台灣順向坡滑動災害的回顧與災害防治的原則

洪如江／國立臺灣大學土木系名譽教授、中國土木水利工程學會會士

本文所謂順向坡（dip slope），係指一個自然邊坡，尤其是岩坡，其坡面的傾斜方向（dip direction）與其岩層中主要弱面的傾斜方向是相同或大致相同者。所謂大致相同，指坡面傾斜方向與弱面的傾斜方向相差不超過 15°者（洪，民國 91 年；部分學者用 20°）。順向坡未必發生滑動，滑動的邊坡也未必是順向坡。但是，順向坡滑動，一向是台灣邊坡破壞中最普遍、最嚴重、且最常被討論者，參閱本文「參考文獻」。

台灣常見順向坡的產狀有 6 種（洪，民國 91 年），本文只對最常見的兩種加以討論：

(1) 豚背構造（或單面山），順向坡與崩積土坡雙生，如圖 1 所示。

(2) 脆裂砂岩下接頁岩或砂頁岩互層所構成的順向坡，如圖 2 所示。潛在滑動面在含脆裂節理的砂岩與頁岩 (或砂頁岩互層) 之間的界面。

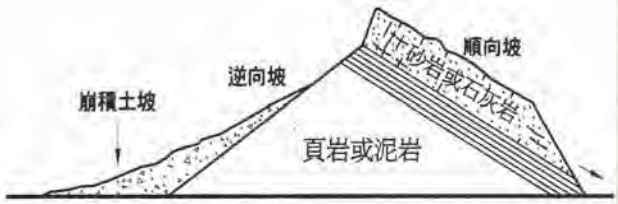


圖 1　順向坡與崩積土坡雙生

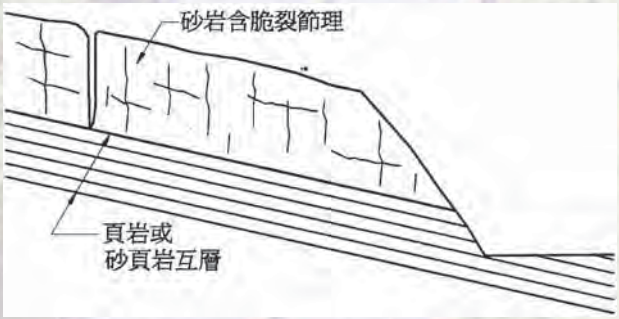
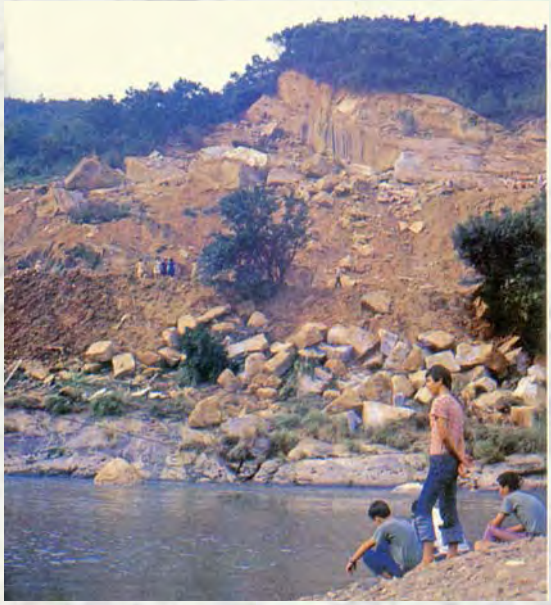


圖 2　脆裂砂岩下接頁岩或砂頁岩互層之順向坡

順向坡滑動造成的災損之所以嚴重，係因其滑動事出突然，且破壞坡體之滑動速度極高，（可能超過每小時 100 公里，或每秒 28 公尺），常難於預知，且來不及逃避，故常造成重大災害。

