

# FLAC<sup>3D</sup>於三維動態分析之應用(一) — 填土邊坡案例

冀樹勇\* 林金成\*\* 黃崇仁\*\*\* 張福全\*\*\*\* 李平仁\*\*\*\*\*

## 摘要

本文以岩盤邊坡進行填土之工程案例，探討 FLAC<sup>3D</sup> 於三維動態分析之適用性，並分析案例邊坡於地震力作用下之動態行為反應，其中包括邊坡岩盤與填土區之地震放大效應、岩盤凹谷之谷地效應與震後邊坡變形等。分析中填土邊坡材料應力應變行為皆以彈塑性模式模擬，其中回填土壤材料並考慮地震力反復作用下之勁度弱化行為。分析結果顯示，其案例邊坡填土區地表加速度分布大致與填土厚度分布吻合，顯示 FLAC<sup>3D</sup> 在三維動態分析上確屬適用。

關鍵字：邊坡穩定、三維動態分析、彈塑性模式、有限差分法

## 一、前言

傳統邊坡之安定分析皆以極限平衡法進行二維邊坡之抗滑分析，而考慮地震力影響時則以 PGA 值轉換為地震係數之仿靜態分析方法，其分析成果僅提供穩定與否之安全因子(Safety Factor)，而無法描述邊坡之動態行為(如現地邊坡之變位分布)，更遑論其對於上部結構物之互制影響。動態反應分析，目前工程實務上所使用之分析程式如表 1 所示，其中等值線性模式之程式屬早期發展且應用最為廣泛之分析程式，但因其僅在頻率域內求解動力方程式，故無法求得土壤之塑性永久變形，因此在評估地盤之變位時，往往需輔以相關材料試驗結果與其它方法。非線性模式分析法係在時間域內直接求解地盤反應，包括加速度、應變與變位歷時等，故其應用已日益普遍，且因土壤材料模式之改進，該分析模式已逐步取代等值線性分析模式，而成為大地工程動態分析之主流。

一般常將大地工程問題以二維數值分析模式模擬，惟在某些三維邊界效應明顯之問題上，單以二維之分析模式往往無法反應三維不規則地盤幾何形狀對於地盤反應之影響。因此，選擇適當之三維分析程式進行數值模擬，為是否確實掌握地盤反應之關鍵。一般現有三維的動態反應數值分析方法，包括有限元素(Finite Element)及有限差分(Finite Difference)方法，其中有限元素的分析模式包含等值線彈性

\* 中興工程顧問社大地工程研究中心經理  
\*\* 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員  
\*\*\* 中興工程顧問公司大地工程部技術經理  
\*\*\*\* 台灣電力公司輸變電工程處股長  
\*\*\*\*\* 台灣電力公司核能後端營運處股長

(Equivalent Linear)及非線性(Nonlinear)模式模擬地震過程中土壤之非線性與弱化行為，前者如 TLUSH (Kagrawa et al.,1981)以頻率域(Frequency Domain)進行，以求得分析域內部各處之反應及內部所產生的動態應力；後者如 DYNAFLOW (Prevost,1981) 程式以多重降伏面塑性模式(Multiple Yield Surface Plasticity Model)進行時間域(Time Domain)之動態分析，如表 1 所示。目前在地盤動態反應分析常用之三維電腦程式以 FLAC<sup>3D</sup> 為主，雖然其他泛用型分析商業軟體，如 ABAQUS、ANSYS、ADINA 與 NASTRAN 等，皆可作為分析工具，惟泛用型商業軟體為符合各類型物理問題之分析需求，一般皆較為複雜且使用較不方便，而地工問題之特性與其他應用領域稍有不同，如複雜的地層分層、地工材料的非線性與非彈性、開挖與支撐結構之模擬及地下水之影響等，皆須有較為合理之模擬。因此，以針對地工分析特性而發展之分析程式 FLAC<sup>3D</sup> 較適合應用於三維地盤受震反應分析問題。

本文以中寮開閉所填土邊坡為例，應用 FLAC<sup>3D</sup> 程式分析三維邊坡於 921 地震作用下之動態行為反應，包括邊坡岩盤與填土區之地震放大效應、岩盤凹谷之谷地效應與震後邊坡變形等，以提供後續改善對策參考，及建立評估改善方案成效分析模式。

表 1 應用於工程實務之大地工程動態分析程式(摘自 Kramer and Paulsen, 2004)

維 度	作業系統	材料組構模式	
		等值線性	非線性
1-D	DOS	Dyneq, Shake91	AMPLE, DESRA, DMOD, FLIP, SUMDES, TESS
	Windows	ShakeEdit, ProShake, Shake2000, EERA	CyberQuake, DeepSoil, NERA, FLAC, ShearBeam
2-D	DOS	FLUSH, QUAD4/QUAD4M	TARA-3, FLIP, DYSAC2, LIQCA
	Windows	QUAKE/W	PLAXIS, FLAC
3-D	DOS	TLUSH	DYNAFLOW, VERSAT
	Windows	SASSI2000	FLAC <sup>3D</sup>

