



高科技半導體廠結構設計之關鍵考量

栗正暉／群策工程顧問股份有限公司 負責人、結構技師

黃宣諭／群策工程顧問股份有限公司 資深工程師、土木技師

台灣高科技製造產業在全世界高科技業供應鏈扮演舉足輕重的角色，舉凡在半導體、面板、記憶體、鏡頭、精密模具…等製造業，台灣都在供應鏈上扮演非常重要的角色。高科技免不了讓人想到電子、電機、機械等專業，初步給人的印象似乎與「土木」這兩個字沒有關聯，其實科技製造業供應鏈需要的專業相當廣泛，幾乎包含大學工學院全部的系所，例如：電子、電機、材料、光電、化工、機械、環工、工業工程與土木工程…等等，高科技電子產品本身或許與土木工程相去較遠，但是製造業一定少不了工廠，在地球上任何一個工廠都必定是一個構造物，構造物裡面裝設有許多生產設備，只要是構造物就一定需要土木工程的专业。

半導體廠與一般建築有何差異

半導體廠主要的功能就是生產或是測試半導體晶片，而一般建築都是以人為主要的服務對象，當然半導體晶片最後也是以人為服務對象，但是讓人舒服居住與晶片順利生產，一定有巨大的不同，所以設計並完成建造一座半導體工廠需要非常特殊的專業技術。這些專業技術有些與半導體製程有關，有些與台灣在半導體產業供應鏈的角色有關，有些與台灣特殊的地理地質環境有關，以下將分別介紹這些特殊的專業技術。

半導體廠房的結構系統

半導體廠的結構系統的特性

廠房平面尺度很大

平面尺度達到 200 m × 200 m 以上，相較於台北市敦化國小的校園尺度約為 110 m × 200 m（包含校舍與操場），一座半導體廠房幾乎是兩個完整的校園大小。

廠房的高度不高

屋頂高度一般都低於 30 m，通常是地下 2 層與地上 4 層的構造，廠房主要的生產樓面是 3 樓（樓層代

號是 L30），單一樓層高度約為 6 ~ 10 公尺之間。

大跨度的鋼構桁架構造

如（圖 1）所示 3 樓的空間通常採用大跨度的鋼構桁架構造，跨度可達 25 ~ 50 公尺之間，以維持設備最大的彈性排放空間，潔淨室空間以綠色的 CR 符號表示，潔淨室內空氣必須維持在極度的潔淨環境，才能達到精密製程需求。

高勁度與低微振動 RC 結構

3 樓以下的空間通常採用小跨度的 RC 梁柱構造，常見的梁跨度為 4.8 m、6 m 或 7.2 m，梁通常採用 RC 格子梁系統（圖 3），以高勁度降低振動量，構件長度採用 60 公分的模具，是為了配合潔淨室高架地板、天花板與金屬牆板的 60 公分模具考量，在水平向也必須是高勁度與低振動的環境，所以通常採用 RC 剪力牆的構造，剪力牆採雙向正交配置（圖 2），剪力牆的水平距離在 50 m 以內。

