

# 弱面與邊坡相對方位影響岩坡穩定性之研究

張光宗<sup>(1)</sup> 林怡綾<sup>(2)</sup> 葉柏村<sup>(3)</sup>

## 摘 要

坡地之邊坡問題除表土層崩塌外，其他都屬岩坡問題。台灣之山坡地以沉積岩和變質岩為主，沉積岩中的層面或是板岩中的劈理面都是岩石中延續性良好的弱面，這些弱面不同的方位對岩坡之穩定性有不同的影響。本研究探討平面與楔形弱面位態對邊坡穩定的影響，採用 PLAXIS3D 之數值方法模擬簡單邊坡模型，以岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式 (Iso-JRMC) 考慮弱面，進行分析比較不同弱面和邊坡的相對位態下之邊坡安全係數。結果顯示平面弱面狀態中，當弱面與邊坡傾向一致時，弱面之傾角與坡面傾角相等之順向坡或弱面傾角趨近於 90° 最不利邊坡穩定。楔形弱面狀態中，當兩弱面交線傾向與邊坡傾向一致時，兩弱面交線之傾角與坡面傾角相等時，或兩弱面之交線傾角趨近於 90° 時最不利邊坡穩定。其中當兩弱面傾角不相等，差異越大時，安全係數越小，若一個弱面傾向與傾角趨近於坡面時安全係數最低。

(關鍵詞：岩坡、弱面、位態、邊坡穩定、PLAXIS 3D)

## Rock Slope Stability Considering Orientations of Weak Planes

Kuang-Tsung Chang<sup>(1)</sup> Yi-Ling Lin<sup>(2)</sup> Po-Tsun Yeh<sup>(3)</sup>

Professor<sup>(1)</sup> Graduate student<sup>(2)</sup> Ph.D. student<sup>(3)</sup>, Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung-Hsing University, Taichung, 402 Taiwan

## ABSTRACT

Except the shallow landslides that are associated with soils, other slope stability problems are associated with rock. The hill slopes of Taiwan are mainly composed of sedimentary rocks and metamorphic rocks. The bedding planes in the sedimentary rocks and the cleavage in the slate are weak planes with good consistency. Various orientations of these weak planes have different effects on the stability of rock slopes. We study the effects of orientations of planar and wedge weak planes on slope stability, using the software PLAXIS 3D. A simple slope model with various weak plane conditions is simulated. The jointed rock model with overall Mohr-Coulomb failure criterion (Iso-JRMC) is used to take the weak planes into account. The results show that for planar weak planes conditions, the most unfavorable conditions appear when the weak planes and the slope dip to

---

(1)國立中興大學水土保持系 教授

(2)國立中興大學水土保持系 碩士生(通訊作者 e-mail: kinki8262001@hotmail.com)

(3)國立中興大學水土保持系 博士生

the same direction, and the dip angle of the weak planes coincides with that of the slope or is equal to  $90^\circ$ . For wedge weak planes conditions, the most unfavorable conditions appear when the line of intersection of two sets of weak planes and the slope dip to the same direction, and the plunge of the line of intersection of two sets of weak planes coincides with the dip of the slope or is equal to  $90^\circ$ . In particular, the higher the difference of the dip angles of the two sets of weak planes, the lower the safety factor of the slope obtained.

(**Keywords** : rock slope, weak plane, attitude, slope stability, PLAXIS 3D )

## 前言

台灣地形受造山運動影響，山坡地面積約占全島 74%，且地形陡峭地質構造複雜多變，外加氣候屬亞熱帶，潮濕多雨，使得邊坡地質更顯脆弱。

崩塌影響因子主要分為地質因子、地形因子、環境因子及人為因子等四大類(Cruden and Varnes, 1996)。李錦育(2001)將崩塌發生之五大因素分別為地質構造、岩性、地形過陡、雨水因素和人為因素。環境因子及人為因子雖為促崩因子，但若無地質之潛在不利因子存在，要產生崩塌實則不易。

一般而言，岩坡破壞可分為平面破壞、楔形破壞、圓弧形破壞、傾倒破壞。邊坡中之岩層與土壤最大不同，即土壤通常可視為連續體，而岩石中常有節理、層面、裂隙等不連續面，常為導致岩石邊坡破壞之主要因素。延續性好的不連續面如層面和劈理面會產生明顯的岩體材料之異向性，另外弱面位態之不同使邊坡破壞之機制與模式有所不同，因此本研究以三維數值方法，探討不同之弱面位態狀況對邊坡穩定之影響。

## 數值分析方法

本研究採用 PLAXIS 3D 進行數值模擬，並以簡單邊坡模型分析不同弱面(平面及楔形)

與坡面的相對方位狀況下之邊坡穩定性。

### 1. PLAXIS 3D

PLAXIS 3D 是荷蘭 PLAXIS BV 公司發展的有限元素軟體。有許多土壤或岩石應力應變關係的組成模式，包括簡單的彈性完全塑性的莫爾庫倫破壞準則模式(Mohr-Coulomb model)，較複雜的彈塑性模式(Hardening model)、潛移模式(Creep model)、岩體節理異向性模式(Jointed rock model)、虎克布朗破壞準則模式(Hoek-Brown model)及許多用戶自定義模式(User defined soil models)等。

為了解弱面影響邊坡安全係數的問題，本研究使用用戶自定義模式(User defined soil models)中的岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式(Jointed rock model with overall Mohr-Coulomb failure criterion，以下簡稱 Iso-JRMC)及強度折減法(phi-c reduction)計算數值模型的安全係數。

岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式(Iso-JRMC)結合了岩體節理異向性模式(Jointed rock model)及莫爾庫倫破壞準則模式(Mohr-Coulomb model)，改善了岩體節理異向性模式中非弱面方向上難以發展破壞面的缺點，以莫爾庫倫破壞準則定義非弱面方向的破壞。其彈性變形方面為等向性模式，使用剪力模數(Shear modulus)及帕松比(Poisson's

ratio)定義之。而塑性變形方面包含最多三個平面方向的異向性模式，以及其餘方向的莫爾庫倫破壞準則模式，使用凝聚力(Cohesion)、摩擦角(Friction angle)、剪脹角(Dilation angle)及各平面的抗拉強度(Tensile strength)定義之。

2. 邊坡幾何模型

本研究以國道 3 號 3.1 公里處崩塌事件為參考案例，建立邊坡幾何模型，邊坡坡度 20.6°，各部尺寸如圖 1 所示。針對不同弱面與坡面相對傾向、傾角等，將這些因子以不同的組合分類進行研究。

為方便後續討論，本研究將平面弱面及楔形弱面(圖 2(a))各部定義如下：

平面弱面的傾斜方向與坡面傾斜方向之夾角，或楔形兩弱面交線(圖 2 (b))傾斜方向與坡面傾斜方向之夾角定義為  $\alpha$ ；平面弱面傾角減邊坡傾角，或楔形兩弱面交線向量傾角減邊坡傾角定義為  $\beta$ ；楔形兩弱面之夾角定義為  $\gamma$ ；與楔形兩弱面交線垂直之剖面上(圖 2 (c))，弱面 1 之軌跡與水平線之夾角定義為  $\omega_1$ ，弱面 2 之軌跡與水平線之夾角定義為  $\omega_2$ ，此兩夾角差值之絕對值定義為  $\omega$ 。

3. 模式參數

岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式(Iso-JRMC)之基本參數包括：

(1)非弱面

G：剪力模數； $\nu$ ：帕松比； $c_{mc}$ ：凝聚力； $\phi_{mc}$ ：摩擦角； $\Phi_{mc}$ ：膨脹角

(2)弱面

nPlanes：弱面組數；

$\alpha_1^I / \alpha_1^{II}$ ：弱面 1/ 弱面 2 傾角；

$\alpha_2^I / \alpha_2^{II}$ ：弱面 1/ 弱面 2 傾向；

$c_1 / c_2$ ：弱面 1/ 弱面 2 凝聚力；

$\phi_1 / \phi_2$ ：弱面 1/ 弱面 2 摩擦角；

$\Phi_1 / \Phi_2$ ：弱面 1/ 弱面 2 膨脹角

依據上述模式(Iso-JRMC)之基本參數，本研究假設模擬之材料參數如表 1 所示。弱面之傾角與傾向部分，因楔形破壞屬三向度問題，故本研究依據不同組合之弱面與坡面相對方位條件使用立體投影圖計算兩弱面之傾角與傾向。

表 1 材料模式參數

Table 1. Parameters of the Iso-JRMC model

|      | c<br>(kpa) | $\phi$<br>(°) | G<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $\nu$ | $\gamma_{unsat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|------|------------|---------------|---------------------------|-------|------------------------------------------|
| 非弱面  | 50         | 30            | 2.6E5                     | 0.3   | 26                                       |
| 弱面 1 | 10         | 25            | -                         | 0.3   | -                                        |
| 弱面 2 | 10         | 25            | -                         | 0.3   | -                                        |

