

地震引致崩塌之易損性曲線建立及其應用

研究團隊：謝孟勳、李秉乾、林正紋
報 告 人：謝孟勳博士

中華民國108年8月27日

逢甲大學
Feng Chia University

壹、前言

- 臺灣山坡地約佔74%，易因天然營力造成災害。
- 坡地災害管理中，減災與警戒是管理部門重要課題。

崩塌的潛因

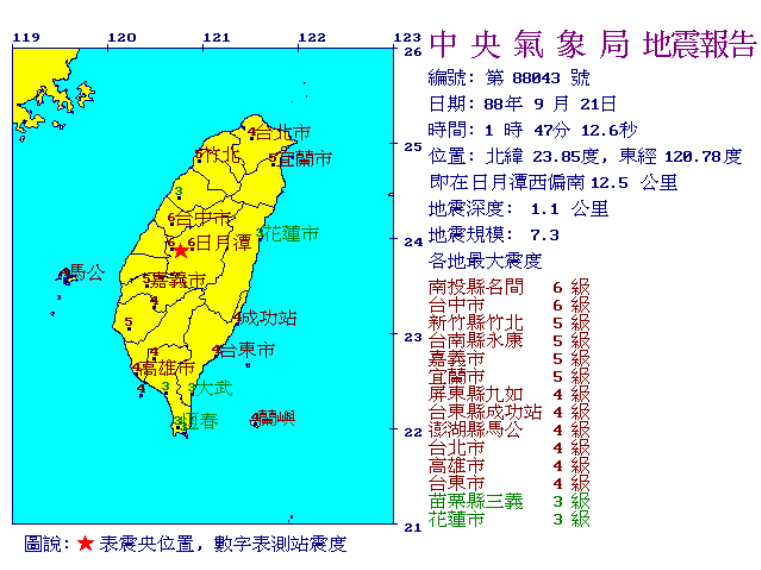


崩塌的誘因



壹、前言

■ 在菲律賓海板塊和歐亞大陸板塊交界處的課題







Feng Chia University

壹、前言

■ 地震vs降雨

地震災害具不可預測性
因此早期評估相當重要

地震事件

地震事件於震後
30秒完成定位

30分鐘

時間短

災害發生

無預警

地震災害早期評估

颱風、豪雨具災害可預測性
警戒模式相當重要

颱風、豪雨
事件

充裕時間可
預測降雨及推估雨量

時間長

警戒與災害評估

災前
應變

災害發生

逢甲大學 Feng Chia University

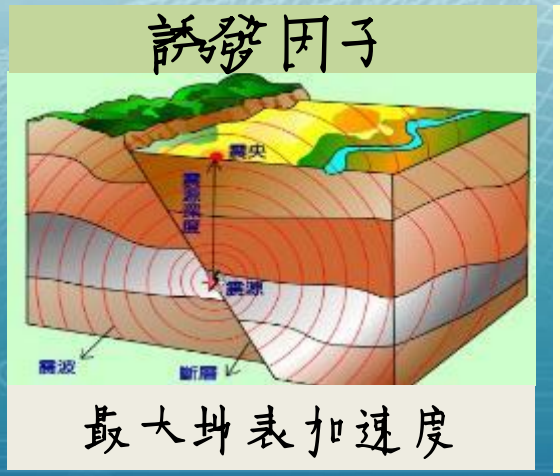
貳、易損性分析理論

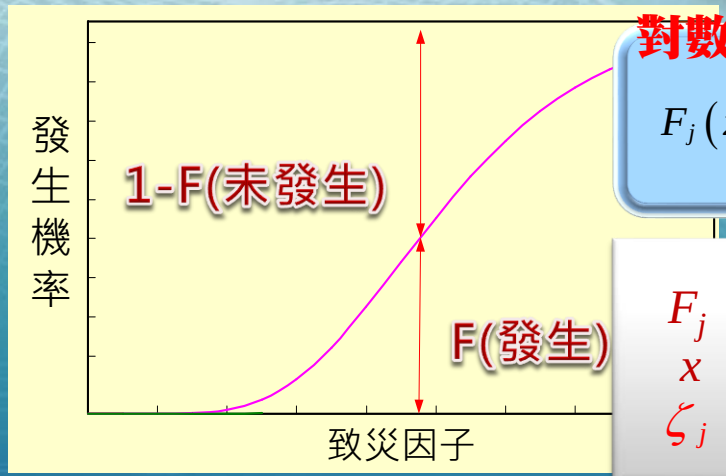
■ 易損性分析(Fragility Analysis)

- 表達致災誘發因子對事件(坡地崩塌、建物倒塌)發生的可能性關係。
- 為地震因子(尖峰地表加速度，PGA)—災害事件發生機率之評估模式。

■ 求取方式

- 以某一連續變因為自變數，如地震力(PGA)，致災目標物(坡地或建物)的致災機率為因變數之曲線，即災害發生的可能性。
- 建立累積機率分布，由估計易損性參數，推估災害事件最可能發生機率。





對數常態分布

$$F_j(x;c_j,\zeta_j)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}erf\left[\frac{\ln(x/c_j)}{\zeta_j\sqrt{2}}\right]$$

F_j ：災害發生的致災機率
x ：誘發因子　C_j：中位數
ζ_j ：標準差　erf：高斯函數

貳、易損性分析理論

■ 易損性分析理論

■ 在第k個集群內 X 次試驗中發生之次數被表示為x_k，其概似函數：

二項分布型

概似函數

K_g:所有事件資料; x_k:崩塌發生資料

$$L_j^B(c_j,\zeta_j)=\prod_{k=1}^{K_g}\binom{X}{x_k}[F_j]^{x_k}[1-F_j]^{X-x_k}$$

估計所有事件　發生機率　未發生機率

最大概似求解

多項分布型

概似函數

$$L^M(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j)=\prod_{k=1}^{K_g}\binom{X}{x_{k0},x_{k1},\cdots,x_{kj}}\prod_{j=0}^{J}[P_j]^{x_{kj}}$$

逢甲大學 Feng Chia University

貳、易損性分析理論

■ 坡地崩塌之易損性分析流程

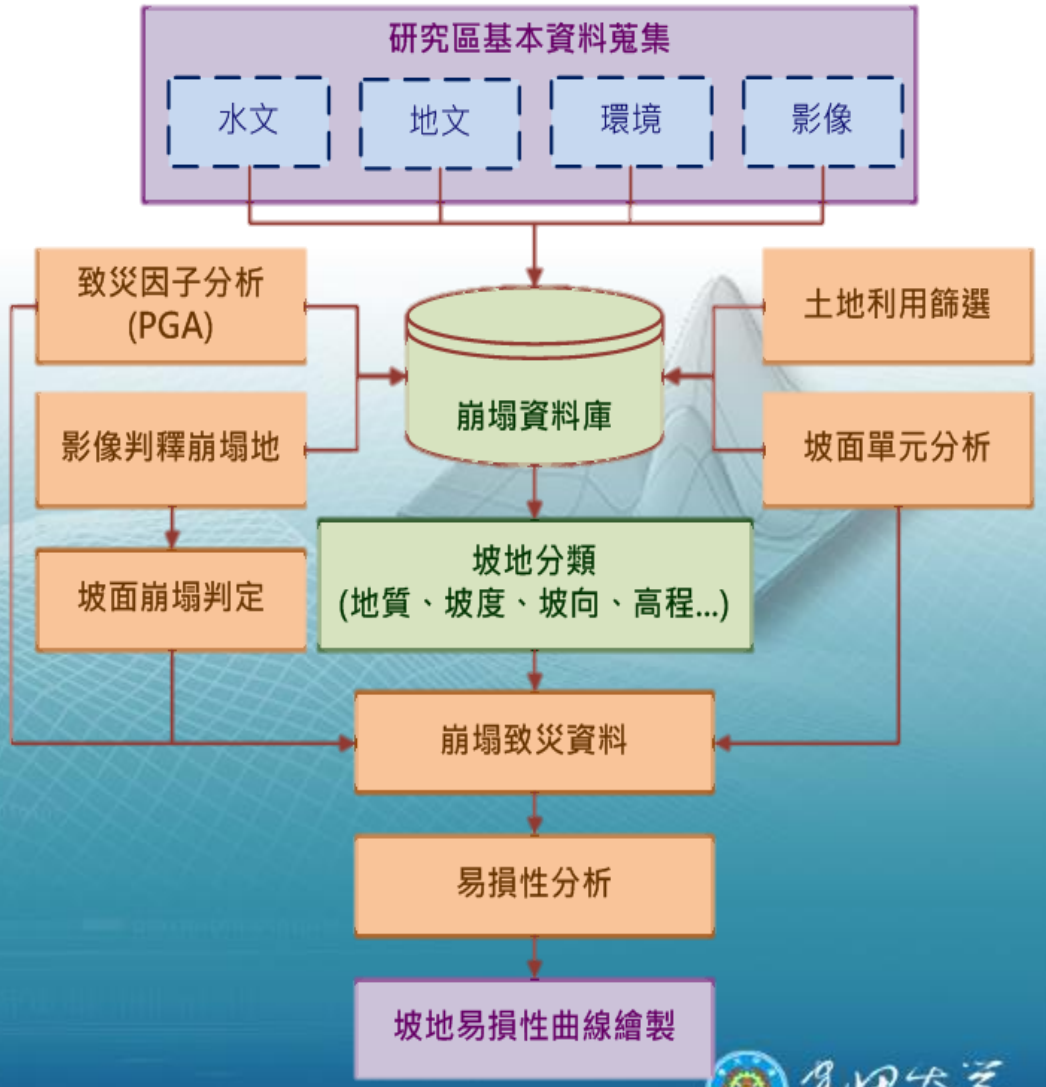


坡地分類

選擇以地質、坡度、坡向敏感等重要因子區分坡地易損特性。

坡地易損性曲線

以12類坡地易損性曲線表示坡面遇地震時的易崩特性。

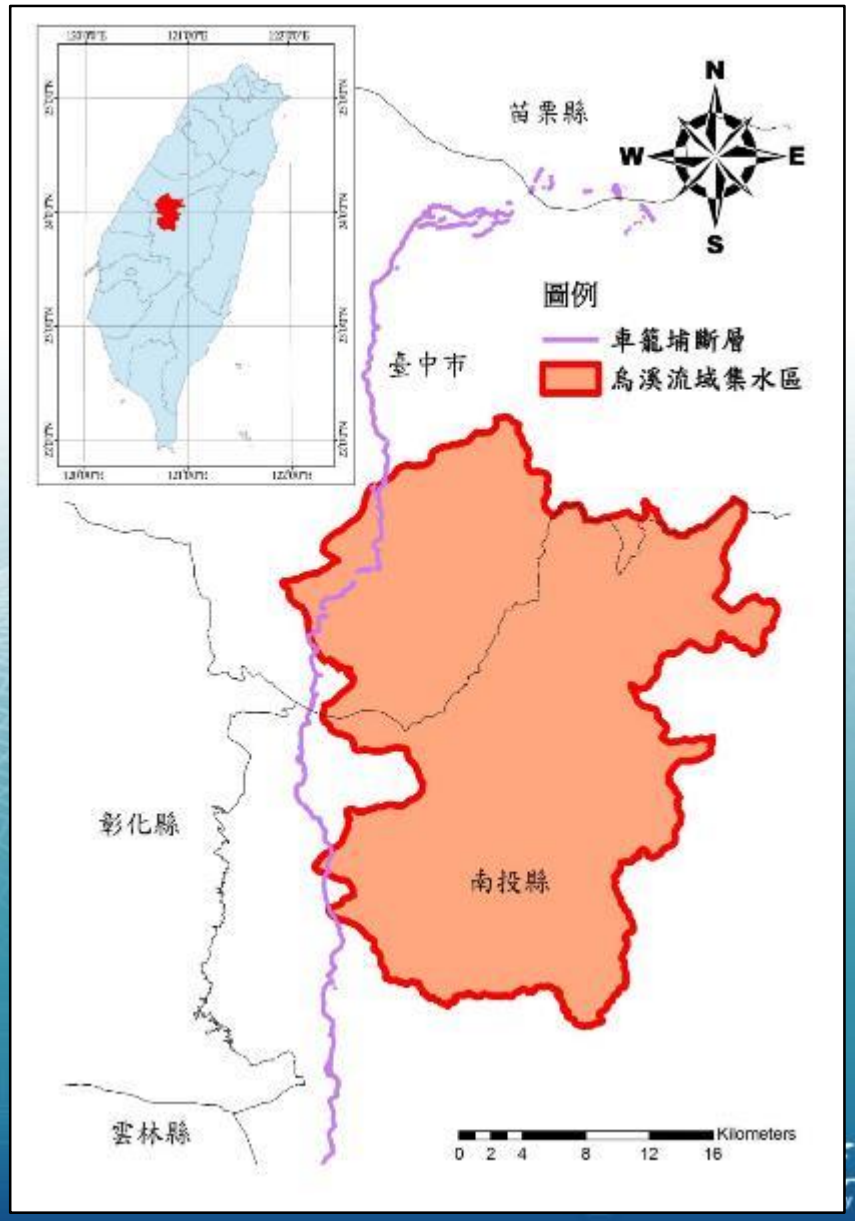


逢甲大學 Feng Chia University

參、研究區資料蒐集

■ 實證研究區說明

- 為發展易損性曲線，優選於具高潛勢危害地區，選擇車籠埔斷層鄰近。
- 921地震由於逆衝斷層效應，上盤(斷層右側)遠比下盤(斷層左側)嚴重,尖峰地表加速度和災損較高。
- 研究區屬於烏溪流域集水區，行政區隸屬台中及南投，由大里、北港、烏溪、貓羅溪、南港溪、水里溪，六個子集水區所組成，集水區面積658.34平方公里。



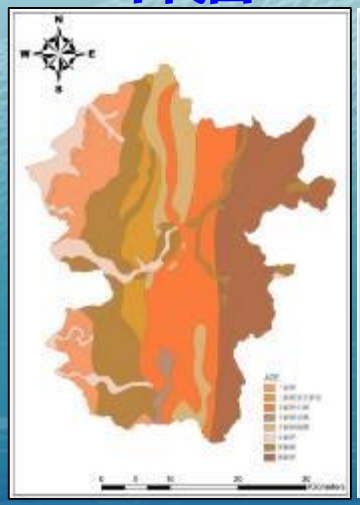
參、研究區資料蒐集

■ 地文因子資料－地質

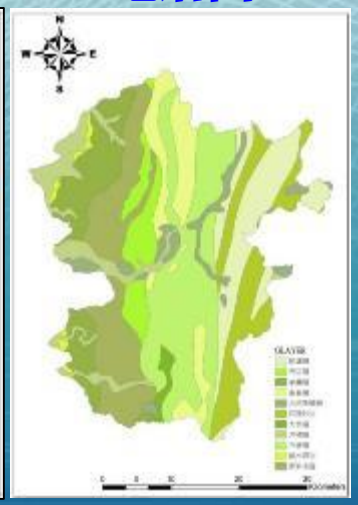
以地震工程學的角度，地震引致的崩塌與振動、加速度與波速更為相關，這與岩土硬度具有較大關係，影響地振動的大小與能量。

分類	台灣地區分類準則
B	中新世或較老的地層,包含石灰岩、火成岩及變質岩等
C	上新世及更新世地層，包含礫石層、 火山角礫岩、火山碎屑岩…等，以及紅土台地
D	更新世晚期與全新世地層，低位河階地,以及緻密的黏土層或砂泥層平均地表30m內SPT N 值≧15
E	全新世沈積物及回填物等，平均地表30m 內SPT N 值<15

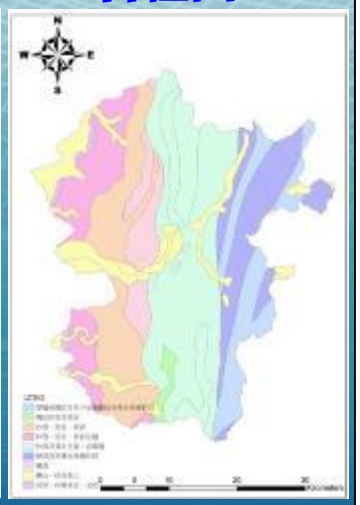
年代圖



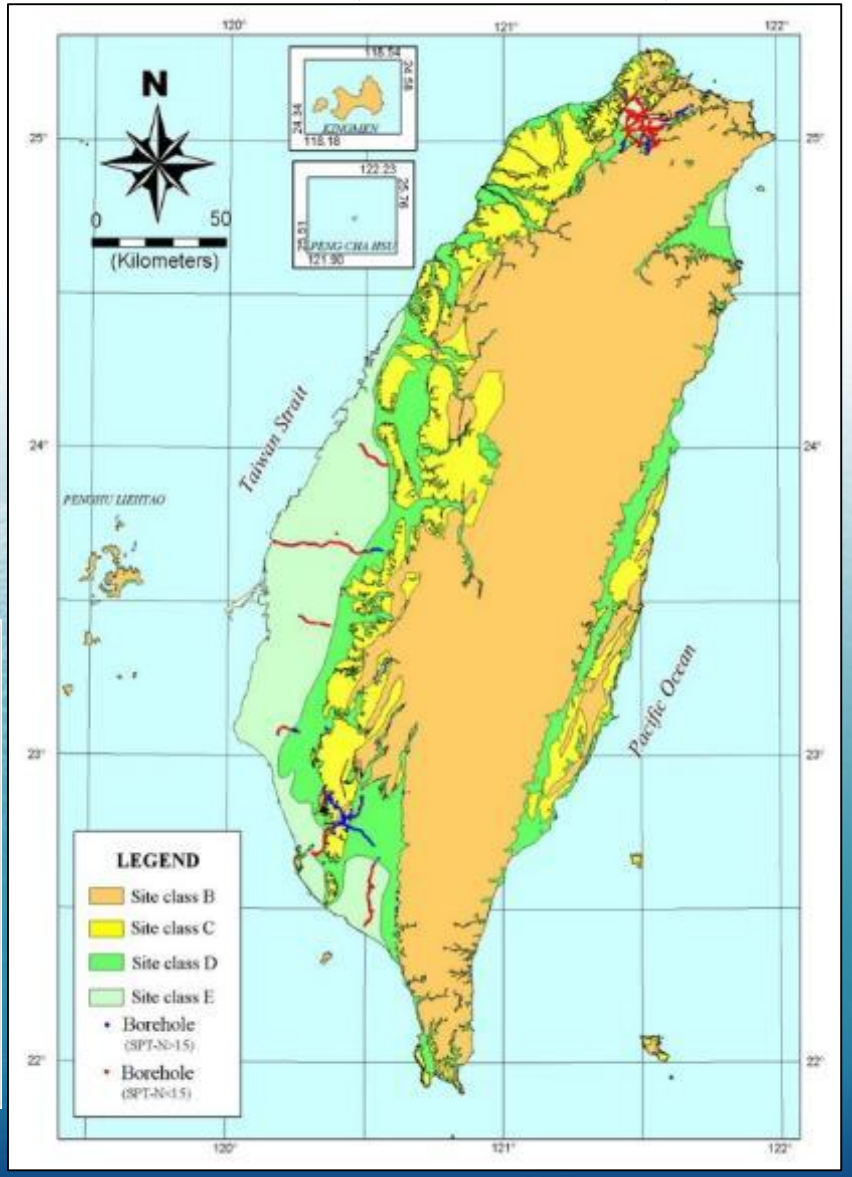
地層圖



岩性圖



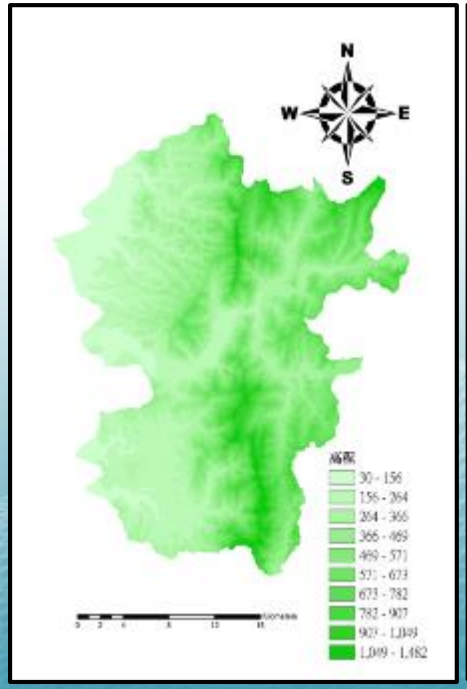
李錫堤等人(Lee *et al.*, 2001)



