



模擬地震作用下區域液化潛能評估 -以宜蘭縣羅東鎮為例

黃宏謀¹ 林卓君²

1. 國立宜蘭大學建築與永續規劃研究所教授
2. 國立宜蘭大學建築與永續規劃研究所研究生

摘要

地震發生時，含有飽和鬆散砂土層之場址可能會產生土壤液化的現象。有些維生系統涵蓋大片區域，地震可能會在這大片區域上引起多處土壤液化，進而對維生系統造成破壞，因此對一片區域土壤液化潛能的評估是一個值得探討的議題。本研究提供對一個區域評估液化潛能的方法。這方法首先蒐集一個地區的鑽孔資料，並利用地理資訊系統建置鑽孔資料庫。其次考慮影響該地區的震源，設定一個模擬地震，並求得每一鑽孔所在位置之最大地表加速度，接者計算液化潛能指數，判定每一鑽孔所在場址液化潛能的類別，最後利用地理資訊系統的功能製成研究地區的液化潛能微分區圖。本研究以宜蘭縣羅東鎮為例，說明製作液化微分區圖的過程。本研究之成果可供相關單位進行工程或防災規劃的參考。

關鍵詞： 模擬地震、土壤液化、微分區圖



Assessment of Liquefaction Potential in an Area Induced by a Simulated Earthquake - Using Luodong Town, Yilan County as a Case Study

Howard Hwang¹ Juo Jiun Lin²

1. Professor, Graduate Institute of Architecture and Sustainable Planning, National Ilan University
2. Graduate Student, Graduate Institute of Architecture and Sustainable Planning, National Ilan University

ABSTRACT

In this study, we propose a method for assessment of soil liquefaction in an area caused by a simulated earthquake. In this method, we first compile boring logs data for a study area. Next, we define a simulated earthquake based on seismic sources that may affect the area, estimate peak ground acceleration at the sites where boring logs are available, and then assess liquefaction potential using the method recommended by Iwasaki and others. Finally, we use a GIS technique to generate a liquefaction potential microzonation map. As an illustration, we generate a microzonation map for Luodong Town, Yilan County. The result from this study can be used as a resource for engineering planning or disaster prevention planning.

Keywords: Simulated earthquake, Soil liquefaction, Microzonation map

一、前言

強烈地震發生時，斷層附近之地盤可能隆起或下陷，山坡地可能崩塌，廣大區域的地表會產生振動，另外含有飽和鬆散砂土層之場址可能會產生土壤液化的現象。土壤液化可能造成噴砂、地盤沉陷與側向滑移等現象。受到土壤液化的影響，建築物可能會倒塌，橋樑可能會傾倒，以及地下維生管線也可能遭受損壞，因為這些損害，可能導致人員傷亡與財產損失。例如，民國 88 年 9 月 21 日在台灣中部發生芮氏規模 7.3 之集集大地震，發生土壤液化的範圍相當廣泛，遍及南投、台中、彰化、雲林等縣市，造成的損害包括台中港碼頭沉箱的外移，員林鎮崙雅里、霧峰鄉四德路與南投縣軍功里等地區之建築物嚴重破壞（黃俊鴻等，2000）。

有些維生系統如道路系統或自來水系統涵蓋大片區域，地震可能會在這大片區域上引起多處土壤液化，進而對這些維生系統造成破壞，因此對一片區域土壤液化潛能的評估是一個值得探討的議題。本研究提供一個在地震發生時對一片區域評估液化潛能的方法，將評估結果製成一個液化潛能微分區圖，此微分區圖可作為相關單位進行工程或防災規劃的參考。

台灣位於環太平洋地震帶上，由於受到歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的相互碰撞以及沖繩海槽的擴張作用，台灣東部陸地與外海地震發生頻繁，尤其以宜蘭到花蓮外海一帶最為活躍。羅東鎮為宜蘭縣之經濟重鎮，位於第四紀沖積層所覆蓋的蘭陽平原上，且地下水位接近地表面，因此當強烈地震來襲時，羅東鎮可能會產生土壤液化的現象，故本研究以宜蘭縣羅東鎮作為案例來說明所探討之議題。

二、模擬地震與場址最大地表加速度

在研究區域的周圍可能存在有幾個震源，每個震源可能發生地震的大小與頻率皆不盡相同。決定地震大小的方式有兩種，第一種方式係在研究區域周圍的震源中，選定一個對該區域最有影響的震源，決定震源的特性，並且設定一個地震的大小，稱之為模擬地震。第二種方式係考慮地震的不確定性，利用地震危害度

分析來決定地震的大小。對於涵蓋大片區域的維生系統，需要評估在同一地震作用下，整個維生系統受到液化可能的破壞狀態，因此只有模擬地震達到此要求，故本研究利用模擬地震來評估一個區域液化的情形。

當（模擬）地震發生時，地震所釋放之能量會以地震波的形式通過各種地層而傳遞至地表面，引起地表振動。影響地表振動的主要因素為震源特性、路徑效應與場址效應。震源特性包括斷層型態、地震規模與震源深度。路徑效應為地震波在傳遞的過程中會因地層介面的不同而產生折射與反射，進而改變地震波的大小以及行進的方向。場址效應為當地震波接近地表時，若通過之土層較為鬆軟且具有非線性，地震波的大小與頻率內涵會有所改變。在設定的基準地盤種類下，地表振動會因為受到震源特性與路徑效應的影響而產生衰減。多位學者如 Abrahamson and Silva (1997)、Chiou and Youngs (2008) 與簡文郁 (2001) 等都曾提出有關地表振動的衰減公式。簡文郁 (2001) 利用在臺灣地區具有各種地盤種類測站所得到的地震紀錄，推導台灣地區不分地盤條件的最大地表加速度衰減公式如下所示：

$$A = A_0 e^{aM_L} [R + b e^{cM_L}]^{-d} \quad (1)$$

式中，A 為一般地盤之最大地表加速度， M_L 為芮氏規模，R 為場址至震源的最短距離（公里）， A_0 、a、b、c、d 為回歸係數，當計算最大地表加速度時， A_0 為 0.0036944，a 為 1.7537666，b 為 0.1221955，c 為 0.7831508，d 為 2.0564446。

