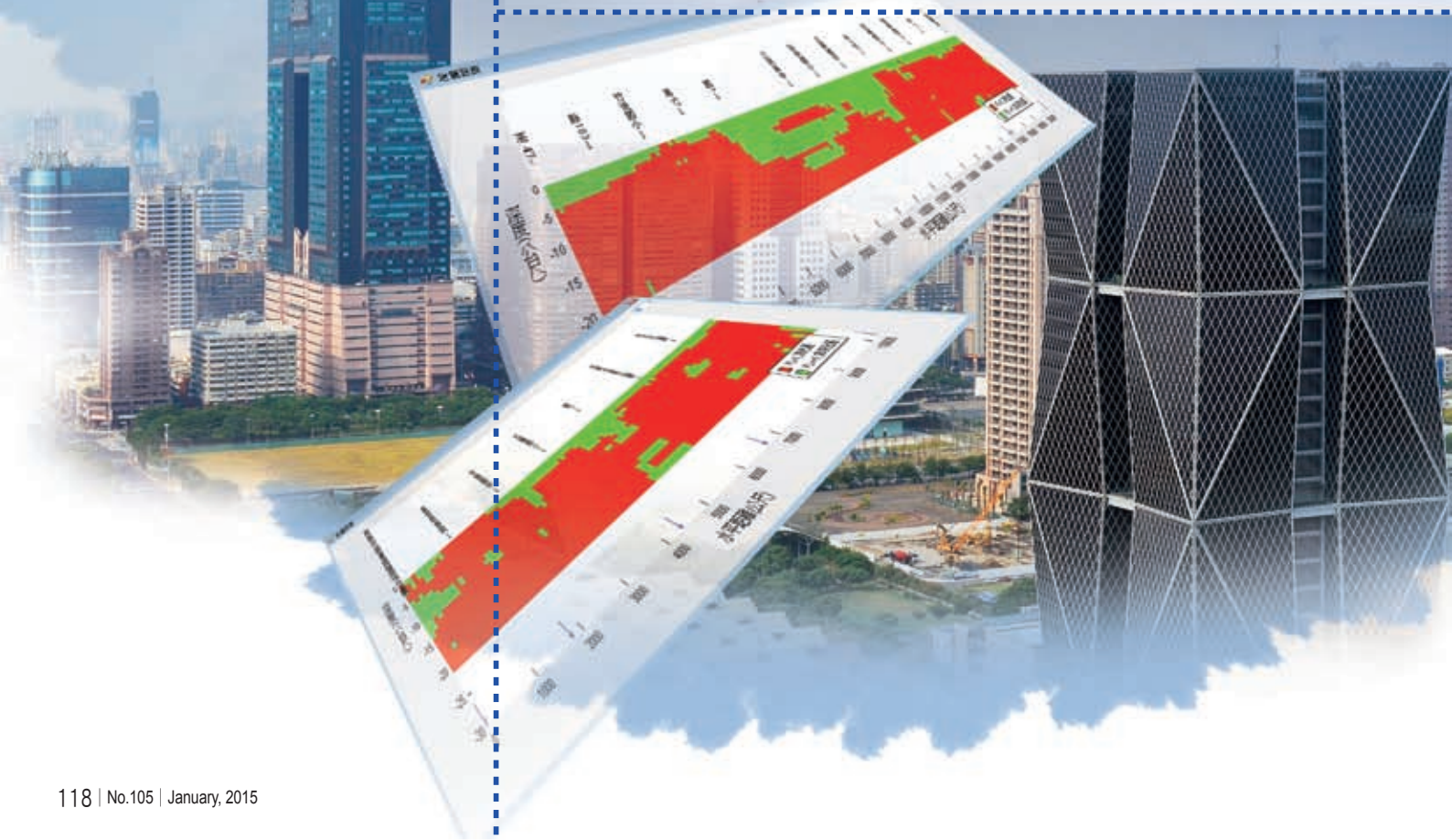
高雄都會區三維地質防災資料庫建置與分析

關鍵詞：高雄都會區、地質分區、地質防災、三維地質模型

經濟部中央地質調查所／組長／費立沅 ❶
經濟部中央地質調查所／簡任技正／紀宗吉 ❷
經濟部中央地質調查所／技士／蘇品如 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／技術經理／吳文隆 ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／謝文誠 ❺
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／楊智堯 ❻



