

砂岩與頁岩之邊坡穩定問題

SLOPE PROBLEMS IN SANDSTONE
AND SHALE FORMATION

胡 邵 敏

亞新工程顧問公司
大地工程部副經理

S.M. WOO

Associate and Deputy Manager
of Geotechnical Engineering
Moh and Associates

本文為六十八年邊坡穩定與坍方研討會專題講演
原載於研討會論文專集，第 117 - 145 頁

Reprinted from

*Proceedings, Seminar on Slope Stability
and Landslides, 2-4 April 1979, Taipei*

pp. 117 - 145

*Chinese Institute of Engineers
Chinese Institute of Civil & Hydraulic Engineering*

ABSTRACT

In the island of Taiwan, over four-fifth of the land area is hilly or mountainous. Due to the limited availability of plain areas, utilization of slope land for housing and industrial development becomes more popular in recent years. Problem of slope stability is the utmost important consideration for these developments. Many slope failures or landslides have occurred in the past few years.

Geologically, about one-fourth of the total land area in Taiwan is composed of interbedded sandstone-shale formation. They are distributed in the Western foothill region of the island where numerous faults are also concentrated. This paper presents the engineering characteristics of the sandstone-shale formation in Taiwan. Discussions are presented on the causes of landslides and special characteristics of slopes composed of this type of formation. Methods of slope stability investigation and design are also described.

一、緒言

本省面積五分之四屬於山嶺或丘陵。近年來人口激增，有限之平原地區已不敷使用，活動居住範圍漸向山區擴張，因而山坡地之開發，日漸普遍。開發山坡地、邊坡穩定問題當為首要之安全顧慮。

綜觀本省之山嶺或丘陵地區，地質構造層於砂岩與頁岩互層者頗廣，概略估計約佔本省總面積四分之一，分佈在中央山脈與西部海岸平原間之麓山帶，從北延伸至南，如圖一所示。砂頁岩分佈區域，不幸亦為本省斷層密集區，因此，山坡地開發上，砂頁岩之邊坡穩定問題，尤應特別注意。

近年來砂頁岩邊坡崩坍之例頗多，漸為工程師所重視。本文主旨在介紹本省砂頁岩之工程性質，進而研討此類邊坡之崩坍原因及特性，穩定調查方法及設計要點。

二、臺灣砂頁岩之工程性質

1. 形成

本省之砂頁岩層形成於中新世，係由碎屑沉積物連續堆積而成。根據何春霖（1975）記載此地層厚度最大可達 5,500 公尺左右。在臺灣北部厚層或塊狀的砂岩非常顯著，愈向南就漸變為較厚的頁岩或泥質地層。林朝榮、周瑞燉（1974）亦記載云：「中新世地層之厚度沿臺灣西北部海岸約達 3,000 公尺，自此向東南及南逐漸增厚，隨堆積物之增厚，頁岩百分比逐漸增高，而砂岩之顆粒逐次變細，此現象表示砂質物主要來自北及西北方。」由此可見本省中北部地區砂頁岩互層較多，而中南部地區則為厚層之泥岩頁岩。

砂岩及頁岩均為沉積岩，其形成過程是因顆粒受壓力及膠結作用而結成塊狀。砂岩之顆粒組成為砂粒，其膠結作用可分二類：

- (1)砂岩中原有顆粒在含砂溶液中，因受砂之結晶作用而滋長連結；
- (2)砂顆粒間空隙受滲流水中沉積物膠結，例如矽酸鹽、氧化鐵及碳酸鹽等。

砂岩又可按其膠結物之不同而分成：

- (1)砂質砂岩——由矽酸鹽膠結或結晶而成之砂岩，含石英量甚高，質極堅硬，耐風化；
- (2)鐵質砂岩——由氧化鐵膠結砂粒而成，呈紅棕色，亦極堅硬；
- (3)鈣質砂岩——膠結物為方解石（calcite），方解石遇酸易被溶解，極易風化而鬆散；
- (4)泥質砂岩——膠結物為粘土，粘結力量弱。

由鈣質或泥質膠結之砂岩，強度較弱，容易崩解。本省之砂岩，大多歸屬此類。

頁岩及泥岩屬於沉積岩之一種。當初沉積時，含水量很高，在覆蓋沉積逐漸增厚，覆蓋壓力增大，孔隙水被排出而成固結現象。最後受到不同程度之膠結而形成泥岩或頁岩。至於泥岩和頁岩之分別，HOLMES（1965）指出泥岩是一種密實（compact）結構狀態而頁岩

則是薄片層結構。頁岩具有明顯之分層。頁岩或泥岩之起源過程，可由圖二說明之。

頁岩按其組成顆粒大小分類，可區分為粘土質頁岩，粉土質頁岩及砂土質頁岩。UNDERWOOD (1976) 則按頁岩之組成及性質分成兩大類：一類是土狀頁岩 (soil-like shale)，另一類是岩狀頁岩 (rock-like shale)，其詳細分類如圖三所示。土狀頁岩與岩狀頁岩之主要分別是由於形成過程不同，土狀頁岩靠其上土層之覆蓋壓力達成粘結與壓密，顆粒間缺乏膠結物。岩狀頁岩則含大量的膠結物質，例如石灰質、砂質、鐵質等膠結物質。因此，土狀頁岩遇水後容易崩解 (slaking) 岩狀頁岩因含有膠結物，較為堅硬，不易崩解，臺灣北部之頁岩多為粉土質頁岩，含有膠結力較弱之碳酸物。

2. 指數性質

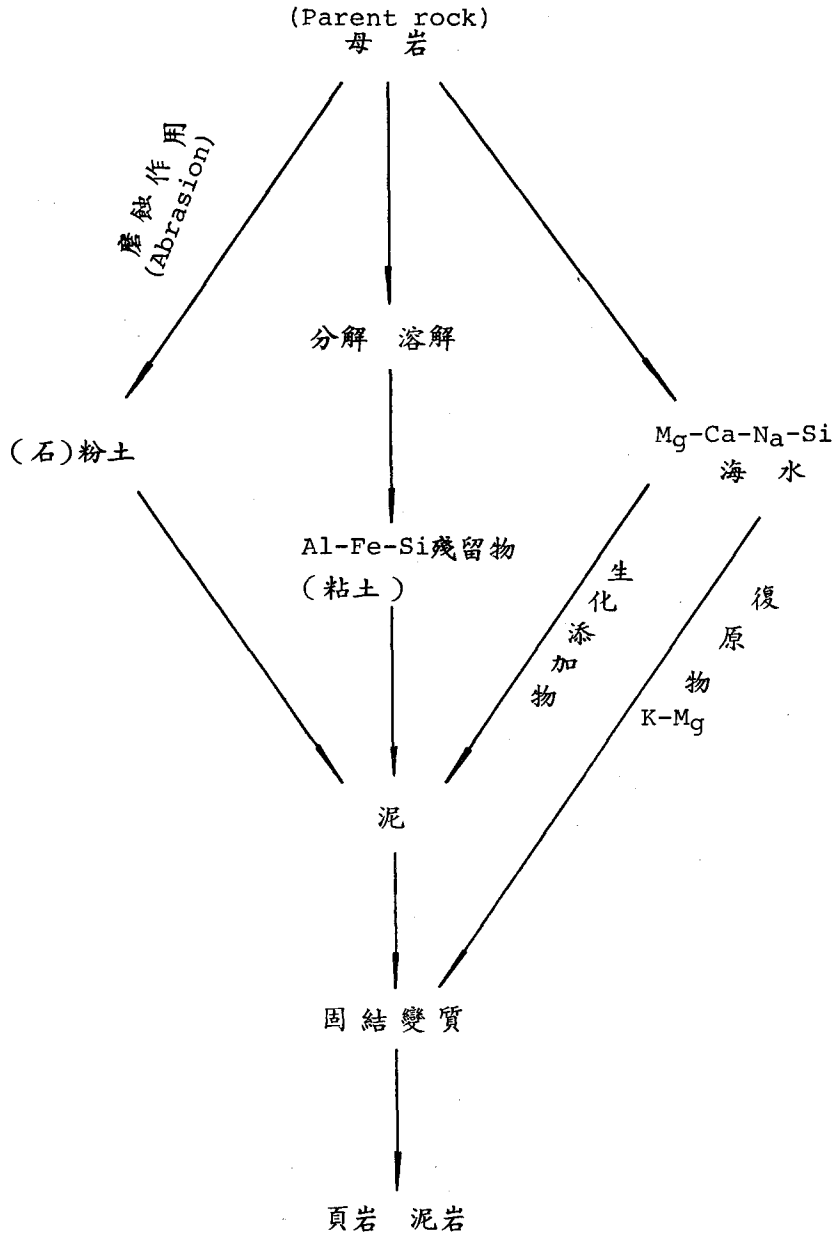
根據周瑞燉、吳福泰等人之研究 (見表一)，臺灣砂岩之組成顆粒，一般直徑均在 0.06 mm 至 0.5mm 之內，顯示組成屬於細砂至中砂，顆粒圓度屬次圓 (subrounded or subangular)，組成顆粒級配 (gradation) 良好，亦即地質學上淘選 (sorting) 不良。由臺灣北部五處不同地點採樣所作粒徑分析試驗結果示如圖四，其平均粒徑， D_{50} 為 0.07 mm 至 0.4mm，均勻係數 (coefficient of uniformity) 均超過 4，證明顆粒級配良好。比重平均在 2.68 左右。

