

大規模崩塌潛勢評估與分級

張光宗 葉柏村

July 28, 2020

動機

近年來水土保持局依據中央地調所公布的結果，積極辦理大規模崩塌潛勢地區的調查與評估工作。若能對這些大規模崩塌潛勢區進一步分級，將可使有限的人力與經費更有效利用。

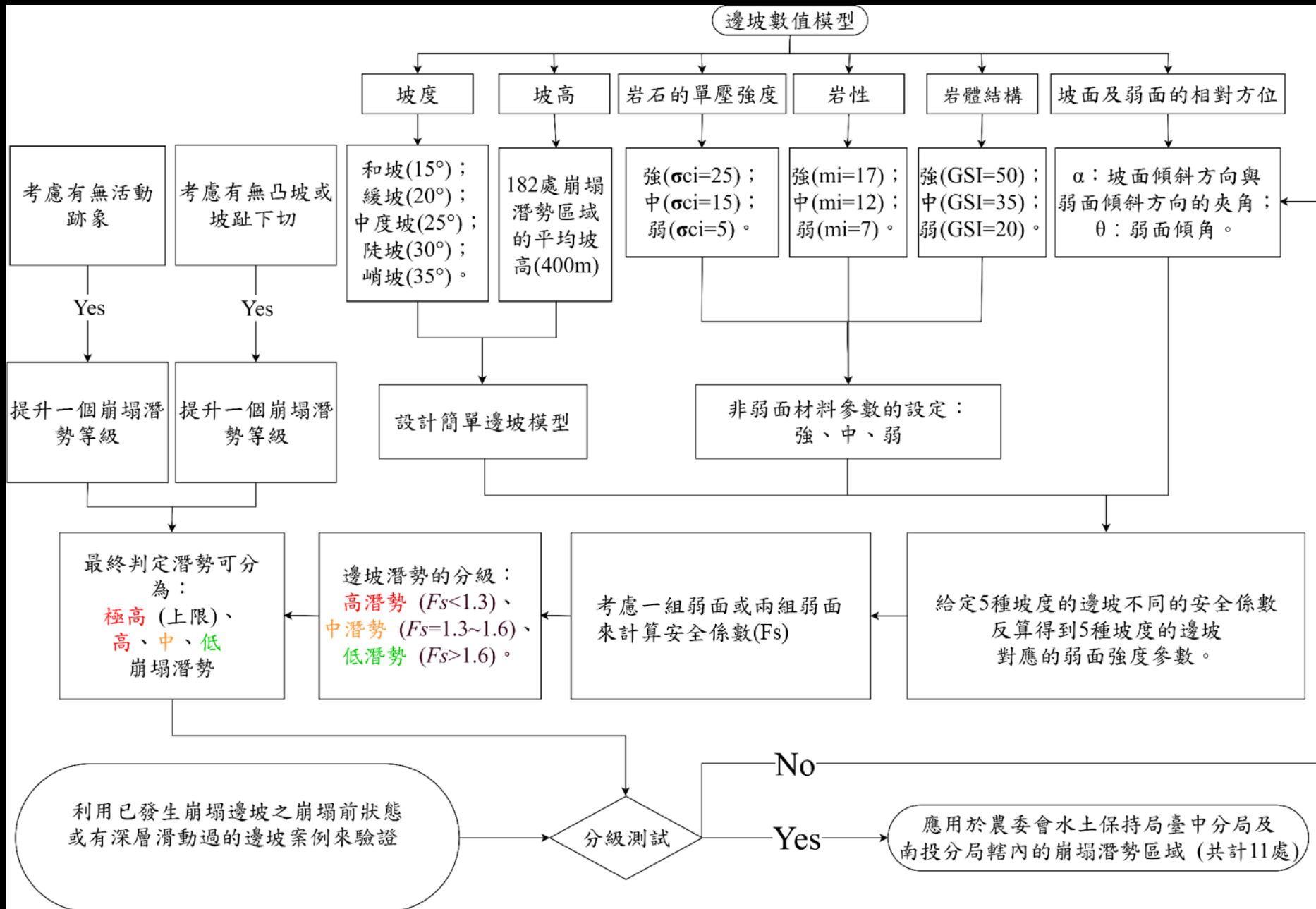


目的

大規模崩塌深度較大多為岩坡破壞，與延續良好的弱面有關，如砂頁岩中的層面和板岩中的劈裡面。本研究在沒有鑽探與力學試驗資料的狀況下，考慮地形、地質與弱面位態狀況，對大規模崩塌潛勢區做初步分級，應用於實際案例。

研究流程圖

4



研究方法

- 岩體節理異向性模式
- 非弱面材料參數的設定
- 弱面強度參數的反算
- 弱面位態的設定
- 弱面位態對安全係數的影響
- 崩塌潛勢的分級
- 驗證與應用

有限元素軟體PLAXIS 3D

- 利用有限元素軟體 (PLAXIS 3D) 中的異向性模式 (Jointed rock model with overall Mohr-Coulomb failure criterion, Iso-JRMC)，和強度折減法 (ϕ/c reduction) 來得到邊坡的安全係數。

