

國立臺灣大學理學院地理環境資源學系

碩士論文

Department of Geography

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

利用歷史航空照片估計年代際利吉惡地侵蝕型態

Estimating the multidecadal erosional pattern of the

Lichi Badland by using historical aerial photos

李子昕

Lee, Zi Xin

指導教授：莊昀叡 博士

Advisor: Ray Y. Chuang, Ph. D.

中華民國 111 年 08 月

August, 2022



國立臺灣大學碩（博）士學位論文 口試委員會審定書

利用歷史航空照片估計年代際利吉惡地侵蝕型態
Estimating the multidecadal erosional pattern of the
Lichi Badland by using historical aerial photos

本論文係李子昕君（R09228024）在國立臺灣大學地理環境資源學系、所完成之碩（博）士學位論文，於民國 111 年 7 月 25 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

莊的叡

SIGNED VIA ILOVEPDF
5F326805-E822-465F-A1D8-0251300F86835

口試委員：

(簽名)

任家祥 (指導教授)

SIGNED VIA ILOVEPDF
71048F26-7284-48DA-94F5-53703C9D16DE

陳毅青

SIGNED VIA ILOVEPDF
360BC485-2095-4346-914A-51039C63AE5F

(陳麒文老師)

SIGNED VIA ILOVEPDF
93208198-8E6D-49A8-82EF-D0438D1A0A4D

(陳毅青老師)

詹鈞評

(陳麒文老師)

(詹鈞評老師)

誌謝



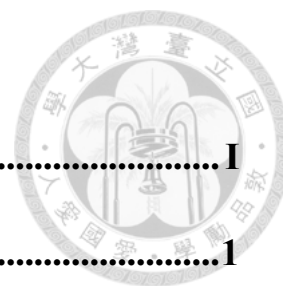
感謝我的指導老師莊昀叡老師，計劃書口試委員李宗祐老師、陳毅青老師；感謝我的論文口試委員任家弘老師、陳毅青老師、陳麒文老師、詹鈞評老師，給予我的論文指導與建議。感謝在我研究中幫助我的所有人，包括 303 研究室的 Chelsey、亞嫻、婉姿、向婕、Penny、昭蓉、靜儀、豐傑、冠榮、友維、佑璇、聿修、秉宸、邵方、立學、冠至、耕霈、耀萱、李旻，在研究期間協助我野外工作和提供研究上的意見。感謝研究期間協助和支持我的友人與家人。

感謝中央研究院人文社會科學研究中心即農林航空測量所提供本研究使用之台東利吉惡地區歷史航空照片。感謝內政部國土測繪中心測繪之五公尺數值高程模型、通用正射影像。感謝中央地質調查所測繪之五萬分之一地質圖。感謝 Agisoft 開發之 Metashape 提供本研究影像建模軟體。感謝提供開源功能的 GMT 及 QGIS 協助本研究繪圖及分析。感謝 Google 地圖提供開源影像。感謝向山榮團隊開發之 ELSAMAP 協助本研究。

感謝科技部計劃支持本研究，計劃編號：109-2121-M-008-004、110-2923-M-002-019-MY3。感謝經濟部中央地質調查所計劃支持本研究，計劃編號：B11130。

本研究階段性的研究成果曾發表於以下研討會：2021 年中國地理學會年會暨學術研討會、2022 年中華民國地理學會後疫情時代的地理學學術研討會、2022 年台灣地球科學聯合學術研討會、2022 年中華民國測地年會學術研討會。本研究的成果計劃後續將結合其他資料進行討論，並投稿於國際學術期刊。

目錄



誌謝.....	I
摘要.....	1
Abstract.....	2
第一章 前言	3
1.1 研究動機.....	3
1.2 研究目的.....	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 短期侵蝕觀測.....	5
2.1.1 事件型變化觀測.....	6
2.1.2 穩定變化觀測.....	6
2.2 歷史航照結合傳統攝影測量在地形觀測的應用.....	7
2.3 歷史航空照片結合運動回復結構在地形上的應用.....	8
第三章 研究區域	11
3.1 利吉混同層.....	13
3.2 利吉惡地邊坡研究.....	14
第四章 研究方法	15
4.1 研究架構.....	15
4.2 研究資料.....	16
4.3 各年代數值高程模型產製.....	19
4.3.1 歷史航空影像前處理.....	19
4.3.2 控制點與檢核點.....	21
4.3.3 Agisoft Metashape	22
4.3.5 資料驗證.....	23
4.4 檢視 SfM 與歷史航照觀測侵蝕的流程與限制	23
4.5 侵蝕模式與侵蝕量分析.....	24
4.6 研究假設.....	25
第五章 研究結果	26
5.1 各時期建模成果精度誤差.....	26
5.2 各時期建模成果.....	33

5.3 DoD 觀測結果	39
5.3.1 1956 年與 1964 年	46
5.3.2 1964 年與 1974 年	47
5.3.3 1974 年與 1984 年	48
5.3.4 1984 年與 1993 年	49
5.4 邊坡侵蝕體積估算	50
第六章 討論	51
6.1 使用歷史航空照片觀測可行性及限制	51
6.1.1 蠟筆標記與雲霧遮蔽	51
6.1.3 建模參數	53
6.2 利吉惡地邊坡演育	55
6.2.1 利吉惡地 A 區	56
6.2.2 利吉惡地 B 區	59
6.2.3 利吉惡地 C 區	64
6.2.4 小結	66
6.3 侵蝕體積與侵蝕率比對	66
6.4 邊坡侵蝕分佈	69
第七章 結論	72
參考文獻	73
附錄 1 控制點與檢核點坐標	80
附錄 2 歷史航空照片列表	85

圖目錄



圖 2-1 運動回復結構示意圖。	8
圖 2-2 SFM 技術演算流程概念圖。	9
圖 3-1 利吉混同層(綠色區域)於台東地層分佈。	12
圖 3-2 利吉混同層於台東大橋北邊的利吉惡地地質公園出露邊坡。	13
圖 4-1 研究流程圖。	15
圖 4-2 各時期選用歷史航照分佈位置。	18
圖 4-3 使用歷史航空照片結合 SFM 技術示意圖	19
圖 4-4 歷史航空影像的原始掃描檔案樣圖。	20
圖 4-5 在不同年間選取相同且變化不大的特徵物作為控制點。	22
圖 5-1 控制點(紅)與檢核點分佈。橘色區域為利吉惡地地質公園區域。	26
圖 5-2 1956 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。	28
圖 5-3 1964 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。	29
圖 5-4 1974 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。	30
圖 5-5 1984 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。	31
圖 5-6 1993 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。	32
圖 5-7 1956 年照片產製之正射影像。	33
圖 5-8 1964 年照片產製之正射影像。	34
圖 5-9 1974 年照片產製之正射影像。	34
圖 5-10 1984 年照片產製之正射影像。	35
圖 5-11 1993 年照片產製之正射影像。	35
圖 5-12 1956 年 DSM 產製之 ELSAMAP。	36
圖 5-13 1964 年 DSM 產製之 ELSAMAP。	36
圖 5-14 1974 年 DSM 產製之 ELSAMAP。	37
圖 5-15 1984 年 DSM 產製之 ELSAMAP。	37
圖 5-16 1993 年 DSM 產製之 ELSAMAP。	38
圖 5-17 1956 年與 2006 年 DSM 相減之 DOD 成果。	39
圖 5-18 1964 年與 2006 年 DSM 相減之 DOD 成果。	39
圖 5-19 1974 年與 2006 年 DSM 相減之 DOD 成果。	41
圖 5-20 1984 年與 2006 年 DSM 相減之 DOD 成果。	41
圖 5-21 1993 年與 2006 年 DSM 相減之 DOD 成果。	42
圖 5-22 1956 年與 2006 年模型 DOD，坡度與 DOD 頻率。	43
圖 5-23 1964 年與 2006 年模型 DOD，坡度與 DOD 頻率。	43
圖 5-24 1974 年與 2006 年模型 DOD，坡度與 DOD 頻率。	44
圖 5-25 1984 年與 2006 年模型 DOD，坡度與 DOD 頻率。	44
圖 5-26 1993 年與 2006 年模型 DOD，坡度與 DOD 頻率。	45

圖 5-27 1956 年與 1964 年的 DSM 進行 DOD 成果。	46
圖 5-28 1964 年與 1974 年的 DSM 進行 DOD 成果。	47
圖 5-29 1974 年與 1984 年的 DSM 進行 DOD 成果。	48
圖 5-30 1984 年與 1993 年的 DSM 進行 DOD 成果。	49
圖 6-1 產製出的正射影像上，保留著歷史航照的蠟筆標記。	52
圖 6-2 雲遮情況範例。	53
圖 6-3 歷史航照文字記錄的保存清單。	54
圖 6-4 歷史航照上所標記的資訊。	54
圖 6-5 利吉惡地地形演育討論區域劃分及截取各時期 DSM 剖面之位置。	56
圖 6-6 邊坡倒退模式。	56
圖 6-7 A-A'剖面。	57
圖 6-8 B-B'剖面。	58
圖 6-9 C-C'剖面。	58
圖 6-10 利吉惡地內陸支流區域的導覽步道終點。	59
圖 6-11 利吉惡地內陸支流區域邊坡。	59
圖 6-12 D-D'剖面。	60
圖 6-13 E-E'剖面。	61
圖 6-14 F-F'剖面。	61
圖 6-15 利吉惡地河岸邊坡，照片於利吉堤防道路上有南向北拍攝。	62
圖 6-16 2018 年(左)及 2019 年(右)利吉惡地河岸邊坡北段的衛星影像。	62
圖 6-17 利吉惡地河岸邊坡北段的道路被崩積物覆蓋形成土丘。	63
圖 6-18 利吉惡地河岸邊坡南段。	64
圖 6-19 利吉惡地河岸邊坡南段與利吉堤防之間的石山圳水利設施。	64
圖 6-20 G-G'剖面。	65
圖 6-21 支流河道，從下游向上游拍攝。	65
圖 6-22 支流河道的泥岩除了上游邊坡還有保留，河道上幾乎只剩下粒徑較大的蛇綠岩和基性火成岩。	66
圖 6-23 利吉惡地侵蝕體積與台東測站累計雨量統計。	68
圖 6-24 利吉惡地 A 區邊坡各時期侵蝕體積與台東測站累計雨量散佈圖。	68
圖 6-25 利吉惡地 B&C 區邊坡各時期侵蝕體積與台東測站累計雨量散佈圖。	69
圖 6-26 利吉惡地各時期邊坡及河道分佈。	71
圖 6-27 各時期利吉惡地河岸邊坡正射影像。	71
圖 6-28 利吉惡地邊坡平水期河床現況。	72



表目錄

表 4-1 1956 年至 1993 年利吉惡地歷史航空影像參數。	17
表 5-1 各年段使用之影像數量及誤差。	27
表 5-2 各時期正射影像影像解析度。	36
表 5-3 各時期 DoD 不穩定區塊(uncertainty cube)估算。	45
表 5-4 各時期 DOD 相減後侵蝕體積估算。	50



摘要



地形演育是一個地貌形成的過程，而侵蝕是改變地形重要的因子之一。地形學家透過各種測量方法去了解一個地方侵蝕的過程，以了解它如何形塑成現今的地貌，並釐清其影響因素。在造山作用的長時間尺度下，地表作用會影響水系型態的發育、氣候型態、碳循環，以及生物多樣性的變化。現今地形作用的短時間尺度下，侵蝕除了會增加地震活動的頻率，觀測幾十年穩定的侵蝕模式對於人類活動、土地利用及減災和預防災害上都扮演著重要的角色。因此，高空間解析度的侵蝕觀測資料對於短期侵蝕觀測非常重要。

台灣在歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合下形成弧陸碰撞，除了造山運動活躍，台灣的侵蝕率也非常高，觀測侵蝕非常重要。然而，觀測台灣短期侵蝕的方法主要以集水區和水系侵蝕為主，空間解析度較受限制，因此探討一個可以觀測台灣年代際大面積高解析度的侵蝕資料非常重要。隨著電腦視覺技術的發展，使用運動回復結構於地形觀測開始被關注，若結合台灣於 1940 年代開始出現的歷史航空照片則有非常大的潛力還原過去地表地形地貌，並估計高空間解析度的侵蝕變化。

本研究使用 1956 年至 1993 年歷史航空照片，觀測台灣東部利吉惡地年代際侵蝕模式。利吉惡地構造活動活躍，且岩性易被侵蝕的優勢，適合作為本研究的觀測區域。在進行歷史航空照片三維建模後，本研究能產製出整體精度誤差低於 3.1 公尺的三維地表模型。透過估算，利吉惡地的侵蝕率約為 6.6 ± 1.4 cm/yr 至 23.2 ± 1.4 cm/yr。相較於不在河岸邊的利吉惡地區域，在卑南溪沿岸邊坡侵蝕更加明顯。因此，利吉惡地侵蝕除了降雨，河流作用應為主要侵蝕來源之一。

關鍵字：惡地，運動回復結構，歷史航空相片，年代際，數值地表模型。

Abstract



Detecting the present-day erosion is one main factor for landscape evolution. Therefore, it is important to have a few decades and high spatial resolution data to detect the steady erosion pattern of the landscape. However, present-day observations cannot provide high spatial coverage and spatial resolution erosion because the present-day erosion methods focus on either catchment-wide sedimentation or in-situ incision erosion observation at a certain location. Thus, we aim to discuss a method that can detect multidecadal timescale erosion with high spatial resolution.

With the development of Structure from Motion (SfM) photogrammetry, combined with the historical aerial photos becomes possible to reconstruct old topography without complicated procedures and numerous input parameters. We generate 5 periods of digital surface models (DSMs) from 1956 to 1993 by using historical aerial photos and SfM photogrammetry in Lichi Badland, which is the bare land of Lichi Mélange and presents high erosion. The result shows that the error of the DSMs derived by the SfM method and historical aerial photos is within 3.1m. We use the DEMs of Difference (DoD) method to detect the topographic change of Lichi Badland, and we estimate Lichi Badland erosion rate in 50 years are 6.6 ± 1.4 cm/yr (tributary) and 23.2 ± 1.4 cm/yr (riverside). From the distribution of Lichi Badland, we found that the slope retreat is significantly distributed beside the Peinan River.

Keywords: Badland, Structure form Motion(SfM) photogrammetry, Historical aerial photos, Multidecadal erosion, DEM of difference(DoD)

第一章 前言



1.1 研究動機

地形演育是地表形貌變化的過程，了解地形變化的作用因子是地形演育重要的議題。舉例來說，造山帶的地形演育來看，如何受構造運動(tectonics)與地表作用(surface process)之間相互的影響，是地形學研究長期以來一直在議論的課題。在造山作用幾十萬年至幾百萬年的長時間尺度，地表作用會影響造山運動的發育機制(Molnar and England, 1990; Avouac and Burov, 1996; Pinter and Brandon, 1997; Willett, 1999; Beaumont et al., 2001; Whipple, 2009)並控制了水系型態的發育(Clark et al., 2004; Castelltort et al., 2012)，影響氣候型態與碳循環(Molnar et al., 2010; Hilton and West, 2020)，也影響了生物多樣性的變化(Antonelli et al., 2018)。

若將時間尺度縮小到幾十年至幾千年，地表作用中的侵蝕除了可能增加活動斷層上的地震活動(Steer et al., 2014)，觀測幾十年的侵蝕變化為短期地形演育、土地規劃，以及防災也扮演著重要的角色(Bierman & Montgomery, 2014)。因此，高解析度且能觀測幾十年穩定侵蝕的方法非常重要。

台灣在歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合下形成弧陸碰撞，造山運動活躍(Hsu, 1976; Biq, 1981)。此外，台灣的侵蝕速率也相當高，而中央山脈以東是較為明顯的地區之一(Dadson et al., 2003)。然而，這些侵蝕率的取得主要來自水文測站或者流域採樣，其數值代表的是整個流域的侵蝕率。若需探討區域或更高空間解析度的侵蝕，除非同為河流流域，否則應該使用更高空間解析度的資料才能觀測沿著構造的侵蝕。花東縱谷南端的利吉惡地，為利吉混同層的一部分，也是縱谷斷層南段的上盤地區。此區域為構造活動活躍的地區，過去的文獻也顯示此區有較高的侵蝕率(Dadson et al., 2003)。此外，利吉惡地地區的歷史航照保存完整，因此適合作為本研究觀測年代際侵蝕變化之研究區。

目前在台灣觀測侵蝕的方法無法觀測大範圍高空間解析度的侵蝕，因此探討

一個可以觀測幾十年穩定變化的方法非常重要。隨著電腦視覺技術的進步，使用運動回復結構(Structure from Motion)及航空照片還原三維地表模型的研究逐漸被關注。除此之外，過去於台灣拍攝的歷史航空照片逐漸公開，將這些歷史航空照片使用於地形的觀測具有很大的潛力。若結合電腦視覺技術還原歷史航空照片下的三維地表模型，則有很大的潛力觀測幾十年前至今的地表變化。

1.2 研究目的

本研究觀測利吉惡地的侵蝕變化，透過運動回復結構 SfM 的三維電腦視覺技術，結合歷史航空照片重建利吉惡地數十年的三維數值地表模型(Digital surface model, 以下簡稱 DSM)。目的有以下兩點：

- (一) 探討 SfM 技術結合歷史航空照片在台灣觀測年代際大面積地表變化之可行性，統整其操作流程及使用時的限制。
- (二) 觀測地表變化，分析利吉惡地的侵蝕發育模式及影響因素。

第二章 文獻回顧

地形演育是一個地貌形成的過程，而侵蝕是改變地形的重要因子之一。過去地形學家積極透過各種測量去了解一個地方侵蝕的過程，以了解它如何形塑成現今的地貌。對於理解侵蝕造成地形演育的過程，學者可以釐清其影響因素，對於人類活動及減災和預防災害上都扮演者重要的角色(Bierman & Montgomery, 2014)。

本研究先回顧短期侵蝕觀測的方法，將短時間觀測分為事件和穩定變化觀測，並列出短期時間尺度下不同觀測的方法的觀測時間及空間尺度，以及這些觀測方法存在的研究限制。接著，本研究回顧使用之研究方法，即歷史航空照片及運動回復結構攝影測量技術之原理、現況及發展，以說明使用此方法的考量以及運用上的現況。

2.1 短期侵蝕觀測

從時間尺度來看，觀測侵蝕或地表變化，可以分為長時間尺度和短時間尺度。長時間尺度是指觀測距今千年以上的侵蝕變化，主要透過在河道中採集樣本進行定年，例如：核飛跡定年法(Willet et al., 2003)，以及放射性定年法(Dadson et al., 2003; Derrioux et al., 2014)，計算河床採樣到岩石的剝蝕抬升率(exhumation rate)，並透過冷卻年代來計算該流域長時間的剝蝕速率(denudation rate)。

短時間尺度是指近現代幾十年(後簡稱年代際)的侵蝕和地表變化，也是本研究觀測的時間尺度。與長時間尺度不同，短時間尺度的觀測通常為能觀測到的實際數值，例如，沉積物通量或山崩侵蝕等等。短時間尺度的侵蝕觀測可以分為事件型變化及穩定變化兩個部分，過去學者除了可以討論事件怎麼改變地形，也能討論地形穩定的變化，對於地形演育、土地利用和防災都是重要的觀測資料(Bierman & Montgomery, 2014)。



2.1.1 事件型變化觀測

事件型變化觀測的侵蝕是指因為災害導致的崩塌和侵蝕，針對事件的觀測。例如，地震造成的山崩或強降雨事件造成的崩塌，學者使用航空攝影測量和空載光達測繪崩塌面積(Chen et al., 2005)。此外，也有學者使用侵蝕探針 (林俊全, 1995; Higuchi et al., 2013)進行邊坡觀測，並結合降雨資料來解釋侵蝕量與大型降雨時間變化的關係。然而，事件型變化的觀測只能解釋災害事件造成的侵蝕，無法解釋地形穩定變化的趨勢。

2.1.2 穩定變化觀測

穩定變化觀測的侵蝕是指幾年或幾十年，一個區域穩定且平均的變化。有別於事件型的變化，穩定的變化是可以代表一個地區比較長時間地形的演育。過去學者發現，這樣穩定的侵蝕變化與長時間尺度的侵蝕呈正相關(Larsen & Montgomery, 2012)。因此，這樣的時間尺度對於一個區域的地表變遷和穩定的侵蝕速率是很重要的觀測。學者使用設置在河流流域的水文測站測量沉積物通量(Dadson et al., 2003)，或計算下游或水庫沉積量估計上游的侵蝕率(McManus and Duck, 1984; Champagnac et al., 2009)。雖然這些方法和數值能解釋河流流域的侵蝕模式，但這些資料僅能解釋其採樣點上游區域的變化，無法解釋流域以外空間上的變化和侵蝕來源(Lee, 1997)，空間解析度較低。

若需觀測流域以外的地形或邊坡侵蝕模式，目前常見的觀測模式則是使用侵蝕探針(Hudson, 1993; 林俊全, 1995; Higuchi et al., 2013)。近年也有使用無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)或航空照片(Thomas and Welch, 1988)，進行數化邊坡的觀測；或使用攝影測量技術(Warrick et al., 2017)進行觀測侵蝕模式及分佈，並結合模型計算出侵蝕量(Báčová and Krása, 2016; Zheng et al., 2020)。這些產製出來的模型能獲取高精準度的侵蝕資料，但也只能解決開始架設儀器或拍攝後的侵蝕變化。若要解釋年代際穩定的侵蝕模式，這些侵蝕觀測方法存在著它測

量時間的限制。隨著攝影測量技術的進步，使用歷史航空影像可成為觀測較舊年代的地形觀測技術。



2.2 歷史航照結合傳統攝影測量在地形觀測的應用

歷史航空影像保留了過去地景的樣貌。近年來，歷史航空照片應用於地形演育研究為觀測地表的測地工具之一。

在台灣，從日治時期就有航空照片的出現。林姍安(2020)整理了台灣歷史航照任務的演變。台灣最早系統性歸納和編制的歷史航照任務於 1940 年代末開始出現，當時為美軍在太平洋戰爭期間偵測台灣以進行轟炸任務的戰略拍攝。太平洋戰爭後，1950 年代起，農航所的前身，即中國農村復興與聯合委員會的台灣土地利用及森林資源調查隊開始進行航拍任務，由美國空軍援助拍攝，作為土地利用及林業規劃等用途。1962 年後則有美國空軍與中國民國國軍共同合作的「快刀計劃」，以 U-2 偵查機進行高空偵查以及拍攝任務。

歷史航照經掃描數化，結合傳統攝影測量產製 DSM 和正射影像，能取得高空間解析度的地表變化。例如，Báčová and Krása (2016)利用歷史航照進行影像對位，結合土壤侵蝕模擬探討捷克高原上的地表變化。歷史航空照片也可結合攝影測量的技術進行研究，重建過去一個地區地形變化、侵蝕活動與侵蝕量。Schiefer and Gilbert (2007)使用歷史航照結合傳統攝影測量重建加拿大 Lillooet Valley 的冰河地形，並觀測其地表的變化。江若慈等人(2016)將台江內海區域歷史航照產製正射影像，進行影像糾正對位的討論。然而，傳統攝影測量需有詳細的相機內外方位參數，年代較舊歷史航空照片多為後期底片掃描，且詳細的參數記錄不完整，為使用歷史航照進行攝影測量的一大限制。

2.3 歷史航空照片結合運動回復結構在地形上的應用

隨著電腦視覺與影像處理的進步，攝影測量發展出運動回復結構(Structure from Motion)。運動回復結構的概念最早由 Ullman(1979)提出，它的原理與傳統攝影測量相似，即使用多張連續、不同拍攝角度的影像(圖 2-1)進行匹配，由重疊的部分辨出立體結構重建三維模型(Westoby et al, 2012; Snavely et al, 2008)。運動回復結構概念隨著電腦視覺計算技術的發展，發展為 Structure from Motion-Multiview Stereo Matching(SfM-MVS, 後皆簡稱 SfM)(圖 2-2)。其主要使用 Scale Invariant Feature Transform (SIFT)進行影像匹配的演算(Lowe, 1999)，再進行光束平差法(bundle adjustment)約制誤差，最後多視立體運算(Multiview Stereo Matching)解算出三維模型。

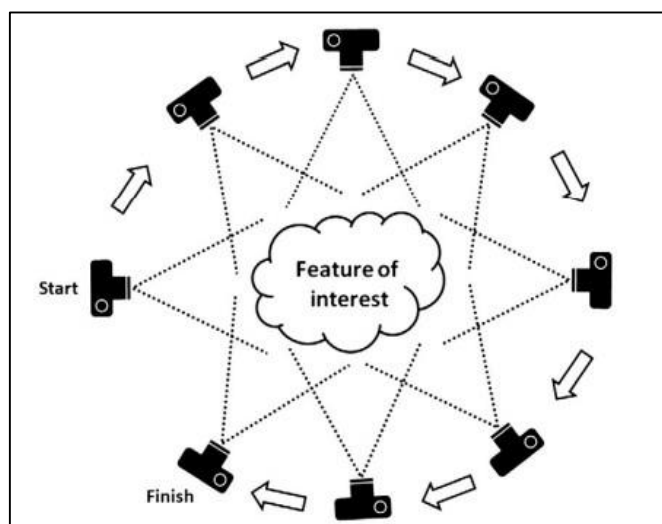


圖 2-1 運動回復結構示意圖。(Westoby et al, 2012)

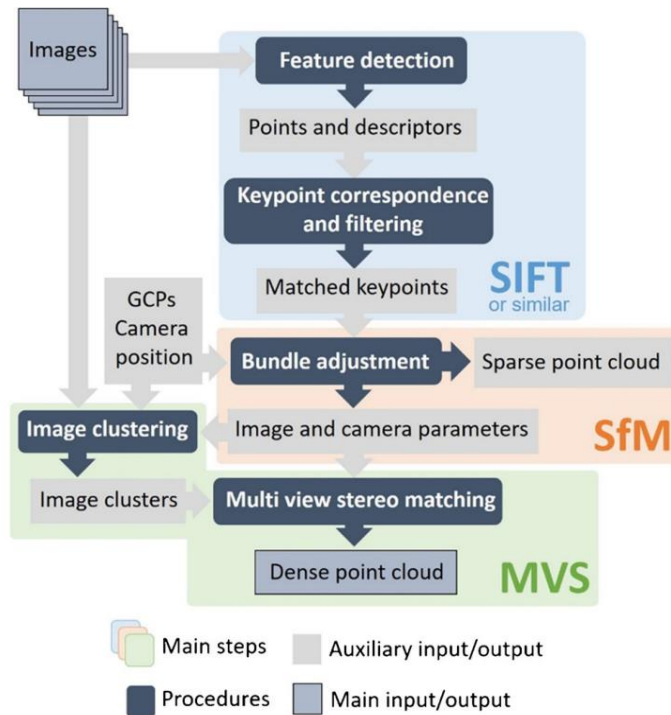


圖 2-2 SfM 技術演算流程概念圖。(Iglhaut et al, 2019)

SfM 技術相較傳統攝影測量，所得到的誤差差異不大，是一種低成本取得高解析度地形重建的攝影測量技術。透過電腦軟體的自動計算，SfM 無需太依賴手動輸入，調整相機參數、鏡頭畸變，只需依賴地面控制點也能獲取低誤差、高精度的數值地形模型(Bakker and Lane, 2016; Warrick et al., 2017; Carvalho et al, 2021)。此外，SfM 技術較不依賴相機和鏡頭內、外參數的設定，透過軟體自動運算就能取得與傳統攝影測量相近的成果，其對 GCPs 的判釋依賴性較強(Bakker and Lane, 2016)。過去 SfM 技術主要使用無人機或近景攝影測量進行影像的三維建模。例如，學者使用無人機拍攝發生崩塌事件前後的影像生成數值地形模型，分析崩塌地變化(Lucieer et al., 2014)。

使用歷史航空影像結合 SfM 技術進行地形重建近年來也開始備受關注。透過歷史航空影像進行地形重建是將過去連續的航空影像進行底片掃描或紙本航照掃描取得數位化影像，並使用 SfM 技術進行多張相片匹配，透過相機率定、鏡頭矯正、內外方位調整計算出高精度的地圖及數值地形模型和正射影像。學者

使用歷史航照結合 SfM 技術能觀測地表上的變化，例如河岸邊坡的變化(Bakker and Lane, 2016)、計算冰河高程的變化來探討變化(Mölg and Bolch, 2017)、海崖的崩塌與堆積變化(Warrick et al., 2017)，以及觀測海岸的變遷及侵蝕體積(Carvalho et al, 2021)。使用歷史航照結合 SfM 技術在經過精度驗證後可以明顯觀測地表的侵蝕量及分佈變化，所建模的成果精度誤差約在幾公尺的範圍內(Bakker and Lane, 2016; Warrick et al., 2017; Carvalho et al, 2021)。

