



高科技半導體廠 下部結構工程 概論

宋思賢 / 台灣積體電路股份有限公司 廠務處 副理

關於「高科技」的定義，國際經濟合作發展組織（OECD）將航太科技、藥品配製、電腦資訊機械、通訊器材等，做為高科技產業的範疇。而「半導體」則是台灣高科技製造業中，扮演世界供應鏈不可或缺的角色，其產業應用從 3C 電腦科技產品、行動裝置手機、平板到現今 AI 人工智慧運算、自駕車、5G 通訊，打個比喻，水泥材料對於土木工程的重要性以及應用廣度，就如同半導體對於高科技產業的角色，台灣也因著半導體舉足輕重的地位，建立起矽屏障的實力。

半導體廠則是涵蓋了晶圓生產設備機台以及高科技廠房設施，其中廠房設施則包含了建築、水電空調、管線設備、空汙水污處理、環境保護設施等，而本文主要介紹高科技半導體廠的下部結構工程，也就是整個半導體廠的起點，從一片素地，開始建造起一座高科技半導體廠。

半導體廠房的下部結構系統設計概要

何為下部結構？

首先，先來說明下部結構的定義，一般在土木工程與建築工程的下部結構範圍，指的是承載建物重量

傳接至土層的基礎工程，例如建築物的基礎、橋梁基墩、水壩的擴基等，這屬於狹義範疇，然而在廣義的定義上，則泛指「地面層以下」，所有結構體及相關的結構設施，包含地下室的結構體、基礎結構體、基樁、隧道等，都屬於下部結構。

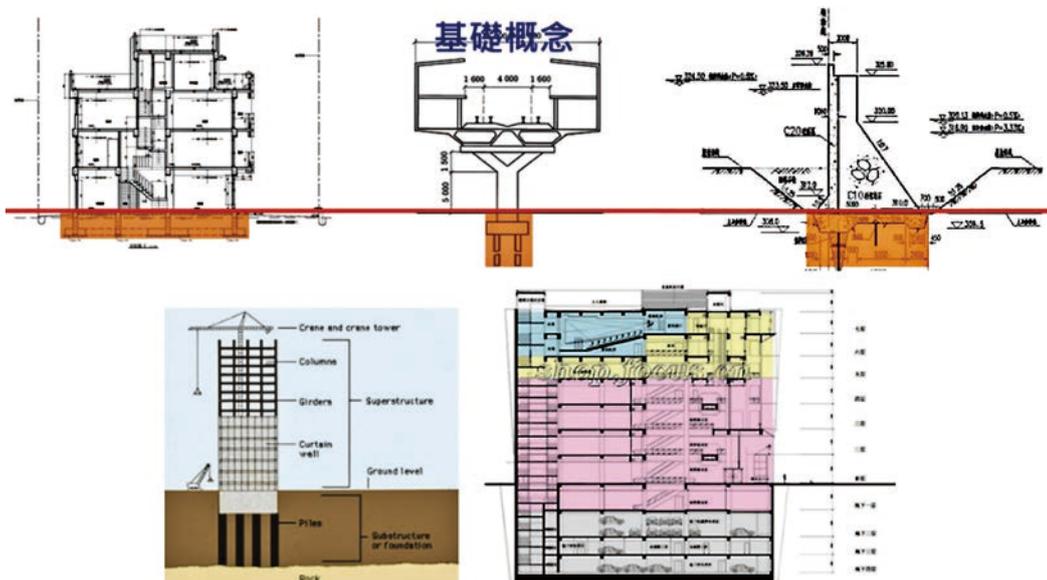


圖 1 下部結構示意說明

而本文主角，半導體廠的下部結構內容，主要針對其廠房地下室結構為主，如圖 2 所示，主要構造為基樁、基礎、擋土牆、結構體（柱、剪力牆、梁、1F 樓板）。

而地下室區域的空間需求，LB2 為製程用水製造區域、廢水處理區域，須要極大的腹地以及空間高度，才可放置處理系統的桶槽與管線；LB1 空間則為附屬的設備機台生產空間，用於放置電氣機房、機台的附屬設施（電盤、抽氣幫浦、廢棄處理設施等），如圖 3 照片所示。

下部結構主要特性因素

既然下部結構主要是在地面層以下，因此其主要特性，則離不開大地，將依以下幾點特性因素來說明重點。首先要先了解這個大地，不同的地理環境，就有各式的差異變數，例如台灣的竹科、中科、南科，就分別有不同的地質，第一步則是需要進行地質鑽

探，了解腳底下的大地有甚麼樣的成分與歷史，透過鑽探挖掘的土壤，分析其成分特性，做為結構設計的依據及形式。鑽探結果，甚至有考古遺址，則必須評估如何開挖搬運保護，才得以進行施工，如圖 4。第二步，針對鑽探結果進行評估，是否需要進行地質的改良，例如置換土壤或是設計承載的樁結構，如圖 5 說明。第三步施工下部結構，就得開挖腳下的大地，也就是擋土開挖，進而才能進行第四步的結構工程，後續將會依循這下部結構的主要特色因素來介紹。