高設計載重需求

廠房主要生產設備載重通常高於 2,000 公斤/平方米，其他的樓層載重大約在 500 ~ 1,000 公斤/平方米之間。

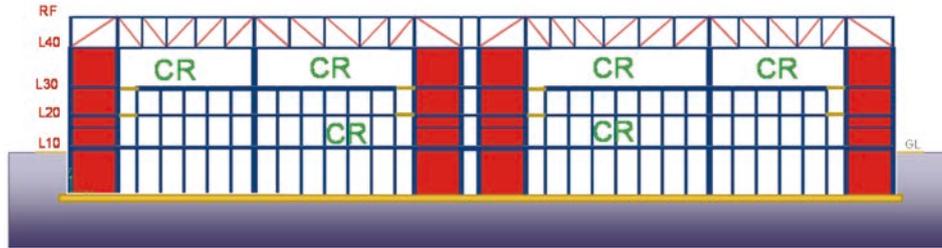


圖 1 半導體廠的剖面圖，紅的方塊是 RC 剪力牆

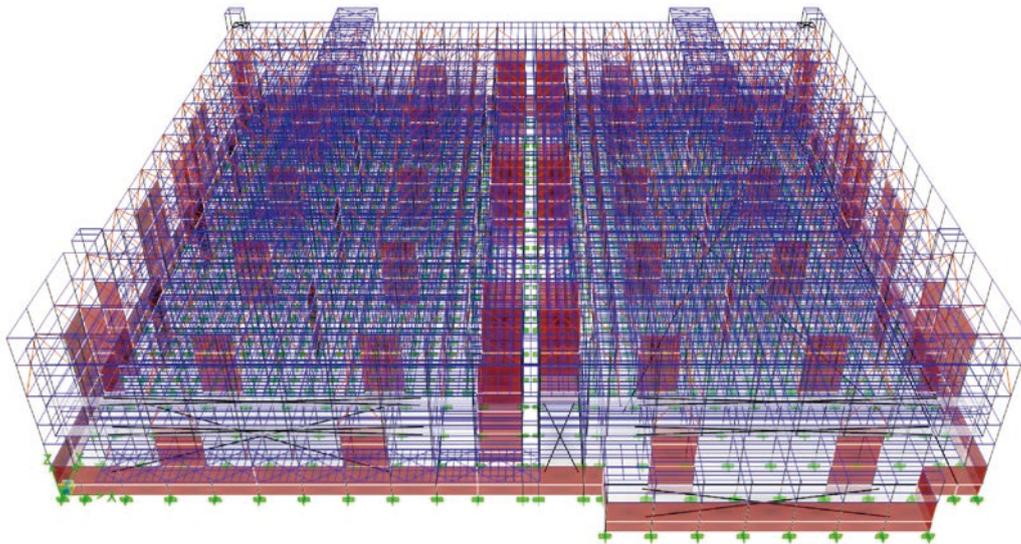


圖 2 ETABS 結構模型立體透視圖，紅的方塊是 RC 剪力牆



圖 3 半導體廠 RC 格子梁

微振動控制

半導體的精密製程趨勢就是越來越小的電晶體元件，以一只手機的最新製程 CPU 為例，晶片裡面包含的電晶體數量高達到 85 億個，以 7 奈米製程生產的晶片，其線路寬度已經遠低於可見光波長 400 ~ 700 奈米區間，能夠在晶片上生產遠低於可見光波長的線路，

需要非常穩定的環境控制。眾所周知，地球本身就會產生振動，就算是在極偏遠少人居住的鄉間，地表還是會有一定的振動量，更不用說半導體廠需要便利的交通，以維持生產原物料與水電資源供應，所以半導體廠不可能離開工業區。

微振動環境條件是影響生產良率很重要的因素，半導體廠房必須建築在土壤上，地表的振動一定會透過基礎傳遞到上部結構，加上工廠裡面的大大小小振動源，例如：風機、幫浦、馬達、風管、水管…等，都必須一一採用設備隔振克服，目前業界常用的微振標準是 Colin G. Gordon 與同仁在 1980 年代早期研發制定^[1]，從 VCA 到 VCE 分為 5 個等級，每一個等級的振動容忍值都是以速度為單位（圖 4），而且每個較嚴格等級的振動容許值都是前一個等級的 1/2，所以 VCE 是 VCA 的 1/16 容許振動量。

既然環境振動無法完全避免，所以半導體廠選址一定要經過微振動的測量，如果素地的條件不好，是不可能符合最精密的製程需求條件，廠址必須避開高

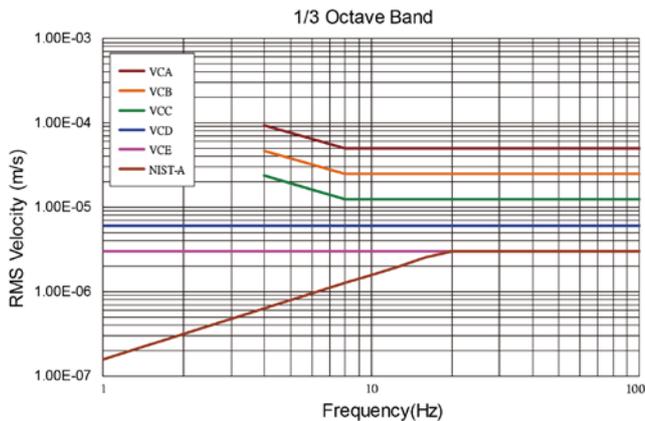


圖 4 Colin G. Gordon 與同仁在 1980 年代早期研發制定之微振標準

速公路、高鐵、過於軟弱土層、過於繁忙的交通要道、海邊（波浪振動）… 等地區，例如喧騰一時的南科高鐵振動就是一個典型的例子，依照實際測試結果發現，在高鐵沿線 200 公尺內的基地振動量，無法符合最高等級的半導體精密製程需求。

一般結構設計的考量通常都是依據人的活動來設計，工廠裡面人感覺不到的振動對精密加工機台還是會有影響，為了維持低振動的生產條件，精密製程設備會有特殊的隔振墊，來降低外在的環境振動，這些隔振墊通常採用氣壓彈簧 Air Spring 的型式（圖 5），有些設備還會採用主動控制式的隔振墊。氣壓彈簧與設備構成的系統自然頻率會很低，而且氣壓彈簧還有足夠的變形空間來緩衝外在振動，氣壓彈簧功能如同低通濾波器，將高於一定頻率的震動降低到很微小的水準，所以可將外界的高頻振動降低，當然也可能將低於系統自然頻率的振動放大，隔振墊設計需要振動力學的知識，但是精密製程隔振墊能夠隔離的振動有一定的上限，因此設計一座符合設備容忍上限的工廠結



