

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

(子計畫三)集集地震所引發山崩地下游河流環境的監測

(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2116-M-002-033-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學地質科學系暨研究所

計畫主持人：劉平妹

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 11 月 13 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告

集集地震所引發山崩地下游河流環境的監測(第三年)

Monitor of response of bedrock rivers downstream of 1999

Chi-Chi coseismic landslides to large floods

計畫編號: NSC 91-2116-M-002 -033

執行期限: 91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人: 劉平妹 國立臺灣大學地質科學系

Abstract

We examined aerial photographs taken in 1976, 1980, 1985, 1990 and 1997-2001 to inspect the response of the Gen and Ten-wei-keng rivers (Ninety-nine mountain terrain) upon disastrous typhoons and the 1999 Chi-Chi earthquake, which triggered great landslides and rock falls. A total of 24 transects also was repeatedly surveyed along the Ten-wei-keng river to monitor its evolution since the earthquake. We find: (1) The 2001 Toraji Typhoon resulted in debris flows, the greatest since 1976, in almost all low-order rivers in the study area. Since the typhoon did not bring about particularly severe rainfall, this debris-flow event apparently resulted from the accumulation of debris during the 1999 earthquake, which increased the slope of the rivers. The great supply of debris from the tributaries also caused aggradation in the main valley (ca. 120,000 m³ debris was deposited in the lower 2 km-long Ten-wei-keng River and its river mouth). Without heavy rainfall, the

river became stable within one year after the typhoon, during which minor deposition was only locally detected (downstream of Check-dam VII [1.6 km from the river mouth] of the Ten-wei-keng River and at its river mouth). (2) Construction of Check dams and artificial banks, which stabilizes, steepens river channels and facilitates sediment transport, controlled the evolution of the studied rivers. These constructed river reaches were less widely alluviated during the Toraji Typhoon than during the previous typhoons. The Toraji Typhoon, however, resulted in greater deposition downstream of these river reaches: at the place downstream of Check-dam II (0.9 km from the river mouth) of the Gen River, where erosion dominated during the previous typhoons, and at the mouth of Ten-wei-keng River (creating a debris fan).

(Keywords: Debris flow, Deposition, Chi-Chi earthquake, Toraji Typhoon, Check Dam)

中文摘要：

本研究利用不同年份的航照判識，及 2001-2002 年間野外實測（於田尾坑溪），嚐試了解九九峰山區自 1976 年來（含 1999 年集集地震及 2001 年桃芝颱風）河流形貌及環境的演變。主要結果包括：

(1) 1999 年地震崩落在研究區各支流溪谷的岩屑在桃芝颱風時經土石流大量向下游搬運，並造成主流溪谷的加積，規模為歷年之最。總計約有 120,000 立方公尺的岩屑堆積在田尾坑溪下游兩公里長的溪谷中。由於桃芝颱風時的降雨在歷年颱風紀錄中並不算大，也無引發新的山崩，這大規模的搬運與堆積事件當起因於地震後支流溪床坡度的增加（因岩屑大量堆積）。桃芝颱風後至今並未有較大的降雨，小規模加積僅在田尾坑溪局部河段中出現（七號攔砂壩下游及溪口），整體河床並在 2002 年秋天以前已趨向穩定。(2) 近十年來攔砂壩、河岸護坡的大量興建已使研究區的河道變窄、整體河床變陡，同時增加岩屑向下游輸送的效率（田尾坑溪六號攔砂壩以降，乾溪五號至二號攔砂壩之間）。即使經歷桃芝颱風，超大量土石的供應並未能完全淹沒這些整治過的溪床（不同於整治前颱風時的狀況），這些土石卻繼續向下游輸送，堆積在乾溪二號攔砂壩下游（先前該河段颱風時一直以下切為主），並在田尾坑溪溪口造成一土石扇（並未在其它颱風事件中發現）。

（關鍵詞：土石流，河床加積，九九峰，集集地震，桃芝颱風，攔砂壩）

1. 研究目的與地點

九二一集集地震在九九峰山區引發大量落石，這些岩屑儲藏在溪谷中，等待雨季的到來重新向下游搬運堆積。本研究

的目的有二：(1) 監測源自九九峰山區河川（尤針對田尾坑溪[1.5 km²]）集集地震以來形貌的變遷及侵蝕堆積的狀況；

(2) 了解這變遷在河川長時期演育過程中所扮演的角色（即地震對河流演育的影響），研究對象乃田尾坑溪及乾溪（4.3 km²）（圖一）。

2. 研究方法與過程

本研究利用全測儀量測地貌座標（相對所設立的基準點）。至 2001 年底（跨越桃芝颱風），共計在田尾坑溪中游六號及七號攔砂壩間建立 15 條垂直河道走向的測線，測線中點與點的距離平均 0.5-1 公尺，兩測線間隔約 20-30 公尺。爾後陸續在五號及六號攔砂壩間建立 9 條測線，間距約 30-40 公尺（為方便重複測量及觀察河道地形變化，自 2001 年冬起，各測線均噴漆作記）（圖二至圖五）。2002 年夏，四號及五號攔砂壩間遭疏浚，被掘除的土石深約三公呎（總約 14,000 m³）；疏浚後的河道形貌也量測完成（表一）。不同時期量測的數值均以所設立的基準點（或參考點）為準，轉換成同一座標系統；該測量及座標轉換的誤差在 X、Y 平面上小於 15 公分，Z 軸（高程）上小於 2 公分（跨越數百公尺測距）。考慮河床的不規則程度、測點的密度及不同時間對同一斷面測量位置的吻合程度，這些誤差當在容忍的範圍以內。

本研究也利用 1997-2001 年的航空照片，檢視這段期間田尾坑溪地貌的變遷（經歷 1996 賀伯颱風、1999 集集地震及 2001 桃芝颱風）。為了解近三十多年來田尾坑溪及乾溪流域對大雨事件的反應，1976，1980，1985，1990 年的航空照片（均攝於當年大颱風或降雨事件之後）也加入檢視；同期間降雨資料則參考