台灣北中南科學園區的地質特性，如圖 6，其中最大的差異則為中科與南科，中科地質均為大粒徑的卵礫石層，硬度高且困難挖掘，相對的其結構承載條件佳；南科地質則為沉澱淤積的粉、黏土層，且硬度低，簡單挖掘但卻有容易沉陷的特性。因應不同的地質條件，就有著截然不同的設計與施工工法，例如樁基礎的結構設計與施工。

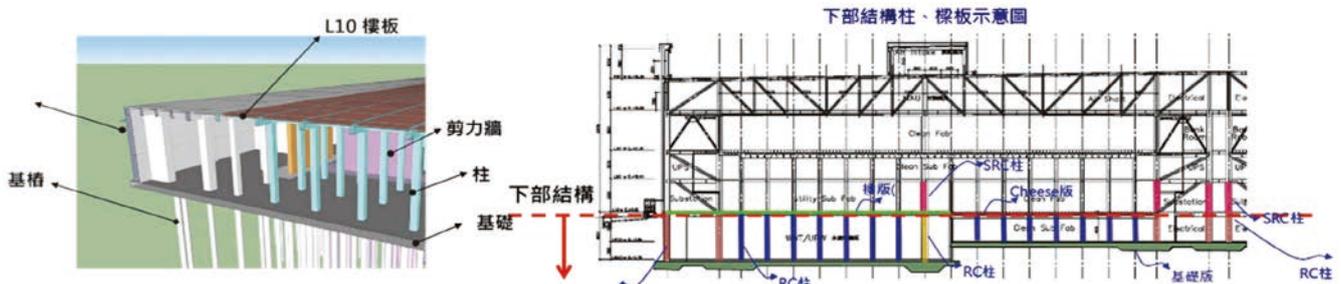


圖 2 半導體廠下部結構示意說明



WWT (Waste Water Treatment) / UPW (Ultra Pure Water)

Clean Sub Fab

圖 3 半導體廠下部結構 LB2、LB1 照片示意

地質鑽探

- 地質調查定義：在基礎設計及決定構築方法前，必需瞭解地層組織及載重能力，作為基礎設計之安全性考量

地質調查目的

- 瞭解土壤之承載力、沉陷量、側壓力
- 瞭解水文、地下水的高程、土壤含水率、伏流
- 選擇基礎設計之形式與深度、適當與經濟考量
- 確保鄰近構造物之穩定安全，作為施工之預防
- 假設工程之資料提供研判，與安全計劃之防範
- 考古遺址？！



開挖考古遺址，搬運保護



圖 4 地質鑽探照片與目的

地質改良

■ 當基礎地盤土壤承载力不足以直接承地上結構物、或者地盤沉陷量過大的情況下，利用各種壓實或固結等方法將地盤土壤顆粒的排列及空隙狀態等不穩定之因素加以改良，以促進地盤承载力及抑制沉陷量的方法。

改良之設計流程

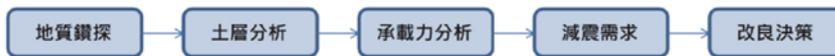
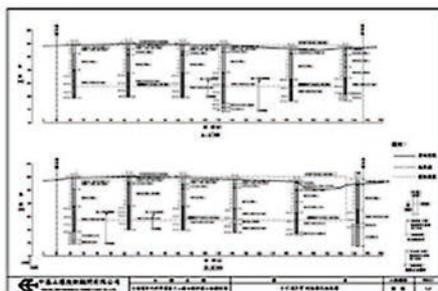


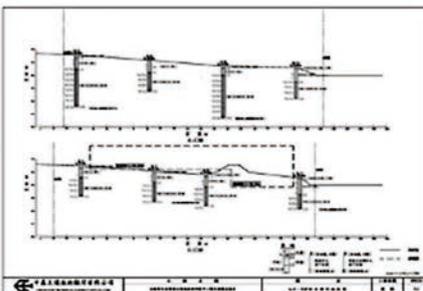
圖 5 地質改良流程

竹科



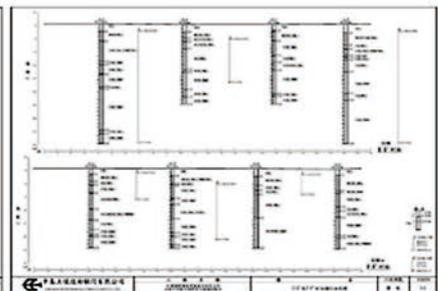
分為四個層次：
 (1) 回填層
 (2) 砂質黏土或粉土質黏土層
 (3) 卵礫石夾黃棕色粗中細砂層
 (4) 岩層
 地下水水位介於 EL+83.16~87.96m 間
 地下水應位於地表下 15.00m
 細顆粒卵礫石層
 穩定-硬度中可鑽掘

中科



分為二個層次：
 (1) 表土覆蓋層
 (2) 卵礫石夾黃棕色粉土質砂層
 基地下水水位在 鑽孔深度 20.00 公尺以下
 大粒徑卵礫石層
 穩定-但硬度高困難鑽掘