## 二、FLAC<sup>3D</sup> 簡介

FLAC<sup>3D</sup> 為美國 Itasca 公司發展之三維地工分析電腦程式，為一有限差分(Finite Difference Method, FDM)程式，其採用顯示法(Explicit Method)以時間積分之運動方程式求得三維系統之靜力平衡或動態行為，可解決地工問題中複雜之幾何及力學問題。

### (一)程式計算流程

1. 塊體切割：由使用者建立分析網格，再由程式內自動生成為四面體之分析組體。
2. 初始及邊界狀況：由使用者依分析之物理問題給定邊界條件，包括集中載重、邊界位移及邊界速度等，內部之初始應力由給定之狀況經程式內部轉換至網格節點(Node)。
3. 計算步驟：FLAC<sup>3D</sup> 利用顯示法(Explicit Method)以「時間步長」與幾何網格之有限差分(Finite Difference Method, FDM)進行運算，主要包含：
  - (1) 由節點速度對幾何微分得到新的應變速率(Strain Rate)；
  - (2) 由應變速率及應力(Stress)經組合方程(Constitutive Equation)計算得新的應力；

(3) 由應力及力量(Force)經運動方程計算新的節點速度與位移。

由(1)~(3)步驟循環計算，當不平衡力(Maximum Out-of-balance Force)達穩定，則可獲得分析問題之穩定平衡。

## (二) 程式主要架構

FLAC<sup>3D</sup> 為地工程式，可模擬工程之開挖、堆填及支撐工之安裝等施工步驟。其主要架構包含：

1. 分析模式包含 3 種彈性模式(等向彈性(Isotropic)、橫向等向彈性(Transversely Isotropic)、正交等向彈性(Orthotropic Isotropic))，及 6 種塑性模式(Drucker-Prager、摩爾-庫倫(Mohr-Coulomb)、應變硬化/軟化(Strain-hardening/Softening)、Ubiquitous-joint、雙線性應變硬化/軟化(Bilinear Strain-hardening/Softening)、劍河(Cam-clay)模式)，且分析網格中之每一網格可設定為不同之材料模式。
2. 界面(Interface)容許滑動或分離，可模擬斷層、節理及摩擦邊界。
3. FLAC<sup>3D</sup> 包含網格自動建立及內含多種不同網格形狀自動產生模式，包括交叉隧道形式，提供便利及快速的三維網格建立。
4. 現地應力及邊界狀態可由座標位置及特定分布梯度給定，且由地下水位的設定可解總應力及有效應力問題。
5. 結構中之隧道襯砌、樁、版樁、鋼索、岩釘及地工織物等均可以 FLAC<sup>3D</sup> 中樁(Pile)、鋼索(Cable)、梁(Beam)及薄殼(Shell)之結構元件加以模擬。另外包含內建程式語言 FISH 可供使用者定義新變數及函數，以分析不同之地工問題及模擬複雜程序。

## (三) FLAC<sup>3D</sup> 應用的範疇

1. 邊坡安定及基礎設計之承載與變形問題；
2. 岩礦及隧道設計之圍岩破壞及崩裂問題；
3. 地下水及擋土結構問題中孔隙水壓的激發與消散問題；
4. 黏滯材料的潛變行為；
5. 起伏的地質結構中之動態荷載—地震工程及岩爆研究；
6. 隧道鑽掘與開挖產生之爆炸與震動之動態效應；
7. 土石結構物之地震動態分析；
8. 熱應力引發之變形及力學不穩定問題。

此外，FLAC<sup>3D</sup> 以有限差分方法配合內建可選擇之土壤分析模式進行時間域之動態分析時，可採用自由場邊界(Free Field Boundary)消除分析時分析域內材料與邊界波傳能量反射之影響，分析時並可依需求記錄地盤運動過程中土層各點之加速度、速度、動態應力及位移歷時。

## 三、應用案例邊坡狀況

本文以中寮開閉所填土邊坡於 921 地震受震反應作為 FLAC<sup>3D</sup> 動態分析之應用案例。中寮開閉所邊坡基地所在位置屬大肚溪流域東南邊上游之平林溪一帶，為南投縣之西部，在地形分區上屬於丘陵地

形，高程皆在 250 公尺以上，陵線多呈南北或西北—東南走向，面向東北主坡面為順向坡，地形較為寬廣且平緩，西南向則為較陡峭之逆向坡。

基地區域之主要地層為更新世頭嵙山層香山砂岩段，岩層主要由厚層砂岩和砂岩與頁岩互層所組成之凹谷坡地。基地總面積約 23 公頃，基地開發採挖填趨於平衡而成之高平台基地。根據整地設計圖，邊坡填土分為上下兩區，整地前，上邊坡頂高程為 EL. 230 公尺，坡趾高程為 EL. 224 公尺，邊坡坡度約為 30%；下邊坡坡頂高程為 EL. 217 公尺，坡趾高程為 EL. 197 公尺，下邊坡坡度約為 28%。邊坡整地後地形走勢略呈梯形之平緩坡地，整體平均坡度約 8%。