由於場址所屬的地盤種類可能不同於推導最大地表加速度衰減公式時所設定的基準地盤種類，因此在計算場址之最大地表加速度時，需要對用最大地表加速度衰減公式所得之值加以修正，這修正值稱為場址效應修正係數 (Walling et al. 2008)。利用這種方式，場址真正的最大地表加速度可由最大地表加速度衰減公式與場址效應修正係數來求得。

三、土層液化評估

土壤液化係指鬆散的飽和砂性土壤在地震作用下，土壤結構遭到破壞，使得土壤顆粒排列趨於緊密，若土壤裡的孔隙水無法及時排出，孔隙水壓會迅速上

升，導致土壤的有效應力降低，若土壤的有效應力降低趨近於零時，土壤將失去原有的強度及承載能力，這種現象稱為土壤液化。

在評估場址液化時，一般工程界會根據鑽孔資料，利用簡易土壤液化評估方法來判別場址下各土層液化的可能性。目前較常使用的簡易土壤液化評估法包括 Seed 簡易液化評估法 (Seed and Idriss 1971; Youd et al. 2001)、日本道路協會簡易液化評估法 (日本道路協會, 1996) 以及 Tokimatsu 與 Yoshimi 簡易液化評估法 (1983)。Seed 簡易液化評估法由於發展最早且資料最為完整，因此被工程界廣泛使用。

根據 Seed 簡易液化評估方法，地表下某一深度土層之土層抗液化安全係數 FS 的計算式為：

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2)$$

式中，FS 為土層抗液化安全係數，CRR 為土層抗液化強度比值，CSR 為地震所引起的土層反覆剪應力比值。

當地震發生時，土層因地震作用而承受反覆剪應力，地震所引起的土層反覆剪應力比值 CSR 的計算方式如下所示：

$$CSR = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot r_d \quad (3)$$

式中， a_{\max} 為最大地表加速度， σ_v 為垂直總覆土應力， σ'_v 為垂直有效覆土應力， r_d 為土層深度折減係數。

一般而言，土層具有抵抗液化的能力，Seed et al. (1985) 根據長期蒐集世界上地震規模為 7.5 左右的地震案例，建置地震規模 7.5 時土層抗液化強度與正規化標準貫入試驗值 $(N_1)_{60}$ 的關係曲線。Seed et al. (1985) 並認為土層的細粒料含量 (FC) 對土層的抗液化強度有顯著的影響。Youd et al. (2001) 利用細粒料含量將 $(N_1)_{60}$ 修正為含細料含量之正規化標準貫入試驗值 $(N_1)_{60CS}$ ，並建議地震規模 7.5 時土層抗液化強度比值 $CRR_{7.5}$ 可利用下式來計算：

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{[10 \times (N_1)_{60CS} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

當地震規模不為 7.5 時，土層抗液化強度比值 CRR 會與 $CRR_{7.5}$ 有所差異，CRR 與 $CRR_{7.5}$ 的比值稱之為地震規模修正係數 MSF。Youd et al. (2001) 所建議的地震規模修正係數 MSF 之計算式如下所示：

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (5)$$

因此當地震規模不為 7.5 時，土層抗液化強度比值 CRR 可利用地震規模 7.5 的土層抗液化強度比值 $CRR_{7.5}$ 乘以地震規模修正係數 MSF 來求得：

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF \quad (6)$$

Seed 簡易液化評估法係利用土層抗液化安全係數 FS 來判別土層是否會發生液化，當土層抗液化安全係數小於 1 時，判定土層會發生液化，反之，當土層抗液化安全係數大於 1 時，判定土層不會發生液化。

四、場址液化潛能評估

一個場址是由許多土層所組成，若發生液化的土層離地表越近，場址液化的程度就越嚴重，另外，液化土層越厚，場址液化的程度也可能越嚴重，故場址液化的程度是會受到場址下各個可能液化土層的影響。為了探討整個場址的液化情形，一般工程界利用 Iwasaki et al. (1982) 所建議的液化潛能指數 P_L 來評估整個場址液化的程度。

Iwasaki et al. (1982)，藉由深度加權的概念，利用地表下各土層分析得到之抗液化安全係數 FS 值，來求得整個場址的液化潛能指數 P_L ，其計算式如下所示：

$$P_L = \int_0^{20} F(z)W(z)dz \quad (7)$$

式中， P_L 為液化潛能指數， z 為土層距地表之深度， $W(z)$ 為深度權重係數， $F(z)$

為土層抗液化係數，其計算式如下所示：

$$F(z) = \begin{cases} 0 & FS(z) > 1 \\ 1 - FS(z) & FS(z) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

Iwasaki et al. (1982) 只考慮地表下 20 公尺內的液化土層，當液化土層離地表越近，場址液化程度會越嚴重，因此深度加權係數的值應較大，反之，當液化土層離地表越深，深度權重係數應較小。Iwasaki et al. (1982) 所建議的深度權重係數 $W(z)$ 的計算式如下所示：

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (9)$$

Iwasaki et al. (1982) 根據日本地震案例，將場址液化程度分為四級：嚴重液化、中度液化、輕微液化、與無液化，如表 1 所示。

五、液化潛能微分區

單一場址的液化潛能評估，只能判定該地點可能液化的情形，本研究的對象為一個區域，因此需要一個方法把單一場址的液化潛能評估擴展為對一片區域的液化潛能評估。單一場址的液化潛能評估係利用該場址的鑽孔資料，一個鑽孔資料代表該點地表下土層的情形，因為土層的連續性，鄰近的土層可視為與該鑽孔的土層類似，因此可利用該鑽孔資料來代表鄰近範圍的土層。本研究以每一鑽孔為中心，選定一個合理的半徑例如 200 公尺，利用地理資訊系統軟體中環域分析 (Buffer) 的功能向外擴展為一個圓形，並將此圓形內的液化程度視為與該鑽孔的液化程度相同。若兩個不同液化程度的範圍有相互重疊，則將重疊的區域作等分來分離兩個不同液化程度的範圍，如圖 1 所示。如果有局部地區未被劃定任何一種液化程度的範圍，可參考鄰近液化程度的範圍作適當的填補，最後可製一個區域的液化潛能微分區圖。