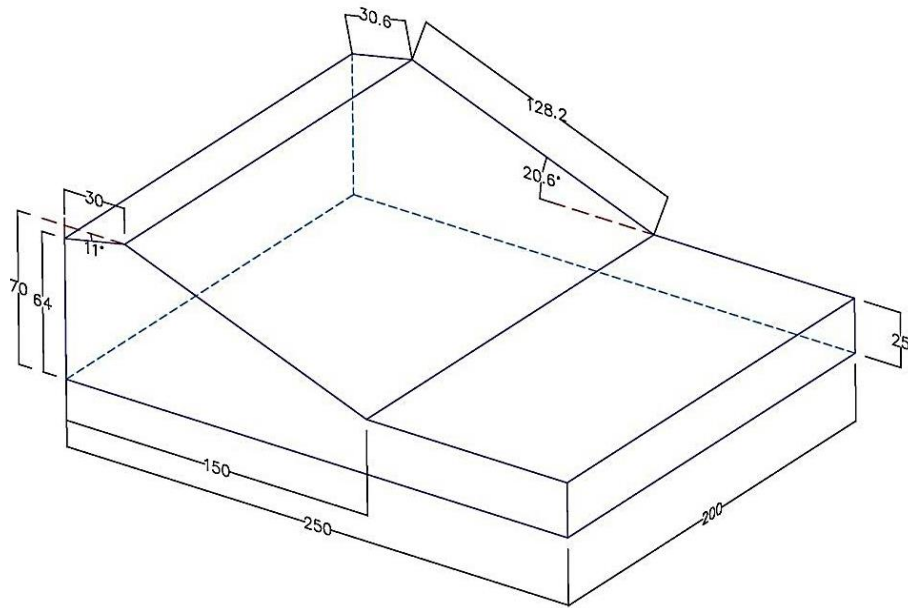


圖 1 邊坡幾何模型

Fig.1 The numerical slope model

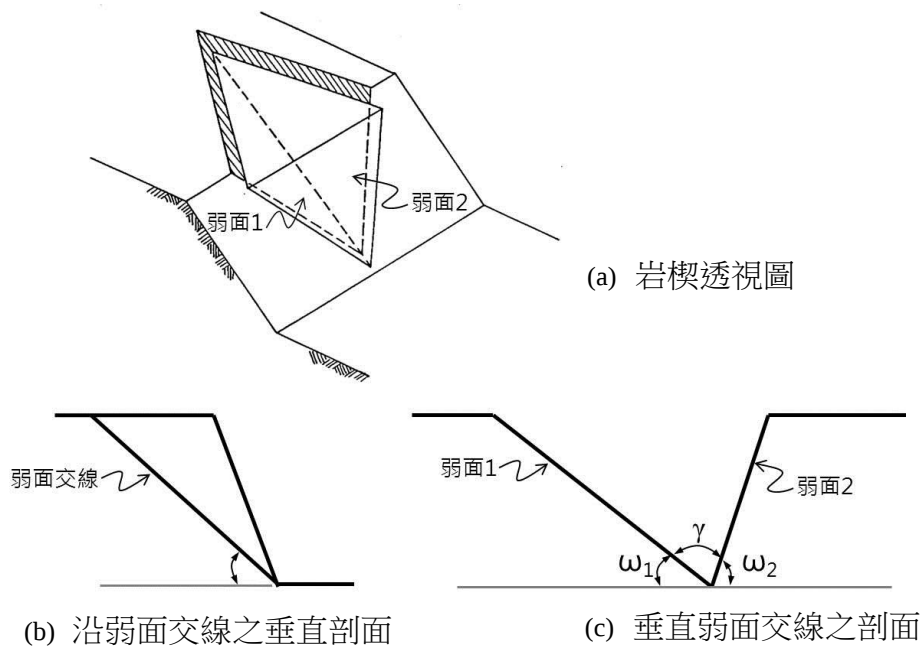


圖 2 岩楔之各參數名稱（修改自 李錫堤，1989）

Fig.2 Parameters for the wedge

## 結果與討論

本研究以邊坡之平面破壞及楔形破壞為主要探討對象，並以無地下水之情形下，分別討論不同位態組合因素之對邊坡安全係數及滑動情形之影響。其影響岩坡穩定因素，包括：平面弱面之  $\alpha$  及  $\beta$ ，楔形弱面之  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\omega$ 。

### 1. 平面弱面

#### (1) $\alpha$ 變化對邊坡穩定之影響

如圖 3，當  $\alpha$  越大時，其安全係數越大，當平面弱面之傾向與坡面一致( $\alpha=0^\circ$ )，安全係數最小，如圖 4，滑動情形隨  $\alpha$  越大滑動深度逐漸變深。依據水土保持技術規範第三十一條依坡面與岩層不連續面之位態關係， $\alpha \leq 20^\circ$  即為順向坡，其破壞情形趨近平面破壞， $\alpha > 20^\circ$  即為斜交坡，其破壞情形趨近圓弧形破壞。

#### (2) $\beta$ 變化對邊坡穩定之影響

由上述結果得知當平面弱面之傾向與坡面一致( $\alpha=0^\circ$ )，安全係數最小，故以  $\alpha=0^\circ$  討論  $\beta$  變化對邊坡穩定之影響。

如圖 5，隨著  $\beta$  由  $-20^\circ$  增加至  $160^\circ$  時安全係數呈現之變化趨勢為由下降  $\rightarrow$  上升  $\rightarrow$  下降  $\rightarrow$  上升  $\rightarrow$  下降，此變化可將弱面傾角狀態分為水平  $\rightarrow$  與坡面傾角一致  $\rightarrow$  高傾角  $\rightarrow$  垂直  $\rightarrow$  與坡面逆向  $\rightarrow$  水平。

當  $\beta < 0^\circ$  時弱面傾角會有順向坡因天然或人為因素致使弱面出露於坡面，為具潛在危險順向坡情形，但  $\beta = -20^\circ$ ，因弱面傾角接近水平，安全係數相較於  $\beta = -10^\circ$  高，然而由圖 6(a)、圖 6(b)顯示， $\beta = -20^\circ$  之滑動面較  $\beta =$

$-10^\circ$  深，相對來說  $\beta = -10^\circ$  時滑動面在淺層，其崩塌規模相對較小，而  $\beta = -20^\circ$  破壞時之滑動面較深或規模較大。

$\beta = 0^\circ$  時，表示平面弱面與坡面之傾向及傾角完全一致，滑動情形如圖 6(c)，滑動位置位於淺層，屬於平面型滑動，安全係數相對比其他弱面傾角狀況來得小。

在  $10^\circ < \beta \leq 40^\circ$  時，邊坡坡角小於弱面傾角，安全係數有逐漸上升之趨勢，其弱面狀態由順向逐漸變化為高傾角。滑動情形如圖 6(d)~(g)，滑動面逐漸變深。

