

## 第四章 大地工程震害調查

### 4.1 前言

國家地震工程研究中心為進行九二一地震全面性勘災調查，邀集各相關系所師生及單位人員參與勘災調查工作，其中大地工程震災調查組依照地震引致災害之不同類別分為土壤液化與地層下陷、基礎破壞以及坡地破壞等三個分項分別進行調查，詳細調查報告請參考文獻[3.1]。但由於結構物之基礎均埋在地下，再加上許多毀損建築物之基礎均是埋在瓦礫當中，無法目測檢視，故有關基礎破壞之部分尤其是隱蔽部分之基礎破壞情形已於第一階段調查結束後，進行第二階段之補充調查，因此於本檢討報告暫不討論基礎破壞之震害調查。

### 4.2 震害概述

以下分別就此次地震引致大地工程中之土壤液化與地層下陷以及坡地破壞震害分別進行震害概述。

#### 4.2.1 土壤液化與地層下陷震害概述

921 集集大地震各地之震度甚大(意即地表 PGA 值甚大)而且延時亦長(大於 30 秒)故引起多處土壤液化現象，尤其是靠近水系沖積之砂質土壤其液化現象更是顯著。土壤液化不但因水壓力增加而造成噴砂而且使土壤失去承載強度造成側向流動致地層下陷，許多建築物及各種工程設施因而受損。土壤液化引致之震害現象有(1) 房屋倒塌、傾斜、下陷、地板開裂隆起、側移等損害。(2) 橋墩傾斜、位移及橋面破壞。(3) 堤防、檔土牆的崩塌與傾覆。(4) 道路與農田之開裂、塌陷及平移等。本次土壤液化與地層下陷震害調查結果發生前述破壞之震害區域包括台中縣太平、霧峰、大肚；彰化縣伸港、大村、員林、社頭、彰濱近期回填區；南投縣草屯、南投市、埔里以及雲林縣斗六、古坑、斗南等地。若將這些震害地點位置套繪於地形圖上，如圖 3.1 所示，並將東西向之地表 PGA 值套繪結果如圖 3.2 所示。由圖 3.1 與圖 3.2 之套繪結果可看出液化震害位置均發生在水系沖積之砂質土壤且地表 PGA 值達到某一種程度後才會發生土壤液化，西部沿海之土層較斷層附近之土層較易液化，其 PGA 值不需要很大即可達到液化之條件而

斷層附近之土層則需較大之 PGA 值才能達到液化發生之條件。

#### 4.2.2 坡地破壞震害概述

921 大地震之坡地破壞經調查統計整理其發生坡地破壞位置之分佈如圖 3.3 所示，坡地破壞之分佈範圍由苗栗向南直到嘉義，若同時將本次之車籠埔斷層及東西向地震 PGA 值套繪如圖 3.4 所示，由圖 3.3 及圖 3.4 可看出發生坡地破壞處皆發生於山脈經水流切割地形上坡度較陡且地表 PGA 值較高之地方。但因調查對象主要是沿山區道路進行調查，基本上即是沿著水系進行調查，故有關發生坡地破壞之處指的是業已經過詳細調查的部分，並非意味著所有發生坡地破壞的震災點只有這些而已。

### 4.3 震害原因探討

以下分別就此次地震引致大地工程中土壤液化與地層下陷以及坡地破壞原因分別進行探討。

#### 4.3.1 土壤液化與地層下陷震害探討

一般而言某一場址之液化發生之可能性以其對發生液化之感受度 (susceptibility) 來進行評估。藉由場址內之土壤型態與地質條件，液化感受度 (susceptibility) 可典型地區分為五級：非常高、高、中度、低、非常低。Youd 與 Perkins[3.2] 曾藉由場址之沈積過程與其地質年代，提供了一種液化感受度之評估法則。藉由 Liao, Veneziano 與 Whiteman[3.3] 等人之研究工作，與 National Institute of Building Sciences(NIBS)[3.4] 之修正，ATC-40[3.5] 針對各液化感受度區域，建議了導致液化現象的地表搖晃水準，如表 3.1 所示，並以等效加速度峰值(EPA)表示(EPA 值係 5% 阻尼彈性反應譜於等加速度段之平均譜值除以 2.5 所得之值)其中。可能(possible)液化的 EPA 值表示當地表運動等效加速度值達該水準時，有 15% 或更高的液化發生機率，而近似(likely)液化的 EPA 值表示當地表運動等效加速度值達該水準時，有 50% 或更高的液化發生機率。因此，若該場址的不同迴歸期之設計地表振動水準(地震危害度)超過此 EPA 值，則於工程設計時必須考量防範地震引致之液化現象。

反過來說，利用這次液化震害之實例以及各場址上之 PGA 值，我們將各場址之液化感受度進行分類，例如：西部沿海地區其液化感受度必

然較高，因此不需要很高之地表 PGA 值即可達到液化，反觀斷層附近之土壤則需較高之 PGA 值方能達到液化，故其液化感受度較低，若能將上述液化點進行土壤鑽探，則往後碰到類似之土壤條件即可判定其液化感受度之高低，若進一步配合地震危害度之分析即可評估其發生液化之風險，若風險相當高則於設計時必須考量防範液化所引致之結構破壞。前述之液化感受度亦與土壤沉積年代有關，故本檢討報告亦將地質圖套繪如圖 3.5 所示。

