地工技術，第112 期（民國96年6月）第81-86頁
Sino-Geotechnics, No.112 (Jun., 2007) PP.81-86

設計例

基樁 t-z、q-w 曲線用於基樁行為分析設計實例

APPLICATION OF T-Z AND Q-W CURVES ON ANALYSIS OF PILE PERFORMANCE

高秋振　俞清瀚*

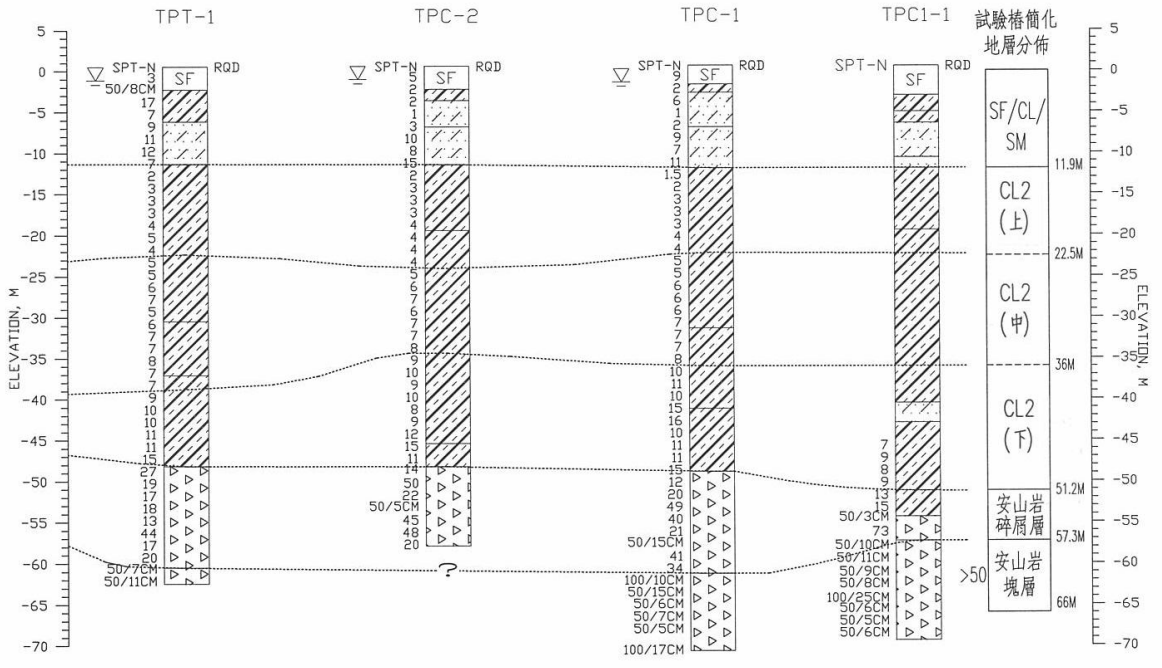
一、 工程概述

1.1 基地地層概要

本設計案例基地位於台北盆地西北邊緣，代表性地層剖面如圖一，設計用簡化土壤參數則如表一。現地表下為厚約11~12m之回填土、粉土質黏土及粉土質細砂層；接著為厚度介於27~56m之粉土質黏土層；以下則為SPT-N值平均大於50之極密實火山角礫堆積層，由大小不等(最大粒徑可達1m以上)之安山岩塊夾砂、泥組成。工程應用上，本火山角礫堆積層表層由火山基質支持而夾大量黃棕色泥砂，緊密度相對較低，可視為安山岩碎屑層；以下為灰色凝灰質粗砂夾多量安山岩塊層，屬安山岩塊顆粒支持組構，其緊密度相對較高，則視為安山岩塊層。

