計畫編號：SWCB-106-041

衛星雷達影像產製數值地形應用於土砂生產分析之可行性評估
Evaluation on the feasibility of InSAR derived DEM on sediment yielding estimation
成果報告書

執 行 單 位：長榮大學土地管理與開發學系

執 行 期 間：106 年 2 月 20 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：曾志民 副教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 106 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）

衛星雷達影像產製數值地形應用於土砂生產分析之可行性評估

摘要

本計畫利用上升與下降軌道之衛星雷達影像，融合產製數值高程模型。依據融合地形產製成果顯示，單一軌道造成之幾何畸變已有明顯改善。依據 25 處崩塌地土砂生產量誤差分析成果顯示，約有 6 成崩塌地誤差百分率小於 50%，部分誤差百分率較大之崩塌地多數位於朝東之坡向(東、東北、東南)或坡度較大之坡面。後續在地形融合產製過程除升降軌道參數外，亦可考量加入坡度與坡向特徵因子，以精進地形產製成果。

關鍵字：雷達影像、融合、數值地形模型、崩塌、土砂

Evaluation on the feasibility of InSAR derived DEM on sediment yielding estimation

Abstract

Ascending track and descending track SAR images are utilized in this study to generate digital terrain model. Results show that the image geometric distortion due to single track effect has been significantly improved through fusion processes. The landslides volume obtained from SAR generated DTM were verified by those calculated by LiDAR data in 25 selected landslides. More than 60% of the landslides volume error are less than 50%, an acceptable error level. Landslides with larger volume error mainly concentrated in those landslides located in eastern (E, SE, NE) aspect or steep gradient hillslope. Therefore, it's suggested that except track parameters, aspect and slope gradient can be considered as weighing factors as well in the fusion processing to further improve DTM quality.

Keywords：SAR, Fusion, DTM, Landslide, Sediment

目次

摘要 ..... **I**

Abstract ..... **III**

目次 ..... **V**

表次 ..... **VII**

圖次 ..... **IX**

第一章　緒論 **1-1**

第一節　計畫背景 1-1

第二節　計畫目標 1-3

第三節　研究區域概述 1-4

第二章　工作執行方法與步驟 **2-1**

第一節　工作執行方法 2-1

第二節　工作執行步驟 2-7

第三章　工作進度與交付項目 **3-1**

第一節　計畫甘特圖 3-1

第二節　計畫成果說明 3-2

第四章　結論及建議 **4-1**

第一節　結論 4-1

第二節　建議 4-1

參考文獻 **參-1**

表次

表 1-1　曾文水庫集水區之高程分布統計 1-5

表 1-2　曾文水庫集水區各坡面分級面積統計 1-6

表 1-3　曾文水庫集水區各雨量站暴雨事件雨量統計表 1-9

表 3-1　TSX/TDX 之影像參數 3-5

表 3-2　25 處崩塌地基本資料及崩塌生產量誤差分析成果 3-16

圖次

圖 1-1　曾文水庫集水區之高程分布圖 1-4

圖 1-2　曾文水庫集水區之坡面分布圖 1-5

圖 1-3　曾文水庫集水區地質分布圖 1-7

圖 1-4　曾文水庫集水區水系分布圖 1-8

圖 1-5　曾文水庫集水區之雨量測站分布圖 1-9

圖 1-6　曾文水庫集水區土石流潛勢溪流分布圖 1-10

圖 1-7　曾文溪主流里佳壩以上主流河道縱斷面比對 1-12

圖 1-8　曾文溪主流新山美大橋至里佳壩主流河道縱斷面比對 1-12

圖 1-9　曾文溪主流亞米亞娜橋至新山美大橋主流河道縱斷面比對 . 1-13

圖 1-10　曾文溪主流大埔壩至亞米亞娜橋主流河道縱斷面比對 1-13

圖 2-1　TERRASAR-X/TANDEM-X 衛星系統成像原理 2-2

圖 2-2　升降軌數值高程模型融合流程圖 2-5

圖 2-3　工作流程圖 2-7

圖 3-1　計畫甘特圖 3-1

圖 3-2　升軌(紅框)和降軌(綠框)影像覆蓋區域 3-5

圖 3-3　單軌 TSX/TDX 資料產製之 DEM (A)升軌；(B)降軌 3-6

圖 3-4　升降軌融合後之數值高程模型成果(空間解析度約 4M) 3-7

圖 3-5　研究區域之高程區間分布 3-8

圖 3-6　研究區域之坡度區間分布 3-8

圖 3-7　研究區域之坡向區間分布 3-9

圖 3-8　研究區域之植生高度分布 3-9

圖 3-9　融合後 4M 解析度數值高程模型空洞網格之高程區間分布 .. 3-10

圖 3-10　融合後 4M 解析度數值高程模型空洞網格之坡度區間分布 3-10

圖 3-11　融合後 4M 解析度數值高程模型空洞網格之坡向區間分布 3-11

圖 3-12　融合後 4M 解析度數值高程模型空洞網格之植生高度分布 3-11
圖 3-13　以較高解析度 DEM 去除干涉相位之產製成果 (解析度約 2 公尺) 3-12
圖 3-14　融合後 2M 解析度數值高程模型空洞網格之高程區間分布 3-13
圖 3-15　融合後 2M 解析度數值高程模型空洞網格之坡度區間分布 3-13
圖 3-16　融合後 2M 解析度數值高程模型空洞網格之坡向區間分布 3-14
圖 3-17　融合後 2M 解析度數值高程模型空洞網格之植生高度分布 3-14
圖 3-18　25 處示範崩塌地之分布位置 3-15

第一章　緒論

第一節　計畫背景

目前有關集水區之崩塌土方生產量估算，多僅於少數交通可及之重點地區進行多期地形測量以估算土砂生產量，其餘廣域地區仍以坡度與崩塌厚度經驗關係式，或崩塌面積與崩塌厚度之經驗關係式等方式概估整個崩塌地之平均崩塌厚度，再乘上影像判釋獲得之崩塌面積，最後得到崩塌生產土方體積。上述方法估算之土砂生產量體往往有數倍甚至十數倍之偏差，因此目前既有集水區土砂運移評估分析工作，在上游端之土砂生產量體分析即具有高度偏差，也連帶影響後續擬定相關治理對策之妥適性。近年航遙測技術發展快速，多元尺度數值地形例如 LiDAR、航空照片與無人載具 UAV 產製數值地形日益成熟，結合這些多期多元尺度數值地形比對分析即可有效定量分析集水區尺度之崩塌地土砂生產量、殘留量，與河道土砂沖淤及運移量體資訊。目前此種作業方式已應用於水保局多件委辦計畫，例如 104 年「高屏溪及林邊溪集水區土砂收支管理模式建置」、105 年「濁水溪集水區土砂收支管理模式建置」及台東分局 105 年「太麻里溪及金崙溪集水區土砂控制測量與監測計畫」。上述作業方式雖已獲致良好成效，惟作業空間範圍及時間頻率仍有討論精進空間，例如透過農林航測所之航空照片雖可廣域產製高精度數值地表模型，但航拍頻率在平地約可達每年一次，但山區因地形與天候限制僅能達 2~3 年一次，部分區域甚至時距更長；無人載具 UAV 航拍雖可克服時間頻率問題，但對於大面積航拍作業同樣受限於天候問題而影響作業效率。因此，除了航空照片及無人載具航拍作為產製數值地形來源外，應可思考不

同飛航載具來源產製數值地形，進而應用於土砂變異分析之可行性，例如衛星雷達影像。衛星雷達影像之成像原理，為雷達側視系統所發射之電磁波脈衝(electromagneticpulses)至地面後，藉由反射回波訊號的先後順序與強，記錄目標物至感測器的斜距(slantrange)，進而獲取衛星雷達影像資料。衛星雷達係採用主動式的微波遙感探測，可以不依賴於陽光照射，穿透雲霧、雨雪，可全天時作業。惟雷達入射方向的觀測角度與雷達回波的強弱有關，在地形起伏劇烈處，容易受地形起伏影響，產生觀測幾何變形，甚至造成地形遮蔽效應，與真實地表狀況有所出入。若僅選定單一入射角之衛星雷達影像，在山勢起伏較大的山區，勢必受到地形遮蔽而無法成像，導致部分解算資料的缺失。綜合上述，本計畫與大陸中南大學地球科學與信息物理學院特聘教授胡俊博士合作，利用上升與下降軌道之衛星雷達影像，分別產製數值高程模型，進而結合升軌與降軌參數融合產製單期數值高程模型，有助於克服因地形造成的遮蔽效應。產製地形成果並以 LiDAR 光達地形加以檢核，分析探討地形坡度、坡向及植被對升降軌融合地形精度之影響，作為衛星雷達影像產製地形應用於土砂變異分析可行性之參考。

第二節　計畫目標

一、利用升軌與降軌衛星雷達影像，經由融合程序產製研究區域之數值高程模型，以消除單一軌道造成之幾何畸變問題。

二、以高精度光達地形資料檢核衛星雷達影像產製之數值地形，以了解地形坡度、坡向及植被特性的影響程度。

三、綜合評估衛星雷達影像產製數值地形應用在土砂生產量評估之可行性與限制條件。

第三節　研究區域概述

本計畫研究區域為曾文水庫上游集水區，以下針對研究區域之自然環境特性說明如下：

一、地形與地質

(一) 地形

曾文水庫集水區主要以山坡地及林班地利用為主，平原地區以庫區鄰近區域為主，平均高程約為 963 公尺，源頭標高在 2,600 公尺以上(圖 1-1 及表 1-1)。集水區地勢由東北往西南方向逐漸降低，平均坡度約為 54.4%。坡面級序多屬四級坡以上，其中六級坡所佔的比例最高，約達 41.2% (圖 1-2 及表 1-2)。曾文溪主流平均坡降為 1.5%，河源附近達 33.3%。

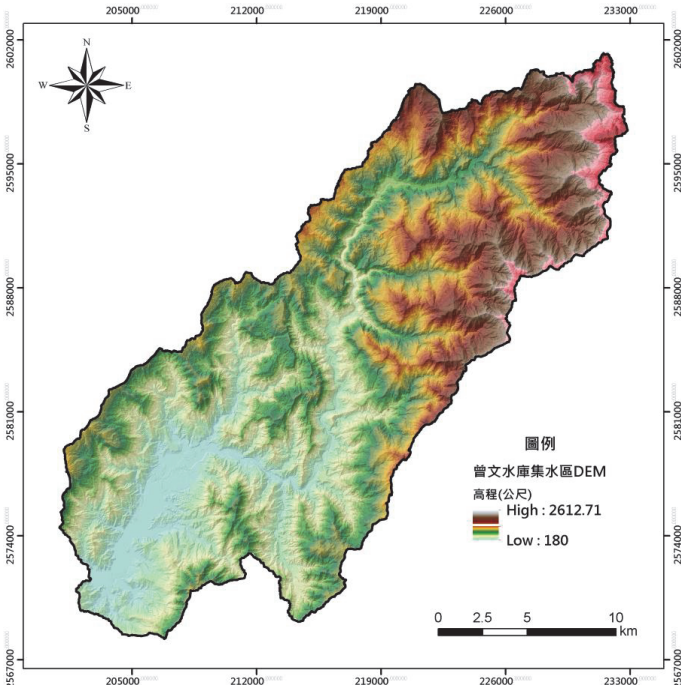


圖 1-1　曾文水庫集水區之高程分布圖

表 1-1 曾文水庫集水區之高程分布統計

高程區間(公尺)	面積(平方公里)	面積百分比(%)
180 - 475	101.70	20.8
475 - 750	102.87	21
750 - 1000	87.98	18
1000 - 1250	65.08	13.3
1250 - 1500	47.67	9.8
1500 - 1750	32.77	6.7
1750 - 2000	24.96	5.1
2000 - 2300	20.73	4.2
2300 以上	5.36	1.1
總 和	**489.12**	**100**

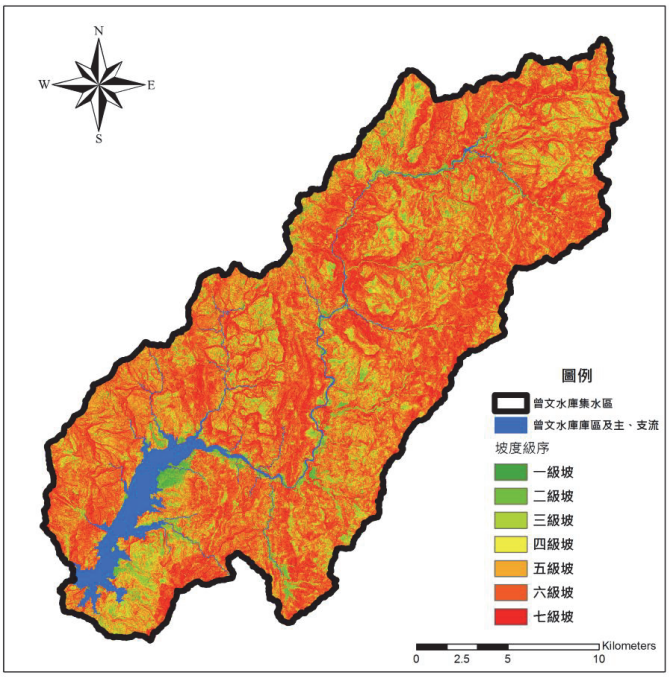


圖 1-2 曾文水庫集水區之坡面分布圖

表 1-2 曾文水庫集水區各坡面分級面積統計

坡度分級	坡度範圍	面積(平方公里)	面積百分比(%)
一級坡	S≦5%	18.34	3.7
二級坡	5%<S≦15%	23.97	5.0
三級坡	15%<S≦30%	46.74	9.6
四級坡	30%<S≦40%	40.83	8.3
五級坡	40%<S≦55%	73.97	15.1
六級坡	55%<S≦100%	201.42	41.2
七級坡	S>100%(大於 45 度)	83.85	17.1
總 和		**489.12**	**100.0**

