

地工技術

超高大樓基礎設計與施工(一) —高雄85層 T & C Tower—

陳斗生

富國技術工程顧問有限公司

摘要

本文檢討位於高雄市苓雅區東帝士國際廣場大樓(T & C Tower)，地上85層地下5層之超高大樓基礎之規劃，設計至施工之考量過程與儀器監測結果。該大樓採用均勻對稱三管式結構，基礎則基於地層特性、施工技術、鄰房狀況與施工工法之考量而採用框格式地下連續壁牆，監測結果顯示大樓平均沉陷相當均勻在中央區約5-6公分，四周約3-5公分，地下水壓於營造至約35樓停止降水後，隨樓層之增高逐漸回升，於完成時回升至原地下水壓狀態。

關鍵字： 超高大樓、地下連續壁、浮式筏基、沉陷、地下水壓、觀測系統。

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGHRISE BUILDING FOUNDATIONS(1) —85-STORY T&C TOWER IN KAOSHIUNG—

DUNSTAN D. S. CHEN

SINO GEOTECHNOLOGY, INC.

ABSTRACT

This paper describes the process of design and construction and monitoring results of the foundation system for T & C Tower, an 85-storey highrise building with 5 levels of basements in kaoshiung, southern Taiwan.

The structure system design is a triple tube in series with 8 mega columns each to support loads up to 40,000 metric tons; Considering the soil conditions, construction techniques available at the time, safety of vicinity buildings and method of construction, a grid pattern of slurry walls underneath the floating raft foundation system was used. Monitoring results indicate that after completion of 85 stories, the settlements at the central portion and periphery of the building are 5-6cm and 4-5cm, respectively; while the ground water pressure at the bottom of the raft after stopping dewatering when construction reached 35F, it increased gradually towards its natural level as construction progressed towards 85F.

KEY WORDS : 85-storey highrise, slurry wall, raft, settlements, ground water pressure, monitoring system.

地工技術

一、前言

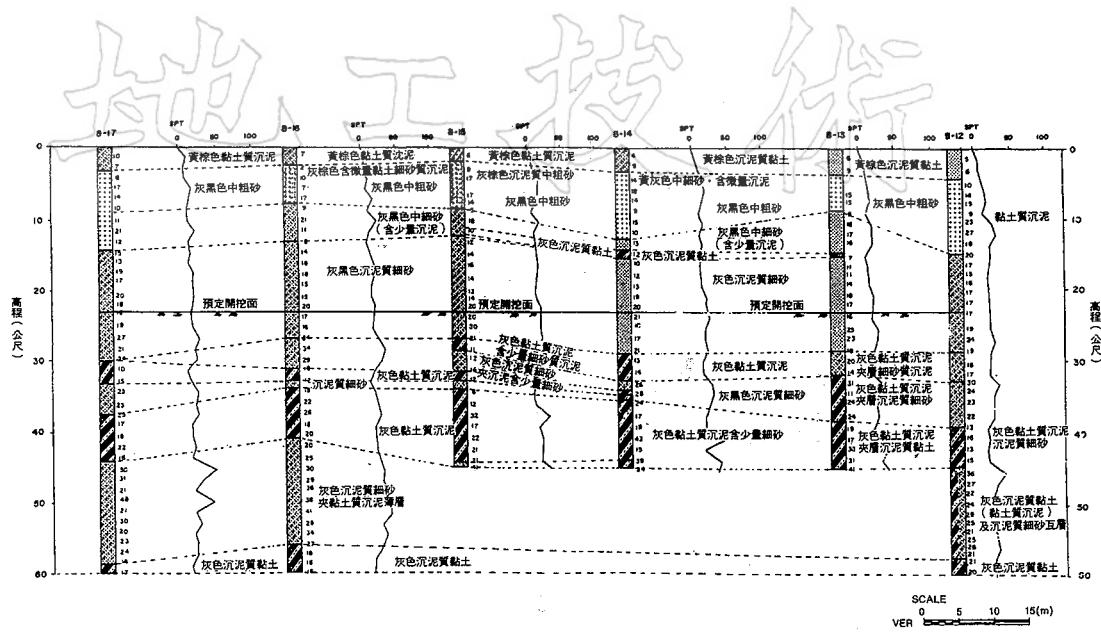
隨著分析技術與施工工法之改進及對大地之瞭解，高樓建築在都會區之興建也日趨普遍，高度也不斷創新高，超過二百公尺高度以上者世界上已超過200棟，超過三百公尺者也近二十棟(表一)。超高大樓之設計最俱挑戰者首推結構及消防機電之設計，對基礎工程而言，端視地層狀況與基礎型式而有難易度，筆者參與之超高大樓基礎設計者有1970年代末期新加坡Raffle City72層、42層、32層之高樓群，由於地層條件甚佳而採用筏式基礎；高雄85層東帝士大樓則採用框格式地下連續壁牆，主要取其砂性土層摩擦力之

T-Z有利特性而設計；而台北之國際金融中心則利用在深度不大的地表下即可遇年青之岩盤，國內之技術即足以施作貫入此岩盤之場鑄樁為基礎。是以超高大樓之基礎無一定之型式，主要取決於地質/地層特性、建築之配置與荷重分佈、基礎在設計與實際荷重下之行為與施工之難易度、及是否可克服施工上之困難，且可加以驗證等因素而定。