1.2 工程基本資料

本基地建物基礎皆採單柱單樁之大口徑現場鑽掘灌注基樁(Cast-in-Place Bored Pile)設計，柱位最大設計長期持續性載重(Sustained Load)及地震短期載重(Transient Load)分別達1,250及2,500ton，參考『建築物基礎構造設計規範』(內政部，2001)及北側緊鄰基地相同地層之試樁結果，評估樁徑須達2.5m，且需貫穿安山岩碎屑層(厚約6~15公尺)，並進入安山岩塊層達3~5m，研判此部份基樁需採全套管工法；而針對載重較小基樁，估計樁徑約1.5~2.0m，僅需進入安山岩碎屑層3~5m，可採反循環工法。



圖一　基地代表性地層剖面

* 富國技術工程股份有限公司

表一 設計用簡化土層與工程性質參數表

土層			平均厚度 (m)	SPT-N值 (平均值)	C' (t/m²)	Ø (°)	S_u (t/m²)	S_u/P_c'
1	回填層(SF)		2.3	-	-	-	-	-
2	粉土質黏土層 (CL1)		4.4	1.5~7 (4)	0.4	28	4	-
3	粉土質細砂層 (SM)		5.6	3~12 (7)	0	28	-	-
4	粉土質黏土層 (CL2)	(上)	10.2	1.3~4 (3)	0.5	27	4	0.25
		(中)	14.3	5~8 (6)	0.5	27	6	0.25
		(下)	21.2	8~27 (12)	0.5	28	8	0.25
5	火山角礫堆積層(BC)		-	-	0*	34*	-	-

註：* 表推估值

1.3 基樁分析設計流程

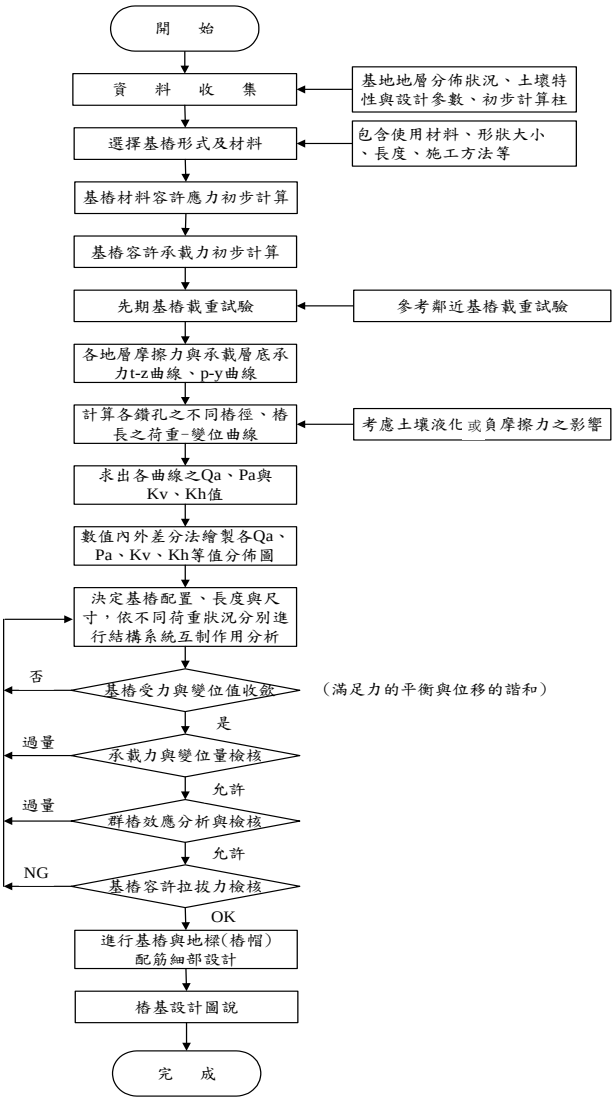
有關基樁分析設計完整流程如圖二，本案例主要針對垂直下壓基樁進行介紹，且不考慮土壤液化與負摩擦力之影響，及基樁本身結構設計。