六、模擬地震作用下區域液化潛能評估

綜上所述，在一個模擬地震作用下，本研究評估一個區域液化潛能的步驟如

下：

1. 蒐集一個地區之鑽孔資料，並將資料不全的鑽孔剔除，然後利用地理資訊系統建立為鑽孔資料庫。
2. 考慮影響該地區的震源，設定一個模擬地震。
3. 利用適當的地表振動衰減公式與場址效應修正係數求得在模擬地震作用下每一鑽孔所在位置的最大地表加速度。
4. 利用簡易土壤液化評估法以及液化潛能指數之計算方法，判定每一鑽孔所在場址可能液化的程度。
5. 以每一鑽孔為中心，選定一個合理的半徑，利用地理資訊系統軟體中 Buffer 的功能向外擴展為一個圓形。
6. 將不同液化程度範圍的重疊區域作等分割分，若有局部地區未被劃定任何一種液化程度的範圍，可參考鄰近液化程度的範圍作適當的填補。
7. 利用上述方式，製作模擬地震作用下該區域之液化潛能微分區圖。

七、案例說明

羅東鎮為宜蘭縣之經濟重鎮，位於蘭陽平原上（圖 2）。蘭陽平原屬於沖積平原，地下水位接近地表面，且含大量之砂性土壤，當強烈地震發生來襲時，羅東鎮可能會產生土壤液化的現象，因此本研究以羅東鎮為例，來說明對一區域作液化潛能微分區的方法。

7-1 羅東鎮鑽孔資料庫

本研究從宜蘭縣鑽孔資料庫（趙紹錚等，2002；簡連貴等，2003），挑選出位於羅東鎮內之鑽孔資料共 140 孔，其中 4 孔資料不全，剔除資料不全的鑽孔後得到 136 孔的鑽孔資料。國家地震工程研究中心在羅東鎮的兩個強地動觀測站進行鑽探，本研究也取得這兩個強地動測站的鑽孔資料。此外，本研究從鑽探公司取得 13 孔位於羅東鎮之鑽孔資料。綜上所述，本研究共搜集得到羅東鎮 151

孔鑽孔資料。每個鑽孔資料的內容包括鑽孔編號、鑽孔座標、地下水位深度以及每一土層的描述與分類等資料。本研究利用地理資訊系統 ArcView 將這些鑽孔資料建立為鑽孔資料庫，鑽孔位置的分佈如圖 3 所示。

7-2 模擬地震之設定

台灣位於環太平洋地震帶上，由於受到歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的相互碰撞以及沖繩海槽的擴張作用，台灣東部陸地與外海地震發生頻繁，尤其以宜蘭到花蓮外海一帶最為活躍。黃宏謀等（2007）根據宜蘭地區的地震活動情形，定出五個可能影響宜蘭地區的地震帶（圖 4）並決定這五個地震帶的震源參數（表 2）。在這五個地震帶中，由於沖繩海槽地震帶 A 段穿過羅東鎮（圖 5），若此地震帶發生地震，可能對羅東鎮有嚴重的影響，故本研究選擇沖繩海槽地震帶 A 段作為模擬地震之震源。如表 2 所示，此模擬地震的芮氏規模為 6.7，震矩規模為 6.9，震源深度為 10 公里。

7-3 模擬地震作用下場址最大地表加速度之計算

本研究利用位於羅東鎮東安里光榮路旁的一處場址（編號 129）為例，來說明模擬地震作用下計算該場址最大地表加速度的方法。本研究所選擇的場址與沖繩海槽地震帶 A 段的關係如圖 5 所示。利用地理資訊系統軟體量得場址到斷層線的水平最短距離為 1.74 公里，沖繩海槽地震帶 A 段的震源深度為 10 公里，因此震源最短距離 R 經計算後約為 10.15 公里。利用簡文郁（2001）地表振動衰減公式（式 1）求得場址在一般地盤之最大地表加速度 A 為 0.345g。

根據場址的土層厚度與標準貫入試驗值 N 等資料，利用建築物耐震設計規範中土層平均標準貫入試驗值的方法，判定場址的地盤種類為第三類地盤。在場址為第三類地盤的條件下，本研究利用葉錦勳等（2004）所建議的最大地表加速度 PGA 與 A 值之對應關係，求得場址最大地表加速度 a_{\max} 為 0.376g。利用上述方式，本研究計算羅東鎮每一鑽孔所在位置的最大地表加速度。

7-4 模擬地震作用下場址液化潛能評估之計算

本研究仍利用位於羅東鎮東安里光榮路旁的場址，來說明模擬地震作用下評估場址液化潛能的方法。場址的地層如圖 6 所示，本研究首先利用 Seed 簡易液

化評估法 (式 2 - 式 6) 計算場址下每一土層的抗液化安全係數 FS, 再利用 Iwasaki et al. (1982) 所建議的液化潛能指數的計算方式 (式 7 - 式 9), 求得場址的液化潛能指數 P_L 為 7.83。由於 P_L 值介於 5 至 15 之間, 根據表 1, 可判定在沖繩海槽 A 段芮氏規模 6.7 之模擬地震作用下, 這場址可能會發生中度液化。

本研究計算羅東鎮每一鑽孔的液化潛能指數, 並判別各鑽孔可能的液化程度。判別結果, 31 個鑽孔為嚴重液化, 75 個鑽孔為中度液化, 32 個鑽孔為輕微液化, 13 個鑽孔為無液化, 這些鑽孔的分佈如圖 7 所示。

7-5 羅東鎮液化潛能微分區圖

本研究以每一鑽孔為中心並選定半徑 200 公尺, 利用地理資訊系統 ArcView 中 Buffer 的功能向外擴展為一個圓形, 此圓形內的液化程度視為與該鑽孔的液化程度相同。若兩個不同液化程度的範圍有相互重疊時, 將重疊的區域作等分來分離兩個不同液化程度的範圍, 有些地區未被劃定為任何一種液化程度, 則參考鄰近液化程度作適當的填補, 部分地區如農地無法取得鑽孔資料, 本研究將這些地區訂為未定區。利用上述過程, 羅東鎮液化潛能微分區圖如圖 8 所示。

