

## 應用孔內水文地質調查成果於山崩潛勢評估

林榮潤<sup>[1]\*</sup> 周柏儀<sup>[1]</sup> 許世孟<sup>[1]</sup> 林燕初<sup>[2]</sup>  
張閔翔<sup>[2]</sup> 黃智昭<sup>[2]</sup> 費立沅<sup>[3]</sup>

**摘要** 本研究主要係嘗試透過孔內水文地質調查成果，評估大甲溪與濁水河流域地表下岩層的地質材料特性、水力特性、地下水與集水區山崩潛勢之關連性。過去研究較少針對崩塌地進行現地水文地質調查與試驗，本研究根據 49 處試驗場址成果顯示，水文地質特性與山崩的潛勢、滑動深度，以及地下水位有一定程度之關連性。本研究建議進行調查區域的水文地質特性，以及各促崩因子所造成山崩的易損性，係各類型山崩災害分析與潛勢評估之重要的研究課題，亦可提供相關臺灣災害防治之參考。

**關鍵詞：**孔內水文地質調查、水文地質特性、山崩。

## The Application of Borehole Hydrogeological Investigation for Assessing Landslide Susceptibility

Jung-Jun Lin<sup>[1]\*</sup> Po-Yi Chou<sup>[1]</sup> Shih-Meng Hsu<sup>[1]</sup> Yen-Tsu Lin<sup>[2]</sup>  
Min-Hsiang Chang<sup>[2]</sup> Chi-Chao Huang<sup>[2]</sup> Li-Yuan Fei<sup>[3]</sup>

**ABSTRACT** On the basis of 49 borehole studies at the mid- and upper-stream of the Dajia and Jhuoshuei river basins, landslide occurrence was found to not only be related to subsurface geological composition and hydrogeological characteristics, but also to groundwater level dynamics, which have seldom been addressed in previous works. It is suggested that the interplay between hydrogeologic and landslide factors be given further consideration in future investigations. This would be a crucial step towards effective disaster prevention for mountainous regions in Taiwan.

**Key Words :** Borehole hydrogeologic investigation, hydrogeologic characteristics, landslide.

### 一、前言

近年來，地質災害相關議題已逐漸受到國人重視，尤其山崩 (landslide) 災害影響國人深遠，可能由於氣候變遷、地質不穩定或板塊運動所誘發的地震等因素使然，為了保護人民的生命財產安全，山崩災害的調查、模擬與評估是近幾年重要的研究課題。根據

水土保持技術規範第六十六條，崩塌係指邊坡土石之崩落或滑動現象，主要分為陷落、山崩及地滑；Varnes (1978) 與費立沅 (2009) 依據山崩之移動方式與移動物質類別，分類出不同種類的災害特性，包括落石 (rock fall)、岩屑崩滑 (debris slide)，以及岩體滑動 (rock slide) 等。Varnes (1984) 提出山崩風險機率是山崩災害機率與易損性 (vulnerability) 的乘積，其山崩災害的易

[1] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

Geo-technical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan.

[2] 經濟部中央地質調查所資源地質組

Geological Resources Division, Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Taipei, Taiwan.

[3] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組

Environmental & Engineering Geology Division, Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Taipei, Taiwan.

\* Corresponding Author. E-mail: ijlin@sinotech.org.tw

損度模式深受各類型山崩的規模、滑動速度與堆積模式控制。而相關影響山崩的因子中，林彥亨 (2003) 曾考慮五十多種的山崩潛感因子進行分析；溫振宇 (2005) 統計相關的研究報告，各因子被考量與使用的次數；而李錫堤 (2009) 分析與彙整，提出重要 16 項因子為：岩性、坡度、坡向、事件前的植被指數 (NDVI)、地形粗糙度、坡度粗糙度、地形曲率、坡高、全坡高、道路距、斷層距、河彎距、源頭距、愛氏震度、雨量強度及總雨量等；然而，造成山崩災害除了上述的影響因子之外，地下水亦是重要影響的因素，可能會增加岩層風化速度與孔隙水壓，而影響邊坡的穩定性。過去研究較少針對崩塌地進行現地水文地質調查與試驗，以分析崩塌地的水文地質架構、岩層水力特性，以及地下水的關連性，故瞭解區域的水文地質特性，以及各促崩因子所造成山崩的易損性，係各類型山崩災害分析與潛勢評估之重要的研究課題，亦可提供相關災害與防治之參考。

## 二、研究目的與區域概述

本研究主要係嘗試透過孔內水文地質調查成果，評估地表下岩層的地質材料特性、水力特性與集水區山崩潛勢之關連性。研究區域為臺灣中段山區的大甲溪與濁水河流域，於不同的地層與高程等，布設共 49 處水文地質調查試驗場址，各場址探討深度為 100 公尺，如圖 1 所示。

### 1. 地理位置與水文特性

大甲溪流域位處臺灣中西部，發源於雪山及南湖大山之間，幹流全長 124.2 公里，分水嶺高峰多在 3,000 公尺以上，東西長、南北窄，狀似橫臥如意，其北、東、南三側分水嶺多由標高超過 2,000 公尺之陡峭山脊所連成，故為典型急流性河川，亦為臺灣中部之重要河川。

濁水河流域是臺灣最長之河川，發源於合歡山主峰與東峰之間鞍部海拔 3,220 公尺處，最高峰玉山幾達 4,000 公尺。雨量方面，大甲溪年平均雨量約為 2,500 至 3,000 毫米以上，降雨集中於 5 至 9 月，約佔全年總降雨量之 75%，而濁水河流域年平均降雨量 2,200 毫米，各地區的降雨量差異很大各月份降雨量差異極大，5 至 10 月為豐雨季，以 11 月至翌年 4 月為枯雨季，降雨佔全年之 70%至 85%。

## 2. 地質條件

兩流域山區涵蓋中央山脈地質區與西部麓山帶地質區，如圖 1 所示。中央山脈地質區為第三紀亞變質岩區及變質岩區，可再分為雪山山脈分區與脊梁山脈分區，皆為始新世至漸新世的地層，前者岩性為硬頁岩、板岩與變質石英砂岩或間夾互層等，岩質較為堅硬且裂隙網絡發達；而後者岩性為變質程度較高的板岩、千枚岩與變質石英砂岩等，劈理發達且岩體較為破碎。西部麓山帶主要為沉積岩區，主要為中新世至更新世的地層，岩性有礫岩、泥岩、頁岩、砂岩或其互層等，沉積層理明顯。各分區亦分布許多斷層與褶皺等地質構造。

