

高樓建築基礎之應用及其最近發展
THE PRACTICE AND RECENT DEVELOPMENT IN
FOUNDATION ENGINEERING OF TALL BUILDINGS

歐 晉 德

CHIN-DER OU

Vice President

Moh and Associates, Inc.

原載中國工程師學會近代工程技術研討
會論文專集，71年7月25日至8月6日

Reprinted from

*Proceedings, Modern Engineering and
Technology Seminar, Taipei,*

25 July - 6 August, 1982

Chinese Institute of Engineers

ABSTRACT

The paper discusses recent development on deep foundations and compensated foundation systems for tall buildings. Problems associated with deep excavation are also described.

近代工程技術討論會之一

高樓建築基礎之應用

及其最近發展

歐晉德

亞新工程顧問公司協理

前言

高樓建築物由於其特殊高度、強度、環境等因素，在基礎工程方面需要特殊的考慮。自基礎工程設計觀點視高樓建築，有下列特點：

1. 高度集中荷重——由高樓經由樑柱累積傳達至柱腳之集中荷重相當大，於地震或風力作用情況而生之偏心荷重傾倒力矩亦高。
2. 極大不均勻載重——爲了美觀及實用，在高樓四週常環繞一些五至六層的低層建築，因此低層建築之荷重量與高樓形成強烈之對比。

因此，基礎設計時必須考慮下列因素：

1. 基礎土層之安全支撐能力——必須能保證在高度荷重下，建築物亦不致傾覆，並且地震時也不會發生局部超壓破壞。
2. 不均勻之沉陷量——高低樓間重量差異甚大，但在功能上卻必須銜接，因此在設計時，要考慮到由於荷重差異而可能發生之不均勻沉陷量。如何消除此一不均勻沉陷

量，常決定了基礎形態。

3. 施工之限制——由於高樓建築工程多半在都市中進行，因此施工時有許多限制，例如噪音、交通、污水等。高樓建築的基礎設計就必須配合這些施工因素，以求在這些限制下順利完成基礎工程。
4. 工期及管理——爲了爭取時間，在施工時常希望高樓的主體部分能迅速完成，而環樓之低層構造可稍後開工以配合全部工期。因此基礎工程的設計，也要考慮各時期的施工安全，以最理想之基礎設計來爭取施工時效。

同時也需特別注意高樓建築基礎受力情況之特殊性質，在施工過程中，初期與末期間作用於地層上壓力差距極大，應力在地層中如何重新分配，即所謂結構物與土壤之互制作用（Soil-Structure Interaction），亦爲高樓結構基礎設計的主要研究項目之一。

因此在高樓基礎設計之前，需有充分的地質分析資料，諸如土壤支承特性、沉陷量、可能之差異沉陷，對地震、風力所生之側壓影響

表二 地下連續壁挖掘工具之選用範圍

機 具 型 態		抓 斗		打 擊 式	挖 斗 式	水 平 旋 轉 式	多 重 鑽 頭 式
		吊 機 式	導 桿				
深 度 (公尺)	< 20	○	○	○	○	○	○
	30 - 40	△	○	○	△	○	○
	40 - 50	△	○	○	×	×	○
	> 50	×	△	○	×	×	△
壁 厚 (公分)	< 80	○	○	○	○	○	○
	80 - 100	○	○	○	△	○	○
	100 - 120	△	○	△	×	○	○
	> 120	×	△	×	×	×	×
土 層 狀 况	粘 質 土 (N值)	< 4	○	○	△	○	○
		4 - 10	○	○	○	○	○
		10 - 20	○	○	○	○	○
		20 - 30	○	○	○	○	○
		> 30	△	○	○	○	○
	砂 質 土 (N值)	< 10	○	○	○	○	○
		10 - 30	○	○	○	○	○
		30 - 50	○	○	○	○	○
		> 50	△	○	○	○	○
	礫 石 (尺寸, 公分)	< 10	○	○	○	○	○
		10 - 15	○	○	○	○	○
		15 - 20	○	○	○	○	○
20 - 30		△	○	○	△	△	
> 30		×	△	△	×	×	
岩 層	軟 岩	×	×	○	△	×	
	硬 岩	×	×	○	×	×	
震 動 及 噪 音		△	△	△	○	○	
泥 土		○	○	○	△	△	