參、研究區資料蒐集

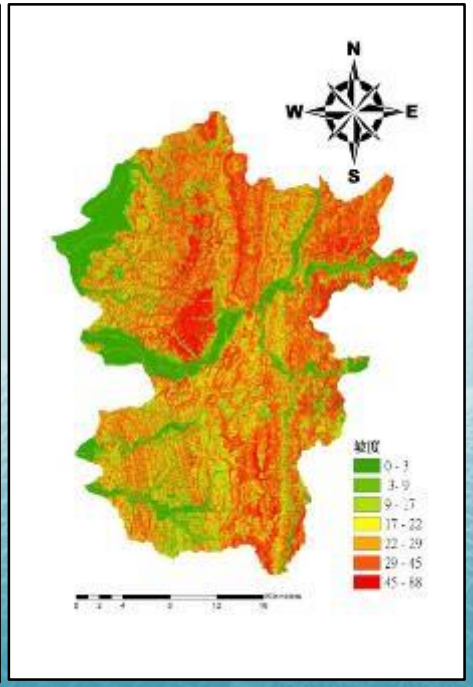
■ 地文因子分析

5m-DEM



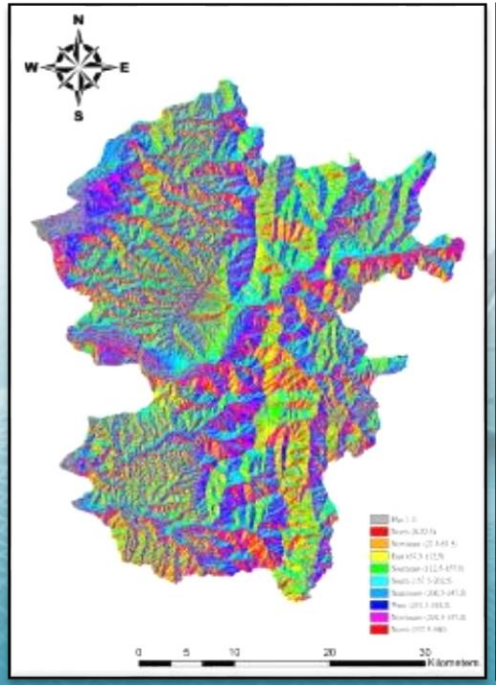
資料來源：內政部

坡度圖



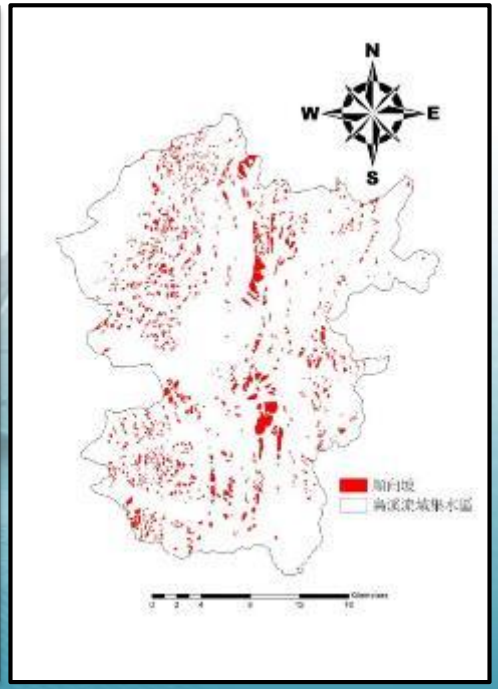
資料來源：本研究

坡向圖



資料來源：本研究

順向坡分布圖



資料來源：地調所

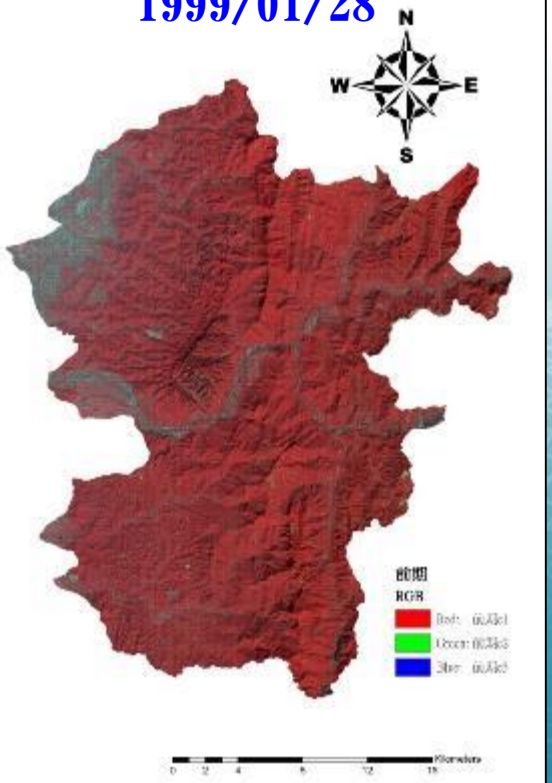
逢甲大學 Feng Chia University

參、研究區資料蒐集

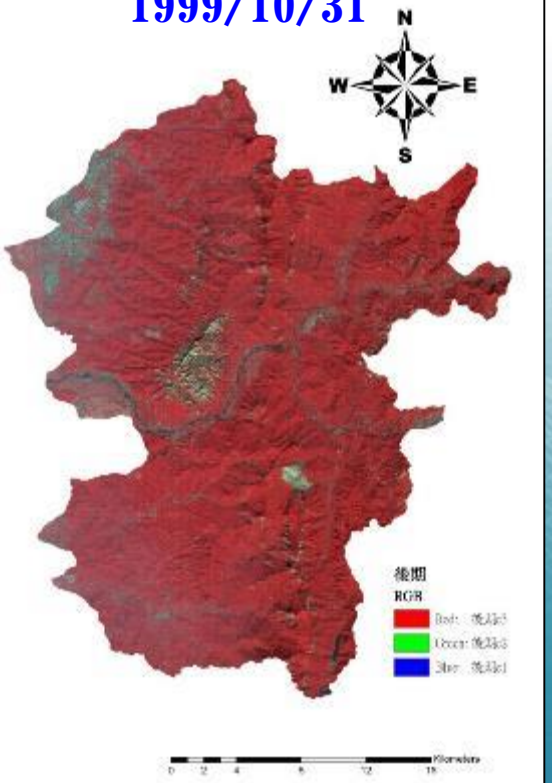
■ 影像判釋

- 蒐集太空遙測中心SPOT-2衛星影像，影像經過正射校正、相對輻射校正以及幾何處理。
- 藉由前後期影像的判釋及比對，進一步萃取出崩塌地區塊。

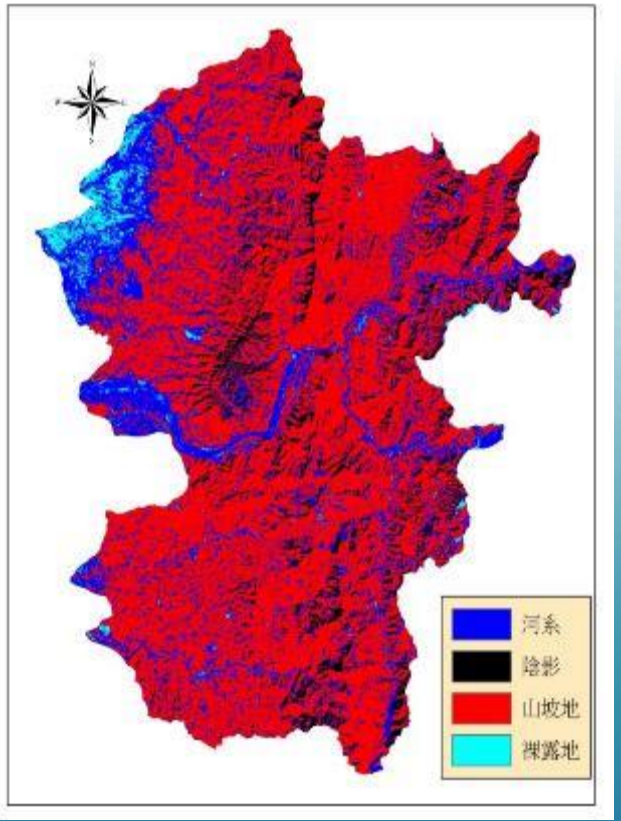
1999/01/28



1999/10/31



影像判識圖(前期)



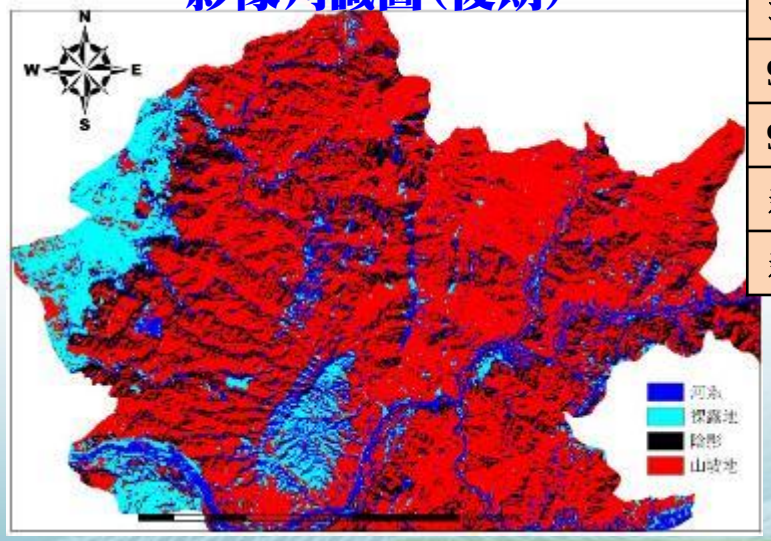
逢甲大學 Feng Chia University

參、研究區資料蒐集

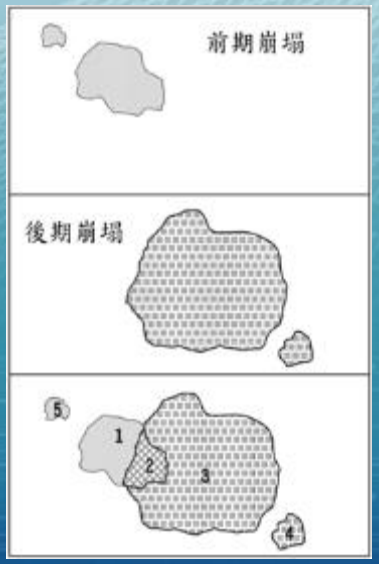
■ 新增崩塌地萃取

■ 採用監督式分類，進行衛星影像判釋，再萃取崩塌地。

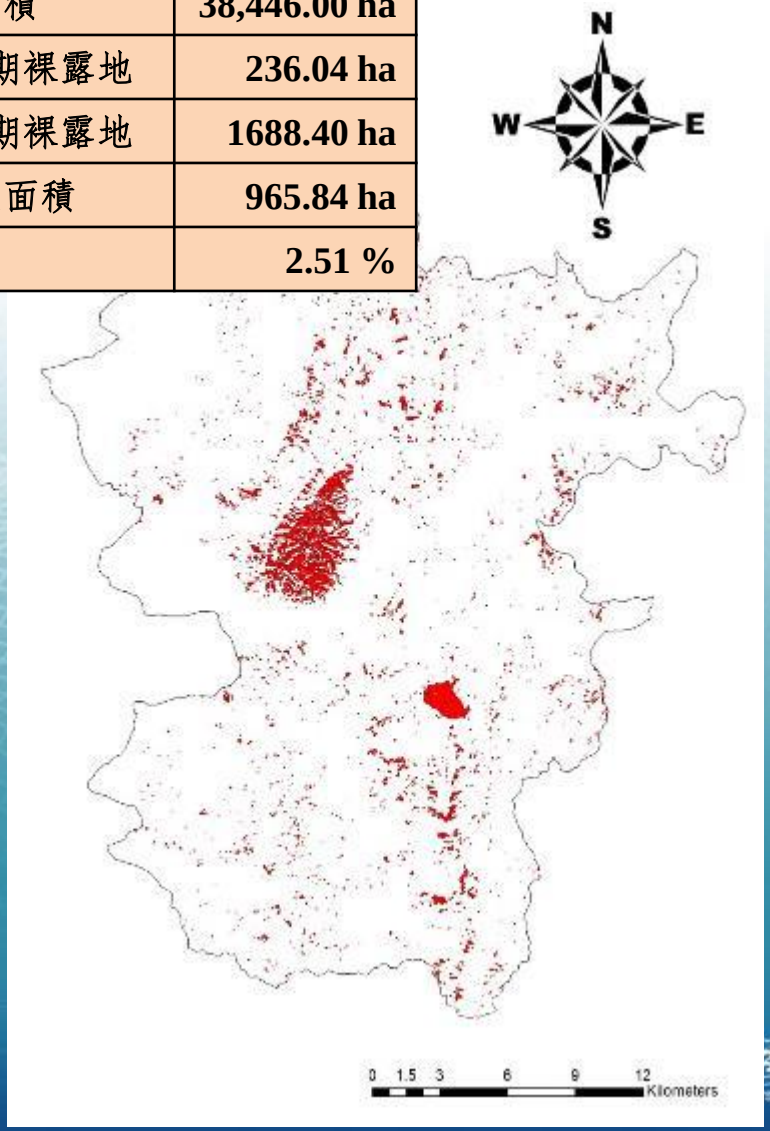
影像判識圖(後期)



流域有效面積	38,446.00 ha
921地震前期裸露地	236.04 ha
921地震後期裸露地	1688.40 ha
新增崩塌地面積	965.84 ha
新增崩塌率	2.51 %

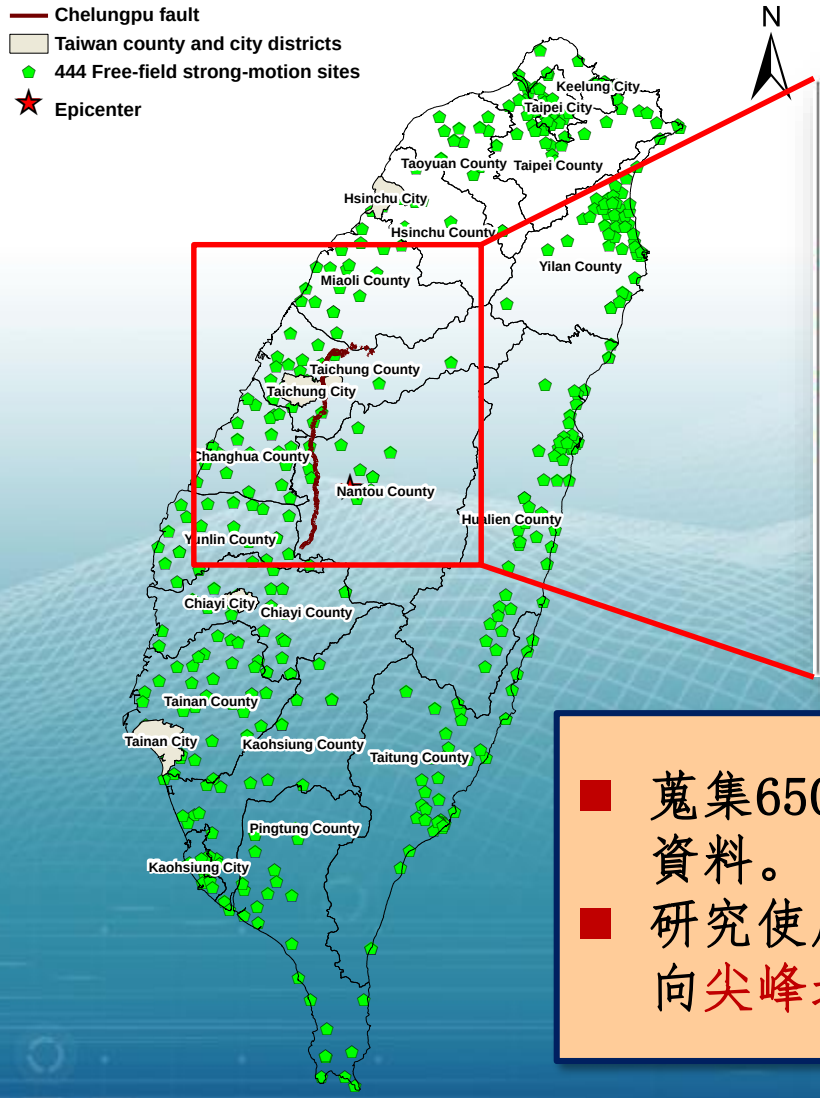


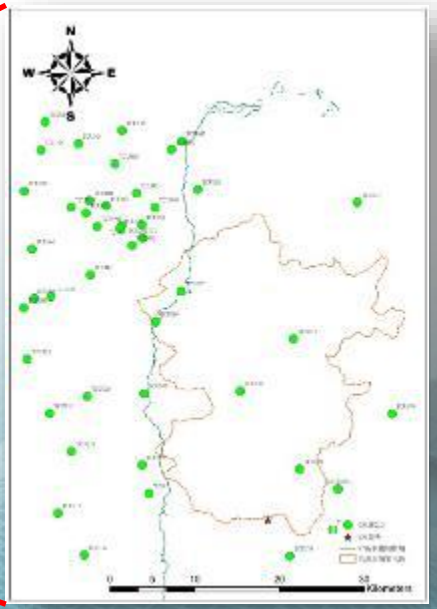
1.崩塌復育
(1)與(5)
2.舊有崩塌地
(2)
3.舊有崩塌地擴大
(3)
4.新生崩塌地
(4)



