

# 臺中卵礫石層之地工參數驗證 ～以臺中商業銀行大樓為例

張程凱<sup>1,2</sup>、蔡祁欽<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>中興大學土木工程學系 <sup>2</sup>義力營造股份有限公司

## 摘要

本文以臺中商業銀行總部大樓新建工程為案例探討臺中卵礫石層之地工參數，該工程地下開挖深度達GL.-34.6m，採用逆打功法，並以全套管鑽掘樁作為擋土排樁，為臺灣深開挖工程的經典案例。為優化擋土樁設計並確保施工安全，本案例於現場進行基樁載重試驗，以取得工址卵礫石層實際之基樁摩擦力與樁底承载力等參數，並透過擋土樁內傾斜管監測側向變形。分析結果顯示，試樁所得之卵礫石層樁周摩擦力明顯高於規範值，建議以實測數據優化設計；正規化後之t-z曲線顯示樁徑2.5%的位移仍未激發最大摩擦力。擋土樁之水平地盤反力係數 $K_h$ 值反算結果則出現較大變異性，經校正後判斷 $K_h$ 介於7000~13000 t/m<sup>3</sup>，其與剪力波速( $V_s$ , m/s)比值約介於14~43之間。

**關鍵字：**卵礫石層、深開挖、樁載重試驗、t-z 曲線、水平地盤反力係數。

## Validation of Geotechnical Parameters in the Taichung Gravel Layer ~ A Case Study of Taichung Commercial Bank

C. K. Chang<sup>1</sup>, and C. C. Tsai<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University <sup>2</sup>Earth Power

## Abstract

This paper investigates the geotechnical parameters of Taichung's gravel layer using the new Taichung Commercial Bank Headquarters building as a case study. The project, a classic example of deep excavation in Taiwan, involved an excavation depth of 34.6 meters below ground level. It employed the top-down construction method with full-casing bored piles as retaining systems. To optimize the design of the retaining piles and ensure construction safety, a pile load test was conducted on-site to obtain actual parameters for the skin friction and end-bearing capacity of the gravel layer. Besides, lateral deformation of the retaining piles was monitored using inclinometers. The analysis results show that the skin friction of the gravel layer obtained from the test piles was significantly higher than standard code values, suggesting that using the measured data can optimize design. The normalized t-z curve indicates that the maximum skin friction was not fully mobilized even at a displacement of 2.5% of the pile diameter. The back-calculated values for the coefficient of horizontal subgrade reaction ( $K_h$ ) of the retaining piles showed a large variability. After calibration, it was determined that  $K_h$  is between 7,000 and 13,000 t/m<sup>3</sup>, with a ratio to shear wave velocity ( $V_s$ , m/s) ranging from approximately 14 to 43.

**Key Words :** gravel, deep excavation, pile load test, t-z curve, horizontal subgrade reaction coefficient.

## 一、前言

近年來國內職業安全衛生意識普遍提高，

對於具危險性之工程項目特別重視。臺中商業銀行總部大樓新建工程位於臺灣地區，其地下樓層數達10層，開挖深度深達GL.-34.6m，在臺灣深開挖工程中名列前茅。原先設計以人工

\*通訊作者(Corresponding author) : tsaicc@nchu.edu.tw



施作前，進行了嚴謹的靜載重試驗，包括一組軸向壓力試驗(TPC1)和一組軸向拉力試驗(TPT1)，共施作7支前期基樁，包括1支壓力主樁、1支拉力主樁及5支反力樁(試樁位置詳圖二)。