在  $40^\circ < \beta \leq 70^\circ$  時，安全係數有逐漸下降之趨勢，滑動情形如圖 6(h)~(i)，滑動面主要集中於上邊坡。

在  $70^\circ < \beta \leq 159.4^\circ$  時，弱面係屬逆向坡情形，當  $\beta = 70^\circ \sim 80^\circ$  時即為弱面傾角趨近  $90^\circ$ ，安全係數最小，壞破位置集中於上邊坡至坡頂處，如圖 6(j)，隨著  $\beta$  越大，安全係數先上升後下降，滑動趨勢如圖 6(k)，在  $140^\circ < \beta \leq 159.4^\circ$  時，因弱面傾角已接近水平，安全係數隨之下降，滑動面亦逐漸變淺，如圖 6(l)，而  $\beta = 159.4^\circ$  與  $\beta = -20^\circ$  安全係數相同為 2.14。

綜合上述平面弱面  $\beta$  變化對邊坡穩定之影響討論結果，當  $\beta = 70^\circ \sim 80^\circ$  時表示弱面傾角趨近  $90^\circ$ ，安全係數最小，在重力的長期作用下，一般有利於傾倒破壞的發育，對邊坡安全影響最大，其次為與坡面呈順向坡之  $\beta = -10^\circ \sim 10^\circ$ 。反之，與坡面呈逆向坡之  $\beta = 90^\circ \sim 140^\circ$  安全係數最大，對邊坡安全影響最小。而  $\beta = -20^\circ$  及  $\beta = 159.4^\circ$  之弱面傾角趨近水平時，不似順向坡及傾倒破壞狀態對邊坡安全影響顯著，但因天然或人為因素致使弱面

