

結合孔內探測與自動化監測技術之 坡地監測系統研擬

鍾明劍¹、譚志豪¹、許世孟¹、顧承宇²、冀樹勇¹

蘇泰維³、李錦發³、費立沅³

1 財團法人中興顧問社

2 國立海洋大學河海工程學系

3 經濟部中央地質調查所

摘要

台灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界區域，由於板塊間的相對運動頻繁，造成台灣的地質構造複雜且破碎。再因台灣地區雨量豐沛且颱風事件頻繁，導致坡地災害頻傳，造成生命與財產之損失，因此產生坡地調查與監測之需求。常見之坡地調查手段有地質鑽探調查、地表地質調查、雙環入滲試驗、地表地球物理調查、孔內探測調查、未飽和層土壤含水特性試驗、以及土壤與岩石力學試驗等，用以瞭解坡地之可能崩滑範圍、水文地質構造及滑動機制。其中，孔內探測調查包含岩體裂隙位態調查、裂隙岩體水力試驗、電井測調查、地下水流速調查等，其功用除掌握坡地內各地層之水文地質參數、架構水文地質概念模型外，亦可協助釐清可能之潛在滑動面範圍及含水層位置與型態，提供監測儀器佈置規劃之參考。雖然傳統之坡地監測多採人工量測或自記式監測方式，而隨著科技的進步，自動化監測系統已逐漸受矚目，其最大的優點在於節省人力與可藉由有線或無線傳輸獲得即時訊息。有鑑於此，本研究結合孔內探測與自動化監測技術，研擬一套適用於山岳地區邊坡的全自動監測系統，並實際建置於大漢河流域的義興崩塌地，此套監測系統歷經數場颱風事件仍持續正常運作中，顯示其成效良好，可供各界參考。

關鍵詞：坡地監測、自動化監測、孔內探測

Abstract

Taiwan is an active mountain belt created by the oblique collision between the northern Luzon arc and the Asian continental margin. The inherent complexities of geological structure create numerous discontinuities through rock masses and relatively steep hillside in this island. In recent years, the increase in the frequency and intensity of extreme rainfall due to typhoon events brings significant landslide hazards. Accordingly, the study uses field investigation and monitoring for landslides to improve the quality of life of local residents. Field investigate methods, including geological

drilling, field geological investigation, double-ring infiltration test, geophysical investigation, borehole explorations, and laboratory tests, are used to confirm the slide mechanism and establish conceptual model of landslide. Borehole explorations include a series of field tests of borehole televiwer, double-packer hydraulic test, electrical logging, and borehole micro-flowmeter. Further, borehole explorations can find the potential sliding surface, identify subsurface aquifer types of landslide and assist in planning the layout of monitoring system. The aim of the study is establishing a landslide monitoring system in mountain area by borehole explorations and automatic monitoring system. The best benefit of automatic monitoring system is able to receive the real-time monitoring data of landslide. This paper describes the application and result of case study from the Yi-Sing landslide in the Da-Han watershed. The result shows that the proposed automatic monitoring system has well-performance during several typhoon events.

Keywords : landslide monitor, automatic monitoring system, borehole exploration.

一、前言

台灣本島係由歐亞板塊和菲律賓海板塊相互擠壓成形，造就出陡峻的地形與脆弱多變的地質環境。近年來由於全球氣候異常，頻繁的颱風豪雨及地震活動使得受災範圍與程度均遠較過去為烈，以致山崩土石流等自然災害頻傳。此外，集集地震後，近幾年來數次的颱風事件，經常導致山區發生大規模的山崩與土石流，除造成道路中斷與房舍被掩埋等災害，亦造成集水區下游易淹水地區之水患問題，導致各地的受災範圍與程度均遠較過去為烈，嚴重地危害到民眾生命與財產的安全。因此，如何有效的分析地質災害發生之潛勢，以提供災損評估及做為防災減災之參考，實為今日防災工作上的一項重要課題。根據歷年山崩與土石流現地調查之工作成果顯示，山崩與土石流的發生受地質、地形與水文環境的影響而具有地域性及重複性，其中尤以水文地質因素係引發山崩與土石流發生之主控因素。近年來，集集大地震後接續之颱風豪雨事件所引致之山崩土石流，對全國各地區帶來嚴重的災害，顯示水文地質特性係影響崩塌之主因，有必要進行詳細之調查評估。為瞭解坡地之可能崩滑範圍、地質構造及滑動機制，常見的調查手段有地質鑽探調查、地表地質調查、雙環入滲試驗、地表地球物理調查、孔內探測調查、未飽和層土壤含水特性試驗、以及土壤與岩石力學試驗等，各項調查工作之目的與用途詳列如表1所示(經濟部中央地質調查所，2008；顧承宇等人，2008)。其中，孔內探測調查包含岩體裂隙位態調查、裂隙岩體水力試驗、電井測調查、地下水流速調查等，其功用除掌握坡地內各地層之水文地質參數、架構水文地質概念模型外，亦可協助釐清可能之潛在滑動面範圍及含水層位置與型態，提供監測儀器佈置規劃之參考。

表 1 坡地水文地質調查工作之目的與用途說明

調查項目	目的	用途
鑽探調查	調查坡地內地層與地質構造之空間分布及其力學特性。	1. 提供坡地水文地質及邊坡穩定分析所需之基本參數； 2. 瞭解坡地地層之破碎程度； 3. 提供坡地可能滑動面深度及可能滑動位置。
地表地質調查	調查坡地範圍內之地形表徵與地質露頭。	1. 調查坡地地形表徵，掌握坡面變動狀況； 2. 掌握坡地露頭分佈及位態，推估坡地內地質構造。
雙環入滲試驗	調查坡地表層土壤之入滲率。	1. 提供坡地水文地質及邊坡穩定分析所需之入滲參數。
地表地球物理調查	調查坡地內地層構造特性與地下水位面訊息。	1. 調查坡地內潛在滑動面位置與滑動區塊； 2. 調查坡地內岩盤分布及深度； 3. 調查阻水層位置、含水層深度與厚度。
岩體裂隙調查分析	調查岩層破碎程度、主要含水層可能之位置。	1. 評估裂隙岩體水力試驗之深度位置； 2. 掌握鑽孔岩心之精確位置，檢核鑽探品質； 3. 釐清可能潛在滑動面之範圍。
裂隙岩體水力試驗	調查鑽孔內地層之裂隙岩體透水係數。	1. 評估坡地水文地質特性； 2. 評估坡地內含水層位置與型態； 3. 提供坡地水文地質及邊坡穩定分析所需之透水係數。
電井測調查	調查地層孔隙及其強度、界定地層岩性及裂縫位置。	1. 評估坡地地層細部構造； 2. 提供建置崩塌地水文地質概念模型之參考。
地下水流速調查	調查鑽孔內地層之滲透或含水層位置。	1. 評估崩塌地內含水層位置； 2. 提供建置崩塌地水文地質概念模型之參考。
未飽和層土壤含水特性試驗	利用壓力鍋與現地張力設備調查未飽和層土壤含水特性。	1. 評估不飽和土壤滲透特性，求取體積含水量隨基質吸力之變化； 2. 提供坡地水文地質及未飽和層邊坡穩定分析所需之基本參數。
土壤與岩石力學試驗	利用現地鑽探與調查取得的岩心試體或土壤試樣進行各項相關之室內試驗。	1. 提供坡地水文地質及邊坡穩定分析所需之基本參數。

一般監測系統可按監測資料的記讀及傳輸方式區分為人工量測、半自動監測、全自動監測等運作方式，人工量測係指監測資料記讀及傳輸均由人力完成，半自動監測係指利用自記式感測器配合人工定時收取資料，而全自動監測係指利用自記式感測器搭配傳輸系統獲得即時監測資訊者。傳統坡地穩定監測多採人工量測或半自動監測方式，而隨著科技的進步，自動化監測系統已逐漸受矚目，其最大的優點在於節省人力與可藉由有線或無線傳輸獲得即時訊息。由於山岳地區邊坡多位於人跡罕至之處，常缺乏電力系統或有線傳輸設備，如何建立高效率、全自動的監測系統則已成近年來的重要課題（何樹根等人，2001；Lollino et al., 2002；Liu et al., 2004；Lemke, 2006；方仲欣與何應璋，2007；Lemke et al., 2008；廖瑞堂等人，2008）。

