

地工技術

未固結土壤對地震波放大 效應之實例研究

陳正興*

一、前言

地震是一種自然現象，從以前到現在，從太平洋的此岸到彼岸，都有可能發生，而且不定時地發生，對人類社會造成重大之災害。地震不斷地在殘害這世界，無可避免地，人類亦必須不斷地與地震所帶來的威脅奮戰。

人類對於地震向來具有恐懼感。以前的人因為完全不瞭解地震發生之原因，故以怪物翻身之類的傳說來描述地震；現代的科學已能解釋地震發生之原因，其實為地殼板塊運動之結果(Bolt, 1988)，但仍然無法掌握地震發生之時間與地點，人類仍處於被動之地位。同時，由於人類文明之高度成長，地震災害之程度反而日益擴大，數萬人之死傷時有所聞，因此地震災害之防治將一直是國際防災研究之重要課題之一。

關於地震之研究，地震學家 (Seismologist) 著重於地震現象之描述，工程師 (Engineer) 著重於工程之抗震性，而工程地震學 (Engineering Seismology) 則是兩者間之橋樑。它是一門融合地球科學與土木工程學之學科，旨在研究如何減少地震對工程之危害度，它必須利用地球科學與土木工程學之

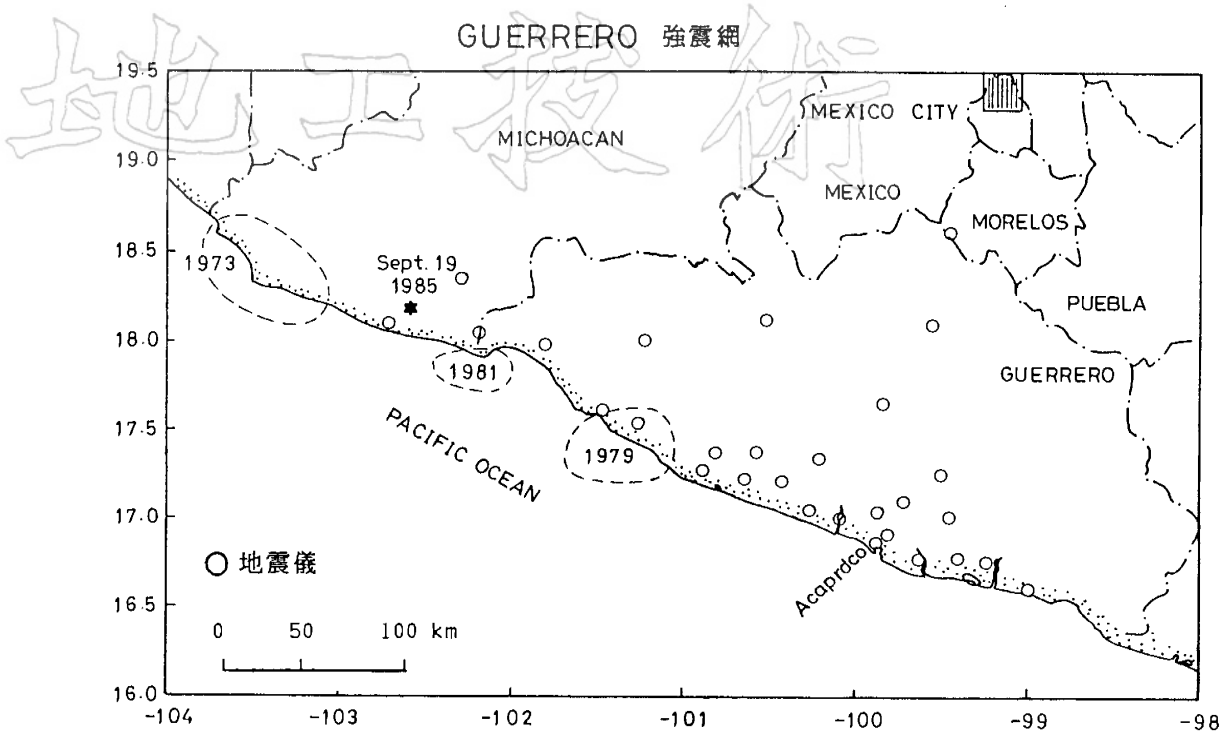
知識，提供工程建設安全之基本資料，諸如：地震發生之可能地點與機率、地盤運動之情形、地盤變形之程度以及其對人為構造物所造成之影響等等。總而言之，工程地震學是要去評估各地區之地震危害度及其影響，提出一個安全而經濟之工程建設指標，以減少重大地震災害之發生 (Ambraseys, 1988)。

近年來，世界各地相繼發生災害性之大地震，造成人命財產之巨大損失，而所造成之災害往往均局限於人口集中之城市或都會地區，並非全面性的，這與都市地區之地質情況有極密切之關係。有鑑於此，作者乃收集了墨西哥、亞美尼亞及美國舊金山地區之地震資料，分析其地質條件與地盤運動之關係，以說明工程地震學之意義及重要性。

二、1985年墨西哥地震 (Michoacan earthquake)

墨西哥位於環太平洋地震帶之東緣，為世界有名之地震區，其震央分佈均集中於沿墨西哥西南海岸之狹長地帶上 (見圖一) (Anderson et al., 1986)，此乃由於太平洋東側之可口士 (Cocos) 海板塊與北美洲大陸板塊於此發生碰

* 國立台灣大學土木工程學系教授



圖一、墨西哥西南海岸之強震網及近年發生之大地震

撞，迫使海板塊下沉於大陸板塊之下，因此常沿此下陷帶發生大地震。1985年9月19日，即在Michoacan海岸附近發生規模8.1之大地震，震央附近之最大地表加速度為0.16g，而首都墨西哥市距震央之距離約為400公里，卻發生嚴重之震災，估計死亡人數達八千人，受傷人數則達參萬人以上，全倒或嚴重損壞之樓房（包括商業大樓）達五百棟以上，造成五萬人以上無家可歸，「震」驚世界 (Bolt, 1988)。

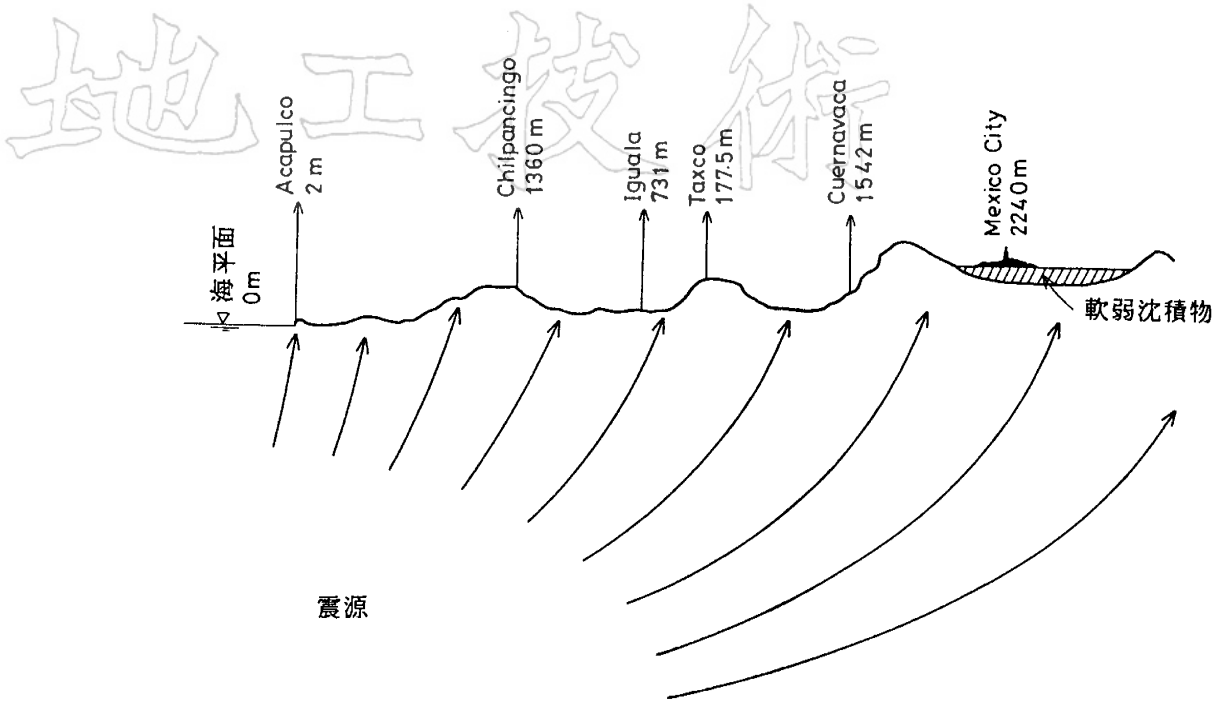
為何墨西哥市 (City of Mexico) 距震央有400公里之遠，卻發生這麼嚴重之災害呢？許多研究已明確地指出：局部地區軟弱土壤之放大效應為致災之主要原因。由於墨西哥市是一個高原上之湖積盆地(見圖二) (Zeevaert, 1971)，其標高為海拔2,240公尺，盆地內

堆積有厚層未固結之軟弱粘土，當地震波自震源向四面八方傳開時，由於幾何輻射作用 (geometric radiation) 之關係，震波傳至墨西哥市附近之岩盤時，其加速度已變得相當小，但當此地震波向上傳經軟弱粘土層達地表面時，振幅再被放大，造成地面上結構物之嚴重損壞。

要探討地震時之盆地效應，墨西哥市為一很好之例子，可從其地質條件與地震記錄間之關係得到一明確之驗證。

1. 地質條件

墨西哥市及其東側之谷地在更新世 (Pleistocene) 之前原為一河谷，稱為墨西哥谷 (Valley of Mexico)，當時為往南排水。在第四紀早期，墨西哥谷南方之Puebla及Toluca附近火山噴發



圖二、由海平面至墨西哥市之地形斷面(摘自 Zeevaert, 1971)

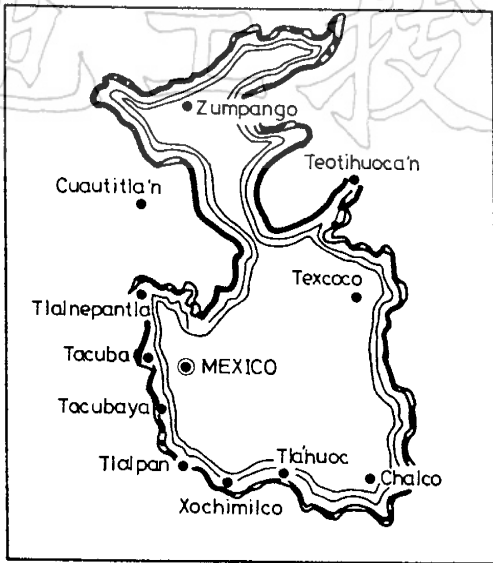
，形成Chichinautzin 山脈，將排水出路阻絕，使墨西哥谷變成封密之盆地，在洪積世時為一很大之湖泊，後因火山噴發物及四周山區之沖刷物逐漸沉積，使湖泊之面積逐漸減小，其演化史如圖三所示 (Romo et al., 1988)。今日之墨西哥市恰位於古湖泊區之西側邊緣，分析其地層構造，可明顯地劃分為山區，漸變區及湖底區，如圖四所示 (Mendoza and Auvinet, 1988)。盆地四周之山區為堅硬密實之礫石砂土或凝灰岩、熔岩流等火山岩石，內側為狹窄之漸變區，其岩盤上覆有薄層沉積土壤。中央寬廣地帶為古湖泊區域，稱為湖底區，沉積層相當厚，下層為較堅硬之沉泥或砂等沉積層，上層則為軟弱粘土夾有薄層之沉泥砂，上層軟弱粘土之厚度分佈如圖五所示 (Romo et al., 1988

)。在墨西哥市中心區之軟弱粘土層厚度約在40至50公尺左右，其地質剖面如圖六所示 (Zeevaert, 1971)，為典型之湖積盆地。

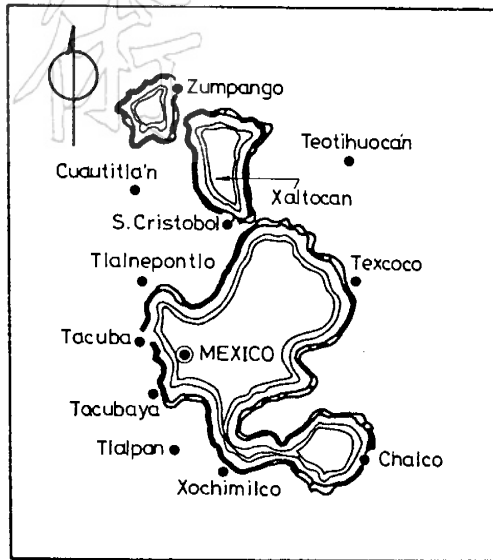
墨西哥市之軟弱粘土舉世聞名，在 Zeevaert (1971) 一書中有詳細之敘述，其動力特性稍異於常見之粘土，在剪應變達0.3% 時，仍幾乎呈彈性行為，阻尼甚小，剪力模數衰減現象不明顯，但當剪應變大於1%以上時，剪力模數衰減得特別快 (Romo et al., 1988)。