肆、921地震強地動推估

■ 九二一地震測站資料蒐集





研究範圍選定

考量崩塌事件多集中在高震度地區，選定以烏溪流域集水區周邊範圍。隸屬於台中及南投，由大里、北港、烏溪、貓羅溪、南港溪、水里溪，六個集水區所組成，總面積658.34平方公里。

- 蒐集650個中央氣象局921地震自由場強地動觀測資料。
- 研究使用強地動觀測網中48個測站所記錄之三軸向尖峰地表加速度主震歷時記錄。

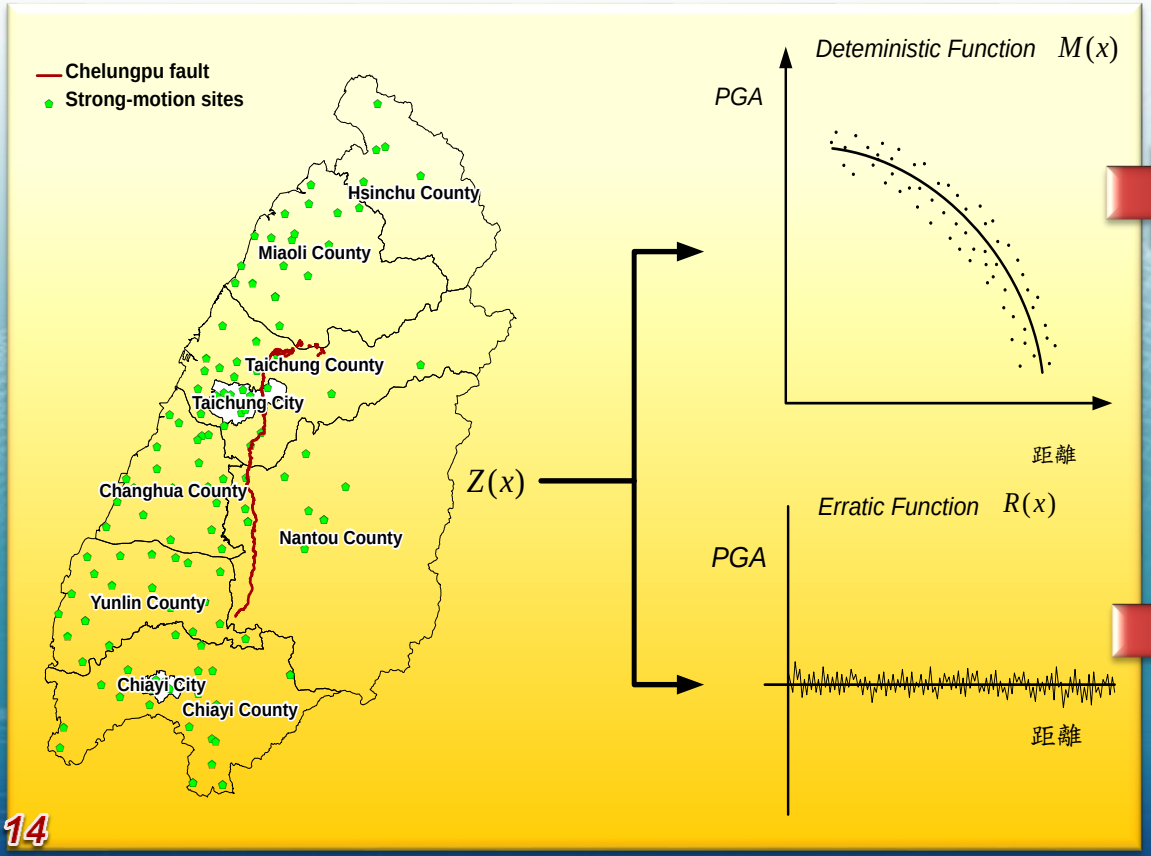
逢甲大學 Feng Chia University

肆、921地震強地動推估

■ 九二一地震強地動分析

- 空間統計推估：以區域化變數理論推估地震所引致之地表震度分布。
- 以吳逸民教授(2001)發展的台灣地區震度衰減率進行克利金空間內插。

震度衰減率 $\log_{10}(S_h) = 0.00215 + 0.581M_w - \log_{10}(R + 0.00871\times 10^{0.5M_w}) - 0.00414R$



區域趨勢值：表示一個緩慢變化的定率函數(deterministic function)，即地表震度衰減率。

$$Z(x) = M(x) + R(x)$$

殘差分量：為空間中一個期望值為0之隨機變動值(erratic fluctuations)。

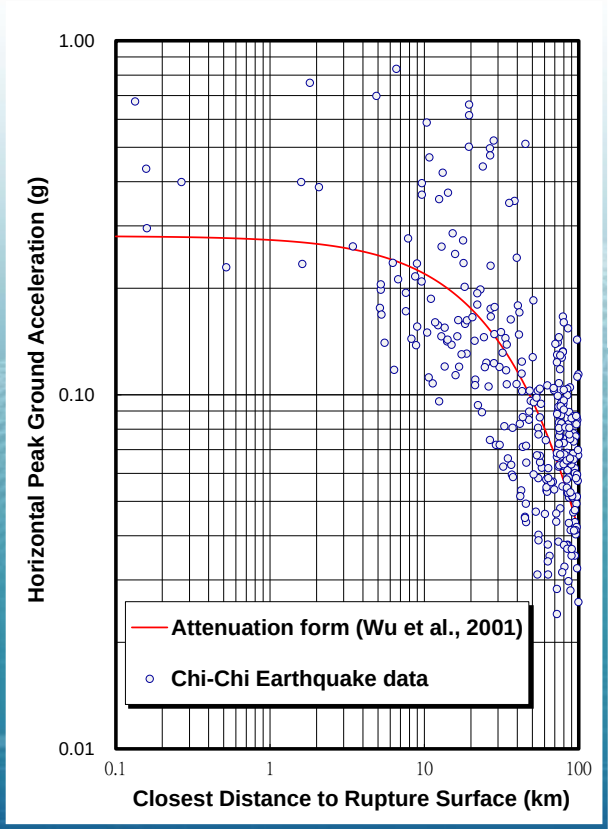
肆、921地震強地動推估

■ 九二一地震強地動分析

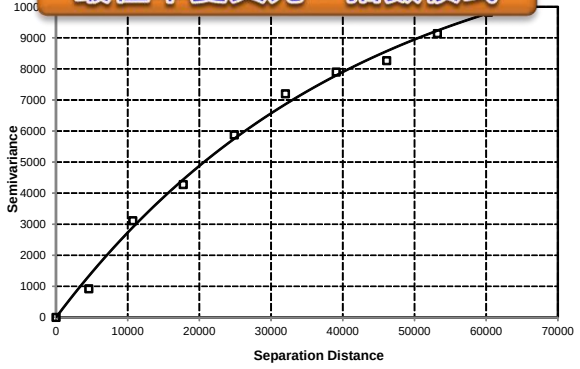
衰減率修正係數

■ 對地表震度衰減率進行修正以反應衰減率函數特性，使測站實測值與修正後推估值間之誤差絕對和為最小，修正系數0.568。

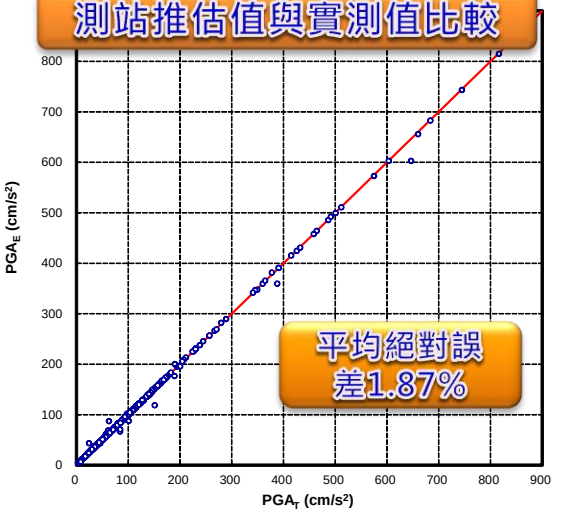
修正系數0.568



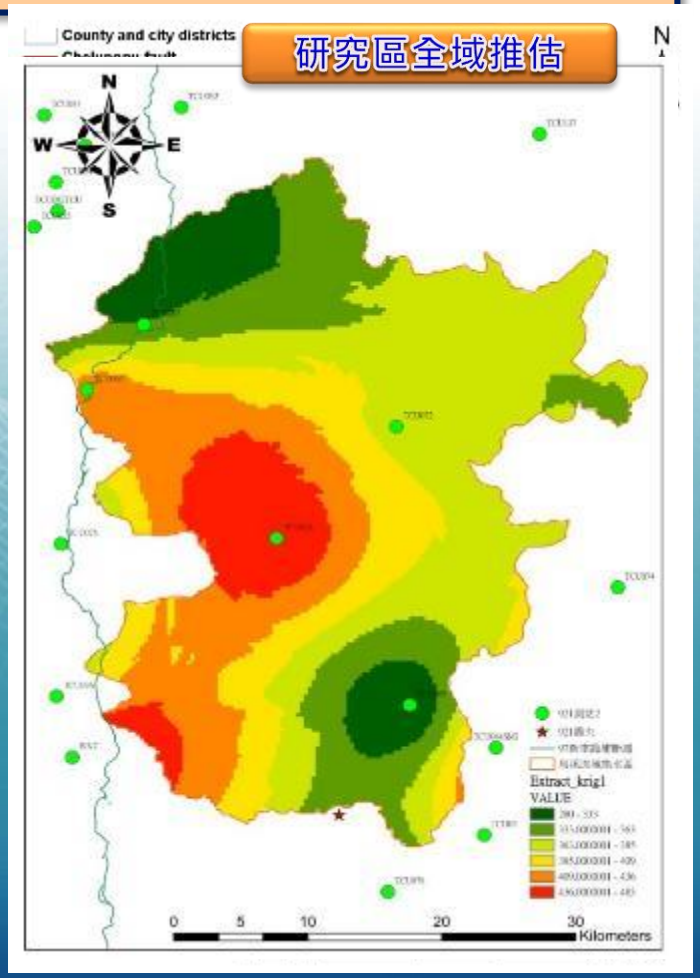
最佳半變異元 - 指數模式



測站推估值與實測值比較



研究區全域推估

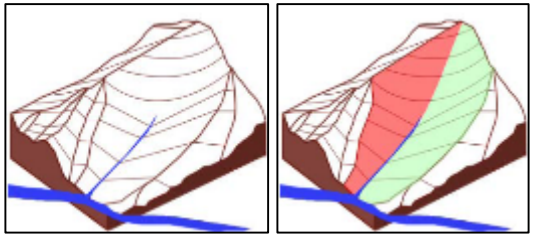


伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 坡面單元的評估模式－網格or坡面

坡面單元選取之目的：
更具物理意義之樣本，但網格亦可進行易損性分析。

分析構想



1. 坡地易損曲線基於網格致災資料分析，再以坡面單元的面積權重求得坡地易損性曲線。
2. 直接以坡面單元作為是否崩塌依據，再以坡面分類，發展坡面單元之坡地易損性曲線。

不同測繪單元劃設優缺點比較表
(Guzzeti et al., 1999)

	優點	缺點
網格單元	結構簡單，容易使用，且製作簡單快速，大小一致。可依使用者需求決定網格大小。	無法詳細呈現連續之地形面，須有足夠的記憶體和處理速度，才能處理廣域及大量的分析單元。
坡面單元	所得之參數代表整個地形單元，較具地形上的連續意義，極適於山崩潛勢的研究。	小型岩屑山崩難以呈現，流域界線不一定符合地貌地質或土地利用分界。

1. 坡面單元分析
2. 崩塌資料蒐集
3. 致災資料分析
4. 坡地易損性分析

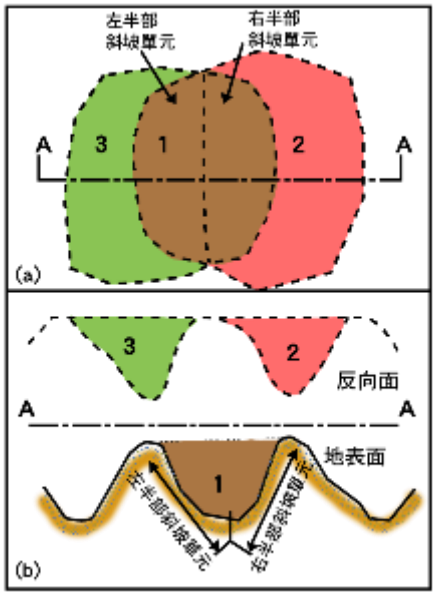
- 繪製坡面單元
- 坡面單元定義(依分類定義)
- 衛星影像判釋
- 崩塌地判釋
- 強地動推估
- 坡面崩塌定義(是否崩塌)
- 崩塌程度定義(崩塌後果)
- 致災誘因分析
- 最大概似法
- 坡地易損性模式

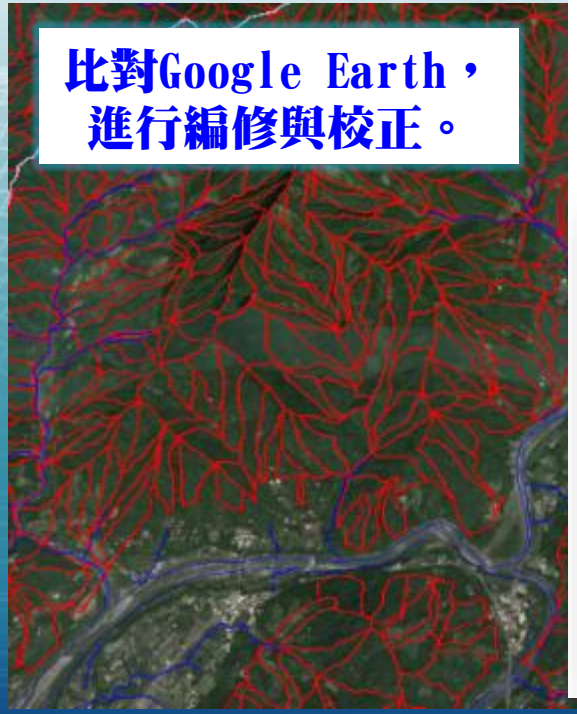
逢甲大學 Feng Chia University

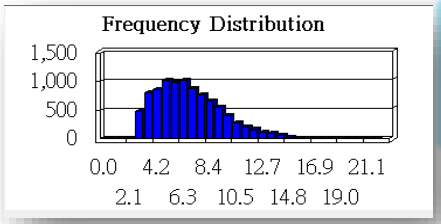
伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 坡面單元萃取模式

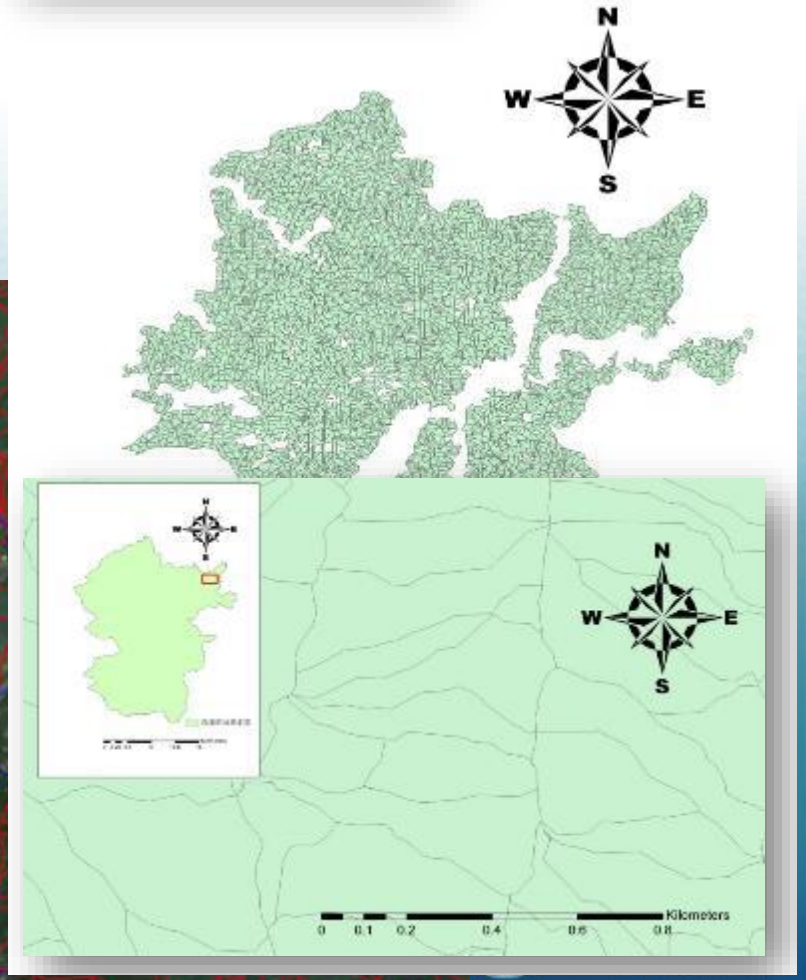
- 採用集水區重疊法：坡面單元為斜坡的一部分或是集水區的左、右部分，被集水區中山脊線（分水嶺）和山谷線（溪流線）所劃分。(Xie *et al.*, 2004)
- 避免聚落管理單元面積過小，坡面單元控制在約3至10公頃為原則。