中寮開閉所基地約略位於車籠埔斷層及 921 主震震央中間，震央與基地距離約為 7 公里，由於地震規模大且震央距離近，此次地震造成基地嚴重災損。依據工程顧問公司之綜合評估，921 地震時該基地約造成  $PGA=0.5g$  之地震加速度，基地破壞情形如圖 1 所示，主要災害包括沿原挖填界線發生之開裂及下陷、邊坡坍塌、坡頂開裂及上部結構嚴重損壞等。

## 四、分析方法

### (一) 土壤材料模式

本文探討之岩盤邊坡幾何形狀如圖 2 所示，於凹谷區進行填土，其幾何形狀已非一般傳統之二維分析所能勝任，而必須採用三維之分析模式方能完全反映此等物理問題。回填區因為係人工夯實填築，不像沖積土壤較具明顯之層狀結構，故將回填土劃分為同一材料，其材料有效應力強度參數取  $c'=0$ 、 $\phi'=36^\circ$ 。最大剪力模數  $G_{max}$  對動態分析中結果有相當之影響性，本文採用現地 P-S Logging 所測得之剪力波速  $v_s$  與材料密度  $\rho$  經下式換算而得回填土與岩盤之最大剪力模數。

$$G_{max} = \rho v_s^2 \quad (1)$$

動態分析考慮邊坡填土之土壤材料為：(1)土壤剪力模數在地震過程中隨反復剪應變(Cyclic Shear Strain)之增加而遞減；以及(2)土壤不可恢復應變以彈塑性力學模式模擬。本文中土壤彈塑性應力應變關係採用摩爾-庫倫彈塑性模式，而在材料彈性階段，其地震力作用過程中之土壤勁度弱化行為，則以動態特性試驗所得之剪力模數與剪應變關係曲線模擬，惟該關係曲線通常應用於等值線性頻率域動態分析中，而無法應用於時間域之非線性增量動態分析。因此，在時間域之分析中，必須有適當之應力應變關係，以反映材料遲滯圈(Hysteresis Loop)之動力特性，梅新規則(Masing Rule)常被應用於單向度之時間域增量式地盤反應分析，其規則包含：(1)由試驗先決定材料在單調加載(Monotonic Loading)下之應力應變曲線，並定義為骨架曲線(Backbone Curve)，材料在初始加載(Initial Loading)階段之應力應變關係即遵循骨架曲線；(2)當材料受均勻反復應力作用時，其卸載(Unloading)或重載(Reloading)之轉向曲線，恰為原點至轉向點間骨架曲線之兩倍大小。

以上兩點之梅新規則並不足以描述一般之反復載重狀態，如地震力作用，故需有額外之規則以描述其行為。廣義梅新模式(Extended Masing Model)除包含上述兩規則外，並增加：(1)若卸載或重載曲線中之應變超過以往最大應變且與骨架曲線相交時，則其應力應變循骨架曲線發展，直至下一應力反轉；(2)若目前之卸載或重載曲線與前一階段之卸載或重載曲線相交，則其應力應變循前一階段之卸載或重載曲

線發展。另岩盤材料因為強度較土壤材料為高，且勁度弱化行為不明顯，故其應力應變關係以摩爾-庫倫彈塑性模式模擬。

本文以 FLAC<sup>3D</sup> 所提供之 FISH 程式語言模擬上述填土材料勁度弱化特性之應力應變關係，為驗證土壤材料模式之適用性，故模擬室內動力三軸試驗，以確定其模式之適用性。圖 3 為模擬分析土壤動態特性試驗結果，分析與試驗所得相當吻合。另以三軸動態強度試驗模擬結果如圖 4 與圖 5，其中對於土壤承受反復載重之強度與變形特性皆可獲得相當一致之結果，顯示本文所採用之材料模式可合理模擬土壤材料在反復作用下之行為反應。