南科



分為五個層次：
 (1) 回填層
 (2) 粉土質黏土層
 (3) 砂質粉土或粉土質細砂層
 (4) 粉土質黏土層
 (5) 粉土質細砂層
 常時狀態以 地表下 1.00~5.00 公尺設計
 粉土、黏土層
 易沉陷-硬度低

圖 6 竹科 / 中科 / 南科地質比較

開挖擋土

主要考慮變數為土壤的特性以及基地週遭的條件，例如南科的地質軟弱，擋土的設計，就不太可能往垂直立面開挖，容易崩塌，須要增設許多擋土設施，如排樁（用樁體所組成的擋土牆面），並且增設地錨來錨定，提供擋土牆面的支撐；若基地週遭有足夠的腹地，則可使用明挖工法，直接開挖斜坡，但一般在施工動線的限制下，通常沒有足夠的腹地空間，例如台北市建築大樓的施工，週遭都是鄰房，則不可能明挖，而是採取連續壁體的施工，同時做為擋土設施以及地下室外牆結構。

在開挖的過程中，尤以安全的觀測為主要的重點，

必須確認開挖時，擋土設施的結構穩定，有無傾斜影響到週遭道路或是鄰房，或者是因下雨導致地下水上升，而導致有更大的土壓力（含水），而必需要盡快抽水，降低水位，加強擋土設施安全，如圖 8 說明。

基樁

半導體廠的下部結構，除了基本的載重設計需求外，對於高耐震以及對於中小型地震對於生產的影響需降至最低，因此均會依該地質條件進行樁基礎的設計，尤其南科的地質為軟弱的粉黏土層，均會有樁的結構設計，往往一個半導體廠均需 4,000 ~ 5,000 支的基樁。而基樁設計的原理，簡易可分兩類。

擋土開挖工法

- 考慮土壤特性差異，擋土開挖工法如下：自承式開挖工法、明挖邊坡工法、擋土牆自承工法、地錨工法、水平支撐工法、島築式工法、壕溝式開挖工法...等眾多方式
- 主要分類如下：
 - 明挖護坡：腹地大、成本低、風險低
 - 鋼板樁：工期短、成本低、剛性低
 - 擋土樁、擋土排樁、擋土預疊樁：工期長、成本中、剛性高
 - 連續壁：工期長、成本高、剛性高、可為地下室結構擋土外牆
 - 潛盾工法、新奧工法：工期長，多用於隧道工程

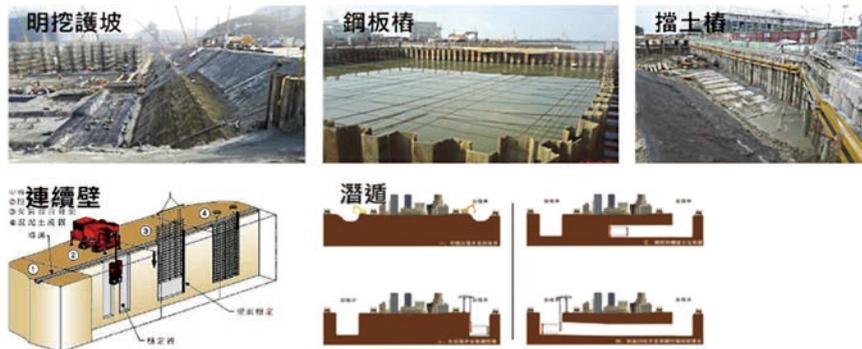


圖 7 開挖擋土工法示意

- 開挖前需完成各項安全觀測設施，進行監控
- 開挖中需定期觀測各項安全指標，了解擋土措施現況(擋土旁降解除壓)
- 根據安全觀測指標數據執行-安全/警戒/行動值
- 需設立抽水井、降低基地內地下水位，減少地下水影響開挖效率及擋土安全

項次	安全觀測設施	說明	照片
1	壁體傾斜管	擋土壁變形量觀測	
2	水位觀測井	場區內外地下水位監控	
3	地錨荷重計	擋土措施內應力及外部土壓監控	
4	沉陷釘、隆起點	基地內建物及基地外路面高程變化監控	
5	鄰房傾度盤	鄰近建築受基地開挖影響，沉陷量監控	

圖 8 開挖安全觀測說明

- 一、承載基樁，主要依靠樁與土壤的摩擦力 + 樁底部的承載力，做為基樁承載的結構核算
- 二、浮動基樁，主要利用基樁佈設的密度與土壤的握裹，做為固結的效益，就像是綁住大地土壤的概念，來加強降低地震時對半導體廠的影響，如圖 9。

由於大地的變數多，因此每當基樁結構設計完成，會在該基地現場進行試樁，直接在實際地質的環境中驗證，確保設計的條件及目標與實際執行相同，而這個動作也能確保基樁的設計是否符合需求，此點相當重要，因此施工前需要執行「設計樁」的測試，

