

# 動態作用下之邊坡滑移與破壞分析

## Analysis of Displacement and Failure of Slopes under Seismic Loading

計畫編號：NSC 90-2211-E-002-098

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：林美聆 臺灣大學土木工程教授

### 一、摘要

本研究利用數值方法建立一嚴謹的模型來模擬簡單邊坡受震之情形，並與擬靜態法與滑動塊體法加以比較，除了破壞面位置的探討，也包括邊坡受震安全性評估上的比較，並探討各法之優缺點及限制，來了解邊坡受震時，較‘接近’真實狀況的情形究竟如何，包括：坡體幾何形狀、地震波性質、及土壤性質對放大效應所造成的影響，以及動態分析破壞面與擬靜態分析破壞面兩者之差異量，並由此可看出擬靜態法分析不合理處及決定滑動塊體法的範圍。接著，以動態數值分析法求出永久位移量與滑動塊體法比較，由此進一步建議滑動塊體法適用的範圍，並討論影響滑動塊體法與數值分析法差異的原因。

接著，提出一梯形斷面邊坡受震的簡化分析模式，此一邊坡受震模式可適用於壩體邊坡、土堤型式之邊坡受震上，由於此類型式的邊坡經濟價值較大，因此需進一步提供更精細的分析。擬以滑動塊體法為基礎，修正 Mononobe(1936)提出的剪力樑法考慮坡內加速度變化之情形，使此模式能合理反應土壤剪力模數不均質、非線性、邊坡幾何形狀、震波性質對於放大效應之影響，在分析上更合理且比數值方法分析簡單方便。為了對於此簡化分析模式的正確性有一了解，本文選擇鯉魚潭土石壩的壩體邊坡做為驗證的案例，目前已完成加速度方面比對，可得出不錯的模擬效果，將來將比對受震位移量值，以了解此一簡化模式的合理性及應用性。

### ABSTRACT

A dynamic numerical model simulating simple slopes subjected to the earthquake was developed to investigate the dynamic slope behavior in the study. Results of this numerical model were compared to those of pseudo-static analysis and sliding block analysis for failure surfaces, evaluation of seismic slope safety, and limitations of analyses. Different effects caused by amplification through the soil layer, geometry of slopes, the properties of the

seismic waves and dynamic soil properties as well as differences between failure surfaces determined by pseudo-static, sliding block and dynamic numerical analysis were discussed. Accordingly, the appropriate range for applying sliding block analysis was proposed. Within the range, the displacement of toe of slope calculated by these two methods was compared and the differences between two methods were discussed.

A simplified analysis model for slopes with trapezoidal cross-section was constructed to account for seismic slope behavior of dams and levees. The model would incorporate the dynamic nonlinear soil properties, non-uniform shear modulus with depth, geometry of the slopes, and properties of seismic waves into the sliding block analysis based on modified shear beam method. The simplified model is reasonable yet simpler and more convenient than numerical method. To verify the accuracy of the simplified model, the field records of the slopes of Liyutan Dam were used for comparisons of the calculated results. The calculated accelerations records and measured field data are fairly consistent. The further research will aim at comparisons of the displacements calculated by the model and the field measurements to verify the rationality and performance of this model.

### 二、計畫緣由與目的

台灣平地面積有限，山坡地所佔面積相當廣泛，因此對於山坡地的開發與利用，顯得相當頻繁且有其需要性。由於台灣位於環太平洋地震帶上，地震相當頻繁，因此，邊坡受震穩定性的問題是經常遇到之課題。以往各國發生大地震時，因地震引起邊坡破壞，所導致生命或是經濟財產上的損失，往往在各種地震引起的災害中名列前茅。以 921 集集大地震為例，因山崩所產生的崩毀面積高達全國總面積的 0.3%，影響了交通、經

