知識天地

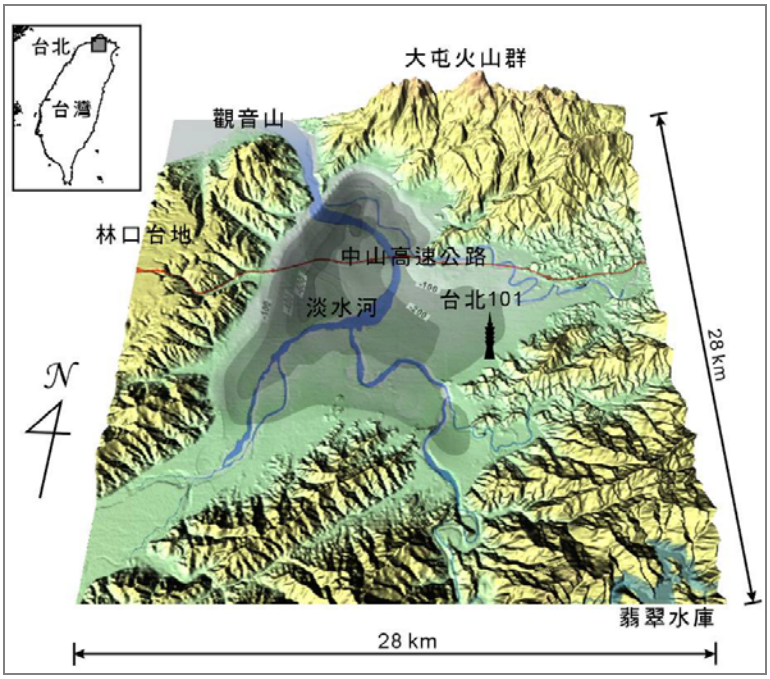
三維地震波模擬：談臺北都會區的地形與盆地效應

李憲忠博士後研究（地球科學研究所）

臺北盆地的隱藏危機

臺北都會區是臺灣人口最密集的區域之一，其座落在北部一個接近三角形的沈積盆地上（稱爲臺北盆地），地理位置非常特殊。過去二十多年來，地震一直是造成臺北地區建築物損毀與人員傷亡的主要天然災害，特別是 1999 年 9 月 21 日集集大地震（M_W 7.6）以及 2002 年 3 月 31 日宜蘭外海地震（M_W 7.0）。近來的研究更指出，發生在臺北盆地附近中等規模的地震活動亦會使整個臺北地區面臨強烈地表震動的風險。