○適用

△有困難

×不適用

原有之有效覆土壓及水壓所抵消。

當地震力作用時，將造成基礎土壤之額外負荷，地震在基礎面形成一傾倒力矩及基面剪應力，使基礎向一邊移動，造成地盤反力重新分佈。

在設計考慮上，必須慎重分析此額外增加應力的作用程度，並要求：

1. 此應力增加以後，不得使基礎土壤發生局部剪力破壞現象，否則結構物將造成永久傾斜。

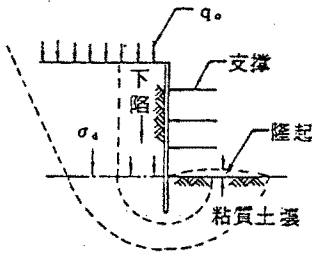
2. 檢驗土壤在此應力作用下之彈性反應，以確保當地震作用以後，建築物可恢復至原來之直立狀態。

世界上其他各城市曾發生多次地震後建築

建築物重量，建築物置入土中愈深，則獲得的穩定性及承載力愈高。

2. 此類基礎設計，除避免土層之剪力破壞外，主要在於滿足結構將來允許沉陷量及不均等沉陷的要求。

理論上，當基礎置於某深度下，而不致於增加有效覆蓋土壓力，且不改變現有水壓時，則完全沒有沉陷發生。但實際上，在基礎開挖過程，造成土壤有效應力大幅度的變更，若如圖三所示產生隆起(Heave)則將來的沉陷超過預期數量，此種問題在設計中，常易被忽略，在設計抵消式基礎時，如何模擬基礎土層因開挖之解凍過程，以推求將來之沉陷，是不可忽略的一點。



圖三 開挖底面之隆起

此外，在地盤發生下降地區，如台北市基礎設計工程師，不可忽視此種因水壓狀態變化而發生的土壤壓密現象。地盤沉陷的原因，如觀測所知，是由於地下水水位下降而增加了下層土壤體中有效應力，因而使得土壤產生壓密效果，地盤即生下降現象，對於具高度壓縮性之正常壓密粘土層，有效應力增加即可使土壤產生大量壓縮效果，因此在地盤沉陷區，設計抵消式基礎應以不超過目前之有效覆土壓為界限，以使將來水位降低情況，仍在有效應力增加壓縮反應上有折衷之餘地。

要了解地盤沉陷區，地層有效應力的變化情形應仔細調查土層變化與構造，同時應在各不同深度之土層中裝設水壓計(Piezometer)，此外還應有極深的永久準點，作為所有沉陷量調查的依據。台北盆地地盤沉陷的調查工作已進行多年，雖有少數沉陷點的設置，但不論永久水準點或水位觀測井以及水壓計之裝置，都極端缺乏，這是調查及設計工作之一大遺憾。

在地震區設計抵消式基礎，必須特別考慮由地震所造成基礎面上的額外應力，對於完全抵消式基礎而言，在靜力荷重下，不致有任何問題發生，因為其所有荷重已由基礎面上土壤

表一 開挖穩定性公式一覽表

提 案	公 式	安 全 係 數 F
Terzaghi & Peck	$\frac{\gamma_1 H}{S_u} = \frac{5.7}{F} + \frac{\sqrt{2} H}{B}$	1.5
Tschebotarioff	$\frac{\gamma_1 H}{S_u} = \frac{5.14}{F} + \frac{H}{B} (L/B > 2)$	2.0
Bjerrum & Eide	$\frac{\gamma_1 H}{S_u} = \frac{N_c}{F}$	1.2
日本建築法規修正式	$\frac{\gamma_1 H}{S_u} = \frac{1}{F} (\pi + 2\alpha)$	1.2
Finn	$\frac{\gamma_1 H}{S_u} = 10$	1.0
Peck	$\frac{\gamma_1 H}{S_u} = N_c$	1.2
我國建築技術規則	$\frac{\gamma_1 H + q}{S_u} = \frac{2\pi}{F}$	1.2