本文首先對東帝士高雄85層國際廣場大樓之基礎設計過程作一簡要之介紹。容後再另文對台北國際金融中心大樓之基礎設計與施工作介紹。

表一 世界超過300公尺之超高大樓

	名稱	地點	樓層	高度	完成年份
1.	Petronas Tower	馬來西亞吉隆坡	88F	452m	1996
2.	Sears Tower	美國芝加哥	110F	443m	1974
3.	上海金茂大樓	大陸上海	88F	421m	1998
4.	World Trade Center(N)	美國紐約	110F	417m	1972
5.	World Trade Center(S)	美國紐約	110F	415m	1973
6.	Empire State Building	美國紐約	102F	381m	1931
7.	Central Plaza	香港	78F	374m	
8.	Bank of China	香港	72F	369m	1988
9.	東帝士大樓	台灣高雄	85F	348m	1999
10.	Amoco	美國芝加哥	80F	346m	1973
11.	John Hancock	美國芝加哥	100F	344m	1968
12.	地王大廈	大陸深圳	81F	325m	1996
13.	中天廣場	大陸廣州	80F	322m	1996
14.	Chrysler Bldg	美國紐約	77F	319m	1930
15.	Library SQ Tower	美國洛杉磯	75F	310m	1989
16.	Texas Commerce Plaza	美國休士頓	79F	305m	1982
17.	柳京飯店	韓國平壤	105F	305m	1980



圖一 東帝士大樓代表性土層剖面

二、地層及結構體之基本資料

超高中樓由理念之構思、規劃、設計至施工等過程一般需達5-10年以上，俾可針對各項有利及不利因素詳加分析、研判，因此大地工程師在基礎設計上除應及早完工外，必須早期即與業主、建築師及結構工程師作充分之溝通，以掌握其設計理念，預定進度，預算及技術上可行性以獲得完全而最經濟效益之基礎設計。

2.1 基地土層概況

高雄市為台灣南端西部沖積平原的一部份，屬第四紀沖積土層，基地之工址調查除進行十七孔之鑽孔(深度45公尺至100公尺)及取樣外，也進行了微地動、下孔波速檢測、CPT、LLT、滲透性等現地試驗，實驗室除進行土壤一般工程特性實驗外，也對經冷凍處理之砂質土樣進行動力三軸及共振柱等動力實驗。由工址調查結果顯示，基地主要之土壤組成為粉土質

砂為主，夾砂質至黏土質粉土或粉土質黏土之互層，厚度在100公尺以上，在地表下60公尺以內之砂質土層，N值在25以下，屬中度密實(Medium Dense)，黏土質粉土或黏土層則為稠密至極稠密(Stiff to Very Stiff)，代表性土層分佈及參數如圖一及表二所示。

地下水位則在地表下2m至3m，因基地離港區不遠，地下水位可能受到季節性及潮水位之輕微影響，且含鹽份較一般地下水略高。

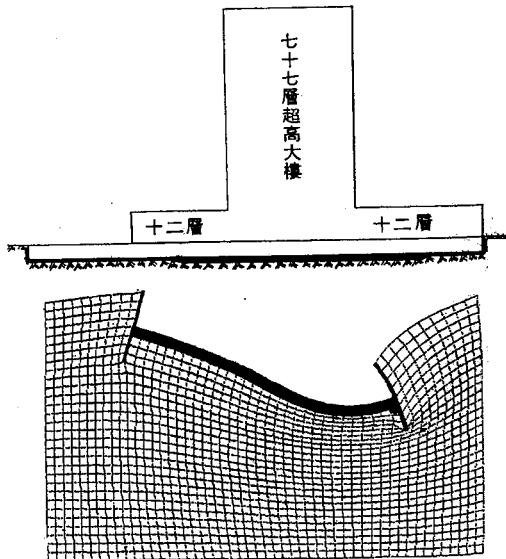
2.2 建物配置，結構荷重及分佈

本超高中樓在構思、規劃過程中，初步規劃為樓高七十七層，裙樓樓高十二層，地下室五層，開挖深度23.1m，基地面積約80m×146m，南側並有開放空間之廣場(圖二)。由於高樓重心偏北，南側之開放空間浮力偏高，經分析倘不使用樁基礎或其他特殊基礎設計，筏基之差異沉陷將不易設計，在風力及地震力作用下應力分佈不均現象將較嚴重，益以地層為現代沖積土層，基樁將達100公尺左右，以當時(1987)

地工技術

表二 東帝士大樓代表性土層分佈及基本特性

土層 層次	分類	深度 (m)	平均厚度 (m)	N	γ , (t/m ³)	Wn, (%)	Gs	e	C' (Kg/cm ²)	φ' , (degree)	Cc	Cr
1	ML/SM	0-3.9	1.9-2.7	7	1.98	19.9	—	—	0	30	—	—
2	SM	1.0-10.7	1.2-3.2	10	1.93	21.3	2.69	0.61	0	30	—	—
3	SM	1.5-17.8	7.2-12.7	14	2.02	20.4	2.68	0.56	0	31	—	—
4	SM	8.5-31.1	11.3-18.1	18	1.94	21.2	2.70	0.75	0	30	—	—
5	ML	14.05-38.7	2.6-6.6	17	2.05	24.2	2.72	0.57	0.1	25	0.225	0.027
6	SM	31.1-38.2	1.6-4.9	24	2.00	25.0	2.68	0.80	0	30	0.161	0.022
7	ML	34.0-45.4	3.9-7.4	20	2.07	22.9	2.71	0.85	0.6	32	0.164	0.040
8	SM/ML	37.0-58.8	7.6-13.9	25	1.96	27.7	2.71	0.63	0	36	0.287	0.033
9	ML	54.0-66.1	10.6	19	1.95	29.8	2.71	0.74	0.3	36	0.182	0.037
10	SM	65.7-72.1	4.4	≥50	2.02	17.3	2.68	0.59	0	40	—	—
11	SM	69.0-87.0	15.8	≥50	2.00	24.1	2.68	0.70	—	—	—	—
12	ML	87.0-100	11.0	32	2.01	22.9	2.70	0.62	—	—	0.145	0.017
13	SM/ML	95.7-100	≥4.3	≥50	2.05	19.0	—	—	—	—	—	—



