

陶朱隱園住宅大樓無支撐開挖案例介紹

張敬禮 葉秀信
傑聯國際工程顧問公司

林培元
華熊營造股份有限公司

何樹根*
富國技術工程股份有限公司

摘要

傳統地下結構體施作，必須考慮「擋土-開挖-支撐」施工之基本工序，工程經驗顯示地下擋土結構適當的配置，可減少在施工過程中之支撐作業，例如採用圓弧形狀擋土結構，可發揮水平之拱效應，抵擋部份甚至全部之土壤側向壓力，可減少(或免除)支撐作業。本案例為於一具有地下室之舊建築物，由新設及舊有之結構形成自立式擋土構造，以無支撐方式構築地下室。本文主要介紹結構之設計理念、施工過程及最後之監測成果討論。

關鍵字：陶朱隱園、無支撐開挖。

Unsupported Excavation of Tao Chu Yin Yuan Residential Building

King-Le Chang Hsiu-Hsin Yeh
King Le Chang & Associates

Pei-Yan Lin
Taiwan Kumagai, Co.,Ltd.

Su-Ken Ho*
Sino Geotechnology, Inc.

Abstract

The traditional underground structure construction must consider the basic process of "retaining-excavation-support". The engineering experience exhibits that an underground retaining structure with a suitable configuration can reduce the supporting work in the construction process. For example, the arch retaining structure can develop a horizontal arching effect to resist some or all of the soil lateral pressures, reducing some or all supporting operations. This described project site was occupied by an old building with a deep basement. Therefore the new basement construction had to combine the new and old basements to produce an arching retaining wall that could enable an unsupported construction. The paper introduces the design concept of structural engineers, the process of construction, and the result of monitoring.

Key Words : Tao Chu Yin Yuan, unsupported excavation.

一、前言

圓筒狀之地下結構，因為可以形成拱的作用，在適當的設計下，不需要支撐便可以進行內部開挖作業。最常見的是地下天然氣儲氣槽體及隧道工程的通風豎井。近年也應用在土木工程之地下室開挖作業，例如高雄捷運的大港埔地下圓形車站便採用無支撐開挖。

本案例位於臺北市之信義區，基地上原有地下四層的建築物(亞太會館)，新建物地下室

採用圓筒狀的結構體，地下開挖時結合舊地下室利用環形特性進行無支撐開挖。本案例林等人(2016)曾在地工技術發表，該文著重在地工之觀點，本文乃另以結構設計者的觀點出發，並探討各階段的監測成果。

二、地上結構設計介紹

2.1 建築設計

本案例為一地上21層、地下4層之住宅大樓，負責建築設計之法國建築師Mr. Vincent

* 通訊作者 hsk@sinogeotech.com.tw

Callebaut以具有旋轉律動變化及代表傳承意向之DNA作為本工程的基本設計理念，將生態環境與人之間的互動引入設計中，並以城市之樹的姿態聳立於臺北街頭(見圖一)。開發單位希望藉由本工程的實現來增加城市表情的多樣性與節能減碳綠建築之典範，並能成為傳世藝術建築為目標。

由於建築設計是以「城市之樹」為出發點，其建築外型猶如一棵大樹聳立於臺北101大樓附近。為使每一樓層均有其不同視野的獨特性，建築師將上下樓層間以相差4.5度的方式由一樓至屋頂順時針方式旋轉，建築物由一樓的南北向順時針旋轉至屋頂層成為東西向，猶如DNA旋轉的概念，讓每個住戶擁有自己的天空。另外本案的21個樓層每層僅有兩戶，每戶約1,000m²，每戶室內要求無立柱，除在建築設計上是一個創新觀念，但相對在結構工程上亦為相當大的挑戰。

2.2 結構設計概念

由於建築設計平面旋轉的幾何特性，結構系統的思考，首先是將傳統二維平面轉換為三維立體的概念，了解旋轉樓層在外力作用下的行為與傳統建築的差異，一個可以克服這些問題的結構系統是本工程可以實現的重要關鍵。

另外一個主要思考因素是臺北市位於強震區，建築物需設計能承受除垂直載重及風力載重外，主要需考量地震產生的側向地震力及垂直地震力。

因應開發單位要求提高結構的抗震等級，將地表加速度提高至0.4g時結構桿件仍需保持彈性，遠超過法規2,500年回歸期地震(地表加速度0.32g)結構可產生塑鉸而不倒塌的設計要求。為達到此設計標準以及提供使用者更高的舒適性，基礎層設計有48組摩擦單擺隔震墊(friction pendulum bearing)以降低地震輸入能量。

2.3 結構系統

本工程結構系統主要由五個單元所組成：

1. 中央鋼構核心筒(steel core)
2. 組合柱結構(mega column)
3. 屋頂外伸穩定桁架系統(roof outrigger truss system)