圖 5 氣壓彈簧 Air Spring 隔震墊

<https://www.bilz.ag/en/products/bi-air-membrane-air-springs/membranluftfedern-ed-al/>

構也需要振動力學的知識，土木工程的基本訓練是有機會參與振動控制的領域，以過去接觸過振動控制專家的大學或研究所背景來看，其本科系所包含有：物理、機械、土木結構、船舶等領域，微振顧問的工作包含從建廠選址、結構微振設計、廠務設備隔振設計、結構體完成階段振動測試、廠務設備運轉階段振動測試、製程設備振動問題排除… 等工作，結構上可以達成微振需求的方法通常是透過提高勁度、提高質量來達成，當然材料本身的阻尼對比較高頻（例如 15 ~ 20Hz）的振動降低也會有幫助，實務上的做法可以藉由 RC 樓板加厚、梁柱結構加大斷面、提高混凝土強度、縮小柱間距、增加剪力牆… 等方式來達成，所以小跨度的 RC 格子梁結構（圖 3）是最常被採用的構造方式，鋼結構在微振控制上不如 RC 結構來的有優勢，主要的因素是重量比較輕、斷面比 RC 構造小、材料阻尼係數低等因素所致，如果一台價值一億歐元的設備無法正常生產，或是良率過低，都是非常可怕的災難。

除了廠房內部的人為振動源之外，鄰近廠房附近的施工振動也是必須考慮的風險，為了提高經濟效益，半導體產業經常會形成產業聚落，這也表示一個廠區的開發經常是分成數期來完成建設，當第一期廠房開始運轉後，後期廠房的施工，就變成前期廠房運轉的主要振動源，所以在一開始的規劃設計上必須考慮採用低振動工法，並在施工機具正式進場前必須進行振動衰減評估，也就是必須評估不同施工機具振動安全距離，實際上採用的方法是在現場足夠遠的安全地點以相同的機具進行施工，測量不同距離的地表振動量來評估安全距離，圖 6 呈現的是在竹科測試 H 型鋼樁振動植入時的振動量距離衰減曲線，一般來說如果施工機具振動能量集中在地表，振動會有比較遠的傳遞距離，這點與表面波沿著二維表面擴散衰減較慢的理論是相符的，此外由於 H 型鋼植入是採用振壓工法，設備振動頻率主要分布在 20Hz 以上的高頻區間（圖 7），在低於 10Hz 低頻區間的振動量與原背景振動差距不大，如果生產設備有比較好的隔振，應該可以大幅度的降低風險。

除了振動之外，外在的空氣條件，例如養豬場的氣味（阿摩尼亞味），或是高壓電塔的電磁波都可能影響製程，近來隨著精密機台等級提高，低頻振動的容許值有越來越嚴格的趨勢，低頻振動是非常難以隔離的振動，對新世代的半導體廠選址與建廠都會是新的挑戰。