摘 要 ABSTRACT

高雄都會區主要為高雄市平原區域範圍，包含楠梓、左營、三民、鼓山、梓官、橋頭、大社、仁武、鳥松、鹽埕、新興、前金、苓雅、前鎮、旗津、小港及鳳山等行政區，計畫面積約310平方公里，人口密集、產業發展集中。從都市防災的觀點，人口密集區域對於災害的敏感度相對較高，尤其如地震、地盤沉陷等地質災害而言，通常具有區域發生之特性，一旦發生災害，將會造成重大損失，因此針對都會區內的災害防治或應變工作相當重要。本計畫蒐集高雄都會區內共4655孔工程鑽井，依據鑽井資料顯示高雄都會區沖積層之分布狀況及組成，最接近地表的現代沖積層為各項工程建設常遭遇之地層，其厚度在各分區分布不等。現代沖積層沉積物沉積時受原始地形、相對海水面變化以及河系影響，形成低至中塑性之泥層，以及泥質砂或砂礫等交互層次的土層，因此高雄都會區部分區域先天上已屬於相對軟弱、容易發生地質災害區域。本計畫在高雄都會區已建立都會區之三維防災地質資料庫，內容包含土壤液化、軟弱地盤等地質災害潛勢分析資料，其成果除了可呈現平面的災害潛能外，亦能呈現不同深度土層之潛勢分析結果，可做為高雄都會區防災與工程規劃之參考。

壹、高雄都會區沖積層分布特性

高雄為臺灣南部都會中心，自民國99年底高雄縣市合併後，其行政區面積大幅增加，約2946平方公里，目前人口約277萬人(資料來源：高雄市民政局)，其中以平原地區(即高雄都會區)人口相對密集，其範圍大致北以梓官、橋頭區為界，向南至小港區，東至西部麓山帶前緣及鳳山丘陵西緣，西至海岸線止。高雄都會區內平原上聳立著兩座石灰岩丘，分別為半屏山及壽山，半屏山外形略呈紡錘狀，呈東北-西南向，過去曾有石灰岩開採歷史，最高海拔約180公尺左右，在稜線的西北側有斷崖，呈單面山地形；壽山最高點為三角山，海拔356公尺，稜線位於中央，西翼為斷崖，斷崖以東為單面山地形。(如圖1)

依陸挽中等(2005)對臺南高雄地區地下水文地質概況研究中，將臺南、高雄平原區分為

圖1 高雄都會區區域地質圖

臺南地區、岡山地區及高雄地區三個主要構造單元，而高雄都會區則位於岡山地區及高雄地區之構造單元，岡山地區構造高區以東北-西南走向的中洲台地為主，西北側低區連接至臺南地區邊緣，東南側為另一沉積谷地；高雄地區位於半屏山隆起珊瑚礁與鳳山隆起珊瑚礁之內，中間為古高雄谷地沉積區，延伸至外海接上高雄海底峽谷。高雄都會區平原可以半屏山及壽山這兩個高地劃分成南北兩個主要沉積盆地，半屏山及壽山以北屬岡山地區構造高區東南側之沉積谷地，以南則屬古高雄谷地沉積區。

在半屏山及壽山北側僅涵蓋岡山地區東南側沉積谷地的一部分，此區的沖積層沉積厚度向西及向北增厚。而半屏山及壽山南側則涵蓋整個古高雄谷地沉積區，由沖積層分布及基盤的位置約略看出古高雄谷地的形貌，河谷谷底約略由高雄市新莊國小位置向西南至中洲國小附近出海，但古高雄谷地實際分布範圍，仍須配合其他調查資料才能正確的描繪。

高雄都會區內沖積層分布特性，在半屏山及壽山的北側之沉積谷地與南側古高雄谷地明顯不同，岡山地區東南側之沉積谷地內沖積層可明顯分為兩部分，即上部砂層與下部厚泥層；而古高雄谷地內之沖積層則以砂泥互層的分布，不易看出其岩性分布的規則性。

為能針對高雄都會區之沖積層工程地質狀況與地工特性作整體的規劃與掌握，乃依據研究成果及蒐集之資料進行地工分區的劃設。本計畫主要研究都會區30公尺內未固結之沖積地層，地質分區圖中將土層種類劃分為：砂(S)、泥(M)、砂夾泥(S/M)、泥夾砂(M/S)及礫石(G)等五種，土層厚度劃分為a：5～10公尺；b：10～20公尺；c：20～30公尺等三種。在地層中砂或泥的厚度小於5公尺，且呈互層的分布時，若劃分的地層厚度中砂層的合計厚度大於50%，則為砂夾泥，反之則為泥夾砂。

參考已完成的地質剖面，並依上述方法將計畫範圍內地表下30公尺內之土層加以分類，則可將鄰近相同分類的地層歸於同一分區，若鄰近地層分類差異甚大，則再參考三維分析模組分析結果及鑽孔柱狀圖來界定分區的界線。