(二) 地質

曾文水庫集水區地質分布如圖 1-3 所示，主要位於新第三紀沉積岩所組成之西部麓山帶地質區，主要地層位於集水區中上游有中新世的南莊層及其相當地層與中新世至上新世的桂竹林層及其相當地層。位於下游水庫庫區附近為上新世至更新世的卓蘭層、錦水頁岩及其相當地層，另有更新世至全新世的階地堆積，多分布於丘陵與平原的交界一帶以及主要河谷的兩側。區內之地質構造以褶皺為主，且地質構造大多呈北北東—南南西走向。曾文水庫集水區地質分布以南莊層與桂竹林層及其相當地層。桂竹林層以暗灰色頁岩及砂、頁岩互層為主，局部夾有泥質砂岩。南莊層為淡青灰色砂岩、砂岩與頁岩互層、及深灰色頁岩等。水庫庫區附近以卓蘭層、錦水頁岩及相當地層為主，主要為頁岩、砂質頁岩夾泥質砂岩的互層與石灰岩組成。

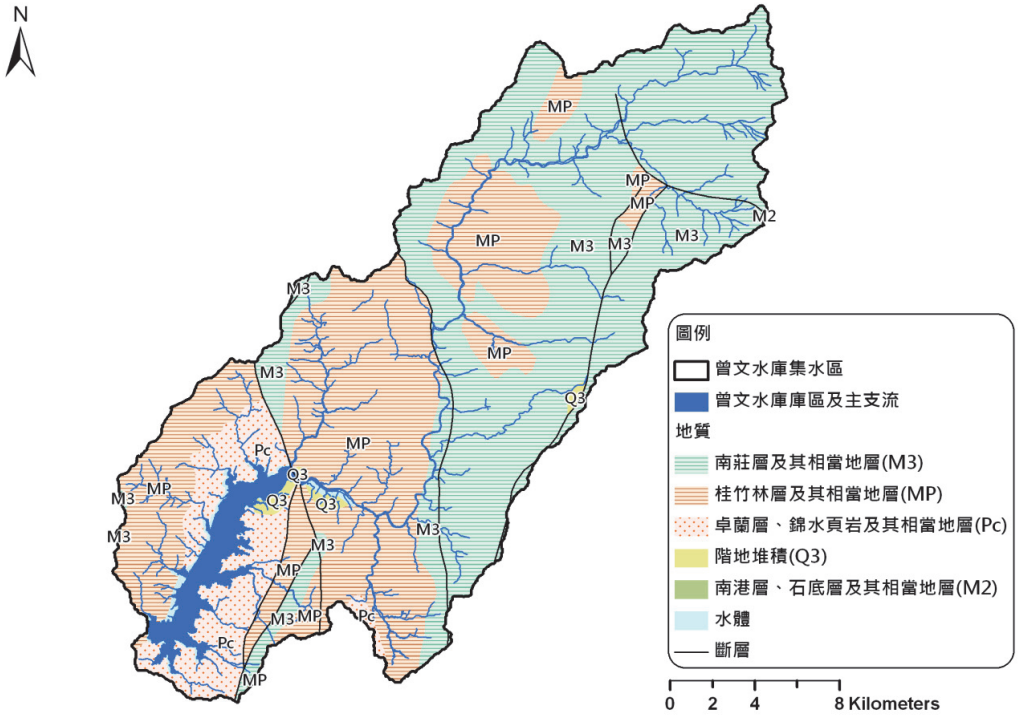


圖 1-3 曾文水庫集水區地質分布圖

二、氣象與水文

(一)水系

曾文水庫集水區水系以曾文溪為主流，貫穿集水區中央，重要支流包括長谷川溪、伊斯基安那溪、達德安溪、沙力基溪及草蘭溪等，主支流水系分布如圖 1-4 所示，曾文溪主流長度約 56.2 公里，主支流總長 213.1 公里。

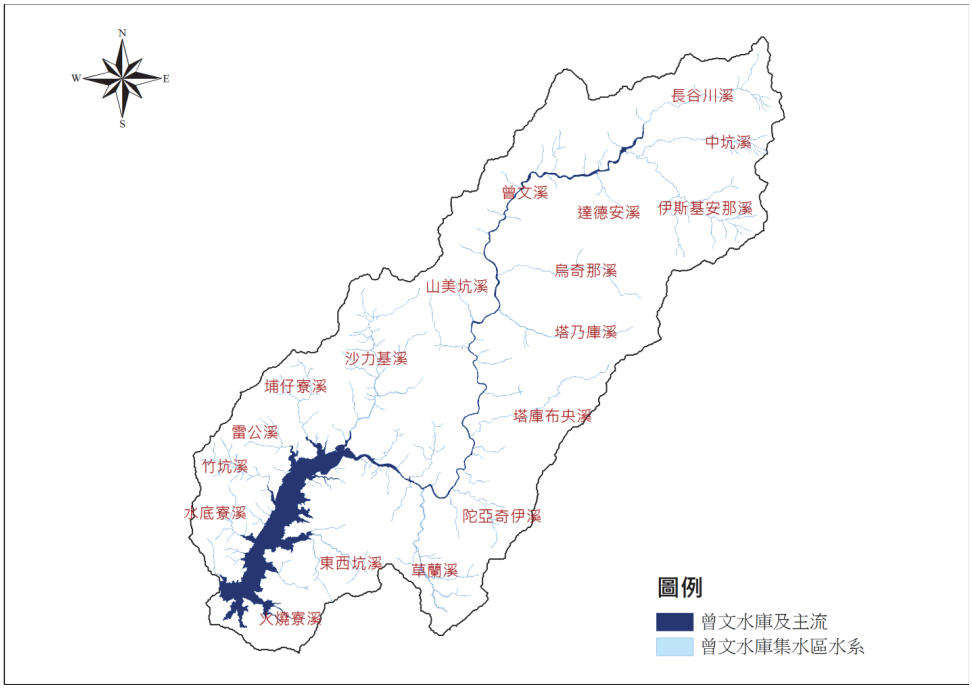


圖 1-4　曾文水庫集水區水系分布圖

(二)雨量

曾文水庫集水區內計有曾文、馬頭山、里佳、水山、樂野、表湖、大棟山、龍美、三角南山等 9 處南水局設置之雨量測報站，以及集水區鄰近由中央氣象局設置之阿里山、奮起湖、瀨頭、小公田、馬頭山、大棟山、曾文、草嶺、表湖及民生等 10 處雨量測站，各測站之相關位置如圖 1-5 所示。曾文水庫集水區歷年平均年雨量約 3,000 毫米，另外表 1-3 列出民國 94～103 年主要颱風暴雨事件的雨量統計資料，其中 98 年莫拉克颱風為歷年單場降雨量最高之颱風事件，其事件累積降雨量規模已超過重現期距 200 年，造成曾文水庫集水區上游形成大量崩塌及土石流災害，主流河道沖刷導致河寬加寬且淤積大量土石，庫區大量淤積造成庫容大幅減少。

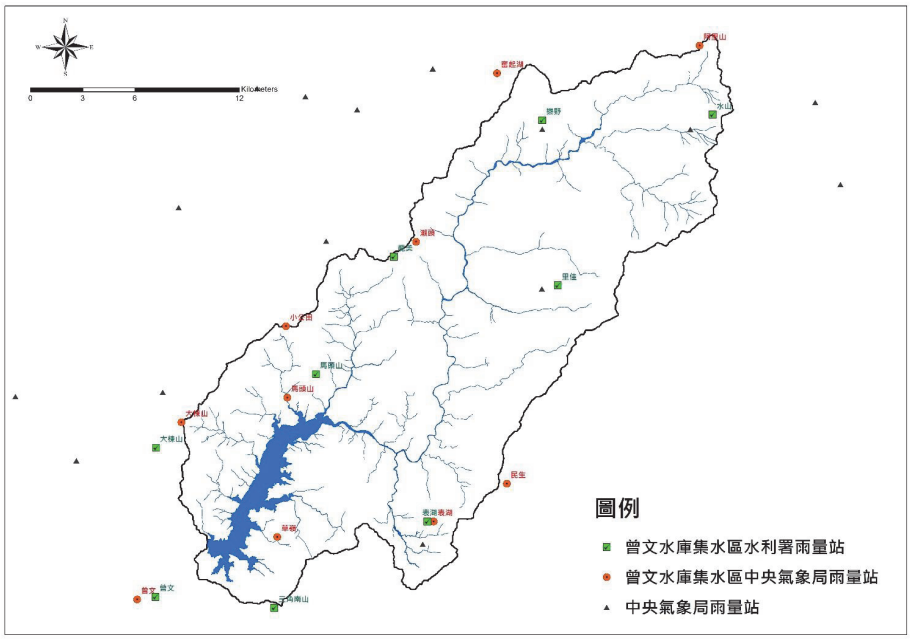


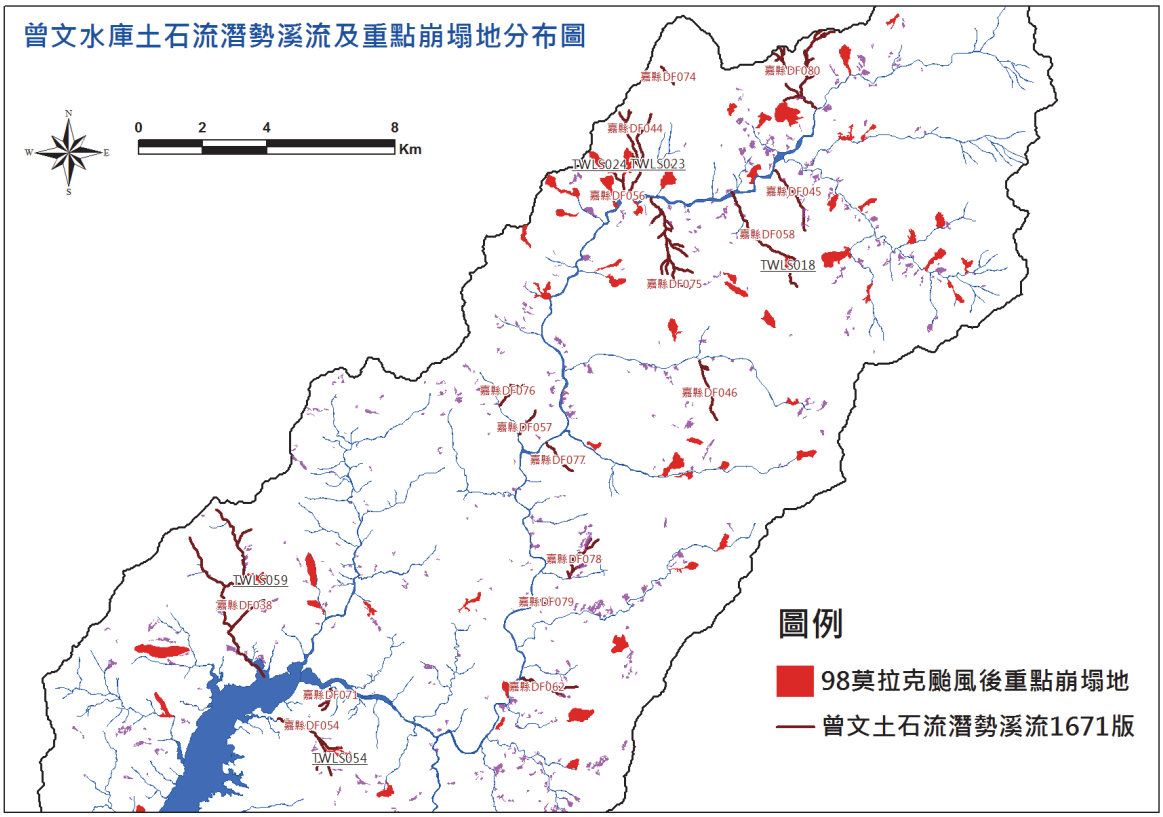
圖 1-5　曾文水庫集水區之雨量測站分布圖

表 1-3　曾文水庫集水區各雨量站暴雨事件雨量統計表

發生日期	暴雨事件	曾文	水山	樂野	里佳	表湖	馬頭山	龍美	三角南山	大棟山
1994/6/14	612 豪雨	411	116	122	132	244	382	257	333	363
1994/7/18	海棠颱風	586	275	284	249	313	412	313	268	387
1994/9/1	泰利颱風	501	232	478	438	345	439	408	282	314
1995/6/9	609 豪雨	272	602	656	653	437	434	530	225	278
1995/7/14	碧利斯颱風	251	228	325	314	292	248	322	238	216
1995/7/25	凱米颱風	140	78	92	162	130	147	124	178	138
1996/8/18	聖帕颱風	231	211	301	316	99	263	308	254	217
1996/10/6	柯羅莎颱風	459	299	604	521	330	425	569	228	340
1997/7/17	卡玫基颱風	924	512	457	562	583	648	531	570	706
1997/7/28	鳳凰颱風	391	339	585	556	329	404	412	370	376
1997/9/12	辛樂克颱風	518	757	997	880	521	650	956	475	447
1997/9/28	薔蜜颱風	518	551	759	615	511	560	564	252	456
1998/8/8	莫拉克颱風	2,047	1,391	2,152	2,631	1,475	1,457	1,619	1,296	1,561
1999/9/19	凡那比颱風	482	124	206	271	239	210	308	153	320
101/06/10	610 豪雨	507	795	696	738	950	625	572	718	509
101/06/20	泰利颱風	312	278	328	477	379	388	437	485	344
101/08/01	蘇拉颱風	439	368	546	449	293	472	442	220	452
102/07/11	蘇力颱風	208	317	513	480	203	244	446	169	207
102/08/20	潭美颱風	317	417	538	583	316	421	478	319	454
102/08/27	康芮颱風	912	360	522	619	631	698	636	760	798
103/07/21	麥德姆颱風	182	346	375	331	210	240	293	217	187

(三)土石流潛勢溪流

依據農委會水土保持局 103 年最新公告 1,671 條土石流潛勢溪流的資料，曾文水庫集水區內共有 17 條土石流潛勢溪流，透過土石流潛勢溪流與崩塌地的分布圖層套疊結果顯示，土石流潛勢溪流之土砂來源與集水區上游崩塌地關聯性極高，圖 1-6 為潛勢溪流分布與莫拉克颱風後崩塌面積大於 5 公頃之重點崩塌地分布圖層套疊成果，圖中顯示潛勢溪流中危險度較高之潛勢溪流，包括嘉縣 DF038、嘉縣 DF054、嘉縣 DF056 及嘉縣 DF058 等 4 條潛勢溪流，上游皆為重點崩塌地。



