

斷層錯動對上覆沖積層與地中結構物之影響

The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels

臺灣大學土木工程研究所

林銘郎

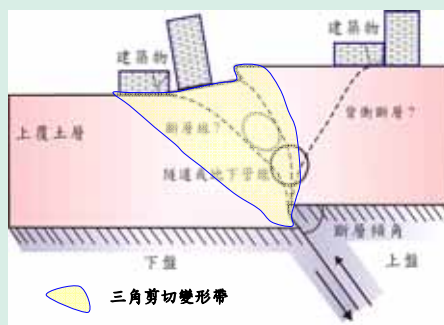
2007/12/20



國立臺灣大學工程地質實驗室

1 中央研究院地球科學研究所演講

斷層錯動對土層與結構物之影響



國立臺灣大學工程地質實驗室

2 中央研究院地球科學研究所演講

斷層錯動對地表結構物之影響

豐原中正公園照片〔劉桓吉攝於民國880925〕



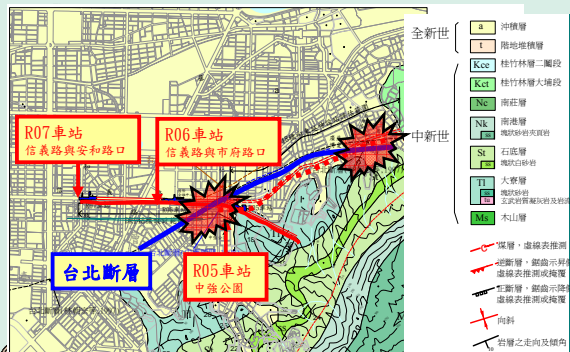
國立臺灣大學工程地質實驗室

3 中央研究院地球科學研究所演講

台北斷層作用與捷運隧道之關係



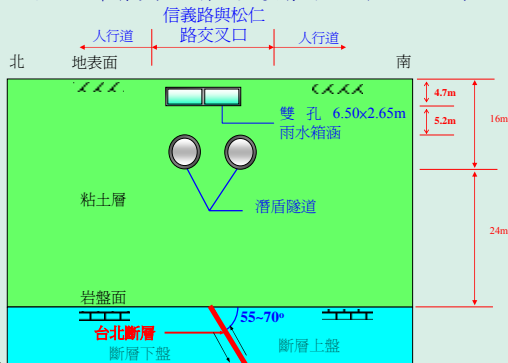
斷層錯動對地中結構物之影響



國立臺灣大學工程地質實驗室

5 中央研究院地球科學研究所演講

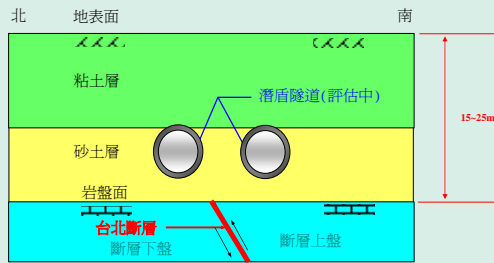
— 台北斷層與潛盾隧道關係 — 松仁路剖面



國立臺灣大學工程地質實驗室

6 中央研究院地球科學研究所演講

台北斷層與潛盾隧道關係 — 廣慈博愛院剖面 東延評估段



國立臺灣大學工程地質實驗室

7 中央研究院地球科學研究所演講

大綱

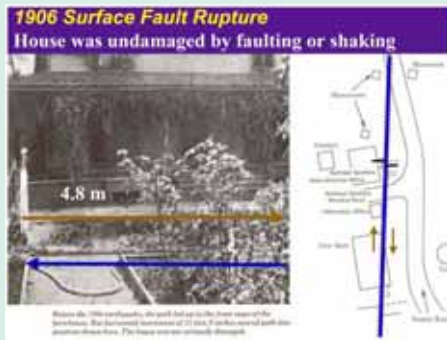
- 緣起
- 相關研究及回顧
- 研究方法
- 物理模型試驗成果
- 數值分析結果與驗證
- 台北斷層數值分析結果
- 結論及建議



國立臺灣大學工程地質實驗室

8 中央研究院地球科學研究所演講

斷層錯動造成上覆土層變形與地表結構物



國立臺灣大學工程地質實驗室

(Cluff, 2002)

9 中央研究院地球科學研究所演講

斷層錯動對地下結構物之影響 Bonilla, 1982



國立臺灣大學工程地質實驗室

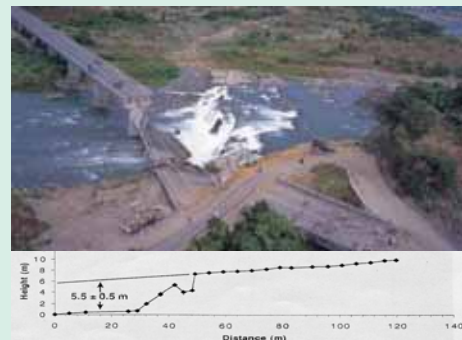
10 中央研究院地球科學研究所演講

車籠埔斷層錯動對壩體之影響



(連永旺, 1999)

車籠埔斷層錯動對橋樑之影響



(連永旺, 1999)



國立臺灣大學工程地質實驗室

12 中央研究院地球科學研究所演講

車籠埔斷層錯動對地表變形之影響:沖積層的貢獻



(連永旺, 1999)



國立中央大學地質博物館

13 中央研究院地球科學研究所演講

車籠埔斷層錯動引致地表變形



霧峰鄉光復國中 (連永旺, 1999)



國立臺灣大學工程地質實驗室

14 中央研究院地球科學研究所演講

上覆土層變形與地表結構物 霧峰鳳梨園鐵塔與斷層交會〔劉桓吉攝於民國881020〕



國立臺灣大學工程地質實驗室

15 中央研究院地球科學研究所演講

上覆土層變形與地表結構物 名間鐵塔與斷層交會〔大地裂痕, 2000〕



國立臺灣大學工程地質實驗室

16 中央研究院地球科學研究所演講

斷層錯動對地表與結構物之影響 草屯東山路照片〔大地裂痕, 2000〕



國立臺灣大學工程地質實驗室

17 中央研究院地球科學研究所演講

車籠埔斷層錯動對地下維生管線變形之影響 (Yasuda et al., 2002)



Photo 2 Damaged gas pipeline at Wu Ai Bridge in Taiwan



Photo 3 Surface fault rupture at damaged site of gas pipeline



國立臺灣大學工程地質實驗室

18 中央研究院地球科學研究所演講

車籠埔斷層錯動產生背衝斷層造成石岡壩引水隧道損壞



隧道破壞照片 (李秉鴻先生提供)

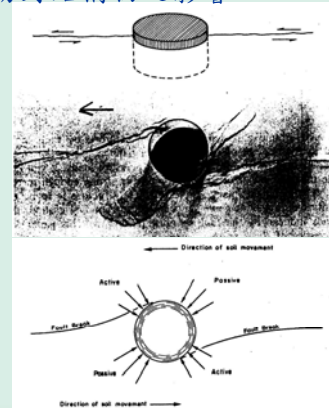


國立臺灣大學工程地質實驗室

21 中央研究院地球科學研究所演講

斷層錯動對結構物之影響

Duncan (1973)
核電廠



國立臺灣大學工程地質實驗室

1976年唐山大地震

- $M_s=7.8$
- 死亡人數: 250,000~650,000人
- 地表結構物: 唐山市 80%~90%倒塌, 有許多建築物是餘震時倒塌, 地下結構受損相對輕微



地下結構物是否是大地震來時避難的較佳場所??

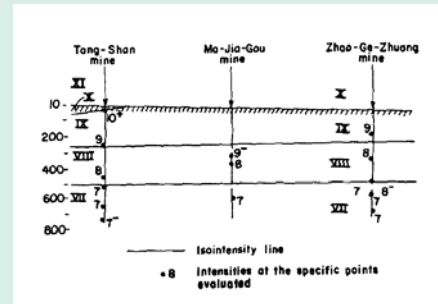


國立臺灣大學工程地質實驗室

21 中央研究院地球科學研究所演講

1976年唐山大地震

- 地下結構受損相對輕微---地下結構物是否是大地震來時避難的較佳場所??