台灣順向坡災害的回顧

民國 30 年與 31 年，草嶺大崩山（順向坡滑動）兩次，坍方體積達二億多立方公尺，清水溪積水成潭達 10 年之久（洪，民國 69 年；洪，民國 88 年）。民國 63 年 9 月中，國道中山高速公路八堵交流道順向坡滑動（照片 1），36 人遇難（Hung, 1987）。民國 66 年 9 月 23 日，國道中山高速公路汐止收費站附近順向坡滑動（照片 2），中山高速公路交通中斷數日（Hung, 1987）。民國 68 年，草嶺大崩山，坍方體積 5 百萬立方公尺，清水溪再度積水成潭，歷時



照片 1　八堵交流道順向坡滑動（民國 63 年 9 月），36 人遇難（洪如江攝）

照片 2　中山高速公路汐止收費站附近順向坡滑動（民國 660923），交通中斷數日（洪如江攝）

照片 3　林肯大郡順向坡滑動災變（民國 860813），28 人遇難（洪如江攝）

一週。民國 73 年 6 月 3 日，台北市松山之虎山順向坡滑動，道路中斷數月。民國 86 年 8 月 18 日，台北縣汐止林肯大郡順向坡滑動（照片 3），28 人遇難（洪，民國 87 年）。民國 88 年 9 月 21 日，集集大地震，草嶺順向坡再度滑動（照片 4），坍方體積達一億二千萬立方公尺，清水溪堰塞湖體積約四千五百萬立方公尺，36 人遇難；九份二山順向坡滑動，坍方體積 3600 萬立方公尺，39 人遇難（洪等，民國 89 年 2 月；洪等，民國 89 年 10 月）。台灣最慘的一次順向坡滑動之災，應該要算民國 98 年 8 月 9 日高雄縣小林村災難（照片 5）；遇難（包括失蹤）者 491 人，大部分被順向坡滑動的土石所埋，部分被堰塞湖崩潰的洪流所害。高雄縣台 21 線公路經過順向坡路段，在莫拉克颱風豪雨侵襲時因順向坡滑動而全面崩塌（照片 6）。民國 99 年 4 月 25 日，國道 3 號在七堵附近的北坡發生順向坡滑動（照片 7 至 9），4 人遇難，引起國人廣泛注意。

草嶺大崩山，其滑動面之坡度不過 12 度至 14 度；國道 3 號的順向坡滑動，其滑動面之坡度不過 15 度左右，可知順向坡滑動，坡度未必要大。翡翠水庫壩址左岸，為一順向坡，傾角 41 度，經過妥善的工程處理，並不滑動；南港的空軍公墓，也是一個順向坡，經工程技術處理之後，也不滑動。

順向坡之滑動，也未必要有一弱面（或稱不連續面）「露空」（daylight；或稱出現自由端），虎山順向坡在滑動之前，並無露空端之出現。因此，露空端之出現，並非順向坡滑動之必要條件，更不是順向坡滑動的充分條件，但卻是順向坡滑動最常有的一種狀況。

照片 4　民國 88 年 9 月 21 日集集大地震造成草嶺順向坡滑動，36 人遇難（洪如江攝）

台灣順向坡的相關照片，請參閱洪（民國 82 年）、洪（民國 88 年）、工程地質的影像一書（洪，民國 88 年）。

順向坡剖面及作用力的示意圖

圖 3 為一個順向坡滑動岩體（rock mass）塊之單位寬度的剖面（圖 3 中的 abcd）及其作用力的示意圖；滑動岩體之單位寬度通常取垂直剖面 1 公尺從事分析。H 為

照片 5　莫拉克颱風豪雨引發順向坡滑動，小林村 491 人遇難（齊柏林攝）

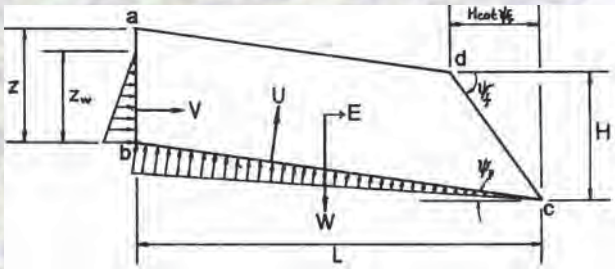


圖 3　一個順向坡滑動岩體的剖面及其作用力的示意圖（不按比例）

坡高，Z（圖 3 中之 ab）為鉛直裂縫的深度（由坡頂面至滑動面），L 為滑動面（圖 3 中的 bc）的水平長度，ψ_p 為滑動面之傾角，W 為滑動岩體之重，V 為水平向之水壓力所產生的水平推力，U 為上頂水壓力（uplift water pressure）所產生的上頂力（uplift force），E 為地震作用力。