圖二 大樓原77層之設計基礎變位分析

國內場地之施工技術，品質控制有困難，因而建築師(李祖原建築師)乃毅然重新規劃，採三個正方形管串連(Triple Tube in Series)之結構，地面層以上建築物面積約52m×120m，主樓85層，雙翼裙樓皆為35層，正中座落於基地；利用大樓內八個電梯間(10m×10m)四角型結構

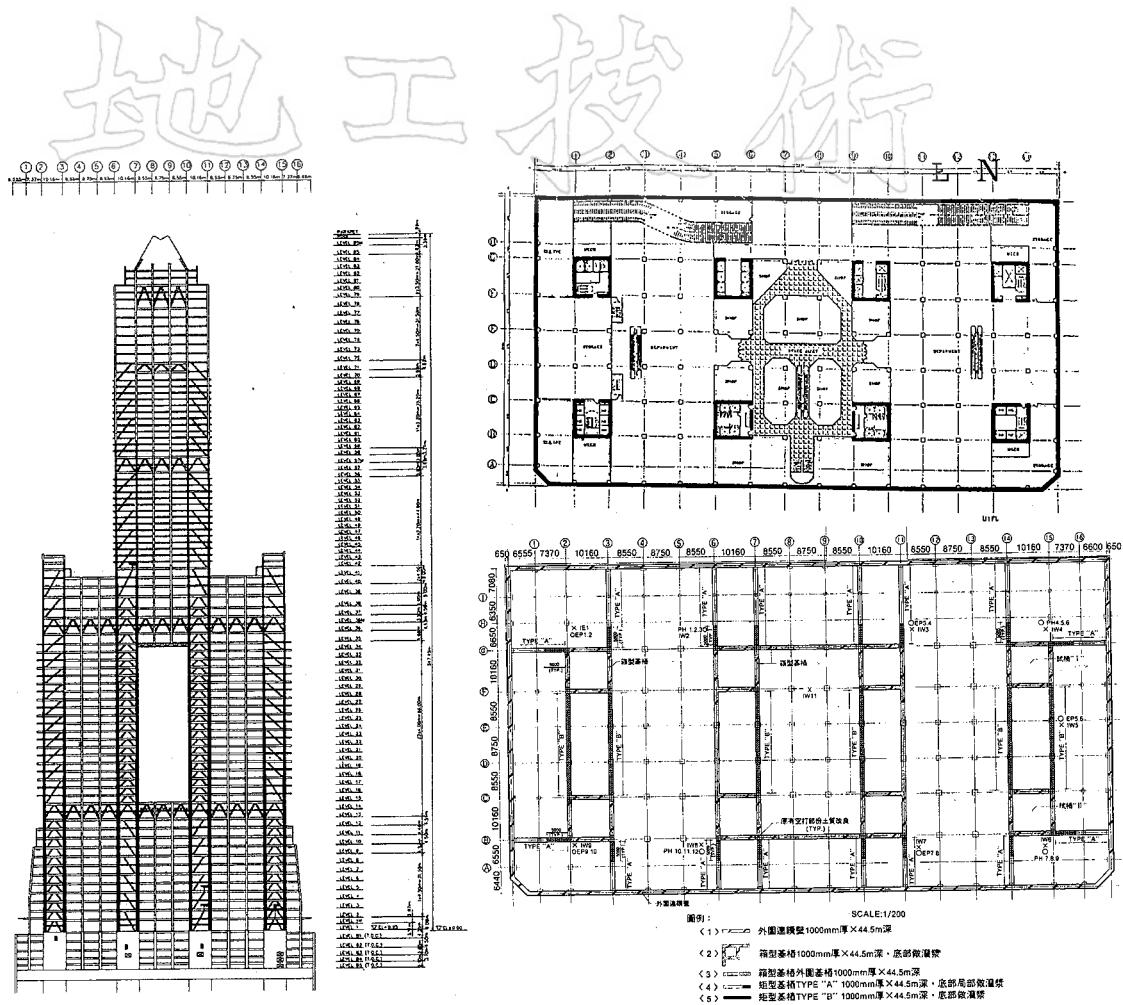
體視為Mega Column，作為三個大方型管結構之支柱(圖三)，支撐了大樓大部份之荷重。根據結構分析結果，風力主控了基礎之荷重，中央四個電梯間，每間具四支柱位，單柱荷重每支呆重約6000噸，活荷重也達3000噸左右；其餘兩側電梯間結構之單柱呆荷重也約為3600噸，活荷重也超過2000噸；其他次要柱位之呆荷重介於1000~2000噸，活荷重則介於600~1000噸。

三、基礎規劃設計之考量

3.1 基礎面作用力之分析

根據初步規劃，開挖面積、各樓層面積、設計載重、土壤、水位資料、開挖深度等，下列為基礎面各種作用力之基本資料：

結構物總重	(公噸)	505,000
底面積	(m ²)	11,926
平均荷重	(t/m ²)	42
靜水壓上舉力	(t/m ²)	21
開挖23m土壤總重	(公噸)	554,000



圖三 東帝士大樓結構配置及基礎型式

另根據開挖23m深，四周擬使用止水性較佳之連續壁，以作為地下室開挖之擋土結構；經穩定分析結果，連續壁厚約1公尺，所須貫入深度約44.5m(開挖面下21.5m)，估計連續壁水中重量約28,660公噸，其四周摩擦阻力約104,550公噸。

由於結構重量(505,000公噸)略低於開挖土壤之總重量(554,000公噸)，因此浮式筏基(Floating Raft Foundation)應為較佳之基礎選擇。然而因超高大樓施工工期甚長，因此最大之基礎面作用力並非在施工完成之後，而係在施工期間，因此對地下室之開挖及施工工法需特別加以考慮。