2. 地震記錄

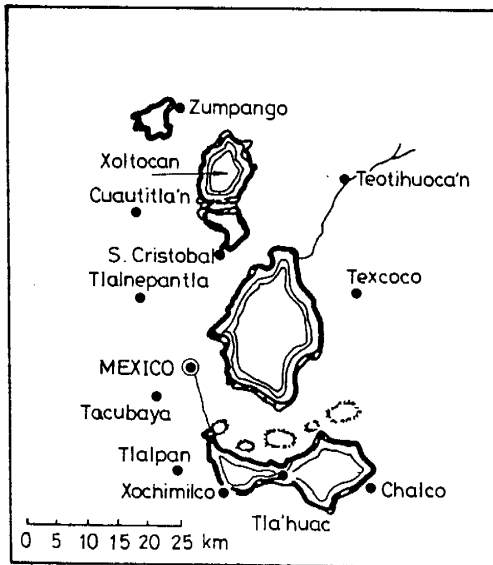
1985年9月19日 Michoacán地震時，震央附近之加速度約為0.10~0.16g，墨西哥市附近設有多處地震儀，分佈於不同之地質區上，各地震儀記錄所得之最大加速度已示於圖四中 (Mendoza and



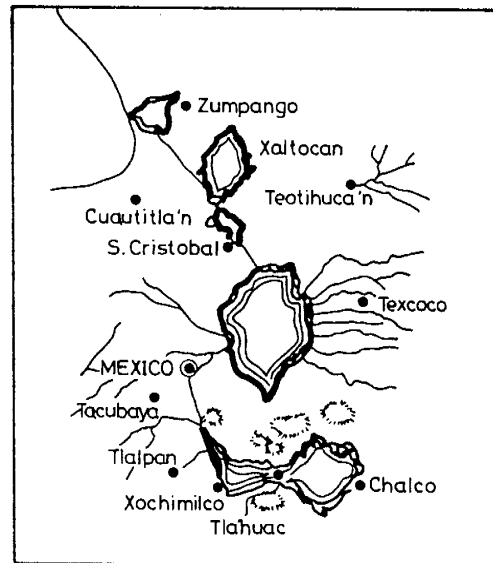
洪積世時湖泊之約略範圍



十六世紀初期



十九世紀初期

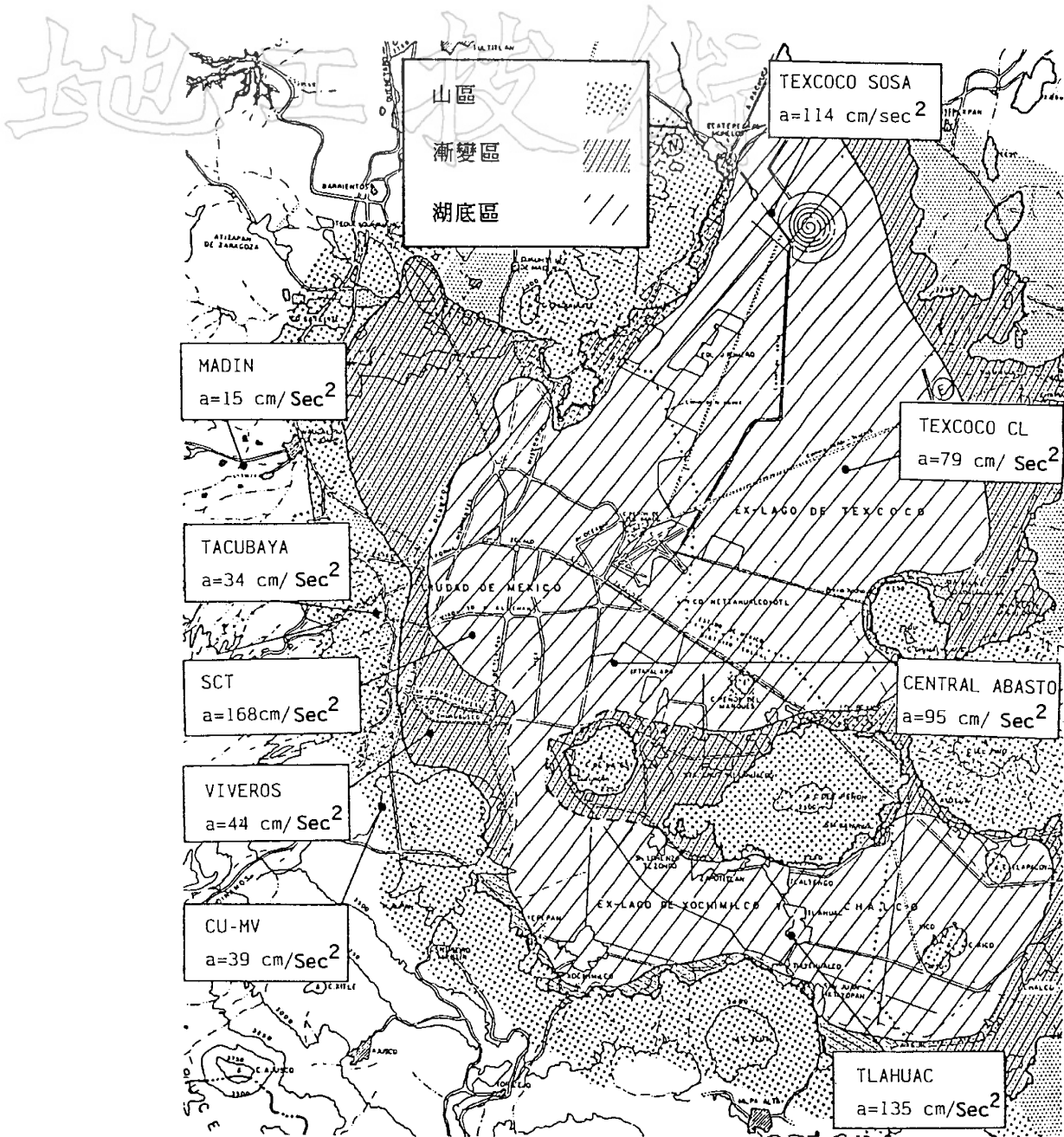


1889年

圖三、墨西哥盆地演變史(摘自 Romo, 1988)

Auvinet, 1988)。在山區及漸變區之最大地震加速度僅為 $0.02 \sim 0.04g$ 左右，但在湖底區之最大加速度卻高達 0.10

$\sim 0.18g$ 左右，其放大效應甚為明顯；再仔細比較山區及湖底區之地震加速度歷時記錄，更可看出放大效應之特性，

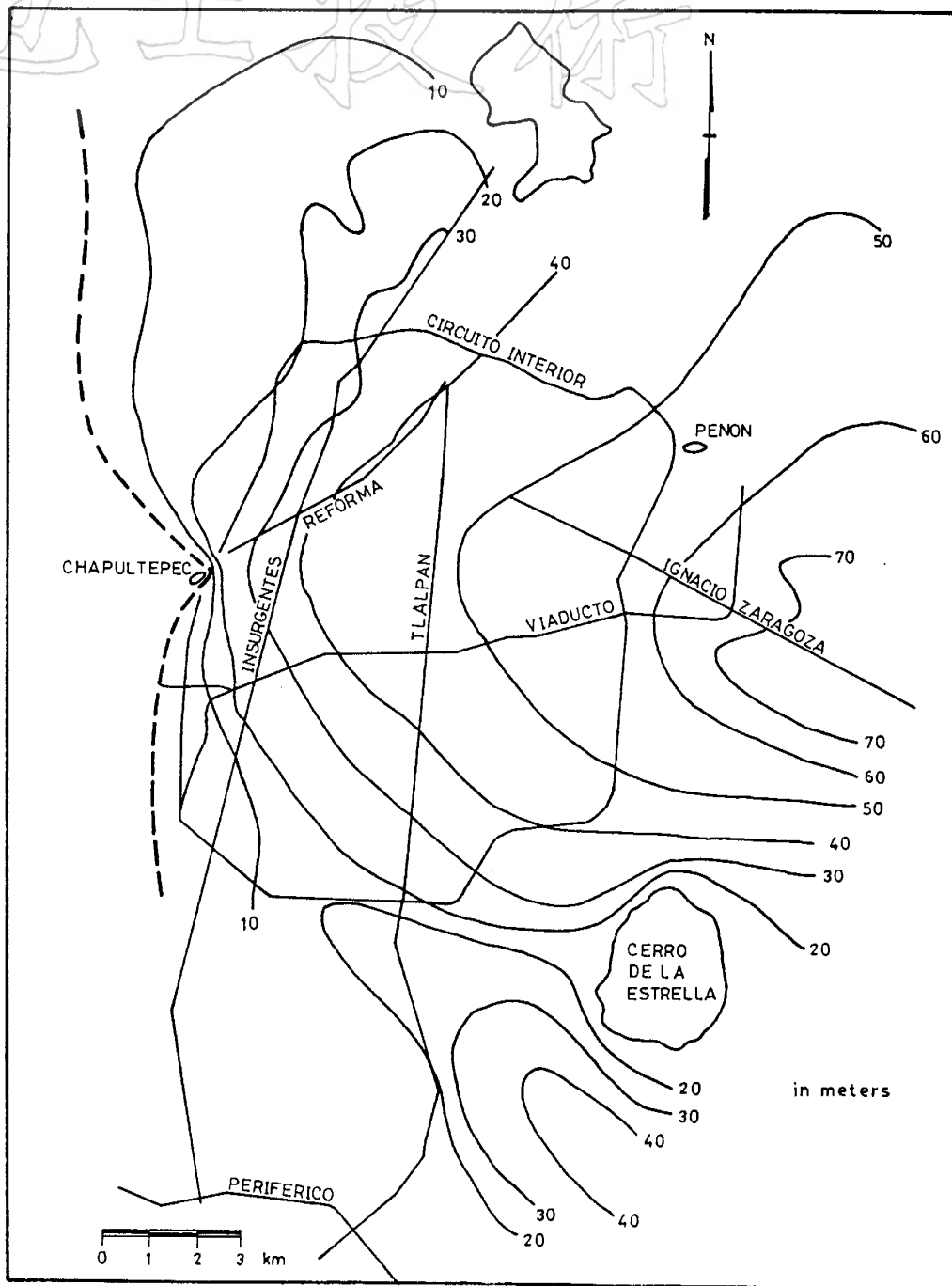


圖四、1985年9月19日地震時墨西哥市各地質區記錄之最大加速度(摘自 Mendoza, 1988)

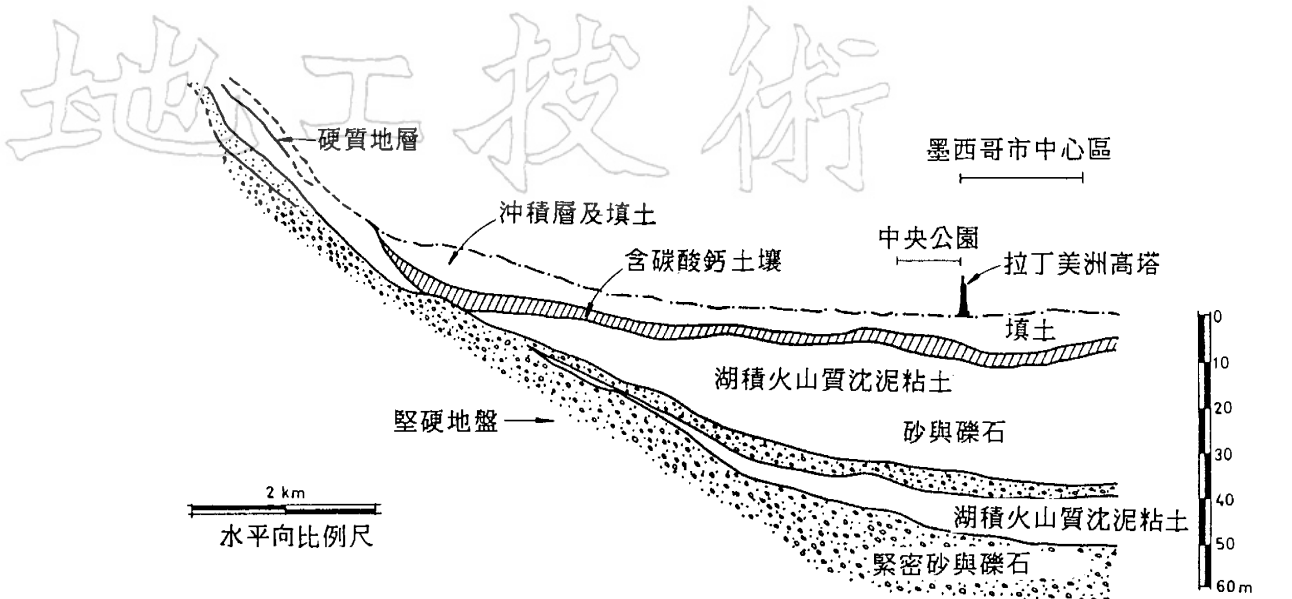
圖七依序示有湖底區 CAO (Central Abasto)、SCT 兩處及山區 TACY (Tacubaya)、CUMV兩處之地震加速度歷時記錄 (Bard et al., 1988), 由其

比較可知, 軟弱土層上之地震加速度與岩盤上之地震加速度顯然不同, 岩盤呈較高頻之振動, 振幅較小, 而土層則呈較低頻之振動, 振幅較大, 且振動延時

地工技術



圖五、墨西哥市軟弱土層厚度分布圖(摘自 Romo, 1988)



圖六、墨西哥市東西方向之地質剖面(摘自 Zeevaert, 1971) 鉛直向比例尺

增長很多，此乃由於土層之基本週期較長，當地震波由岩盤傳至土層時，地震波中與土層基本週期相近之振動部份與土層發生共振現象而被顯著地放大，使土層產生劇烈振動。

墨西哥市在此次地震中損壞最嚴重之地區即為市中心區附近，分佈如圖八所示 (Sanchez-Sesma et al., 1988)，若與圖四之地質分區比較，可知受損之房子大部份均落於湖底地質區內，而山區部份則幾無房屋受損，可見湖底地區軟弱土壤之放大效應，使該區之地盤振動特別大，導致房屋嚴重受損。

