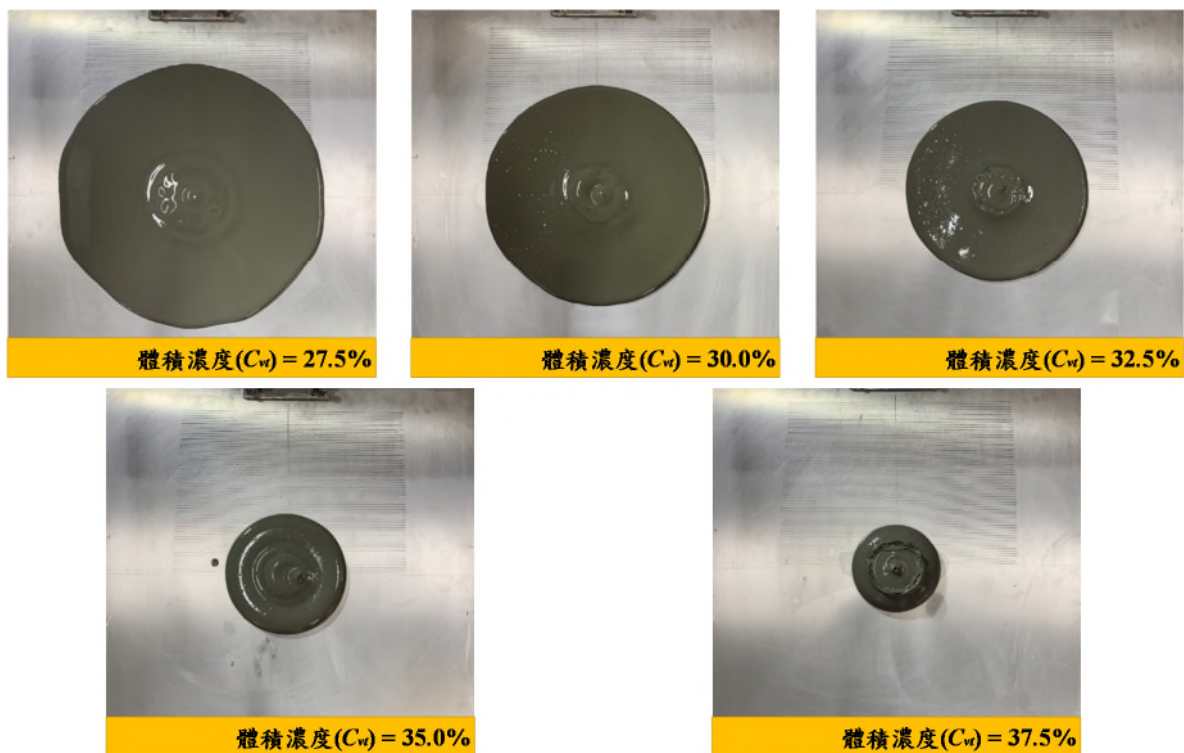


圖 4.29 水庫淤泥漿體於不同體積濃度的坍流俯視圖

表 4.10 水庫淤泥漿體於不同體積濃度的坍流參數

體積濃度(%)	27.5	30	32.5	35	37.5
坍流度(cm)	55.2	41.0	31.8	22.0	16.8
坍落度(cm)	14.5	14.0	13.7	12.8	10.2
無因次坍流度	5.52	4.10	3.18	2.20	1.68
無因次坍落度	0.97	0.93	0.91	0.85	0.68

參考資料：本計畫彙整

本研究進一步將坍流度(D_f)除以試驗桶直徑($D_0 = 10$ cm)，即可求得無因次化數值，如表 4.10 所示。根據細泥漿體體積濃度與無因次坍流度的關係瞭解（圖 4.30），體積濃度與無因次坍流度大致呈現負相關性，隨著體積濃度之增加，無因次坍流度亦隨之減少。

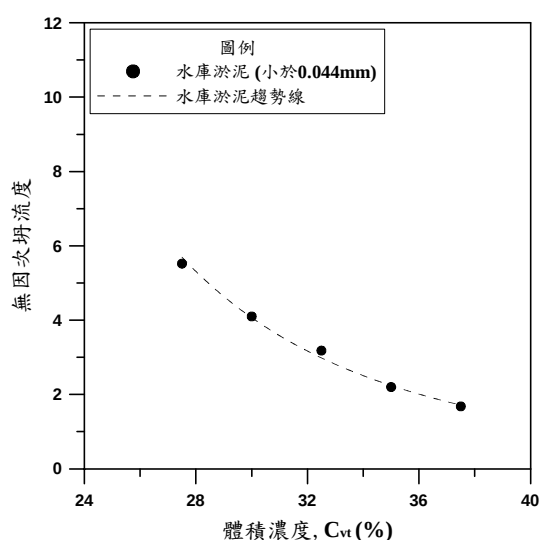


圖 4.30 水庫淤泥漿體的體積濃度與無因次坍流度之關係圖

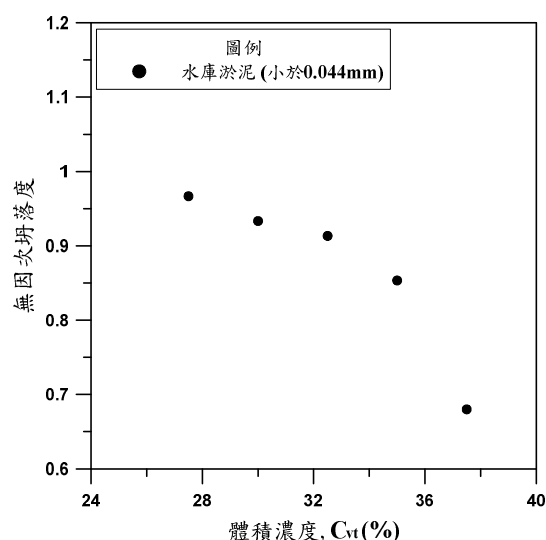


圖 4.31 水庫淤泥漿體的體積濃度與無因次坍落度之關係圖

本研究依序針對坍流試驗結果的坍落度進行分析說明，坍落度(S)是以坍落桶高(H_0)減去漿體坍落後所量測的漿體高度(H_f)，而水庫淤泥各體積濃度 ($C_{vt} = 27.5\%$ 、 30% 、 32.5% 、 35% 及 37.5%) 之坍落度，依序分別約為 14.5 cm、14 cm、13.7 cm、12.8 cm 及 10.2 cm。

本研究進一步將坍落度(S)除以試驗桶高 ($H_0 = 15$ cm)，即可求得無因

次化數值（表 4.10），然而根據漿體的體積濃度與無因次坍落度之關係顯示（圖 4.31），當體積濃度於 27.5%、30%、32.5%及 35%時，無因次坍落度隨著體積濃度增加而減少，且大致呈負相關的線性關係，但當體積濃度為 37.5%時，無因次坍落度則呈現大幅下降之趨勢，與前四個者之無因次坍落度有較顯著的差距。

本研究進一步探討漿體坍落後之斷面變化情況，如圖 4.32 所示，漿體隨著體積濃度之增加，坍流參數（坍流度跟坍落度）都逐漸變小，其中當體積濃度為 27.5%、30%、32.5%及 35%時，其試驗後的漿體形狀可分為兩部分，分別為中心圓與中心圓外圓環之部分，兩部分之間皆呈現凹陷之現象，但當體積濃度 37.5%時，其漿體坍落後則呈現為梯形狀，僅於漿體中心位置有一凹陷情況，然而此現象所產生之差異在於漿體坍流及坍落流動過程中，當體積濃度較低時，坍流與坍落的流動完成時間差異不大，但隨著體積濃度增加，兩者的流動完成的時間差越來越大，因此於坍流流動完成時，坍落的流動還在進行，上方坍落下來的部分會將下方的漿體逐漸從中心位置向外推擠流動，使漿體圓環的漿體厚度變厚，這也說明體積濃度為 27.5%、30%、32.5%及 35%漿體坍落後會有中心圓外圓環之部分。

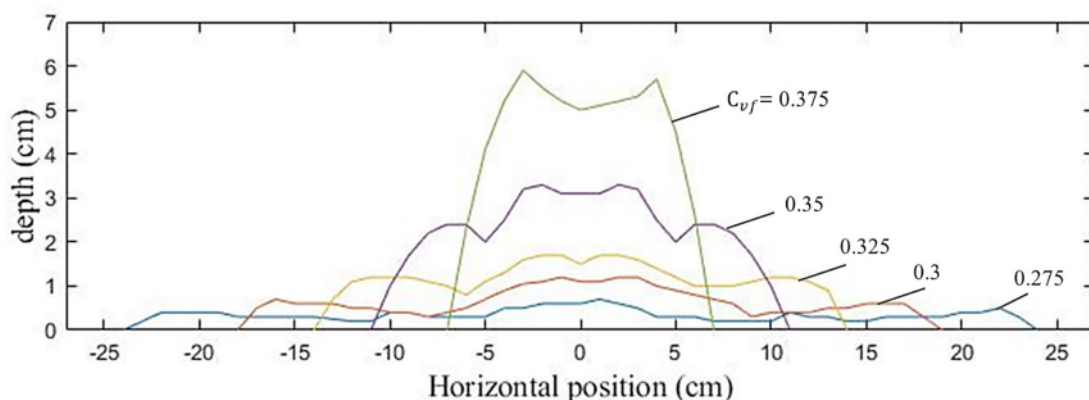


圖 4.32 不同體積濃度的水庫淤泥漿體之坍流結果縱剖面圖

4.3.2 土石流集水區現地沙（角埔溪集水區）

本研究依序進行土石流集水區現地泥沙（角埔溪集水區）之坍流試驗，首先針對坍流度之結果進行說明，對於不同粒徑大小之現地泥沙，於各體積濃度（ $C_{vt} = 40\%$ 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）的泥沙漿體所測得之坍流度俯視圖，如圖 4.33 至圖 4.35 所示，坍流度及無因次化之結果，請參見表 4.11 至表 4.13。

計畫根據通過#100 號篩的泥沙顆粒漿體進行的坍流試驗之結果顯示（表 4.11），不同濃度（ 40% 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）漿體經試驗所得之漿體坍流直徑（坍流度）依序約為 63.0 cm 、 59.0 cm 、 46.5 cm 、 42.0 cm 及 28.0 cm ，而坍流度隨著體積濃度(C_{vt})增加而逐漸減少。由圖 4.33 中可以觀察到體積濃度 40% 至 47.5% 時，其坍流結果相較於水庫淤泥的坍流結果，呈現較不規則的圓形，此原因主要是現地泥沙材料之粒徑組成含有部分較粗的泥沙顆粒（圖 4.9），所以較不同於水庫淤泥之泥砂顆粒組成形態，然而濃稠度相對較低的泥沙漿體，於坍流試驗過程中則呈現類似「飛濺」出去的形狀，導致坍流結果呈現較為不規則的形狀；相較之下，當體積濃度 50% 時，所得之坍流結果則較接近圓形。

依據通過#200 篩的泥沙顆粒漿體進行的坍流試驗之結果顯示（表 4.12），各體積濃度（ 40% 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）之坍流度，依序約為 60.0 cm 、 51.0 cm 、 43.0 cm 、 31.0 cm 及 21.0 cm ，而坍流度同樣隨著體積濃度(C_{vt})增加而逐漸減少。根據圖 4.34 的坍流結果同樣顯示，當體積濃度 40% 與 42.5% 時，其所得之坍流結果亦呈現不規則之圓形，而體積濃度 45% 至 50% 時，其坍流結果則呈現較為接近圓形。

然而通過#300 篩的泥沙顆粒漿體於坍流試驗後所量測的漿體直徑（表

4.13)，於各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）之坍流度，依序約為 50.0 cm、39.0 cm、26.0 cm、17.0 cm 及 16.0 cm，而坍流度同樣隨漿體體積濃度(C_{vt})增加而減少，根據圖 4.35 的坍流試驗結果顯示，各體積濃度漿體的坍流結果皆較接近於圓形。

表 4.11 角埔溪現地沙通過#100 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
坍流度(cm)	63.0	59.0	46.5	42.0	28.0
坍落度(cm)	14.7	14.7	14.4	14.2	13.4
無因次坍流度	6.30	5.90	4.65	4.20	2.80
無因次坍落度	0.98	0.98	0.96	0.95	0.89

參考資料：本計畫彙整

表 4.12 角埔溪現地沙通過#200 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
坍流度(cm)	60.0	51.0	43.0	31.0	21.0
坍落度(cm)	14.6	14.6	14.2	13.6	12.4
無因次坍流度	6.00	5.10	4.30	3.10	2.10
無因次坍落度	0.97	0.97	0.95	0.91	0.83

參考資料：本計畫彙整

表 4.13 角埔溪現地沙通過#300 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
坍流度(cm)	50.0	39.0	26.0	17.0	16.0
坍落度(cm)	14.4	13.9	13.2	11.4	10.4
無因次坍流度	5.00	3.90	2.60	1.70	1.60
無因次坍落度	0.96	0.93	0.88	0.76	0.69

參考資料：本計畫彙整

整體而言，坍流試驗之結果會受到現地泥沙粒徑組成之影響，於相同的體積濃度下，隨著漿體中含有較多的細顆粒泥砂，其漿體相對較為濃稠，因此所得到的坍流結果也越接近圓形，而坍流直徑（坍流度）也隨之縮小。此外，根據漿體體積濃度(C_{vt})與無因次坍流度的關係瞭解（圖 4.36），體積濃度與無因次坍流度大致呈現負相關性，隨著體積濃度的增加，無因次坍流度