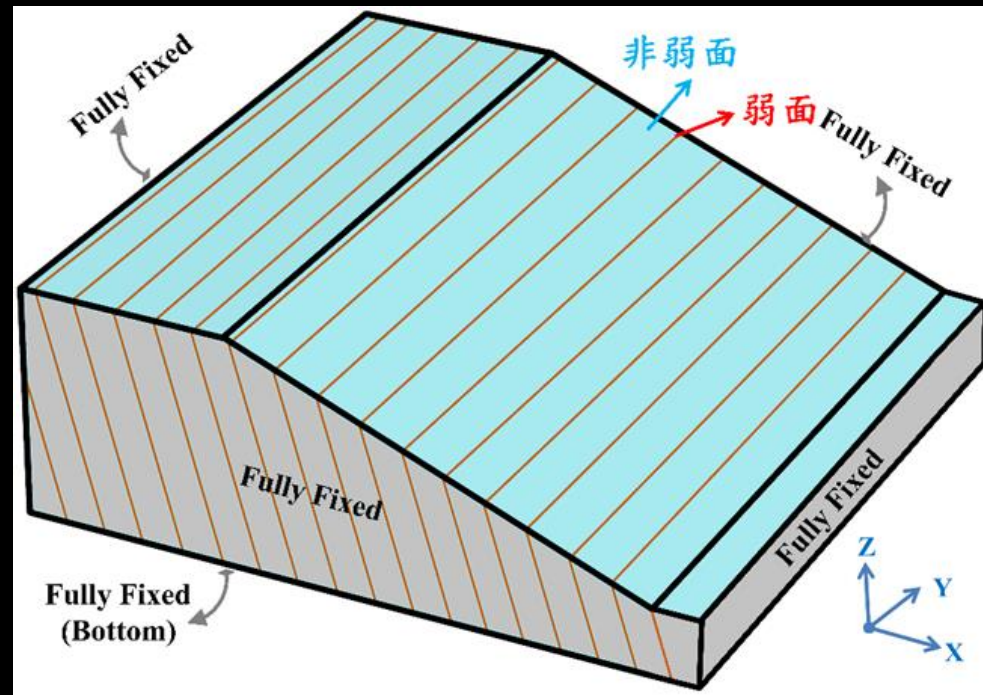
需設定

簡單的邊坡形狀(坡度、坡高)

非弱面材料參數($\gamma, G, \nu, c, \varphi$)

弱面的強度參數(c, φ)

弱面的位態



非弱面參數的設定

利用Hoek-Brown破壞準則，其參數為 σ_{ci} 、 m_i 及GSI。

單壓強度 σ_{ci} ：簡化分為3個等級：強 (25MPa)、中 (15MPa)、弱 (5 MPa)。

臺灣地區岩盤類別建議表(公共工程委員會專案研究計畫, 2002)

區域		西部麓山帶及平原		雪山山脈	脊梁山脈及恆春半島	海岸山脈	外島地區		
年代	北 部	南 部					馬祖	澎湖	金門
第四紀	店子灣層 大南澳層 海山層 海山山麓層 海山山麓層	六雙層 二重溪層 炭下寮層 六雙層 玉井頁岩 六龜礫岩 北寮頁岩 古亭坑層 竹頭崎層 南勢崙砂岩 茅埔頁岩 隘寮腳層 蓋子寮頁岩 鹽水坑頁岩 烏山層	六雙層 二重溪層 炭下寮層 六雙層 玉井頁岩 六龜礫岩 北寮頁岩 古亭坑層 竹頭崎層 南勢崙砂岩 茅埔頁岩 隘寮腳層 蓋子寮頁岩 鹽水坑頁岩 烏山層		太平層 四溝層 板寮石灰岩 永建礫岩 馬鞍山層 牡丹層 (恆春層) 潮州層 大禹嶺層 禮觀層 黑岩山層 華珠山層 樟谷層 十八重溪層	卑南山礫岩 吳厝礫岩 八里灣層 利吉層 都巒山層	小門礫岩 紅土層 澎湖層 金門層		
新第三紀	卓蘭層 錦水頁岩 二圖層 桂竹林層 大埔層 南莊(五塊)層 南港層 石龜層 大寮層 水山層 五指山層 蚊子坑層 巴陵層 粗坑層	卓蘭層 錦水頁岩 二圖層 桂竹林層 大埔層 南莊(五塊)層 南港層 石龜層 大寮層 水山層 五指山層 蚊子坑層 巴陵層 粗坑層	卓蘭層 錦水頁岩 二圖層 桂竹林層 大埔層 南莊(五塊)層 南港層 石龜層 大寮層 水山層 五指山層 蚊子坑層 巴陵層 粗坑層		太平層 四溝層 板寮石灰岩 永建礫岩 馬鞍山層 牡丹層 (恆春層) 潮州層 大禹嶺層 禮觀層 黑岩山層 華珠山層 樟谷層 十八重溪層	卑南山礫岩 吳厝礫岩 八里灣層 利吉層 都巒山層	小門礫岩 紅土層 澎湖層 金門層		
中生代	白堊紀 侏羅紀 三疊紀	白堊紀 侏羅紀 三疊紀	白堊紀 侏羅紀 三疊紀		太平層 四溝層 板寮石灰岩 永建礫岩 馬鞍山層 牡丹層 (恆春層) 潮州層 大禹嶺層 禮觀層 黑岩山層 華珠山層 樟谷層 十八重溪層	卑南山礫岩 吳厝礫岩 八里灣層 利吉層 都巒山層	小門礫岩 紅土層 澎湖層 金門層		
古生代	二疊紀 石炭紀	二疊紀 石炭紀	二疊紀 石炭紀		太平層 四溝層 板寮石灰岩 永建礫岩 馬鞍山層 牡丹層 (恆春層) 潮州層 大禹嶺層 禮觀層 黑岩山層 華珠山層 樟谷層 十八重溪層	卑南山礫岩 吳厝礫岩 八里灣層 利吉層 都巒山層	小門礫岩 紅土層 澎湖層 金門層		

$\sigma_{ci}=25\text{MPa}$

$\sigma_{ci}=15\text{MPa}$

$\sigma_{ci}=5\text{MPa}$

☐ A岩類
☐ B岩類
☐ C岩類
☐ D岩類

註：本表不包括全新世以來未固結之沖積層與堆積材料。

非弱面參數的設定

岩性係數 (m_i)

(修改自 Hoek, 2007)