資料來源：102-103 年度曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測，南區水資源局，2014。

圖 1-6　曾文水庫集水區土石流潛勢溪流分布圖

(四)近年主河道沖淤情形

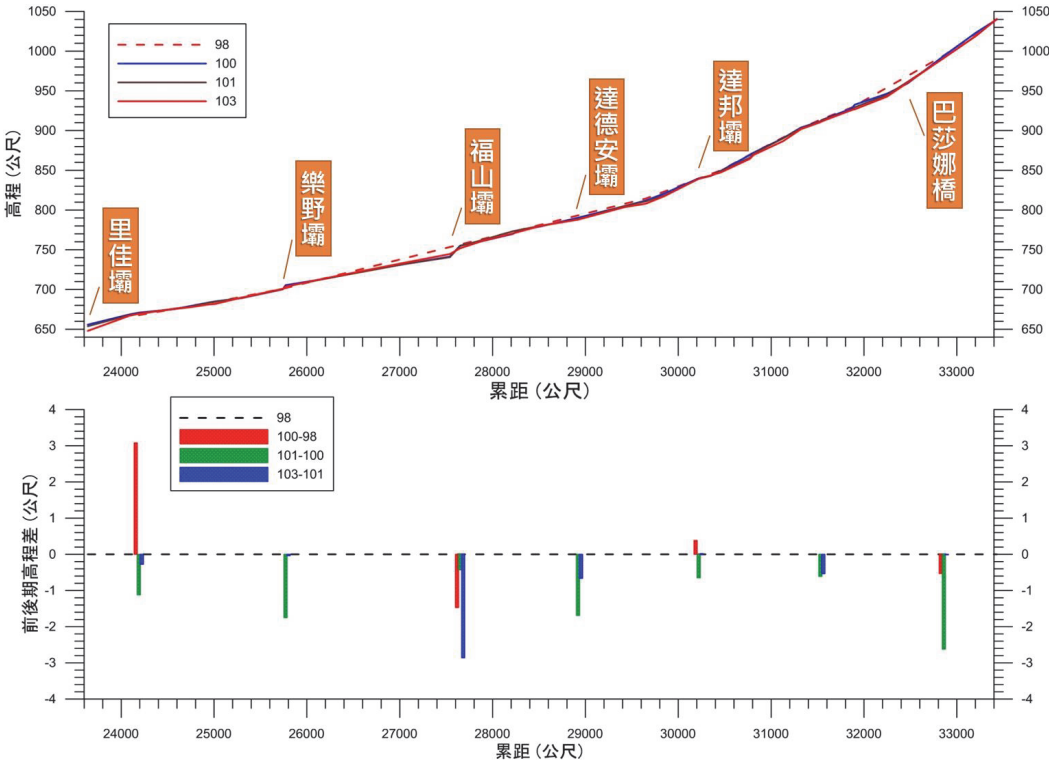
莫拉克颱風造成曾文水庫集水區主流河道產生大量土砂淤積，而後河床淤積隨降雨逕流運移造成沖淤變化，依據 2014 年南區水資源局「102-103 年度曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測」委辦計畫利用 LiDAR 地形資料及 98 年莫拉克颱風後之主流河道縱斷面地形進行比較，以瞭解各河段斷面沖淤趨勢，比對成果如圖 1-7~圖 1-10 所示。曾文溪主河道近年沖淤趨勢依不同區位如下：

(1)里佳壩以上河段：整段河床大致呈現沖刷的趨勢，惟在樂野壩至福山壩的河道，略呈淤積的現象。

(2)新山美大橋至里佳壩：整段河床主要屬於土砂沖刷之河段，其中尤以新山美大橋附近之河道，沖刷較為劇烈。

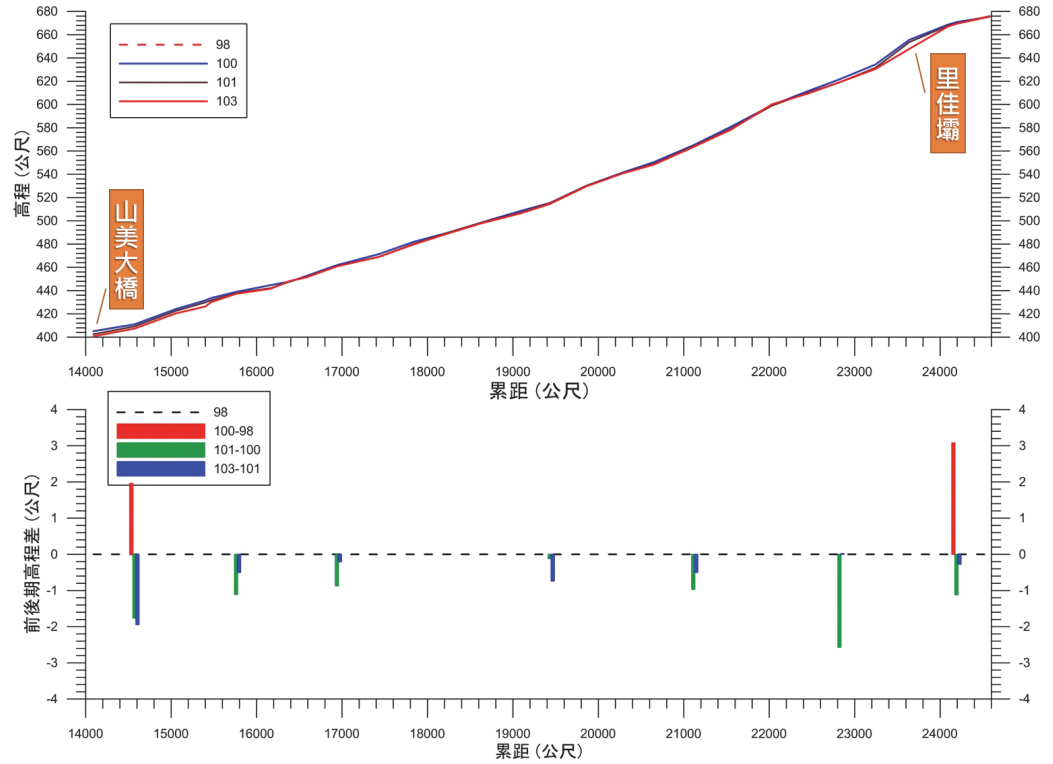
(3)亞米亞娜橋至新山美大橋：整段河床呈現沖淤互現的情況，但以沖刷現象之河段居多，主要以新山美大橋及塔庫布央溪匯流口以下河段較為明顯。

(4)大埔壩至亞米亞娜橋：此河段大致以紫荊橋為界，上游河段呈現沖刷之趨勢而下游河段為淤積現象。



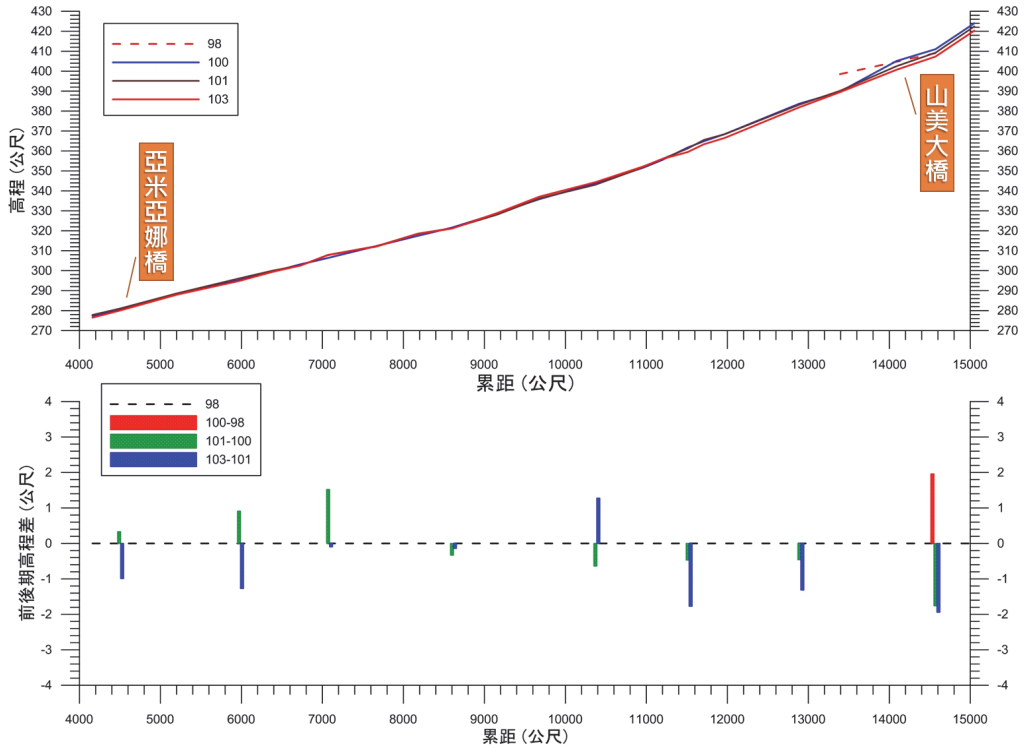
資料來源：102-103 年度曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測，南區水資源局，2014。

圖 1-7　曾文溪主流里佳壩以上主流河道縱斷面比對



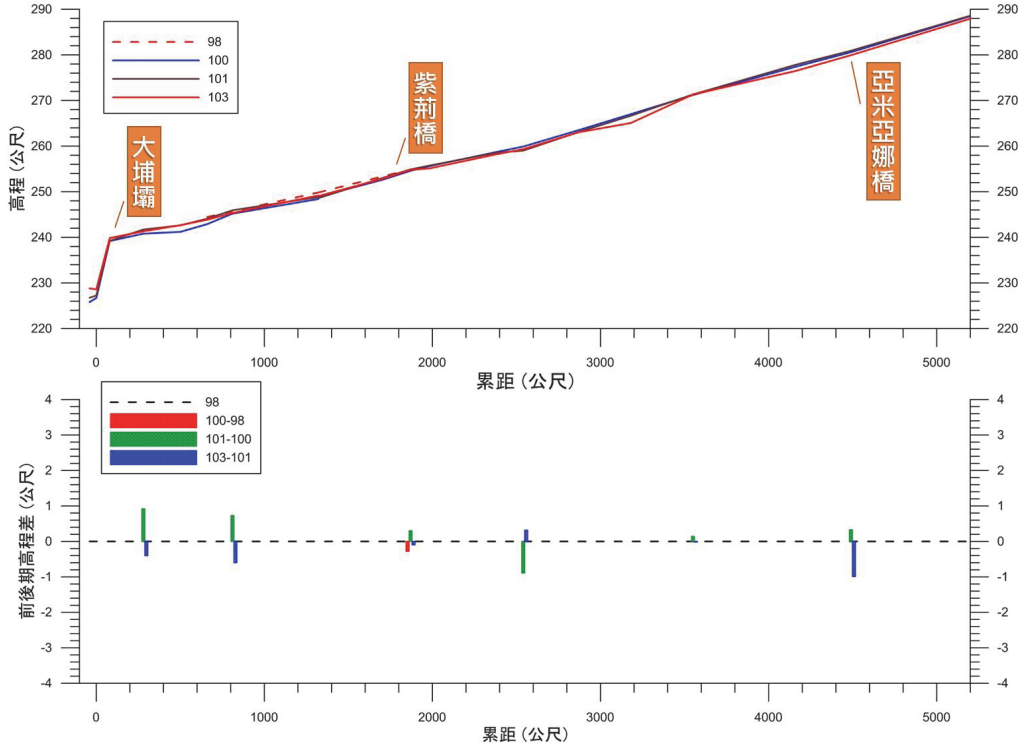
資料來源：102-103 年度曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測，南區水資源局，2014。

圖 1-8　曾文溪主流新山美大橋至里佳壩主流河道縱斷面比對



資料來源：102-103 年度曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測，南區水資源局，2014。

圖 1-9　曾文溪主流亞米亞娜橋至新山美大橋主流河道縱斷面比對



資料來源：102-103 年度曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測，南區水資源局，2014。

圖 1-10　曾文溪主流大埔壩至亞米亞娜橋主流河道縱斷面比對

第二章　工作執行方法與步驟

第一節　工作執行方法

本計畫主要工作項目及採用之研究方法說明如下：

一、基本資料蒐集分析

本計畫以莫拉克颱風後有數期 LiDAR 資料之曾文水庫上游部分子集水區為研究區域，基本資料包含與 LiDAR 產製資料時間相近之雷達衛星影像，考量衛星雷達 L 波段的波長較長(19.3 ~ 76.9 cm)，其植被與地表穿透能力較佳，但地面解析度較差，相較於衛星雷達 X 波段波長較短(2.7 ~ 5.2 cm)，對於植被穿透力較差，但具有較佳的空間解析度。因此本計畫採用 TerraSAR-X 及 TanDEM-X 衛星雷達影像，融合不同視角的 TerraSAR-X/TanDEM-X 干涉對(即升軌和降軌 InSAR 干涉對)，透過不同飛行方式所具有的不同幾何關係和參數，如入射角、垂直基線和高程模糊度等，來對因單一軌道產生的陰影、疊影等區域的地形資訊進行恢復。

TanDEM-X 是德國國家太空中心在 2010 年發射的 SAR 衛星，是 TerraSAR(2007 年發射)的姊妹衛星，採用了 HELIX 衛星運行方式並進行編隊飛行形成一個單軌雙天線系統對地球進行觀測從而得到三維地表數值高程模型。本計畫採用 TSX/TDX 下的一發雙收模式(bistatic)下所獲取的原始數據，該模式下信號由一個衛星發射，兩個衛星同時接收，該模式下的 SAR 干涉對的時間基線幾乎為 0，能夠最大限度地克服大氣、時間去相關和軌道誤差對干涉相位的影響，有利於干涉相位的解譯從而獲取精確的地形資訊。除了衛星雷達影像蒐集外，其他資料蒐集項目包含高程資料及土地利用型態資訊等。