液化感受度	EPA (g)	
	可能 (15%)	近似 (50%)
非常高	必然發生	0.15
高	0.15	0.2
中度	0.2	0.3
低	0.4	不必考慮
非常低	不必考慮	不必考慮

表 3.1 導致液化現象之地表搖晃標準(參考文獻[3.5])

#### 4.3.2 坡地破壞震害探討

事實上當斜坡上之滑塊質量因地震作用與重力作用而超過坡度穩定性時，將引致坡地破壞而導致地基失效，並使結構基礎破壞。開始引發坡度不穩定的最低地表加速度稱之為臨界加速度，取決於場址之坡度以及土壤與地質條件。

藉由 Wilson 與 Keefer[3.6]之研究工作，以及 National Institute of Building Sciences(NIBS)[3.4]之修正，ATC-40[3.5]針對各坡度與土壤地質條件，建議了可能(25%或更高的發生機率)引致坡地破壞的 EPA 值如表 3.2 所示，若該場址的不同迴歸期之設計地表振動(地震危害度)超過此 EPA 值，則必須考量防範地震引致之坡地破壞現象。

若能利用這次坡地破壞實例之坡度條件以及各場址上之 PGA 值，則可統計出某種坡度條件下要發生坡地破壞之臨界加速度值，若進一步配合地震危害度之分析及場址坡度及地質條件即可評估其發生坡地破壞之風險，若風險相當高則於設計時必須考量防範坡地滑落所引致之結構破壞。前述之坡地破壞與地質條件有關，故本檢討報告亦將地質圖套繪如圖 3.6 所示。

Geological Group	EPA (g) at slope angles (25%)						
	0°-5°	5°-10°	10°-15°	15°-25°	25°-35°	35°-45°	>45°
<b>Dry conditions (Groundwater below level of slope)</b>							
Strongly cemented rock (Crystalline rock and well-cemented sandstone)	None	None	None	0.7	0.5	0.3	Any
Weakly cemented rock and soil (sandy soils and poorly cemented sandstone)	None	None	0.5	0.4	0.2	0.1	Any
Argillaceous rock (shale, clayey soil, existing landslides, poorly compacted fills)	None	0.3	0.2	0.1	Any	Any	Any
<b>Wet conditions (Groundwater level at ground surface)</b>							
Strongly cemented rock (Crystalline rock and well-cemented sandstone)	None	None	0.5	0.4	0.2	0.1	Any
Weakly cemented rock and soil (sandy soils and poorly cemented sandstone)	None	0.3	0.2	0.1	Any	Any	Any
Argillaceous rock (shale, clayey soil, existing landslides, poorly compacted fills)	None	0.1	Any	Any	Any	Any	Any

表 3.2 導致坡地破壞之地表搖晃標準(參考文獻[3.5])

## 4.4 檢討與建議

1. 配合 Haz-Taiwan 軟體與工址之土壤地質、坡度條件資料庫，以及本次震害實例，我們可以獲得本土化之脆弱曲線參數，進而可更準確的進行液化及坡地破壞之風險評估與損失估計，同時可作為防救災策略之依據。
2. 有關大地工程之設計規範，雖然目前已由大地工程學會訂定新的設計規範，提供工程界在進行有關大地工程設計時之依據，但新規範並未包含耐震設計。於此建議宜藉由本次震害事例適度重新檢討該規範，使得未來在降低基礎受震破壞與土壤液化之影響方面，對於不同震區之結構物，其結構-土壤互制與基礎抗液化之耐震設計能有所加強。
3. 政府有責任讓民眾瞭解其所處場址之液化及坡地破壞之風險性，故有關液化潛勢及坡地破壞潛勢圖之研究與繪製宜加速進行推動。
4. 因坡地破壞立即影響交通或威脅居民生命財產損失，因此若發生坡地破壞應儘速清除路面及邊坡上之堆積土石，同時加強擋土設施及邊坡穩動的工作，並做好水土保持的工作，避免裸坡受雨水等侵蝕而再次崩落。對於大量之土石崩落，應考量對邊坡加強保護，可先將危岩剝除並以噴漿處理，或採取削坡、型框植生等處理方法。

堆積於溪中之土石宜儘速清理，以防豪雨後造成之河川土砂災害，道路路基毀損者，需注意路基承載力因地震力後土石極為鬆動，需確實夯實補強。至於邊坡或道路修復困難或將來極有可能產生重大坍方危及居民安全處，則建議居民搬遷或將道路改道。此外，深山中之大量土石崩落，並無直接災害，但應考量大量之土石是否可能造成二次災害，如土石流，或礫石堆積河道而影響下游輸砂平衡。針對坡地災害之重建對策，分別依短、中、長程提出下列初步建議。