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21±3)	Sandstones 17±4	Siltstones 7±2	Claystones 4±2
			Breccias (19±5)		Greywackes (18±3)	Shales (6±2) Marls (7±2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12±3)	Sparitic Limestones (10±2)	Micritic Limestones (9±2)	Dolomites (9±3)
		Evaporites		Gypsum 8±2	Anhydrite 12±2	
		Organic				Chalk 7±2
METAMORPHIC	Non foliated		Marble 9±3	Hornfels (19±4) Metasandstone (19±3)	Quartzites 20±3	
	Slightly foliated		Migmatite (29±3)	Amphibolites 26±6	Gneiss 28±5	
	Foliated*			Schists 12±3	Phyllites (7±3)	Slates 7±4
		Light	Granite 32±3 Granodiorite (29±3)	Diorite 25±5		

$m_i=17$

如：砂岩

$m_i=12$

如：砂頁岩互層、片岩

$m_i=7$

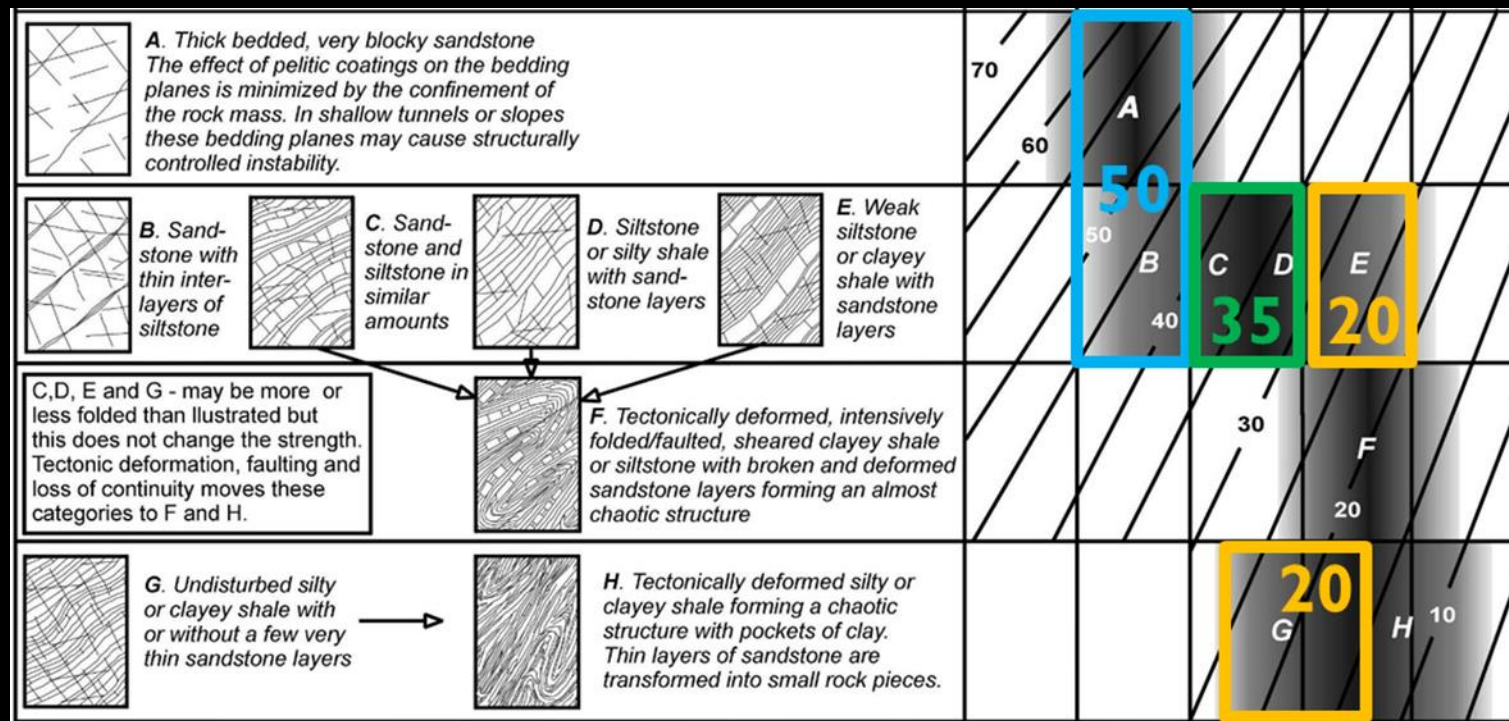
如：頁岩、粉砂岩、泥岩、板岩、千枚岩

Volcanic	Lava	Andesite 25±5	Basalt (25±5)
	Pyroclastic	Agglomerate (19±3)	Breccia (19±5) Tuff (13±5)

非弱面參數的設定

Geological strength index (GSI): 沉積岩的GSI分類

(修改自 [Marinos and Hoek, 2001](#))



GSI=50

如：厚層砂岩偶夾薄頁岩、砂岩

GSI=35

如：砂頁岩互層、砂岩偶夾頁岩、粉砂岩

GSI=20

如：砂頁岩薄互層、頁岩偶夾砂岩、泥岩偶夾砂岩、頁岩、泥岩

非弱面參數的設定

Geological strength index (GSI): 變質岩的GSI分類

(修改自 Truzman, 2009)