則會逐漸減少，而相同體積濃度下，隨著漿體內之泥砂顆粒越細，無因次坍流度也會隨之降低，但當體積濃度越高($C_{vt}=50\%$)且漿體內含有較多的細顆粒泥沙時，其坍流度的整體變動幅度會逐漸降低。

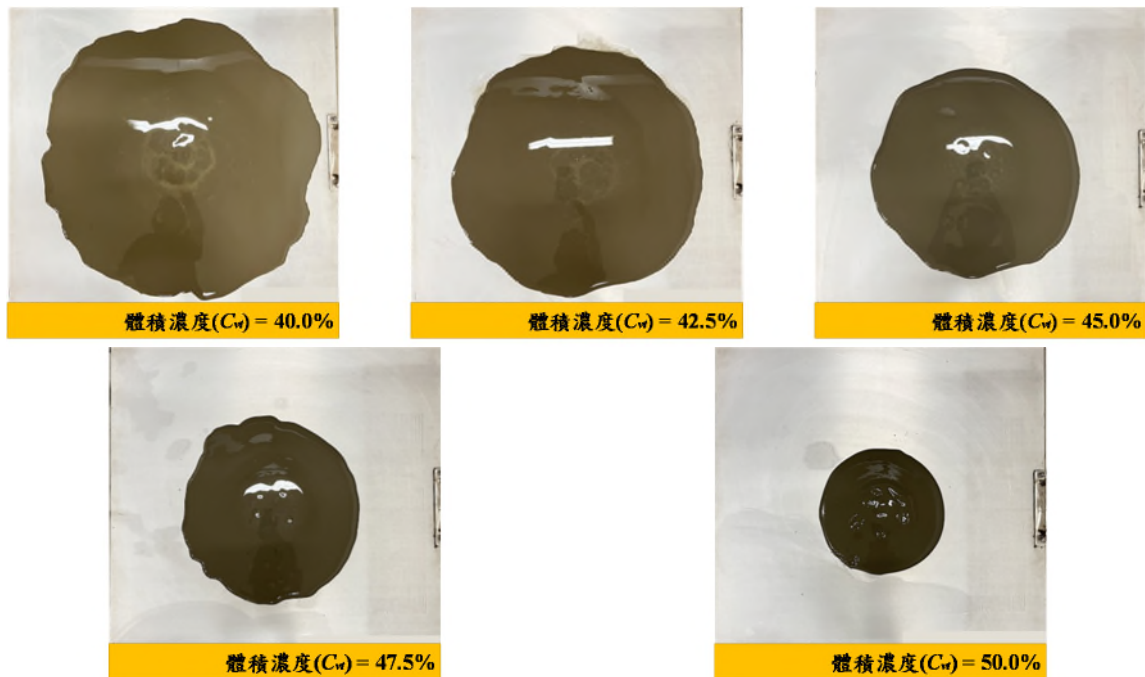


圖 4.33 角埔溪通過#100 篩泥沙漿體於不同體積濃度的坍流俯視圖

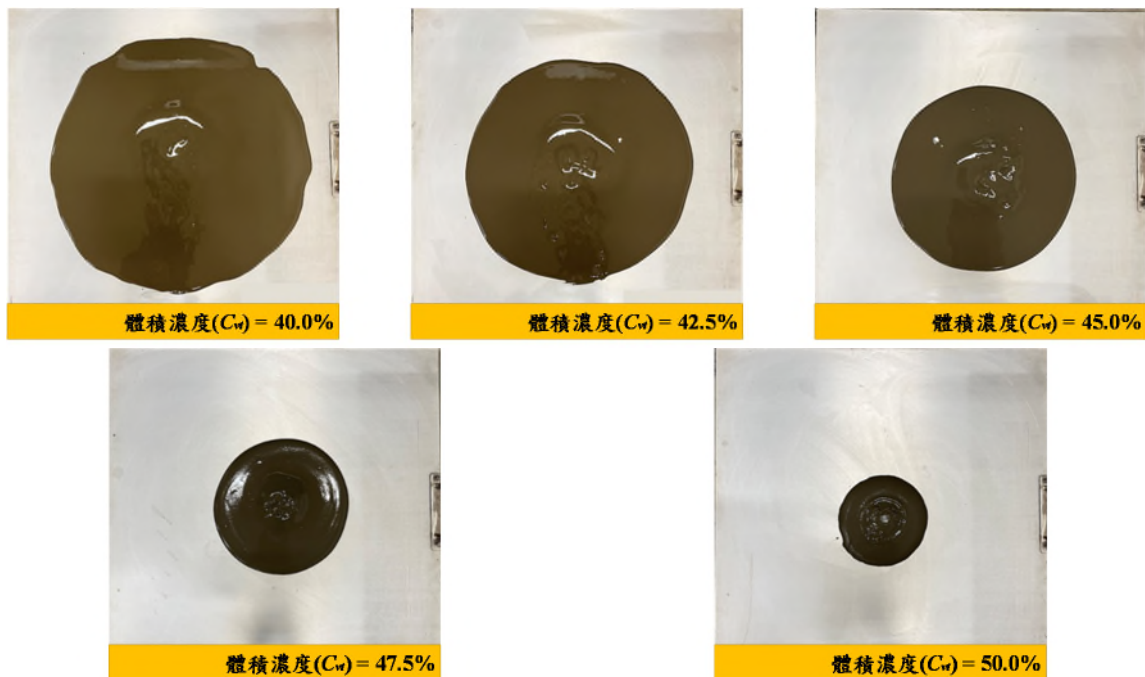


圖 4.34 角埔溪現地沙通過#200 篩泥沙漿坍流結果俯視圖

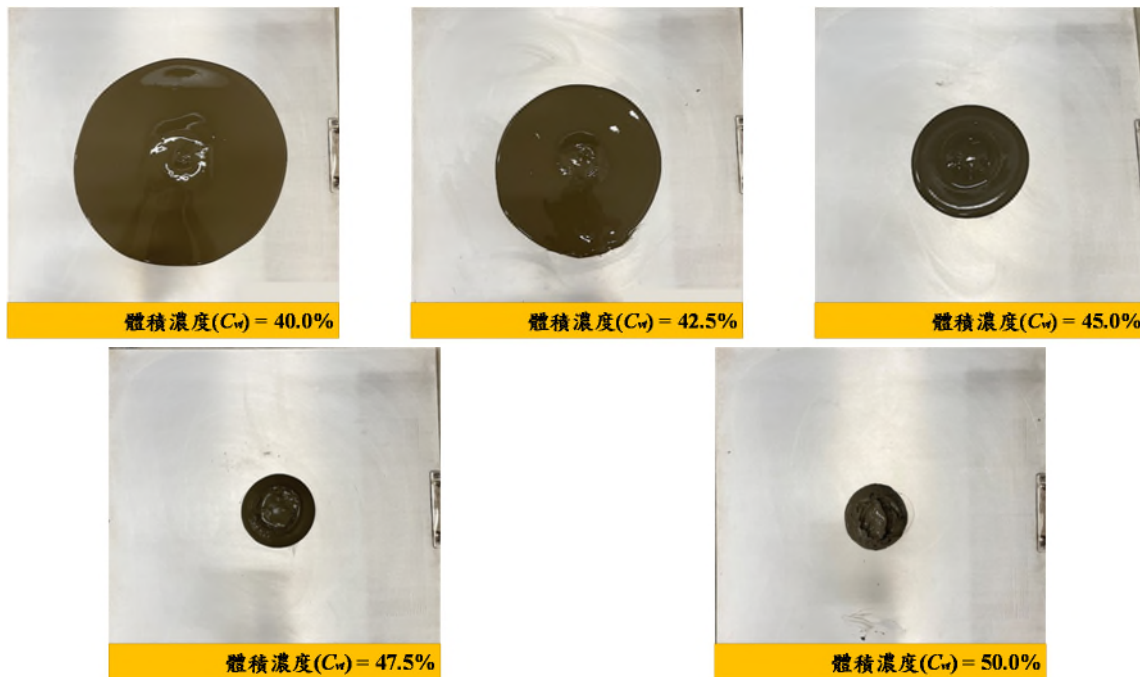


圖 4.35 角埔溪現地沙通過#300 篩泥沙漿坍流結果俯視圖

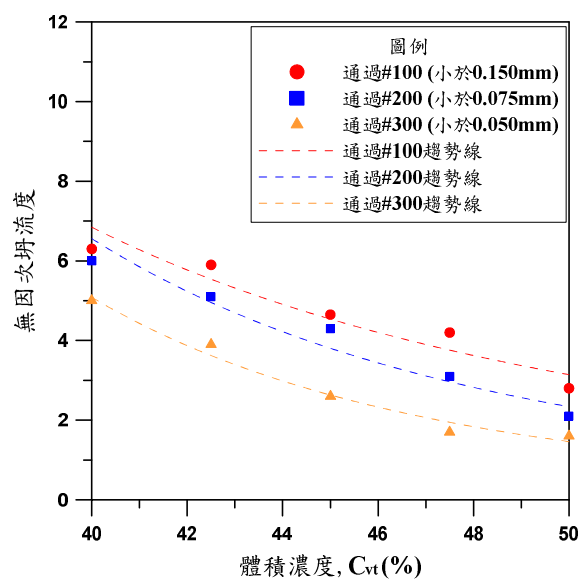


圖 4.36 角埔溪現地沙體積濃度(C_{vt})與無因次坍流度之關係圖

接續針對土石流集水區現地泥沙(角埔溪集水區)坍流試驗結果之坍落度進行分析說明，對於不同泥砂顆粒組成(通過#100 篩、通過#200 篩與通過#300 篩)之現地泥沙，於各體積濃度(40%、42.5%、45%、47.5%及 50%)的泥沙漿體所測得之坍落剖面，如圖 4.37 至圖 4.39 所示。坍落度及其無因次化之數值，如表 4.11 至表 4.13 所示。

計畫根據通過#100 號篩的泥沙顆粒漿體進行的坍流試驗之結果顯示（表 4.11），各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體經試驗所得之坍落度，依序約為 14.7 cm、14.7 cm、14.4 cm、14.2 cm 及 13.4 cm，然而從坍流結果縱剖面（圖 4.37）可觀察到當體積濃度 40%至 47.5%時，其坍落剖面的中央凸起部分較不顯著，此現象主要是因為過#100 篩的漿體內之含有較多的粗顆粒泥沙，因此漿體的濃稠度相對較低，造成漿體未於中央聚積，相對而言，在體積濃度為 50%時，可明顯觀察到有中心圓與中心圓外圓環的兩部分，其較接近於水庫淤泥的坍流試驗結果；通過#200 篩的各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體之坍落度（表 4.12），依序為 14.6 cm、14.6 cm、14.2 cm、13.6 cm 及 12.4 cm，根據圖 4.38 的坍流結果縱剖面可知，當體積濃度小於 42.5%時，坍落剖面中央凸起部分較不顯著，而其餘體積濃度之漿體，則可觀察到剖面上中心圓與中心圓外圓環兩個部分；通過#300 篩的各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體之坍落度（表 4.13），依序為 14.4cm、13.9 cm、13.2 cm、11.4 cm 及 10.4 cm，同樣根據坍流結果縱剖面（圖 4.39）可知，此泥砂粒徑條件下於各體積濃度之坍落剖面之凸起部分較為明顯，而漿體坍落之形狀皆可區分為中心圓與中心圓外圓環兩個部分，但當體積濃度大於 47.5%時，其漿體坍落後則呈現為梯形狀，於中心位置有一凹陷，此現象主要是由於之漿體與模具內壁的黏合作用影響，因此當體積濃度越高且漿體內含有較多的細顆粒泥沙時，黏合作用則會越為顯著。

整體而言，坍落結果會受到漿體體積濃度與現地泥沙顆粒組成之影響，根據漿體體積濃度(C_v)與無因次坍流度的關係（圖 4.40）瞭解，隨著體積濃度之增加，而坍落度則隨之降低，然而於相同的體積濃度下，隨著泥砂粒徑越細，坍落度亦逐漸減小，因此綜觀上述之結果可知，漿體體積濃度(C_v)與

無因次坍塌度大致呈負相關性（圖 4.40），但當體積濃度越高($C_{vt} = 50\%$)與漿體內含有較多的細顆粒泥沙時，其坍塌度的整體下降幅度亦會呈現逐漸增加情況。