短期初步建議：

- (1) 多數破壞之坡地，目前地表裸露、土石鬆散，即易受豪雨沖刷或餘震再度引起土石坍滑，故對於裸露之邊坡，應儘速以植生或其他簡易工法加以保護。
- (2) 落石破壞在本次邊坡破壞中，佔相當大之比例，且多處落石坡對於道路交通與安全造成重大影響。對於此類落石坡，建議對於邊坡存留之危岩，儘速加以剝除，較小規模之落石坡則可考慮以掛網噴漿方式加以保護。
- (3) 目前坡地多處仍持續崩落，公路養護單位亦持續清理路面中，惟目前已有大量崩落土石堆積於道路下邊坡，未加已處理。由於崩落土石相當鬆散，仍可能由下邊坡再度向下崩落而造成災害，故對於堆積之崩落土石宜儘速加以清運。

中期初步建議：

- (1) 較大規模落石坡道路可以明隧道，落石棚方式加以保護。
- (2) 對道路造成重大影響之邊坡，應考慮加以修坡或以其他工程方法加以保護，以使其穩定。
- (3) 部分山區邊坡目前雖無立即危險，但中程仍宜加以檢討，並加強水土保持工作。

長期初步建議：

- (1) 對於可能長期造成災害及不易維護之道路邊坡應考慮局部改線已徹底改善道路邊坡狀況。
  - (2) 山區邊坡對於居民造成影響而難以改善者，應考慮加以遷村。
5. 對於因土壤液化與地層下陷而導致受損建物的處置應依各建物受損狀況由專業技師負責進行修復補強工作。一般如果結構受嚴重破壞，則必須拆除，如果主要結構沒有損傷，可將傾斜下陷之建物以灌漿、托底及基地土壤改良等方法加以扶正、抬高及補強。如修復費用太高，則可考慮拆除重建。將來應經由地質鑽探、調查及分析，劃定可能液化地區並經由 921 地震液化案例所得數據，訂定土壤液化評估準則，以修訂規範。對可能發生液化地區之新建工程，對土壤液化及其災害之防治，在設計及施工時應有充足的考量與對策，如基地土壤之改良或使用深基礎等。921 集集大地震在台中縣、南投縣、彰化縣和雲林縣等地，共有十三個鄉鎮傳出土壤液化的災情，而針對上述地區液化復發潛能，國科會正在評估當中。對液化復發潛能高之危險地區建議以土壤改良的方式，降低液化復發之潛能，使該地區能回復『適合再居住區』。

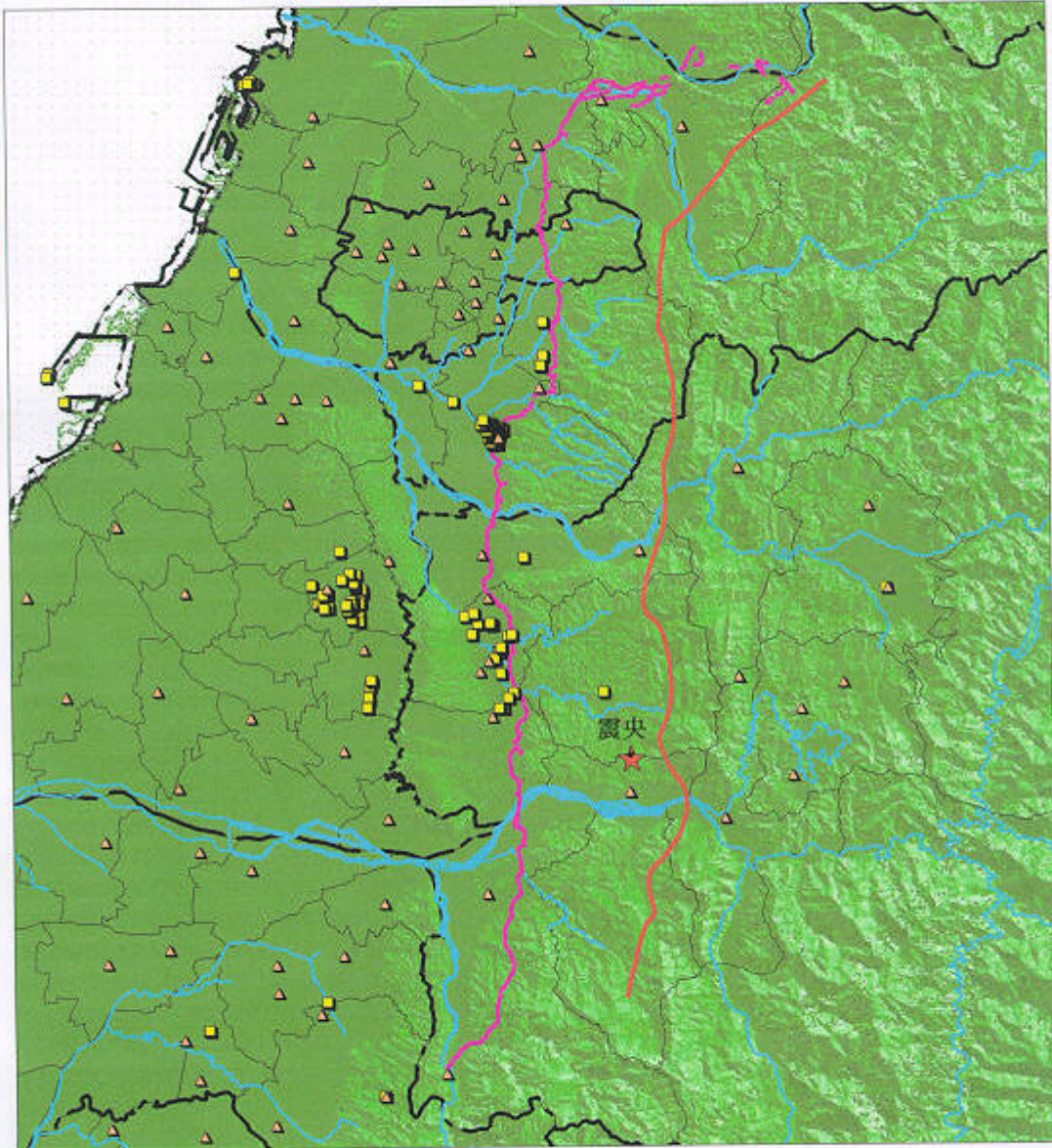
由於樁基礎在抵抗土壤液化之表現相當良好，故可考慮在結構物基礎打設基樁或進行土壤改良工作。土壤改良之幾種可行性較高之施工方法有：