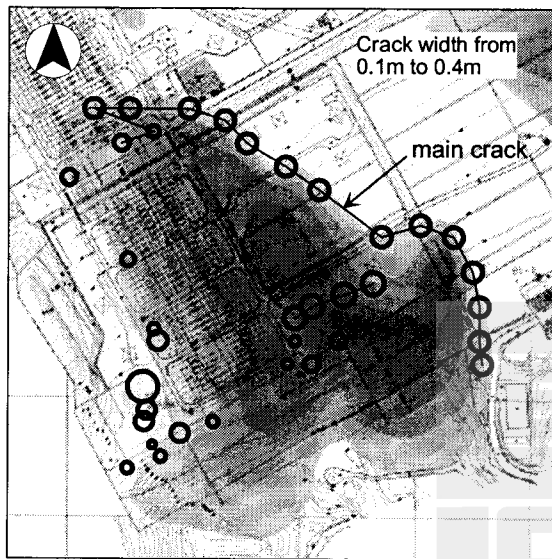


圖 1 中寮開閉所填土區域裂縫寬度分布

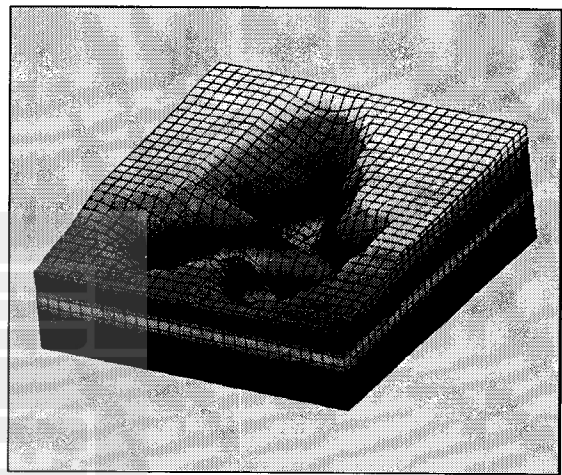


圖 2 中寮開閉所岩盤凹谷坡地之三維分析網格

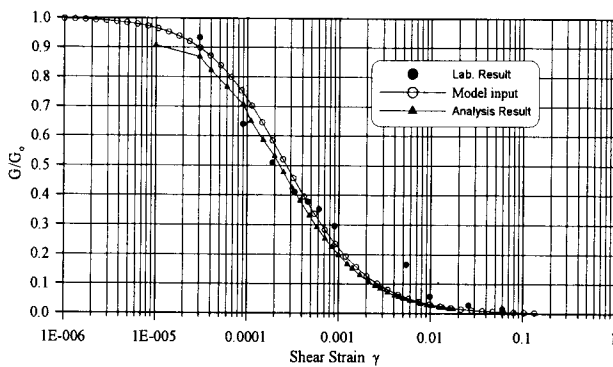


圖 3 剪力模數與剪應變關係圖

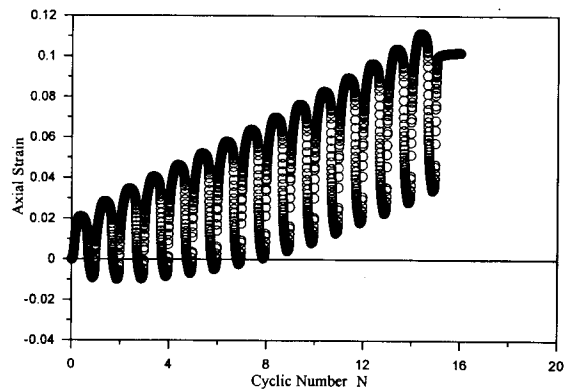


圖 4 動態強度試驗應力週數與軸向應變關係

### (二) 邊坡三維動態分析模式

由現地調查與基地地質模式建立分析區域與分析網格，其岩盤凹谷坡地之三維分析網格如圖 2 所示。網格區域範圍以主要填土區域為主，其平面尺度為 420 m × 450 m，垂直深度範圍取 90 m，網格單一元素採 15 m × 15 m × 4 m 至 15 m × 15 m × 8 m 之尺寸。分析模式地層材料參數如表 2 所示，其中最大剪力模數係由每公尺深度透過剪力波速求得後，取每 5 公尺平均作為輸入值。

由於場址附近無測站，故選取位於場址北方約 11 公里之測站紀錄作為輸入地震，並假設為 921 地震當時場址之自由場出露岩盤之地震紀錄，其三向之輸入地震歷時如圖 6 所示，將該加速度歷時以 SHAKE91 轉換至填土基礎岩盤後所獲得之加速度歷時，作為分析之輸入地震。由該地震歷時顯示，在地震作用 40 秒後其加速度反應即相當小，故為縮短分析時程，僅取 40 秒作為輸入地震。

表 2 分析所用地層參數

項目	深度 (m)	SPT (N)	單位重 (t/m <sup>3</sup> )	孔隙比	塑性指數	P-S Logging Vs(m/sec)	最大剪力模數 (kg/cm <sup>2</sup> )	包松比	有效凝聚力 (kg/cm <sup>2</sup> )	有效摩擦角 (deg.)
回填土層	0~5	11	2.10	0.47	13	192	775	0.38	0.0	36.0
	5~10	17	2.11	0.47	12	205	979	0.38	0.0	36.0
	10~15	22	2.12	0.47	12	217	1085	0.38	0.0	36.0
	15~20	28	2.14	0.47	11	271	1635	0.38	0.0	36.0
	20~25	34	2.15	0.47	11	285	1721	0.38	0.0	36.0
	25~30	39	2.16	0.47	11	332	2846	0.38	0.0	36.0
岩盤	0~5	—	2.25	—	—	270	1500	0.30	4.0	39.0
	5~10	—	2.25	—	—	272	1542	0.30	4.0	39.0
	10~15	—	2.25	—	—	325	2530	0.30	4.0	39.0
	15~20	—	2.25	—	—	472	4812	0.30	4.0	39.0
	20~30	—	2.25	—	—	620	8511	0.30	4.0	39.0
	30~40	—	2.25	—	—	646	9285	0.30	4.0	39.0
	40~50	—	2.25	—	—	698	10559	0.30	4.0	39.0