另外，地調所 (2008) 欲探討各地質分區與山崩之關連性，將中央山脈地質區分類為第 I 區，而西部麓山帶則依據岩性特徵分類成第 II 區與第 III 區，第 II 區以中新世沉積岩為主，而第 III 區為上新世及其以後之沉積岩為主，主要岩性為膠結較疏鬆之泥岩、砂岩與礫岩，各分區分布圖如圖 1 所示。

## 三、孔內水文地質調查

本研究孔內水文地質調查工作主要有：水文地質鑽探、岩心紀錄、岩層分層作業、孔內封塞水力試驗、地下水位監測等工作，茲將各調查項目概述如下：

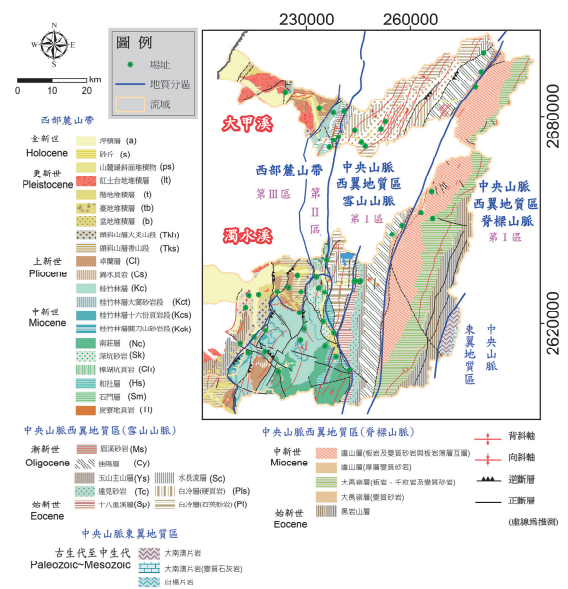


圖 1 研究區位置與地質圖

Fig.1 Location and geology in the study area

### 1. 水文地質鑽探與岩心紀錄

水文地質鑽探主要以 HQ 規格之旋鑽式鑽機，配合劈管取樣器、薄管取樣器及岩心取樣器採樣，運用水洗旋轉式鑽進全程取樣法進行作業，其所取得之岩心依序排放於岩心中，並拍攝高解析度彩色照片建檔。在鑽探過程中，相關試驗有：土層於每隔 1.5 公尺或地層變化處進行標準貫入試驗 (S.P.T.依照 ASTM D1586 規範) 求得土壤 N 值，以判定土壤之軟弱緊密程度，而在具代表性的區段採取土樣與岩樣，以供室內土壤及岩石物理性質和化學試驗；此外，各區段應記錄鑽探的迴水率，以大致瞭解該地質的破碎或軟弱泥質的滲漏情形，亦可在特殊區段施作呂琴 (Lugeon) 試驗以瞭解該區段的透水性。經由上述水文地質鑽探取樣作業所鑽取之未固結及固結土岩材料，乃採用一定標準化的鑑定方式，以得到具嚴謹且可信度較高的成果，其中未固結土岩材料係根據地質調查所「未固結沉積物之分類及地質鑽探岩心紀錄規範」；若屬固結岩層岩心，則依「工程地質探勘資料庫地質鑽探岩心紀錄規範」為原則進行描述。其岩心紀錄項目主要有：岩性、顆粒度、風化程度、岩石品質指標 (RQD) 等。

### 2. 岩層分層作業

透過上述的成果，進行岩層分層作業，以建構地表下的地質與水文地質架構，進而瞭解試驗場址岩層的地質材料與岩盤的深度。根據前人研究，山區的岩層主要分為岩屑層 (regolith) 與新鮮岩盤 (bedrock)，而該區域若地質構造發達，新鮮岩盤的上部可能產生裂隙岩盤 (fractured bedrock)，則其地下水可與上覆的岩屑層連通。透過 ISRM (1981) 新鮮岩盤的特徵，亦即岩心判釋屬於新鮮 (I)，表示岩質新鮮，無可見岩質風化跡象，或僅在主要不連續面 (節理) 有輕

微氧化鐵銹染變色，則該岩層屬於新鮮岩盤，其判釋的鑽探深度則為岩屑層與新鮮岩盤的分層界線，其深度即為岩屑層的厚度。然而，岩屑層因風化等級的不同，亦可劃分出不同的分層，如圖 2 所示，由上而下可劃分出土壤、腐土岩與風化岩塊。此外，地表上可能堆積沖積層與崩積層，以及人為作用的回填土，亦屬於岩屑層的分類，而沖積層與崩積層的分層判釋原則，主要依據岩心的地質材料之淘選度與顆粒度等沉積特徵。

### 3. 封塞水力試驗

封塞水力試驗 (packer testing) 主要目的係求得裂隙岩體的透水係數 (hydraulic conductivity, K)，以及蓄水係數 (storativity, S)，作為水文地質概念模式之建立及地下水流場模擬分析之主要依據。許震雄等 (2011) 提到，傳統岩體水力特性調查技術以重錘式微水試驗或呂琴透水試驗為主，其配合鑽孔進尺來估算岩盤大範圍透水能力，但對於小尺度地質構造或區段之調查，或者需考慮岩土弱面夾層與特定破碎岩體之的分析時，則可以封塞水力試驗針對特定地質區段進行觀測，以加強含水層細部構造所造成流向異性的連續性判識。