二、結合升降軌雷達影像之數值地形產製

(一)單軌 TerraSAR-X/TanDEM-X 產製數值地形之方法原理

TerraSAR-X/TanDEM-X 衛星雷達系統透過由其中一顆衛星發射信號波，兩顆衛星同時接收回波訊號，透過分析相位差獲得地形訊息。此種 SAR 系統衛星所獲得的 SAR 影像對的時間基線幾乎為 0，能夠最大限度地克服大氣、時間去相關和軌道干涉相位的影響，利用干涉相位的解譯從而獲得精確的地形資訊，圖 2-1 所示為 TerraSAR-X/TanDEM-X 雷達系統的成像原理圖。

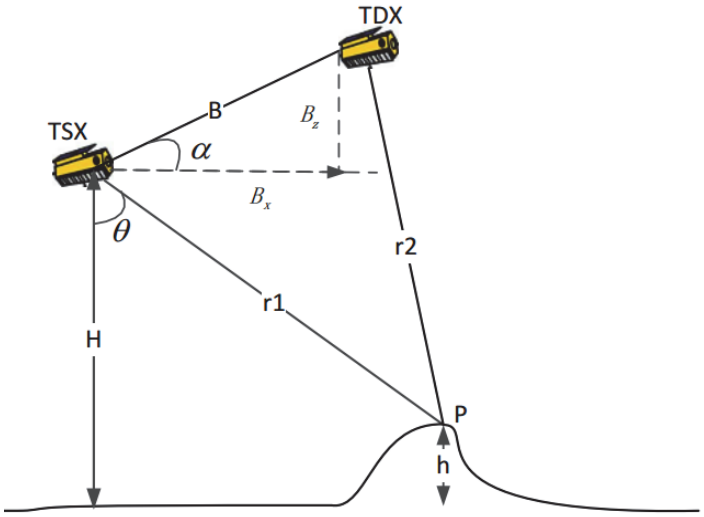


圖 2-1 TerraSAR-X/TanDEM-X 衛星系統成像原理

圖 2-1 中，TerraSAR-X/TanDEM-X 衛星系統對地面某點 P 進行觀測，定義 TSX 為 TerraSAR-X 衛星，TDX 為 TanDEM-X 衛星，P 點高程為 h，衛星到地面高度為 H，主影像入射角 θ，兩顆衛星之間的基線長為 B，B_x 和 B_z 分別為基線長之水平分量和垂直分量，基線 B 與水平方向夾角為 α，r_1 和 r_2 分別為 P 點到感測器之間的距離，則其中的幾何關係可表示為：

$$h = H - r_1 \times \cos\theta \tag{1}$$

$$\phi = \frac{2K\pi}{\lambda}\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) \tag{2}$$

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{B^2 + r_1^2 - r_2^2}{2Br_1} \tag{3}$$

$$h = \frac{\lambda r_1 \phi \sin\theta}{2\pi B \cos(\alpha - \theta)} \tag{4}$$

其中 λ 為波長。單一軌道 InSAR 產製數值高程模型的主要步驟包括：SAR 影像配準、生成干涉圖、基線估計、生成去平干涉圖和相干圖、干涉圖濾波、相位解纏、基線精化、生成 DEM 和地理編碼等程序。

(二)結合升降軌 SAR 數據產製數值地形之方法原理

由於單一軌道（升軌或者降軌）在成像時會有一定的幾何畸變，如陰影、疊影等區域，因而損失這部分區域的高程訊息，而不同軌道具有不同的幾何位置資訊，能夠對單一軌道的結果進行修復，進而獲

得較為完整的數值高程模型。由於 InSAR 測高精度與干涉對的垂直基線有密切的關係，空間基線越長，其測高精度越高；反之，空間基線短的時候其測高精度較低。基於此，本方法將垂直基線、陰影、疊影等因素作為加權因子來進行升降軌數據融合，得到高精度的數值高程模型。

整體產製流程如圖 2-2 所示，分別針對升降軌外部 DEM 進行疊影、陰影區域分析。當坡度角為α時，如果坡度角$\alpha > \theta_{inc}$(入射角)，雷達影像上呈現為疊影，當$\alpha > \theta_{inc}$時，某些區域也受到疊影的影響；當$\alpha < 0$，如果$|\alpha| > \theta_{inc}$，則會在影像上產生陰影，同時，也需考慮當$|\alpha| \le \theta_{inc}$時陰影所影響的區域。其次分別紀錄疊影、陰影區的位置資訊。此處的位置矩陣中僅含有 0、1 兩類元素，即對於升軌而言，受到陰影區域影響的像素位置資訊記為 0，而在降軌時對應像素的位置資訊不受到陰影影響便為 1。將得到的陰影、疊影的位置資訊紀錄為$M_{asc_layover}$、M_{asc_shadow}。然後，計算升降軌干涉對中每個像素上的垂直基線，記錄為B_{asc}。同理，獲得降軌的 DEM 及陰影、疊影的位置資訊$M_{des_layover}$、M_{des_shadow}及垂直基線B_{des}。最後，依據下式將垂直基線、疊影及陰影組成的權重因子針對升軌與降軌分別產製之 TerraSAR-X/TanDEM-X 數值高程模型進行融合獲得單期高精度數值高程模型。

$$H_{fusion} = \frac{B_{asc} \cdot (M_{asc_layover} + M_{asc_shadow})}{B_{asc} + B_{des}} H_{asc} + \frac{B_{des} \cdot (M_{des_layover} + M_{des_shadow})}{B_{asc} + B_{des}} H_{des} \quad (5)$$

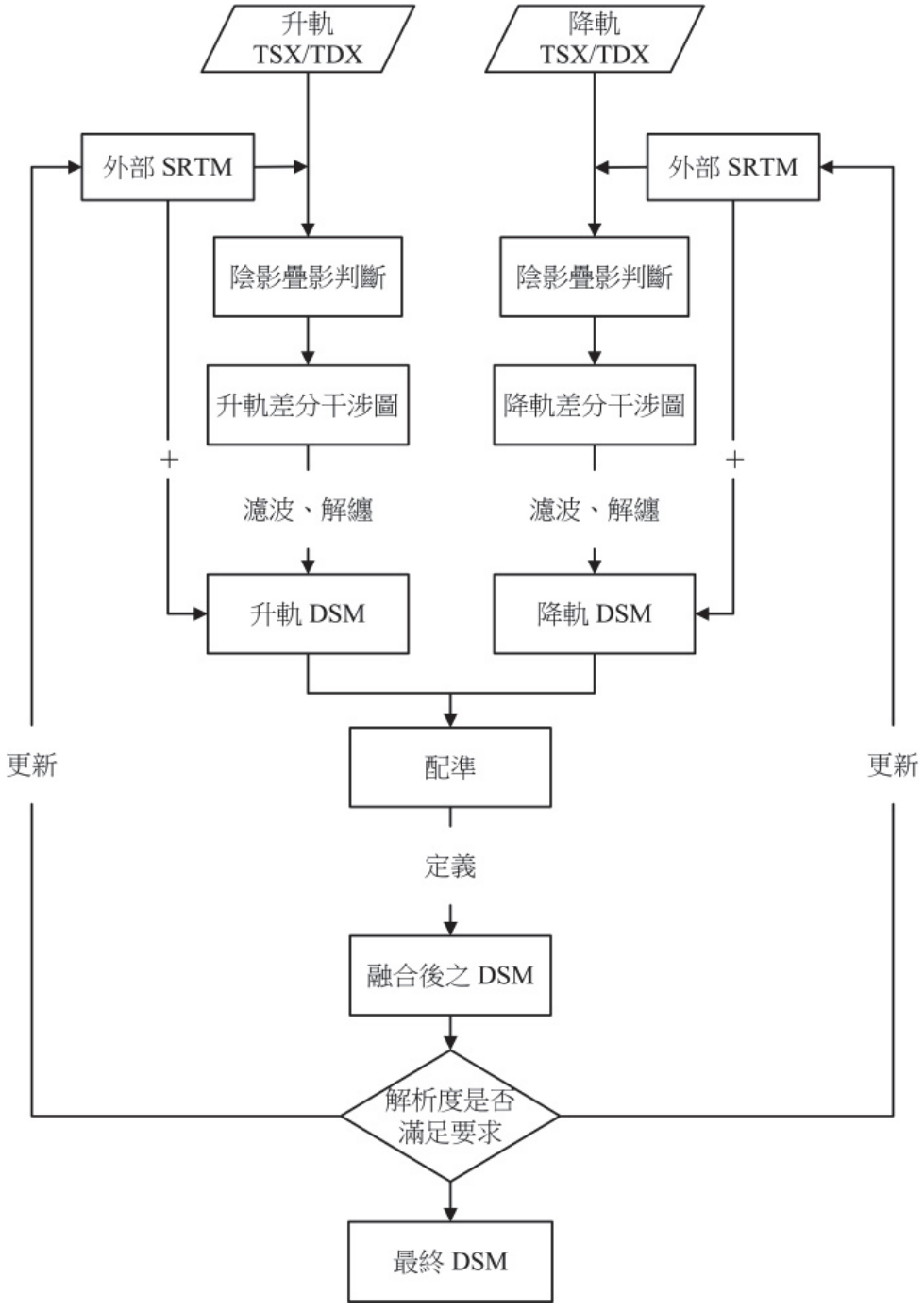


圖 2-2 升降軌數值高程模型融合流程圖

三、數值地形品質評估

針對以升軌與降軌雷達影像融合後產製之數值高程模型，本計畫係以研究區域之 LiDAR 產製 DEM 與 DSM 來檢核衛星雷達影像產製數值高程模型之精度，探討 SAR 影像相干性較差因而導致高程資訊漏失區域之地形坡度、坡向及植被特徵，其中地形坡度及坡向特性可利用 LiDAR DEM 加以分析，植被特徵則可利用 LiDAR DEM 與 DSM 推估樹冠高度模型(canopy height model, CHM)，以了解植被分布密度。

第二節　工作執行步驟

本計畫執行流程如圖 2-3 所示，主要工作項目包含基本資料蒐集分析、結合升降軌雷達影像之數值地形產製及數值地形品質評估等。

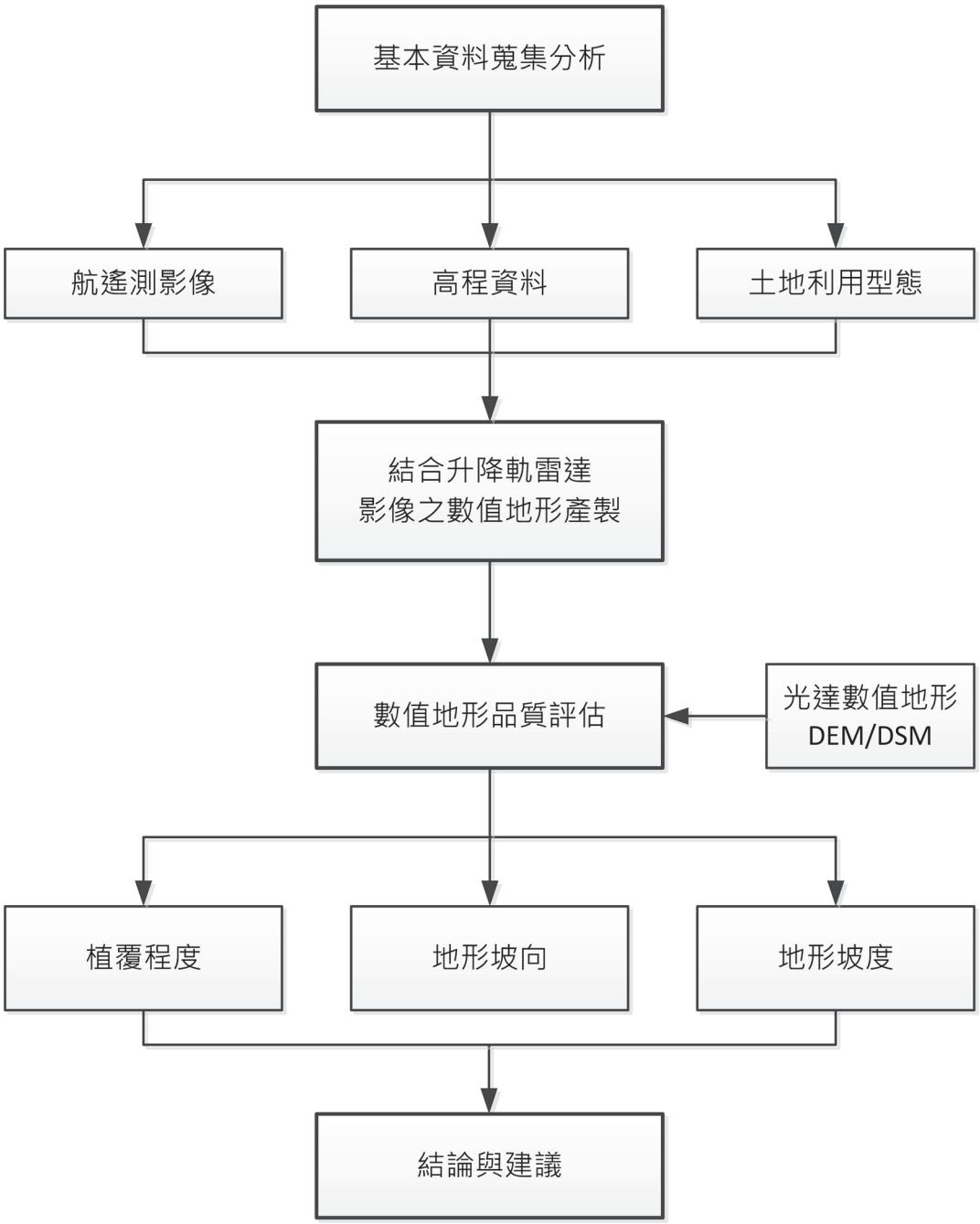


圖 2-3　工作流程圖

第三章　工作進度與交付項目

第一節　計畫甘特圖

本計畫執行甘特圖如圖 3-1 所示，主要工作項目包含基本資料蒐集、單軌數值地形產製、融合數值地形產製及數值地形評估等。計畫執行已完成所有工作項目，包含基本資料蒐集、單軌數值地形產製及融合數值地形產製、數值地形評估及數值地形應用於崩塌土砂生產評估。

