以現地測繪與人工風化實驗探討卓蘭層之風化特性

邱雅筑(1) 羅偉誠(2) 劉宸好(3)

摘要

卓蘭層為台灣本島成岩時間僅長於頭嵙山層之年輕岩層,也是台灣西部南投以北都會區周 邊常見的岩層,具有易風化、膠結不良、強度低且易崩解的特性。本研究針對大安溪河谷的卓 蘭層進行室內人工風化試驗。結果顯示,所採集的砂岩樣本中夾有薄層頁岩,因此其耐久性接 近頁岩,但強度卻較頁岩低。而根據現地測繪與調查結果,取樣點之河岸邊坡崩塌主要機制為 平面及楔型破壞,另亦有區域可能發生傾覆破壞。除了風化侵蝕外,不連續面特性包含位態、 間距與延續性的影響也是決定破壞模式與崩塌量的重要因素之一。

(關鍵詞:卓蘭層、岩石風化、西部麓山帶、現地測繪)

Investigating Weathering Properties of Cholan Formation by Field Surveying and Mapping and Artificial Weathering Experiments

Ya-Chu Chiu⁽¹⁾ Wei-Chen Lo⁽²⁾

Assistant Professor⁽¹⁾ Master^{(2),} Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

Cholan Formation is one of the younger rock formations on Taiwan, with its lithification time only slightly older than that of Toukoshan Formation. It is commonly found in the metropolitan areas north of Nantou in western Taiwan and is characterized by its susceptibility to weathering, poor cementation, low strength, and tendency to disintegrate. This study conducted indoor artificial weathering experiments on samples collected from Cholan Formation exposed in the Daan

⁽¹⁾國立中興大學水土保持學系 助理教授(通訊作者 e-mail: clarice.chiou@gmail.com)

⁽²⁾國立中興大學水土保持學系 碩士

⁽³⁾國立中興大學水土保持學系 碩士生

River valley. The results indicate that the sampled sandstone contains interbedded thin layers of shale, giving it a durability similar to that of shale, but with even lower strength. According to field surveys and mapping, the main collapse mechanisms along the sampled riverbank slopes are planar and wedge failures, with some local topple failures. In addition to weathering and erosion, the characteristics of discontinuities, including their orientation, spacing, and persistence, also play a significant role in controlling the failure modes and the extent of collapses.

(**Keywords** : Cholan Formation, Rock weathering, West Foothill Geological Region, Field surveying and mapping)

一、前言

西部麓山帶為台灣地質分區之一,指台 灣西部隆起臺地最西緣往東至雪山山脈及幾 條斷距較大的斷層為止,其與雪山山脈地質 區之分別在於西部麓山帶全為沉積岩,而雪 山山脈屬於輕度變質岩(陳文山,2016)。西部 麓山帶涵蓋地區為台灣人文和經濟首要之區 (陳培源,2008),根據何春蓀(2006)之台灣西 部麓山帶第三紀及更新世地層對比表,台灣 中部最年輕地層為頭嵙山層,其次即是本研 究探討之卓蘭層。

岩體的風化率除了受環境因子影響,也 與岩體本身的耐久性相關,而後者則由礦物 組成、岩石組構、孔隙率及不連續面影響範 圍所主控(Bell, 1983)。因此,沉積時間短暫 而使壓密不足、膠結度不佳、浸水弱化、強 度低之岩層如卓蘭層與頭嵙山層為台灣抗風 化能力差的岩層代表,多數屬於國際岩石力 學 學 會 (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM)建議 之岩石分類的非常軟弱至中等強度岩石(許 慶祥,2002;羅偉誠,2021)。

卓蘭層(鳥居敬造,1935)出露於台灣中北

部,由砂岩、粉砂岩、泥岩和頁岩互層而成, 且砂頁岩比例(或砂岩出現頻率)與砂岩單層 厚度往上漸增,沉積物顆粒也隨之變粗。本 層上部多厚層砂岩,砂岩間常含砂頁互層, 越接近頂部礫石質砂岩越多。由於砂岩質地 較堅硬,抗風化能力較強,故常形成明顯的 豚背脊地形(何信昌,1994;羅偉等,1999; 何信昌與陳勉銘,2000;陳文山,2016)。