而施工後，同樣需要執行「驗證樁」的測試，來確保工地施工的品質是否符合，如圖 10。

地下室結構

由於半導體廠的整體建物重量大，因此在地下室結構體的設計，則以高載重、高勁度的基礎結構設計，並且均採取筏式的基礎，以避免建物不均勻沉陷的問題，而柱位、梁位系統則依照整體建物的需求配置，從上部結構主要生產空間的承載、耐震、抗微振結構設計需求，一路延伸至下部結構體、大地基礎承載，而在地下室的外牆則需考量背側的土壓、地下水壓力，進行壁體的設計。

承載基樁結構設計原理

- 計算基樁載重需求-試樁試驗(土壤特質)
- 分析決定單樁承載能力
- 依據基礎樁帽所需反力決定基樁數目
- 設計基礎樁帽尺度及配筋需求

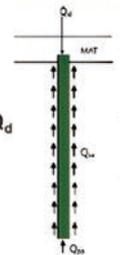
$$Q_u = Q_p + Q_s$$

- Q_u : 單樁極限承載力
- Q_p : 單樁底點承載力
- Q_s : 單樁側摩阻力

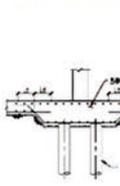
$$Q_a = Q_p / FS1 + Q_s / FS2 > Q_d$$

- Q_a : 單樁容許承載力
- FS1&FS2: 安全係數
- Q_d : 單樁設計所需承載力

承載樁受力示意圖



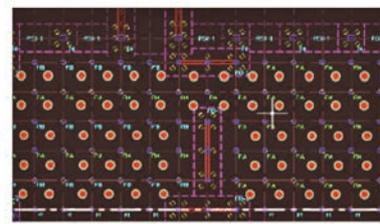
基礎樁帽平面圖



浮動基樁結構設計原理

- 浮動樁主要為增加基樁樁徑、密度、增加與土壤互制、固結設計，而非長度設計(支承)
- 基樁直徑與密度的提高，如同是把FAB與基礎的土壤作固結，往下利用土壤的質量與阻尼特性當作是構造的一部分改變整體動力系統型態 (2Hz以上)

抗浮樁結構平面示意圖



結構土壤互制示意圖

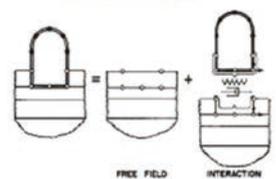


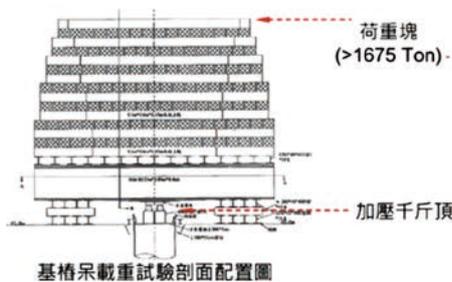
圖 9 基樁結構設計原理

- 設計樁：測試基樁載重試驗與拉拔試驗，測得基樁實際極限荷重，作為基樁載重設計基準
- 驗證樁：確認工地施工現場施工品質驗證，是否符合設計標準



試驗類別	試驗方法
載重試驗	採用基樁錨碇或臬載重方式
拉拔試驗	採用基樁錨碇方式

試驗方式	試驗樁長 (M)	設計極限荷重 (T)*	實測極限荷重 (T)**	測試位移量 (mm)***	永久位移量 (mm)
反力式載重試驗	15	3010	3612	16.05	9.76
拉拔試驗	10	1860	2232	10.07	8.5
拉拔試驗	15	800	960	5.74	1.63



區段	樁徑 (M)	樁長 (M)	設計荷重 (T)	實測試驗荷重 (T)	位移量 (mm)	永久位移量 (mm)
F15P6	2	8	1,675*	1,675	9.84**	6.28
F15P7	2	8	1,675*	1,811	3.87**	2.82

圖 10 試樁照片與說明

地下室結構設計 - 單層筏式 + 樁基礎系統

- 避免差異沉降 (增加勁度)
- 利用基樁降低沉陷量 (< 1 cm)

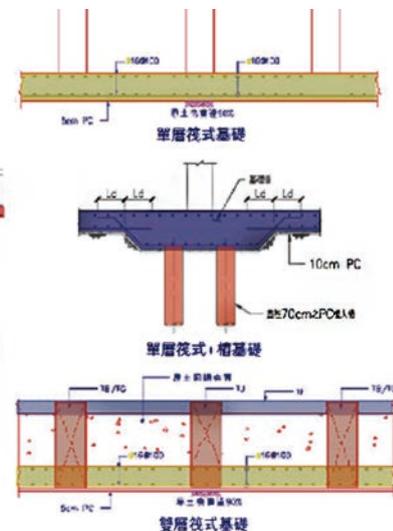
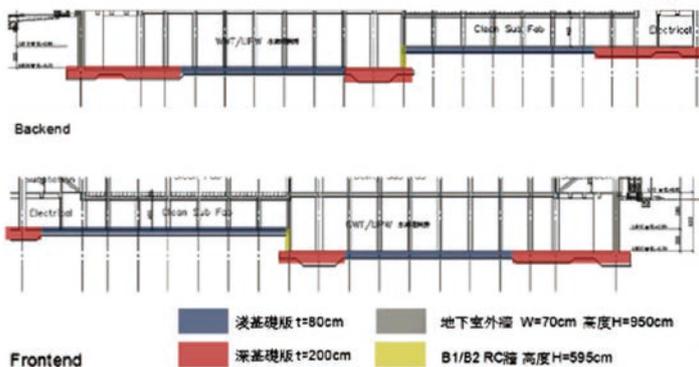