鄰近地區之草屯、國姓、雙冬、及北山之氣象站紀錄。

3. 主要成果與結論

- (1) 桃芝颱風的影響：原本穩定、植被叢生的溪床在經歷桃芝颱風後面目全非。即使沒有新的山崩發生，土石流盛行於各支流，並進入主流河道，大幅增加主流礫石河床（未覆蓋植被者）的寬度。估計共有 120,000 立方公尺的土石堆積在田尾坑溪的主流溪谷中，主要發生在四號攔砂壩以上河段（圖一），及溪口（約 30,000 立方公尺）。所量測之六、七號攔砂壩間主流河道總加積量約為 16,000 立方公尺，河床平均坡度（不含攔砂壩）由颱風前的 9.7%（將河道最低線投影至溪谷中線計算）增為颱風後的 10.2%（由各斷面之平均高程計算）。此河段加積以七號攔砂壩下游（三分之二高之壩體遭掩埋）及支流 B、C 匯口處為最，厚達 2-3 公尺（圖三、六）。加積的岩屑首先填滿颱風前的河道（往往為各斷面加積厚度最大之處；圖三），隨後側向擴張；下切最後發生，尤以支流 B 與六號攔砂壩之間最劇。此河段原河岸地約 5,000 立方公尺遭侵蝕，下切後的溪床高度甚至低於颱風前者（圖六）（這下切當與攔砂壩 U 型排水道的設計有關——迫使水流集中，並以之為侵蝕基準點）。
- (2) 桃芝颱風時田尾坑溪岩屑的搬運特徵：颱風後田尾坑溪主流溪床（平均坡度約 7 度）留下辮狀河道，河道間砂洲多平坦（或略呈圓弧拱起），似為河流搬運、沉積的產物。然而，河床常出露層理不良、富含沙泥的礫層（圖七），暗示至少在河床加積的初期，土石流會盛行於其間。這些土石流堆積物之上往

往為較粗粒（中、大礫）的礫層所覆蓋（圖七）；這些礫層組成砂洲表面，淘選良好，礫石常作疊瓦狀排列（相似的沉積序列也在支流土石扇中出現）。這些礫層推測乃土石流搬運過程中分異而來（即粗粒物質在土石流運動中向上、向前集中），並經爾後水流營力搬運而富集；搬運這些礫石可能不需很強的水流（六、七號攔砂壩間最大水深當不超過一公尺），因為礫石在被水流搬運之前即已處於運動狀態，而事先被土石流填滿、移平的溪床表面（粗糙度降低）也有利其搬運。

- (3) 桃芝颱風後田尾坑溪的地形演育：颱風後至隔年夏天，五至七號攔砂壩間大部分河段均出現小規模加積及（或）侵蝕（圖四、五、六）；最大的地形變化乃發生在七號攔砂壩下游一百公尺內的河床。該河段在颱風後持續加積，但速率隨時間遞減（圖六）；加積量約 5,000 立方公尺，佔同時期六、七號攔砂壩間總加積量的百分之七十；颱風時加積量較小的河段此時正是岩屑堆積最多的地方（圖六），這當反應了來自上游礫石持續的供應（雖無大雨），使加積作用向下游擴展，並增加整體河床的坡度。礫石的供應顯然在 2002 年七月以前已大幅減少，使七號攔砂壩下游四十公尺內發生下蝕（圖六）。九月以後，所量測的剖面多無可解析的地形變化，整體河床趨向穩定。
- (4) 九二一地震的角色：九二一地震所引發山崩、落石的規模遠大於 1976 年以來各颱風所引發者。每次大颱風時，各支流中礫石溪床的寬度顯著較颱風前增加，但以桃芝颱風之時為最；該颱風時也有最多的支流口發育土石扇。顯然地，桃芝颱風期間，進入田尾坑及乾溪

主流的土石量遠勝過從前，這當導因於九二一地震土石大量的供應（增加溪床坡度、減少溪床粗糙度），因為桃芝颱風似乎並未帶來特別大的降雨，研究區近兩年未經歷颱風，地形趨向穩定，但主流與各支流中仍儲藏大量岩屑，大規模河床的加積與侵蝕在往後的大雨事件中仍無可避免。

(5) 人為開發的影響：田尾坑及乾溪下游在 1976 年以前即建有攔砂壩，但大幅防洪設施的興建乃始於 1986 年後。攔砂壩的設立（往往僅需一次大雨事件即填滿）使河床平均坡度增加（雖然壩與壩間坡度減緩），攔砂壩 U 型排水道及河岸護坡的設置使河道固定、變窄；這些措施都增加岩屑向下游輸送的效率，原本以河流為主的搬運方式甚至可能轉變為土石流。這些人造設施已對研究區河川的演育發生影響——田尾坑及乾溪中上游河段的礫石溪床經歷各大颱風時往往能佔滿溪床（即約達到最寬），但往下游（田尾坑溪六號攔砂壩以降，乾溪五號至二號攔砂壩之間），礫石溪床寬度自 1990 年楊希颱風以來似乎有縮小的趨勢；即使經歷桃芝颱風，超大量土石的供應並未使這些下游礫石溪床回復楊希颱風時的寬度——這些土石繼續向下輸送，堆積在乾溪二號攔砂壩下游（先前該河段颱風時一直以切為主），並在田尾坑溪口造成一土石扇（並未在其它颱風事件中發現）。

(6) 晚全新世以來田尾坑溪及乾溪的地形演育：沿烏溪，研究區南緣發育一連續性良好的階地（外緣比高二、三十公尺；以下稱主要階地）（圖一），田尾坑溪及乾溪切過其中進入烏溪（田尾坑溪並曾經在其上發育沖積扇）。覆蓋在