使用 SfM 技術結合歷史航照可以更容易觀測過去的地形。在台灣，過去有關歷史航照結合 SfM 技術的討論，主要為技術上和地表監測的討論。技術上，林佩安(2020)針對台灣歷史航照結合 SfM 技術進行了不同建模軟體和台灣歷史航照限制的討論；地表監測上，主要運用於斷層(李應頌, 2022)及河階(林靜儀, 2022)的地形討論，對於年代際侵蝕的觀測則較少。

此外，歷史航照的選擇也是相關研究很重要的部分。歷史航照的清晰度、歷史航照拍攝時間不同，以及拍攝區太陽照射角度造成的陰影變化，會使歷史影像匯入建模軟體計算時，影像匹配可能出現誤差及匹配異常的情況(Riquelme et al, 2019)。因此，選擇使用的歷史航照品質、時間及 GCPs 的選定，是研究前需考量的限制。

第三章 研究區域

本研究的研究區域為台東利吉惡地，並將觀測範圍設定在台東大橋以北至利吉大橋一帶的利吉惡地地質公園核心區域。此區域於 2020 年 9 月 30 日由台東縣政府公告為利吉惡地地質公園，成為台東縣縣定自然地景。根據《利吉惡地地質公園評估報告書》劃定，利吉惡地地質公園公告的核心區域(圖 3-1)，即利吉村以及富源村內，其核心區劃設的依據地質法第一類地質遺跡和第四類山崩與地滑敏感區進行劃定，為地質地形最脆弱最敏感的區域。利吉惡地地質公園核心區面積約為 1,149,500 平方公尺，南北長 4 公里。園區內除了有利吉惡地觀景平台、富源大峽谷等景點，此區域的邊坡明顯出露(圖 3-2)，因此適合作為觀測目標。

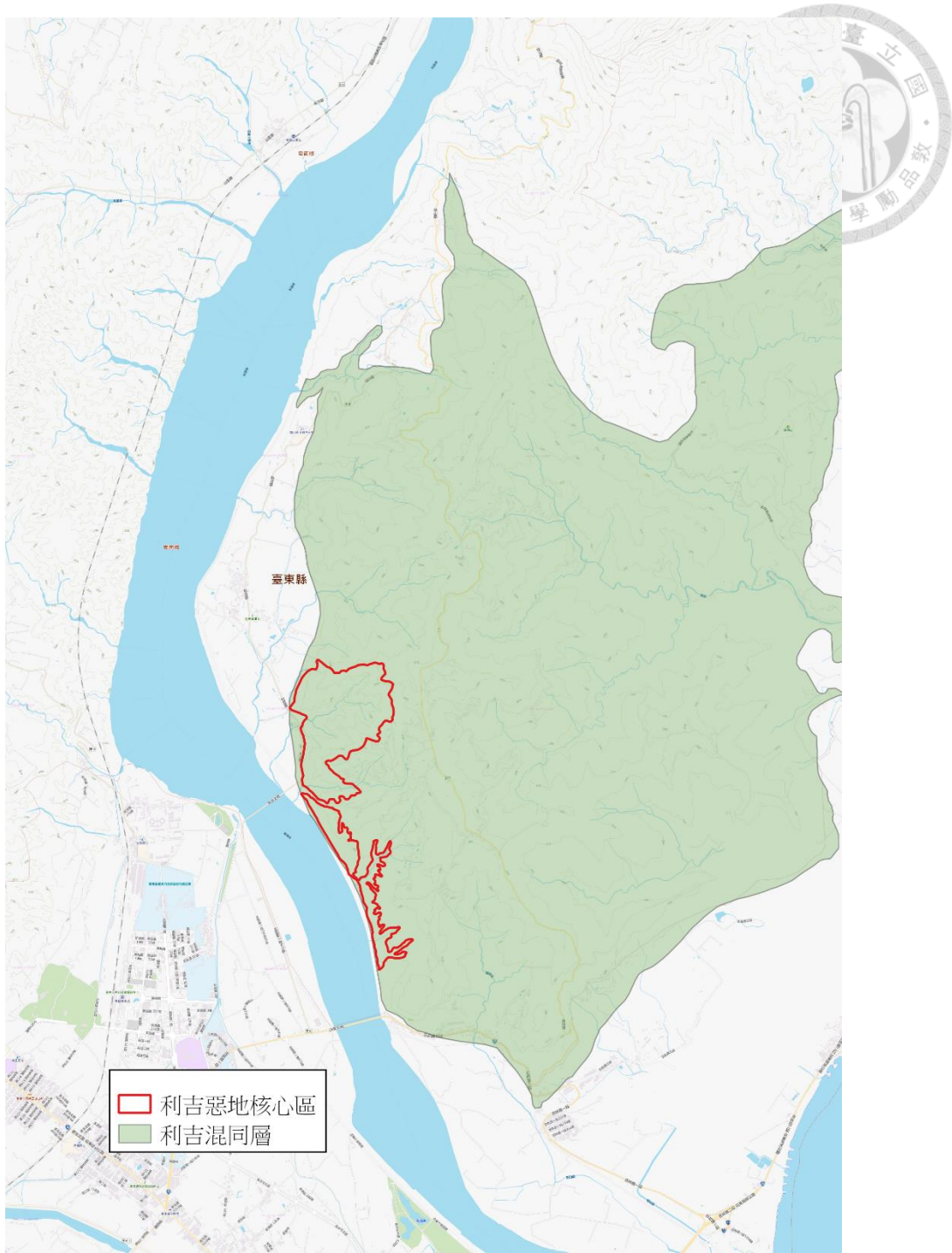


圖 3-1 利吉混同層(綠色區域)於台東地層分佈(改繪自中央地調所五萬分之一地質圖)。紅色區域為利吉惡地地質公園核心區，即本研究的研究區域。



圖 3-2 利吉混同層於台東大橋北邊的利吉惡地地質公園出露邊坡。(2020/07/09)

3.1 利吉混同層

本研究選擇觀測利吉惡地年代際的侵蝕變化。利吉惡地有高侵蝕的特性(Hsu, 1956)，為利吉混同層的一部分。

根據中央地質調查所公告的《五萬分之一地質圖》，利吉混同層主要分佈於海岸山脈西側，南起台東縣台東市台東大橋，北至花蓮縣玉里鎮一帶。此外，利吉混同層也是池上斷層南段及利吉斷層帶上盤前緣的岩層。

利吉層最早由 Hsu(1956)提出，為一包含泥岩、海洋沉積物和蛇綠岩及一些外來岩塊的岩層(Hsu, 1956; Page and Suppe, 1981)。利吉層分佈在縱谷斷層東側的海岸山脈南段玉里至台東，全長約 70 公里，最寬約 10 公里，分佈位置與縱谷斷層平行(陳文山, 1991)，並與縱谷斷層南段地表潛移區域分佈相似(Murase et al., 2013; Thomas et al., 2014; Deffontaines et al., 2017)。

利吉混同層為呂宋島弧和歐亞板塊碰撞前的弧前盆地(Page and Suppe, 1981; Teng and Wang, 1981; Suppe et al., 1981; Lundberg and Dorsey, 1988; Chang et al., 2000; Huang et al., 2008)，並沿著縱谷斷層南段逆衝到卑南山礫岩之上(Hsu, 1956; 陳文山, 1993; 陳文山等, 2008)。關於利吉混同層的形成一直以來都是地形學上

非常有爭議的議題。對於利吉混同層的成因主要的解釋有兩種，一種為沉積作用(崩積作用)形成的傾瀉岩(Olistostrome)(Wang and Chen, 1966; Wang, 1976; Liou et al., 1977; Ho, 1977; Suppe, 1981; Chi et al., 1981; Barrier and Muller, 1984; Teng and Lo, 1985);另一種為構造作用形成，其中又分為隱沒雜岩(Subduction complex)(Biq, 1971; Teng, 1987; Chen and Wang, 1988)及碰撞雜岩(Collision complex)(Barrier and Angelier, 1986; Chang et al., 2000; Chang et al, 2001; Malavieille et al., 2002; Huang et al., 2008; Chen et al., 2017)。

3.2 利吉惡地邊坡研究

利吉混同層上裸露地區，鬆軟的泥岩形成惡地地形(Hsu, 1956)，侵蝕強烈且呈現崎嶇深峻的溝谷(王鑫, 1989)，其比較明顯出露的地區分佈在富源和利吉一帶。過去學者皆注重討論利吉層的成因、岩性與地表潛移，對利吉混同層與利吉惡地高侵蝕的特性只有進行 1-2 年短期的侵蝕探針觀測(林俊全, 1995)以及短期的降雨模擬觀測(林俊全&任家弘, 1996)，若需要解釋幾十年較長尺度且穩定的侵蝕特性則存在其限制。

利吉惡地所在區域歷史航照保存完整，除了有記錄以及明顯的高侵蝕活動區域，此區域也為利吉斷層上盤區域。因此，尋找一個可以解釋利吉惡地年代際尺度變化的方法在解釋利吉惡地地表變化以及討論與構造活動的關係上都很重要。本研究以利吉惡地地質公園規劃之核心區進行本研究的研究區域。

第四章 研究方法



4.1 研究架構

為建立利吉惡地數十年的侵蝕模式及侵蝕分佈，本研究使用歷史航空影像結合運動回復結構技術，重建利吉惡地分佈地區之 DSM，流程如圖 4-1 所示。由於影像的格式及品質不一，因此需要先進行篩選以及裁切等再進行建模。本研究的控制點取自全台 5m 數值高程模型(Digital elevation model, 以下簡稱 DEM)。在進行精度評估後產製各時期數 DSM，並進行數值模型相減(Digital elevation model of difference, 以下簡稱 DoD)以取得利吉惡地在不同時期高程上的差異，分析各年侵蝕模式以及侵蝕量。最後進行田野調查，確認使用歷史航空照片監測年代際地表變化觀測的成果，並進行利吉惡地地形演育和使用歷史航照結合 SfM 方法的成果與限制。

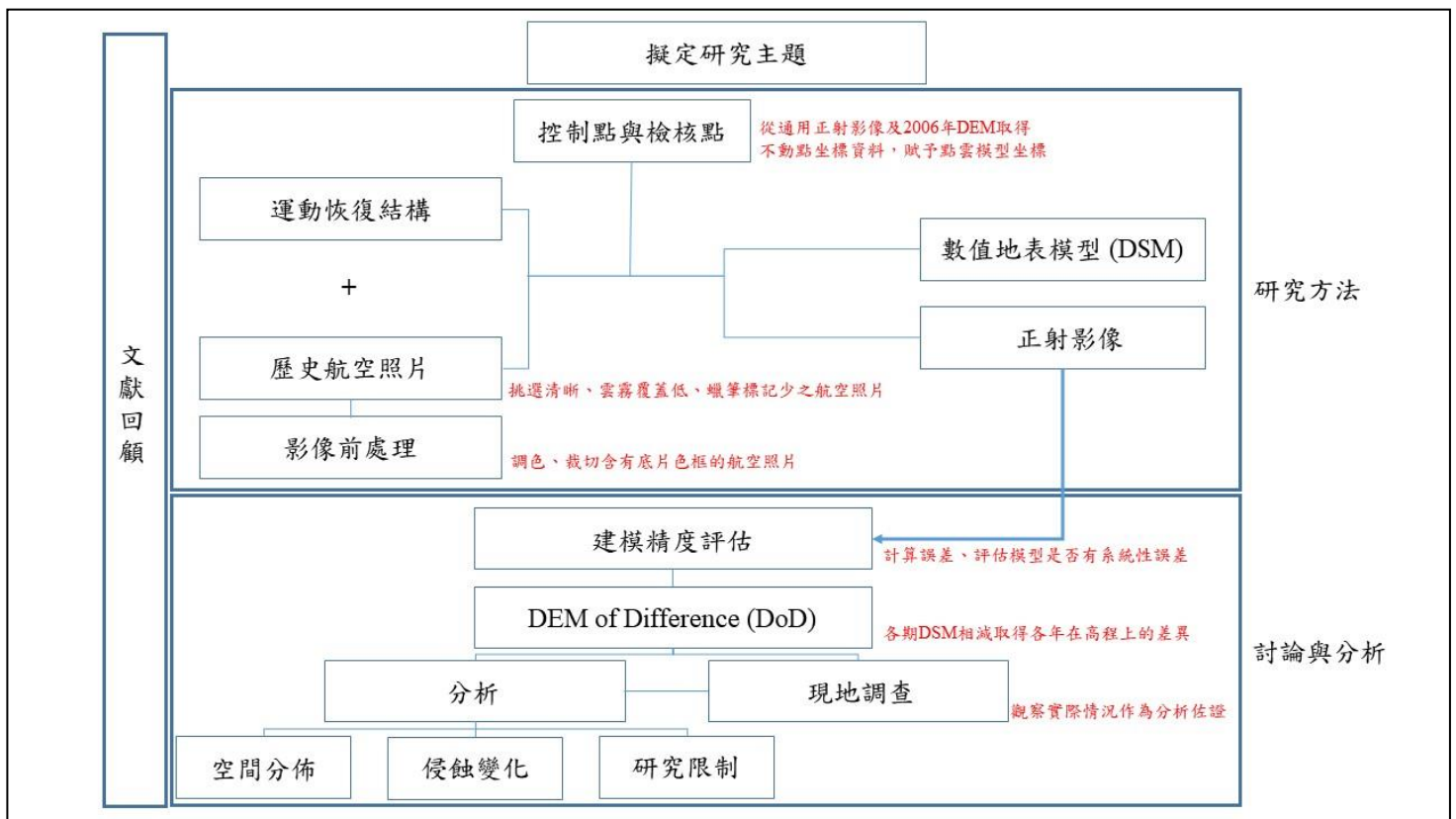


圖 4-1 研究流程圖。



4.2 研究資料

本研究使用 1956 年、1964 年、1974 年、1984 年，以及 1993 年台東市以北利吉惡地周邊的歷史航空照片，每一期照片的間隔時間約為 10 年，並選用時間相近且拍攝完整的年份作為研究材料。由於需要考量後續需要點選控制點，因此選取照片時除了選擇有拍攝到利吉惡地的範圍，也需將照片選取範圍擴大至利吉惡地周邊有聚落、道路或田埂等明顯特徵物的地區。

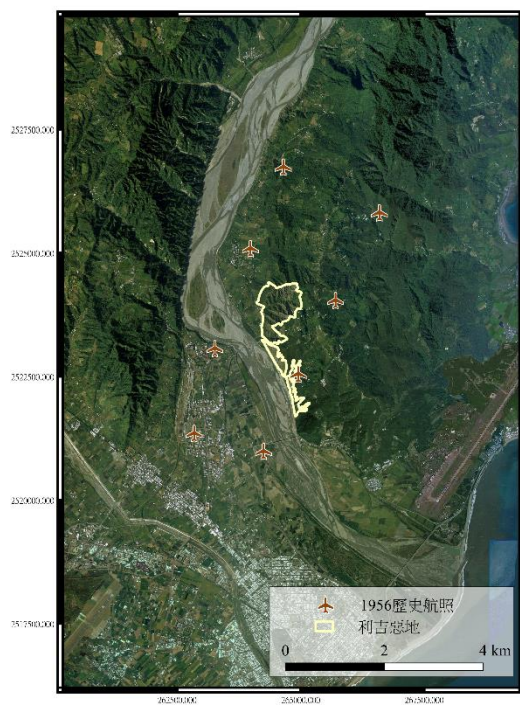
歷史航照的選擇(表 4-1)上，1950 年代的歷史航照選用了 8 張 1956 年的航空影像，為中華民國空軍於 1956 年 6 月 28 至 29 日拍攝，飛行高度約為 10000 英尺，相機焦距為 152.4mm，飛行任務編號為 2W8G-17；1960 年代的歷史航照選用了 11 張 1964 年的航空影像，為中華民國空軍於 1964 年 8 月 6 日拍攝，飛行高度約為 16000 英尺，相機焦距為 152.4mm，飛行任務為 53-054；1970 年代的歷史航照選用 11 張 1974 年的航空影像，為行政院農業委員會林務局農林航空測量所(簡稱農航所)於 1974 年 6 月 22 日及 7 月 28 日拍攝，飛行高度約為 25000 英尺，相機焦距為 208.25mm，飛行任務代碼為 63-016 及 63-024。1956 年至 1974 年的歷史航空影像目前經掃描典藏於中央研究院人社中心地理資訊科學研究專題中心。

1980 年代選用了 15 張 1984 年的航空照片，為農航所於 1984 年 6 月 30 日及 7 月 28 日拍攝，使用 RMKA 15/23 相機拍攝，相機焦距為 153.049mm；1990 年代選用了 20 張 1993 年的航空照片，為農航所於 1993 年 4 月 29 日及 9 月 20 日拍攝，使用 RC10 相機拍攝，相機焦距為 152.99mm。1984 年和 1993 年的歷史航空照片目前為農航所典藏。

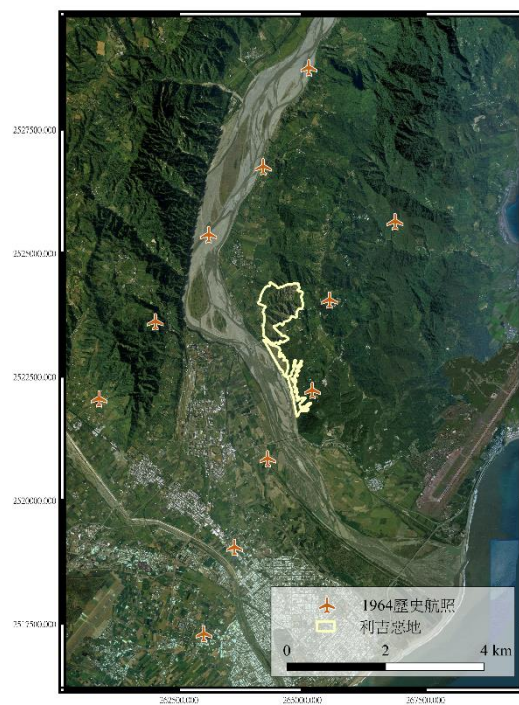
各時期選用的歷史航空照片像主點估計坐標如圖 4-2 所示。

拍攝日期	航帶編號	航高(英呎)	相機	焦距	影像來源
1956/06/28, 1956/06/29	2W8G-17	10000		152.4mm	中央研究院 人文社會科 學研究中心
1964/08/06	53-054	16000		152.4mm	
1974/06/22, 1974/07/28	63-016, 63-024	25000		208.28mm	
1984/06/30, 1984/09/07	73p021		RMKA 15/23	153.049mm	行政院農業 委員會林務 局農林航空 測量所
1993/04/29, 1993/09/20	82p034, 82p124		RC10	152.99mm	

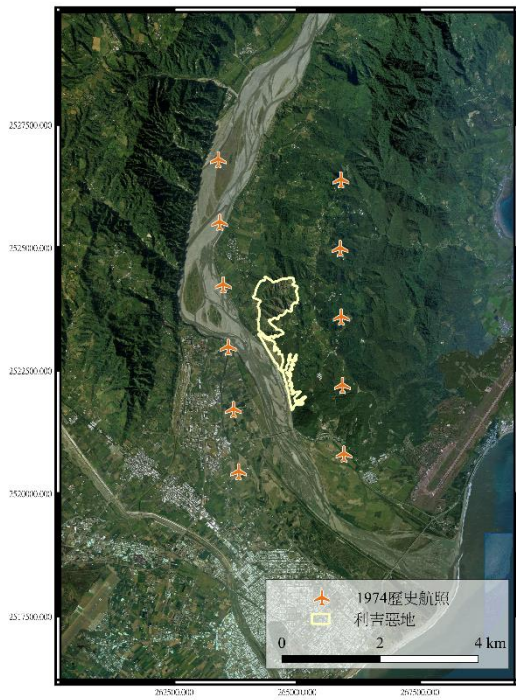
表 4-1 1956 年至 1993 年利吉惡地歷史航空影像參數。灰色格子為資料從缺。



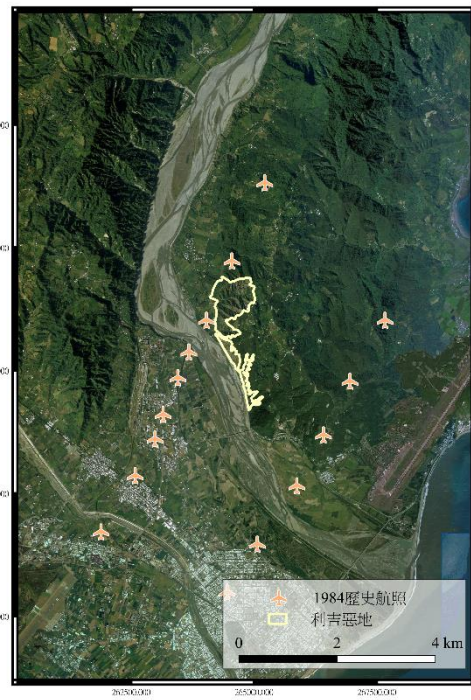
1956 年



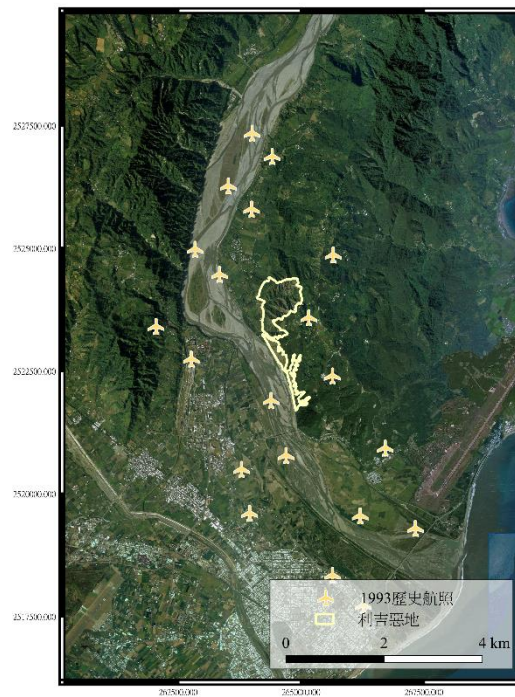
1964 年



1974 年



1984 年



1993 年

圖 4-2 各時期選用歷史航照分佈位置。飛機標示為航照估計之像主點。底圖為內政部國土測繪中心的通用正射影像。

4.3 各年代數值高程模型產製

本研究為取得過去各時期的數值地表模型，因此使用 Agisoft Metashape 三維建模軟體進行影像建模，其概念如圖 4-3 所示，即將歷史航照匯入軟體，並產製數值地表模型 (Digital surface model, 以下稱為 DSM) 以及正射影像。在產製各年代地形模型前，由於建模需要考量並排除不確定因素，因此需要進行影像前處理，並且需要賦予模型控制點，最後也需要進行模型的精度評估。

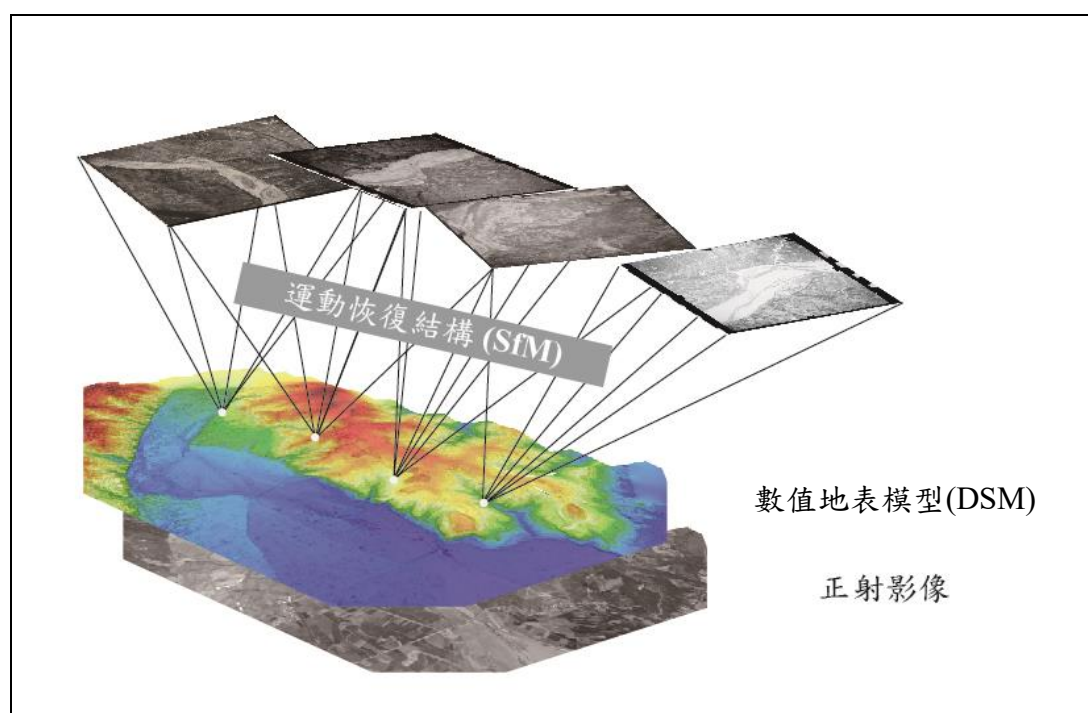


圖 4-3 使用歷史航空照片結合 SfM 技術示意圖

4.3.1 歷史航空影像前處理

歷史航空照片為幾十年前拍攝之照片，多為底片經後期掃描。底片在多年保存下依然有褪色、發霉或色偏等可能。因此在利用歷史航空影像產製三維模型前，需要先進行影像的挑選，去除不適合用於建模的影像，也需要調整可用影像的參數。

由於歷史航空影像多為底片掃描檔，因此數化後的檔案常保留原始底片的底

片參數色標尺、白框、框標、彩色蠟筆標記等(圖 4-4)。若直接將影像匯入建模軟體進行建模則會影響點雲的判別，也會將不必要的點雲資料匹配如模型，影響建模結果。因此在獲取歷史航空影像後需要先判釋影像是否有這些影像因數，並進行裁切。此外，由於歷史航空影像不是同一時間拍攝的影像，使影像會呈現陰影或色調不一的情況，影響影像的點雲匹配，因此也需要進行影像的色階微調。本研究使用電腦內建的相片預覽軟體進行每一張相片的亮度和陰影調整，並使用影像編輯軟體 Fast Stone Image Viewer 進行相片的裁切，盡量使影像的大小、亮度、陰影等一致。

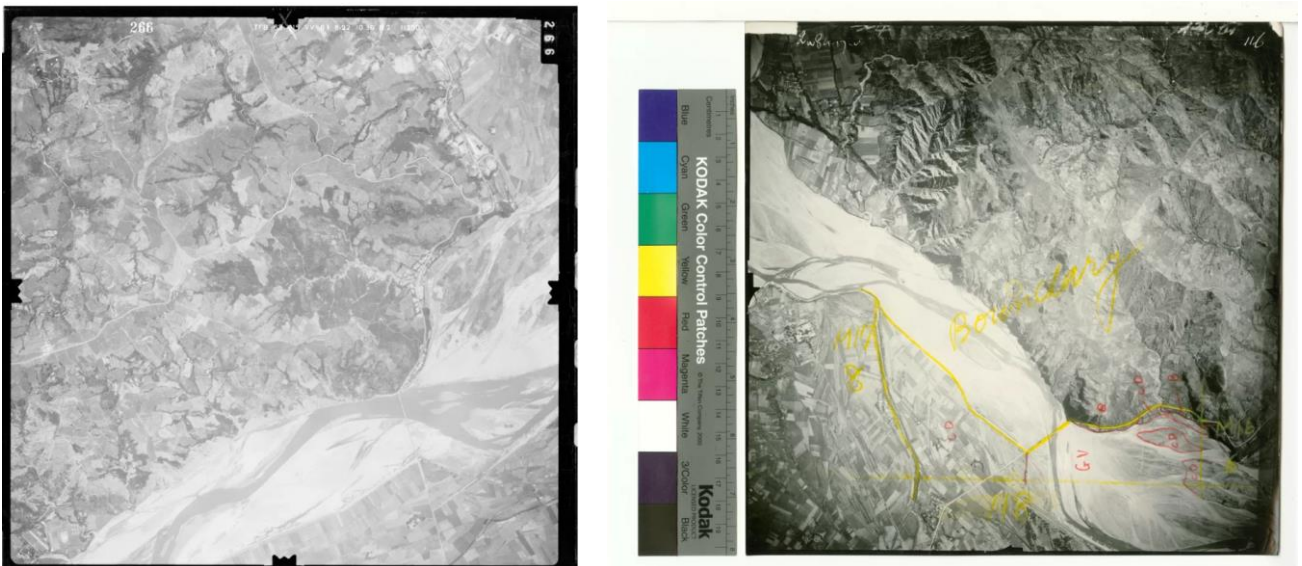


圖 4-4 歷史航空影像的原始掃描檔案樣圖。原始檔案保留了原始的框標、編號標記(左圖上方白色文字標記)，以及底片參數色標尺(右圖左側彩色標記)、白框、彩色蠟筆標記(右圖影像內黃色及紅色標記)，需要進行裁切、調色等影像前處理。