圖 11 地下室結構設計 (一)

地下室結構設計-外牆(擋土牆)

- 考量壁體側向土壓力及水壓力
- 依壁體側向力進行受力分析
- 設計壁體厚度及結構配筋

壁體側向土壓力及水壓力示意圖

側向力受力分析及設計示意圖

壁體結構配筋示意圖

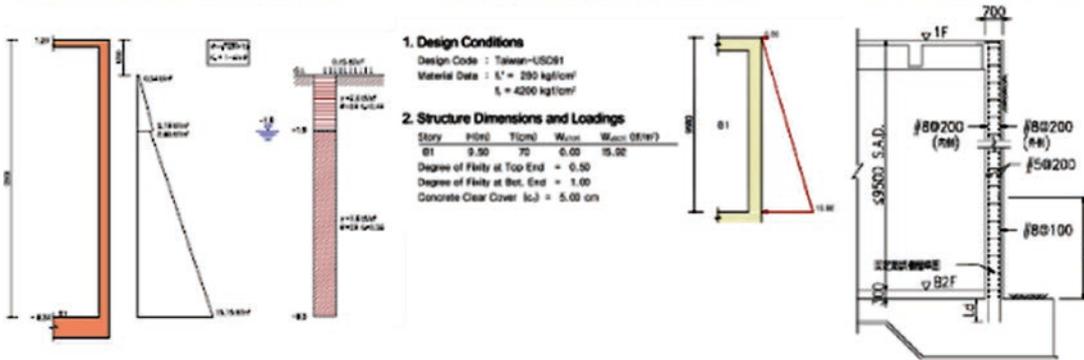


圖 12 地下室結構設計 (二)

下部結構施工介紹

施工流程

了解下部結構的設計概要，這個章節則分別以南科、中科，不同的地理條件的施工流程來介紹，並以大量的照片、圖面來表達施工的節點，說明下部結構整體施工流程。

南科下部結構主要特點，因基地地型的平坦、地質為軟弱的土層，因此施工採取先行基樁打設工作，利用原本平坦的地型，基樁機具的動線、佈置相對容易，然而實際地下室樁基礎的高程，則在原地面以下 5 ~ 10 m 深度，而這部分基樁機具則必須多鑽掘的深度，但並不會有基樁的結構，這樣的工法也稱為基樁「空打」段，但可以有效提高基樁施工安全，並且增進動線的效率，因此會先進行基樁施工，再進行開挖工程，才進行後續防水工程與地下室基礎結構，如圖 14 和圖 15。

南科適用的基樁工法，因地質軟弱，通常採取植入樁工法，利用螺旋鑽掘的基樁機具，挖掘土壤後，直接於挖掘孔洞，灌入根固液，使放入挖掘孔洞的預鑄基樁與土壤有更好的摩擦握裹力，樁長的設計也因地質易鑽掘且預鑄基樁可連結接樁的特性，因此可以拉長樁長設計達 26 ~ 30 m 的深度。

中科下部結構主要特點，基地為山坡地形，有不同的高程，而且地質為堅硬的卵礫石層，因此在開挖施工與基樁的工序，則與南科有所不同，先行開挖至基礎面，再從基礎面往下鑽掘基樁，進而後續整體地下室結構體的施工。原因則是因為山坡地的高低起伏，無法使基樁重機具直接進入施工，因此必須先行整地，並且因中科的地下水位低、地質堅固，因此配合擋土設施，直接開挖整地至基礎高層，並無如南科基地軟弱地質及因地下水位高，開挖後易有地下水滲漏至開挖面的風險，所以樁機可直接於開

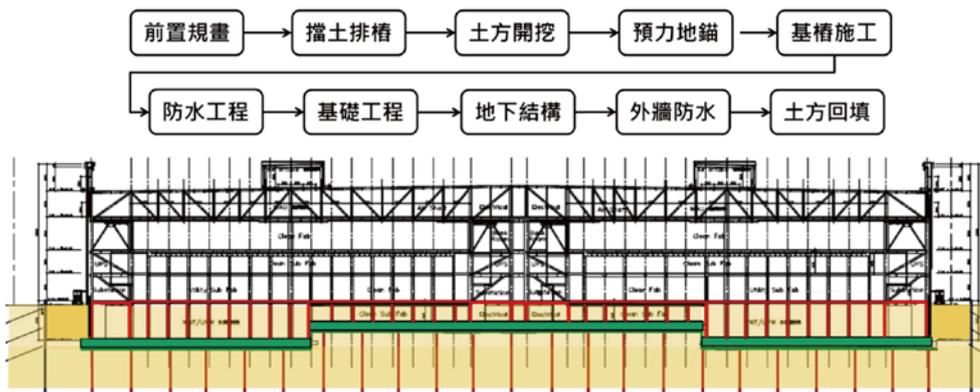


圖 13 下部結構施工流程 (中科為例)