這階地上的礫石厚可達十公尺以上，由其上發育不良的土壤推測，該階地面離水的年代（即烏溪開始下切的時間）當不老於幾千年前。田尾坑溪及乾溪中、下游局部河段亦有狹窄的階地發育（上或有支流土石扇）（比高多 < 5m）；乾溪中有比高較高、連續性較佳者，向下游似可對比溪口的主要階地（圖一）。田尾坑及乾溪溪床在溪口處均顯著變窄，這可能反應了烏溪相對快速的下切（按鄰近河段一略紅土化的階地比高推斷，此間烏溪近三萬年來平均的下切速率為每年二、三公厘）。唯位於乾溪中的主要階地越往上游比高越大（即使修築了攔砂壩），暗示其遭下切的原因可能包括了沉積物供應量的減少（相對當時水力狀況）。推測晚全新世的某一時期，或地震或加上微氣候變遷曾導致整個烏溪流域（含研究區）沉積物供應量的增加，烏溪在此時停止下切（甚至加積），同時期田尾坑及乾溪溪谷達到最寬（坡度也當最陡）；爾後沉積物供應量相對減少，加上地塊隆升從未休止，導致烏溪下切。侵蝕基準面的下降及沉積物供應量的減少也使田尾坑溪及乾溪下切，河道寬度縮減（坡度也變緩）（即此時河流用較窄的寬度及較緩的坡度即可搬運所供應的岩屑）。近幾百年來沉積物的供應量可能仍不及晚全新世的全盛時期，使兩溪在局部河段留下低位階地（即此時沉積物的供應量不足以埋沒整條溪谷〔當溪水流量小時〕或阻止河流下切〔當溪水流量大時〕）。近十年來田尾坑及乾溪地形的演育則受控於人為開發——攔砂壩與護堤的修築使河道變窄、平均坡度增大，加速岩屑向下游輸送；侵蝕基準面的影響也止於第一號攔砂壩。

4. 展望:

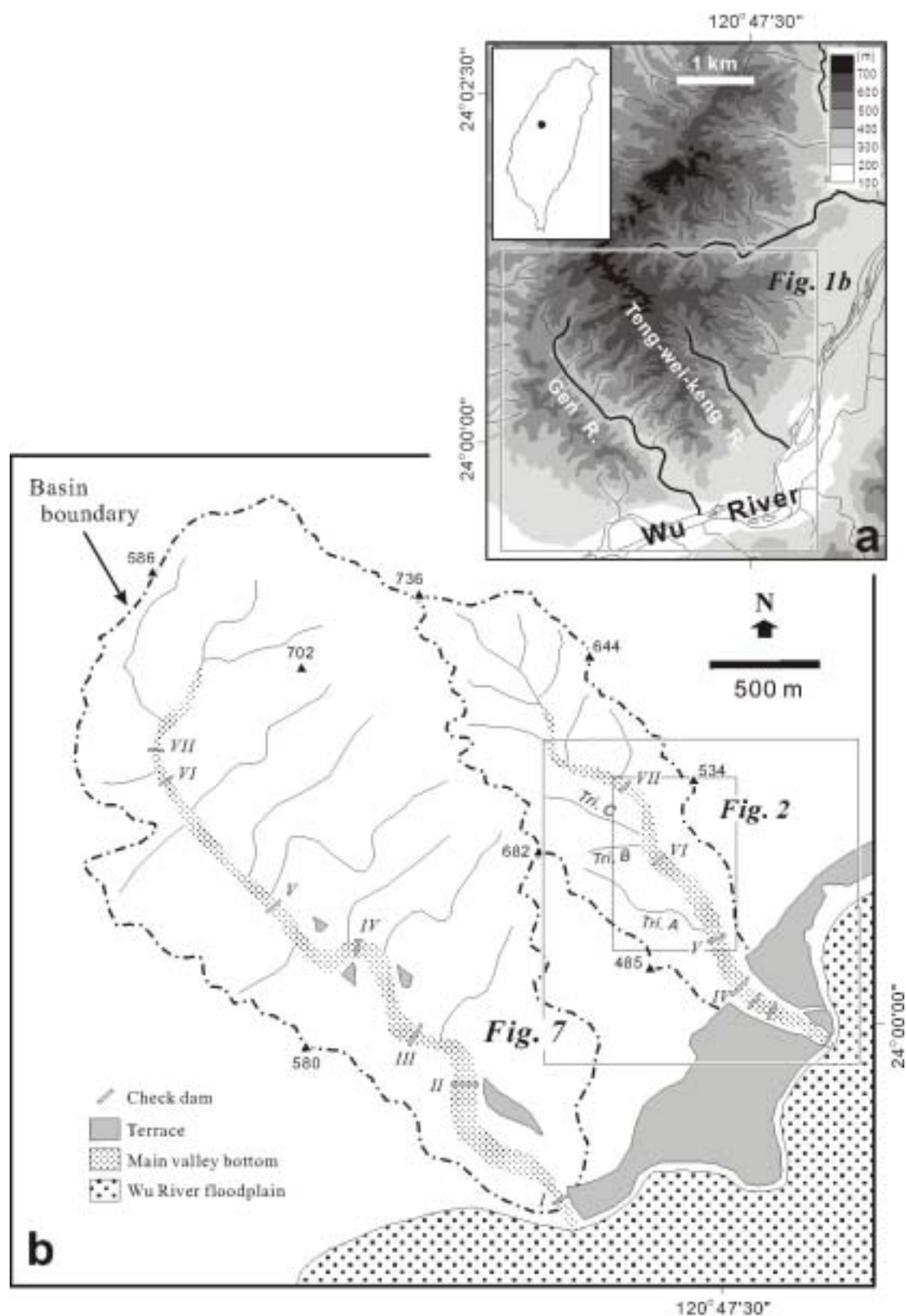
粗粒物質的供應、搬運與堆積攸關河流（或土石流）地形的演育及人類土地的利用，一直是沉積學及地形學最棘手的問題之一。本研究乃國內學術界第一次經由精密測量來監測河流地形的變遷，幸運地捕捉了桃芝颱風帶來的衝擊，可惜颱風後即無大雨，地形在一年內趨向穩定至今。粗粒物質的供應與搬運具災變性、不均勻性，且難以預測，因而一次事件得到的數據較難遽下結論（也不容易應用）。學界對粗粒物質供應、搬運所關心的問題往往需要長期累積的資料來回答（如，田尾坑溪平均十年來上源侵蝕及岩屑搬運的速率為何？人為整治與微氣候變遷的影響？或問，九二一地震崩落的岩屑要經歷幾次颱風事件方能出清？），這些訊息能與較長時距下的地形演育資料結合（本研究結論5及6），進而檢討時下一些地形演化、沉積物搬運的模型（這些模型涵蓋的時距更長）。

