

## 台 8 臨 37 線中橫便道之闢建與管理措施

應廷旻\*、廖勝弘\*\*、洪璠儀\*\*\*

### 一、前言

台 8 線中橫公路於 49 年 5 月 9 日正式完工通車，就道路功能言，縮短台灣東西部的運輸路程，同時由於道路的暢通，使中橫公路兼具經濟、國防及觀光等多項意義。但自 921 地震發生造成中橫公路谷關至德基段阻斷已屆十三年，政府災後復建中橫公路谷關至德基段之決策，如同其他公共政策一樣，無法置外於自然環境的反撲與民眾需求的雙重影響。因此，災害復建制度之設計，應先充分瞭解區域環境之承载力與民眾之需求。同時考量環境永續、經濟發展與社會公義等面向，以確保政府能以客觀及中立的立場去面對復建所需的議題，以符合長期當地環境與多數人的權益。本文以台 8 臨 37 線（中橫便道）管理作為為例做說明。

### 二、歷史沿革

- (一) 45 年 7 月 7 日中橫公路開工，由台灣省公路局成立的「橫貫公路工程總處」負責開路、規劃、建造、鋪路等工程事宜。
- (二) 49 年 5 月 9 日完工通車，整個工程費時 3 年 10 個月，花費約 4 億 3 仟萬元。施工期間由於颱風、地震等天候影響，曾發生過不少意外，經統計因工程意外及天災而殉難者有 212 人，受傷者 702 人。
- (三) 88 年 921 大地震，中橫公路毀損嚴重，特別是台 8 線上谷關到德基水庫及台 8 甲線壩新路口到德基段，上邊坡崩塌路段達八成以上，崩塌面高度達數百公尺，路基流失 26 處，路基缺口則有 134 處，人車因受困傷亡三十餘人。此外亦有數座隧道坍塌或半毀，增加搶修的難度。

---

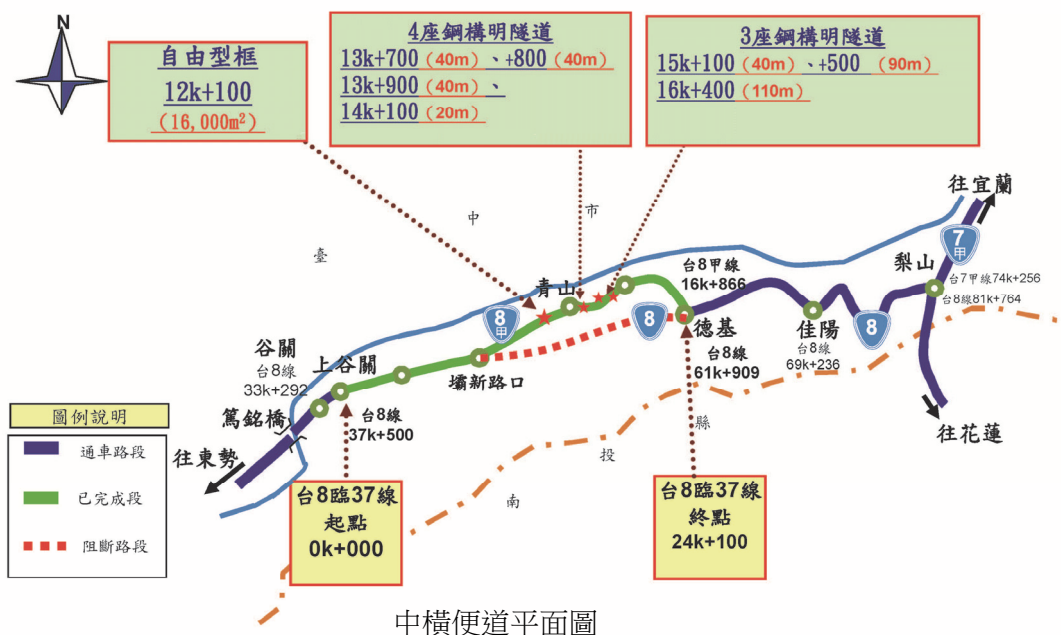
交通部公路總局 第二區養護工程處 谷關工務段

\* 約僱工務員

\*\* 副工程司

\*\*\* 段長

- (四) 89年1月18日暫時搶通，但其中仍有24公里屬極危險路段，每逢下雨或餘震，即造成嚴重坍方，故未開放通車。公路總局經評估並配合台電公司先行修復中橫公路台8甲上谷關至德基(下線)受損路段，沿線搶修及修復經費超過20億元，原預定93年7月15日開放梨山地區居民通行。
- (五) 93年7月2日敏督利颱風又造成嚴重災害，其中台8甲線3.5k~6.5k青山路段遭暴漲溪水沖毀，更有多處路基流失，道路中斷。
- (六) 93年8月23日奉行政院函指示：「基於經濟效益評估、生態維護、國土復育及安全考量，中橫公路谷關至德基段暫緩修復，待地質狀況穩定後，再予評估規劃」。
- (七) 97年11月11日行政院核定中橫便道搶通計畫，計畫全長約23公里，以提供梨山地區民眾緊急救護、救難等基本維生需求考量辦理規劃，搶通作業係以「最小化」、「最簡易」、「減少挖填」及「就地取材」等方式為原則，搶通計畫經費6億2千萬。
- (八) 中橫便道搶通工程克服天候及環境惡劣之因素於101年5月18日完工。
- (九) 在行政院尚未解除暫緩修復管制前，對於社會最關注之地質穩定議題，先啟動地質監測機制，辦理「中橫公路上谷關至德基段地貌變異分析及安全性評估、探討服務工作」，藉由地貌變異分析瞭解計畫區域之地貌變化演進、探討災害機制原因、研判便道沿線之災害潛勢，進而評估研擬改線方案包括路線、橋梁、隧道之可行性及安全性。本工作於101年3月9日開工，已於102年5月28日召開地貌變異分析期末報告審查會議，所有工作預計於103年6月完成，待整體工作成果完成後，作為本路段復建啟動時機、方案選擇之依據。





台8臨37線12k+100自由型框



台8臨37線13k+800鋼構明隧道



台8臨37線13k+700鋼構明隧道



台8臨37線13k+900鋼構明隧道



台8臨37線14k+100鋼構明隧道



台8臨37線15k+500鋼構明隧道

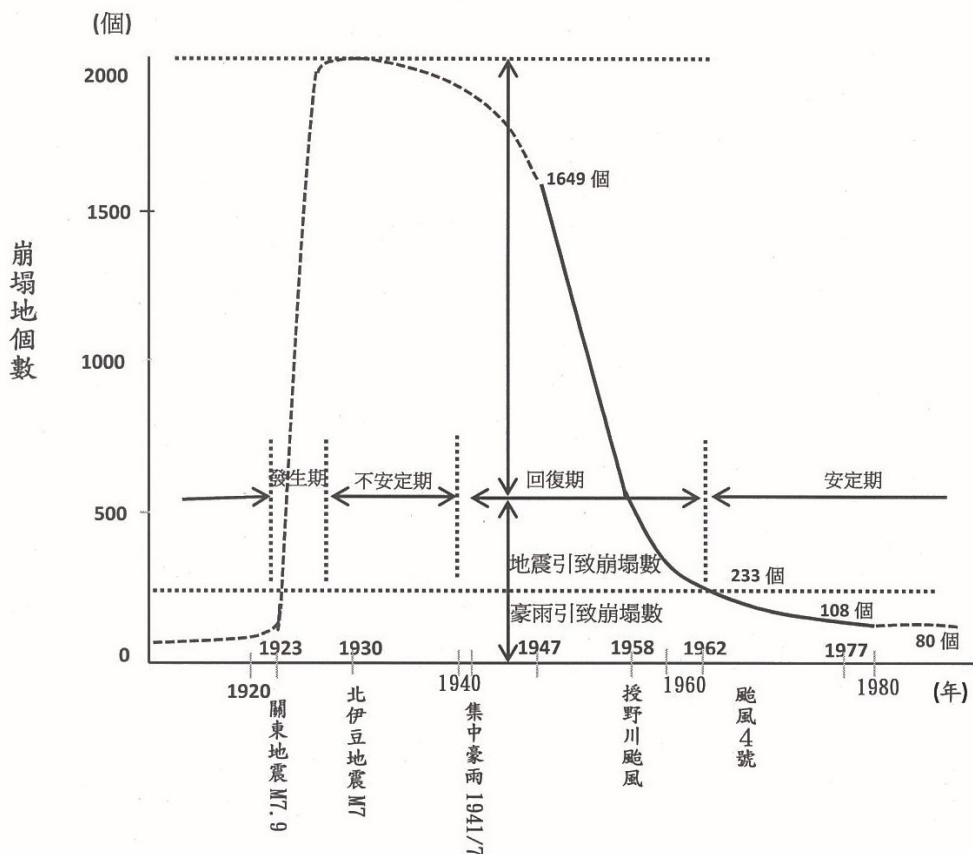


台8臨37線15k+100鋼構明隧道



台8臨37線16k+400鋼構明隧道

(十) 查本路段歷經多次颱風豪雨災害，依據近年來之災害統計資料，本路段每年平均遭遇 3~4 次災情慘重之颱風豪雨災害，故需配合辦理沿線之「落石坍方清除」、「涵管便道維護」、「鋼便橋維護」、「鋼軌樁便道維護」及「零星道路養護」等工作。公路總局第二區養護工程處於 101 年投入便道維護經費約為 5,630 萬元，便道總長 24.1km，每公里維護費用約 234 萬元，102 年投入經費約為 5,700 萬元，每公里維護費用約 237 萬元，為公路總局所轄省道年度平均維護費用（101 年 45 萬元/km、102 年 40 萬元/km）5 倍以上，顯見公路總局非因本路段編為便道而降低維護強度，實因本路段地質環境因地震後所弱化致邊坡長期不穩定。以鄰近日本關東大地震為例，日本學者井上公夫曾以鄰近關東約 50km 處之丹澤山中津川流域，探討 1922 年關東大地震後該區域崩塌地之變遷，提出崩塌地自 1896~1980 年間共計 84 年之變遷推估，並將全期間概分為發生期、不安定期、回復期及安定期共 4 個階段。由該趨勢圖可知，自重大事件（關東大地震）發生後，該區域歷經約 40 年方才進入安定期。



日本學者井上公夫-崩塌變遷曲線圖



### 三、中橫便道完工後災害情形

- (一) 101 年 6 月 10 日 0610 超大豪雨災害，沿線多處坍方及路基流失，計有 29 處坍方落石及路基流失，其中尤以 16.8k 路基流失 50 公尺、17k 路基流失 80 公尺、17.9k 路基流失 40 公尺、21.7k 路基流失 100 公尺、22k 坍方長 50 公尺等 5 處較嚴重，因該 5 處皆為上方野溪或山凹形成土石流所致，土石方量極大及路基修復搶修費時，於 101 年 7 月 31 日搶通。
- (二) 101 年 8 月 1 日蘇拉颱風侵襲，便道於 11.9k 路基掏空 150m 及 12.5k 路基流失 150m，於 101 年 8 月 23 日搶修完成。
- (三) 101 年 8 月 21 日及 8 月 26 日天秤颱風來襲，便道於 13.9k、14.7k、17.5k 等處坍方阻斷，於 101 年 8 月 31 日搶通。
- (四) 102 年 1 月 3 日中午通行時段放行時，車隊於中午 12 時 10 分行經便道 19.3 公里處，因上邊坡突然落石，其中 1 部小型車之副駕駛座乘客遭砸中不幸身亡。
- (五) 102 年 4 月 4 日起遭逢連續豪大雨侵襲，沿線有多處坍方、落石及路基流失，其中受災狀況較嚴重的路段為 5k (馬陵)，自 100 公尺高邊坡連續崩落大量巨石，於 102 年 4 月 10 日搶通。
- (六) 102 年 7 月 11 日蘇力颱風超大豪雨造成沿線 17k (青山) 段路基流失約 50 公尺，21.7k (德基) 及 22k (德基) 等二處大型坍方，受損嚴重，最主要阻斷位置為 15.6k (青山) 段，路基全部流失長 40 公尺深達 20 公尺，地形險惡致搶通困難，原預估最快於 8 月底搶通，經全力搶修後提早於 8 月 18 日完成。
- (七) 102 年 8 月 21 日潭美颱風超大豪雨 15.6k (青山) 段再度造成中斷，經本局全力攆趕後，已於 10 月 1 日完成搶通，並自 10 月 2 日起開放(分 5 時段)管制通行。



蘇拉颱風災害12.5K路基流失



0610災害17K路基流失



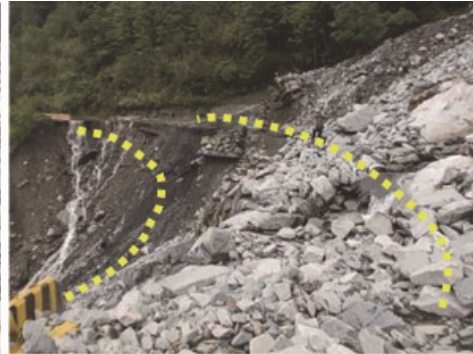
2012.08.20 14:38



2012/07/03 11:28



0610災害17.9K路基流失



0610災害21.7K路基流失



2012/07/23 11:07



2012.07.24 12:25



蘇力颱風15.6K路基流失

#### 四、具體管理作為

##### (一) 中橫便道行車管制之法源依據

查省道「台 8 線 37k+500~44k+300 及台 8 甲線 0k~16k+866」路段，依據行政院經濟建設委員會審議結論：辦理「暫緩復建」為既定政策，仍應予以維持。本便道係屬「轄管公路因災害阻斷、封閉需暫時供民眾改道或改行臨時便道」，為有效管理及提供用路人正確行車訊息，故依據公路總局函訂「公路因災害阻斷改行臨時便道之道路編號原則」及「公路臨時便道『里程碑』設置原則」，為利管理及通行民眾安全考量，將本便道編定為「台 8 臨 37 線」，並制定「台 8 臨 37 線（中橫便道）管制規定」據以執行管制。

##### (二) 中橫便道行車對象管制

本便道管制對象係針對所有通行民眾，駕駛及乘客均要符合通行條件，公路總局第二區養護工程處谷關工務段（以下簡稱本段）管理維護保全對象如下：

1. 設籍於臺中市豐原、石岡、東勢、新社及和平區並確於梨山工作居民。
2. 為梨山居民直系血親（經辦理個人保險後）。
3. 為梨山居民之民生用品及農產品運輸，委託貨運公司貨車通行。

- 4.設籍仁愛鄉榮興村村民，請南投縣仁愛鄉公所統籌投保後造冊送本段核行。
- 5.公務通行、學術研究通行及新聞媒體採訪通行，由各單位將通行名冊行文本段審查後核行。
- 6.其他因臨時緊急事故必須通行時，填寫切結書，本段依權責審核同意後始可通行。
- 7.請臺中市政府配合於谷關及德基兩處管制站派駐警力，協助管制事宜。
- 8.本便道通行民眾均需投保，同時強調「安全第一」，應依據行政院經濟建設委員會審議結論：「基於人道考量，提供梨山地區民眾緊急救護、救難等基本維生之通行」，定位為急救、救難之區域性公路便道，為求用路人安全，將嚴加管制通行安全及管理維護措施，避免當地居民及一般民眾誤解其功能及可能存在之風險。重申本便道極不穩定，常有坍方落石發生，通行本路段確實仍存在高度風險，故通行民眾需投保具備基本保障後始可通行。萬一發生意外後，可確保通行民眾家人相關基本生活所需。

### (三) 中橫便道行車管制時段

- 1.台 8 臨 37 線（中橫便道）於 101 年 5 月 18 日完工，自 101 年 5 月 31 日起開放管制通行。
- 2.實際通車日數，經本段委託管制站實際登錄資料統計如下：
  - (1) 101 年 5 月 31 日開放迄年底計 215 日，實際通車 103 日。
  - (2) 102 年計 366 日，實際通車 176 日。
- 3.中橫便道為考量梨山地區民眾通行之需，自 101 年 5 月 31 日上午 6 點起，由原開放 2 個時段增加為夏季 7 個時段（每日 06、8、10、12、14、16、18 時）、冬季 5 個時段（每日 07、10、12、15、17 時）。
- 4.惟因接連遭遇 101 年 6 月 10 日超大豪雨及 101 年 8 月 1 日蘇拉颱風侵襲，沿線有多處坍方落石、土石流及路基流失，搶修完成後自 101 年 9 月 11 日上午 7 點起開放，通行時段調整為 3 個時段（每日 07 時、12 時、17 時）。
- 5.相關災害修復工程終於 102 年 1 月 24 日完成，因便道抗災能力甚低，為確保梨山民眾通行安全，本處於 102 年 2 月 4 日邀請專家學者及臺中市政府等單位辦理災害搶修後履勘及完工後通車管制事宜協商，針對便道災害路況之危害程度，重新評估開放時間及通行時段，決議自 102 年 2 月 7 日上午 7 點起，通行時段恢復為 5 個時段（每日 07 時、10 時、12 時、15 時、17 時）。
- 6.目前除相關災害造成阻斷外，開放通行時管制時段統一為 5 個時段（夏令每日 07 時、10 時、12 時、15 時、17 時或冬令每日 07 時、10 時、12 時、14 時 30