首先，基樁承載力分析係綜合本基地之先期與施工前基樁極限載重試驗結果，根據現地地層條件、基樁之尺寸、長度等，使用靜力公式、APILE2程式，以試樁結果所推求之t-z曲線參數，採用t-z曲線法，計算不同樁徑、長度之樁頭變位與荷重關係曲線；進而求出個別基樁之垂直容許承載力(Qa)與及相應之反力模數(Kv)，以供結構分析基樁與地樑基礎版結構系統互制作用，直到分析結果(基樁受力與沉陷量)達到收斂值為止；最後根據分析結果進行分配至各柱位下部結構之受力檢核。

二、極限載重試樁成果

2.1 極限載重試樁

依本基地地層分佈與設計基樁尺寸、深度及擬採用工法，選擇具代表性地層區域，分別採用反循環及全套管工法，施作樁徑皆為150cm之試驗主樁及反力錨樁。基樁施工過程乃配合進行鑽掘速率、穩定液性質、孔壁完整性與垂直度、樁底沉泥狀況及混凝土澆灌之檢驗及紀錄，以供試樁結果詮釋依據，並藉以建立後續工作樁之施工準則。而根據試驗樁位置之預鑽孔資料，於試驗樁體內依土層分佈及預定開挖面各不同深度斷面裝設鋼筋計及變位計。



圖二 基樁分析設計流程

全套管工法施作試驗基樁(TPC1-1)樁長66.1m，貫穿12m厚之安山岩碎屑層並進入安山岩塊層5m；反循環試驗基樁(TPC2)樁長51.2m，進入安山岩碎屑層3m。以上試驗樁之最大試驗載重分別達2100及4100ton，其樁頭荷重-沉陷曲線(如圖三(a)及圖四(a))顯示試驗樁皆達極限破壞狀況。