### 3.1 基樁載重試驗規劃

本案例試樁採用靜載重方式，規劃求得各地層之軸向荷重分佈、各地層之摩擦應力、t-z曲線及樁底q-w曲線，以線性方式推估較大斷面尺寸之永久結構樁承载力/拉拔力。

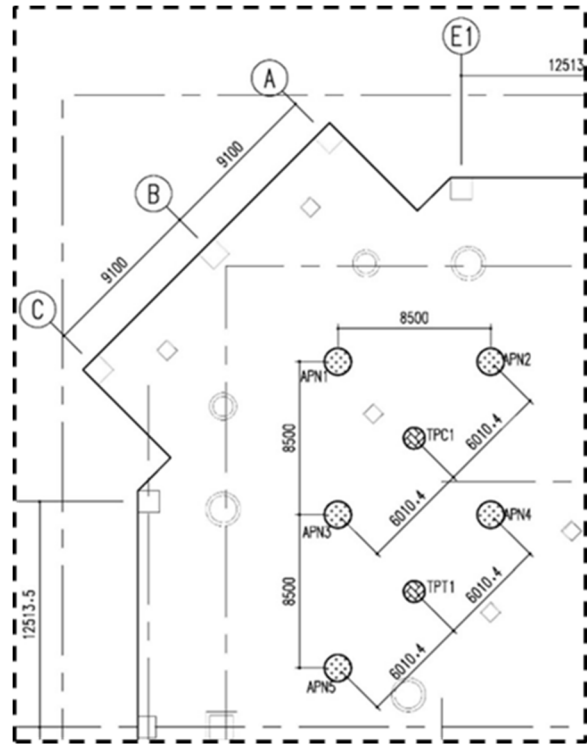
試驗主樁(TPC1壓力樁、TPT1拉力樁)樁徑皆為1.2m，樁長15m。反力樁配置方面，壓力試驗的反力樁(APN1~APN4)樁徑為1.5m，樁長25m；拉力試驗則共用APN4並新增APN5(樁徑1.5m，樁長10m)作為反力樁，試驗樁體澆置完成至試驗日超過28日。

壓力試驗規劃最大試驗載重為6000T，拉力試驗規劃最大試驗載重為1600T。採用標準加載法與循環加載法的混合衍生方式，主要功用在於分離彈性沉陷及塑性沉陷的影響。壓力及拉力試驗均採用三循環(最大試驗載重之25%、50%及100%)加載至最大試驗載重。

除必要之荷重計及電子式位移計外，樁體內配置了鋼筋應力計及樁體變位計。壓力試驗主樁TPC1配置8個監測斷面，拉力試驗主樁TPT1則配置7個監測斷面，每個斷面裝設4支鋼筋應力計，以獲取精準的樁身軸力及樁周摩擦應力變化。樁體變位計則設置於距樁底1m處。

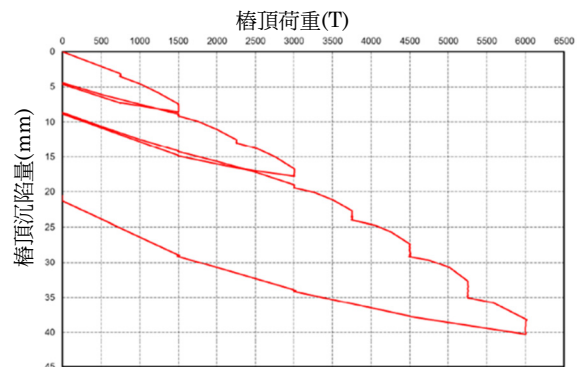
### 3.2 試樁試驗結果

壓力試驗主樁TPC1於2019年9月10日至11日完成試驗，實際最大載重為6000T。依據樁體變位計之量測結果，在試驗荷重達到6000T時，樁頂及近樁底(GL-14.0m)之沉陷量分別為40.29mm及28.66mm，而四支反力樁在最大載重時的最大上拔量介於5.56mm至25.12mm之間，大於經濟部標準檢驗局(1988)基樁載重試驗之要求(錨定樁之拔動量應在2~4 mm以下)。各加載階段壓力試驗荷重-沉陷量曲線如圖三所示，從圖中可看出，在6000T載重下，摩擦力及樁底點承力仍未達到極限值，可見其承载力仍有向上提升之空間。



圖二 試樁位置示意圖

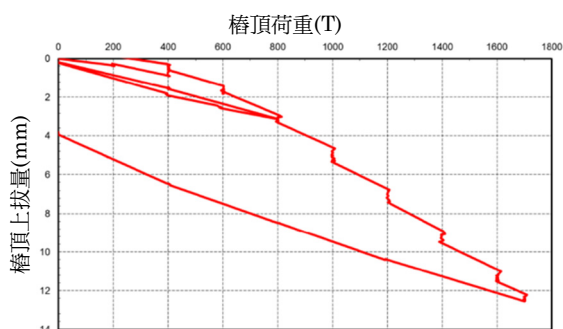
Fig.2 Plan view of pile loading test configuration