分、16 時 30 分)。

(四) 中橫便道行車管制設置及安全維護措施

- 1.本路段設置谷關管制站、青山管制站及德基管制站共三站(以下簡稱各管制站)執行管制作業，除另有規定或公告外，按程序及規定進行管制。管制人員除應確依程序及規定執行職務外，並應遵守工程(勞務)契約所載相關規定。
- 2.逐年加強中橫便道相關安全防護設施，每次放行時都由聘僱民間保全業者擔任通行戒護工作，以減少意外發生。
- 3.惟若天候狀況不佳有下雨(訂有封閉之雨量行動值，即 10 分鐘降雨量達 2 毫米或時雨量達 8 毫米時，封閉道路禁止通行)、颱風或地震等因素，將封閉道路；並於每日派員巡查中橫便道或接獲通報有落石坍方，即派員清除零星坍方落石。



谷關管制站



執行管制作業



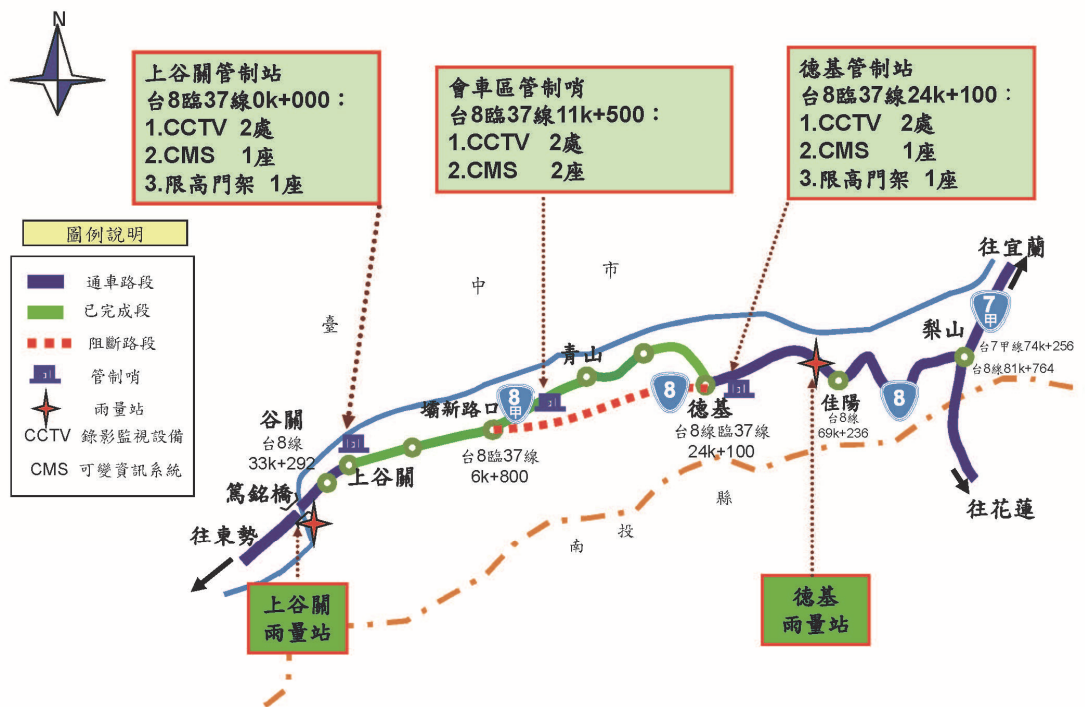
德基管制站

#### 4.各管制站應依下列原則設置：

- (1) 各管制站規劃設計作業時，應妥適配置管制站之設置位置，除所需空間考量納入外，並應以一比一之原則（一入口、一出口），設置管制站控管出入口。
- (2) 各管制站週界應盡量利用自然地形封阻，未能自然封阻之邊界，應設置適當圍牆隔離，確保管制站能完全管制出入。
- (3) 管制站應設置適當之通信監視、保全警報及夜間照明等安全設施，並有與鄰近警察機關常態聯繫方式，俾供值班人員遇有危安狀況，得即時通報聯繫，請求支援。
- (4) 相關管制站管理及值勤人員作業規定，詳如附件 1。

#### (五) 中橫便道相關之交通工程、交控設備及違規處理

- 1.交通工程部分：為維護中橫便道通行安全，沿線依據路況設置相關標誌、標線及號誌等交通工程，在於提供通行車輛駕駛人有關道路路況之警告、禁制、指示等資訊，以利通行安全；並將逐年編列經費辦理改善增設。
- 2.交控設備部分：中橫便道於上谷關、青山、德基管制站設有交控設備（詳后附位置圖），其中 CMS 登載告示牌面內容，提醒民眾通行便道之危險性，並設有 CCTV 全時錄影控管所有進出車輛，確保通行安全管制。
- 3.違規處理部分：
  - (1) 管制站人員應依據「台 8 臨 37 線（中橫便道）管制規定」據以執行管制，同時注意服務態度，遇不符規定通行民眾，應妥為說明相關管制規定或電話通知本段調處；另如有特殊狀況，應隨時通知當地派出所請求線上員警協助處理。
  - (2) 台 8 臨 37 線（中橫便道）於 102 年 12 月 13 日下午 14 時 30 分開放時段，兩位新北市警員（非執行公務）分別駕駛大型重型機車，強行由上谷關管制站柵欄邊闖入中橫便道，經本段及保全人員於途中青山管制站攔截後返回上谷關管制站，並由台中市和平分局谷關派出所警員將兩人帶至派出所查辦。



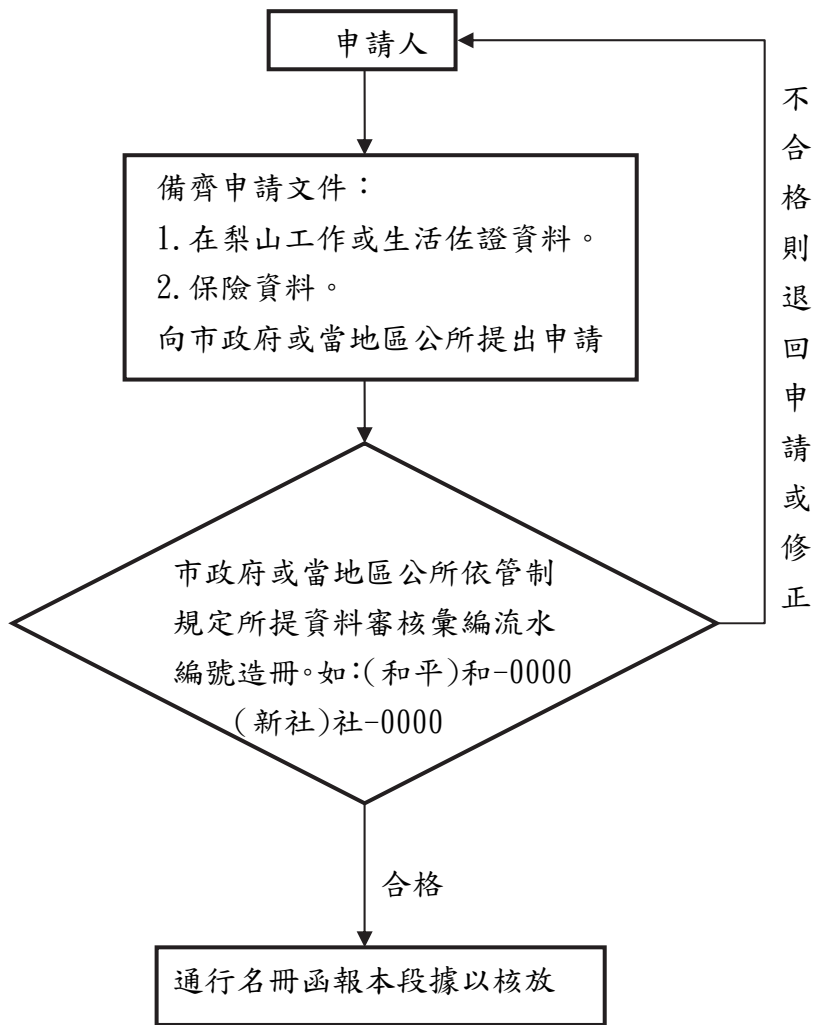
中橫便道交控設備位置圖

## 五、管理作為檢討及精進改善措施

中橫便道管理措施，執行期間尚稱順暢，近因臺中市和平區公所針對便道行車對象管制審核，表示受限人力無法賡續辦理，案經臺中市政府交通局於 102 年 11 月 14 日召開「研商台 8 臨 37 線便道管制通行作業流程及分工會議」後，檢討修正相關便道管制規定，說明如下。

- (一) 依據台 8 臨 37 線（中橫便道）管制規定第 9 點：「未設籍梨山，但確實於梨山工作或生活民眾，請臺中市政府（設籍當地之縣、市政府）協助確認造冊，再送本處谷關工務段核行」。依權責本段係屬道路管養單位，上述民眾是否確實在梨山地區工作或生活，實需地方確認，且符合通行條件者，實質屬梨山居民，故仍請臺中市政府或和平區公所確認核可後，再送本處谷關工務段核行。
- (二) 礙於管制對象認定之困難，申請者是否確實於梨山地區工作或生活，仍需臺中市政府或和平區公所認定後，再由本處谷關工務段確定保險後納入名冊。
- (三) 作業流程：





(四) 通行資格：

1. 設籍於大梨山地區之民眾通行，並針對設籍於豐原、石岡、東勢、新社、和平等五區公所並確有於大梨山地區工作之民眾，經臺中市政府統一投保造冊後，方可准予通行。
2. 設籍仁愛鄉榮興村村民，請南投縣仁愛鄉公所統籌投保後造冊送段核行。
3. 未設籍梨山，但確實於梨山工作或生活民眾，請臺中市政府（設籍當地之縣、市政府）協助確認造冊，再送本處谷關工務段核行。
4. 為梨山民眾之民生用品及農產品運輸，委託貨運公司貨車通行，經辦理保險後，由臺中市政府造冊送段核行。
5. 其他因臨時緊急事故必須通行時，電話通知谷關工務段，經管制站確認後始可

臨時開放通行。

(五) 申請所需文件：(仍請臺中市政府依「確實於梨山工作或生活民眾」認定)

1. 居民(梨山地區身分證明資料，如搬遷至其他縣市者，提出相關佐證資料，如戶籍騰本等)。
2. 果園承租戶需承租相關資料。
3. 農產品運輸業者，提出梨山地區相關貨運行(如萬展、萬瑞貨運公司等託運相關佐證資料等)。
4. 上述通行人員皆需投保意外保險。

(六) 通行車輛管制措施：

1. 本管制路段通行車輛淨高度限制 3.5 公尺以下。
2. 客車車種限制小客車(9 人座以下)。
3. 貨車車種限制 17 公噸以下大貨車(前後輪均為單軸)。
4. 車輛通行時前後車輛應保持一定車距(10 公尺以上)。
5. 車輛進入管制路段應開亮頭燈。
6. 因受限路寬及轉彎半徑，最高時速限 25km/hr 以下、限時段方式進行單向通行管制。



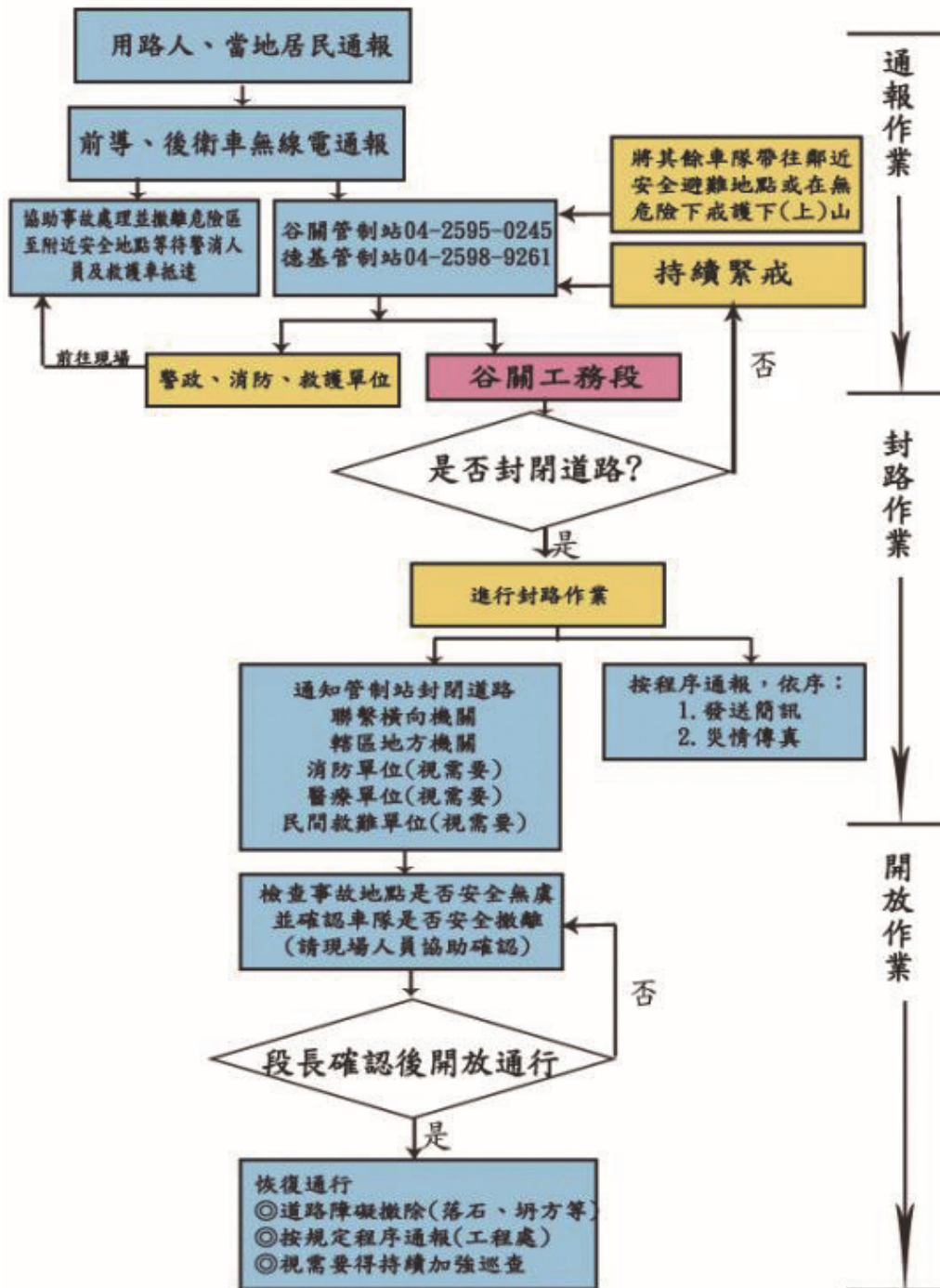
相關標誌（限重、限高、限速及開亮頭燈）



相關標線（保持一定車距）

(七) 緊急狀況處理：

1. 建立便道緊急狀況標準作業 (SOP) 流程圖



中橫便道前導、後衛車通報緊急狀況標準作業 (SOP) 流程圖



## 2. 相關緊急事件應變過程說明：

- (1) 事件 1-102.3.27-10：05 發生規模 6.2 地震，沿線落石，谷關段立即通知管制站，指示 10：00 開放時段谷關端車隊撤回管制站，德基端車隊 15 部車帶往青山避難空間，1 部車遭落石擊中，人員均安，並進行封路作業；管制站檢查事故地點確認安全無虞後請示段長確認後於 12：00 開放通行。
- (2) 事件 2-102.4.1-10：20 急降雨，多處阻斷，谷關段立即通知管制站，指示 10：00 開放時段谷關端車隊撤回管制站，德基端車隊 14 車 26 人帶往青山避難空間，人車均安，並進行封路作業；管制站檢查事故地點確認安全無虞後請示段長確認後於 12：00 開放通行。
- (3) 事件 3-102.5.15-10：10 規模 3.7 地震，3.8k 坍方，谷關段立即通知管制站，指示車隊帶回，無人車傷亡，並進行封路作業；管制站檢查事故地點確認安全無虞後請示段長確認後於 12：00 開放通行。

### (八) 逐年加強安全防護及交通設施：

#### 1. 落石區邊坡保護計 11,000m<sup>2</sup>

- (1) 保護工法—採用噴凝土保護；在高陡易坍方、落石邊坡影響範圍先行刷坡後，鋪設鋼絲網、錨筋及洩水管等設施後以施噴 10cm 厚噴凝土保護。完成後保護範圍內，迄今未再發生坍方、落石，成效顯著。
- (2) 地點—台 8 臨 37 線 6k+700、14k+700、13k+900 及 15k+600 等 4 處。



台 8 臨 37 線 13k+900 段噴凝土保護

## 2.設置 8 處緊急避難空間

- (1) 設置目的—檢視中橫便道內，於無落石之虞空曠處、隧道內等，設置緊急避難空間，提供作為緊急避難處所。
- (2) 地點—台 8 臨 37 線 2k+030~16k+400 等 8 處。