濟，並且危害居民的生命安全，因此對於邊坡受震時的行為以及安全性之評估實有進一步討論的必要。

### 三、研究方法與成果

#### 3.1. 各分析法破壞面之比較

利用 STABL5 分析之擬靜態法、極限分析法之上界值法為基礎之滑動塊體法、及 FLAC 有限差分軟體配合莫耳-庫倫彈塑性分析之動態數值分析法，對於簡單邊坡受震下，在不同 $\alpha$ 、 $c/\gamma H$ 、 $\phi$ 時各分析法破壞位置之差別做一比較，並以不同頻率及振幅之諧和波對於邊坡受震破壞面做一討論，可清楚了解邊坡在動態作用力作用下之破壞面及靜態作用力作用下之破壞面之差別，依此求出滑動塊體法之適用範圍，並對於滑動塊體法及擬靜態法兩法分析合理性做一探討。其中： $\alpha$ 為坡角、 $c$ 為土壤凝聚力、 $\gamma$ 為土壤密度、 $H$ 為坡高、 $\phi$ 為土壤摩擦角。

#### 3.2. 滑動塊體法位移之合理性探討

基於前一段的研究，可以得出滑動塊體法適用範圍，在此一滑動塊體法分析的範圍內，對於坡趾破壞面的坡趾位移量大小及位移的行為，以數值動態分析法及滑動塊體法做一討論及比較，以兩者位移比值之大小來判斷兩者坡趾位移量之差距，討論位移行為及造成位移量差距之原因，以對於滑動塊體法分析的合理性做一評估。

#### 3.3. 簡化分析模式之提出

本研究對於梯形斷面之邊坡型式，提出一簡化但又不失合理性之分析模式，以改良式的剪力樑法考慮梯形邊坡受土壤剪力模數隨深度遞增、梯形斷面之幾何因素、土壤材料動態非線性之特性、地震波特性和，對於坡內加速度造成之影響。將此一模式以穩態解之方式進行推導，並以頻率域及時間域的轉換觀念，將坡內加速度歷時求出，最後，以此模式求得之等值加速度代入滑動塊體法來求得滑移量，以修正傳統滑動塊體法。

#### 3.4. 簡化分析模式之驗證

本研究以鯉魚潭水庫之土石壩邊坡做驗證，由現地量測到的地震資料、壩體邊坡之位移資料與實驗資料進行比對。因現地紀錄器配置的問題，本研究先對現地量測之壩體地震紀錄資料進行修正；材料之參數則取中興顧問公司在現地取樣進行室內土壤動態實驗、物性實驗及靜態實驗所求得之參數來分析，幾何尺寸可由鯉魚水庫之設計圖來求得，將整個分析所需之參數代入模式中，並與現地所求得之地震紀錄做比對，以了

解此模式之正確性。

#### 3.5. 滑動塊體法適用範圍

首先由破壞面的探討知道，滑動塊體法與數值動態分析在滑動塊體法為坡趾破壞時破壞面接近，且滑動塊體法分析所得之破壞面較擬靜態法為合理。故初步先以坡趾破壞為滑動塊體法之適用範圍，並將其決定出來，在隨後分析坡趾位移量的比較，便限定在此適用的範圍內做比較。在均質簡單邊坡受震時的滑動塊體分析法，其破壞面受 $c/\gamma H$ 、 $\phi$ 、 $\alpha$ 、 $K_{hv}$ 四因子影響。其中 $K_{hv}$ 為水平降伏加速度係數。上述四個因子，必須滿足安全係數為1，因此只有三個為獨立，本研究以 $\phi$ 、 $\alpha$ 及 $K_{hv}$ 三個因子決定適用範圍。當邊坡土壤強度很強，亦即代表其降伏加速度 $K_{hv}$ 較大，則邊坡受震時要發生破壞的機率並不大，因此本次找尋的範圍， $K_{hv}$ 最大討論到0.6g，這相當於此邊坡需6級(>0.25g)的大地震才會有破壞的可能。摩擦角範圍是由0度到50度，超過50度的土壤並不多見。而坡度變化的範圍則是由10度到90度。