在大部分的順向坡滑動個案中，鉛直裂縫係因滑動弱面之上的砂岩（或石灰岩），受到大地應力（tectonic stress）作用而產生兩組鉛直或近乎鉛直的脆性節理，或者因張力作用而產生鉛直之張裂縫，其下端與滑動弱面交會。又鉛直之脆性裂縫，若屬兩組或兩組以上，將提供分離面，把岩盤切割成許多小岩塊（rock blocks）。

豪雨之時或豪雨之後，雨水滲入易透水之砂岩材料及砂岩之鉛直裂縫中，產生水平推力 V 及上頂力（uplift force）U。

如潛在滑動面（圖 3 中的 bc）之露空端（圖 3 中的 c）之洩水路徑被堵（例如在坡面構築不透水之混凝土擋土牆，或擋土牆排水不良），則上頂水壓力之分佈不再是三角形而是矩形分佈，上頂力 U 就更大。又如有地震力作用，則在滑動岩體重心加上一向外作用之水平力 E。

照片 6　高雄縣台 21 線公路經過順向坡路段，在莫拉克颱風豪雨侵襲時因順向坡滑動而全面崩塌（洪如江攝）

照片 7　民國 99 年 4 月 25 日國道 3 號順向坡滑動災害的近距離側向鳥瞰照片，視角：西南向東北（連永旺空拍）

照片 8　民國 99 年 4 月 25 日國道 3 號順向坡滑動災害的現場照片（洪如江攝）

順向坡中潛在滑動面之剪力強度

估算順向坡中潛在滑動面剪力強度（τ）的模式不少（洪，民國 91 年），有些高度精緻的模式，需要多種大尺寸室內試驗與現場試驗的配合，通常在拱壩基礎穩定分析或極大規模採礦明坑邊坡穩定分析，才會應用。筆者認為採用庫倫（Coulomb, 1857）定律，加上 Terzaghi（1925）土壤力學的有效應力觀念，如式 (1)，已經足以應付絕大部分邊坡穩定分析之用。

$$\tau = c + (\sigma - u)\tan\phi \qquad (1)$$

式 (1) 之中，τ 為潛在滑動面的剪力強度，c 為凝聚力，σ 為正應力，u 為孔隙壓力，ϕ 為磨擦角。

鑑於在大部分的順向坡之中，潛在滑動面多曾經發生過或大或小的滑動，以及考慮邊坡穩定分析之時，安全係數只用到 1.5，故通常假設：

$$c = 0$$

於是

$$\tau = (\sigma - u)\tan\phi \qquad (2)$$

式 (2)，影響潛在滑動面剪力強度的因素（σ，u，ϕ）之中，σ 的變異不大；潛在滑動面若被水入侵，剩餘磨擦角 ϕ 將大幅下降，潛在滑動面剪力強度當然大幅下降；若潛在滑動面之上的岩層或土層存在鉛直裂縫（例如圖 2 所示者），則鉛直裂縫內的「水壓」及潛在滑動面的「上頂水壓」將使潛在滑動面的孔隙壓力 u 大幅度上升，潛在滑動面剪力強度當然大幅下降。

照片 9　民國 99 年 4 月 25 日國道 3 號順向坡滑動，其滑落土石前端的岩塊（洪如江攝）

阻水進入岩坡之內，將岩坡之內（尤其是各裂縫與弱面之內）的水儘速排出，是保障潛在滑動面剪力強度最有效且最經濟的方法。

順向坡穩定之重要工作項目

(1) 充分瞭解順向坡之幾何形狀。

(2) 估計滑動面（或潛在滑動面）之力學性質。

(3) 掌握地下水之季節性變化。

(4) 確定順向坡滑動之影響因素的重要性順位

(5) 檢討地震力之作用。

(6) 從事邊坡穩定分析。

(7) 選擇邊坡穩定方法並以高水準施工。

詳細項目參閱洪（民國 91 年）。

順向坡災害防治的一般性原則

預防之原則

預防重於治療。及早採取預防措施，代價最低。

避開之原則

在道路選線之時，在坡地開發計畫之中，宜避免順向坡之開挖。有時，為避免大規模順向坡之開挖，甯願改以隧道通過，甚至改道。翡翠水庫，在選擇施工、骨材運輸道路之時，決定在北岸開挖該道路，主要即在避免順向坡開挖。如無法避免開挖順向坡，應有妥善的保護措施，包括儀器監測。