綜合前人研究可知卓蘭層工程特性不 佳,其層內各種岩性抵抗風化的能力尚有高 下之分,且分布於臺灣中北部都會區邊緣, 對鄰近市區之山坡地開發影響極大,確有深 入討論其工程特性之必要。因此本研究選取 臺灣中部地區卓蘭層出露地點,經探勘確認 後進行地表地質調查,以攝影測量方法進行 地形三維測繪,同時取回現地岩石樣本進行 人工風化實驗,最後比對室內實驗與現地測 繪成果,建議卓蘭層各岩性之風化速率。

二、場址探勘與選取

本研究以卓蘭層在中部地區出露之地點 為研究對象(圖1),勘查地點為台中都會區周 邊河流之溪谷。最終選定取樣位置為大安溪 與頭汴坑溪河谷兩處,地點分別位於圖2右 點、現場狀況與露頭條件。 0 紅土台地 堆積層 頭料山層 火炎山段 2.5 5 km 圖例 🛕 卓蘭層取樣點 五萬分之一全島無接縫地質圖 商利128 第11128 臺灣通用電子地圖 22000 230000 圖1場址地質圖 Figure 1 Geological map of study cases 圖例 🛕 卓蘭層取樣點 五萬分之一全島無接縫地質圖

上及左下角。以下分別說明兩個場址之地

圖 2 場址位置圖 Figure 2 Location of study cases

2.1. 頭汴坑溪河谷

臺灣通用電子地圖

本研究頭汴坑溪河谷取樣點屬台中市太 平區,位處頭汴坑溪由西北轉向西南之轉折 點,距頭汴坑溪匯入大里溪位置約7km的上 游處。河谷出露砂頁岩互層與頁岩夾砂岩, 砂岩與頁岩層厚比在不同岩段有顯著落差, 砂頁岩互層之層厚比約1:1,頁岩夾砂岩段則 約1:8(砂岩:頁岩),如圖3現場露頭照片。

2.2 大安溪河谷

大安溪河谷取樣點在台中市東勢區境 內,與省道台三線卓蘭大橋距離約2km。大 安溪南北兩側出露大片砂岩夾頁岩,砂岩與 頁岩層厚比在 8:1 左右,絕大部分為厚層泥 質砂岩,但其中偶夾有薄層頁岩。此處露頭 出露狀況良好,雖有局部植生但溪流兩岸大 致受水流沖刷為裸露岩盤,如圖4。

本研究所探勘之兩處卓蘭層露頭狀態相 近,整體風化程度高,且因泥質含量高而易 受水流侵蝕、容易崩解,二者取樣基本條件 相似。故基於可取得大量樣本的便利性,乃 選取大安溪河谷南岸做為研究案例。



圖 3 頭汴坑溪溪谷露頭照片(攝於 2019/10/06) Figure 3 Outcrop of Toubiankeng River valley (taken on Oct. 6th, 2019)



圖 4 大安溪露頭照片(攝於 2020/07/27) Figure 4 Outcrop of Da-an River (taken on Jul. 7th, 2020)

水土保持學報 54(2): 3337 - 3348 (2024) Journal of Soil and Water ConservatioOn, 54 (2): 3337 – 3348 (2024)

三、地表地質調查

大安溪河谷南岸坡面為厚層砂岩夾薄頁 岩層,有明顯層面和節理面。羅偉誠(2021) 地表地質調查結果顯示現場包含層面(B)與 四組節理面(J1-J4)在內,共有五組不連續 面。現場調查成果經立體投影圖繪製並行統 計後,得到各組不連續面之代表位態值列如 表1。邊坡坡面位態為N30°W,80°N,弱面摩 擦角為42°(國立交通大學防災與水環境研究 中心,2010),綜合所有不連續面位態進行運 動學分析,結果顯示可能發生平面滑動、楔 型破壞、(圖5)。J1、J2和J2、J3和以及J3、 J4 之交線都可能產生楔型破壞。

表1 大安溪河谷邊坡不連續面位態代表值

(羅偉誠,2021)

Table 1 Representative orientations of discontinuities for rock masses at Da-an River $(I \circ 2021)$

(L0, 2021)			
不連續面 代號	走向	傾角	
В	N55°E	27°S	
J1	N39°E	54°N	
J2	N16°W	87°N	
J3	N77°W	58°N	
J4	N14°E	85°N	