封塞水力試驗係利用兩個或多個橡皮封塞分離試驗孔內特定觀察區段，區段的長度可依不同試驗目的或現地需求進行調整，現地即可針對特定不連續面、或明顯地質破碎帶，甚至大範圍岩體結構進行試驗。許世孟等 (2006) 已提出應用雙封塞水力試驗探討裂隙岩體水力特性之四種試驗方法與比較，本研究所採用的定水頭注水試驗是在固定水頭下，從測試區間注水，觀察長時間流量變化趨勢，其步驟係依據美國材料試驗協會 (American Society for Testing and Materials) 所制定的標準分析方法 (ASTM D4630-96 2002) 進行。許世孟等 (2008) 與顧承宇等 (2008) 亦針對現地水力試驗的規劃與設計提出了討論，說明現地人員需謹慎考量經費、試驗場址地質條件及試驗方法，使所獲取水力參數代表較大區域之岩盤工址水文地質特性為原則。

水力試驗數據之解析必須依據地質構造和含水層型態，選擇適合的理論模型來與試驗觀測資料進行匹配。本研究採用 Barker (1988) 的廣義徑向流模型進行水文地質參數的推估，該模式已有相當多的應用實例 (Le Borgne et al. 2004; Maréchal et al. 2004; Cloot and Botha 2006; 林雅婷 2009; Chou et al. 2012)，可表示如下：

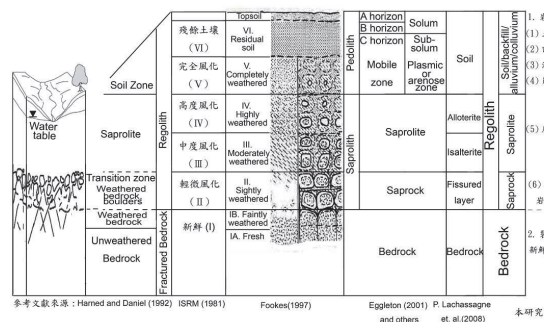


圖 2 各研究岩屑層與新鮮岩盤分層剖面比對圖

Fig.2 Profiles of regolith and bedrock compared with each research

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^{n-1} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (1)$$

其中  $S_s$  為比蓄水係數  $L^{-1}$ ,  $h(r, t)$  代表壓力水頭隨時間的變化量  $L$ ,  $r$  代表徑向距離  $L$ ,  $K$  代表透水係數  $L T^{-1}$ ,  $n$  代表地下水流維度 (flow dimension)。最後藉由數值分析程式 (AQTESOLV) 的應用, 即可在設定迭代區間內找出理論模式與觀測資料之間最小誤差之水地質參數。

#### 4. 地下水位監測

完成上述的試驗, 彙整各分層岩層的水文地質特性, 進而建置不同深度的觀測井, 以分層監測各深度的地下水位之變動情形, 如圖 3 所示。本研究地下水位監測主要分為兩個區間, 淺層的部分主要為岩屑層與其下連通的裂隙岩體, 平均深度為 50 公尺, 視地質條件等狀況來設計; 深層的部分則為基盤岩層, 井底的深度為 100 公尺。監測儀器為自記式水壓計, 由於觀測井須進行長期監測與轉為自動化監測之考量, 故採用內建電池與記憶體之壓力式水壓計 GW200, 自動監測並記錄每個週期之地下水位的變化狀況, 此自記水壓計具排氣導線, 可自動補償大氣壓力變化, 且適用於水文地質調查、地下水、水庫、河道及海洋水位的量測。

### 四、山崩潛勢評估

#### 1. 岩屑層厚度調查

透過水文地質鑽探與岩心紀錄, 可分別調查出各場址岩屑層的厚度與新鮮岩盤的深度, 以及岩屑層分層劃分成果。圖 4 為大甲溪與濁水溪流域的岩屑層厚度調查成果, 資料顯示大甲溪流域的岩屑層厚度較薄, 兩流域平均岩屑層厚度分別為 10.6 與 15.2 公尺, 標準差分別為 11.6 與 12.7 公尺, 整體平均為 12.9 公尺。由圖 5 可知, 兩流域岩屑層的分層之特性, 岩屑層主要為母岩的風化產物, 如: 土壤、腐土岩與風化岩塊, 其次為人為或自然條件堆積的物質, 如: 回填料、沖積層、崩積層等。在濁水河流域, 岩屑層的發育較為完善, 所以土壤、腐土岩與風化岩塊較為明顯, 且厚度較大甲溪為大; 由流域的面積與分布之發展特性可說明, 濁水溪水系較廣, 成似樹枝狀, 而大甲溪水系呈東西向狹窄的分布, 顯示大甲河流域集水面積較為狹窄, 邊坡較為陡, 侵蝕能力較強, 故岩屑層的

厚度較薄。另在濁水溪的次集水區 (圖 5 之 J2 區) 中, 左右側分別為清水溪與陳有蘭溪, 由調查結果可初步瞭解, 清水溪岩屑層的風化層次較為明顯, 而陳有蘭溪則多為崩積層為主。整體而言, 山區的岩屑層主要多堆積崩積層, 不同的地形與地區可能分布的岩屑層厚度也有所差異。

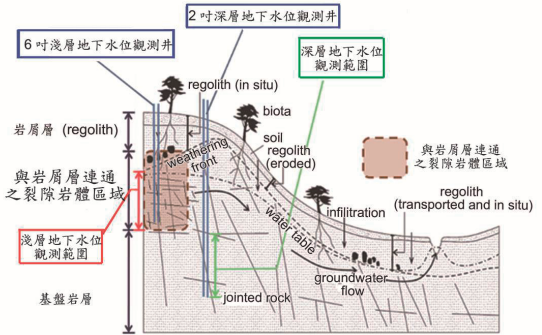


圖 3 山區水文地質架構與地下水位變化概念模型  
Fig.3 Hydrogeologic model and distribution of groundwater in the mountainous area

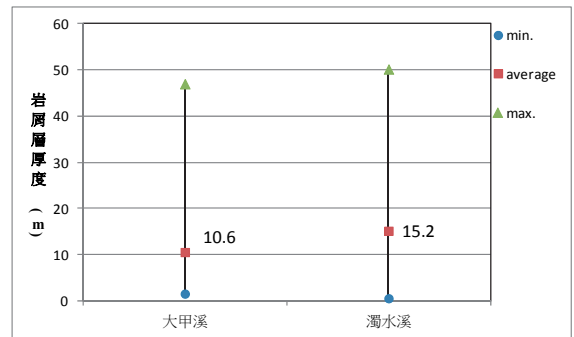


圖 4 大甲溪與濁水溪流域岩屑層厚度調查成果  
Fig.4 Summary statistics of regolith thickness in Dajia and Jhuoshuei river catchment