排水之原則

順向坡之滑動，大多數是在發生豪雨之時或豪雨之後，因此，須使坡面（或坡頂）之水儘速排走，不令進入坡內之多孔質岩石或裂縫之內；而坡內之積水，則應儘速排走，以免降低邊坡穩定之安全係數。排水，通常也是邊坡穩定方法中最經濟、有效的一種。

預裂法開炸之原則

邊坡開挖，常需採用爆材開炸。如採用預裂法開炸（pre-splitting blasting），則開挖後之坡面，極為平整，幾乎沒有因開炸而引起破裂之岩壁，落石之可能性極少，順向坡滑動的自然阻力也比較大。

監測之原則

重要邊坡，即使加以穩定（或根據計算，其安全係數在 1.5 以上），為保證其長期穩定，必需安裝監測儀器。監測之主要項目為：

(1) 邊坡之變形或移動

(2) 地下水位或水壓之升降

若是不辦理監測工作，則常需較為保守（浪費）之邊坡穩定設計。而且，當環境有所變化，例如地震、豪雨、地下水位變化、岩石風化、等等，致邊坡之穩定性逐漸下降或突然下降，若無監測系統，則缺乏預警。再者，人為之穩定措施，例如排水系統或岩錨等，可能已失功效，也可由監測系統及早發現。而設計是否足夠、施工是否正確、計算之參數有無誤差，皆需由監測工作解答。

削坡之原則

如某一順向坡之安定性不足，削去坡頭、降低坡高，通常比結構方法便宜，而且，削坡之後，幾乎是微勞而永逸。

坡腳加重之原則

如空間許可，在坡腳處拋置石方、砂石堆、砂包、或蛇籠等等重物，效果可靠而長久。

不砍坡腳之原則（弱面或潛在滑動面不在坡面露空之原則）

順向坡，最怕坡腳（或稱坡趾）被砍斷，致弱面在坡面露空，或引起許多順向坡滑動之災變，或花費極為昂貴之岩錨加以穩定，皆非明智之舉。

緩衝之原則

在坡趾與建築或工程之間，留下適當寬度的緩衝空間。

韌性與透水性擋土結構之原則

順向坡，若使用擋土結構加以對抗，應儘量採用韌性擋土結構，例如坡腳加重、韌性地錨系統；或採用透水性良好的擋土結構，避免使被保護的邊坡積水。

順向坡穩定最有效方法效益之比較

順向坡之穩定方法甚多，前節已宣示一些原則。更具體的穩定方法，參考 FOOKS & SWEENEY（1976），大致如下：

大規模順向坡最有效穩定方法之排序

削坡、壓腳（坡腳加重）、水平排水廊道、地表防水、排水孔、排水溝、岩錨、錨定擋土牆、岩栓。

小規模順向坡

各種排水方法（但非排水廊道，因為造價昂貴）、錨定擋土牆、擋土工、岩栓、落石溝、攔石牆、清除鬆石。

民國 99 年 4 月 25 日國道 3 號順向坡滑動的學理研判

這次高速公路國道三號在七堵附近（2K + 800 ~ 3K + 100）的順向坡滑動災害，規模中等，但引起國人廣泛且高度的注意與重視，許多機關相繼加強對順向坡的檢查、監測、與加固，可以算是一項良性發展。

照片 7 為災後空拍的鳥瞰照片，為連永旺先生利用遙控直昇機所拍攝者。照片 8 至照片 9 為災後的現場照片，由筆者以簡便式數碼相機在斷橋上所拍攝。

本案順向坡所屬之地層為大寮層，為砂岩及頁岩互層構成。在現場所見之殘留泥質滑動面，判斷曾遭地表水或雨水滲入，對泥質滑動面造成潤滑作用，換言之，剪力強度降低。由於滑動並非發生於豪雨之時，判斷剪力強度之降低，係屬「漸進」（progressive）。