出露於坡面時，仍具有大規模之崩塌潛勢，應值得注意。

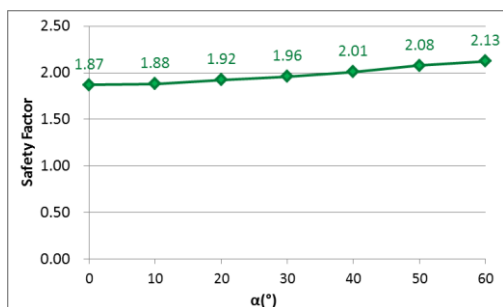


圖 3 平面弱面狀況  $\alpha$  安全係數關係圖

Fig.3 Safety Factor of planar weak planes of Condition  $\alpha$

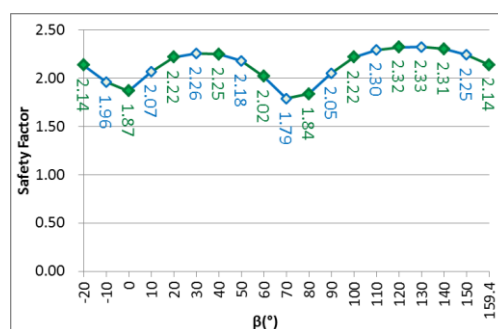


圖 5 平面弱面狀況  $\beta$  安全係數關係圖

Fig.5 Safety Factors with various  $\beta$

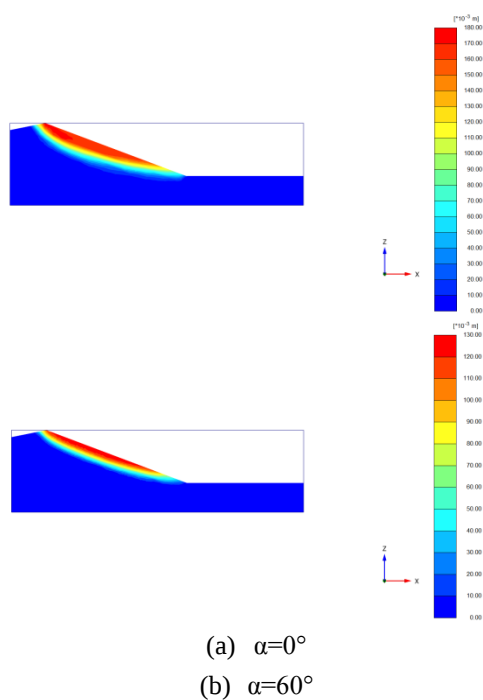


圖 4 平面弱面狀況不同  $\alpha$  的破壞剖面

Fig.4 Cross-sections with different  $\alpha$

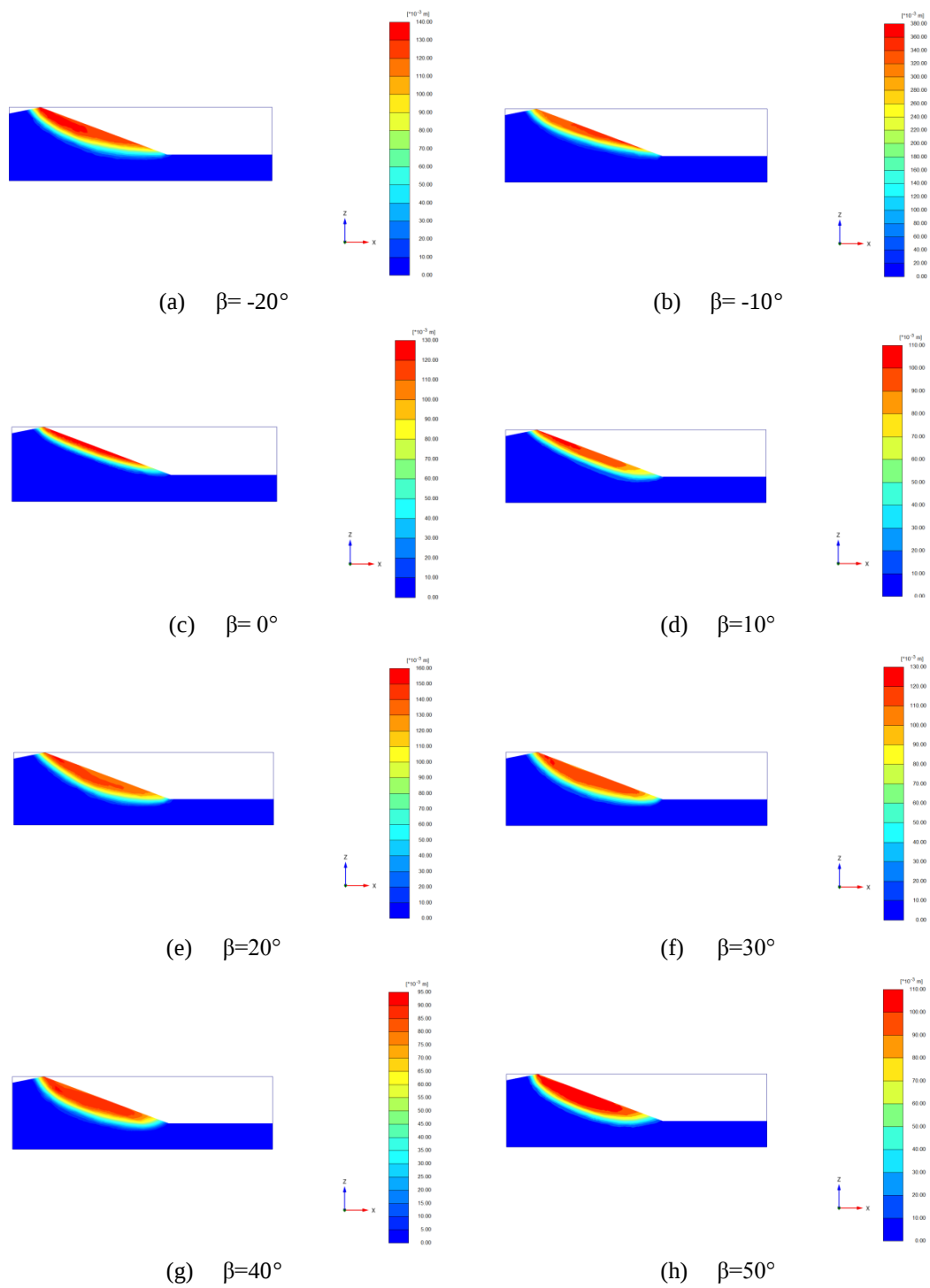


圖 6 平面弱面狀況不同  $\beta$  的破壞剖面  
Fig.6 Cross-sections with various  $\beta$

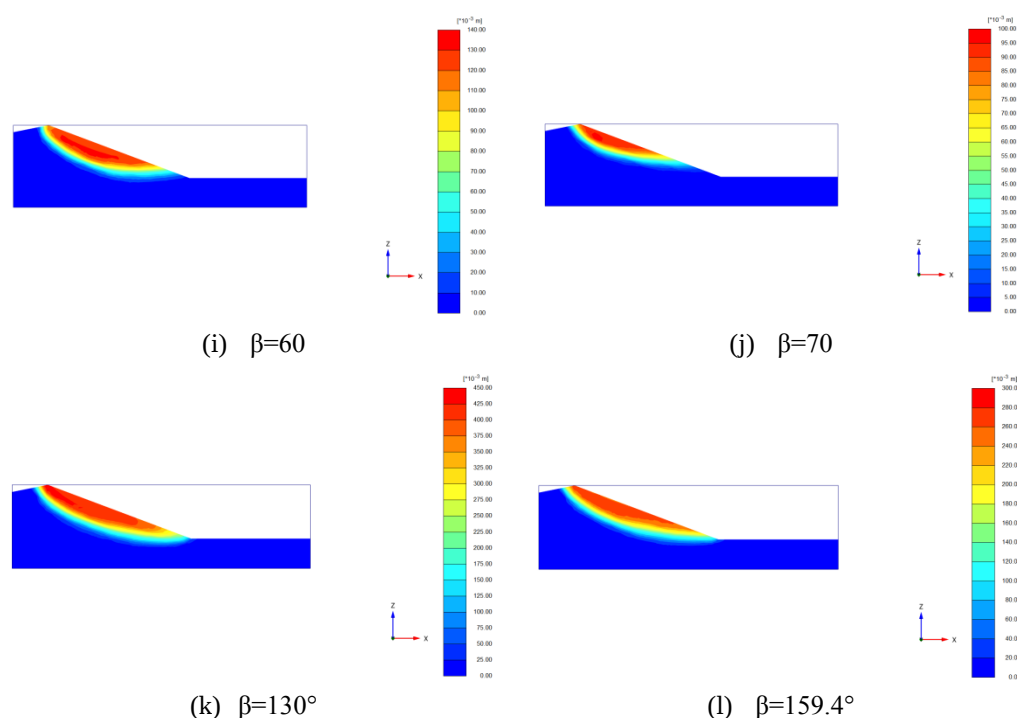


圖 6(續) 平面弱面狀況不同  $\beta$  的破壞剖面

Fig.6 Cross-sections with various  $\beta$

## 2. 楔形弱面

在楔形弱面方面，分別探討  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  及  $\omega$  之改變對邊坡安全係數之影響。