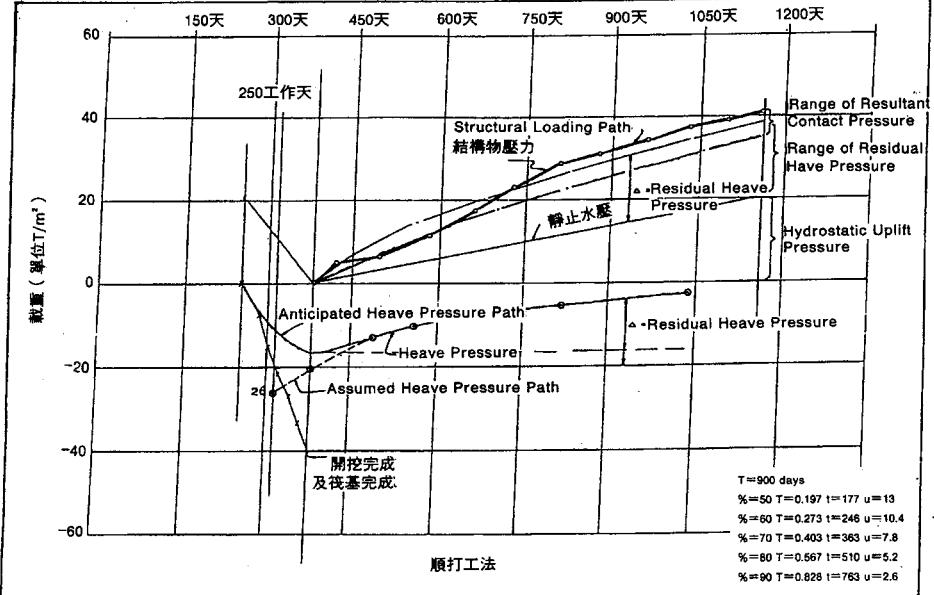
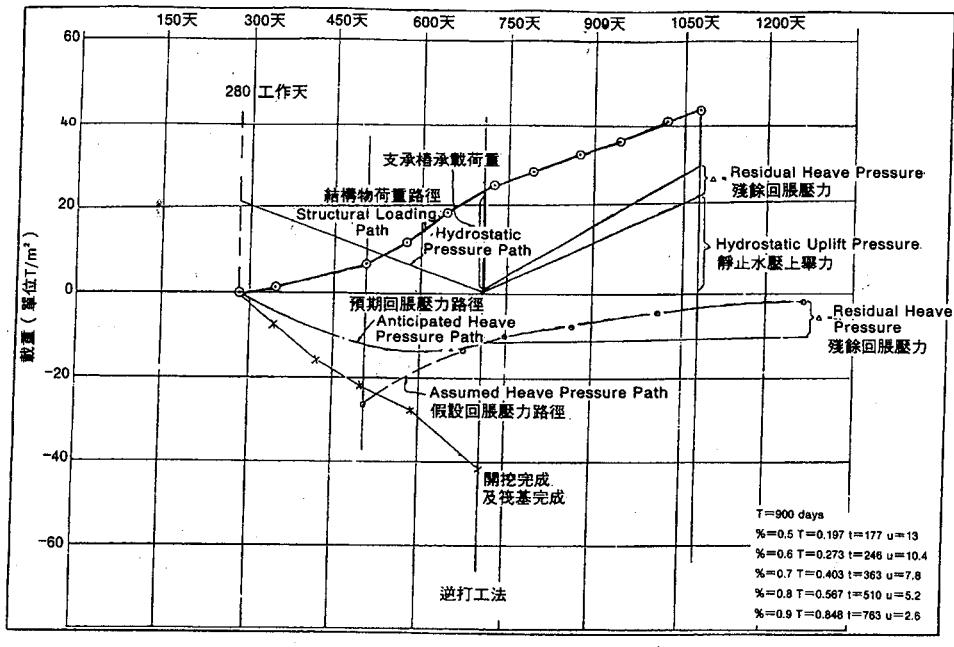
3.2 深開挖及地下室施工工法

一般地下室之開挖及施工可概略分為二種工法，即(1)順打工法(Bottom Up Method)，即開挖到預定基礎面後地下室由下往上構築；或(2)逆打工法(Top Down Method)，即逐層開挖地下室，由地面向上、下一逐層構築。兩者除需有四周之擋土牆之外，前者尚須有內支撐系統以保持開挖區之穩定；後者則利用地下室各樓層作為支撐，但須於各柱位先構築永久支撐柱(King Post)於基礎版完成前支撐所有之結構重量。然而無論採取何種工法，於基礎版完成後除了須承載結構荷重外，尚