物傾斜現象，我國位於地震帶，對此問題不可不慎重考慮。

深開挖工程

由於抵筒式基礎逐步推廣，基礎深度亦大幅度加深，基礎施工遂遭到一些特殊問題：

1. 如何安全抵達設計深度
2. 如何控制土壤的隆起，以減少將來之沉降
3. 採用何種保護系統以保證開挖區的安全

第一個問題，即所謂開挖之穩定性，目前之分析多採極限設計，一般對開挖面之穩定破壞的採用方法，大致如表一所示。

其建議之安全係數差異甚大，工程師在應用上常有困難，而現行之建築法規對此點之規定亦不正確，由於各國之土層性質狀況不一，我國宜自行研究，尋求一適用於我國之理論經驗公式及合理安全係數，以保證工程安全。

第二個問題，即如何安排合適的施工步驟，包含限制開挖空間、抽取地下水等等，以減少隆起間接達成減少沉降的目的。同時土壤因開挖過程之解壓至建築物建造過程的再壓，對其壓縮性強度均有所影響，因此基礎設計者需了解：

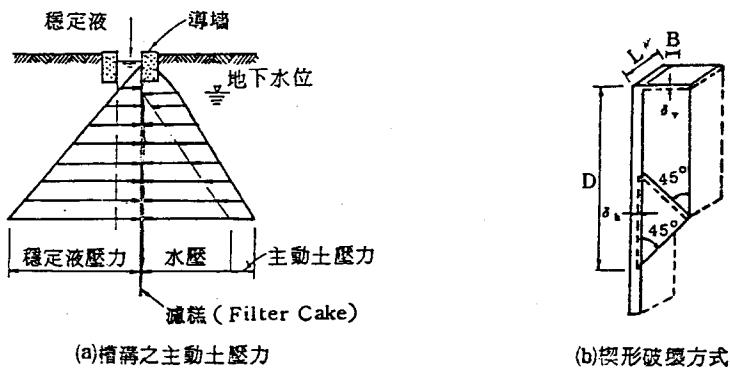
1. 基面土壤在解壓及再壓狀態的性質。
2. 地層中之各土壤層次及性質。
3. 在靜止及動力狀態下地下水之水力性質。
4. 如有需要，尚應考慮地盤整體下陷問題。

總而言之，基礎工程師必須對土壤之壓縮性、彈性及強度性質有充分了解，這些力學性質通常可由對小心取得的未干擾土壤 (Undisturbed sample) 進行各種特殊的試驗而獲得。當然，施工過程中應謹防干擾土壤，特別是過敏度高的粘土層，因隆起現象一向使土壤的強度與承載力大為降低。

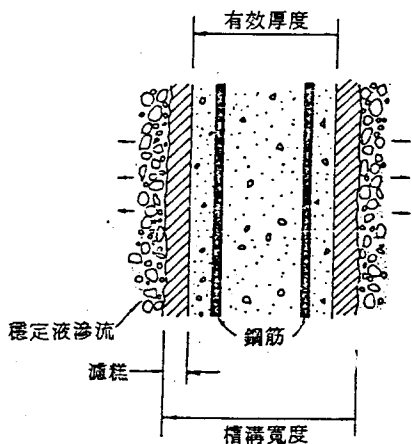
近十多年來，深開挖工程在採用的系統、分析方法，包括對土壓的估計，擋土設施之變形對壓力分佈的影響，均因經驗的累積而逐漸進步。簡單的有鋼軌排樁、鋼版樁，複雜的例如地下連續壁等，國內工程界都廣泛的採用。值得一提的是，自一九七二年國內首次採用地下連續壁後，其生產量在最近三年來更有顯著的增加，此情形在國際上亦然。但是對連續壁的設計理論仍莫衷一是，如 James & Jack (1974) 曾建議彈性理論法，日本也各自發展其分析理論，但都未能一致，主要原因在於設計分析未能完全涵蓋工地之變化情況，即對土壤——擋土結構之互制未能充分掌握其變化，目前仍需大量之研究及現場觀測，以求設計之突破。地下連續壁有多種施工法，所適用的土壤情況亦各不相同，表二列舉目前常用施工法之適用性，在國內若要求較高品質之施工情況時，多半採用 BW 工法，此工法係採旋轉鑽頭鑽掘，並利用反循環水流方式，排除挖泥物。使用地下連續壁，目前這方面的研究大致在於如

