

地震作用下的坡地崩壞機制

Slope Failure Mechanism caused by Earthquake

蘇苗彬

Miau-Bin Su

國立中興大學

土木工程學系副教授

壽克堅

Albert Shou

國立中興大學

土木工程學系副教授

摘要

地震的波動與振動的影響，在山坡地裡可能形成各種災害，落石、地滑、土地沉陷、擋土措施損毀、道路上下邊坡的破壞，甚至建物、住家的災害，大大的影響了民生及環境安全，引起各界的關切。要討論坡地的安全及植生復舊，應先了解其崩壞的機制與規模。

此次地震在台灣中部造成了數量龐大的坡地災害，由其破壞形式來看多為淺層表面平面形的崩落，其落下之堆積物呈現較安定的狀態。另一類數量較少但較嚴重的災害為大規模深層的滑動，數量龐大的風化材料沿著平面平移滑動，並堆積於低地，其所佔體積大，可能可以阻礙原有水流系統，形成堰塞湖等特殊景觀，其堆積物因材料經運移故呈現鬆散，有二次災害之虞，應特別注意。

ABSTRACT

Earthquake caused slopeland failure. Different kinds of disaster including fall, slide, subsidence, destroy of retaining structure, roadside slope failure or even housing are all threatening our life. In order to set the path of remedial work, mechanism of failure caused by earthquake in slopeland were studied here. Most disaster caused by chi-chi earthquake in central Taiwan Island can be divided into two forms. One is shallow surface planar failure in the form of fall. Debris fallen accumulated in downslope which is stable. Another kind of failure is large amount of weathered material sliding along jointing plane and caused large blocked lake intercept the drainage system which maybe threatening downstream in the coming rainy season.

一、前言

地震乃大地應力引起地層錯動的一自然現象，地層因大地應力的持續累積能量，到了臨界破壞或錯動時，其應變能量的瞬時釋放，釋放的過程引起了能量的波動及地殼的振動。這樣波動與振動的影響，在山坡地裡可能形成各種災害，集集大地震後的勘災過程中，山坡地範圍的落石、地滑、土地沉陷、擋土措施損毀、道路上下邊坡的破壞，甚至建物、住家的災害，大大的影響了民生及環境安全，引起各界的關切。

二、地震造成的崩塌

地震引起的地滑，從以下地滑地的分類系統來看，多屬其中幾項特定項目，為深入了解與此次災害相關的部份，先來看這分類系統的內容。首先將地滑依其移動機制分為落(fall)、傾倒(topple)、滑動(slide)、擴散(spread)及流(flow)等 5 大類，見表 1 的分類系統，當然災害也能是兩項以上的組合形式。落及傾倒皆是指滑動物與原地盤產生分離的情形，滑動與擴散則為滑動物與地盤維持接觸，而流專指流體比例大到滑動物呈浮狀運移。討論地震可能造成的地滑地形式之前，先來看看過去十年內的兩處地震災害後的地滑地調查。

此次地震在台灣中部造成了數量龐大的坡地災害，由其破壞形式來看多為淺層表面平面形的崩落，受地震搖動的影響，鬆散的堆積物表面，從平面形破壞面分離而如自由落體滑下，堆積於坡趾的位置，其落下之堆積物呈現較安定的狀態。另一類數量較少但較嚴重的災害為大規模深層的滑動，以旋轉或平移的方式運動，如九份二山的地滑，沿著順向坡的節理面，數量龐大的風化材料沿著平面平移滑動，並堆積於低地，其所佔體積大，可能可以阻礙原有水流系統，形成堰塞湖等特殊景觀，其堆積物因材料經運移故呈現鬆散，有二次災害之虞，應特別注意。

三、案例探討

檢討過去發生的地震中，其條件與此次地震相近的美國加州北嶺 1994 年地震與菲律賓 1990 年地震的災害調查報告，從其災害形式可見與集集地震在台灣中部山區造成的傷害有相似之處，值得借鏡。

1. 案例一，Northridge earthquake 美國加州，1994 年

加州北嶺地區於 1994 年 1 月 17 日，當地時間凌晨 4:31 發生 M-6.7 的地震，如圖 1 顯示，其主震與誘發餘震所導致之地滑地涵蓋範圍約一萬平方公里，約略環繞著震央，所述地滑包括小型崩壞、落石、道路邊緣的破壞等，圖上紅色區域標示出較集中的地滑區，約涵蓋一千平方公里，主要分佈在震央北及西北方，沿著 Santa Susan 山區及其北方的 Santa Clara River Valley，其地層材料主要為年青、未膠結或很弱膠結的沉積物，並經歷過摺皺及各式大地應力作用。由於低強度及陡坡面，造成在地震搖撼下很容易破壞。其中主要見到的地滑災害可分為兩類，第一類是淺層的岩屑與堆積物的崩落及滑動，區域內有數以千處的這一類型的滑動，整個滑動區內都可以看得到。第二類是較深層，較連續的陷落或塊體的滑動，其材料則較為堅硬，主要分佈在 Santa Susan 及 Santa Monica 的山區。