臺灣地區之頁岩或泥岩，其粉土含量大多超過 50%，表二示各地點採樣試驗之結果。頁岩泥岩遇水分解後，其性質類似粘土，具塑性。圖五繪出臺灣頁岩泥岩在塑性分類上，屬於低塑性粘土。未風化之頁岩泥岩，其塑性性質甚相似，顯示粘土礦物差異不大。由塑性指數 (plasticity index) 與粘土量之比得知頁岩泥岩之活性比 (activity) 甚接近 1.0，證明粘土礦物屬於伊利石 (illite) 和綠泥石 (chloride) 之類。關於臺灣頁岩之粘土礦物在林朝榮、周瑞燉 (1974) 一書中，亦有類似載述。

3. 強度特性

影響砂岩頁岩強度之主要因素，可概列表三。臺灣砂岩之顆粒為中砂至細砂，已於上節中論及。關於膠結物之含量，據林朝榮、周瑞燉 (1974) 記載：臺灣西部上部新生代砂岩內之主要碳酸鹽為碳酸鈣，尤以方解石為多，其他有少量之碳酸鎂及碳酸鐵。碳酸鹽含量視沉積環境而定。臺灣西部中新世大寮層、湊合層、南港層與桂竹林層及上新世卓蘭層砂岩之碳酸鹽平均含量為 8.51% 至 10.78% (重量比)，而中新世五指山層、木山層、石底層及南莊層砂岩之碳酸鹽含量則只有 2.04% 至 6.83%。由於碳酸鹽之含量並不高，故砂岩之單軸壓縮強度均不強。由各區之砂岩試樣飽和後測試之單軸壓縮強度，依 HOEK 和 BRAY (1974) 及左天雄 (1974) 之軟岩分類法如圖六及圖七，均證明臺灣大部份地區之砂岩均屬於軟弱岩類。

砂岩之單軸強度，亦受岩樣飽和度之影響。圖八示岩樣強度隨飽和度之增加而減少。飽



圖二 頁 岩 之 形 成

粉岩 + 裂面 (Fissility) → 頁岩
 泥岩

土狀頁岩
 (壓密作用)

粘土質頁岩 { 含粘土 $\geq 50\%$ }

粉土質頁岩 { 含 25~45% 粉土 }

砂土質頁岩 { 含 25~45% 砂土 }

黑頁岩 { 富有機物 }

石狀頁岩
 (膠結作用)