表三 台北市現行採用之穩定液控制標準

性質	範圍	測定法
比重	1.02 — 1.10	Mud Density Balance
粘滯性	21 — 25 秒	Marsh Funnel Viscosimeter
滲透性	Fluid loss < 15 ml in 30 seconds Cake < 2.0 mm	Filter Press Test
PH	8 — 10	PH Meter
含砂量	< 5 %	Sand Screening Test



圖四 槽溝穩定性分析

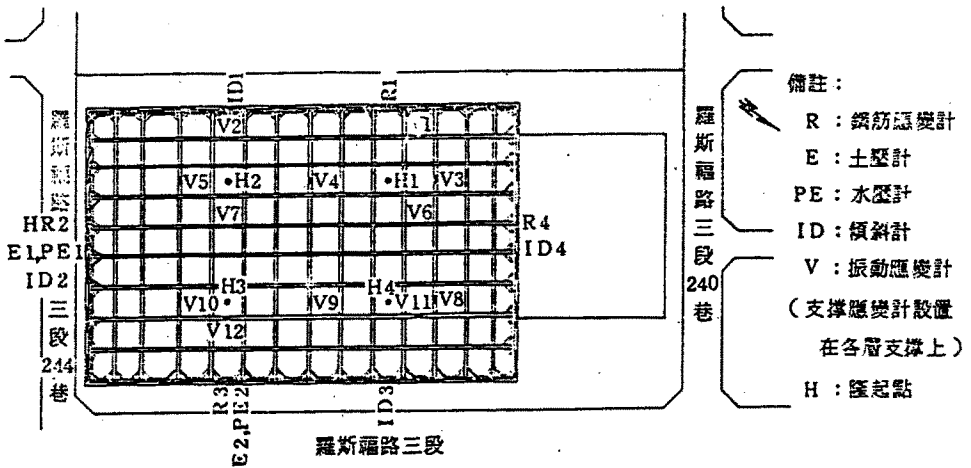


圖五 設計之有效厚度

何擬定合適之施工規範。英國 ICE 於一九七三年曾建議一範本，美國也於一九八一年八月提出另一草案，但對地下連續壁品質影響極大之穩定液控制，仍未有完整且深入之研究。目前採用者大致均沿習 API 規範鑽孔穩定液規格，表三列舉目前國內採用穩定液控制之一般標準。至於如何配合各工程地點工質狀況之穩定液標準，應就槽溝理論觀點作進一步分析，目前所謂槽溝之穩定性分析，大致上可利用之理論為 Aas 的楔形破壞及主動土壓理論，圖四表示此二理論之依據情況。實際上此二理論均未提及槽溝中，土壤挖除後外側土體之變形，而對深槽溝或需較大比重穩定液水保持壁面穩定

時，利用特密管 (Tremie pipe) 澆灌混凝土所可能發生之混凝土污染問題，學者專家們均未有一致之結論。近年來對挖掘槽溝時外側土壤之移動變形，將有進一步研究，而研究方向可能趨向於決定設計之安全係數，如何保持混凝土品質，接縫 (Joint) 的類別，穩定液在壁面產生濾糕 (Filter cake) 之影響，及將地下連續壁用作永久性結構時，其設計強度、品質管制等均有待進一步之實際調查。筆者曾根據現場觀測結果，建議對採用地下連續壁為永久性結構時，對混凝土採取 0.8 之降低強度因素，有效厚度也應折減五公分，以涵蓋濾糕之影響 (圖五)。至於將連續壁作的結構體之承重版或基礎連續樁時，其支承力之分析，目前尚未有完整之方法，通常將連續壁分成單元而利用現有樁基公式來分析，因實際載重試驗結果極為有限，目前尚難評估此法之可靠性，國內可就這點作實際載重試驗而加以研究。

就深開挖工程之支撐系統而言，不外乎內撐 (Internal bracing) 及外拉之預力地錨 (Prestressed earth anchor)，前者之設計對側壓力大致採用 Peck (1967) 之表土壓力法，對土壤結構之互問問題未能綜合涵蓋，施工破壞事件仍時有所聞，防止之法在下節施工監測系統中再加細述。使用內撐時，為減少擋土設施之移動與變形，對支撐採取預壓，近年來國內深開挖工程已逐漸普及，預壓力一般均