第一類淺層的地滑，呈現破裂後滑動，其材料一般缺乏張力強度，容易沖蝕流失。其源頭多為陡峭的近乎垂直坡面，在地震搖動下很容易滑動，區域內約有 75% 的坡面地震後呈現裸露(denuded)的情況，如圖 2 所示，一般約數十公分至數米深，主要表象為乾燥，雜散的材料，堆積在陡坡面下的下坡面及坡趾位置，體積一般為數米立方至數十萬立方不等。有些可能會運移較長距離，至數百米的位置，其鬆散、無固結的堆積物停留在低窪地區，將來大雨可能有形成土石流動的危險(見圖 3)。

表 1 由地滑機制及其形式作成地滑地的分類系統參考 (Brunsden, 1985; Hutchinson, 1988; Casale, 1994; Dikau, 1996 等)

類 型	破壞面起始形式	後續的變形
1.落(崩落)(Fall)		
分離，從	a.平面 b.楔形 c.階梯 d.垂直	破壞面 自由落體，可能破壞，上下跳躍，滑，流下邊坡，可能包括液態化(fluidisation)、液化(liquifaction)、無粘性顆粒流動、產生熱、化學變化等。
2.傾倒(Topple)		
分離，從	a.單一 b.多重	a.已有之不連續面(pre-existing discontinuities) b.張力裂縫(tension failure surface) (同上)
3.滑動(slide)		
旋轉，在	a.單一 b.連續(successive) c.多重	圓弧形破壞面 趾部可能很複雜的變形，可能隆起跨越，流動，蠕動，可能形成退縮式破壞。
非旋轉組合滑動，在	a.單一 b.漸進的(progressive) c.多重的	非圓弧 i.任意形狀 ii.雙線段 在頭部通常發展成開口狀，其趾部破壞可能有多種型式。
平移滑動，在	a.平面 b.階梯 c.楔形 d.非旋轉	破壞面 可能形成複雜的滑出形態，尤其是分解後。
4.擴散(滑散) (spread)		
較軟弱的材料向側向擴散，其變形在	a.硬岩底下的軟弱層 b.層狀中的軟弱層 c.會崩壞(collapsible)的結構	在軟化粘土層突然滑散。 邊坡瓦解成塊狀有溝及裂縫。可能發生液化而致整體邊坡崩壞流動或形成懸浮狀的塊石等。
5.流(Flow)		
碎屑流動，在	a.非拘限之自然組合 b.渠道化之自然組合	地形表面 流動包括複合型的擠出，可能災害很大，可能成片狀或袋狀移動，包括粘性流或質流的機制。
蠕動，在		任何坡面 可能為重力影響，或季節性或破壞發生前或漸進式。
岩石流動(下陷鬆散垂落)，在	a.單邊 b.多邊 c.階段狀	山坡地 a.旋轉 b.組合面 不連續面 可能由自然重力蠕動或為地滑的起始階段，但不會顯出坡趾的變形，只會慢慢隆起。 可能包括傾倒。
6.組合式(complex)		
包括上述兩個及以上組合成的移動		

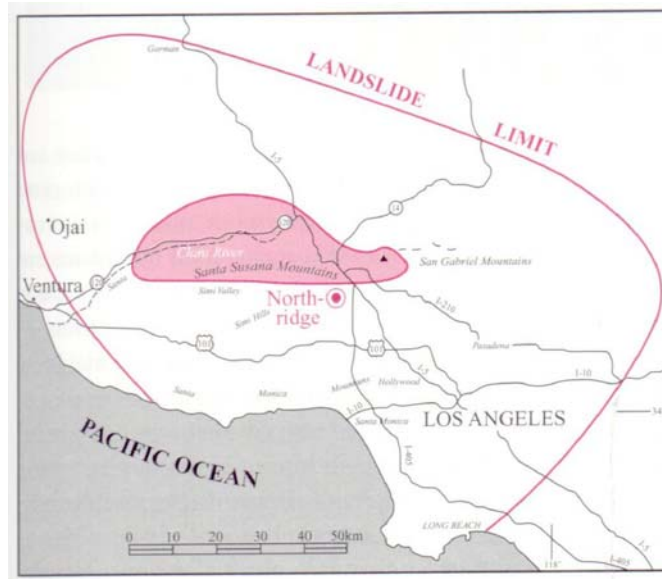


圖 1 加州北嶺地震影響範圍
(紅點位置為震央，紅色範圍為地滑較集中的區域)