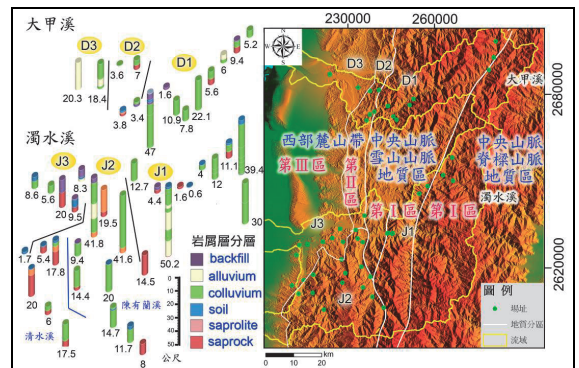


圖 5 大甲溪與濁水溪流域岩屑層分層分布圖  
Fig.5 Distribution of the regolith layers in Dajia and Jhuoshuei river catchment

## 2. 各深度岩體破碎程度分析

根據岩心紀錄中岩盤的岩石品質指標 (RQD) 成果, 本研究以整體流域為單元, 於相同流域內的鑽探場址進行彙整, 將深度 100 公尺分成 10 個區間深度, 分別進行各區間深度的岩盤 RQD 統計分析, 以探討岩體破碎程度隨深度變化之情形。圖 6 與圖 7 分別為大甲溪流域 15 處場址與濁水溪流域 34 處場址, 鑽探場址 RQD 隨深度變化統計圖。整體而言, 大甲溪流域各深度平均的 RQD 低於 60%, 故岩層比濁水溪流域較為破碎, 由地質圖 (圖 1) 可說明, 大甲溪流域在狹窄的集水區中, 斷層與褶皺等地質構造的密度較高, 顯示該流域受地質應力作用的情形較為顯著, 故岩體相對較為破碎。而兩流域表層約 20 或 30 公尺內的岩盤 RQD 較差, 此乃因該區段為裂隙岩體發達之區段, 屬於裂隙岩盤, 地下水可與岩層層連通; 隨著深度之增加, 其 RQD 有增加之趨勢, 惟兩流域皆在地下 40~50 公尺中, RQD 相對鄰近的岩盤有減少的情形, 此特性可能係臺灣地區地質作用力的影響, 使得該區段形成一破碎帶, 該地質條件可能影響山崩的發生, 且其水文地質與山崩之關連性, 值得深入的探討與分析, 故後續將透過水文地質試驗之成果來比對其成果。

## 3. 各深度岩體水力特性分析

首先, 個別將不同流域的資料作分析, 由大甲溪流域所有雙封塞水力試驗區段所估算之水力參數(透水係數與蓄水係數)成果進行整合, 以每 10 公尺為間距進行分區統計, 並取各分區之幾何平均數做為潛能代表值, 將分區數據分布範圍與深度之關連性繪製, 如圖 8 所示。整體而言, 以平均值來看, 大甲溪流域山區岩層的透水潛能隨深度呈現幕次遞減的趨勢, 惟 60~70 公尺區間有相對增加的情形; 而蓄水潛能主要集中在 20 公尺以上岩層層與其連接的裂隙岩盤, 以及深度在 30~50 公尺處的岩盤, 其次為 50~70 公尺, 而深層新鮮的岩盤, 岩層蓄水潛能則呈現遞減趨勢。

而濁水溪流域所有雙封塞水力試驗區段所估算之水力參數成果進行整合, 如圖 9 所示。整體而言, 以平均值來看, 濁水溪流域山區岩層的透水能力與大甲溪流域相仿, 隨深度亦呈現幕次遞減的趨勢, 惟 40~50 公尺區間有相對增加的情形; 而岩層的蓄水潛能則約集中在 20 公尺以上岩層層與其連接的裂隙岩盤, 以及 30~70 公尺處的裂隙岩盤, 而深層新鮮的岩盤, 岩層蓄水潛能則呈現遞減趨勢。

另外, 嘗試合併兩個流域水力參數成果, 如圖 10 所示, 可以觀察到從跨流域與廣域的觀點, 山區岩層的透水能力隨深度遞減的幕次關係可以  $K = 3E-6 \times (\text{depth})^{-1.53}$  表示, 決定係數  $R^2 = 0.86$ , 其透水係數有相對增加變化的區段在 40~50 公尺; 而岩層的蓄水潛能則集中在 20 公尺以上岩層層與其連接的裂隙岩盤, 以及 30~50 公尺處的裂隙岩盤, 其次為 50~70 公尺, 而深層新鮮的岩盤, 岩層蓄水潛能則呈現遞減趨勢。

## 4. 地下水位分析

根據地調所 (2009) 與 (2010) 地下水位監測資料成果, 將大甲溪與濁水溪流域 2010 至 2012 年夏半年 (春分至秋分) 與冬半年 (秋分至次年春分) 各站所記錄之淺井地下水位最高值、平均值與最低水位值分別進行彙整, 並以特定時間段地下水位最高值與最低值的差距說明地下水位振盪範圍, 再疊合各站岩層層與

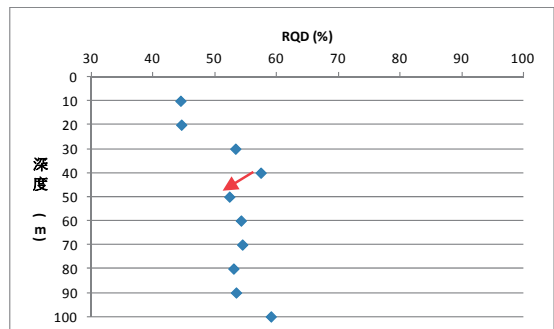


圖 6 大甲溪流域 15 處場址之岩石品質指標(RQD) 隨深度變化統計圖

Fig.6 Summary statistics of the RQD with depth from 15 sites in Dajia river catchment