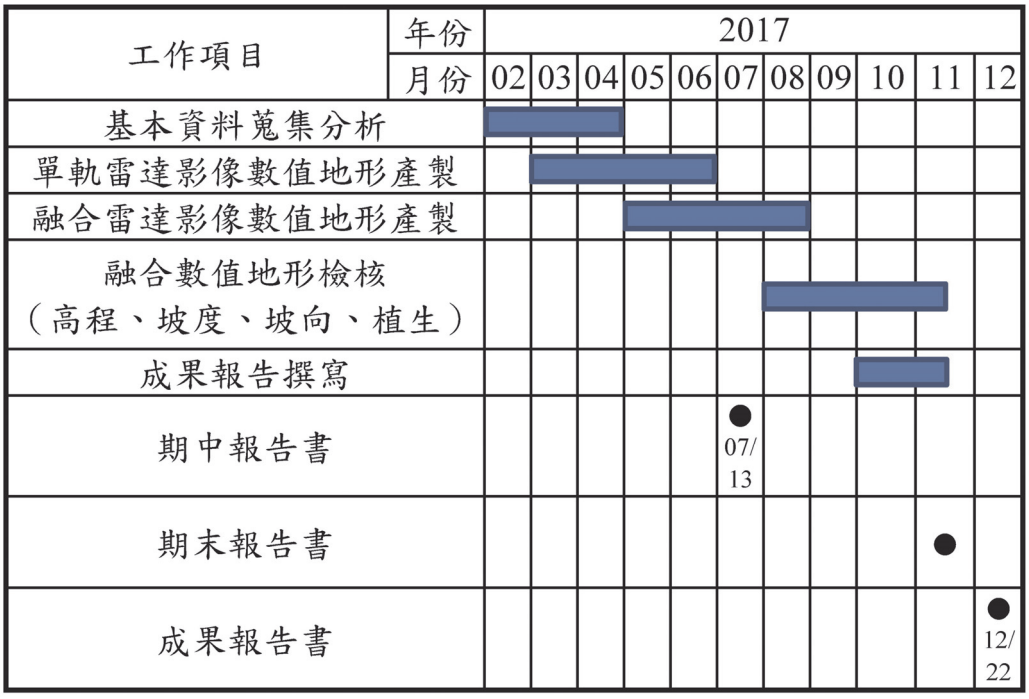


圖 3-1　計畫甘特圖

第二節　計畫成果說明

本計畫針對曾文水庫上游集水區，選取兩個不同時間點的升降軌 TSX/TDX 影像作為數值地形產製數據，影像參數如表 3-1 所示，覆蓋範圍如圖 3-2 紅框(升軌)和綠框(降軌)重疊區域，個別影像覆蓋面積約 28km×40km。圖 3-3 分別為升軌與降軌影像產製之數值高程模型，圖中顯示單一軌道（升軌或者降軌）在成像時產生之幾何畸變，例如陰影、疊影等區域，此部分的高程訊息無法呈現。圖 3-4 則為升軌與降軌數值高程模型經式(5)融合後之 4 公尺空間解析度數值高程模型成果，圖中顯示單一軌道造成之幾何畸變已有大幅改善，多數範圍已能呈現較細緻之地形地貌特徵，但部分區域則仍有高程漏失的情形，此應為地形坡度、坡向及植被造成雷達影像相干性不佳所致。

統計因相干性不佳而造成之地形空洞面積約 2.56 平方公里，約占總地形產製面積 348.3 平方公里之 0.74%。本計畫利用 2014 年 3 月以 LiDAR 產製之數值地形(DSM, DEM)來檢核地形空洞網格分布位置之高程、坡度、坡向及植生高度特性，圖 3-5～ 圖 3-8 分別為研究區域之高程、坡度、坡向及植生高度區間特性分布，其中高程分布以介於 500m～1500m 居多數；坡度分布則以 25 度至 45 度為主；坡向以西、西南及西北等 3 個坡向略占多數；植生高度分布則以 5m 以下為主。圖 3-9～ 圖 3-12 分別為融合後 4m 解析度數值高程模型空洞

網格之高程、坡度、坡向及植生高度區間特性分布，圖中顯示空洞網格較集中於 400m ~ 600m 及 700m ~ 900m 之高程區間；坡度區間則以 25 度至 40 度之區間範圍有較多空洞網格；坡向以南(S)、西南(SW)及東南(SE)有略多空洞網格；植生高度區間大致以 25m 以下區間有較多的空洞網格。

圖 3-4 係利用 SRTM 平面解析度 30 公尺之外部 DEM 去除干涉相位之地形相位訊息，本計畫進一步利用較高解析度 DEM 在地形產製過程去除干涉相位之地形相位訊息，圖 3-13 為地形高程模型產製成果，空間解析度約 2 公尺，相較圖 3-4 之 4 公尺解析度已有明顯改善，然而仍有部分如前述因地形坡度、坡向及植被造成雷達影像相干性不佳導致之空洞網格存在，圖 3-13 中地形空洞面積約 6,509 平方公尺，約占總地形產製面積 280 平方公里之 0.002%。圖 3-14 ~ 圖 3-17 分別為 2 公尺解析度數值高程模型空洞網格之高程、坡度、坡向及植生高度區間特性分布，圖中顯示空洞網格在高程 500m ~ 1800m 之間均有零星分布；坡度區間則以大於 60 度之陡坡範圍有較多空洞網格；坡向以東(E)、東北(NE)及東南(SE)有略多空洞網格；植生高度區間大致以 5m 以下區間有較多的空洞網格。綜合上述，高程、坡度、坡向及植生高度等因素以坡度及坡向對於空洞網格影響較為顯著，本研究區域超過 50 度以上面積約佔 7%。

為進一步了解雷達影像產製數值地形在分析崩塌地土砂生產之可行性，本計畫在曾文水庫集水區選取不同面積、高程、坡度及坡向之 25 處崩塌地，以本計畫產製之雷達影像數值地形與 2011 年本區 LiDAR 數值地形比對獲得崩塌土砂生產量，並利用 2011 年與 2014 年 3 月兩期 LiDAR 數值地形比對之崩塌土砂量體加以檢核，了解誤差程度。圖 3-18 為 25 處崩塌地之分布位置，表 3-2 為 25 處崩塌地之面積、平均高程、平均坡度、代表坡向及崩塌生產量誤差分析成果，25 處崩塌地之面積約介於 0.04 ~ 27.4 公頃；平均高程約介於 386 ~ 1,904 公尺；平均坡度介於 24.1 ~ 52.84 度，表中崩塌產量 A 為兩期 LiDAR 資料分析獲得之崩塌土砂生產量；崩塌產量 B 為雷達影像數值地形與 LiDAR 資料分析獲得之崩塌土砂生產量。表中顯示整體誤差百分率約有 6 成崩塌地(16 處)誤差百分率小於 50%，應屬可接受之誤差水準。然而部分崩塌地之誤差百分率偏大，其中有兩處崩塌地誤差百分率大於 100%。從誤差百分率與面積、高程、坡度及坡向之關係大致顯示，誤差百分率較為偏大之崩塌地多數位於朝東之坡向(東、東北、東南)或坡度較大之坡面，此點顯示坡度與坡向兩項地文因素在雷達影像產製地形之融合過程有較為顯著的影響。

表 3-1 TSX/TDX 之影像參數

數據類型	時間	軌道	入射角(°)
TSX/TDX	20140116	Ascending	37.0
TSX/TDX	20140404	Descending	40.7

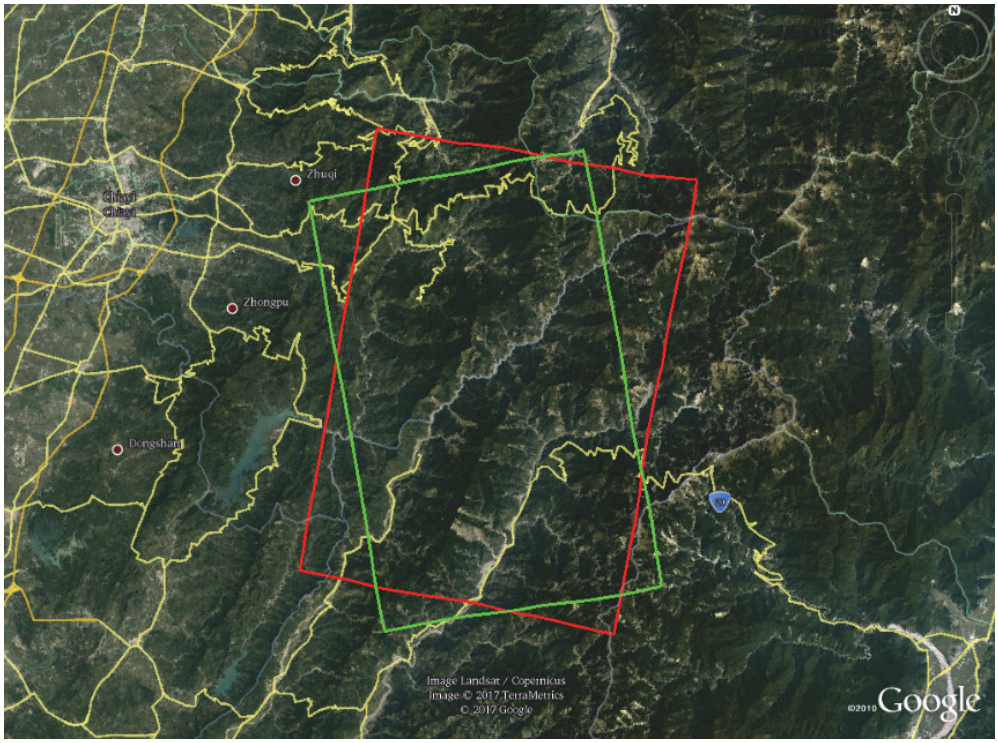
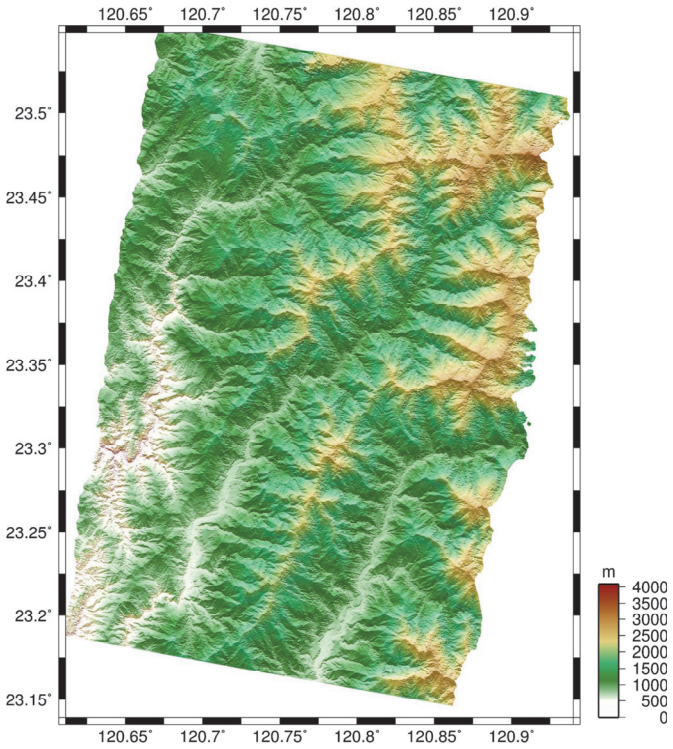
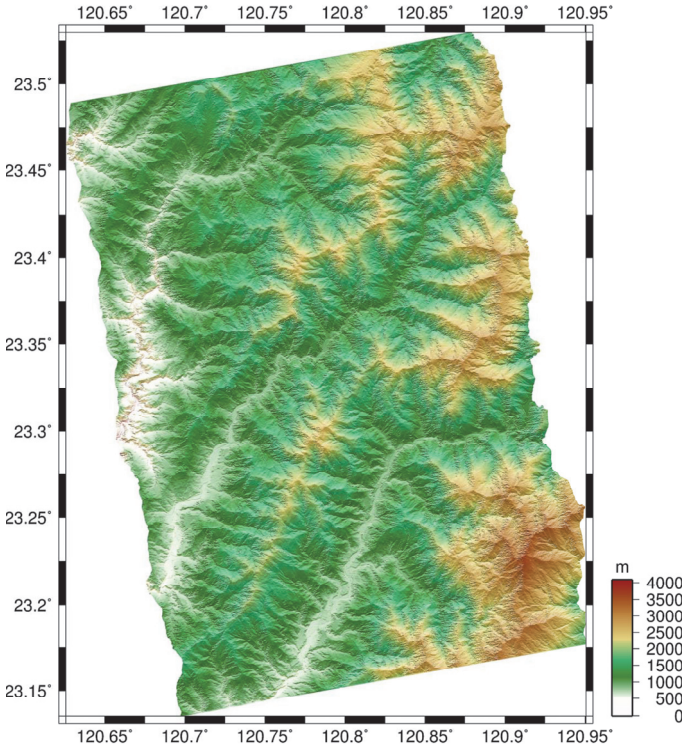