早期對高雄地工分區研究中，其劃分依據包含以行政區、地形、流域等加以劃分，依行政區的劃分雖最為方便，但同一個行政區內可能受不同沉積環境的影響會有不同的地質及地

表1 地質分區特性簡化表

地質分區	微分區	地表下30公尺內沉積物組成	工程地質特性
典寶溪(D)	D1	上部砂層大於20公尺，下部泥層	高液化潛勢，全區地層軟弱
	D2	上部砂層約10～15公尺，下部泥層	高液化潛勢，全區地層軟弱
	D3	第1層砂及第2層泥略大於5公尺，下方為厚砂層	局部高液化潛勢，全區地層軟弱
	D4	表層及底層為泥，夾厚大於10公尺砂層	全區地層軟弱
	D5	第1層砂及第2層泥略大於5公尺，下方為厚砂層	局部中液化潛勢，全區地層軟弱
後勁溪(H)	H1	上部砂層，下部厚泥層大於20公尺	中液化潛勢，全區地層軟弱
	H2	厚砂層大於>30公尺	西側高液化潛勢，全區地層軟弱
	H3	上部砂層約10～15公尺，中間夾泥層，底層為大於5公尺砂層	高液化潛勢，除東側外，其餘地層軟弱
	H4	上部砂，下部泥，厚度相當	全區地層軟弱
	H5	上部砂層大於20公尺，下部礫石	西側高液化潛勢且地層軟弱

接下頁↓

地質分區	微分區	地表下30公尺內沉積物組成	工程地質特性
愛河(L)	L1	上部砂夾泥層，下部砂層約10～15公尺	局部中液化潛勢，全區地層軟弱
	L2	上部泥層大於10公尺，中間夾砂層，底層為大於5公尺泥層	南側高液化潛勢，全區地層軟弱
	L3	上部泥層，下部厚砂層大於20公尺	局部高液化潛勢，全區地層軟弱
	L4	上部泥層，下部砂層，厚度相當	中液化潛勢，全區地層軟弱
	L5	第1層泥及第2層砂略大於5公尺，下方為厚泥層	南側地層軟弱
	L6	上部泥層大於20公尺，下部砂層	西側局部地層軟弱
	L7	上部砂夾泥層，下部砂層約10～15公尺	西側局部地層軟弱
前鎮河(C)	C1	厚砂層大於30公尺	北側高液化潛勢，全區地層軟弱
	C2	第1層砂及第2層泥略大於5公尺，下方為厚砂層	局部中液化潛勢，全區地層軟弱
	C3	上部泥層，下部厚砂層大於20公尺	除鄰鳳山丘陵地區外，其餘地層軟弱
	C4	表層及底層為泥，夾厚15～20公尺砂層	北側地層軟弱
	C5	上部泥層，下部砂層，厚度相當	低液化潛勢，無軟弱地盤

工性質，若以單一特性做為該分區代表，可能不甚恰當，因此以地形或流域分區是較為適合做為分區的方式，同一地形其地質條件往往較為相近，而同一流域在不同的河段可能劃分不同沉積環境。本計畫位於平原區地形，地表上地形變化不大，因此本計畫的地質分區以流域做為劃分的基礎，當計畫範圍內分區均已完成後，再依所屬的流域進行流域分區。

本計畫將高雄都會區由北而南劃分為典寶溪、後勁溪、愛河及前鎮河等4大分區，並再細分22個微分區，地質分區特性簡化表詳表1，地質分區詳圖2。

貳、高雄都會區三維防災地質資料庫

本計畫之工程鑽井資料，主要來自地調所工程地質探勘資料庫(Geo2010)，該資料屬於Access資料庫系統。本計畫系統目前設計為單機版之系統，採用之空間資料庫為ArcMap之Personal GeoDatabase，做為本系統之資料庫管理，並可與大型資料庫如SQL資料庫進行資料整合及資料交換，亦具備後續擴充之需求。