須承受基礎下回升之靜水壓(上舉力)及土壤之回脹壓力。

圖四即二種工法概估之基礎版所受壓力之歷時曲線示意圖，由此可見順打工法過程中基礎面所受之淨下壓力最小，益

以逆打工法支撐柱之荷重甚高，且施工之精度及困難度也較高，以當時之施工技術而言實無把握，因此本超高地盤地下室之開挖乃以採順打工法較為安全。



圖四 順打及逆打基礎應力路徑分析

地工技術

四、基礎型式之選擇

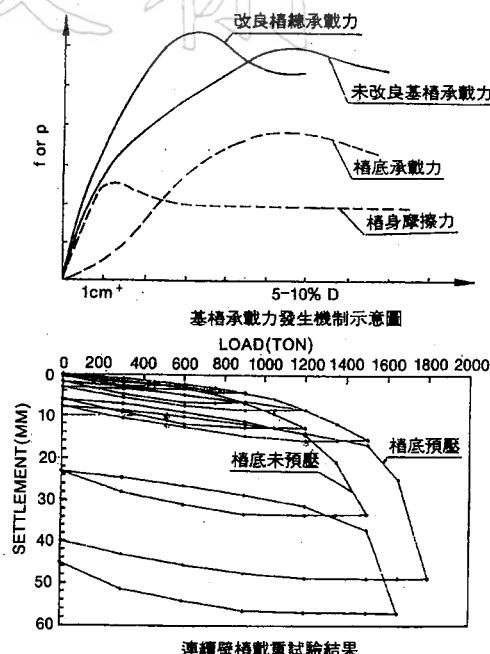
4.1 基礎型式之考量

由於超高大樓之柱位荷重極高，且地下室基礎版可能受到相當高之靜水壓上舉力，倘使用樁基礎勢必使用密度甚高之群樁，經分析數種當時台灣常用場鑄樁之配置，仍不足以安全承載上述各柱位之設計載重，因此考慮使用 $10m \times 10m$ 之墩基礎承載於45m深處之砂層，但為使此墩基樁之底部有足夠之剛性及與承載土層緊密接觸，此墩基礎($10m \times 10m$ 或 $12m \times 12m$)內下半部之土質勢必加以改良使成緊密堅固之栓塞(Plug)，因此于1988年曾於基地試作深層攪拌樁試驗，結果不甚理想而暫棄此構想，並同時提出以地下連續壁牆作為基礎之構想。

地下連續壁在台灣使用極為普遍，一般作為深開挖擋土措施使用，也可於地下室開挖完成後當地下室外牆使用，多家營造廠商技術也頗為成熟，利用連續壁大面積與砂土層結合所產生之高摩擦阻力，可作為下壓或上舉力之阻抗，為極佳之“版狀摩擦樁”，為增加底部之承載力，及改進其荷重傳遞時之應力一應變行為(見圖五)，此“版狀摩擦樁”底部可以“平板膜”(Flat Jack)於“樁”成型後施作“後高壓灌漿”(High Pressure Post Grouting)，可擠除樁底沉澱物使樁底與承載土層緊密接觸，並對承載土層加以預壓。

4.2 版樁載重試驗

根據經驗，基樁與土壤間界面之最大摩擦阻力之產生所須之相對位移不大，一般口徑較小者皆在 $1cm$ 左右，而欲達樁底



圖五 版樁載重試驗

極限承載力則基樁底部沉陷量需達樁徑 $5\% \sim 10\%$ 左右，對大口徑場鑄基樁而言，最大摩擦阻力產生時樁底部同時產生之承載力尚遠低於其極限承載力，而造成設計上之不經濟及不安全，但倘能對基樁底部之土壤先施以壓力，則基樁受力時之應變行為當可受到改良而減小其沉陷量，此種改進對剛性較高或對沉陷較敏感之結構物之設計應極有助力。

為證實上述構想及求得版狀基樁之設計摩擦阻力，於本基地進行了二組實體“版狀基樁”之載重試驗，版樁厚 $100cm$ ，寬 $250cm$ ，深度 $42.5m$ ，其中一組樁底未施加灌漿預壓，另一組則利用德國Bauer公司出品之“平版加壓膜”(Flat Jack)加壓至約 $50kg/cm^2$ ；兩組版樁內皆預埋鋼筋計、變位計等，以量測摩擦力之傳遞與分佈及基樁之應變量，分別垂直加壓至 1625^T 及 1800^T ，樁頭沉陷分

別為5.6cm及5cm，結果如圖七所示。由分析結果顯示，版樁之極限承載力未加壓灌漿者與加壓灌漿者分別在1200T及1500T左右，其樁頭沉陷量約為1.5cm，而二者在砂質土層與基樁界面之平均摩擦阻力均約為 $5.5T/m^2$ ，而底部因預壓而產生之承載力增量約為總承載力之26%。

4.3 基礎系統之設計

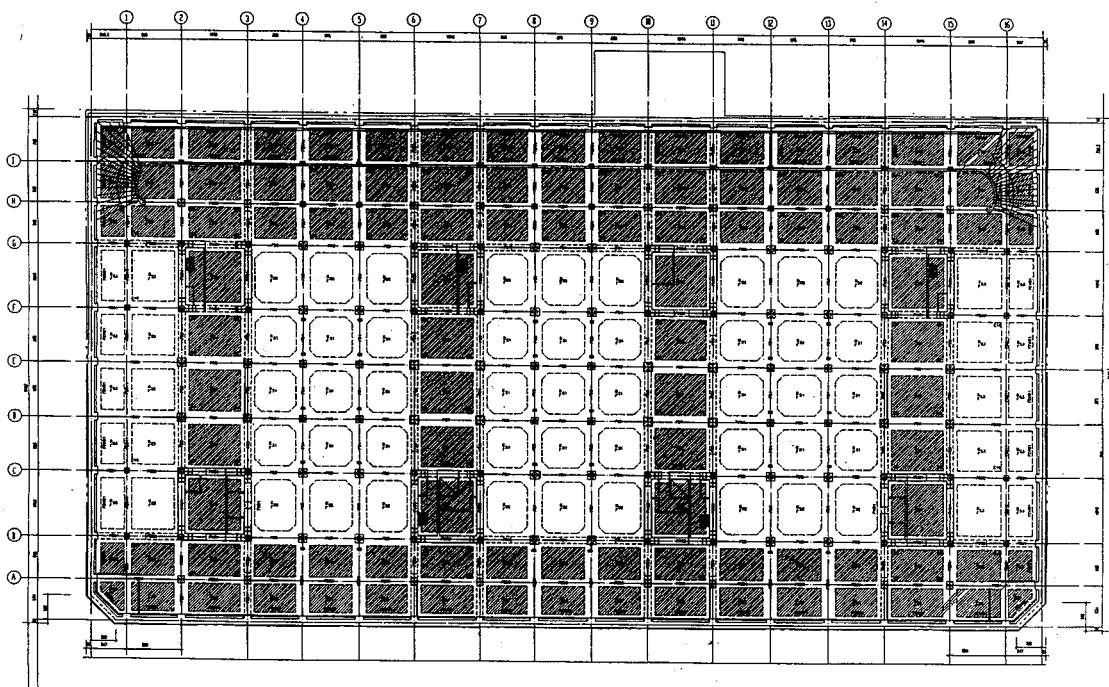
由上述載重試驗結果並考慮結構荷重之分佈及基礎面受力之變化，包括施工期間荷重壓力之變化與永久水壓之作用，除了採用加強式筏式基礎版(圖六)，將地樑與四周之連續壁連成一體外，在高荷重之柱位在縱橫之地樑下構築厚度100公分，深度44.5m之地下連續版樁，並與地樑結構連結，大部份之地下連續版樁皆施以底部平版膜方式灌漿以增加其承載