台 8 臨 37 線 15k+100 段緊急避難空間

## 3.CMS 登載、CCTV 及廣播危險告示

- (1) 設置目的—於上谷關、青山、德基管制站設置 CMS，隨時更新登載告示牌面內容，提醒民眾通行便道現況及危險性，增設 CCTV 全時錄影控管所有進出車輛，確保通行安全管制；加強督導保全人員於核對身分時通行前，告知民眾通行便道之危險性並透過廣播依告知牌面內容重複播放。
- (2) 地點—台 8 臨 37 線 0k+000、11k+500、24k+100 及 15k+600 等 3 處。



台 8 臨 37 線 0k+000 谷關管制站 CMS

#### 4.設置 6 處安全距離標誌標線

- (1) 設置目的—中橫便道上谷關至德基路段目前道路極不穩定，99 年開放迄今，經常發生無預警坍方落石，所以通行本路段確實仍存在高度風險，為維護通行安全，確保安全車距而設置。
- (2) 地點—台 8 臨 37 線 3k+700~19k+300 等 6 處。





台 8 臨 37 線 19k+300 段安全距離標誌標線

## 六、結論

- (一) 本局辦理中橫公路便道搶通工程於完工後提供梨山地區民眾緊急救護、救難等基本維生需求，可有效縮短梨山居民往返通行距離。
- (二) 配合台灣電力公司大甲溪青山發電廠復建計畫所需，並提供沿線大甲溪、水壩及電廠維護管理對外交通需求，對國家基礎建設有相當之助益。
- (三) 便道開放管制通行迄今，民眾對於通行服務品質尚稱滿意，並對政府相關修復工程及通行安全管制措施多所肯定。歷經多次颱風、豪雨或地震等侵襲，本段均竭盡所能的投入災害搶修及復建工作，修復方式採用涵管式乾砌石築堤便道、邊坡植生、邊坡噴混凝土、岩錨擋土牆、防落石掛網等緊急搶災工法，且不斷的在加強安全防護及交通設施，以提供用路人更安全之行車環境。
- (四) 中橫便道地質狀況未趨於穩定前，應依據行政院審議修正搶通計畫：「本便道定位為急救、救難之便道。請交通部務必嚴加管制通行安全及管理維護措施，並廣為宣導，避免當地居民及一般民眾誤解其功能及可能存在之風險」辦理。
- (五) 在行政院尚未解除暫緩修復管制前，對於社會最關注之地質穩定議題，已啟動地質監測機制，辦理「中橫公路上谷關至德基段地貌變異分析及安全性評估、探討



服務工作」，藉由地貌變異分析瞭解計畫區域之地貌變化演進、探討災害機制原因、研判便道沿線之災害潛勢，進而評估研擬改線方案包括路線、橋梁、隧道之可行性及安全性。本工作於 101 年 3 月 9 日開工，所有工作預計於 103 年 6 月完成，待整體工作成果完成後，作為本路段復建啟動時機、方案選擇之依據。

- (六) 目前初步評估結果，依崩塌地判釋初步分析，計畫區之崩塌復育狀況，大致朝持續復育之方向前進，由崩塌變遷推估亦可知目前計畫區惟仍處於不安定期（末期）。建議仍應持續利用遙測影像進行全面式監測，追蹤計畫區域邊坡之長期崩塌復育趨勢；同時由初步多期地貌變異分析結果顯示，計畫區域目前仍存在不少崩塌地，然而總崩塌地面積相較於 921 大地震後，漸有收斂趨緩的現象。建議應待大地環境趨於穩定後（恢復到安定期後）再行復建，復建計畫採用相對安全及對環境衝擊較小之中、長隧道搭配橋梁方案，並納入後續「便道安全性評估、探討」。
- (七) 中橫便道長期規劃，經交通部毛前部長與臺中市政府胡市長研商，將以臺中市政府相關區域治理計畫及對梨山地區未來之整頓計畫等為前提，再以交通部台 8 線復建計畫為配套，作為推動之基本策略。

## 附件 1、管制站管理及值勤人員作業規定

### 1. 管制站作業時間及值勤人員作業方式，應按下列規定執行：

- (1) 現場人員到班備勤得先行進入外，其餘人員應不准進入每日上午七時至下午六時止為原則。
- (2) 前款作業時間開始與終止，管制站柵門應由值勤人員開啟及關閉，如有特殊事故致未依規定時間啟閉者，應載明工作日誌並陳報監造廠商（單位）及本段知悉。
- (3) 工程（勞務）承攬廠商應按月排定管制站值勤人員，並將值勤表送監造廠商（單位）及本段備查。倘有異動，亦同。工程（勞務）監造廠商僱用人員如有嚴重失職、違法違規情事，本段得命廠商立即更換。
- (4) 工程（勞務）承攬廠商應配置管理人員督導管制值勤人員之勤務外（應有適當之查勤措施），並應為僱用人員投保勞工保險及意外險，並確實按「勞工工作安全規則」等法令，嚴格執行勞工安全管理作業。
- (5) 管制站值勤人員應按相關規定值勤，不得有擅離職守情形，並以分日夜三班輪替為原則，次班人員應於作業開始或停止前到場接班。如有遲延，原值勤人員應繼續值勤至次班或代理人員到場為止，不得因此影響進場及出料作業。
- (6) 值勤人員嚴密管制車輛進出，除工程（勞務）承攬廠商或本段派遣採取作業之機具車輛，以及按作業時間進場載運土石車輛外，不得有其他車輛進出。
- (7) 值勤人員應嚴密管制人員進出，除工程（勞務）承攬廠商或本段派遣採取或管理作業之人員外，不得有其他人員停留、休憩，甚或飲酒、聚賭等影響管制作業或人員安全情形。

### 2. 各管制站之管理、稽查及環境維護事項，配置相關人員並按下列規定執行：

- (1) 管制站執行管制作業人員採單一出入口者，不得少於二人；採二出口以上者，不得少於五人。管制站所需資訊、保全、通訊等業務及辦公設備，除本段自行執行外，由工程（勞務）廠商依契約規定備置齊全，並負維護保管責任。
- (2) 交通指揮人員：管制站進出及主要道路出入口，應視交通安全需要，置適當指揮人員及警示設施。
- (3) 稽核（查）人員：本段各主管單位（機關）得按管制計畫及執法需要，派遣稽核人員督導相關管制執行工作。
- (4) 出入車輛及其駕駛人員按本段核發單及證明登錄進出，非屬管制站作業及前三款人員之進出，均應由管制人員查明入場理由並扣繳身分證件後，始得入場，身分證件於出場時領回。
- (5) 進出車輛應依規劃行駛路線及指揮人員之指示，到位實施登記及查核，除特

殊原因並經指揮人員指揮，不得接近管制站。未符規定者，應按指揮人員指示合格後，再行進入管制區。

- (6) 進出之車輛應由駕駛人依交通監理及環境保護法規規定，確實以防塵網覆蓋載貨車斗。出場前並應於管制站完成清洗作業，如有大量滲水或傾洩污泥情況，應於適當清除後再駛離管制站。
- (7) 進出車輛及駕駛有下列情形之一者，管制人員經與監造人員確認並為採證存檔後，應收回管制卡及識別證並撤銷通行權：
  - i. 未經由管制站出入口進出。
  - ii. 駕駛人員未停車受檢並出示證明，或強行進入（出）。
  - iii. 車輛未張貼識別證或與經查驗之車號不符。
  - iv. 經交通監理（警察）、轄區警察、森林警察隊執法人員或環境保護執法人員確認違反相關法令者。
  - v. 駕駛人員不受指揮、言行惡劣經制止仍有影響管制作業者。
- (8) 管制人員查收驗證之證明應妥慎保管儲存，其他工作日誌、聯繫文書、錄影監視等資料及設備亦同。證明單或設備除有異常情況發生，管制站管理人員應隨即通知監造廠商現場人員，並即通知本段承辦人員到場確認，修正資料除經三方簽章確認外，不得採認。
- (9) 各管制站如為因應該場地及作業需求，另於工程（勞務）契約規定有特別規定者，優先適用契約規定辦理。但無優先適用情形，且違反本程序規定者，視為工程（勞務）廠商之重大違約，除按契約規定罰款外，得終止、解除承攬契約，並視情節適用政府採購法第 101 條規定。

### 3. 本段派遣駐場人員按下列規定值勤：

- (1) 應隨時查看採取及管制作業是否依契約及本程序規定執行，有違反情形應立即會同監造廠商派遣人員糾正改善；情節嚴重者，應即回報本段派員處理。
- (2) 資料有異常需修正者，應於查明確認後，方得執行簽名。如事實未明或有重大異常，應即通報本段並將異常情形載明於工作日誌。
- (3) 違反本作業程序規定，除依本段相關契約規定議處外，情節重大者並得按勞動基準法相關規定予以解僱。
- (4) 本段另行委託保全公司指派保全人員進駐者，工程（勞務）廠商應配合該保全契約及廠商，實施門禁及安全管制作業。

## 應用熱影像儀於公路邊坡的初步監測分析

陳冠樺\*、陳建元\*\*

### 摘要

台灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處，地震發生頻率高，且每年受到颱風豪雨的侵襲，造成落石、邊坡滑動及土石流等災害，造成生命與財產嚴重的損害。坡地災害的預警與監控為國內產官學界研究的重要議題，本研究嘗試應用紅外線熱影像儀於現地做坡地災害的監測。紅外線熱影像的分析可以測量出物體表面的溫度變化，以非破壞性檢測監測出其內部變化情形。熱影像儀能夠透過熱影像圖判斷物體表面輻射溫度的高低，以達到坡地災害的初步監測。本研究於研究區域-嘉義縣阿里山鄉達邦三號橋的邊坡做一個短期的監控，發現有幾處的岩坡表面熱輻射差異大，可能是潛在的滑動區。比較三維邊坡穩定分析的安全係數，可看出熱輻射溫度差異較大區域，該區域邊坡穩定安全係數有較低的現象。從材料的熱影像特性中可發現，土壤加水後的溫度會降低，代表土壤內含水量增加時熱輻射會降低，熱輻射變化大的地方可能是潛在破壞區並可研判邊坡潛在破壞區域。

關鍵字：紅外線熱影像、坡地災害、堰塞湖、監測

### 一、前言

台灣位處於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處，地形及地質構造複雜，地震發生頻率高，且每年的颱風豪雨侵襲，造成落石、邊坡滑動及土石流等災害。由前人的研究指出，長期的降雨和豪雨過後容易發生坡地災害，崩積土層因地下水及地表水之影響降低其穩定性，即土層含水量達到飽和，摩擦力降低，安全係數降低，最後土層鬆動而產生崩塌的現象。

熱影像儀是一種對物體散發出的紅外線進行感光成像的設備，目前已廣泛運用在醫療、消防、工業生產及海關檢查等領域。紅外線熱影像儀起初的用途是用在軍事上面，

---

\* 國立嘉義大學土木與水資源工程學系碩士

\*\* 國立嘉義大學土木與水資源工程學系教授



但隨著技術的發展與進步，許多人把熱影像儀應用在民生工業上，例如電器的維護或工業安全的監視等，皆可以熱影像儀進行監測。熱影像儀可進行非破壞的檢測，並能夠大面積及更快的進行表面檢測。有鑑於此，本研究應用熱影像儀先對火成岩、變質岩與沉積岩做岩石樣本熱特性的分析，且與研究區域達邦三號橋崩塌地的關刀山砂岩做分析，針對阿里山縣道 169 線達邦三號橋崩塌地進行調查研究，應用熱影像儀監測現地崩塌表面溫度變化，並與三維邊坡穩定分析的結果做比較，探討溫度變化下崩塌地的衍變。

## 二、文獻回顧

崩塌發生的因素可分為直接因素(如強烈的地震，豪雨)或則長時間的因素(如岩石的風化)，兩者之間的差別，在於一個是直接作用，而另一個是在長期緩慢的累積效應已導致崩塌。這種差異可以很容易地看到 Finlayson and Statham (1980)提出的滑坡測序模型(如圖 1)後來由 Julian and Anthony (1996)修正。漸進破壞的山坡時出現的剪應力作用於岩塊已超過其阻力。要點(1)-(5)對應中長期與短期下崩塌的抗剪強度與剪應力的關係。從物理的角度看，不同階段可能會被認定如下表 1 所示。

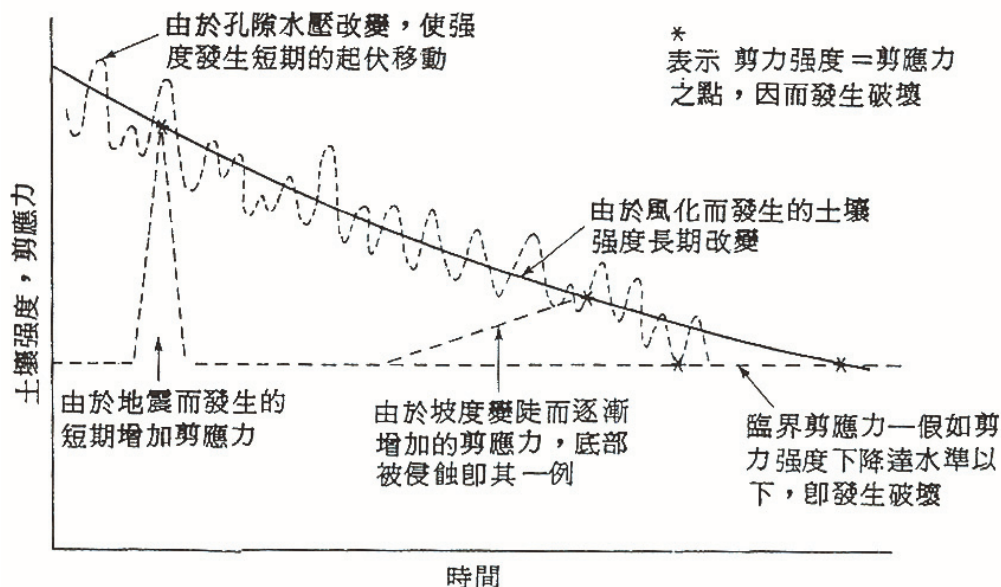


圖 1 崩塌中長期與短期的促動機構作用(Finlayson and Statham, 1980)

表 1 崩塌中長期與短期的土壤抗剪強度與剪應力的形成過程

(Julian and Anthony, 1996)

(1)	經過長期的（約 $10^4$ 的和 $10^6$ 年之間），阻力逐漸減小，由於岩石風化或漸進損害過程。
(2)	短期（ $1-10^2$ 年期間）的強度和應力為振盪，例如：由於季節的變化，然後疊加後，這些影響，並可能導致破裂。
(3)	經過中期至長期（通常為 $10^2-10^4$ 年），在傾斜角的上升侵蝕可能誘發應力增加緩慢直到破裂。
(4)	突然的現象，如強降雨或發生強烈地震，可能會降低阻力水平。
(5)	增加的幅度干擾力，並導致直接破裂。

崩塌的發生因素『水』扮演了很重要的角色，山崩的形成除了外力作用外，主要為水的作用造成其強度降低，抗張力不足，而地滑的形成除了邊坡排水能力不足造成內部孔隙水壓力升高，形成的作用力外，水的存在造成滑動面的土壤剪力強度降低，應常扮演重要的角色。邊坡潛移的現象多在軟弱的土壤夾層中，主要為高含水量且排水不易(蘇苗彬，2009)。

由於岩石風化會導致熱傳導係數下降，而在這潛移的現象中，缺乏一個明顯的解釋和發生機制，因此探討在大自然中每天溫度的變化，造成岩石的熱脹冷縮，這種長期的輕微變化，是否會影響山坡的崩塌為近年學術界研究的主題。

### 岩石的熱物性質與熱傳導率

岩石的熱物性質包括熱傳導係數、比熱、熱擴散係數、線膨脹係數等。這些參數對岩體中溫度場的形成、溫度場的特徵、熱量的傳遞、熱應力的計算等都非常重要的。通常結晶質岩石(crystalline rocks)隨著溫度的升高其熱傳導係數有降低的趨勢，尤其是具有較高熱傳導係數的岩石其降低的趨勢越明顯。相反的，非結晶岩石其熱傳導係數通常較低，其熱傳導係數可能會隨著溫度的增加而升高。對於乾燥的岩石而言，影響熱傳導係數的因素有節理、層面等不連續面、孔隙率、粒徑的形狀及尺寸、膠結程度與礦物組成等。對於飽和的岩石而言，除了與乾燥時的熱傳導係數有關外也與液體的熱傳導係數有關(葉俊廷等，2004)。

岩石傳導熱量的能力稱為熱傳導性，常用導熱係數表示。根據熱力學第二定律，物體內的熱量通過熱傳導作用不斷地從高溫點向低溫點流動，使物理內溫度逐步均一化。設面積為  $A$  的平面上，溫度沿  $X$  方向變化，這時通過  $A$  的熱流量( $Q$ )與溫度梯度  $\frac{dT}{dx}$  及時間  $dt$  成正比即

$$Q = -\kappa A \frac{dT}{dx} dt \dots\dots\dots(1)$$

式中  $\kappa$  為熱傳導率，單位為  $W/(m \cdot K)$ ，含義為當  $\frac{dT}{dx}$  等於 1 時，單位時間內通過單位面積岩石的熱量，表 2、表 3 為常見的岩石熱學性質指標與熱學特性參數。石英岩的熱傳導性最高而煤最低。

