



台灣困難地質條件 之工程挑戰與對策

Engineering challenges and countermeasures of
some difficult geological conditions in Taiwan

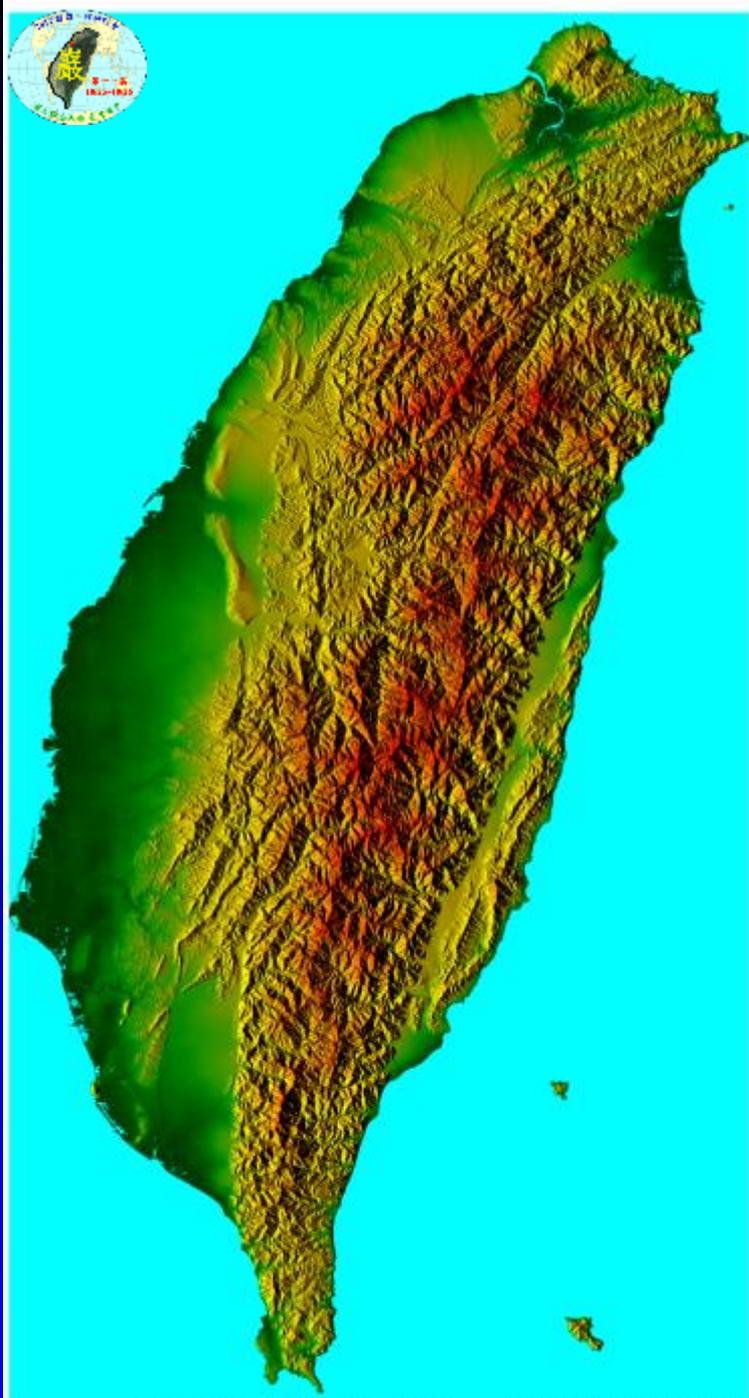
李錫堤教授
國立中央大學應用地質研究所

2012岩盤工程研討會
2012年10月25~26日

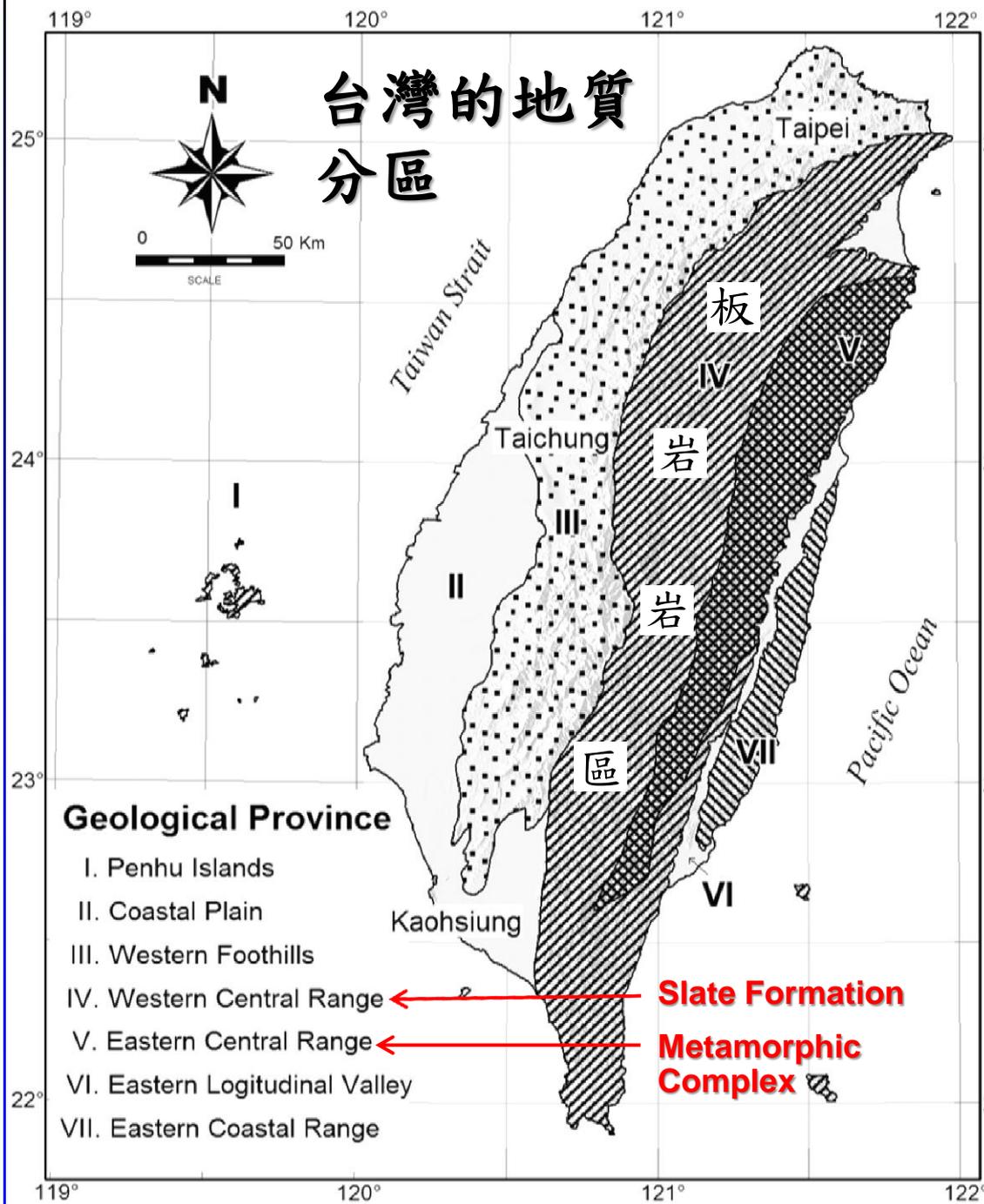


台灣困難地質條件 造成的工程挑戰與對策

- 本文除了介紹台灣常見的困難地質條件與地質災害外，尤其深入介紹順向坡、斷層泥及板岩層等三種最為特別的困難地質條件及其成功與失敗案例。順向坡的特性是其順層的結構及層間軟弱泥層的存在，形成岩盤中最弱的一環。斷層泥是一種極高度壓密但未有膠結的高度敏感性土壤。板岩山坡常出現大規模的重力變形現象，板岩開挖面也容易出現岩片之撓曲現象。
- 此皆有待調查、設計及施工上的特殊考量與適切因應。



DTM Color Shading Map of Taiwan 台灣數值地形彩繪明暗圖





台灣常見的困難地質條件

1/2

- 台灣常見的困難地質條件與地質災害包括：斷層帶、順向坡、舊崩塌地、山坡潛移區、向源侵蝕區、卡斯特地區、舊礦坑、含瓦斯地層、火山硫氣區、地熱區及軟弱地層等。
- 傾斜地層在風化及侵蝕作用下極易形成順向坡。順向坡的特性是其順層的結構且會有層間軟弱的泥層存在，形成岩盤中最弱的一環。由於層間泥層厚度可薄至1公分以下，因此**容易在調查過程中被忽略而導致過於樂觀的設計**，造成後續工程施工及維護之困擾。沉積岩中的順向坡又較板岩及片岩中的順向坡困擾為大。