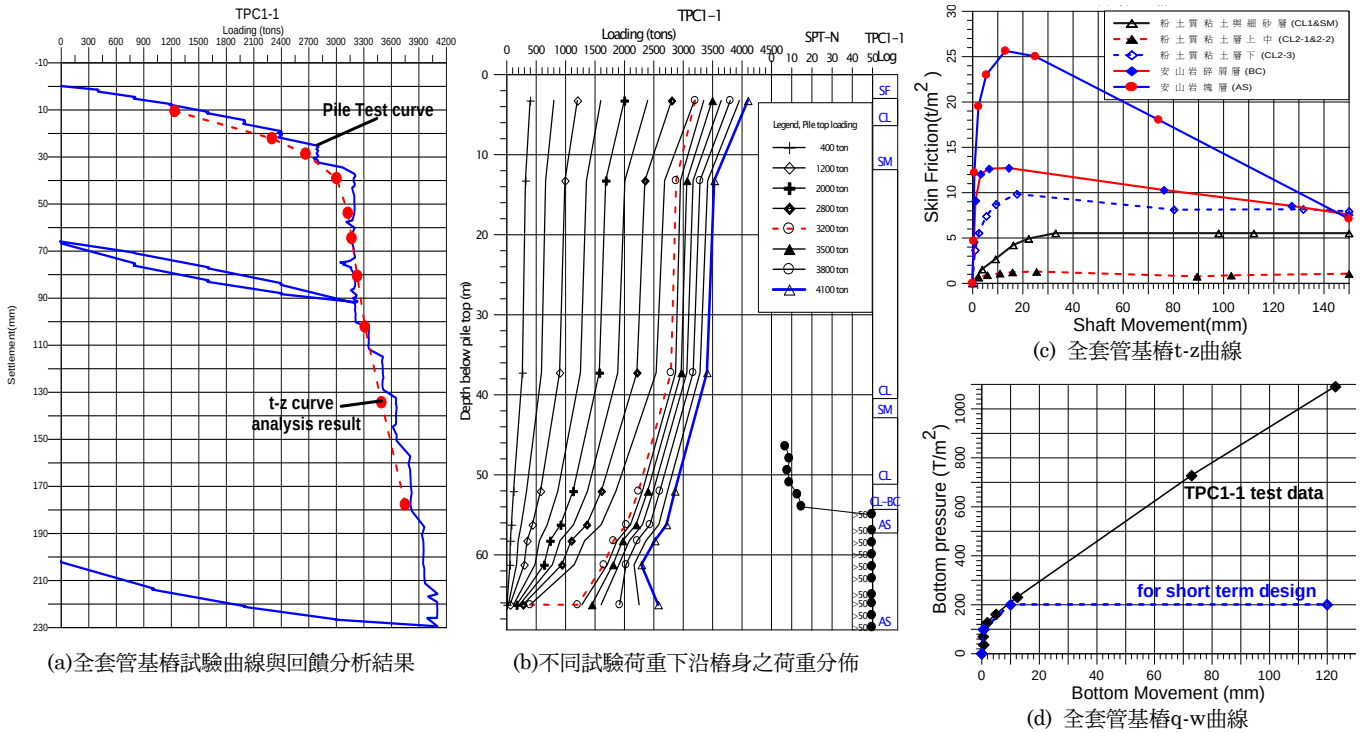
2.2 基樁設計之t-z及q-w曲線

根據各試驗樁不同試驗荷重下沿樁身之荷重傳遞 (Load Transfer) 分佈曲線(圖三(b)及圖

四(b))，及參考變位計量測結果及由鋼筋計計算之樁體各深度變位，試驗基樁長度內不同深度地層之樁身單位面積摩擦力-變位曲線(t-z curves)及樁底反力-沉陷曲線(q-w curves)則彙整如圖三(c)、圖三(d)、圖四(c)及圖四(d)；各深度地層之樁身單位極限摩擦力約於樁體變位達0.5~1.5cm(約為樁徑之0.4%~1.0%)即發揮；然樁底反力則因沉泥分佈，約須達10cm沉陷方有較明顯之反力出現。利用前述t-z及q-w曲線反算模擬各試驗樁之樁頭荷重-沉陷曲線如圖三(a)及圖四(a)之點虛線，顯示與實際試樁結果相當吻合，故圖三及圖四評估各深度地層之樁身單位摩擦力與樁底反力特性曲線應屬合理，於是應用於模擬評估不同尺寸基樁於設計承載力作用下之沉陷行為。綜合圖三(c)及圖四(c)，針對反循環及全套管工法基樁之建議設計極限樁身摩擦力歸納如表二。

2.3 基樁設計底承力評估及建議

根據以上試樁結果，TPC2反循環基樁加載至2000ton時，樁底反力約320t/m2，然因試驗保壓僅約20分鐘，且樁頂沉陷仍持續增加，顯示樁底有頗厚沉泥(至少>10cm)。TPC1-1全套管試驗樁亦有類似現象，第一循環加載至3200ton之樁頂沉陷已超過9cm，而第二循環以每20分鐘荷重增量150ton雖可繼續加壓至4100ton；但圖三(b)及(c)顯示3200~4100ton加載過程，樁身摩擦力皆已呈現定值或降低，且樁頂與樁底之沉陷則大幅增加，顯示亦受樁底沉泥影響，故以上試樁過程中所測得之樁底反力不宜直接視為基樁可提供之底承力。然基於工程實務及經濟考量，建議前述樁底反力於地震力、風力等短期載重狀況下(即Transient loading)可酌量採用。根據試樁之樁頭試驗荷重、樁底反力與樁底沉陷關係(圖五)，當考量基樁底部與樁頭變位之諧和關係，建議依樁底容許變位量(安山岩碎屑層取0.5cm，安山岩塊層取1cm)，針對本基地安山岩碎屑層與安山岩塊層之設計樁底極限承載力，建議於短期載重狀況可分別為140t/m2與200t/m2；然長期持續性載重狀況(Sustained loading)則不宜採用。