圖1中，將坡度由10~90度，找出發生坡趾破壞的門檻摩擦角，需超過門檻摩擦角才會產生坡趾破壞，也就是滑動塊體法的適用範圍是落在線下方，即在線下方才能使用滑動塊體法分析。由圖1中可看出坡度越小、降伏加速度越大，所需的摩擦角越大才會產生坡趾破壞，故在此情形下適用範圍較小。

#### 3.6. 滑動塊體法與數值分析法比較

由於滑動塊體法需限制在坡趾破壞的範圍內，且坡趾破壞型式的邊坡以坡趾受震位移量，來評估邊坡受震後的危險與否應屬合理，故本研究以坡趾位移量來做為兩法比較的基準。在位移的行為上兩法相當接近，可以得知滑動塊體法的分析有其明確的物理意義，及其假設滑動時不用考慮往坡頂方向滑動的合理性。本節取 $\alpha$ 、 $K_{hv}$ 、 $\phi$ 來做為滑動塊體法與數值分析法坡趾處位移比較的參數，以位移比值來判定兩者接近程度，位移比值=數值方法坡趾位移量/滑動塊體法坡趾位移量，越接近1表示兩者分析越接近。

##### a. 坡度因子( $\alpha$ )之討論

由分析中可發現，當坡度超過約60度時，位移比值有突然大增的趨勢，如圖2。且超過坡度60度，降伏加速度會造成位移比值對坡度的分佈相當分散。這是因為滑動塊體法適用分析的破壞型式為滑動型式，但坡度超過60度時，邊坡受震時不止有滑動破壞，還會伴隨坡頂崩落(Rock fall or Toppling)的效應，也就是坡頂會逐漸轉成張力破壞區，造成坡頂塊體有脫離坡體往邊坡外掉落的趨勢。而滑動塊體法無法表現出崩落效應之作用，因此坡趾位移值較小。故可以坡度

60 度以內為適用滑動塊體法的範圍，坡度大於 60 度將不適用滑動塊體法。這與野外觀察到的現象一致，在坡度較陡的時候，邊坡受震時大多為崩落，而在較平緩時，大多為滑動。而 Scott 等人(2000)在野外觀察邊坡受震的損壞情況，發現 60 度以上多以崩落為主，而這與九二一地震所觀察到的情形也相當符合。

#### b. 降伏加速度 $K_{hy}$ 因子之討論

降伏加速度對位移比值作圖，如圖 2。可發現在同一坡度底下，隨著降伏加速度的增加，位移比值都有變大的趨勢，幾乎無例外，其造成的原因主要為非線性效應所造成之影響。

#### c. 摩擦角 $\phi$ 因子之討論

在較低摩擦角時(如摩擦角=10度)，由圖 1 可知道降伏加速度不能太大，否則會不在滑動塊體法的適用範圍內，故在滑動塊體法的適用範圍內，其降伏加速度造成比值增大的情形並不會太嚴重，但是在摩擦角越大時，由於降伏加速度可允許的範圍很大，故降伏加速度造成比值放大情形較為嚴重，因此，可看出在摩擦角大的時候分佈較為散亂。

### 3.7. 推導簡化分析模式

本研究以梯形斷面之假設的邊坡形狀，來考慮壩體型式之邊坡或土堤型式之邊坡動態受震反應，並利用此一方法求得破壞面內的等值加速度，當成滑動塊體法的輸入加速度，以考慮放大效應及土壤非線性效應對於邊坡受震滑移量之影響。此一模式可同時考慮材料的非線性、以及不均質行為—即剪力模數隨深度改變，來求梯形狀邊坡內加速度的反應，分析中所使用的材料參數，可由現地採樣分別做動力、物性實驗所求得，或可由已知的材料特性，並由已有的公式中求得，使用上相當的方便，更重要的是，此法比其它數值方法，如有限元素、有限差分法快上許多，因此，簡化模式並不會因為考慮邊坡動態反應而增加太多計算時間。將求取坡內加速度反應模式特性整理如下：