國立臺灣大學工程地質實驗室

22 中央研究院地球科學研究所演講

主要課題-從工程師的角度

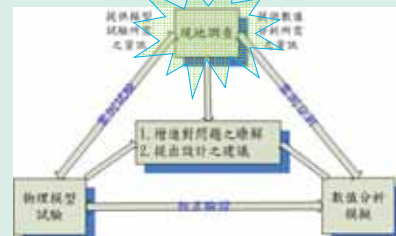
- 斷層錯動時對上覆沖積層之變形分佈影響
 - 除了斷層跡外, 沖積土體的變形也是重點
- 斷層錯動時對上覆沖積層之應力分佈影響
 - 當土壤尚在彈性狀態時, 要了解沖積層中土壤的應力狀態與應變的大小範圍
 - 當土壤已進入塑性狀態時, 要了解沖積層中的 塑性區範圍與塑性應變的大小範圍
- 地下結構物(潛盾隧道)位於斷層附近時, 斷層錯動對其所造成應力與變形行為探討
 - 土壤與結構之互制行為



國立臺灣大學工程地質實驗室

23 中央研究院地球科學研究所演講

研究方法間之整合關係



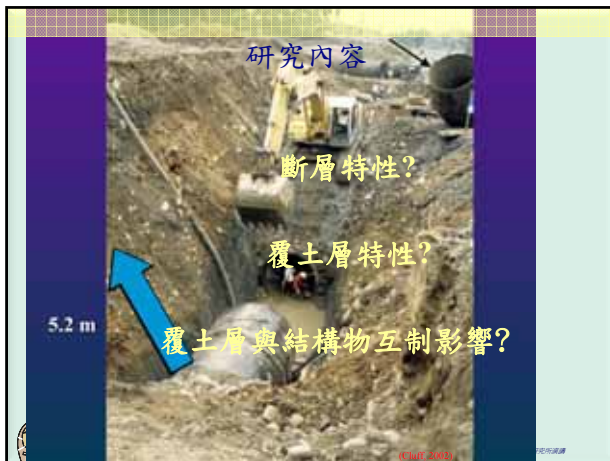
- 1 砂箱因尺寸效應無法完全模擬現地
- 2 突破以往由單一方法提出結果的侷限性

→ 設計與分析使用數值分析方法(以物理模型驗證)
為工具



國立臺灣大學工程地質實驗室

24 中央研究院地球科學研究所演講



斷層錯動對地表變形型態之主要影響因素 (Bray et al, 1994)

- ❖ 斷層運動型態
 - 正斷層
 - 逆斷層
 - 橫移斷層
- ❖ 斷層傾角
- ❖ 斷層錯動量
- ❖ 覆土層厚度
- ❖ 覆土層力學參數

斷層特性

覆土層特性

本研究

斷層、土壤、結構物 三者間之互制行為

斷層錯動對地表變形型態影響之研究方法

- ❖ 現地資料歸納整理
 - 地形地貌觀測
 - 斷層挖溝剖面
- ❖ 物理模型
 - 1g砂箱模型
 - 離心機模型
 - 錨定拉出試驗模型
- ❖ 數值(學)模型
 - Tri shear Model
 - 有限元素法
 - 有限差分法
 - 離散元素法

逆斷層錯動時引致土層發生破裂面示意圖
上下盤之定義-定於岩盤之斷層尖端

W

H

α

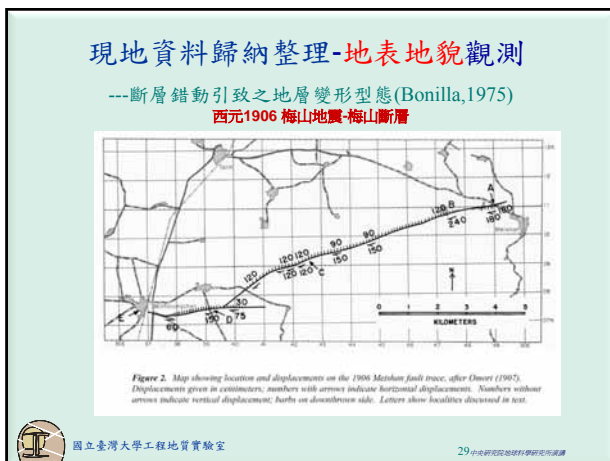
上覆土層

斷層傾角

基盤

斷層擴展到土層時之初始尖端

斷層尖端點擴展到地表



西元1906
梅山地震-梅山斷層

請注意崖高、遠方山形



圖十四A 台灣日日報(1906)所拍攝當時之變形田境之照片(照片摘自鄭世橋, 1998)

石同生提供



國立臺灣大學工程地質實驗室

31 中央研究院地球科學研究所演講

西元1906
梅山地震-梅山斷層

請注意崖高、遠方山形



圖十四B 變形田境的照片中隱顯樹後方特林山，變後之山麓與圖十四A照片中之山麓相同。

石同生提供



國立臺灣大學工程地質實驗室

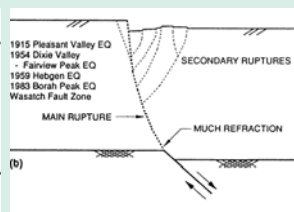
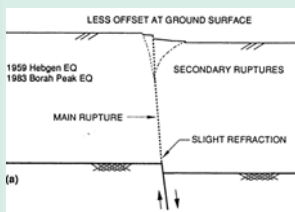
32 中央研究院地球科學研究所演講

現地資料歸納整理-地形地貌觀測

---正斷層錯動引致之地層變形型態(Bray et al.,1994)

高傾角

低傾角



國立臺灣大學工程地質實驗室

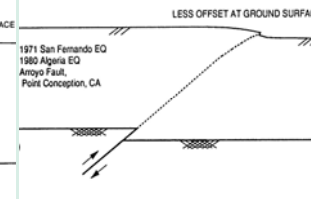
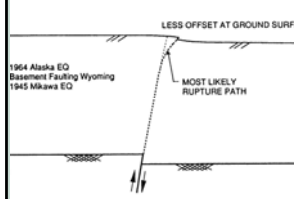
33 中央研究院地球科學研究所演講

現地資料歸納整理-地形地貌觀測

---逆斷層錯動引致之地層變形型態(Bray et al.,1994)

高傾角

低傾角



國立臺灣大學工程地質實驗室

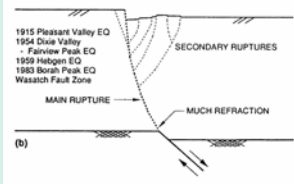
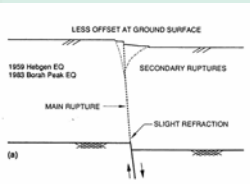
34 中央研究院地球科學研究所演講

現地資料歸納整理-地形地貌觀測

---正斷層錯動引致之地層變形型態(Bray et al.,1994)

高傾角

低傾角



國立臺灣大學工程地質實驗室

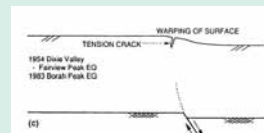
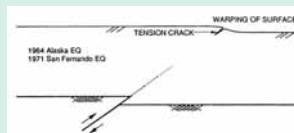
35 中央研究院地球科學研究所演講

現地資料歸納整理-地形地貌觀測

---斷層錯動引致之地層韌性變形型態(Bray et al.,1994)

逆斷層

正斷層



國立臺灣大學工程地質實驗室

36 中央研究院地球科學研究所演講

關心重點：地表地貌與斷層跡位置!!!

槽溝開挖-提供土層變形特徵資料
竹山槽溝—陳文山教授提供



國立臺灣大學工程地質實驗室

37 中央研究院地球科學研究所

斷層槽溝開挖---竹山槽溝(陳文山,2004)



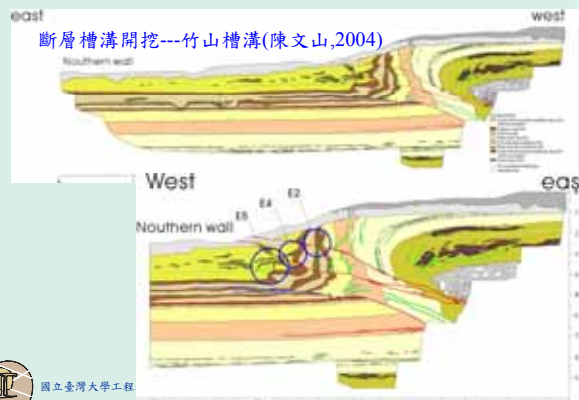
槽溝開挖-提供土層變形特徵資料



國立臺灣大學工程地質實驗室

38 中央研究院地球科學研究所

現地資料歸納整理-斷層挖溝剖面-至少動了四次



國立臺灣大學工程

研究方法內容比較

- 現地調查: 斷層尖端圓潤化、三角剪切變形帶
- 物理模型試驗
 - 以單一均質地層為分析對象
 - 提供大變形行為下之變形模態分析
 - 了解土壤結構互制行為
 - 數值模式正確性之檢驗
- 數值分析
 - 以有限元素法(ABAQUS)分析
 - 採二維平面應變分析模式、採總應力分析法
 - 未考慮地震地震之動態應力應變關係曲線
 - 利用 Contact Pair 界面元素
 - 克服數值不收斂現象