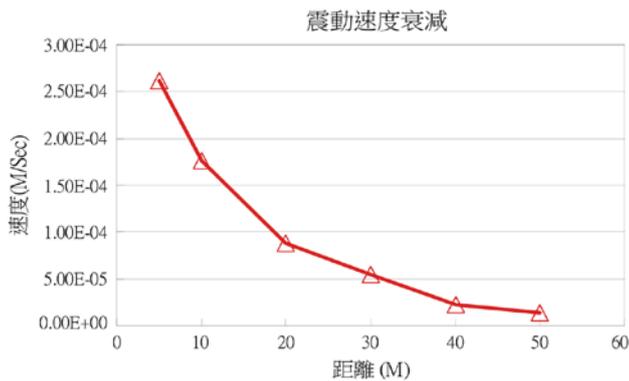


圖 6 於竹科測試 H 型鋼樁振動植入時的振動量距離衰減曲線

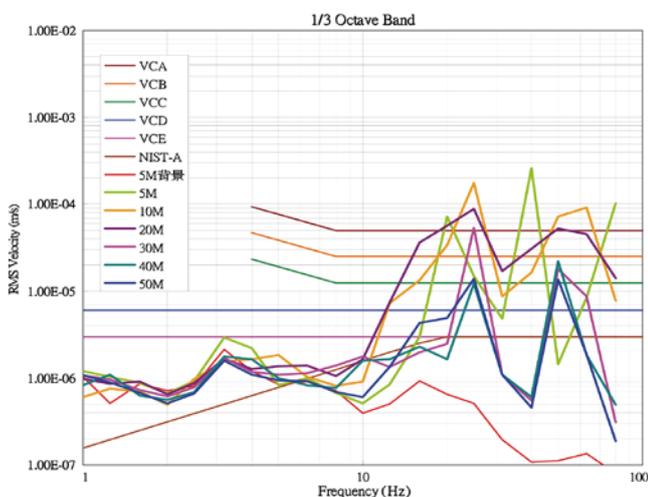


圖 7 於竹科測試 H 型鋼樁振動植入時的振動頻譜圖

耐震與減震

一般建築結構必須符合政府頒訂的建築物耐震設計規範，主要基於保護人民生命財產安全考量，耐震設計的基本觀念是「小震不壞、中震可修、大震不倒」，是在造價與安全上取得平衡的概念，但是對於資本密集、技術密集的半導體產業，一座總投資金額達到千億台幣等級的廠房來說，這樣的考量是不夠的，耐震上應該提高到「中震不壞、大震可修」的水平，這裡表述的「不壞」或是「可修」都是針對主體結構構件，假設當震度 6 的地震發生，主體結構沒有損壞，但是生產設備受損、製程產品損壞無法修復，十幾秒的地震就可能造成數十億台幣的損失。但是地震的發生無法預測，只能以機率的方式來評估發生潛勢，台灣附近地區未來 50 年發生規模 7 以上地震的機率一定高於 0，在這樣的風險下，如何讓一座廠房在經歷過地

震後快速地恢復生產，會是廠房結構設計、施工與設備抗震設計的大挑戰。

以現在的技術能力來說，主體結構已經可以透過 3D 的結構分析軟體來建置，並且得到相當有可信度的靜動態分析結果，在模擬的過程中也必須留意廠房的水平尺度達到 200M*200M，相當於 3 架 747 飛機的長度（圖 8），許多的模型參數並不一定能夠沿用一般小尺度結構的模擬方式，由於樓層尺度過大，因此不能過於簡化結構模型，樓板的勁度必須依照實際的彈性勁度設置，其他的動力參數設定不能只依據理論值，必須參考佈設在廠房內的加速度計數據，在每次地震時後取得的寶貴資訊來回歸，逐步校調模擬數據以接近實際測量成果，對於尚未發生的大地震，可以採用非線性側推模擬分析方法來評估結構非線性行為（圖 9），不論是發生的部位與對應之非線性變形量化指標，都可以有可信度極高的數據當作是風險管理的依據。

對於製程設備或是晶片的防震保護，是另一個更高層次的技術難題，依照美國 FEMA 的準則^[2]，地震對廠房設備的危害分成兩類，第一類是地震加速度敏感設備，也就是當加速度很大就可能會損壞的設備，例如貨架上的可能會掉落的昂貴產品，第二類是地震位移量敏感設備，也就是當地震造成的相對位移量很大就會損壞的設備，例如跨越不同建築物伸縮縫的管線彈性接頭，設計上必須降低廠房結構在地震下所造成的加速度與相對位移。如果我們設計的標的是一間重要的醫院，相信隔震系統會是非常好的選擇，適當設計隔震層與管線彈性接頭，應該可以讓隔震層以上