圖 2 北嶺地震造成山區裸露



圖 3 山區淺層的滑動(主要為未固結沉積材料)

第二類較深層的滑動，數目較少但其總崩落量是很大的(如圖 4 及圖 5)，發生在舊有的崩場地，再遭到啟動而崩壞，其土方量達百萬立方米，再啟動且體積量變得更大，達到坡頂位置，掩蓋了小山丘，山脊等，可能改變了現地的排水系統，其滑落崖明顯，顯示出搖動很厲害，產生了沿著層面的滑動。



圖 4 深層滑動的上邊坡(由照片左向右滑動，移動約 25~30m)

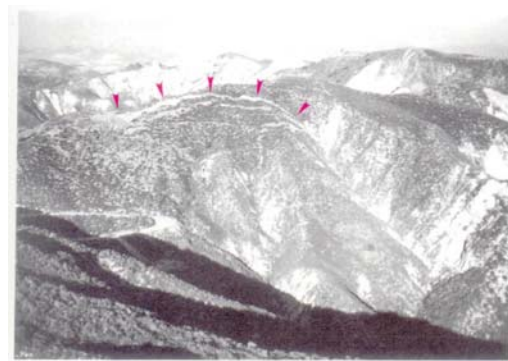


圖 5 深層滑動的崩落崖(箭頭所指為崖頂)

2. 案例二，Luzon 菲律賓，1990 年

在 1990 年 7 月 16 日的 Luzon 地震 7.8 級，沿著菲律賓斷層帶 125 公里的地表破裂(見圖 6)造成島上中央及北區許多的沉陷，住宅及公共設施損毀，道路橋樑破壞(見圖 7)，交通中斷，與海岸線平行的沉積岩小山脊產生許多的破壞，大部份為淺層(1~2 米深)的地滑。其材料多為沉積岩強烈風化而成，有少數塊狀的滑動沿著道路發生，亦有少部份為舊崩塌地再滑動。

本次地震引發的地滑主要發生地點包括陡坡面、分水嶺、河谷源頭(見圖 8)、河灣的凹面(concave)、挖方道路邊坡等，影響了大部份的河谷的山壁，震央附近邊坡有 50~90%造成裸露，其他地區則約為 40%。

沿著 Digdig 河谷做的航照判識顯示約有 5 百萬立方米的崩積量，其中的一條 Mahalika 高速公路有 13 處主要及 8 處較小的阻礙，總落石量約 0.8 百萬立方米，大部份為淺層的殘積土(residual soils)，分佈在超過 20%坡度的坡面上，其主要成份為來自底層岩盤的風化產物，其他沿道路邊坡破壞則主要來自修整坡面及不安定的挖方坡面。

地震造成的地滑大部份會使得邊坡變的更陡，並留下張力裂縫及破裂面，提供水的方便進入與累積在不穩定的邊坡，可能造成後續更多的災害，沿著公路後續的落石造成更大的傷害，在地震後的兩週，降雨造成公路有 14 個主要及 82 個較小的地滑，集中在 27 公里長的公路上，產生了 1.45 百萬米立方的土石，整體而言，降雨及餘震的效應使主要地滑發生範圍擴大，次要的地滑數量則大量的增加，單是道路沿線部份，崩落的總體積量增加了一倍。

鬆散的地滑落下的材料更進一步發展成土石流，在圖 9 的 Buclolc，Dipalo 尤其是在堆積物為砂、粉土少數礫石及樹木殘枝組合。由豐富的殘枝可以知道土石流的來源為新近裸露的邊坡上。這些殘枝可能阻礙水流，尤其在遭遇橋礮時，土石流到更下流後進一步變成超懸浮河川水流(見圖 10)。顯而易見的，在 7 月 16 日的地震形成了地滑相關的災難，而其造成的地質變化也為後續帶來許多災難的可能發生。主震後的邊坡不穩定驗後續餘震及後續季風而引發了許多的地滑，鬆散的地質材料堆積及沒有覆蓋的材料，因其剪力強度很低，可能造成碎屑土石流動，可能影響下游村落安全。而且，碎屑增加影響範圍內河床質，佔據了河床範圍而可能造成下游低地的泛濫。要防範後續災害的發生，應有雨量觀測，因強降雨最有可能引發後續的地滑，後續的土石流發生的可能則由鬆散堆積物的多少及後續降雨是否會再引發崩落造成新的土砂來源。