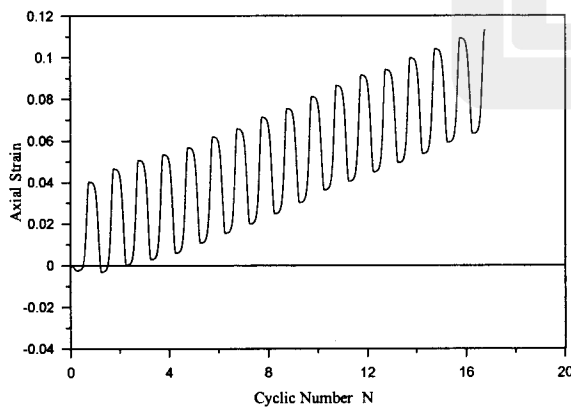


圖 5 數值模擬動態強度試驗結果

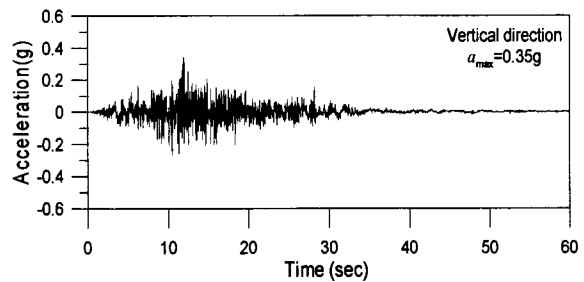


圖 6 分析輸入三向地震(921 地震紀錄)

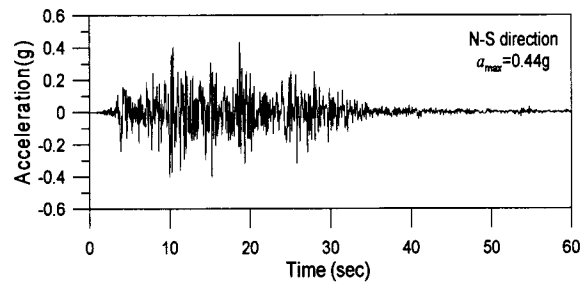
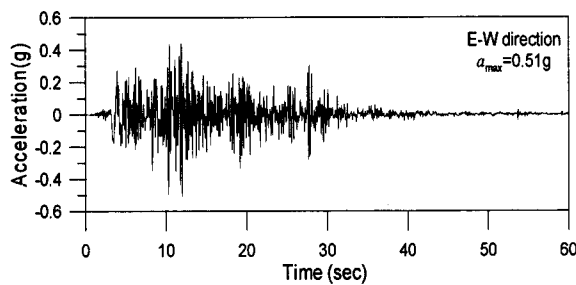


圖 6 分析輸入三向地震(921 地震紀錄)(續)

### 五、分析結果

經由 FLAC<sup>3D</sup> 程式之時間域動態分析，可求得本基地在 921 地震作用下之動態反應。因為現地調查結果顯示，地表震後發生許多裂縫，且裂縫大致沿基地回填土與岩盤之交界邊界分布(如圖 1 之裂縫寬度分布)，因此分析亦以此裂縫造成之變位分布為模擬之依據之一。

圖 7 為加速度歷時分析之最終地表總變位向量分布，圖中顯示地表變位仍集中於填土區域，且大致向下邊坡方向變位，岩盤變位量相對於土壤而言相當小，顯示土壤與岩盤交界區域產生較大之相對變位。為進一步了解邊坡地盤之剪應變分布，以評估較易產生裂縫之區域，故將地震結束時之整體地盤地表剪應變分布顯示如圖 8，由圖中可看出剪應變較大區域大致分布於填土區域，而於填土區域之右方有最大之剪應變產生。

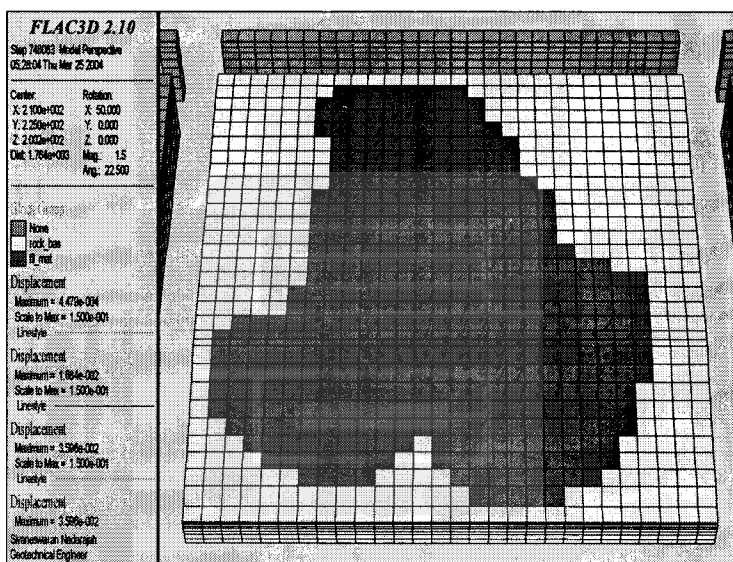


圖 7 921 地震地表變位向量(最大變位 19cm)