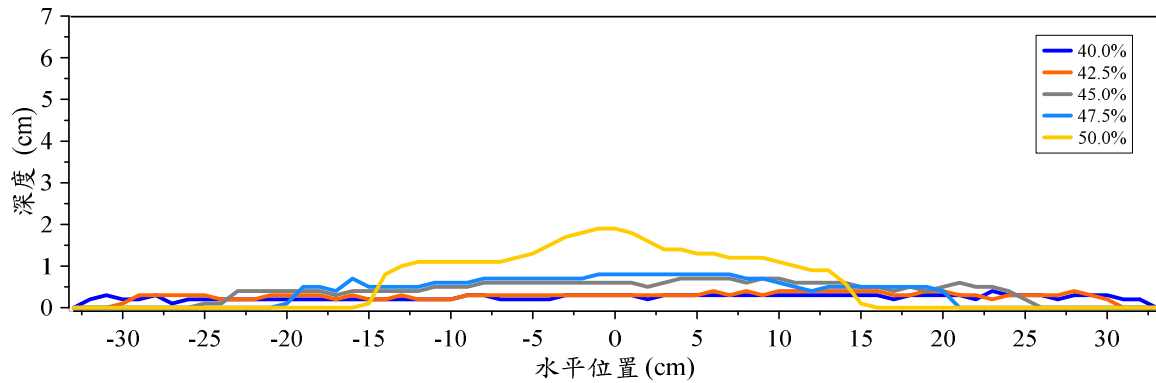


圖 4.37 不同體積濃度的角埔溪現地沙通過#100 篩漿體之坍塌結果縱剖面圖

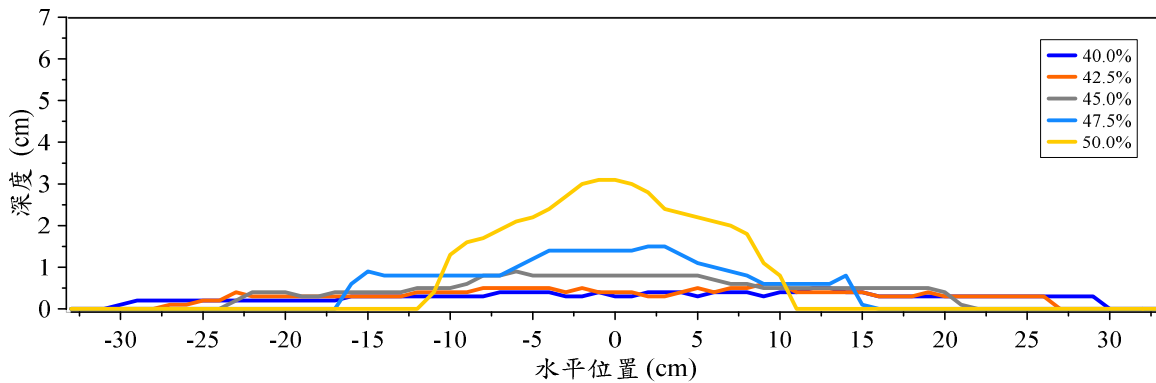


圖 4.38 不同體積濃度的角埔溪現地沙通過#200 篩漿體之坍塌結果縱剖面圖

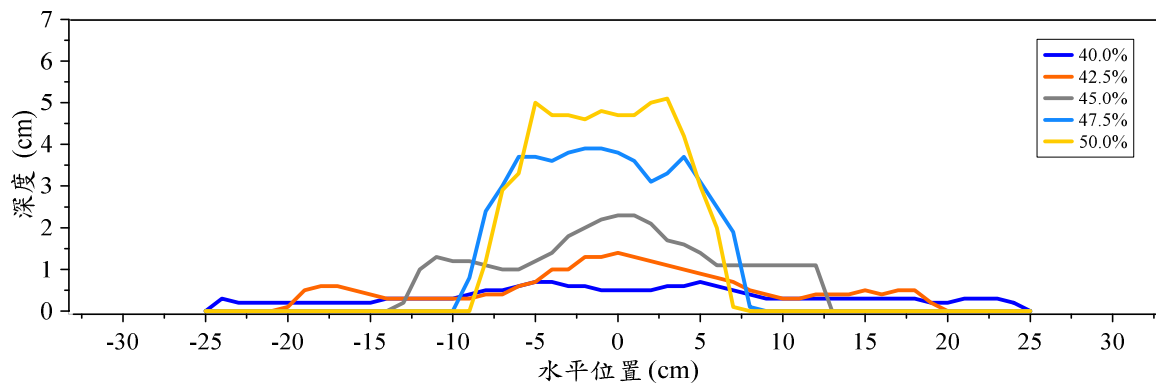


圖 4.39 不同體積濃度的角埔溪現地沙通過#300 篩漿體之坍塌結果縱剖面圖

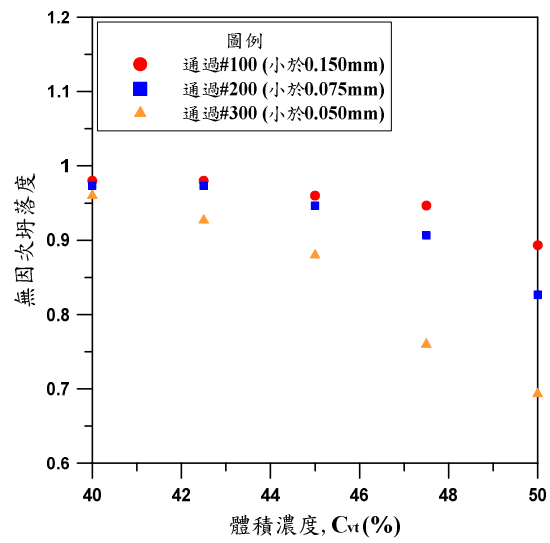


圖 4.40 角埔溪現地沙體積濃度(C_{vt})與無因次坍落度之關係圖

4.3.3 土石流集水區現地沙（愛玉子溪集水區）

本研究後續進行土石流集水區現地泥沙（愛玉子溪集水區）之坍流試驗，首先針對坍流度之結果進行說明，對於不同粒徑大小之現地泥沙，於各體積濃度（ $C_{vt} = 40\%$ 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）的泥沙漿體所測得之坍流度俯視圖，如圖 4.41 至圖 4.43 所示，坍流度及無因次化之結果，如表 4.14 至表 4.16 所示。

計畫根據通過#100 號篩的泥沙顆粒漿體進行的坍流試驗之結果顯示（表 4.14），不同濃度（ 40% 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）漿體經試驗所得之漿體坍流直徑（坍流度）依序約為 58.0 cm 、 50.5 cm 、 40.5 cm 、 31 cm 及 20 cm ，而坍流度隨漿體體積濃度(C_{vt})增加而減少，然而根據圖 4.41 的坍流結果同樣顯示，當體積濃度大於 45% 時，其坍流結果則呈現較為接近圓形之型態；然而通過#200 篩的泥沙顆粒漿體於坍流試驗後所量測的漿體直徑（表 4.15），於各體積濃度（ 40% 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）之坍流度，依序約為 52.5 cm 、 44.5 cm 、 33.0 cm 、 23.0 cm 及 17.0 cm ，而坍流度同樣隨著體積濃度(C_{vt})增加而逐漸減少，且各體積濃度漿體之坍流結果皆較接近於圓形（圖 4.42）；通過#300 篩的各體積濃度（ 40% 、 42.5% 、 45% 、 47.5% 及 50% ）漿體之坍落度（表 4.16），依序為 42.5 cm 、 32.0 cm 、 24.0 cm 、 19.0 cm 及 16.0 cm ，然而坍流度同樣隨著體積濃度(C_{vt})增加而逐漸減少，且各體積濃度漿體之坍流結果皆較接近於圓形（圖 4.43）。

整體而言，坍流試驗之結果會受到現地泥沙粒徑組成之影響，此區域內的粗顆粒泥沙較少於角埔溪區域，其漿體的整體黏稠度較高，因此於坍流試驗結果中，當體積濃度較低時，其坍流試驗結果及較接近於圓形，進一步根據體積濃度與無因次坍流度之關係瞭解（圖 4.44），隨著體積濃度的增加，

而無因次坍流度亦會逐漸減少，其大致呈現負相關性，而相同體積濃度下，隨著漿體內之泥砂顆粒越細，無因次坍流度也會隨之減小，但當體積濃度越高($C_{vt} = 50\%$)且漿體內含有較多的細顆粒泥沙時，其坍流度的整體變動幅度會逐漸降低。

表 4.14 愛玉子溪現地通過#100 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
坍流度(cm)	58.0	50.5	40.5	31.0	20.0
坍落度 (cm)	14.7	14.6	14.2	13.7	12.1
無因次坍流度	5.80	5.05	4.05	3.10	2.00
無因次坍落度	0.98	0.97	0.95	0.91	0.81

參考資料：本計畫彙整

表 4.15 愛玉子溪現地通過#200 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
坍流度(cm)	52.5	44.5	33.0	23.0	17.0
坍落度 (cm)	14.7	14.4	13.9	13.0	11.7
無因次坍流度	5.25	4.50	3.30	2.30	1.70
無因次坍落度	0.98	0.96	0.93	0.87	0.78

參考資料：本計畫彙整

表 4.16 愛玉子溪現地通過#300 號篩不同體積濃度沙漿體坍流試驗結果

體積濃度(%)	40	42.5	45	47.5	50
坍流度(cm)	42.5	32.0	24.0	19.0	16.0
坍落度 (cm)	14.2	13.7	12.9	12.1	11.5
無因次坍流度	4.25	3.20	2.40	1.90	1.60
無因次坍落度	0.95	0.91	0.86	0.81	0.77