總計6,333個坡面單元



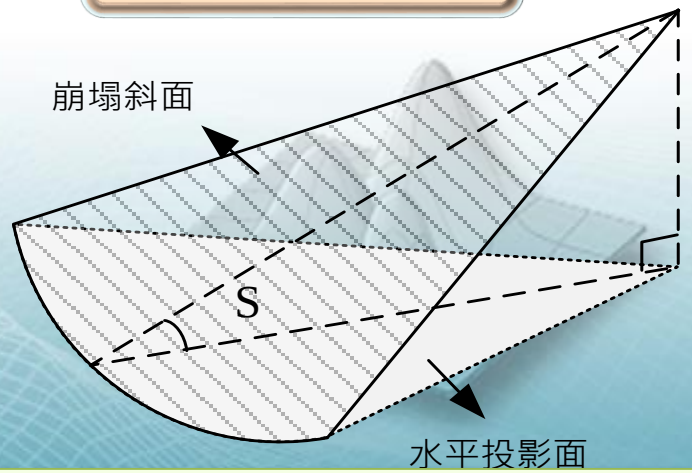
伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 坡面單元崩塌定義

- 衛星影像平面判釋結果無法考慮地形地勢變化而產生的誤差，必須予以修正。
- 由體積(V)與斜面積(A)關係式，推算不同坡度的崩塌斜面積，並計算崩塌面積(水平投影面積)。
- 根據坡度轉換崩塌面積(水平投影面積)，不同坡度分級定義不同的崩塌面積。

經濟部水利署，氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例，2010

$$V = 0.2 \times A^{1.3}$$



編碼	規範分級	水土保持技術規範	
		坡度(S)分級範圍	坡度(°)
S1	三級坡	15% < S≦30%	8.53 < S≦16.70
	四級坡	30% < S≦40%	16.70 < S≦21.80
S2	五級坡	40% < S≦55%	
S3	六級坡	55% < S≦100%	
	七級坡	S > 100%	

崩塌定義考量

1. 崩塌率
2. 崩塌面積

S1類坡度：坡面單元崩塌率達5%，或崩塌面積達0.28ha者判定定坡面單元為崩塌；其餘為未發生崩塌。

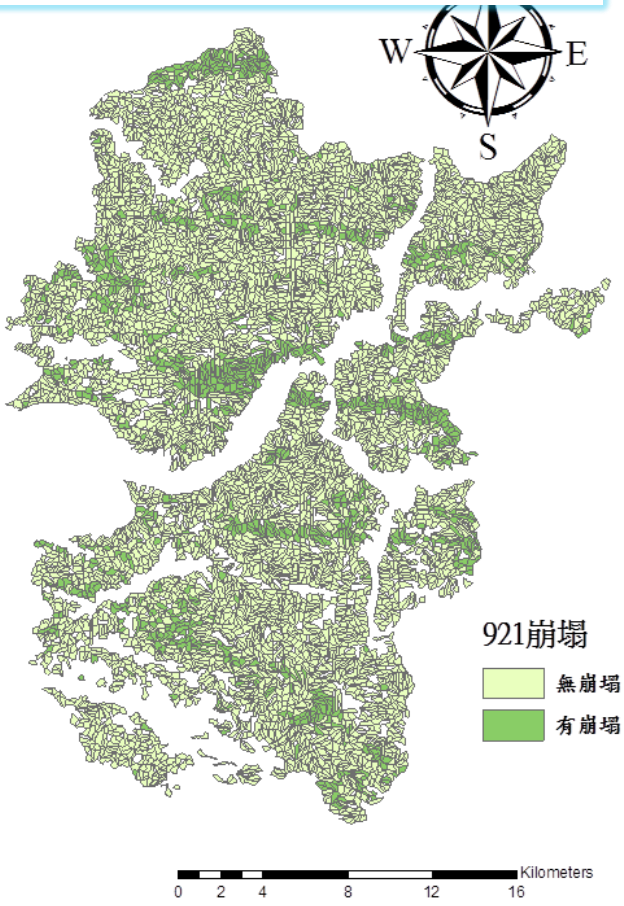
S2類坡度：坡面單元崩塌率達5%，或崩塌面積達0.24ha者判定定坡面單元為崩塌；其餘為未發生崩塌。

S3類坡度：坡面單元崩塌率達5%，或崩塌面積達0.22ha者判定定坡面單元為崩塌；其餘為未發生崩塌。

伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

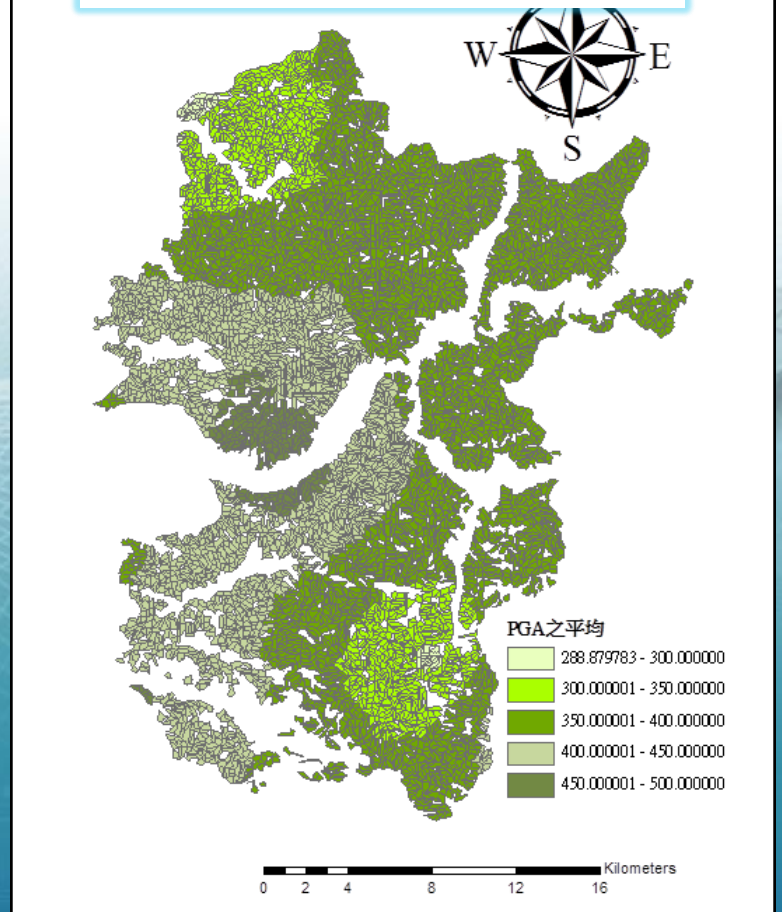
■ 坡面單元崩塌分布

總計6,333個坡面單元中有1,021個崩塌，達16.12%。



■ 坡面單元震度分布

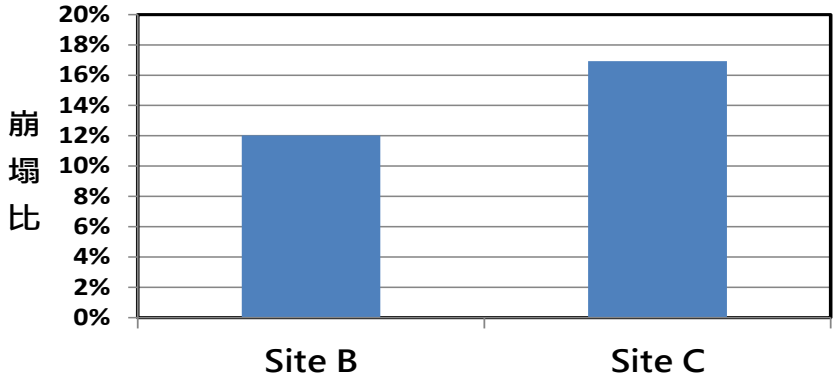
取各坡面單元中網格PGA的最大值作為坡面PGA代表值。



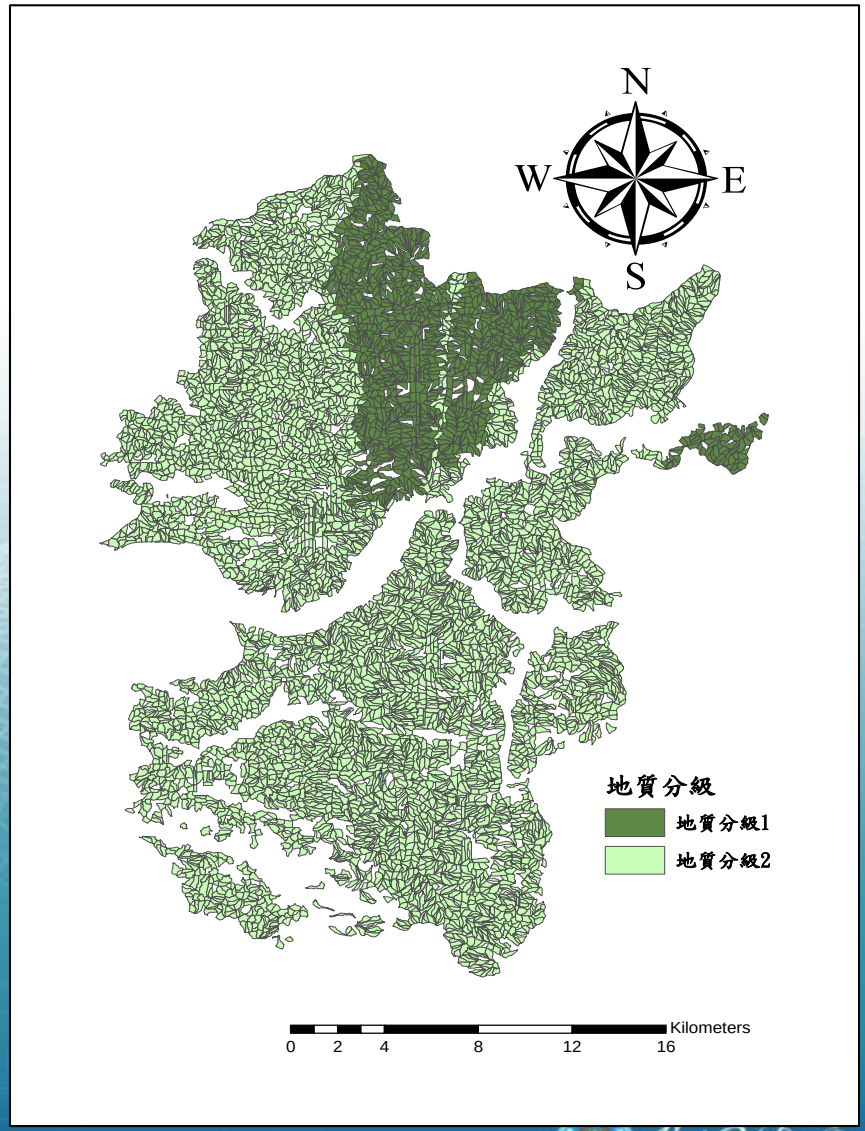
伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 坡面環境因子定義－地質因子(G)

- 依據李錫堤教授之研究成果。
- 坡面單元取各類地質面積比例最大者(相對多數法)為代表地質。
- Site B為堅硬且脆性的岩石；Site C為密集的土壤和軟岩。



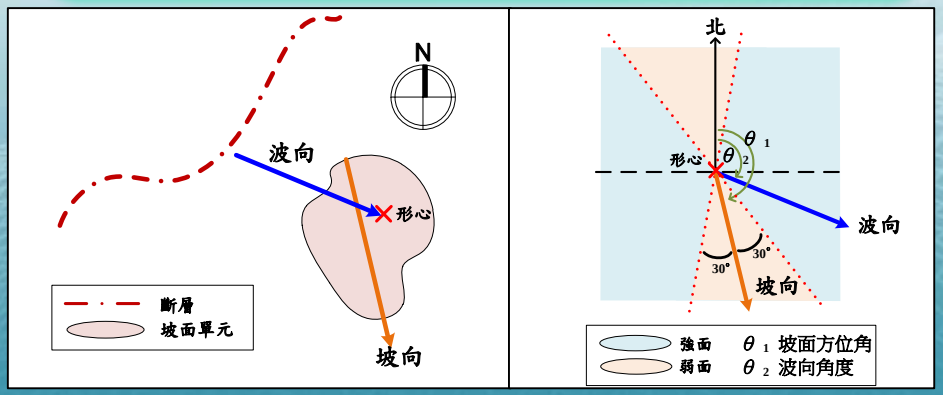
地質分類	數量	崩塌數	崩塌比
SiteB(G1)	1,039	125	12.03%
SiteC(G2)	5,294	896	16.92%



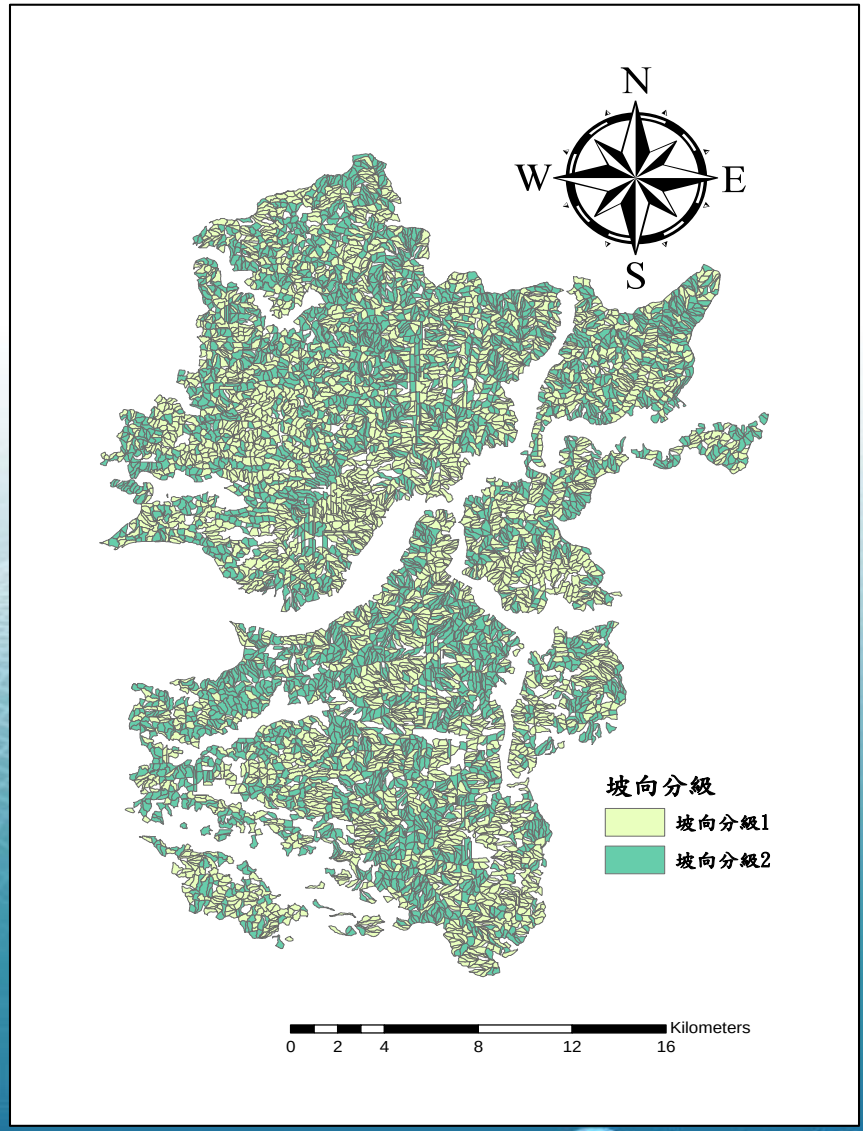
伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 坡面環境因子定義－坡向敏感因子(A)

- 考慮地震波向與坡面坡向關係。
- 假定地震波沿斷層線向外傳遞，且坡面形心距斷層線的最短距離即波向。
- 利用坡面方位角和波向角度以30°為分界評估強面及弱面。
- 考慮順向坡為當然弱面。