地形監測乃長期的工作。田尾坑溪中仍儲藏著大量的岩屑，可預期地，大規模土石的搬運與堆積仍將在下一次颱風時發生。即使本計劃已終結，吾人仍將利用現有測網（密度與精度都優於桃芝颱風前），持續進行監測。

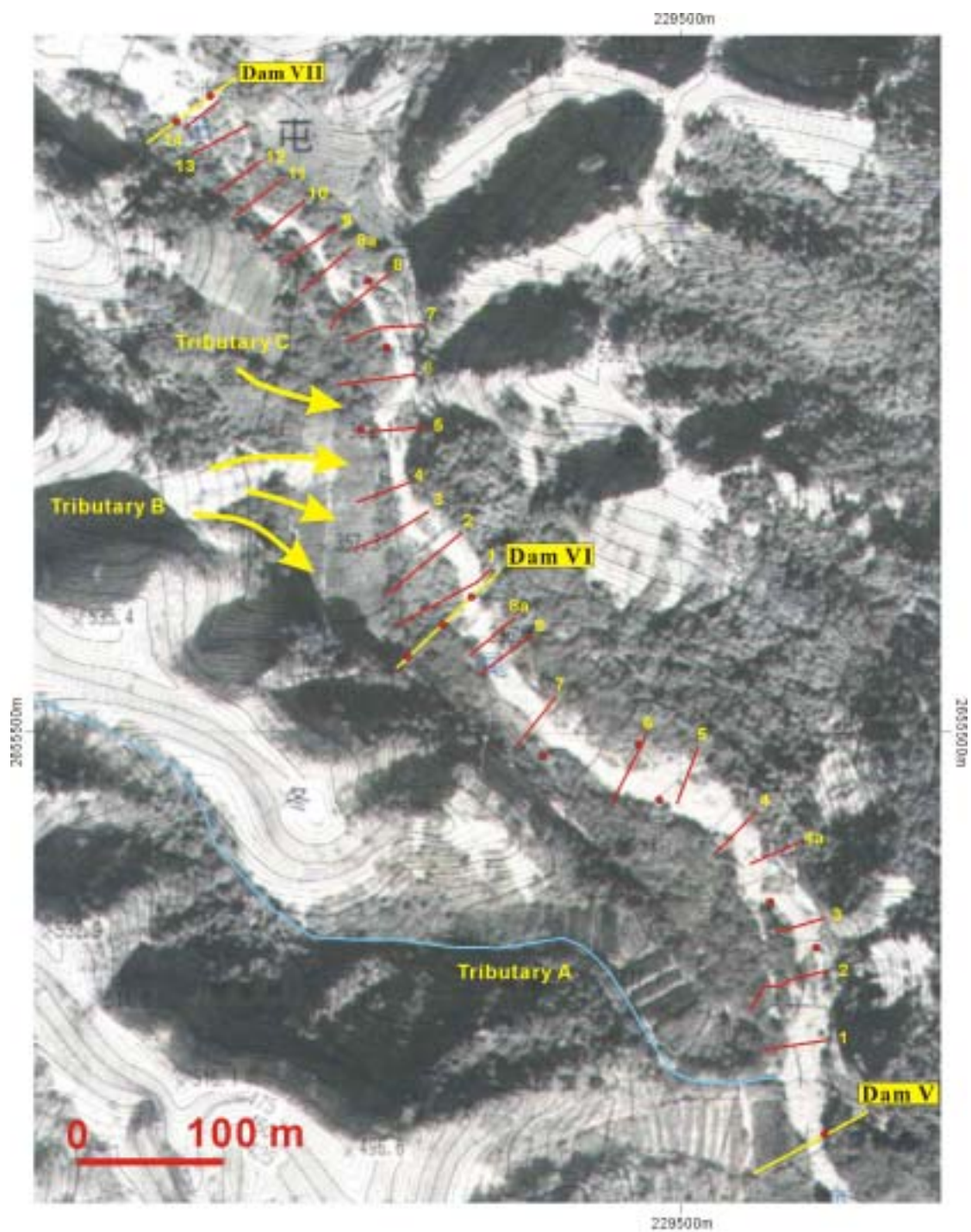
(表一) 本研究測量紀要

測量日期	地點	事件	地形變遷
		2000 年春之陣雨造成六、七號攔砂壩間部分河段加積，土石淹入森林。支流 B 發育南、北兩土石溝，被搬運的岩屑在溪口階地上堆積成扇。	
2001 01/30-03/04	*完成田尾坑溪六、七號攔砂壩間跨主流河道之 12 條橫剖面； *量測支流 B 之土石溝、土石扇及其周邊階地地形。 *於六、七號攔砂壩間兩處及七號攔砂壩上游一處將河床礫石噴漆（每處至少兩百顆）。	無降雨事件；河道在六月後才見水流；植被急速蔓延，礫石河床顯著變窄。	*即使無大降雨，九二一地震崩落在支流 B 的岩屑有約 8,000 立方公尺遭搬運、向下游堆積成扇。
2001 07/24-25	*重測六、七號攔砂壩間之剖面； *測量主河道最深線及被噴漆之礫石再搬運之位置。		*即使無大降雨，中軸直徑 12 公分的礫石可被搬運達 500 公尺遠。
2001 08/06-07	*原設立的剖面記號及基準點多流失或遭掩埋；重新在六、七號攔砂壩間建立 10 條橫剖面。	07/31 桃芝颱風；無山崩但支流多發生土石流；支流 B 土石扇增大，與主流接壤；主、支流礫石河床寬度大幅增加。	*六、七號攔砂壩間主河床加積達 2-3 公尺，總加積量約 16,000 立方公尺；支流 B 下游原河岸地約 5,000 立方公尺遭侵蝕（圖三）。