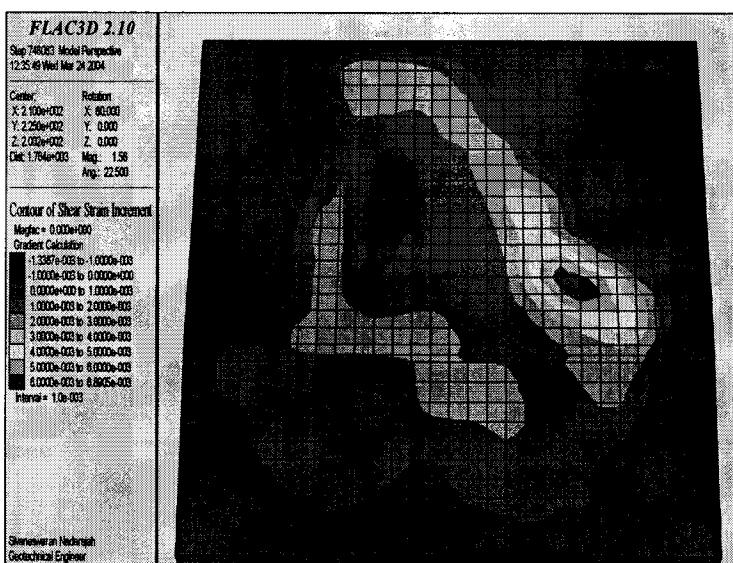


圖 8 921 地震分析地表剪應變量分布

為探討地層內之剪應變及變位分布情形，另沿邊坡傾斜方向與垂直斜坡方向取三剖面(如圖 9)觀察剪應變及變位隨深度變化之分布狀況，如圖 10 至圖 12 所示，其中可看出回填土壤區域之剪應變與變位較岩盤區域為大，變位分布基本上仍以地表最大，隨深度之增加而減少；剪應變則愈接近土壤與岩盤交界處，有愈大之趨勢，顯示整體邊坡回填土在接近土壤與岩盤交界面處在地震力作用下為潛在可能產生較大剪應變之區域。