國立臺灣大學工程地質實驗室

40 中央研究院地球科學研究所

- 1 上覆土層地層剖面中的變形型態是如何形成?
- 2 主要影響因素為何?--斷層尖端圓潤化, 解決銳角尖端之數值問題
- 3 大變形, 多次變形, 多條集中變形帶
- 4 三角形剪切變形帶與集中剪切變形帶



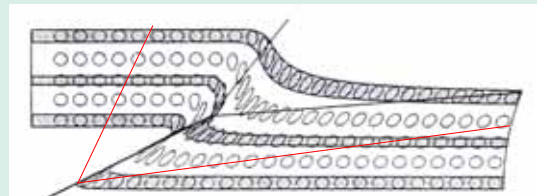
國立臺灣大學工程地質實驗室

41 中央研究院地球科學研究所

41

三角剪切變形帶

Kinematics model---Trishear Model(Allmendinger,1998)

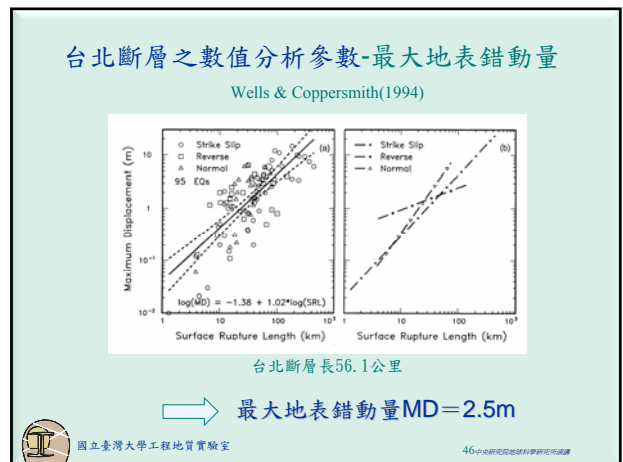
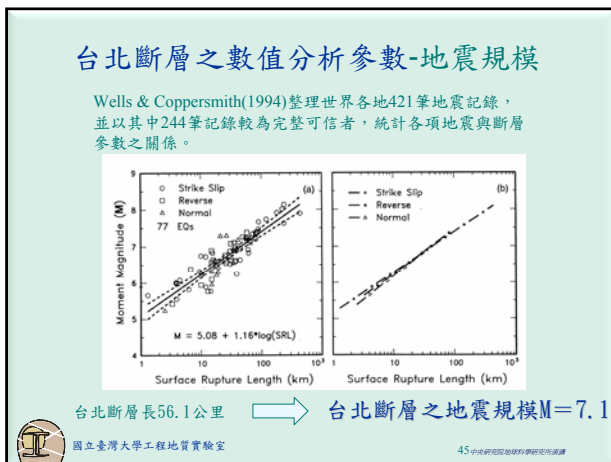
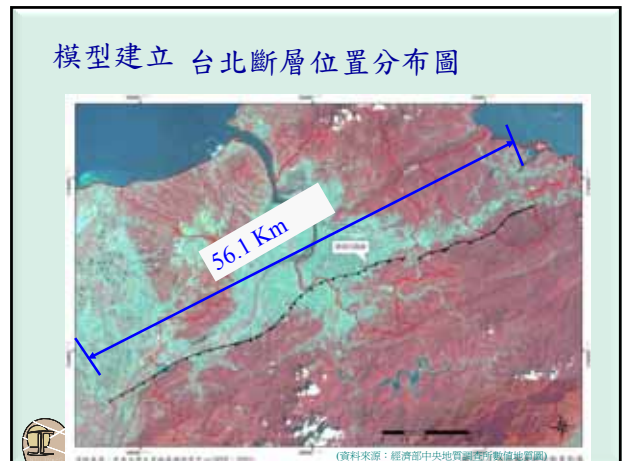


1. 三角剪切帶變形-土壤變形
2. 越靠近斷層尖端變形越大
3. 地層傾角隨不同深度而改變
4. 土層厚度, 影響越大, 但土壤中的變形越小



國立臺灣大學工程地質實驗室

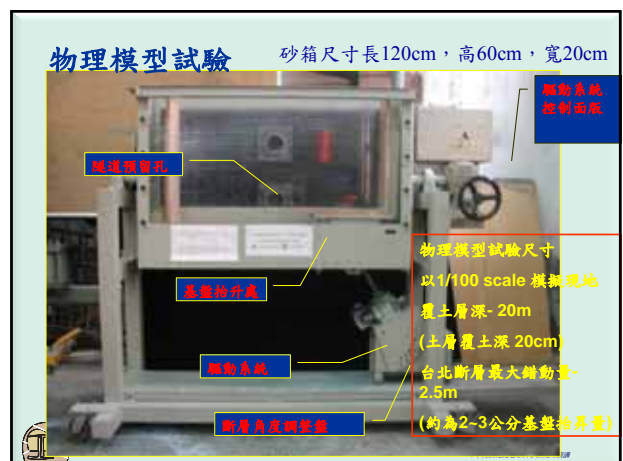
42 中央研究院地球科學研究所



研究方法

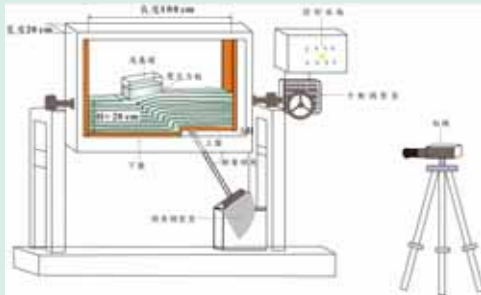
- 物理模型
 - 自由場
 - 模擬隧道置入
 - 斷層錯動時上覆土層之變形行為
 - 土層與結構物間之互制行為
 - 分析對象-單一砂層
- 數值分析
 - 物理試驗比對
 - 台北斷層錯動影響分析
 - 由物理試驗之模擬，驗證數值分析流程之正確性
 - 隧道視切所受斷層錯動引致之額外應力
 - 隧道受影響範圍 (距斷層距離)

國立臺灣大學工程地質實驗室 47 中央研究院地球科學研究所演講



物理模型試驗

砂箱尺寸長120cm，高60cm，寬20cm



國立臺灣大學工程地質實驗室

49 中央研究院地球科學研究所

物理模型試驗



試驗砂-越南石英砂

採用貫降器-以固定落距控制相對密度

每2cm鋪染色色砂一層以利觀測



國立臺灣大學工程地質實驗室

50 中央研究院地球科學研究所

物理模型試驗材料性質

石英砂基本物理性質

參數	周坤賢, 1998	本研究
粒徑分析	礫石含量 (%)	0
	砂含量 (%)	99.3
	細料含量 (%)	0.2
液性限度 (%)	無	無
塑性限度 (%)	無	無
比重 G_s	2.65	2.65
統一土壤分類	SP	SP
最大乾密度 ρ_{max} / g/cm^3	1.66	1.67
最小乾密度 ρ_{min} / g/cm^3	1.44	1.47
最大孔隙比 e_{max}	0.84	0.80
最小孔隙比 e_{min}	0.60	0.59
摩擦角	35°~41°	34°~38°



國立臺灣大學工程地質實驗室

51 中央研究院地球科學研究所

物理試驗結果

- 土層覆土深 20 cm
- 基盤垂直抬昇量 6 cm

做以下之比較：

- 不同角度：50°、60°
- 不同抬昇速度
- 置入隧道與自由場
- 隧道位置：1D 與 2D

物理模型試驗尺寸

以 1/100 scale 模擬現地

覆土層深- 20m

(土層覆土深 20cm)

台北斷層最大錯動量-2.5m

(約為 2~3 公分基盤抬昇量)