### (1) $\gamma$ 變化對邊坡穩定之影響

控制  $\alpha = 0^\circ$  及  $\beta = 0^\circ$ ，並以兩組相同傾角之弱面，探討  $\gamma$  改變對邊坡安全係數之影響。

如圖 7，隨著  $\gamma$  越大，安全係數有下降之趨勢至  $\gamma = 160^\circ$  最低後，又隨著  $\gamma$  增大，安全係數上升。由圖 8(a)~(c)可發現滑動面隨著  $\gamma$  增大而變淺，至  $\gamma = 160^\circ$  之滑動面最淺。而  $\gamma = 160^\circ \sim \gamma = 180^\circ$  趨近於平面弱面，由圖

8(d)~(e)顯示，由此可推斷楔形弱面趨近於平面弱面狀態時對邊坡穩定較不利。

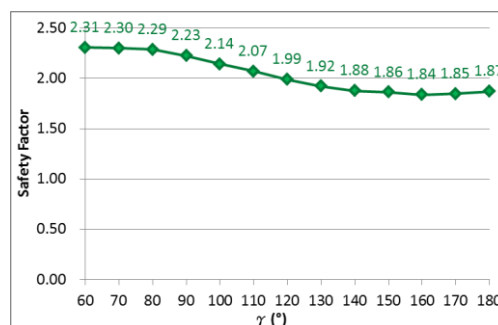


圖 7 楔形弱面狀況  $\gamma$  安全係數關係圖

Fig.7 Safety Factors with various  $\gamma$

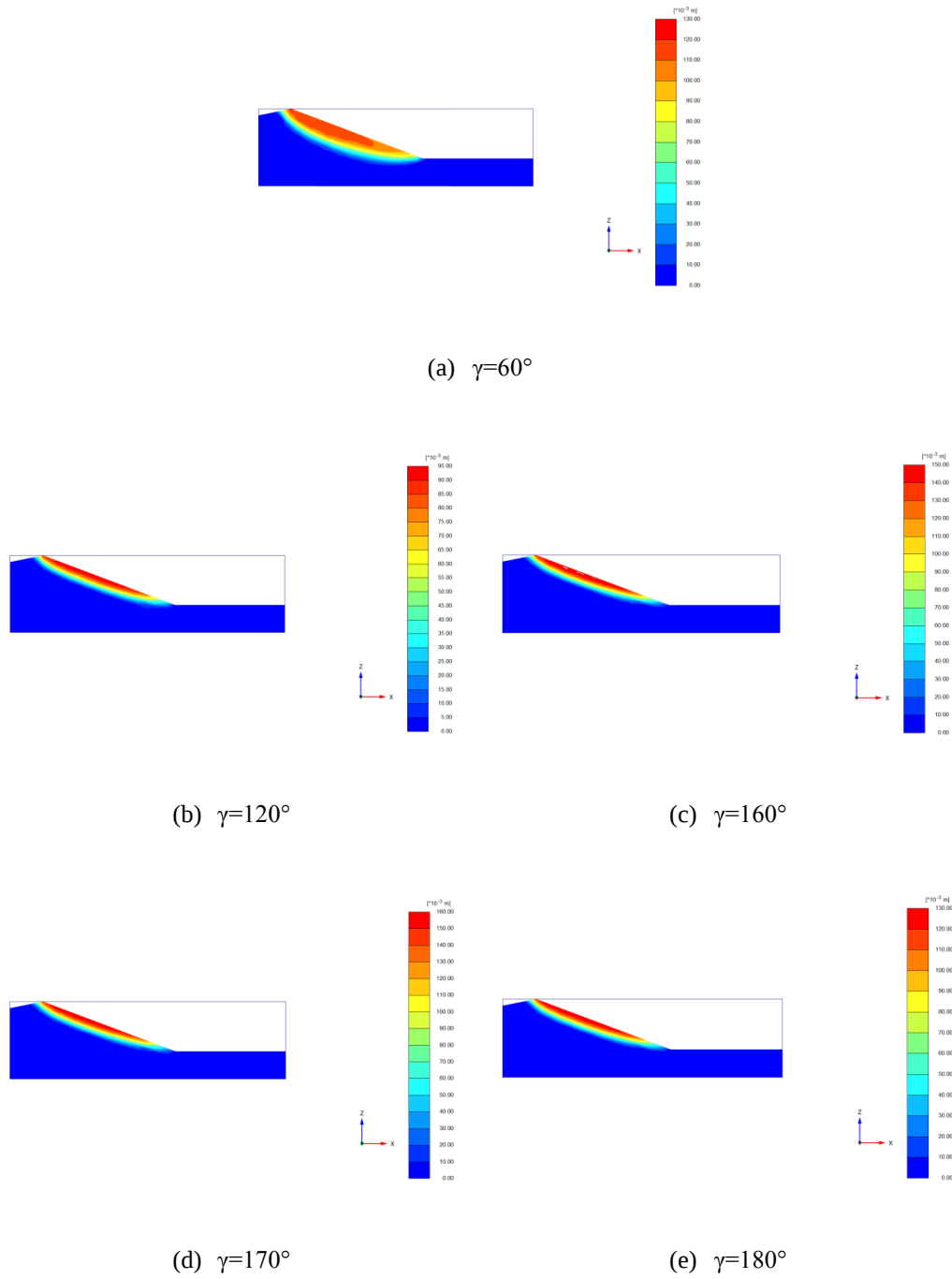


圖 8 楔形弱面狀況不同  $\gamma$  的破壞剖面  
Fig.8 Cross-sections with various  $\gamma$

## (2) $\alpha$ 變化對邊坡穩定之影響

由  $\gamma$  之討論結果，靠近  $180^\circ$  會有平面破壞的趨勢，因此本研究以  $\gamma=120^\circ$  作為楔形弱面之討論對象。