坡向分類	數量	崩塌數	崩塌率
A1弱面	3,188	492	15.43%
A2強面	3,145	529	16.82%



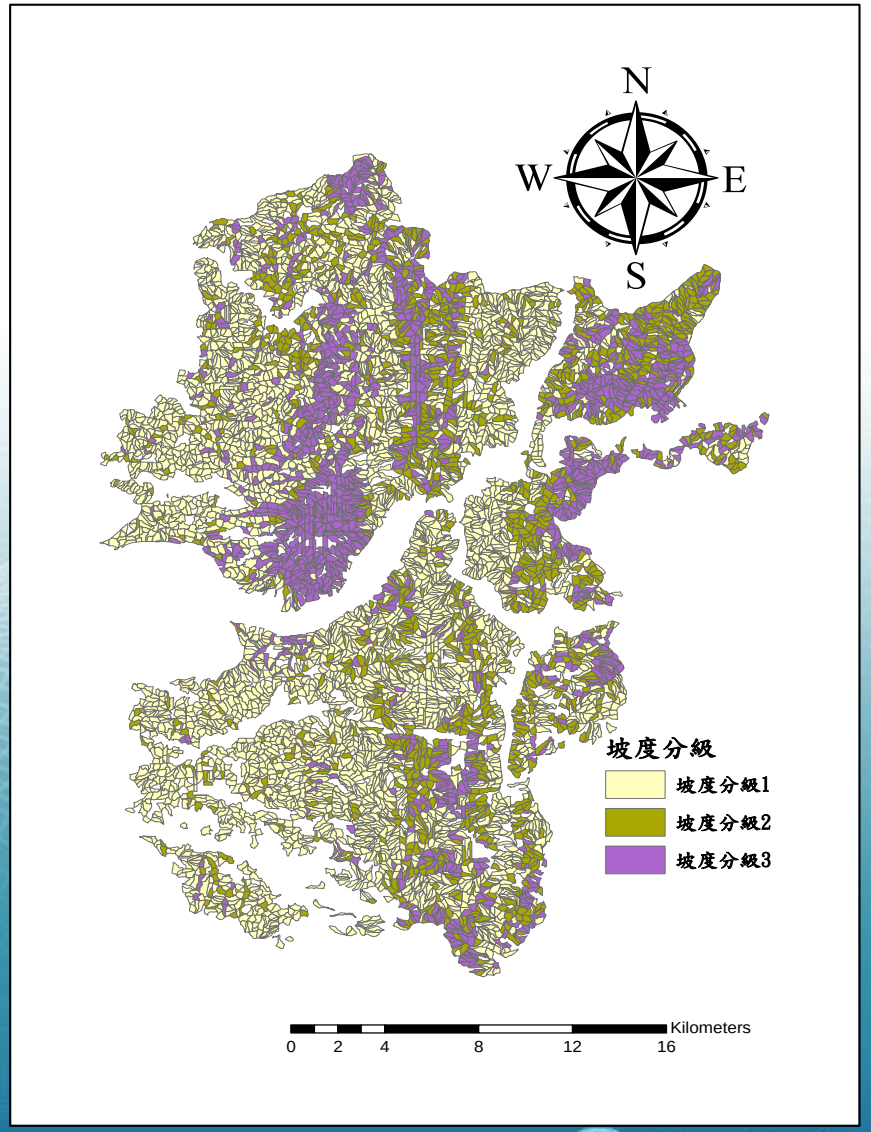
伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 坡面環境因子定義－坡度因子(G)

- ■ 坡面斜率法：以坡面單元最高點至最低點的高程差為坡高，最高點至最低點水平投影距離為坡長，計算其斜率求得坡度分級。
- ■ 將各類坡度分成三種緩急程度，分別為緩坡(S1)、中坡(S2)及陡坡(S3)

編碼	規範分級	水土保持技術規範	
		坡度(S)分級範圍	坡度(°)
S1	三級坡	15% < S≦30%	8.53 < S≦16.70
	四級坡	30% < S≦40%	16.70 < S≦21.80
S2	五級坡	40% < S≦55%	21.80 < S≦28.81
S3	六級坡	55% < S≦100%	28.81 < S≦45.00
	七級坡	S > 100%	S > 45.00

坡度分類	數量	崩塌數	崩塌率
S1緩坡	3,605	570	15.81%
S2中坡	1,400	212	15.14%
S3陡坡	1,328	239	18.00%



伍、地震誘發崩塌之坡地易損性模式

■ 環境因子與坡面分類

地文分類考慮可能直接相關的因素

地文分類因子

- 地質 (G1、G2)
- 坡向敏感 (A1、A2)
- 坡度 (S1、S2、S3)

＋

致災因子

- 地表最大加速度 (PGA)

距斷層遠近、高程等，PGA已隱含區位因子。

前述各坡面因子之分級，各類坡面單元賦予固定編碼，以G、A、S之順序組合，因此包括地質二類、坡向敏感二級以及坡度三級，共計12類組合。

逢甲大學 Feng Chia University

陸、地震誘發崩塌之坡地易損性分析

■ 12類坡地易損性分析結果

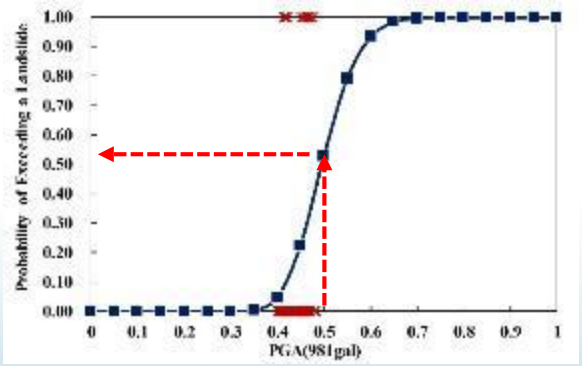
■ 以地質、坡向與坡度因子，進行12類坡地易損性曲線的分析。

分類編號	坡面數量	中位數	標準差	適用範圍(cm/s2)	
G1A1S1	261	0.496	0.128	392.07	474.48
G1A1S2	156	0.517	0.134	291.35	476.34
G1A1S3	126	0.518	0.111	295.48	480.94
G1A2S1	286	0.517	0.187	288.88	473.17
G1A2S2	114	0.466	0.049	296.06	462.68
G1A2S3	96	0.522	0.159	294.70	484.24
G2A1S1	1524	0.946	0.704	343.10	586.31
G2A1S2	562	0.774	0.578	291.35	573.98
G2A1S3	559	0.702	0.516	295.48	558.90
G2A2S1	1534	1.061	0.780	339.72	564.91
G2A2S2	568	0.855	0.654	296.06	502.12
G2A2S3	547	0.801	0.612	294.70	585.77

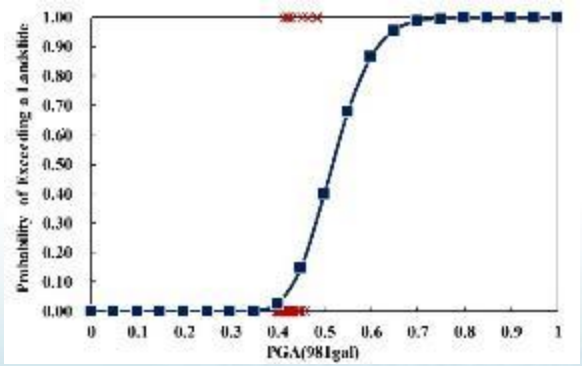
逢甲大學 Feng Chia University

陸、地震誘發崩塌之坡地易損性分析

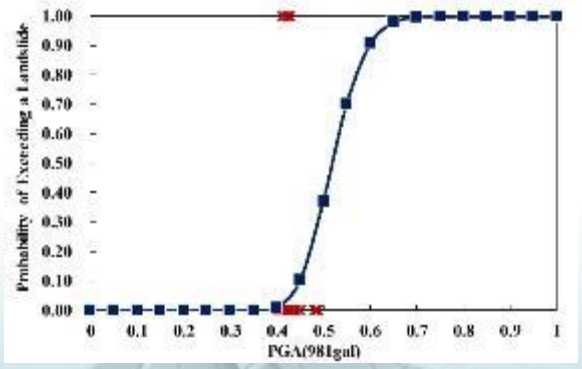
■ G1類坡地易損性曲線(年輕地質)



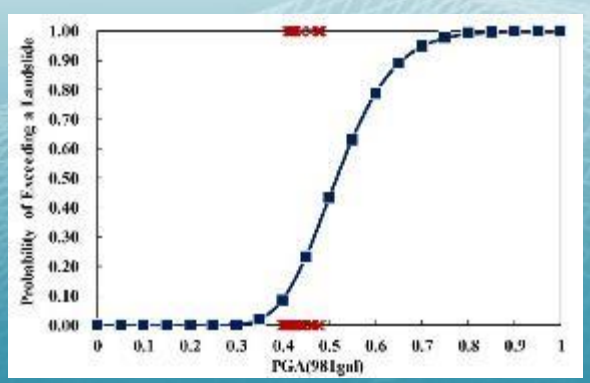
G1A1S1



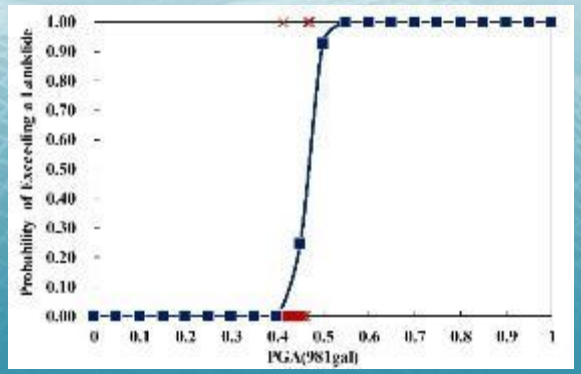
G1A1S2



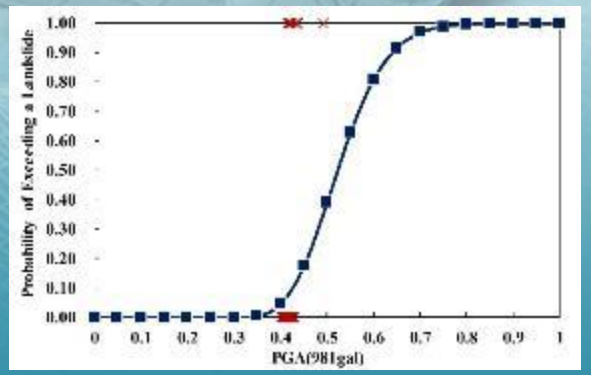
G1A1S3



G1A2S1



G1A2S2

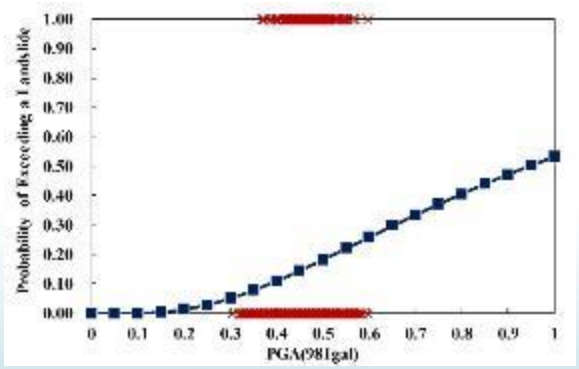


G1A2S3

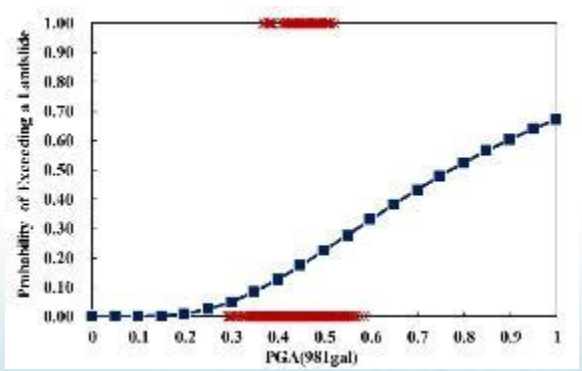
逢甲大學 Feng Chia University

陸、地震誘發崩塌之坡地易損性分析

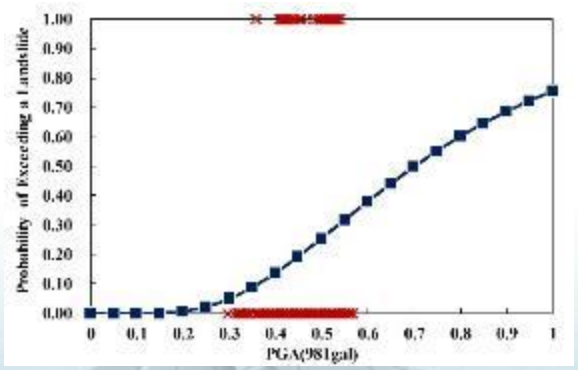
■ G2類坡地易損性曲線(古老地質)



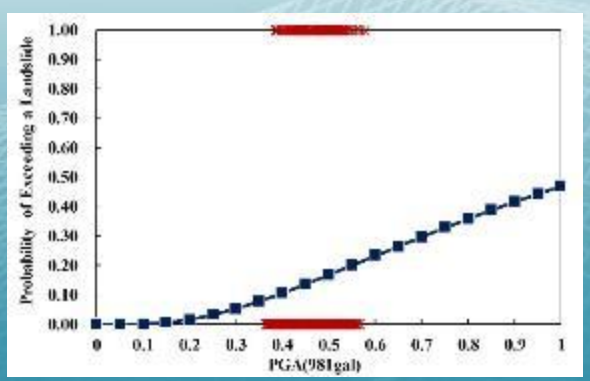
G2A1S1



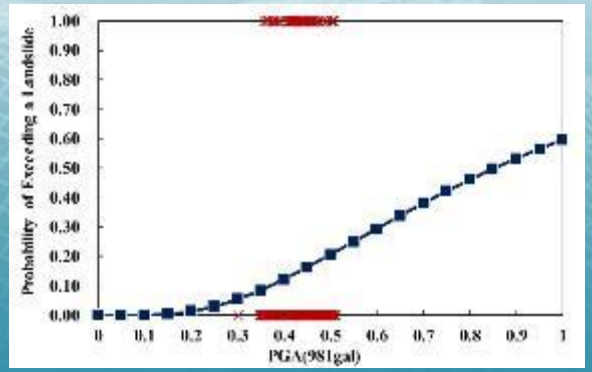
G2A1S2



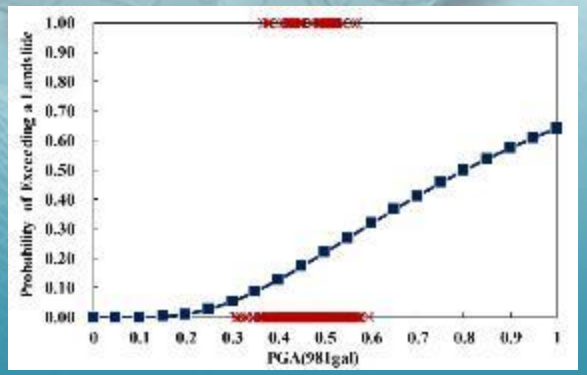
G2A1S3



G2A2S1



G2A2S2



G2A2S3

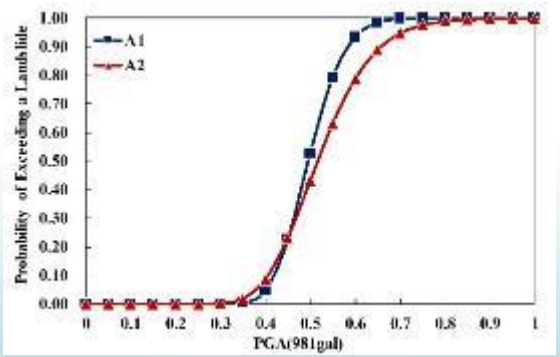
逢甲大學 Feng Chia University

陸、地震誘發崩塌之坡地易損性分析

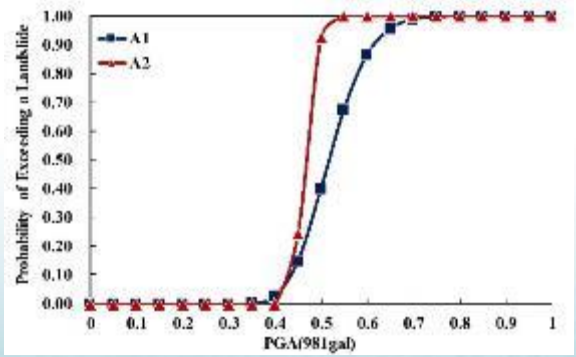
■ 坡地易損性曲線比較

坡向敏感因子-差異約在5~10%間

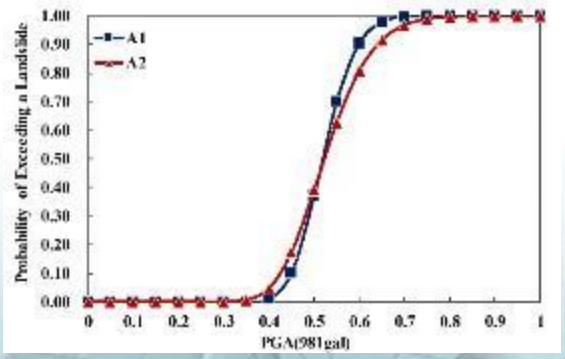
G1A2S2
不合理



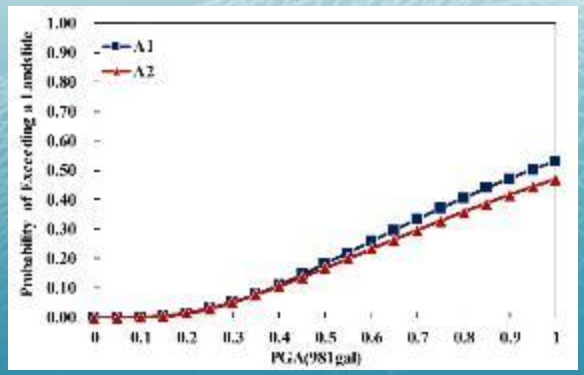
G1-S1類比較



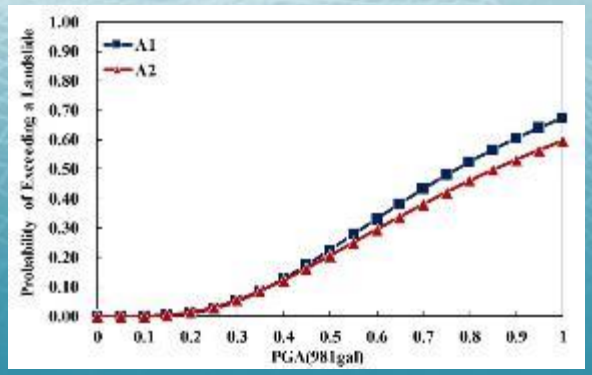
G1-S2類比較



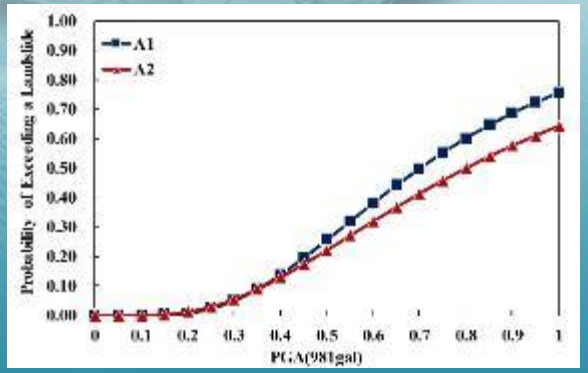
G1-S3類比較



G2-S1類比較



G2-S2類比較



G2-S3類比較

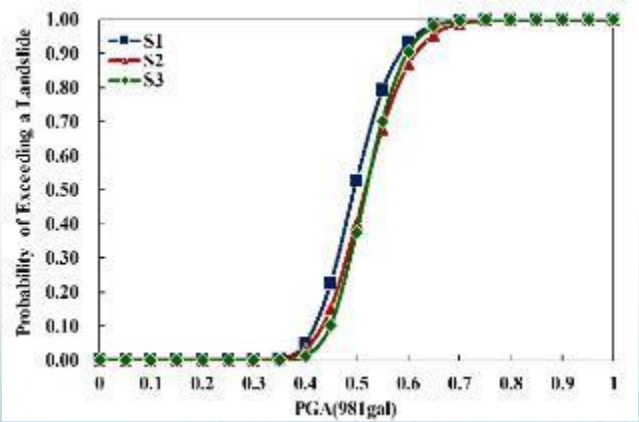
■ G1A2S2致災資料不夠充足，震度接近且無更高PGA的崩塌資料，又與未發生崩塌的致災資料相差不大，表示致災資料充足與否和資料品質的重要性。