圖六 台電大樓監測系統配置圖

採用 10 ~ 25 % 之設計應力，已可顯見其效果。

至於地錨之應用，國內工程界也已採用，但也許由於經費的緣故，對深開挖工程的應用，始終未能有較科學化之管理方式，特別是在台北市之粘土地層中，地錨之設計及施工，仍有待進一步研究。

監測系統

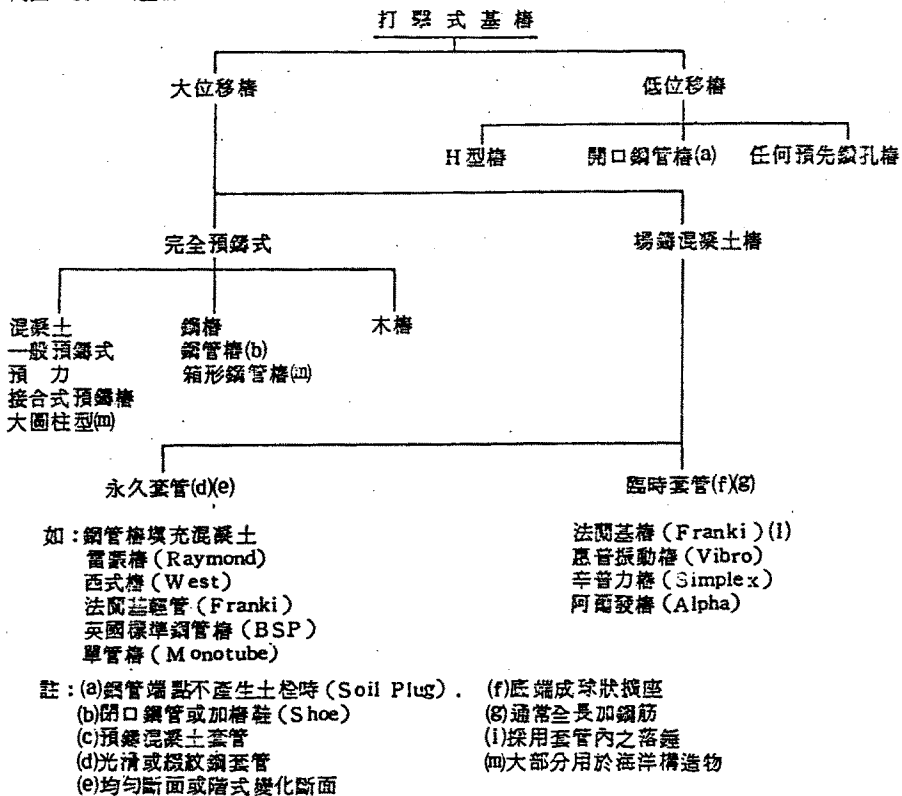
在深開挖工程中，由於許多理論都用半經驗法，加上土質情況不一致，分析設計過程必須加以簡化，且工程在進行中會有許多變化因素，利用監測系統可隨時監督深開挖工程之進行，隨時取得資料，以保證工程安全，因此這已成為不可或缺的一環。國內工程營建單位如榮民事業工程處及中華工程公司在高樓建築之基礎工專上，已有許多採用監測系統之實例，如目前最高建築台電大樓採用深筏基，施工時即有完整之監測。圖六即例舉其監測系統之配置狀況。又如衡德工程公司、海陸工程公司等民營之營造工程公司，也有類似之經驗。將來若大規模進行地下鐵路工程時，這些經驗將有莫大助益。現階段深開挖監測系統，觀測之項目大致為：

1. 開挖區四週之地表沉陷
2. 鄰近結構物之位移及沉陷
3. 地下水位及水壓變化
4. 護土設施之變形
5. 支撐系統之受力狀況
6. 護土設施內之受力狀況
7. 土壓力之變化
8. 開挖區內地層之隆起變化