圖一 陶朱隱園建築效果圖

4. 空腹桁架(vierendeel truss)
5. 基礎層隔震系統

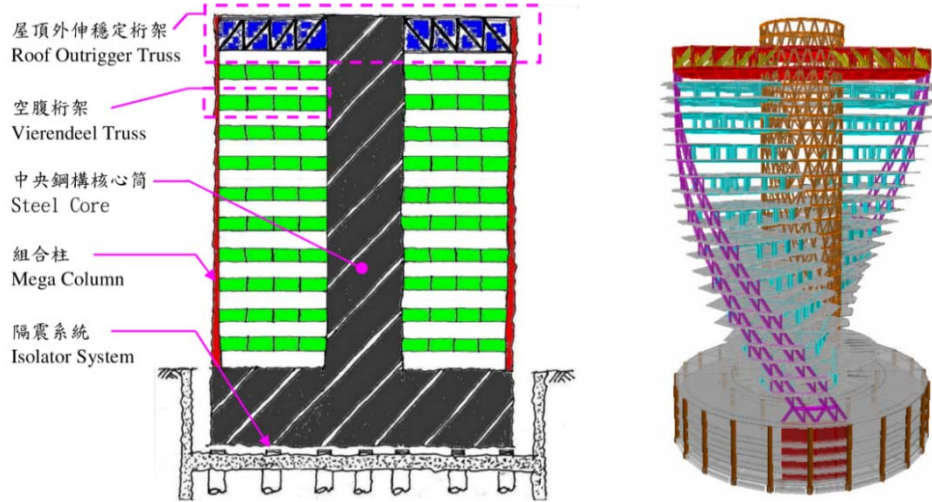
圖二為結構系統概念及結構3D之模型圖，圖三則為上部結構系統圖。

三、地下結構及開挖設計

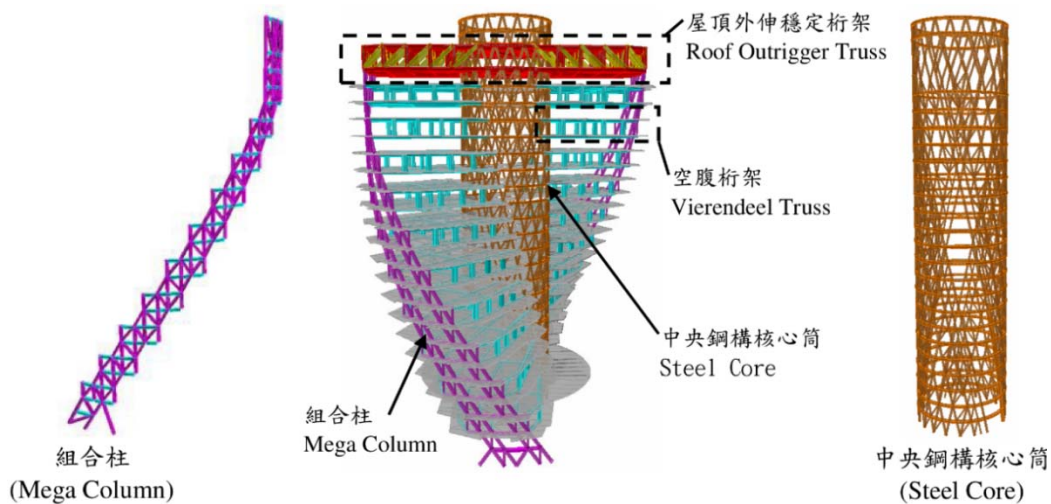
本工程另一個挑戰為地下擋土結構之分析與設計，由於本案地下室開挖不同於一般傳統結構採用順打或逆打工法，除須考量基礎隔震使主結構與擋土外牆間須設置有隔震縫外，如何處理與應用舊有結構(原亞太會館)，確保開挖及鄰房均安全無虞，為地下結構設計最困難的挑戰，以下說明地下開挖設計的各项考量。

3.1 開挖擋土設計概念

本工程地下室開挖設計須考量以下因素：



圖二 結構系統概念及結構3D模型圖

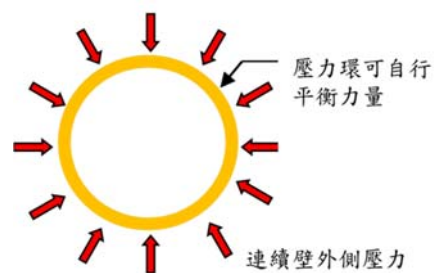


圖三 上部結構系統圖

1. 隔震建築：為降低輸入至主結構之地震能量，於基礎面上方設計有隔震系統，主結構與擋土外牆間須留設隔震縫，除確保地震發生時結構體有足夠的移動空間，亦使地下室空間可以天然採光。

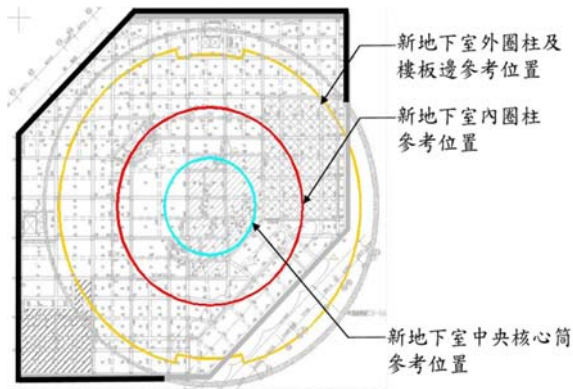
2. 壓力環自行平衡壓力：因為上部結構為旋轉幾何造型，地下室亦設計為圓形，與上部建築相呼應。結構設計應用此幾何條件，將隔震縫外側之擋土外牆系統設計為圓形壁體，利用空心圓筒壓力環平衡外側土壓力之概念(圖四為圓筒壓力環之概念圖)，以達到永久階段擋土外牆高達18.3m卻可以自立之目的。