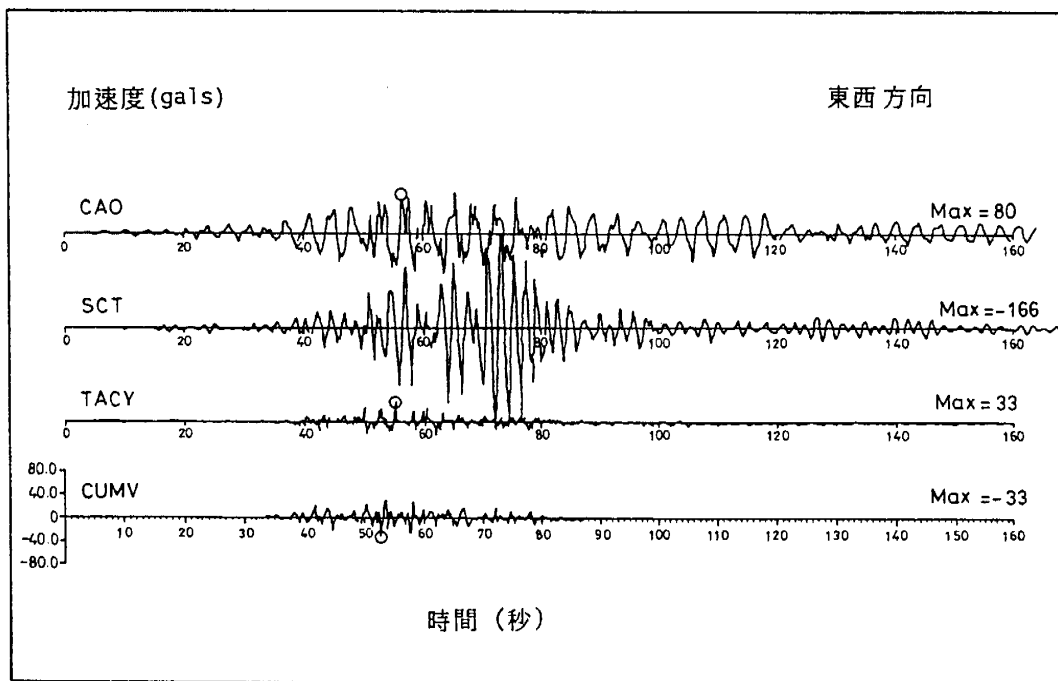
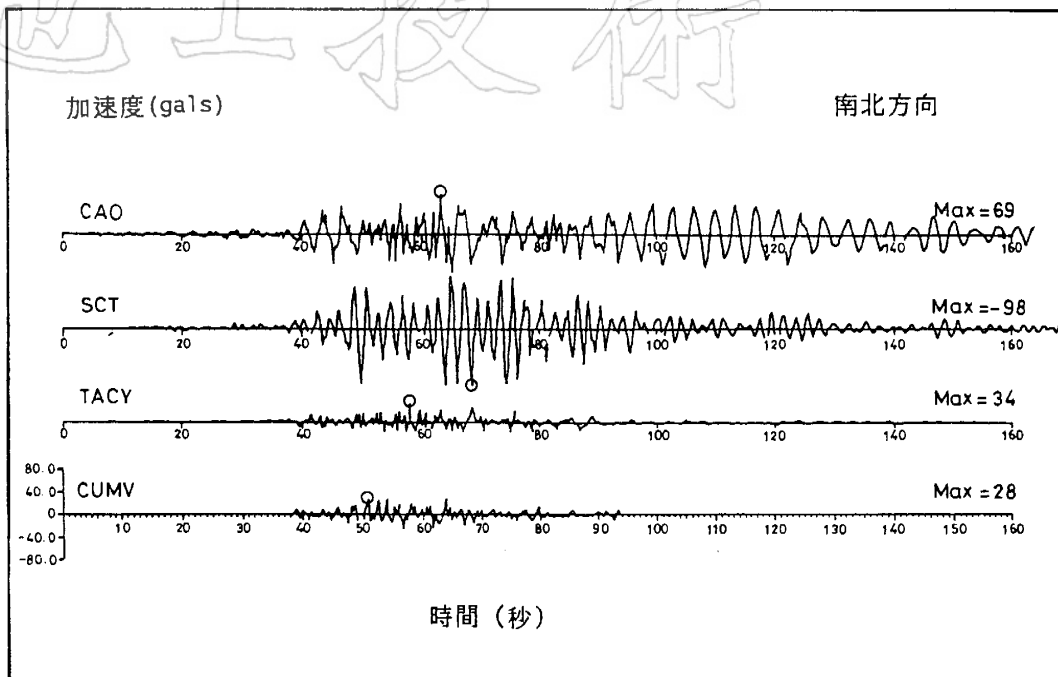
H. B. Seed (1987) 曾對墨西哥市土壤在 Michoacán 地震時之反應作過仔細之研究，分析不同地質區之地震加速度反應譜，結果如圖九所示，岩盤及堅硬土層之反應譜呈較均勻之分佈，其值均低於 $0.1g$ ，而 SCT 地震儀在市中心區附近，軟弱粘土層厚度約為 37 公尺，其反應譜在週期 2 秒附近有一明顯之尖峰

值，高達 $0.8g$ 左右，而 Michoacán 地震時，受損之樓房大多數均為 5 至 20 層之樓房，其基本週期約在 2 秒附近，這也正是市中心區此類樓房產生嚴重破壞之原因。反觀 CA0 地震儀附近，其粘土層厚度雖達 58 公尺左右，但其反應譜之最高值發生在週期為 3~4 秒之間，此與一般結構物之基本週期相差較遠，故僅有零星之房屋受損。

另外 Singh et al. (1988) 亦曾利用近幾年來發生在墨西哥之六個大地震資料，分析墨西哥市之放大效應，結果發現，在週期 1.75 秒至 2.75 秒間，相對放大倍率大於 14 之區域如圖十所示，正與 1985 年 Michoacán 地震之震災區相符合。

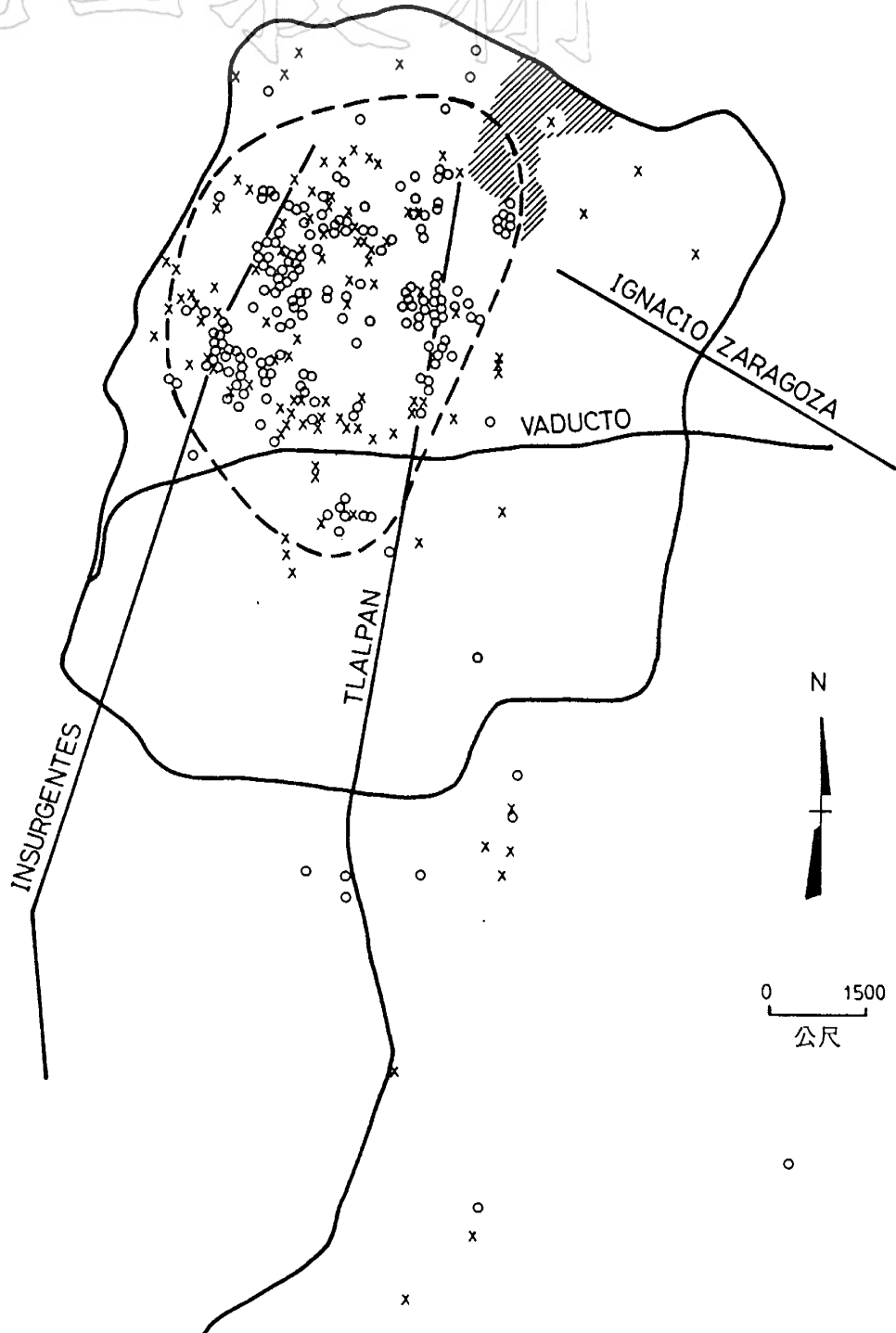
綜上分析，可知地震危害度與區域之地質條件有絕對密切之關係，即使離震央很遠，軟弱土壤之放大效應可使局部地區之地震反應變得非常大，導致嚴重之災害。

地工技術



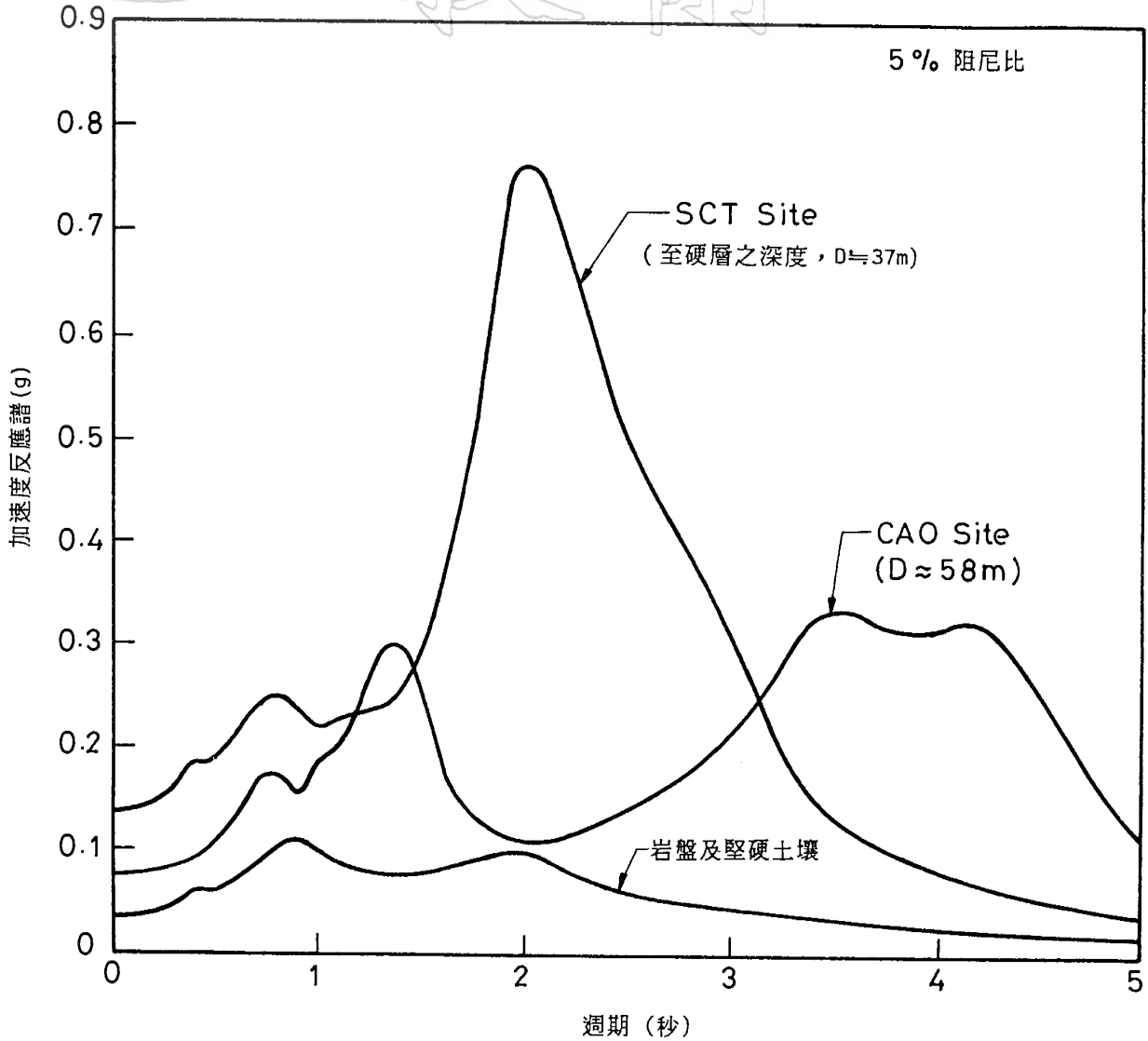
圖七、1985年9月19日地震時墨西哥市各地震站之加速度歷時記錄(摘自 Bard, 1988)