參考資料：本計畫彙整

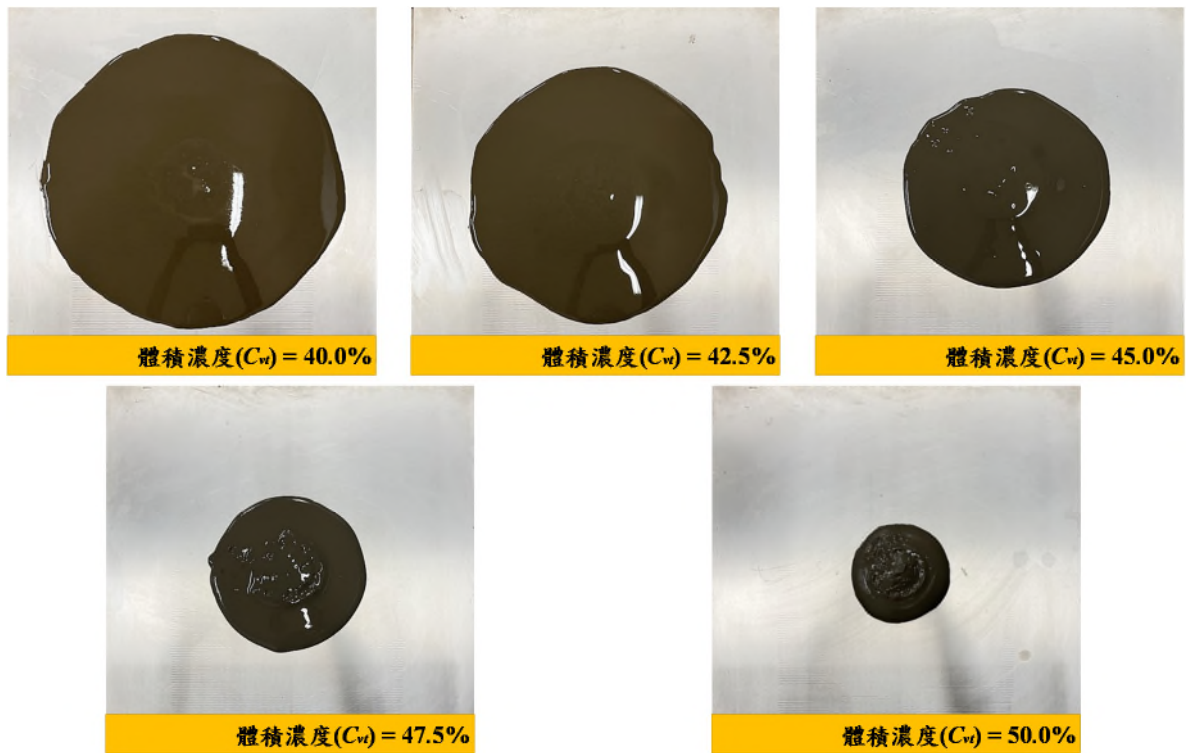


圖 4.41 愛玉子溪現地沙通過#100 篩泥沙漿坍流結果俯視圖

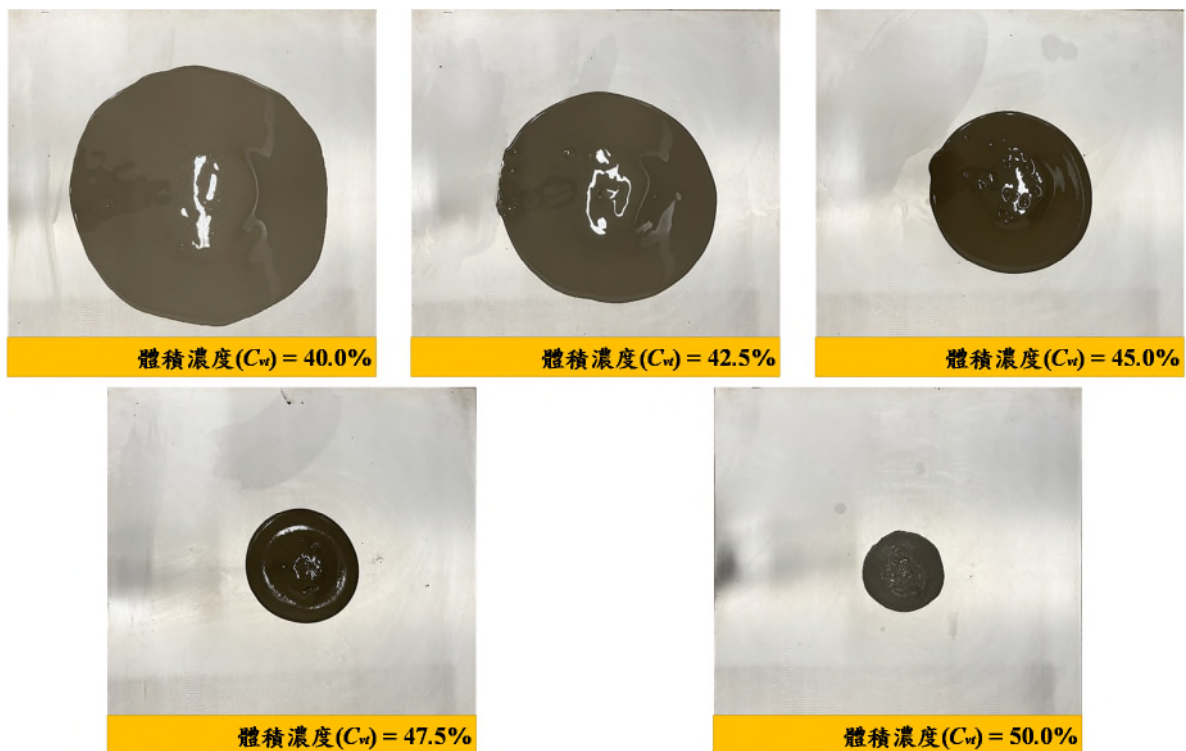


圖 4.42 愛玉子溪現地沙通過#200 篩泥沙漿坍流結果俯視圖

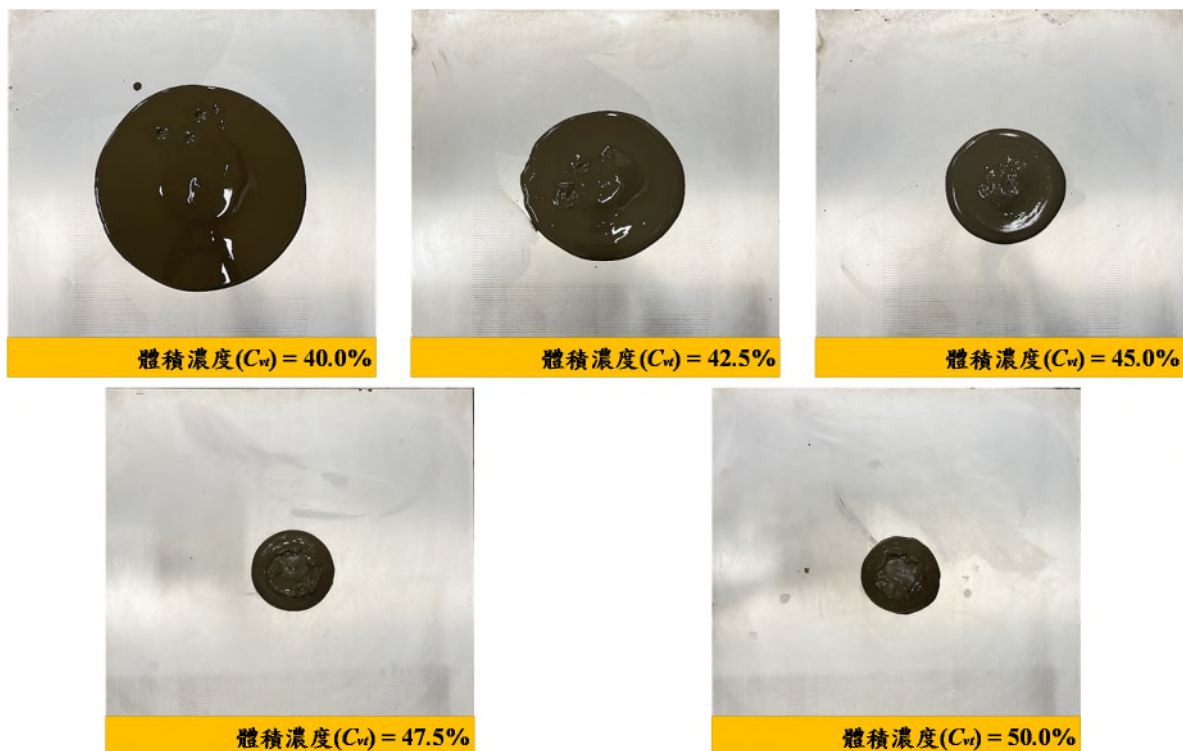


圖 4.43 愛玉子溪現地沙通過#300 篩泥沙漿坍流結果俯視圖

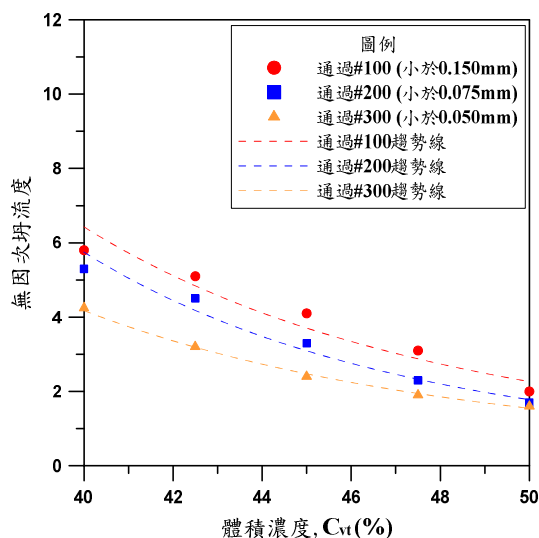


圖 4.44 愛玉子溪現地沙體積濃度與無因次坍流度之關係圖

接續針對土石流集水區現地泥沙(愛玉子集水區)坍流試驗結果之坍落度進行分析說明,對於不同泥砂顆粒組成(通過#100 篩、通過#200 篩與通過#300 篩)之現地泥沙,於各體積濃度(40%、42.5%、45%、47.5%及 50%)的泥沙漿體所測得之坍落剖面,如圖 4.45 至圖 4.47 所示。坍落度及其無因

次化之數值，如表 4.14 至表 4.16 所示。

計畫根據通過#100 號篩的泥沙顆粒漿體進行的坍流試驗之結果顯示（表 4.14），各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體經試驗所得之坍落度，依序約為 14.7 cm、14.6 cm、14.2cm、13.7 cm 及 12.1 cm，然而從坍流結果縱剖面（圖 4.45）可觀察到，當體積濃度 40%至 42.5%時，其坍落剖面的中央凸起部分較不顯著，其主要因為過#100 篩之漿體內含有較多的粗顆粒泥沙，因此漿體的濃稠度相對較低，使得漿體未於中央聚積，相對而言，在體積濃度大 45%時，即可明顯觀察到兩部分，分別為中心圓與中心圓外圓環，其較接近與水庫淤泥漿體坍流試驗結果；通過#200 篩的各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體之坍落度（表 4.15），依序為 14.7 cm、14.4 cm、13.9cm、13.0 cm 及 11.7 cm，根據圖 4.46 的坍流結果縱剖面可知，體積濃度小於 42.5%時，坍落剖面中央凸起部分較不顯著，而其餘體積濃度之漿體，則可觀察到中心圓與中心圓外圓環兩個部分；通過#300 篩的各體積濃度（40%、42.5%、45%、47.5%及 50%）漿體之坍落度（表 4.16），依序為 14.2 cm、13.7 cm、12.9cm、12.1 cm 及 11.5cm，同樣根據坍流結果縱剖面（圖 4.47）可知，此泥砂粒徑條件下於各體積濃度之坍落剖面之凸起部分較為明顯，而漿體坍落之形狀皆可區分為中心圓與中心圓外圓環兩個部分，但當體積濃度大於 47.5%時，其漿體坍落後則呈現為梯形狀，於中心位置有一凹陷，此現象主要是由於之漿體與模具內壁的黏合作用影響，因此當體積濃度越高且漿體內含有較多的細顆粒泥沙時，黏合作用則會越為顯著。

整體而言，坍落結果會受到漿體體積濃度與現地泥沙顆粒組成之影響，根據漿體體積濃度(C_v)與無因次坍流度的關係（圖 4.48）瞭解，隨著體積濃度之增加，而坍落度則隨之降低，然而於相同的體積濃度下，隨著泥砂粒徑

越細，坍落度亦逐漸減小，因此體積濃度與無因次坍落度大致呈負相關性，然而隨著體積濃度增加，坍落度的下降幅度亦呈現增加情況。

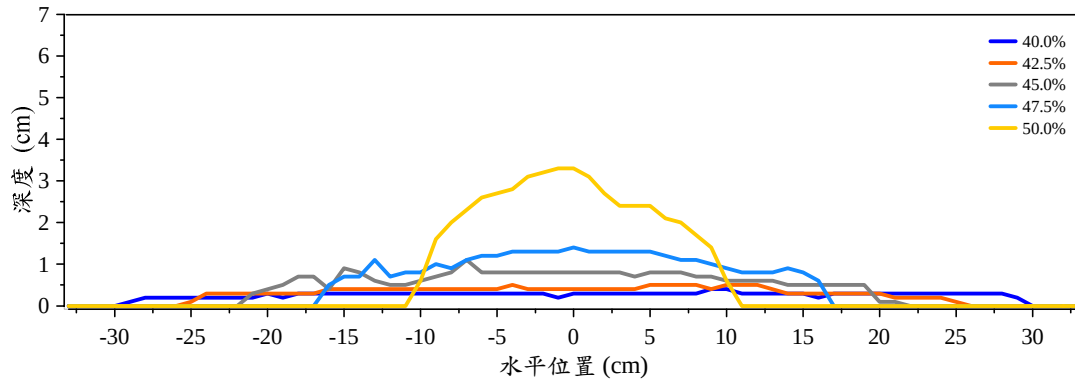


圖 4.45 不同體積濃度的愛玉子溪現地沙通過#100 篩漿體之坍流結果縱剖面圖

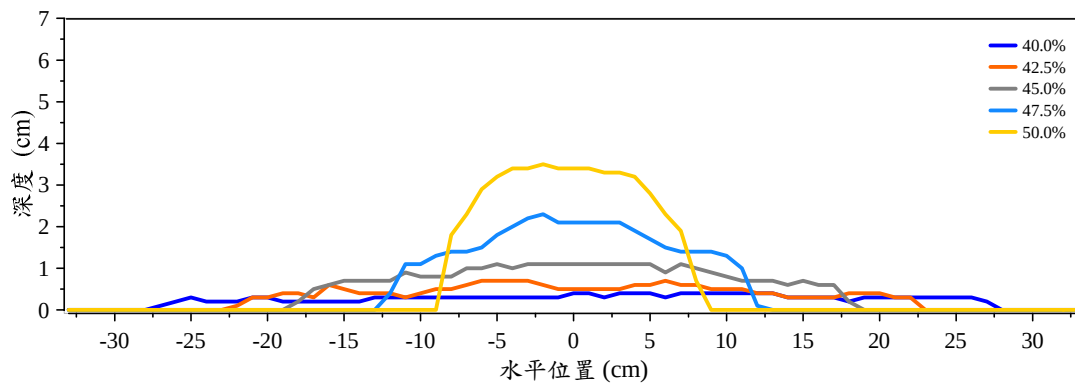


圖 4.46 不同體積濃度的愛玉子溪現地沙通過#200 篩漿體之坍流結果縱剖面圖

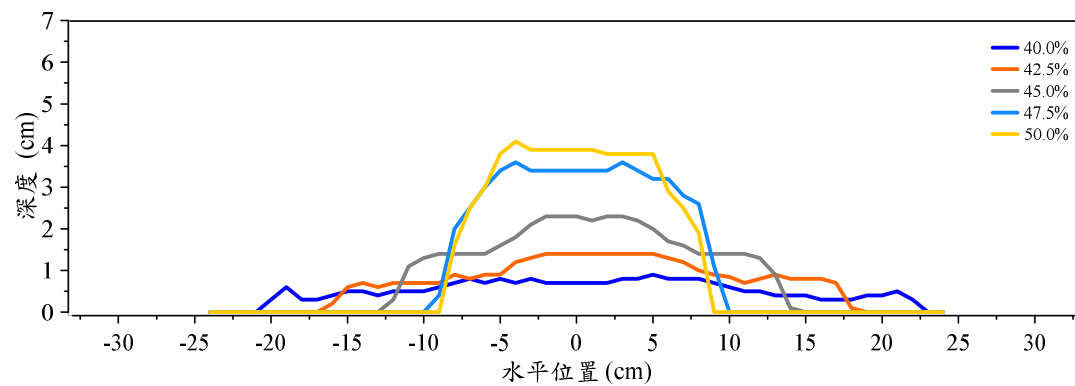


圖 4.47 不同體積濃度的愛玉子溪現地沙通過#300 篩漿體之坍流結果縱剖面圖

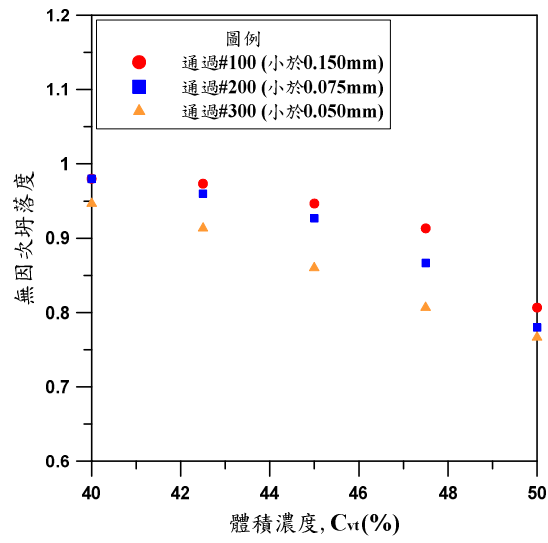


圖 4.48 愛玉子溪現地沙體積濃度(C_{vt})與無因次坍落度之關係圖

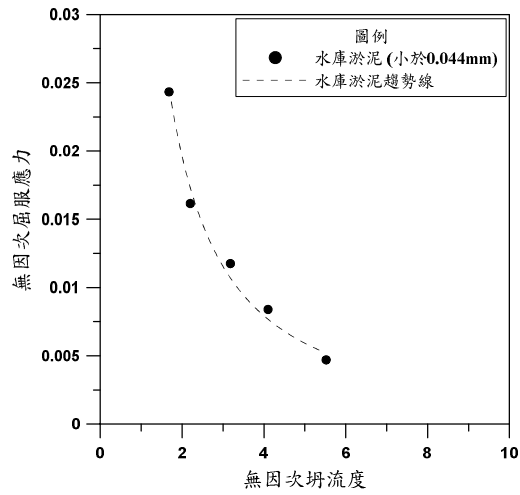
4.4 流變參數與坍流參數之關聯性分析

本計畫經過上述的流變與坍流試驗後，為了瞭解是否能利用坍流試驗所獲得之參數推估流變參數。因此後續針對泥沙漿體的流變參數（例：屈服應力與黏滯度）與坍流參數（例：坍落度與坍流度）進一步分析，以探討泥沙漿體之流變參數對於坍度參數之關聯性，有利於未來利用簡易操作的坍流試驗，以獲得其相關之參數，並快速推估泥沙漿體的屈服應力與黏滯度，進而瞭解其流動特性。