圖 3-2 升軌(紅框)和降軌(綠框)影像覆蓋區域



(a)20140116



(b)20140404

圖 3-3　單軌 TSX/TDX 資料產製之 DEM (a)升軌；(b)降軌

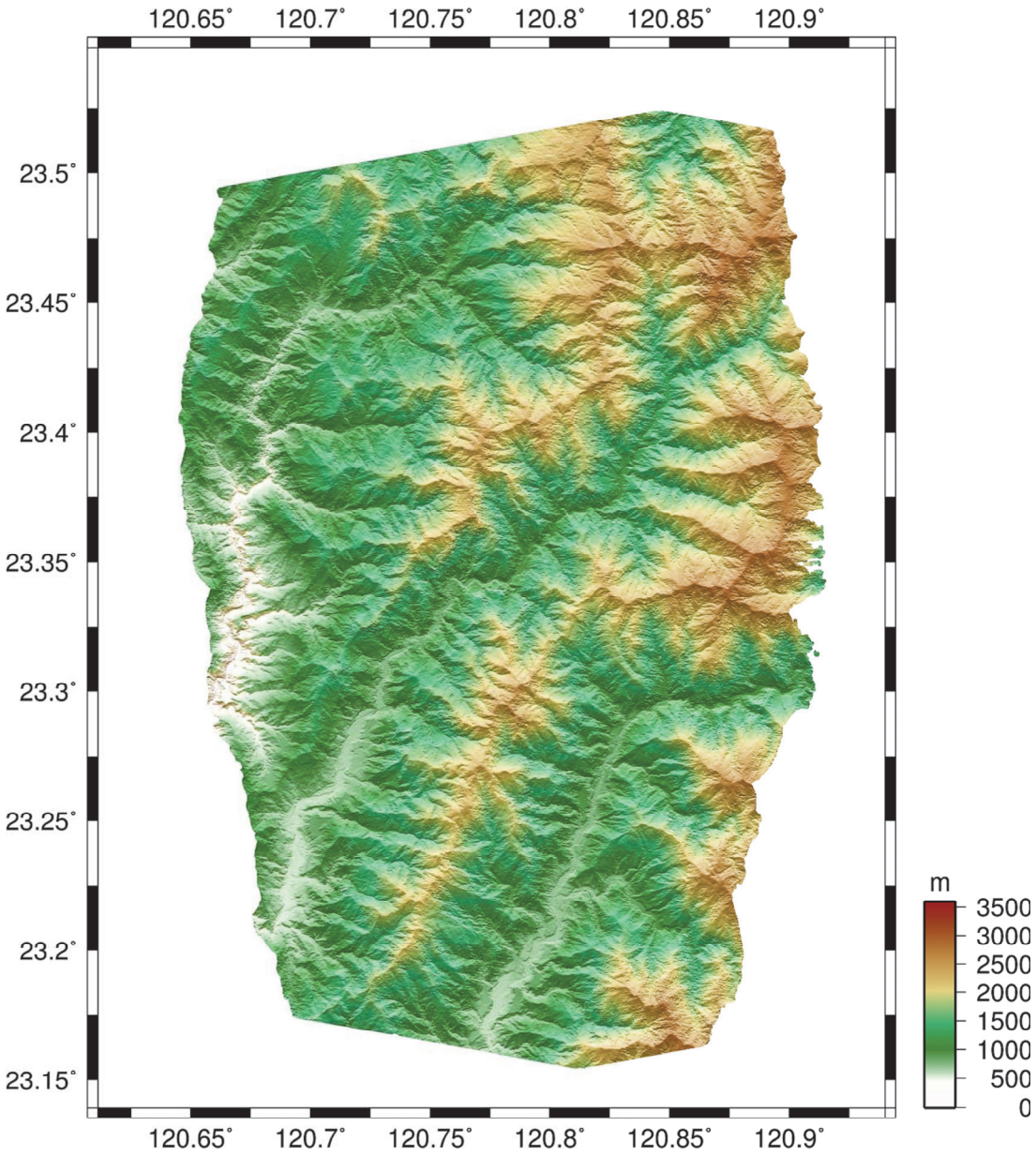


圖 3-4 升降軌融合後之數值高程模型成果(空間解析度約 4m)