八、結論

強烈地震發生時, 含有飽和鬆散砂土層之場址可能會產生土壤液化的現象。有些維生系統如道路系統或自來水系統涵蓋大片區域, 地震可能會在這大片區域上引起多處土壤液化, 進而對這些維生系統造成破壞, 因此對一片區域土壤液化潛能的評估是一個值得探討的議題。本研究提供對一個區域評估液化潛能的方法, 將該地區的液化潛能分為幾種類別, 然後製作液化潛能微分區圖。本研究之成果可供相關單位進行工程或防災規劃的參考。

參考文獻

日本道路協會, (1996), 「道路橋示方書 (V 耐震設計篇) · 同解説」, 社團法人日本道路協會。

黃俊鴻、楊志文、譚志豪、陳正興, (2000), “集集地震土壤液化之調查與分析”, *地工技術*, 第 77 期, 第 51-64 頁。

黃宏謀、許智豪、陳國誠，（2007），“宜蘭地區地震帶與震源參數之評估”，**國立宜蘭大學工程學刊**，第 3 期，第 57-68 頁。

葉錦勳、簡文郁、鍾立來，（2004），“台灣震災早期評估系統之研發與應用”，**中國土木水利工程學刊**，第十六卷，第四期，第 609-620 頁。

趙紹錚、徐輝明、邱佳琪、吳佳容，（2002），“宜蘭地區液化潛能及沉陷量評估”，**液化潛能評估方法及潛能圖之製作研討會論文集**，國家地震工程研究中心，台北，台灣，第 G1-G10 頁。

簡文郁，（2001），「考慮特徵地震與場址效應的地震危害度分析」，**研究報告 NCREE-01-036**，國家地震工程研究中心，台北，台灣。

簡連貴、林敏清、陳怡伶，（2003），「全國液化基本圖之建置－台北縣、基隆市和宜蘭縣」，**研究報告 NCREE-03-003**，國家地震工程研究中心，台北，台灣。

Abrahamson, N. A., and Silva, W. J., (1997), “Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes,” *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 94-127.

Chiou, B. S. J., and Youngs, R. R., (2008), “An NGA Model for the Average Horizontal of Peak Ground Motion and Response Spectra,” *Earthquake Spectra*, Vol. 24, Issue 1, pp. 173-215.

Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K., (1982), “Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes,” *Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Southampton, pp. 925-939.

Seed, H. B., and Idriss, I. M., (1971), “Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273.

Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y., (1983), “Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content,” *Soil and Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74.

Walling, M., Silva, W., and Abrahamson, N., (2008), “Nonlinear Site Amplification Factors for Constraining the NGA Models,” *Earthquake Spectra*, Vol. 24, Issue 1, pp. 243-255.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dorby, R., Finn, W. D. L., Jr., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe II, K. H., (2001), “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833.

表 1 液化潛能指數與場址液化程度之關係

P_L 值範圍	場址液化程度
$P_L \geq 15$	嚴重液化
$5 < P_L \leq 15$	中度液化
$0 < P_L \leq 5$	輕微液化
$P_L = 0$	無液化

表 2 宜蘭地區地震帶之震源參數 (黃宏謀等, 2007)

震源	斷層種類	斷層 長度 (km)	斷層開裂 方位角 (°)	震央位置		震矩 規模 (M_w)	芮氏 規模 (M_L)	震源 深度 (km)
				經度(°)	緯度(°)			
沖繩海槽 地震帶 A 段	正斷層	35	60	121.869	24.742	6.9	6.7	10
沖繩海槽 地震帶 B 段	正斷層	50	90	122.266	24.820	7.1	6.8	10
蘇澳地震帶	平移斷層	10	60	121.799	24.649	6.3	6.2	7
蘇澳花蓮近海 地震帶	逆斷層	100	25	121.652	24.015	7.4	7.0	10
蘇澳花蓮外海 地震帶	逆斷層	55	125	122.030	24.367	7.1	6.8	10