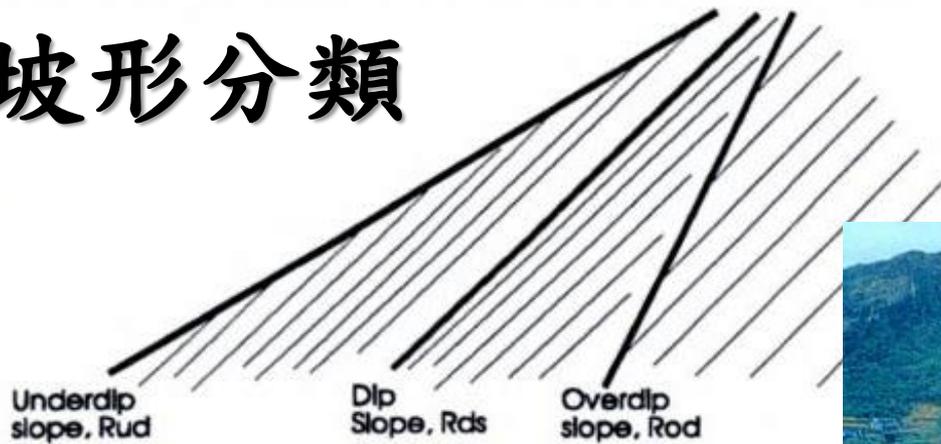


台灣常見的困難地質條件

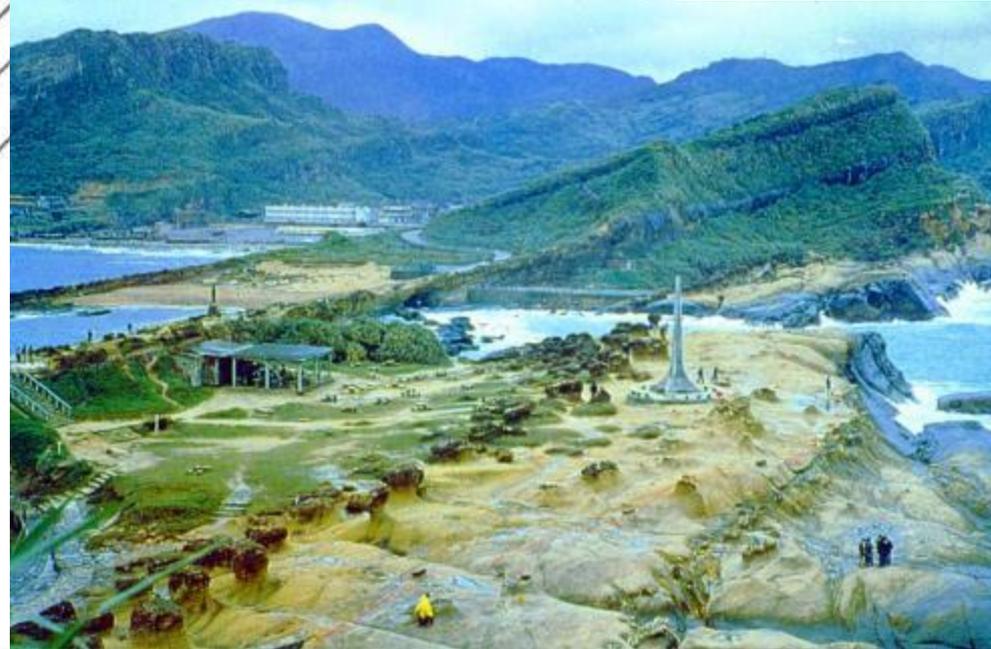
2/2

- 造山帶中大小斷層密布，在老造山帶中多數斷層已經固化成岩，但在活動造山帶中的斷層則多數尚未固化，且愈活動的斷層可能愈軟弱。未固化的斷層泥是一種**極高度壓密但未膠結的土壤**，原狀斷層泥外觀像泥岩，開挖後解壓受潮即快速軟化，造成開挖工程上極大的困擾。地下開挖工程遇斷層帶尚有湧水、落盤及瓦斯突出的問題。
- 板岩是一種高度方向性的泥質岩類，具有間距極密的劈理，一旦受擾動即成薄片狀而容易產生撓曲現象。板岩層約佔台灣本島三分之一或山地約一半之面積。由於位處深山且岩性單調，地質調查不易，地質師也大多不知如何調查，拿不出關鍵資料，誤導工程設計而造成工程上重大的挑戰。台灣高山地區**多數板岩坡已經產生撓曲或重力變形現象**，山坡頗不穩定。板岩層中的工程明挖及地下開挖過程中也容易出現板岩撓曲現象。

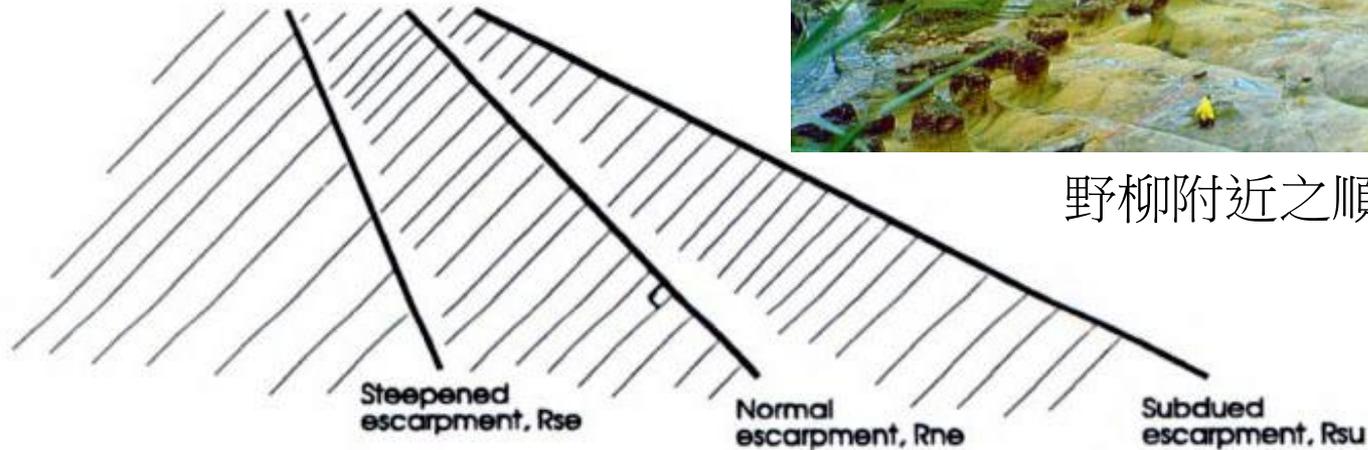
坡形分類



順向坡 Cataclinal slopes



野柳附近之順向坡地形



Anaclinal slopes 逆傾坡

Figure 1. Sections through rock slopes classified by the relative orientation of the penetrative discontinuity (thin lines) and the slope (thick line).



台灣的順向坡

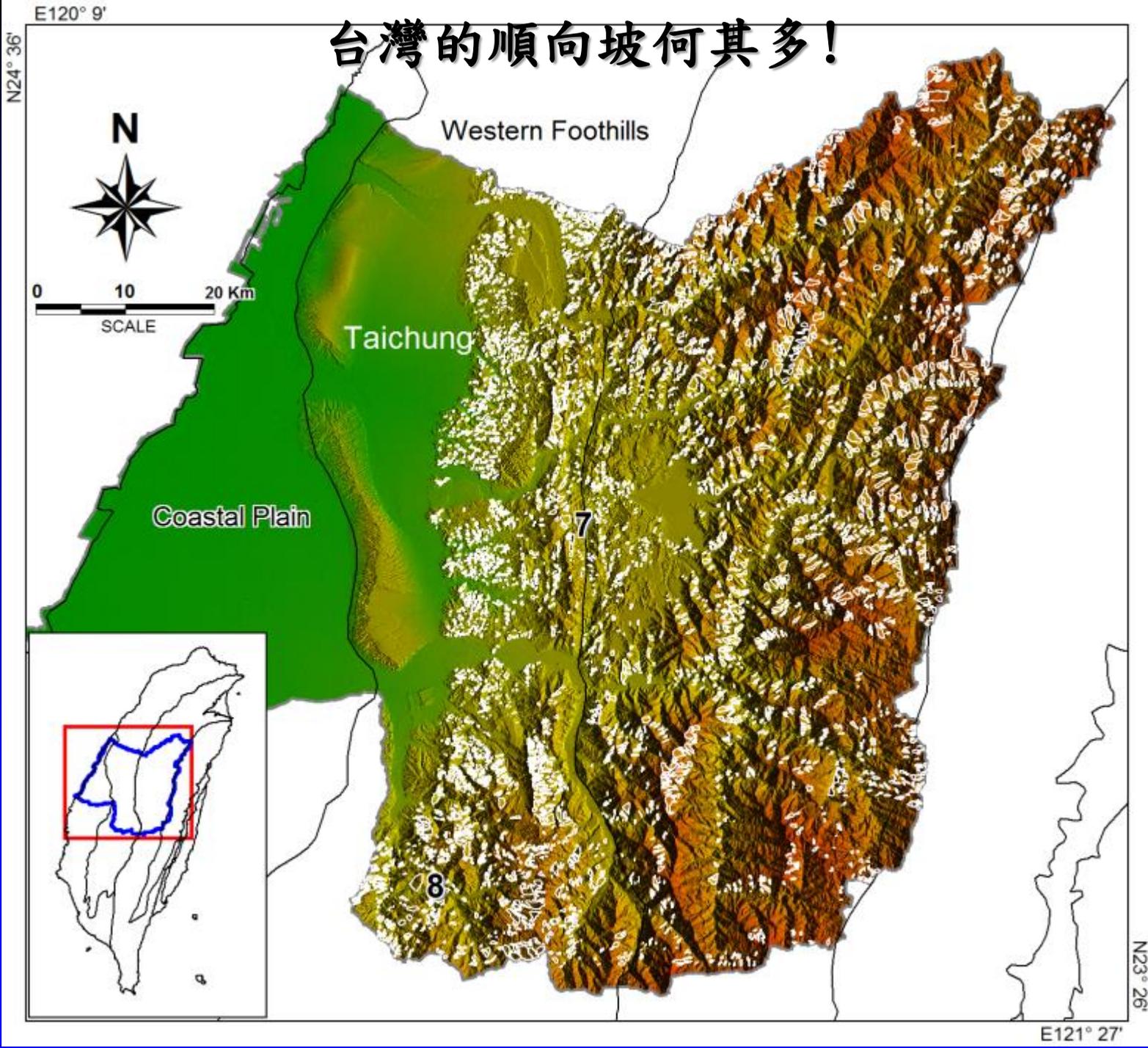
- 不像一般的大陸型國家，台灣的岩層很少有水平分布的，在風化及侵蝕作用下很容易形成順向坡。順向坡的特性是其有順層的結構，且會有層間的泥層存在（李錫堤，2011）。它有別於節理，節理延伸性有限，層間泥層延伸性很大。層間泥層的成因有兩種，其一是地層褶皺過程中產生的**層間剪裂** (bedding shear)，另一種是侵蝕解壓產生的**解壓縫隙** (stress relief)。解壓縫隙的延伸較一般節理長，可達數十公尺到超過百公尺。**層間剪裂在一工址之有限範圍內會具有百分之百的延伸性，且其泥層實際上就是斷層泥**。其在垂直向是阻水層而在側向則是良好的地下水流通層，形成岩盤中最弱的一環。



台灣中部地區的順向坡分布

台灣的順向坡何其多!