國立臺灣大學工程地質實驗室

52 中央研究院地球科學研究所

物理試驗結果: 斷層尖端擴展與三角剪切帶

斷盤抬昇比與斷層尖端之發展

(a) $\Delta H/H = 0.01$



(b) $\Delta H/H = 0.05$



(c) $\Delta H/H = 0.10$



(d) $\Delta H/H = 0.15$

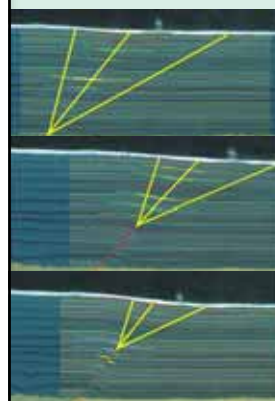


(e) $\Delta H/H = 0.20$



國立臺灣大學工程地質實驗室

砂箱實驗與三角剪切模式最佳比對結果之參數



(a) $\Delta H/H = 0.04$, $P/S = 1.0$, apical angle $2\beta = 46^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha' = 50^\circ$

(b) $\Delta H/H = 0.08$, $P/S = 6.0$, apical angle $2\beta = 48^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha' = 50^\circ$

(c) $\Delta H/H = 0.10$, $P/S = 5.5$, apical angle $2\beta = 52^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha' = 50^\circ$

54 中央研究院地球科學研究所

1.不同斷層傾角比較



斷層傾角50° 斷層傾角60°

上覆砂土層均產生兩條剪切帶，剪切帶發展順序均由上盤向下盤遷移。

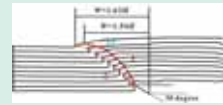
斷層角度較緩時，剪切帶角度較緩而偏向下盤，變形帶範圍較廣。



國立臺灣大學工程地質實驗室

55 中央研究院地球科學研究所演講

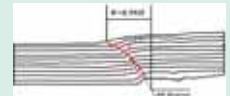
砂箱實驗-斷層傾角之影響



Fault dip angle=30°



Fault dip angle=50°



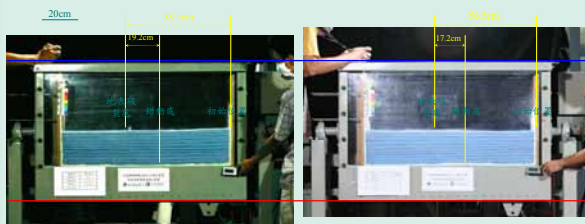
Fault dip angle=60°



國立臺灣大學工程地質實驗室

56 中央研究院地球科學研究所演講

2.不同抬昇速度比較



慢(2.9cm/min) 快(11.2cm/min)

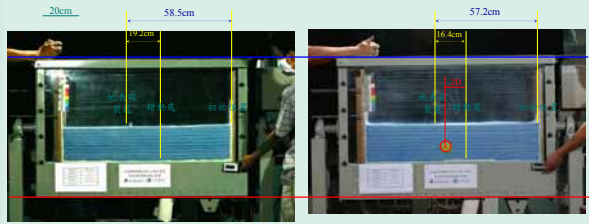
剪動速度較快時，剪切帶角度較陡，變形帶範圍較窄。



國立臺灣大學工程地質實驗室

57 中央研究院地球科學研究所演講

3.置入隧道與自由場之比較



自由場 置入隧道

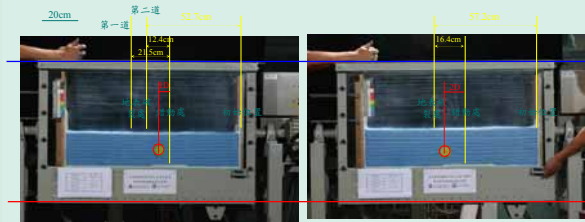
隧道之存在，限制剪切帶之發展，剪切帶角度較陡。
隧道位於2D時並無明顯移動、變形。



國立臺灣大學工程地質實驗室

58 中央研究院地球科學研究所演講

4.隧道距斷層1D與2D之比較



距斷層1D 距斷層2D

隧道位於1D時 剪切帶發展趨勢不同(下方之剪切帶先發展)
隧道可見明顯之位移、變形



國立臺灣大學工程地質實驗室

59 中央研究院地球科學研究所演講

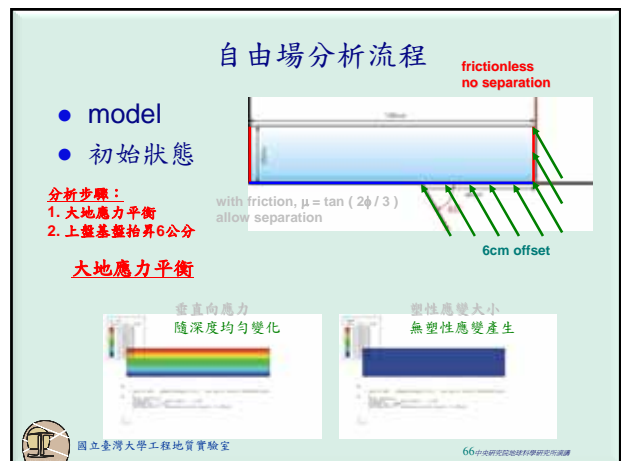
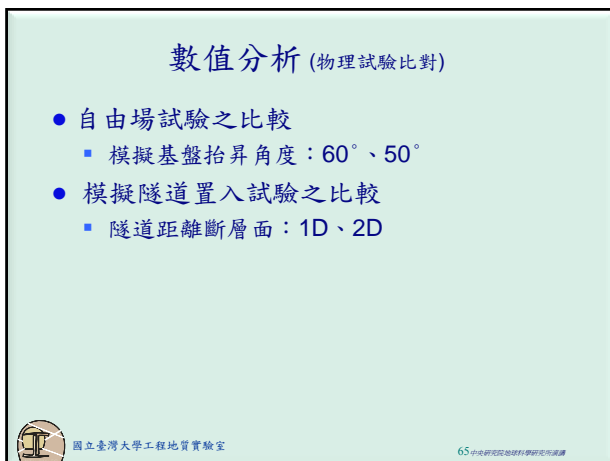
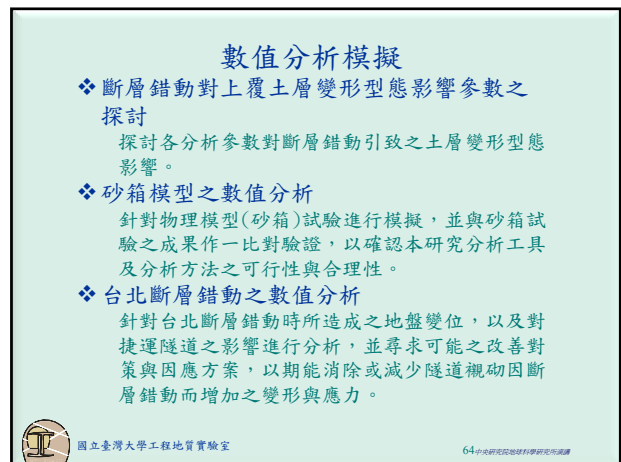
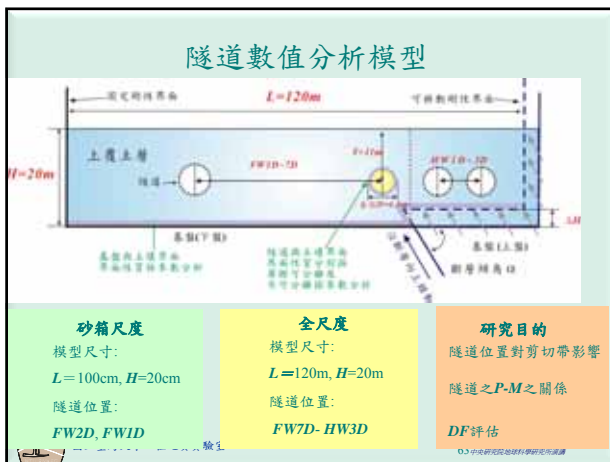
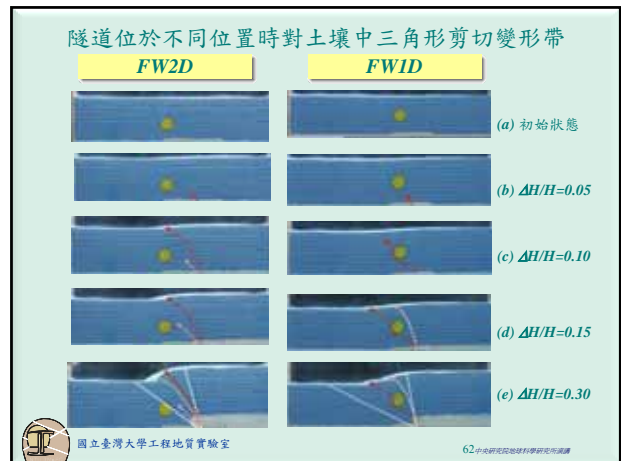
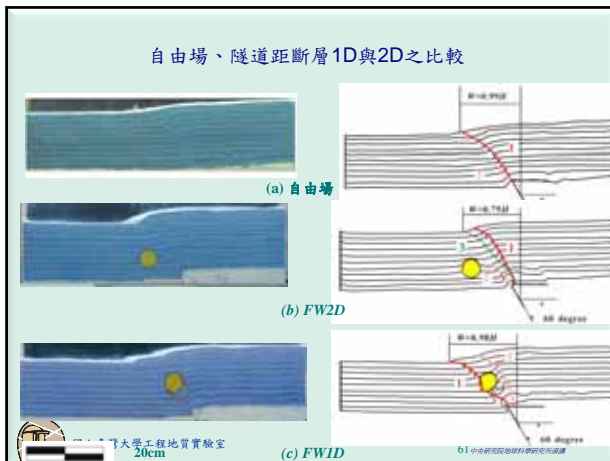
砂箱試驗特徵 - 1D