GSI=50

如：劈理較不發達之板岩

GSI=35

如：劈理中等發達之板岩

GSI=20

如：劈理發達之板岩

非弱面參數的分類

mi = 17		σ_{ci} (MPa)		
		25	15	5
G S I	50	c: 522 kPa, ϕ : 48° E: 5E6 kPa	c: 434 kPa, ϕ : 44° E: 3.9E6 kPa	c: 300 kPa, ϕ : 35° E: 2.2E6 kPa
	35	c: 399 kPa, ϕ : 43° E: 2.1E6 kPa	c: 339 kPa, ϕ : 39° E: 1.6E6 kPa	c: 239 kPa, ϕ : 30° E: 9.4E5 kPa
	20	c: 285 kPa, ϕ : 38° E: 8.9E5 kPa	c: 245 kPa, ϕ : 34° E: 6.9E5 kPa	c: 174 kPa, ϕ : 26° E: 4E5 kPa
mi = 12		σ_{ci} (MPa)		
		25	15	5
G S I	50	c: 489 kPa, ϕ : 45° E: 5E6 kPa	c: 400 kPa, ϕ : 41° E: 3.9E6 kPa	c: 270 kPa, ϕ : 32° E: 2.2E6 kPa
	35	c: 363 kPa, ϕ : 40° E: 2.1E6 kPa	c: 306 kPa, ϕ : 36° E: 1.6E6 kPa	c: 212 kPa, ϕ : 27° E: 9.4E5 kPa
	20	c: 254 kPa, ϕ : 34° E: 8.9E5 kPa	c: 217 kPa, ϕ : 31° E: 6.9E5 kPa	c: 152 kPa, ϕ : 23° E: 4E5 kPa
mi = 7		σ_{ci} (MPa)		
		25	15	5
G S I	50	c: 451 kPa, ϕ : 40° E: 5E6 kPa	c: 357 kPa, ϕ : 36° E: 3.9E6 kPa	c: 229 kPa, ϕ : 27° E: 2.2E6 kPa
	35	c: 315 kPa, ϕ : 36° E: 2.1E6 kPa	c: 261 kPa, ϕ : 31° E: 1.6E6 kPa	c: 175 kPa, ϕ : 23° E: 9.4E5 kPa
	20	c: 212 kPa, ϕ : 30° E: 8.9E5 kPa	c: 179 kPa, ϕ : 26° E: 6.9E5 kPa	c: 123 kPa, ϕ : 19° E: 4E5 kPa

非弱面材料的參數

強	c: 437 kPa, ϕ : 43°, γ : 26 kN/m ³ , G: 1.5E6 kPa, ν : 0.3
中	c: 299 kPa, ϕ : 35° γ : 26 kN/m ³ , G: 7.3E5 kPa, ν : 0.3
弱	c: 196 kPa, ϕ : 27° γ : 26 kN/m ³ , G: 3.2E5 kPa, ν : 0.3

弱面強度參數的反算

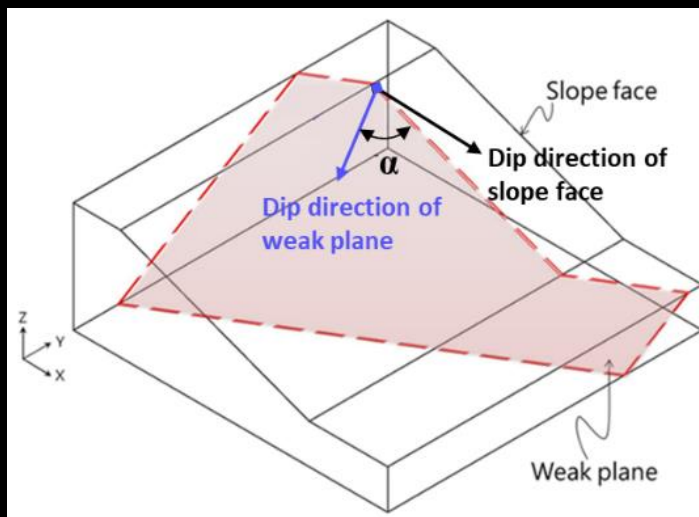
- 緩坡的強度通常較弱，陡坡的強度通常較強
- 當坡面與弱面的傾向與傾角一致時（典型順向坡），安全係數較低

		邊坡模型的坡度				
		15° (和坡)	20° (緩坡)	25° (中度坡)	30° (陡坡)	35° (峭坡)
非弱面材料的強度	弱	典型順向坡 FS設為1.3	典型順向坡 FS設為1.2	典型順向坡 FS設為1.1	(較少出現)	(極少出現)
	中	(較少出現)			典型順向坡 FS設為1.2	(較少出現)
	強	(極少出現)	(較少出現)			典型順向坡 FS設為1.3
反算的弱面強度參數		c: 0 kPa ϕ : 6.5°	c: 0 kPa ϕ : 12.8°	c: 0 kPa ϕ : 17.1°	c: 0 kPa ϕ : 18°	c: 0 kPa ϕ : 20°