- (1) 灌漿固化工法  
為避免地下水位下砂土在地震時，產生液化現象，可藉由土壤灌漿方式，將土壤的孔隙，局部或全部以固態之灌漿材料填充，如此始可減低或是消除砂土液化之可能性。
  - (2) 以排水樁消散孔隙水措施  
打設礫石樁或是排水管道液化潛能高之土壤中，以提供地震激發之孔隙水壓力之排除，將能減少砂土液化之可能性。
  - (3) 基礎托底  
土壤液化後，土壤瞬時失去承載力，造成建築物之沈陷和傾斜情形，也可直接以基礎托底的方式來處理，利用小口徑基樁撐住建物基礎可提供上部結構支承力，避免建築物傾斜或是沈陷。
6. 由於基礎之破壞多以局部個案為主，因此有關基礎受損部分之修補工作，宜以復健方式進行。由本次震災調查所歸納出之基礎震災類型，可對爾後復健和重建之設計和施工方法的選用，提出以下原則性之建議。
- (1) 復健(修復、補強)之安全基準應加以研選
    - a. 基礎復健之耐震安全標準與上部結構一致性之檢討
    - b. 基礎復健之耐震安全標準與符合新訂耐震規定之可行性評析
  - (2) 復健之設計原則
    - a. 基礎復健方法及施工過程應不得使結構物損害程度加劇
    - b. 全面檢討所採復健方式之經濟性、可靠性、耐久性、及施工可行性
  - (3) 復健之施工方法
    - a. 基礎結構損害與基礎地層破壞(液化、滑動、錯動後沈陷)之處置對策應明確釐清，以利研訂施工重點及方向
    - b. 依基礎損害原因、破壞型態研選施工方法
    - c. 基礎結構修補及基礎地層強化可相互為用
  - (4) 重建之設計方針
    - a. 審慎考量斷層錯動帶之地層錯動效應對基礎安全之影響
    - b. 依新訂之耐震設計規範設計基礎結構及強化基礎地層耐震強度
7. 本次震災中擋土牆之倒塌與當時用來設計分析之地震力係數不夠有關。另外，有些擋土牆之傾倒破壞係因牆後土壤液化而將擋土牆推倒。未來重建時，應考量提高震災區之擋土牆的設計地震力。但在提高設計地震力後，所需配合執行之擋土牆措施加強和安全監測系統之設置等，亦是待解決的課題。

## 參考文獻

- [3.1] 國家地震工程研究中心 (1999) , 「921 集集大地震大地工程震害調查報告」 .
- [3.2] Youd, T. L. and D. M. Perkins (1978). ‘ Mapping of liquefaction-induced ground failure potential’ *J. Geotechnical Engng. Div.*, ASCE, 104(4), 433-446.
- [3.3] Liao, S. S., D. Veneziano, and R. V. Whiteman (1988). ‘ Regression models for evaluating liquefaction probability,’ *J. Geotechnical Engng. Div.*, ASCE, 114(4), 389-411.
- [3.4] NIBS (1996) *Development of a Standardized Earthquake Loss Estimation Methodology*, 100% draft technical manual, Prepared by RMS, Inc., for the National Institute of Building Science/Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C..
- [3.5] ATC-40 (1996), *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Vol. 1 by Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [3.6] Wilson, R. C. and D. K. Keefer (1985). ‘ Predicted Areal Limits of Earthquake-induced Landsliding,’ in *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region*, United States Geological Survey Professional Paper 1360, J. I. Ziony, ed. 317-493.