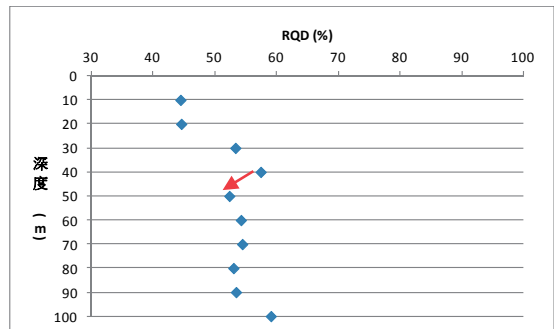


圖 7 濁水溪流域 34 處場址統計之岩石品質指標 (RQD) 隨深度變化統計圖

Fig.7 Summary statistics of the RQD with depth from 34 sites in Jhuoshuei river catchment

岩盤交界面高程相互參照比對，依各站井頂高程排序如圖 11 與圖 12 所示。由結果可知，各場址的地下水位變動主要在岩屑層與連通的裂隙岩盤之間，惟部分場址在深層的岩盤中。季節的部分，主要於夏季的時節，水位變動較大，因此顯示受降雨補注，地下水的變動情形較為顯著。

### 5. 水文地質分析成果與山崩關連性分析

#### (1) 山區水文地質特性

彙整上述水文地質分析成果，整體山區水文地質概念架構大致可劃分成：(1) 岩屑層的部分，其相對岩盤有較佳的透水與蓄水潛勢；(2) 岩盤的部分，地表下 20 公尺以內的岩盤，以及地表下 30 至 50 公尺深度的區段，其 RQD 相對較為破碎，可視為一裂隙岩體或破碎帶，且其岩層透水與蓄水特性較佳。而地下水位變動的區間，主要分布在岩屑層或岩屑層與其連接的淺層裂隙岩層之間，部分區域或陡峭的地形，其地下水位分布在深層的裂隙岩層中。由於地質條件與地下水加速其軟弱的岩層風化速度，故此水文地質特性可能係誘發山崩的致災因子，可能在山崩的災害成因與易損性中扮演重要的角色之一。

#### (2) 山崩調查案例分析

本文引用地調所 (2008) 的山崩調查成果 (表 1)，該成果主要為瞭解降雨、地下水位變化及地層滑動之關係，於崩塌地內裝設自記式雨量

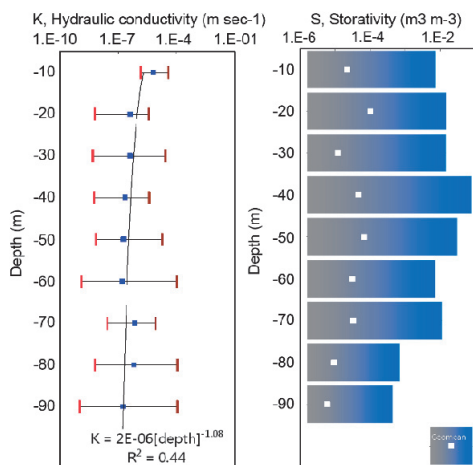


圖 8 大甲溪流流域透水係數 (左) 與蓄水係數 (右) 隨深度之分布與變化

Fig.8 Distribution of hydraulic conductivity (left) and storativity (right) with depth in Dajia river basin

計及地表固定規標點 (配合全測站施測)，以及於地質鑽孔中設置傾斜觀測管，而傾斜觀測管上、下邊坡各設置水位觀測井 (內置水壓計量測)。本研究摘錄出研究區內既有崩塌案例與本研究水文地質調查成果，進行關連性分析與探討，彙整出各案例之岩屑層厚度 (岩屑層與岩盤之交界)、岩心判釋或監測成果之滑動面，以及地下水位監測資料等。

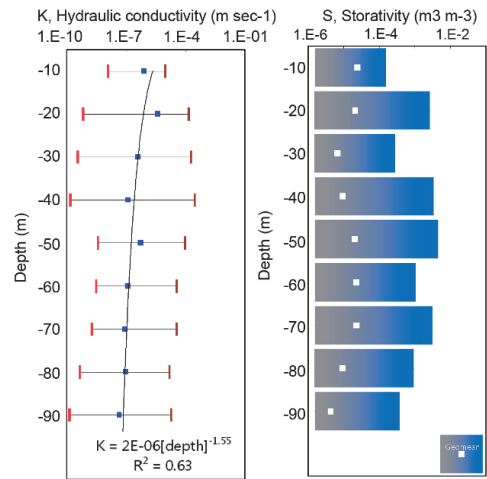


圖 9 濁水溪流流域透水係數 (左) 與蓄水係數 (右) 隨深度之分布與變化

Fig.9 Distribution of hydraulic conductivity (left) and storativity (right) with depth in Jhu-oshuei river basin

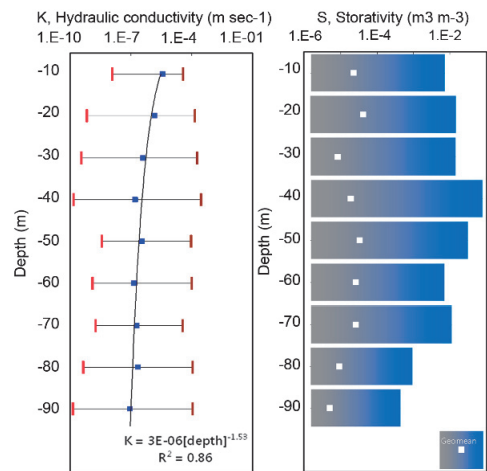


圖 10 跨流域整合之透水係數 (左) 與蓄水係數 (右) 隨深度之分布與變化

Fig.10 Distribution of hydraulic conductivity (left) and storativity (right) with depth over two river basins