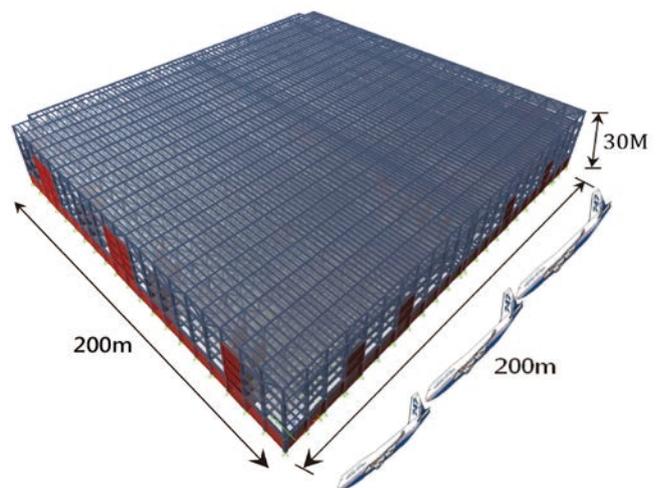


圖 8 ETABS 建構的半導體廠房模型

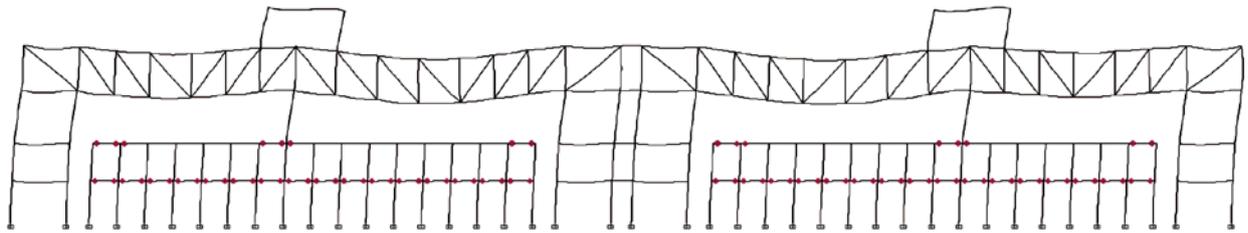


圖 9 以 ETABS 側推 (Pushover) 分析驗證半導體廠房大地震下的非線性行為

樓層之間相對位移量很小，且樓層加速度只有地表加速度 50% ~ 80% 的表現，藉由隔震系統將地震的風險降到很低，但隔震與微振控制概念上是相衝突的，隔震是藉由隔震墊將隔震結構變軟，動力週期延長到地盤週期的 2 ~ 3 倍以上，例如隔震後的系統週期達到 3 秒以上，來降低地震的反應，前面提到未來新設備對低頻振動容忍度有變嚴格的趨勢，一個可以隔地震的廠房，可能會放大微振動量，放大後的量化差距可以參照既有隔震建築之隔震層上下方的微振測量頻譜圖

(圖 10)。此外，進入工廠的管線很多，有許多管線是高風險的流體或是有壓力的氣體管，隔震層高達 40 ~ 50 公分的地震相對位移量，會造成管線在地震後的洩漏風險提高，洩漏後的偵測與修復也很棘手。

減震設計的策略必須在場址選定前就必須開始探討，每個場址都有過去地震的歷時記錄 (圖 11)，將這些歷史記錄製作成地震反應譜，比較探討可以發現反應比較低的頻率分布區間，一般半導體廠房可能的自然頻率為 2 ~ 3Hz (週期 0.5 秒 ~ 0.3 秒) 之間，建築物的自

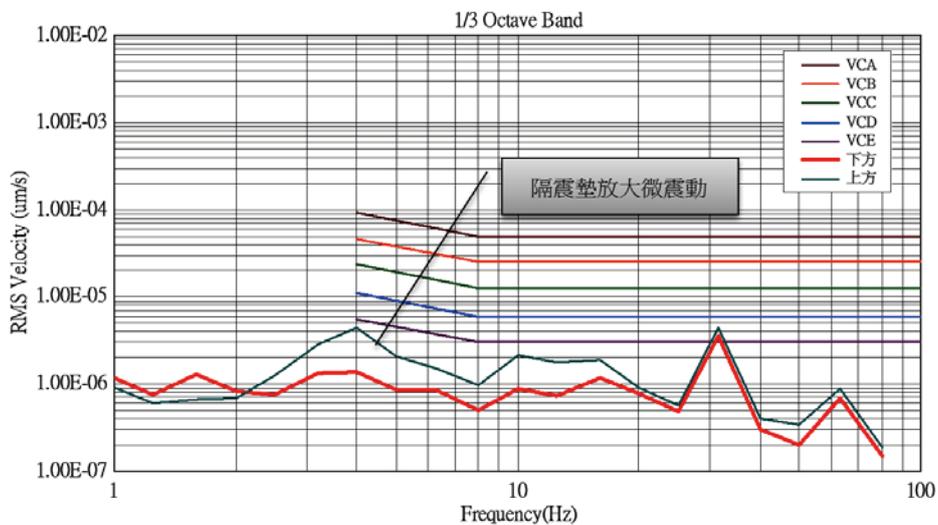


圖 10 隔震結構微振測量比較

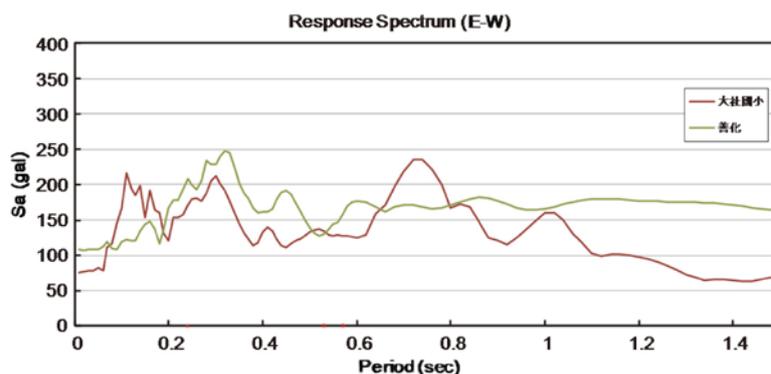


圖 11 0304 地震測站反應譜比較圖

(地震資料來源：中央氣象局歷史地震查詢系統 <https://gdms.cwb.gov.tw/>)