粘土鍵結頁岩 { 粘土礦物
 再結晶或成固結變質鍵 }

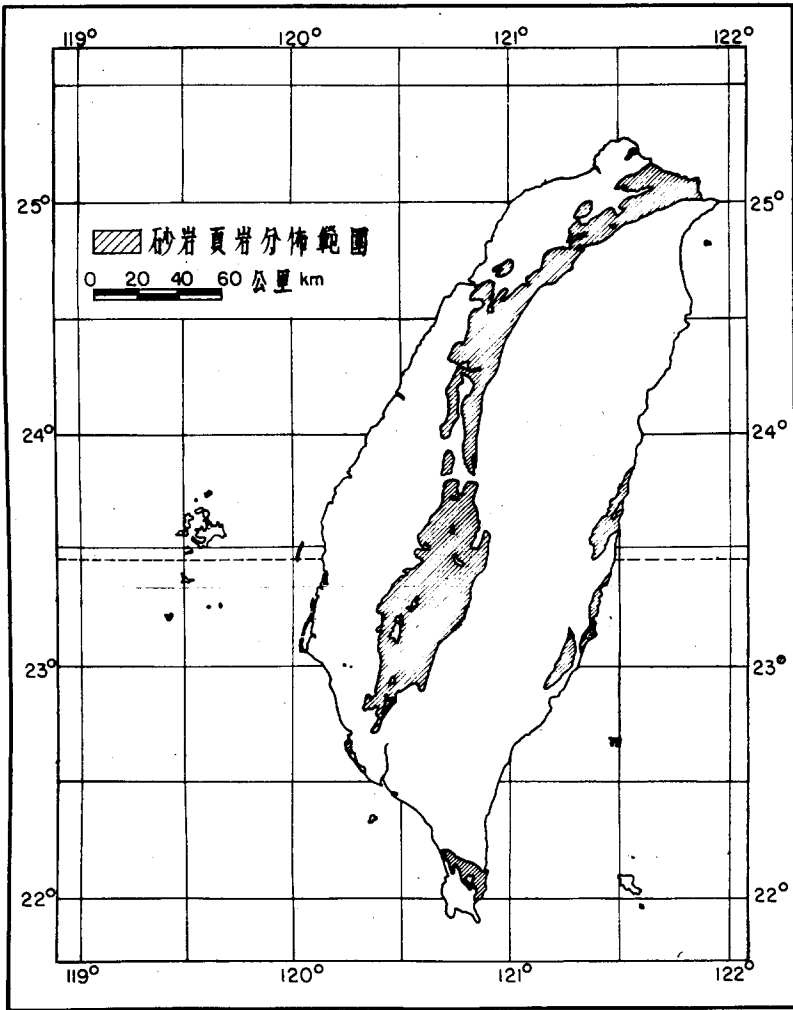
石灰質頁岩 { 含 CaCO_3 20~35% }

矽質頁岩 { 含 70~85% 矽石 }

鐵質頁岩 { 含 Fe_2O_3 25~35% }

碳酸質頁岩 { 含碳酸物 3~15% }

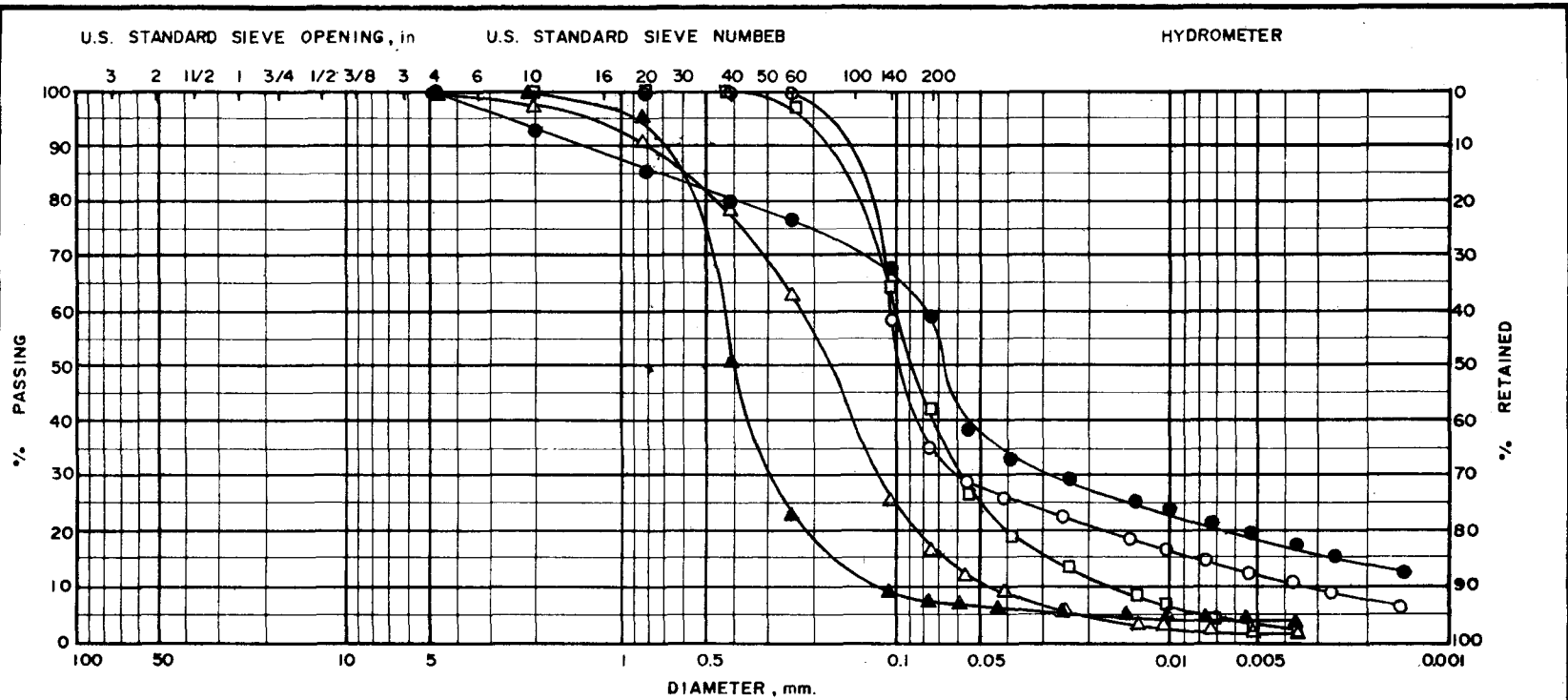
圖 三 頁 岩 之 性 質 分 類



圖一 台灣省砂岩頁岩分佈圖

表一 台灣砂岩之粒徑大小

層次	地點	粒徑 mm	圓度	淘選 (Sorting)	參考
卓蘭層	台中	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	—	周瑞燉(1971)
桂竹林層	台中	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	—	周瑞燉(1971)
南莊層	台中	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	—	周瑞燉(1971)
湊合層	台灣北部	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	Subangular Subrounded	不良	周瑞燉(1964)
觀音山砂岩	台中	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	—	周瑞燉(1971)
打鹿頁岩內副石英砂石	苗栗	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	Subrounded	不良	周瑞燉(1965)
打鹿頁岩內副石英砂岩	台灣北部	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	Subrounded	不良	周瑞燉(1976)
北寮層	台中	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	—	周瑞燉(1968)
石底層	台灣西部	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	—	周瑞燉(1976)
木山層	苗栗	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	Subangular Subrounded	不良	吳福泰(1967)
五指山層	苗栗	$\frac{1}{8}-\frac{1}{4}$	—	不良	吳福泰(1967)



ASTM	GRAVEL	COARSE SAND	MEDIUM SAND	FINE SAND	SILT	CLAY
------	--------	-------------	-------------	-----------	------	------

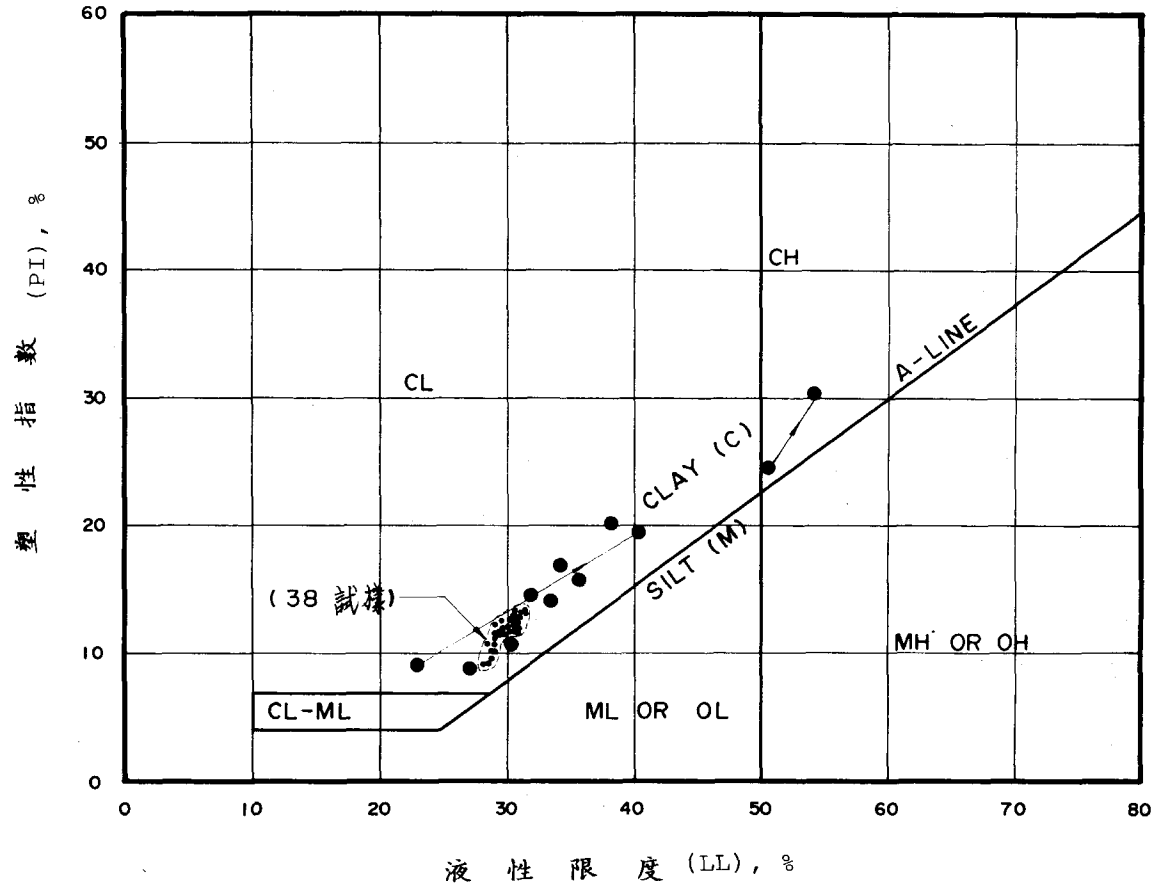
HOLE NO.	SAMPLE NO.	SAMPLE DEPTH, m	REMARKS	HOLE NO.	SAMPLE NO.	SAMPLE DEPTH, m	REMARKS
高捷公路 14K N			●	高捷公路 128K N			△
高捷公路 16K N			○	榮 總			▲
高捷公路 19K N			□				

圖四 台灣北部砂岩顆粒分布曲線

表二 台灣頁(泥)岩之顆粒組成含量

採樣地點	砂土 ($> 74\mu$)	粉土 ($5-74\mu$)	粘土 (5μ)	備註
高速公路 14 KN	23	66	11	
高速公路 19 KN	29	70	1	
高速公路 128 K	10	63	27	
瑞芳—哩咾	34	46	20	
榮總醫院	20	51	29	
恒春—馬鞍山	1-12	49-60	32-49	38試樣
台南—玉井	5	79.2*	15.8*	莊長賢(1976)
台南—關廟	6	78.3*	15.5*	蔡國華(1978)
台南—左鎮	10	66*	24*	蔡國華(1978)