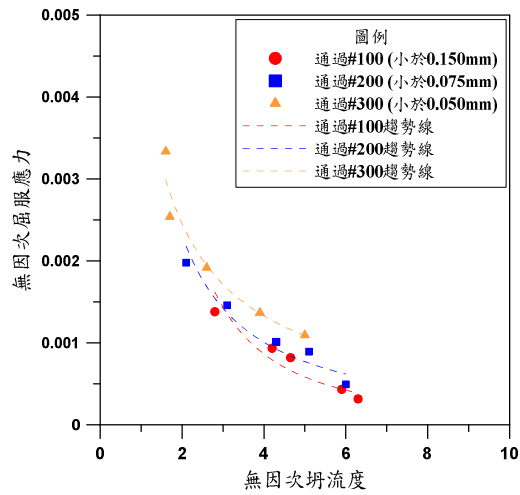
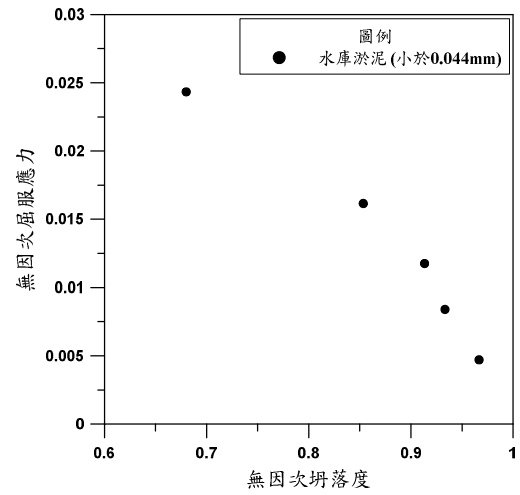
4.4.1 屈服應力

本研究首先針對水庫淤泥、角埔溪與愛玉子溪的泥沙漿體之屈服應力(τ_y)與坍流參數（坍流度與坍落度）進行分析，如圖 4.49 與圖 4.50 所示，針對無因次坍流度與無因次屈服應力之關係結果（圖 4.49）顯示，其呈現負相關的對數型變化之關係，隨著無因次坍流度之增大，而無因次屈服應力則隨之降低，且無因次坍流度愈大時，其無因次屈服應力下降的幅度也就越小。然而進一步針對水庫淤泥的漿體之無因次屈服應力與無因次坍流度進行分析瞭解，其整體的變化幅度（ $\tau_{y*} = 0.005$ 至 0.025 ）遠大於角埔溪與愛玉子溪集水區（ $\tau_{y*} = 0.0005$ 至 0.0035 ）的變化幅度，主要是因為其漿體內的泥沙粒徑組成多細顆粒泥沙（黏土）為主，因此用於一般集水區內泥沙的屈服應力推估將會有高估之情勢。

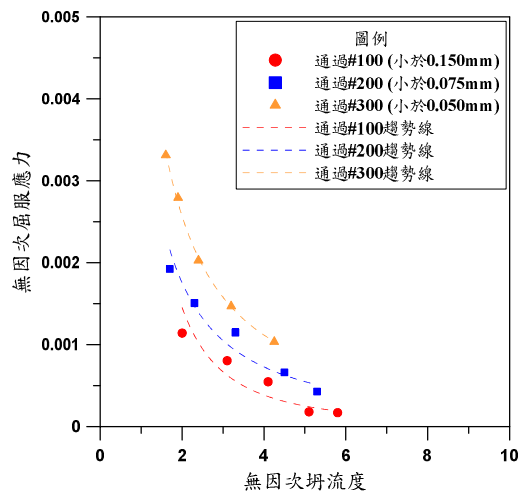
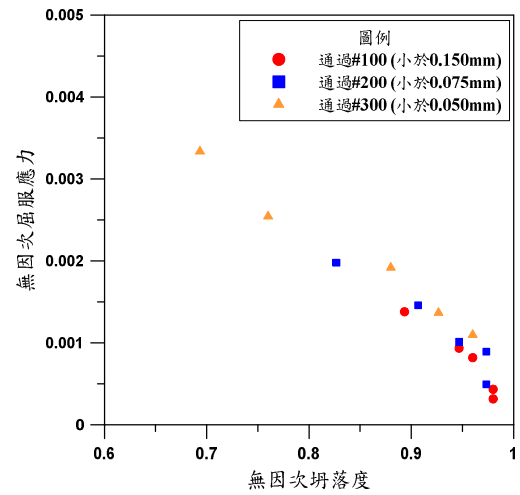
此外，本研究針對無因次坍落度與無因次屈服應力之關係顯示（圖 4.50），其同樣呈現負相關性，隨著無因次坍落度的增加，無因次屈服應力也隨之減少，然而隨著無因次坍落度之減少，無因次屈服應力增大的幅度亦隨之增加，雖然無因次坍落度與無因次屈服應力之關係亦呈現良好的變化趨勢，但坍流試驗中量測坍落度時，因為其變化量較小，往往會產生較大的量測誤差。



(a) 水庫淤泥



(b) 角埔溪集水區



(c) 愛玉子溪集水區

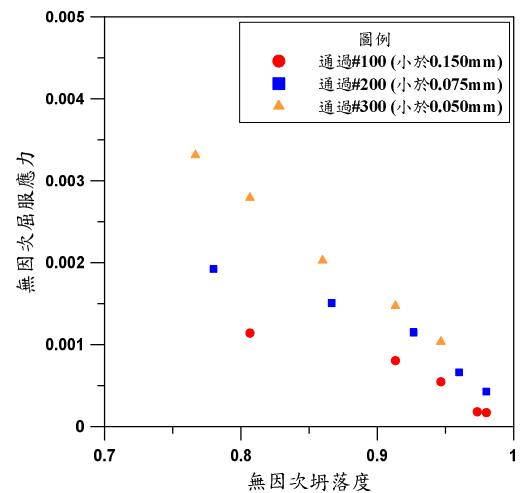


圖 4.49 無因次坍流量與無因次屈服應力之關係圖

圖 4.50 無因次坍落度與無因次屈服應力之關係圖

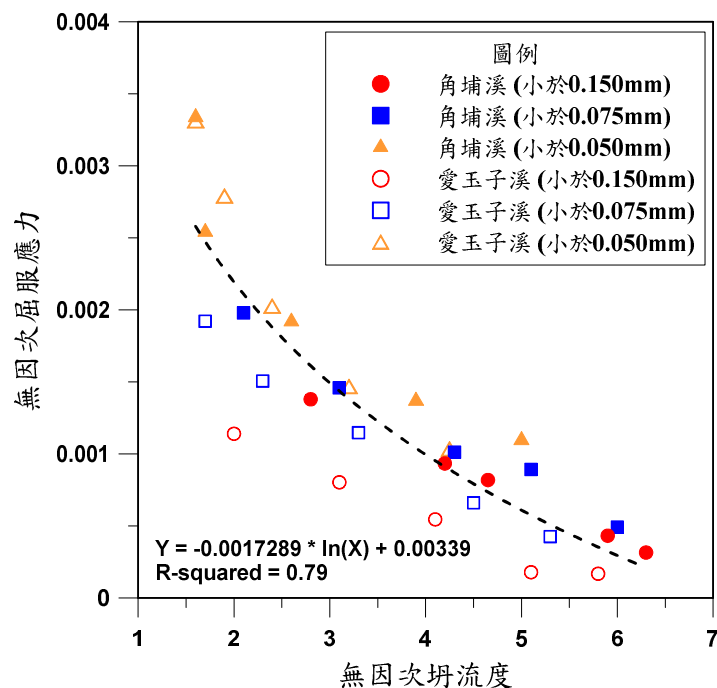


圖 4.51 土石流集水區現地沙無因次坍流度與無因次屈服應力之關係圖

本研究進一步將土石流集水區（角埔溪與愛玉子溪）內的現地泥沙之無因次坍流度與無因次屈服應力之關係進行繪製（圖 4.51），其同樣呈現負相關的對數型變化之關係，其判定係數(R^2)約為 0.79，因此得到一回歸關係式如下：

$$\tau_{y*} = -0.0017289 \times \ln(D_{f*}) + 0.00339 \quad (19)$$

式中， τ_{y*} 為無因次屈服應力； D_{f*} 為無因次坍流度。

4.4.2 黏滯係數

本研究首先針對水庫淤泥、角埔溪與愛玉子溪的泥沙漿體之黏滯係數(μ_B)與坍流參數（坍流度與坍落度）進行分析，如圖 4.52 與圖 4.53 所示，針對無因次坍流度與無因次黏滯係數之關係結果（圖 4.52）顯示，其呈現負相關的指數型變化，隨著無因次坍流度的增加，而無因次黏滯係數也逐漸減少，其趨勢呈現當無因次坍流度愈大時，則無因次屈服應力下降的幅度就愈小。然而流變參數中的黏滯係數(μ_B)是一個非常敏感且易擾動的參數，倘若

如水庫淤泥之泥沙漿體，其組成以黏土材料為主，其整體的變化幅度則會呈現較為穩定之趨勢，但當泥沙漿體的粗顆粒含量較多時，其黏滯係數的擾動程度則相對較大。此外，本研究針對無因次坍落度與無因次黏滯係數之關係顯示（圖 4.53），其同樣呈現負相關性，隨著無因次坍落度的增加，漿體的無因次黏滯係數也隨之減少，然而隨著無因次坍落度之減少，無因次黏滯係數增大的幅度亦隨之增加，然而無因次坍落度與無因次黏滯係數仍呈現變化幅度較大之關係。

本研究進一步針對將土石流集水區（角埔溪與愛玉子溪）內的現地泥沙之無因次坍流度與無因次黏滯係數之關係進行繪製（圖 4.54），其整體的回歸趨勢($R^2 = 0.42$)並非呈現良好的情況，而整體數值的變化幅度較大。此外，透過土石流集水區（角埔溪與愛玉子溪）內的現地泥沙之無因次坍落試體高度與無因次黏滯係數之關係進行分析瞭解，如圖 4.55 所示，其整體的回歸趨勢呈現一正相關的對數型變化之關係，但其判定係數($R^2 = 0.45$)並非呈現良好的情況，而整體數值的變化幅度則較分散。

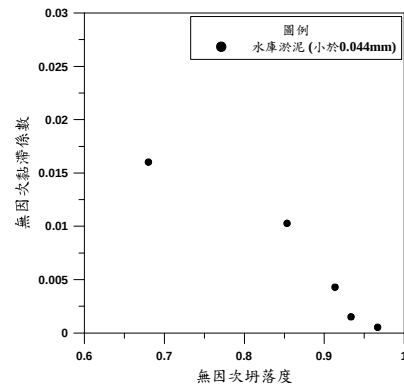
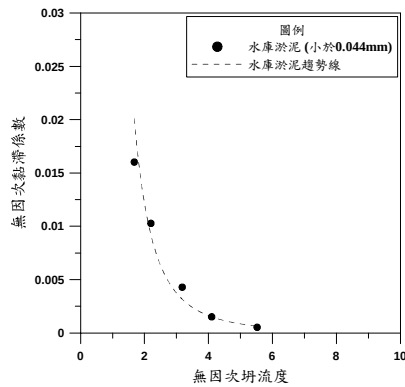
然而進一步透過不同集水區所迴歸之關係式，則會呈現不同的回歸趨勢，於角埔溪集水區的無因次坍流度及無因次坍落試體高度與無因次黏滯係數關係之回歸趨勢，其判定係數(R^2)分別約為 0.76 與 0.80，但愛玉子集水區的無因次坍流度及無因次坍落試體高度與無因次黏滯係數關係之回歸趨勢，其判定係數(R^2)則分別約為 0.53 與 0.45，顯然流變參數中的黏滯係數(μ_B)是一個非常敏感且易擾動的參數，因此於迴歸分析亦呈現較為分散變化之情況。