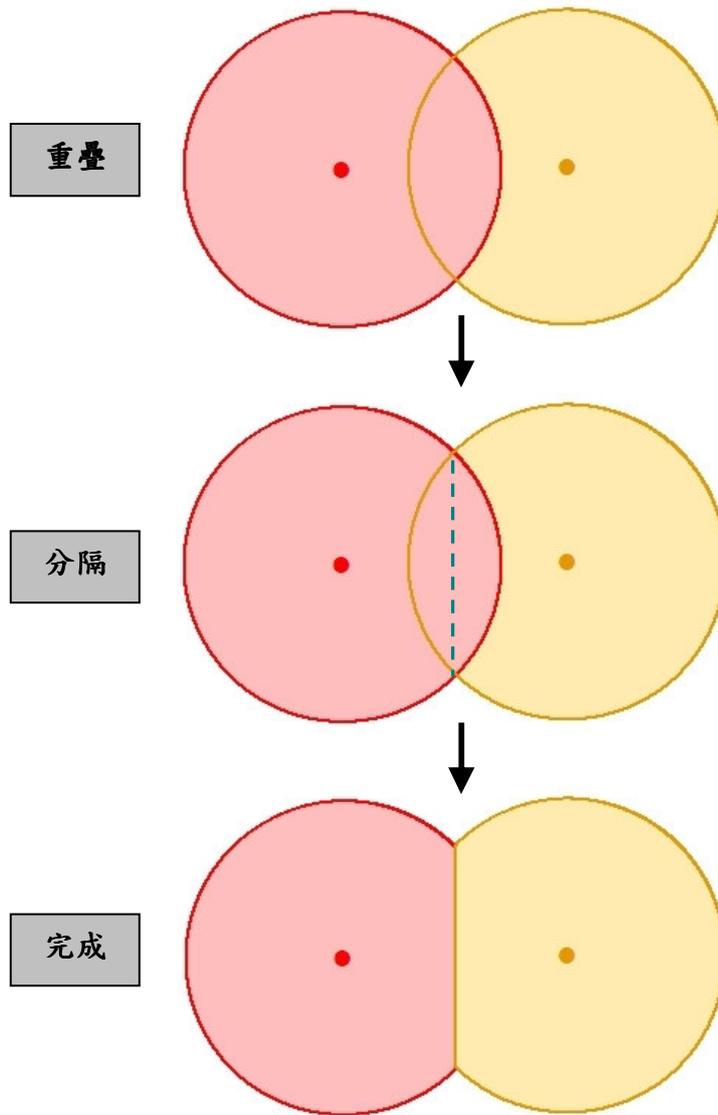


圖 1 不同液化程度範圍重疊區之劃分流程圖

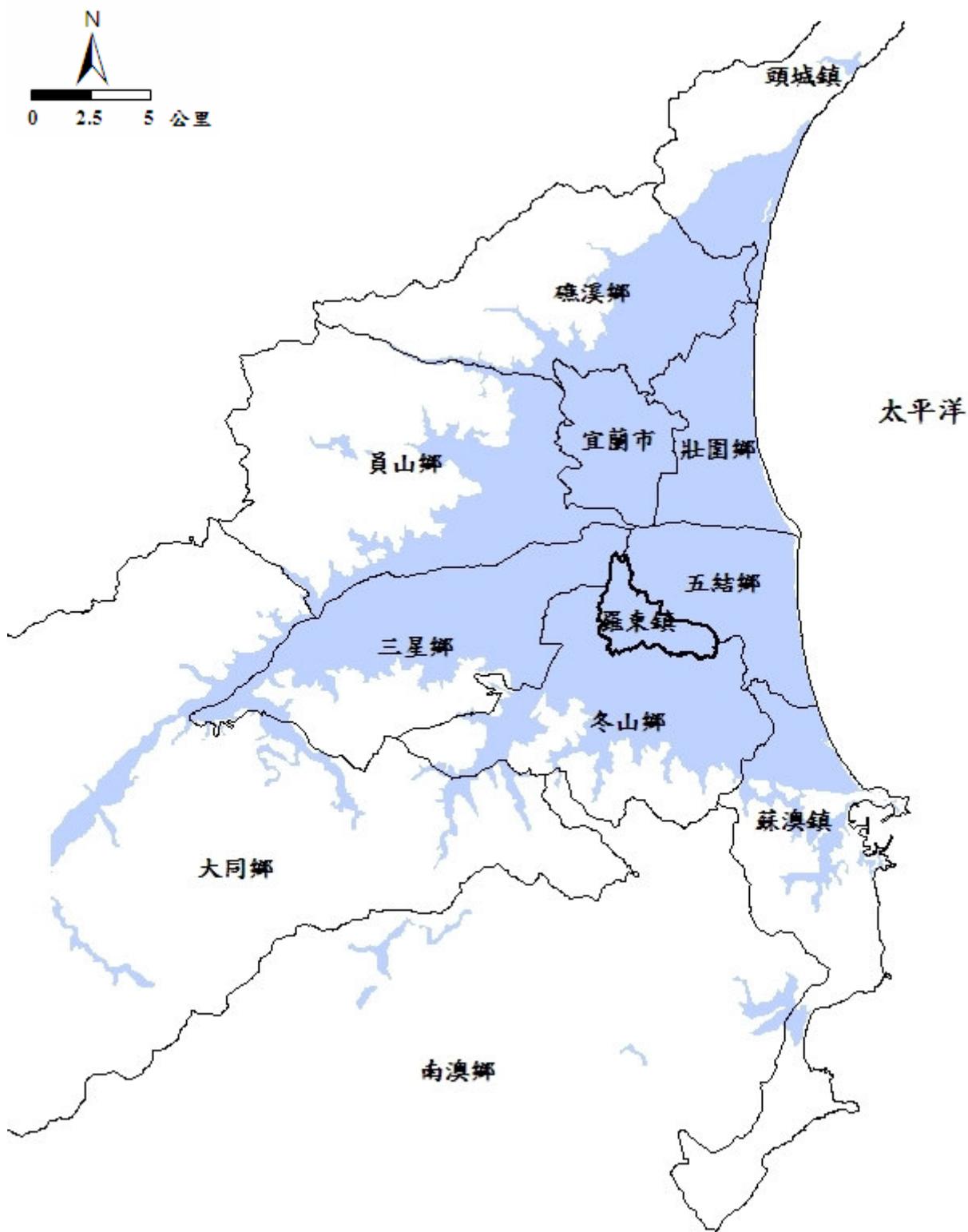


圖 2 羅東鎮與蘭陽平原之位置關係圖