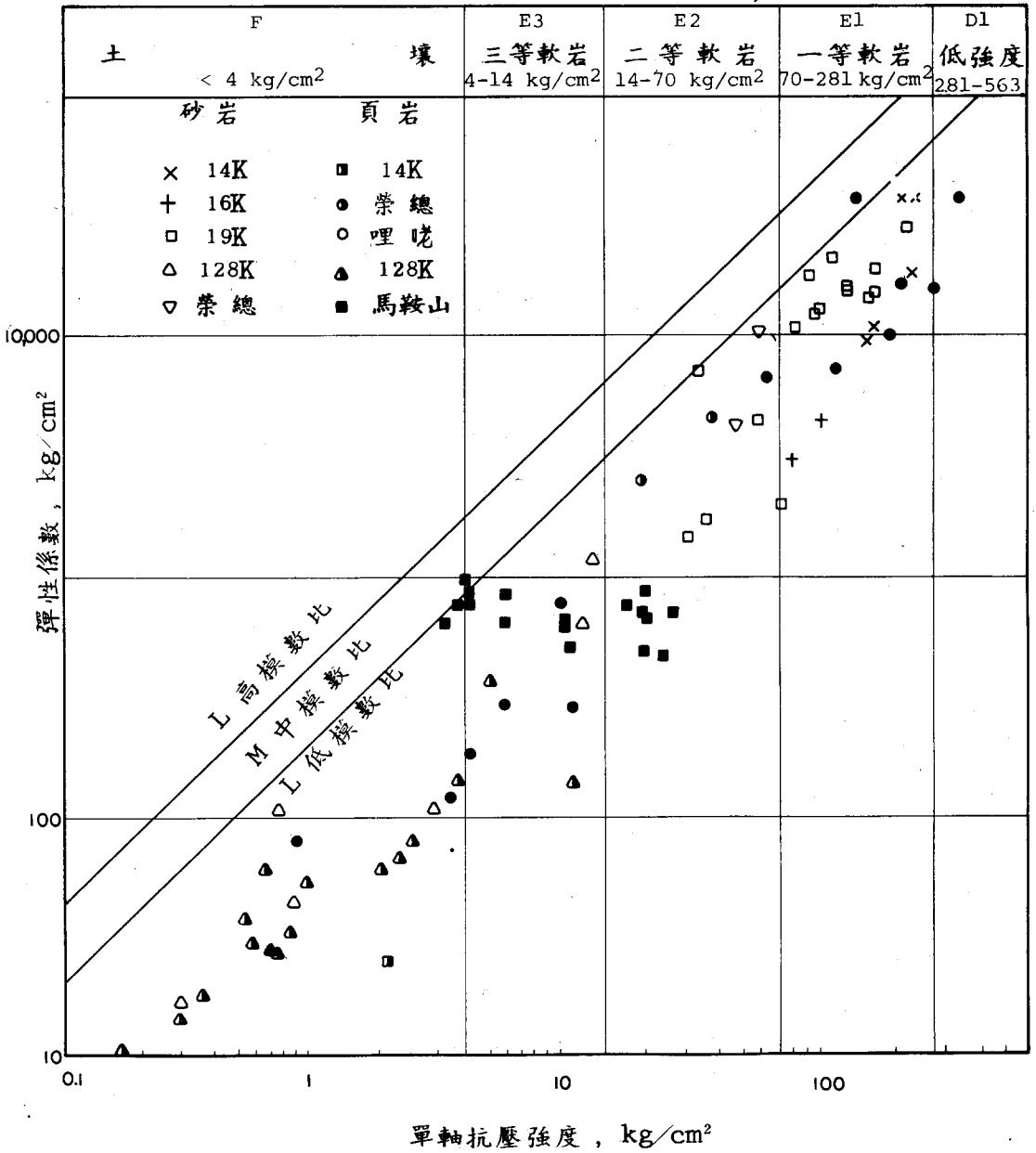
*粘土為 $< 2\mu$ 顆粒粉土為 $2\mu-74\mu$ 顆粒



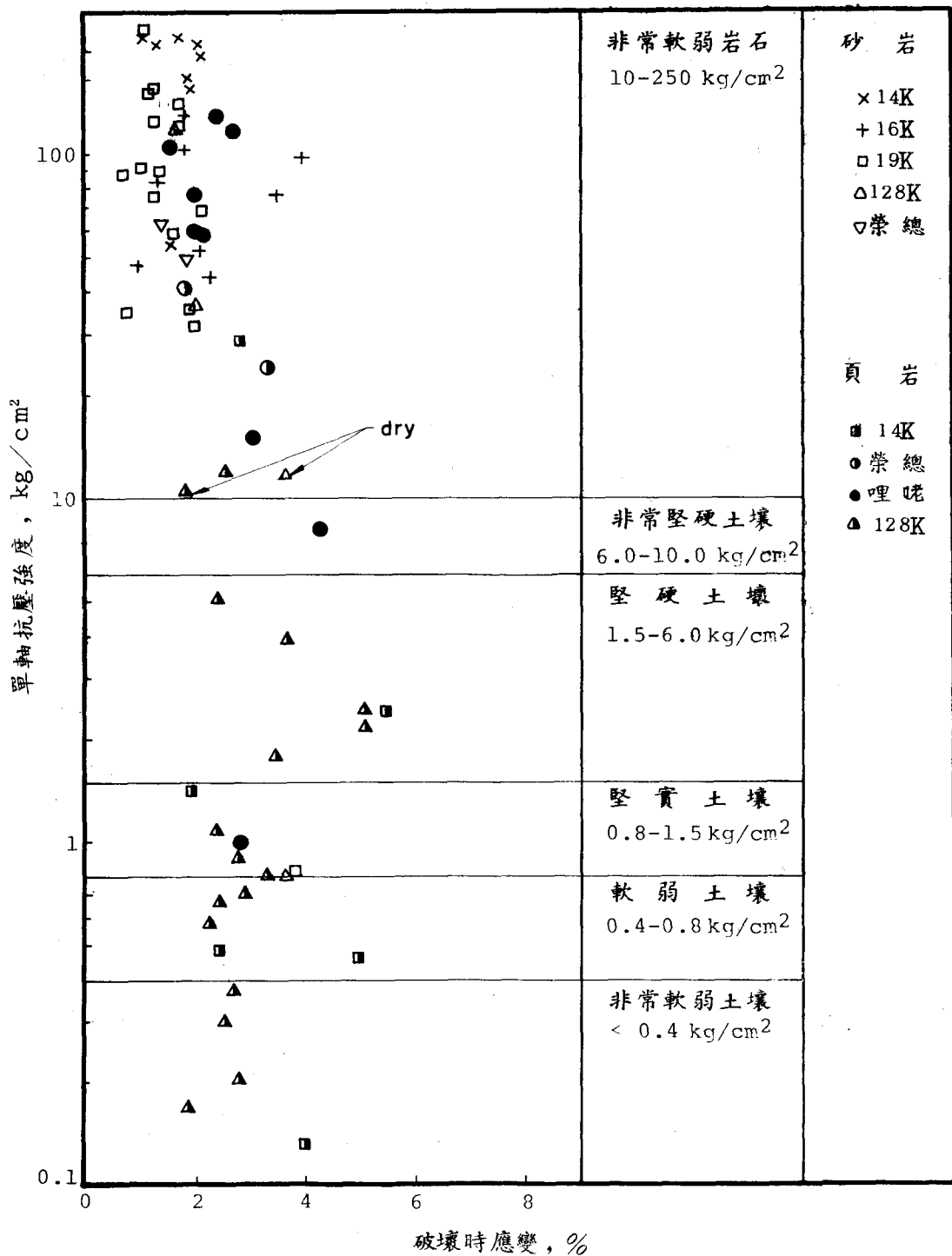
圖五 台灣頁(泥)岩之塑性

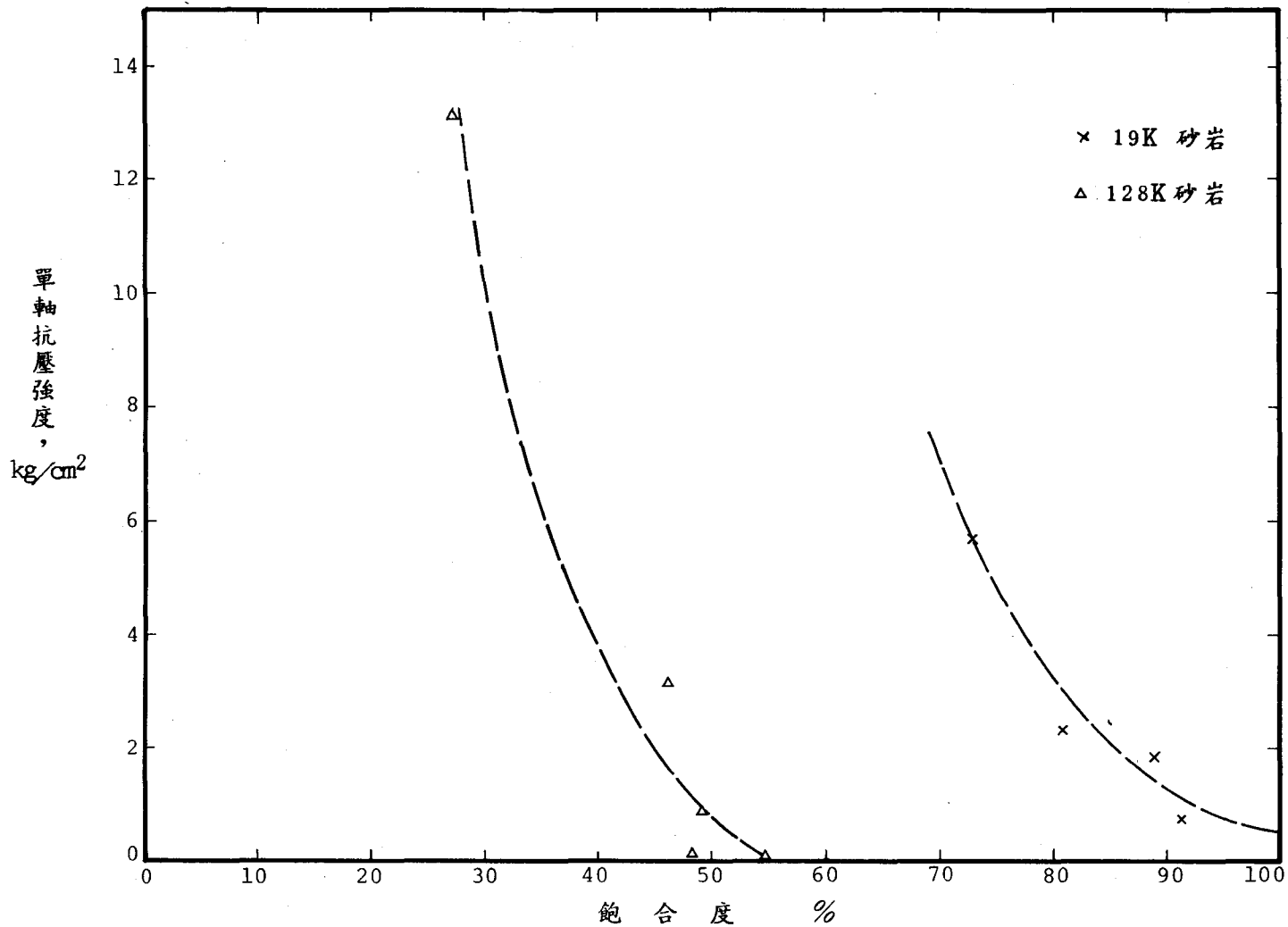
表三 影響砂岩與頁岩強度之主要因素

因 素	影 響
1. 顆 粒 大 小 ， 級 配	摩 擦 力
2. 膠 結 程 度	膠結力， $Si > Fe > Ca > 粘 土$
3. 膠 結 物 量	越 多 越 強
4. 節 理 分 佈	沿節理破壞，強度較低
5. 飽 和 度	飽和試體，強度較低
6. 風 化 程 度	風化作用降低砂頁岩強度
7. 粘 土 礦 物	親水性礦物，易吸水變弱
8. 地 質 年 代	年代越久，強度較高



圖七 岩石及土壤之強度分類





圖八 砂岩強度與飽和度之關係

和度對強度之影響，包括外視凝聚力 (apparent cohesion) 之減弱及膠結物之軟化。膠結力量甚弱之砂岩遇水後即呈鬆散狀態。

砂岩若沿節理或層面剪斷，其強度又比完整岩塊為低。此種沿節理面剪斷之形態，以直接剪力試驗最為方便，表四數據顯示沿節理面之有效摩擦角， ϕ' 約在 25° 至 30° 左右，而完整岩塊之 ϕ' 則高出甚多。

頁岩之強度大小，亦決定於含泥量及膠結物多寡。由臺灣數處地區取樣試驗而得之強度示如圖六及圖七。可見堅硬之頁岩，單軸強度可達 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ ，軟弱之頁岩，其強度則只有 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 。頁岩因含有明顯層面及微裂結構，故沿此等不連續面所得之剪力強度較低，一般而言，其有效凝聚力， c' 約為 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ ，有效摩擦角， ϕ' 只有 20° 至 25° 。

4. 透水特性

砂岩及頁岩之透水特性，頗有差異。由臺灣各區選取之完整岩樣試驗得之透水性結果繪於 HOEK 和 BRAY (1977) 之岩石透水性分類表 (表五)，可見臺灣之頁岩層透水性極低，而砂岩則透水良好，與其他地區之砂岩比較，本省之砂岩透水性屬於良好類。更由於岩層上節理、層面錯綜複雜，故透水性可能更為增加。

三、砂岩頁岩邊坡崩坍之原因

本省砂岩頁岩邊坡崩坍之原因，可分為地質因素、外在因素及內在因素三項：

1. 地質因素

本省砂岩頁岩所分佈之中央山脈麓山帶，亦為本省斷層密集帶，因此邊坡岩層受斷層活動帶來之地震、擠壓、剪斷等影響很大，致使節理發達。麓山帶之平均坡度在 15° 至 30° 間，地質構造所形成之層面多呈傾斜狀態。由於砂頁岩成互層，性質軟硬不等，在地殼活動影響下，互層間層面易生錯動。本省砂頁岩互層之山嶺，多為同斜嶺 (monocline)，即一邊山坡與地層傾角相同，是為順向坡 (dip slope)，另一坡與地層傾斜方向相反，成懸崖狀之反斜坡 (escarpment)。

此外，由於砂頁岩之膠結物含量均不高，致使岩質軟弱。