山崩與水文地質特性及地下水位之關連性分析中, 由表 1 可知, 各崩塌案例的滑動面多分布在本研究水文地質架構之岩層破碎帶或地下水蘊藏較高的區段, 亦即地表下 20 公尺以內或 30~50 公尺區間。而與地下水位變動區間有其關連性的案例有: 臺中梨山村的新佳陽部落、南投仁愛鄉的萬大崩塌地、雲林草嶺村的草嶺崩塌地, 以及神木村的隆華崩塌地。新佳陽部落, 初步透過岩心判釋, 發現不同深度 (28.2~47.8m) 有地層滑動的痕跡, 如擦痕與斷層泥, 而滑動面水平或弧面延伸至上、下邊坡, 其分布在地下水位變動的區段, 有助於滑動面的軟弱岩層風化而滑動, 且危及部落的安全。草嶺崩塌地為既有的順向坡崩塌地, 該區域堆積厚度約為 28 公尺不等的崩積層, 其監測結果亦發現, 可能誘發二次崩塌的滑動面位於岩屑層之中, 約地表下 9 公尺, 沿著軟弱滑動的層面平行延伸至上邊坡, 亦是地下水位變動的範圍。萬大崩塌地與隆華崩塌地的傾斜管場址鄰近下邊坡, 其滑動面分別為地表下 31.5 公尺與 42.5 公尺, 與下邊坡的地下水位變動區間相近。

崩塌規模與類型分析方面, 松茂的淺層區段與草嶺崩塌地, 因調查的滑動面分布在岩屑層中, 故可能發生的災害類型屬於岩屑崩滑, 而松茂的深層區段、新佳陽、萬大與隆華崩塌地, 其滑動面分布在在岩屑層之下的裂隙岩層, 故可能發生的災害為整體岩體滑動, 亦有可能為岩屑崩滑與岩體滑動之複合型的災害, 其規模非常的可觀, 值得相關單位多加注意與持續調查與監測。

表 1 崩塌地案例之岩屑層厚度、滑動面與地下水位監測資料表

Table 1 Results from regolith, slide depth, and groundwater level in the landslide cases

流域	崩塌地	岩屑層厚度 (m)	滑動面 (m)	地下水位變動區間 (m)
大甲溪	松茂地滑	13.6~22.4	18~20 (監測) 58~60 (監測)	9~16 (上邊坡) 32~36 (下邊坡)
	新佳陽部落	17~20	28.2~47.8 (岩心)	44~58 (上邊坡) 35~45 (下邊坡)
濁水溪	萬大崩塌地	8~20m	31.5 (監測)	40~44 (上邊坡) 30~40 (下邊坡)
	草嶺崩塌地	28.3~>60	9 (監測)	4~25 (上邊坡) >50 (下邊坡)
	隆華崩塌地	8~17	42.5 (監測)	>50 (上邊坡) 48~53 (下邊坡)

資料來源: 本文彙整自經濟部中央地質調查所 (2008), 監測資料從民國 96 年至 97 年

因此, 透過上述崩塌案例的分析可知, 各調查與監測的崩塌滑動深度與本文的水文地質分析成果, 有其一定程度的關連性, 故岩層各深度的破碎情形、水力特性以及地下水位等因子, 可能係促使山崩發生, 以及其災害規模與類型之重要的水文地質參數。然而, 由於相關監測工作受限於經費限制, 以及部分儀器因災害而毀損, 故目前無取得完整性的資料, 以提供更多關連性分析與探討。因此, 建議後續在災害防治方面, 應加強崩塌地的水文地質特性之調查與分析, 其調查成果可提供相關災害潛勢分析與預警之參考。

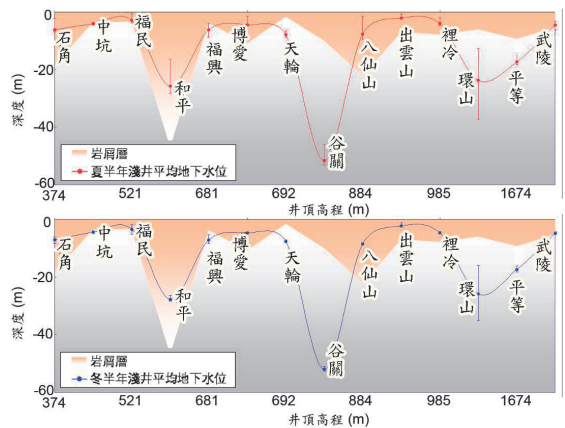


圖 11 大甲河流域夏季與冬季之地下水位監測資料與分布圖

Fig.11 Distribution of groundwater level in Dajia river catchment in summer and winter season

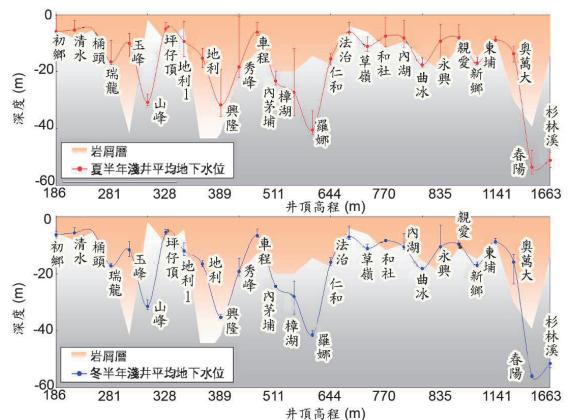


圖 12 濁水河流域夏季與冬季之地下水位監測資料與分布圖

Fig.12 Distribution of the groundwater level in Jhuoshuei river catchment in summer and winter season

### 6. 山崩潛勢評估

本研究將孔內水文地質調查試驗之成果，進一步與山崩潛勢評估之成果作比對，以瞭解岩層的水文地質特性在山崩潛勢評估中可能影響的致災因子。根據式雨量 (2008)，由圖 13 可知，濁水河流域山崩崩壞比較大甲溪高，而透過山崩潛勢分析，如圖 14 所示，高潛勢區域的面積比，濁水河流域仍高於大甲河流域。另由表 2 大甲溪與濁水河流域各類型山坡潛在災害數量統計表可知，濁水河流域山崩事件較多，各災害類型以岩屑崩滑類型較多，故凸顯岩屑層的調查，係山崩潛勢評估與防治中重要的調查項目之一。