土工技術



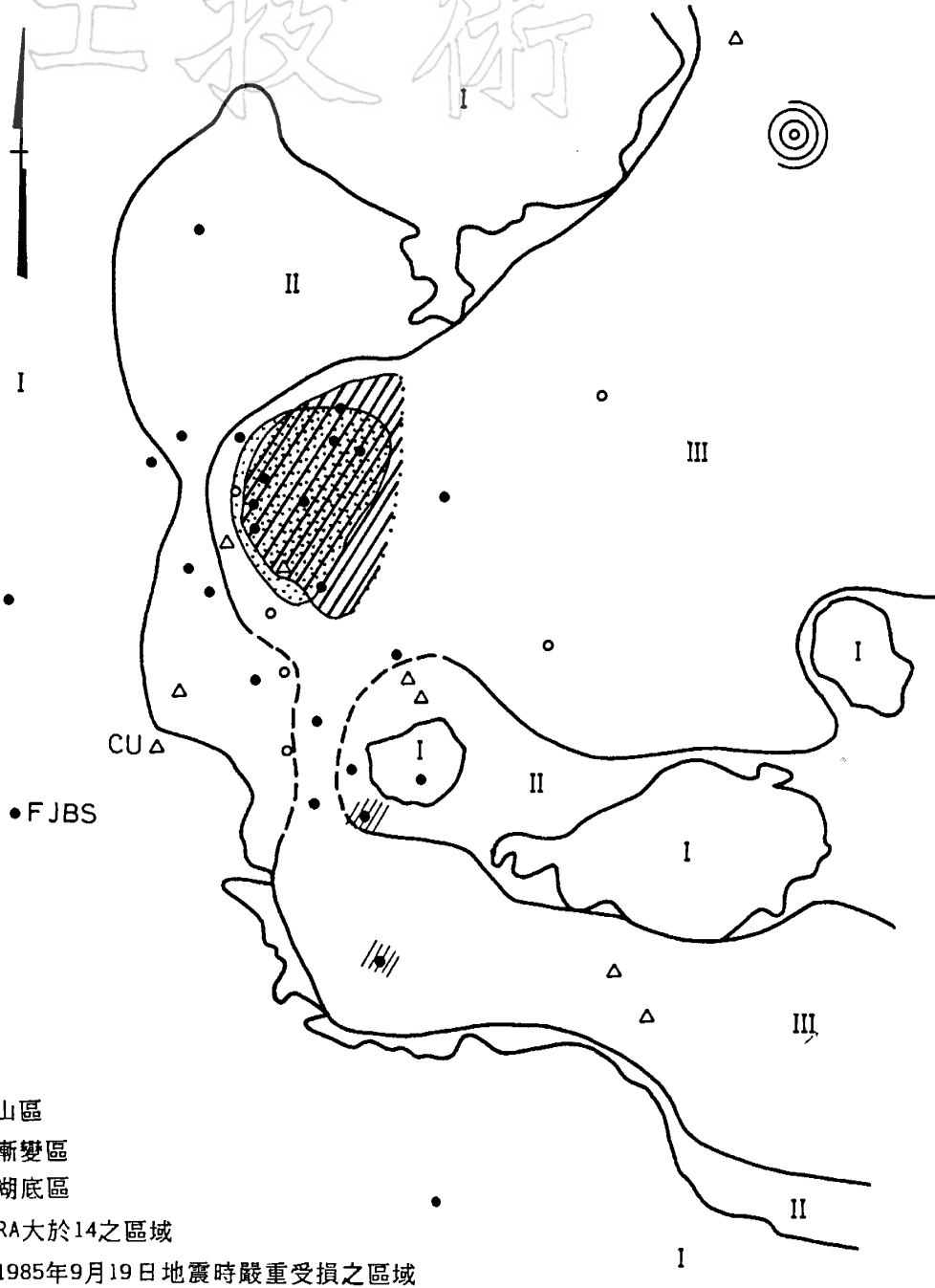
圖八、1985年9月19日地震時墨西哥市房屋損壞分佈圖(摘自 Meli, 1986)

地工技術



圖九、1985年9月19日地震時，不同地質區加速度反應譜之比較(摘自 Seed, 1987)

土工技術



圖十、週期1.75至2.75秒間，墨西哥市富氏振幅放大信率(RA)大於14區域(摘自Singh, 1988)

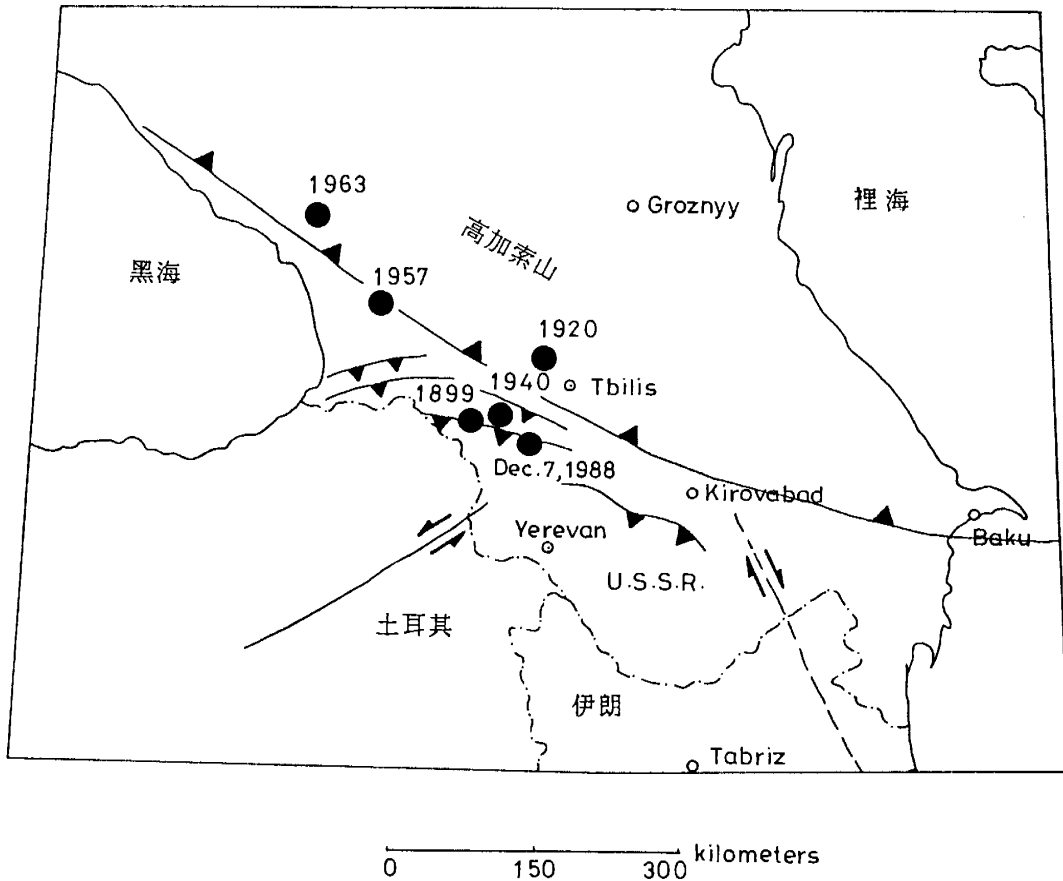
三、1988年亞美尼亞地震 (Armenia earthquake)

亞美尼亞位於黑海與裡海之間，區內有高加索山脈 (Caucasus Mountains) 經過，呈西北—東南走向，南鄰土耳其及伊朗。此區因受阿拉伯板塊向北推進與歐亞大陸板塊相碰撞而常發生地震，如圖十一所示，但以往所發生地震之規模及頻率均低於伊朗及土耳其等地區，故蘇俄當局將亞美尼亞地區劃為莫斯科震度 (MSK) 七至八級之震區。

1988年12月7日，亞美尼亞中部之

Spitak 附近發生強烈地震，造成8公里長之表面斷層，為一逆衝斷層，垂直滑距約為1.6米，水平滑距為0.5米，其表面波地震規模 M_s 為6.8，實體波地震規模 M_b 為6.3，四分鐘後又發生一次規模略小之餘震，其實體波地震規模 M_b 為5.9，亦具相當大之破壞力，造成亞美尼亞有史以來最嚴重之地震災害，估計死亡人數達25,000人以上，受傷人數達20,000人以上，房屋受損達2,000間以上，其中半數為全倒或嚴重損壞而必須拆除，時值嚴冬，救災異常困難，引起世界各國之注意，齊往救災。

1988年12月7日地震之震央位置約



圖十一、亞美尼亞之主要斷層及地震分佈圖 (摘自參考文獻 11)

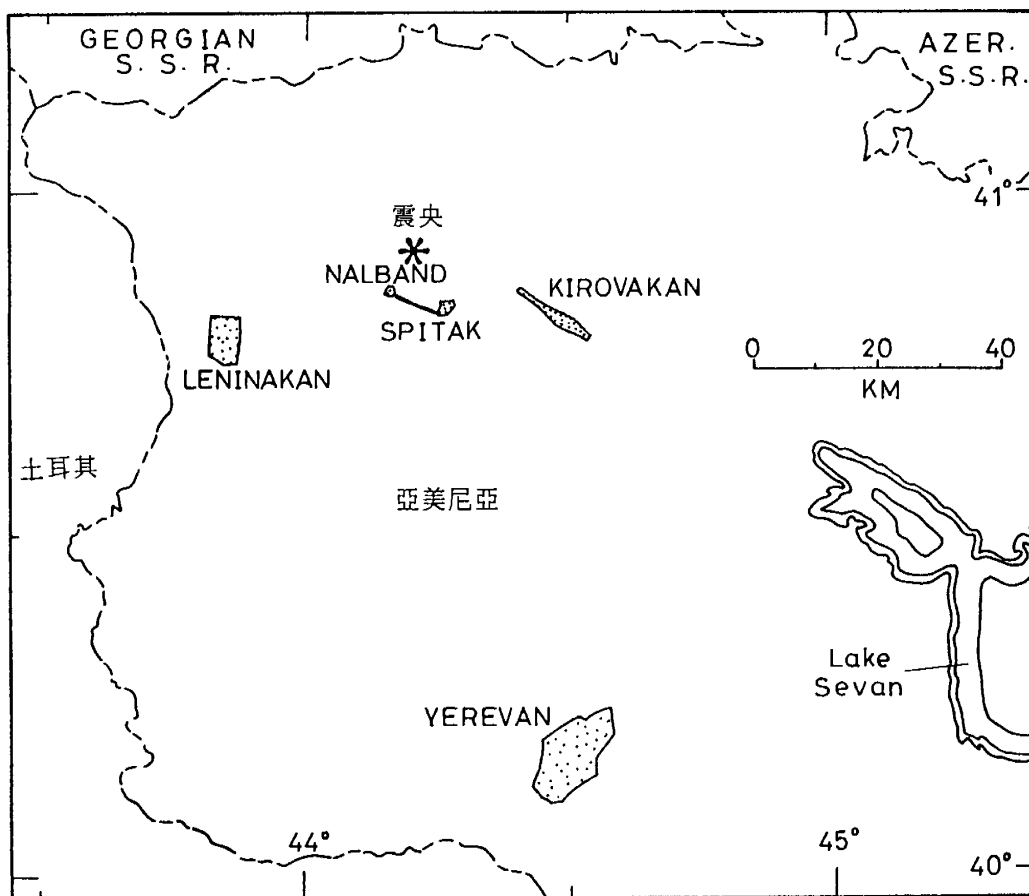
位於亞美尼亞第二大城市Leninakan 及第三大城市Kirovakan 之間，其距離分別為32公里及25公里，如圖十二所示，這兩個城市都受到相當嚴重之損害，但兩城市受損結構物之種類卻呈相反之趨勢，圖十三顯示兩市全倒或嚴重損壞至必須拆除房子之比例。Kirovakan市內，砌石房子大都為四層樓，估計其基本週期約為0.3 秒，倒塌率達41%，砌石填充之鋼筋混凝土構架房子之基本週期約為0.5 秒，其倒塌率降為23%，而較高之鋼筋混凝土構架加格板牆房子之基本週期約為0.6秒，其倒塌率反而為0，顯示基本週期較長之房子，其倒塌率較低

。反觀Leninakan 市，上述三者之倒塌率依序分別為38%，62%，95%，隨著基本週期之增加，其倒塌率愈高，鋼筋混凝土構架加格板牆樓房（包括五層、九層及十二層）幾乎全毀，使得Leninakan 市成為此次地震受損最嚴重之區域。