然頻率如果校調到低反應頻率區間可以降低風險。一般建築物會採用的液壓阻尼器，也會是半導體廠房可以採用的減震策略，與一般建築物不同的是，半導體廠房的勁度很高，相對位移小，廠房面積大，能夠安裝阻尼器的位置有限，所以通常會採用出力比較大且黏性比較高的液壓阻尼器，期望阻尼器在比較低的位移下就可以發揮效能功效，阻尼器通常配置在廠房邊緣的潔淨室回風通道（圖 12），阻尼器採水平方向擺設，讓阻尼器在水平位移下有最佳的消能效果（圖 13）。

自 2009 年以來隨著廠址安裝加速度計取得的測量成果增加，比對南科的測量成果後可以看出有明顯的土壤與結構動態互制現象，有效利用土壤與結構動態互制特性可以降低地震的反應，特別是在廠房的自然頻率區間的地震波震動可以有效的降低，目前的廠房在設計階段會把基地土壤與結構動態互制效應納入考量，在基礎下方就將地震波動降低後再進入廠房，土壤與結構動態互制效應在地震工程的應用，最早是開始於核電廠反應爐圍阻體的設計^[3]（圖 14），核電廠反應爐圍阻體是世界上地震保護最嚴謹的結構物，絕對是半導體廠房學習

的標竿，在實務面上是採用 SASSI 程式進行結構土壤動態互制分析^[4,5]，找出最佳的基樁配置方式來提高土壤結構動態互制效應，以降低地震反應。

簡而言之，半導體廠房的減震設計第一道防線是土壤與結構動態互制效應，可以降低進入工廠有傷害性的地震波，第二道防線是結構物的高勁度與避震調頻技術，可以避開主要共振頻率，降低共振發生機會，第三道防線是液壓阻尼器，可以減低共振發生後的結構反應。經過以上強化設計後的成效，可以比較廠房 3 樓在 2016/02/06 地震下的加速度反應譜，加強土壤與結構動態互制效應（SSI）（圖 15）。

除了主體結構的耐震設計外，廠房內的廠務設備與機台也必須經過耐震設計，設備必須採用適當的固定以防止傾倒，對於會發生相對位移的設備，例如管線，都必須參考主體結構設計時提供的相對位移需求數據來設計，對於本身就具有動態特性的設備，例如設備自然頻率若過於接近廠房自然頻率，則有可能在地震時發生設備與廠房共振行為，應該要避免，比較建議的作法是調整設備的頻率到比較高頻的區間，與