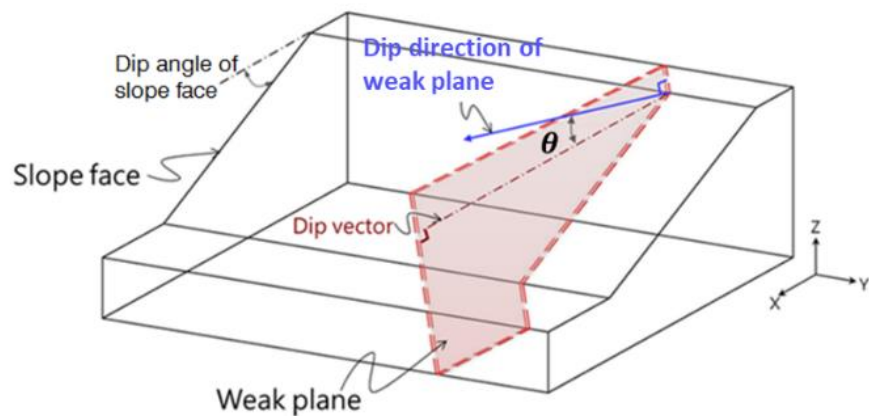
弱面位態的設定

- 平面弱面

α 定義為坡面傾斜方向
與弱面傾斜方向的夾角



θ 定義為弱面傾角



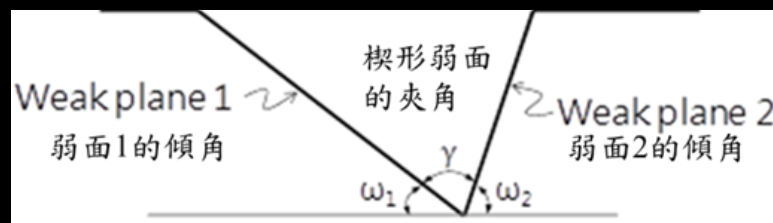
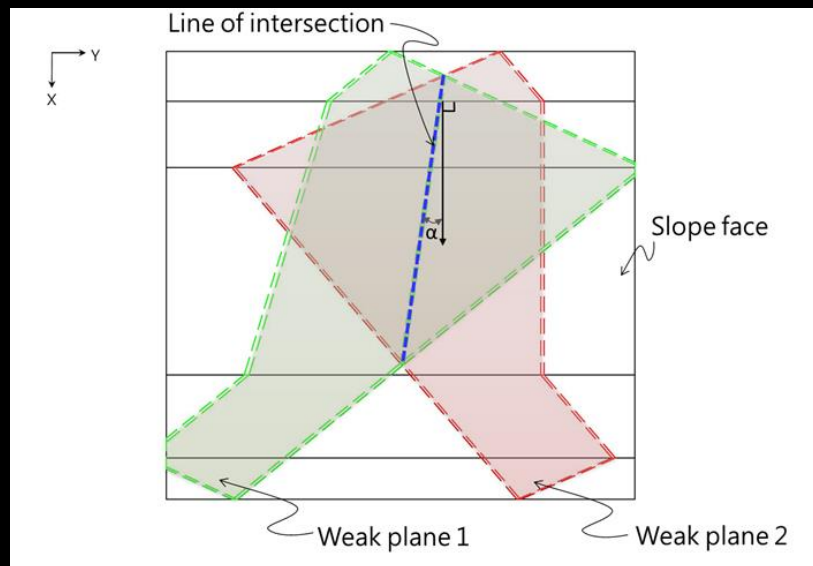
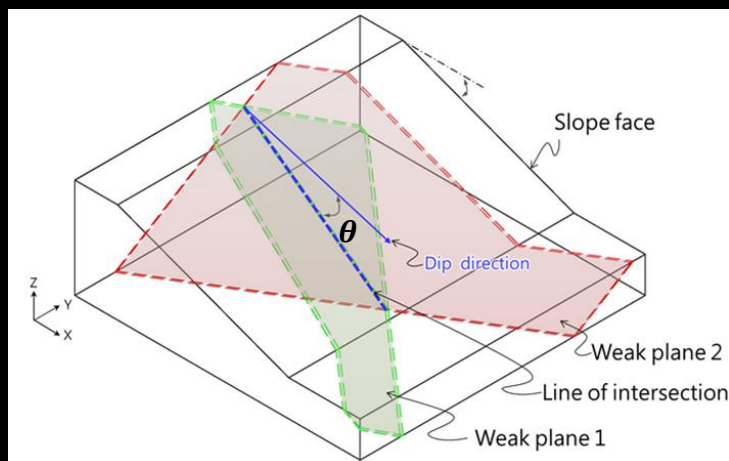
模型均設定邊坡朝正x方向