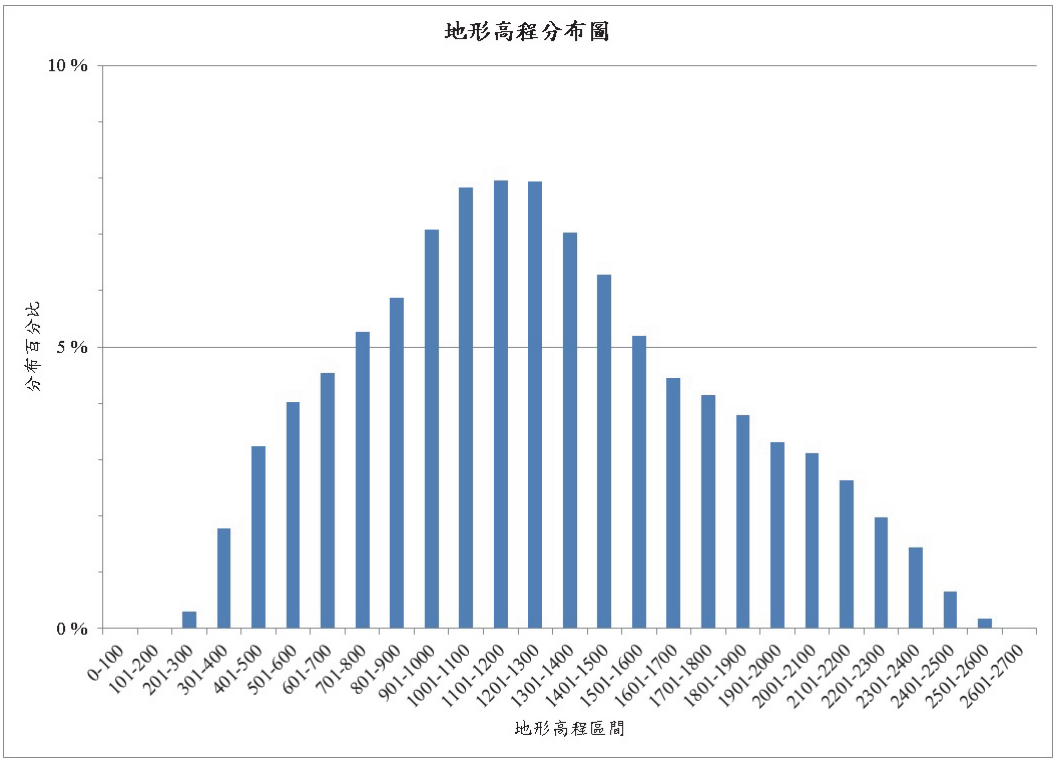


圖 3-5　研究區域之高程區間分布

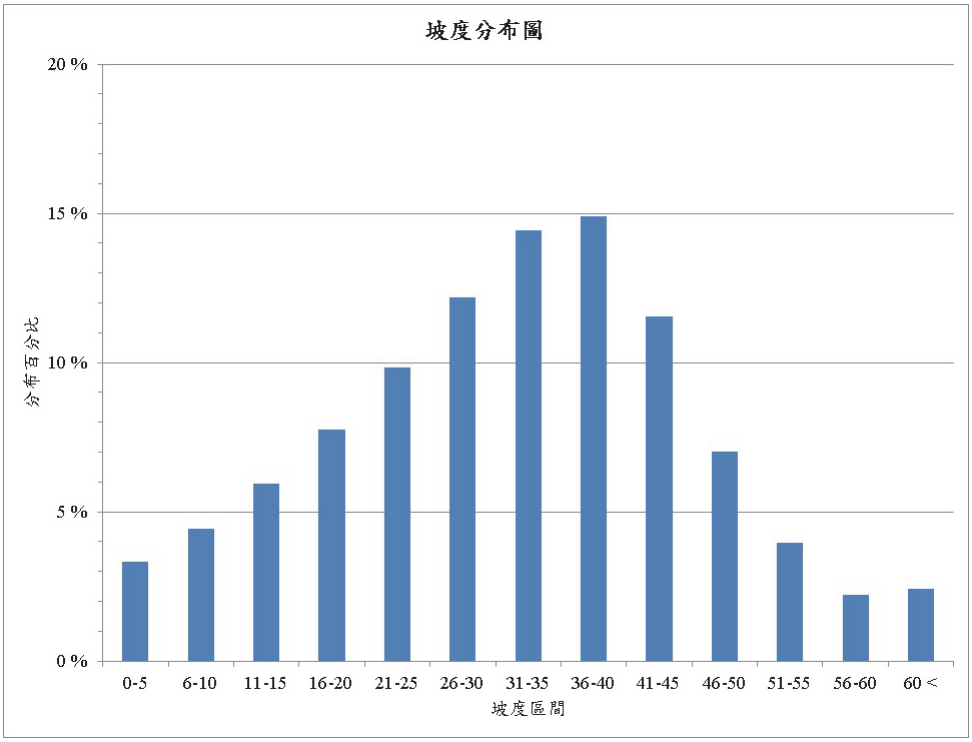


圖 3-6　研究區域之坡度區間分布

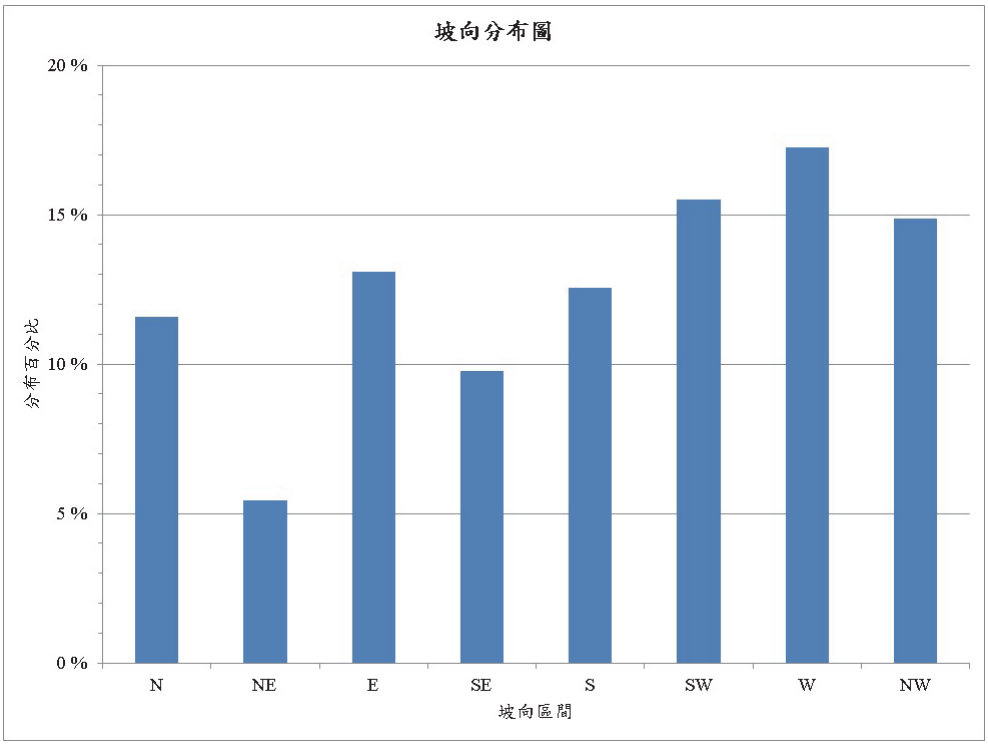


圖 3-7 研究區域之坡向區間分布

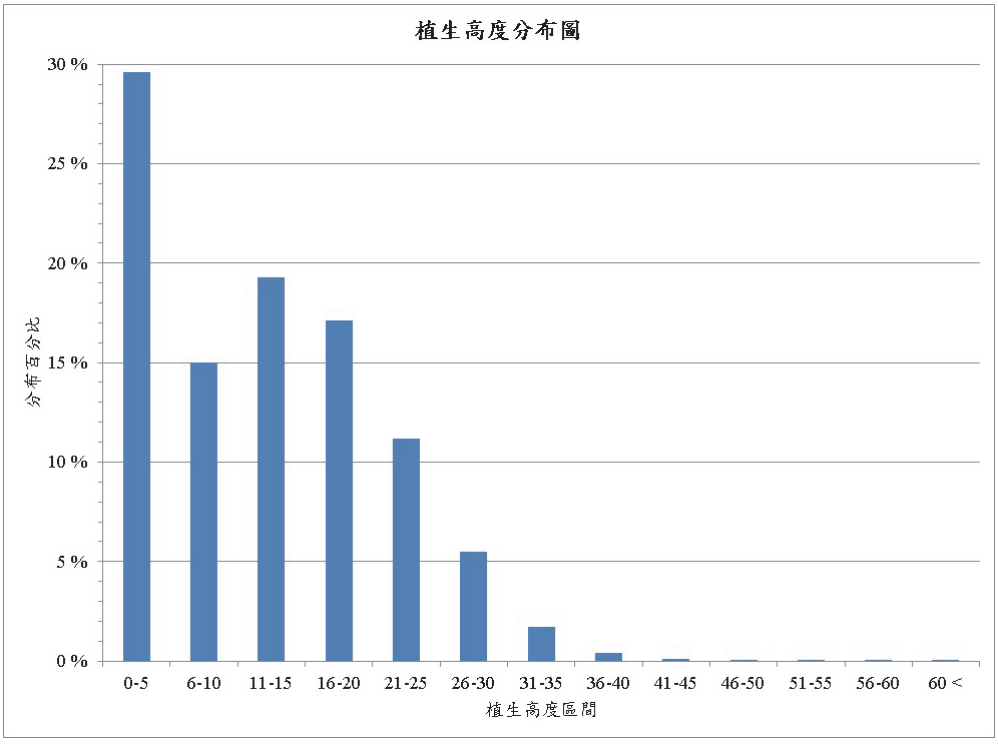


圖 3-8 研究區域之植生高度分布

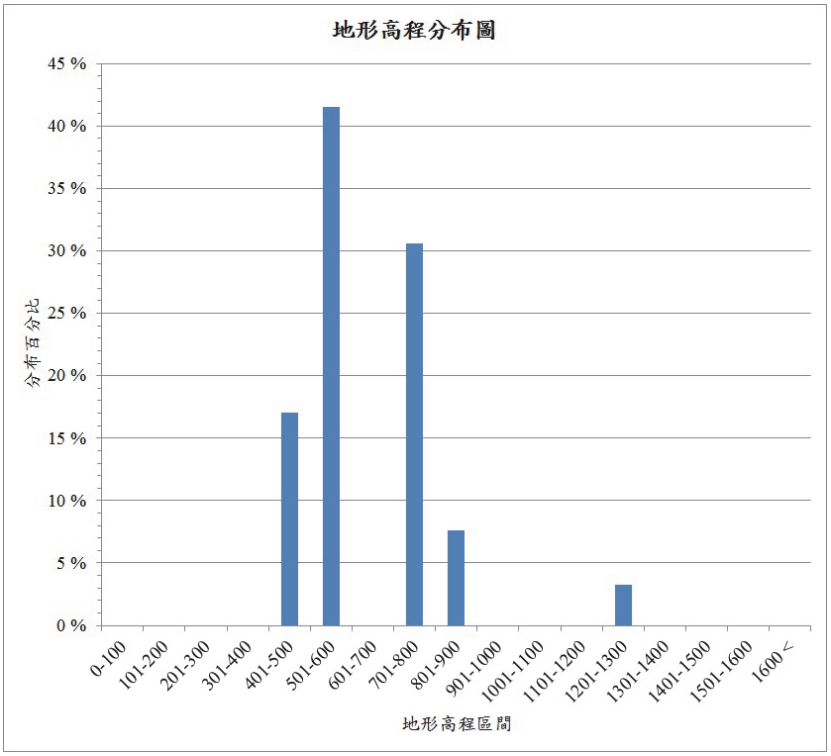


圖 3-9　融合後 4m 解析度數值高程模型空洞網格之高程區間分布

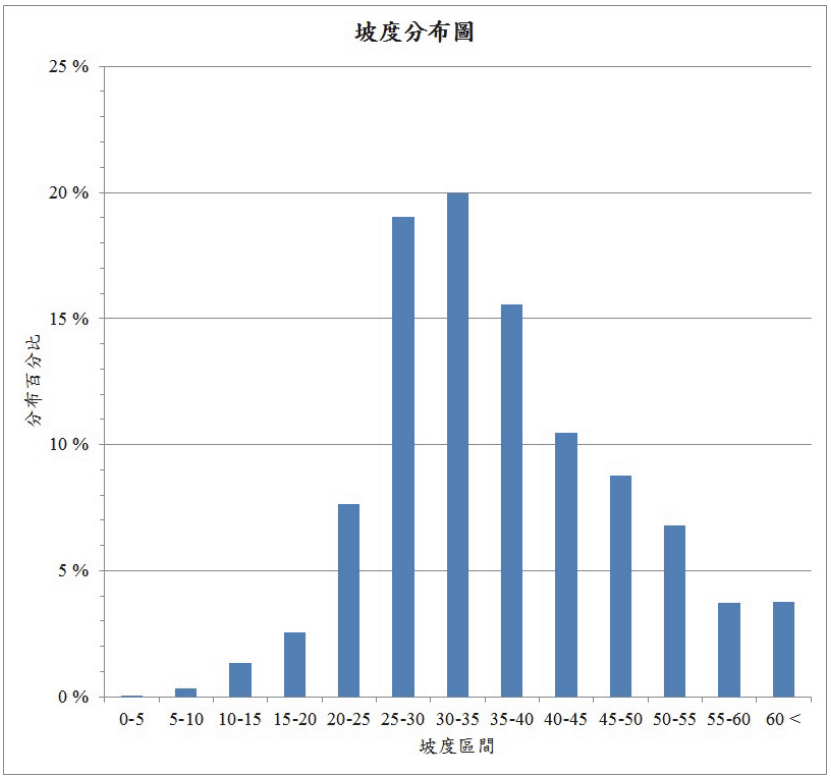


圖 3-10　融合後 4m 解析度數值高程模型空洞網格之坡度區間分布

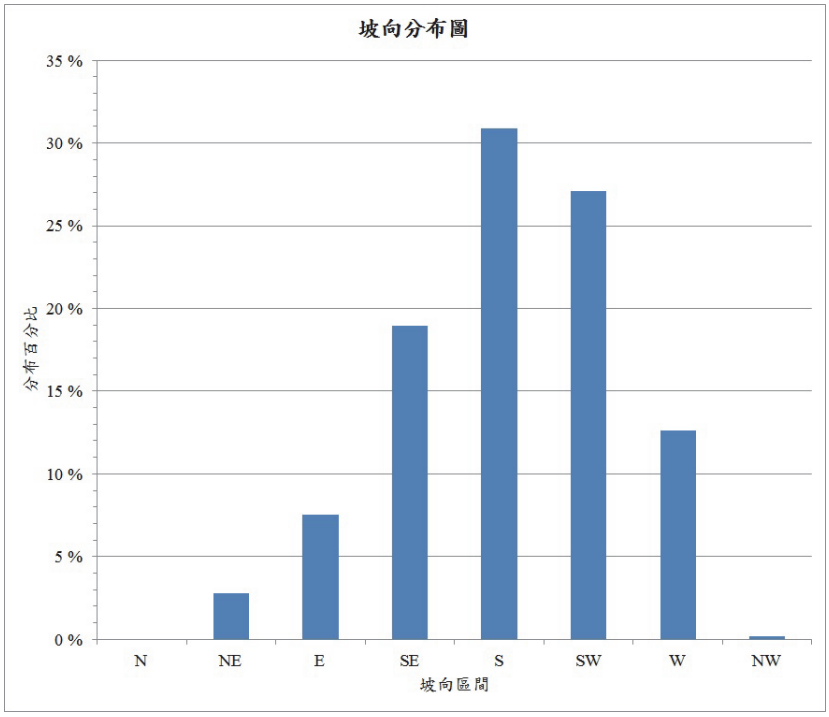


圖 3-11　融合後 4m 解析度數值高程模型空洞網格之坡向區間分布

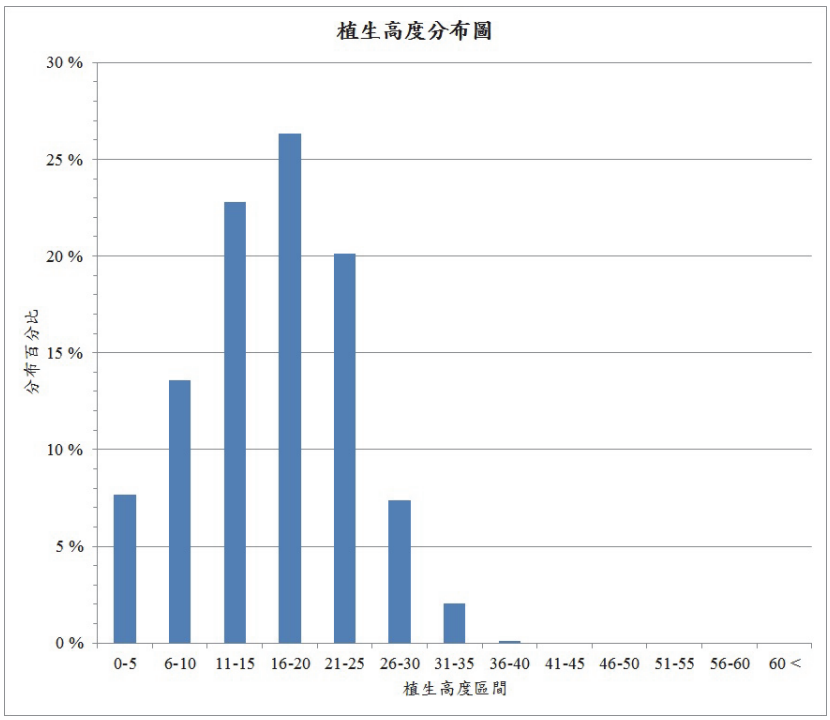


圖 3-12　融合後 4m 解析度數值高程模型空洞網格之植生高度分布

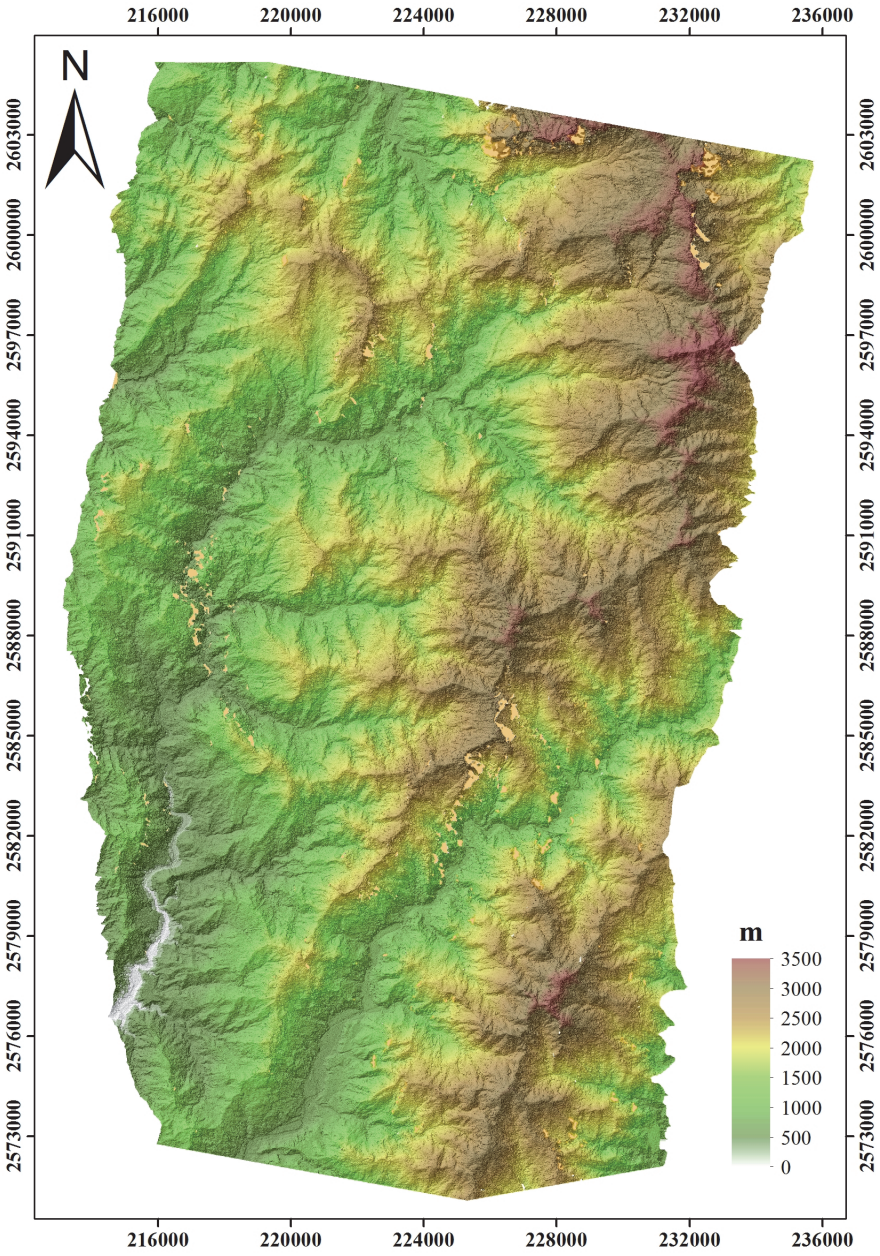


圖 3-13　以較高解析度 DEM 去除干涉相位之產製成果(解析度約 2 公尺)