由滑落土石前端的岩塊（照片 9）所顯示的訊息包括：

(1) 滑動面上覆之岩層，砂岩成份居多，而砂岩的透水性遠大於頁岩者；

(2) 由岩塊自然裂開面銹染的顏色加以判斷，滑動面上覆之岩層早在滑動之前的長久時間中，已經脆裂，讓滲入之地下水所含鐵質或泥質加以塗布，或竟因風化而變色；

另由鳥瞰照片 7 之中的殘坡邊界型態加以推斷，滑動面上覆之岩層，早在滑動之前的長久時間中，已經形成「共軛節理」(conjugate joints)。共軛節理顯現在滑動岩體剖面圖 (圖 3) 中為：鉛直裂縫 ab。地表水或雨水，先流入共軛節理之鉛直裂縫或張裂縫之中，再滲入潛在滑動面，如圖 3 中的 bc。

「順向坡滑動後的治理，『削坡』(包括將殘留的山頭降挖)、『排水』、加『監測』，是最重要的工作。但本案順向坡滑動之後，能降挖的部分不多，反而要重視大範圍的山坡地穩定性。」

順向坡不一定必然滑動

(1) 順向坡滑動為台灣最常見的坍方災害之一，曾多次造成人命傷亡、公路中斷、河流積水成潭與潰潭之災害。

(2) 常見之順向坡，常發生於豚背構造一側之邊坡、脆裂砂岩下接砂頁岩互層之邊坡、混合滑動面（弱面與完整岩石）邊坡、含密集弱面之變質岩坡、崩積層或風化層下接順向岩面之邊坡、含非貫穿性弱面之邊坡。

(3) 台灣最大規模之順向坡滑動為草嶺大崩山，坍方體積高達 1 億立方公尺以上者二次，5 百萬立方公尺者 1 次，皆使清水溪積水成潭，但其滑動面傾角只有 12 度。國道中山高速公路之兩次順向坡滑動，坍方體積分別為 5 千立方公尺與 18 萬立方公尺，傾角約 25 度。翡翠水庫拱壩左翼順向坡，傾角 40 度至 41 度，經工程技術處理，並不滑動。因此，不能說坡度一超過多少度就必然滑動。

(4) 由台北虎山順向坡之例可知，弱面（或稱不連續面）露空（或稱出現自由端）並非順向坡滑動的必要條件，更不是充分條件。

(5) 岩石弱面剪力強度之理論模式有好幾個，可依個案之規模與重要性選用之，並應考慮規模效應。已發生之坍方，都是以反算法（back analysis）求剪力強度的最佳機會，應儘量利用之。

(6) 平緩至中等傾斜之順向坡，受靜力之作用，其潛在滑動面若為首次受剪，剪阻力非常大，難以滑動；其潛在滑動面若為粗糙岩面對粗糙岩面（例

如砂岩節理面）的接觸，因滑動面之粗糙度對摩擦角的貢獻（10 度以上），增加剪力強度，也是難以滑動。國道中山高速公路汐止收費站附近北側順向 坡滑動前，層面（潛在滑動面）已經開裂（HUNG, 1987）；義大利 Vajont 水庫順向坡滑動之潛在滑動面，在 1963 年滑動之前，早已經過多次滑動。故大多數順向坡滑動之分析，只考慮剩餘剪力強度，而且常假設 $c = c_r = 0$。

(7) 砂岩（或石灰岩）下接頁岩（或泥岩）之順向坡滑動，其滑動面其實不發生在砂、頁岩之界面，而發生在界面下頁岩層頂部內，因頁岩浸水之後，剪力強度大為降低，且遠低於砂、頁岩界面者。

(8) 排水，降低坡內之水壓，永遠是最有效且最經濟的穩定方法。因此，護坡工程完工後，必須以監測儀器充分掌握坡內之水位及水壓之變化及排水系統之有效性。一般而言，排水孔在安裝後的幾年之後，常被堵塞，必須加以維修或更新。大雨之時或之後，排水孔不見出水，就是一大警訊。