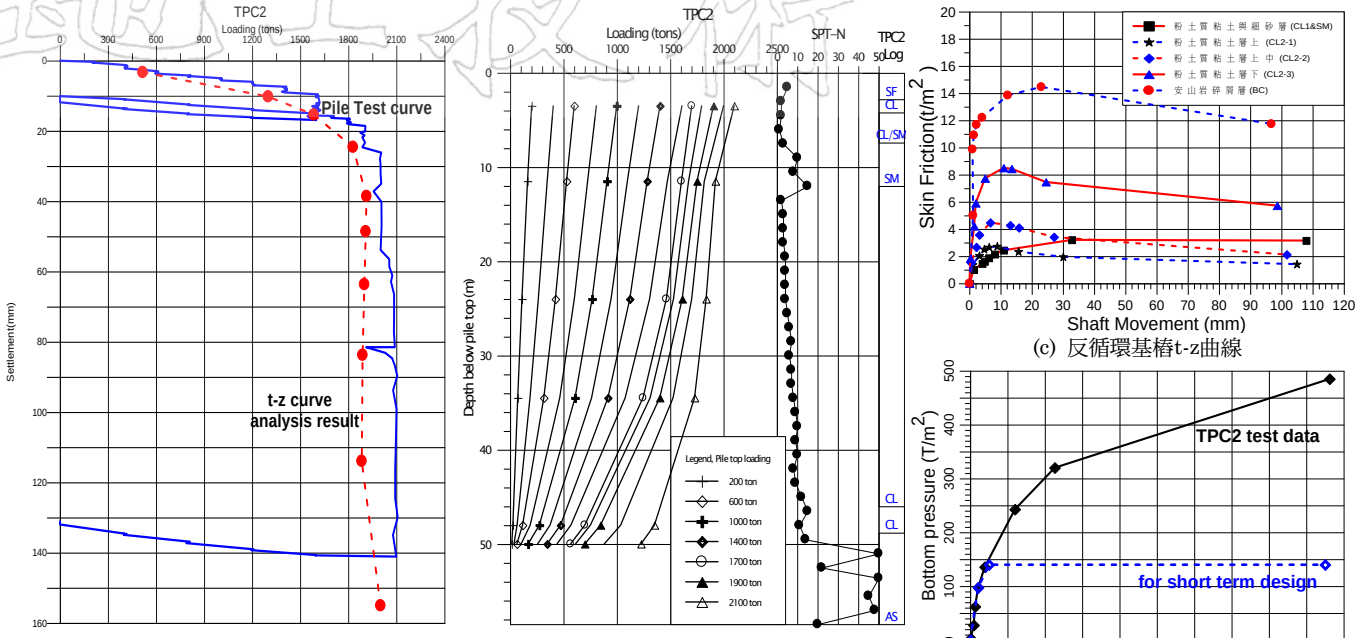


(a)全套管基樁試驗曲線與回饋分析結果　(b)不同試驗荷重下沿樁身之荷重分佈

(c) 全套管基樁t-z曲線

(d) 全套管基樁q-w曲線

圖三　基地全套管基樁(TPC1-1)施工前試樁成果



(a)反循環基樁試驗曲線與回饋分析結果　(b)不同試驗荷重下沿樁身之荷重分佈

(c) 反循環基樁t-z曲線

(d) 反循環基樁q-w曲線

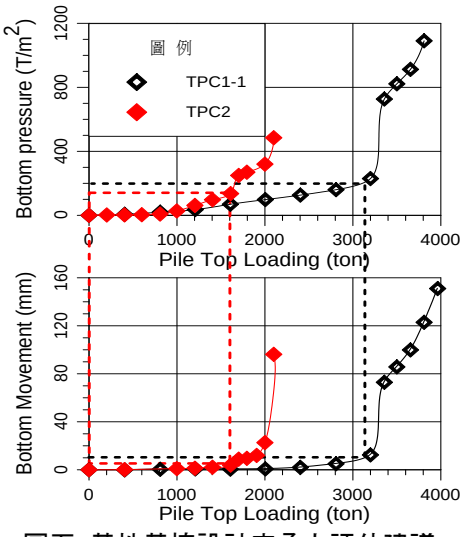
圖四 基地反循環基樁(TPC-2)施工前試樁成果

表二 基地試樁評估樁身摩擦力比較及建議

地層		極限承載力之摩擦力/最大摩擦力,t/m² (深度,m)			極限摩擦力建議值,t/m²	
		TPC1-1(全)	TPC2(反)	TPT1(全)	下壓(全/反)	拉拔(全)
表土層(空打段)	SM	8.11/9.13(0~13.3)	3.21/3.21(0~11.5)	1.11/5.66(0~11.5)	5.5/3.2	1.5
粉土質黏土(上)	CL2(上)	1.27/1.27(13.3~37.3)	1.95/2.73(11.5~24.0)	1.11/3.22(11.5~39.0)	1.5/2.0	1.2
粉土質黏土(中)	CL2(中)		3.42/4.48(24.0~34.5)		2.5/3.0	2.0