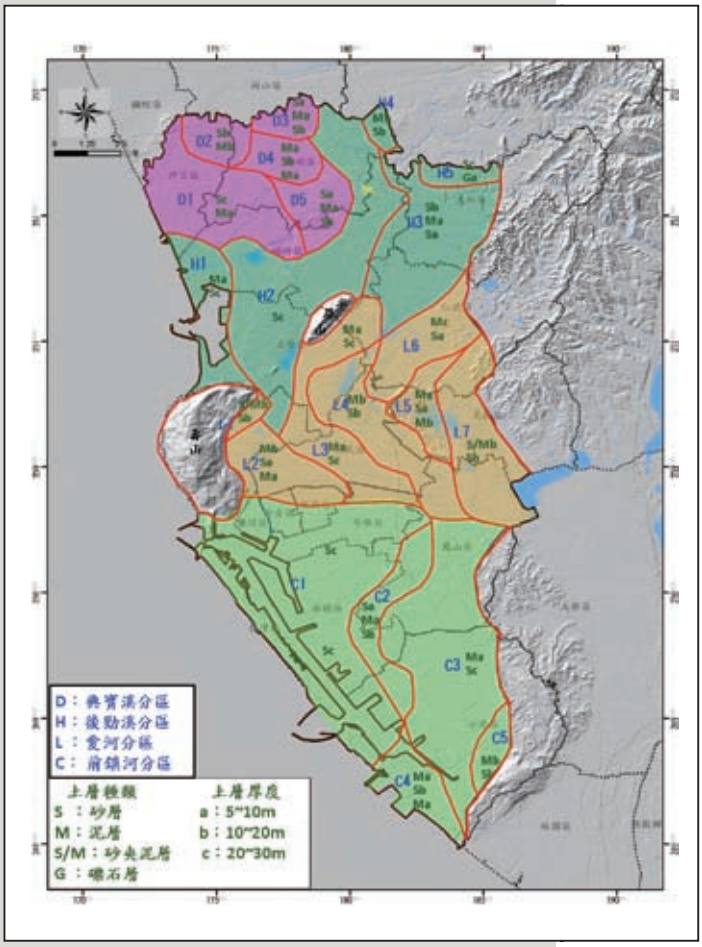


圖2 地質分區圖

由於系統是透過工程地質探勘資料庫、補充調查之地質資料，及蒐集相關災害圖資，目

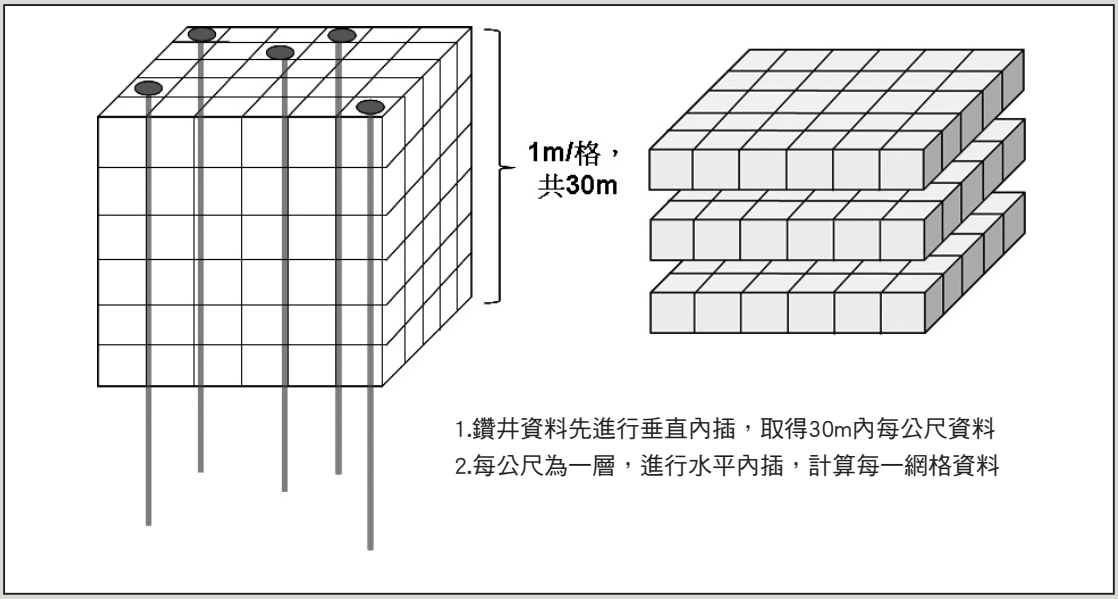


圖3 三維網格分析模式之資料模式示意圖

前對於地質災害之災害類型(軟弱地層、土壤液化)等進行分析，並對地下沉積物分類等，建置防災地質圖基本資料庫。

本計畫資料庫可於GIS分析之評估模式進行土壤液化潛勢分析計算，達到輔助製作防災地質圖之目的。評估模式以三維網格為基礎進行，首先需建立分析區域之三維網格資料庫，再針對每個網格計算，最後可將建置完成之三維網格資料庫，製作地下30公尺內各深度之岩性、剪力波速、抗液化安全係數F_L資料，並可展示平均剪力波速、平均N值、液化潛能指數P_L(最大地震、中小地震、設計地震)等不同之分析結果。