- (1) 本模式可以同時考慮土壤剪力模數非均質之效應及邊坡幾何形狀的影響。土壤剪力模數為非均質的效應可用參數  $m$  控制；而邊坡的形狀的影響亦可採用參數  $R$  控制。
- (2) 本模式採用穩態解的方式求解，在一般需考慮邊坡安全的地震作用下，土壤因非線性行為所產生的等值阻尼比已經夠大到採用穩態解求解與實際解的值非常接近。且以此法計算，配合快速複立葉轉換，計算速度會較以往的模態疊加法快速。

- (3) 本模式採用等值線性法來反應土壤受震時之非線性行為，使得模式可考慮土壤非均質、邊坡幾何形狀、以及土壤受震非線性行為。

本模式以等值線性法模擬土壤非線行為，其優點在於此法之參數求取相當方便，一般土壤動力實驗皆可求取參數，且已累積大量的前人研究可供參考，不像動態彈塑性組成律參數常常難以實驗求取，在實際應用上較有價值。

### 3.8. 簡化分析模式之加速度驗證

本文將以鯉魚潭水庫土石壩的邊坡，配合現地所量測到九二一集集大地震，及其它量測到的壩底、壩頂、壩體下游坡面的加速度紀錄，與上述兩法分析的結果做一比較，以了解改良式的剪力樑法評估壩體內動態反應之效果。其分析材料動態參數仍由中興顧問公司之數據進行迴歸。而初始之剪力模數，則是以取樣土壤材料之物理性質，配合現地壩體邊坡內所測得之土壓及水壓之資料由經驗公式求得，而壩體邊坡之幾何尺寸則由設計圖上求得。

本研究除了以本模式與現地量測資料進行地震加速度之比對外，並以 FLAC 有限差分軟體進行分析，以與本模式結果做一比對。圖 3、圖 4 為 921 地震壩體坡面所量測到的資料與本模式以及 FLAC 數值分析法之比較，由圖可發現本模式在模擬壩體加速度方面，可有不錯的成果。在頻率域的比較方面：在較重要的低頻部分，FLAC 與本模式跟真實紀錄頻譜的形狀近似，但 FLAC 與本模式值較大；在高頻部份以實測紀錄的值較大，FLAC 預測值次之，本模式最小。

## 四、結論

綜合本研究分析成果及比較討論，可得到下列的一些結論：

- (1) 不論是對真實地震還是諧和波分析，滑動塊體法在邊坡受震坡趾位移量的評估上，尚能掌握滑動的行為，在整體行為上與數值方法分析所得頗近似。
- (2) 擬靜態法在坡趾破壞時破壞面與動態分析近似，但其破壞面會因地震力增加而使破壞面後退而增大；滑動塊體法破壞面不受地震力影響。以動態數值分析及 921 現地觀察結果，以滑動塊體法較合理。而擬靜態法需避免在地震力太大時使用，其破壞面會有過大的趨勢。
- (3) 綜合破壞面與坡趾位移量的比較，可建議滑動塊體法的適用範圍需在圖 1 及坡度小於 60 度的範圍內，滑動塊體法在應用上，應在本文所建議的範圍內。

- (4) 簡化模式的收斂速度快，不論初始應變為何，約循環3~6次即可使坡內應變值收斂至相同值；而垂直分區取50區時，m值也可收斂至一相同值。
- (5) 簡化模式之阻尼比曲線建議使用Ghaffar(1981)所提出之曲線分析，在小震才會得到較佳的結果。
- (6) 簡化模式中之頻譜圖以低頻的部分模擬得較佳，分析得到頻譜圖形狀與實測值接近，但值稍高；但高頻部分則會以實測值較大。
- (7) 大致說來，應用此簡化模式求取邊坡內的動態反應加速度，可發現模擬的情況算是相當不錯，可適切的表現出地震加速度受邊坡幾何形狀、土壤性質、地震加速度本身性質交互影響下之放大效應，對於日後壩體邊坡受震穩定性上分析上，可提供相當不錯結果。