根據本研究成果，大甲溪與濁水河流域的平均岩屑層厚度分別為 10.6 公尺與 15.2 公尺，顯示濁水河流域岩屑層分布較厚且風化的岩層較為明顯，故岩屑崩滑之潛勢亦較高；而落石的情形，因大甲溪流域集水區面積狹窄，邊坡較為陡峭，且河川侵蝕能力強，故有較多的落石發生之情形。另外，岩體滑動與順向坡的部分，濁水河流域亦有較多的案例，然而試驗成果顯示大甲溪流域各深度岩盤的 RQD 值較濁水河流域低，此可能因大甲溪流域一半以上的地層為變質岩，其裂隙網絡發達，使得 RQD 值計算時較低，而岩體破碎機制屬於脆性材料，故整體岩體質地仍較為堅硬；反觀濁水河流域多為砂岩、頁岩或其互層的地層，其頁岩為塑性材料，透水性較差，使得岩層的含水量在砂岩與頁岩兩岩層之界面有較多的趨勢，容易造成不連續面的摩擦力降低且產生一滑動面而崩塌。因此，調查的資料目前顯示濁水河流域有較高的潛勢，然而岩體滑動與順向坡的崩塌機制仍無法完全瞭解，是否與本研究初步成果分析的區段與深度有所關連，而大甲溪流域深層滑動的災害是否具有潛在發生的風險，值得後續再進行相關的研究與分析。

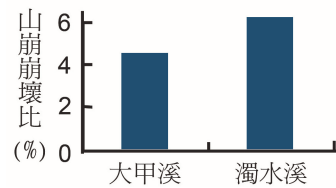
另外，彙整地調所 (2008) 全臺調查流域的山崩資料，依據各地質分區來探討山崩崩壞比，如圖 15 所示，第 I 區中央山脈地質區的變質岩之山崩崩壞比較高，其次為西部麓山帶東側的中新世沉積岩，故顯示高程愈高且變質程度較高的區域，山崩潛勢有較高的趨勢。而本研究統計大甲溪與濁水溪兩流域的成果，其西部麓山帶與中央山脈地質區的平均岩屑層厚度分別為 12.9 公尺與 16.4 公尺，此結果驗證變質岩區的山崩崩壞比較高，主要係受地質構造的影響，該區域易發生山崩，故使得崩積層較厚。

表 2 大甲溪與濁水河流域各類型山坡潛在災害數量之統計表

Table 2 Summary statistics of slopeland hazard types in Dajia and Jhuoshuei river catchment

流域	落石	岩屑崩滑	岩體滑動	土石流	順向坡	數量總計
大甲溪	3,080	8,139	22	134	863	12,238
濁水溪	2,667	22,906	44	566	2,276	28,459
數量總計	5,747	31,045	66	700	3,139	40,697

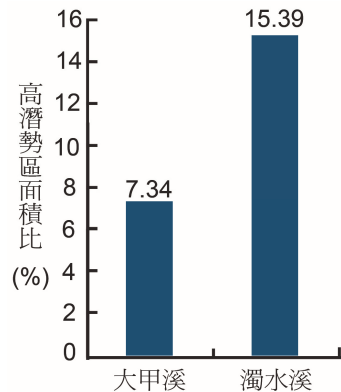
資料來源：本文彙整自經濟部中央地質調查所 (2008)



資料來源：經濟部中央地質調查所 (2008)

圖 13 大甲溪與濁水河流域之山崩崩壞比

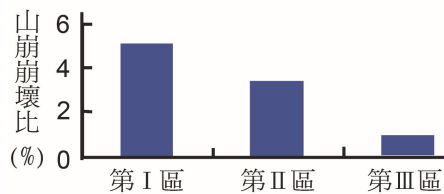
Fig.13 A Landslide ratio of Dajia and Jhuoshuei catchment



資料來源：修改自經濟部中央地質調查所 (2008)

圖 14 大甲溪與濁水河流域之山崩高潛勢區面積比

Fig.14 A Landslide potential area of Dajia and Jhuoshuei catchment



資料來源：經濟部中央地質調查所 (2008)

圖 15 各地質分區之山崩崩壞比

Fig.15 A Landslide potential area of each geologic division



因此,本研究初步發現岩層各深度的水文地質特性與山崩的發生有一定程度的關連性,故本研究建議未來可將此水文地質調查成果延伸,進行更多詳細的山崩潛勢分析與評估,透過完整水文地質調查試驗,進一步瞭解岩層各深度的山崩潛勢與易損性。此外,根據長期地下水位的觀測資料,瞭解岩屑層的飽和分布範圍,有助於建立水文地質架構與山崩潛感之關連性,輔助分析降雨或地震事件誘發山崩的類型與規模,提供未來進行山崩潛勢與預警系統之參考。

## 五、結 論

透過本研究孔內水文地質調查與試驗成果,可瞭解臺灣山區岩層的水文地質架構,各深度有不同的水力特性;其中,大甲溪與濁水河流域透水性與蓄水性能較佳的岩層,其深度分布在地表下 0~20 公尺與 30~50 公尺兩個區段,前者為岩屑層與裂隙岩層為主,後者為深層破碎的岩盤,RQD 值相對鄰近深度的岩層為低,此兩區段深度與流域內各類型崩塌案例的滑動面,有一定程度的關連性,故可能係山區岩體較為脆弱的區段。因此,本研究認為可透過孔內水文地質調查與試驗,以瞭解既有崩塌地、山區聚落或坡地集水區之地表下岩屑層的地質材料、各深度岩體的破碎程度與水力特性,以及地下水位等因子,建構出該區域的水文地質架構,並透過此重要的水文地質參數,以及其他促崩因子,進行評估山崩潛勢、可能發生的型態、滑動深度與規模等,以提供相關單位在聚落安全、災害潛勢分析、預警系統或治理對策等工作之參考依據。