本研究亦土石流集水區（角埔溪與愛玉子溪）內的現地泥沙之無因次屈服應力與無因次黏滯係數之關係進行繪製（圖 4.56），其同樣呈現正相關的

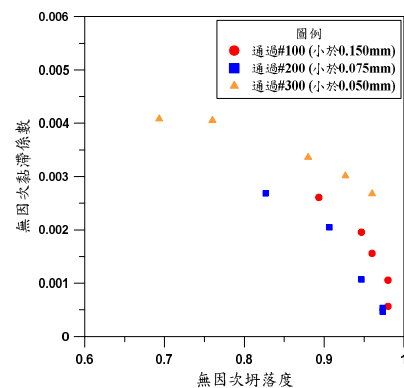
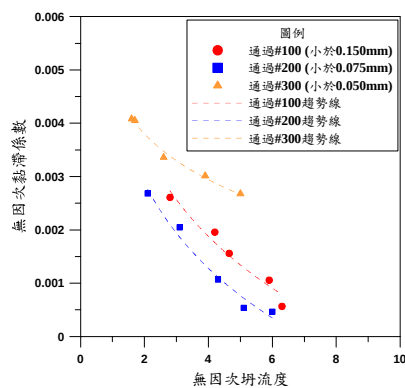
對數型變化之關係，其判定係數(R^2)約為 0.68，因此得到一回歸關係式如下：

$$\tau_{y*} = -0.0009017 \times \ln(\mu_{B*}) + 0.00747 \quad (20)$$

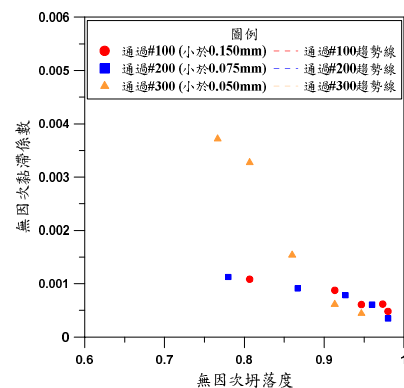
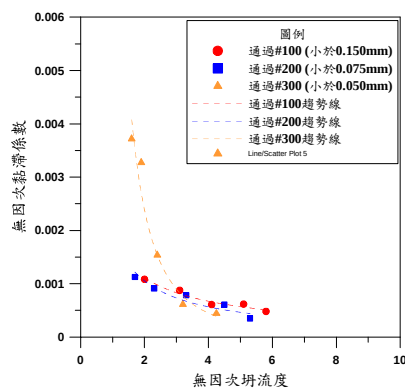
式中， τ_{y*} 為無因次屈服應力； μ_{B*} 為無因次黏滯係數。



(a) 水庫淤泥



(b) 角埔溪集水區



(c) 愛玉子溪集水區

圖 4.52 無因次坍流度與無因次黏滯係數之關係圖

圖 4.53 無因次坍落度與無因次黏滯係數之關係圖

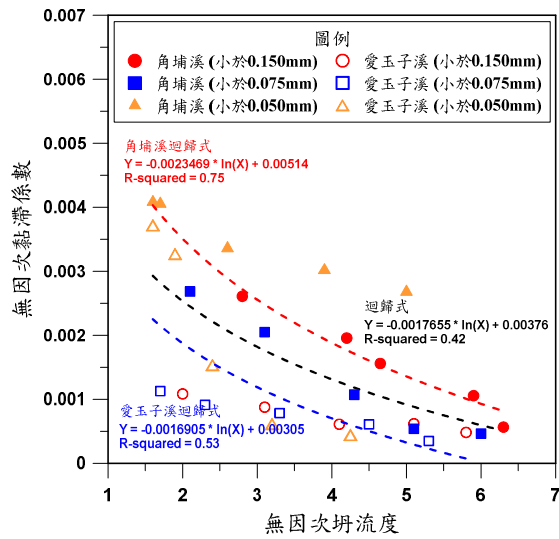


圖 4.54 土石流集水區現地沙無因次坍流度與無因次黏滯係數之關係圖

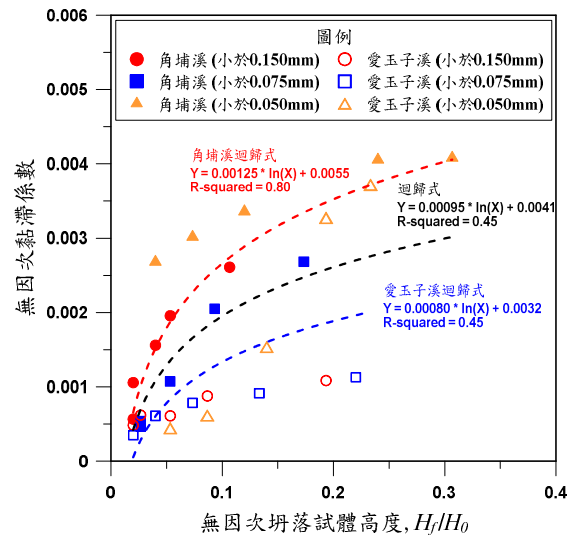


圖 4.55 土石流集水區現地沙無因次坍流試體高度與無因次黏滯係數之關係圖

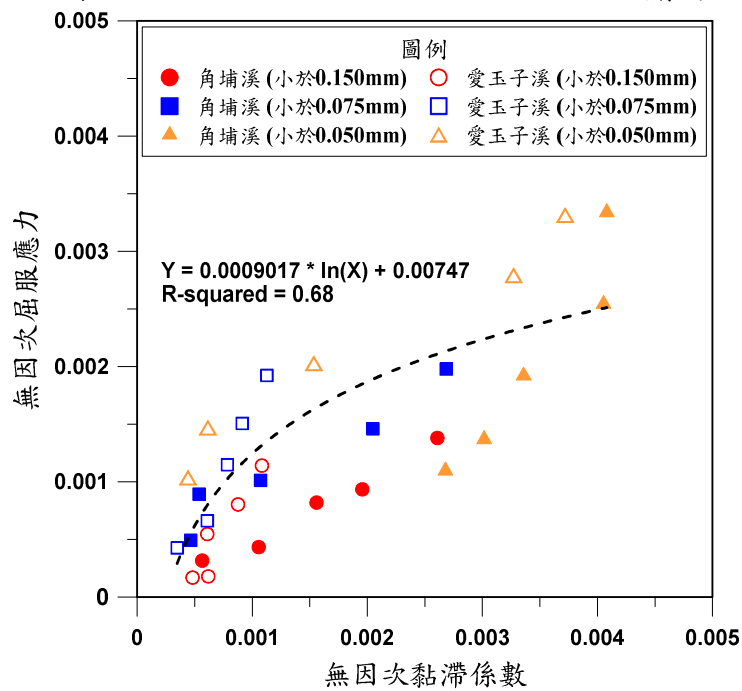


圖 4.56 土石流集水區現地沙無因次無因次屈服應力與無因次黏滯係數之關係圖

4.4.3 屈服應力與黏滯係數之推估

經過上述的流變參數對於坍度參數之關聯性分析探討，本計畫了為瞭解是否能利用簡易操作的坍流試驗，以獲得之坍流參數（無因次坍流度）推估流變參數（屈服應力與黏滯係數）。

因此本計畫於愛玉子溪進行現地坍流試驗之操作，如圖 4.57 與圖 4.58 所示，共完成 8 組的坍流試驗，其中 3 組編號 A 的試驗組別的漿體粒徑皆小於 0.18 mm（小於#80 篩），而 3 組編號 B 的試驗組別之漿體粒徑皆小於 4.76 mm（小於#4 篩），另外 2 組編號 C 的試驗組別之漿體粒徑皆較大，分別小於 8 mm 與 12 mm，其漿體的泥沙粒徑組成，如圖 4.59 所示，相關坍流試驗量測結果，如表 4.17 所示。

本研究進一步透過現地所量測之坍流參數（表 4.17），首先將坍流度轉換成無因次坍流度(D_{f*})，並透過公式(19)以推求無因次屈服應力(τ_{y*})，再進一步透過公式(20)以推求為無因次黏滯係數(μ_{B*})，再透過公式(17)與公式(18)以轉換為屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)，而愛玉子溪集水區現地坍流參數轉換推求之流變參數，如表 4.18 所示。



圖 4.57 愛玉子溪集水區現地坍流試驗操作情況



圖 4.58 愛玉子溪集水區現地坍流試驗量測情況

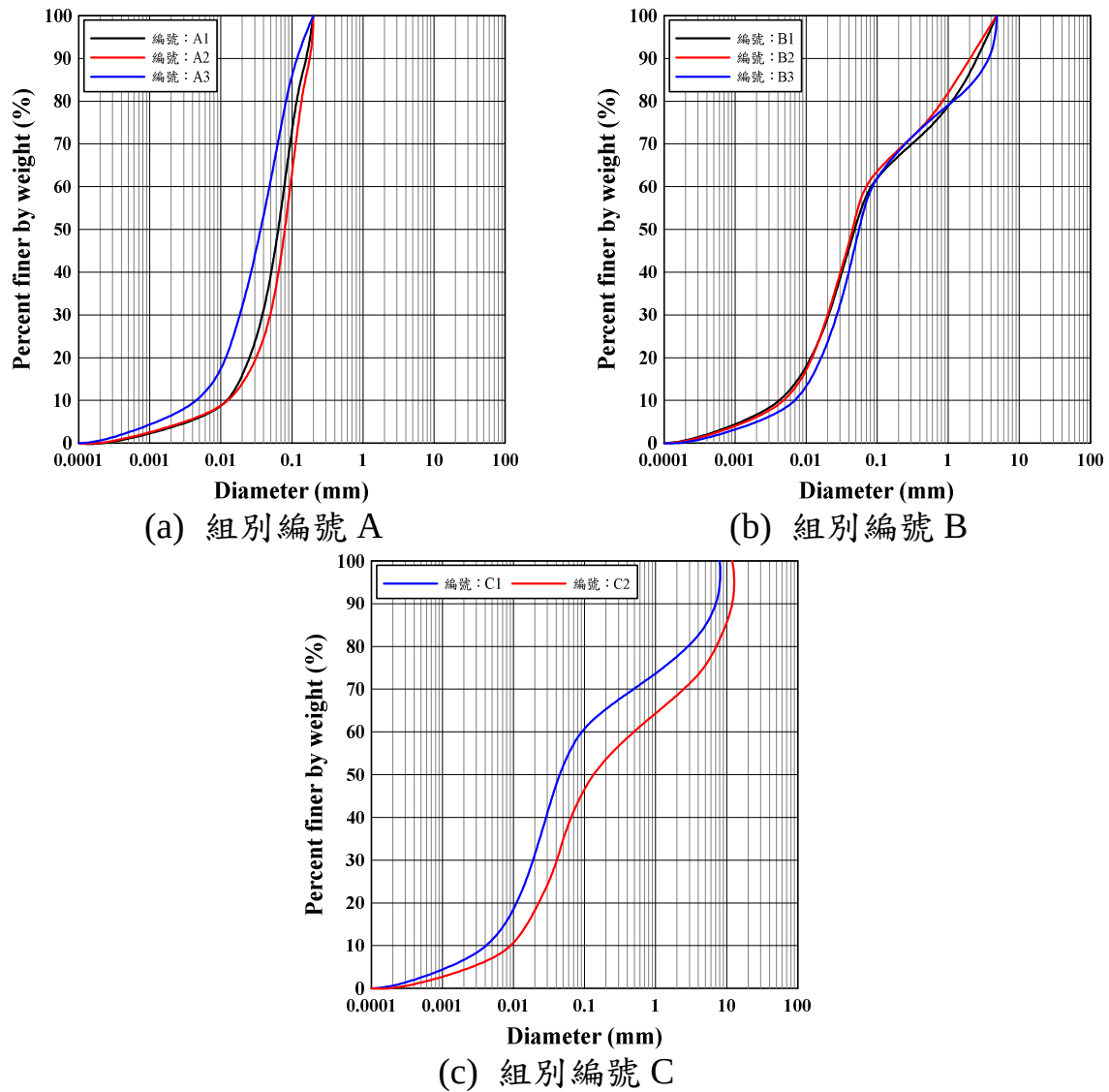


圖 4.59 愛玉子溪集水區現地坍塌試驗漿體之泥沙粒徑分布

表 4.17 愛玉子溪集水區之現地漿體坍塌試驗結果

編號	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
坍塌度(cm)	39.0	26.5	23.0	18.0	29.5	27.5	21.3	23.0
坍塌度(cm)	14.3	13.4	12.8	11.8	13.6	13.5	12.4	12.4
無因次坍塌度	3.90	2.65	2.30	1.80	2.95	2.75	2.13	2.30
無因次坍塌度	0.95	0.89	0.85	0.79	0.91	0.90	0.82	0.83
體積濃度(%)	43	46	52	61	58	61	64	72
細顆粒體積濃度(%)	9.0	11.3	18.6	27.7	26.1	23.7	32.3	28.2

參考資料：本計畫彙整

表 4.18 愛玉子溪集水區之現地漿體流變參數之推估結果

編號	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
無因次坍流度	3.90	2.65	2.30	1.80	2.95	2.75	2.13	2.30
無因次屈服應力	0.00104	0.00171	0.00195	0.00237	0.00152	0.00164	0.00209	0.00195
無因次黏滯係數	0.00080	0.00167	0.00219	0.00351	0.00136	0.00156	0.00255	0.00219
屈服應力	2.609	4.413	5.331	7.009	4.376	4.845	6.313	6.278
黏滯係數	0.248	0.535	0.742	1.282	0.485	0.569	0.956	0.874
體積濃度 (%)	43	46	52	61	58	61	64	72