本模式建立三維立體網格資料庫方式進行分析，首先將所蒐集之工程井，依據本計畫所研擬之篩選條件，得出可供分析使用之井錄後，將各井錄之原始資料以加權平均法將資料進行標準化，重新產生以1公尺為間距之地質資料，並建立地下三維立體網格資料庫。最後再將各網格分別計算土壤液化分析模式(P_L值)，以產出土壤液化潛勢分析圖。本模式之優點，可將建置完成之三維網格資料庫，進行廣泛查詢與應用分析主題圖，如製作地下30公尺各深度之PI、γ_t、N、USGS、V_S、F_L，並可展示平均剪力波速、平均N值、液化潛能指數P_L(最大地震、中小地震、設計地震)等分析結果圖，本模式之資料模式概念如圖3。

參、高雄都會區沖積層地質災害潛勢分析

依據民國99年11月6日頒布之地質法，地質災害係指自然或人為引發之地震、海嘯、火山、斷層活動、山崩、地滑、土石流、地層下陷、海岸變遷或其他地質作用所造成之災害。而本計畫針對盆地內第四紀現代沖積層為探討對象，把地質災害之討論焦點放在都會區內土層可能產生之土壤液化及軟弱地盤等課題進行潛勢分析與探討。

一、土壤液化潛能分析

有關土壤液化判定的方法，依據民國90年

內政部「建築技術規則建築構造篇－建築物基礎構造設計規範」及「建築物耐震設計規範及解說」之規定辦理。工址應分別檢核設計地震及中小度地震時工址之地表水平加速度情況下之液化潛能。

土壤於地震作用下是否會發生土壤液化現象，係以地震引致地層中之剪應力是否大於土壤之抗液化強度做為判斷之標準。依新日本道路橋液化評估法(日本道路協會,1996)進行土壤液化判定，抗液化安全係數$F_L = R/L$，其中R為土壤動態剪力強度比，L為地震引致之平均反覆剪應力比，當$F_L<1$時則視為該土層具有液化潛能。

依據土壤液化之基本條件，土壤若具塑性(CL及CH)或具凝聚力則直接判定不具液化潛能。若土壤位於地下水位面以上亦直接判定不具液化潛能。而針對土壤液化損害評估方法則參考日本Iwasaki et al.(1982)所提之土壤液化潛能指數P_L來進行分析。

除了土壤特性之外，地下水位對於液化評估影響亦大，地下水位愈高，則可能發生土壤液化的範圍亦增加。然而，地下水位資料會隨著工址位置不同而不同，也會隨著季節性以及人為擾動(如施工抽水、鑽探回水等)影響其觀測水位。為避免所採用水位資料受到上述因素影響其代表性，本計畫以經濟部水利署長期觀測地下水位作為液化潛能分析之基本資料。

依據民國100年「建築物耐震設計規範及解說」，本計畫計畫範圍為高雄都會區，各地震微分區採用之地震力係數如表2所示。

表2 高雄都會區各微分區之地震力係數

微分區	S_S^D	S_1^D	S_S^M	S_1^M
仁武區	0.6	0.35	0.8	0.5
鳥松區	0.6	0.35	0.8	0.5
岡山區	0.7	0.35	0.9	0.5
橋頭區	0.7	0.35	0.9	0.5
梓官區	0.7	0.35	0.9	0.5
鹽埕區	0.6	0.35	0.8	0.5
鼓山區	0.6	0.35	0.8	0.5
左營區	0.6	0.35	0.8	0.5
楠梓區	0.6	0.35	0.8	0.5
三民區	0.6	0.35	0.8	0.5
新興區	0.6	0.35	0.8	0.5
前金區	0.6	0.35	0.8	0.5
苓雅區	0.5	0.35	0.7	0.5
前鎮區	0.5	0.35	0.7	0.5
旗津區	0.5	0.35	0.7	0.5
小港區	0.5	0.35	0.7	0.45
鳳山區	0.5	0.35	0.7	0.5