四、崩塌特性與植生復舊的關係

1. 植生對邊坡穩定性的影響

植生對邊坡穩定性的影響，從過去學者的報告中可見，一般將其造成的影響，分為對水文機構的影響及對力學機制的改變兩類，如表 2 之說明。



圖 6 菲律賓 Luzon 地震的範圍(紅色區域為地滑發生較集中的區域，紅點為震央，小紅點為餘震，PFZ 為菲律賓斷層，DF 為另一斷層帶，紅色三角形為後來發生土石流位置)



圖 7 坡面落石(沿著高速公路旁邊)



圖 8 山脊線的崩落(紅色箭頭所指為發生土石流地點)

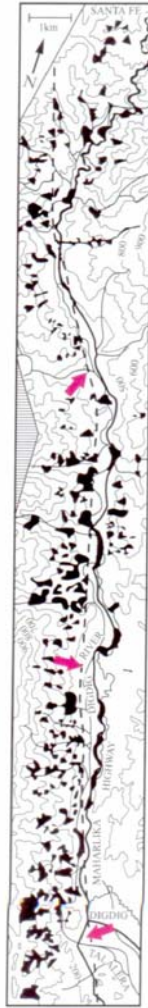


圖 9 沿著河谷的崩落調查(紅色箭頭部份為發生土石流的地區，本調查區為圖 6 之紅色框位置)



圖 10 土石流發生時枯枝阻礙排水

表 2 植生對邊坡的影響(from Coppin and Richards, 1990)

水文機構		力學機制	
<u>葉片攔截降雨，造成：</u>		<u>根系粘結土壤顆粒，造成：</u>	
1.水份減少，入滲量減少。	B	1.限制土粒移動，減少沖蝕。	B
2.減少雨滴動量，降低沖蝕量。	B	2.根系增加剪力強度。	B
3.雨滴由葉片再滴下，局部強度變大。	A	3.根系形成網狀，限制下方土層。	B
<u>莖、葉阻擋水流，產生：</u>		<u>根系穿入深層，造成：</u>	
1.地表儲蓄水增加，更多入滲。	A/B	1.錨定入深層，形成保護層。	B
2.地面糙度增加，降低水流。	B	2.支撐上邊坡形成拱狀。	B
3.不均勻的植生可能造成集中水流速度增加。	A	<u>高樹，造成：</u>	
<u>根系穿透土壤，導致：</u>		1.增加邊坡載重，垂直重及滑下的力皆增加。	A/B
1.縫隙增加入滲。	A	2.承受風的作用。	A
2.吸水產生蒸散，降低孔隙水壓力，增加張力進而增加土壤強度。	B	<u>莖與葉覆蓋地表，造成：</u>	
3.促進乾濕裂隙的生成，造成較多入滲。	A	1.行車的衝擊吸收，保護地表。	B
		2.保護地表受水流沖蝕。	B

A 為有害的效應，B 為有益的效應

從上述說明可見，在地震作用下，植生對於坡地是有保障防止破壞的作用，但在陡坡地及山脊處，因樹木本身重量受地震力搖動，則可形成破壞力的加大。再則植生覆蓋促進了入滲，也加速風化深入岩層，對順向坡安定威脅變大，增加了地震作用下的破壞範圍。各相關影響因子在力學上分析如圖 11 所示，由計算式中可見目前大規模的裸露地與崩落的堆積物，植生覆蓋是必需及經濟性可行的，可以加速邊坡恢復穩定性，但需在其無立即破壞的情況下進行。

2. 影響邊坡穩定性的重要環境因素

板塊的推擠形成了台灣的山地地形、水流及其他風化行為再淤積成平地，過程中地表及地下水滲流與地震作用都可能造成邊坡的不穩定，其作用的差異在此使用邊坡穩定分析中的無限長邊坡分析方法作說明，以垂直及平行於邊坡滑動面的分量，由 $\frac{N}{T}$ 做為指數來比較各種不同情況下，包括排水、地震作用等情況下邊坡的穩定程度。後續表 3 為不同情況下各因子的說明。