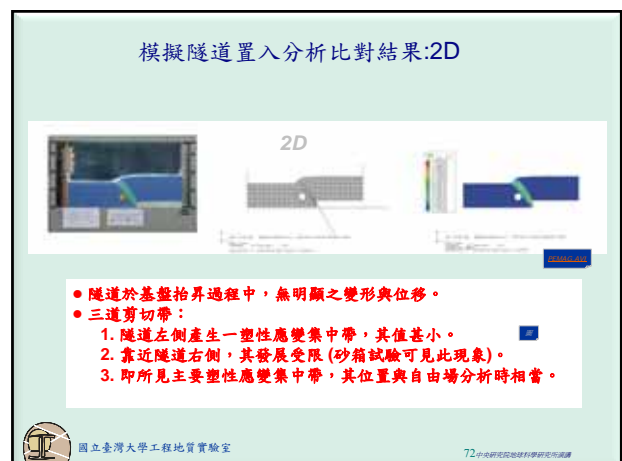
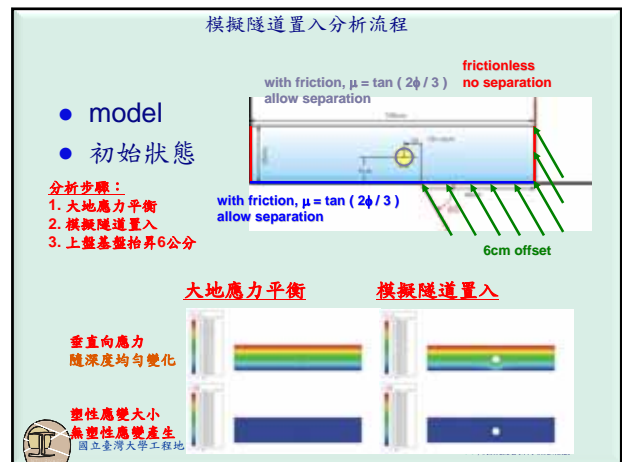
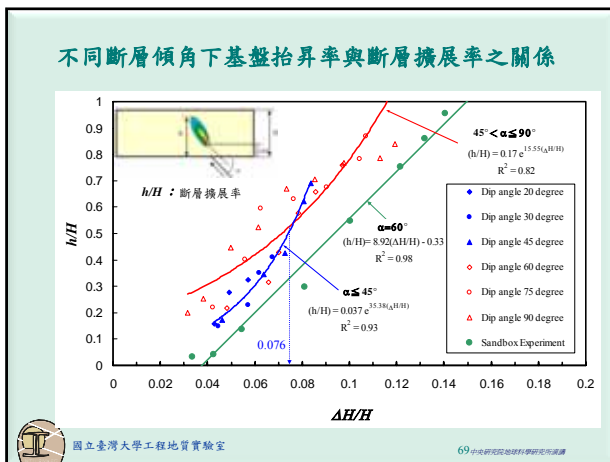
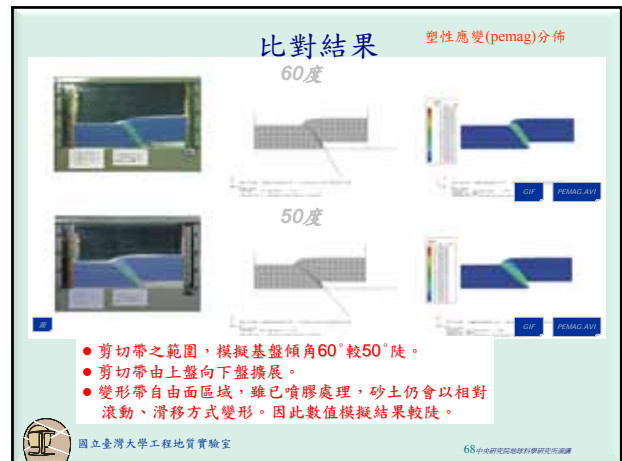
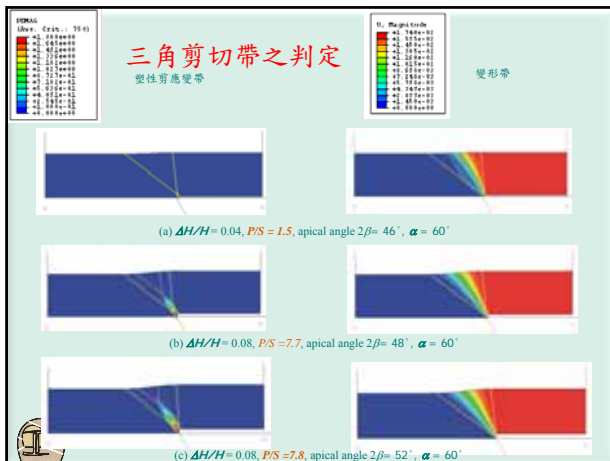
- 隧道受壓後變形為橢圓形。
- 隧道下方於抬昇過程中產生空洞。
- 隧道左方砂土受壓擠入界面。

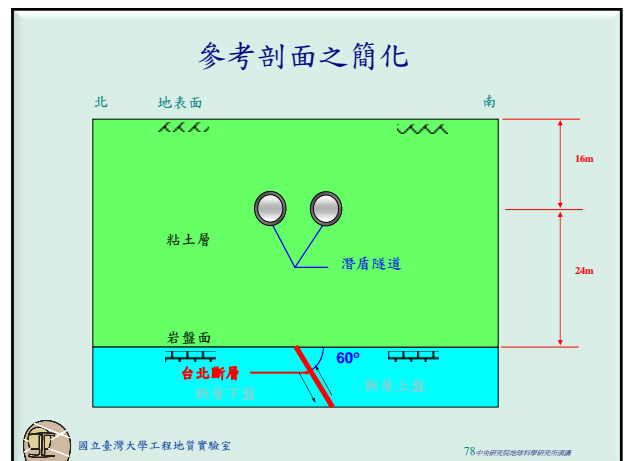
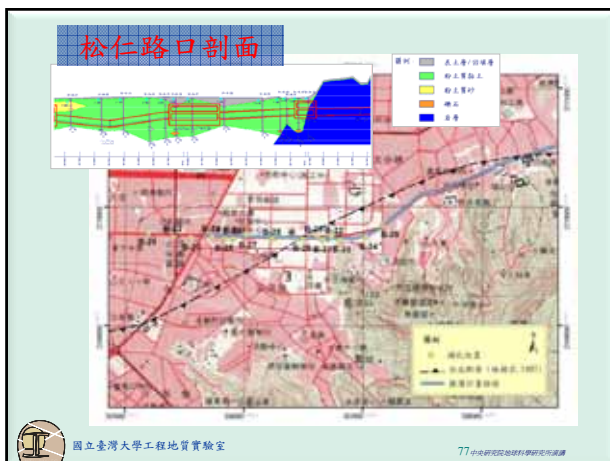
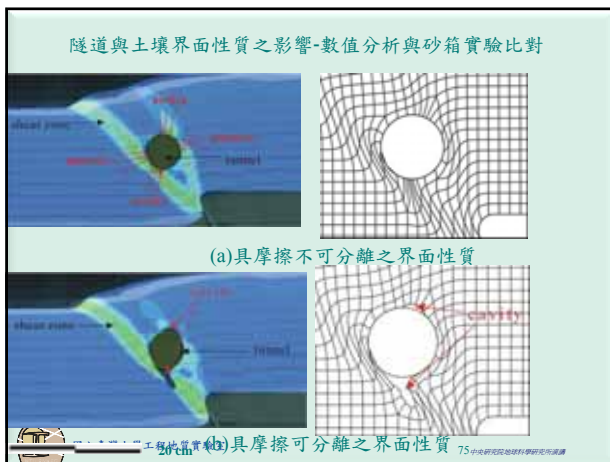
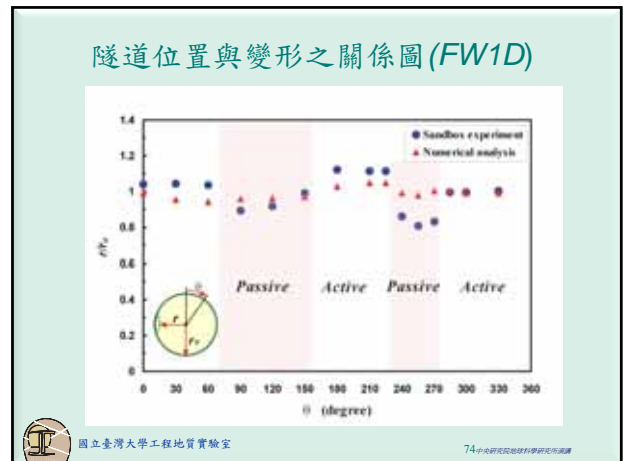
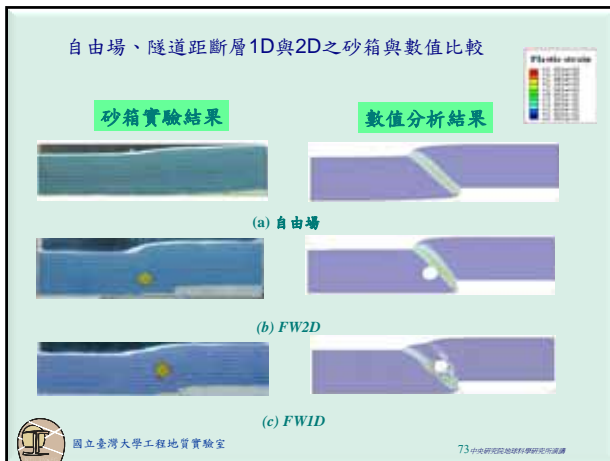