圖三 TPC1壓力試驗樁頂荷重-沉陷量曲線

Fig.3 Pile head loading – settlement curve of TPC1 compression test

拉力試驗主樁TPT1於2019年9月16日完成試驗，在達原定最大試驗載重1600T時，初始上拔量為10.99mm，保壓60分鐘後微幅增加至11.54mm，當時現場初步評估拉拔力仍有向上提升之空間，故將最大試驗載重額外提升至1700T。在試驗荷重達到最大載重1700T時，樁頂及樁底之樁體變位計上拔量分別為12.54mm及0.94mm，而各加載階段拉力試驗荷重-上拔量曲線如圖四所示。兩支反力樁在最大載重時的最大沉陷量則分別為5.03mm (APN4)及12.67mm (APN5)。



圖四 TPT1拉力試驗樁頂荷重-沉陷量曲線

Fig.4 Pile head loading – settlement curve of TPT1 tension test

## 四、t-z 曲線建立與分析

t-z曲線法由Seed及Reese針對軟弱黏土中的打擊樁首次提出，用以描述樁身位移與樁身摩擦力之間的關係。其中，「t」代表樁身所受摩擦力或樁身應力傳遞，而「z」則代表樁身垂直位移量(吳，1994)。Coyle and Reese後續依據Seed and Reese的方法，對黏土中的鋼管樁進行分析，並透過室內模型樁試驗修正現場觀測資料，提出了基樁與土壤互制之t-z曲線法，用於模擬樁周表面及樁端承受載重與位

移的行為(Coyle and Reese, 1966)。本研究以現地試驗數據資料加以整理分析，試圖歸納出適用於臺中地區卵礫石層之t-z曲線。

### 4.1 t-z曲線分析

基樁各監測斷面之位移量，亦可由樁內預埋之鋼筋計應變求得，因其準確度遠高於樁體變位計之量測值，故試樁相關之分析，另以鋼筋計應變求得之位移為準。

透過鋼筋計應變及基樁斷面材料性質，可計算出各監測斷面之樁身軸向傳遞荷重。進一步，各區段樁身周邊之平均摩擦應力可由各深度斷面之樁身傳遞荷重計算而得，其分佈如表一(壓力試驗)與表二(拉力試驗)所示。壓力試驗結果顯示樁身抗壓摩擦力大小與深度成正比，隨著深度增加，摩擦力有增加的趨勢。

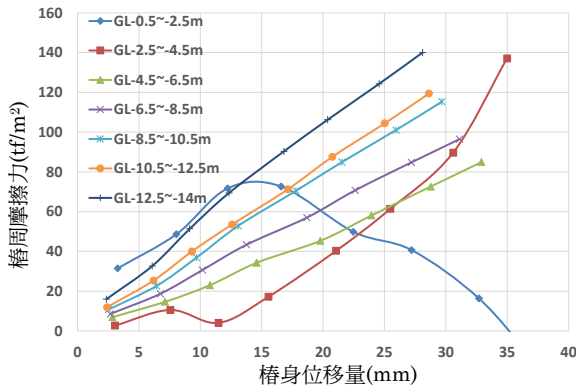
藉由各監測斷面相對應之樁周摩擦力及樁身位移(由樁頂沉陷量及各區段彈性壓縮量計算得之)，便可建立各地層之t-z曲線。壓力試驗之t-z曲線如圖五所示，拉力試驗之t-z曲線如圖六所示。為進一步探討卵礫石層的摩擦力特性，本研究將t-z曲線進行正規化，亦即

表一 TPC1壓力試驗各加載階段樁周平均摩擦應力變化 (T/m<sup>2</sup>)Table1 Average side friction of pile at each loading stage during TPC1 compression test (T/m<sup>2</sup>)