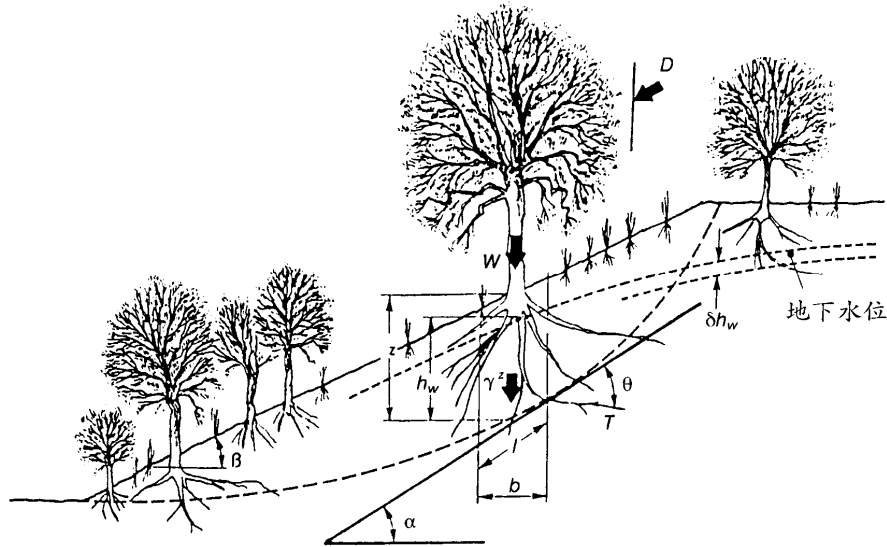


圖 11 植生影響邊坡穩定的主要因子，相關參數如下：

$\gamma \cdot z$	土壤切片的總重(kN/m ²)
c', ϕ'	滑動面的有效剪力強度
l	滑動面長度($b \sec \alpha$)
u	滑動面上的孔隙水壓力(kN/m ²)($\gamma_w h_w$)
植生的存在造成改變相關因子	
u_v	因植生蒸發造成孔隙水壓下降(kN/m ²)(2)
c'_R	因植生根系造成土壤凝聚性增加(kN/m ²)
c'_S	因根系造成土壤呈張力狀態造成有效凝聚性增加(kN/m ²)(2)
W	植生的重量(kN/m)
D	風的載重(kN/m)
T	根系的張力強度(kN/m)
z	滑動面的上方土高(m)
h_w	滑動面上方水位高(m)

其在無植生時的邊坡安全係數

$$F = \frac{c' + (\gamma \cdot z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma \cdot z \sin \beta \cos \beta}$$

有植生時的邊坡安全係數

$$F = \frac{(c' + c'_R) + [(\gamma \cdot z - \gamma_w h_w) + W] \cos^2 \beta + T \sin \theta \tan \phi' + T \cos \theta}{\{(\gamma \cdot z + W) \sin \beta + D\} \cos \beta}$$

表 3 不同情況下邊坡穩定性的比較

情況	條 件			發 生 情 況	特 徵
	含水量 與滲流	地震 力	暫態超 額孔隙 水壓力		
a	未飽和			自然乾燥良好，排水、 入滲少。	最好的情況是良好排 水設計的目標。
b	未飽和	有		遭遇地震時。	很少造成嚴重破壞。
c	飽和， 水平滲流			自然邊坡，無設施，降 雨飽和，不利的滲流。	平行於邊坡的滲流，造 成滲流應力，降低穩定 性
d	飽和， 垂直滲流			邊坡設排水系統，垂直 滲流有益。	垂直向下的滲流，滲流 應力無害，而安全消耗 能量。
e	飽和， 水平滲流	有		飽和邊坡遭遇地震，沒 有體積變化。	在永久構造物考慮地 震影響的設計條件。
f	飽和， 水平滲流	有	正	飽和鬆散或強風化岩 坡遭遇地震，有液化傾 向。	可能造成邊坡完全的 破壞，重要結構物一定 要避免。
g	飽和， 水平滲流	有	負	飽和緊密邊坡，遭遇地 震有膨脹傾向。	緊密土壤及強的硬岩 可以抵抗地震侵襲。

取一無限延長的順向邊坡，其表面傾斜角約為 30° ，假設以下情況作成計算，各情況的向量分析如圖 12 所示，並將其正向力與平行於邊坡的分量作成比較，如圖 13 所示，可以看出各個因子的影響。

情況 a：

無地震之無限長非凝聚性土壤邊坡，其主要作用力只有土體重 W_0

$$\frac{N_a}{T_a} = 1.79, \text{ 顯示高穩定度。}$$

情況 b：(地震對乾燥邊坡的效應)