1),但現地實際量測值 J2 實存在部分離散值

3340

邱雅筑、羅偉誠、劉宸好: 以現地測繪與人工風化實驗探討卓蘭層之風化特性

極點與坡面逆向且落在圖 5(c)紅色區域,為 逆向之高角度節理,有可能導致撓曲傾覆。 考慮直接傾覆破壞時,有部分 J2 極點落於圖 5(d)紅色區域,即與坡面逆向且角度較坡角平 緩,有可能產生直接傾覆破壞;此外,層面 B 半數以上極點落在圖 5(d)黃色區域,因此 B 與 J2 構成之岩塊有機會形成以 B 為底面、J2 為塊體長邊之長柱狀岩塊,且符合直接傾覆 發生條件。上述說明此處節理發達,岩體為 不連續面切割得極為破碎,因此小規模岩塊 滑落現象層出不窮。

四、場址測繪

本研究以攝影測量配合控制點全球定位 系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)量測,建立現場露頭之三維測繪模 型。2019年10月06日成果如圖6,圖中由 右上往左下傾斜者即為不連續面中最顯著之 層面(B),中央偏左側坡趾處可見先前崩塌事 件造成的崖錐堆積。

測繪過程使用 Nikon D750 單眼相機以 焦距 50 mm 定焦鏡拍攝影像,在測繪範圍周 邊布設 8 個地面控制點,並於邊坡上人力不 可及之處以漆彈建立加密點。首先以 GNSS 量測出控制點絕對坐標,再使用全測站基於 控制點量測加密點坐標,獲取加密點絕對坐 標,最後於內業透過軟體解算建立三維模型。



圖 6 大安溪河谷三維測繪模型成果(攝於 2019/10/06) (羅偉誠, 2021) Figure 6 Three-dimensional surveying and mapping model of Daan River valley (photos taken on Oct. 6th, 2019) (Lo, 2021)

五、人工風化實驗

5.1 人工風化實驗設計

為避免取樣影響測繪區域地貌,岩石

取樣地點選於測繪範圍之上游與下游。取 回之岩樣依風化程度、產狀及取樣地點分 為4種砂岩,1種頁岩,給予砂岩代號 Cl SS-1~Cl SS-4,頁岩代號 Cl SH,並處理為 單一重量 40-60 g 之塊體以利後續實驗, 水土保持學報 54(2): 3337 - 3348 (2024) Journal of Soil and Water ConservatioOn, 54 (2): 3337 – 3348 (2024)

如圖7所示。

岩石樣品置於恆溫恆濕箱中,於濕冷及乾 熱條件中反覆循環,模擬自然界中每日、 每季乃至每年間溫度與濕度往復變化之風 化環境。每經過一定循環次數後,將岩石 樣品取出,進行重量量測、點荷重試驗與 消散耐久試驗,以量化岩石在各風化程度 下崩解量、強度與耐風化能力之變化。經 統計位於取樣點附近三處中央氣象局氣象 站包含卓蘭、中竹林及東勢之溫度與濕度 逾十年之時變化量,人工風化實驗之溫度 與濕度條件設計為溫度15℃,濕度80%及 溫度 30℃,濕度 70%,每個條件維持 6小 時之後進行更換,因此每 12 小時為一循 環,共進行10次循環。加速人工風化實驗 則設定為 15℃, 濕度 80%與 60℃, 濕度 50%,每個條件停留3小時,6小時為一 完整循環,如表2所列。本研究所用之恆 溫恆濕箱溫度範圍介於 0-100℃,濕度介 於35-95%,對應精度分別為±0.5°C與±3%。

5.2 消散耐久試驗

消散耐久試驗(Slake durability test)最 早由Franklin和Chandra設計提出(Franklin and Chandra, 1972),目的是評估泥質砂岩 在乾濕循環環境中的抵抗能力。通過標準 化的乾濕循環過程,測量試體的重量損 失,從而計算出消散耐久指數(*la*2)。

*I*_{d2} = 岩塊循環後乾重 / 岩塊初始重量 ×100%

消散耐久指數 *I*₄₂ 專指乾溼循環兩次 後獲得之前後岩塊重量比值,數值越高代 表岩石抗風化能力越強。消散耐久性(slake durability)之定義與消散耐久指數相同,但 適用於所有循環次數,不限定必須為循環 兩次所對應之數值。



5.3 點荷重試驗

點荷重試驗(Point load test)由 Broch 和 Franklin 於 1972 年設計(Broch and Franklin, 1972),旨在通過測量岩石材料的 點荷重指數(*I*_s)來分析其強度特性。此試驗 方法是藉由載重尖錐施加的力量(*P*)與等 效岩心直徑(*D*_e)來計算點荷重指數 *I*_s,