粉土質黏土(下)	CL2(下)	9.81/9.81(37.3~52.1)	7.47/8.51(34.5~48.0)	13.02/13.02(39.0~48.0)	9.8/8.5	9.5
火山角礫堆積層	安山岩碎屑層	12.68/12.68(52.1~56.3)	14.47/14.47(48.0~50.0)	11.11/40.74(48.0~54.3)	12.7/14.5	12.0
	安山岩塊層	25.61/25.61(56.3~61.3)	-	-	25.6/-	-

註：1.TPC1-1及TPC2為垂直下壓試樁，TPT1為拉拔試樁；

2.“極限承載力之摩擦力”係依荷重-變位曲線判釋極限承載力所對應之摩擦力；“最大摩擦力”則為試驗所得之最大摩擦力。



圖五 基地基樁設計底承力評估建議

三、基樁設計成果之檢討比較

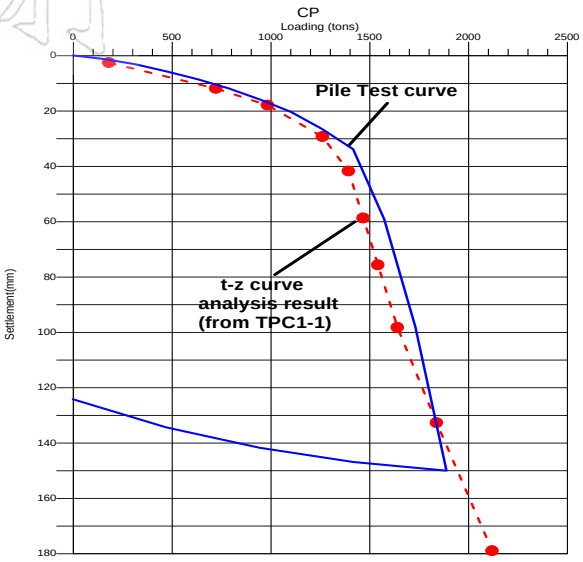
3.1 基樁設計成果檢討比較

根據以上試樁建議之樁身摩擦力及底承力，以樁徑150cm基樁為例，針對反循環及全套管工法，分別進入及承載於安山岩碎屑層與安山岩塊層，並考量短期及長期載重狀況，估算基樁極限承載力如圖六；並與建築設計規範建議公式計算結果進行比較。圖六顯示：規範計算結果明顯低估樁身摩擦力而高估底承力，且因無法考量不同設計載重狀況，導致基樁極限承載力亦與試樁結果推估值有所差異；參考試驗樁施工期間之檢驗及試樁結果，研判此係規範建議之計算方法