力及改善荷重下之沉陷行為。為防止東西側之過度側向變位，六道地下連續版樁並橫貫全基地與東西二側之擋土連續壁直接接觸，作為開挖時之地下扶壁使用(圖三)。

五、鄰房保護、安全監測系統及量測結果

5.1 安全監測系統

本工程除了基礎系統之考量外，因開挖面之西側緊鄰5至12層、地下一層、屋齡十年以上之樓房，距離開挖面僅0.5m，因此於施工中其安全性為地下室開挖之首要考慮。根據當時台灣類似地層地下室良好之施工經驗，連續壁之側向變位無論順打或逆打約為開挖深度之0.2%至0.4%，即5cm至10cm，而鄰近地面之影響範圍



圖六 地下五層(基礎)層結構平面圖

地工技術

依基地之土層狀況可遠達開挖深度之1.5倍至2倍，即30至40m，沉陷量約為連續壁側向位移之50%至100%，即3至10cm，此種沉陷量在本工程中在安全考量上不能接受，因此連續壁橫向之支撐設計必須加以克服，目標為降低西側此等變位量至一半以下。因此除了四周採用剛性較佳之連續壁，以七層橫撐之外，並將東西向地下連續壁樁延長至連續壁，且於開挖以上部份以低強度普通水泥形成如扶壁式之擋土牆(Buttress Retaining Wall)以增加連續壁之勁度(Stiffness)；同時可將大範圍之開挖分割成小範圍之分區開挖，除利於地下水之控制外，也可降低隆起之可能性。至於地下連續壁之施工，每單元皆進行超音波檢定及選擇性施作非破壞性檢驗以鑑定其孔壁之狀況及壁體之完整性，於所有連續接頭皆先後加以止水灌漿，有缺陷處也加以灌漿補強。

上述之設計，當時在學理分析尚未臻成熟，在類似地層與超高大樓基礎設計上也屬首創，因此在設計上除儘量採取較保守之分析外，在施工前即規劃較為完整之儀器監控系統，以利施工中隨時監測並作回饋分析。所使用之安全監測系統及開挖完成後之觀測值如表三所示(表中之單一數值者為管理值，即達此值時宜加強監測，並分析原因後根據情況再提預防改進措施)。

除了在基地四周鄰房與地表裝置沉陷觀測點與建物傾斜計(Tiltmeter)外，開挖期間於基地西南側之鄰近建物地下室也對每一柱位之沉陷進行密集之監測，結果如圖七所示。

此外，於筏式基礎大底完成後，即於大多數之柱位建立沉陷監測系統進行全

程之量測，圖八即顯示各柱位分別於樓高35層及85層完成時之沉陷量測值。

表三 安全監測系統管理表(西側)

觀測項目	觀測結果(西側最大值)	管理/容許值
壁體內傾斜管	33.44 mm	50.00 mm
壁體外傾斜管	29.61 mm	50.00 mm
鋼筋計	2,225.37 kg/cm ²	2,580.00 kg/cm ²
支撐應變計	255.18 Ton	130/290 ton
鄰房及地表	2.26 cm	3/5 cm
沉陷點		
連續壁沉陷計	0.641cm	3/5 cm
建物傾斜計	4'0.8"	6'52.5"
水位觀測井	-4.83 m	-4.08/-4.58 m
電子水壓計	穩定	—
土/水壓計	讀數不穩定	—
中間柱隆起桿	8.65 cm	5.00 cm

5.2 安全監測系統量測結果

由圖九所示之施工進度可見於開挖至大底後之停頓及筏基之施工工期長達一年，由於解壓時間甚長，開挖面中央部份之隆起高達8.65公分(表三)，四周地面及建物也產生隆起約2公分，其影響範圍約達開挖周界外40公尺(圖七)，隨著超高大樓之施工，由於荷重之增加，及基礎下水壓之解除控制，基礎下及基地四周土層受到向下壓力而使筏基及四周之地表反向產生沉陷，由量測結果顯示筏基於達35層及地下水壓解除控制使自然回覆至原地下水壓時其沉陷量中央及四周分別約為3公分與2公分；於樓高達85層時，中央及四周之沉陷量各達約5~6公分及3~5公分，整棟大樓之沉陷量極為均勻，而四周建物淨沉陷量約1公分。