4.3.2 控制點與檢核點

現今所取得的歷史航空影像皆為掃描數化成影像檔案，影像本身並不會有坐標等空間資訊，因此在進行建模時必須規劃賦予影像控制點進行模型約制。由於無法取得過去的坐標，因此我們能參考現今能取得空間坐標的圖資。同一區域在不同年代地景都會有所改變，其會被侵蝕、都市更新、道路拓寬等因素影響。本研究比對過去各期歷史航照、國土測繪中心 2018 年通用正射影像，以及中研院百年歷史地圖平台的歷史圖資，找出不動特徵物(圖 4-5)作為本研究的控制點。本研究所選定的不動特徵物為在多期影像比對後變化不大的區域，例如相近的道路路口、田埂，以及鐵道與道路邊界等。隨有道路拓寬和下陷等疑慮，但這些地方為能截取的影像中最穩定且變化不大的區域，因此本研究使用這些位子截取控制點和檢核點。本研究使用內政部地政司衛星測量中心於 2003 年至 2006 年間測製的全台 5m DEM 取得高程，並套疊通用正射影像取得平面坐標。控制點的選取除了選擇不動特徵物外，也必須選擇能圍繞在研究區或是在研究區內的地方，使研究區內的模型能被約制，還原近真實的地表起伏。

過去使用歷史航空影像進行 DEM 產製的研究也有使用現今 DEM 取得高程資料，其模型誤差約為數公尺的範圍(Carvalho et al., 2021)。本研究使用全台 5m DEM 模型取得高程資料，因此模型的控制點與檢核點誤差也控制在 5m 內。



圖 4-5 在不同年間選取相同且變化不大的特徵物作為控制點。以 1956 年(左圖)1974 年(右圖)的歷史航照為例，同一區域的歷史航照在比對確認沒有改變後可使用道路交界處作為控制點的選址。

4.3.3 Agisoft Metashape

本研究使用 Agisoft Metashape Professional(以下簡稱 Metashape)作為產製地表模型的工具，版本為 1.6.3。Metashape 為 Agisoft 公司開發之影像建模軟體，為現今主流的 SfM 技術的攝影測量軟體之一。過去學者比對了目前常用來進行 SfM 的商用軟體結合歷史航空照片進行影像建模，發現使用 Metashape 進行歷史航空照片的建模成果最好，匹配成果和精度都比其他商用軟體理想(Mölg and Bolch, 2017; 林姍安, 2020)。因此，本研究使用 Metashape 進行歷史航空影像的影像 3D 建模。

本研究使用 Metashape 進行各時期歷史航空影像的地表高程模型和正射影像產製。Metashape 的操作流程主要如下：

- (一) 歷史航空影像在進行前處理後匯入 Metashape，在調整坐標投影系統至 TWD 97(EPSC:3826)，並輸入歷史航照的相機參數(如：焦距)。
- (二) 調整匹配點雲上限後進行點雲匹配產製連接點(tie point)，本研究設定準確度為 High，Key point limit 為 50,000，Tie point limit 為 25,000。
- (三) 將選取的控制點檢核點匯入 Metashape，並標記於有顯示特徵物的影

像，隨後進行光束平差(optimize camera)，檢查控制點與檢核點精度誤差。

- (四) 進行密點雲(dense cloud)產製，本研究設定 Depth maps 品質為 High，Filtering mode 為 Aggressive。
- (五) 進行 DEM 產製，模型採用的資料來源為密點雲。
- (六) 進行正射影像產製。
- (七) 匯出建模報告書，進行建模數據檢視。

4.3.5 資料驗證

為確保研究區的建模資料是還原近真實的樣貌，利用歷史航空影像所產製的模型需進行精度檢核。本研究使用以下三種方法進行檢核：

- (一) 先使用 Metashape 在賦予控制點與檢核點後，進行光束平差所取得的誤差進行初步判釋。
- (二) 將 Metashape 計算出的各控制點和檢核點點位水準及垂直方向誤差繪制誤差分佈圖，檢視模型是否有系統性誤差。
- (三) 隨機於研究區內選取不動點獲取其高程，並同時比對同個地方全台 5m DEM 的高程進行相關性分析比對，透過不同資料不動點的高相關性來驗證模型誤差。

在進行模型精度檢核，確認誤差後，方可進行模型的分析及討論。

4.4 檢視 SfM 與歷史航照觀測侵蝕的流程與限制

透過 SfM 技術及歷史航空影像產製的各時期 DSM 和正射影像，可以檢視使用 SfM 技術及歷史航空照片運用在台灣地表監測上，其可行性以及能達到的解析度。除了討論這些 DSM 的準確性，本研究也會進行分析整理在使用 SfM 技術及歷史航空照片時，對於歷史航空照片的挑選及前處理、進行三維建模，以及精

度評估的研究流程，並列出其觀測地表侵蝕變化上，其潛在的研究限制和注意事項。



4.5 侵蝕模式與侵蝕量分析

在產製出各年的 DEM 後，即可匯入地理資訊技術軟體 QGIS 進行分析。本研究先將各期 DSM 產製 ELSAMAP (Elevation and Slope Angle Map)。ELSAMAP 為向山崇及佐々木壽於 2007 年提出的地圖詮釋概念，使用 ELSAMAP 觀測可以明顯觀測地形的起伏以及變化。本研究將各期 DSM 匯入至 QGIS，並將高程資料進行高度分類，並套疊由當時期 DSM 產製的坡度並進行透明度調整，即完成 ELSAMAP 的製作。

除了產製各時期的 ELSAMAP，本研究將各期 DSM 進行 DoD 相減。使用 DoD 方法可將各年的 DEM 相減，即能取得不同年代的高程變化量。此方法可以與全台 5m DEM 進行相減，觀察本研究選定的不動特徵點變化，進而評估模型誤差。此外，DoD 方法也能觀測研究區侵蝕分佈，計算研究區域的侵蝕體積，估算平均侵蝕速率。在計算的過程中，同時使用偵測極限(limit of detection, 以下簡稱 LOD)作為侵蝕體積計算的誤差。LOD 的計算方法為三維建模計算之均方根誤差(root mean square error, RMSE)的標準差，LOD 的計算公式如下：

$$LOD = \sqrt{(E_{before})^2 + (E_{after})^2}$$

其中， E_{before} 為 DoD 相減的前期模型 RMSE 誤差， E_{after} 為 DoD 相減的後期模型 RMSE 誤差。

使用 LOD 可以估計 DSM 在 DoD 方法中的不穩定區塊(uncertainty cube)，並使用以下公式計算 DoD 體積誤差(E_{DoD})：

$$E_{DoD} = n_{pix} \times A_{pix} \times LOD$$

其中， n_{pix} 為 DoD 計算到的網格數量， A_{pix} 為網格面積， LOD 為偵測極限。此計算方法過去使用於影像建模產製的 DSM 時，使用 DoD 方法估算誤差的方法

(Wheaton et al., 2010; Carvalho et al., 2021)。

本研究在研究區使用 DoD 技術進行相減所測得的侵蝕邊坡可在 QGIS 內進行剖面監測。剖面的劃設依研究區的地形在不同的區域以不同的邊坡方向各畫一條剖面觀測，若是條狀研究區則以該區域北中南平均規劃剖面。本研究透過劃設在研究區的剖面，觀測利吉惡地侵蝕邊坡的後退模式，並結合泥岩惡地過去的觀測資料和實地現場調查進行分析與探討。

4.6 研究假設

本研究針對研究目的及方法提出以下假設：

1. 在歷史航空照片各期的時間，研究區域發生侵蝕的量可以達到數公尺以上，並且能在邊坡裸露的利吉惡地區域觀測到隨著時間的侵蝕變化。
2. 本研究選用自 1950 年代至今的不動點作為本研究的控制點與檢核點。不動點有可能經歷道路拓寬、塌陷、重新鋪設等改變。若在歷史航照與現今的通用正射影像比對為輪廓相近且道路寬度變化不大，本研究將其定義為沒有改變的不動點。
3. 本研究使用歷史航照建模產製的結果為 DSM，也就是說，除了地表高程外其數值包括樹高及建築高等，因此在進行 DoD 相減時數值會包含所有地表上的變化。考量利吉惡地邊坡裸露的特性，明顯侵蝕的邊坡理論上受植被影響小，因此本研究觀察邊坡 DoD 變化時，在高程減少的區域忽略植被的變化。

第五章 研究結果



本研究將研究成果分成四部分。第一部分為使用 Metashape 建模的精度誤差，第二部分為建模所產製的 DSM 和正射影像，第三部分為使用各時期 DSM 進行 DoD 相減之成果，第四部分為侵蝕以及估算。

5.1 各時期建模成果精度誤差

本研究使用 1956 年至 1993 年的歷史航空照片，並透過 Metashape 重建例如 5 個時期的 DSM。各時期使用歷史航空照片產製之點雲模型，需賦予模型控制點及檢核點進行光束平差來檢視模型精度。本研究選用了分佈在利吉惡地周邊的 28 個不動特徵點，如圖 5-1 所示。其中，控制點和檢核點的選取會依航照覆蓋的區域進行調整，所使用的點位如附件 1 所示。

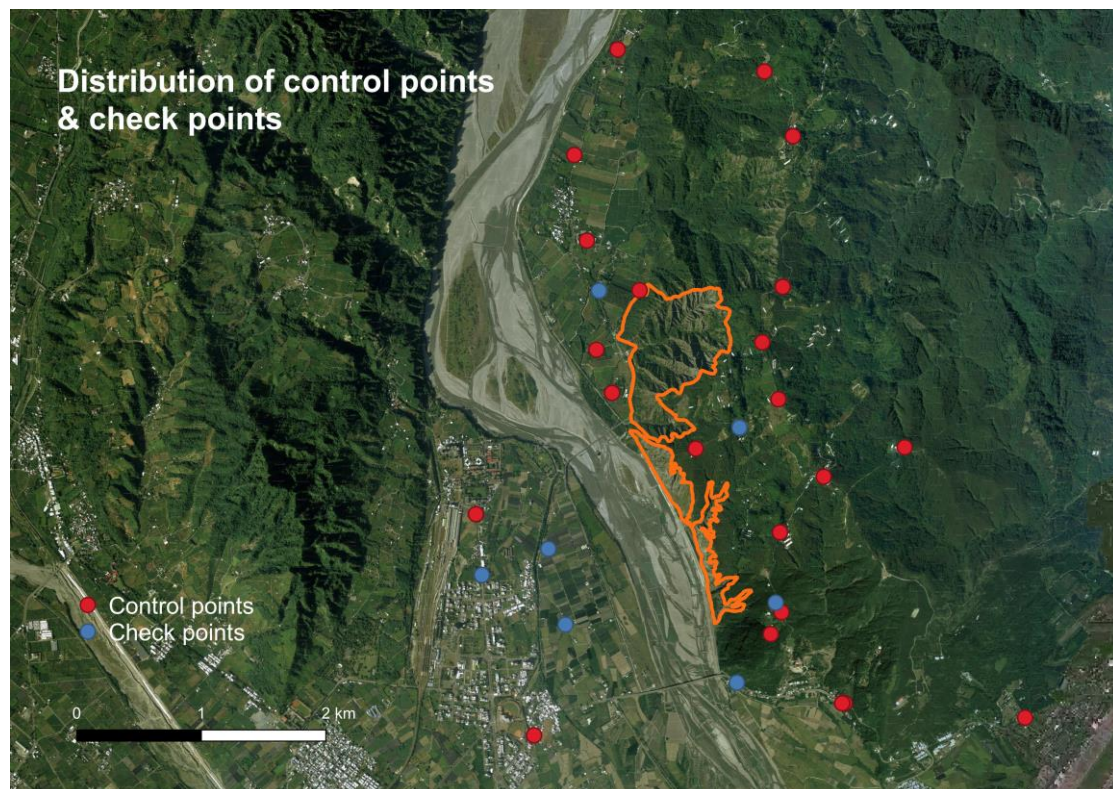


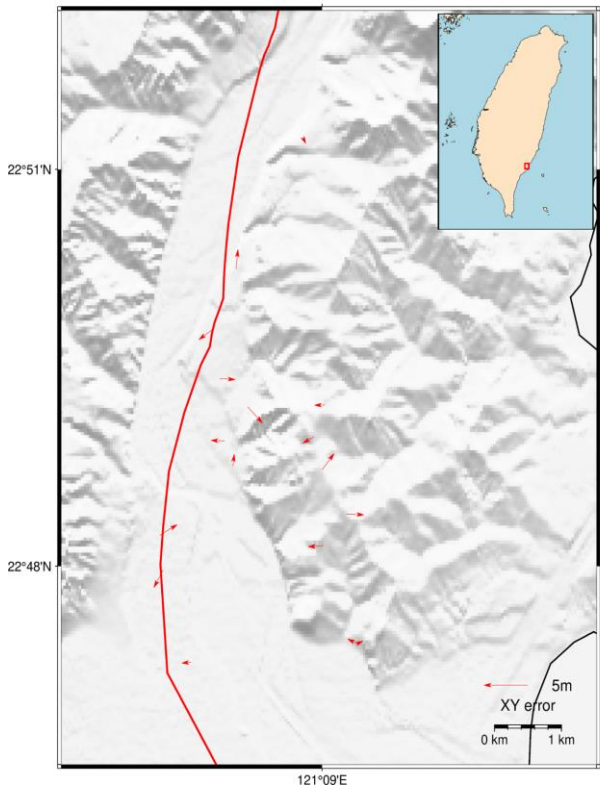
圖 5-1 控制點(紅)與檢核點分佈。橘色區域為利吉惡地地質公園區域。

在賦予控制點和檢核點進行光束平差檢視模型精度(表 5-1)後，各年代的點雲模型的水準誤差及垂直誤差最高為 1956 年($\pm 3\text{m}$)，因此可知，本研究各時期的建模整體的模型精度在 3 公尺以內。以整體誤差結果來看，誤差隨著航照年代越新而越小，並且本研究仍然在預期精度誤差範圍內。透過誤差分佈(圖 5-2 至圖 5-6)觀察可知，本研究誤差無論在水平方向(xy 方向)和垂直方向(z 方向)皆沒有出現系統性誤差，僅存在隨機誤差。

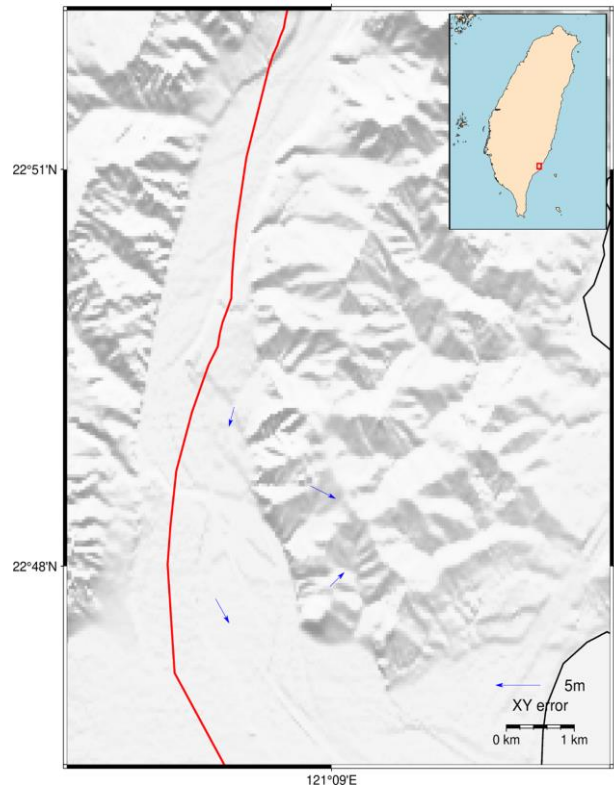
年代	影像數量	RMSE (m)		水準誤差 (m)		垂直誤差 (m)	
		控制點	檢核點	控制點	檢核點	控制點	檢核點
1956	8	± 1.9	± 3	± 1.9	± 2.5	± 0.9	± 1.1
1964	11	± 1.8	± 3	± 1.6	± 2.8	± 0.9	± 1.2
1974	11	± 1.8	± 2.6	± 1.7	± 2.7	± 0.8	± 1.4
1984	15	± 1.8	± 2.8	± 1.8	± 2.8	± 0.8	± 1.1
1993	20	± 1.7	± 2.3	± 1.6	± 2.2	± 0.6	± 0.7

表 5-1 各年段使用之影像數量及誤差。

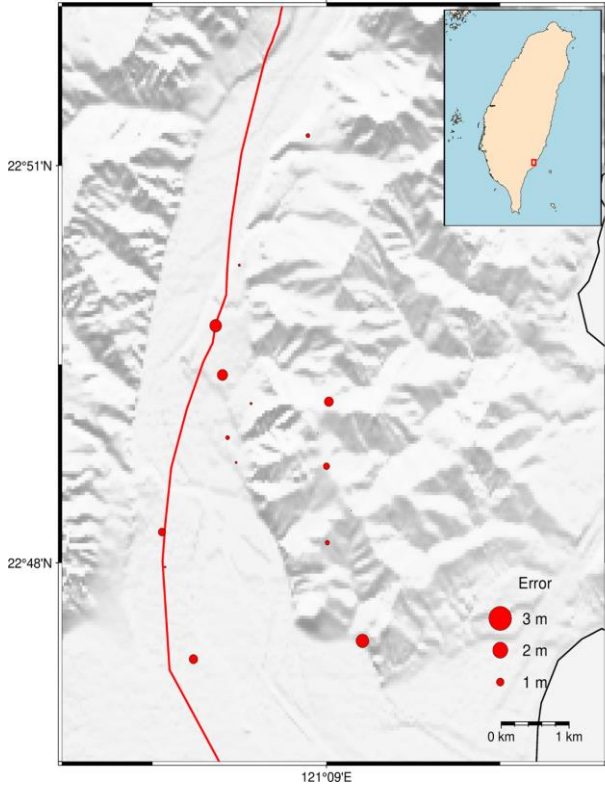
Distribution of control points xy error (1950s)



Distribution of check points xy error (1950s)



Distribution of control points z error (1950s)



Distribution of check points z error (1950s)

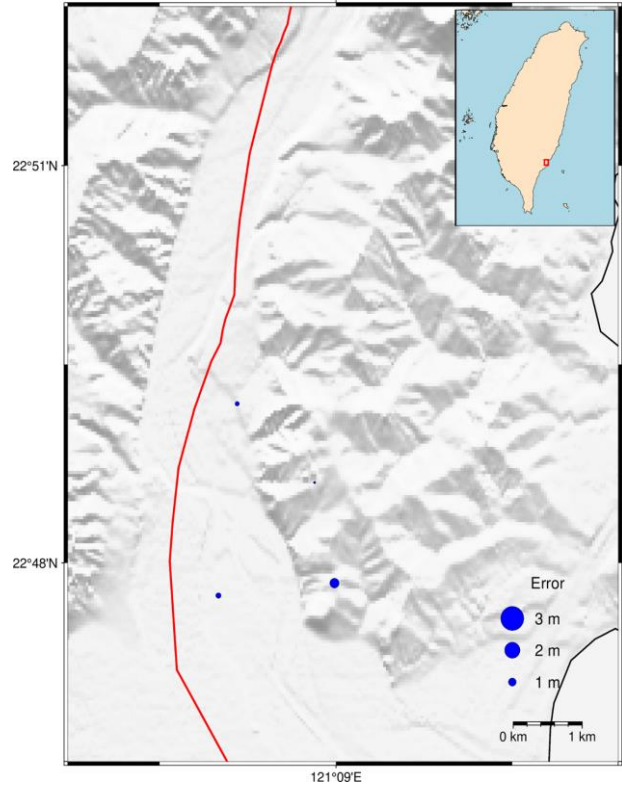
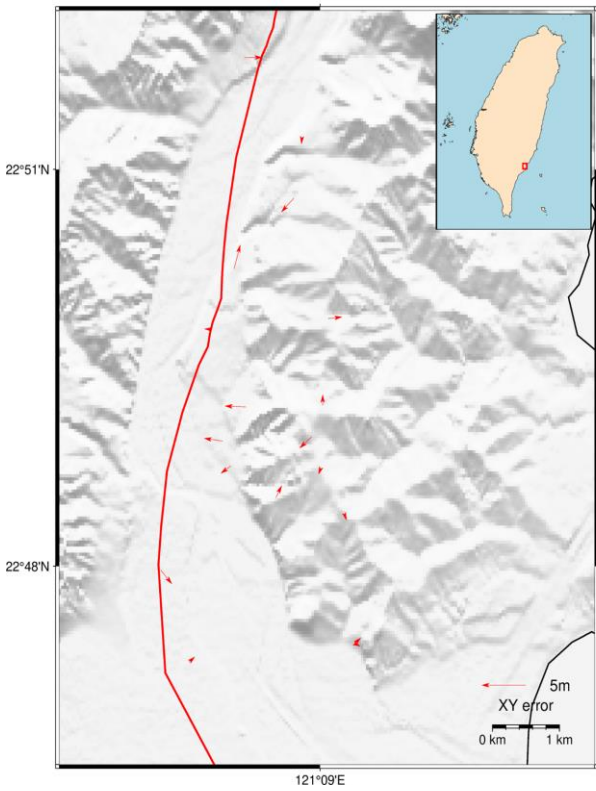
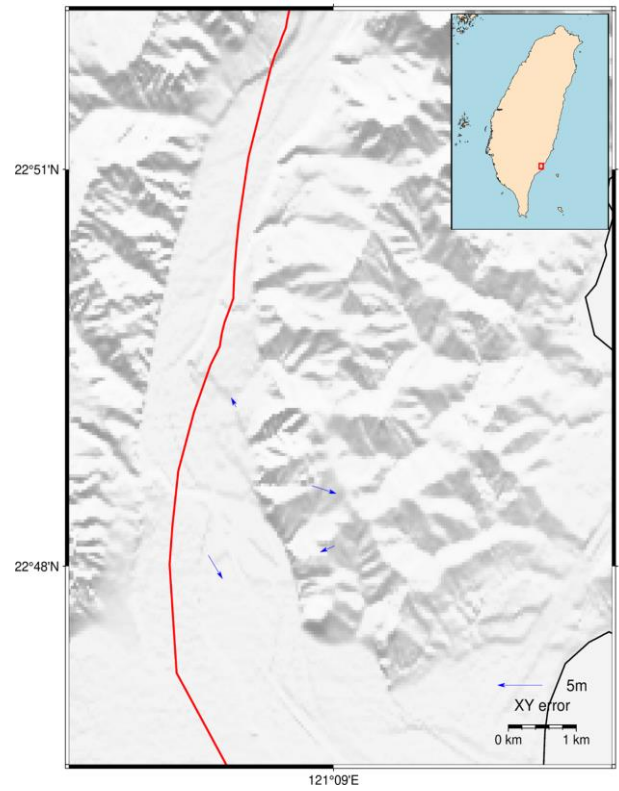


圖 5-2 1956 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。

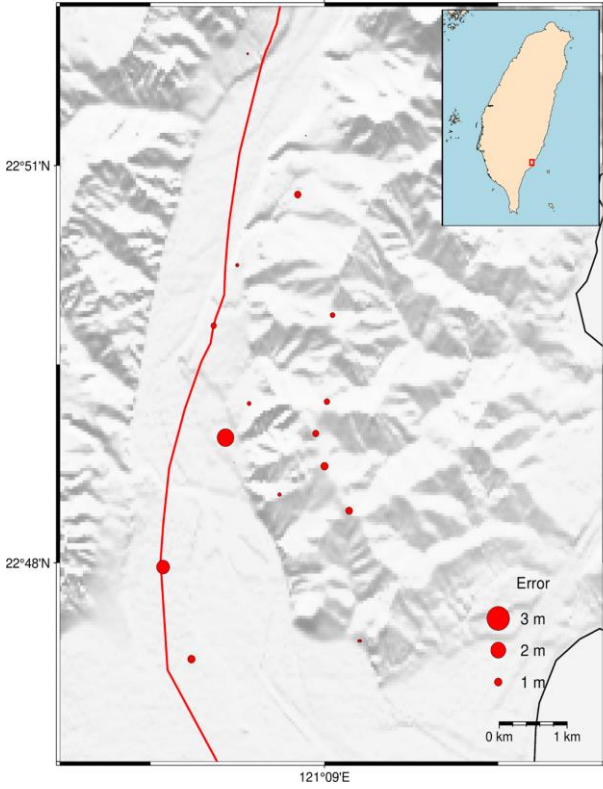
Distribution of control points xy error (1960s)



Distribution of check points xy error (1960s)



Distribution of control points z error (1960s)



Distribution of check points z error (1960s)

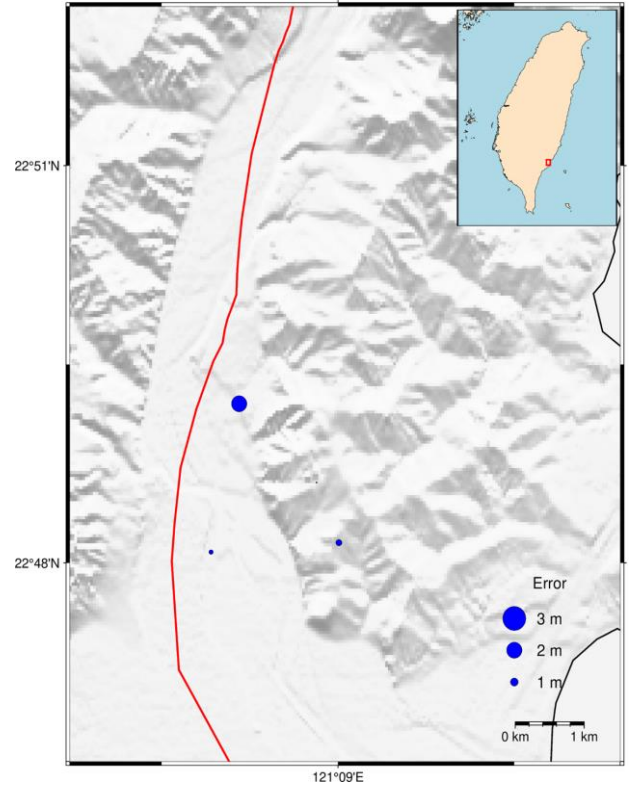
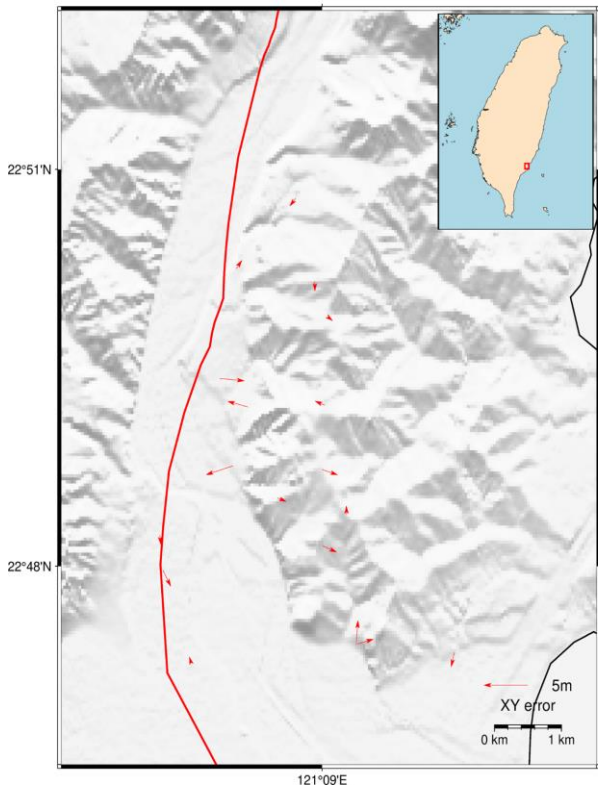
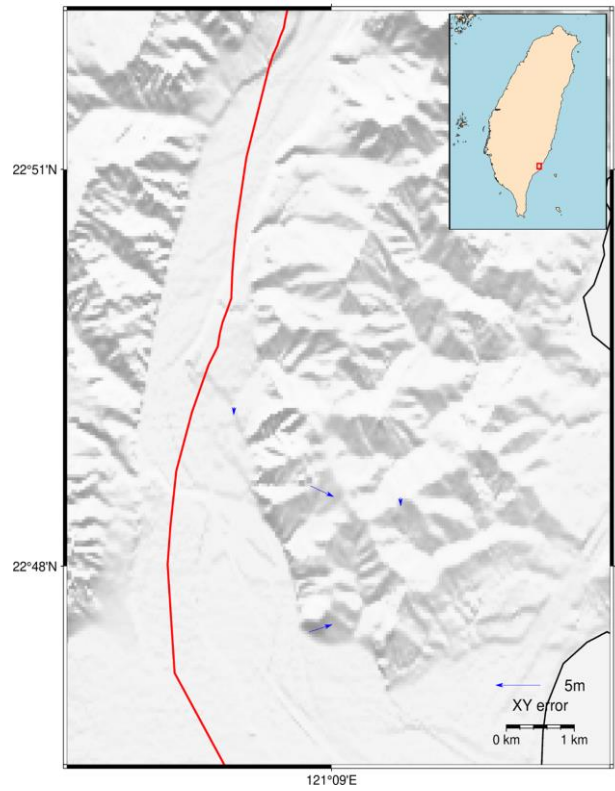