3. 既有結構拆除與整合：新建物大樓與舊地下室範圍並未完全重疊，結構設計依據新舊建物之幾何規劃，應用既有之結構體做為開

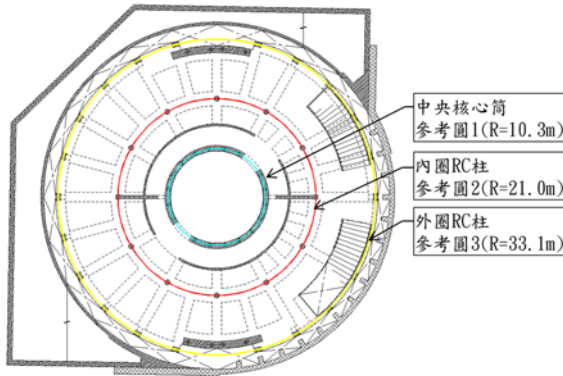


圖四 圓筒壓力環概念圖

挖/拆除過程中之擋土結構之一部份。新地下室與舊地下室採相同深度，以減少開挖數量，並利用舊地下室之基礎版作為本案新基礎版之大底。新地下室結構採用無梁版系統，除新舊建築地下層數(地下四層)相同，另可再增加一層隔震層。圖五為舊地下室結構平面圖，圖六則為新地下結構平面圖。



圖五 舊建築下部結構平面圖



圖六 新建築物下部結構平面圖

3.2 永久擋土結構系統

本工程永久擋土結構系統主要由以下單元所組成：

1. 圓弧連續壁(標準厚度1m, 深度36m)。
2. 600mm厚RC環牆(簡稱RC600)。
3. 新舊結構的五層水平連接樓板(詳圖七)。

3.3 分析考量

1. 地下室既有結構、RC600及新圓弧連續壁結構均納入結構分析範疇。

2. 地下室拆除需考慮既有結構勁度及利用新圓弧連續壁拱之幾何效應, 永久擋土系統需在無樓板支撐情況下, 抵抗土壓、水壓、超載及地震力等外力作用。因為系統複雜故需採用三維之結構分析方能考慮以上之情況。

3. 依據3.4節之步驟進行相關結構分析, 確保既有結構於拆除過程不會超過容許應力。

4. 施工過程因壁體的變形而產生主、被動土壓力變化, 此種土壓力變化難於結構分析程式中模擬, 故於土壓力部分, 無論於施工中或永久階段, 均保守取靜止土壓力施加於連續壁上, 以確保分析結果偏向保守側。