下部結構體施工照片 (南科 - 先行施工基樁, 空打工法)



圖 14 南科下部結構施工照片

南科施工流程示意

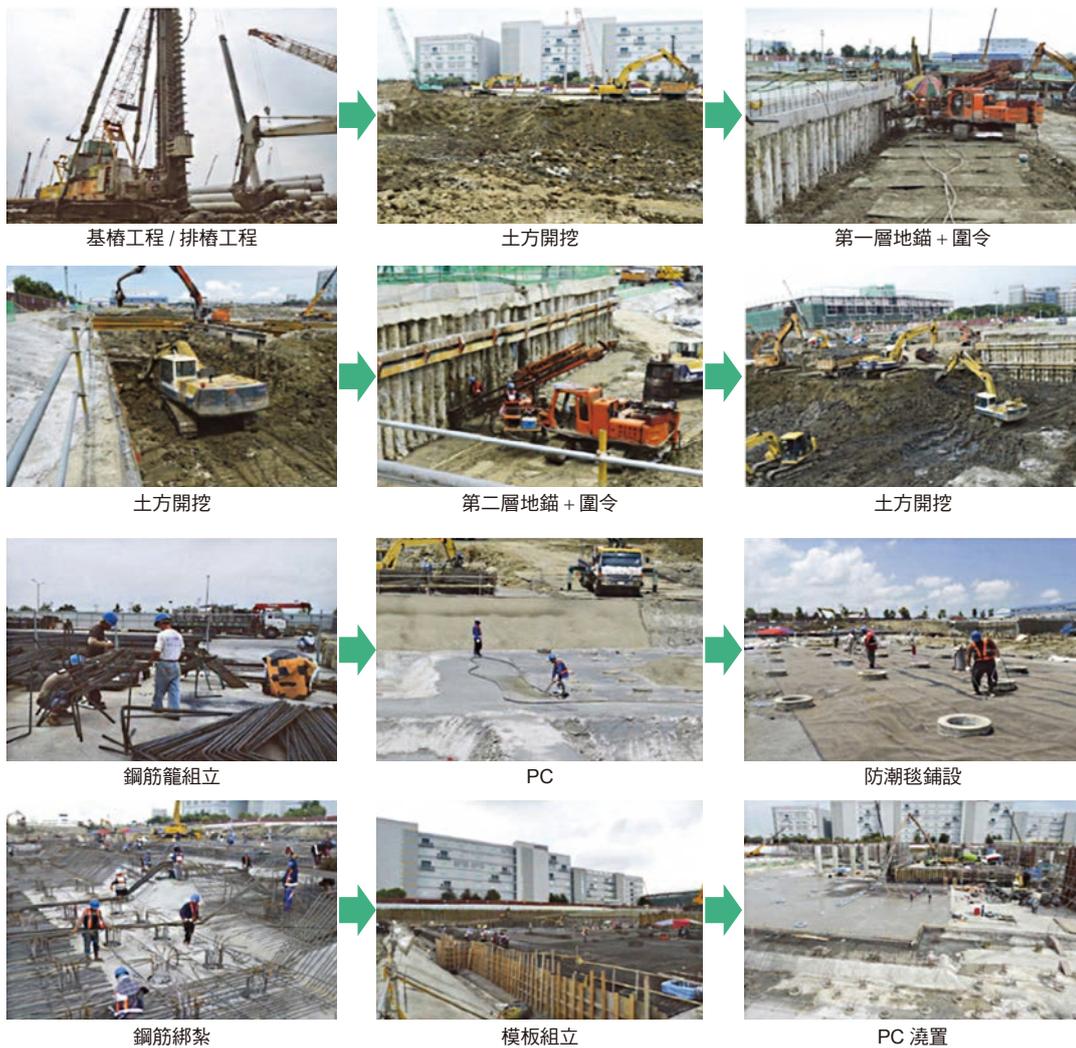


圖 15 南科施工流程示意

挖後的基礎高程施工，如圖 17 為中科下部結構照片，同時也具備各下部結構施工的特色，如開挖擋土設施，有明挖擋土、排樁地錨擋土、地質改良（CLSM 回填）等。

因應中科卵礫石層的地質，基樁的工法，也有所差異，不同於南科可以採取螺旋鑽掘的工法，而是需要採取全套管基樁施工，主因必須利用全套管基樁工法才足以破碎卵礫石，利用落下的重錘（俗稱鯊魚頭）敲擊石頭，並且取出礫石，但也因此施工效率不同與植入樁，平均一天一台機具僅可完成 1~2 支基樁，植入樁則可完成 10~12 支，故設計採取更大面積尺寸的基樁形式取代支數設計，例如全套管基樁直徑 200 cm 設計深度 14~22 m，植入樁基樁直徑則為 70~90 cm，設計深度 18~30 m。