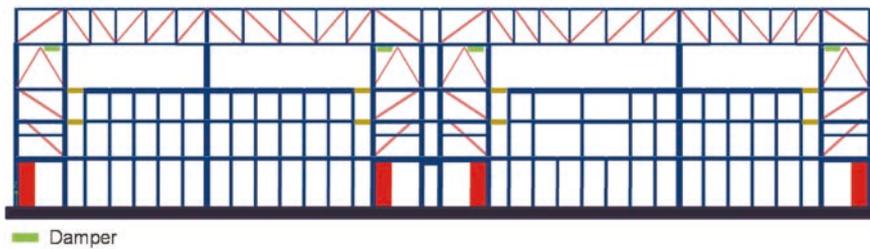


圖 12 半導體廠房阻尼器配置



圖 13 半導體廠房阻尼器採水平方向配置

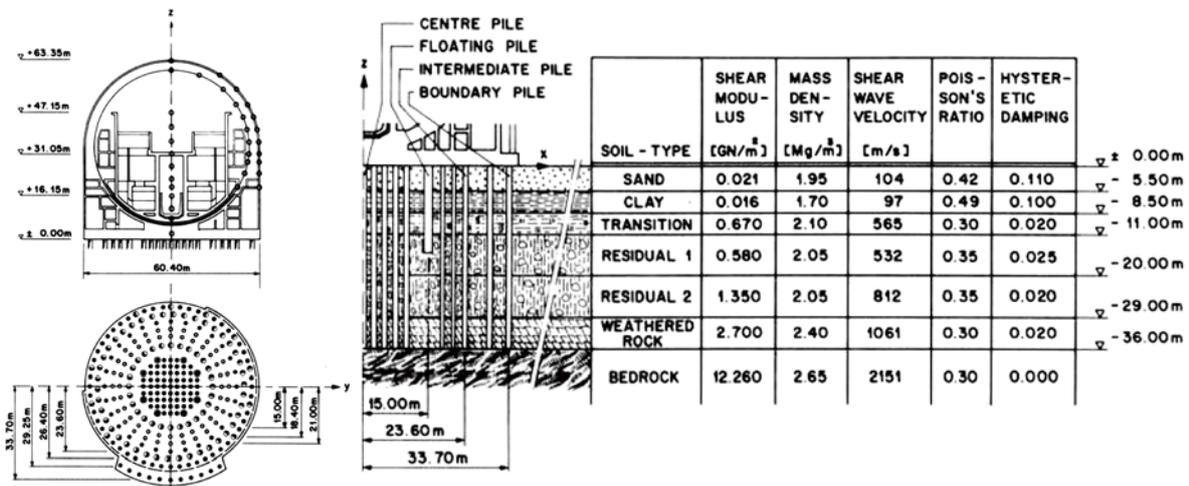


圖 14 核電廠圍阻體利用基樁加強土壤與結構動態互制效應

資料來源：“Dynamic soil-structure interaction”, John P. Wolf, 1985

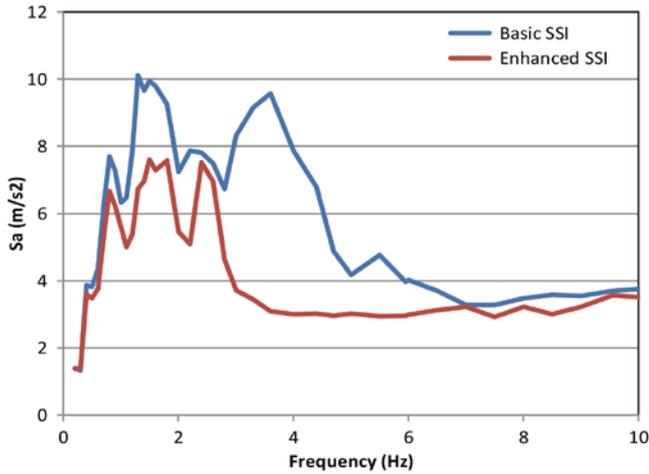


圖 15 加強土壤與結構動態互制效應 (SSI) 結構在 3F 反應有明顯降低現象

設備安裝阻尼器作法相較，與其等到共振發生再透過阻尼器減震，倒不如直接調頻避免共振發生來得直接有效，設備結構是比較小的系統，如果想要提高 2 ~ 4 倍的勁度，在技術上是有機會可以達成的，對於比較重要的設備也可以採用振動台測試的方法來驗證設備的耐震效果 (圖 16)，為達到試驗的真實性，設備在試驗過程中是以真實的晶圓片來測試，晶圓片容器墜落後的破片情況，也是完全反應真實地震情境 (圖 17)。



圖 16 在 NCREE 進行之半導體設備振動台測試

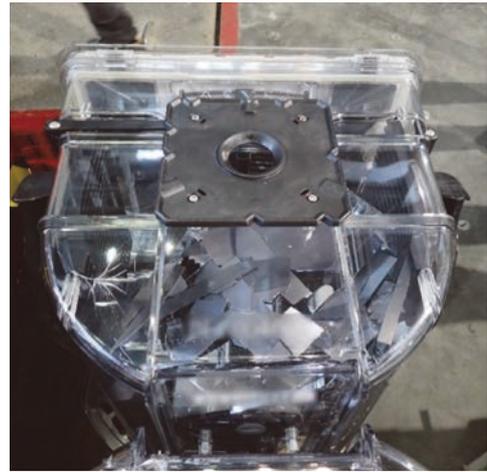


圖 17 在 NCREE 以實際振動台測試晶圓儲存設備，晶片受加速度作用後墜落破碎

造價與工期

除了前面談到的結構行為外，造價與工期是專案實務上能夠成功非常重要的因素，一個工程規模達到百億台幣的建築工程發包作業，一定是耗費時間的工作，科技廠房的投資是反應科技產品市場的需求，如果一只手機的使用期間是 3 年，那麼生產手機晶片工廠的建造也勢必要跟得上電子業的節奏，除了設計時程短暫外，工期也非常的短暫，常見的主體建築工期大約是 14 ~ 15 個月，相對於工期短，發包作業時程就變成是工程進行的要徑 (Critical Path)，半導體產業幾乎都是上市公司，發包與計價計量的過程一定是要公正透明經得起稽核，如果設計圖面不清楚，會造成業主與承包商彼此的履約風險，如何在最短時間內提出讓合約甲乙雙方都可以信服的估價參考依據，是非常務實與重要的工作，數量估算上些許的誤差就可能讓投標廠商遭受鉅額虧損，或是發生履約糾紛讓工程停擺，經過多年的研發與嘗試，一些最先進的半導體廠發包作業，已經開始採用 BIM 3D 建模方式，來輔助發包作業，具體的作法是在廠商領標後兩周，由結構設計單位提出詳細的 Tekla Structures 3D^[6] 鋼筋與鋼構模型，以鋼筋為例，模型必須依照標準圖與設計圖說建置，包含：主筋、箍筋、繫筋、彎鉤、錨定、搭接與續接器 … 等等 (圖 18、圖 19)，廠商取得模型後很快就可以獲得鋼筋的重量數據，也可以檢視鋼筋模型建置是否符合施工方式。同樣的鋼構也會建立 3D 模型 (圖 20)，包含加勁板、連結板、柱底板 … 等等資