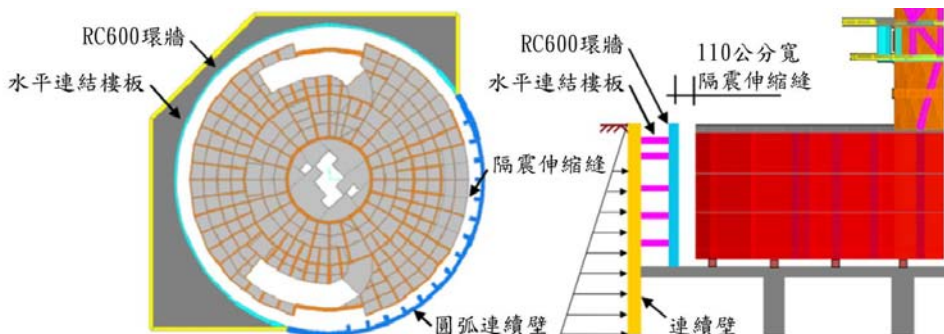
3.4 開挖步驟規劃

本案地下室開挖/開除, 規劃5個主要步驟, 各步驟規劃平立面如圖八, 並說明如下：

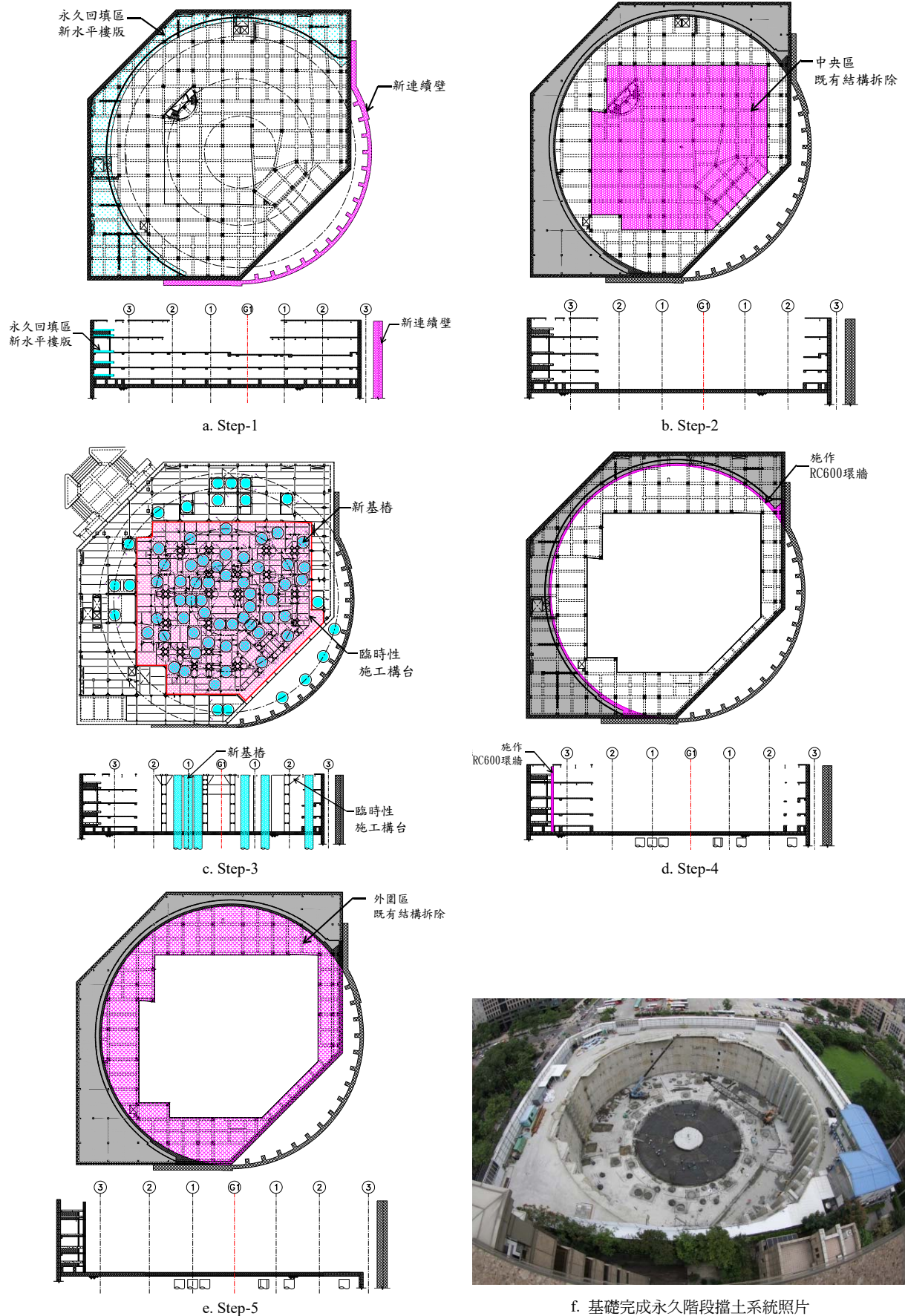
1. STEP-1. 施作新連續壁與永久回填區水平樓板：首先於基地右下角與舊地下室沒有重疊範圍先施作新圓弧連續壁(含扶壁), 並於既有結構外圍永久回填區施作5層新水平樓板, 作為連結舊連續壁與RC600環牆之用(圖八a)。

2. STEP-2. 中央區1FL~B4FL既有結構拆除：地下室分兩次進行拆除作業, 此階段先拆除中央區既有結構體(圖八b), 利用未拆除之既有結構及新圓弧連續壁之勁度來抵抗壁體外側壓力。

3. STEP-3. 新基樁施作：本案採用樁徑2.5m全套管基樁, 均嵌入岩盤；舊基樁為東西及南北向配置, 本案則以圓形環徑向分配, 新基樁之配置上有許多限制, 也增加施工的難度；部分基樁距離很近需考量其群樁效應(圖八c)。



圖七 地下層擋土外牆結構示意圖



圖八 開挖步驟規劃

考量基樁之施工及安全性，須於一樓面進行基樁施工作業，故於已拆除既有結構中央區範圍設置由基礎至一樓面，高度約18.3m之臨時施工構臺供全套管基樁施工使用。

4. STEP-4. RC600環牆施作：為使隔震縫外圓筒壓力環成立，除於基地右下角之新弧形連續壁外，亦於既有結構範圍內施做厚度600mm之RC環牆(RC600)與新弧形連續壁連結，以形成壓力環系統(圖八d)。

因RC600環牆須穿過既有結構樓板，為確保力量可以順利傳遞，於牆體內約每2m距離設置一根鋼柱，以增加安全性。

RC600環牆與新弧形連續壁相接後，永久擋土系統即完成。

5. STEP-5. 外圍區既有結構拆除：因永久擋土系統已完成，即可以無支撐方式拆除剩餘既有結構(圖八e)。

四、實際施工步驟

依結構設計之理念，施工時規劃三個階段(Phase 1~3)，Phase 1目標為完成環形之擋土結構，包括新連續壁、RC600及RC600與新連續壁之結合；Phase 2為基樁施工；Phase 3為舊地下室拆除新基礎版構築。每個階段再分數個工作項目，其施作過程及及細分之工作項目如表一所示。各項施工細節詳林等人(2016)。