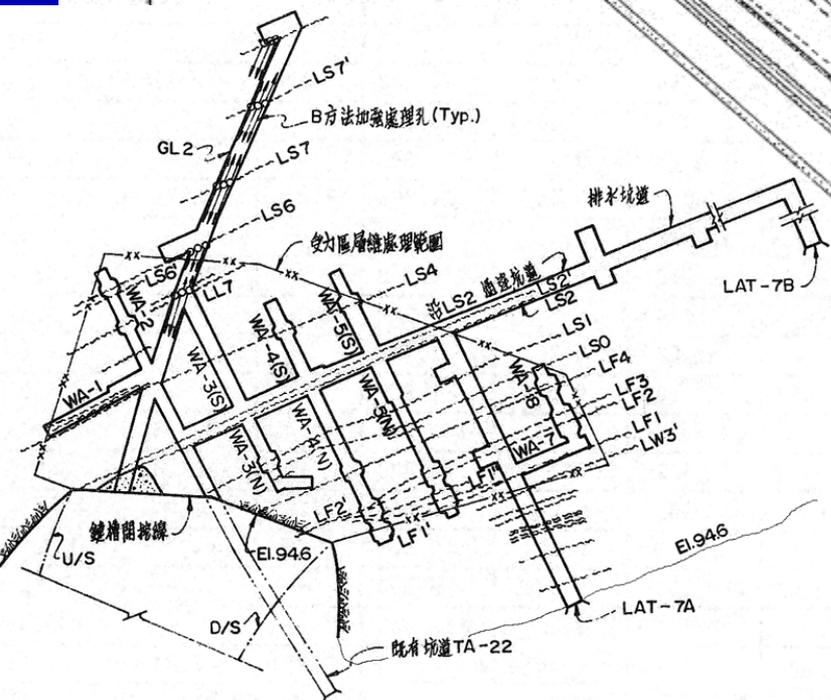
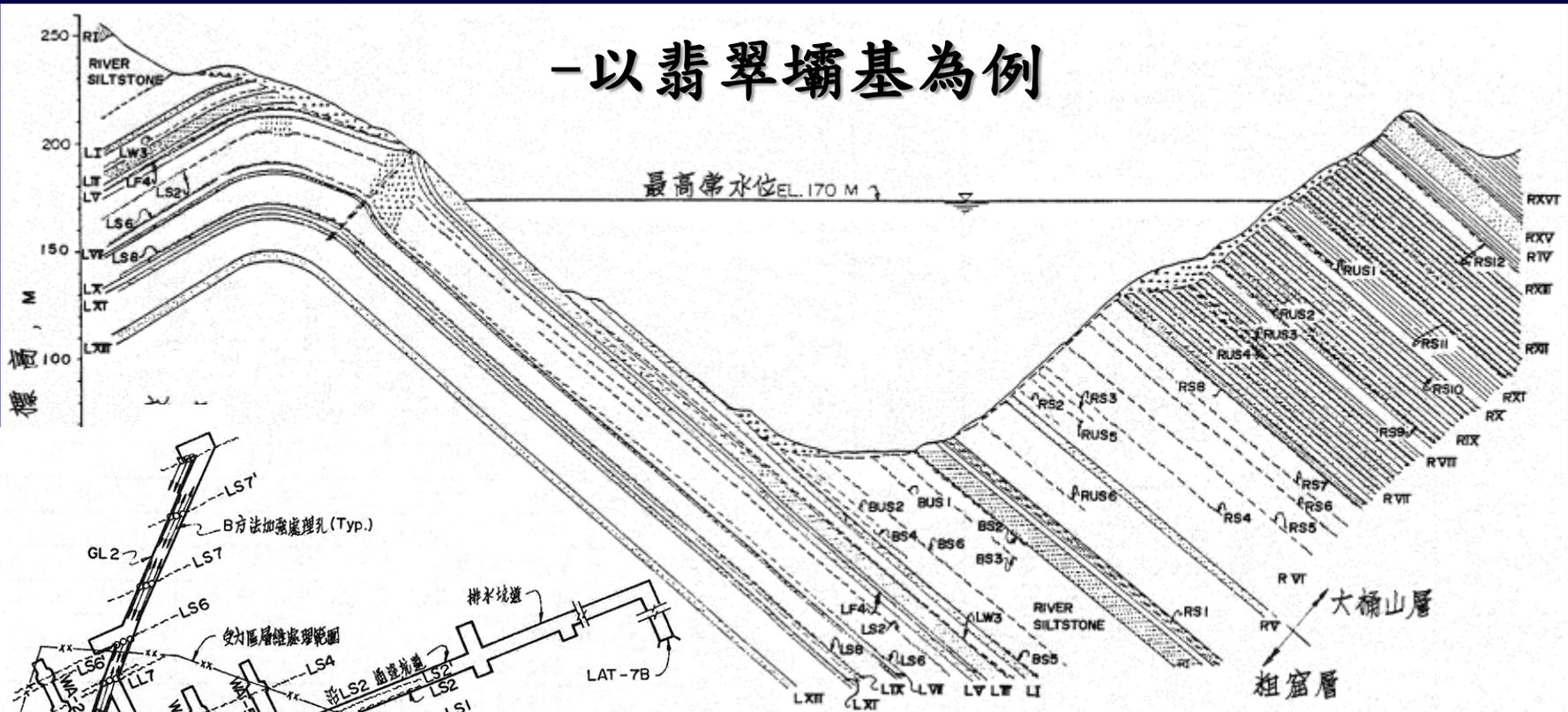
大甲、大肚及濁水溪流流域





順向坡坡體內的泥層分布 (2/1)

-以翡翠壩基為例



翡翠壩址地質剖面圖
左岸El.94.6m層縫
加強處理平面佈置圖

- 說明:
- 覆蓋層
 - 砂岩
 - 粉砂岩
 - 互層, 粉砂岩為主
 - 互層, 砂岩為主
 - 層層縫
 - 剪裂縫
 - 破碎岩盤



順向坡坡體內的泥層分布 (2/2)

BEDDING SEAMS IN LEFT ABUTMENT OF DAMSITE NO.3

| Geologic Column | Bedrock Seam | Distance to portal (m) | | | | | | | | | | Continuity (%) | Physical Property | | | | Notes |
|--|--------------|------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------|------|------|-------|-------|----------------|----------------------------------|--------------------|---------------|---|---|
| | | TA 18 | TA 8 | TA 22 | TA 20 | TA 16 | TA 17 | TA 6 | TA 7 | TA 19 | TA 21 | | Thickness of fractured rock (cm) | Occurrence of clay | Color of clay | Clay Content (%) | |
| W1 W2 W3 | Zone 1 | W1 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | 45 | 8-12 | diss. | brown | "diss." means disseminated interstitially in fractures S ₂ referred to in text as main seam | |
| | | W2 | 9 | 3 | - | 3 | - | - | - | - | - | 55 | 8-15 | " | " | | |
| | | W3 | 12 5 20 | 6 5 15 | 4 5 13 | 6 5 15 | - | - | - | - | - | - | 100 | 550 | " | | " |
| F1 F2 F3 F4 S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 | Zone 2 | F1 | 24 | 18 | 15 | 18 | 9.5 | 3 | - | 4 | 1.5 | 3 | 80 | 5-30 | " | " | Two sandstone beds on upper part of zone 2 are shown as single bed in figures in text See p.44 for continuity (%) criteria |
| | | F1' | - | 19 | 16.5 | 20 | 11.5 | - | - | 5 | 2.5 | - | 40 | 5-15 | " | " | |
| | | F2 | 27 | 21 | 18 | - | 12.5 | 6 | - | - | 4.5 | - | 50 | 5-25 | " | " | |
| | | F3 | - | 23.5 | 21 | - | 15.5 | - | - | - | 6.5 | 7.5 | 55 | 0-35 | " | " | |
| | F3' | - | - | 23 | - | 17.5 | - | - | - | 8 | 10.5 | 20 | 1-4 | " | " | | |
| | F4 | 32.5 | 27 | 24 | - | 19 | 12 | 6.5 | 10 | 10 | 13 | 90 | 5-30 | " | " | 11 | |
| | S1 | 39 | 31 | - | - | - | 15 | - | - | - | 19.5 | 30 | 1-15 | " | " | | |
| | S2 | 45 | 38 | 36.5 | 39 | 30.5 | 23.5 | 18.5 | 23 | 22 | 25 | 100 | 1-30 (partly 80) | layered (1-8 cm) | gray | 33 | |
| S3 | 44 | 45 | - | 38 | 31 | - | - | 30 | - | 30 | 50 | 2-5 | diss. | brown | 12 | | |
| S4 | 47 | - | 47.5 | 41 | - | - | - | - | - | 33 | 40 | 0-100 | " | " | 6 | | |
| S5 | 51.5 | - | - | 44 | - | - | - | - | - | 35 | 15 | 0-6 | " | " | 12 | | |
| S6 | 64 | - | - | - | 54.5 | 47 | 43 | 46.5 | - | 45 | 85 | 1-10 | layered (1-4 cm) | gray | 24 | | |
| S7 | 68 | - | - | - | 62 | - | - | - | - | 51 | 20 | 0-3 | diss. | brown | | | |
| S8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 1-5 | layered (1-5 cm) | gray | 48 | | |

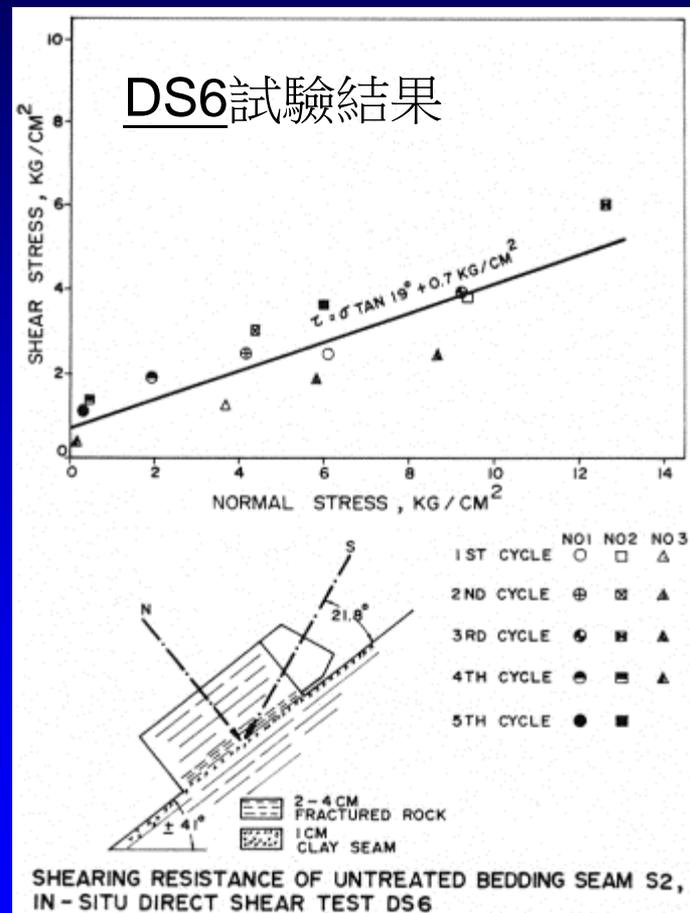




翡翠順向坡內泥層的剪力強度

(70x70公分現地直接剪力試驗結果一覽表)

| 試驗編號 | 試驗對象 | 凝聚力 (kg/cm ²) | 模擦角 (度) |
|------------|-------|---------------------------|-------------|
| <u>DS2</u> | 層縫LS2 | 0.4 | 19.3 |
| <u>DS6</u> | 層縫LS2 | 0.7 | 19.0 |
| <u>DS3</u> | 層縫LS6 | 0.7 | 22.3 |
| DS1-1 | 層縫LS2 | 0.5 | 18.5 |
| DS1-2 | 層縫LS2 | 1.0 | 19.0 |
| DS1-3 | 層縫LS2 | 0.3 | 17.5 |
| DS2-1 | 層縫LS4 | 2.0 | 30.0 |
| DS2-2 | 層縫LS4 | 0.9 | 27.5 |
| DS3 | 層縫LS8 | 1.0 | 1.0 |
| DS8 | 層縫LS6 | 2.1 | 27.5 |



※前面3個試驗是定案研究階段做的(1977)
 後面8個試驗是基本設計階段做的(1979)

★大壩基礎安定分析設計值採用:
 C=0, φ=19°



八堵交流道1974順向坡滑動



1974年9月28日，興建中的中山高速公路八堵交流道因順向坡坡腳被挖除，施工中即發生地層滑動(南港砂岩)，數萬方土石埋沒基隆河右岸的十數間民宅，造成36死之悲劇。



汐止收費站北1977順向坡滑動



滑動情形一

事件後，高工局予以修坡及施做岩錨加固，迄今未再出問題。

1974年中山高速公路汐止收費站北方因順向坡坡腳被挖除，加以未做任何補強措施，通車後不久隨即發生地層滑動(南港砂岩)，約300公尺長的路段被堆積了約10公尺高的土石，幸而未有車被埋。