# 九二一大地震土壤液化區域分佈圖

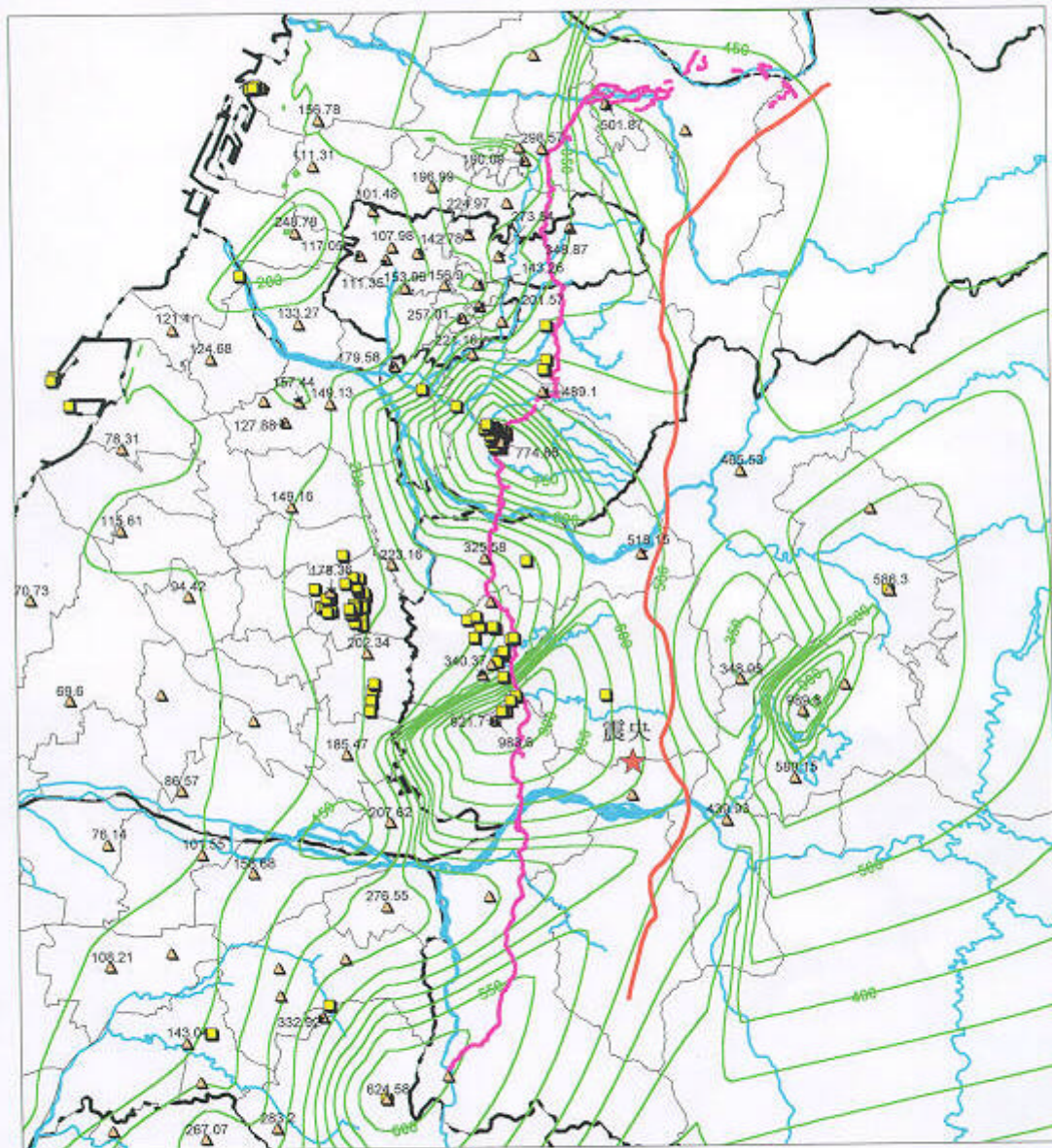


SCALE = 1 :412,000

- |          |         |
|----------|---------|
| ■ 土壤液化區域 | — 雙冬斷層  |
| ▲ 地震測站   | — 車籠埔斷層 |
| ★ 震央     | — 縣市界   |
| — 河流     | — 鄉鎮界   |