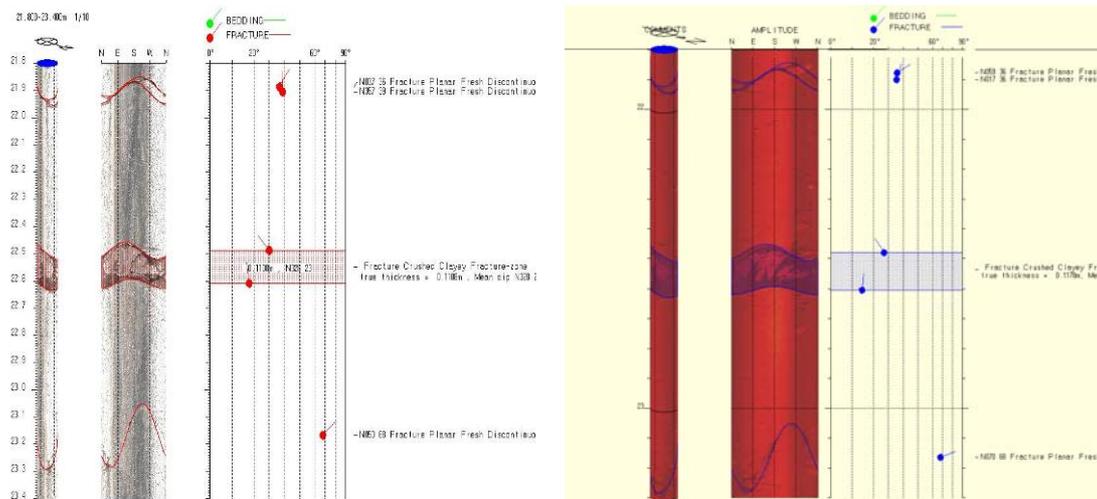
有鑑於此，本研究結合孔內探測與自動化監測技術，研擬一套適用於山岳地區邊坡的全自動監測系統，並實際建置於大漢河流域的義興崩塌地。文中先說明孔內探測及自動化監測技術，再以義興崩塌地為例說明全自動監測系統的建置方式與應用，並提出相關成果與建議供各界參考。

二、孔內探測及自動化監測技術

本節將針對孔內探測及自動化監測技術進行回顧與說明，其中孔內探測調查包含岩體裂隙位態調查、裂隙岩體水力試驗、電井測調查、地下水流速調查等，茲分述如后。

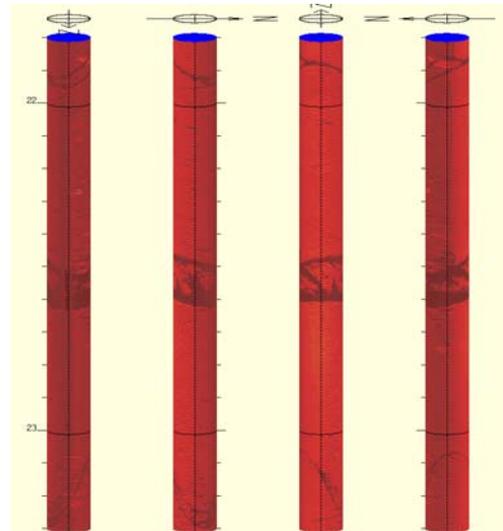
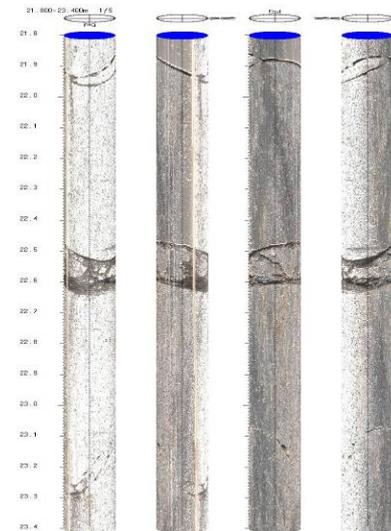
(一)孔內岩體裂隙位態調查

傳統上坡地可能的滑動位置及型態係透過地表地質調查與岩心鑽探資料判斷，惟根據岩心調查弱面之可能位置仍存在以下限制：(A)當岩心破碎或無法提取時，即無法了解地下地質狀況，然而該區段往往可能是調查的重點區域；(B)不易或無法判斷岩心顯示之弱面為原生或為施鑽過程中之機械破壞導致之破裂；(C)對於空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形，不易透過岩心檢視得知；(D)無法檢核岩心箱內鑽孔岩心有無錯置。為改善上述限制，本研究擬採用音射式孔內攝影儀 (High resolution acoustic televiewer, HiRAT) 搭配光學式孔內攝影儀 (Optical televiewer, OPTV) 進行調查。由於音射式孔內攝影儀需藉由水作為傳遞聲波之介質，故僅能在鑽孔有地下水的條件下施測，若遇地下水過低之情況，應以光學式孔內攝影的施測來補足音射式孔內攝影之限制。反之，倘若鑽孔內地下水過度混濁導致光學式孔內攝影裂隙影像辨識不易，則需以音射式孔內攝影影像作為裂隙判釋之依據。圖 1 為光學式與音射式孔內攝影影像所做之弱面位態分析結果及模擬岩心影像。此調查主要在獲取鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布情形，評估岩層破碎程度與潛在滑動面位置。調查結果除可補充研究區域地質資料外，同時也提供後續裂隙岩體水力特性相關調查規劃之依據。



(a) 光學式弱面位態分析結果

(b) 音射式弱面位態分析結果



(c) 光學式模擬岩心影像

(d) 音射式模擬岩心影像

圖 1 孔內攝影影像及分析結果

(二) 孔內裂隙岩體水力試驗

過去類似之調查方法以 Lugeon 試驗為主，該試驗係配合鑽孔進尺調查不同深度岩體之透水性，惟無法提供某特定深度岩體構造區段之透水性，在考慮岩土弱面夾層或特定破碎含水層等裂隙岩體內複雜多樣的地下水流動分析有相當限制。為克服 Lugeon 試驗的限制，本研究配合孔內岩體裂隙位態調查成果，評估並挑選出較具代表性的岩體區段施作水力雙封塞試驗（本研究使用的雙封塞系統詳見圖 2），以進行相關水文地質調查工作。裂隙岩體水力試驗主要目的係求得裂隙岩體的透水係數（Hydraulic conductivity, K ）以及貯水係數（Storativity, S ），試驗所得之水文地質參數資料，將作為架構水文地質概念模型之主要依據，由水文地質分層及含水層型態可進一步提供監測系統考量地下水井分層之依據。

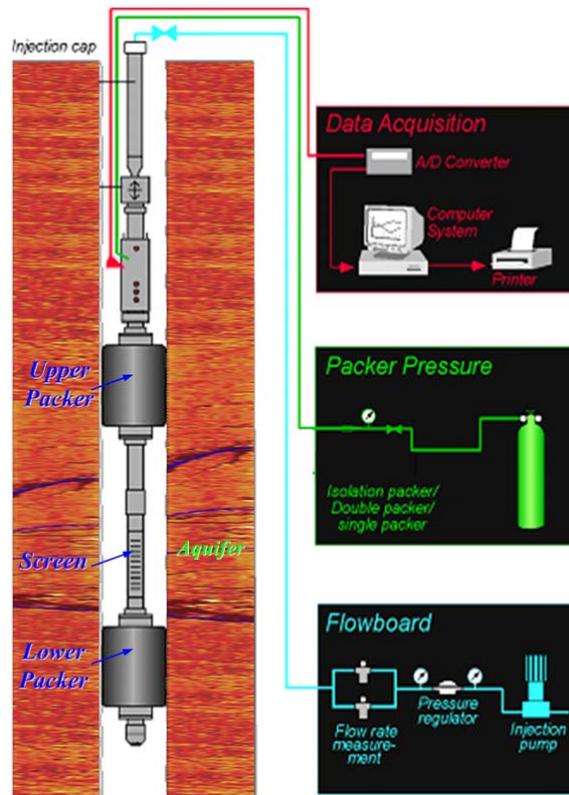


圖 2 單井雙封塞水力試驗設備示意圖

一般單井雙封塞水力試驗有四種試驗方法：(A)定流量（Constant-flow tests），適用於高滲透性含水層；(B)定水頭（constant-head tests），最適低滲透性含水層，其他類型含水層亦可；(C)微水試驗（slug tests），適用於中及低滲透性含水層；(D)壓力脈衝試驗（pressure pulse tests），適用於非常低滲透性的含水層（NRC, 1996）。綜觀四種單井水力試驗方法，本研究整理各種方法的優缺點比較，如表 2 所示。一般來說試驗方法之選擇可依據：(A)試驗區段的水力傳導能力（地質條件）；(B)水文地質參數代表的岩石體積；(C)可支配時間（計畫費用考量）；(D)儀器設備等因素進行綜合考量。