弱面位態的設定

- 楔形弱面

α 定義為坡面傾斜方向與兩弱面交線傾斜方向的夾角

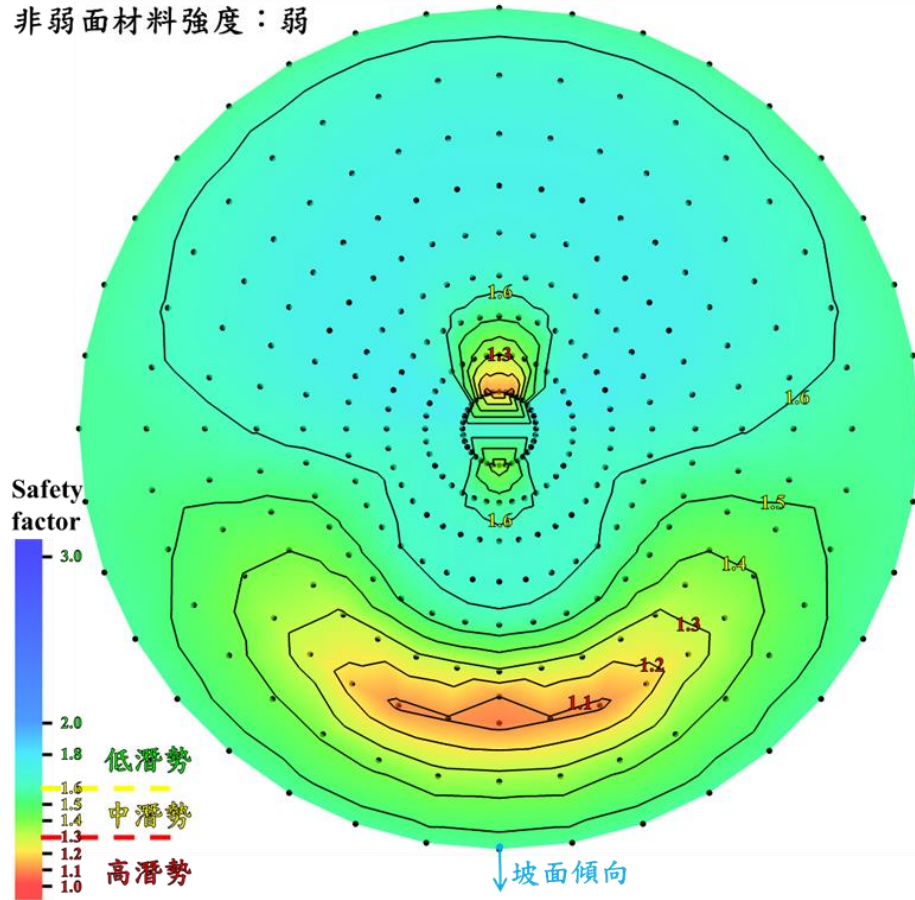
θ 定義為弱面傾角



立體投影圖展現弱面位態對安全係數的影響

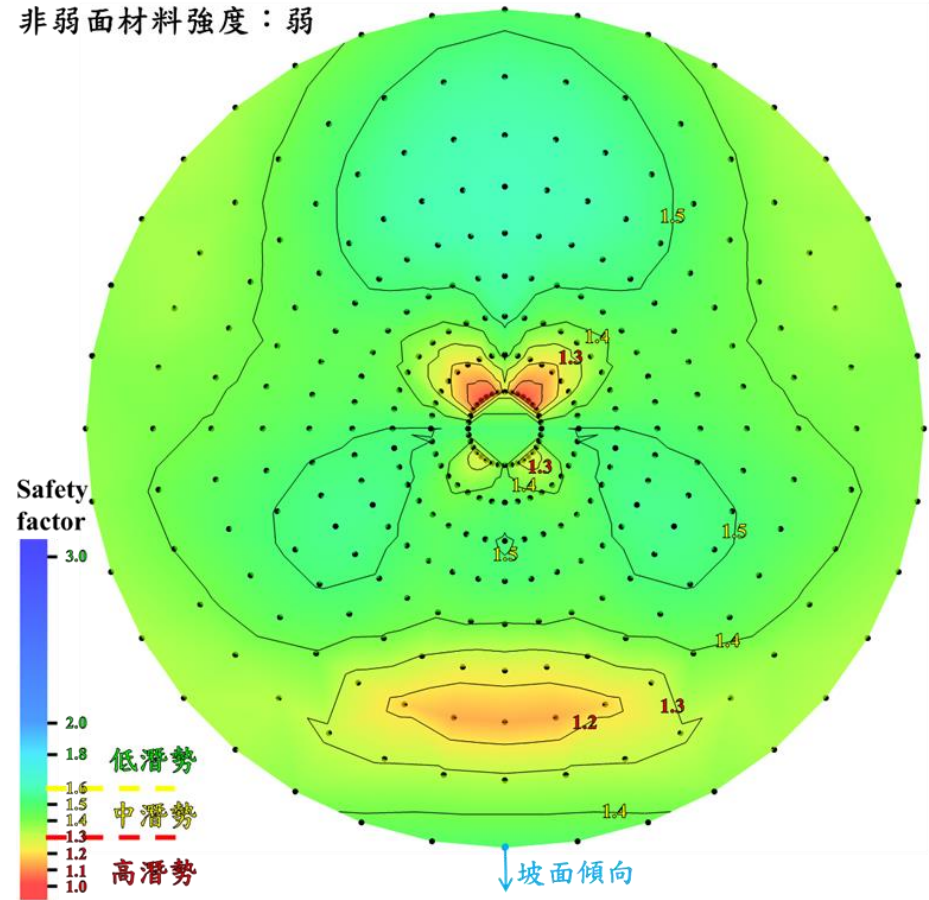
邊坡坡度：25°，
非弱面材料強度：弱

(考慮平面弱面情況下)



邊坡坡度：25°，
非弱面材料強度：弱

(考慮楔形弱面情況下)

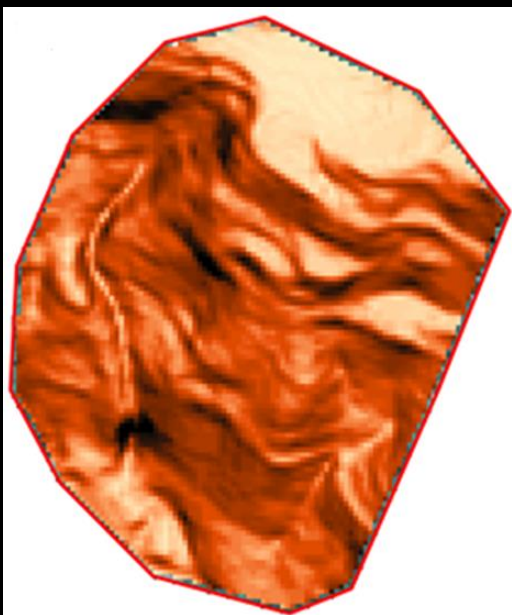


假設 $\gamma=110^\circ$, $\omega_1=\omega_2=35^\circ$

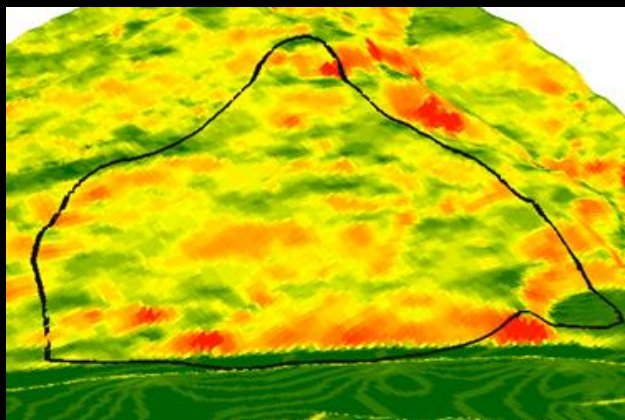
崩塌潛勢的分級

- 安全係數的範圍1~1.3為高潛勢、1.3~1.6為中潛勢、超過1.6為低潛勢。
- 再加以考慮: (I)有凸坡或坡趾下切 (II)有活動跡象，用以提升一至二個潛勢等級，故最後可分為：**極高**、**高**、**中**、**低**崩塌潛勢。