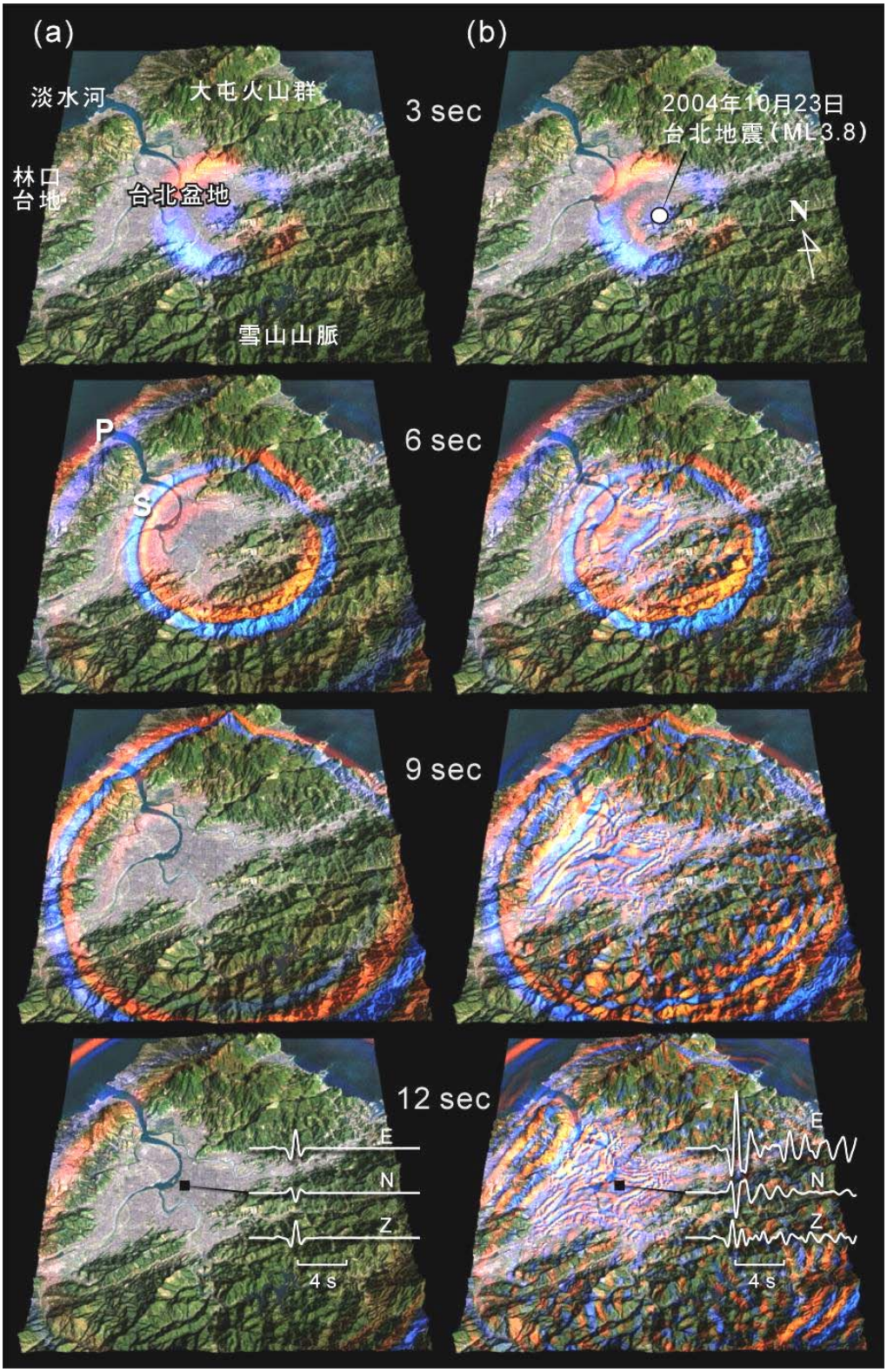
與世界上其它座落在盆地地形的都會區比較起來，如美國加州洛杉磯市下方的洛杉磯盆地，臺北都會區所處的臺北盆地面積並不大，僅約 20×20 平方公里。從深度上來看也相對地比較淺，地質調查的結果顯示盆地的最深處大約在 700 至 1000 公尺（如圖一）。盆地周圍由複雜的地表地形所環繞，包括北邊的大屯火山群、西側的林口臺地以及南邊的雪山山脈，這些不同的地質地形在短距離內由海平面（0 公尺）迅速抬升到 1120 公尺，其高度變化非常劇烈。另外，盆地的內部存在兩個主要的不連續面：一個是松山層，另一個爲盆地的基盤。松山層是位在盆地淺部的鬆軟沖積層，其組成物質的剪切波（S 波）速度非常的低，最低僅約 200m/s。盆地的外圍是由第三紀岩層所構成的基盤所圍繞，最深處近 1000 公尺。臺北市座落在這個獨特的盆地上，市區內高樓林立，盆地的東區有著現今世界最高樓—臺北 101 金融大樓。近來的研究顯示當地震波進入到盆地時，受到盆地的幾何以及其內部鬆軟沈積物的影響，會產生顯著的地震波震幅放大現象。臺北都會區正好位在這樣地質結構特殊的盆地上，加上高度密集的人口，使得臺北比其他地方潛藏了更高的地震危害風險。



圖一：臺北盆地俯視圖。盆地的深度變化以灰階表示；其中紅色線爲中山高速公路，圖中並特別標示出位於盆地東緣的臺北 101 金融大樓。

近幾年來，數值計算已經成功地應用在模擬地震所引起的強烈震動以及其所帶來的地震災害。然而臺北盆地內淺而具明顯速度側向變化的沖積層，以及盆地邊緣物質特性的顯著差異，於進行數值模型時會面臨較大的困難，再加上盆地周圍劇烈變化的地表地形，使這個問題更加地複雜。爲了要精確地將地表地形以及盆地內的低速物質加入考量，研究中採用了譜元素法（Spectral-Element Method, SEM）來處理臺北盆地的波傳問題。SEM 是一個已經發展了近二十年的數值方法，最初是於流體動力學上發展，近來才成功地應用在地震波的模擬中。目前來看，於三維波傳數值模擬的問題上，譜元素法是最具彈性與發展潛力的數值方法。然而由於其模型網格的建立具相當的複雜與困