五、監測結果討論

5.1 結構分析與實測值比較

因本案擋土外牆採用圓筒壓力環系統，此擋土外牆猶如懸臂18.3m之牆體，依據分析結果，壁頂最大側向變位為19.9mm，而現

表一 各施工階段施工程序及工作項目內容

階段	工作概要	項目	期間	施作內容
1 1	PHASE 1 透過四個作業項目 完成圓筒狀永久擋土牆結構	1	2013/01/28~ 2013/04/23	新連續壁施作： 36m深的圓弧型連續壁，弧長80m、弧度125度、壁厚1m，兩側約12m長為新舊連續壁與RC600牆重疊區域，壁厚增為1.5m，連續壁內間格每4.8m設置一處厚1m、長1.5m之內扶壁。
		2	2013/09/02~ 2013/11/30	地下室第一回合拆除： 主要目的為提供在既有地下室內施工的垂直運輸作業空間，改善施工作業環境。
		3	2013/08/20~ 2014/01/10	RC600環牆施工： 舊地下室內施作圓弧RC牆，牆厚60cm、弧長152m、弧度235度，兩側約6m長與新連續壁結合。
		4	2013/11/30~ 2014/03/20	新連續壁與RC600接合： 接合處以加厚壁體施作，閉合後成為一正圓360度。先將接合範圍之舊有地下室結構體分層由下而上進行細部拆除清理，並重新植筋、補強、止水樁施作，再施作新拌巨積混凝土固結閉合。
2	PHASE 2 基樁施工	5	2013/12/13~ 2014/01/29	基樁構臺施工構臺： 採用鋼結構桁架支撐系統搭配鋪設覆工板，以提供給基樁工程施做之重型施工機具及材料置放吊運、混凝土澆築作業使用。基樁在構臺上施工有許多要注意事項，請見林(2018)在土木技師期刊上所發表的文章。
		6	2014/02/21~ 2014/05/26	基樁鑽掘施工： 基樁68支，直徑為2m，主要採用套管貫穿原地下室空間進入土層至少八m後，配合搖管機及特製的土壤抓掘器進行施工，基樁抓掘至入岩1~2m後，吊放鋼筋籠及混凝土澆灌。
3	PHASE 3 舊地下室拆除 新基礎版構築	7-1	2014/05/28~ 2014/07/10	土方開挖： 新連續壁與舊地下室間之土層挖除
		7-2	2014/05/30~ 2014/09/30	舊地下室拆除： 新地下室結構體範圍內之舊結構拆除
		8	2014/06/03~ 2014/09/27	舊連續壁拆除： 新地下室範圍內之舊連續壁拆除，拆除至基礎版面。
		9	2014/09/02~ 2014/12/023	基礎版構築： 於完全無支撐環形撐土構造物內(圖八f)，進行新建築的基礎版構築作業。

場開挖過程之監測資料，最大側向變位為18.22mm，與分析結果相近。取4個點(位置如圖九)比較分析與實測之壁頂變位如表二所示。本項比對僅針為壁頂之變位，壁體變形曲線則不盡相同，由於結構分析軟體對於土壤之模擬過於簡化，本案例另有以地工軟體進行3D分析，分析與實測比對見5.4節。

5.2 傾斜管變位

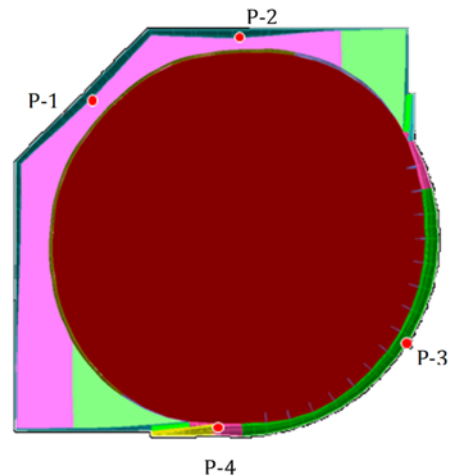
監測儀器安裝位置如圖十所示，主要監測地下室構築期間地層及擋土結構之側向變位及地盤下陷量。傾斜管SIS-1、SIS-2及SIS-3裝設在沒有拆除的舊地下室外側之土壤中；SID-4及SID-5裝設在舊地下室內側之環形RC600牆內；SID-1、SID-3裝設在新連續壁壁體內；SIS-4為因SID-2裝設失敗而補裝設在新連續壁外側SIS-4係在Phase I完成後始裝設，故僅能量測Phase II、III施工時地層之側向變位；而SID-4、SID-5係裝於RC600牆之結構體內，深度只到達基礎版面僅能量測Phase 3施工時之變位；前述傾斜管除SID-4、SID-5之外，底部都進入卵礫石層內，均假設為不動點。

圖十一為各施工階段結束後之傾斜管累積側向位移，其變位包含三個施工階段之影響總合，為瞭解各階段之施工影響，以各階段開始施工的時間點為初始值重給變位如圖十二，其變位可代表各該階段的施工影響。以下對各階段所引致之變位行為分別探討：

5.2.1 Phase 1 圓筒狀擋土結構施工階段

本階段為產生之變位如圖十二a及d，側向變位約呈懸臂形，最大變位在5~10mm之間。其中SIS-2較為特殊，沒有顯著變位，研判是因為Phase 1之施工對舊地下室最大的破壞是發生在表一中第4工項施工時，因其施作必需先敲除閉合區的舊連續壁及既有地下室結構體，才能將RC600牆與新連續壁連結閉合，形成兩個結構上變位較大處，而SIS-2距離這二點最遠。

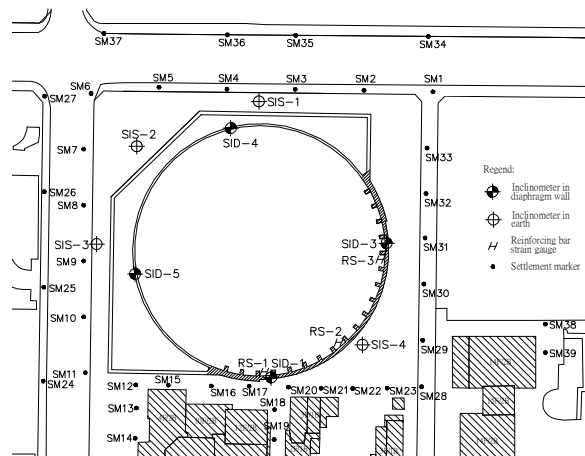
另外SIS-1及SIS-3在深度18m左右各有一個變位的轉折點，約在舊基礎版高程位置，SID-1及SID-3則沒有此現象，因SID-1及