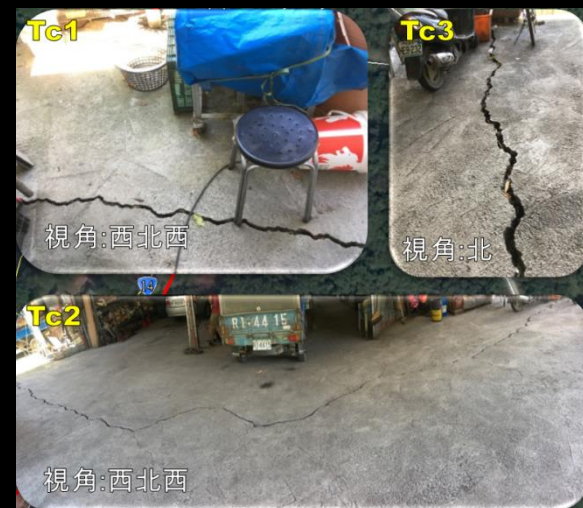
凸坡



坡趾下切



活動跡象



驗證結果

崩塌地/崩塌潛勢區	考慮平面弱面情況下的安全係數	分析潛勢	考慮楔形弱面情況下的安全係數	分析潛勢
國道三號	1.27	高		(Lo et al., 2016; Chen and Cheng, 2017)
	非弱面強度 \in 弱 (大寮層：A岩類， $\sigma_{ci} = 25\text{MPa}$ ；滑動體下層為厚層頁岩：mi 保守選定為7；GSI 選定為20)			
梨山圓環	1.92	低	1.62	低
	(廖志中等, 2011; 中央地調所, 2019)			
	非弱面強度 \in 弱 (廬山層：A岩類， $\sigma_{ci} = 25\text{MPa}$ ；劈理發達之風化板岩如下圖：mi 選定為7；GSI 選定為20)			
九份二山	1.08	高		(Wang et al., 2003)
	非弱面強度 \in 弱 (中新世樟湖坑頁岩層：A岩類， $\sigma_{ci} = 25\text{MPa}$ ；厚層頁岩如下圖：mi 選定為7；GSI 選定為20)			
草嶺	1.2	高		(Tang et al., 2009; 李錫堤, 2011)
	非弱面強度 \in 弱 (卓蘭層、錦水頁岩：B岩類， $\sigma_{ci} = 15\text{MPa}$ ；滑動體下層為厚層頁岩：mi 保守選定為7；GSI 選定為20)			
小林村	1.27	高	1.11	高
	(Tsou et al., 2011; 李錫堤等, 2009)			
	非弱面強度 \in 弱 (鹽水坑頁岩層：B岩類， $\sigma_{ci} = 15\text{MPa}$ ；塊狀頁岩偶夾砂岩如下圖：mi 選定為7；GSI 選定為20)			
廬山	1.94	低	1.9	低
	(張光宗等, 2009; Chang and Huang, 2015)			
	非弱面強度 \in 中 (廬山層：A岩類， $\sigma_{ci} = 25\text{MPa}$ ；劈理中等發達之板岩如下圖：mi 選定為7；GSI 選定為35)			
屏東霧台阿禮D082	2.11	低	1.79	低
	(蔣季翰等, 2019)			
	非弱面強度 \in 強 (潮州層：A岩類， $\sigma_{ci} = 25\text{MPa}$ ；硬頁岩、板岩與變質砂岩互層：mi 選定為12；GSI 選定為35)			



梨山圓環
(廖志中等, 2011)



九份二山
(Wang et al., 2003)



小林村
(李錫堤等, 2009)



廬山
(張光宗等, 2009)

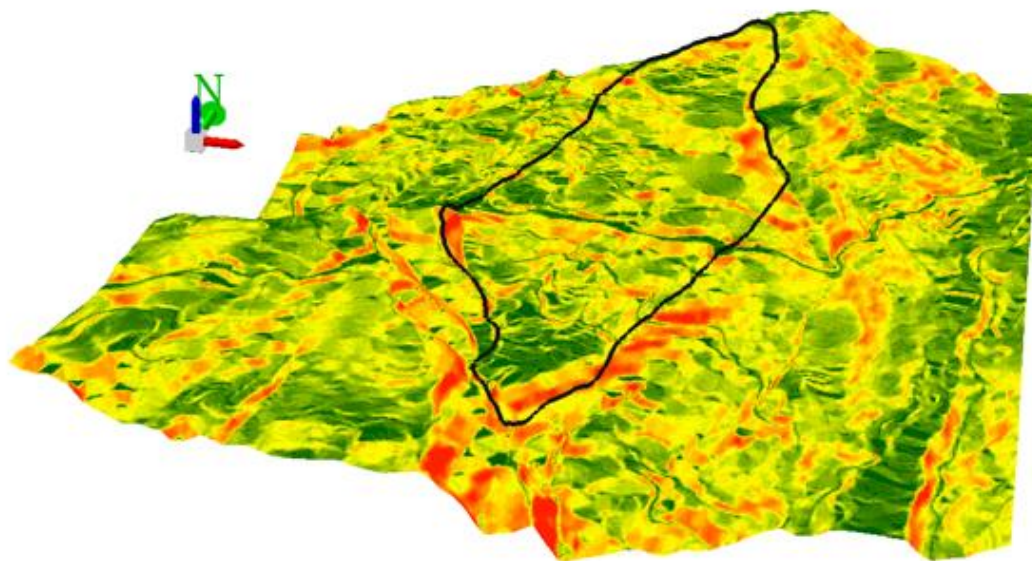
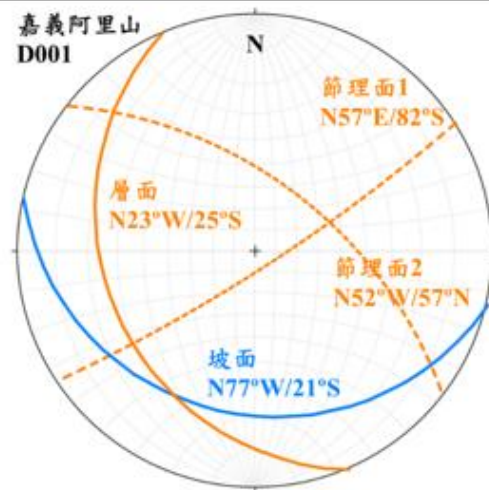
再考慮有凸坡、坡趾下切或有活動跡象用來提升1~2個潛勢等級 (危險、高、中、低)