圖 3.1 土壤液化災害分布與地形圖

# 九二一大地震土壤液化區域分佈圖

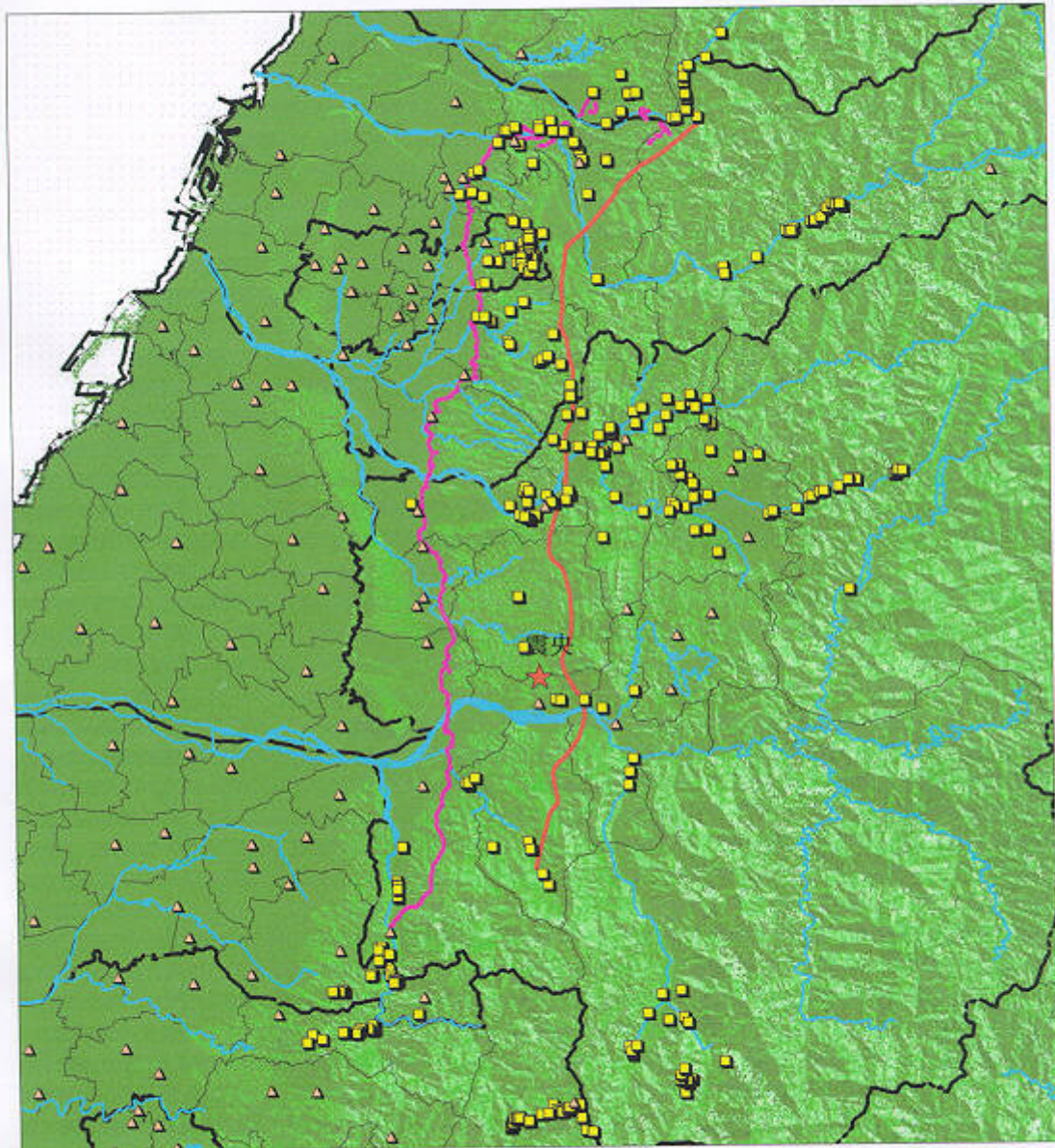


SCALE = 1 : 412,000

- PGA\_EW等值線
- 雙冬斷層
- 車籠埔斷層
- 縣市界
- 鄉鎮界
- 土壤液化區域
- ▲ 地震測站
- ★ 震央
- 河流

圖 3.2 土壤液化災害分布與東西向最大地表加速度關係圖