2001 12/20 ↓ 2002 01/22	*重新在六、七號攔砂壩間確立 14 條橫剖面，均噴漆作記（圖二）。 *測量支流 B 之土石溝、土石扇地形。 *測量田尾坑溪溪口土石扇地形。	桃芝颱風後即無颱風；偶有陣雨。	*河床持續加積，總加積量約 4,500 立方公尺，大部分集中在七號攔砂壩下游一百公尺內（圖四、六）。 *桃芝颱風時支流 B 有約 11,000 立方公尺岩屑向下游搬運、堆積。支流 B 中之北土石溝坡度由平均 47% 減緩為 44%；其下游土石扇平均坡度約為 30%。 *桃芝颱風時共約 30,000 立

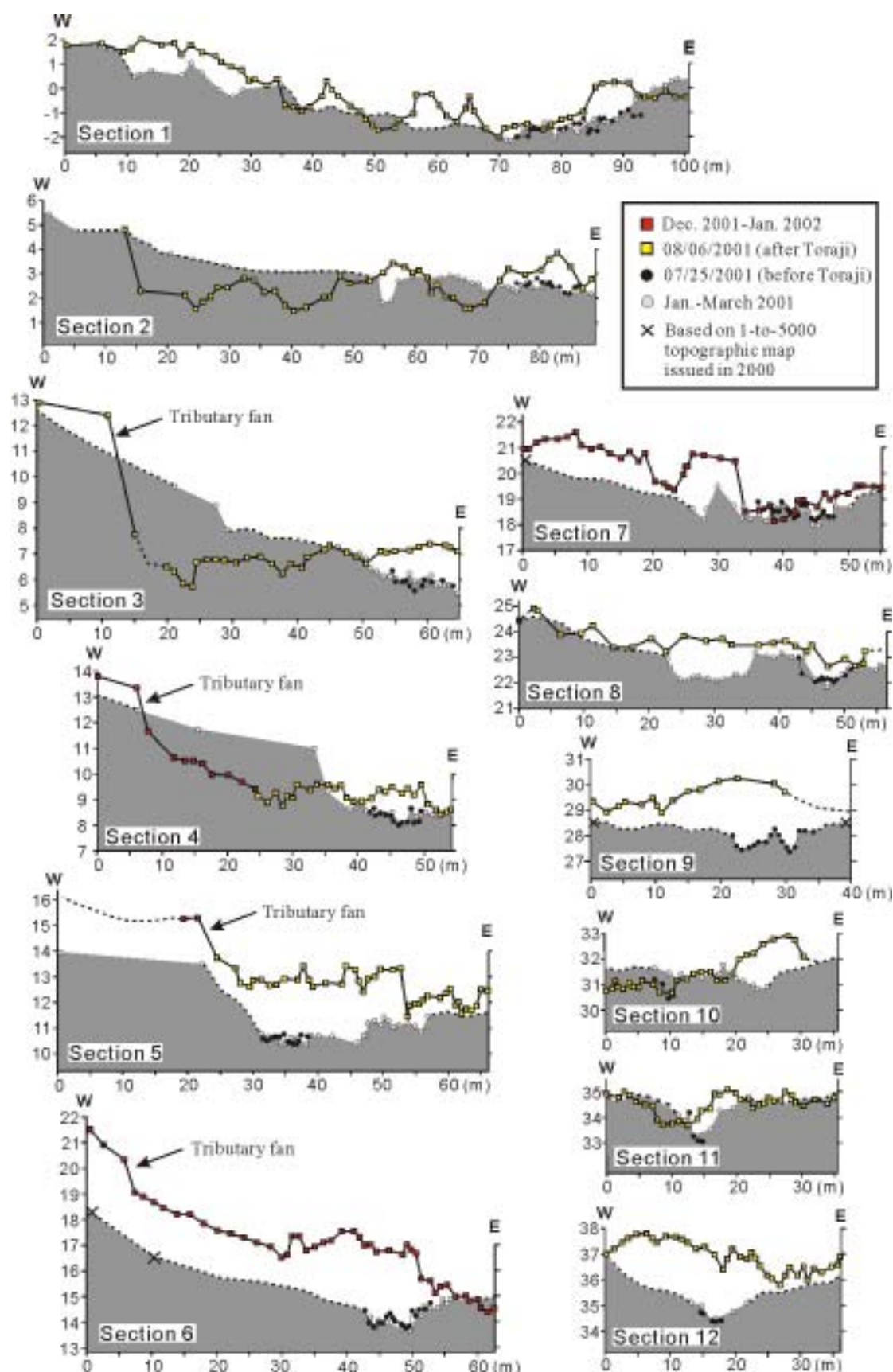
			方公尺土石堆積在田尾坑溪溪口。
2002 04/05	*建立五、六號攔砂壩間 5 條橫剖面		
2002 07/17-08/06	*重測六、七號攔砂壩間剖面，並將剖面總數增為 15（圖二）； *重測五、六號攔砂壩間剖面及溪口土石扇地形。	全年無颱風；偶陣雨（前半年乾旱）。 四、五號攔砂壩間河道在八、九月間遭疏濬，被移除之土石約 14,000 立方公尺。四號攔砂壩右岸加新壩，高達四公尺。	*顯著侵蝕發生在七號攔砂壩下游四十公尺內河床；往下五十公尺內河床持續加積，但量不如從前。以下至五號攔砂壩間各斷面均出現小規模加積及（或）侵蝕（圖四、五、六）（六、七號攔砂壩間總加積及侵蝕量各約 2,700 及 2,400 立方公尺）。 *溪口土石扇部分地方加積達半公尺高（小礫為主）。
2002 09/12-13	*重測五至七號攔砂壩間剖面；五、六號壩間剖面總數增為 10（圖二）。 *測量四、五號攔砂壩間疏濬後的地形。		所量得之地形變化均在誤差範圍內（圖四、五）。
		2003 年至九月底止無颱風；偶陣雨（前半年乾旱）。植被蔓延，礫石河床寬度縮減。	