參考資料：本計畫彙整

本研究進一步將前述流變試驗之屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)進行繪製，並將透過現地坍流試驗所推求之屈服應力(τ_y)與黏滯係數(μ_B)點繪於其中，其結果顯示相關推估之流變參數會散布於既有流變試驗之試驗值區間，且並無發散之情況，如圖 4.60 所示，。

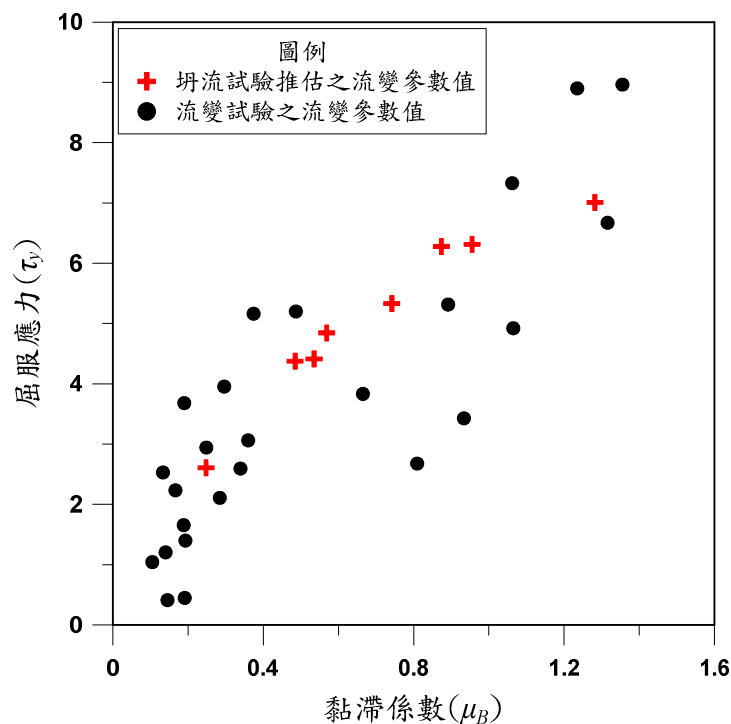


圖 4.60 流變參數試驗值與推估值之分布情況

第伍章 結論與建議

本研究首先針對研究區域內的基本資料進行蒐集，並配合現地泥沙粒徑採樣進行分析，進一步透過流變試驗分析研究區域內泥沙漿體的流變參數（例：屈服應力與黏滯度），且搭配坍流試驗分析研究區域內的坍流參數（例：坍落高度及坍流直徑），最終針對研究區域內泥沙漿體的流變參數與坍流參數進行關聯性分析，有利未來可透過簡易操作的坍流試驗，以獲得其相關參數，並快速推估泥沙漿體的屈服應力與黏滯度。

5.1 研究結論

- 一、在泥沙粒徑採樣分析瞭解，在中值粒徑(d_{50})方面，以內社溪之中值粒徑為最大(16.8 mm)，其次為角埔溪(4.59 mm)與愛玉子溪(3.82 mm)，而砂質含量中分別約為 14.4%、33.8%與 38.7%，其中小於 1.0 mm 之泥沙粒徑分別約為 8.1%、25.3%與 26.8%，而細顆粒材料方面（小於 0.15 mm，通過#100 號篩）佔整體粒徑分布之百分比，分別約為 1%、7%及 5%。
- 二、在流變試驗之分析結果顯示，屈服應力及黏滯係數大致上皆隨沙漿體之體積濃度上升而增加，然而於相同體積濃度(C_v)下，漿體內細顆粒泥沙所佔比例越高，其流變參數(τ_y 與 μ_B)亦呈現較大之情況，且隨著細顆粒含量較高的泥沙漿體，隨著體積濃度(C_v)越大，則屈服應力(τ_y)的上升幅度就有略為顯著之增加。
- 三、在流變試驗之粒徑分析結果顯示，增加細顆粒泥沙材料濃度相較於增加粗顆粒泥沙材料之濃度對於流變參數之增加量較為顯著，因此細顆粒泥沙之含量多寡對於流變行為之影響較粗粒料含量更為顯著，因此建議未來在探討土石流流變特性中，於細顆粒泥沙材料盡量要小於

0.016 mm 且細顆粒體積濃度(C_{vf})盡量要大於 20%，將有助於分析與探討土石流體之流變行為。

- 四、坍流試驗之分析結果顯示，隨著體積濃度的增加，坍流度與坍落度則會逐漸減少，而於相同體積濃度下，隨著漿體內之泥砂顆粒越細，坍流度與坍落度也會隨之降低，但當體積濃度越高($C_{vt} = 50\%$)且漿體內含有較多的細顆粒泥沙時，其坍流度的整體變動幅度會逐漸降低，而坍落度的降低幅度則會呈現逐漸增加情況。
- 五、根據流變參數與坍流參數之關聯性分析瞭解，隨著無因次坍流度之增大，而無因次屈服應力則隨之降低，且無因次坍流度愈大時，其無因次屈服應力下降的幅度也就越小，其呈現負相關的對數型變化之關係，因此得到一回歸關係式： $\tau_{y*} = -0.0017289 \times \ln(D_{f*}) + 0.00339$ ；然而無因次坍流度及坍落度與無因次黏滯係數之關係，雖同樣呈現負相關性，但因為黏滯係數是一個非常敏感且易擾動的參數，因此於迴歸分析呈現較為分散變化之情況。
- 六、本研究針對無因次屈服應力與無因次黏滯係數之關係進行分析瞭解，其呈現正相關的對數型變化之關係，因此得到無因次屈服應力與無因次黏滯係數之回歸關係式： $\tau_{y*} = -0.0009017 \times \ln(\mu_{B*}) + 0.00747$ ，將有助於後續透過簡易操作之坍流試驗，以獲得之坍流參數(無因次坍流度)進而推估相關之流變參數(屈服應力與黏滯係數)。

5.2 研究建議

- 一、建議後續可針對不同地區的土石流溪流進行相關的流變試驗與坍流試驗，進一步分析泥沙漿體的流變參數與坍流參數之關聯性，以提升既有回歸關係式之可性度，以利後續推估泥沙漿體的屈服應力與黏滯度

適用性。

- 二、建議後續的現地流變與坍流試驗中，可進一步結合無人載具空拍進行廣域河道粗細粒料之分佈調查，藉以推估試驗漿體粗顆粒與細粒料泥沙之間的組成比例。
- 三、建議後續亦可透過流變與坍流試驗所得之流變與坍流參數，進一步透過數值模擬演算以推求其相關之參數，以輔助並提供試驗所無法觀測之現象。

參考文獻

1. 王志賢(2000)，「粗顆粒材粒對土石流體流變特性影響之實驗研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
2. 王志賢(2007)，「泥砂顆粒組成對黏性土石流體流變參數影響之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系博士論文。
3. 王裕宜(2006)，「粘性泥石流體流的應力應變特徵和應力本構關係之研究」，山地學報，第 24 卷，第 5 期，第 555-561 頁。
4. 王裕宜、詹錢登、嚴璧玉(2001)，「泥石流體結構和流變特性」，湖南科學技術出版社。
5. 王靖(2013)，「泥流型和礫石型土石流有限元素分析初步探討」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
6. 余昌益(1996)，「高含沙水流流變參數之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
7. 李丹、王志賢、詹錢登(2022)，「泥沙漿體屈服應力與坍塌度及坍塌度關係之研究」，中華水土保持學報，第 53 卷，第 3 期，第 167-175 頁。
8. 林基源、陳冠宏、洪政宏(2007)，「土石流濃度及細料對壩體攔阻特性影響之研究」，朝陽學報，第 12 期，第 73-87 頁。
9. 胡小芳、蘇志學(2006)，「改進式攤度試驗落度筒法測定新拌混凝土流變性能」，混凝土，202，第 64-69 頁。
10. 張雅雯(2008)，「固體顆粒和 Carbopol 940 漿體混合後支流變特性」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
11. 許喬凱 (2016)，「利用坍塌度試驗推估泥沙漿體的流變參數」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
12. 郭啟文(2002)，「泥漿體及礫石泥漿體之流變特性」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
13. 黃法禮、李化建、謝永江、易忠來、譚鹽賓(2015)，「新拌混凝土工作性能與流變參數相關性研究進展」，預拌混凝土，312，第 119-127 頁。
14. 詹錢登(2000)，「土石流概論」，科技圖書股份有限公司。

15. 詹錢登、張雅雯、郭峰豪、羅偉誠(2009)，「固體顆粒對賓漢流體流變參數之影響」，中華水土保持學報，40(1)，第 95-104 頁。
16. 詹錢登、許喬凱、楊致遠(2018)，「高嶺土泥沙漿體流變與坍度之試驗研究」，中華水土保持學報，49(2)，第 71-77 頁。
17. 鄒初首、夏勇(2006)，「混凝土坍落度影響因素的試驗研究」，混凝土，195，第 65-67 頁。
18. 蔡孟芳(2009)，「非均勻固體顆粒對賓漢流體流變參數之影響」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
19. Bagnold, R. A. (1954), Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. of the Royal Society of London, A255, 49-63.
20. Bouvet, A., Ghorbel, E., & Bennacer, R. (2010). The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study. Cement and concrete research, 40(10), 1517-1523.
21. Chidiac, S. E., Maadani, O., Razaqpur, A. G., & Mailvaganam, N. P. (2000). Controlling the quality of fresh concrete-a new approach. Magazine of Concrete Research, 52(5), 353-363.
22. Collins, F., Lambert, J., and Duan, W.H. (2012). “The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube OPC paste mixtures.” Cem. Concr. Compos. 34 (2) 201-207.
23. Cui, W., Tang, Q. W., & Song, H. F. (2021). Effects of Viscosity on Pumping Concrete Behavior Using Computational Fluid Dynamics Method. ACI Materials Journal, 118(2), 117-126.
24. Dey, L., Jan, C. D., & Wang, J. S. (2021). Effects of particle fractions on the Bingham yield stress and viscosity of fine-coarse particle suspensions. Journal of Mountain Science, 18(11), 2960-2970.
25. Ferraris, C. F., & de Larrard, F. (1998). Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. Cement, Concrete and Aggregates, 20(2), 241-247.
26. Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 104(5), 461-478.

27. Gao, J., & Fourie, A. (2015). Spread is better: An investigation of the mini-slump test. *Minerals Engineering*, 71, 120-132.
28. Jan, C. D., & Dey, L. (2022). Effects of sediment fractions on slump-flow parameters of fine-and coarse-sediment suspensions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 310, 104925.
29. Jan, C.D., and Shen, H.W. (1997). Review Dynamic Modeling of Debris Flows. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 64, 93-116.
30. Komura, R., Tanigawa, Y., Mori, H., Kurokawa, Y. (1994). Rheological study on slumping behavior of fresh concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, AIJ, No. 462, 1-10. (In Japanese).
31. Kurokawa, Y., Tanigawa, Y., Mori, H., and Komura, R. (1994). A study on the slump test and slump-flow test of fresh concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 16, 25-32.
32. Laskar, A. I. (2009). Correlating slump, slump flow, vebe and flow tests to rheological parameters of high-performance concrete. *Materials Research*, 12(1), 75-81.
33. Li, W., Guo, L., Liu, G., Pan, A., & Zhang, T. (2020). Analytical and experimental investigation of the relationship between spread and yield stress in the mini-cone test for cemented tailings backfill. *Construction and Building Materials*, 260, 119770.
34. Major, J. J., and Pierson, T. C. (1992). "Debris flow rheology: experiment analysis of fine-grained slurries." *Water Resources Research*, 28(3), 841-857.
35. Mitschka, P. (1982). "Simple conservation of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions." *Rheologica Acta*, 21, 207-209.
36. Murugan, M., Santham, M., Gupta, S.S., Pradeep, T., and Shah, S.P. (2016). "Influence of 2D rGO nanosheets on the properties of OPC paste." *Cement and Concrete Composites*, 70, 48-59.
37. O'Brien, J. S., and Julien, P. Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hy-draulic Engineering*, ASCE, 114(8), 877-887.
38. Pashias, N., Boger, D., Summers, J., and Glenister, D. (1996). "A fifty-cent rheometer for yield stress measurement." *Journal of Rheology*, 40(6), 1179-1189.

39. Pereira, J. B., & Maciel, G. F. (2021). Automated slump test: An effective alternative in predicting rheological properties and an efficient tool for providing the quality control of materials. *Measurement*, 178, 109384.
40. Pierre, A., Lanos, C., and Estelle, P. (2013). "Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation." *Applied Rheology*, 23(6):63849.
41. Roussel, N. and Coussot, P. (2005). "Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow." *Journal of Rheology*, 49(3), 705-718.
42. Saak, A.W., Jennings, H.M., and Shah, S.P. (2004). "A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow." *Cement and Concrete Composites*, 34, 363-371.
43. Sakir, S., Raman, S.N., Kaish, A.B.M.A., and Mutalib, A.A. (2020). "Calibration of ASTM C230 Cone for measuring flow diameter of self-flowing mortar according to the EFNARC recommendation." In book: *Rheology and Processing of Construction Materials*. DOI: 10.1007/978-3-030-22566-7_31.
44. Tanigawa, Y., & Mori, H. (1989). Analytical study on deformation of fresh concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(3), 493-508.
45. Tregger, N., Ferrara, L., & Shah, S. P. (2008). Identifying viscosity of cement paste from mini-slump-flow test. *ACI Materials Journal*, 105(6), 558.
46. Tregger, N., Gregori, A., Ferrara, L., and Shah, S. (2012). "Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test." *Construction and Building materials*, 28, 499-505.
47. Wallevik, J. E. (2006). Relationship between the Bingham parameters and slump. *Cement and concrete research*, 36(7), 1214-1221.