滑動情形二



國道三號2010大埔順向坡滑動

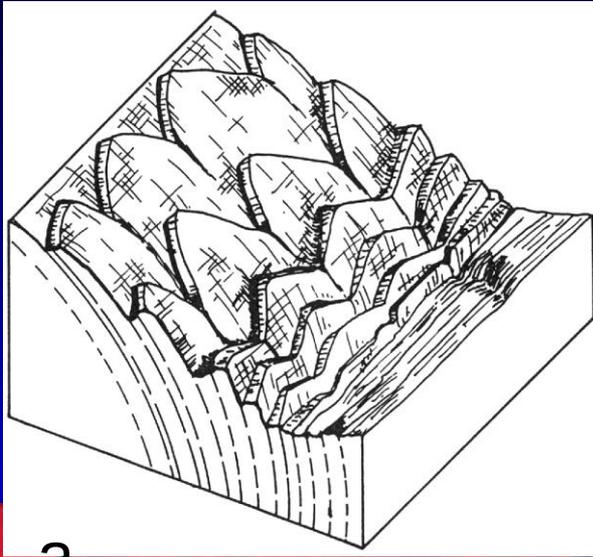
2010年4月25日國道三號在通車11年後，在大埔段(里程3.1K)，向西南方傾斜約15度的石底層砂岩，在無雨及無地震的情況下突然發生滑動。約二十萬方土石滑落車道，3車4人遭掩埋。

施工過程中已施拉600支60-T地錨補強，但補強部分僅限於坡腳，上方邊坡仍處於未補強狀態。





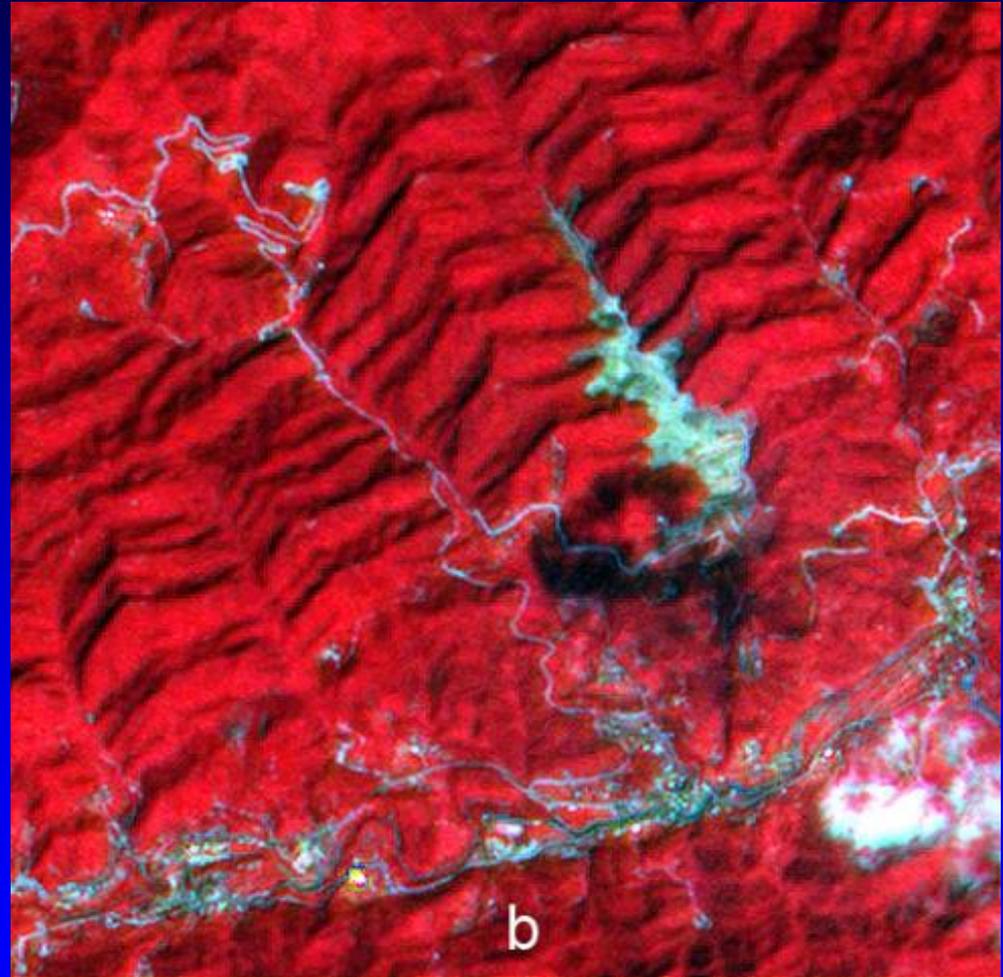
熨斗狀地形



a 熨斗狀地形示意圖



大埔順向坡熨斗



台灣北部基隆河上游地區的熨斗狀地形



1997林肯大郡順向坡滑動

1997年 8月18日 中度颱風溫妮來襲當天，林肯大郡西側山坡發生順向坡滑動，衝垮最西側一整排五層樓公寓，造成28人死亡之慘劇。

此事件導因於順向坡坡腳遭整地挖除，使上部岩層失去支撐。雖然坡面事先有預力地錨補強，但仍因拉力不足及排水不良而發生滑動。



台北縣汐止鎮林肯大郡大規模順向坡滑動



1990新埔順向坡滑動



1990年4月23日在一場暴雨後，新竹縣新埔鄉在距國道一號約三百公尺外的鳳山溪北側山坡發生大規模地層順層滑動，面積達**20**公頃，幸未造成傷亡。此地屬更新世楊梅層，地層傾角僅約**5**度，但因河流掏蝕坡腳，加以台地邊緣容易滲出地下水而致滑動面水壓激升，終致滑動。



1999草嶺順向坡滑動



草嶺村

草
嶺
潭

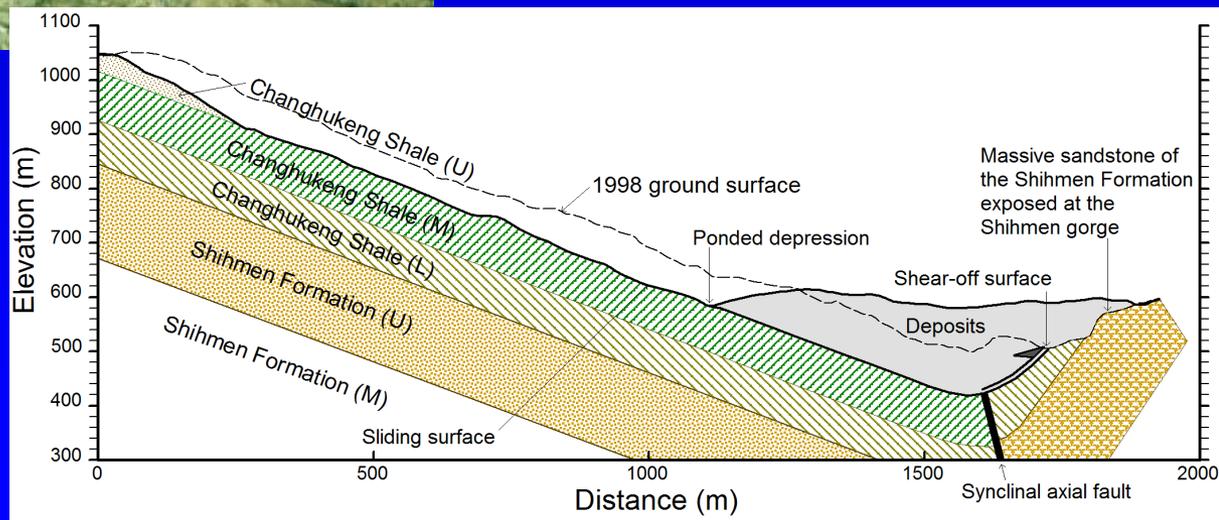


1999九份二山順向坡滑動



1999年9月23日從直升機
拍攝之九份二山順向坡滑動
面

沿滑動區中心
之地質剖面圖





2009小林村順向坡複合型滑動



崩塌區全景(齊柏林攝影)



崩塌前

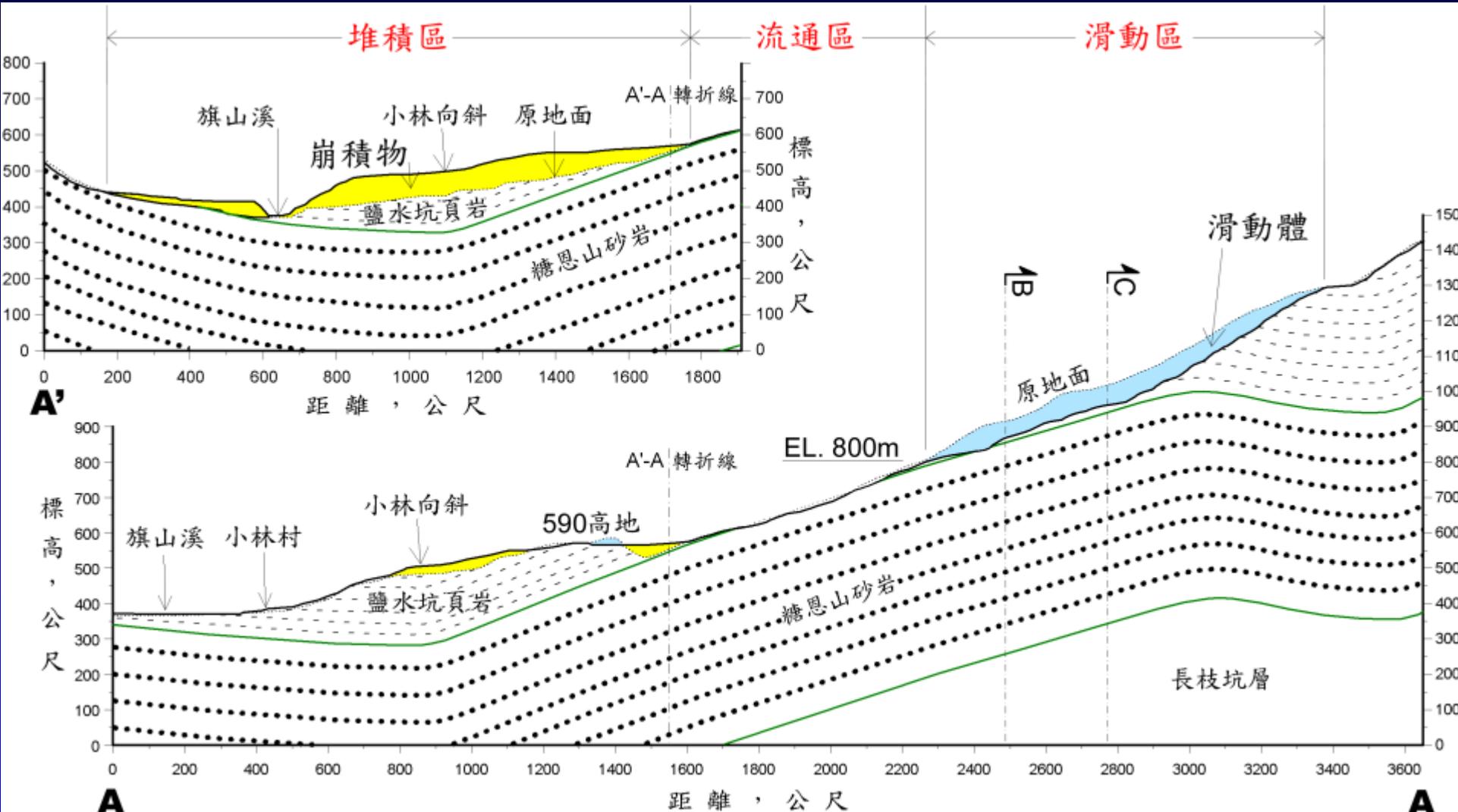


崩塌後

小林村崩塌前後景像(鄭錦桐提供)