崩塌地/崩塌潛勢區	分析潛勢 (時間狀態)	有凸坡或坡趾下切	有活動跡象	最終判定潛勢 (時間狀態)
國道三號	高 (原地質情況)	✓ (坡趾下切) (崩塌前)		極高 (崩塌前)
梨山圓環	低 (原地質情況)		✓	中 (現在)
九份二山	高 (原地質情況)	✓ (凸坡) (Wang et al., 2003) (崩塌前)		極高 (崩塌前)
草嶺	高 (原地質情況)	✓ (坡趾下切) (李錫堤, 2011) (崩塌前)		極高 (崩塌前)
小林村	高 (原地質情況)	✓ (凸坡) (周立生, 2014) (崩塌前)		極高 (崩塌前)
廬山	低 (原地質情況)	✓ (凸坡) (Chang and Huang, 2015)	✓	高 (現在)
屏東霧台阿禮D082	低 (原地質情況)		✓	中 (現在)

應用案例

嘉義阿里山 D001 (平均坡度：21°；坡高：613m)

$\sigma_{ci}=25\text{MPa}$ (長枝坑層 \in A 岩類),
 $m_i=12$, GSI=35 (砂頁岩互層), 非弱面材料強度為強。凸坡或坡趾下切：有 (坡趾下切)；活動跡象：無。



考慮平面弱面—層面： $F_s = 2.05$ (低潛勢)

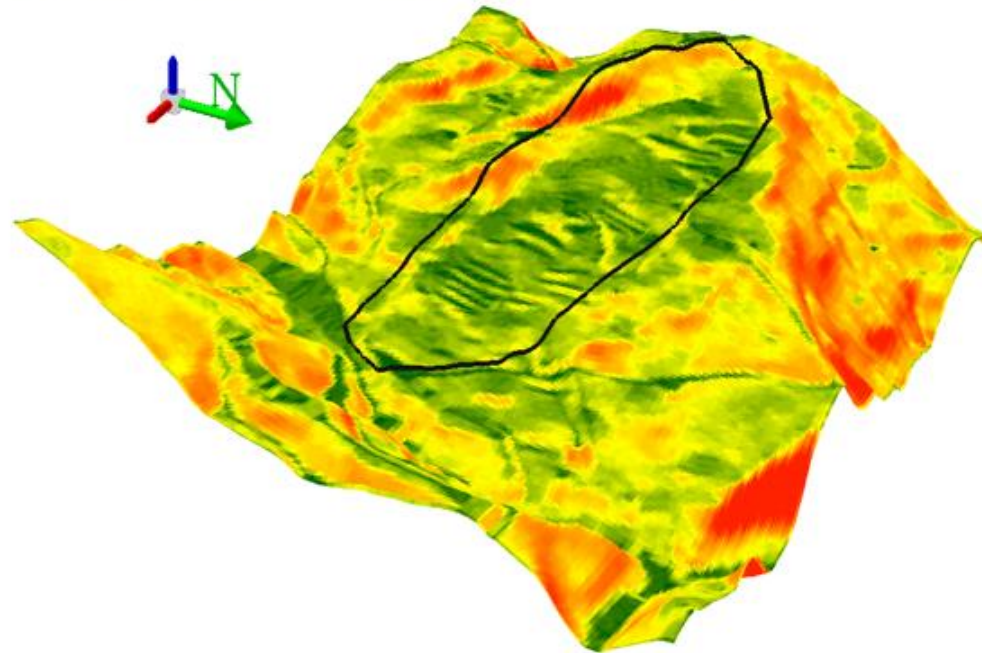
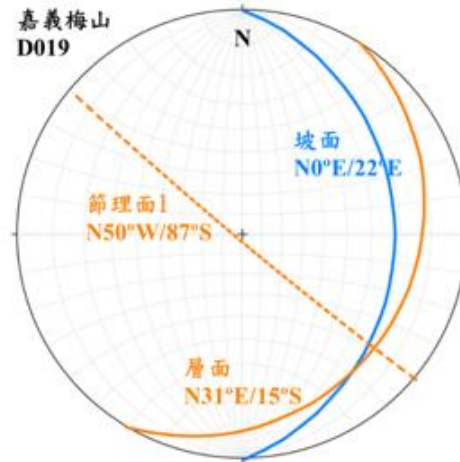
考慮楔形弱面—層面&節理面 1： $F_s = 1.98$ (低潛勢)、層面&節理面 2： $F_s = 2$ (低潛勢)

分析潛勢：低潛勢

考慮有坡趾下切；無活動跡象：提升一個潛勢等級

最終判定潛勢：中潛勢

$\sigma_{ci}=15\text{MPa}$ (卓蘭層∈B 岩類), $m_i=12$,
 $\text{GSI}=35$ (砂頁岩互層), 非弱面材料強度
 為中。凸坡或坡趾下切：無；活動跡
 象：無。



考慮平面弱面—層面： $F_s = 1.44$ (中潛勢)

考慮楔形弱面—層面&節理面1： $F_s = 1.19$ (高潛勢)

分析潛勢：高潛勢

考慮無凸坡、坡趾下切；無活動跡象

最終判定潛勢：高潛勢

結論

- 數值分析結果顯示，弱面與坡面方位相近的順向坡，以及弱面為高傾角的順向坡和逆向坡，都顯示出不利於邊坡穩定的趨勢。
- 驗證的結果顯示，已崩塌的邊坡案例的最終判定潛勢為極高潛勢，而有深層滑動過的邊坡案例則為高潛勢或中潛勢。應用於中部11處大規模崩塌潛勢區，則有1處極高潛勢、5處高潛勢 5處中潛勢。
- 本研究的分級方法，可在沒有沒有鑽探與力學試驗資料的狀況下，考慮地形、地質與弱面位態狀況，對大規模崩塌潛勢區進一步分級。

- Thanks for your attention -