圖九 分析與設計變位比較點

表二 結構設計與實際位移比較

POINT	分析位移 (mm)	監測位移(2014.11.4) (mm)
P-1	6.97	5.23
P-2	6.98	6.09
P-3	19.90	18.22
P-4	8.69	7.55

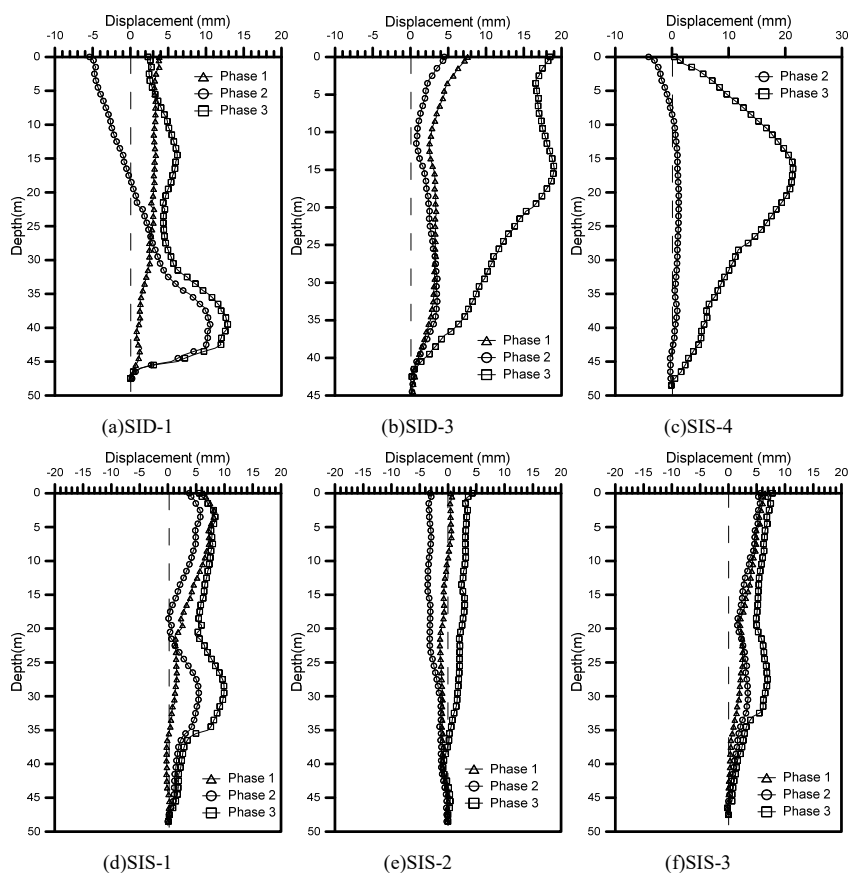


圖十 監測儀器位置圖

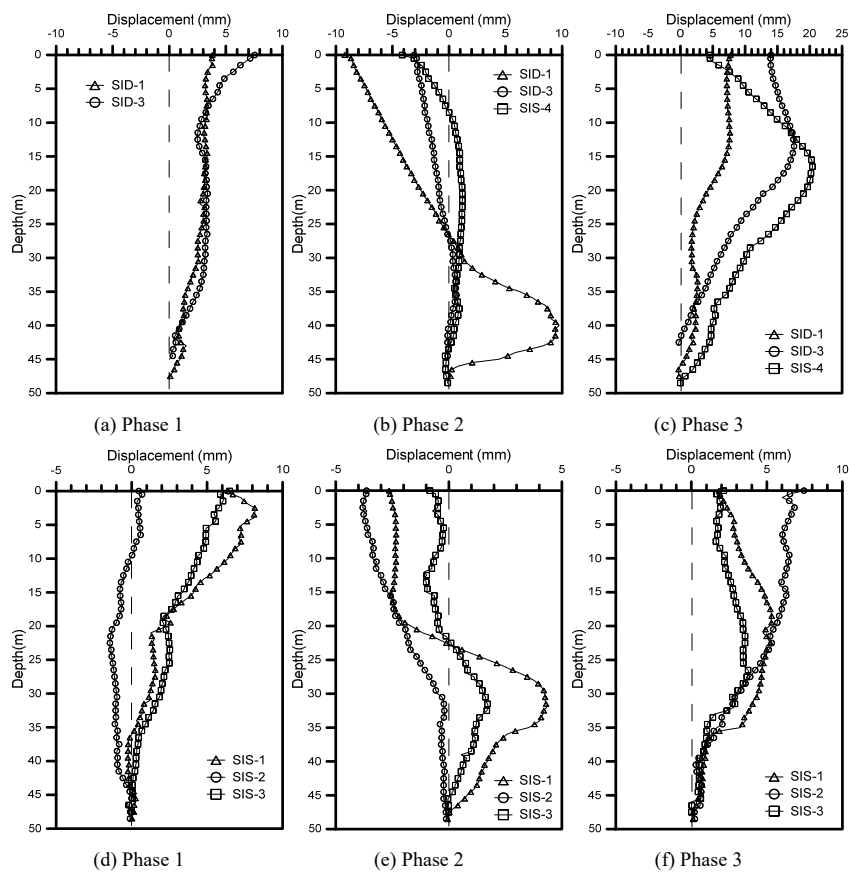
SID-3在安裝在新連續壁，該深度並無基礎版，因此變位的轉折應為舊基礎版之影響。