附錄一

期初審查會議委員意見回覆及辦理情形

由坍流試驗進行現地量測土石流流變參數之研究

期初審查會議委員意見回覆及辦理情形

審查委員意見	回覆及辦理情形
游繁結 委員	
1. 混凝土有其一定比例之水、沙、石、水泥等比例與粒徑極限，而土石流則包含大、小不同之粒徑，且粒徑小至“ μ ”等級，大至“m”等級，如何界定其流變參數？本報告已有一定進展，應予肯定。	感謝委員建議，過往流變實驗之試驗材料選用高嶺土或水庫淤泥，此兩種材料粒徑皆屬於較小且具有凝聚性之泥沙顆粒；而現地河道之泥沙分布廣，故為了執行流變實驗，需選取粒徑較小之材料，以取得具「流變特性(賓漢流體)」之漿體。因此，本研究分別以過#100 號篩、過#200 號篩及過#300 號篩之現地泥沙，以不同濃度比例之漿體，嘗試進行現地沙流變試驗。
2. 泥沙漿體之物理性質是否需予以定義？	感謝委員建議，本研究之流變試驗，主要以不同「體積濃度」之漿體進行。在前期試驗時，需確認特定濃度之漿體，是否充分混和，而未出現「水沙分離」之情形，試驗中，則由流變儀測得之數據，判斷該漿體是否符合賓漢流體特性。
吳嘉俊 委員	
1. 坍流試驗桶所採用的土沙料源、含水量及土沙分布宜補充說明。	感謝委員建議，本案之土沙料源及體積濃度分別為水庫淤泥(27.5%至 37.5%)及現地沙(30%至 50%)，相關內容可參考 3.4 節說明。
2. 以坍流試驗求得土沙流變參數的作法，是否可反映期初報告 P.3-4 的六大類流變，宜再釐清。	本研究將土石流漿體視為單相流體，以現地沙配置不同濃度之漿體進行流變試驗，參考前人之定義，此流變形式可歸類為黏塑性模式

審查委員意見	回覆及辦理情形
	(Visco-Plastic model)。
3. 建議將坍流試驗的試驗成果與 DV-III 型水平旋轉式流變計及 RV6 圓盤式轉子的測定結果相互比較，並加以分析及論述。	感謝委員建議，本試驗即將流變儀測得之漿體流變特性，及該濃度配置下，由坍落筒所得之坍流及坍落度進行比較，初步分析如 4.4 節說明。
陳振宇 委員	
1. 本計畫擬使用坍流實驗來求得土石流的流變參數，極有價值，惟其操作過程、步驟由現地取樣開始至各階段之作法，請予 SOP 化，俾能具有可操作性。	感謝委員建議，本案泥沙粒徑採樣、流變及坍流試驗之詳細流程可參 3.1.1 節 3.2.3 節及 3.3.4 節說明。
周祖明 委員	
1. 如何取得與現地相似的漿體顆粒組成(尤其大石)，來去做試驗，又大石之形狀特性等每處均不相同。	感謝委員建議，不同集水區之泥沙組成不同，故本研究選取三個土石流集水區進行試驗，比較彼此粒徑組成與流變參數關係。而由前人之研究可瞭解，細粒料之含量多寡相較粗顆粒之含量，對於流變行為之影響較大，故本研究首先由各樣區細粒料組成漿體，比較彼此間之流變參數關係。
2. 實驗室試體是否需參照實地的黏滯度、壓密性等性質。	感謝委員建議，流變試驗之漿體配置主要由體積濃度所定義，由流變計得取黏滯度及屈服應力等資料。
技研小組（施佩昱）	
1. 泥沙流變試驗分析是於災害過後取樣，如何比較災害當下的差異？	感謝委員建議，河道土沙料源源自集水區崩塌之材料，在災害後，經歷不同水文事件，河道之組成可能

審查委員意見	回覆及辦理情形
	略有不同，本案比較不同期河道樣坑粒徑組成，發現此三個集水區之粒徑分布大致上未有顯著變異，相關說明可參 4.1 節說明。
2. 請以表格方式提供採樣區域的坐標位置。	感謝委員建議，本案已增列採樣點位坐標資料於表 4.1 說明。
3. 環境概況建議將研究區域的地質概況納入參考。	感謝委員建議，本案已增加研究區域地質與土壤分布概述於 1.2 節。
4. P.3-2 內社溪集水區含 2022 年 4 月的河床質採樣資料，請確認年份。	感謝委員建議，本案已修正。
5. P.3-4 第二段錯字請修正，"期間"。	感謝委員建議，本案已修正相關說明。

附錄二

期中審查會議委員意見回覆及辦理情形

由坍流試驗進行現地量測土石流流變參數之研究

期中審查會議委員意見回覆及辦理情形

審查委員意見	回覆及辦理情形
游繁結 委員	
1. P.2-5，塑性混凝土(40~90)一詞重複出現。	感謝委員的指正，本案已修正相關內容。
2. P3-10 文謂試驗材料之泥砂採取粒徑小於 1.0mm 之細砂，但圖 3.1 該等土砂粒徑只佔土樣之 20%以下，是否能代表土石流流動支配之主要材料？	感謝委員建議，本研究由過往土石流發生紀錄了解，研究河道土石流之型態接近於泥流至一般型土石流，因此本研究以研究河道細粒料作為流變試驗材料。
3. 所採實驗土砂之塑性限度、液性限度各為多少？是否有所掌握，以釐清試料之物性？	本研究使用之水庫淤泥、角埔溪及愛玉子溪土沙之塑性限度分別約為 17、24 及 23，液性限度分別約為 20、27 及 28。
4. 表 3.3 是何意？	感謝委員的意見，以針對此表進行修訂，此表要表達後續流變試驗與坍流試驗泥沙漿體材料之粒徑與體積濃度。
林仕修 委員	
1. 實務上土石流之粒石顆粒從巨石到細粒及泥質土壤分布非常廣，其流動行為也與其粒徑分布有很大的關係，因此如只取溪床的部分細粒料所做的坍流試驗恐難代表實際溪床的相關流動參數。	感謝委員建議，土石流是固體和液體混合的兩(多)相體，而當把土石流體簡化為單相流體時，則以流變模式來描述土石流體的流動特性，其所表達之土石流流動以漿體推動或乘載礫石往下游移動，然而土石流之流動行為與其組成有重要關聯，而根據細粒料之組成不同可將土石流區分為泥流型、一般型與礫石型土石流，本研究以賓漢流變

審查委員意見	回覆及辦理情形
	特性描述土石流流動，其流變參數適合用於細粒料含量較多之流態（泥流型及一般型土石流）。
陳振宇 委員	
1. P3-1 內社溪河床質採樣日期於期初報告時即出現 2022 年 4 月的日期，不甚合理，此處又再出現，請確認是否無誤。	感謝委員意見，於期初報告中蒐集之採樣時間誤植為 2021 年 4 月，而本團隊今年度 2022 年 4 月亦前往進行泥沙採樣之作業，因此造成資料混淆之誤會。
2. P3-16 使用體積濃度 45%以下之試驗，其形態似較偏向高含砂水流，而非土石流，是否適宜，請確認。(洪水<20%，高含砂水流：20—47%，土石流 47-55%)	感謝委員意見，土石流之體積濃度與其組成相關，一般來說，土石流之體積濃度約在 28%，本研究調配水庫淤泥漿體之最低體積濃度為 25%，以現地沙調配漿體之最低濃度為 40%，該濃度皆以水沙可充分混合為基準。
3. P4-2 表 4.1 取樣位置是否確認為土石流沖積扇處，或是土石流堆積區？是否僅為一般的洪水堆積區？是否具有代表性？	感謝委員建議，由於研究河道土石流發生時間距今已長，土石流沖積扇已於期間內經數場事件沖刷，因此本研究透過現地河床質調查以瞭解多年期河道粒徑組成變化，是故採樣點位選定與鄰近前人採樣點為主。
技研小組（蔡宗賢）	
1. 河床質採樣將做為後續坍流度試驗之材料，故其代表性相當重要，應以集水區內發生崩塌及土石流流動區域內土砂進行採樣較宜，如以過往位置之河床質採樣進行分析，是否有釐清當初採樣之選取原則？是否是前述原因造成 P.3-15	感謝委員建議，由於研究河道發生土石流至今，已經過數年多場高流量事件，現地泥沙組成已與土石流發生時不盡相同，本研究透過現地河床質調查以瞭解多年期河道粒徑組成變化，是故採樣點位選定與鄰近前人採樣點為主。經試驗後本

審查委員意見	回覆及辦理情形
所述，現地採樣結果較難調配出具備「漿體」特性之混合試體？	研究建議現地沙「漿體」之調配濃度約為 40 至 50%。
2. 本計畫進行現地河床質採樣，提到現地土砂以大顆粒為主，而探討流變參數時，卻採用#100、#200 及#300 號篩網進行分類，選取細粒料進行漿體配置，如此是否將現地情形視為泥流型土石流之賓漢流體，如此與現場土石流型態是否一致？	感謝委員建議，由於研究河道發生土石流至今，已經過數年多場高流量事件，現地泥沙組成已與土石流發生時不盡相同，惟透過過往土石流發生紀錄可了解研究河道過往土石流之型態接近於泥流至一般型土石流，故本研究採集該河道泥沙施作現地沙流變試驗，嘗試推估該集水區土石流之流變參數。
3. 本案進行坍流度試驗時，似捨棄現地採集之大部分土砂，而採較細顆粒之土砂進行，雖可反應出細顆粒土砂於土石流發生時流變參數群(黏滯係數及屈服應力)，但對於其他類型土石流參數將如何取得？是否表示目前試驗仍有侷限？另，目前試驗成果顯示體積濃度大於 45%，黏滯係數已成負值，不具備賓漢流體之特性，是否代表土石流為賓漢型流體之體積濃度分界點即為 45%，有無文獻可佐證。	感謝委員意見，土石流是固體和液體混合的兩(多)相體，而當把土石流體簡化為單相流體時，則以流變模式來描述土石流體的流動特性，其所表達之土石流流動以漿體推動或乘載礫石往下游移動，而於前人的研究顯示，細粒徑含量對於流變參數之影響較粗粒料顯著，是故本研究首先以現地細粒料配置漿體以瞭解流變參數。本案於期中報告後重新率定儀器以克服高濃度漿體於流變試驗中，轉針不穩定的情形，初步建議適用於本儀器之漿體濃度上限為 50%。

附錄三

期末審查會議委員意見回覆及辦理情形

由坍流試驗進行現地量測土石流流變參數之研究

期末審查會議委員意見回覆及辦理情形

審查委員意見	回覆及辦理情形
1. 現地土壤取樣的粒徑組成不同時，其坍落度或坍流度的主要控制參數為何？是細料比，或粗料或含水量？	感謝委員的意見，細粒料組成多寡對於漿體之坍流參數影響最大，原因為其為影響賓漢流變特性之主要因子。
2. 成果具創新性，惟現地的顆粒組成較為複雜，後續如何在現場施作坍度？不同位置是否會有很大的差異？	感謝委員建議，集水區不同位置之顆粒組成不同且複雜，本研究試驗主要針對泥流型及一般型土石流組成進行探討，故應用上建議細顆粒含量要到達一定比例組成較佳，以推估坍流參數與流變參數之關聯性。
3. 實驗的控制變數與現實可能存在差異，但一定模型的應用應可強化成果之應用性。	感謝委員建議，本研究初步規劃未來以模型試驗探討流變參數與坍流參數的關聯，進一步增加兩者之適用範圍。
4. 簡化現地試驗，有助於廣範未來應用。	感謝委員的意見。
5. 本計畫之目標實務性很好，但現地條件與實驗室的理想條件不同，建議針對其應用可能會遇到的困難提出建議。	感謝委員建議，在現地應用上容易遇到的困難為土石流漿體的細粒料含量及濃度之決定，由於較不易取得土石流發生當下之數值，故建議在使用上可以不同濃度之漿體，獲得一定區間範圍的流變參數，作為後續數值模擬之參考。
6. P.2-5 研究結果顯示(錯誤!找不到參照來源)，請修正。	感謝委員的指正，本案已修正相關內容。
7. 本研究藉由坍流度來找出土石流	感謝委員建議，集水區上下游之粒

審查委員意見	回覆及辦理情形
流變參數係屬合理，但一場土石流發生，因河道上游多為粗顆粒，下游多為細顆粒，土石流體積濃度會依照流動過程而改變，如何定義出該場土石流的流變參數，是否流變參數以一範圍作描述較為合宜。	徑組成確實不同，在土石流運動發生時流變參數亦會隨之調整，本研究主要以賓漢流變關係描述泥流型及一般型之土石流流動，此流動發生時流變關係受細粒料組成所主導，是故在此區間可透過流變參數與坍流參數之關聯，推估土石流流變參數。