國立臺灣大學工程地質實驗室

60 中央研究院地球科學研究所演講







松仁路口剖面之 數值分析參數

參數			採用值	單位
黏土層 A (0m ~ 20m)	彈性參數	E	2	MPa
		ν	0.4	
	塑性參數	C	40	KPa
		摩擦角 ϕ	1	degree
	等值靜止側向土壓力係數 K_0		0.8	
	土壤單位重 γ		17.5	KN/m ³
黏土層 B (20m ~ 30m)	彈性參數	E	2.75	MPa
		ν	0.4	
	塑性參數	C	55	KPa
		摩擦角 ϕ	1	degree
	等值靜止側向土壓力係數 K_0		0.8	
	土壤單位重 γ		17.7	KN/m ³
黏土層 C (30m ~ 40m)	彈性參數	E	5	MPa
		ν	0.4	
	塑性參數	C	85	KPa
		摩擦角 ϕ	1	degree
	等值靜止側向土壓力係數 K_0		0.8	
	土壤單位重 γ		18	KN/m ³

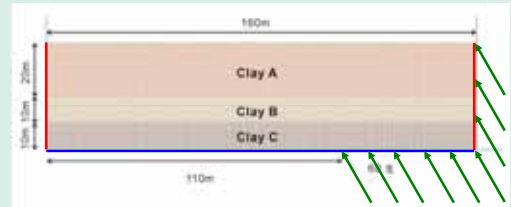


國立臺灣大學工程地質實驗室

79 中央研究院地球科學研究所演講

全尺度數值分析：自由場分析 model

- 分析步驟：
1. 大地應力平衡
2. 上蓋基盤抬昇2.5公尺



with friction, $S_{max} = C$
allow separation

frictionless
no separation

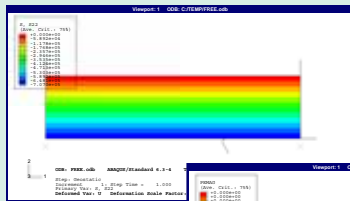
2.5m offset



國立臺灣大學工程地質實驗室

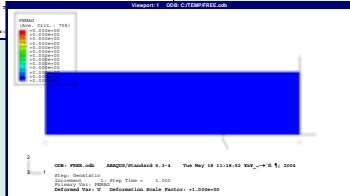
80 中央研究院地球科學研究所演講

大地應力平衡



垂直向應力
隨深度均勻變化

塑性應變大小
無塑性應變產生

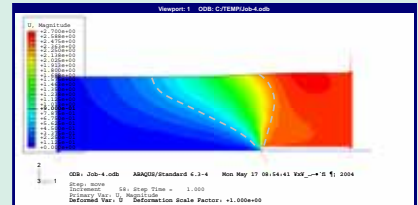


國立臺灣大學工程地質實驗室

81 中央研究院地球科學研究所演講

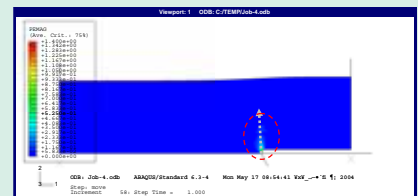
位移量圖

- 影響範圍
- 發展方向



塑性應變圖

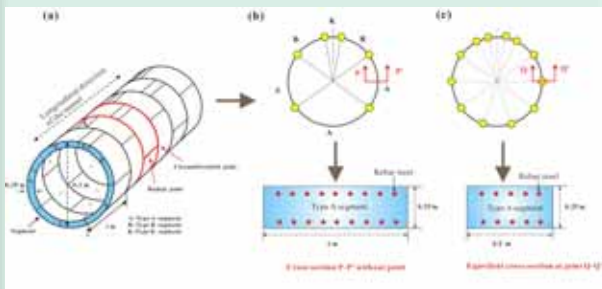