表 2 單井水力試驗方法簡介及優缺點比較（NRC, 1996）

方法種類	方法簡介	方法優缺點比較	
		優點	缺點
定流量試驗	將抽水馬達置入試驗區段，在定量流下將水從試驗區抽出。	所得透水係數可代表較大的試驗岩體。	(1)需知抽水量； (2)在低滲透性岩體，實驗易失敗。
定水頭試驗	在固定水頭下，從測試區間注水。	井徑大小的效應不太影響試驗結果。	所得透水係數代表較小的試驗岩體。
微水試驗	快速的抬升或降低套管的水位，然後觀測水位之恢復行為直到水位到達平衡。	試驗時間短。	(1)所得透水係數代表較小的試驗岩體； (2)如低滲透性岩體及大管徑都導致試驗時間攏長。
壓力脈衝試驗	快速注入一定量水，並施加一額外水壓，然後觀測水位恢復直到水位到達平衡位置。	縮短試驗時間，取代微水試驗。	所得透水係數代表較小的試驗岩體。

(三)孔內電井測調查

孔內電井測調查係以地球物理探勘的方式，將各式探測儀置於鑽孔或試驗井中，並在吊放或拉升的過程中測錄電阻、自然電位差、聲波速度、放射線強度等來判定地層之特性，其應用早期係以資源探勘為主，近年來，井測也陸續開始投入至地下水、工程地質及岩石力學等相關調查中。為獲得更為完整之水文地質資訊，本研究採用電測儀（Electrical log）進行孔內電井測調查，探測訊號包含正常態電阻率（64" and 16" normal resistivity）、單點電阻（Single point resistance）、自然伽瑪（ γ ）射線（Natural gamma radiation）、自然電位（Spontaneous potential）等，探測結果隨深度的柱狀圖如圖 3 所示。探測成果圖可用以分析地層之細部構造、判斷地層滲透或蓄水層位置、推估地層孔隙及其強度、界定地層岩性及裂縫位置等，可輔佐岩體裂隙位態調查與裂隙岩體水力試驗成果，進行交互比對判釋。

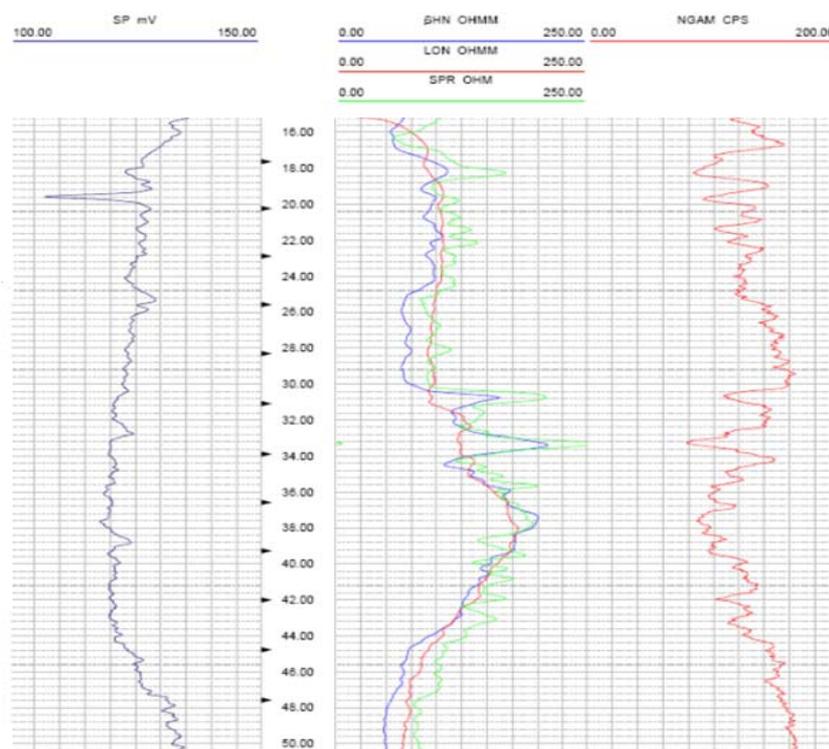
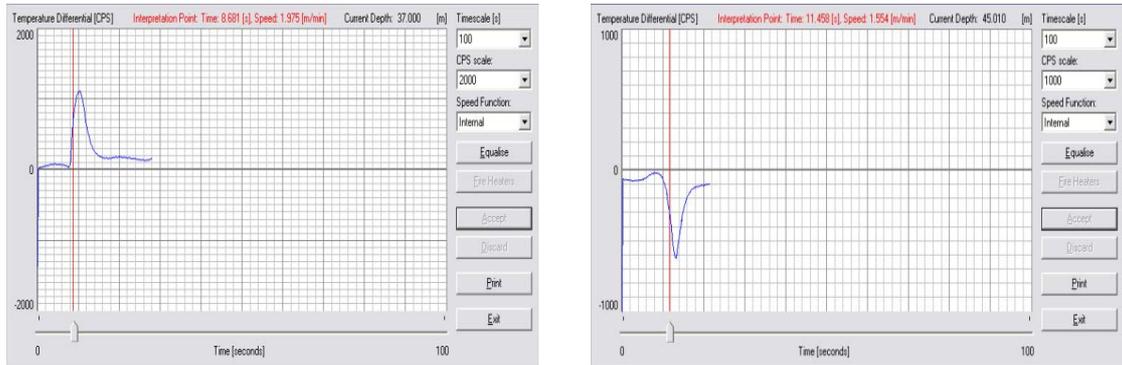


圖 3 孔內電井測探測柱狀圖

(四)孔內地下水流速調查

地層透水性為地下水資源不可獲缺之調查項目之一，而透過現地試驗的施作，將可求取區域的透水特性。本研究在透水性調查方法上，除封塞水力試驗外，亦嘗試以流速儀來量測鑽孔內地下水流速及垂直流向，用以判定地層之透水特性及地下水流速之分布情形。調查結果除能提供後續裂隙岩體水力特性相關調查規劃依據外，亦可回饋架構水文地質概念模型。

本研究所採用之流速探測儀包括熱脈衝式流速儀（Heatpulse flowmeter）及葉片式流速儀（Impeller flowmeter），兩者的區別主要在於量測流速規模的不同，熱脈衝式流速儀適用於低流速的探測，主要是以定點的方式量測鑽孔內地下水的流速及垂直流向，如圖 4 所示；葉片式流速儀則適用於高流速的探測，主要是以連續測錄的方式，量測探測儀在鑽孔吊放或拉升過程中葉片的轉速，並用以推估地下水流速分布情形，如圖 5 所示。



(a)熱脈衝曲線（水流向上）

(b)熱脈衝曲線（水流向下）

圖 4 孔內熱脈衝式流速儀調查結果

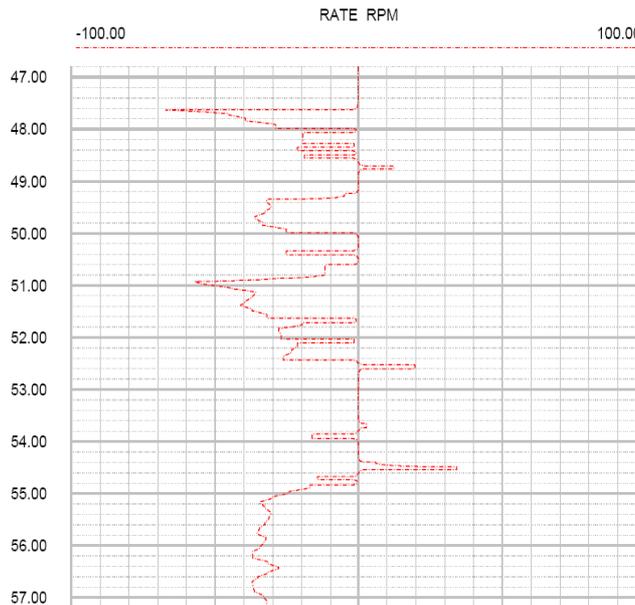


圖 5 孔內葉片式流速儀探測柱狀圖

(五)自動化監測技術

一般監測系統可按監測資料的記讀及傳輸方式區分為人工量測、半自動監測、全自動監測等運作方式，人工量測係指監測資料記讀及傳輸均由人力完成，半自動監測係指利用自記式感測器配合人工定時收取資料，而全自動監測係指利用自記式感測器搭配傳輸系統獲得即時監測資訊者，本研究彙整三種監測方式之差異與比較如表 3 所示。