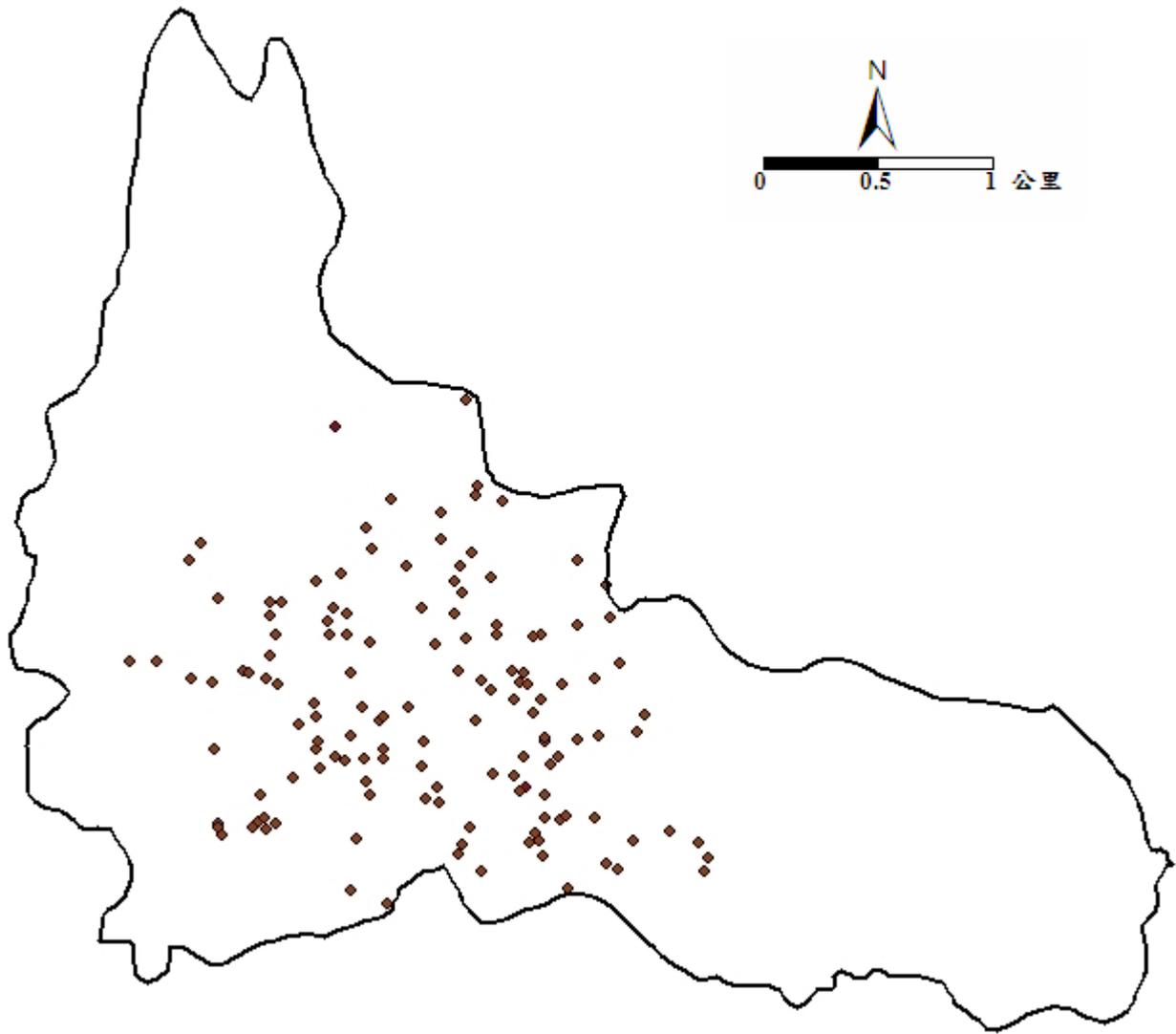


圖 3 羅東鎮鑽孔分佈圖

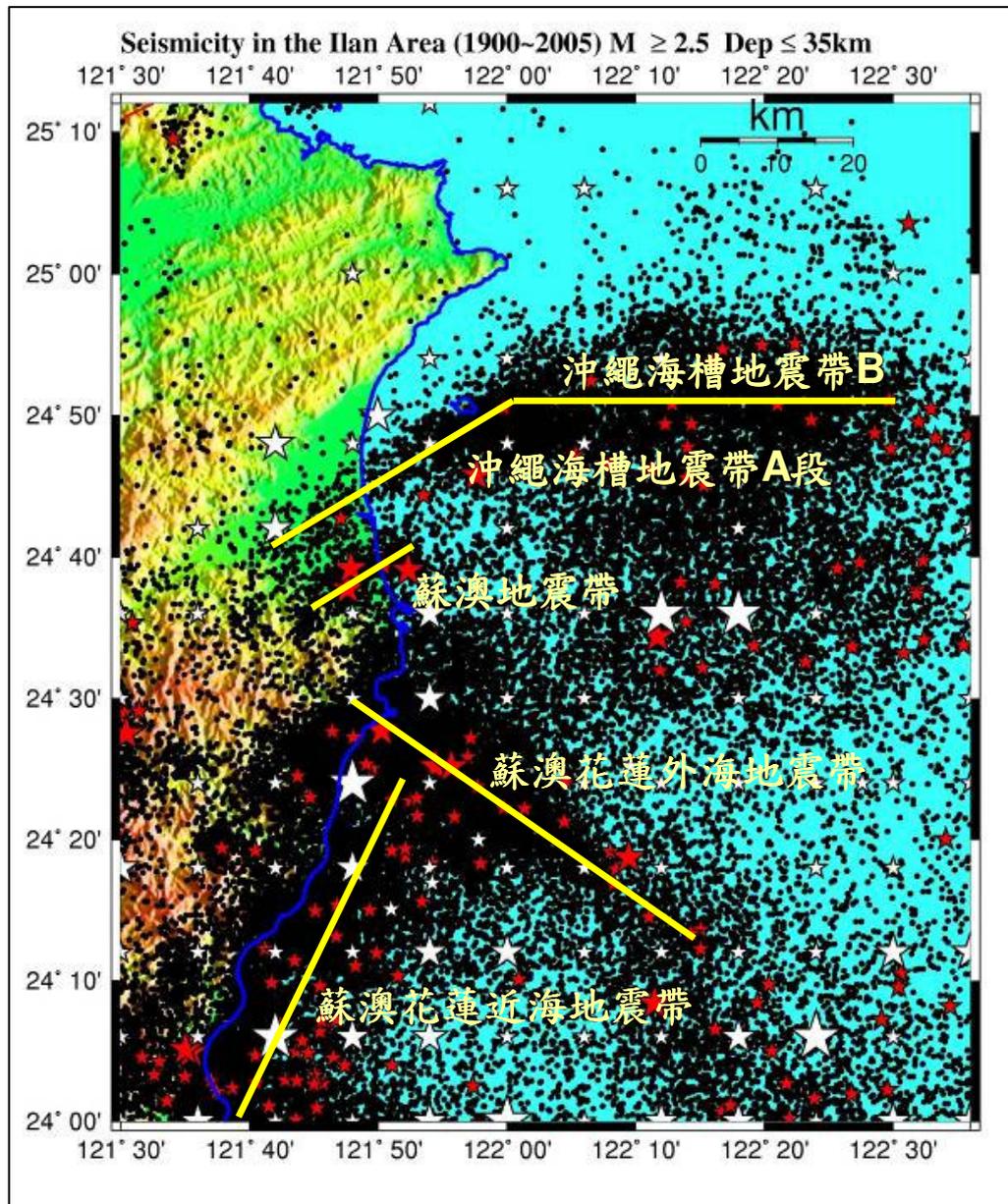


圖 4 影響宜蘭地區之地震帶 (黃宏謀等, 2007)