圖 5-3 1964 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。

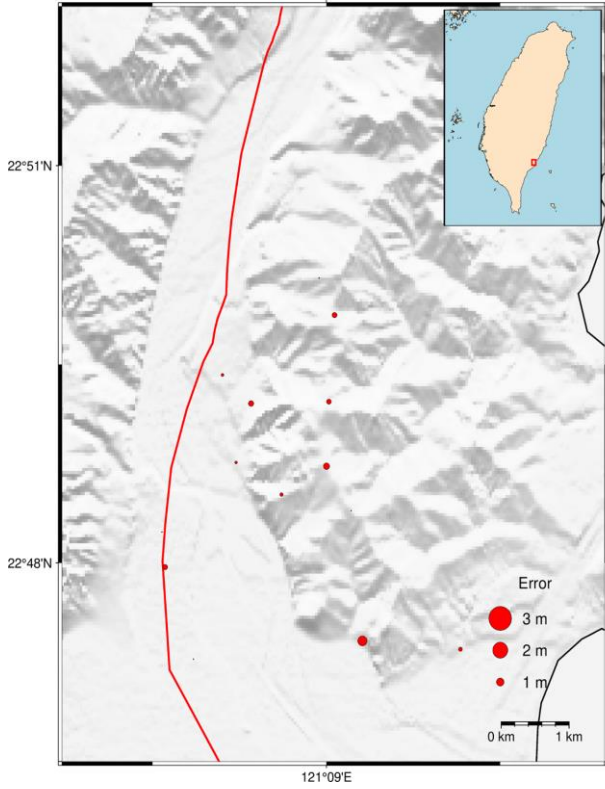
Distribution of control points xy error (1970s)



Distribution of check points xy error (1970s)



Distribution of control points z error (1970s)



Distribution of check points z error (1970s)

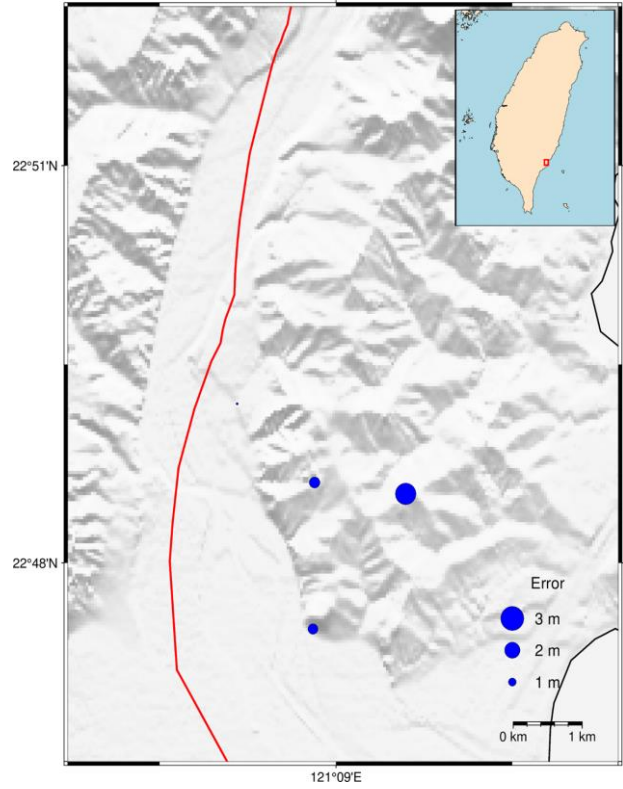
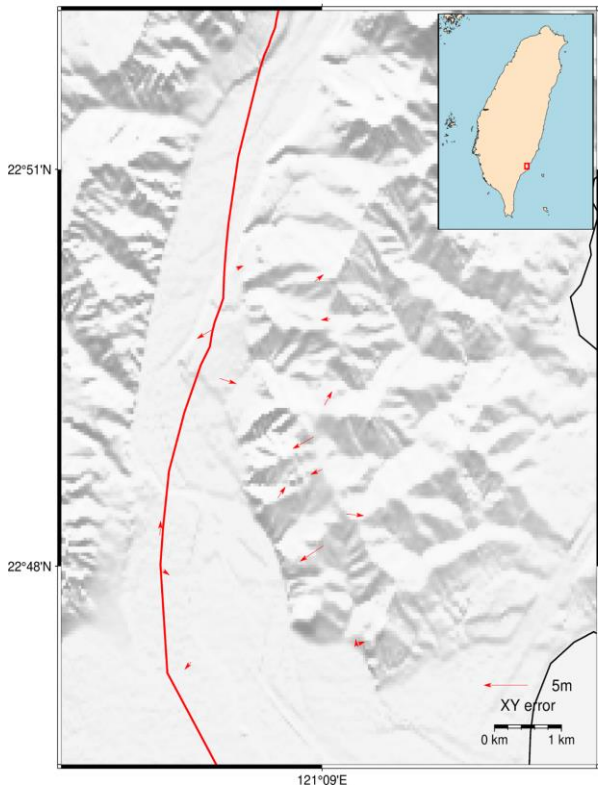
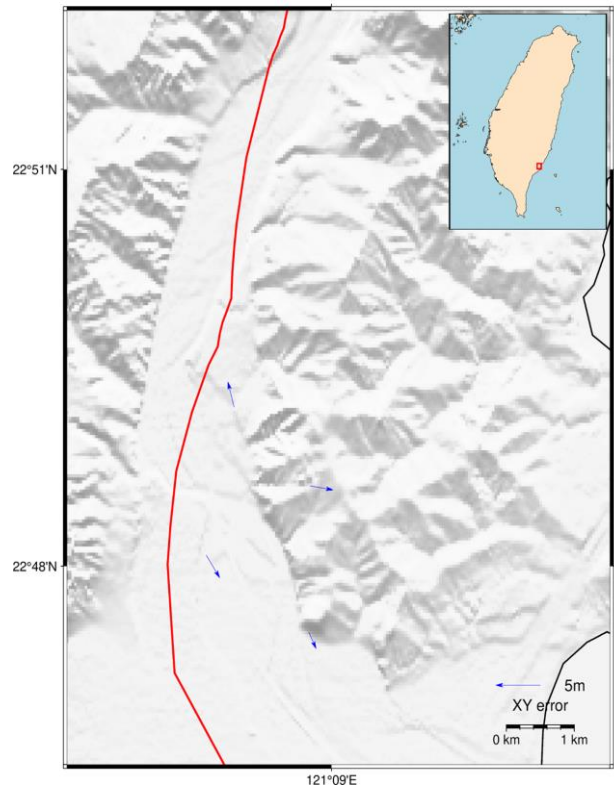


圖 5-4 1974 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。

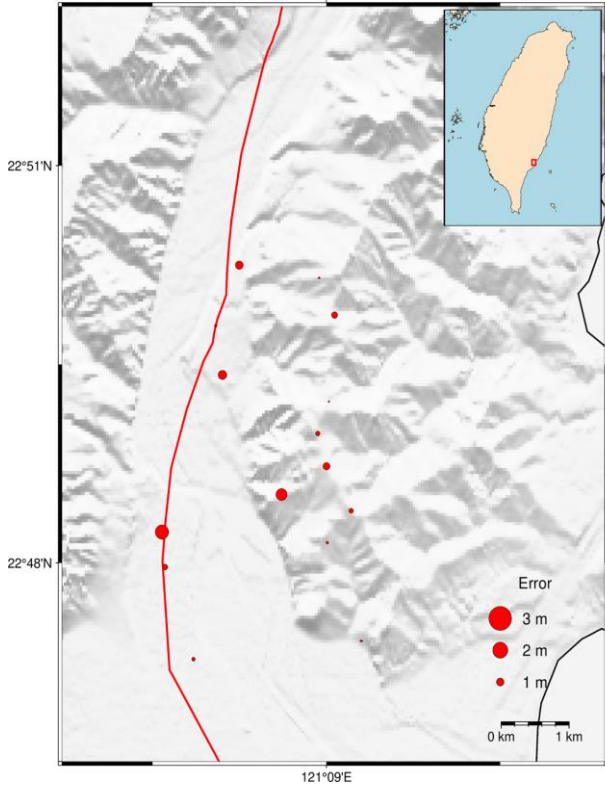
Distribution of control points xy error (1980s)



Distribution of check points xy error (1980s)



Distribution of control points z error (1980s)



Distribution of check points z error (1980s)

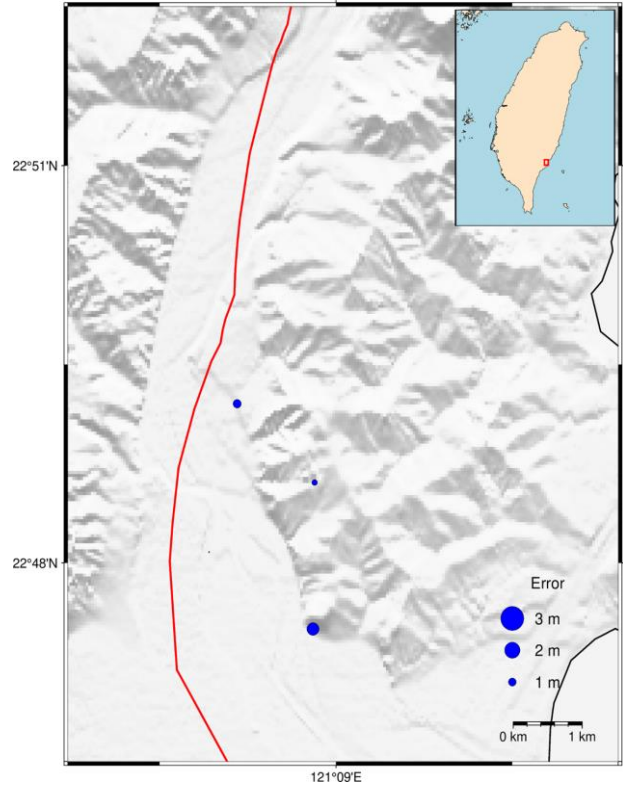
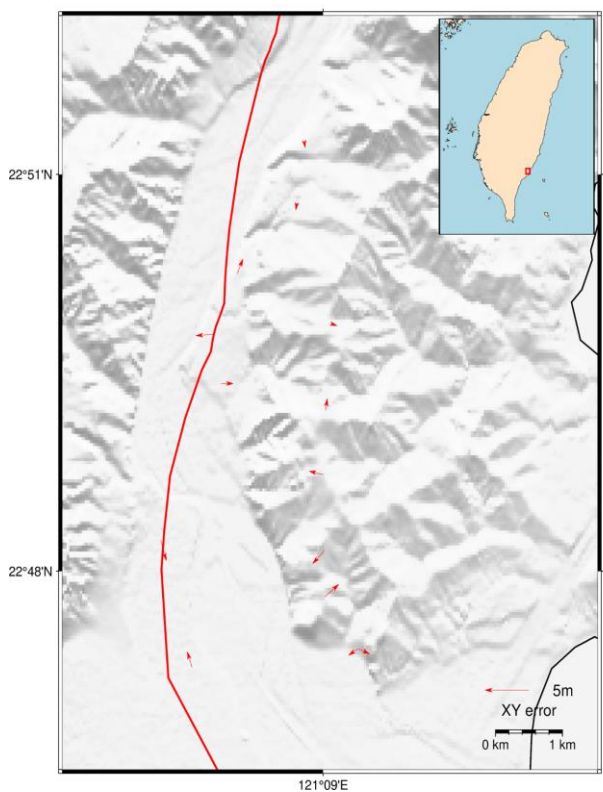
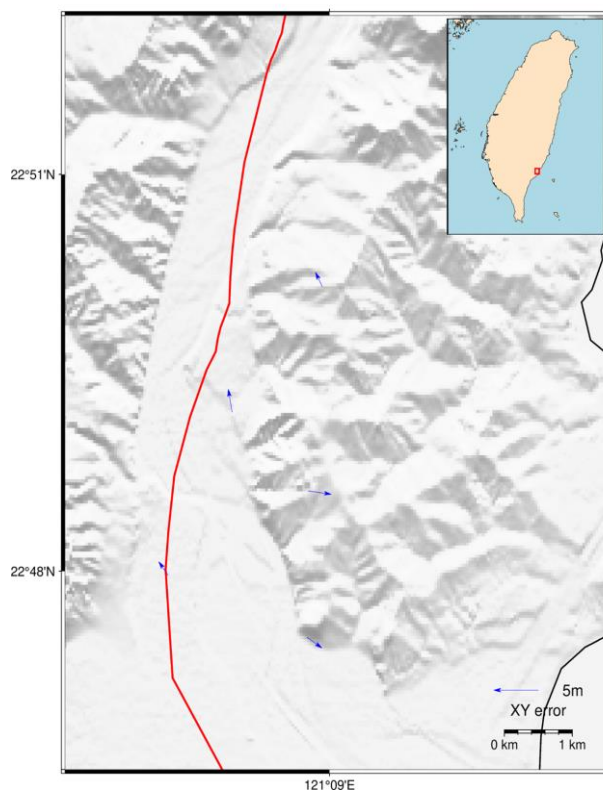


圖 5-5 1984 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。

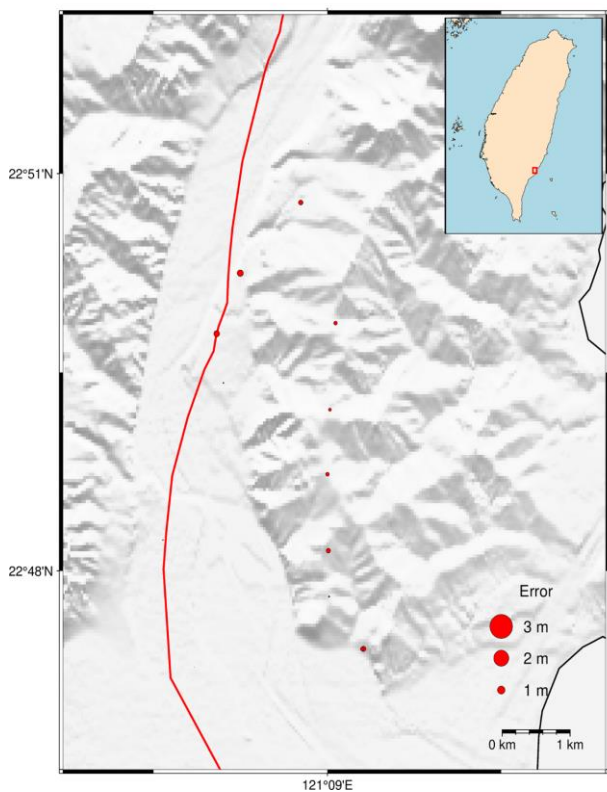
Distribution of control points xy error (1990s)



Distribution of check points xy error (1990s)



Distribution of control points z error (1990s)



Distribution of control points z error (1990s)

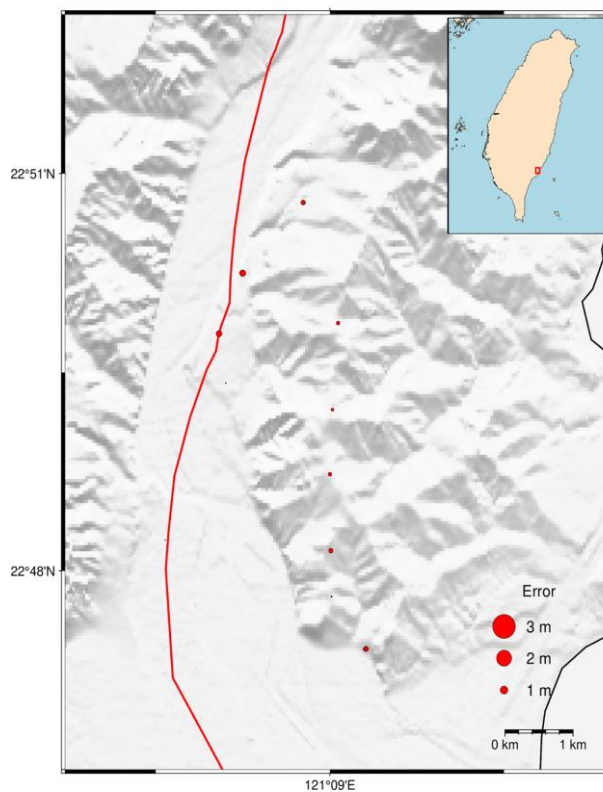


圖 5-6 1993 年利吉惡地建模控制點(紅色)及檢核點(藍色)誤差分佈。

5.2 各時期建模成果

本研究使用歷史航空照片及 SfM 技術進行的三維建模並產製正射影像(圖 5-7 至圖 5-11)及 DSM

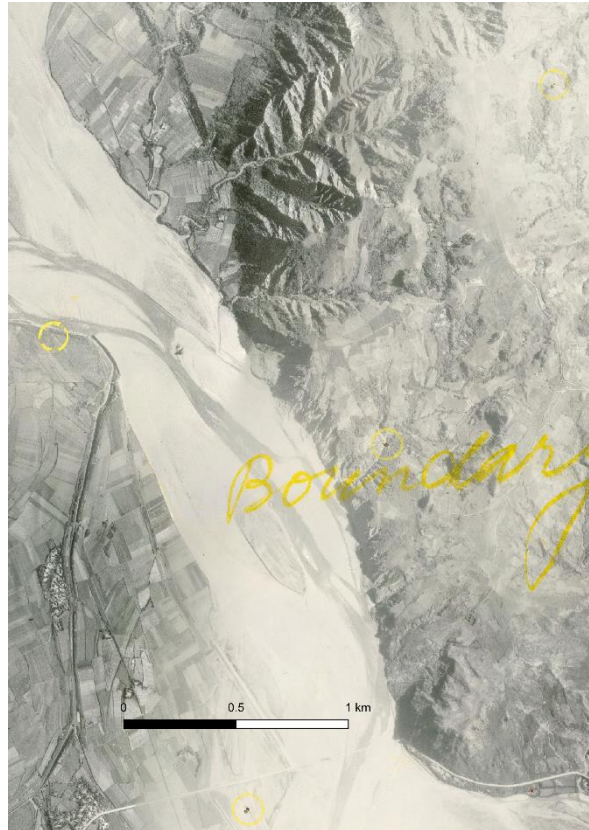


圖 5-7 1956 年照片產製之正射影像。



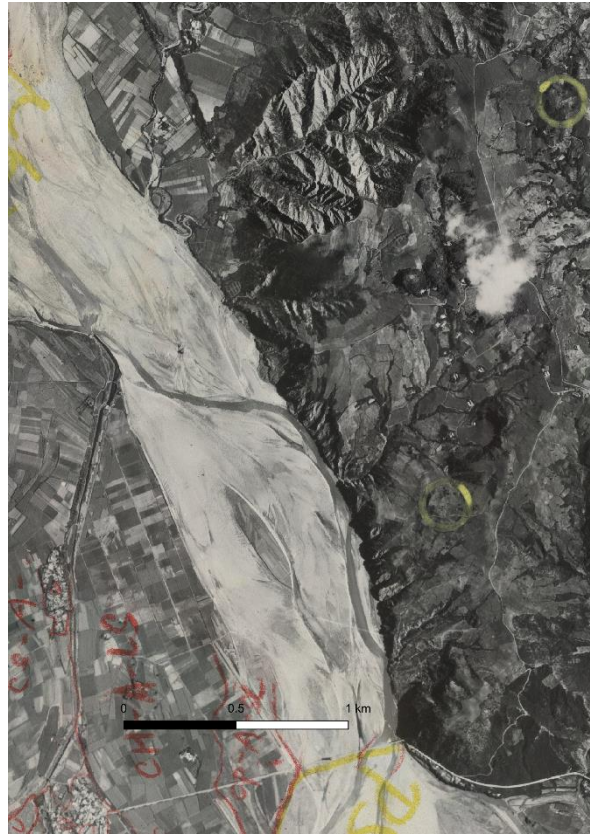


圖 5-8 1964 年照片產製之正射影像。



圖 5-9 1974 年照片產製之正射影像。



圖 5-10 1984 年照片產製之正射影像。



圖 5-11 1993 年照片產製之正射影像。

在影像進行影像篩選並裁切後，本研究的影像拼接成果良好。從正射影像解析度(表 5-2)來看，由於地面解析度受拍攝高度和拍攝儀器焦距所限，各時期的正射影像解析度介於 0.36m/pix 至 1.32m/pix 之間，並以 1974 年的歷史航空照片成果最好。從正射影像畫質上來看，1956 年及 1964 年的正射影像有使用含蠟筆標記的照片，但因有標記區域並不在利吉惡地上，且不影響所產製出的 DSM，因此這些影像仍可適用。

年代	使用影像數量	地面解析度
1956	8	0.66m/pix
1964	11	1.05m/pix
1974	11	0.36m/pix
1984	15	0.51m/pix
1993	20	0.57m/pix