2. 外在因素

邊坡崩坍時，可視為邊坡上破壞面 (failure surface) 之平均剪應力超過其平均剪力強度。TERZAGHI (1960) 提出邊坡崩坍之內在因素及外在因素。外在因素是促使邊坡上剪應力增大者，而內在因素則係使邊坡之剪力強度降低者。內外因素均能引起邊坡之滑動。引起邊坡剪應力增高之因素有：

(1) 邊坡側向支承力之消除——例如道路挖方，建築基地開挖，河川對坡脚之侵蝕，擋土

表四 砂岩之強度參數

取樣地點	岩樣	c' , kg/cm ²	ϕ' , deg.	試驗	參 考
高速公路 16KN	I	2.7-4.4	56.2-69.7	TC	
高速公路 16KN	U	0.1-2.2	41.4-54.3	TC	
瑞芳哩哇	U	0.08	26.2	DS	
高速公路 19KN	U	0	26.5-28.5	DS	
高速公路 128K	I	0-0.18	42.5-54.0	TC	
	U	0-0.08	31.0-34.0	TC	
	U	0.2-0.3	26.0-31.5	DS	
砂 岩	U	0	25-35	DS	BARTON (1973)
砂 岩	I	0.5-1.5	45-50		HOEK (1970) HOEK & BRAY (1974)
砂 岩	D	0	27-38		
砂 岩	U	0	25-34		

I: Intact

D: Discontinuity

U: Ultimate

DS: Direct Shear

TC: Triaxial Compression

表五 各類岩石之透水性

k-cm/sec.	透水性	完整岩石	破碎岩石	本省岩樣試驗結果
10^{-10}	接近不透水	板岩 白雲石 花崗岩		頁岩
10^{-9}				
10^{-8}				
10^{-7}	低流量 排水不良	石灰岩	砂岩	砂岩
10^{-6}				
10^{-5}				
10^{-4}	高流量 排水良好		泥填節理	
10^{-3}				
10^{-2}				
10^{-1}			含節理岩石	
1.0				
10^1				
10^2			嚴重破碎岩石	

資料來源：HOEK 和 BRAY (1977)

牆之拆除等；

(2)邊坡側向壓力之增大——例如岩層裂縫充水，岩縫水結水膨脹，岩石本身吸水膨脹等；

(3)外力之增加——例如地震力，震動力，邊坡上興建建築物或堆積廢土礦渣等。

3. 內在因素

降低剪力強度之因素有：

(1)風化作用使岩石分散，降低其凝聚力；

(2)粘土礦物之水化作用，含水量增加，岩體膨脹軟化；

(3)岩層水壓力升高，有效壓力降低；

(4)顆粒間膠結物溶解；

(5)邊坡受外力或內力之變化，產生逐漸性破壞 (progressive failure)，使岩體強度由尖峯強度降至殘餘強度；

(6)岩體強度受循環性因素影響而降低；例如熱脹冷縮、晴雨季節及水位升降等。

上述之內外因素，均與水有密切關聯。本省之頁岩除屬於軟弱岩類外，亦具很高之膨脹性，頁岩試體之自由膨脹量平均約在 3% 至 10%，在覆蓋壓力下之膨脹量亦達 3%，可見頁岩中粘土礦物和水有極高之親和力。綜合本省頁岩之工程性質，依表六內 UNDERWOOD (1967) 之分類，證明邊坡穩定之各類問題，主要由於頁岩之性質不良所引起。