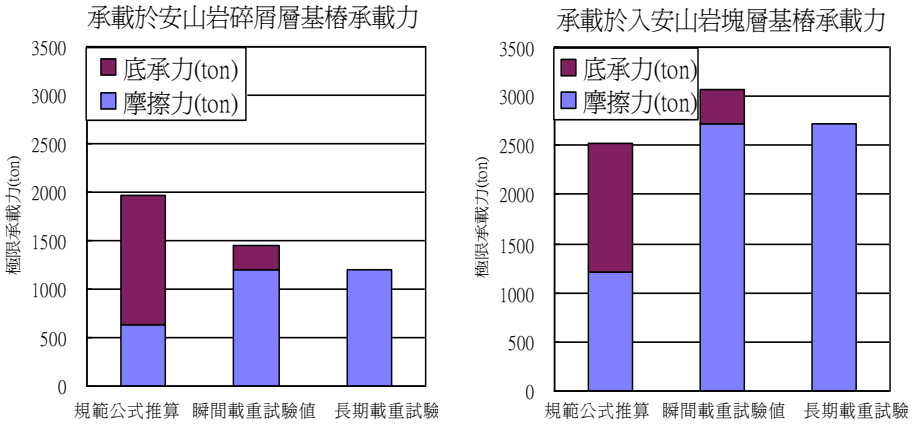
並無法有效反映鑽掘基樁實際之施工狀況，如鑽掘孔壁完整性、粗糙狀況，及樁底沉渣清理情形所致。因此，建議較大型開發基地應進行基樁前期極限載重試驗，以取得符合基地地層特性與施工狀況之相對應基樁設計參數。

3.2 基樁尺寸效應檢討比較

由於本工程設計時利用樁徑150mm極限試樁結果所求得之t-z及q-w曲線，模擬分析不同尺寸基樁之荷重-沉陷曲線；因此為檢核基樁之尺寸效應，再利用前述t-z及q-w曲線反算模擬本基地另一組樁徑110mm先期試樁之樁頭荷重-沉陷曲線如圖七之點虛線，與實際試樁結果相當吻合，顯示以前述歸納之t-z及q-w曲線確可用於模擬分析不同尺寸基樁於各種設計荷重下之相對應沉陷量。