表 5-2 各時期正射影像影像解析度

本研究將建模所產製的 DSM 加以繪製成 ELSAMAP。繪制結果圖 5-12 至圖 5-16 所示。

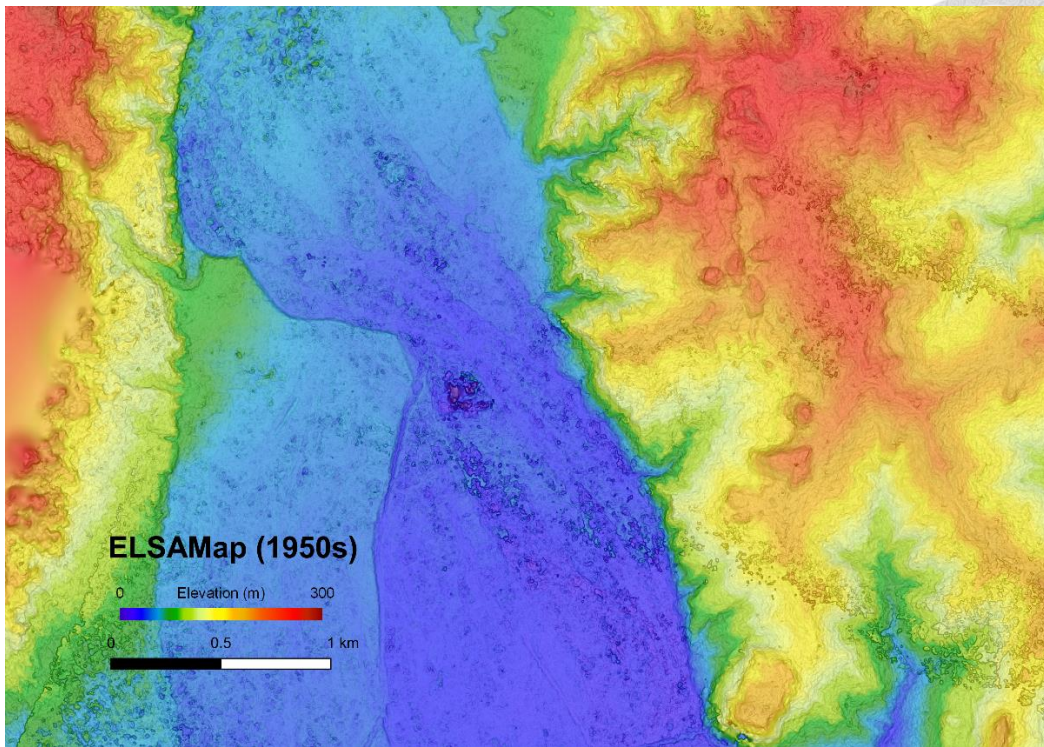


圖 5-12 1956 年 DSM 製之 ELSAMap。

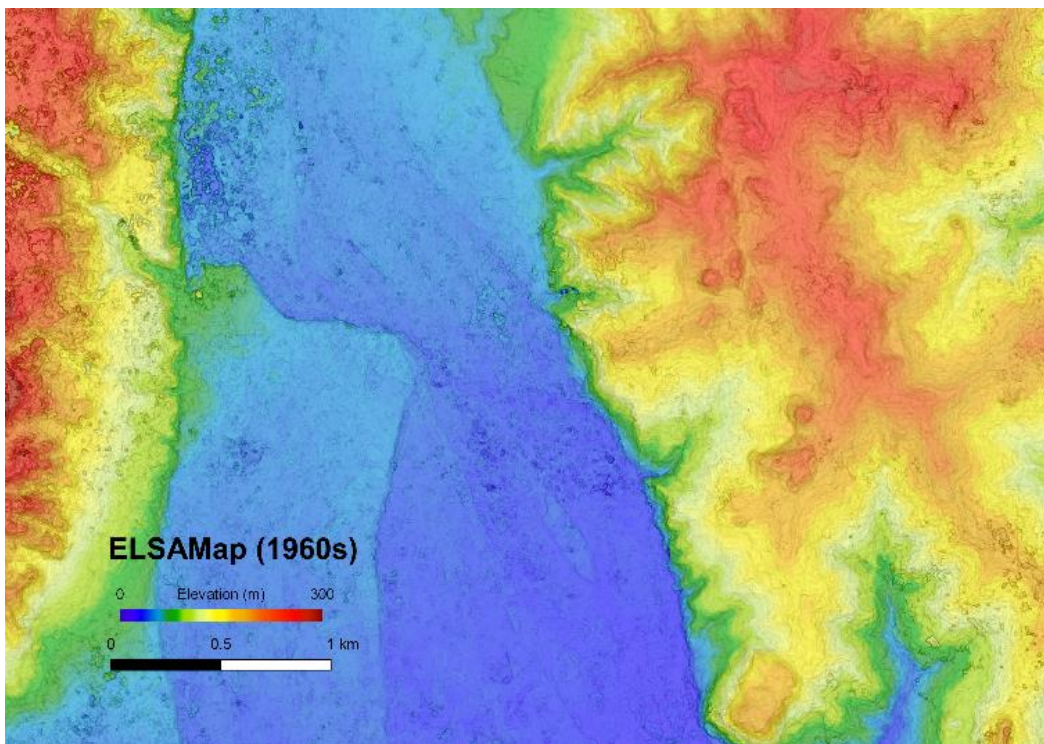


圖 5-13 1964 年 DSM 產製之 ELSAMap。

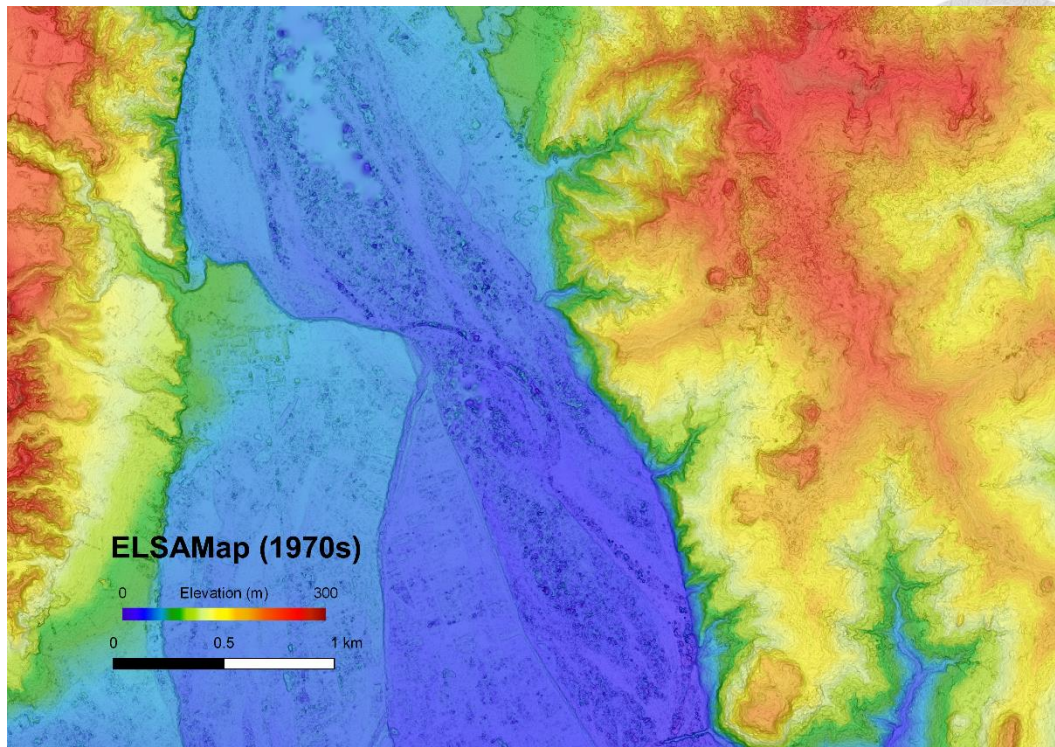


圖 5-14 1974 年 DSM 產製之 ELSAMap。

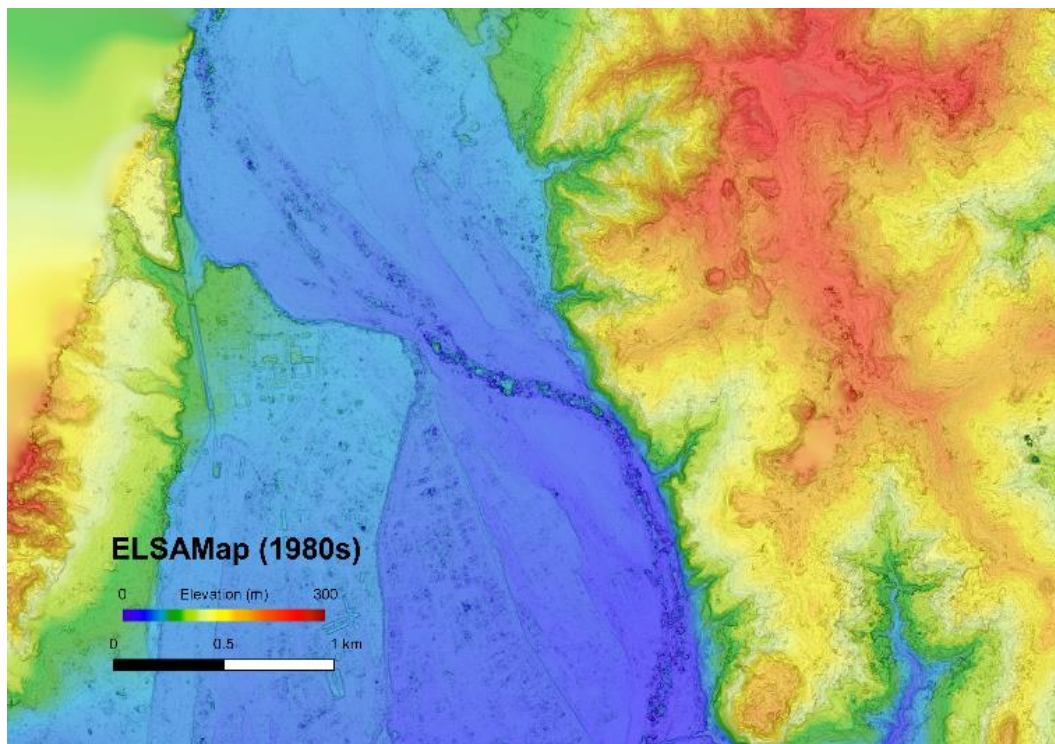


圖 5-15 1984 年 DSM 產製之 ELSAMap。

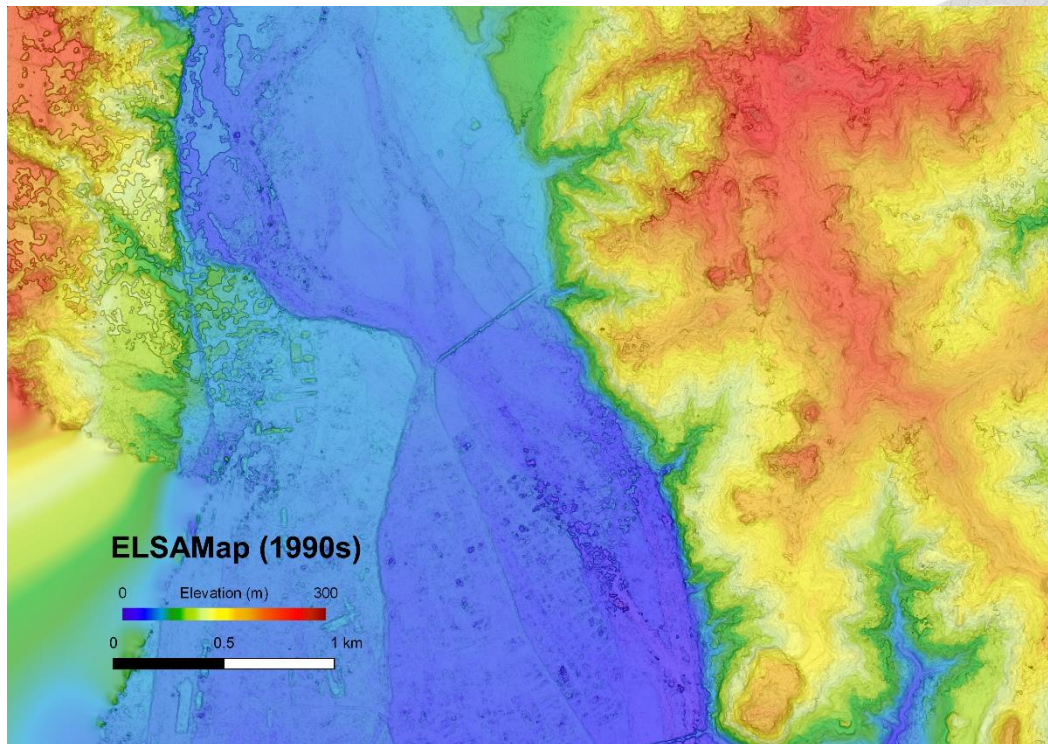


圖 5-16 1993 年 DSM 產製之 ELSAMap。

成果中除了河道因為水體建模的限制，其他地方如邊坡的高程都沒有出現極端值。ELSAMap 將各時期的邊坡和起伏明顯的表示出來。

5.3 DoD 觀測結果

本研究將各年 DSM 匯入地理資訊軟體 QGIS，並透過 DoD 方法套疊各時期 DSM 產製的坡度資料，將各年的 DSM 與 2006 年近現代的 5m DEM 進行相減取得兩年段間高程上的差異。由於本研究的控制點和檢核點坐標為採用 5m DEM 截取的高程資料，因此各年 DSM 和 5m DEM 相減除了可以確認模型侵蝕以外的區域沒有出現極端差異，也可以觀測各時期與近現代 DEM 之間的高程差異。各時期 DSM 與 5m DEM 進行 DoD 相減結果如圖 5-17 至圖 5-21 所示。

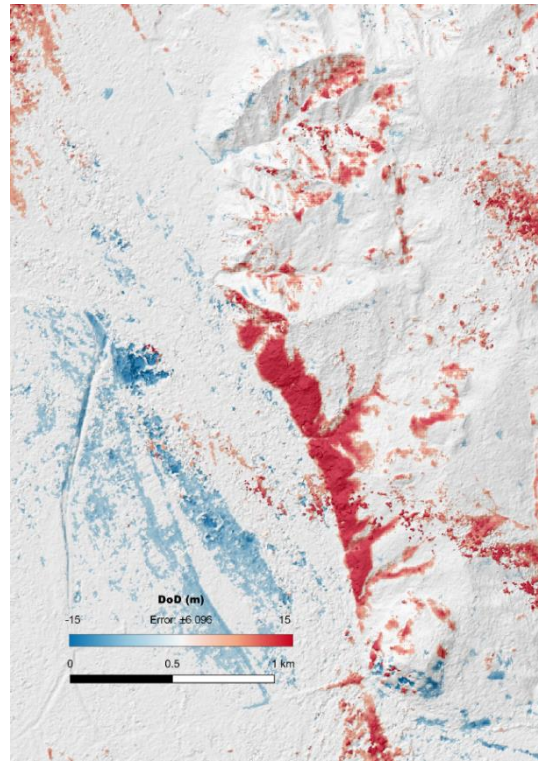


圖 5-17 1956 年與 2006 年 DSM 相減之 DoD 成果。紅色為高程增加，藍色為高程減少。

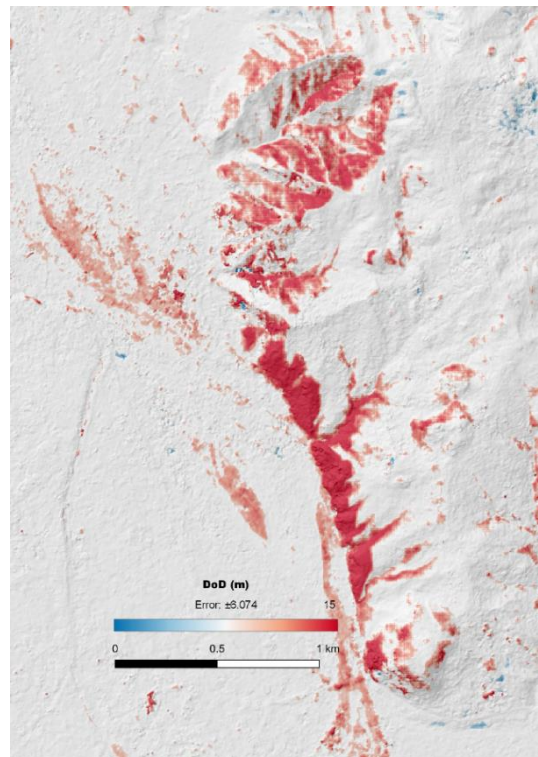


圖 5-18 1964 年與 2006 年 DSM 相減之 DoD 成果。紅色為高程增加，藍色為高程減少。

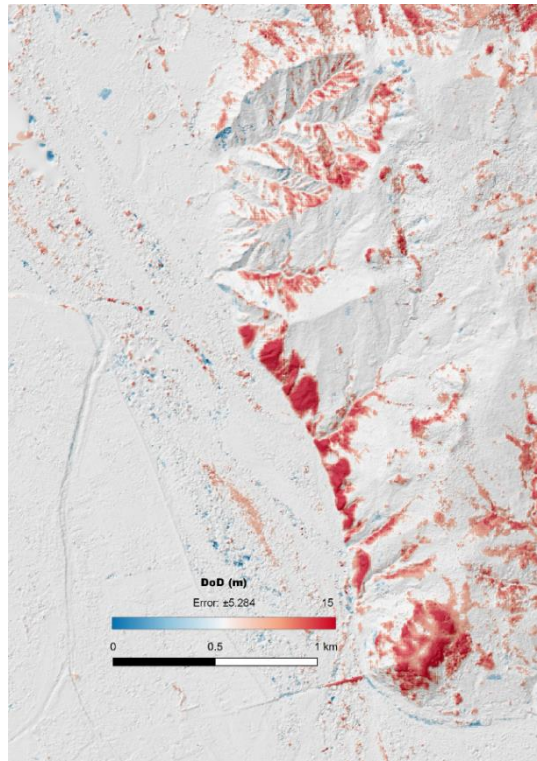


圖 5-19 1974 年與 2006 年 DSM 相減之 DoD 成果。紅色為高程增加，藍色為高程減少。

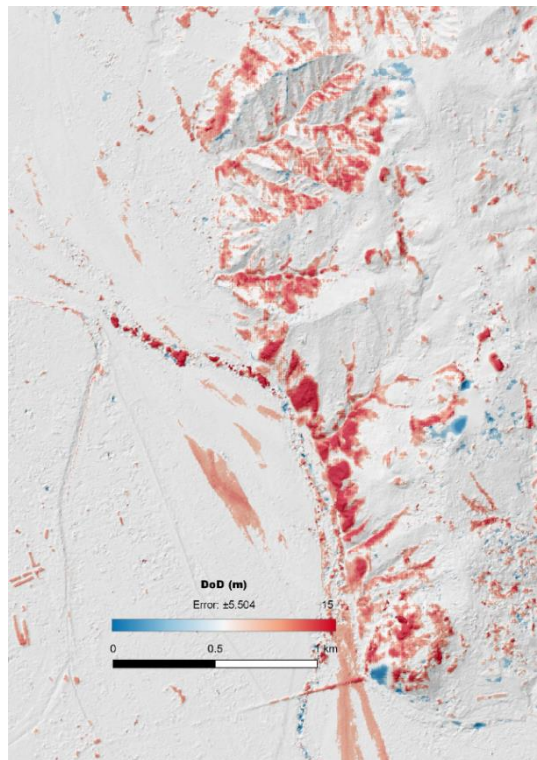


圖 5-20 1984 年與 2006 年 DSM 相減之 DoD 成果。紅色為高程增加，藍色為高程減少。

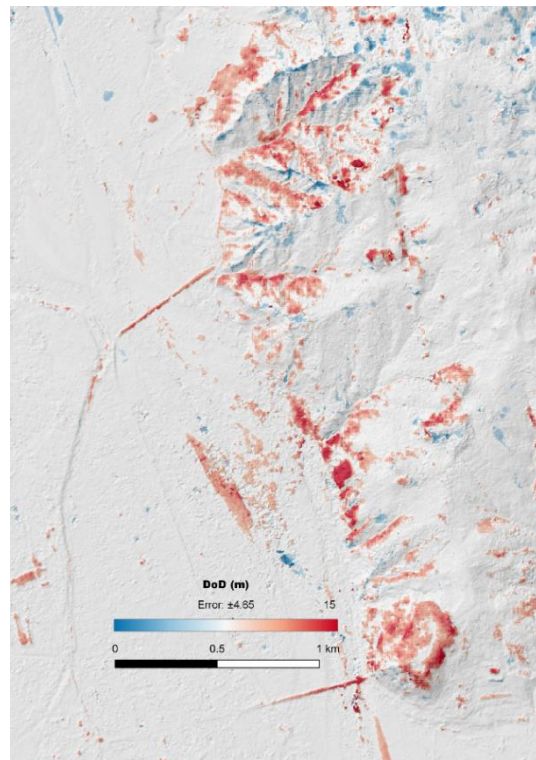


圖 5-21 1993 年與 2006 年 DSM 相減之 DoD 成果。紅色為高程增加，藍色為高程減少。

從各時期 DSM 與 2006 年 DEM 進行 DoD 的成果來看，高程減少明顯的區域(紅色)集中在邊坡上，趨勢隨著年代越舊，累計的高程減少越多，並以圖中央的邊坡最為明顯。此外，不動的區域在 DoD 的成果也在 DoD 接近 0 的區域(白色)，也就是說，模型中的不動點不用太大的變動，與預期相符。

將每一個網格 DoD 的高程差與坡度進行比較，則可畫出不同坡度下的 DoD 頻率(圖 5-22 至圖 5-26)。從結果表來看，坡度和 DoD 的頻率呈現常態分佈。本研究將坡度分類成 3 組，並用顏色分類，即坡度小於 20° ，邊坡較平緩的藍色；坡度介於 20° 至 70° 的橘色，其為一般認知邊坡的坡度；坡度大於 70° 黃色。此外，每一種坡度較淺色的區域為不穩定區塊範圍內的值和坡度。從表中可見，各時期與 5m DEM 相減的 DoD 數值越大時，坡度 20° - 70° 的占比越高，因此可知 DoD 數值較高的地方為邊坡為主。

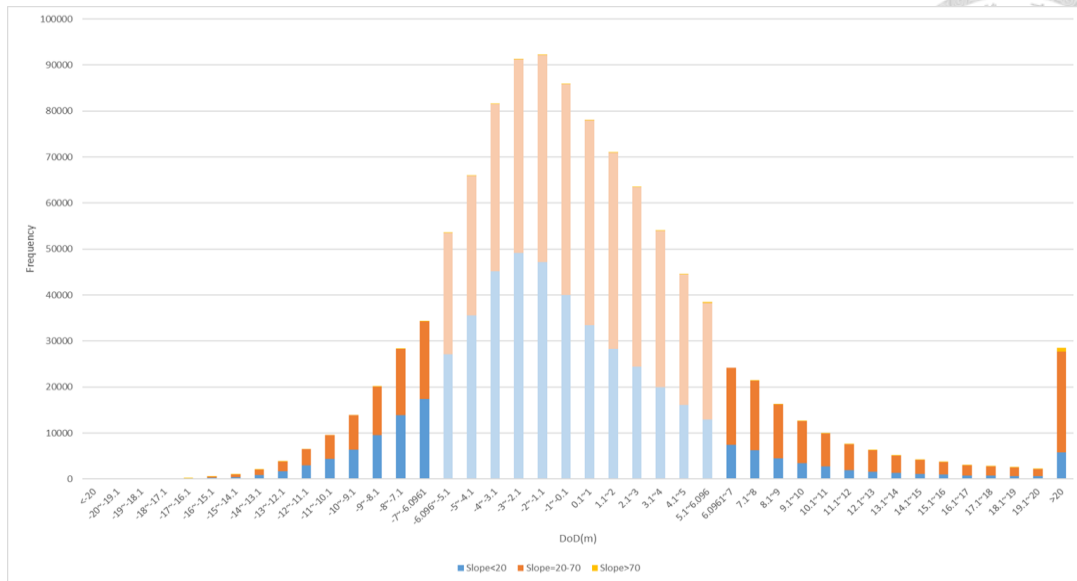


圖 5-22 1956 年與 2006 年模型 DoD，坡度與 DoD 頻率。淺色區域為誤差(± 6.1m)可能導致的不穩定區域。

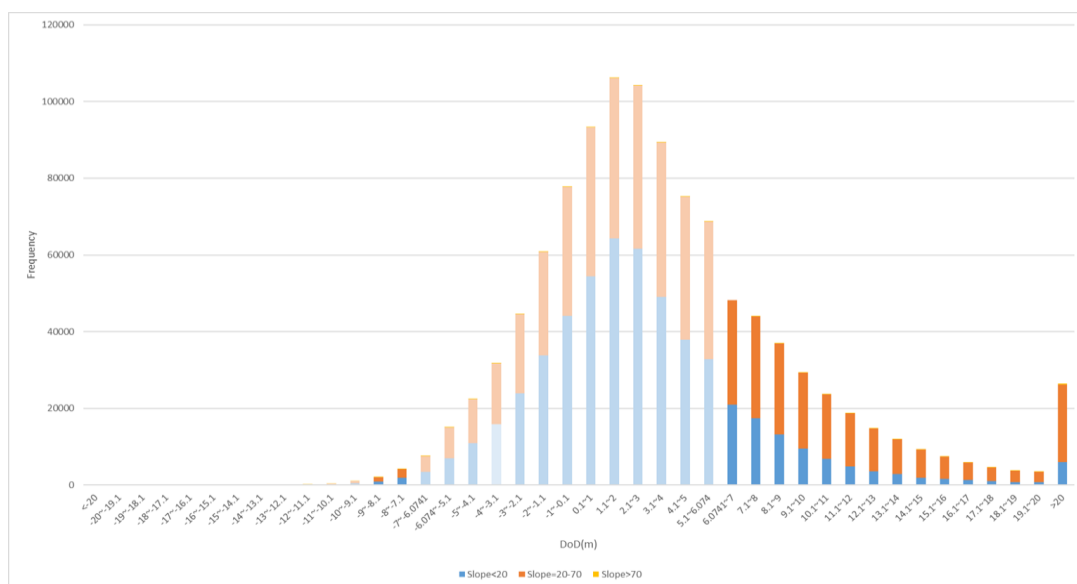


圖 5-23 1964 年與 2006 年模型 DoD，坡度與 DoD 頻率。淺色區域為誤差(± 6.1m)可能導致的不穩定區域。

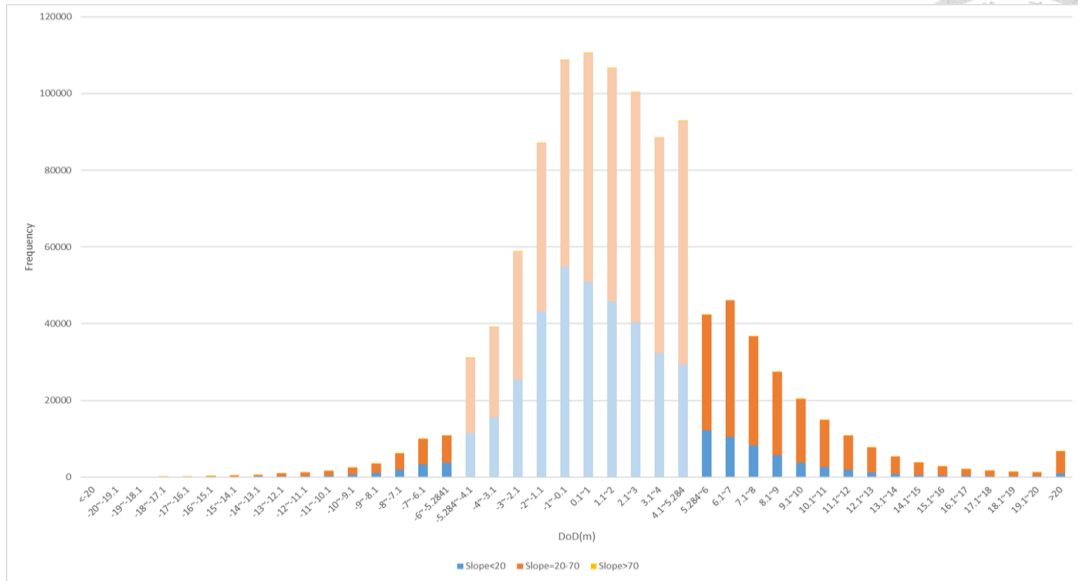


圖 5-24 1974 年與 2006 年模型 DoD，坡度與 DoD 頻率。淺色區域為誤差(± 5.3m)可能導致的不穩定區域。

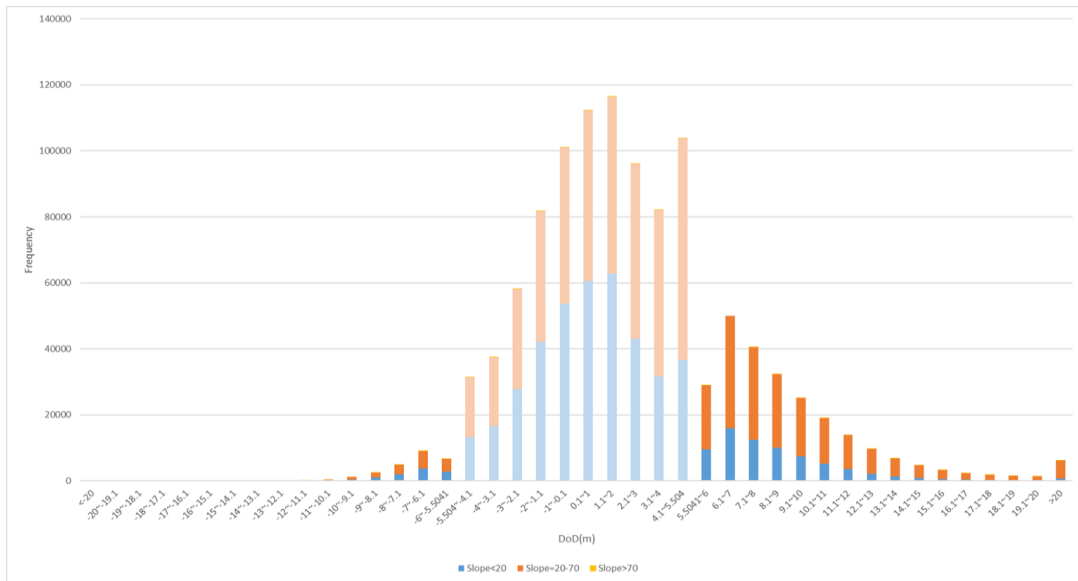


圖 5-25 1984 年與 2006 年模型 DoD，坡度與 DoD 頻率。淺色區域為誤差(± 5.5m)可能導致的不穩定區域。

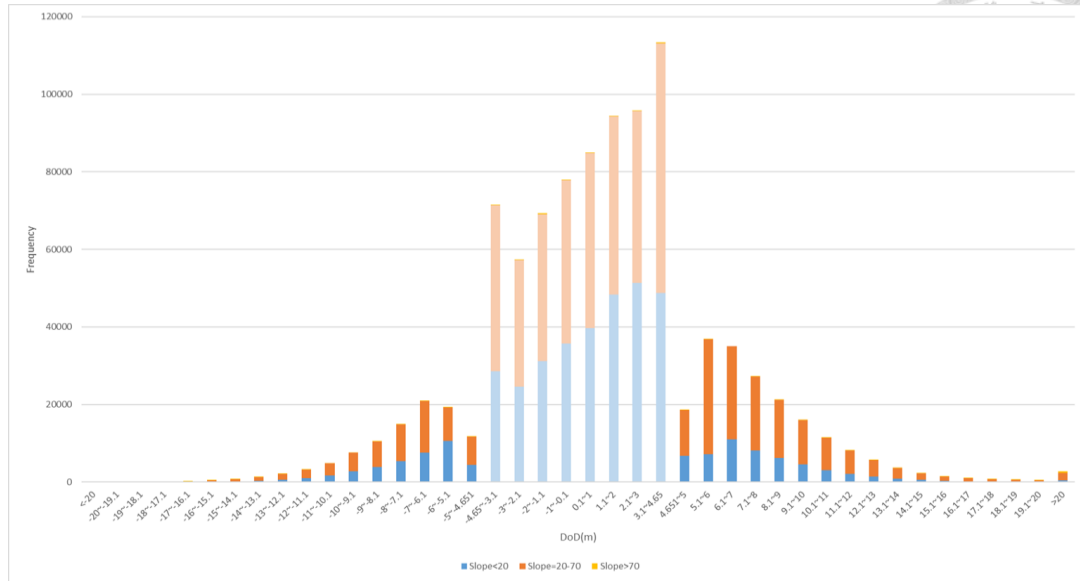


圖 5-26 1993 年與 2006 年模型 DoD，坡度與 DoD 頻率。淺色區域為誤差(± 4.7 m)可能導致的不穩定區域。

在確認所產製的模型精度後，本研究將各時期的 DSM 進行十年間的 DoD 相減，並觀察利吉惡地區域在每個年代的高程變化的分佈。由於 DoD 為兩時期資料相減，因此本研究使用標準差作為其相減誤差傳導的估算，計算 DoD 的不穩定區塊(uncertainty cube)，即該數值正負以內的值為 DoD 成果的不穩定區塊。

DoD 相減時期	不穩定區塊估算(m)
1956-1964	4.3
1964-1974	4
1974-1984	3.8
1984-1993	3.6

表 5-3 各時期 DoD 不穩定區塊(uncertainty cube)估算。

5.3.1 1956 年與 1964 年

1956 年至 1964 年的 DSM 進行 DoD 相減(圖 5-27)，其不穩定區塊為 $\pm 4.3\text{m}$ 。從相減的結果來看，能觀測到利吉惡地北邊不在河岸邊的支流坡底高程增加，而河岸邊的邊坡坡面高程明顯減少，一些高程減少的區域下方的坡面及坡底則有高程增加。

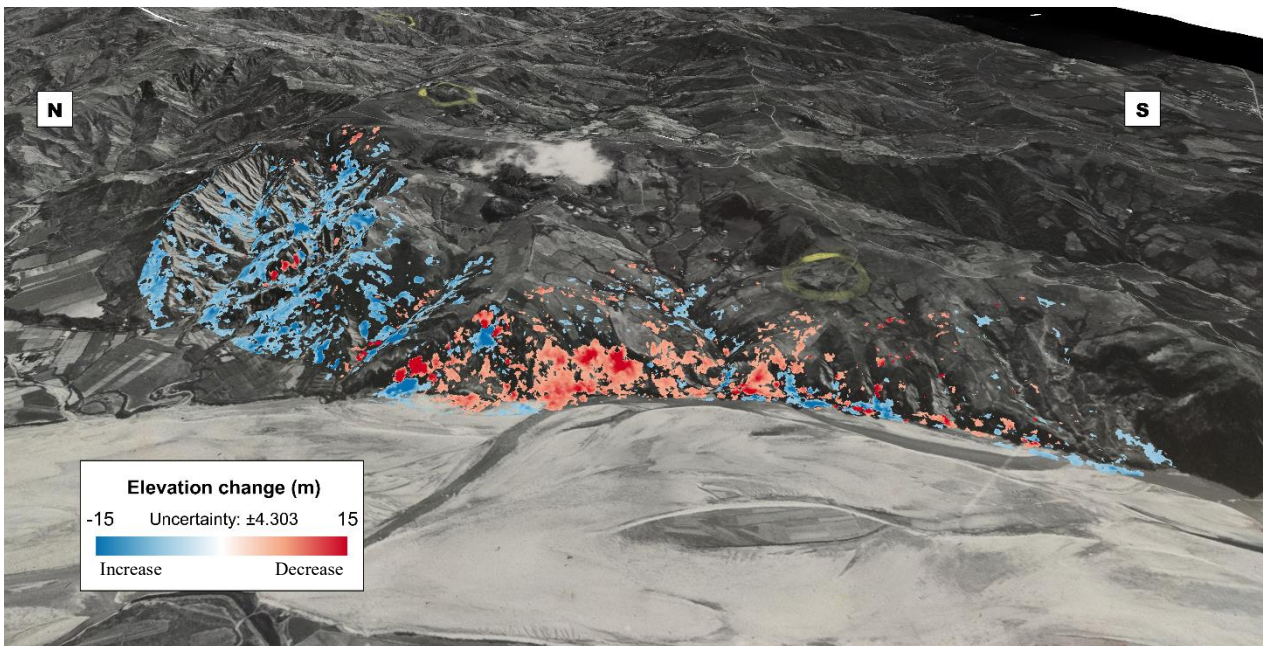


圖 5-27 1956 年與 1964 年的 DSM 進行 DoD 成果。紅色為高程減少，藍色為高程增加。

5.3.2 1964 年與 1974 年

1964 年至 1974 年的 DSM 進行 DoD 相減(圖 5-28)，其不穩定區塊為 $\pm 4\text{m}$ 。從相減的結果來看，能觀測到利吉惡地不管是北邊不在河岸邊的支流或是河岸邊的邊坡，DoD 上主要以高程減少為主，並且這樣的變化以河岸邊的邊坡最為明顯。