圖 5 沖繩海槽地震帶 A 段與場址關係圖

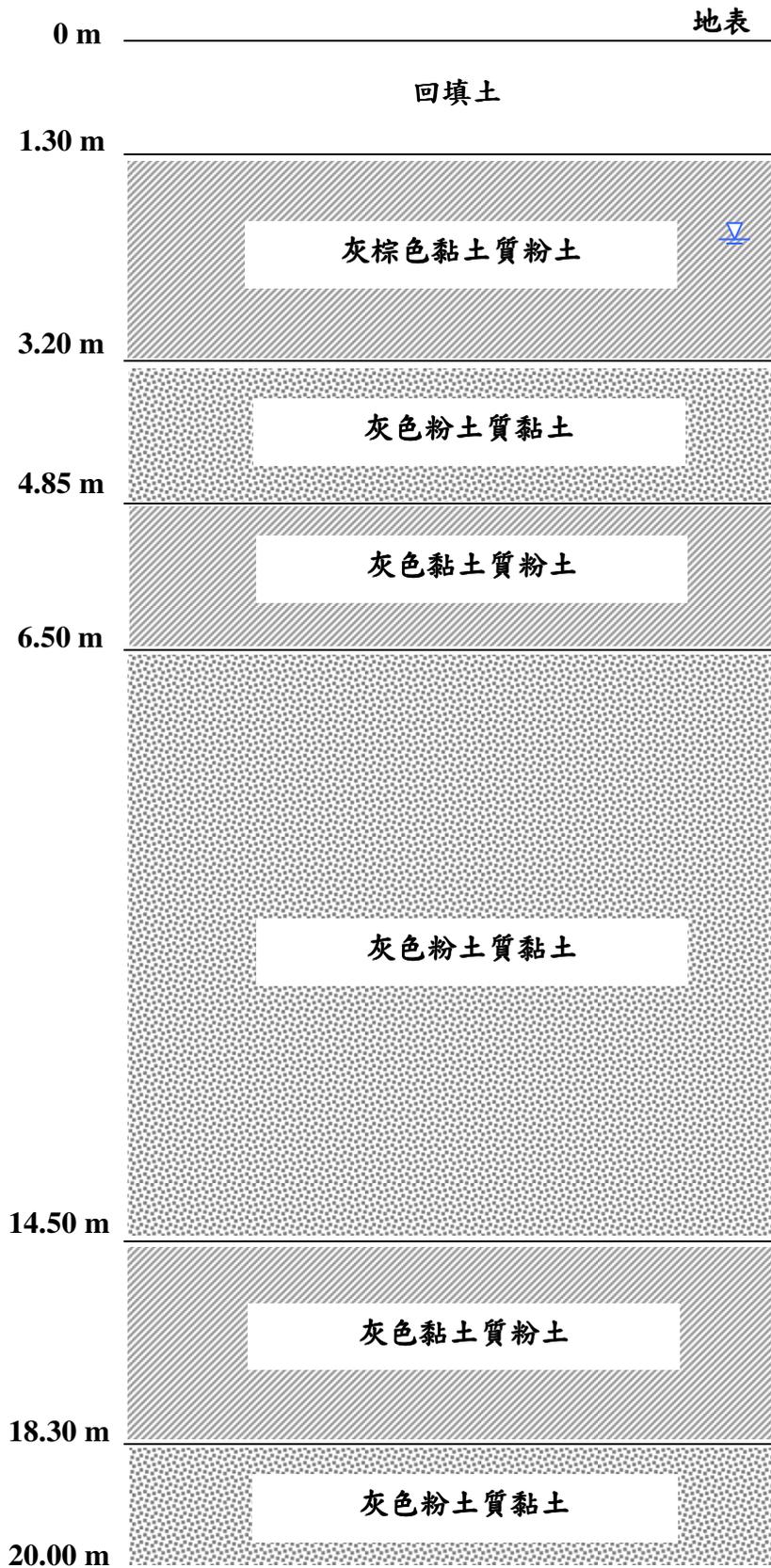


圖 6 鑽孔編號 129 之地層圖

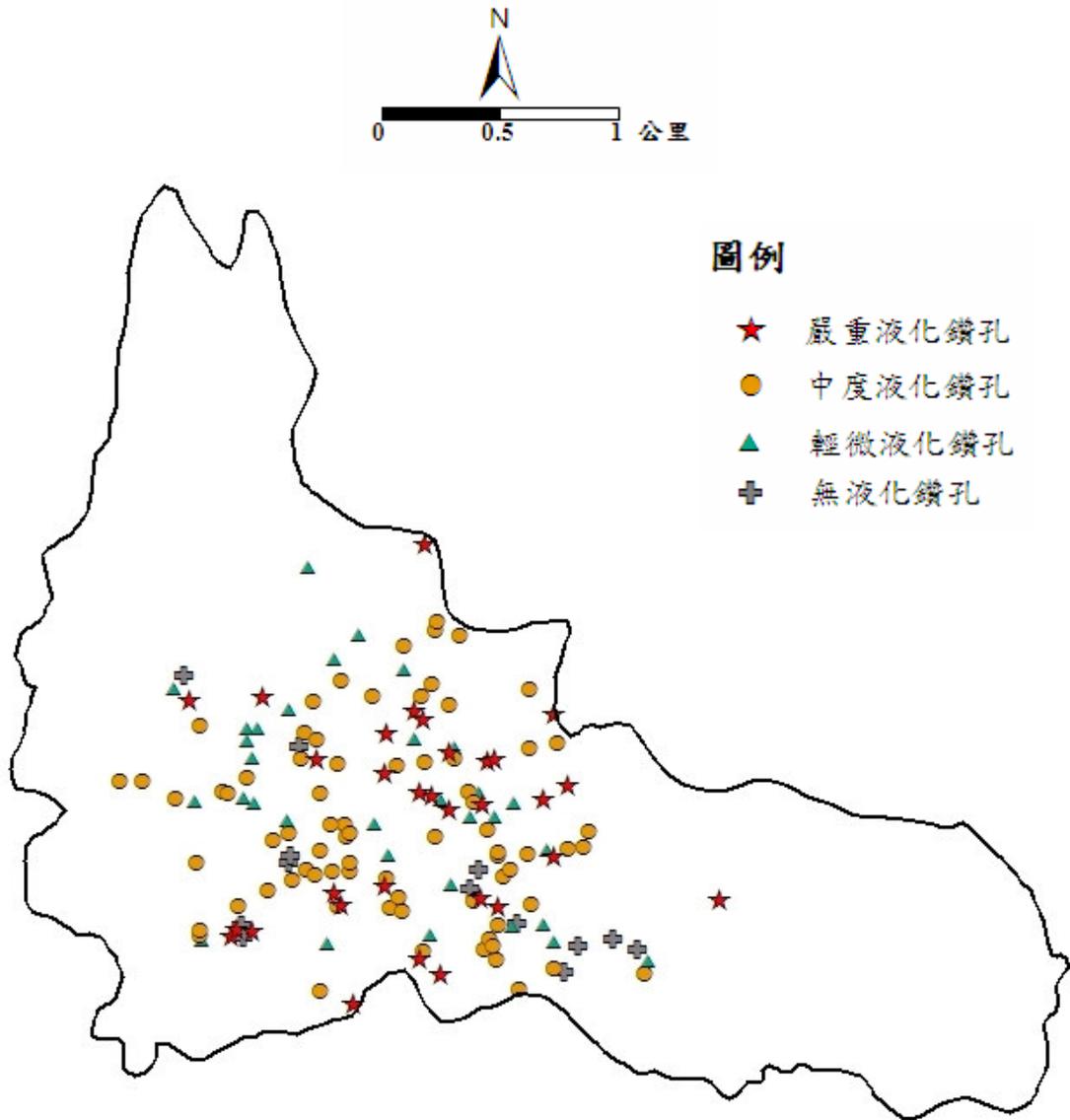