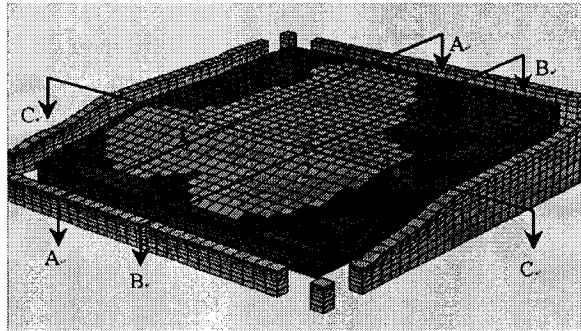


圖 9 分析結果展示剖面

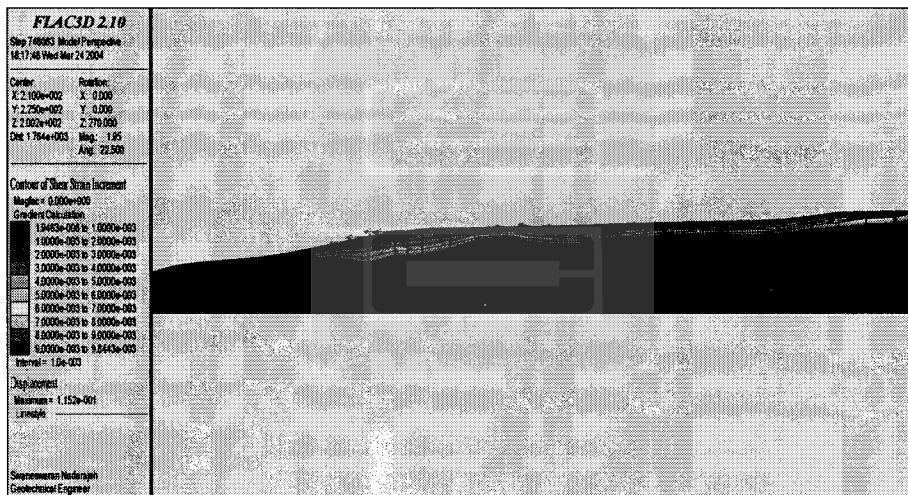


圖 10 剖面 A-A 之變位及剪應變分布

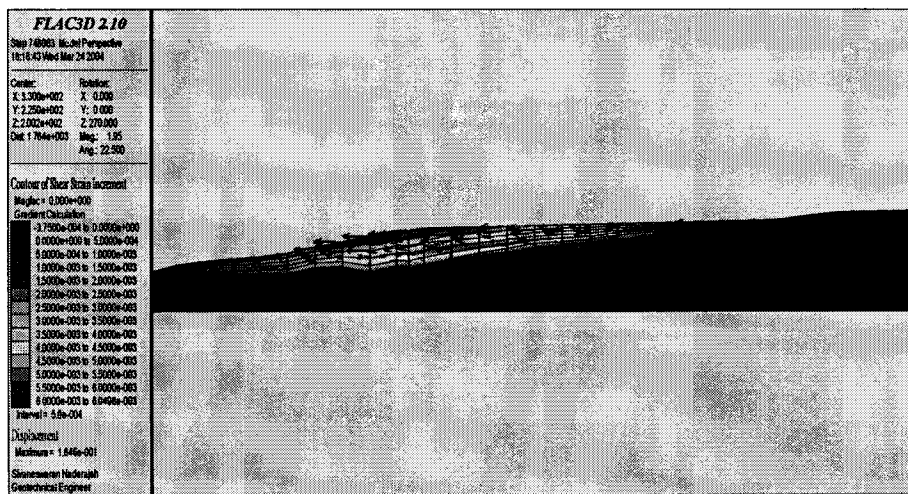


圖 11 剖面 B-B 之變位及剪應變分布



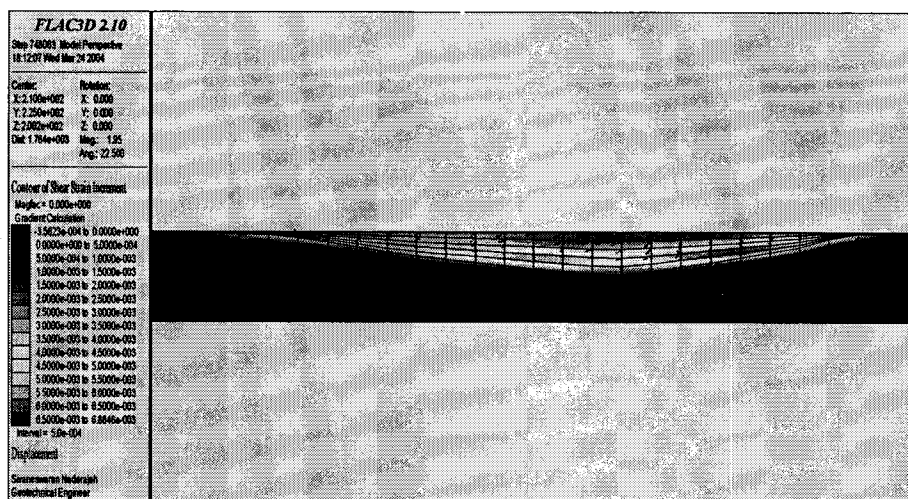


圖 12 剖面 C-C 之變位及剪應變分布

為瞭解整體地盤對於地震作用之歷時反應，於地表選取若干點進行地盤反應分析結果之監測位置。如圖 9 中之點 1、點 2 與點 3 所示，選取之監測點分別代表淺填土區(點 1)、深回填土區(點 2)與岩盤地表(點 3)等。圖 13 至圖 15 分別為東西向、南北向與垂直向之地盤反應譜，圖中顯示，點 1 之淺層回填土層之地表加速度反應大於點 3 岩盤之地表加速度反應，而點 2 之厚回填土層則因為前述產生最大變位，在進入塑性區域，藉由變形來進行耗能，故其反應加速度於三者中最小。