$I_s = P/(D_e)^2$

點荷重指數可用於估岩石材料之單軸壓縮 強度與單軸拉伸強度。

表 2 人工風化實驗條件(修改自羅偉誠, 2021)

Table 2 Conditions of artificial weathering experiments (modified from Lo, 2021)

實驗 類型	溫度/濕度 條件	實驗方法
溫度影響 實驗	15°C/35-95% 15-95°C/35%	實驗中僅改個 度或溫每個時,4小 時為一循環取出稱 5次循環取出稱 重,每10次消 載 行一次消 數 人 式 驗
人工風 化實驗	15°C/80% 60°C/50%	每個條件維持6 小時,12小時為 一循環,每1次 循環後取出進行 量化實驗

六、卓蘭層風化特性

6.1 溫度濕度影響實驗

Cl-SS-3 砂岩試體在固定濕度,改變溫 度的循環實驗下,經 20 次循環後表面相對 新鮮未經溫度變化循環的岩樣無顯著變化 (圖 8a, b),但從圖 8c 與圖 8d 兩者經消散 耐久循環後之產狀,新鮮岩樣殘留量體為 歷經循環岩樣的 150%以上,可見卓蘭層 砂岩在溫度影響實驗後抗風化能力顯著下 降。

固定濕度,使岩樣在高低溫度間不斷 循環後,消散耐久指數在前20次人工風化 循環持續下降,但第30次卻較風化循環 20次來得大(圖9a)。但歷經相同人工風化 循環次數的岩樣,其消散耐久性皆隨消散 耐久循環增加而下降,如圖 9(b)。



(a)新鮮岩樣照片



(c)新鮮岩樣消散耐 久兩次循環後



b)温度影響貫驗 20 循環後



(d)溫度影響實驗 20 循環後及消散耐久 兩次循環後

圖 8 砂岩 CI-SS-3 試體溫度影響實驗循環 20 次後之照片(羅偉誠, 2021) Figure 8 Photos of Cholan Sandstone CI-SS-3 after 20 cycles of temperature test (Lo, 2021)

濕度影響實驗結果顯示消散耐久指數 10 次風化循環後之消散耐久指數甚至比 完全未風化時高,之後隨人工風化循環次 數增加,消散耐久指數逐步下降(圖 10a)。 比對人工風化循環次數對應之消散耐久 性,同樣是完全未風化者較弱(H-CI-SS-3 R0),但風化循環 10 至 30 次的三筆結果均 是消散耐久循環次數越多,消散耐久性越 低。圖 9a 與圖 10b 中"Constant"指溫度與 濕度均維持定值之實驗結果,因此標示於 風化循環 0 次對應位置。

6.2 人工風化實驗

卓蘭層砂岩歷經人工風化後,重量大致逐步下降;卓蘭層頁岩的重量變化相對於砂岩較小,但異動較大(圖 11),且變動量不因風化循環次數增加而減少。

卓蘭層砂岩在人工風化循環三次左 右,消散耐久性即降至30%以下,但當風 化循環次數繼續增加時,消散耐久性約呈 定值,但帶有約±5%的上下起伏變動(圖 12a)。卓蘭層頁岩之消散耐久性則在人工 風化循環10次以內約略一致,尚未有顯著 下降,如圖12b。

岩石樣品風化後的強度變化顯示砂岩 在人工風化循環 0 至 120 小時期間之點荷 重指數約以 0.5 MPa,相當於單軸壓縮強 度 12 MPa 左右為中心上下變動(圖 13a)。 頁岩之點荷重指數則約以 1.2 MPa(單軸壓 縮強度約 28.8 MPa)為中心上下波動(圖 13b),兩者之共同特性為變異性高。



















different weathering time (Lo, 2021)

七、討論

本研究於大安溪河谷所取岩樣在人工 風化之後的重量變化為砂岩較頁岩顯著 (圖 11),消散耐久性在風化初期砂岩與頁 岩非常相近,但隨人工風化循環次數增 加,頁岩之抗風化能力不減反增,推測是 岩石樣本變異性所致,如圖 12,而砂岩則 是持續下降,相對較合理。強度變化方面, 卓蘭層砂岩與頁岩在人工風化循環增加時 都沒有顯著的上升或下降,但其間數值持 續上下波動。實驗結果顯示頁岩較砂岩強 度高,與現場測繪所見砂岩凸出、頁岩凹 入的地貌不同。在重新檢視該批岩樣後, 發現多數具有極薄頁岩層,事實上應為砂 岩夾薄頁岩,也說明了異質性之影響雖經 常在力學分析中被簡化忽略,但只要砂岩 中存在極薄頁岩層且層面位態不利,受力 後便會沿砂頁岩介面滑動。反之,均質的 頁岩受力後尚須克服整個截面積的凝聚力 與摩擦角之貢獻,故強度較砂岩夾薄頁岩 高。