陸、地震誘發崩塌之坡地易損性分析

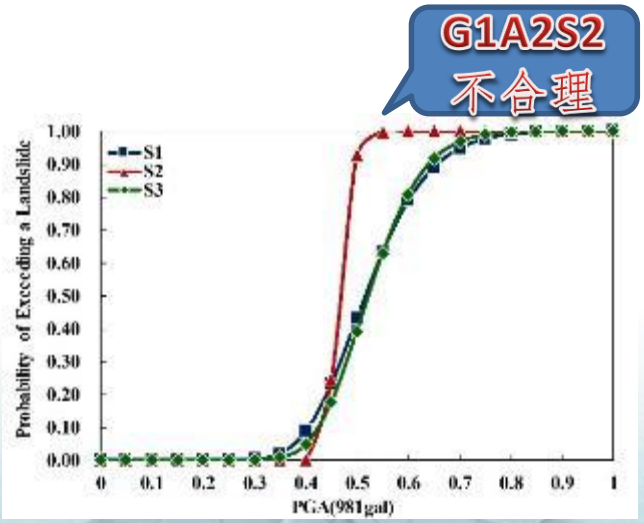
■ 坡地易損性曲線比較

坡度比較

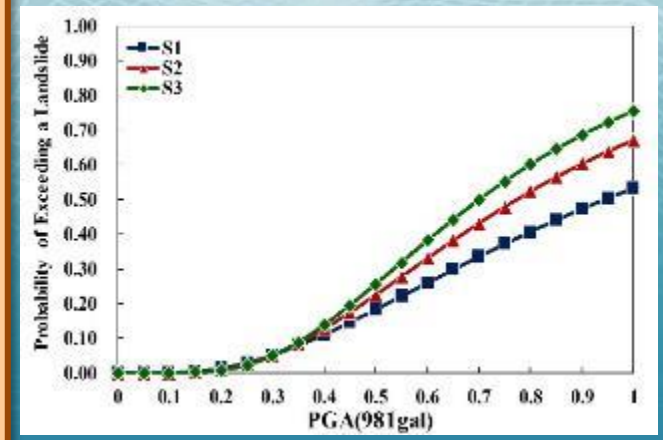
- 除了G1A2S2外，G1類對於坡地易損性曲線並不敏感，大致上的易損特性接近。
- G2類差異較明顯，又以A1(弱面)更為明顯，中、高震度相差可達10%以上。
- G2類A2(強面)中的陡坡和中坡則差異較低，大約5%左右。



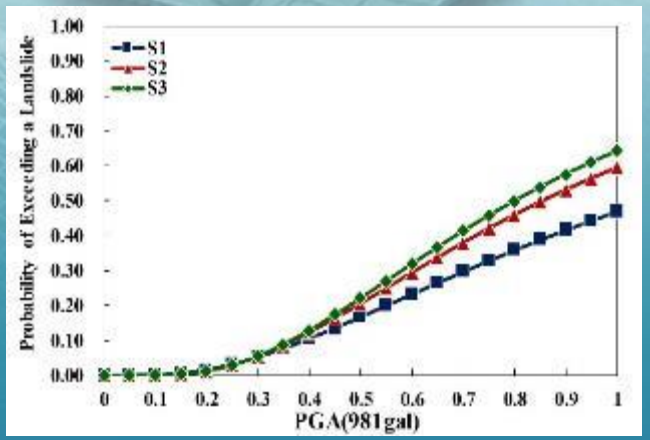
G1-A1類比較



G1-A2類比較



G2-A1類比較



G2-A2類比較

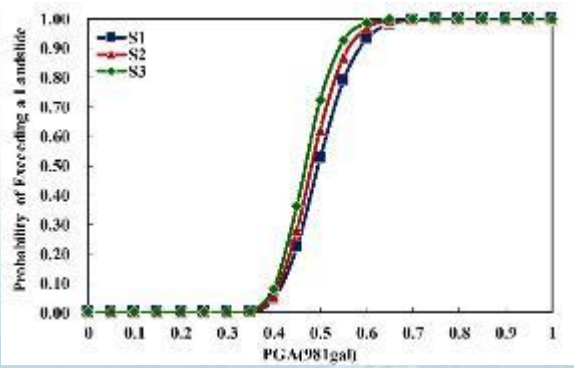
逢甲大學 Feng Chia University

柒、坡地易損性曲線優化

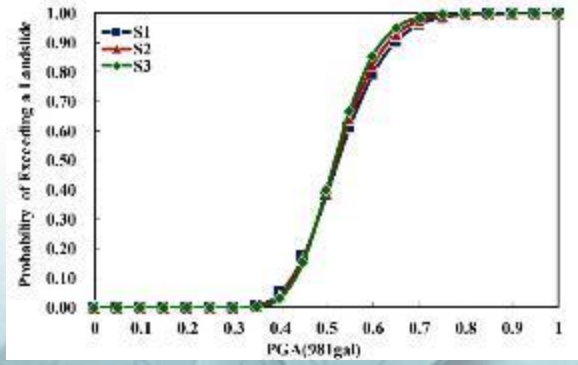
■ 坡地易損性曲線比較

G1類年輕地質

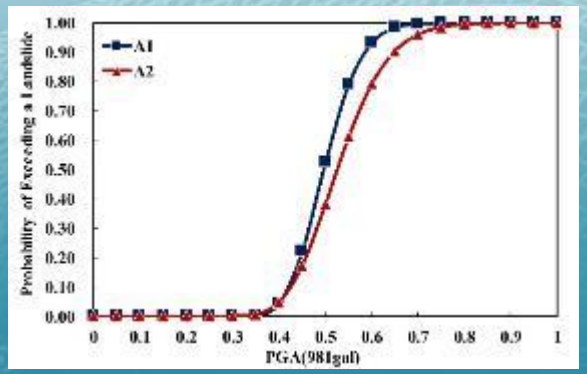
- 坡度因子方面,不同坡向中坡度陡緩對於崩塌機率差別不大,
- 於坡向而言，坡度越陡坡向屬強面或弱面的影響越大。



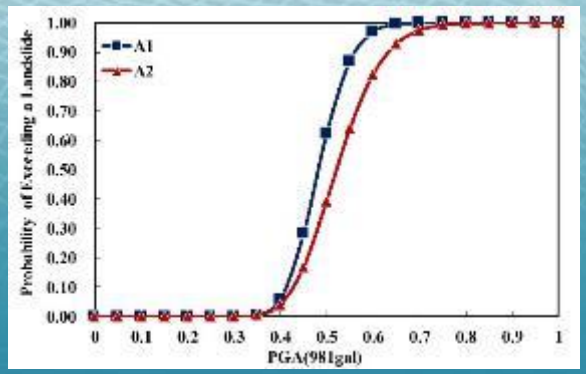
A1類比較



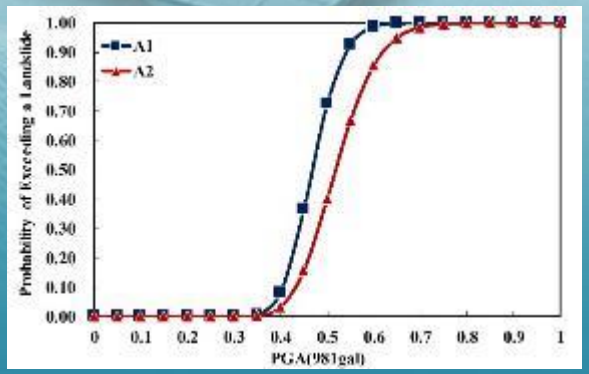
A2類比較



S1類比較



S2類比較



S3類比較

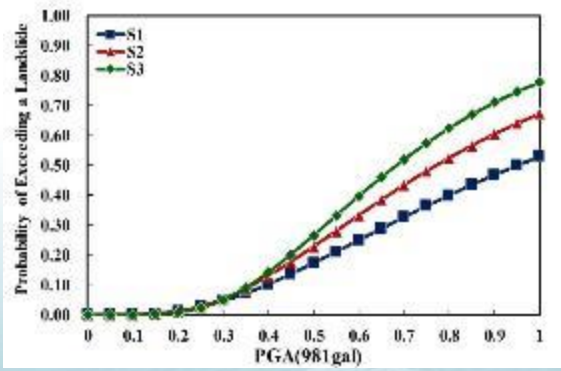
逢甲大學 Feng Chia University

柒、坡地易損性曲線優化

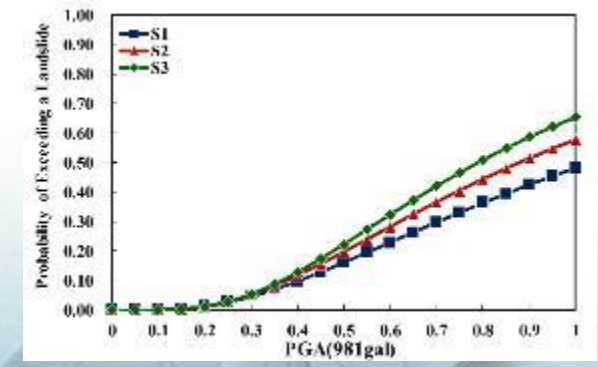
■ 坡地易損性曲線比較

G2類古老地質

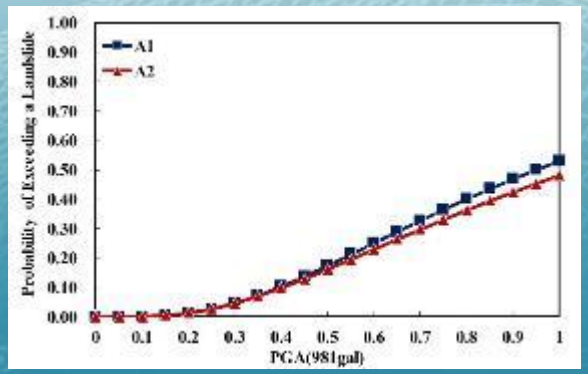
- 坡度因子方面,不同坡向中坡度陡緩對於崩塌機率差別較大,
- 於坡向而言，坡度越陡坡向屬強面或弱面的影響越大。



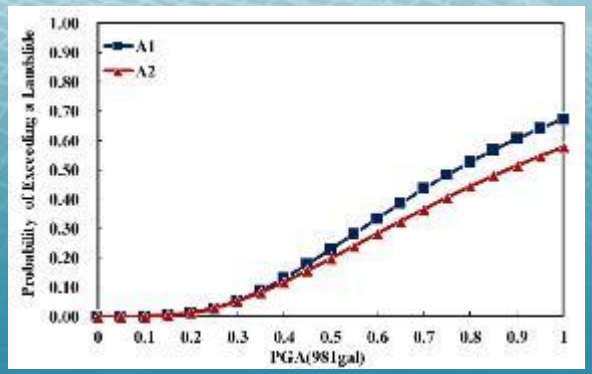
A1類比較



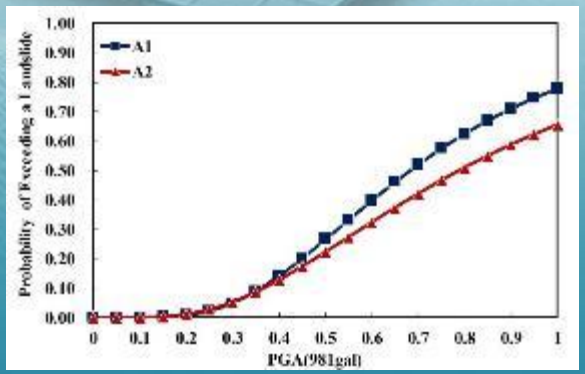
A2類比較



S1類比較



S2類比較



S3類比較

逢甲大學 Feng Chia University

柒、坡地易損性曲線優化

■ 九二一地震事件崩塌危險程度驗證

子集水區	有效面積	真實		評估		驗證
		崩塌率	危險度	崩塌率	危險度	
山茶鍋坑	1,069.40	2.60%	中高	18.18%	高度以上	正確
內城	1,076.48	3.85%	中高	14.37%	中高以上	正確
北坑溪	506.16	3.06%	中高	13.00%	中高以上	正確
石門	484.60	5.54%	中高	15.75%	高度以上	正確
草魚潭	1,541.80	2.49%	中高	15.07%	中高以上	正確
乾溪	1,074.28	2.32%	中高	17.57%	高度以上	正確
粗坑溪	898.32	3.46%	中高	8.42%	中度以上	錯誤
種瓜坑溪	1,016.12	2.42%	中高	10.99%	中高以上	正確
樟平溪	1,377.80	2.67%	中高	13.92%	中高以上	正確
大冷坑	742.24	8.39%	高度	12.29%	中高以上	錯誤
火燒坑寮	417.80	6.83%	高度	15.03%	中高以上	錯誤
仙洞指坑	1,141.28	12.55%	高度	22.71%	高度以上	正確
柑子林	404.32	9.92%	高度	11.53%	中高以上	錯誤
三隻寮	463.12	0.41%	中度	6.10%	中度以上	正確
土地公坑	548.08	1.58%	中度	12.95%	中高以上	正確
大觀	1,781.80	1.84%	中度	12.57%	中高以上	正確
五棚坑	779.04	0.54%	中度	9.91%	中度以上	正確
水長流溪	1,860.76	1.01%	中度	9.58%	中度以上	正確
北山坑	1,058.96	0.32%	中度	7.05%	中度以上	正確
北港溪	1,042.08	1.34%	中度	11.67%	中高以上	正確
東勢閣坑	2,086.20	1.42%	中度	11.67%	中高以上	正確
金子坑	1,024.84	1.69%	中度	14.38%	中高以上	正確
阿冷坑	903.68	0.59%	中度	16.88%	高度以上	正確
後寮溪	682.88	0.11%	中度	2.83%	中度以上	正確
炭寮	1,337.64	1.41%	中度	9.60%	中度以上	正確
韭菜湖溪	682.32	1.09%	中度	9.67%	中度以上	正確
食水坑	1,396.92	0.95%	中度	19.54%	高度以上	正確
草湖溪	2,814.00	1.87%	中度	17.18%	高度以上	正確
梅子林	615.84	0.55%	中度	5.40%	高度以上	正確
猴洞坑	653.04	1.72%	中度	10.20%	中度以上	正確
象鼻坑	927.36	1.26%	中度	17.35%	高度以上	正確
福山巷	461.20	1.21%	中度	7.86%	中度以上	正確
頭汴坑溪	5,575.64	1.52%	中度	9.32%	中度以上	正確
正確率						87.88%

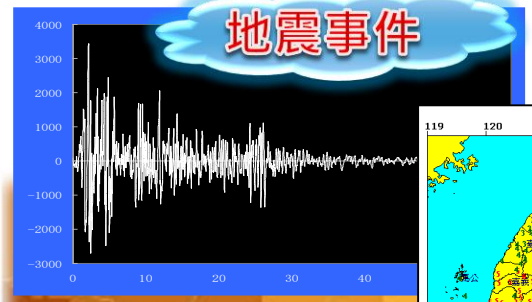
捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