上述兩城市距震央之距離相當，為何其受損情形有這麼大之差別呢？其主要原因還是在於地震之盆地效應，以下再以此次地震之記錄與地質條件之關係作一分析。

1.地質條件

亞美尼亞有百分之九十以上之區域



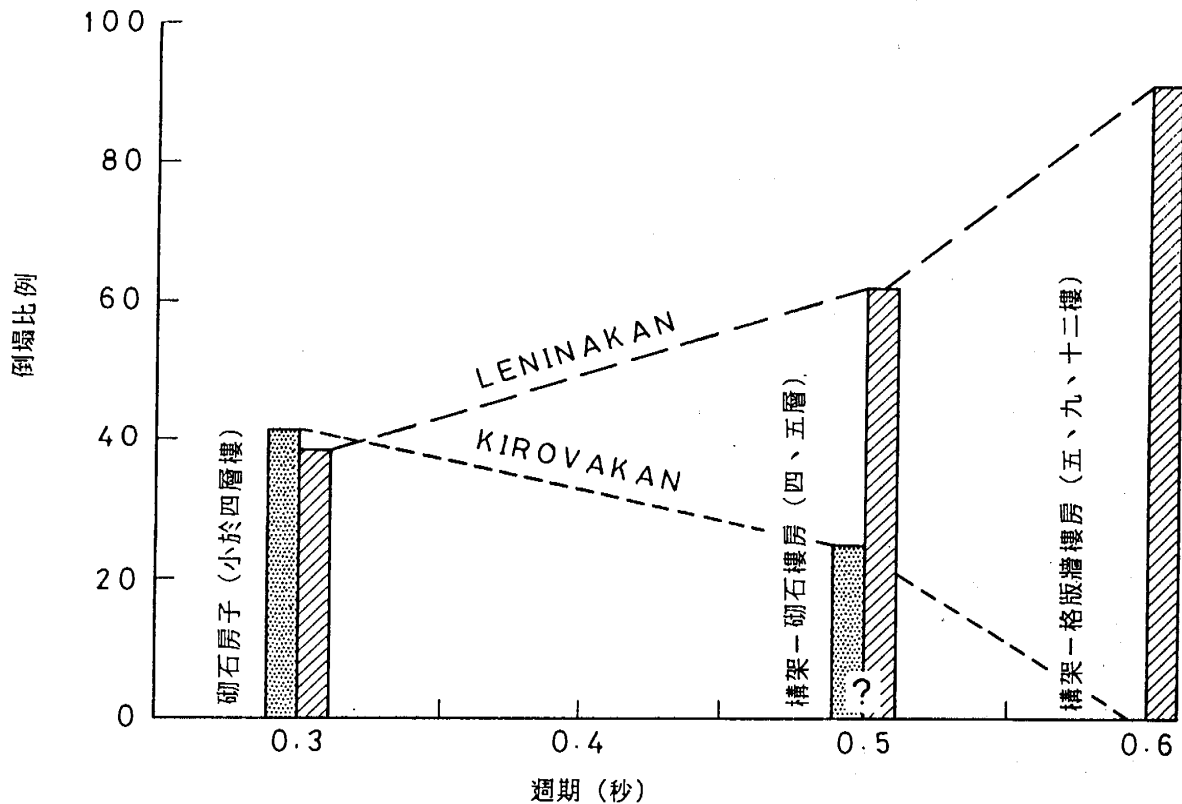
圖十二、1988年12月7日亞美尼亞地震震央位置圖

為海拔1,100 公尺以上，平均高度為海拔1,800 公尺，屬火山地形，由玄武岩、安山岩及凝灰岩所構成，沿主要河流及其支流則為較低之沖積層、冰積層及湖積層。震央附近之地形圖如圖十四所示，Kirovakan位於Pambak河之狹長谷地上，四周均為高山，其地盤較為堅硬，為岩盤或岩盤上覆薄層土壤，而Leninakan市濱臨 Akhurian 河，其南方之 MT. Aragats 高4090公尺，於第四紀噴發時，將Akhurian 河擋住，故在Leninakan附近形成湖泊，堆積大量之沉積物，後來湖水洩出，形成今日較寬之谷地。Leninakan 市區之平面佈置及鉆孔位置示於圖十五中，東西方向之地質剖面則

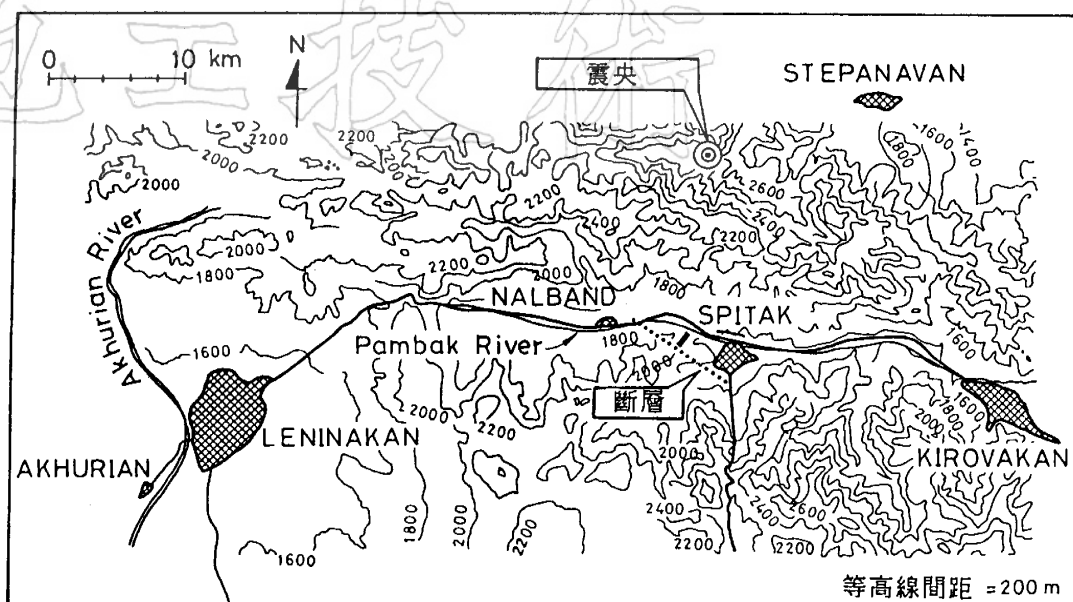
示於圖十六中，很明顯地為一盆地地形，其岩盤以凝灰岩及玄武岩為主，上覆砂、土及礫石等互層，未固結之沉積土厚度約有200至300公尺厚，其在地震來襲時之放大作用，將是此城市產生嚴重震災之主要原因。

2.地震記錄

在亞美尼亞境內雖設有各式各樣之地震儀，但型式老舊，於12月7日之主震及餘震發生時，並沒有記錄到完整的強震資料。唯一最完整之地震歷時記錄是在Ghoukasian記錄到的，該地震站位於Leninakan 北方27公里處，也就是震央西北約33公里處，地震儀設於堅硬地



圖十三、1988年12月7日地震 Leninakan 及 Kirovakan 兩城市房屋損壞率之比較(摘自參考文獻 11)



圖十四、1988年亞美尼亞地震震央附近地形圖

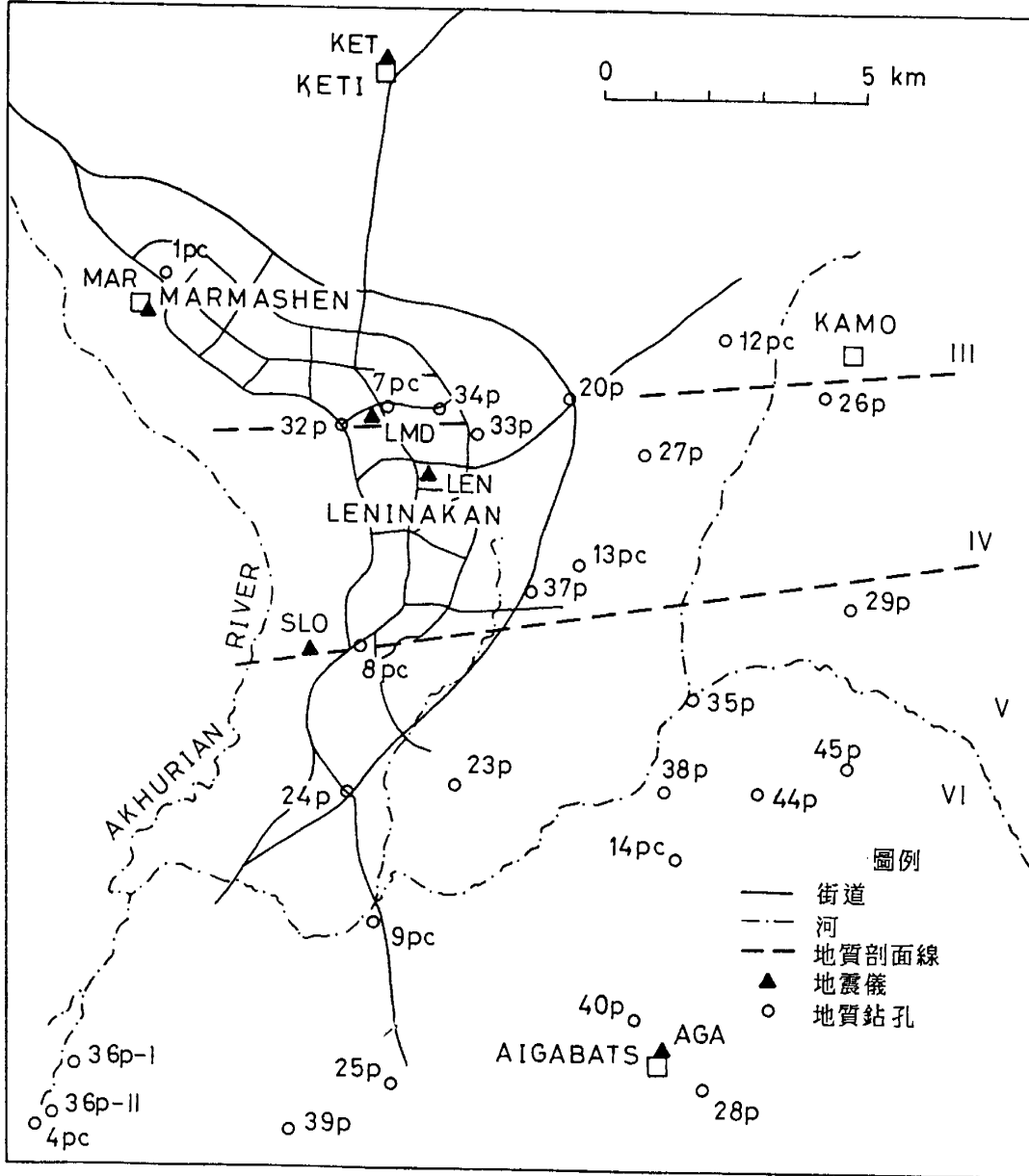
盤上，記錄顯示最大水平加速度為0.21 g，強震延時約為10~12秒，地盤運動之卓越頻率介於3~4Hz之間。首府Yerevan（震央南方約80公里）所得之記錄值相當小且品質不佳，不值得參考。至於在Leninakan市內之八個地震站，只有四個地震站有不太完整之記錄。由記錄資料推估其最大水平加速度約為0.4g，同時發現主震之強震延時達50秒，強震後還有相當長時間（約一分多鐘）之地盤振動，強震時之卓越頻率為1Hz，而地盤土壤自由振動之主要頻率為0.5 Hz。由前述知Leninakan盆地內有200~300公尺厚之未固結土壤，由於該土壤之放大效應，使得Leninakan在地震時之振動特性與Ghoukasian之岩盤記錄完全不同，振動延時變長很多，卓越頻率也相對地降低很多，這種振動特性正是Leninakan市較長週期樓房嚴重損壞之主要原因。

由於亞美尼亞在歷史上未曾遭受過如此大之震災，而12月7日地震時之強震記錄又非常缺乏，所以聞訊前往的美國地質調查所國家地震資料中心（National Earthquake Information Center of U.S. Geological Survey）研究小組臨時設立了24個手提式的強震儀，記錄了同年12月23日至次年1月4日之餘震資料，共獲有兩千組完整之地震記錄。

為了進一步瞭解亞美尼亞地區地盤振動之特性，研究小組選取1988年12月31日之餘震資料來作分析。此次餘震之實體波地震規模 M_b 為4.7，震央位置如圖十七所示，差不多位於地震站LEN，KET，GOG及DZH之中間，其距離分別為24，20，23及28公里。其中LEN地震站位於Leninakan市內（見圖十五），恰位於盆地之正中央，基地下約有250公尺之未固結土壤，其他三個地震站之基

地均為岩盤或岩盤上覆薄層土壤。比較四地震站在12月31日餘震時之加速度、速度及位移歷時記錄，得知 Leninakan 土壤上二水平方向之尖峰加速度分別為三岩盤基地平均尖峰水平加速度之 0.8 和 1.4 倍，而 Leninakan 土壤上二水平方