六、檢討與結論

由於本超高大樓於1980年代後期之基礎設計時，於高雄地區尚無前例可援，

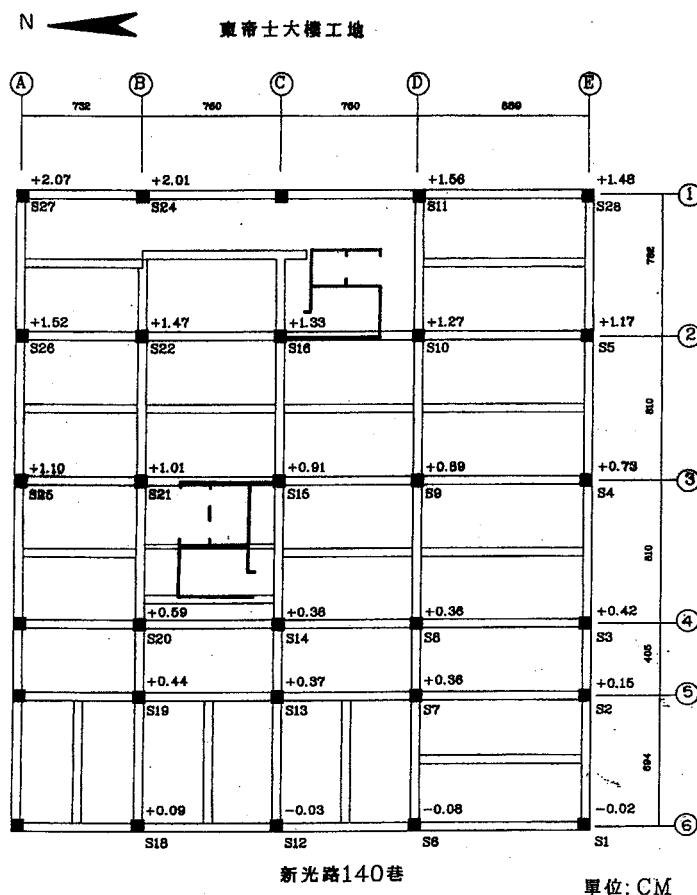
施工技術

因此於設計時完全以包括業主、建築師、結構工程師、大地工程師、營建單位、機電、消防、環境及營建管理及其顧問之團隊通力合作，大地工程於基礎方向雖略有貢獻，但新式基礎之構思、設計以至於採用皆為團隊每位成員腦力激盪之結果，不墨守於現有基礎型式及觀念是本大樓基礎設計之最大突破。此基礎型式其後尚使用於台北之極軟弱黏土層，亦獲致極為成功之案例。

本工程於施工中亦發現南北兩側因

未確實執行止水灌漿而漏水致引起地表沉陷之外，經灌漿處理後使沉陷不致擴大，但也指出承包廠商之選擇及施工品質之控制對地下工程之重要性。於開挖至大底時停工及含筏基施工工期長達一年，倘非以本工程之基礎型式與結構之加強設計，危險性明顯將大為增加，施工之管理(Construction Management)也明顯有加強之必要。