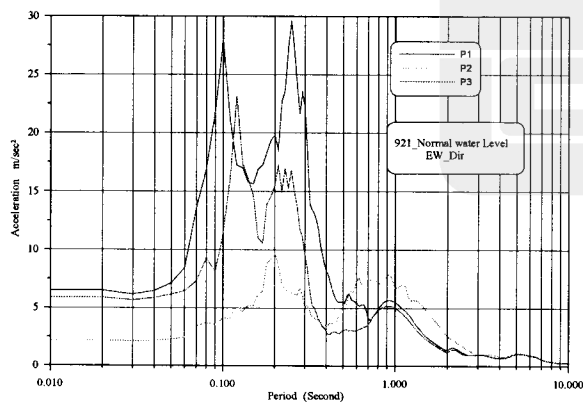


圖 13 東西向地盤反應譜

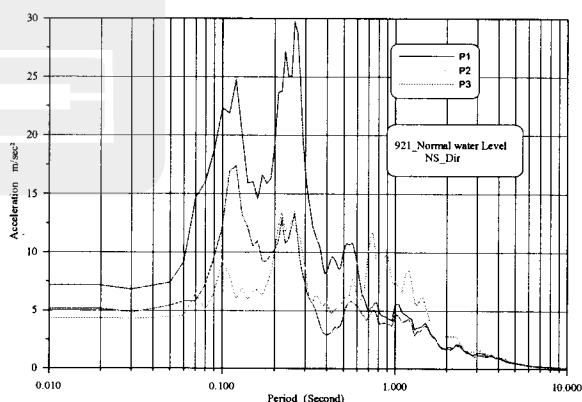


圖 14 南北向地盤反應譜

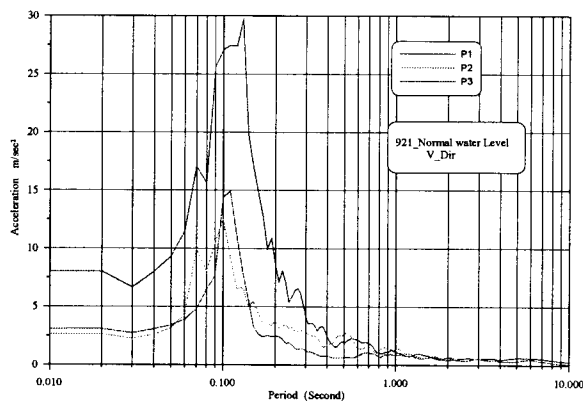


圖 15 垂直向地盤反應譜

圖 16 與圖 17 為 921 地震下之地表水平 PGA 等值圖與垂直 PGA 等值圖，圖中顯示 PGA 分布大致與填土區域之不同填土厚度所反映之地層特性吻合，即填土愈深區域其地震作用下造成之地表 PGA 值愈低。另在回填土與岩盤交界處局部區域有 PGA 值變化梯度較大之現象。

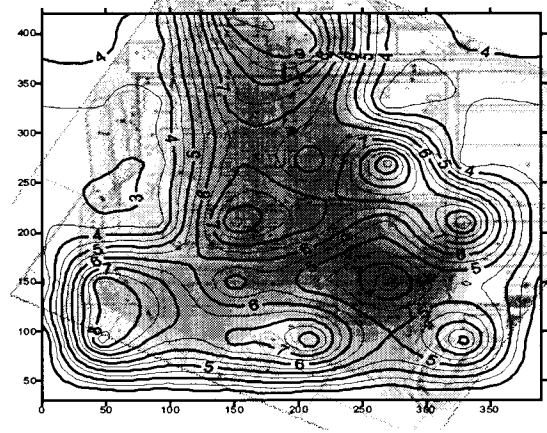
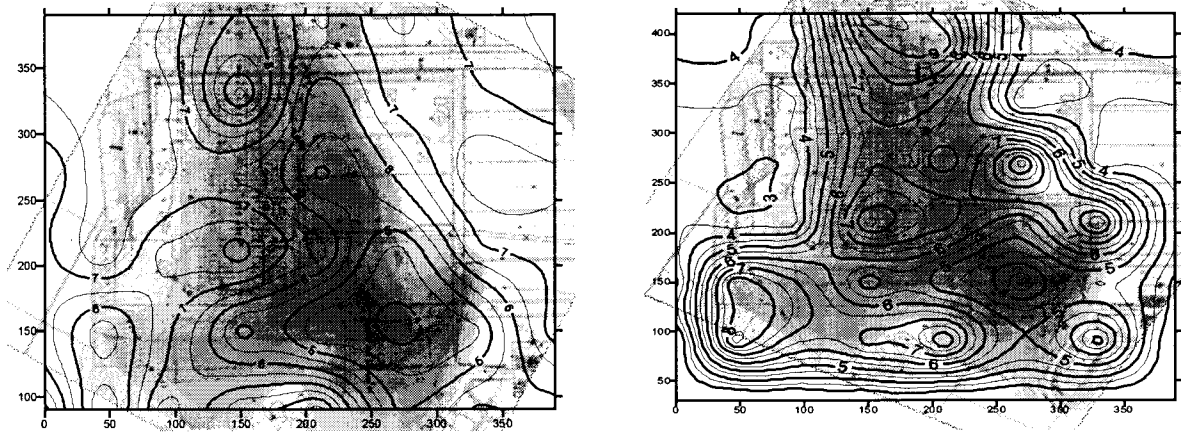


圖 16 921 地震下之地表水平 PGA(m/sec<sup>2</sup>)等值圖 圖 17 921 地震下之地表垂直 PGA(m/sec<sup>2</sup>)等值圖

## 六、結 論

本文以岩盤邊坡進行填土之工程案例，探討 FLAC<sup>3D</sup> 應用於三維邊坡在 921 地震力作用下之動態行為反應，包括邊坡岩盤與填土區之地震放大效應、岩盤凹谷之谷地效應與震後邊坡變形等。分析結果可歸納結論如下：

1. 時間域動態分析已為地震模擬之發展趨勢，不僅可求得地盤震後變形，更可藉由適當之材料模式，掌握地盤材料於地震過程中複雜的力學行為反應。
2. FLAC<sup>3D</sup> 在三維地盤之動態分析上可確實掌握其地盤反應，以中寮開閉所案例分析結果觀之，其邊坡地表變位大致集中於填土區域，且向下邊坡方向變形。在邊坡剖面之剪應變分布則以填土區近岩盤交界處產生較大值。
3. 填土區地表加速度分布大致與填土厚度分布吻合，填土厚度愈小，其地表加速度放大愈大。

## 參考文獻

- 台灣電力公司 (2004) 中寮開閉所邊坡穩定複查技術服務工作，期末成果報告
- Itasca Consulting Group, Inc. (1986) Manual of FLAC<sup>3D</sup>, Version 2.1, Vol. 1-5, Minneapolis, Minnesota, U. S. A.
- Kramer, S. L. and Paulsen, S. B. (2004) Practical Use of Geotechnical Site Response Models, Pacific Earthquake Engineering Research Lifeline Program Report