## 誌 謝

在此特別感謝「經濟部中央地質調查所」,提供水文地質與山崩調查等計畫資料,方能完成本論文之研究。

## 參考文獻

- [1] 李錫堤 (2009),「山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望」,台灣公共工程學刊,5(1),1-29。(Lee, C.T. (2009). "Review and prospect on landslide and debris flow hazard analysis." *Journal of the Taiwan Society of Public Works*, 5(1), 1-29. (in Chinese))
- [2] 林彥享 (2003),「以類神經網路進行地震誘發山崩之潛感分析」,國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Lin, Y.H. (2003). *Application of neural network to landslide susceptibility analysis*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 林雅婷 (2009),「利用雙封塞微水試驗推估裂隙含水層水力傳導係數」,國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Lin, Y.T. (2009). *Estimation of hydraulic conductivity of fractured aquifer using double packer slug test*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 許世孟、翁孟嘉、曾慶恩、顧承宇、譚志豪 (2006),「應用雙封塞水力試驗探討裂隙岩體之水力特性」,2006 岩盤工程研討會,臺南,臺灣,199-208。(Hsu, S.M., Weng, M.C., Tseng, C.N., Ku, C.Y., and Tan, C.H. (2006). "The application of double-packer technique to determine the hydraulic properties of fractured bedrock." *2006 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Tainan, Taiwan, ROC, 199-208. (in Chinese))
- [5] 許世孟、顧承宇、鍾明劍、李錦發、蘇泰維 (2008),「岩盤工址之水力特性調查與案例應用」,地工技術,115,39-48。(Hsu, S.M., Ku, C.Y., Chung, M.C., Lee, J.F., and Su, T.W. (2008). "Site investigation of hydraulic properties for rock masses." *Sino-Geotechnics*, 115, 39-48. (in Chinese))
- [6] 許震雄、吳年昌、周柏儀 (2011),「山區裂隙岩體水力試驗成果與未來發展—以濁水河流域為例」,第二十屆水利工程研討會,嘉義,臺灣。(Hsu, C.H., Wu, N.C., Chou, P.Y. (2011). "The preliminary result and future work of conducting borehole packer testing in the mountainous region - a case study in Jhuoshuei river basin." *The 20th Hydraulic Engineering Conference symposium*, Chiayi, Taiwan. (in Chinese))
- [7] 費立沅 (2009),「臺灣坡地災害與地質敏感區的關係」,地質,28(1),16-22。(Fei, L.Y. (2009). "Correlations of slope land disasters and geological hazard prone areas in Taiwan." *Ti-Chih*, 28(1), 16-22. (in Chinese))
- [8] 溫振宇 (2005),「結合地震與颱風因子之山崩模式分析」,國立成功大學地球科學系碩士論文。(Wen, C.Y. (2005). *A landslide model analysis with combining factors of earthquake and typhoon*, Mas-

- ter thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] 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及資料庫建置 (第 2 期 97 年度) — 集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫 (1/3)」, 經濟部中央地質調查所出版。(Central Geological Survey, MOEA (2008). “Geological investigation and database construction for the upstream watershed of flood-prone area. (Second phase)- Investigation and evaluation of the effect of hydrogeology on slope stability in the watershed area (1/3)”. Published by Central Geological Survey, MOEA (in Chinese))
- [10] 經濟部中央地質調查所 (2009), 「臺灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫—第一期 101 年度臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(1/4)」, 經濟部中央地質調查所出版。(Central Geological Survey, MOEA (2009). “Rock aquifer hydraulic properties investigation and ground-water monitoring wells construction in mid-Taiwan mountainous region (1/4)”. Published by Central Geological Survey, MOEA (in Chinese))
- [11] 經濟部中央地質調查所 (2010), 「臺灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫—第一期 102 年度臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置 (2/4)」, 經濟部中央地質調查所出版。(Central Geological Survey, MOEA (2010). “Rock aquifer hydraulic properties investigation and ground-water monitoring wells construction in mid-Taiwan mountainous region (2/4)”. Published by Central Geological Survey, MOEA (in Chinese))
- [12] 顧承宇、許世孟、鍾明劍、羅鴻傑 (2008), 「岩盤工程實務與教學應用—以水文地質調查為例」, 2008 岩盤工程研討會, 臺北, 臺灣。(Ku, C.Y., Hsu, S.M., Chung, M.C., and Lo, H.C. (2008). “Practical experiences to teaching of rock engineering: a case study of hydrogeologic investigation.” *2008 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Taipei, Taiwan, ROC, 199-208. (in Chinese))
- [13] Barker, J.A. (1988). “A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock.” *Water Resource Research*, 24, 1796-1804.
- [14] Chou, P.Y., Lo, H.C., Hsu, S.M., Lin, Y.T., and Hunag, C.C. (2012). “Prediction of hydraulically transmissive fractures using geological and geophysical attributes: a case history from the mid Jhu-oshuei River basin. Taiwan.” *Hydrogeology Journal*, 20, 1101-1116.
- [15] Cloot, A., and Botha, J.F. (2006). “A generalised groundwater flow equation using the concept of non-integer order derivatives.” *Water SA*, 32, 1-7.
- [16] Eggleton, R.A. (2001). *The regolith glossary*, Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration, Australia.
- [17] Fookes, P.G. (1997). “Geology for engineers: the geological model, prediction and performance.” *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 30, 293-424.
- [18] Hamed, D.A., and Daniel, C.C., III (1992). “The transition zone between bedrock and regolith—Conduit for contamination?” in Daniel, C.C., III, White, R.K., and Stone, P.A. (1989), eds., *Ground water in the Piedmont: Proceedings of a Conference on Ground Water in the Piedmont of the Eastern United States*, Clemson University, 336-348.
- [19] ISRM. (1981). *Rock characterization testing and monitoring* (ed. E. T. Brown), Pergamon Press, Oxford.
- [20] Lachassagne, P., Wyns, R., Be'ard, P., Bruel, T., Che'ry, L., Coutand, T., Desprats, J.F., and Le Strat, P. (2001). “Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones.” *Ground Water*, 39(4), 568-581.
- [21] Le Borgne T., Bour O., de Dreuzy J.R., Davy P., and Touchard F. (2004). “Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation.” *Water Resource Research*, 40, W03512.
- [22] Maréchal, J.C., Dewandel, B., and Subrahmanyam, K. (2004). “Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer.” *Water Resource Research*, 40, W11508.
- [23] Varnes, D.J. (1978). “Slope movement types and processes.” *Landslides: analysis and control* (eds. Schuster, R.L., & Krizek, R.J.), special report 176, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- [24] Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*, UNESCO Press, Paris.

---

2013 年 01 月 15 日 收稿

2013 年 02 月 25 日 修正

2013 年 03 月 28 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 3 月 31 日)