表2 岩石的熱學特性(劉佑榮，1999)

岩石	比熱容 $c$ /[ J/(kg·K) ]	熱導率 $k$ /[ W/(m·K) ]	線膨脹係數 $\alpha$ / $10^{-3}/K$	彈性模量 $E$ / $10^4 MPa$	熱應力係數 $\sigma e$ /( MPa/K)
輝長岩	720.1	2.01	0.5~1	9~6	0.4~0.5
輝綠岩	699.2	3.35	1~2	4~3	0.4~0.5
花崗岩	782.9	2.68	0.6~6	1~8	0.4~0.6
片麻岩	879.2	2.55	0.8~3	3~6	0.4~0.9
石英岩	799.7	5.53	1~2	2~4	0.4
頁岩	774.6	1.72	0.9~1.5	4	0.4~0.6
石灰岩	908.5	2.09	0.3~3	4	0.2~1.0
白雲岩	749.4	3.55	1~2	4~2	0.4

表3 0~50°C下常見岩石的熱學性質指標(劉佑榮，1999)

岩石	密度	比熱容		熱傳導率		熱擴散率	
		溫度/°C	J/(kg·K)	溫度/°C	W/(m·k)	溫度/°C	$10^{-3} cm^2/s$
玄武岩	2.84~2.89	50	883.4~887.6	50	1.61~1.73	50	6.38~6.83
輝綠岩	3.01	50	787.1	25	2.32	20	9.46
閃長岩	2.92	-	-	25	2.04	20	9.47
花崗岩	2.50~2.72	50	787.1~975.5	50	2.17~3.08	50	10.29~14.31
花崗閃長岩	2.62~2.76	20	837.4~1256.0	20	1.64~2.33	20	5.03~9.06
正長岩	2.80	-	-	50	2.2	-	-
蛇紋岩	-	-	-	20	1.42~2.18	-	-
片麻岩	2.70~2.73	50	766.2~870.9	50	2.58~2.94	50	11.34~14.07
片麻岩 (平行片理)	2.64	-	-	50	2.93	-	-
片麻岩 (垂直片理)	2.64	-	-	50	2.09	-	-
大理岩	2.69	-	-	25	2.89	-	-
石英岩	2.68	50	787.1	50	6.18	50	29.52

硬石膏	2.65~2.91	-	-	50	4.10~6.07	50	17.00~25.7
黏土泥灰岩	2.43~2.64	50	778.7~979.7	50	1.73~2.57	50	8.01~11.66
白雲岩	2.53~2.72	50	921.1~1000.6	50	2.52~3.79	50	10.75~14.97
石灰岩	2.41~2.67	50	824.8~950.4	50	1.7~2.68	50	8.24~12.15
鈣質泥灰岩	2.43~2.62	50	837.4~950.4	50	1.84~2.40	50	9.04~9.64
致密石灰岩	2.58~2.66	50	824.8~921.1	50	2.34~3.51	50	10.78~15.21
泥灰岩	2.59~2.67	50	908.5~925.3	50	2.32~3.23	50	9.89~13.82
泥質板岩	2.62~2.83	50	858.3	50	1.44~3.68	50	6.42~15.15
鹽岩	2.08~2.28	-	-	50	4.48~5.74	50	25.20~33.80
砂岩	2.35~2.97	50	762~1071.8	50	2.18~5.1	50	10.9~423.6
板岩	2.70	-	-	25	2.60	-	-
板岩 (垂直層理)	2.76	-	-	25	1.89	-	-
煤	1.47	-	-	50	<u>0.23</u>	-	-

表 4 為岩石的熱傳導係數，依據住宿類建築物節約能源設計技術規範(2011)所給出的岩石熱傳導率  $U_i$  之計算，依下式求得：

$$U_i = \frac{1}{1/h_o + \sum d_x/k_x + r_a + 1/h_i} \dots\dots\dots(2)$$

其中

$U_i$  :  $i$  部位之熱傳透率 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$r_a$  : 中空層之熱阻 [ $m^2 \cdot K/W$ ]

$h_o$  : 外表面的熱傳遞率 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$h_i$  : 內表面的熱傳遞率 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$k_x$  :  $I$  部位內第  $x$  層材料之熱傳導係數 [ $W/(m \cdot K)$ ]

$d_x$  :  $I$  部位內第  $x$  層材料之厚度 [ $m$ ]



表4 岩石的熱傳導係數(取自住宿類建築物節約能源設計技術規範)

材料名稱	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	熱導係數 k 濕潤 80% [W/m·k]
大理石	2670	2.8
花崗石	2810	3.5
土壤 (黏土質)	1860	1.5
土壤 (砂質)	1560	0.93
土壤 (壤土質)	1450	1.05
土壤 (火山灰質)	1070	0.47
砂粒	1850	0.62
泥壁	1300	0.8

### 紅外線的相关原理與應用

1672 年人們發現太陽光(白光)是由各種顏色的光複合而成，同時牛頓做出了單色光在性質上比白光更簡單的著名結論。使用分光稜鏡就把太陽光(白光)分解為紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等各色單色光。1800 年英國物理學家 F.W.赫胥爾從熱的觀點來研究各種色光時，發現了紅外線。

所有的物質只要大於絕對溫度 0K 以上(-273℃)，皆會輻射出能量，輻射熱亦屬於電磁輻射的一種。熱輻射之熱源與受熱物體不需要直接接觸。例如太陽輻射熱量透過窗戶讓皮膚感覺曬到熱。熱對流及熱傳導之熱傳遞量與溫度差異呈線性關係。熱輻射的熱傳遞量與溫度的四次方成正比(針對黑體)。在真空中只有熱輻射會發生，熱對流及熱傳導不會發生(科穎科技有限公司，2011)。

熱影像可視為一種將能量轉換成影像的應用技術，其工作原理為偵測待測物之紅外線熱輻射，經由特殊透鏡聚焦，投影在熱影像儀之感測器(Detector)上，感測器再將紅外線能量轉換成電子訊號，經過硬體的信號處理，便可在顯示器上顯現出物理的熱影像(李璟芳等，2004)。

根據普朗克黑體輻射理論(Planck's black body radiation Law)，任何物體只要溫度高於絕對零度便會電磁輻射，而宇宙中所有真實物質皆以高於絕對溫度(-237.16℃)存在，構成物質的元子或分子因相互碰撞與結合，使原子內的基本電荷受到加速，而產生熱輻射。輻射強度與其波長分佈( $\lambda$ )和輻射率(Emissivity)有關，理想放射體(黑體)的熱輻射將遵守普朗克定律(陸懋宏，1985)，其關係式如下：

$$M_{e\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} = \frac{3.754 \times 10^4}{\lambda^5 (e^{14.388/\lambda kT} - 1)} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$M_{e\lambda}(\lambda, T)$ =光譜輻射分佈(Watt/cm<sup>2</sup>·μ)；

μ=放射波長(μm)；

T=黑體的絕對溫度(K, kelvins)；

h=普朗克常數( $6.626176 \times 10^{-34}$  Watt·sec<sup>2</sup>)；

c=光速( $2.99792438 \times 10^{10}$  cm/sec)；

k=波次曼常數( $1.380662 \times 10^{-23}$  Watt·sec/K)。

根據上式，可繪出溫度與其輻射強度及光譜特性之函數關係情形(如圖2)，紅外線熱像儀即是藉由此普朗克黑體輻射的理論，量測輻射能量以得知物體之溫度分佈(李璟芳等，2004)。

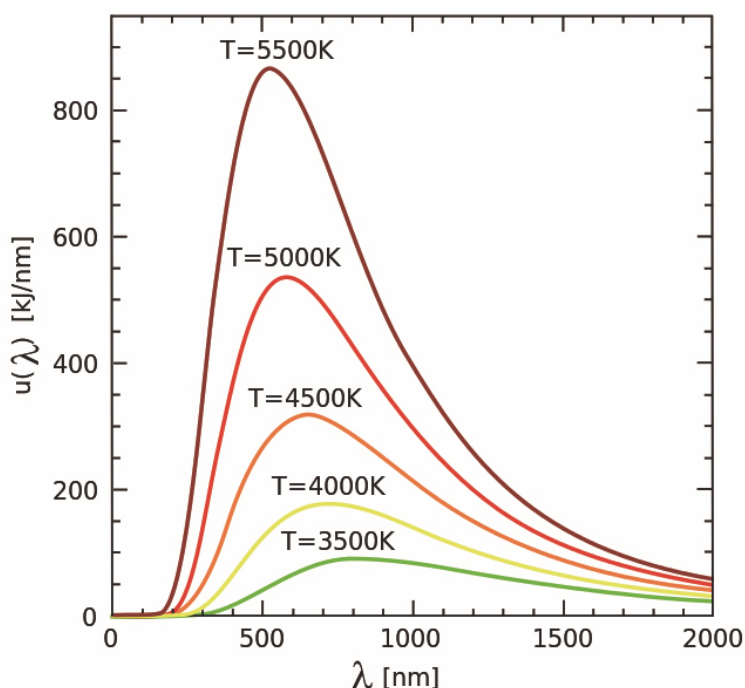


圖 2 普朗克黑體輻射曲線圖(Richard, 1969; 摘自維基百科)

使用熱影像技術由表面溫度的測量來評估一個目標對象的好處包括(Clark et al., 2003)：

- (1)遙感：在調查之中於設備和目標之間沒有直接接觸。設備和目標距離可能從幾毫米範圍到幾公里外被辨認為潛在地危險區域。因無外在光源，日夜間皆能操作。
- (2)大監視面積：在視野之內，熱影像技術具有同時監視許多不同點位溫度的能力。
- (3)可視性高：因為熱輻射比可見光輻射更可穿透煙與薄霧，視覺上被遮暗的目標可以被查出。

- (4)測溫的範圍大：通過變更透鏡孔徑設備和通過各式各樣的過濾器，系統的敏感性和它的對熱輻射的反應可因環境而改變。
- (5)快速的反應速度：熱影像設備能查出和監測迅速的溫度波動。
- (6)輕便：熱影像設備重量輕且易於運輸。
- (7)可以數據操作：可於個人電腦執行影像處理軟體以記錄和處理監測的數據。

紅外線熱影像比其他非破壞檢測法更晚用於非破壞檢測上，不過相對的紅外線熱影像儀有著下列優點：能夠快速的進行表面檢測、能夠進行大面積的檢測、不會損害待測物體、不會有輻射線殘留、不會侷限於地形而能方便使用、將溫度轉換成熱影像分佈容易判斷等。隨著訊號處理技術的進步，現今的科技能接收紅外線熱輻射，並將該訊號轉為我們可以判讀的熱影像圖，即在實驗中所用的紅外線熱影像儀(李洲亘，2006)。

日本建設省土木研究所長谷川秀人等(1996)利用紅外線熱影像對噴漿護坡進行研究，指出若噴漿背後邊坡內如果有孔洞存在，會產生對熱傳導上的差異性。並以砂箱試驗驗證其熱傳導概念圖，以不同厚度之混凝土砂箱並放入不同傳導介質如水、土、空氣等進行試驗，如圖3所示。由砂箱試驗結果看出內部傳導物質若為空氣時，其外部混凝土表面溫度上升率較高；即當噴漿內部產生孔洞時，則其噴漿表面溫度上升率較高。於現地噴漿護坡試驗方面，空洞部分與密著完好部分相比，當溫度上升時，其空洞部分的溫度變化會較大，而密著完好部分的溫度變化比較小。並就噴漿護坡應用及測定上需注意的事項提出如下之建議：

- 1.現地條件：日照造成噴漿表面溫度變化，因此日照的角度及時間均需考量。
- 2.植生存在：植生會造成計測上的困難，量得的表面溫度乃植生的溫度，而非植生下物體的溫度。
- 3.距離條件：當儀器與測定物距離過長，則解析度會降低。
- 4.天候條件：晴天與陰天是較好的測定環境，需避開降雨與降雪的天氣。
- 5.濕潤部分：表面流水與濕潤部分，均會造成計測上的困難，而無法測出空洞處，只能測出水的表面溫度。
- 6.適用條件：當噴漿層厚度過厚時，則會造成精度低下的情況。
- 7.凹凸表面：邊坡表面的凹凸起伏，於不同角度的陽光照射下會產生陰影，影響計測。

長崎大學工學部山中稔等人(2000)應用紅外線熱影像研究長崎縣時津町邊坡崩塌案例中，於現地拍攝噴漿護坡示意圖，如圖4所示。其研究成果提出於12:00至17:30邊坡降溫過程中，現地調查出之確定空洞位置的溫度變化差距大於內部良好的部分。其結果如圖5所示。綜合上述之研究結果可在午後與凌晨量測每點的較高與較低溫度，計算其溫度變化；最大溫差處的區域，可能即為隱藏於噴凝土後方孔洞的位置。

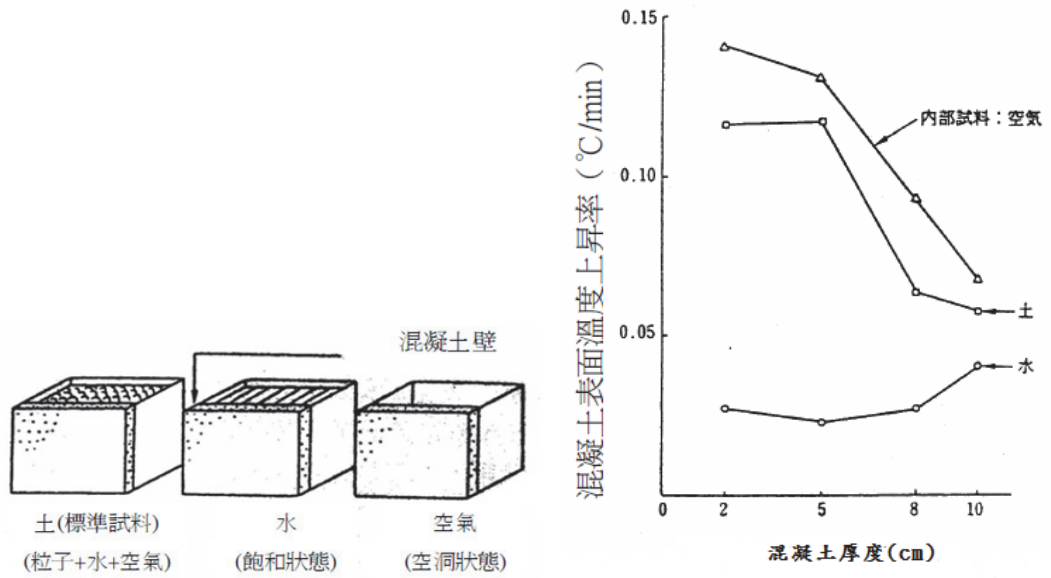


圖 3 混凝土砂箱試驗表面溫度上升率與混凝土厚度之關係圖  
(長谷川秀人等人，1996)

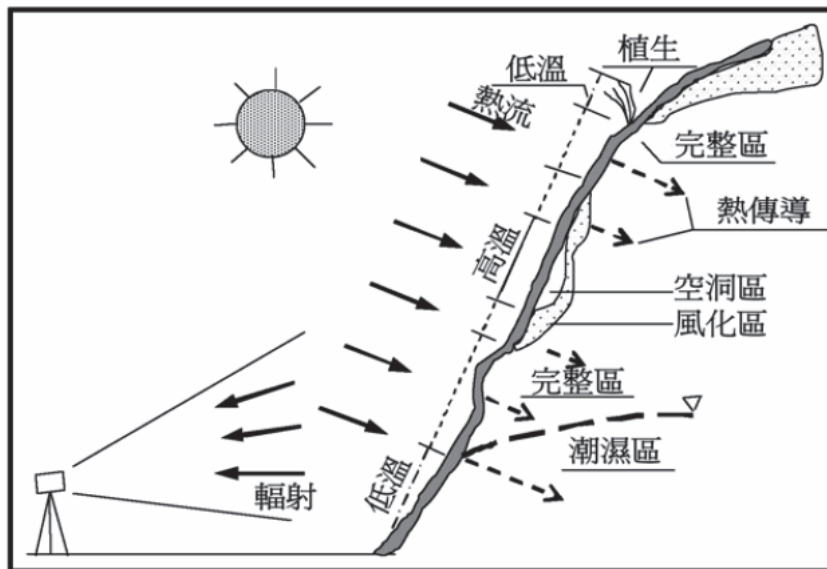


圖4 邊坡熱影像量測示意圖(山中稔等人，2000)