若發生地震時，增加一水平地震力 $0.15W$ 使得 N_b 變大， T_b 變小。

$$\frac{N_b}{T_b} \approx 0.7 \frac{N_a}{T_a}, \text{ 穩定度降低 30\%。}$$

情況 c：(飽和邊坡滲流方向的效應)

前述之邊坡若因豪雨使得地下水位上升至地表面，則水流方向大致與坡面平行，而土重變成浸水單位重。利用水力梯度法 (HYDRAULIC GRADIENT METHOD) 或邊界壓力法 (BOUNDARY PRESSURE METHOD)，決定滲流力 F 。

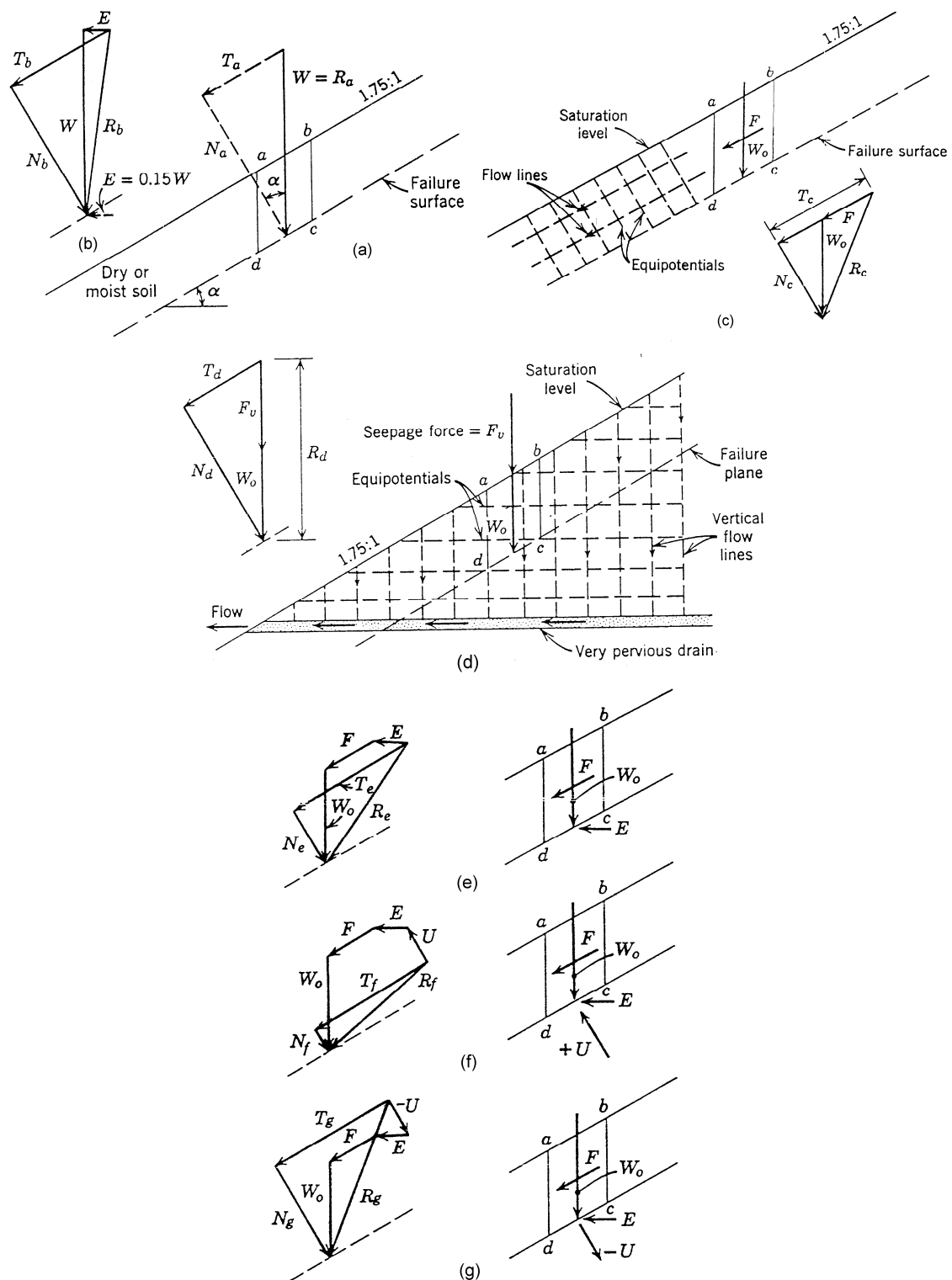


圖 12 以無限長邊坡各種受力條件之分析示意圖，(a)乾燥邊坡，(b)加上地震力的影響，(c)邊坡內部飽合，有平行於坡面的滲流，(d)飽合坡面有垂直向的滲流
地震作用下，(e)沒有體積變化，(f)產生體積收縮，(g)產生體積膨脹