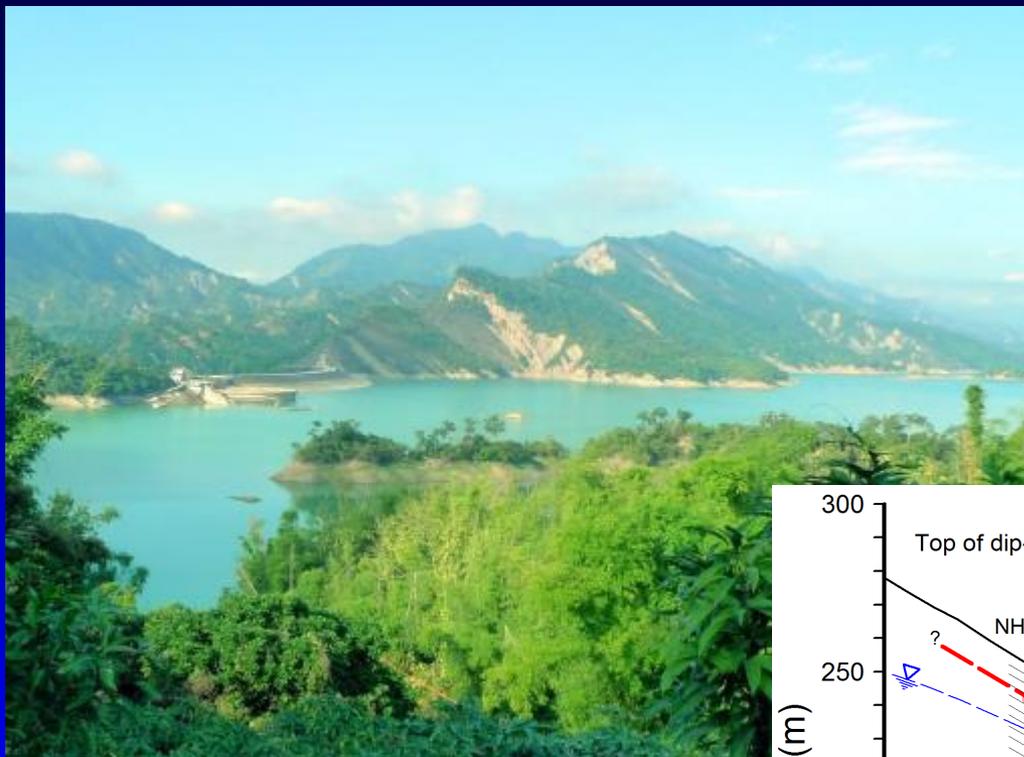
2009小林村順向坡複合型滑動



小林村地質剖面圖A-A

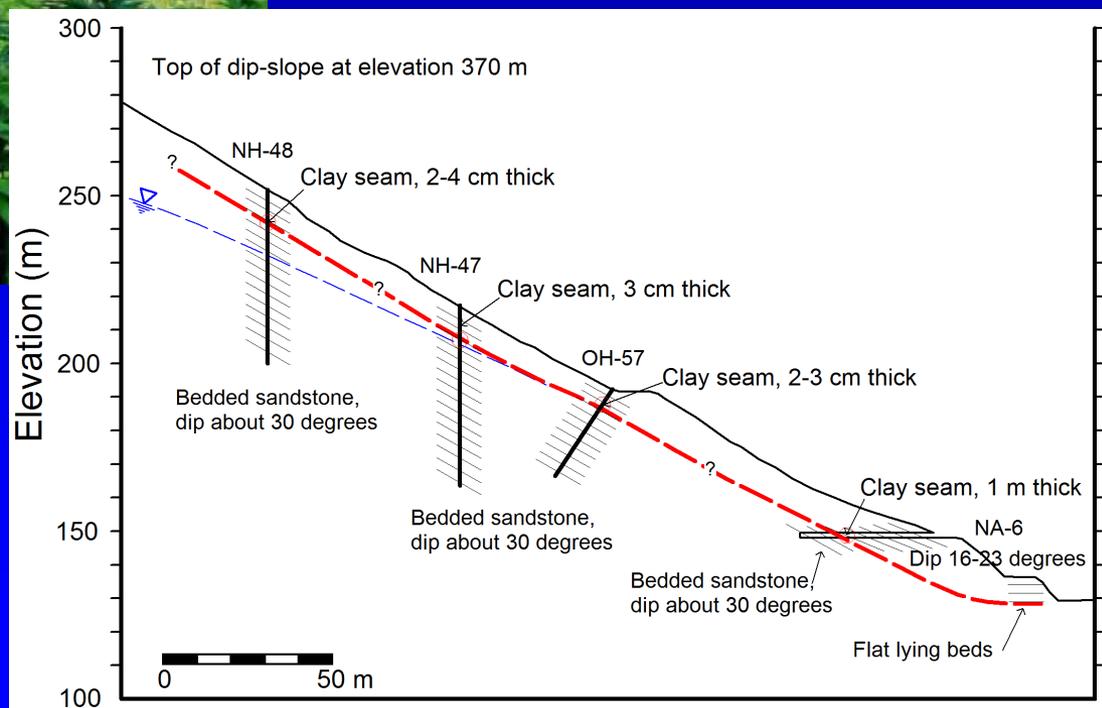


南化水庫右岸順向坡



順向坡坡腳已有名顯剪壞情形

南化水庫全景 (由台20北眺)





翡翠大壩左岸順向坡



翡翠大壩左壩座開挖全景
(攝於1981年左壩座開挖完成時)

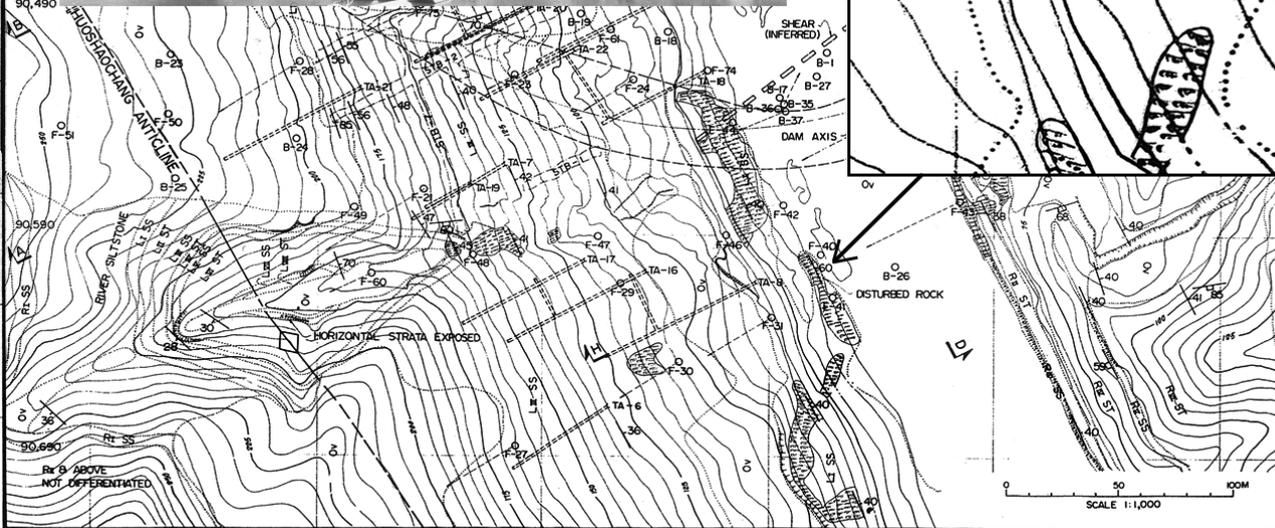
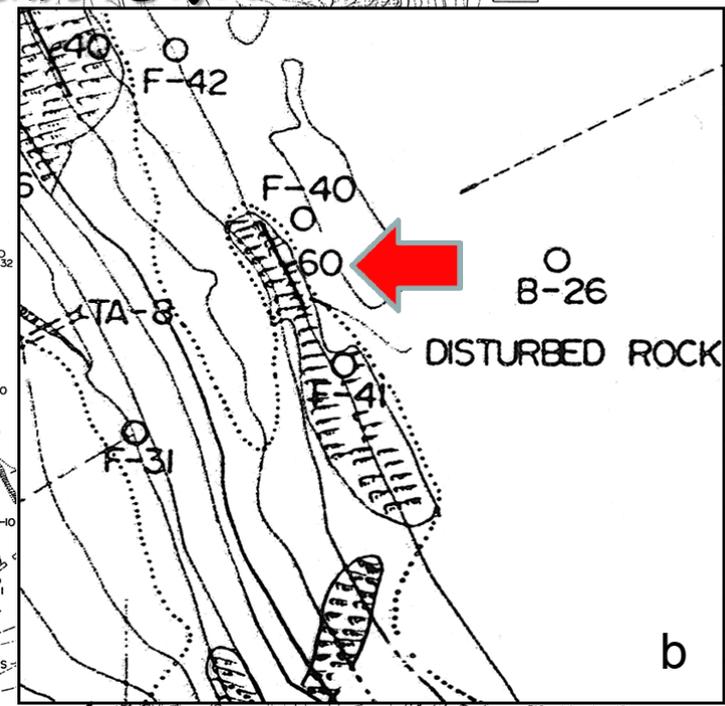
翡翠大壩全景 (由右壩高處
往左壩看) (攝於1985年近
完工時)





翡翠大壩左岸順向坡

坡腳有鼓脹現象!



LEGEND
Ov COLLUVIUM AND ALLUVIUM

DOMINANT
DOMINANT
and angle)

thou
youngest
, oldest
of indicates
depth
mt.
script
terred

TAB - Adults after 1979
3. For geologic sections, see Dwg 355S-C-022, 023
and 024.

| 次修日期 NO. DATE | 修次內容 DESCRIPTION | 修改校核圖審核及批准 REV. CHK. APP. REV. & APP. 字號 SINOTECH TAIPOWER |
|------------------|---------------------|---|
| | | |

翡翠水庫工程
FEITSUI RESERVOIR PROJECT
地質
GEOLOGY
壩址
DAMSITE
平面
PLAN

中興工程顧問社 台灣電力公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC. TAIWAN POWER COMPANY

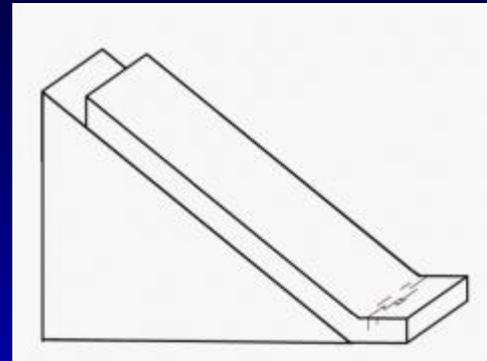
設計 C. T. Lu 會核 REV. Wu Jue-sa
DGN. COR.
繪圖 F. C. Su 審核 APP. 謝世國
校核 S. Y. Chang 監製 DATE 10/1/81
DATE 1981 Mar. 10. 1981 圖號 355S-C-021 9