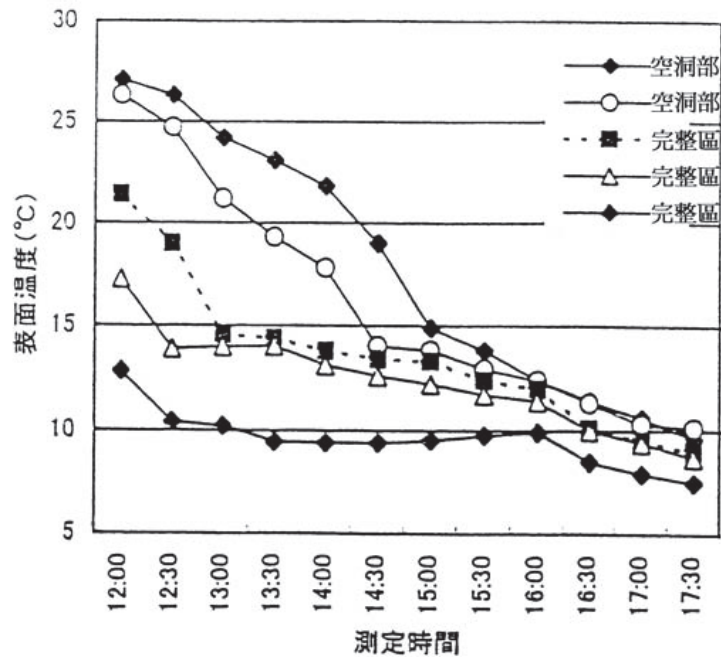


圖5 歷時表面輻射溫度變化(山中稔等人, 2000)

方世杰(2009)發現噴漿保護邊坡之表面物質雖較為均質，但於熱影像探測時會發現均一的表面仍有溫度變化上的差異，由此溫度差異即反應出噴漿內部的不同。由現地拍攝成果可知孔洞部分的溫度變化較噴漿完好部分變化大，亦即孔洞部分受日照產生溫度差大於噴漿完好的部分。藉由影像處理技術將溫差以圖像方式來呈現，即以高溫時的圖像減去早晨未受太陽影響時之圖像，則圖像上溫差較高部分(如圖6)，即為噴漿護坡內部有孔洞的區域。且由不同時期之噴漿護坡熱影像圖徵，可探討孔洞擴張之趨勢。

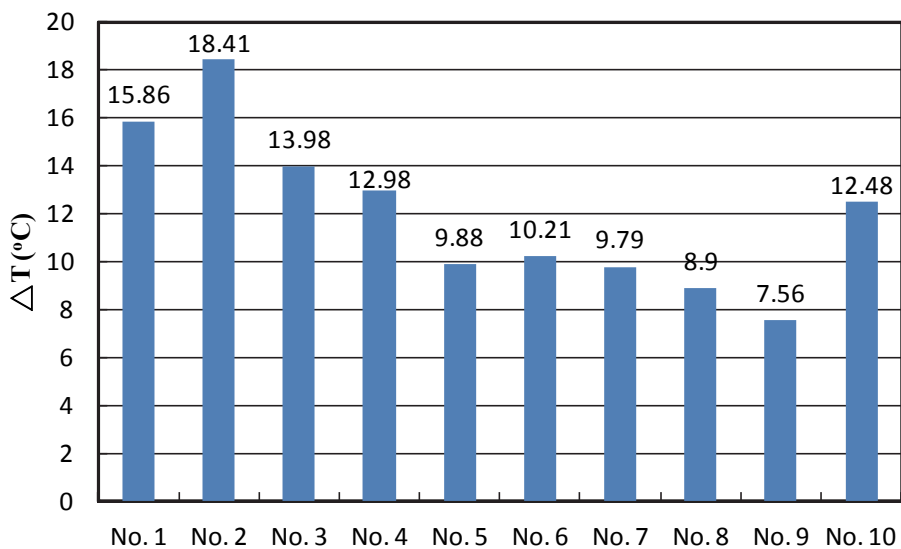


圖6 各點位噴漿護坡溫差柱狀圖(方世杰, 2009)

Baroň(2012)提出應用紅外線熱影像儀，監測開放式裂縫和張力裂縫於岩質邊坡的不穩定性和巨大岩壁，應用高解析度的地面相機和機載紅外線熱影像儀。於寒冷的季節時，基於岩體深度與溫度之間的對比。在冬季時，通過開放式裂縫和接縫，溫暖的空氣從深處上升到地表，可以檢測到溫度對比。熱影像結果得出結論表明存在開放式裂縫、鬆動的岩石區和偽溶洞穴。熱影像的做法被證明是有助於快速的評估開放式裂縫和張力裂縫與落石和塌方的分佈危險評估所需的關鍵信息。

熱影像方法的成功應用，充分考慮包括以下幾點:

- 1.環境空氣溫度低於當地平均深度岩石溫度，營造出對比裂縫空氣和周圍的地面溫度。
- 2.能見度良好。
- 3.缺乏直接曝曬。
- 4.沒有厚的積雪覆蓋，它可能掩蓋岩石表面的溫度差異和精確合理的距離。
- 5.稀疏植被的岩石表面。

李璟芳(2004)使用熱影像儀監察土石流發生流動現象與源頭崩塌的位移，以提供土石流與坡地監測的應用參考。Gunzburger(2004)應用熱影像儀監測邊坡每天表面的溫度，觀測到每日的溫度是會對山坡的崩塌有一定的影響。鄭子揚(2005)的研究採用紅外線熱影像法做建築物的檢測，進行遠距離非接觸性的檢測，檢測混凝土表面下的缺陷。李洲亘(2006)使用熱影像儀檢測火災後混凝土表面的缺陷。藍棟彥(2009)利用紅外線溫度記錄法探測橋面分層的試驗方法，判斷該區域是否為缺。張晉銘(2011)採用熱影像技術記錄不同水灰比W/C、水膠比W/B 試體之熱消散情形。

### 三、紅外線熱影像分析

#### 熱影像的特性與介紹

熱影像的技術可以測量出物體表面的溫度，以檢測出其內部情形的非破壞性檢測。熱影像技術早期已應用於軍事，工業，醫療和科學應用，由於現在科技的進步，熱影像最近又有了更快速的發展，熱影像相機，該技術已被主要適用於工程施工和技術科學。熱影像技術是利用物體在不同溫度下輻射出來的電磁波，並由不同物質能量輻射出的不同電磁能量的差異性來加以區分。

熱影像儀可以探測出物體表面溫度的差異，是一種非接觸、非破壞且測溫快速的檢測，且可以從圖片的顏色中看出溫度的不同，讓人更容易辨識及使用。本實驗用的熱影像儀型號日本NEC公司所生產的NEC G100D，其分析溫度的精度可到小數點後兩位，溫度範圍在-40°C~500°C，靈敏度（NETD）0.08°C（在30°C及8.5Hz螢幕更新率下）測量精確度±2°C（在100°C以內）或±2%讀值（大於100°C以上）檢測器波段範圍8到14μm

(微米)可見光數位相機200萬畫素CMOS。熱影像儀拍紅外線的照片同時也會拍下可見光的照片，以做參考，可用讀卡機或USB線把所拍攝的照片下載到電腦裡。於現地拍攝腳架架好與設定後可做單張拍攝或長期的監測，拍攝後可用程式做進一步的分析。

## 岩石的熱影像特性

岩石是由不同礦物的顆粒所構成的，是組成地殼的主要物質，其構成的礦物顆粒都有不同的熱傳導性。陳聖文(2008)提到，多數岩石來講，所受的溫度越高和含水量越大，岩石的力學性能越差，隨著岩石受熱溫度的升高，岩石內部水分蒸發，含水量減小，導致岩石力學性能既增加又減弱的結果，使得力學試驗結果不明顯。

岩石邊坡的穩定性與岩石的溫度隨著時間的變化和熱特性可能是一個重要因素，Moore和Gischig等人(2011)對岩石的熱梯度的影響進行了研究，在瑞士蘭達塌方演示了溫度的效應可以推動在更深處的岩石邊坡變形。

本研究首先探討火成岩、變質岩、沉積岩，這三種不同類型組成的岩石的熱影像特性，並與研究區域的岩石做熱影像的分析比較。

## 火成岩熱影像分析

火成岩的組成是因高溫的岩漿，噴發出地表或者在地底下慢慢的降溫冷卻，然後凝固後所形成的岩石。因為火成岩是直接由岩漿凝固形成的，並沒有經過變質或風化作用，因而被認定是能代表地球內部成份的岩類。

台灣大部分的火成岩形成於新生代，亞洲東部的大陸板塊邊緣處於劇烈張裂運動，另一方面緊鄰的太平洋板塊則向下俯衝形成隱沒帶。因此火成岩的岩性有張裂性板塊內部岩漿(玄武岩為主)以及聚合板塊邊界岩漿(安山岩為主)兩大類(劉聰桂，2005)。台灣地區最常見的火成岩種類有安山岩及玄武岩，另外在金門、馬祖有花崗岩。

本實驗針對火成岩的樣品進行分析，如圖7所示，以這12種不同火成岩做熱影像儀的分析與討論，實驗方式為放置12塊岩石於空地中進行曝曬，並架設紅外線熱影像儀設定以30分鐘拍攝1次，進行溫度分析，火成岩岩石熱影像圖如圖8所示。

火成岩溫度分析的結果，如圖9所示，可以發現12塊火成岩岩石中平均溫度最高的是玻璃質玄武岩(Glassy Basalt)，平均溫度最低的是花崗岩(Granite)。玄武岩熱傳導係數為1.61~1.73(W/(m·k))小於花崗岩的熱傳導係數2.17~3.08(W/(m·k))(表3)。由於熱傳導率k是材料直接傳導熱量的能力，k值低則在陽光曝曬下因不易傳熱致岩石表面溫度會較高。由於物質k值會因溫度高低而有差異，因此在不同觀測溫度下各岩石之表面溫度並不成正比例變化。



圖 7 火成岩岩石樣品的種類

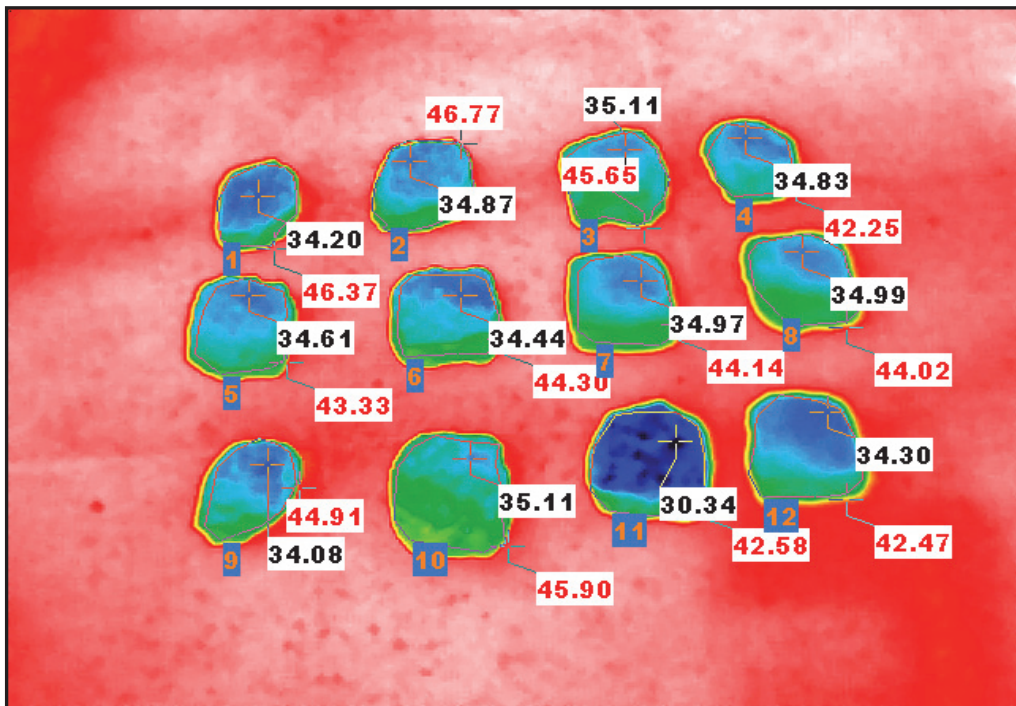


圖 8 火成岩樣品熱影像圖(圖中顯示各岩石之最高溫及最低溫)

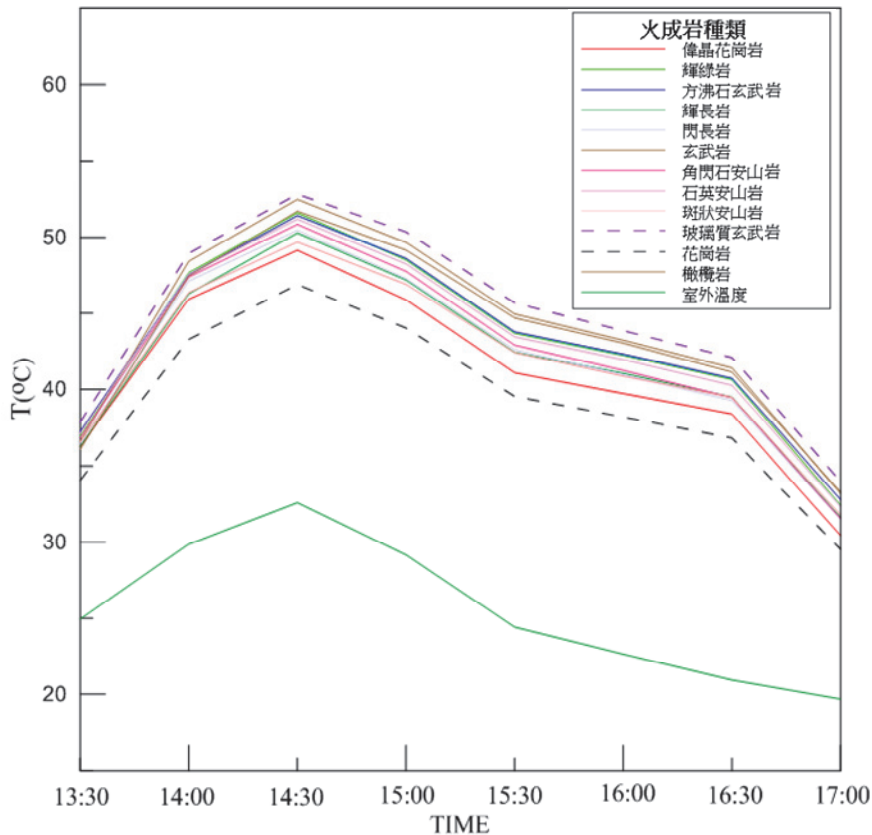


圖 9 火成岩樣品熱影像平均溫度分析的結果

### 變質岩熱影像分析

變質岩的岩石組成是在地底下受壓力、溫度的增高，造成原有岩石的排列、結構或礦物種類改變而形成的岩石。這些高溫高壓的變化可能是岩漿的侵入或地殼運動所造成的。

台灣島因為位於歐亞板塊和菲律賓海板塊的交界，常受到板塊的互相擠壓影響，岩石的結構組織與礦物成分，因為溫度、壓力增高而發生變質作用。台灣的變質岩主要分佈在中央山脈與雪山山脈，另外在花東縱谷則有一些零星的板塊分佈(劉聰桂，2005)。

本實驗以12種不同變質岩岩石做熱影像儀的分析與討論(圖10)，各岩石平均溫度的分析結果如下圖11，可以從圖中發現，平均溫度最高的是板岩(Slate)，平均溫度最低的是大理岩(Marble)，從表3的熱傳導係數中可發現，板岩的導熱係數為 $1.89(W/(m \cdot k))$ 小於大理岩的導熱係數 $2.89(W/(m \cdot k))$ 。





圖 10 變質岩岩石樣品的種類

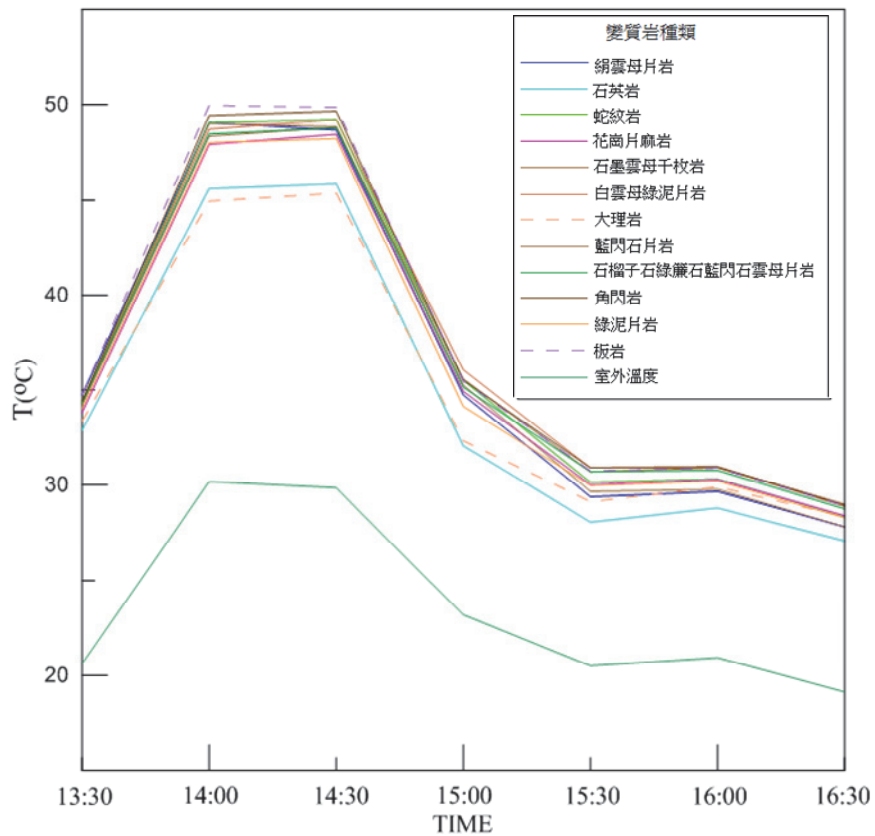


圖 11 變質岩樣品熱影像平均溫度分析的結果

## 沉積岩熱影像分析

沉積岩的形成是經侵蝕、風化作用或動物的遺骸所形成的沉積物，經過膠結與深埋的作用而成的岩石。沉積岩在形成過程中往往會含有生物的遺骸，這些遺骸經過了長久的時間就變成化石。