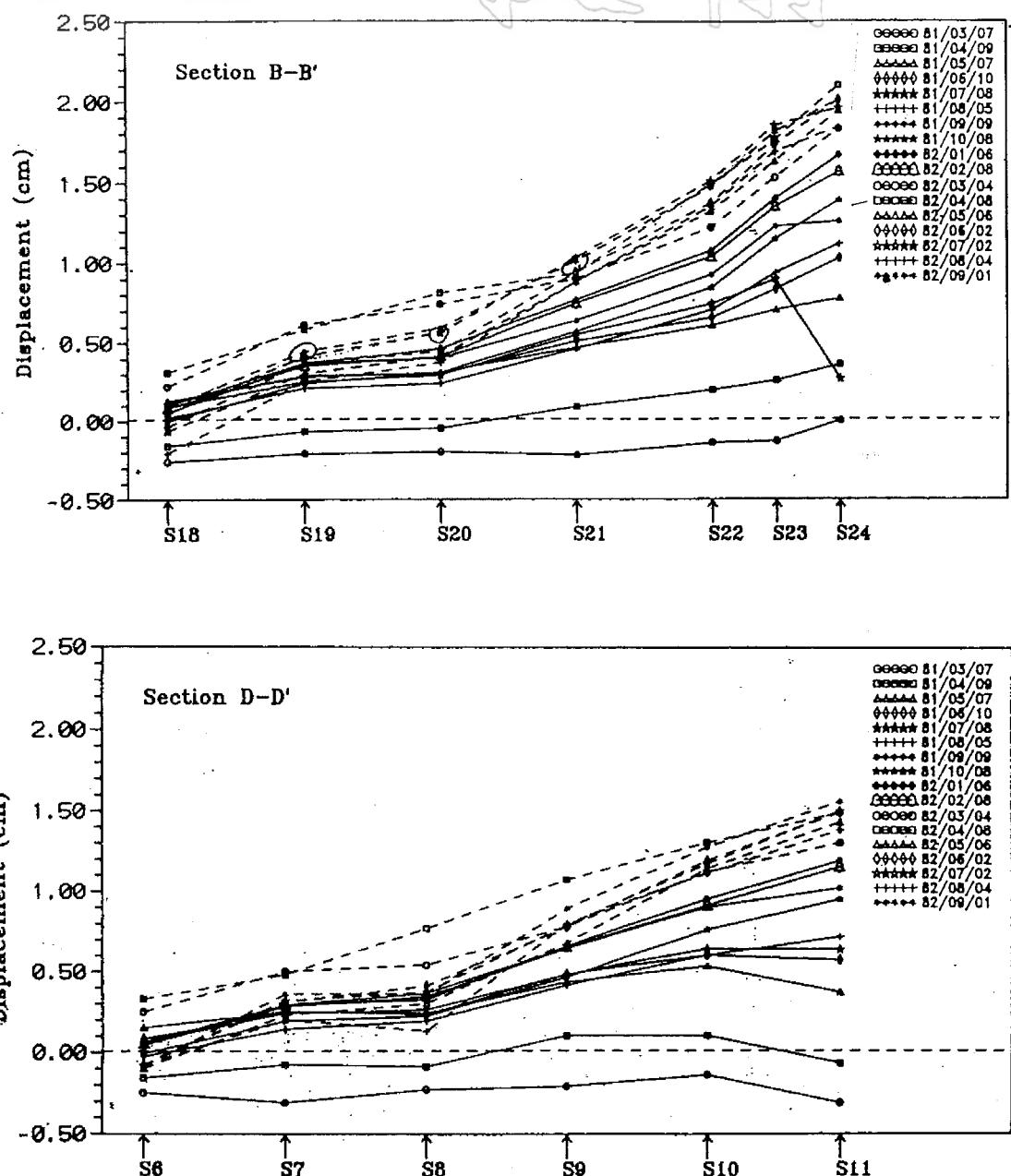
相信由本超高大樓之案例，讀者與著者皆可從中獲得相當多的啟示與經驗。



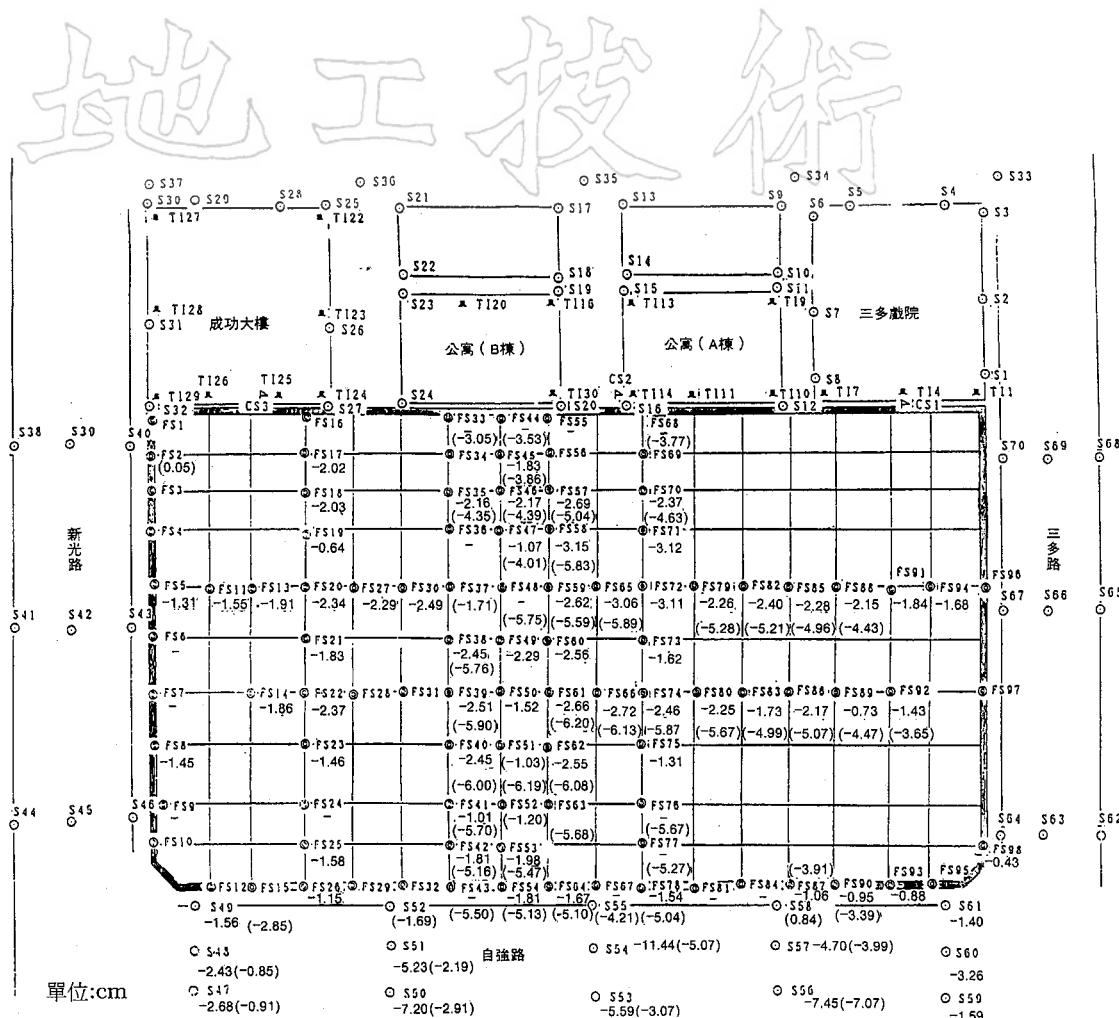
地下室柱位沉陷點82年9月1日量測結果

圖七 鄰近建物地下室柱位之沉陷觀測結果(一)

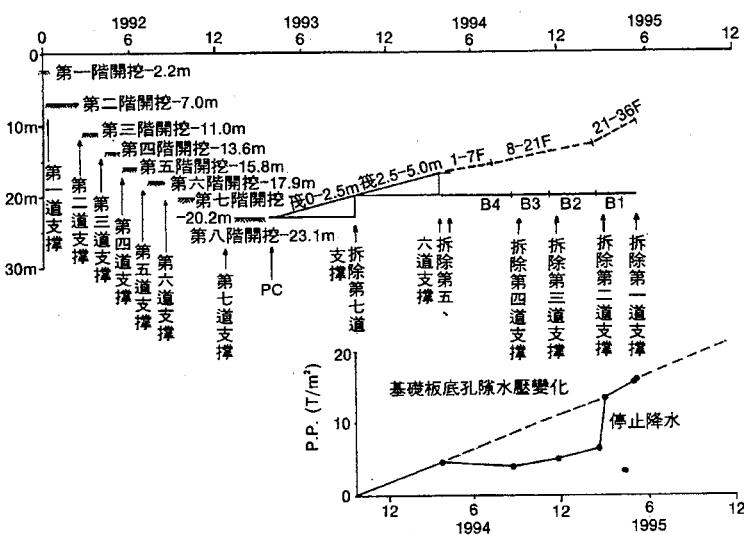
地工技術



圖七 鄰近建物地下室柱位之沉陷觀測結果(二)



圖八 大樓沉陷量測結果(35F及85F完成)



圖九 施工進度及基礎面下水壓變化圖