表 3 監測系統分類與比較

監測類別	傳統量測技術 (監測儀器型式)	近端傳輸技術 ¹	遠端傳輸技術 ²
人工量測	非自記式	無	無
半自動監測	自記式	無	無
全自動監測	自記式或非自記式	(a)有線傳輸技術 (如埋管拉線) (b)無線傳輸技術 (如藍芽、Radio 或 Zigbee)	(a)有線傳輸技術 (如 ADSL) (b)無線傳輸技術 (如 VSAT、GPRS 或 GSM)

註：1.近端傳輸技術係指各感測器連結至資料擷取系統的方法；

2.遠端傳輸技術係指資料擷取系統連結至遠端控制中心（伺服器）的方法。

一般而言，全自動監測系統之基本架構主要包含感測單元（Sensor or Transducer）、資料擷取系統（Automatic data acquisition system）、通訊傳輸系統（ADSL、Radio、GSM、GPRS、VSAT 等）、及遠端控制中心等部分，圖 6 為全自動監測系統架構之示意圖。目前可應用於坡地之自動化監測項目，包含地表及地中變形、地聲、水文、雨量等項目，坡面上之結構物則可監測其受力與變位行為。由此可知，事實上全自動監測系統係多種專業產業與技術的整合，且應視各案例之現場環境、監測目的、經費配置與成果要求等因素進行綜合考量，方能妥善規劃合適且穩定的監測系統，以獲取所需之即時監測資訊。



圖 6 全自動監測系統示意圖

三、義興崩塌地概述及全自動監測系統建置

本節即分述義興崩塌地概況、水文地質調查與概念模型建置、監測佈置規劃、及全自動監測系統建置方式如后。

(一)義興崩塌地概況

義興崩塌地位於桃園縣復興鄉，為義興電廠之上方邊坡，自民國 75 年 3 月豪雨，造成邊坡滑移，導致輸水隧道末端施工縫及前池伸縮縫開裂，壓力鋼管受縱向擠壓而與支墩有明顯相對位移及兩側山坡龜裂數處並有湧水痕跡後，陸續雖進行邊坡穩定及排水改善工程，近年來每逢颱風及梅雨季豪雨影響，常造成義興、榮華、巴陵地區省道台 7 線附近邊坡嚴重坍方（詳見圖 7）。

根據經濟部水利署北區水資源局（2006）「石門水庫暨榮華壩監測資料收集及分析綜合報告」及本研究現地調查成果研判，義興崩塌地仍具有持續潛移之情況（詳見圖 8）。由於義興崩塌地下方為義興電廠，若此地滑區域產生大規模地層滑動，勢必將對電廠營運及當地居民安全造成極大的威脅，故本研究選定義興崩塌地進行全自動監測系統建置並進行持續性監測工作。



圖 7 台 7 省道道路邊坡因豪雨崩塌滑動情形



圖 8 義興地區與義興電廠因地層破碎邊坡仍持續變形

(二)水文地質調查與概念模型建置

綜合前期研究與調查成果可知，本區岩層多屬灰白色厚層細粒至中粒、膠結良好、抗侵蝕能力強之砂岩。坡趾部分岩盤由粉砂岩構成，地表則覆有一淺薄之堆積及河階礫石。新鮮之粉砂岩緻密堅實，強度頗高，但風化之粉砂岩則裂隙發達且銹染含泥，強度較差。邊坡中段岩盤由粉砂岩及砂岩組成，地表亦覆有淺薄之河階堆積礫石及堆積所夾塊石，構成岩盤之砂岩及粉砂岩緻密堅實，強度頗高，根據相關鑽孔資料及義興電廠排水廊道地質記錄顯示本段山坡地層局部受火成岩體入侵，圍岩受擠壓擾動，並有泥縫發育。接近地表部分岩層，因受解壓及風化影響，岩體破碎且易蓄積地下水。電廠前池附近岩盤則以粉砂岩偶夾薄層砂岩為主，粉砂岩緻密完整，而風化之粉砂岩則較為破碎，並偶有黃泥填充於裂隙中。此外，由歷來之鑽探監測資料顯示（水利署北區水資源局，2006），此區具持續蠕動現象且以壓力鋼管右側邊坡變形較為顯著。

本研究將壓力鋼管右側邊坡圈劃為義興崩塌地範圍，並於圈劃範圍內配置四口地質鑽孔（詳見圖 9），分別為 AH-01（60 公尺）、AH-03（50 公尺）、AH-05（40 公尺）及 AH-07（50 公尺）等鑽探孔，總進尺達 200 公尺。鑽探成果顯示 AH-01 與 AH-07 鑽孔於地表下 25.0~44.5 公尺間具局部銹染跡象，而 AH-03 與 AH-05 鑽孔岩心亦有類似跡象，故推測此崩塌地下方之裂隙應具良好連通性且有水體流動或蓄積之現象。此外，AH-01 鑽孔具兩層疑因地層滑動所造成之破碎帶（7.86~16.7 公尺和 23.0~44.5 公尺），且更於 AH-05 鑽孔岩心發現地表下 29.0~29.5 公尺處有剪裂泥存在，顯示義興崩塌地有數個可能滑動面存在。



圖 9 義興崩塌地地質鑽孔佈置圖（航照日期：2007）

本研究於義興崩塌地採用岩體裂隙位態調查及裂隙岩體水力試驗等兩種孔內探測調查，由岩體裂隙位態調查可知義興崩塌地於地表下 35 至 60 公尺間具有兩組不利於邊坡穩定之弱面（傾角分別約為 22~27 度及 45~57 度）存在，圖 10 為義興崩塌地之立體投影分析圖。

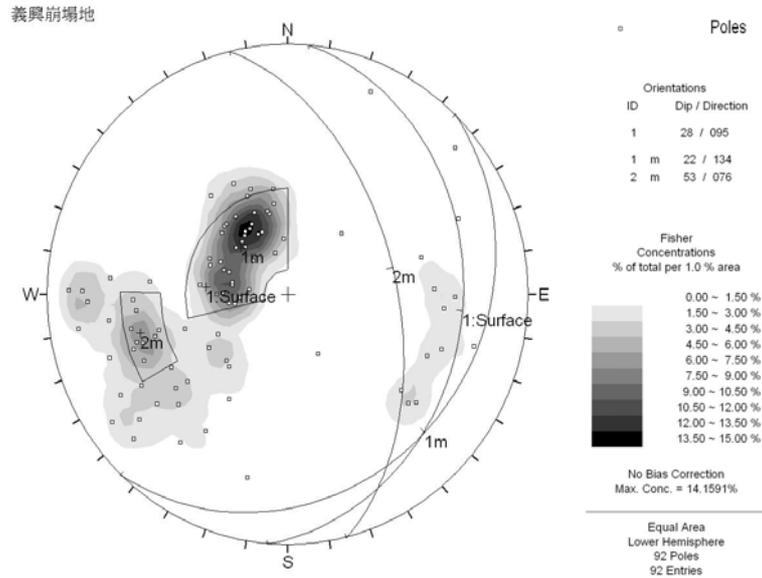


圖 10 義興崩塌地立體投影分析圖

裂隙岩體水力試驗成果則彙整如表 4 所示，其中 AH-01 鑽孔內岩體透水性大約介於 10^{-6} ~ 10^{-8} m/s 數量級之間，依據裂隙岩體構造不同岩體透水性會有所差異，如 48.0~50.5 公尺試驗區間從孔內攝影影像資料顯示有約 1.47 公尺的破碎帶，岩體透水性在此區段最佳，可達 10^{-6} m/s 數量級，從理論解可知三個試驗區段含水層的型態皆為侷限含水層。AH-03 鑽孔試驗成果與 AH-01 鑽孔類似，而從理論解可知 23.6~25.2 公尺試驗區段屬於裂隙含水層，分析可得裂隙 (Fissure) 及基岩 (Matrix) 的透水係數分別為 1.72×10^{-8} m/s 與 1.13×10^{-7} m/s，由於此段裂隙中含有導致滲透性降低的填充物，故其透水係數與預期在裂隙處會有較佳滲透性有所差異。此外，AH-03、AH-05 與 AH-07 孔於鑽探後量測所得之地下水分別為地表下 42 公尺、32 公尺與 44 公尺。