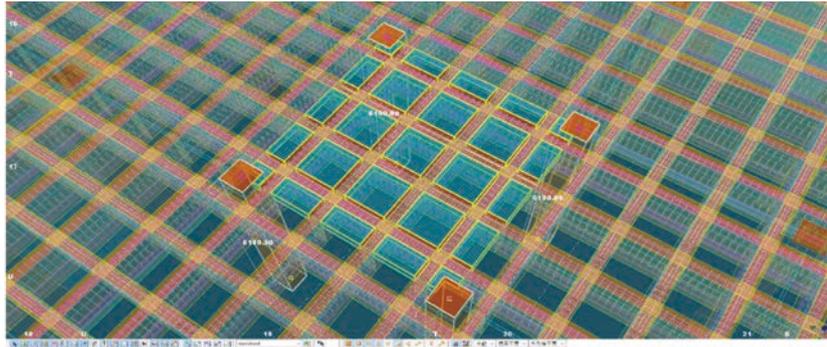


圖 18 Tekla RC 格子梁 BIM 建模

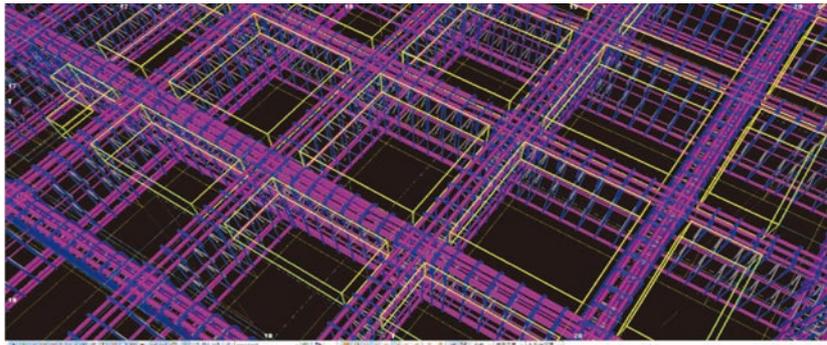


圖 19 Tekla RC 格子梁 BIM 建模

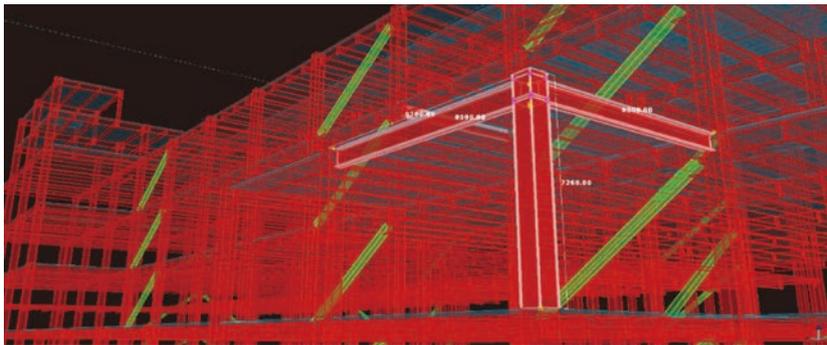


圖 20 Tekla 鋼構 BIM 建模

訊，全部的資訊都是以 3D 方式來呈現，對於比較零碎難以建入模型的元件，例如開口補強、收邊小構件、穩定性角鋼、高低差補強、螺栓與剪力釘 … 等可以透過人工計算方式補充，以縮短作業時程。

結論

半導體產業是高度資本密集與技術密集的產業，以現今的國際局勢來看，幾乎被當作是戰略競爭優勢，在台灣地小人稠與天然災害的環境下，孜孜不倦的工程人員默默的付出智慧與勞力維持著競爭優勢，發展出在技術上可用、在商業上可行、在資源上可及的種種解決方案，在建廠與營運上，全部的人員是一個團隊，共同完成一個目標「在預定時程內，製造出高品質的半導體元

件」。相信未來的挑戰還非常多，例如：缺工、缺水、缺電，在人類對高效運算需求只會增加的預期下，繼續建設新一代的半導體廠房仍然是大勢所趨。

參考文獻

1. Colin G. Gordon, “Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment”, SPIE Proceedings Volume 1619 (1991).
2. “Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Buildings”, FEMA P-58-6 (2018).
3. John P. Wolf, “Dynamic soil-structure interaction” (1985).
4. 陳希舜、廖克弘、徐偉朝、施俊揚、侯志剛，「以無因次化影響參數探討土壤結構系統之互制行為」，NSC91-2211-E-011-046 (2003)。
5. 許尚逸、陳正興，「考慮土壤與結構互制效應之等值固定基盤分析模式」，臺灣大學：土木工程學研究所 (2006)。
6. 歐亞電腦，“Tekla Structures” (2019)。