順向坡滑動類型

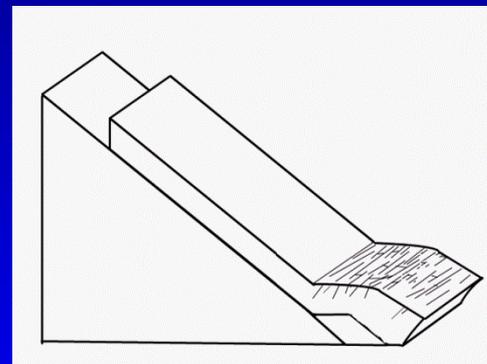
☆坡腳移除型滑動

坡腳因開挖或河流侵蝕被移除，失去支撐而使岩層順著層面向下滑動。



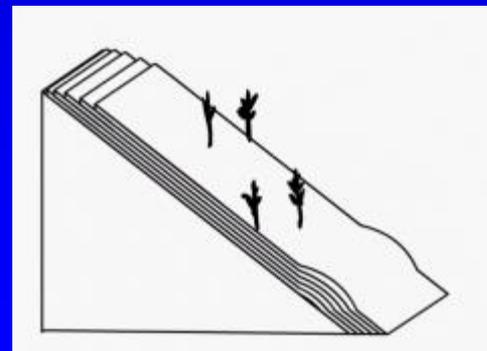
☆坡腳剪壞型滑動

坡腳岩層中含有低角度不連續面，例如節理或剪裂等，因應力弱化或其他外因剪壞而致向下滑動。



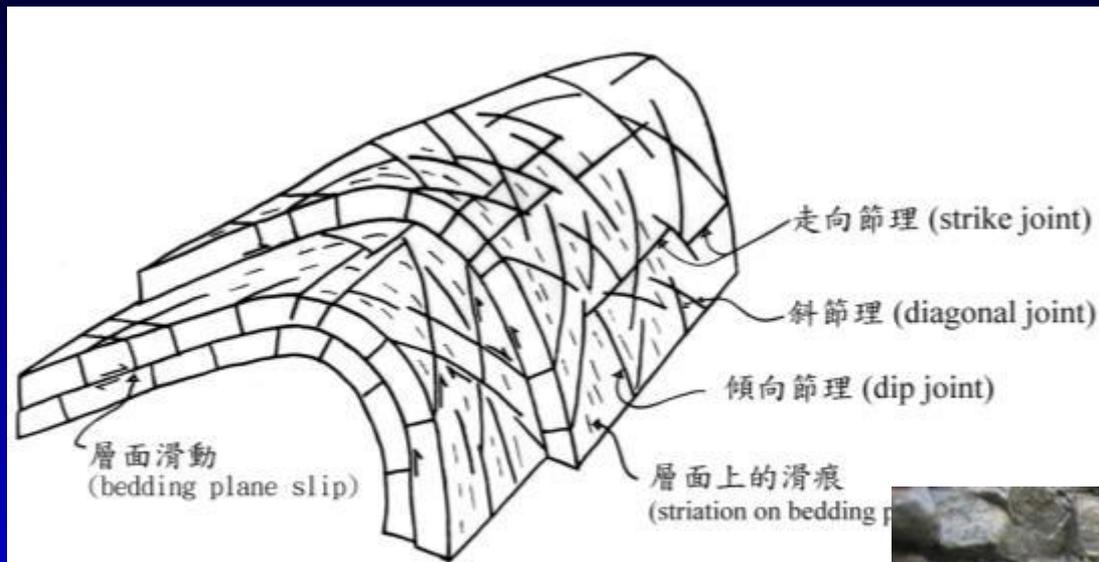
☆坡腳鼓脹型滑動

岩層中含有許多順層弱面，因細長比過高而在坡腳產生鼓脹(buckling)，最後也可能發生滑動。





褶皺地層中常見之節理與層面滑動



鷺鷥潭背斜節理示意圖

傾斜的沉積地層中含有許多順層的剪裂 (bedding shear) 或層面滑動 (bedding plane slip)，這是地層中極為軟弱的不連續面。順向坡坡體內會有這一種弱面存在，地層容易順此弱面滑動。



草嶺大崩山滑動面附近之層面剪裂



順向坡上的淺層岩屑崩滑



忠勇山

碧山巖



內湖忠勇山順向坡岩屑崩滑

榮華左岸順向坡坍方

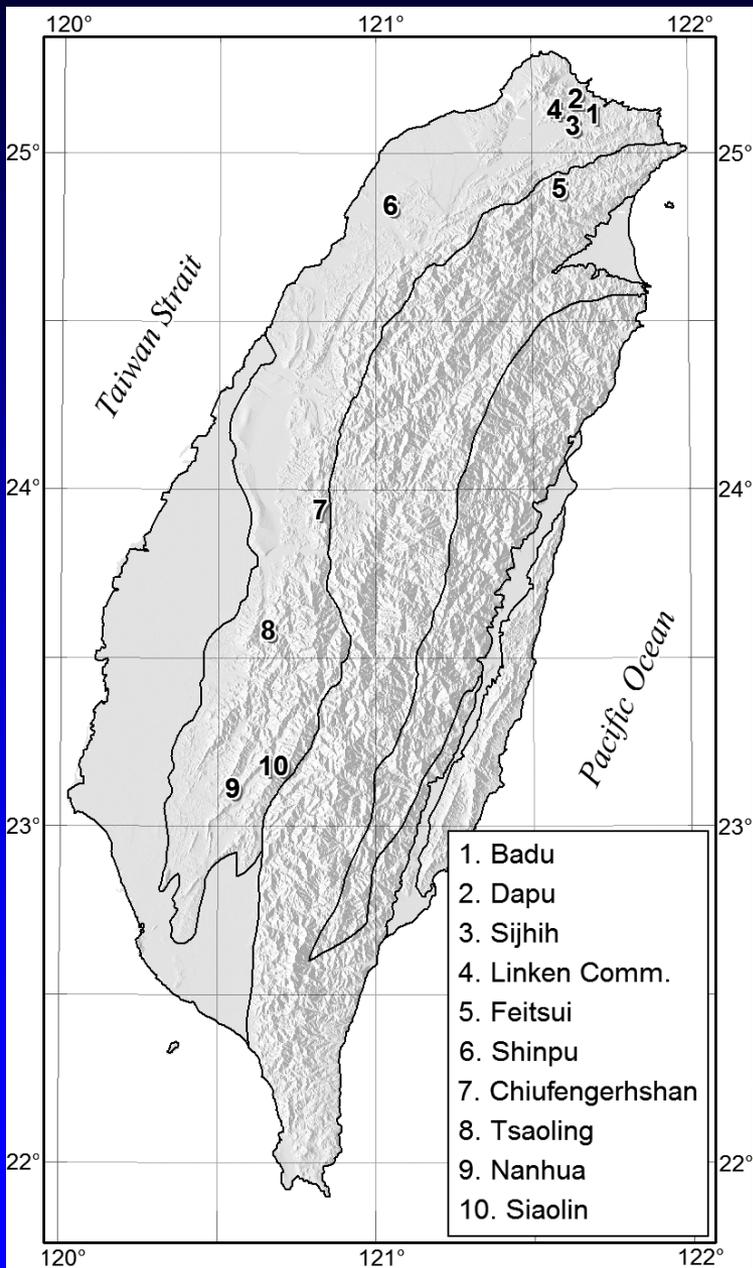


板岩與片岩地區的順向坡

- 山區的板岩及片岩也常形成順向坡。但板劈理或片理間不常有剪裂面存在，其安定性較沉積岩順向坡好很多。解壓節理及解壓縫隙僅存在於淺部且連續性不高，故安定性較不成問題。筆者曾在野外看到過板岩坡腳淺部鼓脹型滑動，且滑動體捲成圓球狀。



台灣的順向坡破壞案例



案例

| 案例 | 地層傾角 | 破壞模式 |
|--------------------|------|------|
| 1.八堵交流道1974順向坡滑動 | 24度 | 坡腳移除 |
| 2.國道三號2010大埔順向坡滑動 | 15度 | 坡腳移除 |
| 3.汐止收費站北1977順向坡滑動 | 25度 | 坡腳移除 |
| 4.1997林肯大郡順向坡滑動 | 23度 | 坡腳移除 |
| 5.翡翠大壩左岸順向坡 | 40度 | 坡腳鼓脹 |
| 6.1990新埔順向坡滑動 | 5度 | 坡腳移除 |
| 7.1999九份二山順向坡滑動 | 21度 | 坡腳剪壞 |
| 8.1999草嶺順向坡滑動 | 12度 | 坡腳移除 |
| 9.南化水庫右岸順向坡 | 29度 | 坡腳剪壞 |
| 10.2009小林村順向坡複合型滑動 | 25度 | 坡腳移除 |



順向坡的挑戰與對策

- 經驗上，**5度傾斜的順向坡就有滑動的記錄**。但順向坡並不可怕，翡翠拱壩左壩座就整個座落在順向坡上 (Fu et al., 1987)，完工二十六年來監測記錄全部正常。但是，順向坡卻還有許多失敗的案例，例如：2010年國道三號3.1K順向坡滑動，1977年國道一號汐止收費站東北側順向坡滑動，1974年八堵交流道順向坡滑動等。
- 它的工程挑戰是：1) **少部分工程師不知順向坡之存在**，2) **大多數人不知泥層之必然存在於順向坡岩層中**，3) **絕大多數人不知泥層延伸會那麼廣**，且不知斷層泥的敏感性。
- 除了**加強工程地質教育**外，工程界最需要做的事是：**工程開挖過程中詳實記錄開挖面地質**，以確保重要地質弱面沒有被忽略掉。地質圖比例尺宜為一百分之一，詳細測繪層間泥層的位置、延伸及含泥狀況。



斷層泥 1/2

- 斷層泥是一種**極高度壓密但未膠結的土壤**，其溼密度可高達2.6公克每立方公分，孔隙比可低至0.1；乾的狀況下外觀像泥岩，一旦受潮即快速軟化。活動斷層的斷層泥會含有蒙脫石，一般的斷層泥則較少含有膨脹性粘土。不過，**在不含膨脹性粘土的情況下，斷層泥受潮後也會回脹**；其自由回脹率可高達百分之三十五 (吳富洵，1993)，二次回脹更隨著過壓密比的增加而增加(林銘郎等人，2000)，回脹壓力可達十公斤每平方公分 (沈建志，1995)，最高達二十公斤每平方公分 (洪清琳，1996)。
- **回脹後強度大幅下降。**



斷層泥 2/2

- 因斷層泥困擾阻礙工程進度的代表性案例包括：木柵一號隧道、新莊機廠-樂生療養院等。**斷層泥並不可怕，怕的是設計者及施工者不知其敏感性**；剛挖出來的斷層泥硬如岩石，但解壓及受潮後很快地軟化，而且還會持續惡化；範圍越來越大，深度越來越深。
- 其解決之道還是首重**工程地質教育**，一旦設計者及施工者能瞭解斷層泥的敏感性，便容易針對它來做設計及施工。**其處置對策當然就是盡量不要去擾動它**；隧道開挖後隨即預襯，基礎開挖前預留保護層；邊坡開挖則須予避免，必要時應隨即圍束回去。