四、砂頁岩邊坡崩坍之形態

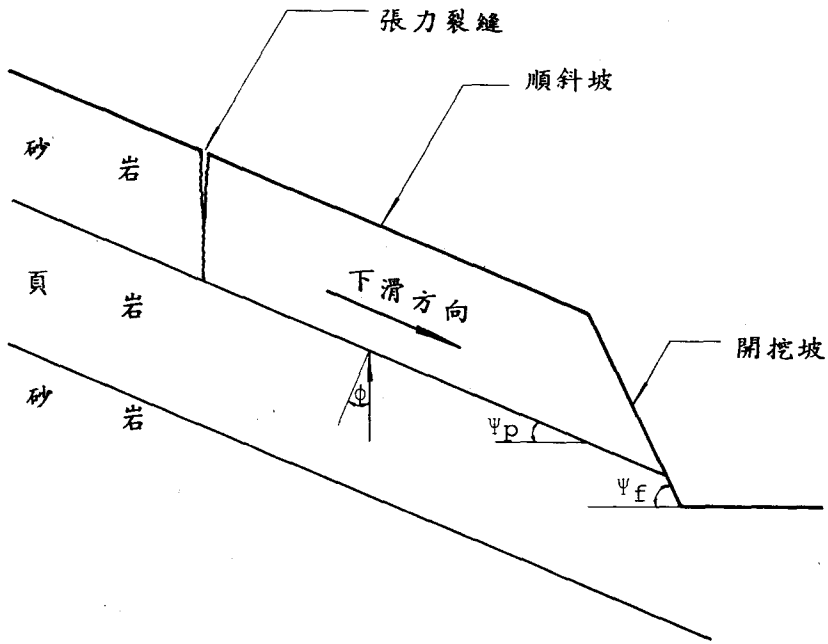
本省砂頁岩邊坡之崩坍形態，概可分為板狀崩滑 (plane failure)、楔狀崩滑 (wedge failure) 及落石 (rockfall)，在南部之厚泥岩地區，崩滑有時呈圓弧狀。

1. 板狀崩滑

構成板式崩滑之條件見圖九。在一砂頁岩互層之順斜坡上，坡腳處為開挖坡，開挖坡之坡度較順斜坡之傾斜角為大，因此上層岩體之下滑趨勢，必須由砂頁岩層層面之剪力強度抵抗。若傾斜角較岩體之內摩擦角為大，而層面無凝聚力，則岩體有滑落可能。當傾斜角較岩體之內摩擦角為小，但岩體有外力作用（如裂縫水，地震力）下，仍有下滑可能。板狀崩滑之上方，常有張力縫，可以積存水壓。HENKEL (1967) 曾載述在 -10° 之砂頁岩邊坡上（圖十），若砂岩積存有地下水壓，則邊坡之穩定度，視頁岩之強度而定。越靠近邊坡之邊緣處，所須要之強度越高，亦即在靠近邊坡之邊緣處，其剪應力最高。若超過頁岩之尖峯強度，可引導邊坡至殘餘狀態。近年高速公路之里程 14KN，16KN，19KN，八堵交流道及頭份珊瑚潭等邊坡之崩滑，皆由於連續豪雨，使頁岩軟化而產生板狀崩滑。

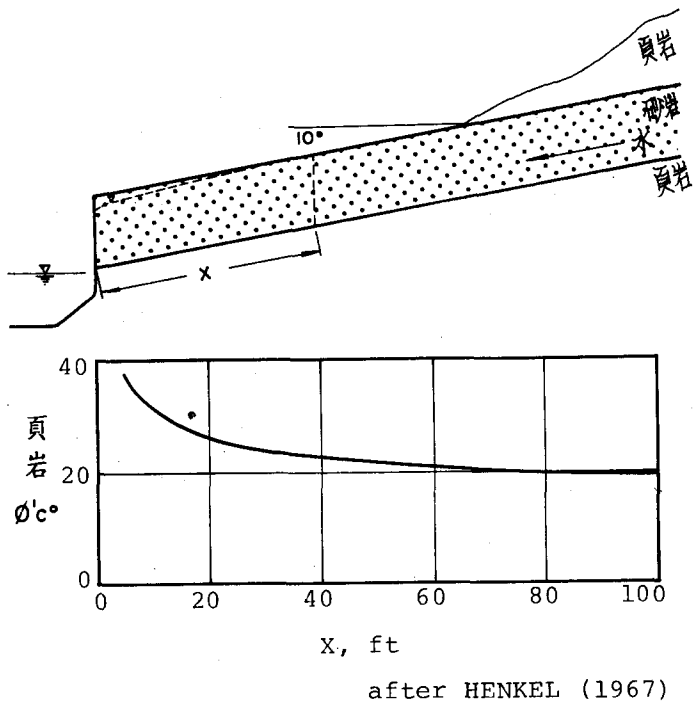
表六 本省頁岩工程性質與邊坡穩定問題之關係

工程性質	一般頁岩 UNDERWOOD (1967)		本省頁岩		可能發生之邊坡穩定問題			
	不利範圍	有利範圍	平均	在不利範圍	穩定	高水壓	崩解	冲刷
抗壓強度 kg/cm ² '	3.5-20	20-350	0.1-6	是		✓		
凝聚力 kg/cm ² '	0.35-7	> 7	0-5	是	✓		✓	✓
內摩擦角 deg.'	10-20	20-65	26-30	否				
膨脹量 %'	3-15	1-3	> 3	是	✓			✓
透水性 cm/sec'	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁷	> 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷	是	✓	✓	✓	
粘土礦物	蒙脫土 伊利土	高嶺土 綠泥石	伊利土 綠泥石	是	✓	✓		
活性比	0.75-2.0	0.35-0.75	≐ 1.0	是	✓			
應力狀態	> 現存 覆蓋壓力	○ 現存 覆蓋壓力	過壓密	是	✓			

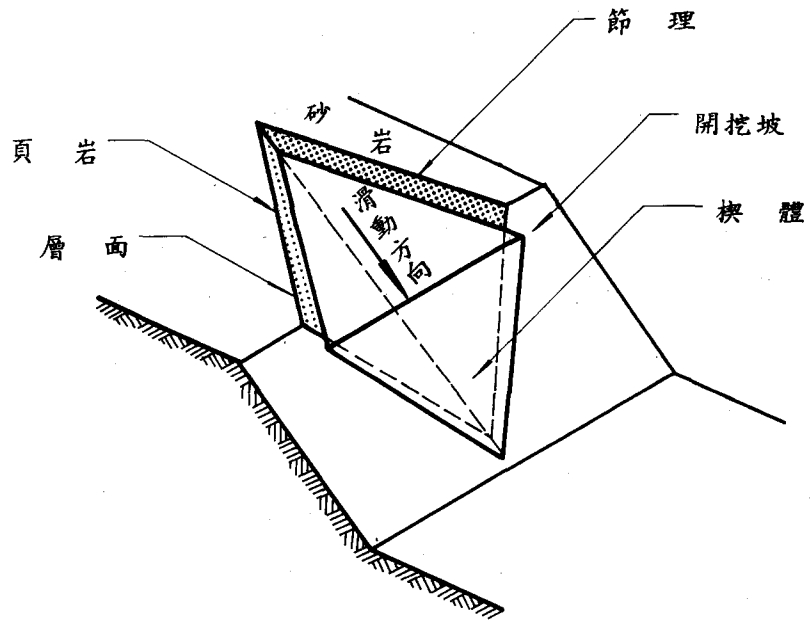


	無外力作用	有外力作用
滑動時	$\Psi_f > \Psi_p \geq \phi$	$\Psi_f > \Psi_p \geq \phi$

圖九 砂岩頁岩互層邊坡之板式崩滑



圖十 頁岩之有效摩擦角 $\phi'c^\circ$ 與 X 之關係曲線



圖十一 楔狀崩滑

2. 楔狀崩滑

當砂頁岩層中有兩組相交之不連續面，例如層面節理，則不連續面上岩塊，可沿兩面之交接線滑動如圖十一。在開挖邊坡上，開挖坡之坡度須較交接線之角度為大，才能形成楔狀崩滑，楔狀岩體之下滑力量，由兩不連續面上之摩擦力抵抗。在砂頁岩層中，常見之楔形滑動為砂岩塊沿頁岩層面及砂岩之節理間滑動。高速公路苗栗段 128K 附近借土邊坡之崩滑，為典型之楔狀崩滑。