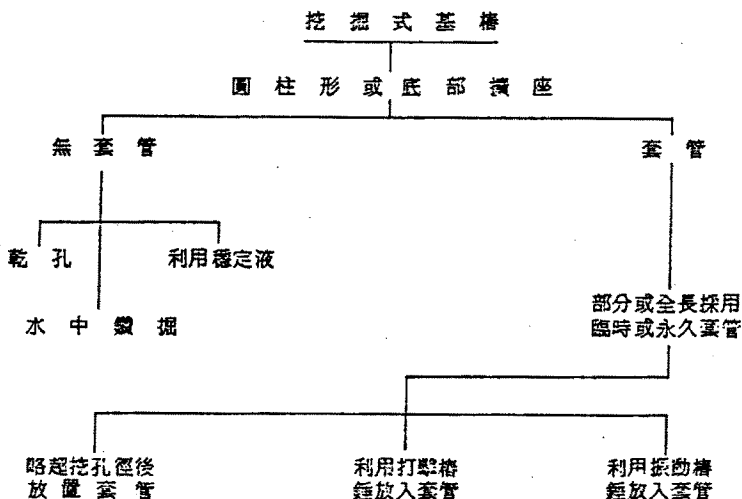
地表沉陷及結構物位移，可利用水準測量，水位及水壓變化則利用水壓式或氣壓式水壓計測量，而以氣壓式水壓計較好，開挖底面隆起則可利用隆起桿測量，護土設施變形多半用傾斜計測得，至於支撐系統之受力，若護土設施是採用連桿壁時，其鋼筋之受力及牆內外側之土壓變化所採用之壓力計、軸力計或應變計等，目前種類較多，基本上可分成油壓式壓力計、光彈性壓力計、振動弦式應變計（Vibrating wire strain gauge）、電阻式應變計（Resistance strain gauge）、或線性差動轉換器（Linear variable differential transformer）。這些國內均會採用，對目前深開挖工程的安全性提供了相當的保證。

深基礎

表四 打擊式基樁



表五 挖掘式基樁

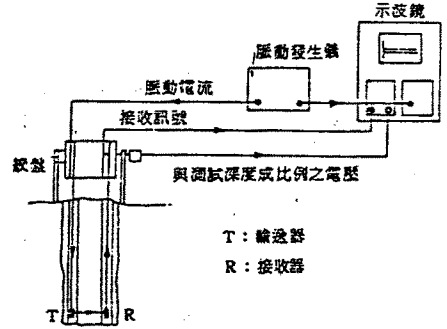


除抵消式基礎外，高樓建築基礎之另一可能形式為深基礎 (Deep foundation)，深基礎又可以分為打擊式樁基礎 (Driven pile foundation)、場鑄式鑽掘樁基 (Cast-in-situ bored pile foundation) 及墩基或大型沉箱基礎 (Pier and caisson)，建築物常藉著深基礎，將高樓之巨大荷重傳至地表下較深強度較佳之土層上，以獲取足夠之支承力及減少沉陷。表四及表五分別列舉常用之打擊式及鑽掘式樁基類別。

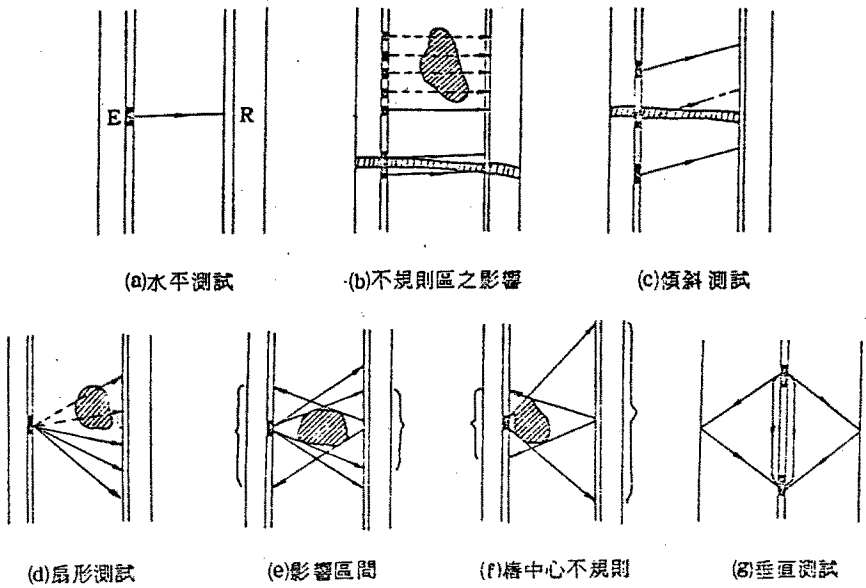
打擊式樁基，一般都是採用預鑄混凝土樁、預力混凝土樁、H型鋼樁或底端開口之鋼管樁為多，後二者屬於低位移形樁基 (Low-displacement pile)，在裝設過程中對四週土壤之擠壓變形量較小，在都市內使用時，可能發生之地表隆起或對已打設基樁之隆起影響程度較低，打擊式樁基對材料本身之品質較易掌握，但缺點在施工時噪音太大，在都市內施工常受限制，其震動亦可能造成鄰近結構之破壞，因此近年來有所謂無噪音打樁法之產生，也有