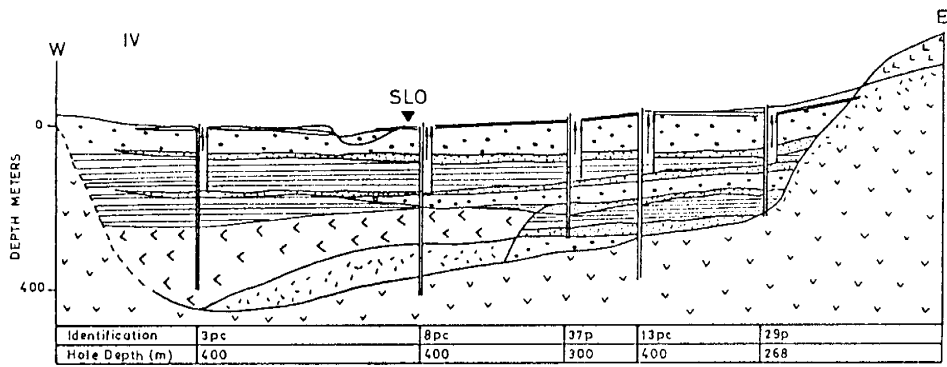
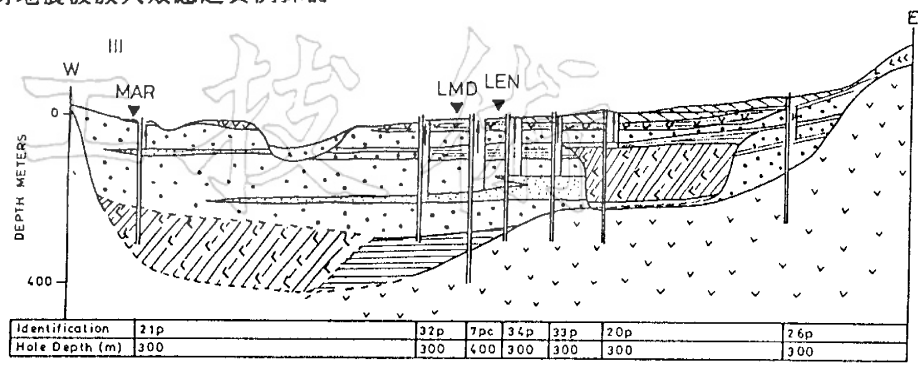
向之尖峰速度分別為其他三基地平均值之 1.7 和 1.8 倍，二水平方向之尖峰位移則為 4.7 和 8.0 倍，可見土壤之放大效應在此次地震時，對於加速度不太明顯。但對於速度和位移則甚為明顯。圖十八比較 LEN 和 DZH 二地震站之速度歷時記錄



圖十五、Leninakan 市附近鑽孔分佈圖(摘自參考文獻 11)

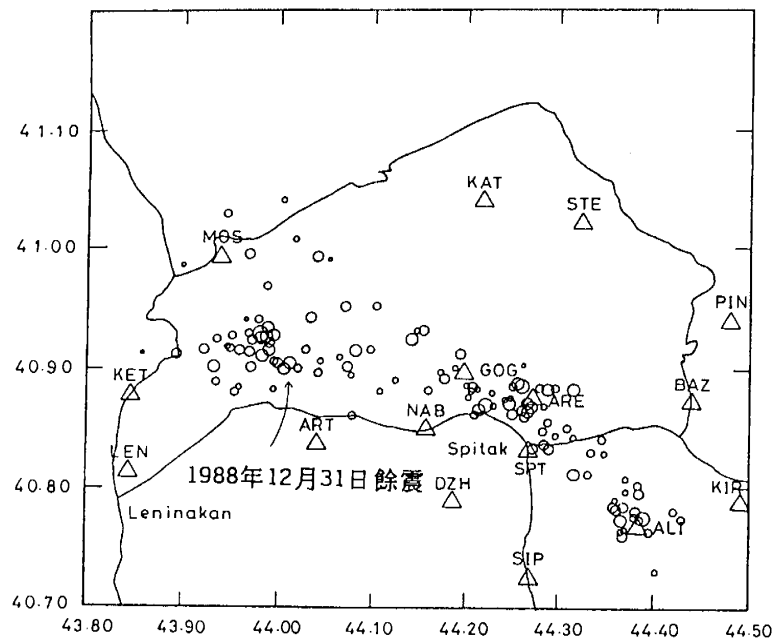
48 未固結土壤對地震波放大效應之實例探討

地

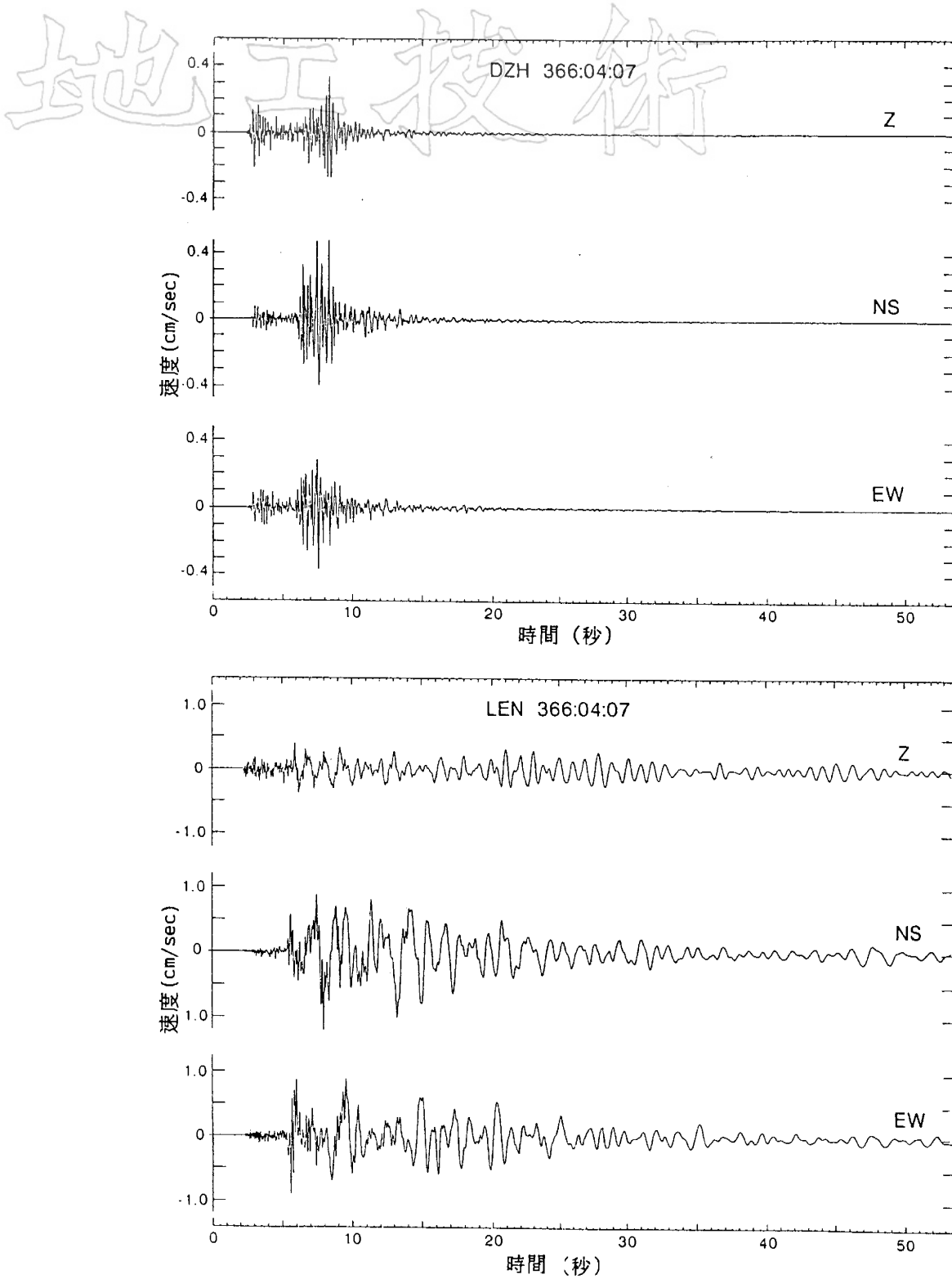


砂
 壤土
 粘土
 礫岩、礫石、砂和粘土
 疑
 蛭石
 灰岩
 玄武岩

圖十六、Leninakan 盆地地質剖面圖 (摘自參考文獻 11)



圖十七、亞美尼亞臨時地震站及餘震分佈圖



圖十八、1988年12月31日餘震時 DZH 及 LEN 地震站之速度歷時記錄(摘自參考文獻11)

，由圖可清晰地看出土壤之放大效應，不僅使得尖峰值加大，更使振動延時加長，而卓越頻率也明顯地降低。

四、1989年美國洛馬普利塔地震(Loma Prieta earthquake)

美國西海岸恰位於太平洋板塊與北美大陸板塊之交界面上，由於兩板塊之相互移動，形成有名之聖安德魯斯（San Andreas）斷層，地震頻繁，歷史上有名之1906舊金山大地震即發生於此斷層上，斷層破裂長度達430公里，最大水平位移達6.5米，造成舊金山地區慘重之災害。1989年10月17日，復在舊金山灣區南方之斷層線上發生地震，震央位置在聖塔克魯茲（Santa Cruz）東北方約16公里處，如圖十九所示，稱為洛馬普利塔地震，其規模為7.1，造成67人死亡，2,439人受傷，房子受損者達100,000間以上，其中全倒或嚴重損壞而必須拆除者達1,000間以上，另有高架道路倒塌或受損，以及海灣大橋發生落橋事件，造成56億美元之損失，為美國有史以來最嚴重之天然災害（Meekan et al., 1989）。

由於舊金山灣區人口密集，工商發達，歷年來又一直受到地震活動之威脅，因此各機構在灣區附近設有密集之強震網，以收集地震來臨時各種地盤及結構物之反應，供學術研究及震災防治之用。圖十九所示為美國加州礦務及地質局（Department of Conservation, Division of Mines and Geology）所

設之強震網CSMIP（California Strong Motion Instrumentation Program）（CDMG, 1989），在此區域內共有93個地震站。圖二十所示為美國地質調查所（U.S. Geological Survey）在此區域所設之強震網（許茂雄等，1989），共有38個測站。另有加州大學柏克萊校區及史丹佛大學所設之較小型之地震網。這些地震儀幾乎都收集到此次地震時之完整資料，包括地盤、基礎、高樓、橋樑及大壩等之地震反應，資料豐富而完整，甚為寶貴，對地震研究而言，可謂豐收之一年。

在各地震網所收集到之地盤反應中，包括近距離及遠距離之地盤反應，依種類而言，包括了岩盤、沖積層、人工填土區（artificial fill）及軟弱之海灣淤泥區（Bay Mud）等地之反應。目前這些記錄尚未完全數據化，假以時日，必可用來評估地震引致各種地盤之運動情形，對工程地震學之研究助益甚大。

以下僅就所收集到之初步資料，用來說明軟弱土壤在地震時所引起之放大效應：

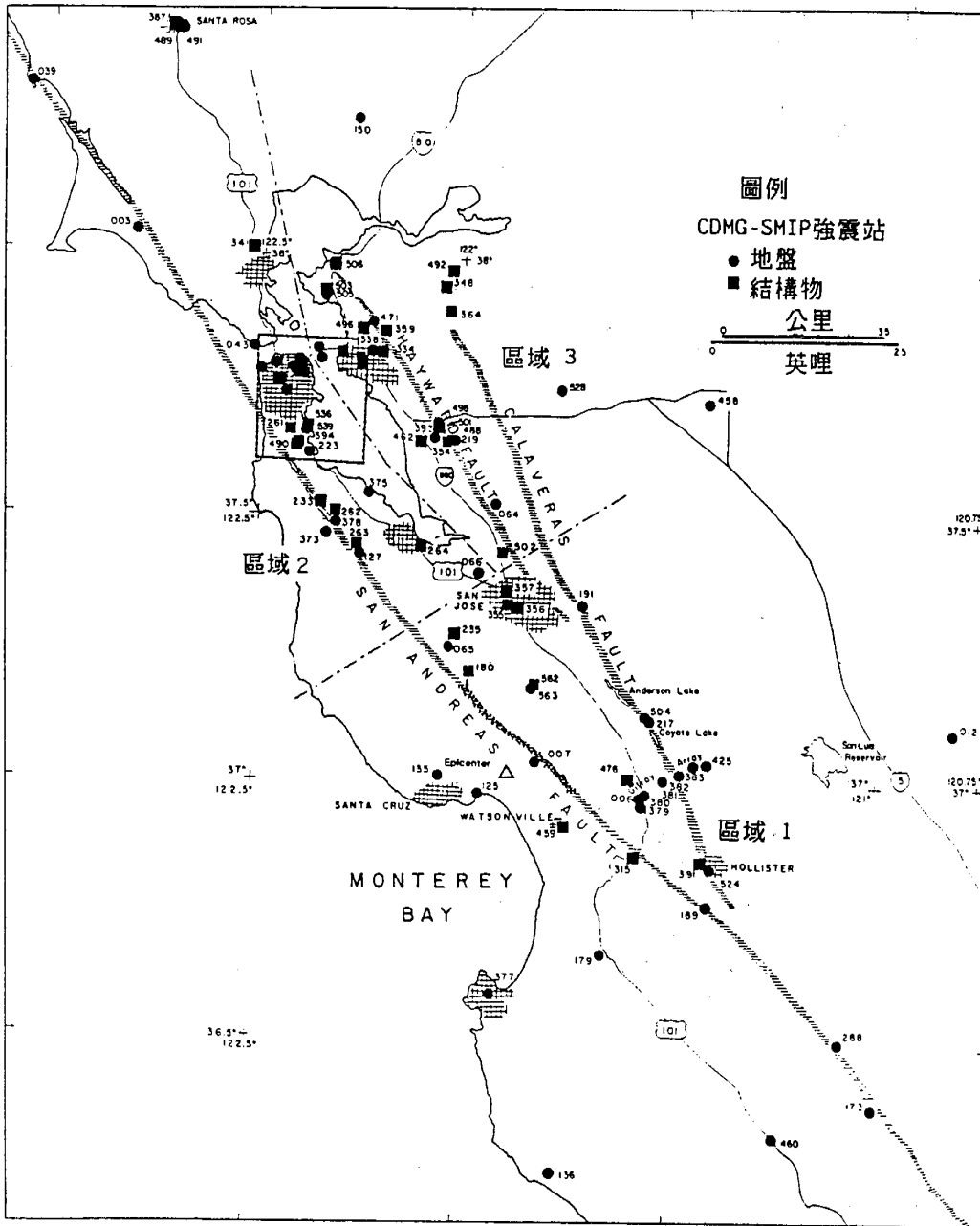
1. 吉爾羅陣列(Gilroy Array)之地震反應

在震央東側約30至40公里處，有一線性之地表陣列橫跨卡拉維拉斯（Calaveras）斷層（見圖十九），稱為吉爾羅陣列。此陣列橫跨聖塔克拉拉（Santa Clara）谷，在谷地之西側為岩盤，谷地內為沖積層，谷地之東側則為砂岩層上覆薄層土壤，表一列有各地震