5.2.2 Phase 2 基樁施工階段

由圖十二b、e可以發現SIS-1及SID-1傾斜管在基礎版面下均產生明顯之內擠變位，最大變位發生在新作連續壁側的SID-1達到10mm，而SIS-1則接近5mm，由(圖十及圖八c)中可知這兩支傾斜管位置極為接近新設之



圖十一 各傾斜管不同施工階段累積變位



圖十二 各單一施工階段引致之傾斜管變位

基樁，研判應為基樁施工過程抓掘擾動土壤引致地層之變位。SID-1緊鄰二支基樁，最近樁的距離為2.6m，而SIS-1附近有五支基樁，最近距離則約10m，研判基樁施作距離遠近相較樁數多寡，造成基礎版下地層內擠之變位效應更為顯著。SID-3、SIS-2及SIS-4所在位置內擠並不明顯，研判是因為其與新作基樁距離較遠。

另新舊連續壁底部深度均為36m，各壁體內傾斜管(SID)頂部相對於36m均有往開挖面外傾斜現象。研判基樁僅在舊基礎面(GL:-18m)以下施工，鑽掘期間地層呈現短期空洞狀態，有類似開挖之作用，以致引發基礎面下地層往基地內的移動，連續壁下半部因而往內移動，上半部相對產生往外的傾斜。

5.2.3 Phase 3 開挖/拆除/基礎版施工階段

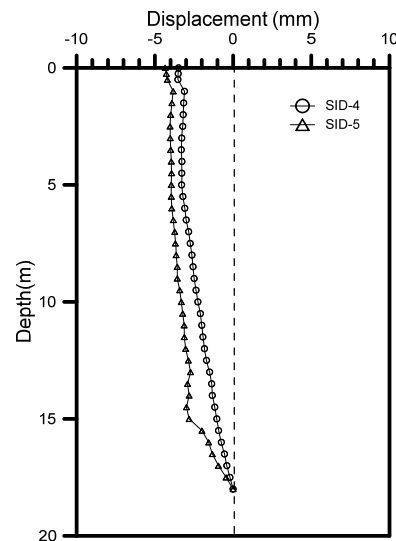
由圖十二c、f中得知除SIS-2外，其他各傾斜觀測管的變位行為，均類似於凸型變位，顯示圓筒狀擋土結構在無支撐之開挖狀況下，擋土壁的變位亦類似於傳統深開挖採用水平內支撐之行為，是故圓筒狀結構的拱效應可以提供類似水平內支撐的作用。上述凸型變位於高雄捷運美麗島站之圓形自立擋土開挖，其連續壁亦有類似凸型變位型態(李等人, 2005)。

Phase 3最大的變位為20mm，約為開挖深度的0.1%，小於臺北市開挖經驗之最大變位為開挖深度的0.2~0.5% (Ou et al., 1993)。

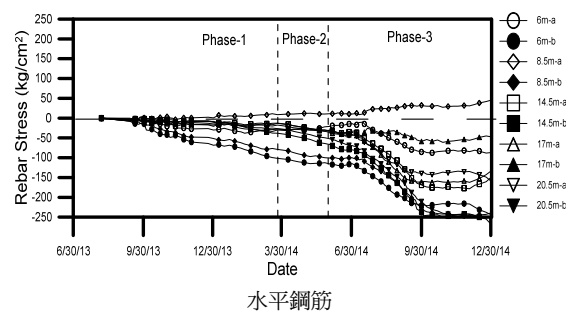
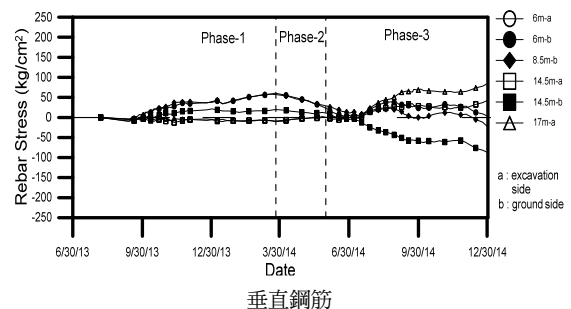
Phase 3同時有埋設在RC600牆中的傾斜管SID-4、5，因為其深度僅到基礎底，因而量測所得僅為相對的變位，頂部相對的變位為負值(圖十三)，比對SIS-1及SIS-3相同深度的相對變位亦為負值，且變位之形狀一致，因而推測變位行為一致。

5.3 鋼筋應力變化

在深開挖的經驗中，因為鋼筋計之測值變異性很大，因而很少比對分析鋼筋計量得之測值，本案例因為擋土結構為圓形，因而裝設垂直及水平鋼筋計，安裝在三個位置(見圖十，RS-1, RS-2及RS-3)，在不同深度的垂直向及水平向內外各裝設一個鋼筋計。其中RS-1及RS-3在變化斷面及新舊結構連結處，應力變