(9) 岩層順向坡，一但滑動，其下滑速度可達每小時一百公里以上，人車皆難逃脫。如採人工結構抵擋，宜採韌性結構、易排水之結構。

(10) 筆者一向認為：邊坡穩定分析，在確定影響穩定的主要變數之後，應辦理敏感度分析，以明白某一重要變數（例如水壓、摩擦角）的單位變化，會引起邊坡穩定安全係數的多大變化。筆者曾經以國道中山高速公路汐止收費站附近順向坡滑動為例，加以示範（洪，民國 91 年）。

(11) 民國 99 年 4 月 25 日，國道 3 號在七堵附近的順向坡滑動，判斷曾遭地表水或雨水滲入，對泥質滑動面造成潤滑作用，換言之，剪力強度降低。由於滑動並非發生於豪雨之時，判斷剪力強度之降低，係屬「漸進」(progressive)。「一般而言，順向坡滑動後的治理，『削坡』(包括將殘留的山頭降挖)、『排水』、加『監測』，是最重要的工作。但最近國道 3 號的順向坡滑動之後，能降挖的部分不多，反而要重視大範圍的山坡地穩定性。」

參考文獻

1. 洪如江（民國 69 年），草嶺大崩山之探討，**工程環境學會會刊**，第一期，第 29~39 頁。
2. 洪如江與翁作新（民國 75 年，77 年），**砂頁岩順向坡力學性質與穩定性之研究（一）與（二）**，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 74-55 號與 76-40 號。
3. 洪如江等七人（民國 78 年，79 年），**變質岩順向坡力學性質與穩定性之研究（一）與（二）**，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 77-47 號與 78-52 號。
4. 洪如江等八人（民國 82 年），**中橫公路岩坡安定科技綜合研究（二）**，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 81-43 號。
5. 洪如江（民國 82 年），台灣的順向坡滑動，**地工技術**，第 44 期，第 106~113 頁。
6. 洪如江（民國 87 年），坡地建築之破壞，**地工技術**，第 68 期，第 129~142 頁。
7. 洪如江（民國 88 年），再訪順向坡，**地工技術**，第 71 期，第 99~112 頁。
8. 洪如江（民國 88 年），草嶺大崩山之歷史性照片，**地工技術**，第 76 期，第 113~124 頁。
9. 洪如江（民國 88 年），**工程地質的影像**，財團法人地工技術研究發展基金會發行。
10. 洪如江、李錫堤、林美聆、林銘郎、鄭富書、陳正興（民國 89 年 2 月），天塹可以飛渡、崩山足以斷流（草嶺順向坡滑動），**地工技術**，第 77 期，第 5~18 頁。
11. 洪如江、林美聆、陳天健、王國隆（民國 89 年 10 月），921 集集大地震相關的坡地災害、坡地破壞特性、與案例分析，**地工技術**，第 81 期，第 17~32 頁。
12. 洪如江（民國 91 年），順向坡之破壞與穩定，**地工技術**，第 94 期，第 5~18 頁。
13. FOOKS, P.J. & M. SWEENEY（1976）, Stabilization and Control of Local Rock Falls and Degrading Rock Slopes, **Q. Jl. Engg. Geol.**, 9:37~55.
14. HOEK E. & J.W. BRAY（1977, 1980, 1981）, **Rock Slope Engineering**, IMM, London.
15. HUNG Ju Jiang（1987）, Landslides and Related Researches in Taiwan, **Memoir of the Geological Society of China**, 9:23 ~ 44.
16. HUNG, J. J. & T.T. LEE（1990）, A Study on the Shear Strength of Rock Joint of Partial Continuity, **Rock Joints**, Barton and Stephanson（Eds.）, Balkema, Rotterdam.
17. HUNG Ju Jiang and LEE Tzong Te（1991）, Failure and stability of dip sliopes in Taiwan, Chapter 15 of **Neotectonics and Resources**, edited by John Cosgrove and Mervyn Jones, Belhaven Press, London.
18. SKEMPTON, A.W.（1964）, Long Term Stability of Clay Slopes, **Geotechnique**, 14:77 ~ 101.