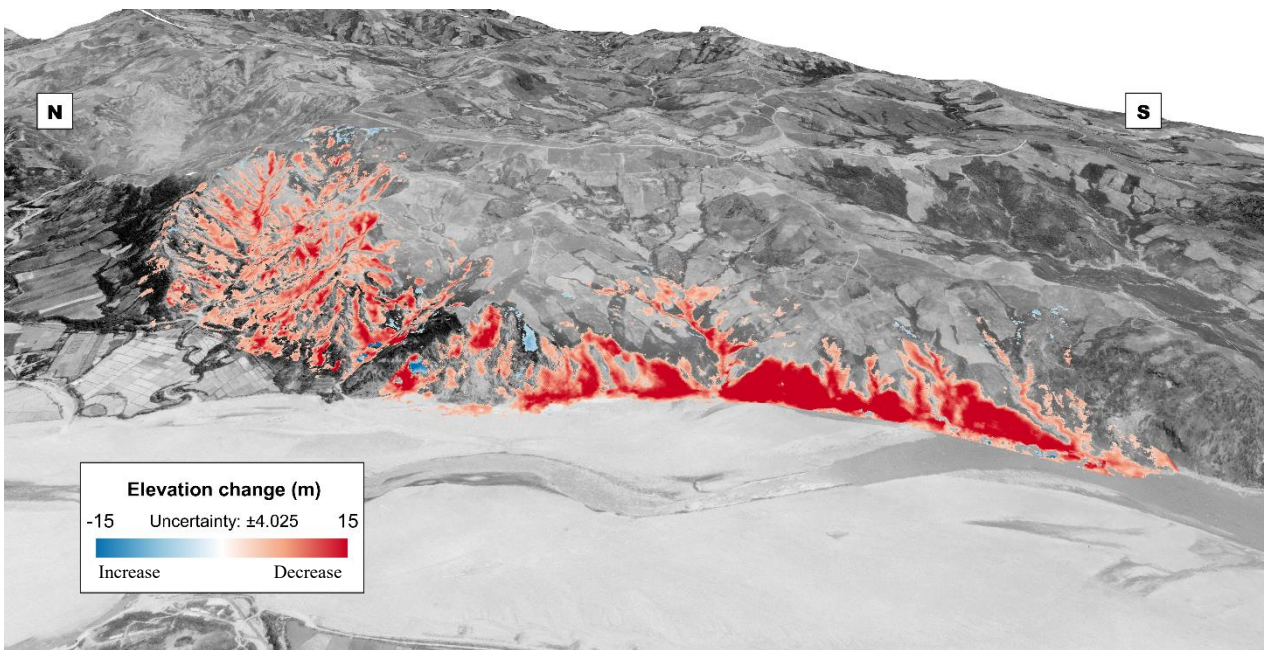


圖 5-28 1964 年與 1974 年的 DSM 進行 DoD 成果。紅色為高程減少，藍色為高程增加。

5.3.3 1974 年與 1984 年

1974 年至 1984 年的 DSM 相減(圖 5-29)後，其不穩定區塊為 $\pm 3.8\text{m}$ 。從相減的結果來看，能觀測到利吉惡地北邊的坡底和蝕溝高程變高，坡面上部則主要為高程減少。河岸邊坡北側有幾塊崩塌，而南側則為坡面下部高程增加，坡面上部高程減少。

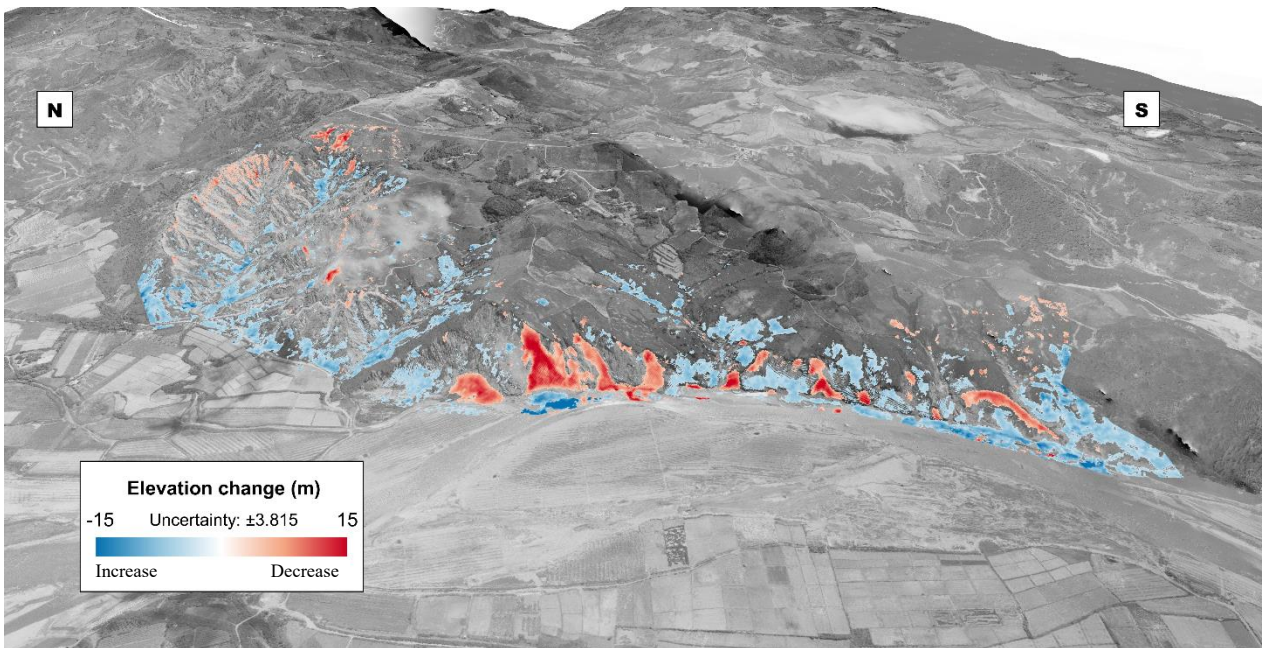


圖 5-29 1974 年與 1984 年的 DSM 進行 DoD 成果。紅色為高程減少，藍色為高程增加。

5.3.4 1984 年與 1993 年

1984 年至 1993 年的 DSM 相減(圖 5-30)，其不穩定區塊為 $\pm 3.6\text{m}$ 。從相減的結果來看，能觀測到利吉惡地無論是北邊不靠卑南溪的邊坡或是河岸邊的邊坡，主要都坡面接近坡肩的區域以高程減少為主，並且和 1964 年至 1974 年的 DoD 成果一樣，以河岸邊的邊坡變化最為明顯。而坡底和蝕溝則有一些高程增加的現象。

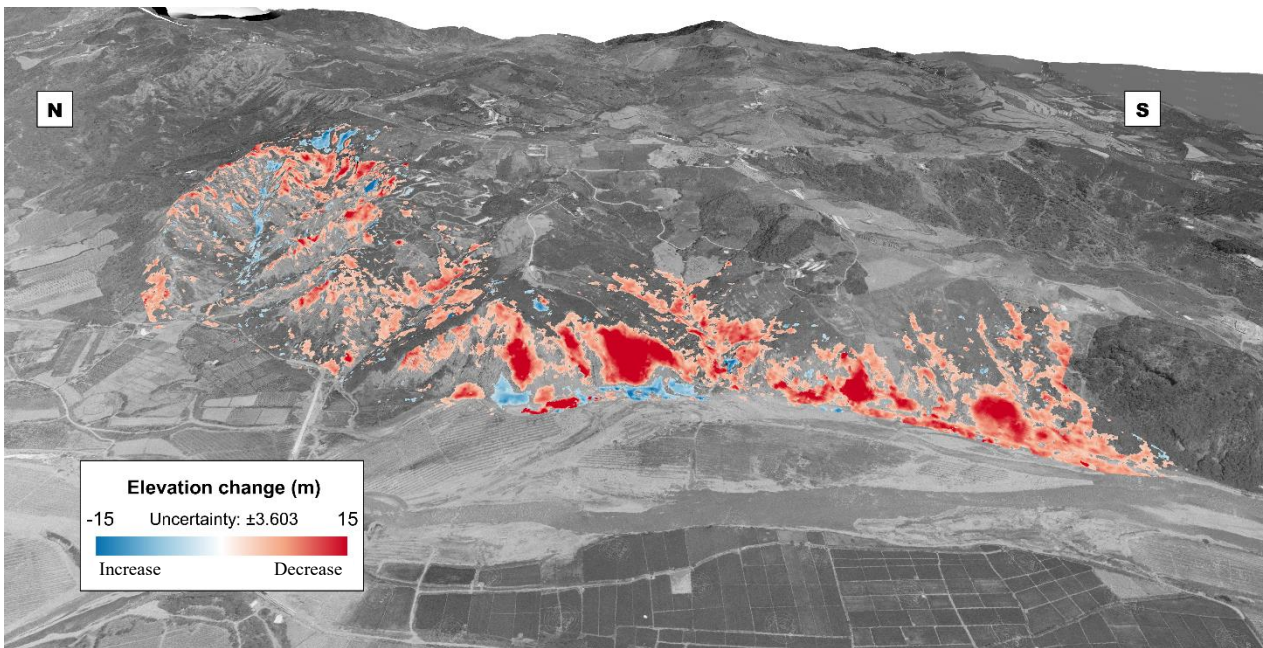
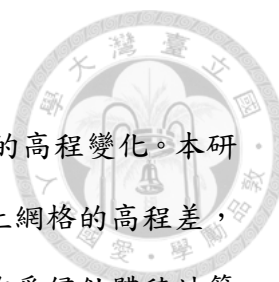


圖 5-30 1984 年與 1993 年的 DSM 進行 DoD 成果。紅色為高程減少，藍色為高程增加。



5.4 邊坡侵蝕體積估算

透過 DoD 進行各時期 DSM 的相減，能獲取地表在各時期的高程變化。本研究使用 QGIS 計算網格體積的功能，將 DoD 計算出的網格乘上網格的高程差，計算出侵蝕體積，並同時使用偵測極限(limit of detection, LOD)作為侵蝕體積計算的誤差。本研究將研究區分為兩個區域計算，一個為不在卑南溪河畔的利吉惡地集水區，另一個為在卑南溪河岸的河岸邊坡地區。

	集水區(m ³)	集水區 LOD(m ³)	河岸邊坡(m ³)	河岸邊坡 LOD(m ³)
1956-1964	54,311	10,173	198,236	39,629
1964-1974	1,152,618	308,608	1,724,917	202,450
1974-1984	93,287	37,035	252,942	54,799
1984-1993	622,795	178,183	1,203,717	197,969

表 5-4 各時期 DoD 相減後侵蝕體積估算。

從各時期 DoD 估算的體積來看，各時期河岸邊坡的侵蝕體積都高於內陸支流(表 5-3)。其中，侵蝕體積最高的年份為 1964 年至 1974 年，其次則為 1984-1993 年。

若將 1956 年至 2006 年的 DoD 成果直接平均計算，不在卑南溪河岸邊的利吉惡地集水區從 1956 年至 2006 年的侵蝕體積為 $603,602 \pm 128,514 \text{ m}^3$ ，50 年的平均侵蝕率為 $6.6 \pm 1.4 \text{ cm/yr}$ ；利吉惡地河岸地區 $3,965,279 \pm 239,779 \text{ m}^3$ ，50 年的平均侵蝕率為 $23.2 \pm 1.4 \text{ cm/yr}$ 。

第六章 討論

本章節針對所提出的研究目的，以研究流程以及利吉惡地的邊坡侵蝕模式兩個部分討論。第一部分為討論在使用歷史航照產製 DSM 和正射影像時，整體操作和流程上的限制；第二部分為討論利吉惡地幾十年間的侵蝕發育模式，結合觀測結果與實地調查進行年代際尺度下的地表變化分析。

6.1 使用歷史航空照片觀測可行性及限制

本研究依照研究方法所提之操作流程進行影像建模。建模成果與計劃中的誤差和完成度相符，主要的誤差最大值為 3m。整體看來，本研究各時期 DSM 的誤差隨著時間的遞進越來越小，主要因為歷史航照的解析度隨著時間越來越好，匹配的結果越細緻，並且在產製出來的正射影像(表 5-3)也為同樣的結果。操作流程上，本研究的控制點及檢核點因無法取得過去的坐標，這些歷史航照在拍攝時也沒有和現在一樣的航測標或定位，因此只能使用 5m DEM 以及通用正射影像等尋找不動點並截取其坐標和高程作為研究預估的控制點。從誤差評估結果來看，這樣的方法是可行的。雖然無法很仔細的在利吉惡地的邊坡附近取得點位，但控制點的分佈只要平均分佈在觀測的研究區，使用歷史航照進行建模能取得公尺等級精度的地表變化，對於穩定的侵蝕觀測而言已是非常有利的觀測方法。

本研究將流程中遇到的限制分成蠟筆標記、雲霧遮蔽和建模參數進行討論。

6.1.1 蠟筆標記與雲霧遮蔽

在前置歷史航空照片的篩選上，挑選歷史航空照片需過濾陰影面積大、褪色、缺失的照片，並且裁剪一些年代照片的底片色框。然而，較久的歷史航照雖然已

盡量挑選完整的照片，但為了確保建模時有足夠重疊率的歷史航照，因此還是有需要使用部分畫質不理想的照片。例如，本研究使用的 1956 年航照，其使用到了在利吉惡地上有蠟筆標記以及有雲霧遮蔽的照片。從結果上來看，1956 年和 1964 年的歷史航照有需要使用含有蠟筆標記的照片。蠟筆標記在影像建模所產製出 DSM 高程資料並沒有出現不連續或者建模失敗等誤差限制，但產製的正射影像有蠟筆標記，在做判釋工作時則有一定的限制。



圖 6-1 產製出的正射影像上，保留著歷史航照的蠟筆標記。

雲霧遮蔽方面，本研究在 1964 年和 1984 年的成果有雲霧遮蔽。從歷史航照產製的正射影像和 DSM 結果來看，這樣的情況與蠟筆標記相似(圖 6-2)。

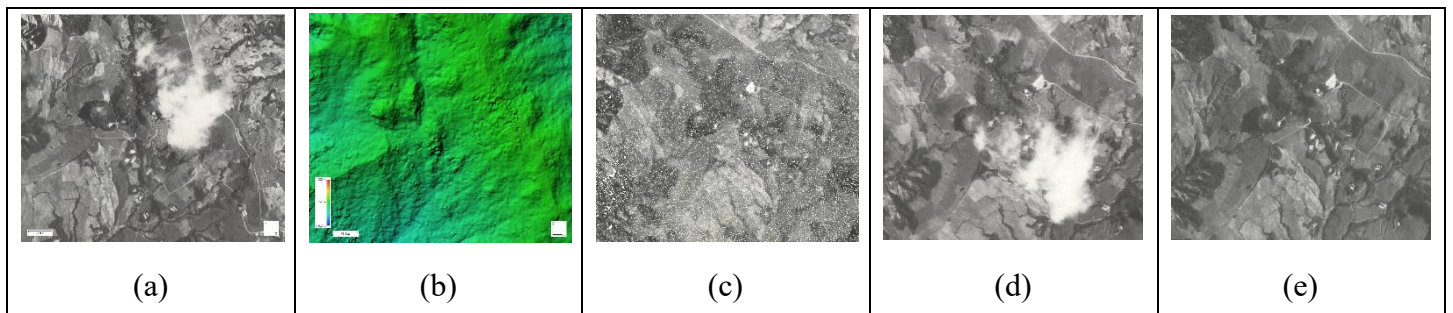


圖 6-2 雲遮情況範例。以 1964 年為例，在同一個區域中，正射影像(a)有雲霧遮蔽。然而，在 DSM(b)和密點雲(c)的結果中沒有受雲霧影響。其可能的原因為正射影像的拼貼使用有雲的影像(d)，而其他航帶的影像(e)則沒有拍攝到雲霧遮蔽。

綜上所述，對於使用正射影像判釋會出現無法判別的限制，但同樣的區域在 DSM 的成果上則不受影響。其可能的原因為 Metashape 挑選合適的影像作為正射影像的拼貼，而該區域影像的前後重疊可以截取到該區域的點雲，因此在產製 DSM 時不受影響。因此，在影像建模的前置作業上，需要在 Metashape 中進行歷史航照的物件遮罩，把被影響的區域進行遮蓋再做建模，應可以達到正射影像不會出現蠟筆標記和雲霧的情況。但若蠟筆標記和雲霧面積過大，且研究區域影像重疊率低，則有可能進行遮罩導致共同特征點不足，電腦軟體無法順利匹配的限制。

本研究在沒有進行遮罩的情況下進行影像建模，即使有蠟筆標記和雲霧遮蔽也能取得相對可信的 DSM 資料，僅在正射影像上存在視覺上無法辨識的限制。對於使用歷史航照取得過去的地表資訊而言，使用歷史航照進行 SfM 影像建模的方法在觀測年代際的地形變化有著很大的價值。

6.1.3 建模參數

早期歷史航照為底片再經過掃描成數位影像，也就是說影像的畫質、變形、色彩等不是原始拍攝當下的品質。這些限制與現今的數位影像不同，其實際畸變、尺寸等無法明確預估，因此在影像建模中無法輸入作為參數使用，也是使用歷史航照進行影像建模的限制。歷史航照除了是底片掃描的影像外，相機的像主點、相機拍攝時的內、外方位參數都沒有詳細的記錄，能得知的資訊僅為飛行高度、焦距、是否為正拍等文字清單資訊(圖 6-3)以及在照片上保存的文字清單資訊(圖

6-4)，因此能輸入進 Metashape 的參數非常少，是建模上很大的限制之一。因此本研究僅將焦距參數在建模前輸入軟體進行建模，讓軟體自行運算每一張照片的內、外方位參數。從成果上來看，各時期產製的模型除了隨機誤差外，沒有明顯的系統性誤差，與 5m DEM 相減的結果也為常態分佈。因此，本研究認為使用 Metashape 進行歷史航照建模，在影像連續、清晰，並且同一區域影像多於 3 張 (本研究建模成果的最低重疊張數) 的情況下，可以只輸入相機的焦距參數，不用做其他的參數設定，讓軟體自行運算參數，也能取得理想的結果。

航線編號				攝影機種			
ZW84-17-VV				A1			
地區	經緯度	攝影方式	片號	份數	攝影日期	收到日期	涵蓋圖號數
		VV	1-192	192	45.6.28	45.10.	
					焦距	航高	相幅
						10000	
					存地	所在箱號	所在架號
					北屯		
借出情形				損壞情形			
片號	借出日期	借出單位	附記	片號	損壞原因	損壞程度	附記

圖 6-3 歷史航照文字記錄的保存清單(中研院人社中心廖法銘副技師提供)



圖 6-4 歷史航照上所標記的資訊。其中 63-019 為飛行任務編號，VV 為正拍，63 6.22 為拍攝日期，8.2' 為焦距(英吋)，11200' 為飛行高度(英呎)。

6.2 利吉惡地邊坡演育

本研究將歷史航空照片及 SfM 技術產製的 DSM 和正射影像等成果進行討論。由於利吉惡地不同區域觀測到的侵蝕變化、地形，以及邊坡倒退等有所不同，因此本研究依利吉惡地的地形和分佈，分成 A、B，以及 C 三個區域進行討論(圖 6-6)。

本研究將各時期的利吉惡地 DSM 匯入 QGIS，使用剖面繪制工具在利吉惡地邊坡繪制剖面。本研究針對不同區域進行剖面繪製，A 區為一集水區因此依照此區域不同坡向的坡面進行剖面繪製；B 區為河岸的邊坡，因此沿著此區域邊坡的北中南區域進行繪製；C 區為小支流，因此在河道上繪製河道剖面。此外，針對研究區內的三個區域進行邊坡形貌變化、侵蝕分佈，以及發育模式進行討論，並結合實地調查資料佐證。邊坡倒退模式的形貌描述上，Young(1972)統整了 3 個邊坡發育模式(圖 6-5)，將邊坡倒退模式分為平行倒退(parallel retreat)、斜坡置換(slope replacement)，以及減坡後退(slope decline)。邊坡倒退模式用於解釋邊坡形貌隨著時間的變化，並說明不同地區邊坡發育的特徵。例如，平行倒退主要出現在濕潤地區；減坡後退主要出現在半乾燥地區；斜坡置換主要出現在乾燥地區。本研究依據從各期 DSM 取得的剖面資料，來判定其邊坡各年代間的變化。

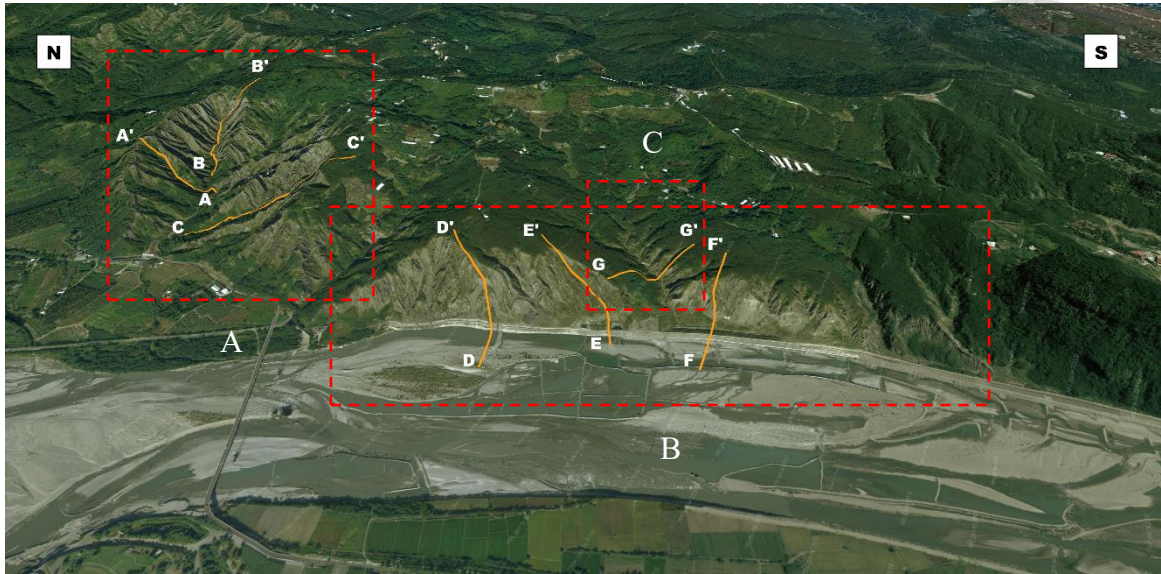


圖 6-5 利吉惡地地形演育討論區域劃分及截取各時期 DSM 剖面之位置。

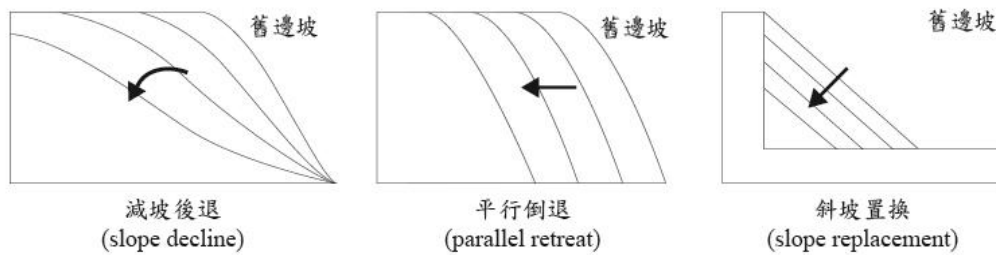


圖 6-6 邊坡倒退模式(改繪自 Bierman & Montgomery, 2014)

6.2.1 利吉惡地 A 區

利吉惡地 A 區域為一個不在主河道(卑南溪)旁的集水區。此區域目前在此有建設利吉惡地地質公園導覽步道。此區域主要為樹凸狀的的流域模式。從 DoD 相減的成果(圖 5-27 至圖 5-30)來看,除了 1964 年至 1974 年,侵蝕相對較少,主要觀測到的侵蝕都集中在臨近坡頂的邊坡。若順著內陸支流不同坡向的邊坡進行剖面(圖 6-7 至圖 6-9)繪製觀察,則可看見內陸支流區域變化很小,除了剖面 C(圖 6-9)接近坡頂的邊坡坡面有坡向和坡度水平倒退的平行倒退變化,其他地方的剖面較不穩定。此區域雖然是植被較多的部分,樹高有約 3-5 公尺,但透過實地觀測(圖 6-10)以及使用歷史航照所產製的正射影像可見,侵蝕強烈的邊坡主要還是