3. 其他型式之崩滑

砂頁岩層中，由於強度並不一致，耐風化之程度亦異。在天然之邊坡上或人工開挖面上，經過長時間之風化作用，頁岩率先軟化剝落或被雨水淘空，頁岩上層之砂岩塊因失却支撐力而滾落，形成落石。（圖十二）

厚層之頁岩，可能沿表面風化層滑動，或局部性之圓弧滑動。膠結不良之頁岩或粉砂岩，在受到嚴重風化作用之後，常變成泥土狀，一旦被雨水冲刷，易形成液態流動（flow）。

五、邊坡穩定調查與分析

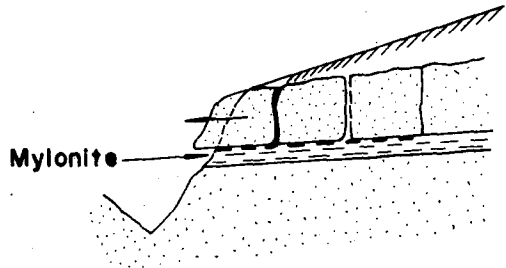
邊坡穩定調查之目的在瞭解邊坡之穩定程度及其崩坍原因。因此調查之對象，亦須從邊坡之地質構造、內在及外在因素着手。邊坡穩定調查之項目，可列分如下：

1. 地質調查

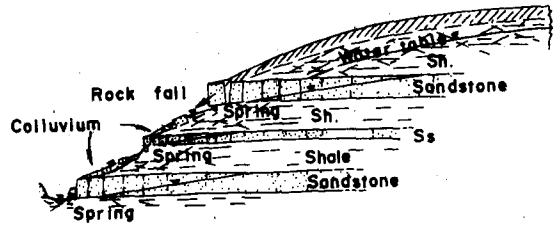
- (1)地形測量——地形測量之比例視邊坡之範圍及重要性而定。一般以不小於一千分之一為佳。若須配合其他結構設計，則比例尺應不小於五百分之一。小範圍之重要邊坡，地形圖可測至二百分之一比例。
- (2)研製邊坡地質圖——研製地質圖，須要參考鑽探調查資料及地面地質調查資料。地質圖上應包含該區岩層之走向，節理大小、長度及方向；岩層露頭之層次及風化程度；邊坡上之龜裂，滑動裂縫等。
- (3)邊坡附近之踏勘調查——包括地形、排水及滲水現象調查。
- (4)原始地形，水文雨量等資料之收集。

2. 鑽探取樣

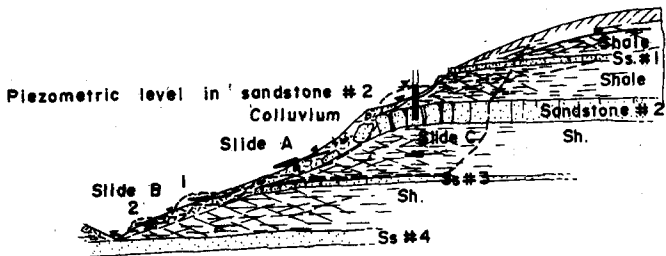
鑽探調查或配合地球物理方法調查是在瞭解邊坡地面下之地質構造，以供穩定分析及護坡設計用。因此鑽探時所取得岩心，對其岩質，解理形貌大小，層理及鑽探時之迴水情形，岩心提取率（rock recovery）及岩質鑑定值（Rock Quality Designation 簡稱 RQD）均須仔細記錄研判，對於試驗用樣品，必須妥為保存。由鑽探所獲資料配合地質調查之結果，即可建立邊坡之地質構造斷面及邊坡面，岩層層面與節理間之幾何關係，從而判斷邊坡之可能滑動形態。



(A) STRESS RELIEF ALONG VALLEYS



(B) SANDSTONE BEDS EXPOSED



(C) SANDSTONE BEDS COVERED WITH COLLUVIUM

after DEERE & PATTON (1971)

圖十二 砂頁岩互層之崩滑情形

3. 現場水壓及移動量測

邊坡之水壓是調查項目中最困難一項，但邊坡水壓力却影響邊坡之安全最大。工程師常犯一種錯覺，以為乾燥之坡面即表示沒有地下水壓。其實，當坡面之蒸發量超過滲流量時，坡面即呈顯乾燥，而岩層中可能積存高水壓。邊坡之安全與否決定於水壓力大小而非滲流量，因此，邊坡內水壓力之調查，極屬必要。尤其在砂頁岩邊坡內，由於砂頁岩之透水性不一致，所以水壓力之形成常極不均勻（如圖十三），故調查時每一層次之水壓力，均須確實把握。水壓力之測量，以裝設水壓計最為可靠。一般常用之水壓計，有開管式（open-type）和閉管式（closed-type）。水壓計裝設後，晴天時可定期觀測，暴雨或颱風後，應勤加觀測。

在穩定調查時，若須證實邊坡之滑動或逐漸性移動，速率及方向，可以裝設傾位儀（slope indicator）及在坡面上建立測量觀測點。

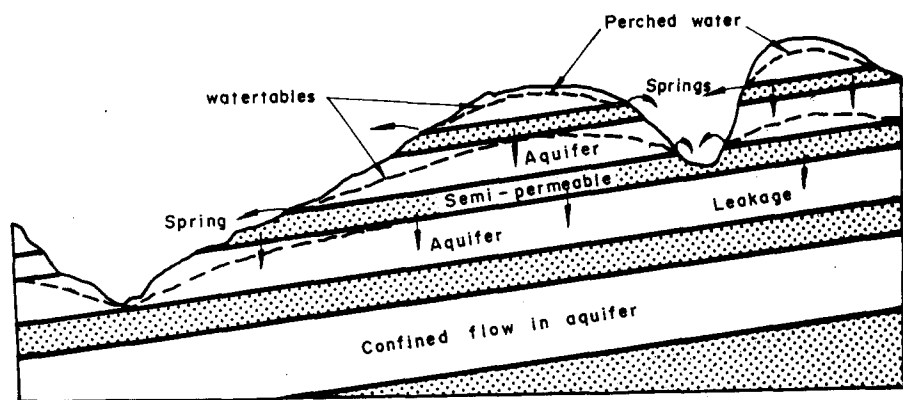
4. 試驗室試驗

對於砂頁岩邊坡之穩定調查，試驗室試驗主要項目可分成：

- (1) 強度試驗——無論穩定分析或設計，均須瞭解岩層之強度。軟弱之砂頁岩，強度試驗可用土壤試驗儀器，較堅硬之砂頁岩，則須用岩石試驗儀器。由於砂頁岩邊坡常在豪雨後發生崩滑，因此，以飽和岩樣試驗較符合現場情況。岩層節理及層面之強度，可由鑽探岩心中，選取適當之試樣以直接剪力試驗求取。
- (2) 親水性試驗——由於砂頁岩之性質受水之影響甚大，親水性高之岩層，其穩定性低。因此，岩層之親水性試驗，極為重要。親水性試驗一般有膨脹試驗，消化試驗（slaking test），循環乾濕試驗等。
- (3) 透水性試驗——瞭解砂頁岩層之透水性，可研判邊坡之地下水流向及作為排水設計之依據。

5. 分析要點

在建立正確分析斷面，判斷崩滑型態後，穩定分析可參考 HOEK 和 BRAY (1977)，MORGENSTERN (1968) 之方法進行。在對已發生崩滑之邊坡回估分析（back analysis）中，崩滑面強度可由試驗證明或依崩滑時安全係數為 1 反求。在未崩滑之邊坡中，則依假想滑動面進行分析。一般砂頁岩邊坡之穩定性常由頁岩強度所控制，故自然邊坡或考慮長期性穩定，以頁岩之殘餘強度（residual strength）作分析，較為合理。對於崩滑時滑動面水壓力估計，在已發生崩滑之邊坡上可由殘餘邊坡內量測推估。邊坡穩定設計中，在設計年限內可能遭遇之最大水壓力，須由邊坡內量測之已知水壓記錄及水文資料預估。砂頁岩邊坡內之未知因數尚多，例如潛移（creep）作用，風化速率等對穩定性之影響。因此