表 4 義興 AH-01 現地水力試驗成果

鑽孔編號	試驗區段 (m)	封塞方式	試驗長度 (m)	理論模式	含水層型態	透水係數 K (m/s)	貯水係數 S
AH-01	48.0-50.5	雙封塞	2.5	Baker	Confined	6.04×10^{-6}	2.33×10^{-5}
AH-01	55.9-57.5	雙封塞	1.6	Baker	Confined	1.25×10^{-7}	1.30×10^{-3}
AH-01	57.8-59.4	雙封塞	1.6	Jacob-Lohman	Confined	6.88×10^{-8}	2.33×10^{-5}
AH-03	23.6-25.2	雙封塞	1.6	Baker	Fractured	1.72×10^{-8} (Fissure)	2.86×10^{-2} (Fissure)
						1.13×10^{-7} (Matrix)	7.74×10^{-2} (Matrix)
AH-03	34.8-36.4	雙封塞	1.6	Baker	Confined	7.71×10^{-5}	2.33×10^{-5}
AH-03	48.1-50.0	單封塞	1.9	Baker	Confined	6.61×10^{-6}	2.33×10^{-5}

結合義興崩塌地各項調查與試驗成果顯示，義興崩塌地可能破壞機制為複合型破壞，而義興崩塌地的水文地質概念模型則如圖 11 所示。

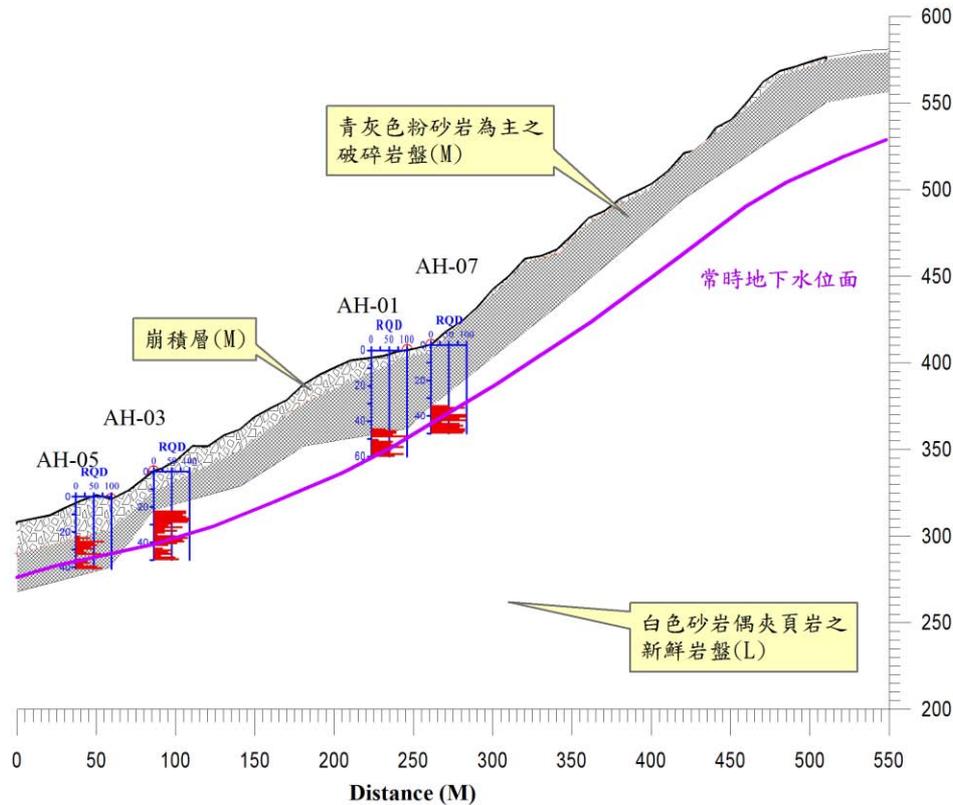


圖 11 義興崩塌地水文地質概念模型

(三) 監測佈置規劃

本研究針對義興崩塌地監測工作所採用的方式如圖 12 所示，主要係於崩塌地內之地質鑽孔中，設置水位觀測井與傾度觀測管，透過水壓計及測傾儀進行各崩塌地之地下水位變化及潛在面位移之觀測。同時，於崩塌地內之適當地點設置雨量站與打設固定規標點，進行降雨量與地表變形之觀測。綜上所述，本研究於義興崩塌地係同步進行降雨量、地下水位、地中變形、地表變形等監測工作，圖 13 則為本研究對義興崩塌地所規劃之監測儀器配置圖。惟受限於經費考量，地表變形僅於颱風事件前後進行人工量測，而地中變形則係每月定期派員前往進行量測，再於室內統一進行相關分析。因此，本研究所建構之全自動監測系統初步係以雨量計與水壓計兩項感測單元為主。

(四) 全自動監測系統建置方式

由現勘結果可知，義興崩塌地植被茂密且有通行道路貫穿其坡面，且近年來相鄰之義興壩則是持續進行清淤作業致使大型車輛往返頻繁，欲於此場址以埋管拉線方式匯集監測資料確實有其困難性。因此，本研究所研擬的全自動監測系統架構，其近端傳輸係採低耗電的 Zigbee 無線感測網路，將各感測器資訊傳至當地基地端，再配合 GPRS 進行遠端無線傳輸。本研究於民國 96 年 10

月 29 日完成全數現地建置工作，圖 14 為義興崩塌地全自動監測系統配置圖，包含 1 處監測基地站（編號：0）、3 處中繼站（編號：101~103）、1 處雨量站（編號：1）、及 3 處水壓計（編號：2~4）等設備。本研究監控中心的遠端伺服器已持續性地即時接收監測資訊，配合遠端伺服器內的資料庫與即時資料展示介面（見圖 15），可供使用者進行即時監控及資料備份與查詢動作。