裸露的，植被主要集中分佈在坡底和坡頂，對於觀測侵蝕影響較少，但對於坡頂和坡底是崩積物堆積還是植被生長無法判別，因此在坡頂和坡底的觀測存在限制。

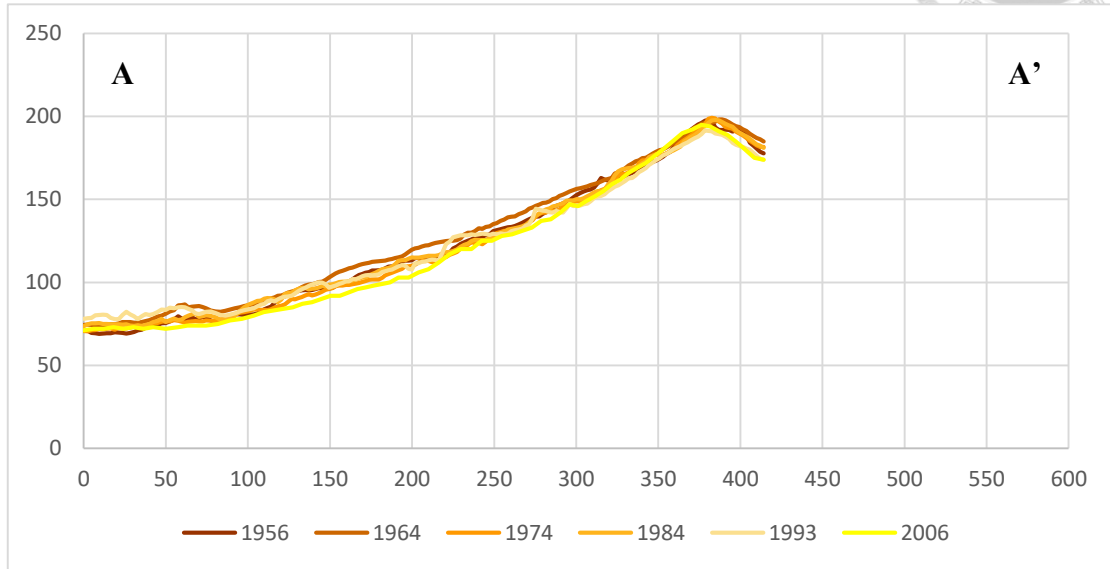


圖 6-7 A-A'剖面

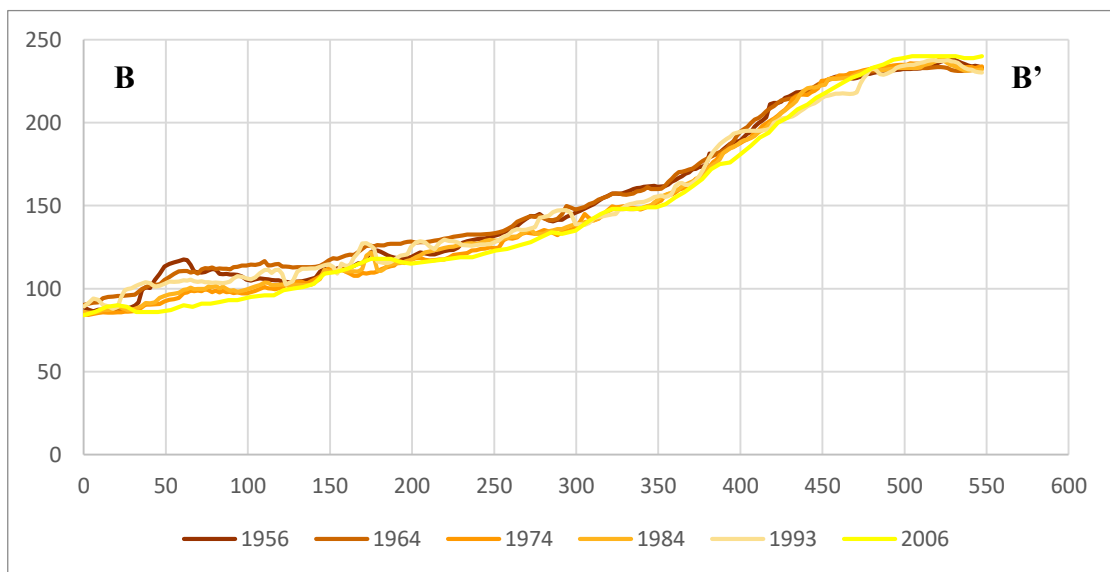


圖 6-8 B-B'剖面

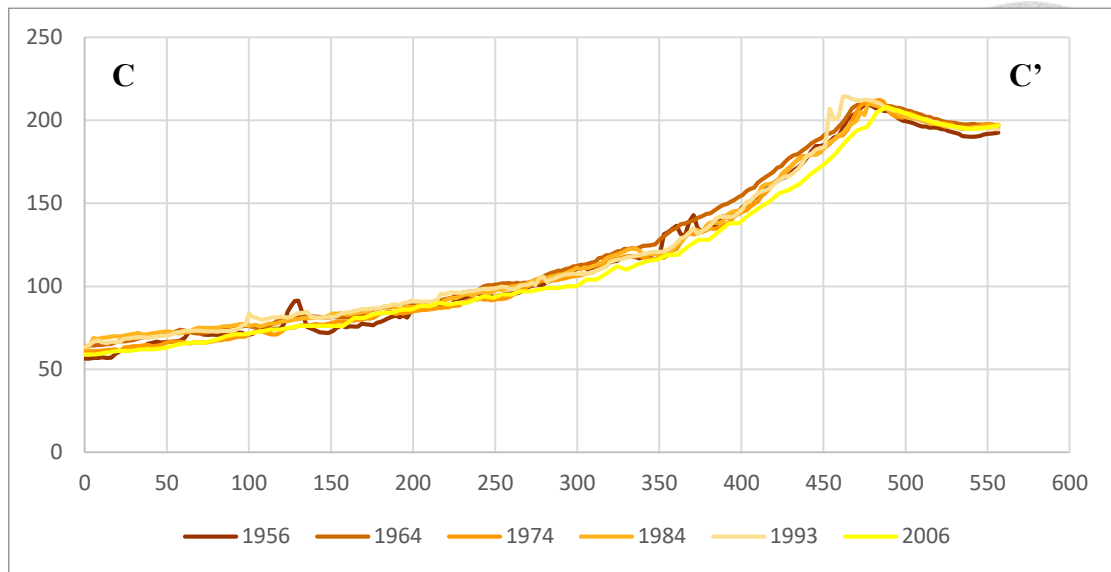


圖 6-9 C-C'剖面



圖 6-10 利吉惡地內陸支流區域的導覽步道終點。坡底的區域主要為 3-5 公尺的植被，後方的邊坡則明顯較為裸露。(2022/06/22)



圖 6-11 利吉惡地內陸支流區域邊坡。被侵蝕的邊坡現今還是裸露。

(2022/06/22)

6.2.2 利吉惡地 B 區

利吉惡地 B 區域主要指的是位於利吉大橋和台東大橋之間，沿著卑南溪的河岸邊坡。此區域主要為格子狀的流域模式，崩積物會在坡底堆積或直接被卑南溪帶走。在 DoD 的成果中，河岸邊坡為侵蝕和高程變化最明顯的區域。侵蝕分佈上，在北邊的邊坡從剖面(圖 6-12)上來看，侵蝕變化較為平均，每年約倒退 10 公尺。中間(圖 6-13)和南邊(圖 6-14)的邊坡在 1964 年至 1974 年較為明顯，最明顯的水平方向倒退可達 50 公尺。從各時期正射影像來看，此區域的邊坡倒退非常明顯，在使用 DSM 截取高程剖面(圖 6-12 至圖 6-14)來看，其發育模式與 DoD 成果所看到的趨勢相同。

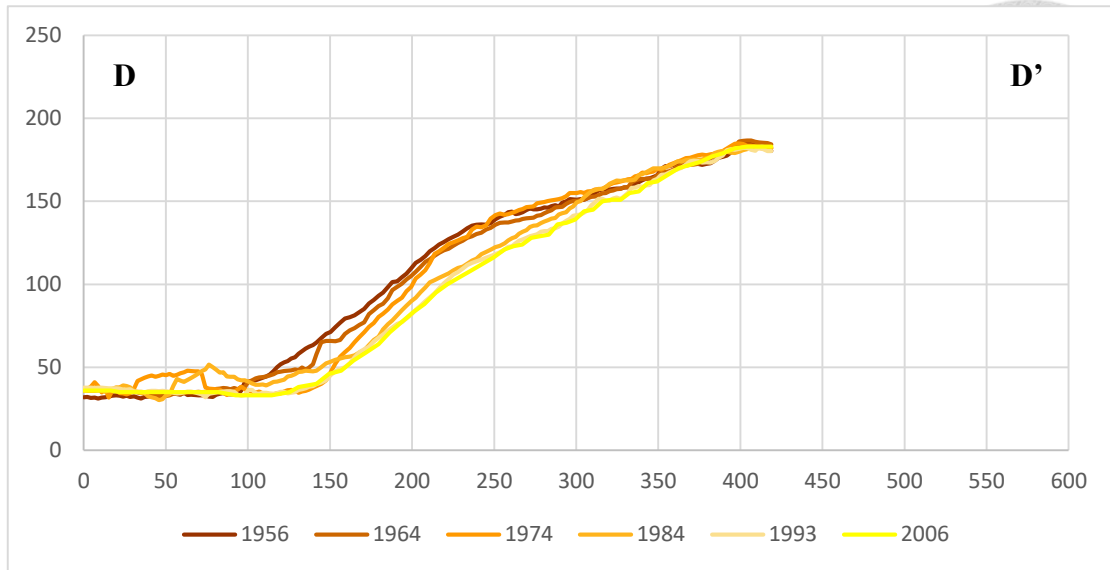


圖 6-12 D-D'剖面

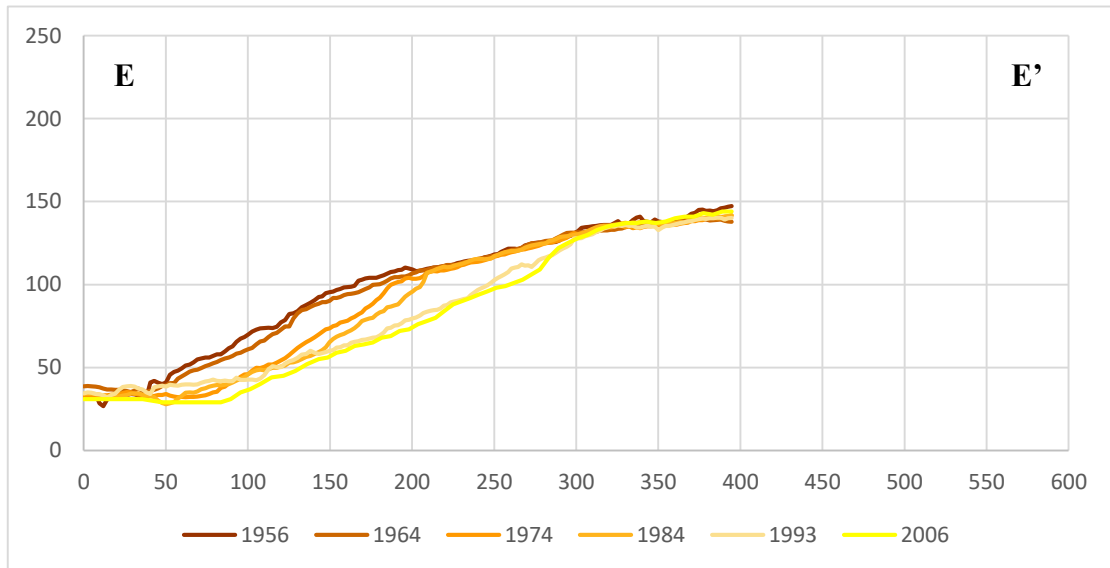


圖 6-13 E-E'剖面

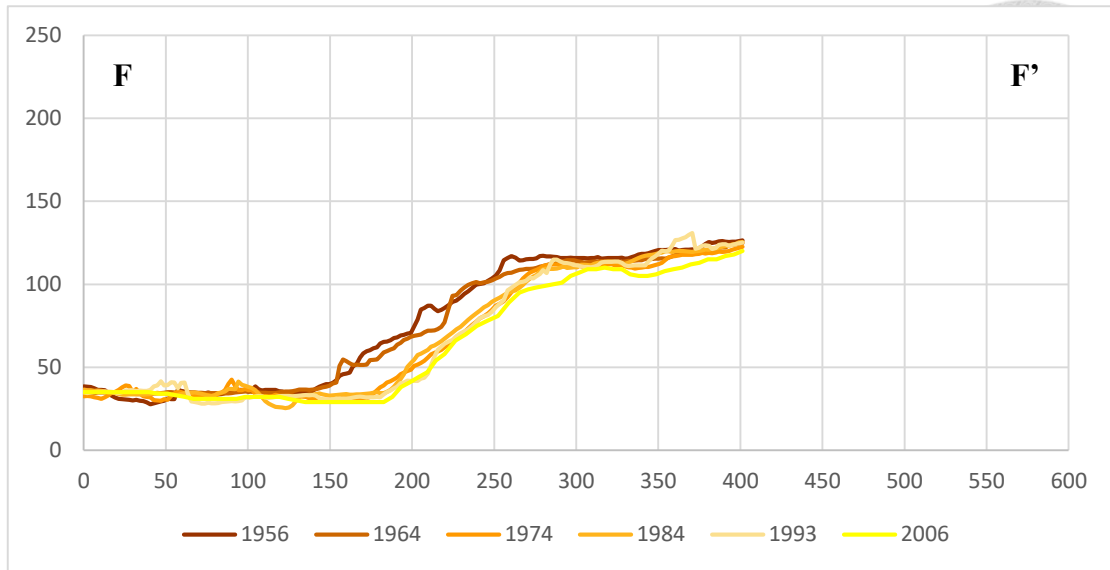


圖 6-14 F-F'剖面



圖 6-15 利吉惡地河岸邊坡，照片於利吉堤防道路上有南向北拍攝。

(2022/06/22)

實地調查上，此區域的邊坡在北邊較為陡峭，靠近中間的區域則較緩(圖 6-15)。此外，卑南溪沿岸在 2011 年起修建利吉堤防和石山圳入水口，並於 2014 年完工。如今的堤防道路北段已被泥岩崩積物所覆蓋且淹過了堤防，其覆蓋高度約為 3 公尺。從現場來看，B 區北段的邊坡即使有受堤防的保護，但此段邊坡的侵

蝕依舊明顯。若從過去的衛星影像來推測，應在 2018 年至 2019 年間，堤防上的道路才被崩積物覆蓋。從各時期 DSM 上畫的剖面來看，此段邊坡(圖 6-11)的發育模式為平行倒退的邊坡發展模式，並且各年倒退相較均值，因此可以判定此區域的邊坡數十年來都是穩定發展。



圖 6-16 2018 年(左)及 2019 年(右)利吉惡地河岸邊坡北段的衛星影像。紅圈處為利吉堤防道路被覆蓋區域。



圖 6-17 利吉惡地河岸邊坡北段的道路被崩積物覆蓋形成土丘。(2022/06/22)

B 區南段邊坡在利吉堤防修建後距離河道有幾十公尺，並有石山圳和堤防間隔。從現場來看，此區域邊坡坡底有低矮的植被覆蓋，其高度約在 1-2 公尺。從正射影像和各期 DSM 繪製的剖面(圖 6-12、圖 6-13)來看，此區域的邊坡在 1964 年至 1974 年這段時間邊坡變化明顯。與北段發育模式不同，這裡的發育模式為減坡後退(圖 6-12)和平行倒退(圖 6-13)。此外，從 F-F'剖面(圖 6-14)來看，有觀測坡底的水平方向倒退量比坡頂更多的現象。



圖 6-18 利吉惡地河岸邊坡南段。(2022/06/22)



圖 6-19 利吉惡地河岸邊坡南段與利吉堤防之間的石山圳水利設施。

(2022/06/22)

6.2.3 利吉惡地 C 區

利吉惡地 C 區是指在利吉惡地 B 區河岸邊坡中的一條支流。從各期 DSM 繪製的剖面(圖 6-20)來看，這條支流在 50 年間下切非常明顯，並且從主河道向上游看，其右側邊坡侵蝕較為明顯。

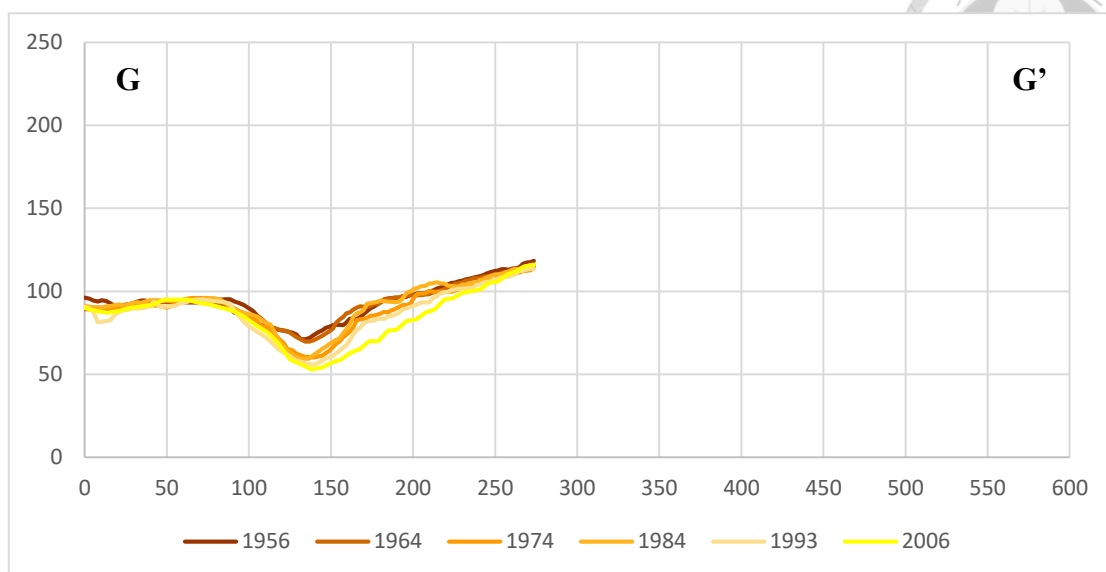


圖 6-20 G-G'剖面。

實地調查後發現，支流河道的左側邊坡較緩，並有植被覆蓋，而右側邊坡則坡度較陡，邊坡也相對裸露，與 DSM 剖面觀察一致。



圖 6-21 支流河道，從下游向上游拍攝。左側邊坡被植被覆蓋，右側邊坡則較裸露。(2022/06/22)



圖 6-22 支流河道的泥岩除了上游邊坡還有保留，河道上幾乎只剩下粒徑較大的蛇綠岩和基性火成岩。(2022/06/22)

6.2.4 小結

綜上所述，從現場的觀察、DSM，以及正射影像的判釋，利吉惡地主要的發育主要在河岸邊更為明顯。不在河岸邊的 A 區的邊坡發育較為不穩定，侵蝕相對較少，並都在邊坡裸露的區域。B 區邊坡的侵蝕相對 A 區侵蝕相對明顯，B 區北段的發育較為平均，每年約倒退 10 公尺，南段以 1964 年至 1974 年最為明顯。無論是在 A、B，或是 C 區域，從 DoD 和繪製剖面的結果來看，高程增加且剖面高低變化不穩定的區域應為植被的覆蓋，在坡頂上部和坡底相對茂盛。雖然對利吉惡地的堆積區域判釋存在限制，但實際觀察比對可發現侵蝕明顯的邊坡地區植被相對較少，因此本研究觀測到的侵蝕成果應不會被植被影響。

6.3 侵蝕體積與侵蝕率比對

本研究透過 DoD 估算的侵蝕體積(表 5-3)以及 DSM 剖面觀察，可以看到 1964 年至 1974 年的侵蝕變化較大。因此本研究比對了歷年台東測站的累計降雨量以及各時期的侵蝕量，發現累計降雨量和侵蝕體積在 1964 年至 1974 年間都為最高，

兩者間也有高度相關，相關係數介於 0.7 至 0.8。也就是說，降雨量越高的年代，利吉惡地的侵蝕量則越大，這與過去學者認為的惡地受降雨影響結果相同。

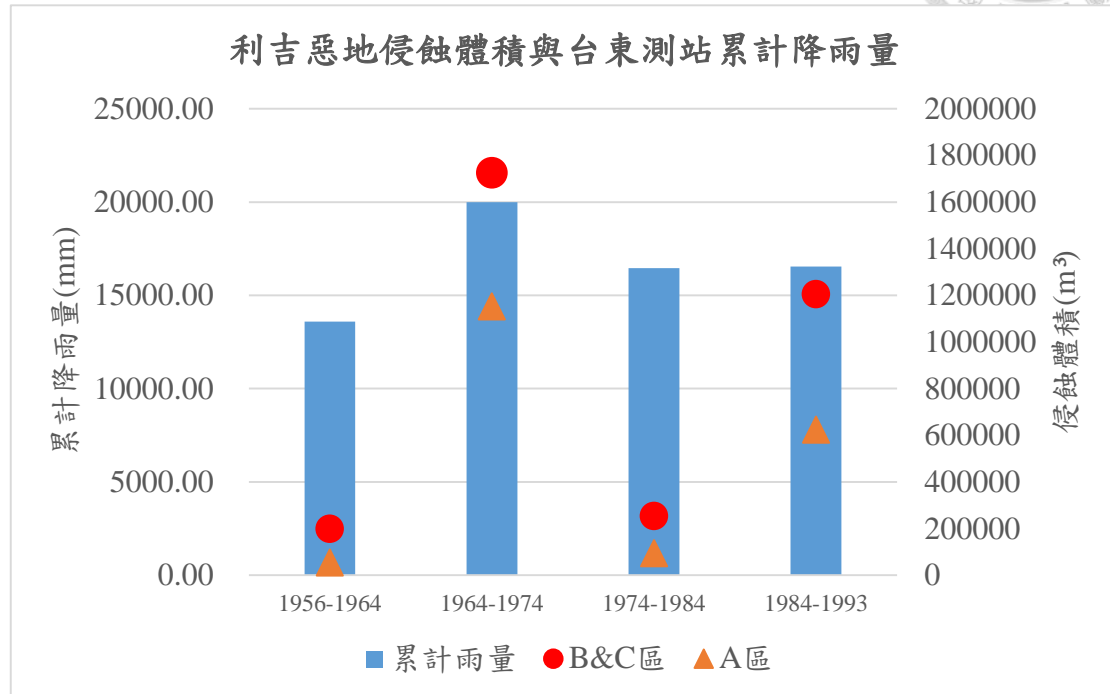


圖 6-23 利吉惡地侵蝕體積與台東測站累計降雨量統計。

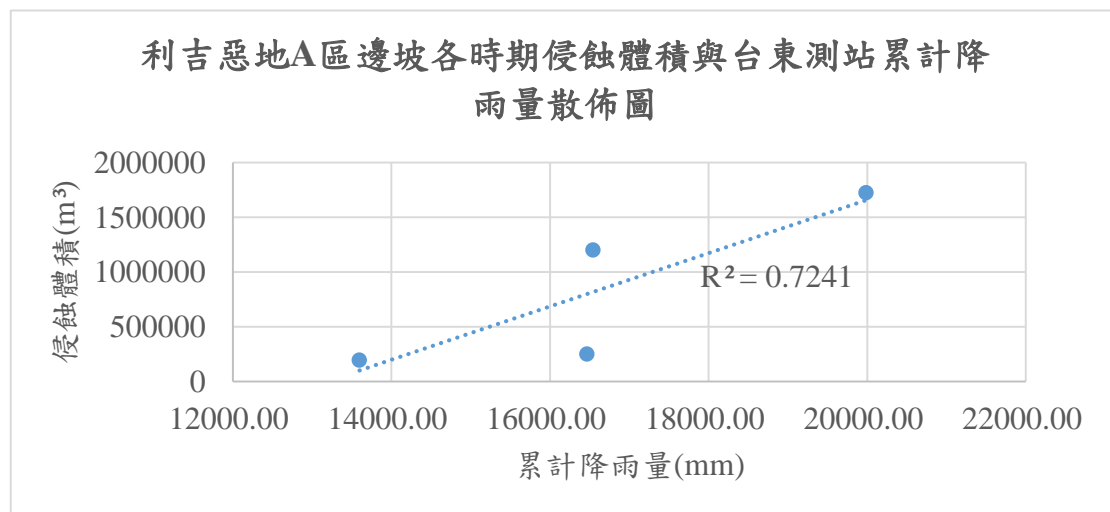


圖 6-24 利吉惡地 A 區邊坡各時期侵蝕體積與台東測站累計降雨量散佈圖。

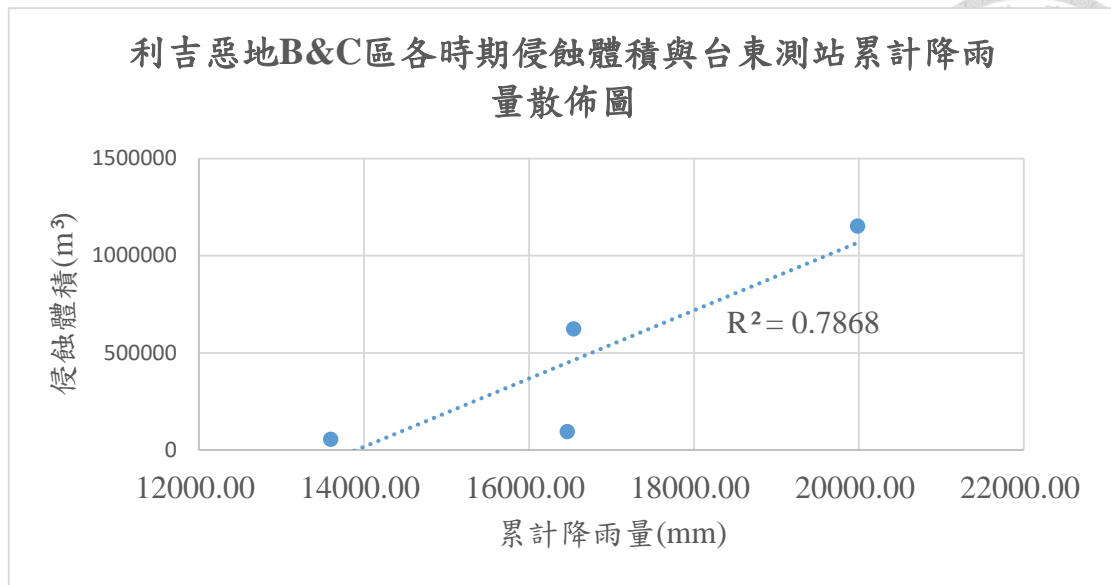


圖 6-25 利吉惡地 B&C 區邊坡各時期侵蝕體積與台東測站累計降雨量散佈圖。

本研究估算利吉惡地 1956 年至 2006 年內陸支流地區侵蝕率 6.6 ± 1.4 cm/yr，以及河岸地區侵蝕率 23.2 ± 1.4 cm/yr。回顧過去有關利吉惡地和台灣的侵蝕率，河道上水文測站所測量的平均侵蝕率遠低於利吉惡地觀測到的侵蝕率。過去通過在河川上架設沉積物通量的水文測站，台灣平均的侵蝕率約為 5.5mm/yr (Li, 1976)，卑南溪平均侵蝕率為 5mm/yr (Li, 1976)，而位於利吉惡地以下游的台東大橋水文測站則測得 20.9mm/yr (Dadson et al., 2003)。雖數值遠低於本研究所測，但臨近利吉惡地觀測到的侵蝕速率還是高於台灣平均侵蝕速率。

然而，若比對台灣其他惡地區域的侵蝕速率，過去學者在西南部的泥岩惡地使用侵蝕探針進行 4 年的測量，所取得的侵蝕率為 9cm/yr (Higuchi et al., 2013)。林俊全(1995)也於月世界進行為期 1 年的侵蝕探針觀測，所取得的侵蝕率介於 9.9cm/yr-21cm/yr。從數值來看，雖然西南部的泥岩惡地與東部利吉惡地的成因不同，但其侵蝕率相似。值得注意的是，西南部泥岩測到的最高值(21cm/yr)為強降雨事件所導致，年代際平均下來不一定是如此，而東部利吉惡地為 50 年 DoD 相減之平均侵蝕率，因此本研究認為除了過往認為的惡地的侵蝕受降雨影響外，利吉惡地應該有其他的侵蝕因素使得此區域侵蝕強烈。



6.4 邊坡侵蝕分佈

將各時期產製的正射影像中，利吉惡地邊坡與河川邊界進行數化。通過資料套疊可以發現，在利吉惡地侵蝕分佈上，邊坡倒退明顯的區域主要集中在卑南溪流域的河畔。

從數化的邊坡來看，河岸旁的利吉惡地邊坡坡頂明顯隨著時間倒退。若從邊坡剖面來看也可發現河岸邊的邊坡倒退非常明顯，在 50 年間的平均侵蝕率和侵蝕體積也非常高。相比之下，不在河岸邊的邊坡無論從 DoD 結果(圖 5-13 至 5-17)、剖面(圖 6-2)，或是侵蝕量來看，都沒有特別明顯的變化。此外，河岸邊的剖面(圖 6-14)有坡底倒退大於坡頂的趨勢，比對過去河道邊界可以發現，這些區域位在卑南溪的攻擊坡，因此河流侵蝕坡腳，造成坡底侵蝕比較強烈。

除了數化邊坡，透過歷史航空照片產製的正射影像來看，卑南溪在平水期時，河道從利吉惡地邊坡北側(現今利吉大橋南側)開始幾乎緊貼在利吉惡地邊坡一側，並且在利吉惡地邊坡最南邊(現今過了台東大橋後)的區域轉向，這樣的現象在本研究中的正射影像都很明顯。若從實際調查來看，現今的河道(圖 6-28)也是以相似的模式流經此區域。