控制  $\beta=0^\circ$ ，並以兩組相同傾角之弱面探討  $\alpha$  改變對邊坡安全係數之影響。如圖 9，整體趨勢與平面弱面之討論相似， $0^\circ \leq \alpha < 20^\circ$  時，兩弱面之交線與邊坡坡面呈順向狀態，安全係數較小，坡趾處之最大滑動面位於淺層，如圖 10 (a)； $30^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$  時，兩弱面之交線與邊坡坡面呈斜交狀態，安全係數相對較大，坡趾處之滑動面較深，如圖 10 (b)。

## (3) $\beta$ 變化對邊坡穩定之影響

控制  $\alpha=0^\circ$ ，並以兩組相同傾角之弱面探討  $\beta$  改變對邊坡安全係數之影響。如圖 11，整體趨勢也與平面弱面之討論相似。 $\beta=0^\circ$  兩弱面交線向量傾角與邊坡坡面一致，以及  $\beta=70^\circ \sim 80^\circ$  兩弱面交線向量傾角趨近垂直時不利邊坡穩定；當  $\beta \leq 0^\circ$  時兩弱面交線出露， $\beta=-20^\circ$  因兩弱面交線向量傾角接近水平，安全係數相較於  $\beta=-10^\circ$  高，而由圖 12(a)及(b)顯示， $\beta=-20^\circ$  雖然邊坡相對比  $\beta=-10^\circ$  及  $\beta=0^\circ$  穩定安全，一旦發生破壞，滑動面較深。

在  $10^\circ < \beta \leq 30^\circ$  時兩弱面交線變陡，以及  $80^\circ < \beta \leq 159.4^\circ$  時兩弱面交線與坡面呈逆向，安全係數有逐漸上升之趨勢，對於邊坡穩定有正面影響。