地表的岩石不論是火成岩、變質岩或是沉積岩，都會因為地表的物理(溫度及壓力)及化學環境(如水與氧等成份)與原來岩石生成時的狀況不同而風化，這些風化作用後的產物，再經過搬運、堆積、壓實、膠結等作用，形成沉積岩。沉積岩在地表的分佈普遍，在台灣，沉積岩區大多分布在較容易到達的低緩地區，所以也較易觀察(劉聰桂，2005)提到。

實驗以這12種不同沉積岩岩石做熱影像儀的分析與討論(圖12)。熱輻射溫度的分析結果如下圖13，可以從圖中發現，平均溫度最高的是煤(Coal)，平均溫度最低的是石灰岩(Limestone)，而煤的導熱係數為 $0.23(W/(m\cdot k))$ 小於石灰岩的 $1.7\sim 2.68(W/(m\cdot k))$ 。



圖12 沉積岩岩石樣品的種類

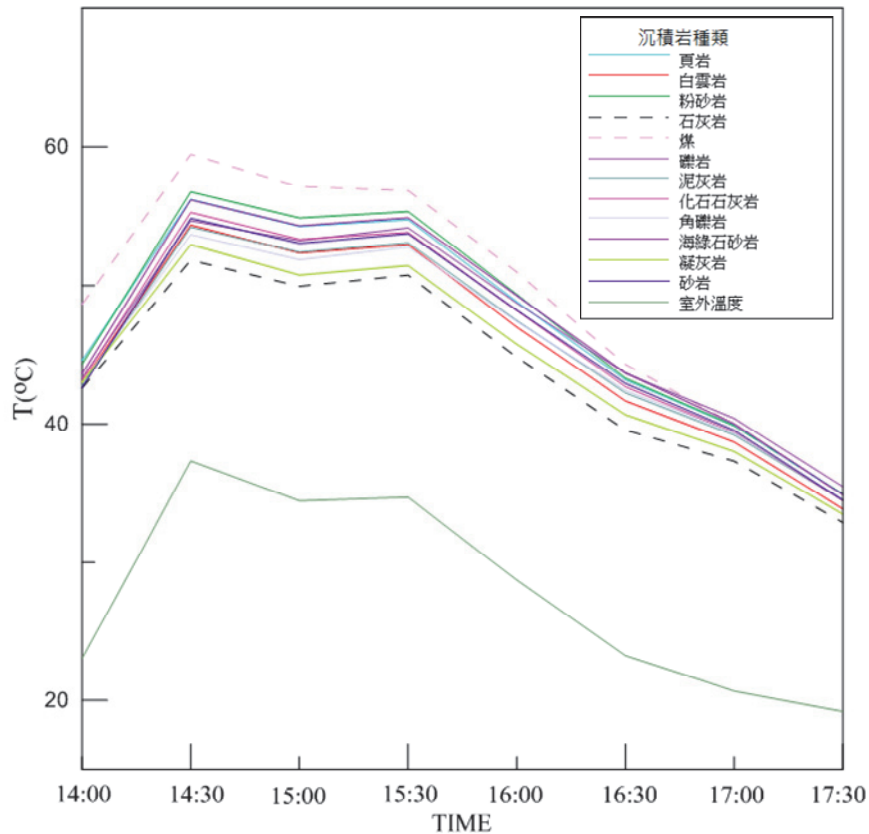


圖 13 沉積岩樣品熱影像平均溫度分析的結果

### 邊坡材料的熱影像特性

骨材又稱粒料是岩石類的材料，有多種尺寸與形狀，骨材的主要來源為各種不同種類的岩石或石塊，包括天然骨材和人造骨才兩種，本實驗應用材料做熱影像特性的分析，材料上用粒徑大於等於4.75mm(3/16 in)的粗骨材，與粒徑介於 $150\ \mu\text{m}$ (0.006 in)至4.75mm(3/16 in)之間的細骨材，及土壤與黏土做不同組合的混合(如圖14)，以了解其材料的熱特性。其試驗方式為放置於一塊空地進行曝曬，並架設紅外線熱影像儀設定以30分鐘拍攝1次，觀測其溫度的變化。

材料溫度分析的結果，如圖15所示，可以發現材料中細骨材平均溫度最高，平均溫度最低的是土壤加水，細骨材的平均溫度較高，原因可能是孔隙率小較容易受熱，土壤加水因為有含水的關係所以平均溫度才最低，黏土本身就有一定的含水量，所以平均溫度偏低。



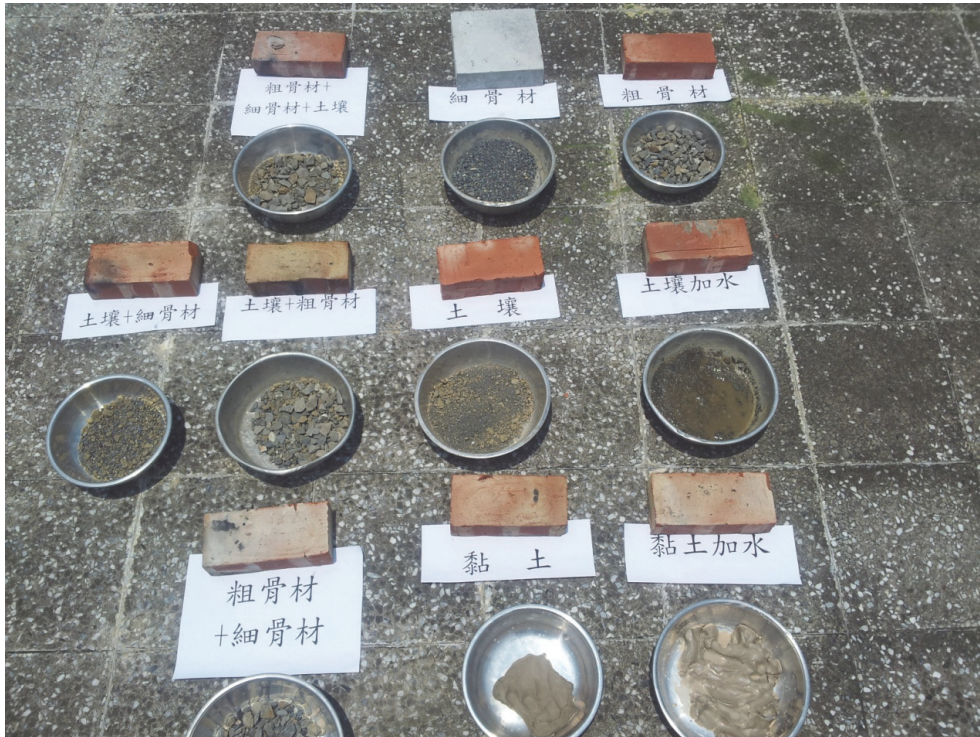


圖 14 應用不同種材料做混合搭配

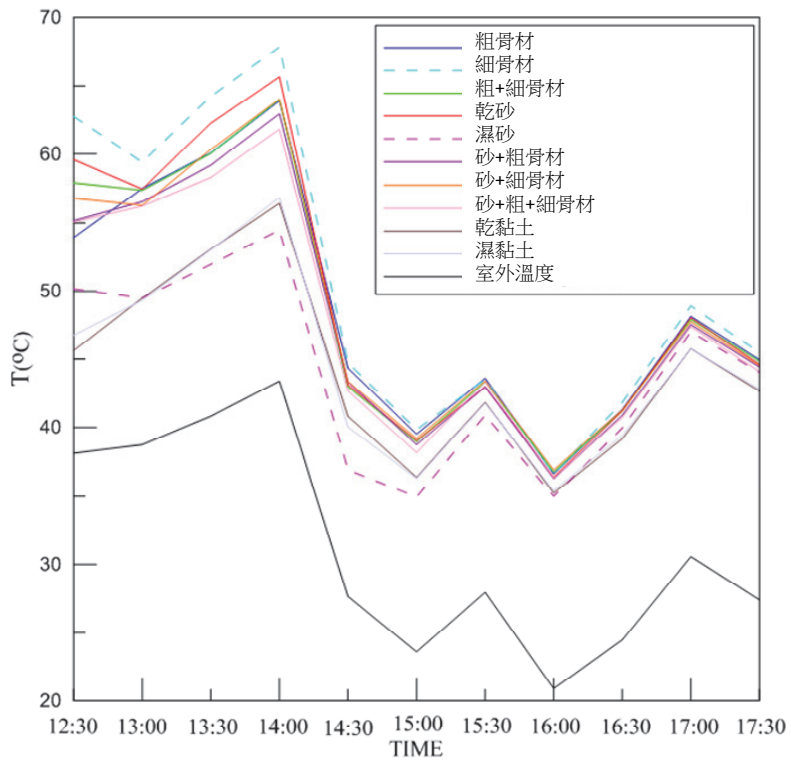


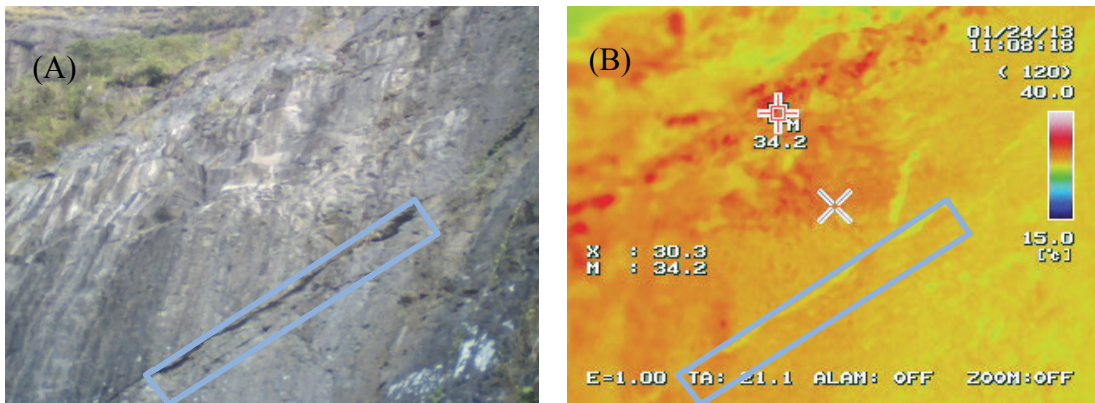
圖 15 材料樣品熱影像平均溫度分析的結果

#### 四、熱影像儀在岩坡監測上的應用

Baroň (2012)提出裂縫是邊坡穩定性的關鍵因素。開放式裂縫可以表明落石的初期階段;往往可以定義不穩定岩體，並代表一個顯著的施工規範。開放式裂縫和鬆動的岩石也透露倒塌的石柱和不穩定區沿岩石峭壁和未來潛在落石的關鍵指標。這種不穩定的地區，通常通過人工檢查確定，但在特別陡峭的高山地區，調查可能是有限的。在落石前的預防措施，有效辨別不穩定的地區，才能預防與鞏固脆弱地區也保護了人的財產和生命。

##### 岩石邊坡熱影像的特性

本研究用紅外線熱影像儀監測邊坡，監測方式為依靠裂縫中的空氣流通與通風的特性，使用紅外線熱影像儀可以監測到崩塌地區於裂縫帶的相對低溫區，也有另一種可能是因為裂縫帶所產生的陰影，形成邊坡有相對的低溫區。如圖16(A)(B)可看出，這是阿里山公路上的一處邊坡，從(A)圖上可看出有一道明顯的裂縫，而這道裂縫從(B)圖中的熱影像圖中，溫度分析出的裂縫平均溫度為 $28^{\circ}\text{C}$ ，而其它邊坡的平均溫度為 $29.7^{\circ}\text{C}$ ，可以看出裂縫中的溫度較其他邊坡的溫度來的低。從另一張阿里山公路的另一處邊坡圖16(C)(D)中也可以從圖(C)中看出有一道裂縫，而從(D)圖的熱影像圖中可發現，裂縫中的溫度較其他地區偏低，裂縫中的平均溫度為 $30.7^{\circ}\text{C}$ ，而其它崩塌地地區平均溫度為 $32.1^{\circ}\text{C}$ ，可發現裂縫中的溫度是較低的。再從另一處阿里公路上的邊坡來看，如圖16(D)圖中可以看出邊坡上有一處破碎的岩盤，從熱影像圖16(E)中可以發現破碎岩盤的溫度較其他地方的崩塌地的溫度低，從溫度分析中破碎岩盤的平均溫度為 $33.4^{\circ}\text{C}$ ，其他地方的平均溫度為 $36.5^{\circ}\text{C}$ 。





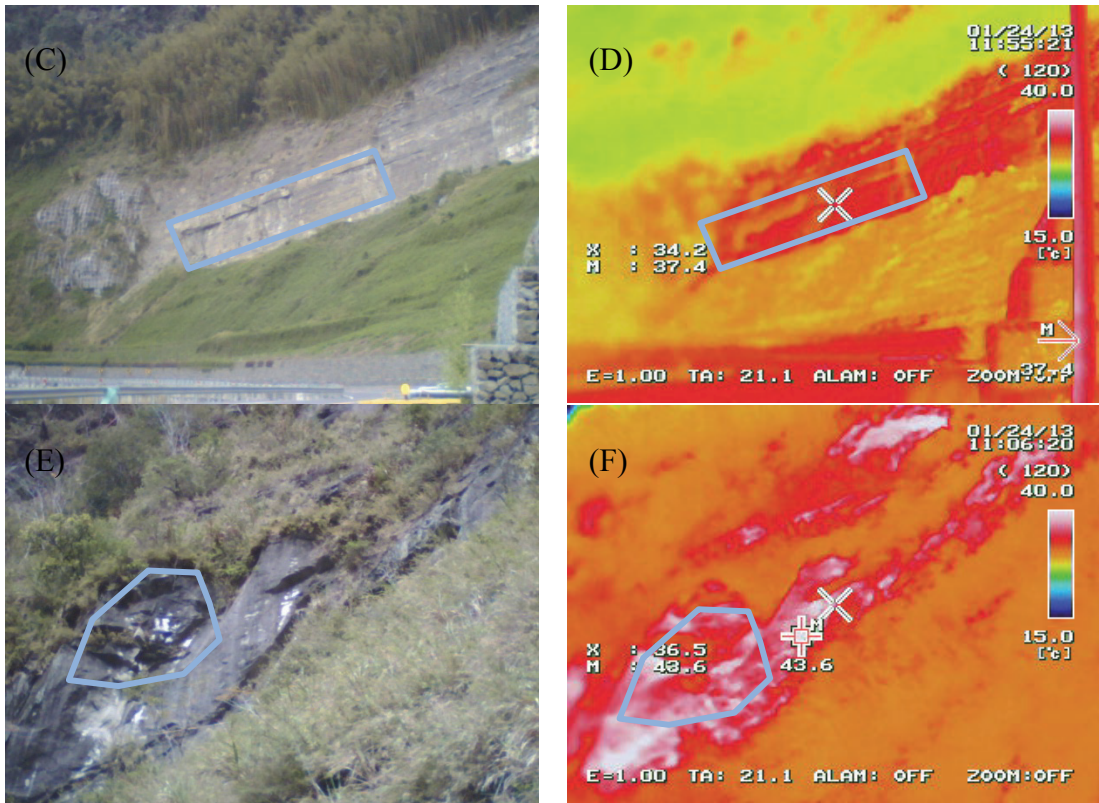


圖 16 阿里山公路上的邊坡熱影像圖(2013.1.24 攝)

圖17為縣道133線一處裸露岩盤的崩塌地，(A)圖可以看到岩盤中有許多裂縫分佈於岩盤上，從熱影像圖(B)中顏色的分佈可以看出，裂縫的顏色偏紅，與其他完整岩盤地方偏白色有所區別，白色岩盤溫度於熱影像圖中溫度為較高的，與裂縫中呈現的紅色相比，代表有裂縫帶的溫度偏低。