# 九二一大地震坡地災害區域分佈圖



SCALE = 1 : 500,000

- 坡地災害區域
- ▲ 地震測站
- ★ 震央
- 河流
- 雙冬斷層
- 車籠埔斷層
- 縣市界
- 鄉鎮界

圖 3.3 坡地破壞分布與地形圖

# 九二一大地震坡地災害區域分佈圖

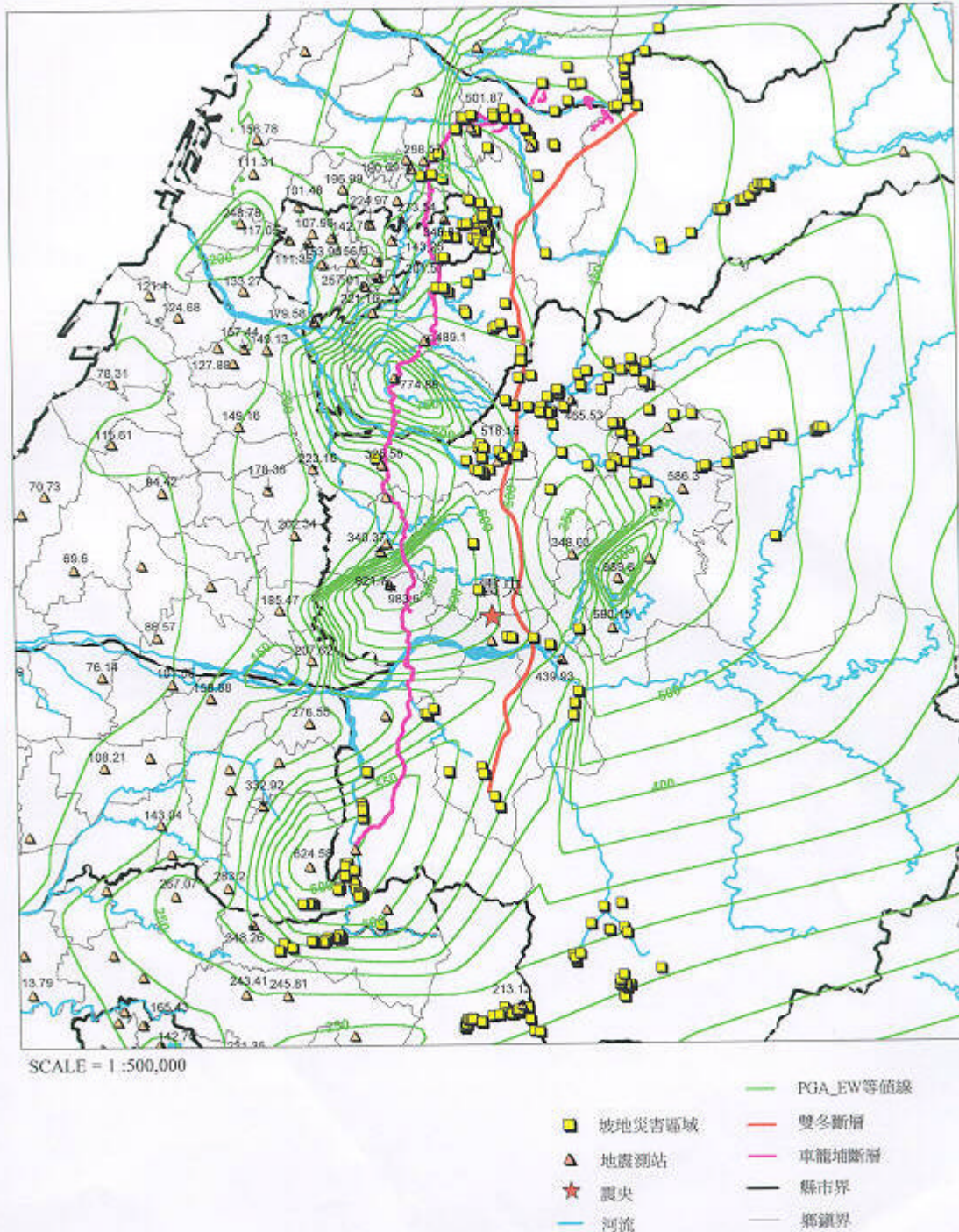