由於消散耐久試驗與點荷重試驗為破 壞性試驗,因此係準備多批岩樣,在到達 指定風化循環次數後取出一批進行實驗, 實驗完後該批岩樣即消耗殆盡,不同循環 次數的各筆數據皆為不同岩石樣本。以點 荷重實驗而言,按 Franklin and Chandra (1972)建議,每批應包含10個40-60g的 岩石樣本,但本研究每批次為3個岩樣, 實驗結果受樣本材質的變異性影響較大。

羅偉誠(2021)2020 年 8 月 5 日於大安 溪河谷邊坡針對砂岩頁岩互層區域受侵蝕 的深度進行實際調查,量測頁岩相對砂岩 在垂直層面方向之退縮長度如表 3。成果 顯示差異侵蝕量大致呈兩群數值,一群落 在 20-30 cm,另一則是 60-80 cm,推測現 場侵蝕量除了岩性本身抗風化能力之外, 也受弱面間距、延續性與層厚綜合影響。

八、結論

卓蘭層為台灣西部南投以北都會區周 邊常見岩層,具有抗風化能力差、膠結不 良、強度不高與易崩解等特性。本研究取 大安溪河谷出露之卓蘭層進行室內人工風 化實驗。實驗結果顯示所取岩樣中砂岩尚 夾有薄層頁岩,因此消散耐久性與頁岩相 近,但強度反而較頁岩弱。而現場測繪及 調查結果顯示主要為平面、楔型及撓曲傾 覆破壞,故除了風化侵蝕之外,不連續面 特性亦為主控破壞模式和崩塌量的原因之 一。

Table 3 Statistics of erosion difference between sandstone and shale of the study area (modified from Lo, 2021)

編號	平均一維 侵蝕量(cm)	頁岩層厚(cm)
1	20	1.8
2	75	1.8
3	60	1.8
4	27	29.4
5	78	29.4
6	80	29.4

謝誌

本研究為羅偉誠碩士論文一部分,數 次野外探勘蒙馮正一教授與其研究團隊成 員郭秉軒,曾逸帆,康凌傑君鼎力相助, 特此銘謝。

參考文獻

- 陳文山(2016),「臺灣地質概論」,中華 民國地質學會,臺北市。
- 羅偉誠(2021),「中台灣晚中新世以後 沉積岩風化侵蝕特性之探討」,國立中 興大學水土保持學系碩士論文。
- 3. 陳培源(2008),「台灣地質」,台灣省

應用地質技師公會,臺北市。

- 何春蓀(2006),「臺灣地質概論-臺灣 地質圖說明書」,經濟部中央地質調 查所,臺北縣。
- 許慶祥(2002),「膠結不良岩層力學行 為之研究」,國立中興大學土木工程研 究所碩士論文。
- 鳥居敬造(1935),「東勢圖幅與說明書 (五萬分之一)」,臺灣總督府殖產局出 版第 732 號(日文)。
- 何信昌(1994),「五萬分之一臺灣地質 圖幅說明書-苗栗」,經濟部中央地 質調查所,臺北縣。
- 羅偉、吳樂群、陳華玟(1999),「五萬 分之一臺灣地質圖幅說明書-國 姓」,經濟部中央地質調查所,臺北 縣。
- 何信昌、陳勉銘(2000),「五萬分之一 臺灣地質圖幅說明書-臺中」,經濟 部中央地質調查所,臺北縣。
- 國立交通大學防災與水環境研究中 心(2010),「設置攔河堰引致岩盤沖 刷之機制與評估研究總報告」,經濟 部水利署水利規劃試驗所。
- Bell, F.G. (1983), Fundamentals of Engineering Geology, Butterworths, London.
- Broch, E. and J. A. Franklin (1972), "The point-load strength test," International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 9: 669-697.
- Franklin, J. A. and Chandra, R. (1972), "The slake-durability test," International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 9: 325-347.

水土保持學報 54(2): 3337 - 3348 (2024) Journal of Soil and Water ConservatioOn , 54 (2): 3337 – 3348 (2024)

> 113年11月11日收稿 113年12月02日修改 114年02月10日接受