- 發展方向
- 擴展程度



國立臺灣大學工程地質實驗室

82 中央研究院地球科學研究所演講

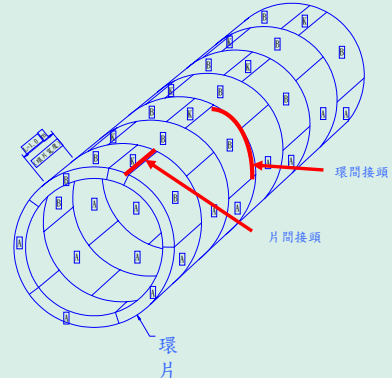
潛盾隧道數值模擬： 每環由六環片組成、環間交錯配置



國立臺灣大學工程地質實驗室

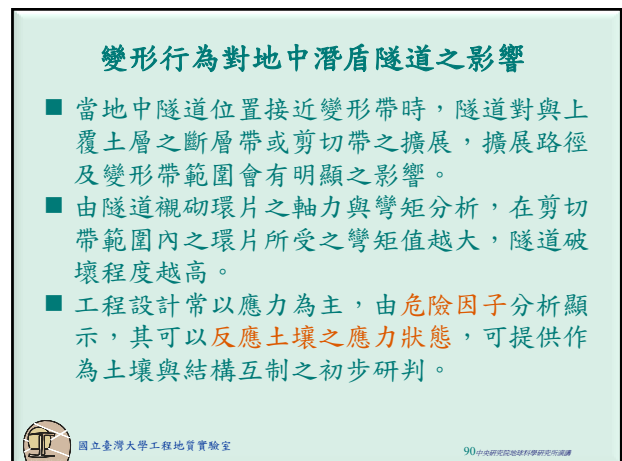
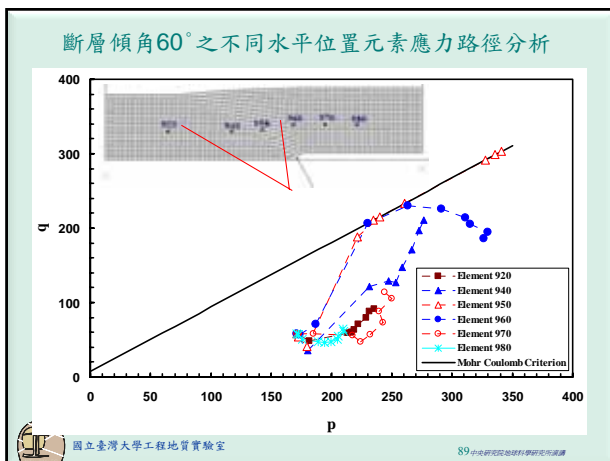
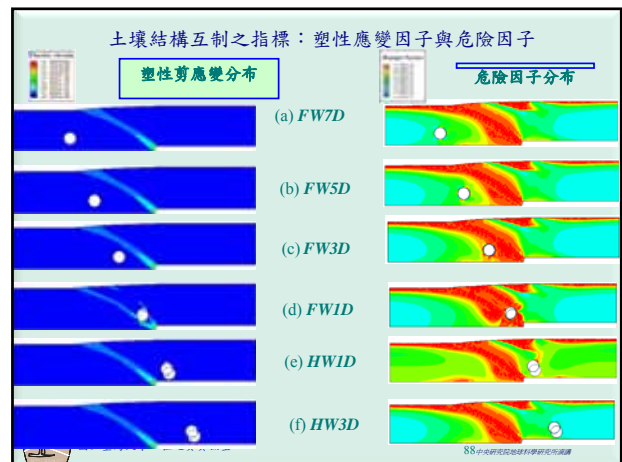
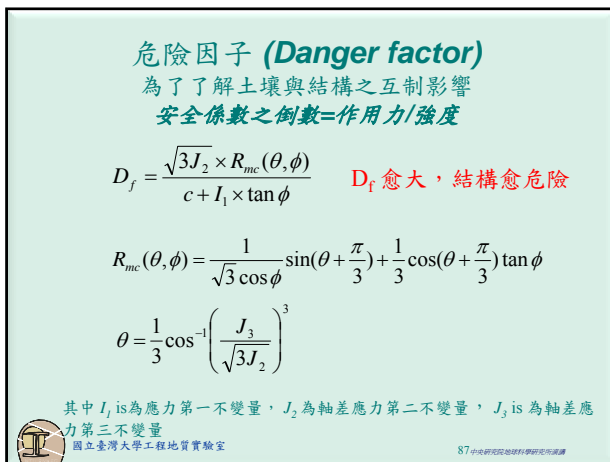
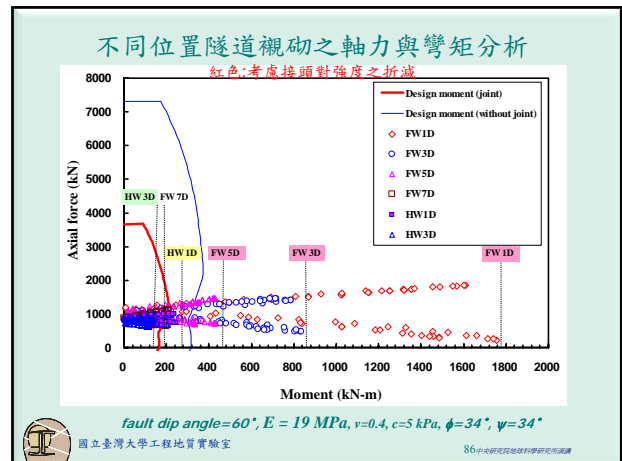
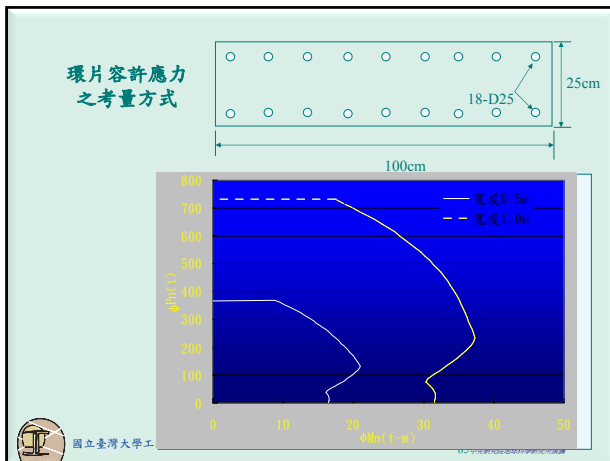
83 中央研究院地球科學研究所演講

潛盾隧道數值分析_環片錯置方式:12接頭, 74標元素



國立臺灣大學工程地質實驗室

84 中央研究院地球科學研究所演講



實例分析: 不同隧道位置分析model



91 中央研究院地球科學研究所演講

隧道開挖之影響 (雙環模式)

塑性應變分佈



位移量分佈 FW1D

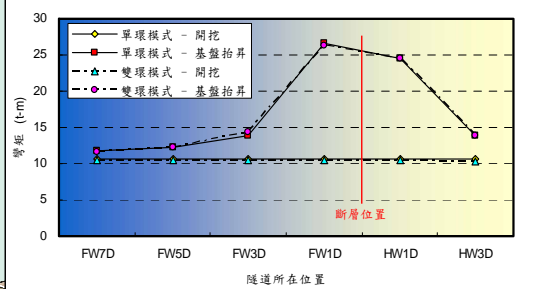


國立臺灣大學工程地質實驗室

92 中央研究院地球科學研究所演講

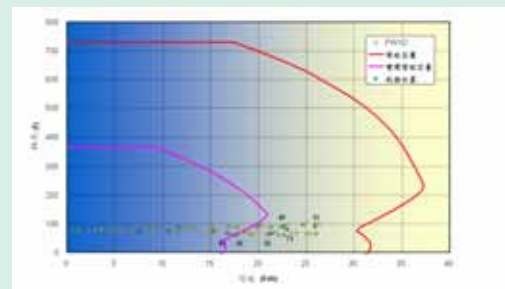
隧道開挖之影響 (雙環模式)

不同距斷層距離下環片彎矩最大值變化圖



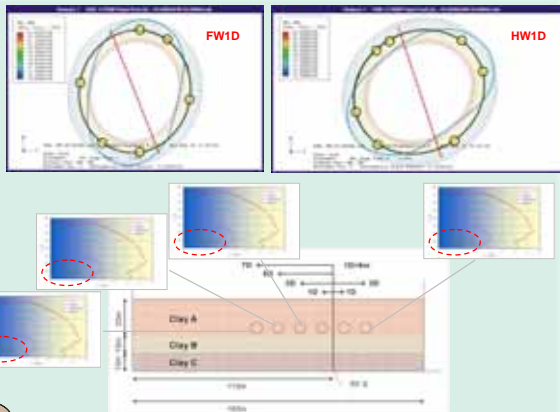
93 中央研究院地球科學研究所演講

環片彎矩容量之檢核 (雙環模式): FW1D



國立臺灣大學工程地質實驗室

94 中央研究院地球科學研究所演講



95 中央研究院地球科學研究所演講

松仁路口剖面結論

- 於松仁路口剖面，隧道離斷層3D以上時，受斷層錯動影響不大。
- 單環模式分析
 - 斷層錯動時，隧道環片可通過彎距容量之檢核，保持完好。
- 雙環模式分析
 - 斷層錯動時，距斷層約1D的範圍，隧道環片有沿接頭破壞的可能性。