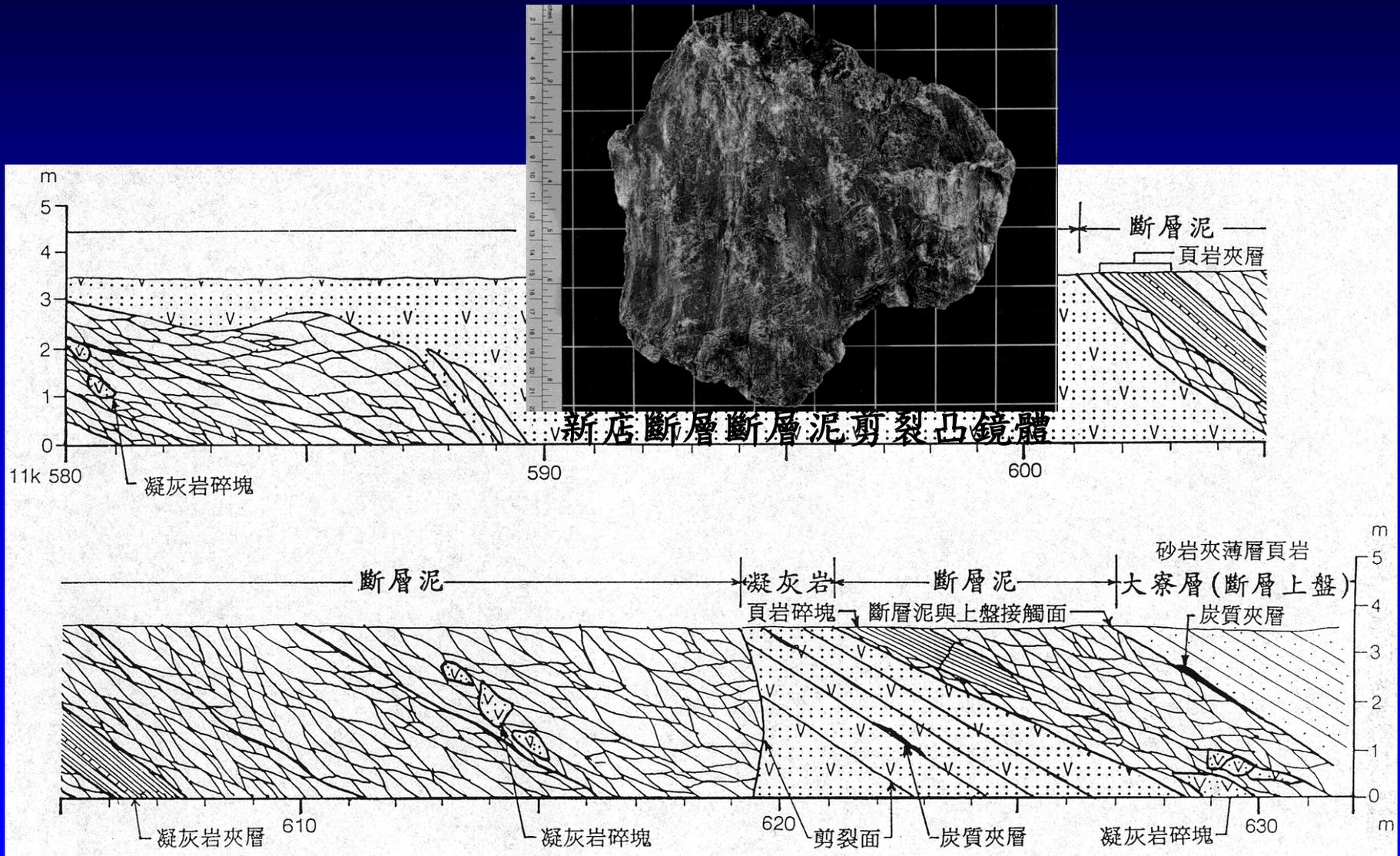


國道三號木柵一號隧道案例

- 國道三號木柵一號隧道北上線在里程11k500m~11k585m及在南下線在里程11k550m~ 11k635m貫穿新店斷層帶。根據開挖期間的觀察，斷層帶的水平寬度約80公尺，斷層泥佔四成，餘為破碎帶，若加上兩側的擾動帶則寬度可達一百公尺以上(吳富洵，1993)。
- 道開挖至斷層時，並未大量出水，僅在破碎帶略有零星的滴水現象，而斷層泥則呈乾燥狀，使現場人員未能在第一時間查覺到已開挖至斷層帶，及至筆者赴現場將岩塊攜至洞外，在陽光下仔細觀察後才能確認。經將斷層泥塊帶回實驗室試驗結果，首次瞭解了斷層泥的敏感特性，並建議設計及監造單位隨即預襯，但因無人能擔負失敗的風險而拖延數月，至變形量超過一公尺後始採取鋼性支撐抑止變形。



國道三號木柵一號隧道案例

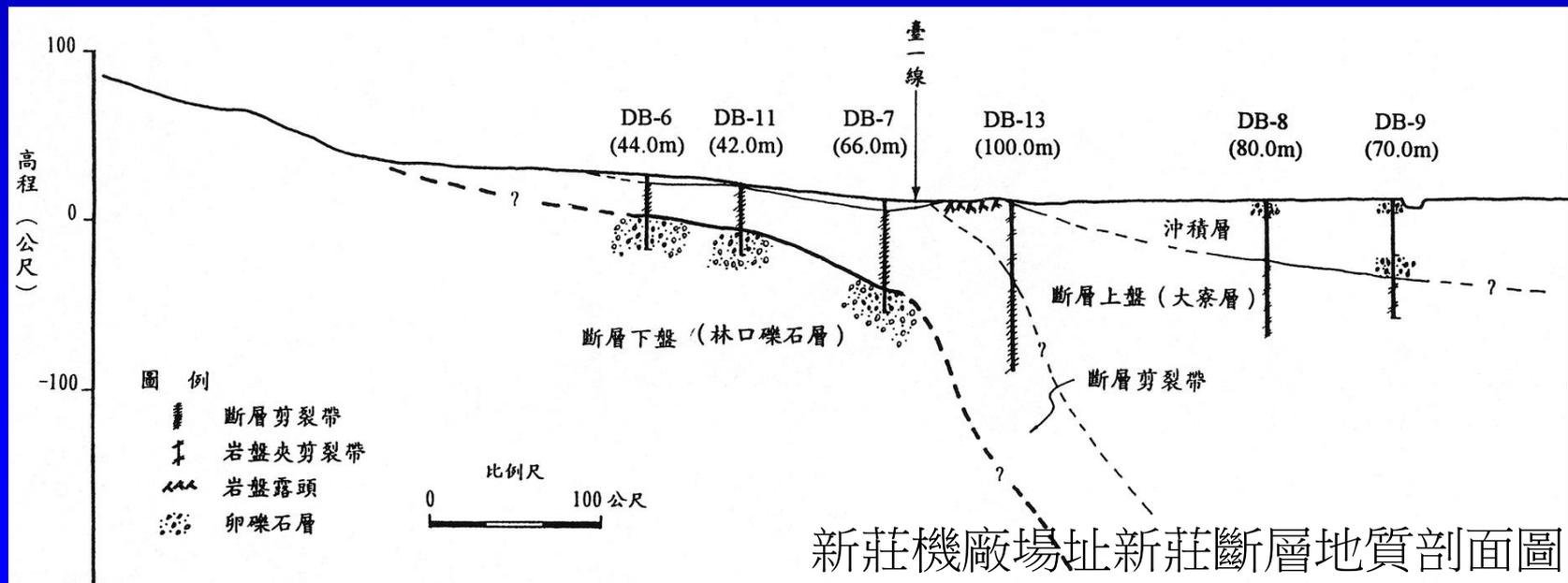


木柵一號隧道南下線新店斷層地質剖面



新莊機廠-樂生療養院案例

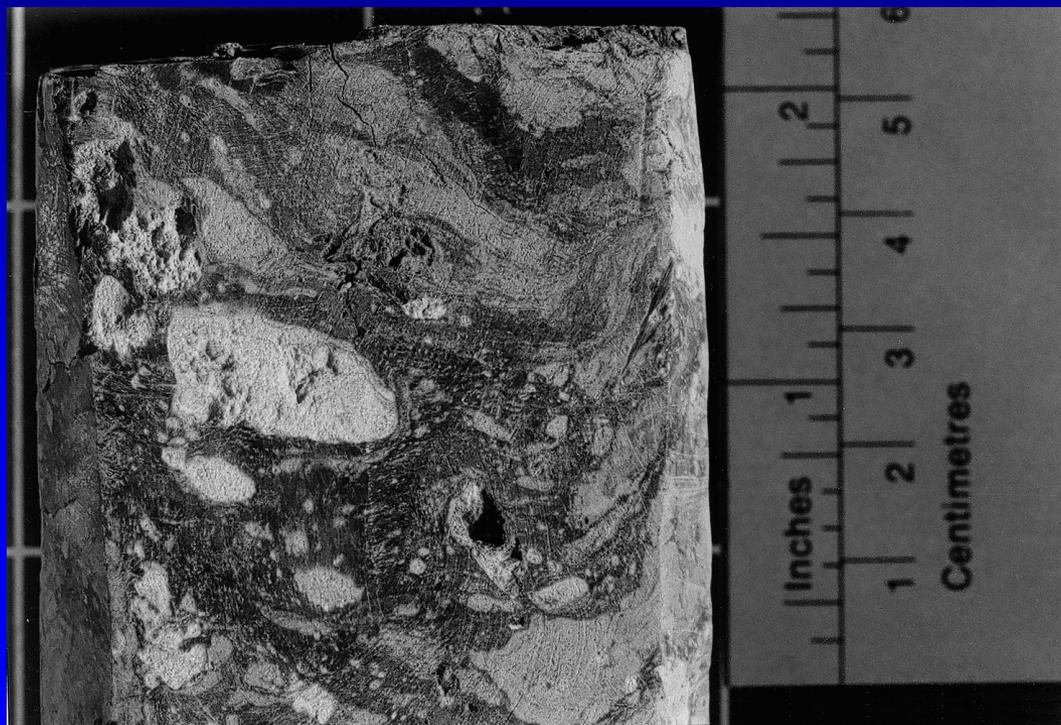
- 新莊機廠-樂生療養院的大地工程問題癥結在於新莊斷層。在新莊機廠規劃階段即瞭解場址有新莊斷層之存在，並積極進行了各項地質調查，調查結果之代表性地質剖面如圖5所示。斷層帶寬度約在40~90公尺，斷層傾角自東側之60度轉為場址內之15度，致其斷層帶地表水平寬度約達300公尺。斷層帶下伏未膠結之卵礫石層，呈受壓地下水層，估計壓力水頭高出地表15公尺(闕河淵等人，1996)。





新莊機廠-樂生療養院案例

- 在嶺頂的一處採土場有新莊斷層帶露出，可供觀察、採樣及研究 (劉俊杰，1993)。在關渡附近某大樓基地鑽探也曾鑽獲新莊斷層岩心 (劉俊杰，1993)，下圖斷層泥之近照，顯示斷層泥中常夾雜大小不一之岩石碎塊。



關渡附近新莊斷層鑽探岩心之斷層泥近照



新莊機廠-樂生療養院案例

- 原規劃考慮遷移樂生療養院並將山坡上的斷層泥全數挖除以永絕後患。後來因為療養院方面希望能盡量保留原有房舍，業主及設計單位也與之妥協，保留了大部分斷層帶上方的房舍，而在機廠與院舍間補強高邊坡因應。工程拖延十數年來，邊坡持續變形，且有惡化的趨勢。今年設計單位接受專家建議，部分改採明挖回填以減低坡高，並進一步圍束邊坡以穩住變形。
- 對於地下水壓的問題，國人已頗有處理經驗，在新莊機廠工地尚看不出有任何處理不足的情形。但對於斷層泥的問題，業主、設計及施工單位過去可能都未了解到斷層泥解壓、吸水、膨脹、弱化等一系列的可能變化，致未及早將整個邊坡圍束起來，使之能穩住而不再變形。希望今年專家的建議能被確實執行而還來得及穩住邊坡。