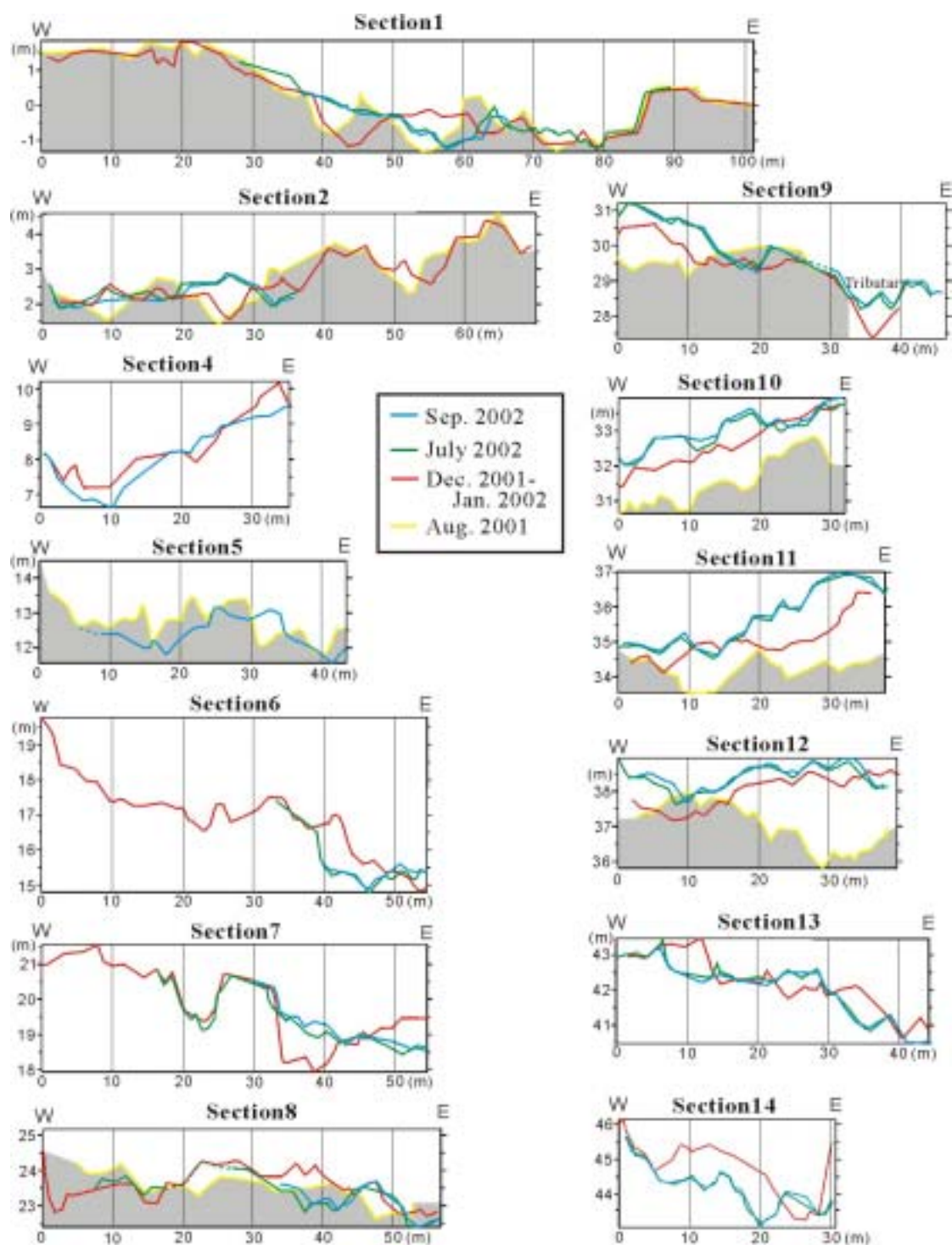
(圖一) 研究區位置：(a)九九峰地區地形圖；(b)乾溪及田尾坑溪攔砂壩位置與週邊地形單元。