■ 地震後的山區災害樣態

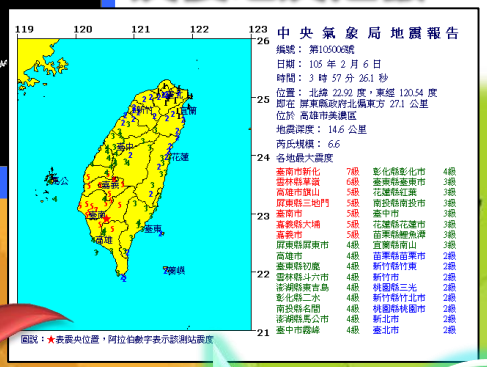


捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

■ 地震早期評估



震後地震速報



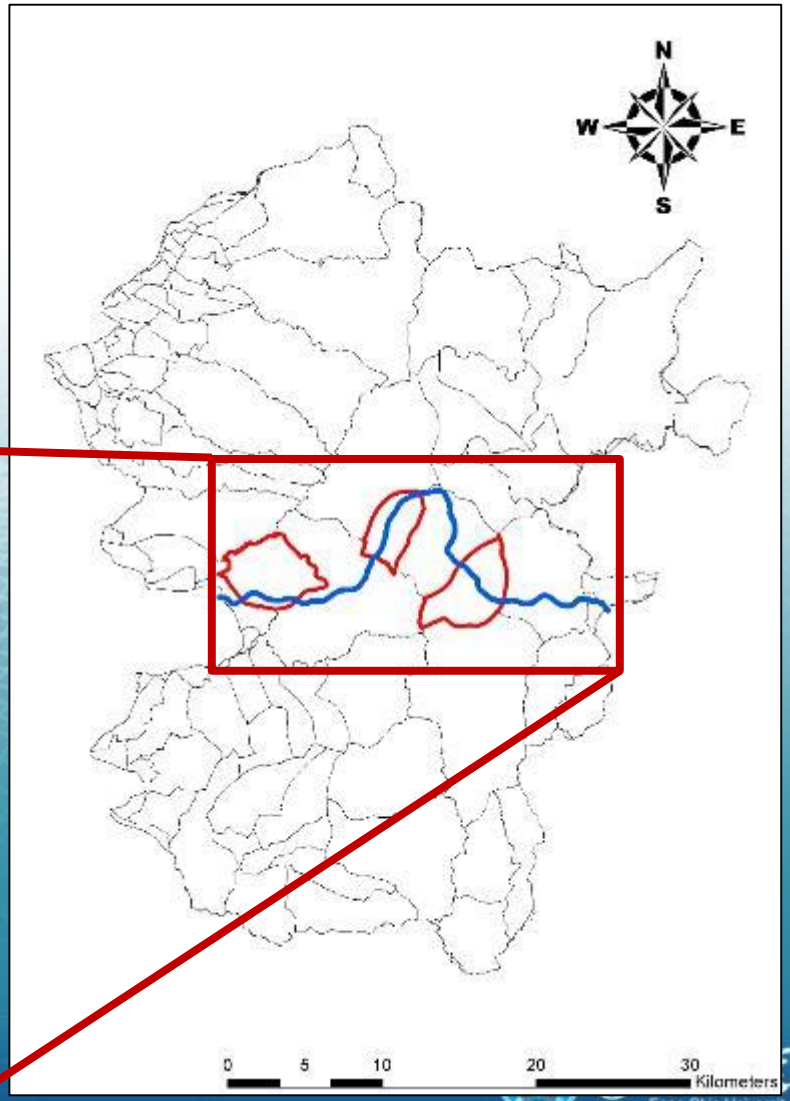
經由災害潛勢之影響評估在
震前建立地震災害的應變策略

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

■ 早期評估示範區位

以台14線沿線聚落為對象，針對聚落進行危險坡面調查，包括平林里、福龜村和大石村，具有連貫和共同連絡道路，行政區域皆隸屬於南投縣，總面積約24.3平方公里，總戶數約1,480戶，總人口約4,292人。。





Feng Chia University

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

■ 山區災害潛勢評估示範區位初選

調查環境資料、聚落範圍、危險坡面、建物資料、人口數量、路網分布…等。



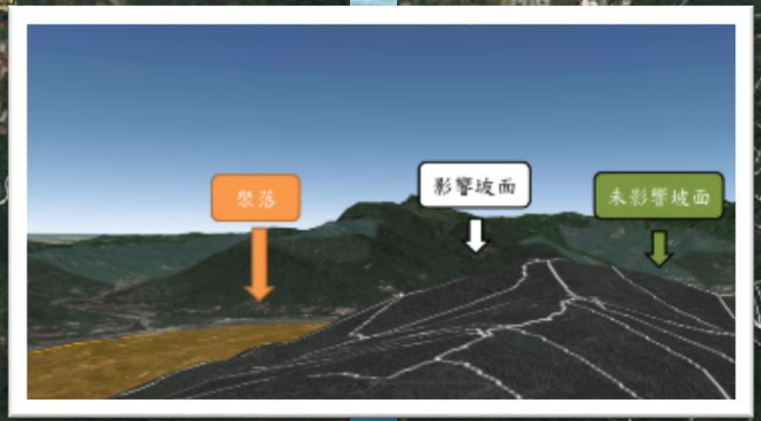
逢甲大學 Feng Chia University

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

■ 聚落範圍及危險坡面劃定







逢甲大學 Feng Chia University

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

■ 聚落道路之影響坡面

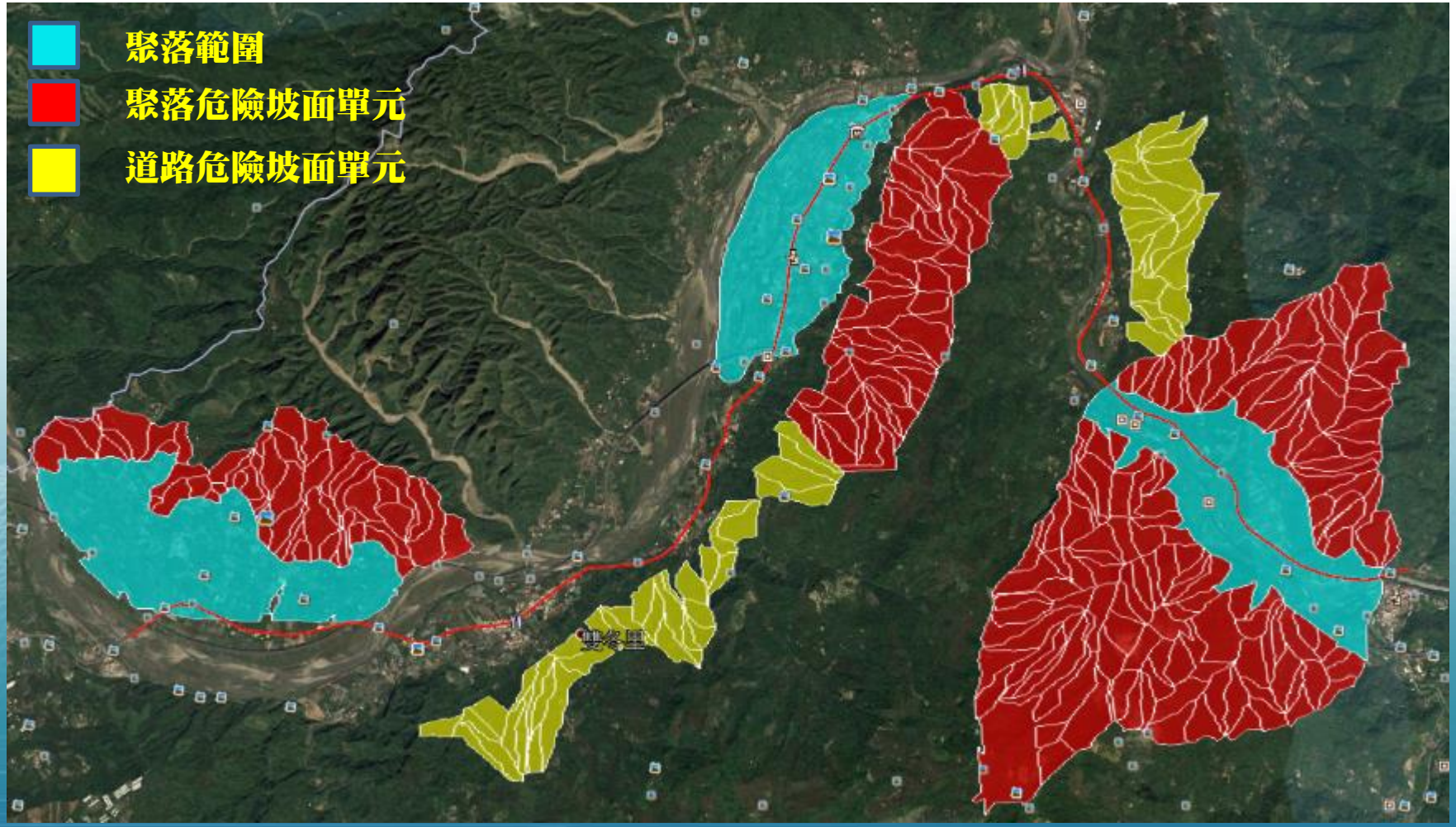
■ 道路沿線二側500公尺範圍內之坡面單元



- 為一對多的關係
- 建立道路屬性資料
- 建立道路阻斷易損

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

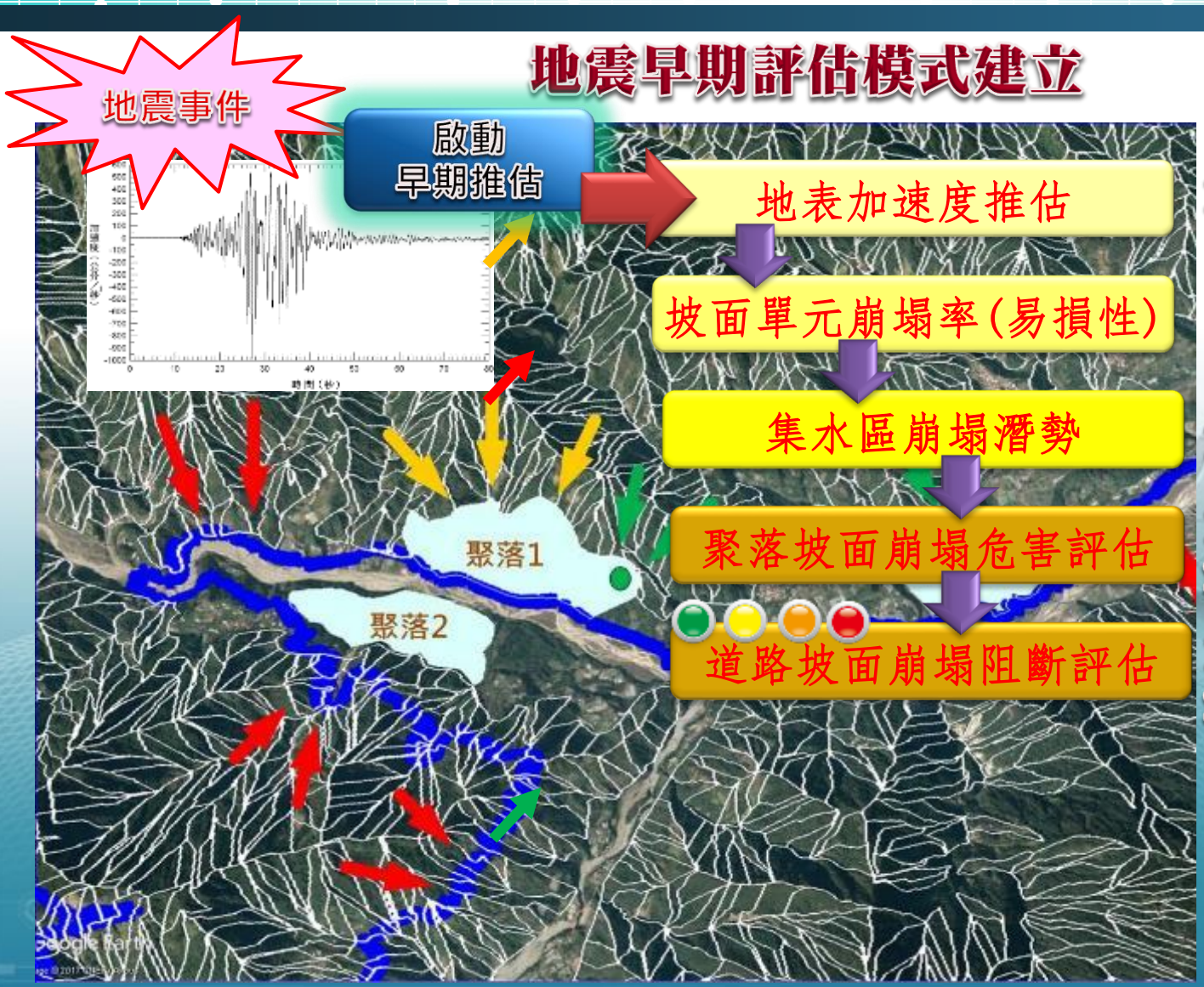
■ 示範區危險坡面劃定



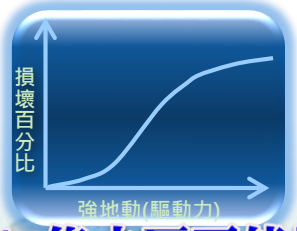
逢甲大學 Feng Chia University

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

地震早期評估模式建立



1. 依震度衰減率推估



1. 集水區可能崩塌量

1. 是否具崩塌
2. 計算崩塌危

$$I = \frac{N_1}{N_0}$$

1. 路段阻斷之易損性
2. 路段阻斷危害潛勢值

逢甲大學 Feng Chia University

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

一、事件規模

■ 九二一地震事件(歷史地震)

百年餘年來在臺灣發生的最嚴重地震事件（地震規模7.3，北緯23.85度，東經120.82度，震源深度8.0km），其震源機制主要是由車籠埔斷層的破裂所造成。

■ 彰化斷層事件(人工地震)

假定示範聚落周遭之彰化斷層發生規模7.5，震源深度15km之地震進行模擬，彰化斷層是逆斷層，緊鄰八卦台地的山腳而行，全長約32公里，是現今相當受矚目的高潛勢斷層。

二、地表加速度推估

在示範區聚落中，
平林里震度範圍509.64~563.67cm/s^2
福龜村震度範圍449.76~492.44cm/s^2
大石村震度範圍430.17~459.62cm/s^2
三村里皆屬中央氣象局地震震度分級的7級劇震。

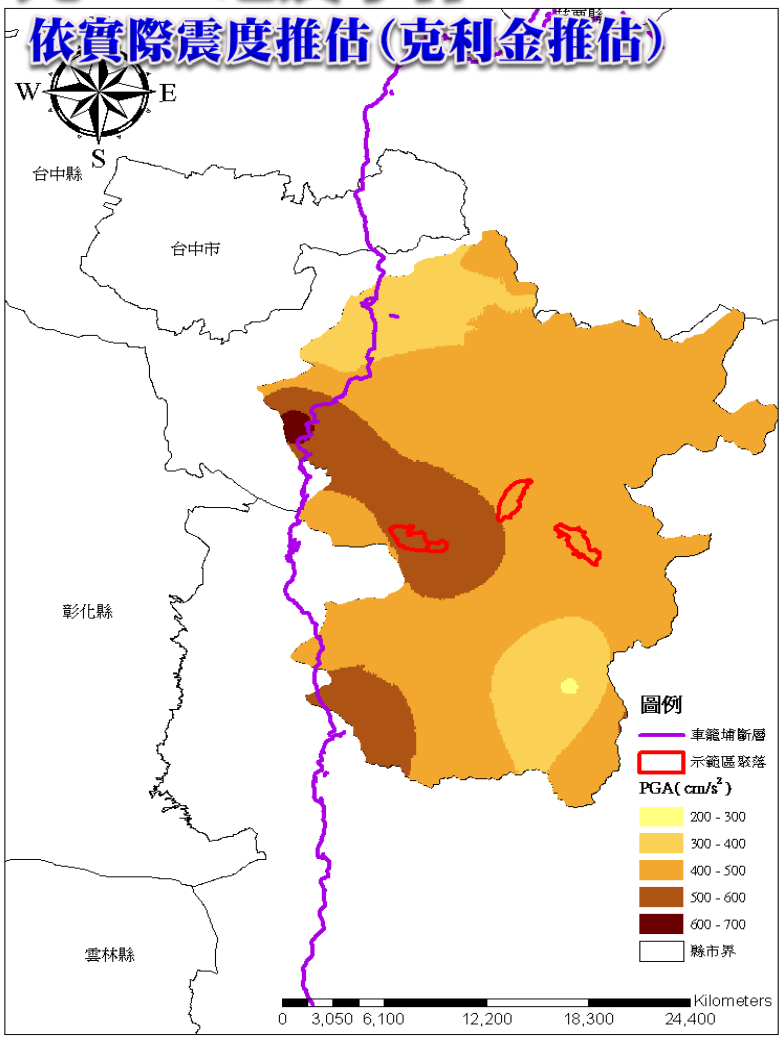
在示範區聚落中，
平林里震度範圍277.51~301.71cm/s^2
福龜村震度範圍242.24~256.16cm/s^2
大石村震度範圍226.23~250.56cm/s^2
三村里皆屬中央氣象局地震震度分級的5級強震至6級烈震。

逢甲大學 Feng Chia University

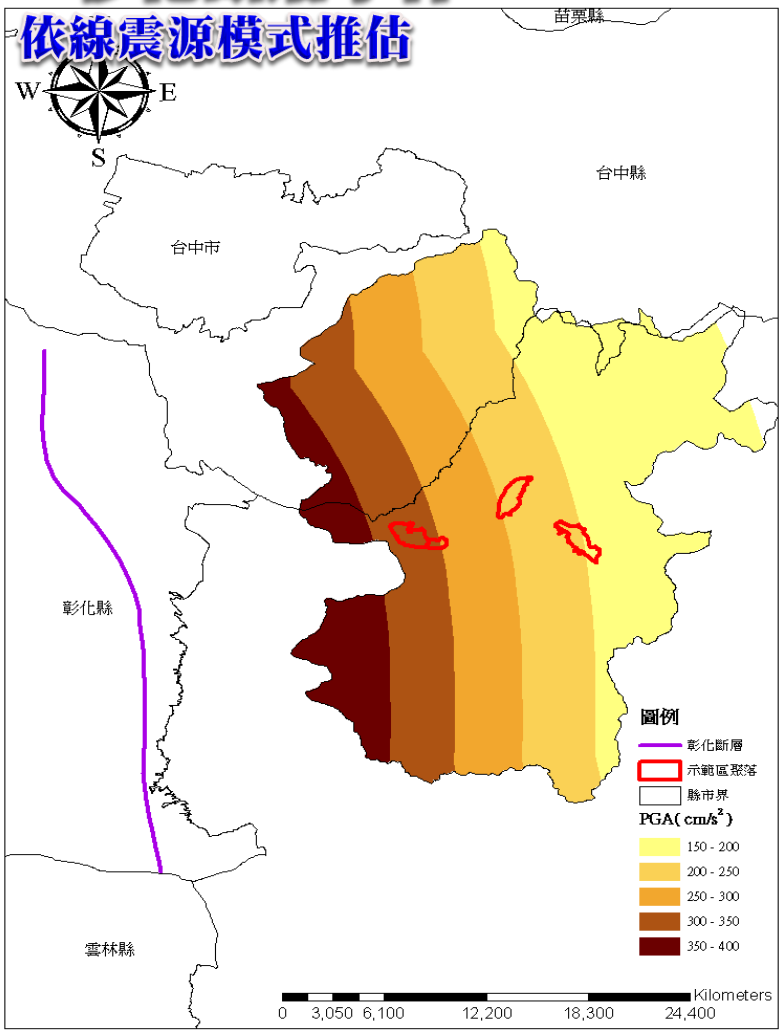
捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