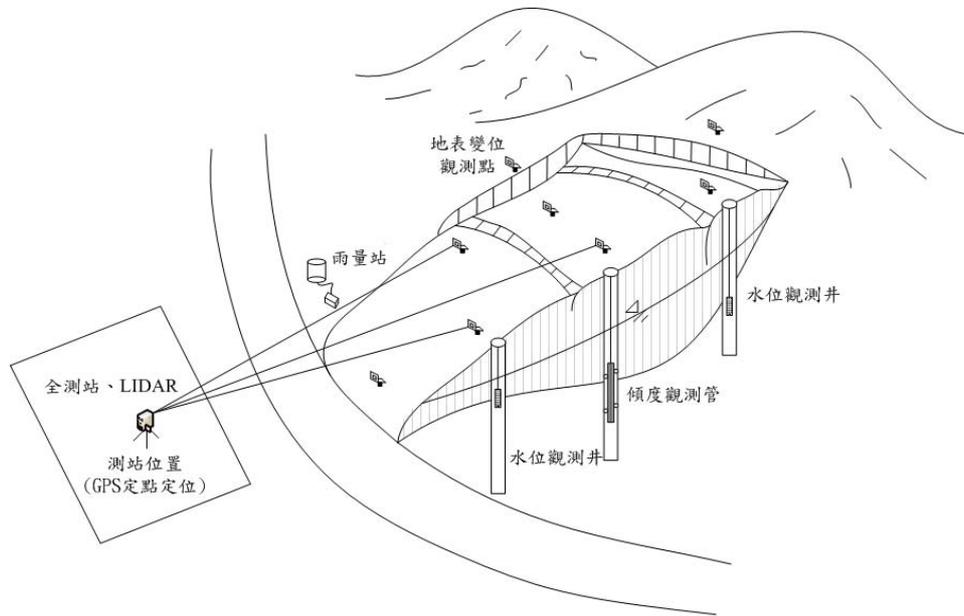


圖 12 義興崩塌地監測工作示意圖

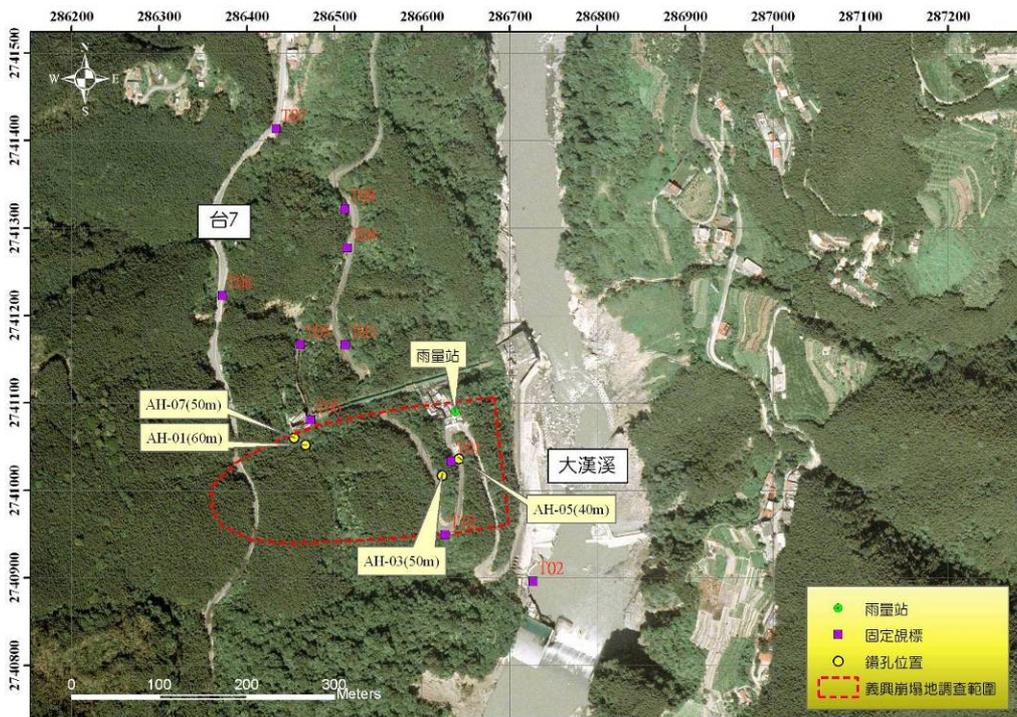


圖 13 義興崩塌地監測儀器配置圖（航照日期：2007）

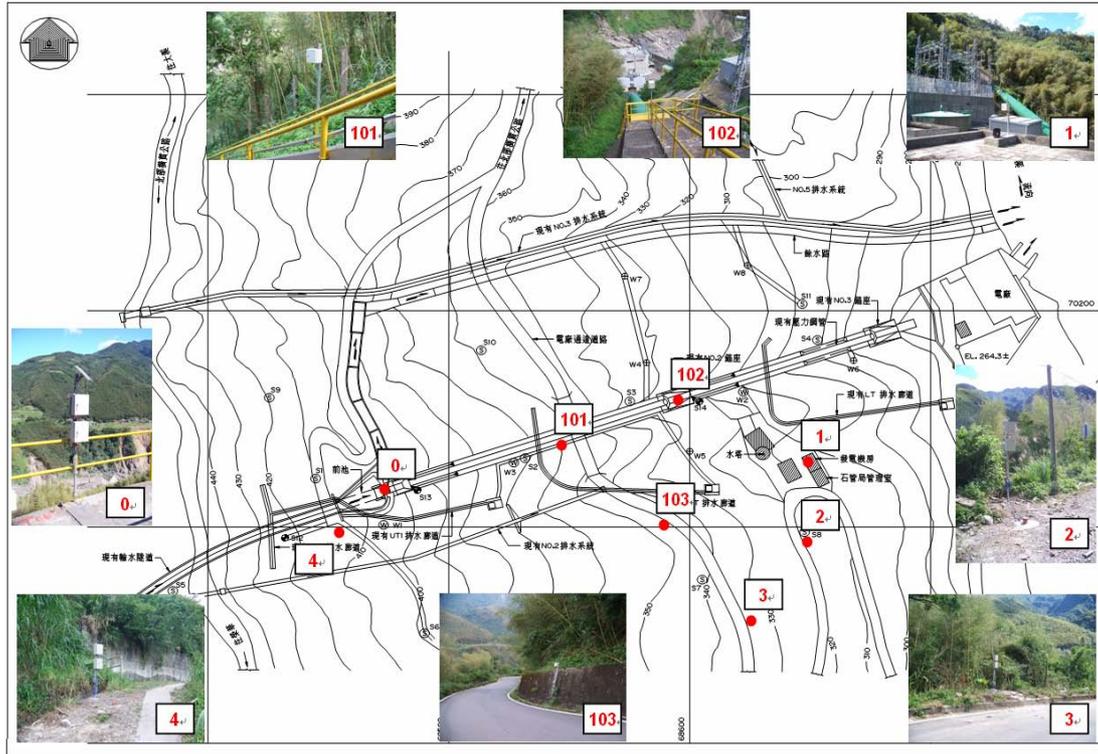


圖 14 義興崩塌地全自動監測系統配置圖



圖 15 遠端伺服器監測網頁畫面

四、義興崩塌地監測成果

本研究已於民國96年10月上旬至同月下旬期間陸續完成監測儀器之安裝，於有效監測期間內（截至97年7月30日之監測資料），已成功地記錄2007年柯羅莎（KROSA）颱風期間的雨量監測資料，以及2008年卡玫基（KALMAEGI）與鳳凰

(FUNG-WONG) 颱風期間的滑動監測資料，茲將其成果分述如后。

(一) 監測期間之颱風事件概述

(A) 柯羅莎颱風事件

根據中央氣象局公布資料，柯羅莎颱風屬於強烈颱風，並於民國 96 年 10 月 4 日至同月 7 日發佈警報。依據農委會截至民國 96 年 10 月 12 日 16 時止之統計資料顯示，柯羅莎颱風侵襲造成全台農業產物估計損失及民間設施毀損計 42 億 5,623 萬元。另由行政院災害防救委員會所做柯羅莎颱風災害應變處置報告（結報）之統計資料顯示，嘉義縣竹崎鄉的奮起湖於民國 96 年 10 月 5 日 00 時至 10 月 8 日 12 時止累積雨量達 1,118mm 居冠，而全台總計 9 人死亡，2 人失蹤，57 人受傷，2,329,174 戶電力中斷，高達 91 處道路中斷。

(B) 卡玫基颱風事件

根據中央氣象局公布資料，卡玫基颱風屬於中度颱風，於民國 97 年 7 月 16 日至同月 18 日發佈警報。依據農委會截至民國 97 年 7 月 24 日 16 時止之統計資料顯示，卡玫基颱風侵襲造成全台農業產物估計損失及民間設施毀損計 12 億 1,860 萬元。另由行政院災害防救委員會所做卡玫基颱風災害應變處置報告（第 11 報）之統計資料顯示，高雄縣六龜鄉於颱風警報起至 20 日 6 時止累積雨量達 1,043mm 居冠，而全台總計 20 人死亡，6 人失蹤，8 人受傷，127,165 戶電力中斷，高達 96 處道路中斷。

(C) 鳳凰颱風事件

根據中央氣象局公布資料，鳳凰颱風屬於中度颱風，於民國 97 年 7 月 26 日至同月 29 日發佈警報。依據農委會截至民國 97 年 7 月 31 日 16 時止之統計資料顯示，鳳凰颱風侵襲造成全台農業產物估計損失及民間設施毀損計 11 億 2,632 萬元。另由行政院災害防救委員會所做鳳凰颱風災害應變處置報告（第 7 報）之統計資料顯示，全台總計 2 人死亡，6 人失蹤，388,857 戶電力中斷，高達 66 處道路中斷。

(二) 監測成果與探討

(A) 降雨量

義興崩塌地監測所得降雨量資料如圖 16 所示，於有效監測期間內(民國 96 年 10 月 5 日至 97 年 7 月 29 日)之累積雨量約為 2,772mm，並監測得柯羅莎、卡玫基與鳳凰等三場颱風之降雨紀錄。柯羅莎颱風時雨量紀錄如圖 17(a)所示，此場颱風事件之累積雨量約 711mm，最大日雨量發生於民國 96 年 10 月 6 日，所量得之日雨量達 515mm，屬於超大豪雨事件；卡玫基颱風時雨量紀錄如圖 17(b)所示，此場颱

風事件之累積雨量約 73mm，最大日雨量發生於民國 97 年 7 月 18 日，所量得之日雨量達 48mm；鳳凰颱風時雨量紀錄如圖 17(c)所示，此場颱風事件之累積雨量約 310mm，最大日雨量發生於民國 97 年 7 月 28 日，所量得之日雨量達 186mm，屬於豪雨事件。