先行鑽孔再打樁，或整體樁及樁錘部分加隔音設備，當然這都會使施工成本增加。

鑽掘式基樁 (Bored pile) 為在現場直接鑽孔再灌鑄混凝土，這是針對噪音問題，而多採用於都市中之施工法，大口徑高單位荷重之場鑄挖掘樁之施工成本較打擊式低。目前施工多採用螺旋鑽掘式 (Auger type) 或反循環鑽掘式 (Reverse circulation pile)，國內則普遍採用反循環式，口徑自六十公分至二一〇公分不等，部分基樁底端並利用鑽孔機擴大至磨



圖七 基樁聲波檢測法



圖八 聲波測試形式及其檢測形態

身二至三倍大之直徑，以增加支承力，此類基樁之施工問題在於如何保護孔壁使其不致崩塌，以及控制混凝土品質以符合設計需求。通常可利用穩定液或套管保護孔壁，但在目前台灣之基樁施工中，一如地下連續壁施工，對保證孔壁之垂直度及混凝土不致受污染，是最弱的一環，幾乎毫無管制。鑒於高樓之特殊高度荷重，大型挖掘樁之高度荷重，其中任何一根失敗，都會導致整體結構之破壞，如何加強對此類基樁施工之管制，實為基礎工程界的營務之急。近年來有使用音波測孔及不破型檢驗法來測定基樁品質，如圖七所示於鑄樁時預先埋管，再利用聲波儀檢核基樁之斷面是否合乎要求，圖八列舉檢測之形式，可分水平測試、傾斜測試、扇形測試及垂直測試等，可分別檢測出樁體之不規則區，甚為簡便，當可引進並加以利用，以提高此類場鑄基樁之施工品質。

直徑大於二五〇公分以上之大口徑墩基，亦可用作高樓之基礎，亞洲區域以香港地區使用最多，在較佳之岩盤中，其支持力高達二〇〇〇噸以上，若地下水位低，則施工成本也低，支持力高則對工程有益。國內尚無應用此法

之例，若工程地點之支持層在三十公尺左右時，可能可考慮其可行性。

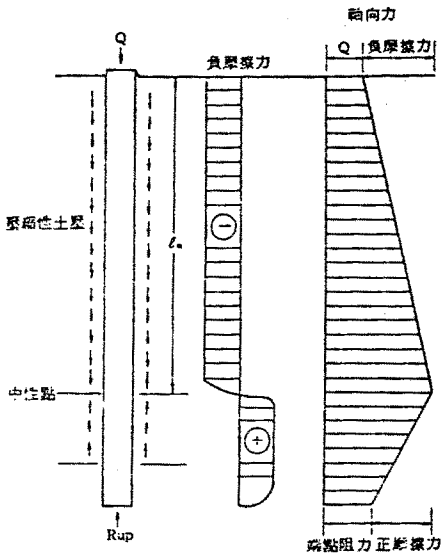
採用深基礎時，除支承力及沉降量外，有時還需考慮負摩阻力及側向力的負荷問題。在軟弱地層中，由於施工或長期抽取地下水或地表之超加荷重影響，會導致樁周緣地層產生壓密沉陷，如圖九所示。地盤對基樁發生相對之位移，而產生負摩阻力，使基樁負擔額外重量，這在嚴重地盤下陷地區如東京、曼谷等地均有明顯證據。基樁設計時應考慮負摩阻力之理論，近年來有相當之進展，讀者參考 Browns (1979) 之論文可得知大概。而對負摩阻力之消除可採用：