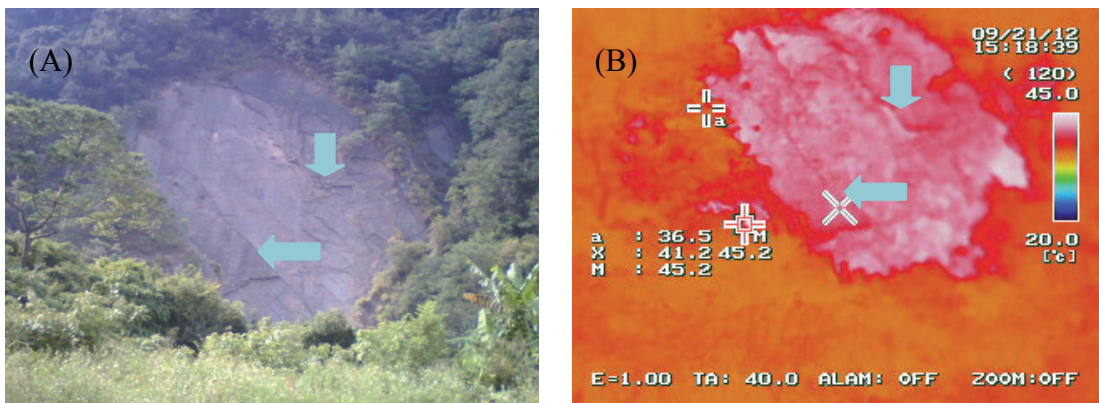


圖 17 南投縣縣道 133 線往惠蓀林場方向的崩塌地(2012.9.21 攝)

2012年因蘇拉颱風的侵襲，導致阿里山公路35公里處的觸口路段上方大量土石滑落，導致交通阻斷且也波及到下面的民宅與便利商店(如圖18)。崩塌規模非常大，所幸



當時已經實施交通管制，所以沒產生任何傷亡，其後做了邊坡災害的修復工程，圖19(A)圖中可看出觸口路段的邊坡已經經過了植生護坡工程，從熱影像圖(B)的分析上可看出中間部分的溫度有偏低現象，這有可能是因為中間部分的陰影區，導致溫度會較其他有植被的地方低，並也有可能因為土壤含水量較高。從溫度分析出中間圈畫部份溫度平均溫度為32.3°C，其它植生地區平均溫度為34.0°C。



圖 18 觸口路段崩塌(2012.8.6 攝)

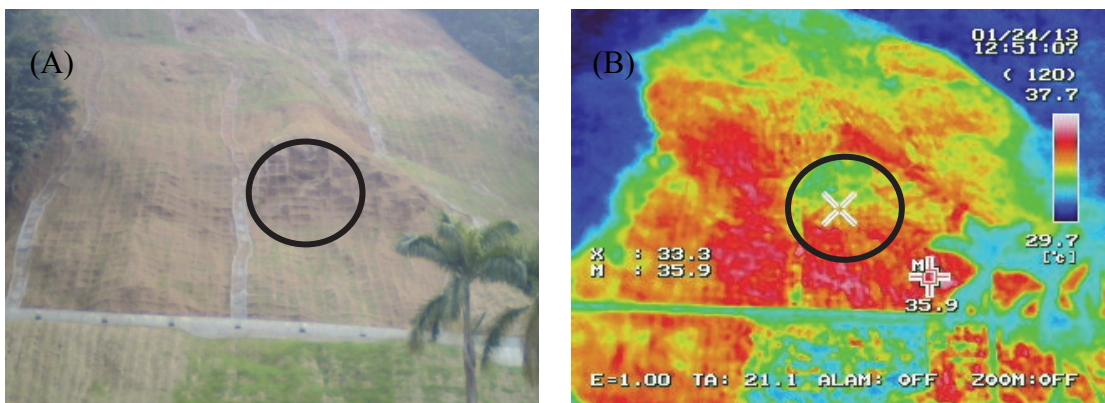


圖 19 觸口路段邊坡經過護坡植生工程後(2013.1.24 攝)

## 岩石邊坡熱影像監測分析

達邦三號橋(如圖20)因2006年六月連續幾日的豪大雨後，邊坡產生大規模崩塌導致鋼橋沖毀至溪底，造成169線往達邦、里佳地區交通阻斷，李錦發等人(2006)的資料顯示，此區計有3處發生崩塌，其中以達邦三號橋墩東側之邊坡崩塌規模最大，崩塌地寬度約350公尺，平均高度約350公尺，為造成達邦三號橋毀損及路基流失之主因。第2處崩塌地位於主崩塌路段南側道路下方邊坡，規模較小，寬度約80公尺，並未造成道路損毀。第3處崩塌位最東側，亦造成該路段100公尺路基流失。以下做該研究區域的地理位置、地質概述與氣象水文的介紹。



圖 20 達邦三號橋災前(李勇鋒 1999.2.26 攝)及災後照片(2012.3.13 攝)

本研究區域的崩塌處位於嘉義縣縣道169線27K+500 達邦三號橋，衛星定位點(TW97): X座標為220578.188,Y座標為2594526.769，行政區域隸屬於嘉義縣阿里山鄉樂野村，該橋樑上游支流為米洋溪並跨越了曾文溪，位置如圖21。



圖21 達邦崩塌地2005年衛星影像(取自 Google Earth)



達邦三號橋的崩場地使用地質鑽探及地球物理探測方式，以瞭解地層特性，岩性以破碎砂岩為主，透過岩石強度試驗結果為砂岩單軸壓縮強度為15~57 MPa，屬於ISRM岩石分級中之中強岩，岩石之基本摩擦角為20~24度。附近之地層主要屬中新世晚期之地層，由老至新分別為南莊層及關刀山砂岩，出露地層以關刀山砂岩為主整合覆於南莊層上，地層之主要地質構造為扶蓉山向斜，扶蓉山向斜之西翼弱面位態約N80°E/20°S，向斜東翼弱面位態N25°E/25°N，向斜軸部通過阿里山公路及縣道169線27K+511附近，軸部側出露地層為厚層塊狀之關刀山砂岩，西翼地層向東傾斜25~30度，東翼地層向西傾斜38~45度，該區域岩體受接近垂直向節理切割，節理面延伸性佳且盤根複雜（交通部公路總局第五區養護工程處，2007）。

本研究區域為達邦三號橋，其岩石以關刀山砂岩為主，關刀山砂岩屬於沉積岩，其內含有大型有孔蟲的化石，這次實驗已在研究區域所帶回來的三塊關刀山砂岩，並與火成岩、變質岩與沉積岩中導熱係數最小與最大的岩石做分析，即火成岩中的玻璃質玄武岩(Glassy Basalt)和花崗岩(Granite)、變質岩中的板岩(Slate)和大理岩(Marble)與沉積岩中的煤(Coal)和石灰岩(Limestone)，其溫度分析結果如圖22，咖啡色線的部分為火成岩，紅色線的部分為沉積岩，綠色線的部分為變質岩，黑色線的部分為研究區域中的關刀砂岩。分析結果發現，關刀山砂岩(Kuantaoshan Sandstone)的平均溫度除了比煤(Coal)低以外，比其他岩石還要高，代表關刀山砂岩的導熱程度，比大多數的岩石還要好。

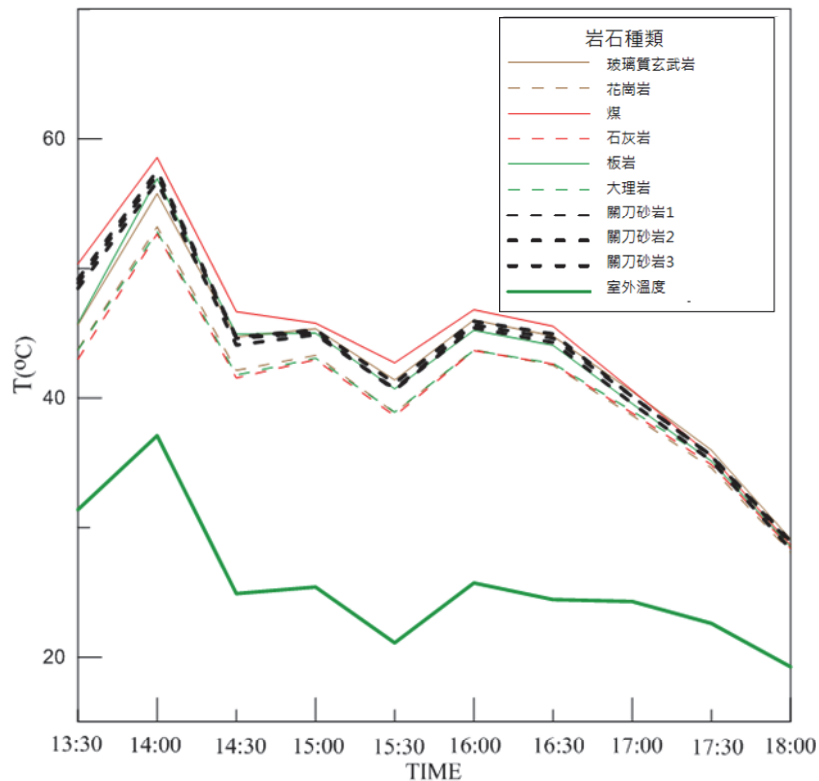


圖22 關刀山砂岩熱影像平均溫度分析結果

研究中應用紅外線熱影像儀，探討火成岩、變質岩與沉積岩這三種不同組成方式的岩石熱特性，並與研究區域中的達邦三號橋的關刀山砂岩做熱影像的分析關刀山砂岩的導熱特性除了比煤低以外，比一般岩石的吸熱還要高。從Gunzburger等人於2004年研究發現，邊坡上的岩石每日受溫度變化不同的影響，會產生輕微的位移，這種每日反覆的輕微擾動，可能是崩塌發生的原因。Moore等人(2011)的研究發現邊坡變形與岩石的熱特性有關。Vargas等人(2013)的研究指出，岩石間的每日的溫度波動可能會傳遞入岩體中，產生熱應力的足夠幅度，進而產生邊坡失穩。從前人研究中可發現，岩石的熱特性會對邊坡崩塌有一定的影響。圖23為達邦橋地區附近的一處邊坡，於晴天時邊坡突然發生落石的現象，並從圖(B)中的點1位置發現此區的邊坡溫度較高，由點1的位置做連續的溫度監測，可以從圖24中看到，邊坡於岩石落石時，呈散熱的狀態，溫度會慢慢的降低，最後漸漸穩定後，邊坡上的岩石溫度又慢慢的升高，代表邊坡中的岩石受熱狀態，也是造成邊坡崩塌的因素之一。

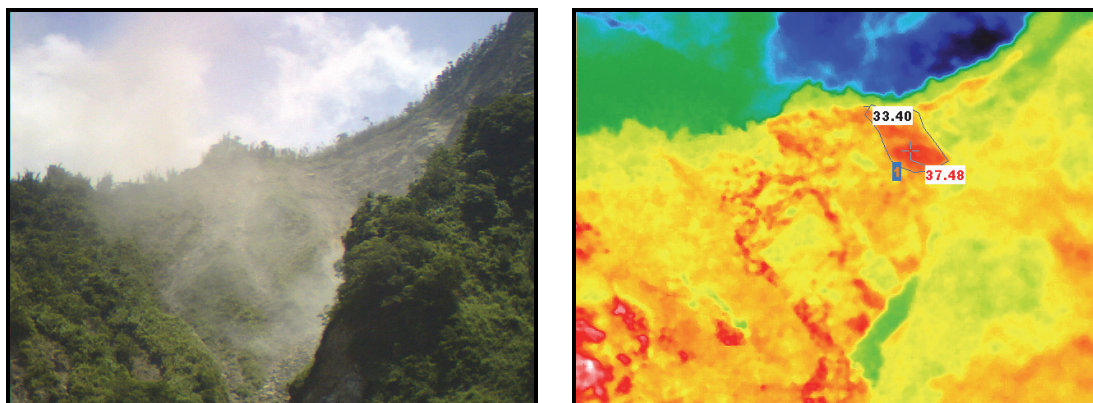


圖 23 達邦橋地區附近一處邊坡崩塌(圖中標示最高溫及最低溫)



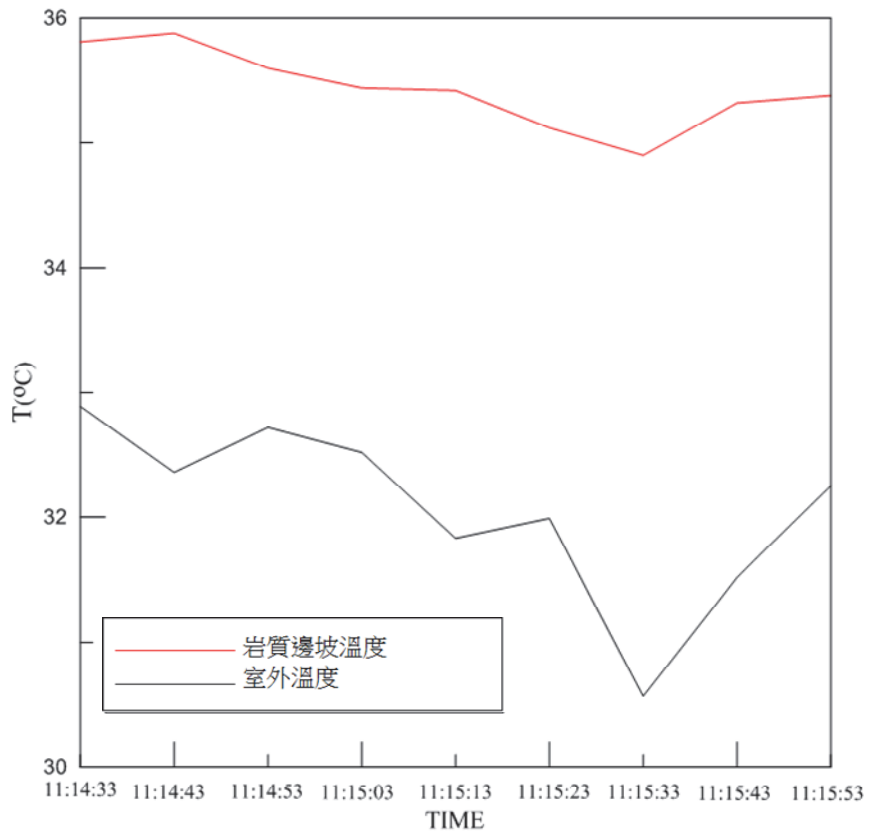


圖 24 達邦橋崩塌溫度分析圖

### 達邦三號橋崩塌地監測

達邦三號橋位於縣道169線27+500處，達邦三號橋崩塌地的岩層主要以關刀山砂岩為主，關刀山砂岩主要由深灰色、灰色、青灰色的緻密塊狀混濁之砂岩組成。本實驗以達邦三號橋的崩塌地做短期觀測與分析，選取十個點做監測與分析(如圖25)，熱影像圖如圖26所示，邊坡監測的時間為早上的11:00拍攝到下午的16:00設定為每30分鐘拍攝一次，其溫度變化圖如圖27所示。圖中顯示12:00至12:30溫度梯度有一個很大的上升，12:00至14:00時因為當時有雲的遮擋，才造成溫度梯度下降。



圖 25 達邦三號橋邊坡及監測點位

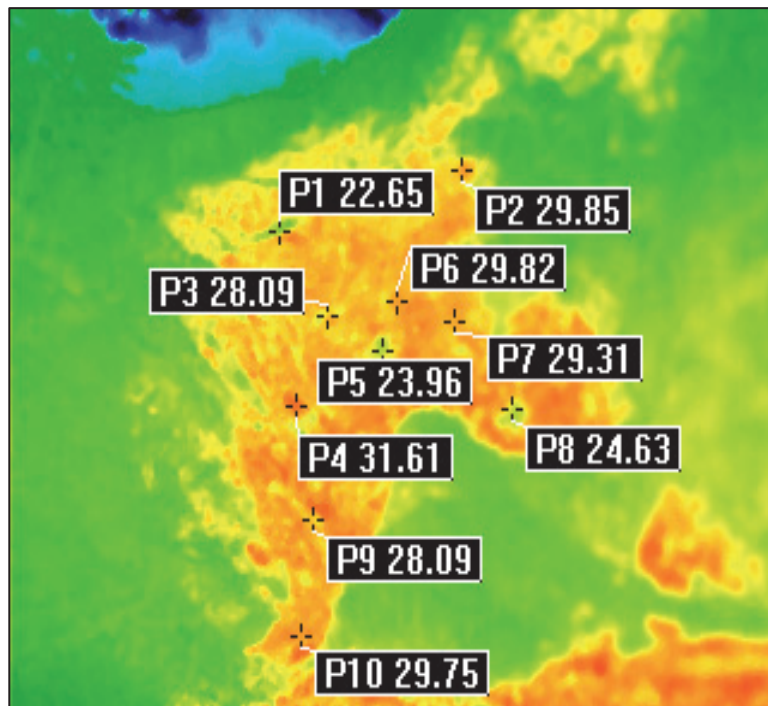


圖 26 達邦三號橋邊坡熱影像及監測點位

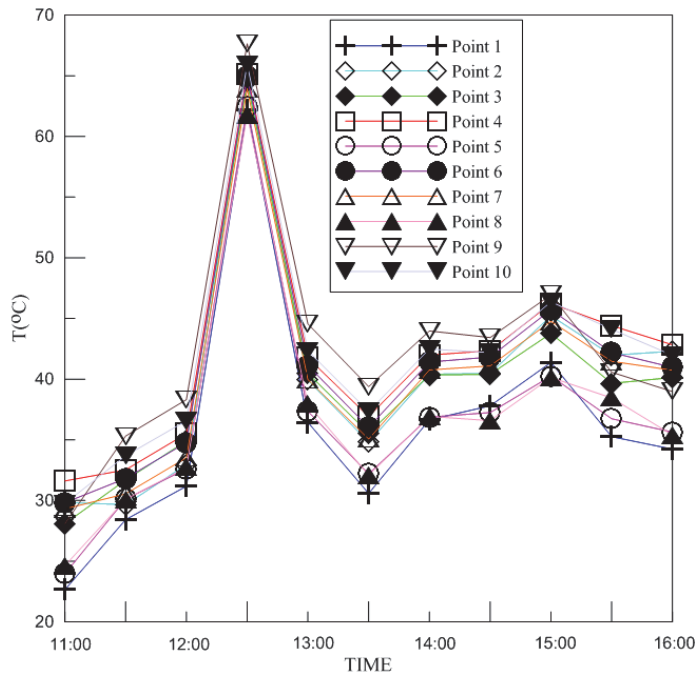


圖27 達邦三號橋邊坡上選取各點位的溫度變化

選擇中午12點的最高溫度與早上11點的低溫度，做成的溫差圖如圖28所示，所選取的10個點，為岩石的裸露區幾乎沒有植被的覆蓋，在太陽的直曬下可看出第1點與第九點的溫差較其他點位為最大的，其次是第5點的位置也較其他點位略高，因為以岩石的熱特性來看，溫度波動較大的地方可能會影響邊坡的崩塌。