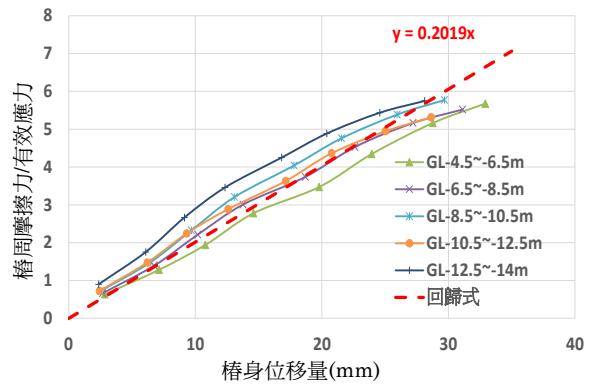
地層深度範圍	試驗荷重							
	750T	1500T	2250T	3000T	3750T	4500T	5250T	6000T
GL-0.5~-2.5m	31.46	48.63	71.74	72.63	49.82	40.65	16.32	-16.91
GL-2.5~-4.5m	2.7	10.54	4.04	17.20	40.27	61.36	89.73	137.13
GL-4.5~-6.5m	6.95	14.70	23.02	34.30	45.35	58.10	72.62	85.00
GL-6.5~-8.5m	8.49	18.65	30.65	43.33	57.03	70.75	84.80	96.50
GL-8.5~-10.5m	10.66	22.60	36.86	52.84	70.51	84.98	101.07	115.39
GL-10.5~-12.5m	11.91	25.34	39.98	53.52	71.25	87.65	104.46	119.49
GL-12.5~-14.0m	16.04	32.67	51.40	69.46	90.37	106.33	124.39	140.07

表二 TPT1拉力試驗各加載階段樁周平均摩擦應力變化(T/m<sup>2</sup>)Table2 Average side friction of pile at each loading stage during TPT1 tension test (T/m<sup>2</sup>)

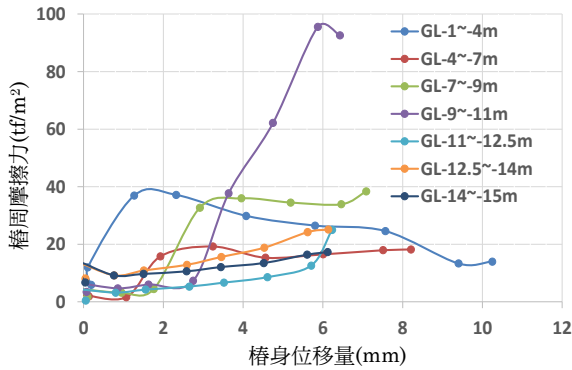
地層深度範圍	試驗荷重								
	200T	400T	600T	800T	1000T	1200T	1400T	1600T	1700T
GL-1.0~-4.0m	5.9	11.96	36.95	37.17	29.88	26.50	24.59	13.33	13.95
GL-4.0~-7.0m	1.85	2.60	1.61	15.82	19.24	15.32	16.54	17.93	18.21
GL-7.0~-9.0m	1.7	4.29	3.18	4.41	32.74	35.98	34.54	33.93	38.38
GL-9.0~-11.0m	3.43	6.37	4.70	6.02	7.31	37.72	62.18	95.59	92.62
GL-11.0~-12.5m	0.44	4.14	3.18	4.24	5.27	6.65	8.55	12.60	24.98
GL-12.5~-14.0m	8.11	13.84	9.17	10.87	12.85	15.58	18.80	24.20	25.13
GL-14.0~-15.0m	6.70	14.16	9.20	9.72	10.62	12.09	13.50	16.40	17.29



圖五 TPC1壓力試驗各地層t-z曲線  
Fig.5 t-z curve at different depths derived from TPC1 compression test



圖七 剔除異常後之壓力試驗正規化t-z曲線  
Fig.7 Normalized t-z curve (after removing abnormal data) from compression test



圖六 TPT1拉力試驗各地層t-z曲線  
Fig.6 t-z curve at different depths derived from TPT1 tension test  
將各地層的摩擦力除以其有效應力。