圖 7 沖繩海槽地震帶 A 段芮氏規模 6.7 之地震作用下羅東鎮各級液化鑽孔分佈圖

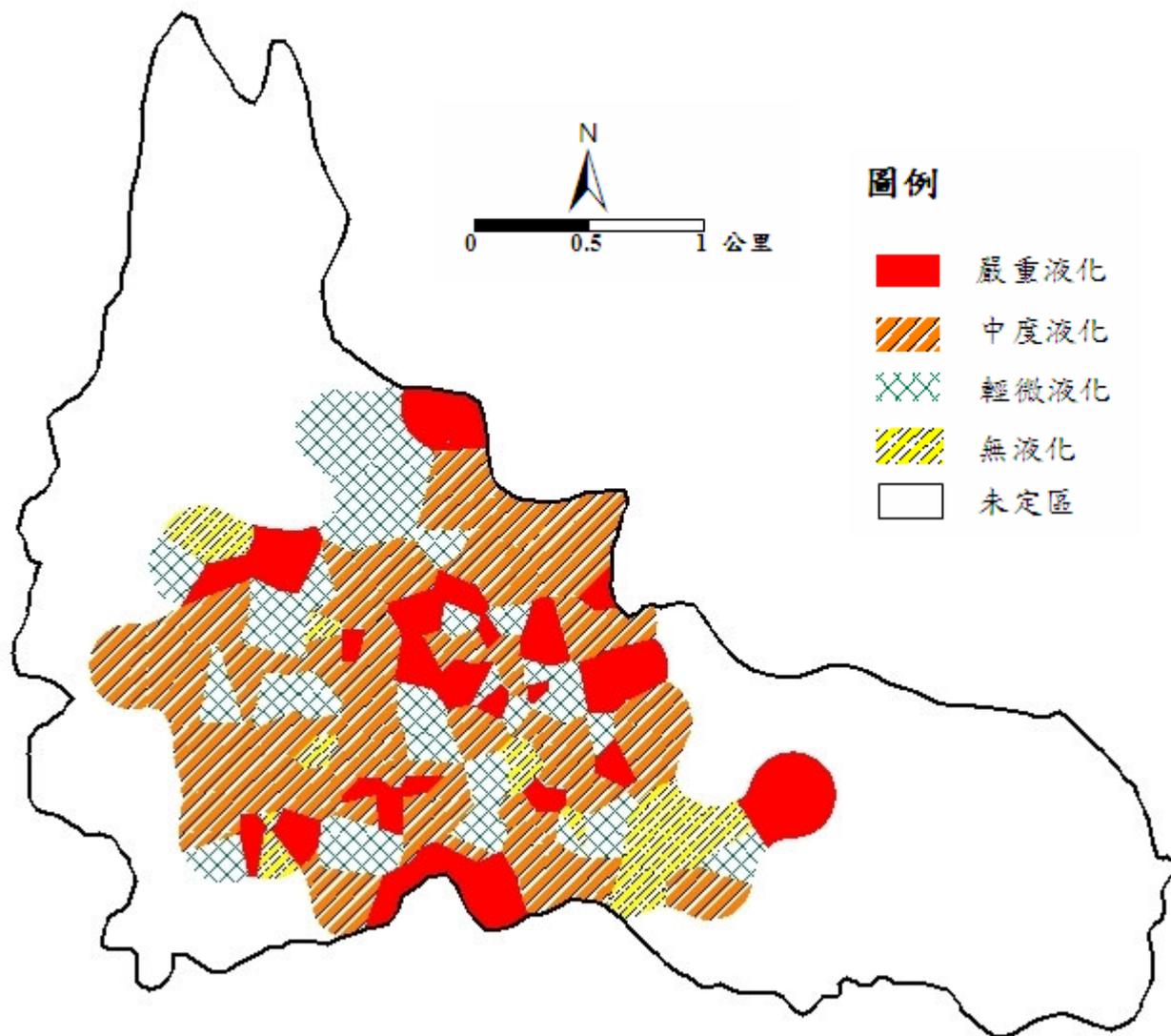


圖 8 沖繩海槽地震帶 A 段芮氏規模 6.7 之地震作用下羅東鎮液化潛能微分區圖