## 五、參考文獻

1. 中央研究院地球科學研究所(1999)，『鯉魚潭水庫地震觀測及維護服務報告』，台灣省中區水資源局委託辦理。
2. 中興工程顧問有限公司(1997)，『台灣省鯉魚潭水庫管理局鯉魚潭水庫定期監測分析工作：大壩動態分析報告』，台灣省鯉魚潭水庫管理區委託辦理。
3. 台灣省中區水資源局(1999)，『鯉魚潭水庫竣工報告』。
4. 行政院農委會，九二一震災系列調查(一)——崩塌地調查與治理規劃成果資料，委託單位：行政院農委會水土保持，調查單位：工業技術研究院能資所(2000)。
5. 岡本舜三，「地震工程學」，科技圖書股份有限公司，1991年版。
6. 洪如江、林美聆、李錫堤、林銘郎、鄭富書(2000)，「九二一集集大地震後續短期研究-草嶺大崩山之後續研究」，報告編號，NCREE-00-057，國家地震工程研究中心。
7. Chang, C. J., Chen W. F. & Yao, J. T. P. (1984). "Seismic displacements in slopes by limit analysis," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 7, pp. 860-874.
8. Chen, W. F. & Liu, X. L. (1990). *Limit analysis in soil mechanics*, Developments in Geotechnical Engineering.
9. Chen, W. F. & Snitbhan, N. (1975). "On slip surface and slope stability analysis," *Soils and Foundations*, Vol. 13, No. 3, pp. 41-49.
10. Jibson, R. W., (1994). "Predicting Earthquake-induced Landslide Displacements using Newmark's sliding block analysis," *Transportation Research Record*.
11. Newmark, N. M. (1965). "Effect of earthquakes on dams and embankments,"

*Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp. 139-159.

12. Seed, H. B., Lee, K. L., & Idriss, I. M. (1969). "Analysis of Sheffield Dam failure," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, No. 6, pp. 1453-1490.

## 六、圖表

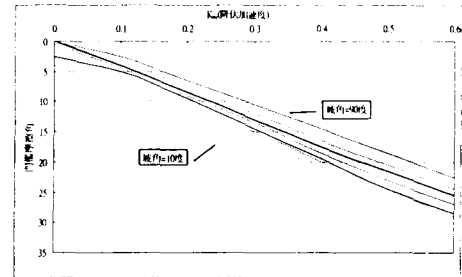


圖 1：滑動塊體法適用範圍

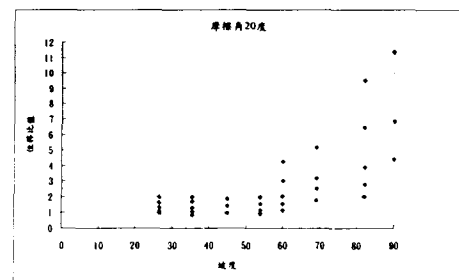


圖 2：坡度對於位移比值之影響

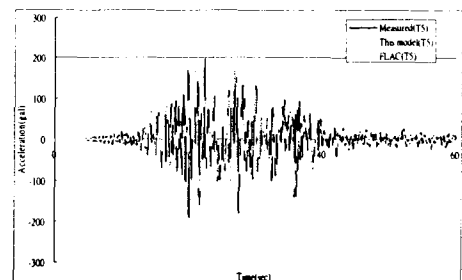


圖 3:壩坡面加速度之比較(921 地震)

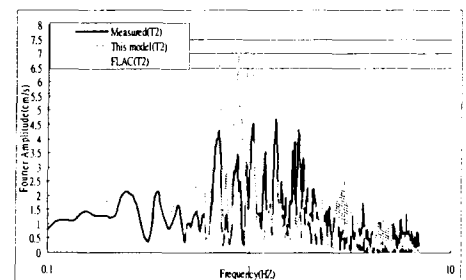


圖 4:壩坡面加速度頻譜之比較(921 地震)