儀所記錄到最大加速度之變化情形，可明顯看出谷地內沖積層上之水平及垂直加速度均高於兩側堅硬地盤上之記錄值，顯然為土層之放大作用所致，為盆地效應之另一明證。

2. APEEL陣列之地震反應

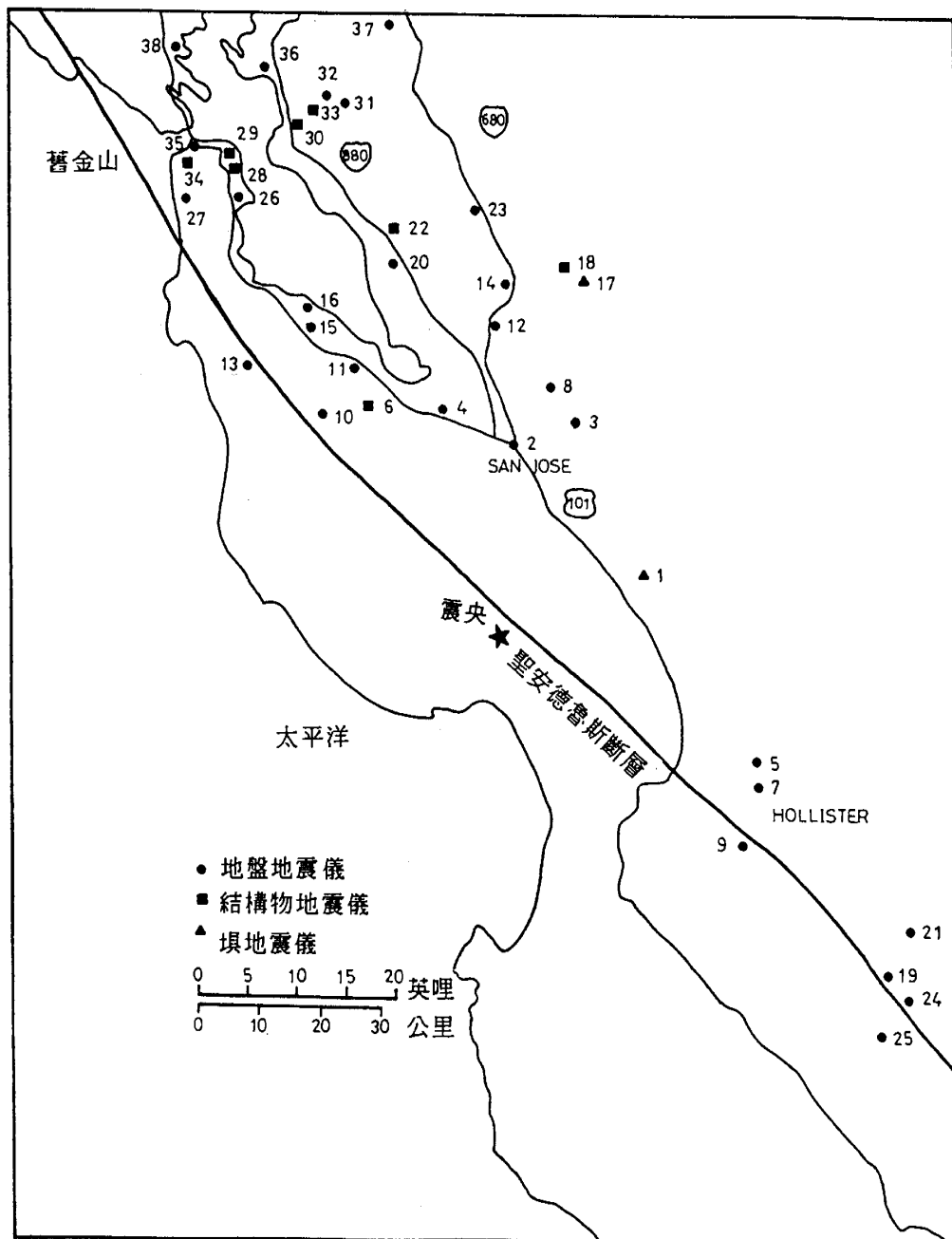
在震央北方約65公里處，有一東西向之APEEL陣列橫跨舊金山海灣，表二顯示各地震儀之位置（見圖十九）、地盤種類及最大加速度之記錄值。此陣列



圖十九、加州礦務及地質部在震央附近之強震網

各地震儀距震央之距離相當，但位於沖積層上之地震反應顯然較兩側岩盤之地震反應高出甚多，尤其是海灣邊編號37

5地震儀，其基地附近分佈有相當厚之海灣淤泥（Bay Mud），故放大效應更為明顯。



圖二十、美國地質調查所在震央附近之強震網



表一、吉爾羅 (Gilroy) 陣列之地盤反應

地震站		基地地質	震央距離 (公里)	尖峰加速度	
名稱	編號			方位角 (g)	
Gilroy #1 Gavilan College Water Tank	47379	砂 岩	29	90	0.50
				Up	0.22
				360	0.43
Gilroy #2 Hwy 101/Bolsa Rd Motel	47380	沖 積 層	30	90	0.33
				Up	0.31
				360	0.37
Gilroy #3 Gilroy Sewage Plant	47381	沖 積 層	31	90	0.37
				Up	0.38
				360	0.55
Gilroy #4 San Ysidro School	57382	沖 積 層	32	90	0.22
				Up	0.17
				360	0.42
Gilroy #6 San Ysidro Microwave Site	57383	砂 岩 上 覆 粘 土	35	90	0.17
				Up	0.10
				360	0.13

3. 舊金山附近之地震反應

圖二十一顯示舊金山市附近地盤之最大水平加速度及其基地地質情況，此區域距離震央約100 公里，距離已相當遠，故在岩盤上之地震加速度均甚小，約在0.1g左右，但在填土區域或海灣淤泥層上，其加速度則被放大至0.2~0.3g左右，若再比較此區域附近之地質圖（圖二十二）(Schlocker et al., 1989)，更可明顯地看出受災最嚴重之馬利那(Marina)、南中國盆地(South China Basin) 及I-880高架橋之位置均在海灣

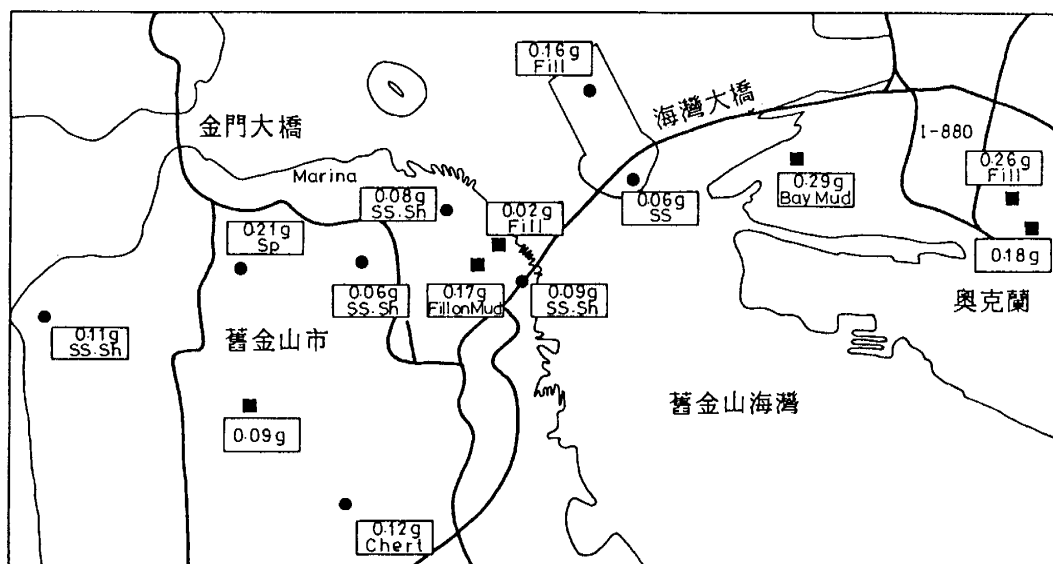
淤泥層之填土區上，可見地質條件之差異確為影響地震危害度最主要之因素之一。

4. 土壤液化區

在此次地震時，舊金山灣區及蒙特利 (Monterey) 海邊等地方有土壤液化之現象發生，加州大學柏克萊校區土木系之初步調查報告顯示有土壤液化現象之區域如圖二十三所示 (Astaneh et al., 1989)，若將此圖與灣區附近之地質圖（圖二十四）(Borcherdt et

表二、APEEL陣列之地盤反應

地震站		基地地質	震央距離 (公里)	尖峰加速度	
名稱	編號			方位角	(g)
Upper Crystal Springs Reservoir Pulgas Water Temple (APEEL 7)	58378	砂岩	63	90 Up 360	0.09 0.06 0.16
Foster City Redwood Shores (APEEL 1)	58375	沖積層厚 約210公尺	63	90 Up 360	0.29 0.11 0.37
Hayward Muir School (USGS#1121) (APEEL 2E)	58393	厚層沖積 土壤	71	90 Up 360	0.14 0.10 0.18
Hayward CSUH Stadium Grounds (APEEL 3E)	58219	綠岩 (Green Stone)	63	90 Up 360	0.08 0.05 0.08