圖十三 砂頁岩互層之地下水狀態

，砂頁岩邊坡之設計安全係數應較一般土壤邊坡稍高。在重要邊坡上，正常狀態取 1.5 以上，地震分析取 1.2 以上。

六、邊坡穩定設計方法研討

1. 保護措施

本省之砂頁岩邊坡因岩質鬆軟，極易被風化及沖刷，常須予以表面保護。表面保護亦可防止地面水下滲。選擇護坡材料可依邊坡之重要性及設計年限而定。護坡材料中，噴射混凝土 (shotcrete)，噴漿 (cement mortar)，穩定土 (stabilized soil) 等均有防水耐沖刷之作用，無形中亦達到防止邊坡岩層風化之效果。噴射混凝土是把混凝土以高壓力噴射於坡面上，為防止保護層收縮龜裂，內中可置鐵絲網一層。層厚最少為 5 公分。噴漿之保護作用與噴射混凝土相似，只是材料採用水泥砂漿。因水泥砂漿較易產生龜裂，維護上較困難。穩定土一般是採用水泥、石灰或其他化學藥劑處理後之土壤作為防水保護層。目前，國內對採用穩定土作邊坡保護尚不普遍。

採用植生保護，在景觀上較為可取，但保護效果較差，尤其對於砂頁岩邊坡之風化作用幾乎無法防止。據高速公路基內段 14KN 一處崩塌後之坡面發現，在有框條格柵植生保護之砂頁岩邊坡上，二年內其風化深度達 2 公尺。故此，植生護坡只可用於較不重要之邊坡上。

2. 排水措施

砂頁岩之邊坡問題，大部份皆由於水之作用而引起，因此，在穩定設計中，採用排水常為最有效之方法。排水之目的另一方面在防止地面水下滲，減少岩層裂縫積存水壓之機會，另一方面是藉排水降低岩層中之水壓力。為達到此二目的，可兼用坡面排水及地下排水兩項。坡面排水設施是以截水溝、吊溝等攔截坡面水，使之迅速排出邊坡範圍外。地下排水是以地下排水管深入含水層使地下水能由排水管排出邊坡。

現時國內尚存有一些錯誤之觀念，認為地下排水管設立後，必須不斷有大量出水，才能達到降低地下水壓之功效。其實岩石邊坡如砂頁岩者，岩層或裂縫中雖只積存很少水量，但亦足以形成很高水壓。因此，在整個邊坡上，雖然可能只有少數幾個排水孔有地下水排出，但已經可以達到降低水壓之效果。

3. 穩定設計

當祇用排水設計尚不足使邊坡符合穩定要求時，使用穩定設計亦可增加邊坡之安全性。設計原則可包括增加邊坡之抵抗力量，如採用擋土牆，岩栓，岩錨等；同時亦可用減少滑動面應力方法達成目的，例如加預力岩錨，排水，清土等。其實，完善之邊坡設計，應該包含邊坡之表面保護，地面及地下排水和穩定設計在內。

4. 安全觀測

邊坡之調查與維護，採用安全觀測系統，極受推許。安全觀測之目的在充實穩定調查無法獲得之資料，並協助瞭解邊坡穩定處理後之效果。完備之安全觀測，可收下列之功效：

- (1)預報崩坍之潛勢，減少突發性之災害；
- (2)作為施工時之控制，改進施工之方法；
- (3)收搜區域性邊坡之資料，改良設計分析之準確性。

在砂頁岩之邊坡設計中，岩石強度及水壓力等因數均非恒定。頁岩之逐漸性破壞，週期性因素之影響，潛變之性質等，目前，尚未有深入瞭解。因此，邊坡設計安全與否，有賴觀測系統之證實。觀測儀器通常包含：

- (1)水壓計——量測岩層內之水壓；
- (2)應力計——量測岩層之應力；
- (3)傾位儀——量測邊坡岩層之相對變位；
- (4)壓力計——量測擋土設計或岩錨設計之應力；
- (5)地面位移觀測——量測邊坡滑動速率及方向。

七、結論

- 1.本省砂頁岩之地質條件，工程性質頗多不良，對邊坡穩定有不利影響。
- 2.砂頁岩邊坡之崩坍原因常由於地面水及地下水所引起。
- 3.砂岩透水性高，而頁岩易吸水軟化，故造成砂岩沿頁岩面滑動。
- 4.正確之穩定調查方法應包括地質調查、岩性分析及地下水壓量測等。
- 5.砂頁岩邊坡之未知因素尚多，故穩定設計除針對崩坍原因外，尚須配合觀測系統。

誌 謝

本文為四十五分鐘之講稿，文內資料得亞新工程顧問公司各位同仁，尤其是郭文祥先生、蘇文忠先生、歐陽湘先生三位之協助頗多，謹此誌謝。

參考文獻：

- 1.左文雄 (1974) 「臺灣岩石，軟岩及土壤之力學分類」，土木水利季刊，第一卷第三期。
- 2.何春霖 (1975) 「臺灣地質概論，臺灣地質圖說明書」，經濟部。
- 3.吳福泰 (1967) 「臺灣苗栗附近木山層及五指山層油砂之岩石學研究」，中國石油地質，第六號。
- 4.林朝榮、周瑞煥 (1974) 「臺灣地質」，臺灣省文獻委員會。

- 5.周瑞燉 (1964) 「臺灣北部中新世湊合層及南港砂岩之地層沉積之研究」，中國石油地質，第三號。
 - 6.周瑞燉 (1965) 「苗栗鐵砧山通霄構造打鹿頁岩內副石英砂岩岩石學之研究」，中國石油地質，第四號。
 - 7.周瑞燉 (1968) 「臺灣北部中新世打鹿頁岩內砂岩之地層沉積研究」，中國石油地質，第六號。
 - 8.周瑞燉 (1971) 「臺灣南部臺南區泥岩層之地層沉積之初步研究」，中國石油地質，第八號。
 - 9.周瑞燉 (1976) 「臺灣西部中新世石底層之地層沉積及其古地理之研究」，中國石油地質，第十三號。
 - 10.莊長賢 (1976) 「泥岩地區邊坡破壞原因之研究」，國立成功大學土木研究所碩士論文。
 - 11.蔡國華 (1978) 「成層和非均向性土壤之剪力強度特性之研究」，國立成功大學土木研究所碩士論文。
- BARTON, N. (1973), "Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints", *Engineering Geology*, Vol. 7, pp: 287-332.
- DEERE, D. U. and PATTON, F.D. (1971), "Slope Stability in Residual Soils", *Proc. 4th Pan-American Conf. on SMFE*, Vol. 1, Puerto Rico., pp. 87-170.
- HENKEL, D.J. (1967), "Local Geology and the Stability of Natural Slopes", *JSMFD, ASCE*, Vol. 93, No. SM4, pp. 437-446.
- HOEK, E. (1970), "Estimating the Stability of Excavated Slopes in Open Cast Mines", *Trans. Inst. Min. Metall., Section A*, 79, pp. 109-132.
- HOEK, E. and BRAY, J.W. (1974), "Rock Slope Engineering", *Inst. of Mining and Metall.*, 1st Ed., London.
- HOEK, E. and BRAY, J.W. (1977), "Rock Slope Engineering", *Inst. of Mining and Metall.*, 2nd Ed., London.
- HOLMES, A. (1965), "Principle of Physical Geology", Nelson, London.
- MORGENSTERN, N.R. (1968), "Ultimate Behaviour of Rock Structures", *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Chapter 10, Ed. by Stagg K.G. and Zienkiewicz, O.C., John Wiley and Sons, London, pp. 321-351.
- TERZAGHI, K. (1950), "Mechanism of Landslides", *Application of Geology to Engineering Practice*, *Geol. Soc. Amer.*, pp. 83-123.
- UNDERWOOD, L.B. (1967), "Classification and Identification of Shales", *JSMFD, ASCE*, Vol. 93, No. SM6, pp. 97-116.