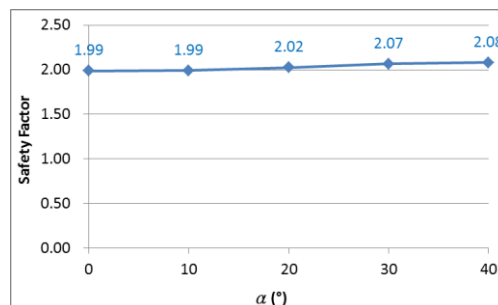


圖 9 楔形弱面狀況  $\alpha$  安全係數關係圖

Fig.9 Safety Factors with various

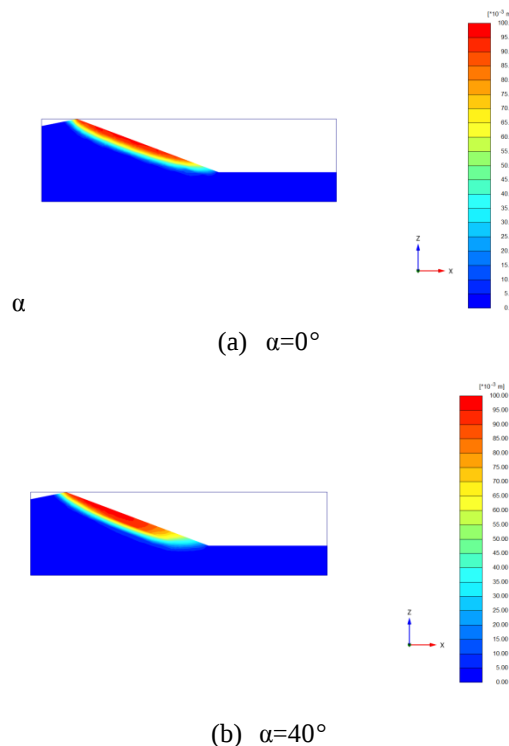


圖 10 楔形弱面狀況不同  $\alpha$  的破壞剖面

Fig.10 Cross-sections with various  $\alpha$

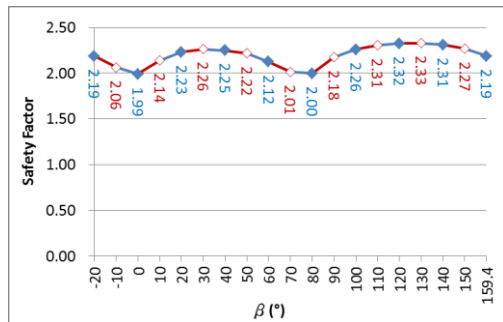


圖 11 楔形弱面狀況  $\beta$  安全係數關係圖

Fig.12 Safety Factors with various  $\beta$

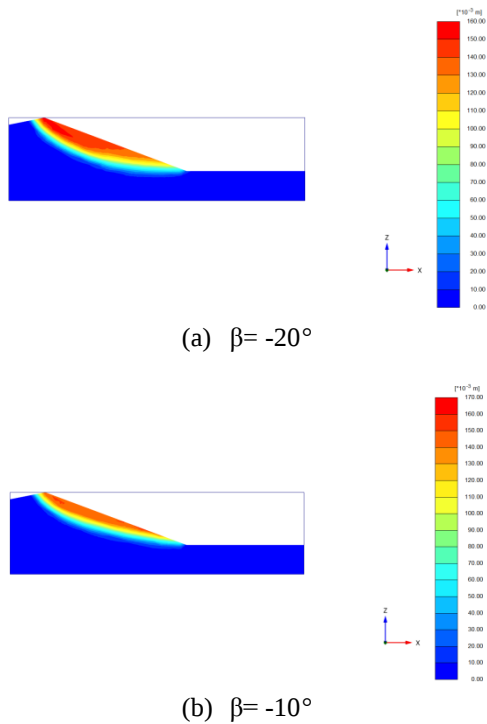


圖 12 楔形弱面狀況不同  $\beta$  的破壞剖面

Fig.12 Cross-sections with various  $\beta$

#### (4) $\omega$ 變化對邊坡穩定之影響

上述  $\alpha$ 、 $\beta$  及  $\gamma$  之變化均以兩組相同傾角之弱面做討論，以下以  $\alpha = 0^\circ$ 、 $\beta = 0^\circ$  及  $\gamma = 120^\circ$ ，另針對  $\omega$  對邊坡安全係數之影響一併進行探討。

如圖 13，安全係數與  $\omega$  角度成反比， $\omega = 0^\circ$  時即為弱面 1 之  $\omega_1$  等於弱面 2 之  $\omega_2$ ，安全係數最大，且滑動面之位置集中於兩弱面交線方向，如圖 14 (a)；隨  $\omega$  增大至  $\omega = 60^\circ$  時安全係數最小，其原因為當弱面 1 之  $\omega_1 = 0^\circ$ 、弱面 2 之  $\omega_2 = 60^\circ$ ，弱面 1 之  $\omega_1 = 0^\circ$  則表示此弱面與邊坡坡面之傾角與傾向一致，而弱面 2 傾角為高傾角狀態，此兩弱面之狀態均不利於邊坡穩定，安全係數隨之下降，而滑動面之位置則會偏向傾角較高之弱面，如圖 14(b)。因此當兩弱面傾角不同時，其一弱面之傾向及傾角趨近於邊坡坡面，比平面弱面與邊坡坡面之傾角與傾向一致時對邊坡穩定更不利。

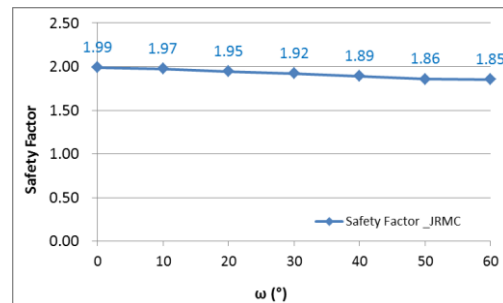


圖 13 楔形弱面狀況  $\omega$  安全係數關係圖

Fig.13 Safety Factors with various  $\omega$

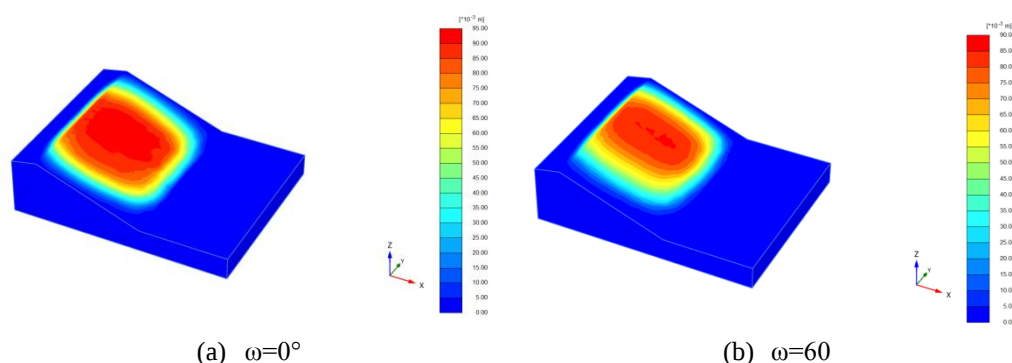


圖 14 楔形弱面狀況不同  $\omega$  的破壞模式

Fig.14 Failure modes with different  $\omega$

## 結論

1. 平面弱面狀態，當弱面傾向與坡面傾向一致時，弱面傾角與坡面傾角相同或弱面傾角趨近於  $90^\circ$  時，最不利邊坡穩定。
2. 楔形弱面狀態，當楔形兩弱面交線之傾向與邊坡傾向一致時，兩弱面傾角與坡面傾角相同或兩弱面之交線傾角趨近於  $90^\circ$  時，最不利邊坡穩定。
3. 當兩弱面傾角不相等，兩弱面傾角差異越大時，安全係數越小，若一個弱面傾向與傾角趨近於坡面時則安全係數最低。

4. Turner, A.K. and Schuster, R.L., eds. "Landslides-Investigation and Mitigation: Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, USA, 67-75.
- Paul Bonnier, Ronald Brinkgreve (2013). "Jointed Rock model with overall Mohr-Coulomb failure criterion". Plaxis bv

106 年 5 月 12 日收稿

106 年 5 月 28 日修改

106 年 5 月 31 日接受

## 參考文獻

1. 李錫堤(1989)，「岩楔安定性之敏感度分析」，工程地質技術應用研討會論文集，315-343。
2. 李錦育 (2001)，「台灣崩塌地的分類與防治工法」，山地學報，19(5)，425-429。
3. Cruden, D.M., and Varnes, D.J. (1996). "Landslide types and processes, in