壓力試驗之t-z曲線正規化後，可發現較靠近地表層的兩條曲線有較大之差異性，進一步剔除異常數值後，可得到較為一致之結果(如圖七)，並可歸納出經驗函式：

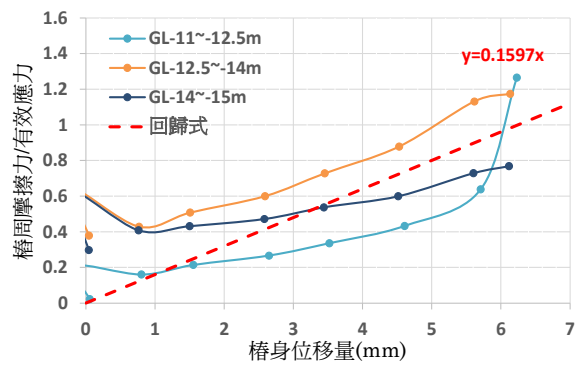
$$t/\sigma' = 0.21z \quad (1)$$

t為樁周摩擦應力， $\sigma'$ 有效應力(根據設計單位重與地下水位GL.-6m計算)，z為樁身位移(mm)，此關係式配合 $z_{peak}$ 的選用可反推各地層之最大摩擦應力。拉力試驗正規化後之t-z曲線相關性較低(詳圖八)，但亦可歸納得經驗函式：

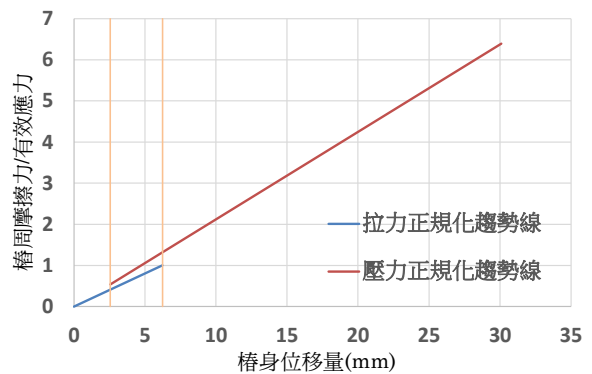
$$t/\sigma' = 0.16z \quad (2)$$

進一步比較壓力、拉力試驗的正規化趨勢線，可觀察到在相同位移量下，壓力試驗的摩擦力有大於拉力試驗摩擦力的現象(詳圖九)。

再者，不論是依基樁載重試驗結果或回推計算所得之摩擦阻力(33.52~140.07tf/m<sup>2</sup>)，均顯著大於「建築物基礎構造設計規範」中表



圖八 剔除異常後之拉力試驗正規化t-z曲線  
Fig.8 Normalized t-z curve (after removing abnormal data) from tension test



圖九 壓力、拉力試驗正規化趨勢線比較圖  
Fig.9 Comparison of normalized t-z curve from the compression and tension tests

5.3-2之最大表面摩擦阻力(15tf/m<sup>2</sup>)。由此可知，若設計時僅採用貫入試驗公式推估之摩擦力，將導致設計過於保守。

## 4.2 APILE程式應用

本研究利用APILE程式進行臺中卵礫石層t-z曲線模擬。本研究根據試驗結果，將

APILE程式中 $z_{peak}$ 調整為實測激發最大摩擦應力時之樁身位移量30mm(即樁徑之2.5%)。此調整可透過直接輸入 $z_{peak}$ 參數或修改 $t-z$ factors中 $z$ factor的修正因子(比值為2.5,即30mm/12mm)兩種方式實現。調整後,APILE模擬的 $t-z$ 曲線與試樁資料更為吻合,樁頂荷重-沉陷量曲線亦接近實測值(圖十)。