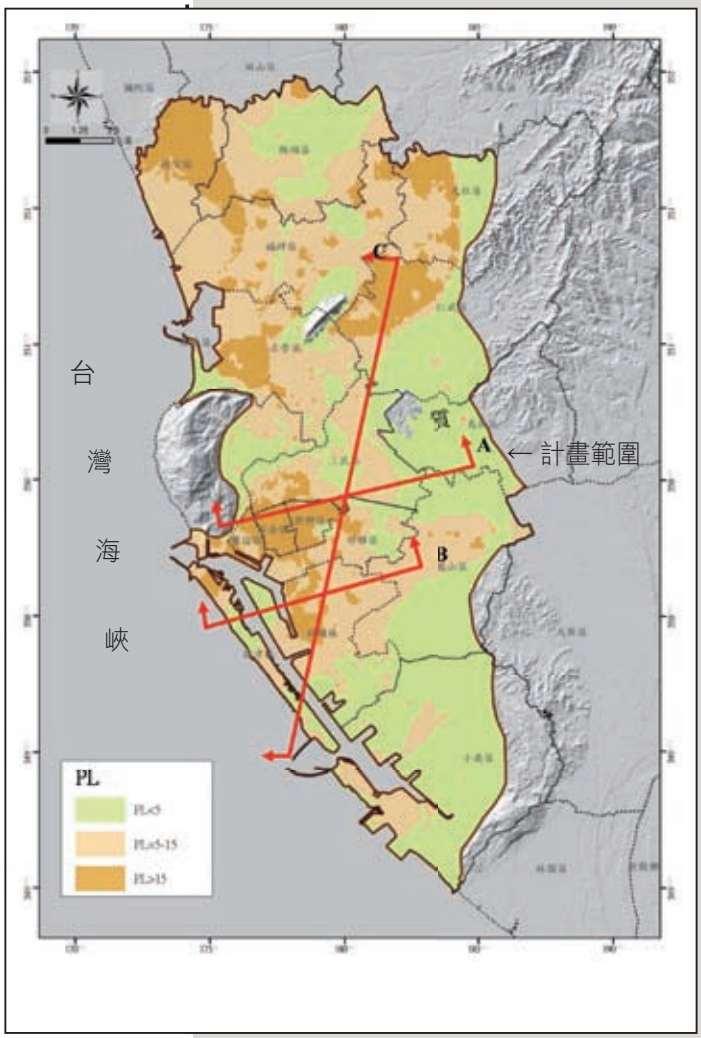


圖4 高雄都會區設計地震(A=0.2~0.28g)液化潛能分布圖

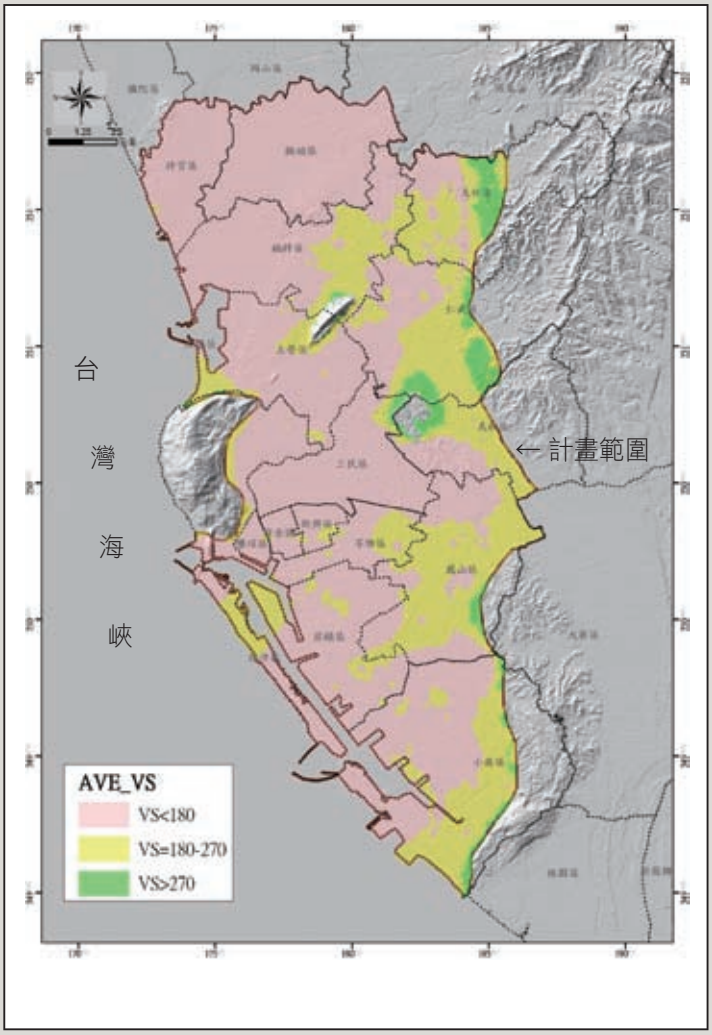


圖6 高雄都會區土層平均Vs值(0~30公尺)等值圖

上述相關分析方法與流程乃參考相關規範進行，此處不再贅述，而僅針對分析結果提出探討。經系統進行土壤液化潛能判定結果詳如圖4所示，另為瞭解地下各深度土層之液化潛勢分布，於都會區中心附近另外展切三個土壤液化潛勢剖面如圖5。本計畫分析結果與前人研究成果比較，其趨勢大致相同，惟局部地區有些微差異，可能是因為分析所使用之鑽井資料以及所分析之數量不同所影響。以本計畫範圍為例，在規範設計地震情況下，計畫範圍內地表加速度為0.2～0.28g，主要高液化潛勢區以沿海區域如梓官、新興、鹽埕、前金等區為主，而局部於仁武區西緣，於較淺部土層為較疏鬆之砂質粉土，因此具有較高之土壤液化潛能。針對設計地震狀態下之分析結果說明如下：