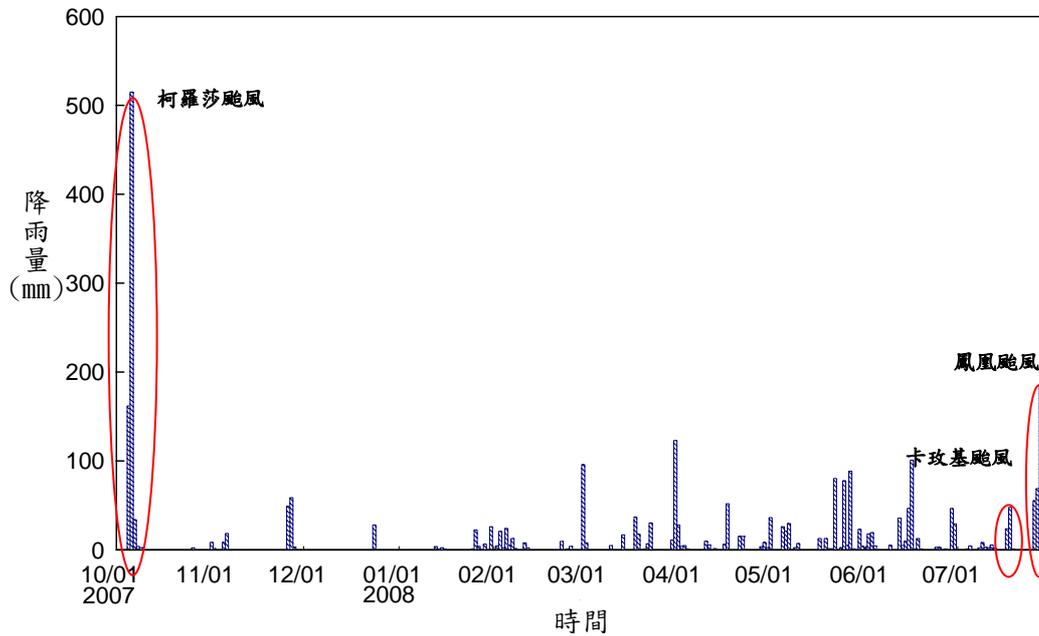


圖 16 義興崩塌地日雨量紀錄 (監測期間：96/10/5 至 97/7/29)

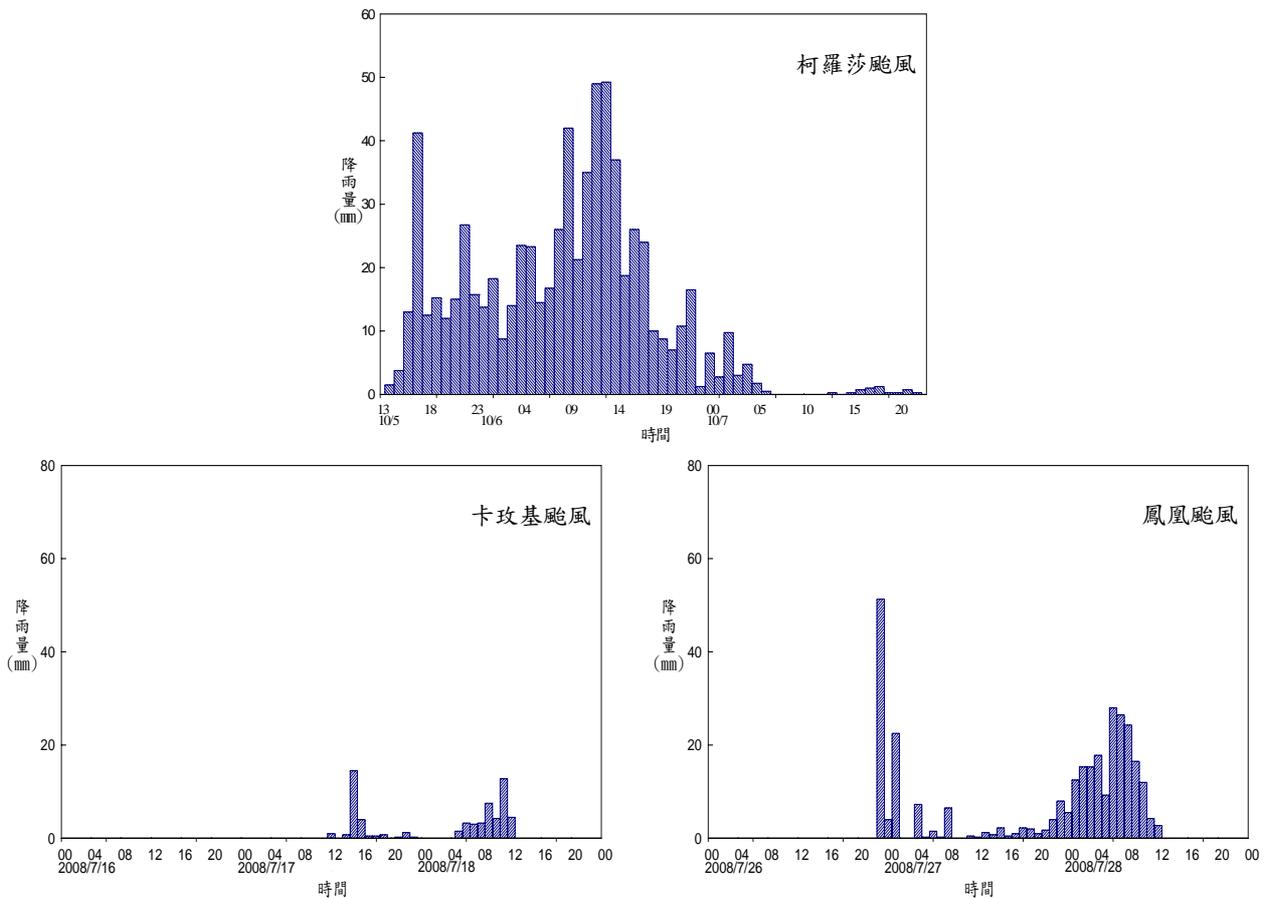


圖 17 柯羅莎、卡孜基與鳳凰颱風於義興崩塌地之時雨量紀錄

(B)地下水位

自民國 96 年 10 月 5 日起監測至今，AH-03 與 AH-07 觀測井的水位變化分別如圖 18 與圖 19 所示，圖中地下水位線呈虛線部分為儀器受清淤車輛撞擊與受人為擅動等因素導致毀損無即時資料。圖 18 顯示位於坡中 AH-03 孔地下水位會隨較大降雨事件方有所抬升，如當 97/3/31 日雨量達 123mm 時使其地下水位有 1~2m 之抬升。圖 19 顯示位於坡頂 AH-07 孔地下水位監測初期變動甚為劇烈，初步研判係因 AH-07 靠近義興電廠的輸水隧道及前池，可能受輸水隧道與前池之蓄放水有關。此外，本研究將 AH-07 於鳳凰颱風期間的地下水位與降雨量以小時為單位繪製成圖 20。由圖 20 可知當鳳凰颱風於降雨開始 26 小時後，累積雨量達 137mm 時，AH-07 地下水位方開始顯著抬升。由以上數據初步研判義興崩塌地之累積降雨量達 120mm 以上時，其地下水位即可能會有所抬升，此抬升量初步判定多由該區域地下水側方補注而來，故時間上有 20 餘小時的遞延。

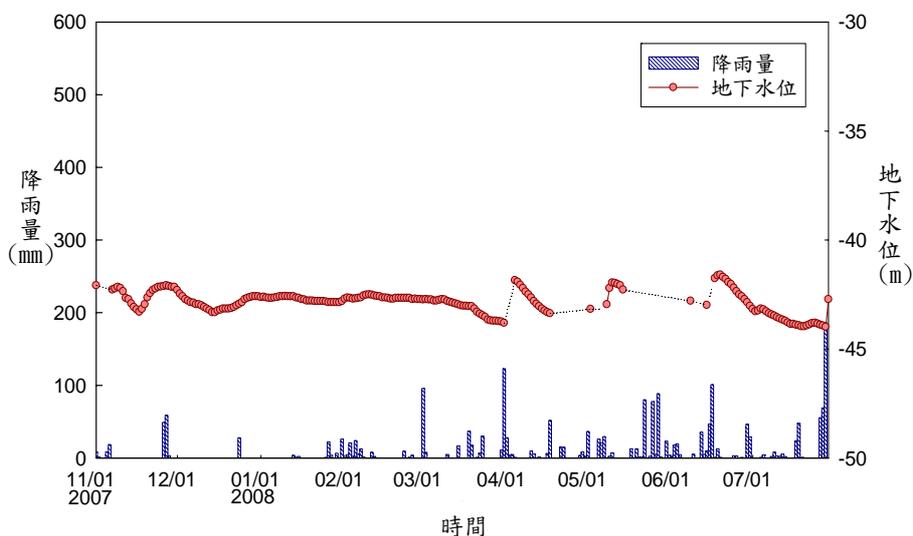


圖 18 AH-03 孔地下水位與降雨量之關係 (監測期間：96/11/1 至 97/7/29)