## 五、擋土樁監測

為確保深開挖工程的安全性,本案例在擋土排樁內設置傾斜管進行側向變形監測。

### 5.1 擋土排樁配置與監測計畫

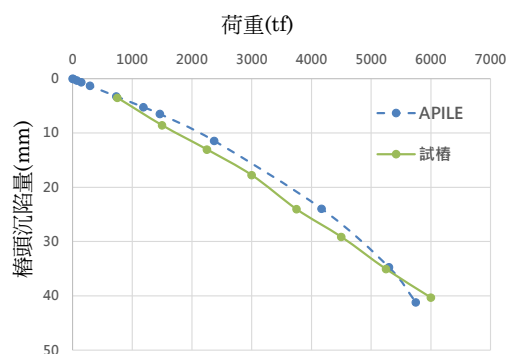
本案例因採「逆打工法」施作,需於開挖前先行施築擋土壁,故僅能選擇連續壁或全套管基樁工法。考量臺中地區卵礫石層常含有較大粒徑礫石,導致連續壁施工效率不佳,故決定選用施工效率較佳的全套管基樁作為擋土壁。基地擋土排樁配置詳見圖十一,南、北及西側共配置102支 $\phi 150\text{cm}$ 全套管基樁,東側鄰河南路側配置33支 $\phi 120\text{cm}$ 全套管基樁。

為確保深開挖安全性,擋土樁內設置傾斜管,並配合現場施工時程安裝套管於鋼筋組立時。擋土樁側向位移監測管理值訂定原則為:警戒值為設計預估變位值之80%,行動值為設計預估變位值加計儀器精度誤差( $\pm 6\text{mm}$ )。當量測值達行動值時,需檢討原因,評估是否暫停施工並採取補強措施。

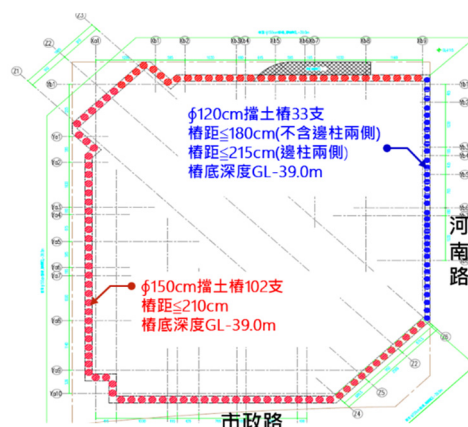
本案例原規劃10處觀測管,但部分因保護蓋毀損或異物阻塞而喪失觀測功能。因此,僅能正常觀測管進行持續監測。考量維度、角隅效應及資料量,本研究優先以15號及85號樁截至第四開挖階段的觀測數據進行探討。

### 5.2 實測資料整理與校正

本研究選取15號及85號樁截至第四開挖階段之觀測數據進行主要探討。觀測期間發現85號樁初期位移即異常偏大,並於2021年6月25日超過警戒值,隨後於2021年6月29日超過行動值。經分析推測係因擋土樁上方未回填所致,施工團隊隨即以CLSM回填間隙以抑制變形。為確保分析數據可靠性,85號樁的後續觀



圖十 APILE分析之樁頂荷重-沉陷量曲線  
Fig.10 Pile head load – settlement of APILE analysis



圖十一 擋土樁配置平面圖  
Fig.11 Plan view of retaining pile configuration

測數據以回填完成後(110年7月29日)的觀測值作為初始值進行校正。本研究主要以修正後的第三階段及第四階段側向位移量進行分析。

## 六、水平地盤反力係數( $K_h$ )探討

本研究利用Torsa3程式(財團法人地工技術研究發展基金會,2016)進行反算分析以探討卵礫石層的水平地盤反力係數( $K_h$ )。

### 6.1 反算分析 $K_h$ 與SPT-N值之關係

Torsa3採用平面應變彈塑性平衡理論,將擋土結構視為彈性梁,土壤及側向支撐假設為等值彈簧進行模擬,並以水平地盤反力係數 $K_h$ 代表土壤勁度。分析時,依以謝等人(1996)建議的非凝聚性土壤 $K_h=100\sim 150\text{N}$ 進行模擬,以每10N為差異比值進行比較。各項土壤參數均依地質調查結果使用。其餘分析參數如擋土壁體勁度、地下室樓版參數、地表垂直超載( $3\text{t}/\text{m}^2$ )及地下水位(取期間最高水位)均採用固定值。

初步分析結果顯示，以 $K_h=100\sim 150N$ 模擬的變位曲線未能完全符合監測值(85號樁分析結果偏小，15號樁偏大)，且觀測資料顯示上部變位較大。後續檢視發現B1F樓版存在高低版配置，無法完全對撐；同時，B2F及B4F樓版在構築完成前即進行下一階段開挖。因此，本研究對B1F、B2F及B4F樓版勁度進行折減。