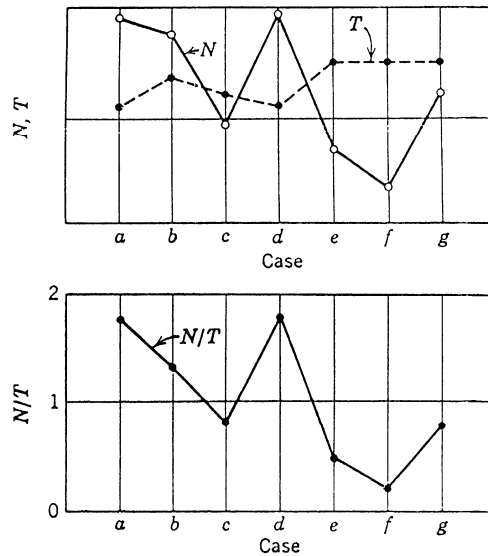


圖 13 前述計算中各種情況的 N, T 與 N/T 的比較
(邊坡斜率 1.75:1，地震力 0.15G，膨脹、收縮的
超額孔隙水壓假設 40%土重)

$$N_c/T_c \approx 0.5 N_a/T_a \quad (N_c/T_c \approx 0.6 N_b/T_b)$$

情況 d：(改變滲流方向成垂直)

若邊坡有一層高透水性礫石層，由流線網可見，因流向為垂直向下，增加土體的重力效應 $W = W_0 + F_0$ ，則 $N_d/T_d > N_a/T_a$ ，因此只要改變滲流方向，非但沒有孔隙水壓的問題，且增加邊坡的穩定力量。

情況 e：(飽和邊坡的地震效應)

地震時土體沒有體積變化作用於土體切片的力系有三種，土體浸水重 W_0 、滲流力 F 、水平地震力 E 。

$$N_e/T_e \approx 0.25 N_a/T_a$$

情況 f：(土體收縮)

組織鬆散的土體受到強烈震動時，土體有固結的趨勢。因土體內的力系，除了 CASE E 中三個力系以外，尚增加正孔隙水壓 U ， U 之大小決定於土體結構受到震動時損壞的程度。

$$\text{假設 } U = 0.4W_0, \text{ 則 } N_f/T_f = 0.11 N_a/T_a。$$

情況 g：(土體膨脹)

組織緊密的土體受到強烈的震動，因土體膨脹產生負孔隙水壓，則其穩定度較 CASE F 高。

臨界密度的觀念是由 Casagrande(1936)提出：顆粒性土壤其密度若小於臨界密度，當承受剪力作用或強烈地震時體積變小，若超額孔隙水壓無法迅速排除，

則造成液化現象。相反的，若土壤密度大於臨界密度，則發生體積膨脹，產生負孔隙水壓的現象。臨界密度的大小與土體之圍壓大小及應力狀況有關。

對於重要的填及其他永久性結構物，為避免在地震時發生嚴重失敗，可採取以下步驟：

- 1.在可能發生液化破壞的區域，利用有效的排水使飽和水面儘可能的降低。
- 2.在基礎部份排除使用鬆散及有潛在不穩定性質的材料。
- 3.在土堤內可能發生飽和的區域，需要徹底的夯實。

針對抵抗地震災害的結構設計，從上述分析可見瞬間孔隙水壓(transient pore water pressure)與重模作用(remolding action)是造成地震破壞的主要原因。在研究重要的地滑及邊坡破壞，需注意以下事項：

- 1.良好的排水是地震時改善邊坡穩定最有效的方法之一。
- 2.從過去結構物失敗的事實，若結構體在其重要區域含有鬆散飽和的土壤，即使削坡加寬結構體，也無法避免強震時發生液化的現象。
- 3.對重要開發其失敗會造成生命及財產的嚴重損失，必須規定其主要剖面是緊密、堅實、良好排水的材料，而在其基礎應排除使用鬆散、軟弱、飽和的材料。

對於順向岩坡而言，在其內部材料因風化而呈現鬆散狀態時，若其有局部飽合，則可能因地震力作用下而產生孔隙水壓的瞬間上升與土體的重模作用，因而發生整體大規模的滑動破壞。