二、地表加速度推估

■ 九二一地震事件



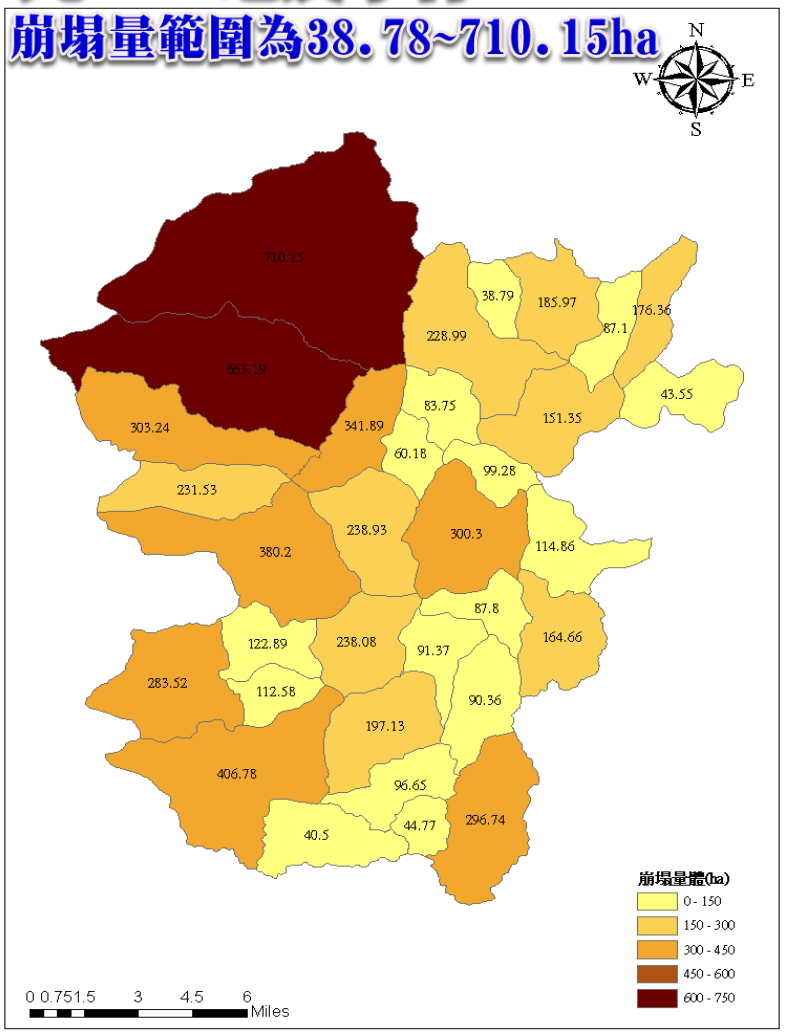
■ 彰化斷層事件



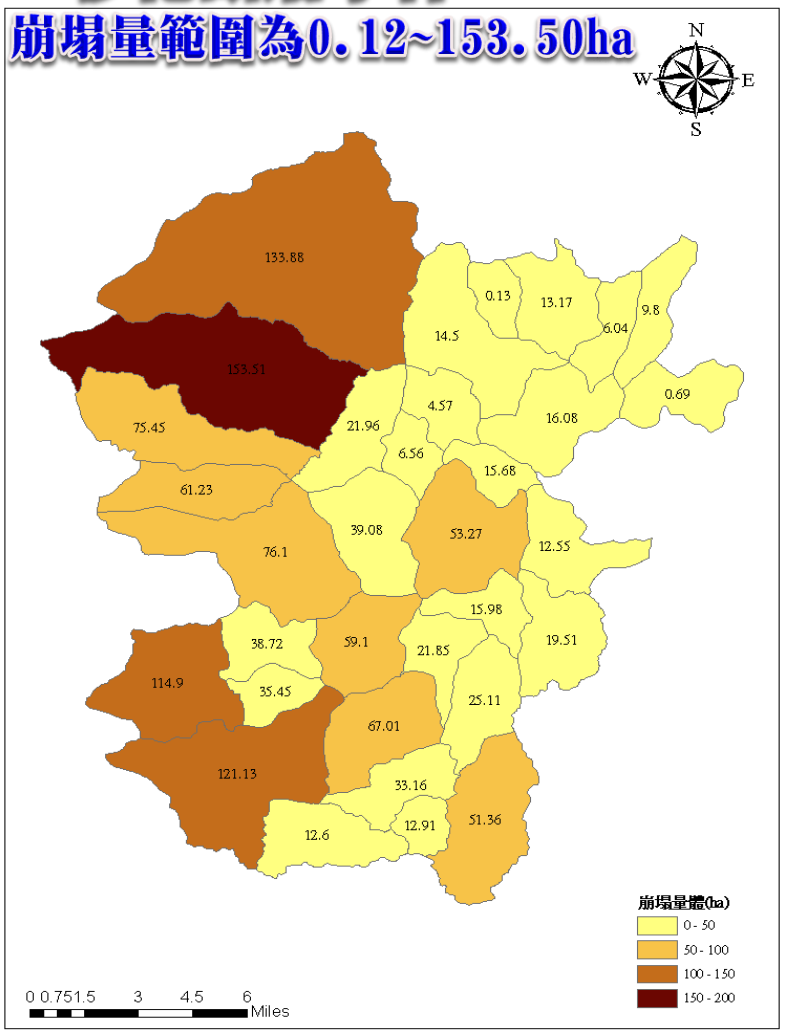
捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

三、集水區崩塌評估

■ 九二一地震事件



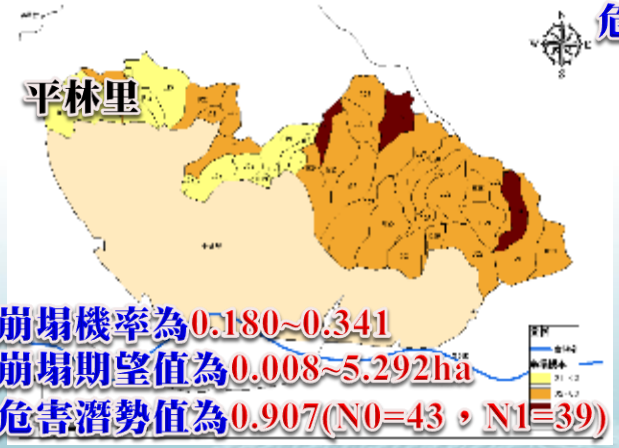
■ 彰化斷層事件



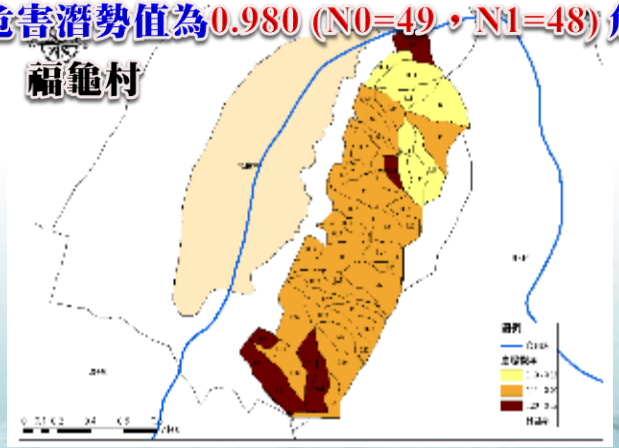
捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

四、聚落之坡面崩塌危害評估

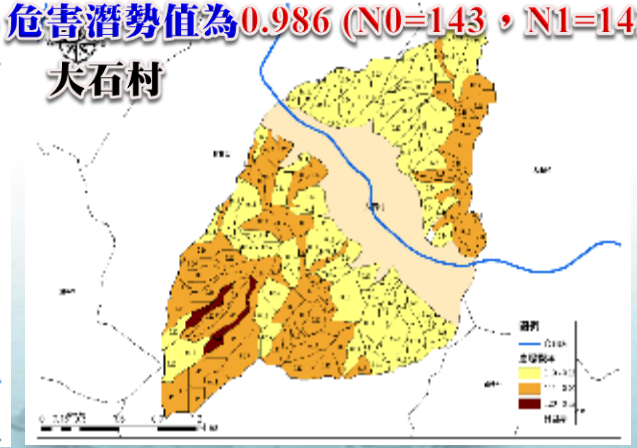
■ 九二一地震事件



崩塌機率為0.180~0.341
崩塌期望值為0.008~5.292ha
危害潛勢值為0.907(N0=43，N1=39)

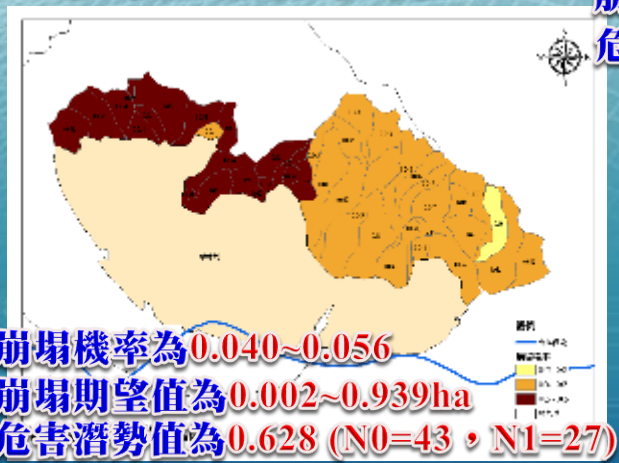


崩塌機率為0.142~0.258
崩塌期望值為0.001~2.444ha
危害潛勢值為0.980 (N0=49，N1=48)

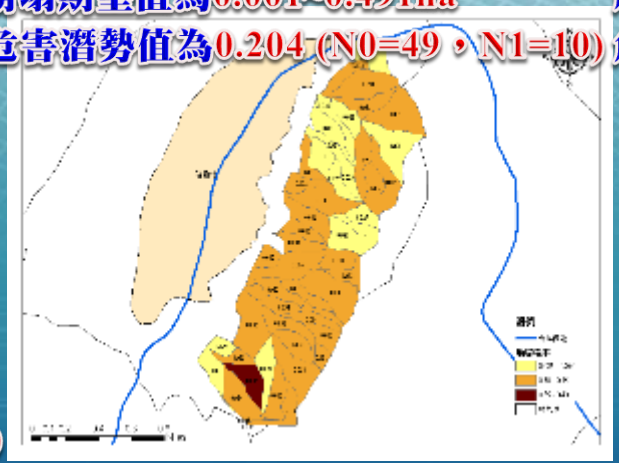


崩塌機率為0.129~0.211
崩塌期望值為0.001~2.716ha
危害潛勢值為0.986 (N0=143，N1=141)

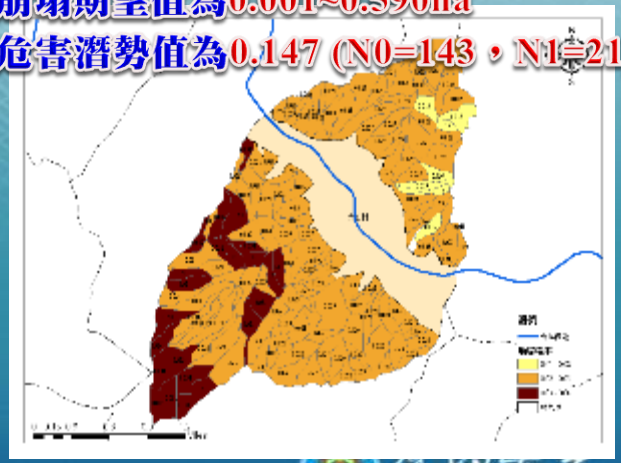
■ 彰化斷層事件



崩塌機率為0.040~0.056
崩塌期望值為0.002~0.939ha
危害潛勢值為0.628 (N0=43，N1=27)



崩塌機率為0.022~0.035
崩塌期望值為0.001~0.491ha
危害潛勢值為0.204 (N0=49，N1=10)

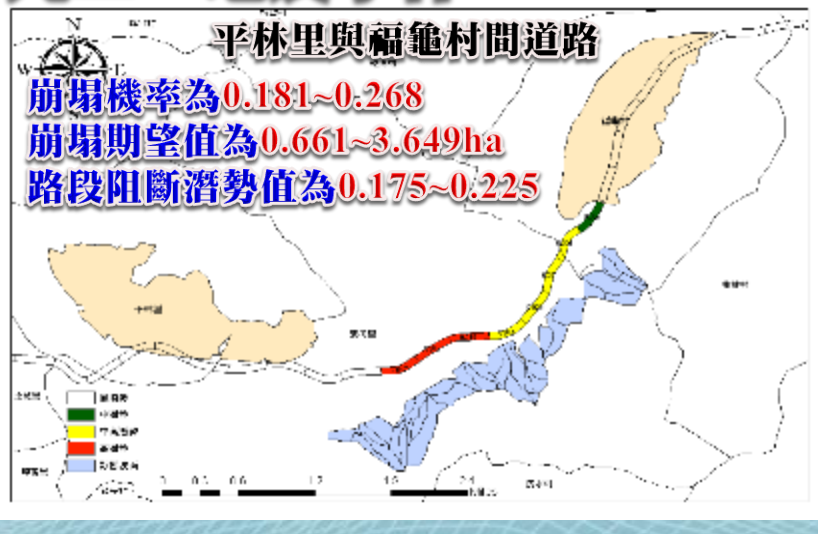


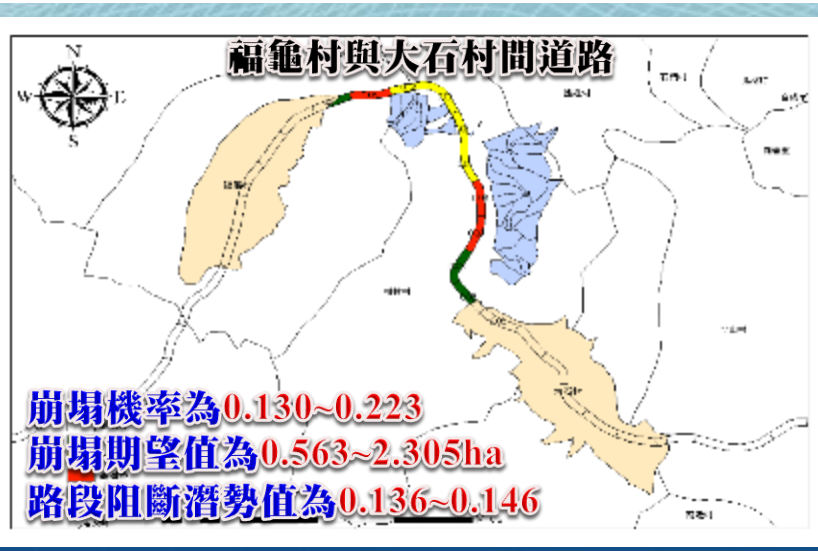
崩塌機率為0.016~0.034
崩塌期望值為0.001~0.590ha
危害潛勢值為0.147 (N0=143，N1=21)

捌、坡地易損性曲線在地震早期評估應用

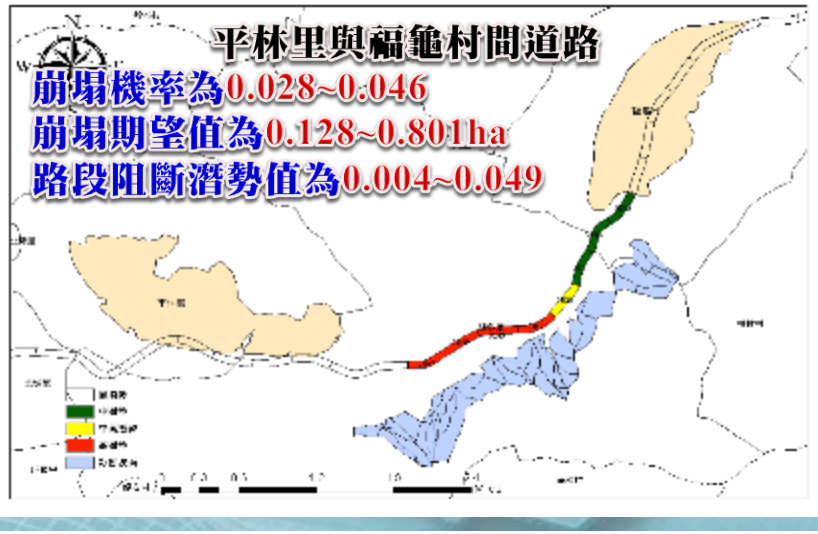
五、道路之坡地崩塌阻斷評估

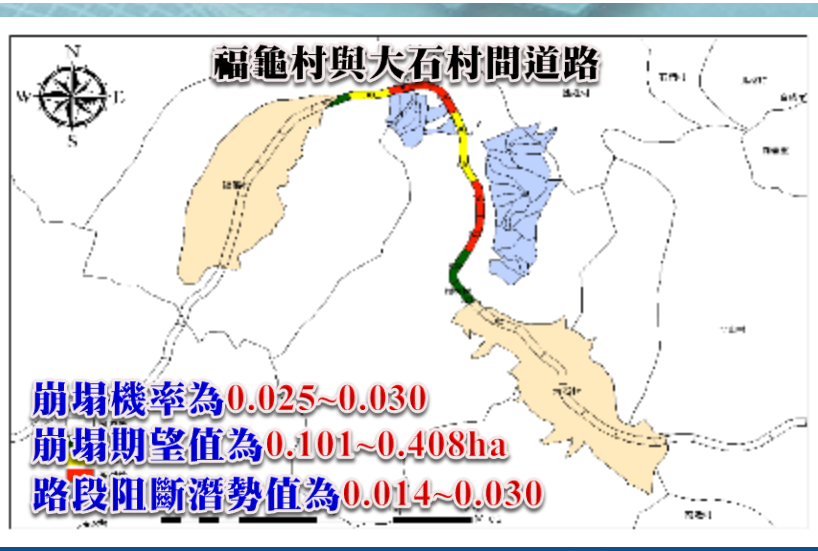
■ 九二一地震事件





■ 彰化斷層事件







敬請指教

謝孟勳　博士/研究副教授
逢甲大學營建及防災研究中心
hsiehmh@fcu.edu.tw