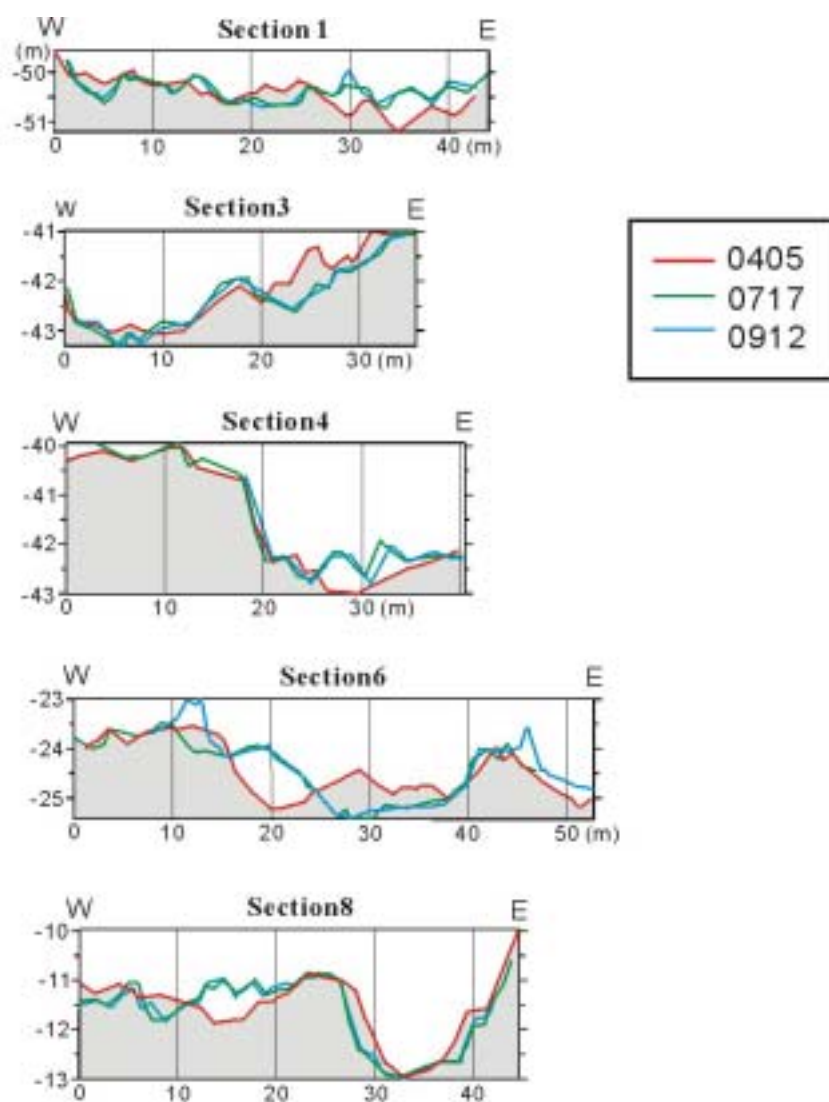
(圖二) 田尾坑溝五至七號棚砂壩間現有之測線(紅線)(紅點為臨時基準點)底圖為縮放之2000年版五十分之一地形圖(位置參見圖一)。



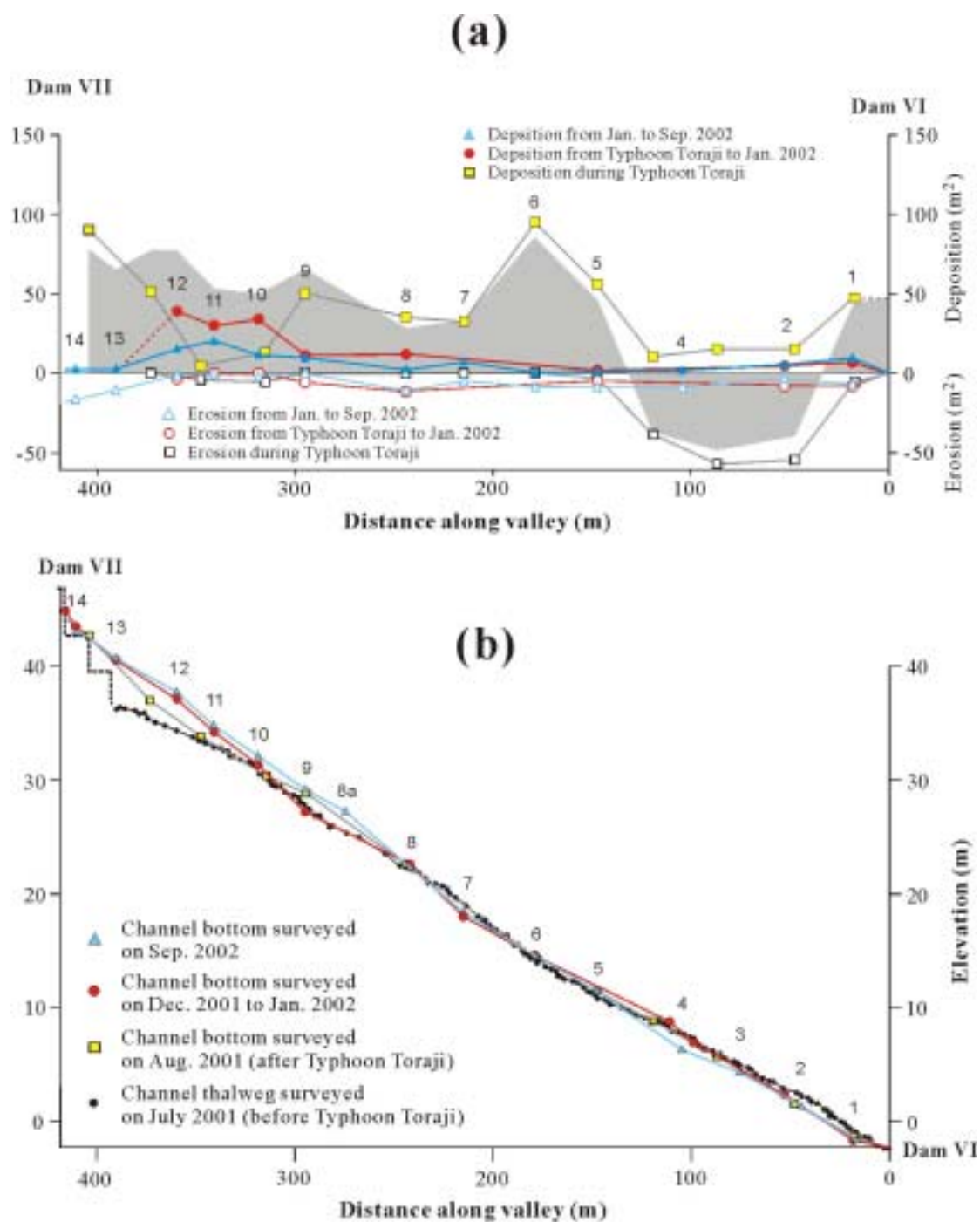
(圖三) 2001 年初至桃芝颱風田尾坑溪六、七號攔砂壩間各河床橫斷面地形。同測站中不同時間所測得的剖面均沿河床中軸線投影在同一平面上(假設河床坡度為 10%)。陰影部分為桃芝颱風前的地形。