(一) 高液化潛勢區

主要位於高雄中北部沿海區域，包括梓官、左營、鹽埕、前金、新興、苓雅、前鎮區以及大社、仁武區之平原區一帶其淺層沉積物(地表下0～20公尺)以淘選良好之砂質/粉土質土壤為主要之地質材料，土壤結構鬆散、地下水位亦高，為高液化潛勢區。

(二) 中液化潛勢區

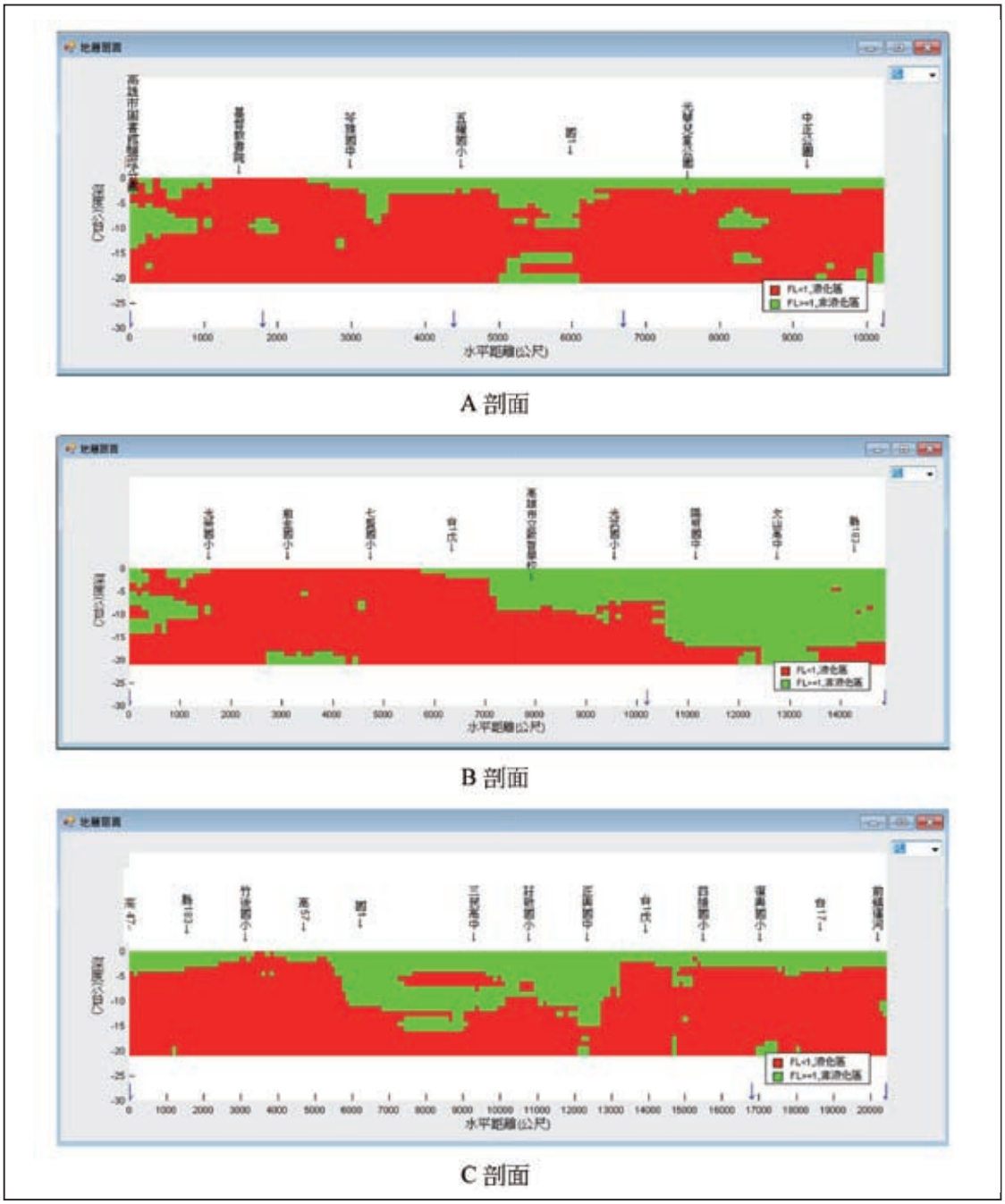


圖5 高雄都會區設計地震(A=0.2~0.28g) 土壤液化潛能剖面圖

主要分布於沿海地區之內陸邊緣，包括楠梓、橋頭、三民、旗津、岡山、鳳山、小港等區，為中液化潛勢區。

(三) 低液化潛勢區

於壽山、半屏山以及大社、仁武等局部丘陵區以及都會區南區之小港與東部之鳥松，屬於低液化潛勢區。

二、軟弱地層評估

在工程設計時，通常需要進行地質調查，藉以了解、掌握地層條件。一般調查的項目

有：(1)在工程區及超載荷重影響範圍內之軟弱地質分布狀況，包括分布面積、深度及各層次的厚度；(2)各軟弱地質的組成及其工程性質。

工程上常用的調查方法為地質鑽探，透過鑽探、現地試驗或取樣進行室內試驗，進行土壤性質的評估以掌握地層狀況。

本計畫採用建築物耐震設計規範所規定之剪力波速(V_{S30})作為本計畫軟弱土層的評估方法，以V_{S30}法之工址土壤分類定義，將地表下30公尺(100ft)內之土壤平均V_S值小於180m/sec的土層視為軟弱土層。由於土層剪力波速(V_S)並非為一般地質調查之指定工作項目，因此直接量測之數據較少，依據內政部2011年所頒佈建築物耐震設計規範採用下列公式概估之，並將地表下深度30m內之V_S值作平均計算後，以等值圖展現，如圖6。

黏性土壤：
$$V_S = \begin{cases} 120 q_u^{0.36} ; N < 2 \\ 100 N^{1/3} ; 2 \le N \le 25 \end{cases}$$

砂性土壤：
$$V_s = 80 N^{1/3} ; 1 \le N \le 50$$

檢視分析結果，高雄都會區除了壽山、半屏山以及大社、仁武、鳥松等嶺口丘陵西緣區域外，幾乎皆屬軟弱地盤，其土層性質亦相對軟弱。