地下室結構體施工

開挖擋土以及基樁工程的施工，是受地理、地質環境變數影響最大的階段，後續進入到地下室結構施工，則並無此差異，主要施工的關鍵則在於動線的規劃，例如吊車機具、搬運車輛的動線如何運補至需要施工的結構體，保留原土方的動線，或是進行假設工程的構台，以利同步施工下方的基礎結構，都是需要評估考量的重點；同時當地下室結構體外牆完成時，也要開始進行外牆防水的施工，以及搭配週遭外部管線施工，盡快進行回填工作，夯壓確實，建立週遭的 1F 地面道路，讓整個下部結構完成，開始進入上部結構施工的階段。

植入樁工法示意



圖 16 植入樁工法

中科下部結構施工照片（中科 - 先行開挖至基礎面，再施工基樁）



圖 17 中科下部結構施工照片

全套管工法示意



圖 18 全套管基樁工法示意



圖 19 地下室結構體施工流程示意

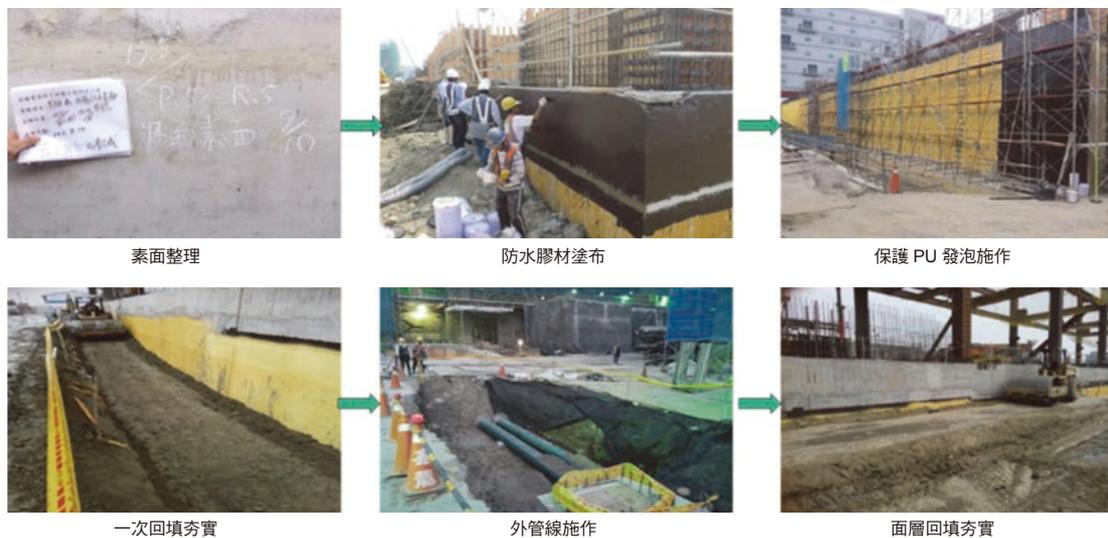


圖 20 防水、回填施工流程示意

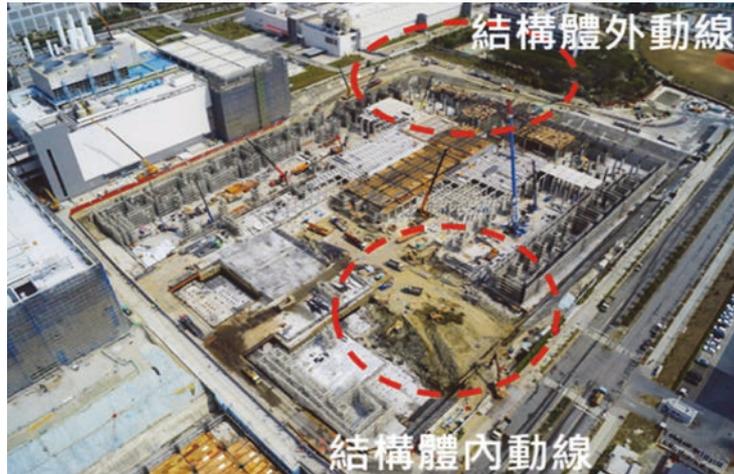


圖 21 結構體施工動線照片

連結上部結構施工

下部結構完成後，進入上部結構施工的介面連結，主要是在 1F 板面須埋設鋼構安裝的預埋構件，連同 1F 板結構體一同澆置。為要使上部結構的鋼構可以進場施工，下部結構體的完成量體需達 50% 以上，才有足夠的腹地空間，增加鋼構施工的效率以及避免重疊作業的安全風險。然而吊裝鋼構的大型吊車、板車