難度，特別是在地表地形與地下構造的整合上，因此譜元素法於普遍應用上仍有所困難。在臺北盆地譜元素法的研究中，我們嘗試在模型網格中加入一個緩衝層（Buffer Layer）用於吸收陡峭地形所造成的網格扭曲來避免可能產生的計算不穩定現象，目前已經能夠將眞實地表地形完整地建置於網格模型中（圖二）。



圖二：兩個不同假設的模型之模擬結果。(a)考慮大尺度三維速度但沒有地表地形；(b)同時考量地表地形、盆地速度與構造以及大尺度地下三維速度模型。圖中所展示的爲垂直方向之速度型波場，其中紅色表示垂直向上之速度，藍色則爲負向速度。最下方的波形爲 TAP001 測站所記錄到之速度型合成地震波。地震波場之模擬採用的數值方法爲譜元素法.，模型的總網格節點數約 297 百萬，計算時的記憶體需求量爲 38 GB。於地球所 IBM eServer（10 個計算節點 20 顆處理器）上進行平行計算，完成 30 秒模擬的平均計算時間約 36 小時。

三維地震波數值模擬

透過上述的網格建構方法並結合 SEM 的特性，研究中以 40 公尺的解析度建立臺北盆地附近之地表地形網格，並提高合成地震波之計算頻率到 1.5 Hz。以 2004 年 10 月 23 日的臺北四獸山地震（M_L 3.8）作爲模擬對象，假設震源半持續時間（half-duration time）爲 0.5 秒來模擬 1 Hz 的地震波傳特性，探討地震波在眞實地表地形下的傳播現象。圖二說明在兩個不同模型下的模擬結果：(a)僅考量地底下的三維速度；(b)除了三維速度之外並加入地表地形與盆地構造。從兩者的比較中很明顯地可以看到，地表地形會造成複雜的波傳現象，當地震波通過山區時會產生顯著的反射與折射，特別是盆地東側附近的山區。模擬中可以觀察到一個主要的反射波從東南方向進入盆地，這個方向與盆地東側外的山脈走勢有一定的關係。另外注意的是，壓縮波（P 波）受地形的影響並不顯著（約出現在地震後 3 秒），但剪切波（S 波）卻產生了很明顯的反射與散射（約在 6 秒時出現）。山脈所造成的後續更多反射能量可以在 9 秒時清楚地觀察到。部分反射波會回傳到盆地中，造成臺北市區內的長時間振動。另外，盆地對地震波所造成的影響可以由模擬結果中清楚地看出。同時考慮了地形與盆地構造（圖二 b），地表振動變的極爲複雜。當地震波進入到盆地後，短週期的表面波（雷利波）在 6 秒時可以很清楚地觀察到其在 S 波後方逐漸形成。這些表面波的產生是由於能量在自由表面與盆地間來回震盪所致。由於能量陷在低速的沈積物質中不易傳播出去，使的地表振動的時間更加地延長，再加上周圍山脈所造成的反射與散射波能量持續進入到盆地內，使的盆地內的振動持續很長一段時間。

若將地表上每個位置的振動最大加速度值（Peak Ground Acceleration, PGA）進行分析，盆地的影響可以更加凸顯出來。與未考量地形的結果進行比較，山區中的最大加速度放大值約界在±50%，然而盆地內沈積物所造成的放大則超過 100%。盆地內的部分區域有著異常大的 PGA 放大值，這些異常區域主要位在盆地的東南端以及北端。值的注意的是，某些區域的放大值甚至可達到五倍以上。從合成波來看，由於盆地內震波速度普遍較低，所以主要波相都有著較長的走時，亦即出現的時間較晚。另外合成波於 10 秒後仍然有許多能量持續震盪，這些後續波相是受到盆地與周遭地形的共同效應所致。

結語

臺北都會區位在地質結構特殊的臺北盆地上，加上周圍複雜的地形以及高度密集的人口，使得臺北地區比其他地方有著更高的地震危害風險。爲了模擬臺北盆地的地震波傳現象，本研究發展了一個新的網格建立方法，可以將臺北都會區附近的地表地形以及複雜的盆地構造精確地建立到模型中，這些網格建立技術將可應用到整個臺灣模型的建立或是其它同樣有著複雜構造的區域。臺北盆地的模擬結果指出，盆地附近的地表地形會造成最大加速度 PGA 值±50%的變化。而盆地所造成的地表最大加速度放大值平均約在一倍以上，部分區域更可能達到五倍。盆地與周圍地形的交互作用將進一步地造成臺北都會區內地表振動時間的延長。這些由數值模擬所獲得的結果，需要我們仔細加以分析與注意，並在下一個大地震發生之前事先做好防範，以期達到地震防災與減災的目標。