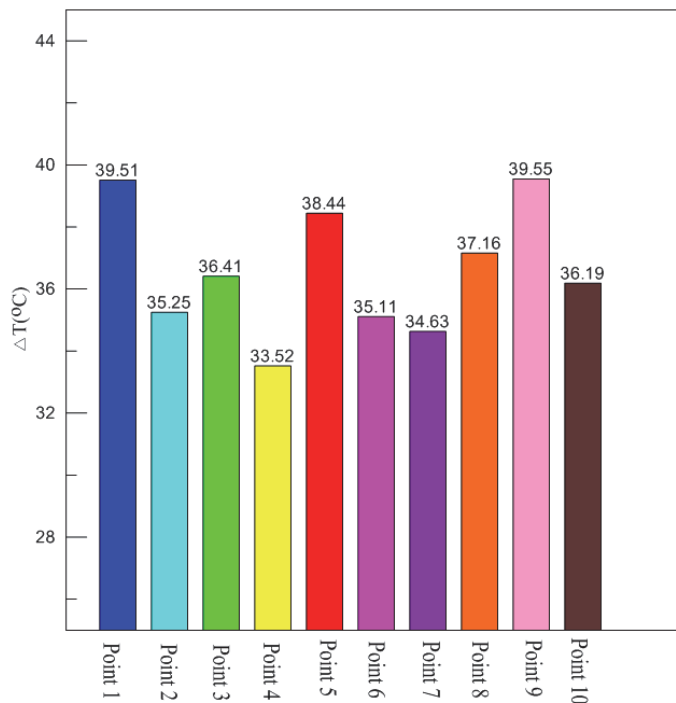


圖 28 各監測點溫差直條圖

裂縫的形成為邊坡穩定的關鍵因素，從前述可看出熱影像圖可以觀察出裂縫周圍溫度變化，因裂縫中可以使空氣流通產生循環，或是裂縫帶所形成的陰影，使得裂縫與周圍表面邊坡的溫度呈現對比。於達邦三號橋的邊坡做一個短期的監控，發現有幾處的溫度變化差異大可能是潛在的危險區。從四個不同時期的達邦三號橋崩塌地來看(如圖 29)，可以從圓圈中發現裂縫隨時間越裂越大，並且中間的山脊線也隨時間的變化有越來越明顯的現象，且碎石也越來越多了。



(a) 2012.2.15 攝



(b) 2012.3.13 攝



(c) 2013.1.24 攝



(d) 2013.3.17 攝

圖29 達邦三號橋崩塌地不同時期地貌變遷



## 五、三維邊坡穩定分析

本研究將以達邦三號橋做邊坡穩定分析，並假設邊坡為平面破壞。本研究區域先在 GIS 上切出分析區域的高程，並繪出邊坡破壞前的高程 GRD 檔，接著在 CLARA-W (O. Hungr Geotechnical Research, Inc.) 的程式中輸入所需要的參數，依照李勇鋒(2010)給定的分析參數，斜坡面高度  $H=300\text{ m}$ 、岩塊單位重  $\gamma_t=2\text{ t/m}^3$ 、水之單位重  $\gamma_w=1\text{ t/m}^3$ 、張力裂縫與斜坡頂距離  $b=30\text{ m}$ ，岩塊受節理等弱面切割並已開裂位移，推估弱面之材料屬頁岩或泥質含量較高之夾層，尖峰剪力強度參數推估約為凝聚力  $c=25\text{ t/m}^2$ 、摩擦角  $\phi=20^\circ$ 。

圖30為程式輸出的結果，包括坡面破壞形狀、破壞體積、破壞邊坡重量、破壞面積、安全係數等相關資訊。程式的結果顯示出達邦三號橋崩塌地的整體安全係數 F.S. 為  $0.687 < 1.2$ ，及代表邊坡不安全。程式並可計算出各網格點之安全係數。應用程式計算出的安全係數與前述熱影像儀做的10個點的溫差直條圖，做對應比較分析(如圖31)，可以發現溫差較大點位為第一點、第五點與第九點，所顯示的安全係數除了第五點安全係數偏高外，第一點與第九點的安全係數都有較低的情形。

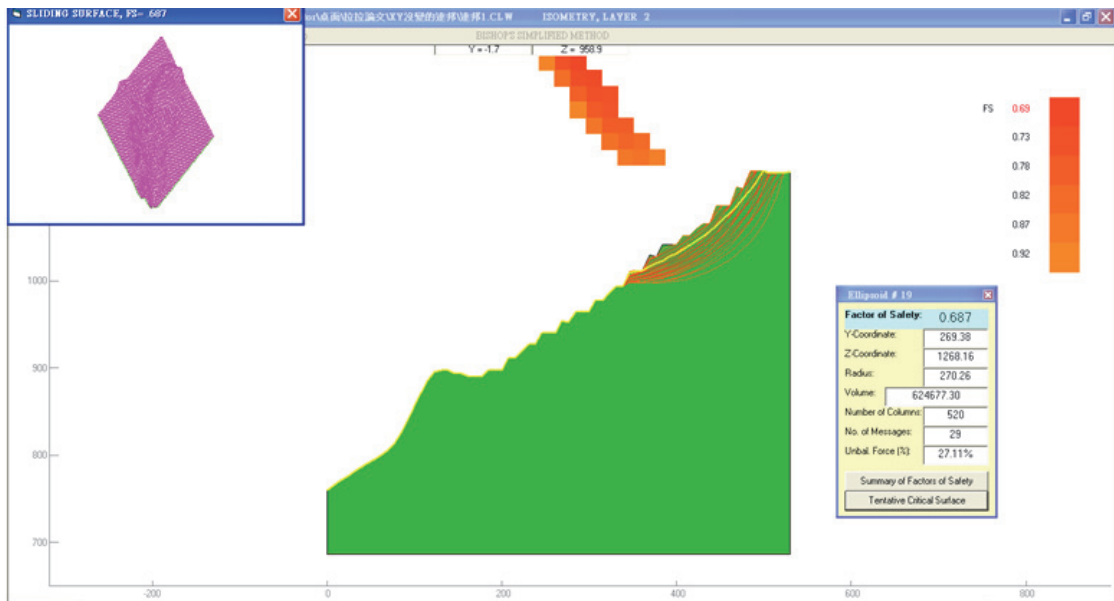


圖30 程式分析結果輸出圖形



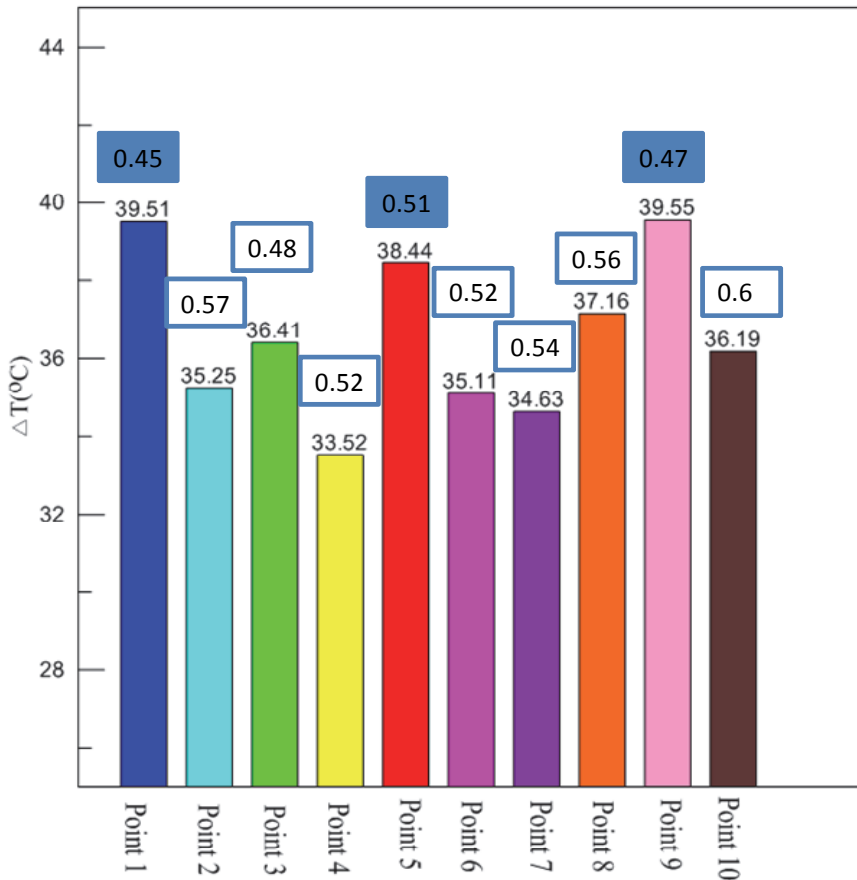


圖31 程式與熱影像圖做結合分析(藍色框框為安全係數)

## 六、結論與建議

本文利用紅外線熱影像測量物體表面的溫度變化、輻射溫度的高低，作為坡地防災初步監測的依據。在邊坡表土含水量增加，或產生裂縫處，溫度會降低，是熱輻射變化較大之處，可能是潛在破壞區。利用熱影像儀於坡地災害的監測與應用，可以做遠距離、大範圍面積與非破壞性的檢測，並且能夠迅速調查大部分潛在的不穩定區有效分辨出溫差較大的區域。邊坡上有植生坡地或有局部陰影處時，熱影像的分析上溫度差異會比較小。不能於降雨時進行熱影像分析，因為會受到雨水影響造成溫度上的差異，最好於晴天施測，且於中午至下午時刻受到陽光的曝曬會有較大的溫度變化。應用熱影像儀於邊坡做熱影像的分析可以找出哪個區域的溫度變化差異較大，進一步可判斷邊坡崩塌的潛在危險區域。

未來建議應用三維雷射掃描於邊坡上作地形量測並與熱影像儀一併做分析，可以更精確的找出邊坡不穩定的區域。並建議取得更多崩塌地的岩石熱特性資料，並與熱影像儀做分析比對，可以更了解哪一種岩石可能較容易受溫度影響而造成邊坡崩塌的危險。

## 參考文獻

1. 內政部營建署，「住宿類建築物節約能源設計技術規範」，2011。
2. 行政院農委會水土保持局，「水土保持手冊」，行政院農委會水土保持局及中華水土保持學會編印，2005。
3. 科穎科技有限公司，「紅外線熱像測溫分析系統」，2011。
4. 方世杰，「阿里山公路邊坡崩壞特性調查與崩壞潛能評估模式建構之研究」，國立成功大學土木工程研究所，2009
5. 李洲亘，「紅外線熱影像法參數設定與表層混凝土火害受損區域檢測」，朝陽科技大學營建工程學系，2006。
6. 李錦發、蘇泰維、宋朝斌、紀宗吉、張閔翔、林錫宏、邱禎龍、李彥良、彭志雄，「0609豪雨—山崩、土石流災害現場直擊」，地質新聞，2006。
7. 李璟芳、張守陽、林智平，「紅外線熱影像應用於土石流監測之可行性研究」，中華水土保持學報，2004。
8. 吳玉洺，「使用紅外線熱影像之乳癌分類評估」，中原大學醫學工程研究所，2008。
9. 吳秉晃，「集集地震後阿里山地區公路邊坡之崩壞行為與熱影像特性研究」，國立成功大學土木工程研究所，2002
10. 林琮文，「堰塞湖誘發原因對壩體類型影響之研究」，國立中興大學水土保持學系，2010。
11. 岳寧芳，「瞬態徑向熱流法測定松散煤體變導熱係數」，中國科技論文在線，2006。
12. 范佐憲，「廢棄掩埋場現地試驗與三維穩定分析」，國立交通大學土木工程研究所，2007
13. 施翔蓉，「甲狀腺疾病的偵測記錄、療效預測與預後評估：遠紅外線熱影像與細胞影像分析」，國立台灣大學醫學工程學研究所，2012。
14. 施國欽，「岩石力學」，文笙書局，1999。
15. 莊鴻志，「紅外線熱影像儀於製程電氣設備預知維護研究-以某印刷電路板廠為例」，國立交通大學工學院碩士在職專班產業安全與防災組，2010。
16. 陳婉婷，「堰塞湖潰決機制與減災工法研究」，國立中興水土保持學系，2012。
17. 陳聖文，「岩石熱力學與力學性質之研究-以三種岩石為例」，中國鑛冶工程學會，2008。
18. 陳建元、李勇鋒，「岩石邊坡災害調查與整治規劃-以縣道169 線-達邦三號橋崩塌地為例」，臺灣公路工程，2010。
19. 張晉銘，「紅外線熱影像技術檢測混凝土結構物水膠比與水灰比」，屏東科技大學土木工程學系，2011。

20. 張峻銘,「崩塌形成堰塞湖的地形特徵分析」,國立嘉義大學土木與水資源工程學系,2013。
21. 陸懋宏,「紅外熱成像系統」,國立交通大學光學工程學系,1985。
22. 葉俊廷,張儷瓊,王玉瑞,王錫福,「岩石熱傳導性質之研究」,中國地質學會九十四年學術研討會,2004。
23. 劉佑榮,唐明輝,「岩體力學」,化學工業出版社,1999。
24. 劉柏宏,「山坡地分析」,科技圖書,1993
25. 劉聰桂,楊燦堯,吳文雄,「台灣的岩石」,台灣地理百科,2005。
26. 鄭子揚,「建築物之紅外線熱影像法檢測」,朝陽科技大學營建工程學系,2005。
27. 藍棟彥,「利用紅外線熱影像探討建築缺陷的溫度變化 -使用層集多重分類法」,朝陽科技大學營建工程學系,2009。
28. 蘇苗彬,「坡地防災預警技術－坡地災害的分類」,國立中興大學土木工程學系,2009。
29. 山中稔等人,「2000 年1月長崎縣時津町がけ崩れ災害における熱赤外線リモートセンシングの適用」,社團法人地盤工學會關西支部, pp. 31-34, 2000。
30. 長谷川秀人等人,「熱赤外線映像法による吹付法面老朽化診斷技術」,基礎工, pp54-58, 1996。
31. 交通部公路總局第五區養護工程處(2007),0609 豪雨169線 27K+500 災害修復工程可行性研究規劃報告書。
32. Vargas J.E., Velloso R., Chávez L., Gusmão L., Amaral C., “On the effect of thermally induced stresses in failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil.” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 61, pp. 196-211, 2013.
33. Baroň I.,Bečkovský D.,MíčaI L.,“Application of infrared thermography for mapping open fractures in deep-seated rockslides and unstable cliffs”,*Landslides* 36, pp.265-275, 2012
34. Clark M.R.,McCann DM,Forde M.C.,“Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges”,*NDT International* 36, pp.265-275 , 2003.
35. Finlayson B.,Statham I.,“Hillslope analysis. London: Heineman”, 1980
36. Gunzburger Y.,Merrien-Soukatchoff V.,Guglielmi Y.,“Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France)”,*Rock Mechanics & Mining Sciences* 42, pp.331-349, 2004
37. Hoek & Bray,“Rock Slope Engineering”, 1977
38. Hungr O., “Clara-W Manual”, 2001, O.Hungr Geotechnical Research Inc.  
<http://www.clara-w.com/>.

39. Julian M.,Anthony E.,“Aspects of landslide activity in the Mercantour Massif and the French Riviera, southeastern France”,*Geomorphology* 15, pp.275-89, 1996
40. Moore J.R.,Gischig V.,Katterbach M.,Loew S.,“Air circulation in deep fractures and the temperature field of an alpine rock slope.” *Earth Surf Process Landforms* 36, pp.1985-1996, 2011
41. Richard D..Hudson J.R.,“ Infrared System Engineering”, John Wiley & Sons Inc, pp.159-166, 1969.