肆、結論與建議

一、本計畫為增加分析之精度，蒐集地調所國土資訊系統、高雄都會區工程及建築鑽孔共有4655孔鑽孔資料，並彙入系統進行相關分析。

二、經參考既有研究及適合計畫範圍特性，完成計畫範圍北而南劃分典寶溪、後勁溪、愛河及鎮前溪等四個地質分區，並再細分成22個微分區。

三、本計畫利用Geo 2010工程地質探勘資料庫資料結合三維網格技術建置高雄都會區三維防災地質資料庫，並進一步分別辦理土壤液化潛能及軟弱地層之地質災害潛勢分析，其中以梓官、新興、鹽埕、前金等沿海區域區及仁武西緣淺部土層較具高土壤液化潛勢風險，而高雄都會區除了壽山、半屏山以及大社、仁武、鳥松等嶺口丘陵西緣區域外，幾乎皆屬軟弱地盤，其土層性質亦相對軟弱。

四、本計畫所完成之三維防災地質資料庫之空間資料分析，並可於平面及剖面進行展示，惟考量硬體之限制以及鑽孔分布之密度，並無法將網格切得太細，後續搭配電腦技術之發展以及鑽井資料密度逐年增加，可再進行更高解析度之資料分析，提供更高精度之地質防災資訊。

參考文獻

1. 內政部營建署，2001，建築物基礎構造設計規範。
2. 內政部營建署，2011，建築物耐震設計規範及解說。
3. 日本道路協會，1996，「道路橋示方書，同解說．耐震設計篇」。

4. 交通部運輸研究所，2006，臺灣西南部沿海地區軟弱地質交通結構物設計處理對策研究(1/2)，共401頁。

5. 交通部運輸研究所，2006，臺灣西南部沿海地區軟弱地質交通結構物設計處理對策研究(2/2)，共454頁。

6. 沈茂松，2001，營建工程防災技術，基礎施工篇，文笙書局，共601頁。

7. 陳景文、林宏翰，2000，高雄都會區土壤液化潛能微分區，地工技術雜誌，第82期，第35～42頁。

8. 經濟部中央地質調查所，2003，高雄都會區工程地質調查研究(九十二年度)，共426頁。

9. 經濟部中央地質調查所，1999，高雄都會區地下地質研究(八十八年度)，共282頁。

10. 經濟部中央地質調查所，2003，高雄都會區地下地質研究(九十二年度)，共290頁。

11. 經濟部中央地質調查所，2013，三維都市防災地質資訊整合分析與建置(4/4)。