1. 增加樁數以負擔額外荷重
2. 提高樁材料強度以增高樁支承力
3. 減少樁距，降低負摩阻力影響
4. 使用外套管避免負摩阻力作用在樁上
5. 利用流青塗敷樁表面以降低摩擦效應

根據近年來之研究所得，以採用第五項特殊塗青處理為最經濟有效。

結論

高樓建築之基礎設計，應充分了解基礎土壤面上，將承受較一般建築高出甚多之壓力，每根柱子部傳遞甚高之集中荷重，壓力的傳佈也因荷重面積之增大而加深，可能產生不均勻沉陷，致使結構物發生龜裂及傾斜，更由於樓高，因風力及地震而生之傾斜側力矩，常成為控制基礎設計之主體因素；以上種種使得基礎設計者，必須對作為承載用之土層性質有充分之認識與了解，因此必須有充分的時間及經費以進行調查，資料搜集及分析等工作，此外，基礎工程師還需了解此類工程多半在都市內進行，因應而生之工作、空間、時間的限制、噪音、污染之管制，對鄰近結構物之安全維護等問題，都會影響基礎形態的選擇，如何利用新穎的施工技術，以較短的時間，較低的成本來達到安全而有效的基礎工事，實為當前不可忽視的課題。



圖九 負摩阻力

高樓建築的基礎工事牽涉範圍日廣，而工地內之安全也日形重要，必須配合有效的監測及施工管理系統，以保證安全，並免因小失大。歐美日等先進國家基礎工程，已成為一專業之學問，我國土木工程界雖也漸重視，但由於

法規的限制，仍未能有效推廣，有鑒於將來工程技術的發展，在此願呼籲政府當局，應儘速修改建築法規，推行專業技師簽證制度，以利基礎工程技術的進步，使我國高樓建築之基礎工程發展進入嶄新的領域。

參考文獻

1. AAS, G., (1976), "Stability of Slurry Trench Excavations in Soft Clay", 6th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna.
2. BJERRUM, L. & Eide, O., (1956), "Stability of Strutted Excavations in Clay", *Geotechnique*, Vol.6.
3. BROMS, B., (1979) "Negative Skin Friction", State-of-the-Art Reports, Proc. of the 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2.
4. DIAPHRAGM WALLS AND ANCHORAGES, PROCEEDINGS, (1975), Conf. Organized by ICE, London, ICE, Sept., 1974, London, England.
5. FINN, W. D., (1963), "Stability of Deep Cuts in Clay", *Civil Engineering*, June.
6. MILLET, R. A. and PEREZ, J - V., (1981), "Current USA Practice: Slurry Wall Specifications", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.107, No. GT8, Aug.
7. MOH, Z. C. and OU, C. D., (1979), "Building Foundation Practice in Taiwan", Proc. of the 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Singapore.
8. OU, CHIN-DER, (1982), "Underground Diaphragm Wall Construction by BW Technique for Supporting of High Rise Buildings", Conf. Diaphragm Walling Techniques, May, Singapore.
9. PECK, R. B. (1969), "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", Proc., 7th ICSMFE, State of the Art Volume.
10. TERZAGHI, K. & PECK, R. B., (1948), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 1948.
11. TSCHEBOTARIOFF, G. P. (1973), "Foundations, Retaining and Earth Structures", McGraw - Hill Book Co. Inc., New York, N.Y.
12. ZEEVAERT, L. (1973), *Foundation Engineering for Different Sub-Soil Conditions*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, N.Y.
13. XANTHAKOS, P., (1979), *Slurry Walls*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, N.Y.
14. 日本建築學會 (1974), 建築基礎構造設計規準, 同解說。
15. 內政部 (1974) 建築技術規則, 建築構造篇。
16. 亞新工程顧問公司 (1979) 台電大樓新建工程地下結構體施工安全觀測工作報告。