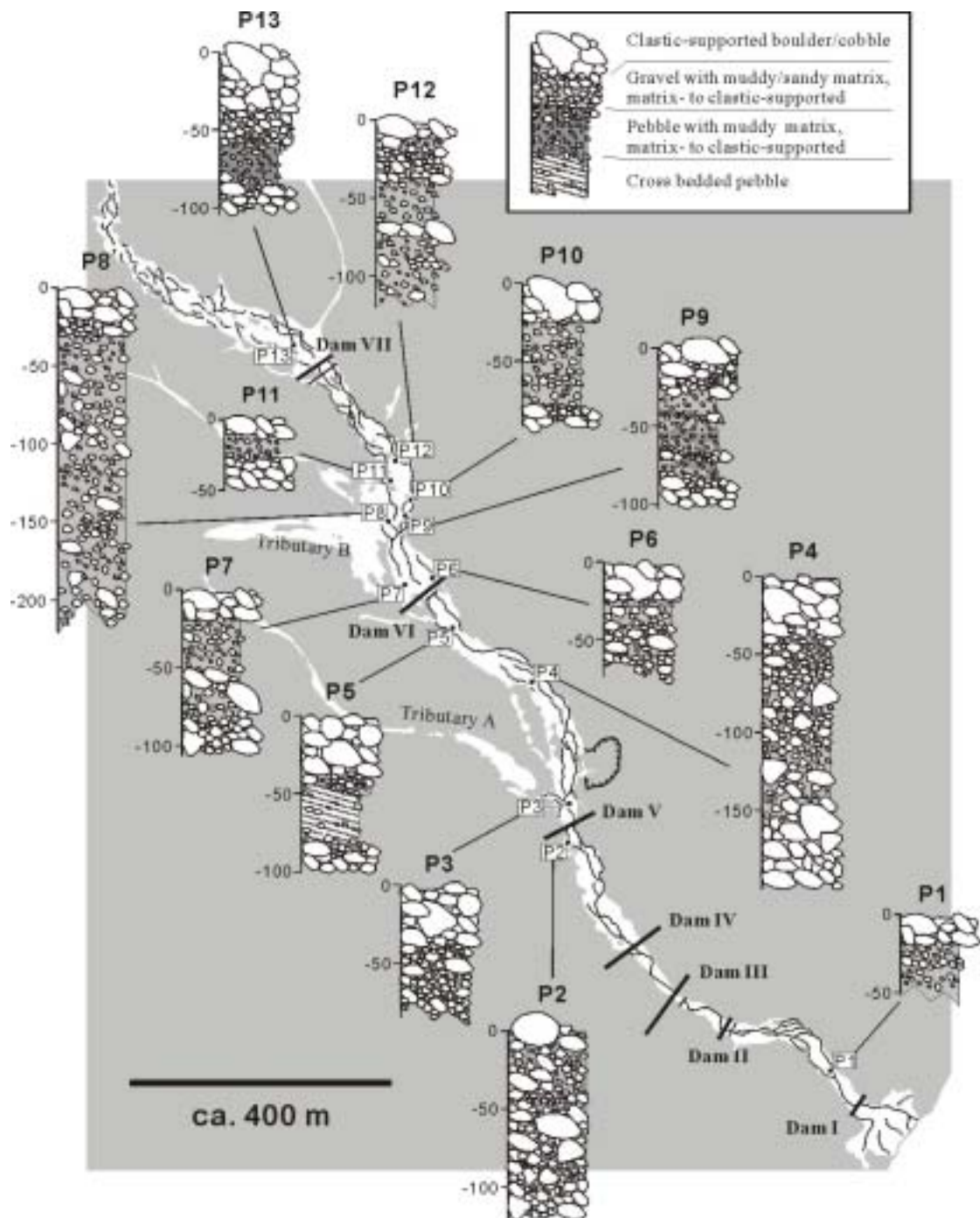
(圖四) 桃芝颱風後至 2002 年九月田尾坑溝六、七號欄砂壩間各河床橫斷面地形(位置參見圖二)。同圖三，相同測站不同時間所測得的剖面均投影在同一平面上(但利用 ArcView3.2 軟體，讀入測量資料及事先沿河床中軸線外插的一組或數組數據，選擇軟體中 Natural Neighbor Interpolation 的方法進行內插，並轉成 TIN[Triangulated Irregular Network]檔案，再利用軟體的空間繪圖功能將剖面繪出)。陰影部分為桃芝颱風後一個星期的地形。



(圖五) 2002 年間田尾坑溪五、六號攔砂壩間各河床橫斷面地形 (位置參見圖二) 其他註解同圖四。



(圖六) (a) 田尾坑溪六、七號測砂壩間礫石渠床隨時間加積、侵蝕情形。陰影部分為自桃芝颱風以來的淨加積或侵蝕量。(b) 同河段渠床縱剖面(沿最低點)變遷情形；數字為橫剖面位置(見圖二)。



(圖七) 田尾坑溪礫石溪床桃芝颱風後所出露的剖面。底圖乃描繪自颱風隔天拍攝的航空照片，空白部分為礫石溪床（其中實線為有水河道，點線為溪床中的線理），陰影部分為植被或裸岩（位置參見圖一）。