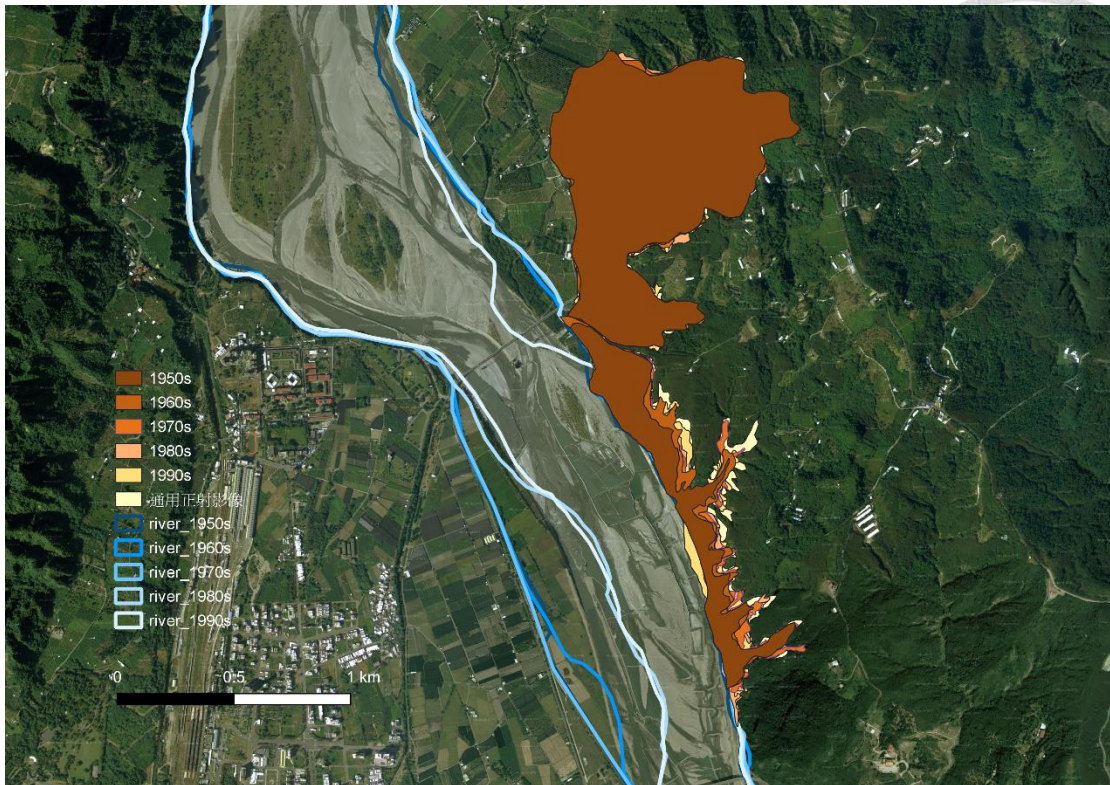


圖 6-26 利吉惡地各時期邊坡及河道分佈。底圖為通用正射影像。

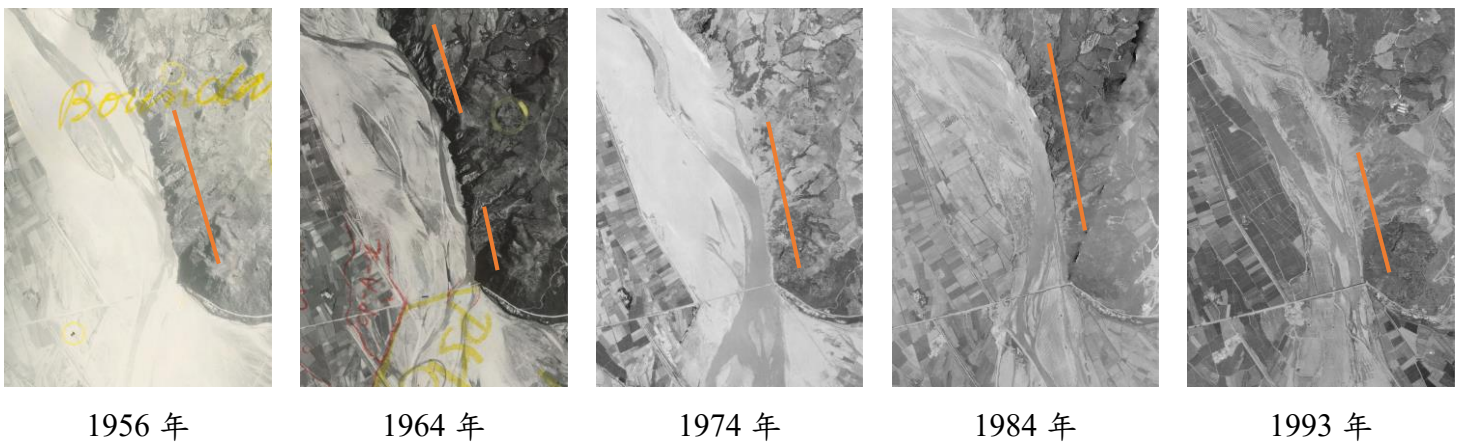


圖 6-27 各時期利吉惡地河岸邊坡正射影像。橘色線為平水期時卑南溪河道緊貼惡地邊坡的區域。



圖 6-28 利吉惡地邊坡平水期河床現況。拍攝位置為利吉大橋南側河岸。拍攝角度為向南，即往卑南溪下游方向拍攝。

利吉惡地地質公園區域皆為利吉混同層組成，被侵蝕的岩性理論上應是相同。回顧有關利吉惡地相關的邊坡侵蝕文獻，過去學者在討論泥岩邊坡及利吉惡地邊坡時主要考量降雨造成邊坡紋蝕溝變化(林俊全, 1995; 林俊全&任家弘, 1996; Higuchi et al., 2013)。然而這樣無法解釋利吉惡地在河岸邊的邊坡與不在河岸邊的邊坡侵蝕差異明顯的現象。因此，結合利吉惡地分佈在河岸邊的邊坡侵蝕更明顯來看，利吉惡地的侵蝕被卑南溪的影響應是利吉惡地不同區域侵蝕差異的原因。

綜上所述，本研究認為，若以利吉惡地地質公園整體的地形演育來看，除了過去認為的降雨，在年代際尺度的觀測下，河流的作用對於河岸邊的惡地邊坡也是影響侵蝕的主要因素之一。

第七章 結論



本研究使用歷史航空照片及 SfM 攝影測量技術，產製 1956 年至 1993 年之 DSM。透過研究方法和討論得出以下結論與建議：

- (一) 以台東利吉惡地為例，使用歷史航空照片以及 SfM 攝影測量技術能獲取高解析度的 DSM，其精度誤差最高為 3.1m，因此能將模型精度控制在公尺範圍內。此外，本研究成果從 DoD 方法相減的成果觀察到利吉惡地在不同時期的侵蝕分佈和變化。使用歷史航空照片以及 SfM 建模的操作流程與一般無人機或近景攝影測量建模相似，唯使用歷史航空照片建模時，與無人機及近景攝影測量不同，照片有蠟筆標記、底片色卡等標記，以及雲霧遮蔽，因此需先進行影像的挑選、裁切等前置處理。若因航照數量限制無法剔除，建議只挑選蠟筆標記較不明顯或少雲霧，並在其他航帶能看見特徵物的航照。這樣的挑選在有限制的情況下，DSM 上不會影響高程，但在正射影像上會有蠟筆標記導致觀測目標被遮擋的可能。
- (二) 從利吉惡地近 50 年的觀測來看，利吉惡地的邊坡主要發育模式為平行倒退模式和減坡後退為主，並且在卑南溪河岸的邊坡能看到明顯的變化。利吉惡地 DoD 方法的成果顯示利吉惡地在各時期的變化量最大的區域為卑南溪河岸的利吉惡地邊坡，在 50 年間被侵蝕了約 $3,965,279 \pm 239,779 \text{ m}^3$ 體積，平均侵蝕率為 $23.2 \pm 1.4 \text{ cm/yr}$ 。相較之下，不在河岸邊的利吉惡地邊坡 50 年間被侵蝕了約 $603,602 \pm 128,514 \text{ m}^3$ ，平均侵蝕率為 $6.6 \pm 1.4 \text{ cm/yr}$ 。由此可見在侵蝕分佈上，利吉惡地的邊坡侵蝕以河岸邊的邊坡更為明顯，推測利吉惡地的邊坡發育除了受降雨影響外，主要受卑南溪影響。此外，利吉惡地的植被會生長在坡頂、較緩的邊坡，以及坡底的崩積物，對於侵蝕強烈的邊坡坡面影響較小。

參考文獻



- Avouac, J. P., & Burov, E. B. (1996). Erosion as a driving mechanism of intracontinental mountain growth. *Journal of Geophysical Research*, 101, 17747-17769. <https://doi.org/10.1029/96JB01344>
- Báčová, M., Krása, J. (2016). Application of historical and recent aerial imagery in monitoring water erosion occurrences in Czech highlands. *Soil & Water Research*, 11(4), 267–276. <https://doi.org/10.17221/178/2015-SWR>
- Barrier, E.& Angelier, J. (1986). Active collision in eastern Taiwan: The Coastal Range. *Tectonophysics*, 125, 1-3, 39-7. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90006-5)
- Barrier, E.& Muller, C. (1984). New Observations and Discussion on the Origin and Age of the Lichi Melange. *Memoir of the Geological Society of China*, 6, 303-325.
- Bakker, M. & Lane, S. N. (2017). Archival photogrammetric analysis of river–floodplain systems using Structure from Motion (SfM) methods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 1274–1286. <https://doi.org/10.1002/esp.4085>
- Bierman, P. R. & Montgomery, D. R. (2014). Key Concepts in Geomorphology. W. H. Freeman and Company Publishers. ISBN-13: 978-1-4392-3860-1
- Biq, C. (1971). Comparison Of Melange Tectonics In Taiwan And In Some Other Mountain Belts. *Petroleum Geology of Taiwan*, 9, 79-106.
- Carvalho, R. C., Allan, B., Kennedy, D. M., Leach, C., O'Brien, S., Ierodiaconou, D. (2021). Quantifying decadal volumetric changes along sandy beaches using improved historical aerial photographic models and contemporary data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1002/esp.5130>
- Castelltort, S., Goren, L., Willett, S. D., Champagnac, J., Herman, F., & Braun, J. (2012) River drainage patterns in the New Zealand Alps primarily controlled by plate tectonic strain. *Nature Geoscience*, 5, 744-748. <https://doi.org/10.1038/NGEO1582>
- Champagnac, J.-D., Schlunegger, F., Norton, K., Blanckenburg, F. v., Abbühl, L. M.& Schwab, M. (2009). Erosion-driven uplift of the modern Central Alps. *Tectonophysics*, 474, 236-249. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.024>
- Chang, C.-P., Angelier, J.& Huang & C.-Y. (2000). Origin and evolution of a me´lange: the active plate boundary and suture zone of the Longitudinal Valley, Taiwan. *Tectonophysics*, 325, 43-62

- Chang, C.-P., Angelier, J. & Huang, C.-Y. & Liu, C. S. (2001). Structural evolution and significance of a mélange in a collision belt: the Lichi Mélange and the Taiwan arc–continent collision. *Geological Magazine*, 138 (6), 633-651. <https://doi.org/10.1017/S0016756801005970>
- Chen, R.- F., Chan, Y.- C., Angelier, J., Hu, J.- C., Huang, C., Chang, K.- J. & Shih, T.- Y. (2005). Large earthquake-triggered landslides and mountain belt erosion: The Tsaoling case, Taiwan. *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 1164-1172. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.04.017>
- Chen, K. H. & Bürgmann, R. (2017). Creeping fault: Good news, bad news? *Reviews of Geophysics*, 55, 282-286. <https://doi.org/10.1002/2017RG000565>
- Chen, W. S. & Wang, Y. (1988). The Plio-Pleistocene Basin Development In The Coastal Range Of Taiwan. *Symposium on the Arc-Continent Collision and Orogenic Sedimentation in Eastern Taiwan and Ancient Analogs, Handbook, Taiwan, ROC*, 21-22.
- Chi, W.-R., Namson, J. & Suppe, J. (1981). Stratigraphic Record Of Plate Interactions In The Coastal Range Of Eastern Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, 4, 155-194.
- Clark, M. K., Schoenbohm, L. M., Royden, L. H., Whipple, K. X., Burchfiel, B. C., Zhang, X., Tang, W., Wang, E., & Chen, L. (2004). Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23(1), TC1006. <https://doi.org/10.1029/2002TC001402>
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B, Hsieh, M. L., Willett, S. D., Hu, J. C., Horng, M. J., Chen, M. C., Stark, C. P., Lague, D. Lin, J. C. (2003). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426, 648–651. <https://doi.org/10.1038/nature02150>
- Deffontaines, B., Chang, K.-J., Champenois, J., Fruneau, B., Pathier, E., Hu, J.-C., Lu, S.-T. & Liu, Y.-C. (2017). Active interseismic shallow deformation of the Pingting terraces (Longitudinal Valley – Eastern Taiwan) from UAV high resolution topographic data combined with InSAR time series. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8:1, 120-136. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1181678>
- Derrioux, F., Siame, L. L., Bourlès, D. L., Chen, R.- F., Braucher, R., Léanni, L., Lee, J.- C., Chu, H.- T. & Byrne, T. B. (2014). How fast is the denudation of the Taiwan mountain belt? Perspectives from in situ cosmogenic ¹⁰Be. *Journal of Asian Earth*

- Sciences*, 88, 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.03.012>
- Higuchi, K., Chigira, M. & Lee, D.- H. (2013). High rates of erosion and rapid weathering in a Plio-Pleistocene mudstone badland, Taiwan. *Catena*, 106, 68-82. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.005>
- Hilton, R. G., & West, A. J. (2020). Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews*, 1, 284-299. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>
- Ho, C-S. (1977). Melanges In The Neogene Sequence Of Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, 2, 85-96.
- Huang, C.-Y., Chien C.-W., Yao, B.& Chang, C.-P. (2008). The Lichi Mélange: A collision mélange formation along early arcward backthrusts during forearc basin closure, Taiwan arc-continent collision. *The Geological Society of America Special Paper*, 436, 127-154. [https://doi.org/10.1130/2008.2436\(06\)](https://doi.org/10.1130/2008.2436(06))
- Hudson, N. (1993). Field Measurement of Soil Erosion and Runoff. *Food and Agriculture Organization of the United Nations Soils Bulletin*.
- Hsu, T. L. (1956). Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. *Bullerin of the Geological Survey of Taiwan*, No. 8.
- Larsen, I. J.& Montgomery, D. R. (2012). Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience*, 5, 468-473. <https://doi.org/10.1038/NGEO1479>
- Lee, C.-T. (1997). Methods of Soil Erosion Measurement. *Journals of Geophysical Science*, 23, 89-106.
- Li, Y.- H. (1976). Denudation of Taiwan Island since the Pliocene Epoch. *Geology*, 105-107.
- Liou, J. G., Suppe, J.& Ernst, W. G. (1977). Conglomerates and Pebbly Mudstones in the Lichi Melange, Eastern Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, 2, 115-128.
- Lowe, D. G. (1999). Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. *International Conference on Computer Vision*, 1999, 1150-1157.
- Lucieer, A., Jong, S. M. & Turner, D. (2013). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 1-20. <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>
- Lungberg, N.& Dorsey, R. J. (1988). Synorogenic Sedimentation and Subsidence in a Plio-Pleistocene Collisional Basin, Eastern Taiwan. *New Perspectives in Basin*

- Analysis*, 265-280. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3788-4_13
- Malavieille, J., Lallemand, S. E., Dominguez, S., Deschamps, A., Lu, C-Y., Liu, C-S. & Schnürle, P., Angelier, J., Collot, J-Y., Deffontaines, B., Fournier, M., Hsu, S-K., Formal, J.-P. L., Liu, S.-Y., Sibuet, J-C., Thareau, N. & Wang, F. (2002). Arc-Continent Collision in Taiwan: New Marine Observations and Tectonic Evolution. *Geological Society of America Special Paper*, 358. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2358-2.187>
- McManus, J. & Duck, R. W. (1985). Sediment Yield Estimated from Reservoir Siltation in the Ochil Hill, Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 193-200. <https://doi.org/10.1002/esp.3290100211>
- Molnar, P., & England, P. (1990). Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? *Nature*, 346, 29-34. <https://doi.org/10.1038/346029a0>
- Molnar, P., Boos, W. R., & Battisti, D. S. (2010). Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38, 77-102. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152456>
- Mölg, N. & Bolch, T. (2017). Structure-from-Motion Using Historical Aerial Images to Analyse Changes in Glacier Surface Elevation. *Remote Sensing*, 9, 1021. <https://doi.org/10.3390/rs9101021>
- Murase, M., Matta, N., Lin, C. H., Chen, W. S. & Koizumi, N. (2013). An episodic creep-slip event detected by precise leveling surveys in the central part of the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, in 2011–2012. *Tectonophysics*, 608, <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2013.07.027>
- Page, B. M. & Suppe, J. (1981). The Pliocene Lichi Melange of Taiwan: Its Plate-Tectonic and Olistostromal Origin. *American Journal of Science*, 281, 193-227.
- Riquelme, A., Soldato, M. D., Tomás, R., Cano, M., Bordehore, L. J. & Moretti, S. (2019). Digital landform reconstruction using old and recent open access digital aerial photos. *Geomorphology*, 329, 206-223. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.01.003>
- Schiefer, E. & Gilbert, R. (2007). Reconstructing morphometric change in a proglacial landscape using historical aerial photography and automated DEM generation. *Geomorphology*. Vol. 88, Issues 1-2, 167-178.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.11.003>

- Snavelly, K. N. (2008). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Ph.D. thesis, University of Washington, USA.
- Suppe, J. (1981). Mechanics Of Mountain-Building And Metamorphism In Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, 4, 67-89.
- Teng, L. S. & Wang, Y. (1981). Island Arc System of the Coastal Range, Eastern Taiwan. *Processings of the Geological Society of China*, 24, 99-112.
- Teng, L. S. & Lo, H-J. (1985). Sedimentary sequences in the island arc settings of the Coastal Range, eastern Taiwan. *Science Reports of the National Taiwan University ACTA Geologica Taiwanica*, 23, 77-98.
- Teng, L. S. (1987). Tectostratigraphic Facies and Geologic Evolution of the Coastal Range, Eastern Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, 8, 229-250.
- Thomas, A. W. & Welch, R. (1988). Measurement of Ephemeral Gully Erosion. *American Society of Agricultural Engineers*, 31(6), 1723-1728.
- Thomas, M. Y., Avouac, J.-P., Champenois, J., Lee, J.-C. & Kuo, L.-C. (2014). Spatiotemporal evolution of seismic and aseismic slip on the Longitudinal Valley Fault, Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 5114–5139, <https://doi.org/10.1002/2013JB010603>
- Ullman, S. (1979). The Interpretation of Structure from Motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* 203.1153 (1979): 405-426.
- Wang, C-S. & Chen, T.- T. (1966). Turbidite Formations Around The Southern Plunge Of The Eastern Coastal Range Near Taitung. *Proceedings of the Geological Society of China*, 9, 46-54.
- Wang, C.- S. (1976). The Lichi Formation of the Coastal Range and Arc-Continent Collision in Eastern Taiwan. *Bulletin of the Geological Survey of Taiwan*, 25, 73-87.
- Warrick, J. A., Ritchie, A. C., Adelman, G., Adelman, K. & Limber, P. W. (2017). New Techniques to Measure Cliff Change from Historical Oblique Aerial Photographs and Structure-from-Motion Photogrammetry. *Journal of Coastal Research*, 33, 39-55. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00095.1>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E. & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Surface Processes and Landforms*, 35, 136-156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>

Whipple, K. X. (2009). The influence of climate on the tectonic evolution of mountain belts. *Nature Geoscience*, 2, 97-104. <https://doi.org/10.1038/ngeo413>

Willett, S. D. (1999). Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *Journal of Geophysical Research*, 104, 28957-28981. <https://doi.org/10.1029/1999JB900248>

Willet, S. D., Fisher, D., Fuller, C., Yeh, E.- C. & Lu, C.- Y. (2003). Erosion rates and orogenic-wedge kinematics in Taiwan inferred from fission-track thermochronometry. *Geology*, 31, 11, 945-948. <https://doi.org/10.1130/G19702.1>

Young, A. (1972). Slope. Oliver and Boyd Ltd. ISBN 0-582-48433-2.

Zheng, Y., Lin, J., Li, B., Liu, J. & Liu, M. (2020). Process of Soil Erosion Study Method. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 526, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/526/1/012008>

陳文山(1993)。海岸山脈地區花東縱穀斷層的活動性淺談。《地工技術雜誌》，44，52-57。

陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宵、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生、盧詩丁(2008)。從古地震研究與 GPS 資料探討縱穀斷層的分段意義，《經濟部中央地質調查所特刊》，20。

江若慈、賴柏溶、曾義星(2016)。台灣歷史航照影像糾正對位元。《航測與遙測學刊》，第二十一卷(1)，43-54。 [https://doi.org/10.6574/JPRS.2016.21\(1\).4](https://doi.org/10.6574/JPRS.2016.21(1).4)

李應頌(2022)。由歷史航照重建探討花東縱谷北段活動構造與 1972 年瑞穗地震之關係。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。

林靜儀(2022)。利用歷史航空影像與運動回復結構分析新竹地區構造地形。國立臺灣大學地理環境資源學系碩士論文。

林俊全(1995)。泥岩邊坡發育模式之研究。國立臺灣大學地理學系地理學報，第十八期，45-58。

林俊全、任家弘(1996)。台東利吉泥岩邊坡沖蝕特性初探個野外人工降雨模擬實驗。《國立臺灣大學地理學系地理學報》，第二十期，33-47。

林佩安(2020)。臺灣歷史航照影像鑲嵌及地理對位處理。國立成功大學測量與空間資訊學系碩士論文。

臺東縣政府(2020)。臺東縣「利吉惡地地質公園」縣定自然地景評估報告書。
王鑫(1988)。泥岩惡地地景保留區之研究。生態研究，4。行政院農業委員會編
印。
向山栄 & 佐々木(2007)。新しい地形情報図 ELSAMAP。地図，45(1)，47-56。
<https://doi.org/10.11212/jjca1963.45.47>



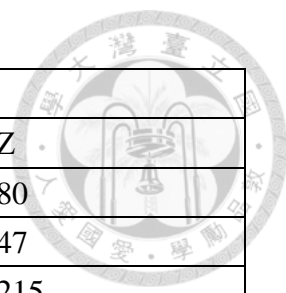
附錄 1 控制點與檢核點坐標



1956 年

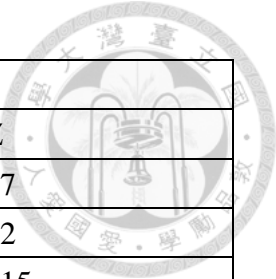
控制點			
編號	X	Y	Z
P01	263761.375	2525447.912	80
P02	263018.859	2522084.171	47
P03	262971.19	2522572	52
P04	265763.488	2522871.42	215
P05	265399.782	2523491.161	235
P06	265270.158	2523947.77	241
P08	265911.73	2521056.945	43
P09	263438.106	2520800.836	38
P10	263862.223	2524761.896	73
P12	264108.912	2526292.146	103
P14	265434.2259	2524391.736	257
P17	265119.6709	2528098.679	166
P18	265412.7016	2522426.355	180
P24	265932.918	2521057.821	46
P25	264064.424	2523542.776	49
P26	264285.136	2524364.221	91
P30	263938.565	2523888.235	51
P30	263938.6	2523888	51
檢核點			
P07	265087.456	2523264.776	189
P13	263959.311	2524360.711	70
P31	265378.24	2521862.538	157
P32	263689.978	2521687.708	37

1964 年



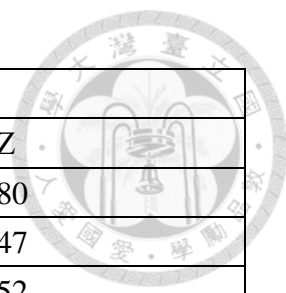
控制點			
編號	X	Y	Z
P01	263761.375	2525447.912	80
P02	263018.859	2522084.171	47
P04	265763.488	2522871.42	215
P05	265399.782	2523491.161	235
P06	265270.158	2523947.77	241
P08	265911.73	2521056.945	43
P09	263438.106	2520800.836	38
P11	265516.302	2525597.566	280
P12	264108.912	2526292.146	103
P14	265434.2259	2524391.736	257
P16	265000.6382	2527277.191	145
P17	265119.6709	2528098.679	166
P22	264736.148	2523095.881	180
P24	265932.918	2521057.821	46
P25	264064.424	2523542.776	49
P29	264259.5749	2529239.01	116
P30	263938.565	2523888.235	51
檢核點			
P07	265087.456	2523264.776	189
P13	263959.311	2524360.711	70
P18	265412.7016	2522426.355	180
P26	264285.136	2524364.221	91

1974 年



控制點			
編號	X	Y	Z
P02	263018.859	2522084.171	47
P03	262971.19	2522571.512	52
P04	265763.488	2522871.42	215
P05	265399.782	2523491.161	235
P08	265911.73	2521056.945	43
P09	263438.106	2520800.836	38
P10	263862.223	2524761.896	73
P11	265516.302	2525597.566	280
P12	264108.912	2526292.146	103
P14	265434.2259	2524391.736	257
P15	265287.6666	2526115.71	279
P16	265000.6382	2527277.191	145
P18	265412.7016	2522426.355	180
P22	264736.1484	2523095.881	180
P24	265932.918	2521057.821	46
P25	264064.4237	2523542.776	49
P26	264285.136	2524364.221	91
P27	267379.9543	2520941.917	21
檢核點			
P03	265087.456	2523264.776	189
P13	263959.311	2524360.711	70
P19	265066.0975	2521222.222	38
P28	266413.5448	2523106.969	194

1984 年



控制點			
編號	X	Y	Z
P01	263761.375	2525447.912	80
P02	263018.859	2522084.171	47
P03	262971.19	2522571.512	52
P04	265763.488	2522871.42	215
P05	265399.782	2523491.161	235
P06	265270.158	2523947.77	241
P08	265911.73	2521056.945	43
P09	263438.106	2520800.836	38
P10	263862.223	2524761.896	73
P11	265516.302	2525597.566	280
P12	264108.912	2526292.146	103
P14	265434.2259	2524391.736	257
P15	265287.6666	2526115.71	279
P18	265412.7016	2522426.355	180
P22	264736.148	2523095.881	180
P24	265932.918	2521057.821	46
檢核點			
P13	263959.311	2524360.711	70
P19	265066.0975	2521222.222	38
P21	263552.813	2522293.542	41
P03	265087.456	2523264.776	189

1993 年



控制點			
編號	X	Y	Z
P01	263761.375	2525447.912	80
P03	262971.19	2522571.512	52
P05	265399.782	2523491.161	235
P08	265911.73	2521056.945	43
P09	263438.106	2520800.836	38
P10	263862.223	2524761.896	73
P11	265516.302	2525597.566	280
P12	264108.912	2526292.146	103
P14	265434.2259	2524391.736	257
P16	265000.6382	2527277.191	145
P17	265119.6709	2528098.679	166
P18	265412.7016	2522426.355	180
P20	265424.8642	2521786.123	155
P24	265932.918	2521057.821	46
檢核點			
P02	263018.859	2522084.171	47
P07	265087.456	2523264.776	189
P13	263959.311	2524360.711	70
P15	265287.6666	2526115.71	279
P19	265066.0975	2521222.222	38

附錄 2 歷史航空照片列表



1956 年

照片編號	拍攝日期	拍攝高度 (英尺)
2W8G-17-007	1956/06/28	10000
2W8G-17-008	1956/06/28	10000
2W8G-17-009	1956/06/28	10000
2W8G-17-010	1956/06/28	10000
2W8G-17-114	1956/06/28	10000
2W8G-17-115	1956/06/28	10000
2W8G-17-116	1956/06/28	10000
2W8G-17-117	1956/06/28	10000

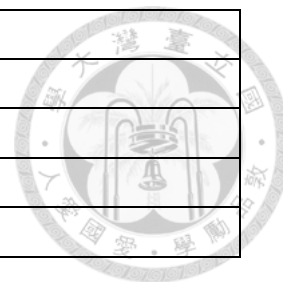
1964 年

照片編號	拍攝日期	拍攝高度 (英尺)
53-054-044	1964/08/06	16000
53-054-045	1964/08/06	16000
53-054-046	1964/08/06	16000
53-054-047	1964/08/06	16000
53-054-048	1964/08/06	16000
53-054-073	1964/08/06	16000
53-054-074	1964/08/06	16000
53-054-075	1964/08/06	16000
53-054-076	1964/08/06	16000
53-054-077	1964/08/06	16000
53-054-078	1964/08/06	16000

1974 年

照片編號	拍攝日期	拍攝高度 (英尺)
63-016-0265	1974/06/22	11200
63-016-0266	1974/06/22	11200
63-016-0267	1974/06/22	11200
63-016-0268	1974/06/22	11200
63-016-0269	1974/06/22	11200
63-024-0114	1974/07/26	11200

63-024-0115	1974/07/26	11200
63-024-0116	1974/07/26	11200
63-024-0117	1974/07/26	11200
63-024-0118	1974/07/26	11200
63-024-0119	1974/07/26	11200



1984 年

照片編號	拍攝日期	拍攝高度 (英尺)
73p021_127	1984/06/30	未知
73p021_128	1984/06/30	未知
73p021_129	1984/06/30	未知
73p021_130	1984/06/30	未知
73p021_131	1984/06/30	未知
73p021_132	1984/06/30	未知
73p021_133	1984/06/30	未知
73p021_134x	1984/06/30	未知
73p021_151	1984/06/30	未知
73p021_152x	1984/06/30	未知
73p021_153x	1984/06/30	未知
73p021_154x	1984/06/30	未知
73p021_156x	1984/06/30	未知

1993 年

照片編號	拍攝日期	拍攝高度 (英尺)
82p034_1186	1993/04/29	未知
82p034_1187	1993/04/29	未知
82p034_1214	1993/04/29	未知
82p034_1215	1993/04/29	未知
82p034_1216	1993/04/29	未知
82p034_1217	1993/04/29	未知
82p034_1218	1993/04/29	未知
82p034_1312	1993/04/29	未知
82p034_1313	1993/04/29	未知
82p034_1314	1993/04/29	未知
82p034_1315	1993/04/29	未知
82p124_2796	1993/09/20	未知
82p124_2797	1993/09/20	未知

82p124_2798	1993/09/20	未知
82p124_2799	1993/09/20	未知
82p124_2810x	1993/09/20	未知
82p124_2811x	1993/09/20	未知
82p124_2812x	1993/09/20	未知
82p124_2813x	1993/09/20	未知
82p124_2831	1993/09/20	未知
82p124_2832	1993/09/20	未知
82p124_2833	1993/09/20	未知
82p124_2834	1993/09/20	未知