- 單環模式分析

- 斷層錯動時，隧道環片可通過彎距容量之檢核，保持完好。

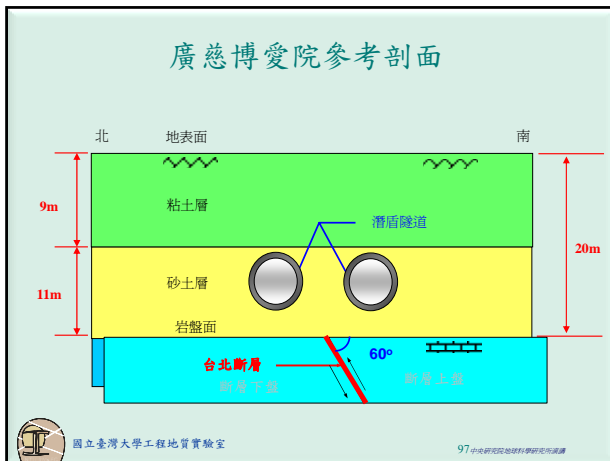
- ## ● 雙環模式分析

- 斷層錯動時，距斷層約1D的範圍，隧道環片有沿接頭破壞的可能性。



國立臺灣大學工程地質實驗室

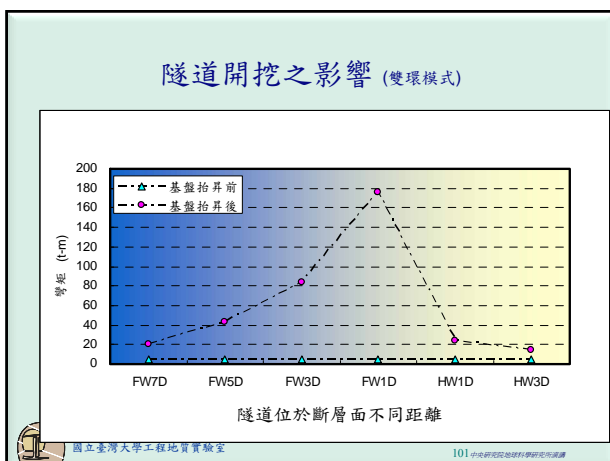
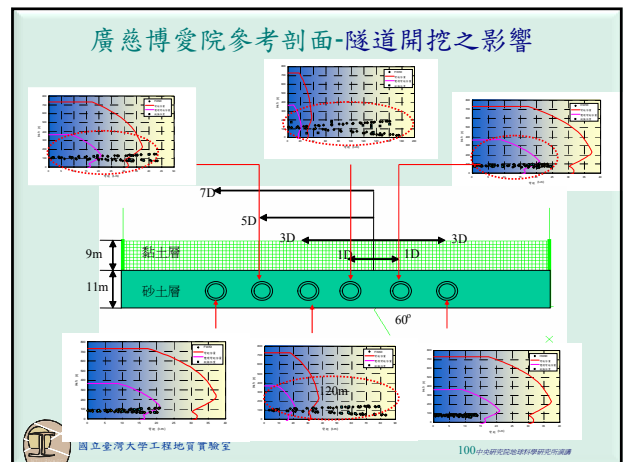
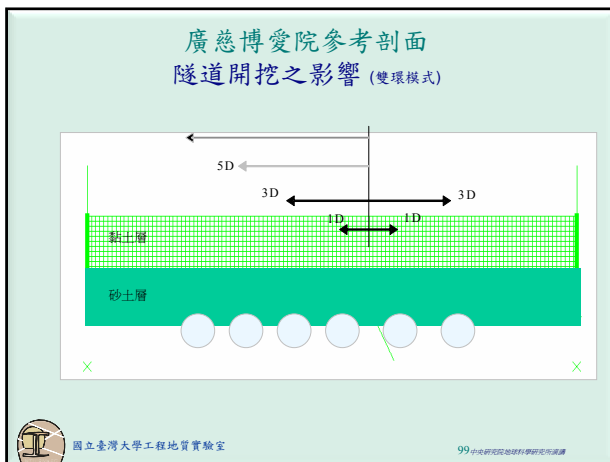
96 中央研究院地球科學研究所演講



廣慈博愛
院剖面之
數值分析
參數

參數		採用值	單位
黏土層	彈性參數	E	2.5 MPa
		ν	0.4
	塑性參數	C	25 kPa
		摩擦角 ϕ	1 degree
	等值靜止側向土壓力係數 K_0	1	
土壤單位重 γ		18	kN/m ³
砂土層	彈性參數	E	19 MPa
		ν	0.3
	塑性參數	C	5 kPa
		摩擦角 ϕ	34 degree
	等值靜止側向土壓力係數 K_0	0.73	
土壤單位重 γ		20	kN/m ³
土壤與基盤摩擦角 $\tan(2/3\phi)$		0.42	

國立臺灣大學工程地質實驗室
 98 中央研究院地球科學研究所



結論 (1/4)

數值分析之土體變形行為，與物理模型試驗之觀察趨勢相同，亦與活斷層挖溝所見之土體變形特徵有一定程度之吻合，未來於進行地下結構物之受斷層錯動危害度評估時，可利用本研究建立之數值方法與經驗進行數值模擬，進行定量分析，作為設計之參考。

國立臺灣大學工程地質實驗室 102 中央研究院地球科學研究所

結論 (2/4)

- 逆斷層作用時，隨斷盤抬昇比增加，斷層尖端向上擴展，引致上覆土層變形，此變形形狀呈三角形，可用三角形剪切變形帶描述。
- 三角形剪切變形帶範圍受到斷層傾角、斷盤抬昇比及上覆土層材料性質等參數影響。
- 當結構物在三角形剪切帶範圍內，土壤與結構將產生明顯互制之影響，造成剪切帶擴展或擴展路徑改變等現象，而對結構物會造成較明顯之破壞。
- 防治對策，結構物應優先避開三角形剪切帶之範圍；如無法避免，覆土材料性質應考慮減少土壤之楊氏模數，減少變形之傳遞。



國立臺灣大學工程地質實驗室

103 中央研究院地球科學研究所

結論 (3/4)

地中結構物(潛盾隧道)位於斷層附近時，斷層錯動對其所造成應力與變形行為探討

- 地下結構物之存在，將限制剪切帶之發展，當結構物位於錯動面1倍直徑距離時，剪切帶分別通過結構物上、下方，結構物四周集中之剪切作用造成其斷面扭曲變形。
- 由參數敏感度分析中，顯示膨脹角對塑性應變集中帶範圍影響較大，膨脹角越大，塑性應變帶角度越緩，塑性應變區範圍越大，對相同距離之隧道破壞性較高。



國立臺灣大學工程地質實驗室

104 中央研究院地球科學研究所

結論 (4/4)

- 松仁路路口剖面數值分析結果
在隧道位於基盤抬昇面下盤1D及上盤1D距離範圍內，部分接頭有破壞可能性外，其餘位置隧道環片之彎矩容量均能通過檢核。
- 廣慈博愛院剖面數值分析結果
 1. 在隧道位於下盤7D及上盤3D範圍外，隧道環片之彎矩容量能通過檢核，餘均超出隧道環片之彎矩容量。
 2. 當砂土層膨脹角越大，對塑性應變集中帶範圍越大，且受黏土層土層界面之限制，塑性應變區集中於砂土層，無法發展至地表面，對隧道環片破壞性較大。
 3. 隨隧道距離斷層面越近，其塑性應變帶與隧道互制現象越明顯，當隧道距離斷層面下盤1D距離時，隨膨脹角不同，改變塑性應變帶發展順序。



國立臺灣大學工程地質實驗室

105 中央研究院地球科學研究所

誌謝

陳文山教授、楊昭男教授、李錫堤教授、盧佳遇教授、劉桓吉博士、Dr. Cluff、亞新工程顧問公司、中興工程顧問公司、中央地質調查所、國科會研究計畫-94-2211-E-002-042、95-2221-E-002-258、所有協助實驗研究生同學及前輩的努力

~ 報告完畢 ~
敬請指教

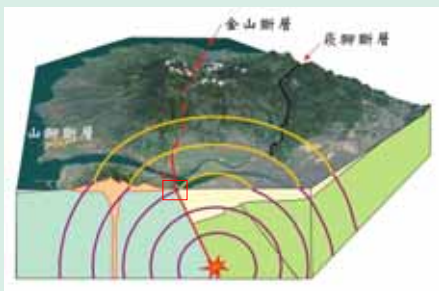


國立臺灣大學工程地質實驗室

106 中央研究院地球科學研究所

成果進一步運用 - 都會型斷層、地震與工程

山脚斷層與台北捷運、機場捷運、高鐵、台電高壓電纜地下化工程、...等重大線形工程相交



國立臺灣大學工程地質實驗室

107 中央研究院地球科學研究所

107

相關著作

Lin, M.L., Chung, C.F., Jeng, F.S., Yao, T.C. (2007) The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology*, 92, 110-132.

鍾春富、林銘郎、鄭富書 (2007) 逆斷層作用引致上覆土層變形行為及其對淺基礎之影響，臺灣礦業，第59卷，第3期，第4-29頁。

Lin, M.L., Chung, C.F., Jeng, F.S. (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, 88, 70-89.

鍾春富、林銘郎、鄭富書、王景平、姚大鈞 (2005) 逆斷層錯動引致上覆土層變形行為探討，經濟部中央地質調查所特刊第十六號，第91-108頁。

Lin, M.L., F. S. Jeng, T. H. Huang, C. F. Chung, H. W. Lee (2006) A study on the damage degree of shield tunnels submerged in overburden soil during the thrust fault offset. PVP2006-ICPV11-93345, Proceedings of PVP2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 23-27, 2006, Vancouver, BC, Canada. (EI)

Lin, M.L., F. S. Jeng, H. J. Wang, C. P. Wang, C. F. Chung, Daniel, C. T. Yao, S. J. Chan (2005) Response of soil and a submerged tunnel during a thrust fault offset based on model experiment and numerical analysis, PVP2005-71179, Proceedings of PVP2005 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 17-21, 2005, Denver, Colorado USA. (EI)



國立臺灣大學工程地質實驗室

108 中央研究院地球科學研究所