修正樓版勁度後，模擬結果顯著改善，15號擋土樁以 $K_h=140N$ 模擬之上部變位曲線已相當吻合監測值。然而，85號樁整體分析變位值仍較實測值小。經過多次嘗試，15號擋土樁在深度9米以下之 $K_h$ 值設為 $250000t/m^3$ 時，其最大變位量達極限最小值1.19cm(與監測值吻合)，此時 $K_h$ 與SPT-N比值高達5000。而85號樁各深度之 $K_h$ 值設為 $65N(3250t/m^3)$ 即可得到近似值。本研究補充分析45號樁與115號樁的第四階段開挖數據，發現以 $K_h=41N$ 模擬45號樁，以及 $K_h=1200N$ 模擬115號樁，可得到與監測值相當的最大變位。

本研究以Torsa3程式進行反算分析。反算結果顯示，本案例中卵礫石層的水平地盤反力係數 $K_h$ 與SPT-N值的比值具有相當大的變異性(65N、140N、5000N、41N、1200N)，這代表輕微的變位量差異即對水平地盤反力係數產生顯著影響。考量基地面積，如此劇烈的 $K_h$ 變化可能歸因於儀器精度誤差( $\pm 6mm$ )。經排除變異性較大的15號樁，並對45號、85號及115號樁的監測值依精度增減6mm進行重新反算後，再透過主要交集範圍的比對，研判本案例的水平地盤反力係數應介於 $7000\sim 13000 t/m^3(140N\sim 260N, N=50)$ 之間(詳圖十二)。

### 6.2 $K_h$ 與剪力波速 $V_s$ 之關係

本研究進一步分析了 $K_h$ 與剪力波速 $V_s$ 的關係。根據基地附近中央氣象局黎明國小( $\sim 400m$ )之測站資料，剪力波速 $V_s$ 隨深度增加而增大。將反算求得的水平地盤反力係數( $7000\sim 13000t/m^3$ )與剪力波速 $V_s$ 繪製成關係圖，發現其比例關係介於 $13.7\sim 43.0$ (詳圖十三)。依此可建立經驗公式3