圖十三 SID-4、SID-5在phase 3產生之變位

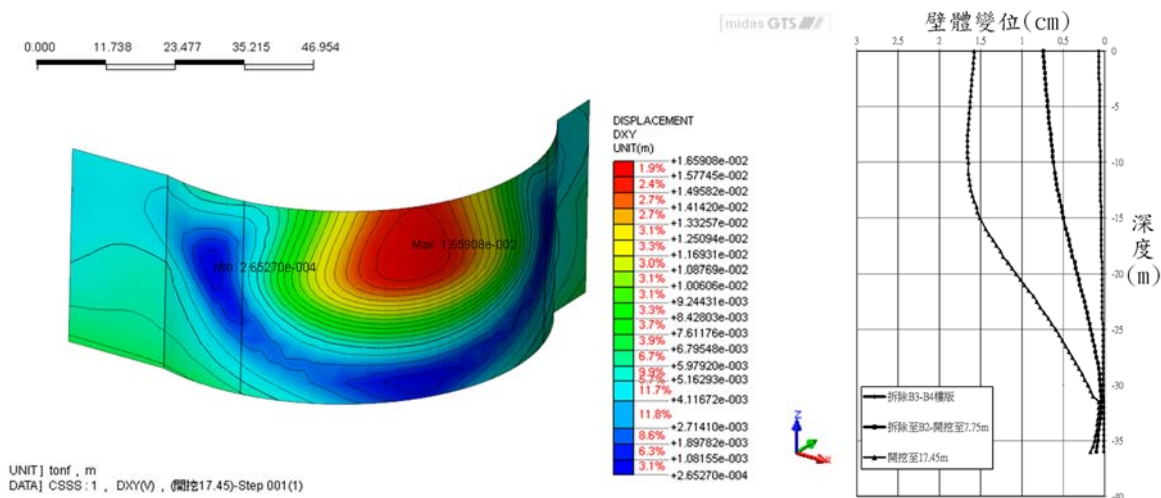


圖十四 RS-2垂直及水平鋼筋應力變化

化較為複雜，RS-2約在新作連續壁的中央，受力較為單純，因而整理RS-2不同深度水平鋼筋計之歷時曲線如圖十四，因為垂直鋼筋損壞較多，因而資料較少；水平鋼筋則有完整資料，由圖十四顯示水平鋼筋之受力比垂直鋼筋要大，且水平鋼筋均為負值(壓力)，顯示圓形結構之拱作用確實發生。

5.4 壁體變形分析與實測之比較

本案例雖為圓形之開挖，但因地下新舊結構(含舊連續壁)都用來共同承擔土水壓力，因而結構較為複雜另採用MIDAS GTS有限元



圖十五 新設連續壁之3D變位及最大變位處變位曲線

素軟體進行3D分析，其分析過程請參考張(2015)，由於新設弧形連續壁之狀況較單純，因而比較其分析與實測變位，分析最大變位如圖十五，最大變位約發生於中央，最接近之儀器為SIS4，但因為補設儀器沒有量測到phase 1之變位，因而另比較有完整測值之SID3，雖與分析最大變位處稍有差異，仍有比較價值，其實測值如圖十一(b)，分析與實測變形曲線均呈凸肚形相當類似，而分析則最大變位約為1.7cm，實測最大變位約2cm(但因位置差異新連續壁中央變位應更大)；最大變位之差異不大，但壁底變位是最大的差異所在，實測值約有7mm之變位，分析值則不大。另外於其他側新舊結構結合處(SIS1~3)之變位均小於1cm，可見本案例地下擋土結構採新舊結合，各處之勁度不盡相同，雖為環形結構，但開挖產生之變位均不相同。

六、結論

本工程的結構系統方案粹取建築設計之精髓，凸顯建築設計隱含之簡單力學行為。

本工程的結構系統方案可以滿足建築室內空間要求，提供足夠結構體耐震要求，更使結構融入建築設計，使本建築設計更合理化。

地下室開挖設計利用既有結構體做為施工過程之臨時擋土系統以達成深度18.3m無支撐開挖，並應用圓筒幾何壓力環自行平衡外側壓力之概念，達到永久擋土外牆自立18.3m無內部樓板支撐。

誌謝

本工程於2015年獲得世界高層建築及都市人居協會(CTBUH)所頒發之結構設計創新獎(Innovation Award)，並於2016年被CNN選為全球九大地標之一，可以獲得這些殊榮，最重要的是各單位有共同完成此工程之使命，包含業主的全力支持、設計與施工單位的溝通與解決困難的意志力。臺大地震中心教授於審查期間給予許多寶貴的意見，在這種與傳統建築截然不同的結構中更形重要，在此一併誌謝。

參考文獻

- 李正彬、陳俊融、洪政豐、陳大康、鈴木丈義、多田幸夫、奧本現、李淳昌 (2005)，「高雄捷運大港埔車站工程一直徑140m之圓形連續壁之設計與施工」，*土工技術*，第105期，第5-16頁。
- 林培元 (2018)，「基樁在構臺上施工案例~以陶朱隱園為例」，*技師期刊*，第82期，第39-45頁。
- 林培元、張登貴、何樹根、徐明志、荷世平 (2016)，「都市更新中舊地下室再利用之策略與技術案例介紹」，*土工技術*，第147期，第19-30頁。
- 張登貴 (2015)，「都市更新地下開挖工法探討及三維數值分析之應用」，*技師期刊*，第71期，第33-44頁。
- Ou, C. Y., Hsieh, P. G., and Chiou, D. C. (1993). "Characteristics of ground surface settlement during excavation." *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 758- 767.