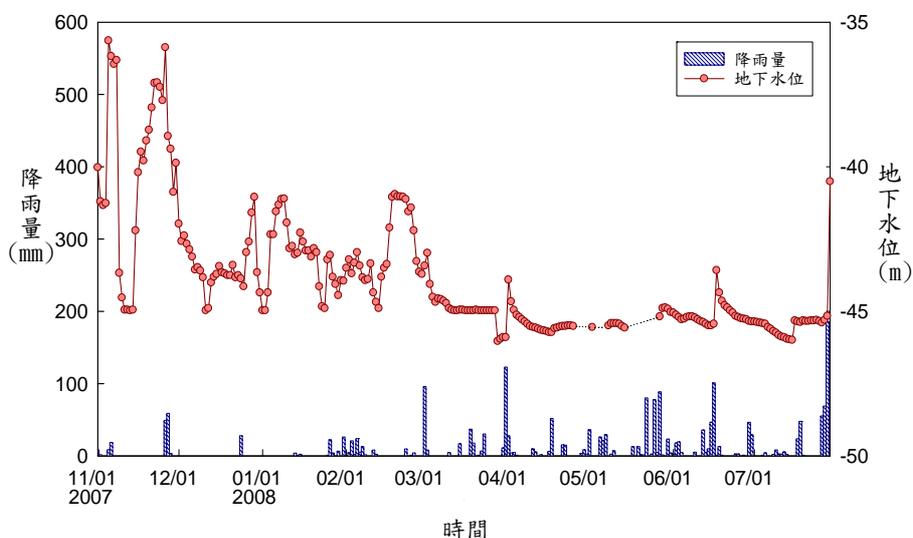


圖 19 AH-07 孔地下水位與降雨量之關係 (監測期間：96/11/1 至 97/7/29)

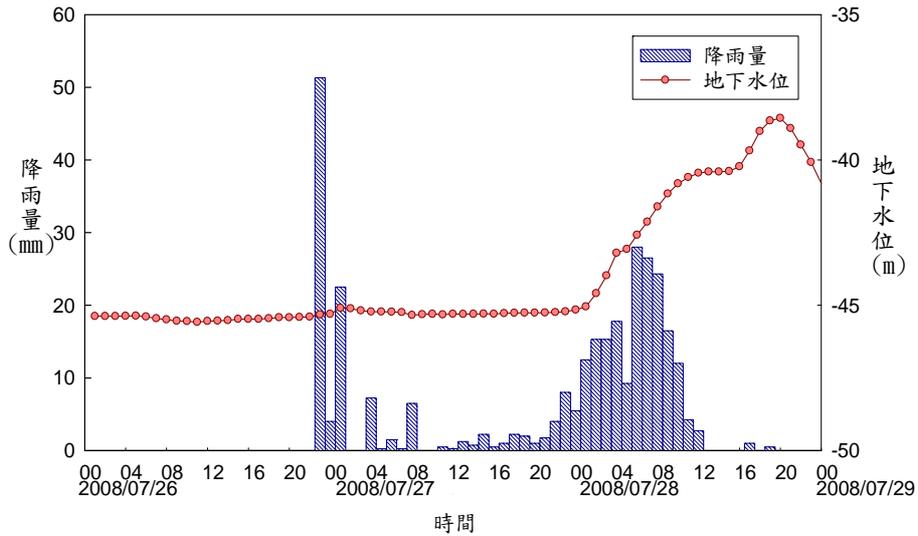


圖 20 AH-07 孔地下水位與降雨量之關係 (鳳凰颱風事件)

(C)地中位移

義興崩塌地監測所得地中位移資料如圖 21 所示，共計量測 14 次，此資料雖非即時監測成果，但為求完整性仍一併放入文中說明。由圖 21 可知義興崩塌地尚無發現明顯滑動面的存在，初步研判義興崩塌地尚屬於穩定狀態。地表下 20~24 公尺處的異常變形行為，經研判應屬局部地質破碎所引致之擠壓變形，惟仍應對其後續變形行為進行持續性觀察。

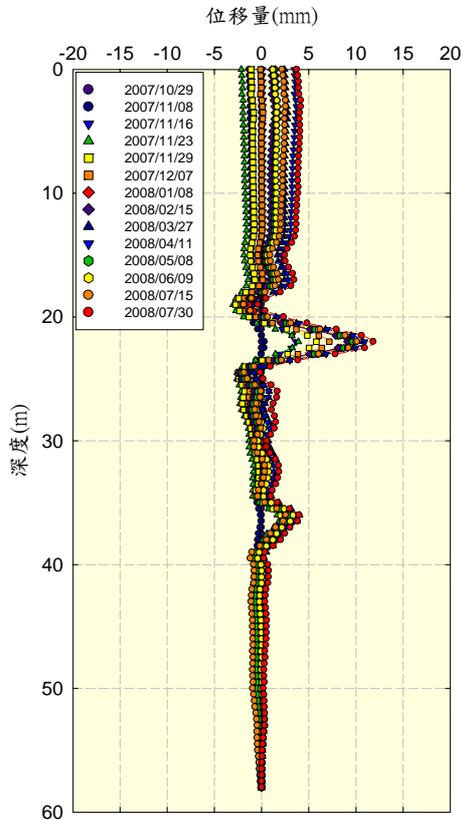


圖 21 AH-03 孔地中變形紀錄 (監測期間：96/10/29 至 97/7/30)

五、結論與建議

綜合本研究所得之各項研究結果，茲摘要提出下列幾點結論與建議：

1. 綜合義興崩塌地各項調查、試驗、與監測成果顯示，義興崩塌地可能破壞機制為複合型破壞，而義興崩塌地調查範圍疑似存在圓弧狀之古崩塌，古崩塌事件形成現今山坡岩層間有破碎帶及崩積物存在，是發生潛變最主要因素。
2. 義興崩塌地監測期間已成功地記錄 2007 年柯羅莎颱風期間的雨量監測資料，以及 2008 年卡玫基颱風與鳳凰颱風期間的監測資料。監測成果顯示義興崩塌地於後兩場颱風期間尚屬相對穩定狀態，而本研究所建構之全自動監測系統歷經三場颱風事件仍持續正常運作中，顯示其成效良好。
3. 由地下水位與降雨量資料比對可知，義興崩塌地之地下水位均受降雨量而有所影響，初步研判義興崩塌地之累積降雨量達 120mm 以上時，其地下水位即可能會有所抬升。惟監測時間僅 10 個月，仍待更長期之資料以供比對與驗證。
4. 因目前地中變形自動化量測之經費費用昂貴致使未能普及推廣，本研究於地中變形部分亦僅採人工按月定期量測及重大颱風事件加測方式取得資料，建議未來具高崩塌潛勢或重要保全對象之崩塌地可納入地中變形之自動化量測，以取得潛在滑動面的即時位移資訊。
5. 監測目的若為研判地滑機制或原因而不需即時監測資料時，建議可採人工量測或半自動監測方式，但若為未來需進行預警或發佈警報時，則應建置全自動監測系統回傳即時資料以供研判及分析。

參考文獻

1. Lemke, J.L. (2006), "In-place inclinometer using low-G accelerometer network," Proceedings of Geocongress 2006, pp. 1-6.
2. Lemke, J.L., Hagy, M., and Brittsan, D. (2008), "Continuous real-time monitoring of an active landslide using a high-density accelerometer network," Proceedings of Geocongress 2008, pp. 500-508.
3. Liu, D.A., Yang, Z.F., Tang, C.H., Wang, J., and Liu, Y. (2004), "An automatic monitoring system for the shiplock slope of Wuqiangxi Hydropower Station," Engineering Geology, Vol. 76, Issues 1-2, pp. 79-91.
4. Lollino, G., Arattano, M., and Cuccureddu, M. (2002), "The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning: the case of Cabella Ligure (North-Western Italy)," Physics and Chemistry of the earth, Vol. 27, No. 36, pp. 1545-1550.
5. National Research Council. (1996), Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications, National Academy Press, Washington DC, USA.

6. 方仲欣、何應璋 (2007),「儀器就定位：邊坡監測自動化」,營建知訊,第 293 期,第 10-21 頁。
7. 何樹根、陳斗生、詹連昌 (2001),「梨山地滑區之全自動化監測系統」,地工技術,第 86 期,第 39-52 頁。
8. 經濟部中央地質調查所 (2008),易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置第一階段實施計畫-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估。
9. 經濟部水利署北區水資源局 (2006),石門水庫暨榮華壩監測資料收集及分析綜合報告。
10. 廖瑞堂、徐振煌、陳昭維 (2008),「自動化監測系統於山坡地防災之應用」,土木水利,第 35 卷,第 2 期,第 45-53 頁。
11. 顧承宇、許世孟、鍾明劍、蘇泰維、李錦發 (2008),「崩塌地水文地質特性調查與應用」,97 年中華民國地質學會年會暨學術研討會,台南,台灣。