$$K_h = 13.7V_s \quad (\text{下限}) \tag{3}$$

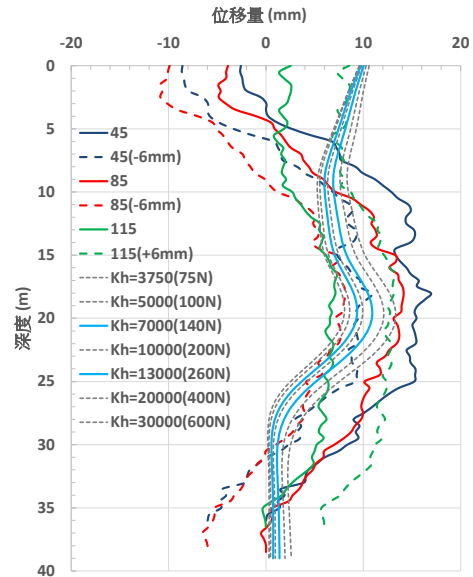
$$K_h = 43.0V_s \quad (\text{上限})$$

水平地盤反力係數 $K_h$ 單位為 $t/m^3$ ，剪力波速單位為 $m/sec$ 。

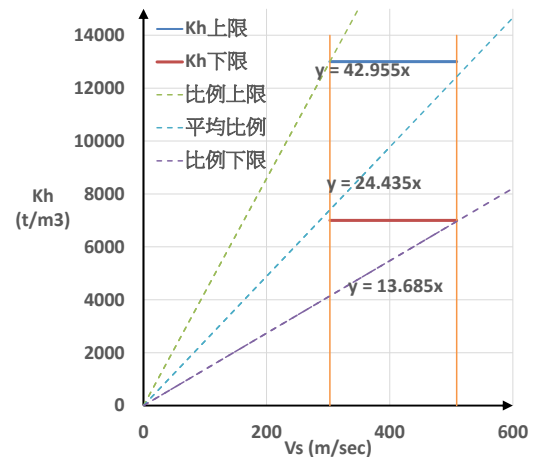
## 七、結論

本研究以臺中商業銀行總部大樓新建工程為實證案例，對其基樁載重試驗數據及擋土樁傾斜管監測資料進行了詳盡的分析與探討，並提出以下結論：

1. 基樁抗壓摩擦力與深度關係：基樁壓力試驗結果明確顯示，樁身抗壓摩擦力的大小與地層深度呈正比，即隨著深度的增加，摩擦



圖十二 水平地盤反力係數 $K_h (t/m^3)$ 交集範圍比對圖  
Fig.12 Comparison of measured and analyzed lateral deflection using different horizontal subgrade reaction coefficients  $K_h (t/m^3)$



圖十三  $K_h$ 與 $V_s$ 之關係圖  
Fig.13 Correlation of  $K_h$  and  $V_s$

力有顯著的增加趨勢。

2. 卵礫石層 $t$ - $z$ 曲線正規化與 $z_{peak}$ 值：本研究對基樁 $t$ - $z$ 曲線進行正規化處理(將摩擦力除以有效應力)後，歸納出樁周摩擦力/有效應力與樁身位移量間存在線性關係式(1)，配合 $z_{peak}$ 的選用可反推各地層之最大摩擦應力。在臺中卵礫石層中， $z_{peak}$ (達到最大摩擦力的樁身位移)建議可取樁徑之2.5%為代表

3. 基樁摩擦阻力之設計考量：本案例基樁載重試驗及由式(1)回推計算所得之摩擦阻力(33.52~140.07tf/m<sup>2</sup>)，均顯著大於現行「建築物基礎構造設計規範」中表5.3-2的最大表面摩擦阻力(15tf/m<sup>2</sup>)。這表示若設計時僅依貫入試驗公式推估摩擦力，將導致設計過於保守，未能充分發揮卵礫石層的承載潛力。

4. 卵礫石層水平地盤反力係數 $K_h$ 變異性：本研究反推求得的水平地盤反力係數 $K_h$ 介於7000~13000t/m<sup>3</sup>(相當於140N~260N)，此大區間的變化顯示卵礫石層的 $K_h$ 值並非固定，推測可能與該地層的卵礫石顆粒排列緊密度不一有關。

5.  $K_h$ 與 $V_s$ 關係：根據本案例研究結果，臺中地區卵礫石層的水平地盤反力係數 $K_h$ (t/m<sup>3</sup>)與剪力波速 $V_s$ (m/s)之關係如式(3)。

## 致謝

感謝達欣工程的陳永義副理及簡赫成工程師提供了寶貴的工程案例及相關資料；也感謝義力營造的陳新春副總經理給予研究之支持、鄭立宜經理與陳耀榮技師的建議。

## 參考文獻

- 吳坤忠 (1994)，「 $t$ - $z$ 曲線法」，*地工技術*，第45期，第108-110頁。
- 徐明志 (2019)，「基樁軸向載重試驗規劃及實踐」，富國技術工程股份有限公司。
- 財團法人地工技術研究發展基金會 (2016)，「TORSA3程式理論背景」。
- 黃俊鴻、楊志文 (2000)，「基樁載重試驗承載力判釋方法之探討與建議」，*地工技術*，第80期，第5-16頁。
- 經濟部標準檢驗局 (1988)，「基樁軸向靜壓載重試驗法」，中華民國國家標準 CNS 12460 A3302。

謝旭昇、程日晟、蔡宗鎧、楊明洲 (1996)，「連續壁設計分析之實務考慮」，*地工技術*，第53期，第35-44頁。

ASTM (2020). "Standard Test Methods For Deep Foundation Elements Under Static Axial Compressive Load." D1143/D1143M-20.

Coyle, H. M., and Reese, L. C. (1966). "Load transfer for Axially Loaded Piles in Clay." *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 92(2), 1-26.

Wang S. T., Arrellaga J. A. and Vasquez L. (2020). "APILE v2019-Technical Manual", ENSOFT, INC.