六、地滑地的地表特徵與植生復舊

地滑地發生造成了現地地貌的改變，影響了土地的安定，與其間植物生長相互的影響，欲在崩壞地區進行植生復舊，必須先了解其安定程度，以下分崩壞下的堆積物及具活動性的滑動土體與安定的舊滑動體說明其特徵。

A.堆積物(Deposits)

- 1.在頭部形成橫向的脊線，以下則形成縱向脊線，趾部呈同心圓狀疊加於原地貌上。
- 2.橫向及幅射狀趾部的裂縫，側邊呈剪力破裂，頭部呈落崖狀。
- 3.趾部呈擴散狀，山谷有部份或完全堵塞，河流改道。
- 4.材料來自本區域但自滑落崖移出，包括原地盤原狀的大塊體在下邊坡堆積。

B.具活動性的滑動土體(active movement)

- 1.滑落崖及裂縫形成尖銳的邊緣及開口，沒有二次填充進入。
- 2.主體單元有二次裂縫及擠壓形成的隆起。
- 3.表面呈現擦痕，看似新鮮。
- 4.表面排水混亂，呈現小水塘等。
- 5.沒有表土生成，只有少數可快速生長之植生。
- 6.在滑動區與非滑動區之間可看出明顯的粗糙度、質地、植生等的差異。
- 7.傾斜的植物生長。

C.不具活動性的滑動土體(inactive movement)

- 1.滑落崖與裂縫經風化變得較不突出，裂縫內有填入物。
- 2.沒有二次壓力擠壓成的明顯隆起現象。

- 3.表面風化，植生進入。
- 4.較完善的排水系統，可能發現有部份不規則及低陷地點內有淤積填充。
- 5.表土覆蓋，植生良好或開發成農林地。
- 6.通常無法由地表判釋其界限，除非使用航照判釋。
- 7.新生成的樹林，滑動後的樹垂直生長。

植生復舊工作進行前，必得先調查區域的安定性，在確認無穩定性問題後，引入植生工程可加速安定性的恢復及沖蝕的防止。如若安定性仍有疑慮，則應安排進行工程方法的調查與實施，完成後再做植生復舊的工作。

七、結論與建議

地震的波動與振動的影響，在山坡地裡可能形成各種災害，集集大地震後的勘災過程中，山坡地範圍的落石、地滑、土地沉陷、擋土措施損毀、道路上下邊坡的破壞，甚至建物、住家的災害，大大的影響了民生及環境安全，引起各界的關切。為探討其災害的成因及破壞的機制，藉由文獻蒐集，現場調查與理論的討論，希能充分了解其災害形式與規模，以供做坡地安全整治之依據與植生復舊工作推展的參考。

此次地震在台灣中部造成了數量龐大的坡地災害，由其破壞形式來看多為淺層表面平面形的崩落，受地震搖動的影響，鬆散的堆積物表面，從平面形破壞面分離而如自由落體滑下，堆積於坡趾的位置，其落下之堆積物呈現較安定的狀態。另一類數量較少但較嚴重的災害為大規模深層的滑動，以旋轉或平移的方式運動，如九份二山的地滑，沿著順向坡的節理面，數量龐大的風化材料沿著平面平移滑動，並堆積於低地，其所佔體積大，可能可以阻礙原有水流系統，形成堰塞湖等特殊景觀，其堆積物因材料經運移故呈現鬆散，有二次災害之虞，應特別注意。

對於順向岩坡而言，在其內部材料因風化而呈現鬆散狀態時，若其有局部飽合，則可能因地震力作用下而產生孔隙水壓的瞬間上升與土體的重模作用，因而發生整體大規模的滑動破壞。

植生復舊工作進行前，必得先調查區域的安定性，在確認無穩定性問題後，引入植生工程可加速安定性的恢復及沖蝕的防止。如若安定性仍有疑慮，則應安排進行工程方法的調查與實施，完成後再做植生復舊的工作。

八、參考文獻

- 1.Cedergren, H., (1989), "Seepage, drainage and flow nets," 3rded, John Wiley and sons.
- 2.Lade and Yamamuro, editors, (1998), "Physics and Mechanics of Soil Liquefaction," Proceedings.
- 3.Morgam and Rickson, editors, (1995), "Slope Stabilization and Erosional Control," E and FN Spon, London.
- 4.SASSA, editor, (1999), "Landslides of the World," Japan Landslide Society, Kyoto University Press.