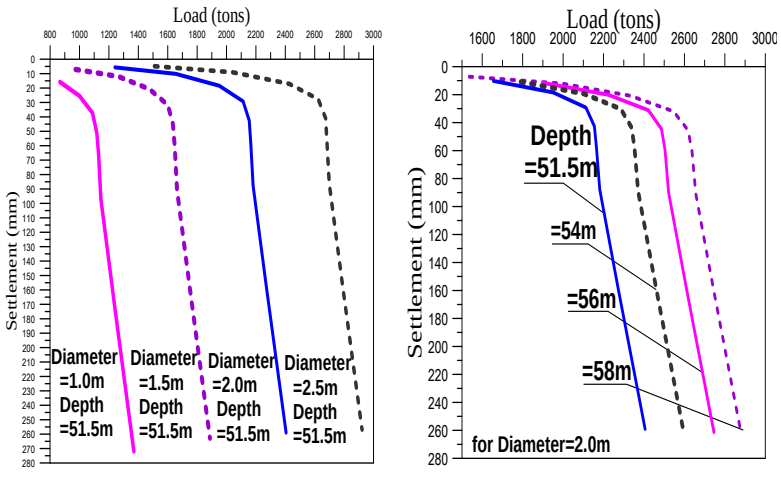


圖七　樁徑110cm試驗曲線與回饋分析結果比較



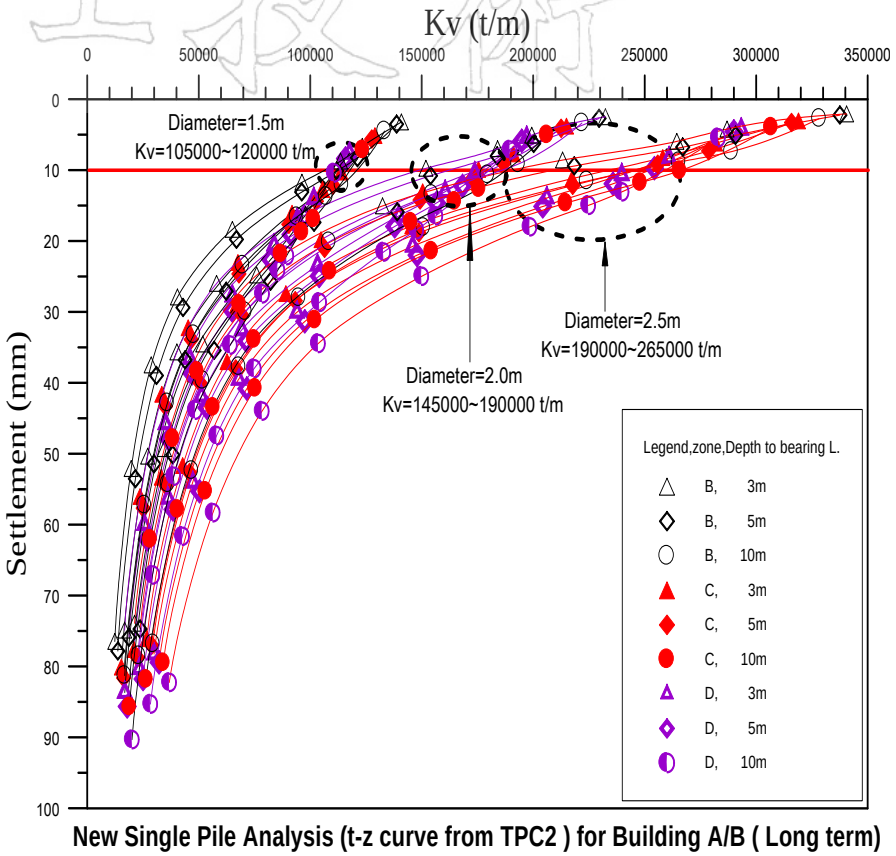
(a)反循環基樁　　(b)全套管基樁

圖六 基地基樁設計及檢驗比較成果



(a) 不同樁徑　　(b) 不同樁長

圖八 基地設計基樁之模擬荷重及沉陷行為



圖九 基地設計基樁之推估反力係數

3.3 基樁行為設計成果

依以上所述之常用傳統設計法，基樁之容許承載力係利用規範建議或試樁結果評估之極限樁身摩擦力與底承力，依基樁尺寸與適當安全係數估算；通常基於安全考量，此估算容許承載力皆趨於保守以滿足設計荷重及隱含之沉陷量要求，但卻無法了解基樁於設計荷重作用下之實際沉陷量及與可能承載行為。因此本基地乃進一步利用試樁結果所推估之樁身摩擦力-變位及樁底反力-沉陷曲線(圖三(c)、圖三(d)、圖四(c)及圖四(d))，模擬分析不同尺寸基樁於各種設計荷重下之相對應沉陷量(圖八)，如此則可估計基樁在不同設計荷重下之實際沉陷量，及評估各基樁之承載行為，以便檢討基樁與上部結構之相容性，此即所謂性能設計(Performance – Based Design)。此外，根據圖八之基樁樁頭荷重-沉陷曲線，則可評估不同設計載重範圍下基樁樁頂之等值反力係數(圖九)，供基礎結構與土壤互制分析設計之依據。

參考文獻

中華民國大地工程學會(2001)，「建築物基礎構造設計規範，內政部」。

富國技術工程股份有限公司(2005)，「台北關渡基地設計後施工前基樁載重試驗成果報告書」。

富國技術工程股份有限公司(2005)，「台北關渡基地基樁分析設計計算書」。

俞清瀚、高秋振 (2007)，"鑽掘灌注式基樁設計施工案例之安全度檢討"，2007海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會論文集，P345~352。

REESE, L.C. AND S.T.WANG (1994), Computer Program APILE2 – Analysis of Load versus Settlement for an Axially Loaded Deep Foundation, Ensoft, Inc., Austin, Texas.