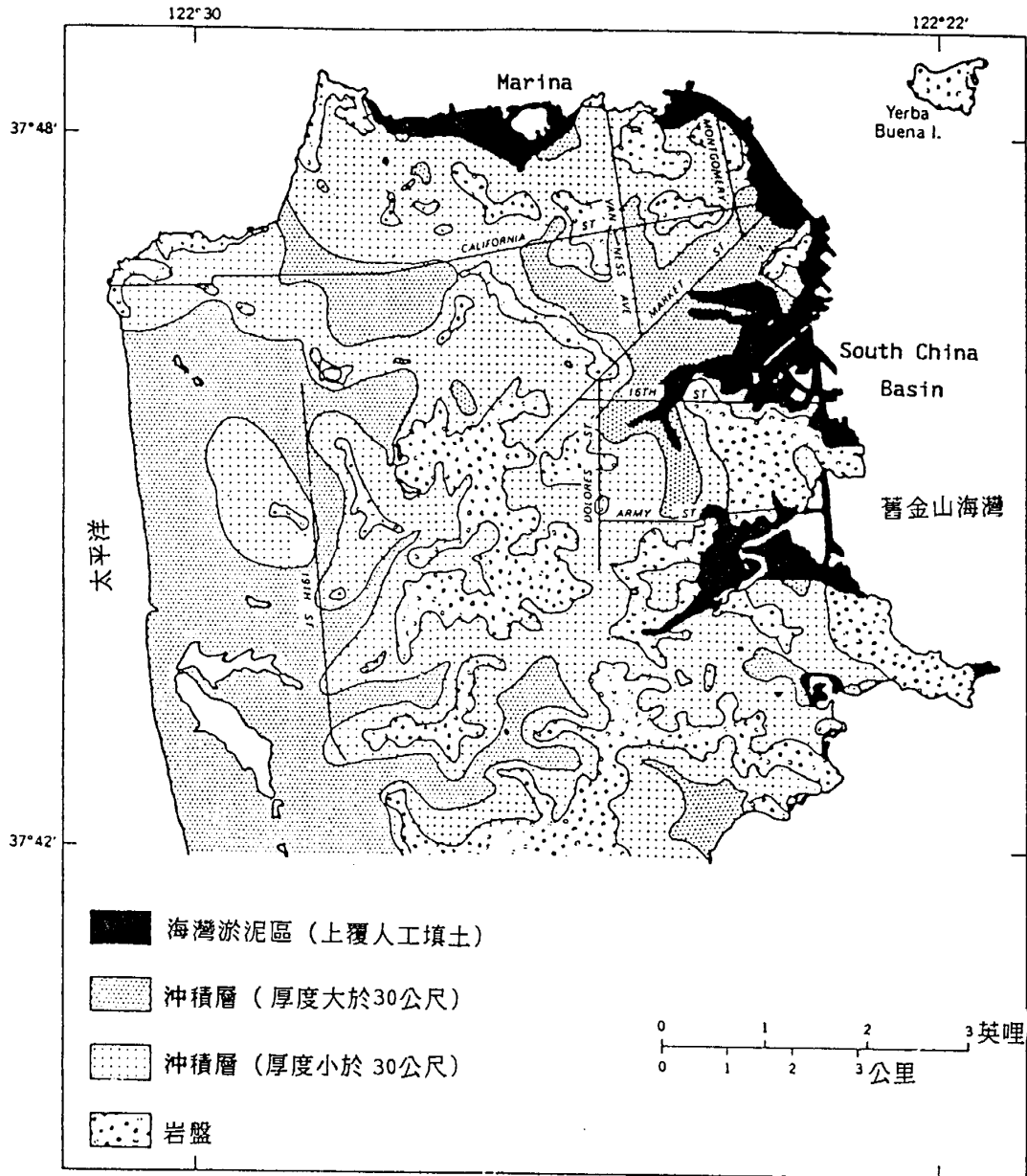


圖二十一、舊金山市附近之最大加速度與基地地質之關係

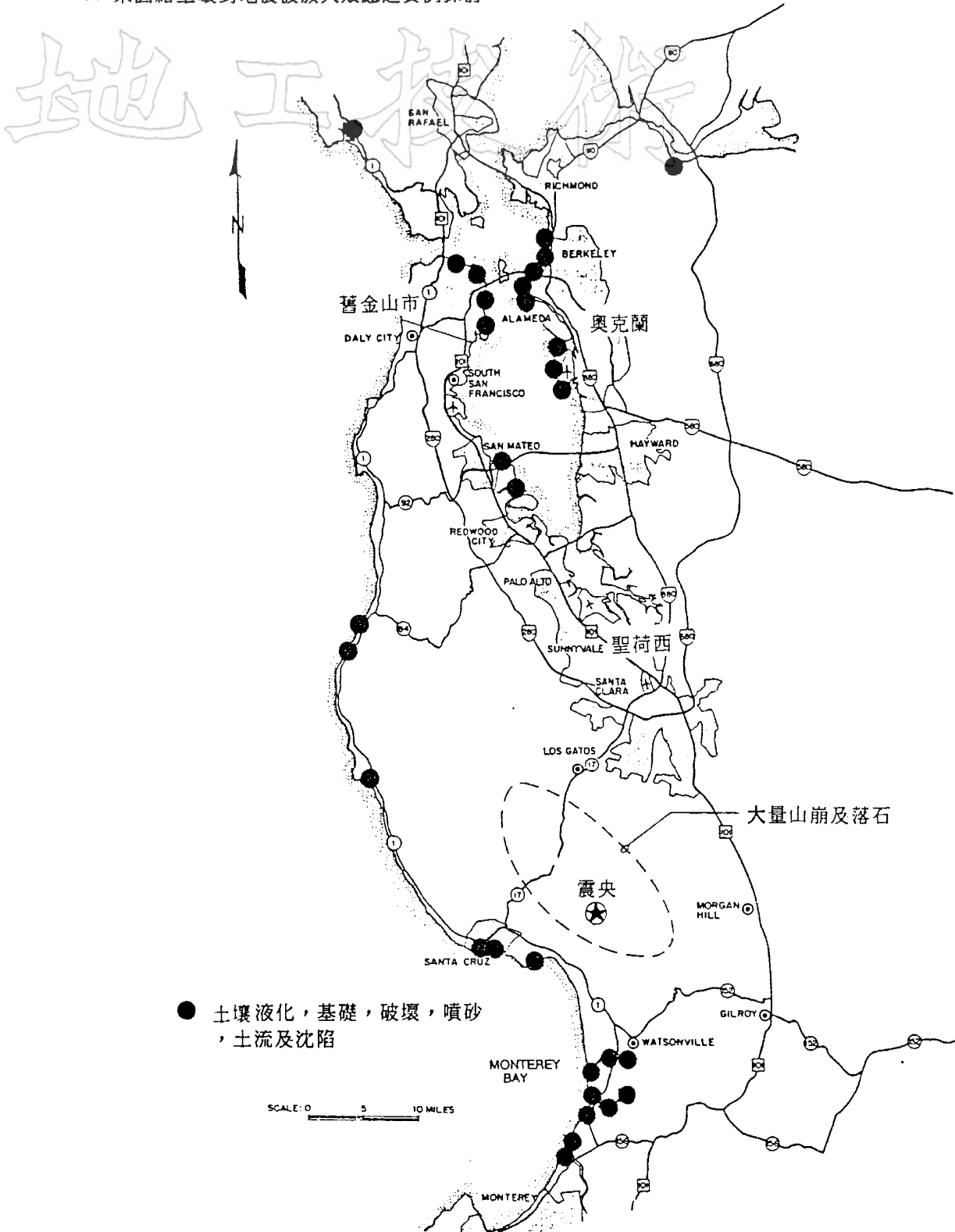
al., 1975) 作一比較，更可看出海灣內之土壤液化區均發生在海灣淤泥或其填土區上，相關之研究也顯示海灣淤泥區及其填土區確為鄰近地區中地震危害度最高之區域 (Seed and Sun, 1989; USGS, 1989)。目前各國正極力開發海埔新生地，如何加強工程之設計與施工

，將是新生地開發之重要課題。

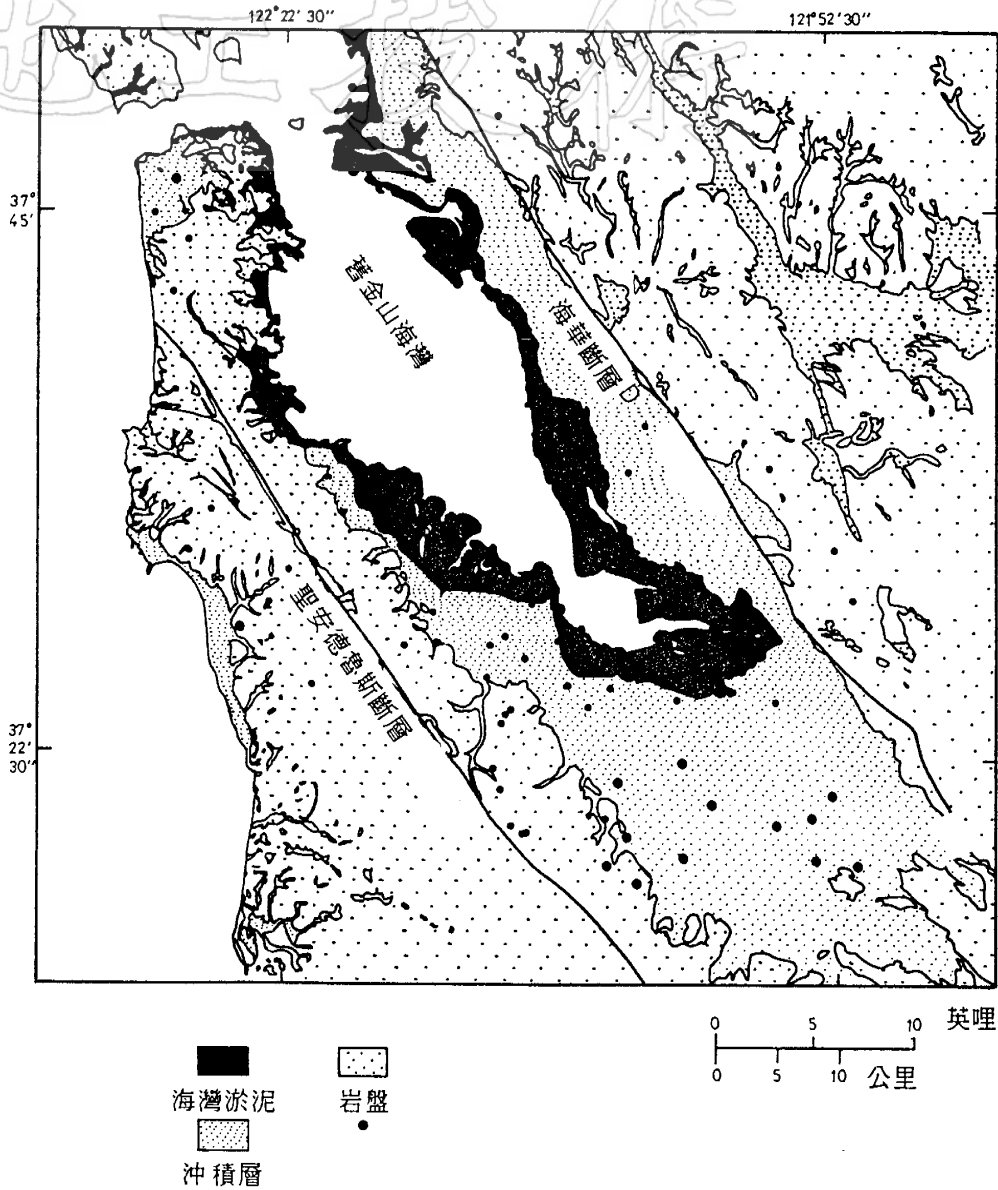
綜上分析，洛馬普利塔地震還不是此地區可能發生之最大地震，但卻對舊金山附近地區造成美國史上最大之天然災害，震災之分佈地區與地質條件有絕對密切之關係，根據此次地震記錄之統計資料顯示，與震央距離相當之同一地



圖二十二、舊金山地質圖(摘自 Schlocker, 1958)



圖二十三、洛馬普利塔地震時發生土壤液化現象之區域(摘自 Astaneh, 1989)



圖二十四、舊金山灣區淤泥分佈圖(摘自 Borchardt, 1975)

區，在沖積層上之最大垂直及水平加速度平均為岩盤加速度之1.9和1.8倍，而人工填土區和海灣淤泥區之最大垂直和水平加速度平均為岩盤加速度之1.8和2.6倍，最高放大倍率還有高至3.7倍者 (Meekan et al., 1989)。對於最大

加速度，其放大效應已甚為明顯，將來若再利用數據化之地震資料，對其反應譜作分析，更可看出地盤反應之最大放大倍率及其所對應之頻率，屆時必能對此次震災之原因提出更詳細之檢討，並研擬周密之震災防治對策。

地 伍、結語 技 術

地震為人類史上最頻繁之天然災害之一，瞬時間，天搖地動，其爆發力及殺傷力常令人措手不及，毫無補救之餘地，迄目前為止，我們對於地震之發生還無法預測，只能預期，我們對於地震之災害也無法完全消除，只能設法減少。應變之道就是要有「準備」，首先要對我們居住之環境有所瞭解，根據各區域潛在之地震危害度去規劃、設計及建造我們的生存空間，再配合周密之防災體系以應「地」變。

工程地震學之主題即是「準備」過程之上游科學，我們要利用地球科學的知識，正確地描繪出地震時地盤振動之程度，作為土木工程建設之根據。本文著重於土壤在地震作用時之放大效應，以近年三個破壞性最大之地震實例作說明，希能讓大地工程師深切體會「地工」與「地震」之密切關係，進而回頭檢討我們自己的生活環境，提早作好萬全之準備，期能使台灣的地震災害減至最小，是為本文之目的。

誌 謝

本文承蒙國立台灣大學地震工程研究中心主任蔡益超教授及土木系羅俊雄教授提供諸多參考資料，特此誌謝。

參考文獻

- 許茂雄等(民國78年)1989年10月17日美國洛馬普利塔 (Loma Prieta)地震震災考察報告書，行政院國家科學委員會防災科技勘災報告78-01號。
- AMBRASEYS, N.N. (1988), "Engineering Seismology", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 17, pp. 1-105.
- ANDERSON, J.G. et al. (1986), "Strong Ground Motion and Source Mechanism of the Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985", *Science* 233, pp. 1043-1049.
- ASTANEH, A. et al. (1989), *Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake*, Report No. UCB/EERC-89/14, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California, U.S.A.
- BARD, P.Y. et al. (1988), "The Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985 - A Theoretical Investigation of Large- and Small-scale Amplification Effects in the Mexico city Valley", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 3, pp. 609-633.
- BOLT, B.A. (1988), *Earthquakes*, W.H. Freeman and Company, New York.
- BORCHERDT, R.D. et al. (1975), "Response of Local Geological Units to Ground Shaking", U.S. Geological Survey Professional Paper 941-A, edited by Borchardt, R.D., pp.A52-A67.
- CDMG (1989), *CSMIP Strong Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October 1989*, Report OSMS 89-06, California Dept. of Conservation, Div. of Mines and Geology, California (1989).
- MEEHAN, J. et al. (1989), *Loma Prieta Earthquake October 17, 1989-Preliminary Reconnaissance*

- Report, Report No. 89-03, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California.
- MENDOZA, M.J. and AUVINET, G. (1988), "The Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985—Behavior of Building Foundations in Mexico City", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 1, pp. 835–853.
- ROMO, M.P., JAIME, A. and RESENDIZ, D. (1988), "The Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985—General Soil Conditions and Clay Properties in the Valley of Mexico", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 4, pp. 731–752.
- SANCHEZ—SESMA, F., et al. (1988), "The Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985— On the Seismic Response of the Valley of Mexico", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 3, pp. 569–589.
- SCHLOCKER, J. et al. (1958), "Geology of the San Francisco North Quadrangle", U.S. Geological Survey Miscellaneous Geological Investigation, Map I-272, Scale 1: 24,000.
- SEED, H.B. et al. (1987), *Relationship between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions in Mexico City in the Earthquake of Sept. 19, 1985*, Report No. UCB/EERC-87/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California, U.S.A.
- SEED, H.B. and SUN J.I. (1989), *Implications of Site Effects in the Mexico City Earthquake of Sept. 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California*, Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California, U.S.A.
- SINGH, S.K. et al. (1988), "The Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985— A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 4, pp. 653–673.
- U.S. Geological Survey (1989), "The Loma Prieta, California Earthquake: An Anticipated Event", U.S. Geological Survey, Open-file, Science 11/17/89.
- WYLLIE, L.A. and FILSON, J.R. (ed.) (1989), *Armenia Earthquake Reconnaissance Report*, Special Supplement Report, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California.
- ZEEVAERT, L. (1971), *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, Van Nostrand Reinhold Company.