台灣的板岩層

- 板岩是一種高度方向性的泥質岩類，具有間距極密的劈理；它是一種潛在的弱面，一旦受擾動即成薄片狀而容易產生撓曲(flexuring)現象。板岩層(slate formation)約佔台灣本島三分之一或山地之一半面積，若將性質相近的片岩也算進去則比例更大。由於位處深山且其岩性單調，地質調查不易，地質師也大多不知如何調查，拿不出關鍵資料，誤導工程設計而造成工程上重大的挑戰。
- 板岩層的關鍵問題就是板岩受重力作用會產生撓曲的現象。台灣的板岩層具有一定的區域位態(都呈高角度傾斜)，但在許多山坡上板岩大多已經產生撓曲或重力變形 (gravity deformation)，劈理變為低角度傾斜。這一種重力變形是持續存在的，且會在豪大雨期間呈現加速情形。



台灣的板岩層



大雪山林道邊坡所見之板岩重力變形



台灣的板岩層



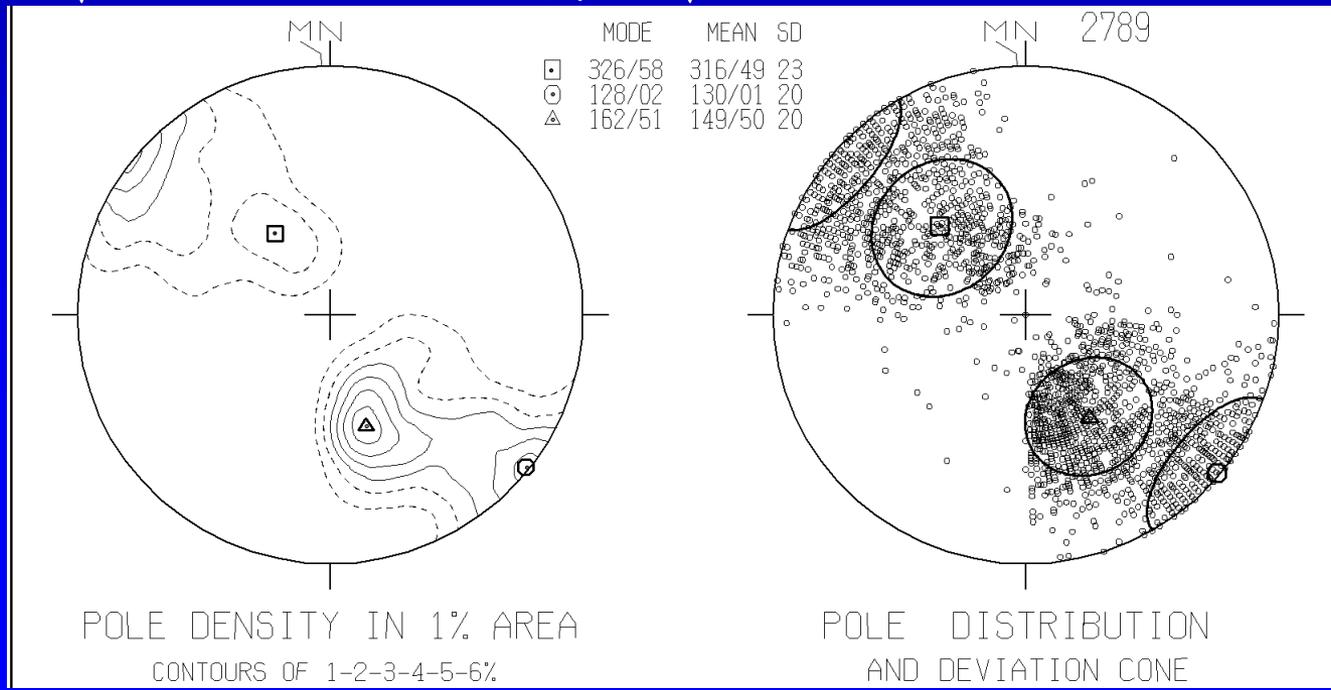
大甲溪北岸佳陽河階旁
支流之板岩重力變形

武陵農場南方產業道路
邊坡之板岩重力變形



台灣的板岩層

- 邱坤豪(1999)調查德基至梨山地區劈理位態並進行統計分析，確認在大甲溪河岸(德基水庫蓄水前資料，顏滄波先生提供)及各主要支流兩側露出之板岩均呈新鮮狀且未受擾動，其劈理位態相當一致，集中在 $N38^{\circ}E/88^{\circ}NW$ ，而在中部橫貫公路邊坡所見之劈理多呈低角度傾斜，且位態頗為混亂。但統計分析結果顯示這一些位態較為混亂的劈理出現兩處集中眼：一在 $N56^{\circ}E/32^{\circ}SE$ ，另一在 $N72^{\circ}E/39^{\circ}NW$ 。

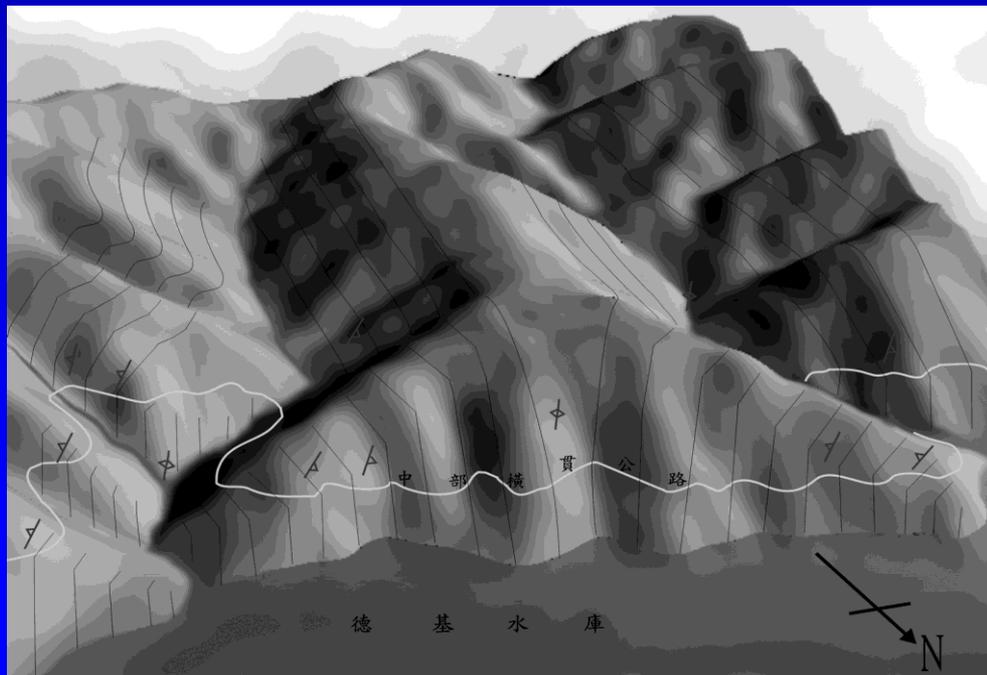


德基至梨山地區
劈理位態統計分
析成果圖



台灣的板岩層

- 進一步與坡向比對結果發現，東南向傾斜的劈理出現在西北向山坡，而西北向傾斜的劈理出現在東南向山坡。這說明了原始高角度傾斜的劈理在西北向山坡發生了向下坡方向的彎折變形，使劈理轉變為向東南低角度傾斜；在東南向山坡也發生了向下坡方向的彎折變形，使劈理轉變為向西北低角度傾斜。此種大規模山坡重力變形現象在世界各大山脈及台灣山區都極為普遍，只是台灣過去大都不太瞭解此問題。



德基至梨山地區劈理位態分布示意圖



台灣的板岩層

- 山坡重力變形及劈理彎折之現象，並不會有立即的滑動威脅。以筆者早年在板岩層區的許多野外觀察經驗，山坡重力變形現象之發展大概可以區分為以下兩個主要階段：**早期主要是單純的彎折現象**，除彎折軸部外沒有太多新的裂理出現，且岩石也沒有特別風化，故不會有立即的滑動威脅。**晚期則整個岩體變得風化破碎，強度降低，有發生滑動之虞**。中部橫貫公路佳陽路段，近四十年來不時有路基下陷的問題，即與晚期重力變形有關。



台灣的板岩層

- 重力變形的深度與岩性有關，若板岩夾有過半的砂岩時，其變形深度通常在十數公尺以內；若為純板岩時，其變形深度可達百公尺或更深。此深度估計可從德基壩的相關地質資料得到印證，即在壩區山坡以石英岩為主的達見砂岩，其彎折軸深度約十餘公尺以內；在壩址上游的板岩層內，其彎折軸與地表水平距離達百公尺(由橫坑所見)，且其軸部範圍較大而不似以砂岩為主的急轉軸。筆者推論以砂岩為主的重力變形不易發展至晚期(因為沒有見過)，純板岩則相對較易發展至晚期(因為案例很多)。



台灣的板岩層

- 廬山溫泉北坡的山坡穩定近兩年成為國內的熱門議題，內政部擔心發生大規模山崩而擬廢除現有的廬山溫泉都市計畫，並積極辦理遷村中。實際上廬山溫泉北坡可能只是板岩的重力變形現象，而其發展僅在早期，不會有立即的滑動威脅。隨有局部之淺層滑動發生，但整體上還是屬於重力變形現象，它可能會像霧社水庫右山脊一樣持續數十年以上的變形，但尚不致發生巨變式山崩。



台灣的板岩層

- 板岩層區的工程地質調查重點在於劈理位態調查。調查結果若顯示任一點的劈理位態偏離區域位態，則該點若非受活動斷層擾動則為重力擾動，重力變形區能很容易從劈理位態分布圖中被圈繪出來。板岩層中的工程明挖及地下開挖過程中也容易出現板岩撓曲現象，特別是在開挖面傾向與劈理面傾向相逆處，這些地點可以即時施作岩釘而獲得改善。



結語

- 台灣是一個活動造山帶，山高水深，地質構造複雜而地形變動快速，形成許多不同類別的困難地質條件與地質災害，例如斷層帶、順向坡、崩塌地、山坡潛移區、向源侵蝕區、卡斯特地區、舊礦坑、含瓦斯地層、火山硫氣區、地熱區、軟弱地層等。其中更以**順向坡**、**斷層泥**及**板岩層**等三種在台灣最為獨特。
- **順向坡**獨特在多而危險，且我們常忽略**其中必有泥層存在**而致設計不足。
- **斷層泥**獨特在台灣**的斷層泥以未膠結者為多**，其密度雖大，但很容易因**解壓而吸水軟化且膨脹變形**。
- **板岩層**只獨特在台灣人大多不知板岩層區普遍的**重力變形**現象。
- ★ 當我們得知這一些獨特的特性之後，工程師很容易在設計及施工上做特殊的考量及適切的因應。



Thanks for your attention!

謝謝