載運鋼構構件，都有重達數十噸的載重，為避免載重直接落於 1F 板面，造成樓板沉陷偏差，甚至破壞，則必須鋪設覆工板的假設工程於 1F 板面，主要利用鋼構橫梁構件橫跨在柱頭的位置（鋪設墊塊架高），將上方荷重平均落在主要柱、梁承載系統而非板面，並且在鋪設覆工板於鋼構橫梁構件上方，製造出平坦無高差的鋼構施工動線腹地。

鋼柱基礎螺栓預埋工序

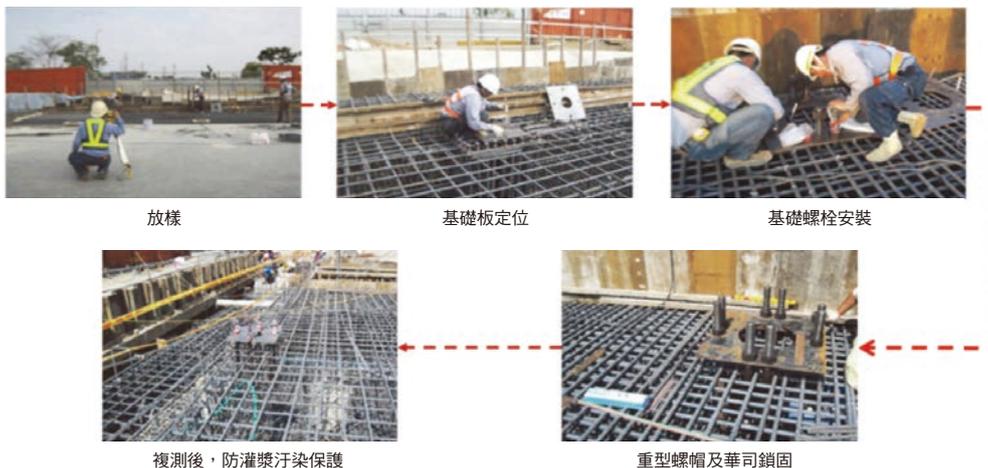
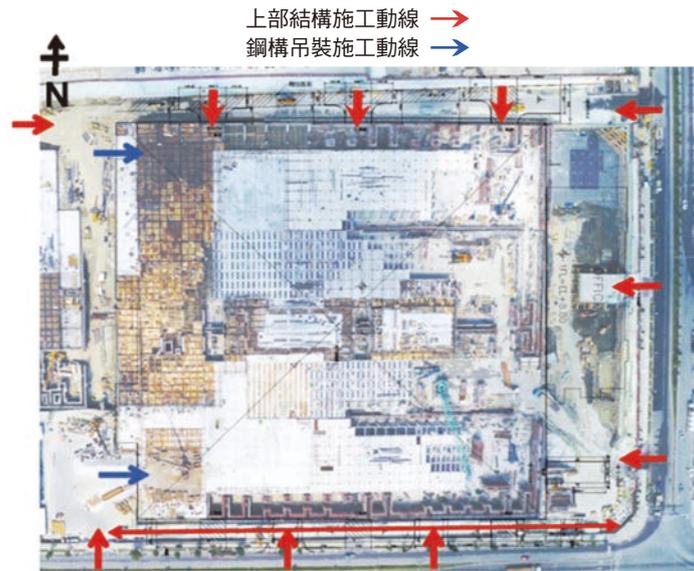


圖 22 鋼構螺栓預埋流程



圖 23 覆工板鋪設示意



鋼構吊裝照片



圖 24 上部結構施工動線及鋼構吊裝照片

最後就是考慮鋼構機具進入下部結構 1F 板面的外部動線，由於車輛設備大，爬坡的斜率與轉彎的道路曲率空間均需考量，並且不僅是鋼構的動線，也必須將上部結構鋼筋、模板、混凝土等施工動線一併規劃，因此必須盡快完成下部結構的外牆以及週遭的外管線或是須埋設在地面以下的槽體，盡速回填，製造出這些施工動線。

結論

台灣的半導體產業，從 45 年前的豆漿店餐桌上開始¹，開疆闢土建立起「矽屏障」，使台灣因著半導體成為現今世界中不可或缺的角色，甚至是世界級的領先。面對未來 5G、AI、自駕車的發展，半導體的進步與需求會持續推動，建廠的腳步也會不停往前，持續壯大台灣在半導體的技術與能力。

半導體廠房的下部結構工程，是一切開始的基礎，有成功的下部結構工程，就代表著專案成功的開始，如何從一片素地，透過本文說明的重點流程，鑽探、開挖、打樁、結構施工、回填，進入上部結構的工作，其中不同的地理環境則有則不同的變數，但卻是在相同緊湊的工期限制，必須如期、如質、安全的完成專案任務，這也是半導體廠房的挑戰所在。

希望藉由介紹半導體廠下部結構的始末，透過簡易的說明以及豐富的照片與圖面，讓讀者了解土木工程對於半導體廠的重要性，對於台灣半導體廠房工程有不一樣的認識與記憶。

參考文獻

1. 張陸滿 (2007)，「高科技廠房設施工程與關鍵技術」。
2. 吳偉特 (1992)，邊坡穩定之分析方法與運用，臺北市／現代營建編印，第 110-112 頁。