圖 3.4 坡地破壞分布與東西向最大地表加速度關係圖

# 九二一大地震土壤液化區域分佈圖

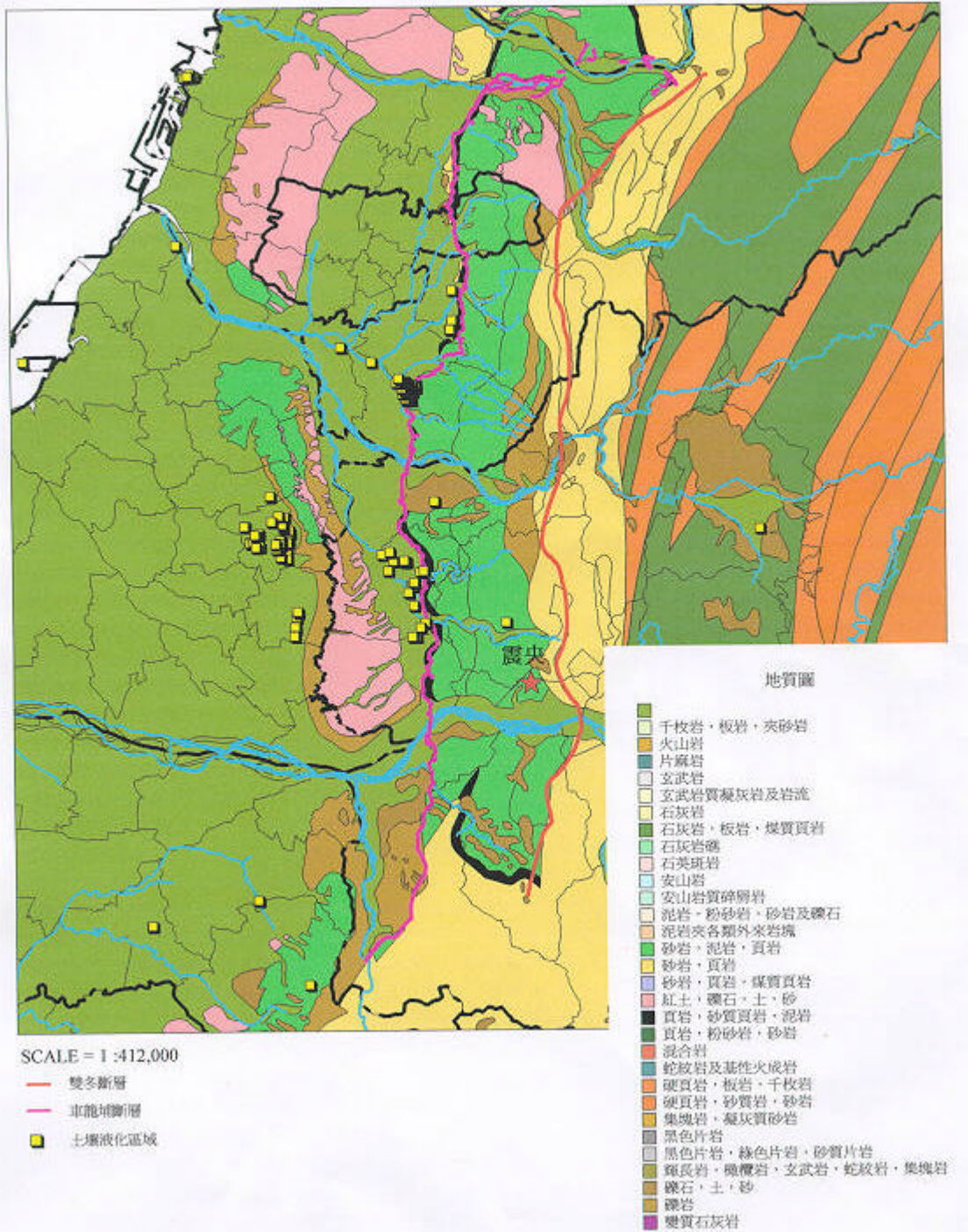


圖 3.5 土壤液化災害分布與地質圖

# 九二一大地震坡地災害區域分佈圖

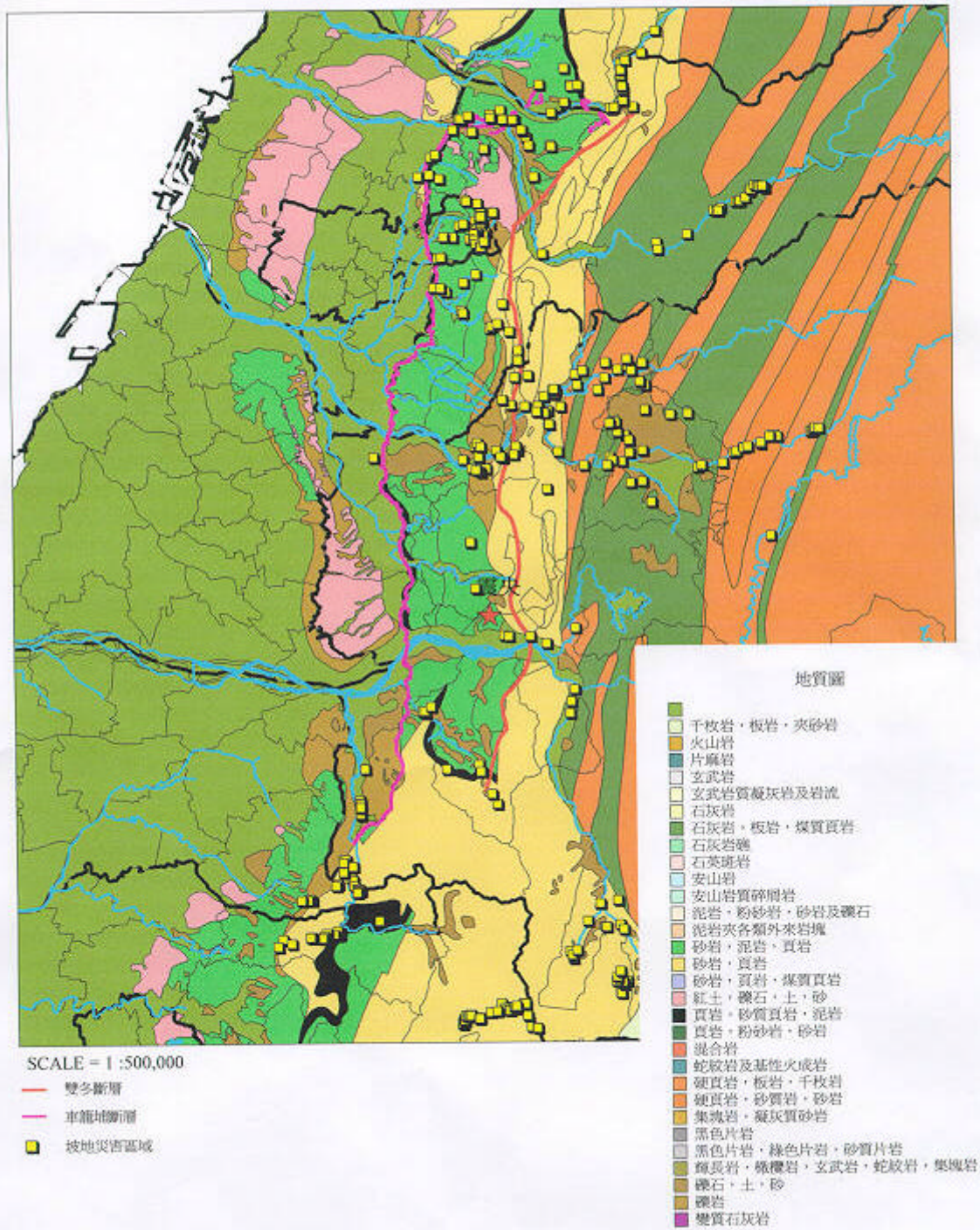


圖 3.6 坡地破壞分布與地質圖