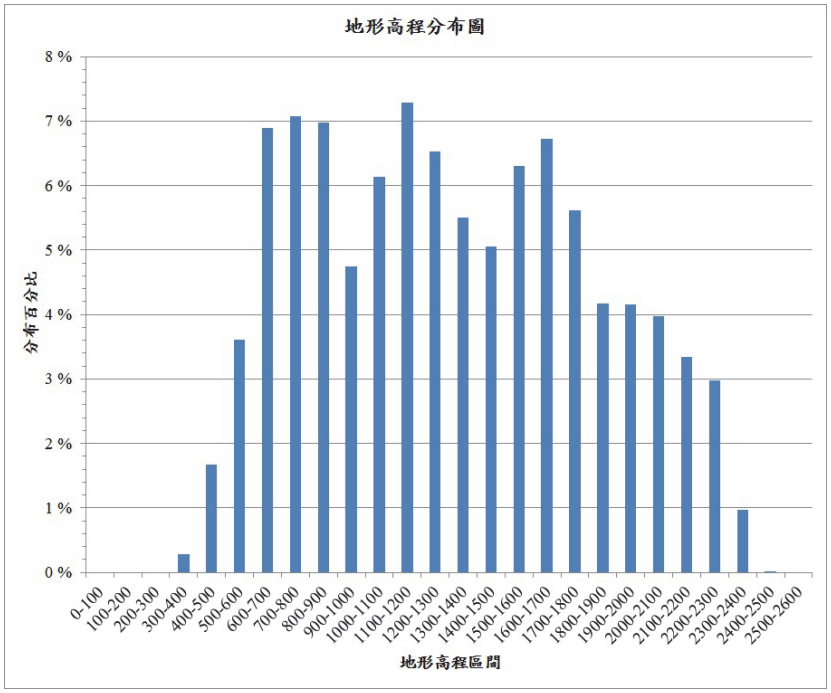


圖 3-14　融合後 2m 解析度數值高程模型空洞網格之高程區間分布

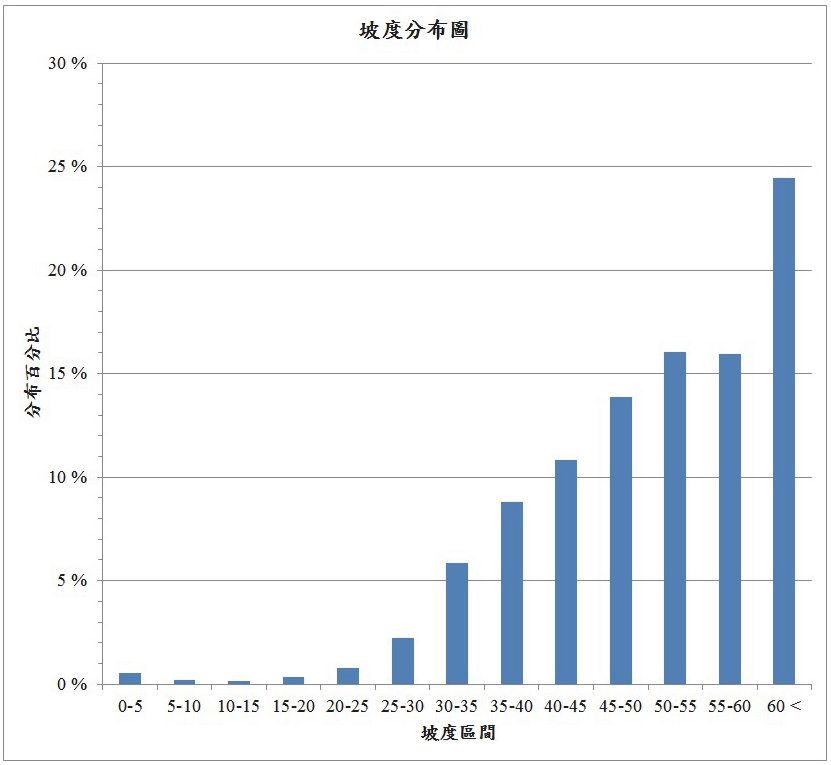


圖 3-15　融合後 2m 解析度數值高程模型空洞網格之坡度區間分布

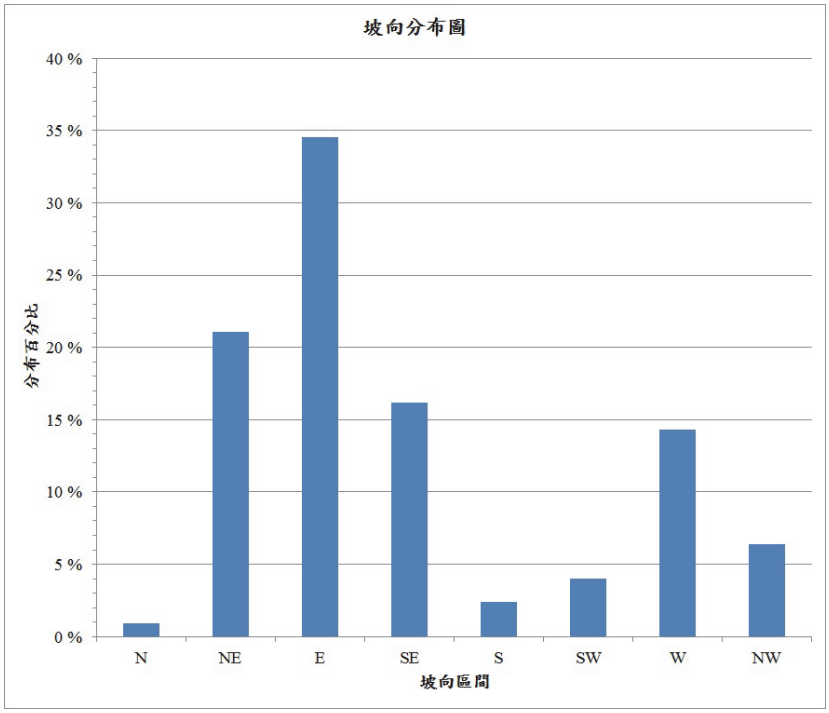


圖 3-16　融合後 2m 解析度數值高程模型空洞網格之坡向區間分布

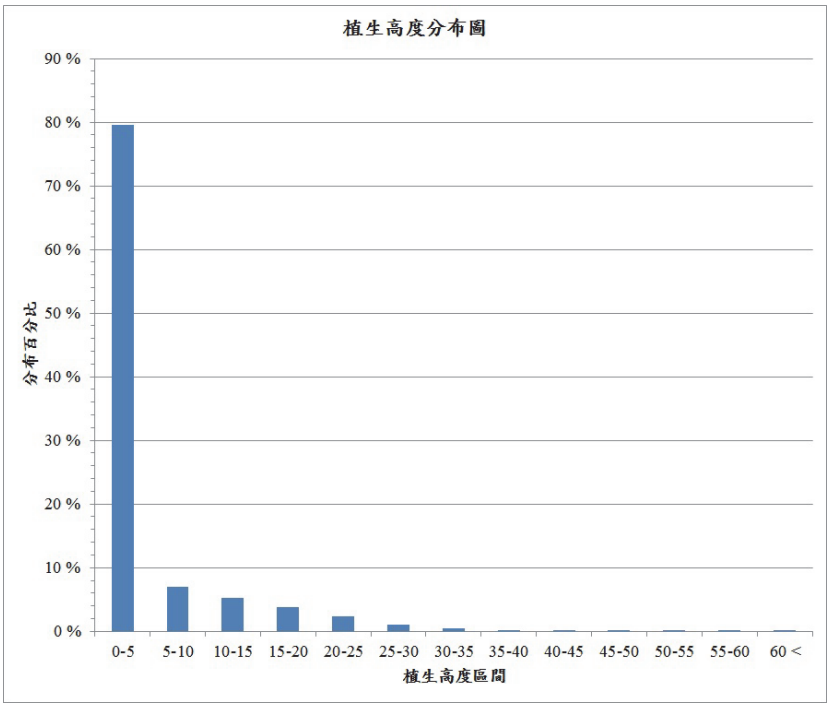


圖 3-17　融合後 2m 解析度數值高程模型空洞網格之植生高度分布

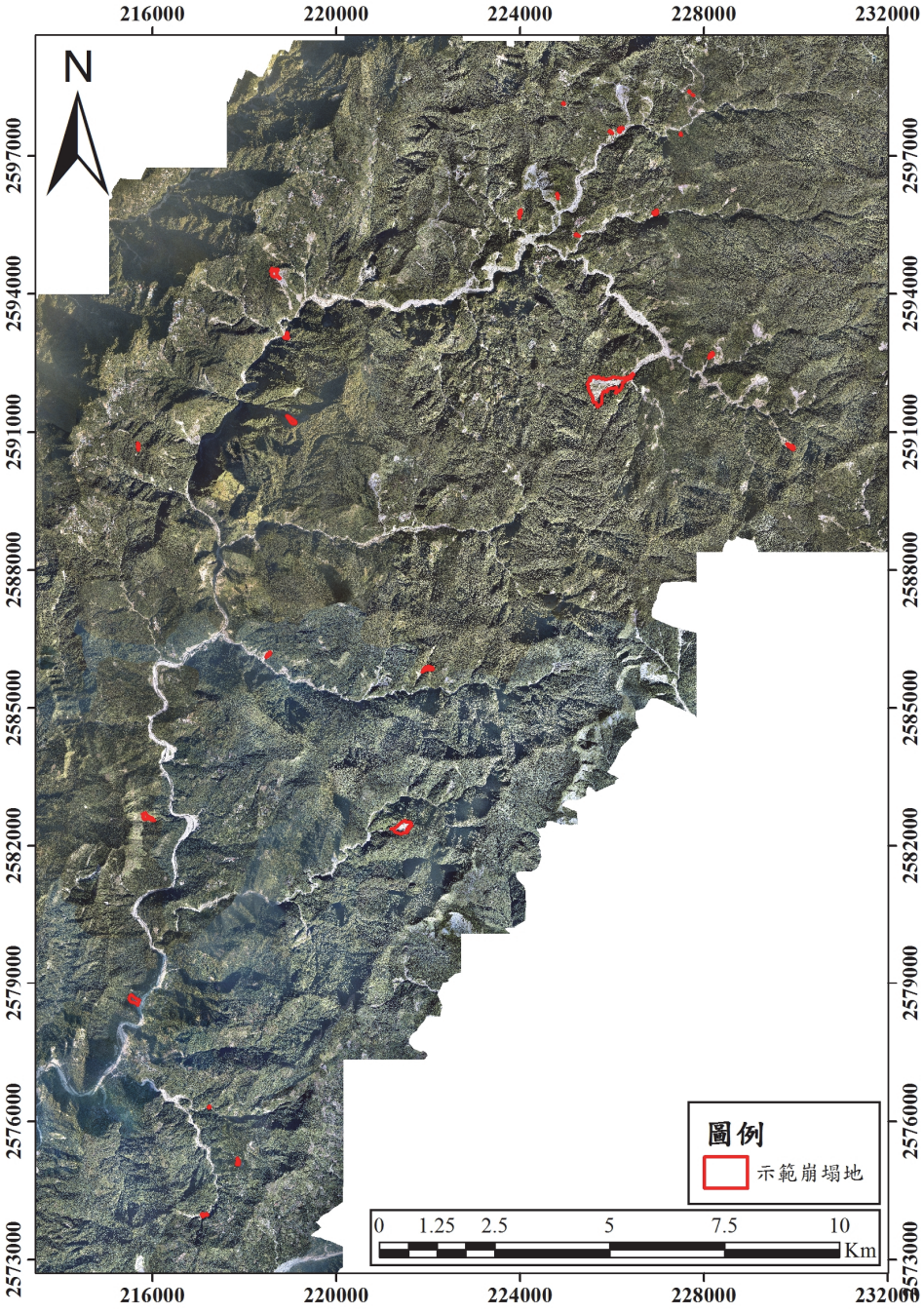


圖 3-18 25 處示範崩塌地之分布位置

表 3-2　25 處崩塌地基本資料及崩塌生產量誤差分析成果

編號	溪流名稱	面積 (m^2)	平均高程 (m)	平均坡度 (度)	代表坡向	崩塌產量 A (萬方)	崩塌產量 B (萬方)	誤差百分率 (%)
1	後大浦溪	433	1558	42.82	東南	0.1231	0.0649	-47.25
2	後大浦溪	359	1498	52.75	東	0.2017	0.1025	-49.18
3	後大浦溪	736	1278	31.98	西北	0.1444	0.1903	31.80
4	後大浦溪	4810	1072	28.41	東南	3.6924	5.7963	56.98
5	後大浦溪	1124	1124	38.85	東南	0.4603	0.9811	113.14
6	後大浦溪	961	1384	36.53	東南	0.3010	0.1561	-48.14
7	曾文溪	1350	1144	52.84	南	0.2387	0.1902	-20.32
8	曾文溪	5208	1100	37.75	南	1.7260	0.9152	-46.98
9	曾文溪	6002	1181	40.67	南	0.9680	0.5844	-39.63
10	曾文溪	1989	1000	38.78	東	0.3628	0.2565	-29.29
11	曾文溪	6569	1402	44.38	南	2.8158	3.5873	27.40
12	曾文溪	273739	1508	33.93	東	195.5828	225.1952	15.14
13	曾文溪	7527	1906	33.59	西北	3.9807	6.3444	59.38
14	曾文溪	21051	1031	30.50	東南	11.9723	28.0764	134.51
15	曾文溪	7562	675	41.89	西	12.5744	14.0494	11.73
16	曾文溪	14143	1086	44.76	西	17.0163	25.0314	47.10
17	曾文溪	2975	1184	38.86	南	1.1339	0.5960	-47.44
18	達娜伊谷溪	4808	678	44.48	西南	4.4332	1.9600	-55.79
19	達娜伊谷溪	13782	1286	38.84	西	15.7462	15.9909	1.55
20	曾文溪	17396	729	30.96	東南	14.3562	14.2915	-0.45
21	普亞女溪	69672	1248	36.35	西	35.9179	62.4805	73.95
22	曾文溪	23800	386	37.82	東南	7.7741	2.8482	-63.36
23	托亞奇伊溪	1115	497	32.16	南	0.9166	0.3684	-59.80
24	托亞奇伊溪	5165	760	24.10	西北	2.6943	4.7947	77.96
25	托亞奇伊溪	4380	772	40.39	東南	2.7137	2.7022	-0.43

第四章　結論及建議

第一節　結論

一、本計畫利用上升(20140116)與下降軌道(20140404)之衛星雷達影像，分別產製數值高程模型，進而結合升軌與降軌參數融合產製單期數值高程模型。依據融合地形產製成果顯示，單一軌道造成之幾何畸變已有明顯改善，多數範圍已能呈現較細緻之地形地貌特徵。

二、本計畫利用較高解析度 DEM 在地形產製過程去除干涉相位之地形相位訊息，產製空間解析度約2公尺之數值地形，相較於利用SRTM 30公尺外部 DEM 獲得之4公尺解析度數值地形，空間解析度已有顯著提升。

三、依據研究區域25處崩塌地土砂生產量誤差分析成果顯示，約有6成崩塌地誤差百分率小於50%，應屬可接受之誤差水準。但部分崩塌地之誤差百分率偏大，誤差百分率較為偏大之崩塌地多數位於朝東之坡向(東、東北、東南)或坡度較大之坡面。

第二節　建議

依本計畫研究成果顯示，坡度與坡向兩項地文因素對於雷達影像產製數值地形有較為顯著的影響，因此後續在地形融合產製過程除升降軌道參數外，亦可考量加入坡度與坡向特徵因子，以精進地形產製成果，進而應用於集水區土砂變異量之評估。

參考文獻

1. 賴子銘，碩士論文，SRTM/TopSAR 高程數據比對與多尺度分析，國立交通大學土木工程學系，2004。
2. 史天元、石宏揚，“以小波進行數值高程模型雜訊去除”，第二十屆測量學術及應用研討會，A7，51-58，2001。
3. C. Rossi, F. R. Gonzalez, T. Fritz, N. Y. Martinez and M. Eineder, “TanDEM-X calibrated Raw DEM generation,” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 73, pp. 12-20, 2012.
4. C. Rossi and S. Gernhardt, “Urban DEM generation, analysis and enhancements using TanDEM-X,” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 85, pp. 120 – 131, 2013.
5. M. Crosetto, “Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation,” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 57, pp. 213 – 227, 2002.
6. M. Karkee, B. L. Steward, and S. A. Aziz, “Improving quality of public domain digital elevation models through data fusion,” biosystems engineering Vol. 101, pp. 293-305, 2008.
7. R. Avtar, A. P. Yunus, S. Kraines and M. Yamamuro, “Evaluation of DEM generation based on Interferometric SAR using TanDEM-X data in Tokyo,” Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 83 – 84,

pp.166－177, 2015.

8. X. Zhang, Q. Zeng, J. Jiao and J. Zhang, “Fusion of space-borne multi-baseline and multi-frequency , interferometric results based on extended Kalman filter to generate high quality DEMs,” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 111, pp. 32－44, 2016.