

# 單樁垂直承載力之敏感度分析與載重-沉陷曲線之模擬

林筱萍、蔡佩勳、張子修  
 朝陽科技大學營建工程系  
 E-mail: [phtsai@cyut.edu.tw](mailto:phtsai@cyut.edu.tw)

## 摘要

本研究使用有限差分 FLAC 程式進行單樁垂直承載力之敏感度分析，並利用實數型基因演算法、現地試樁資料及 FLAC 有限差分程式進行反算分析，以求現地土層最佳材料參數值，再以此參數值推估其載重-沉陷預測曲線。

由本研究分析結果顯示，在參數敏感度分析方面，土壤凝聚力、摩擦角等參數值之改變對樁頂變位有較大之影響；礫石層的摩擦角建議取  $\phi \geq 35^\circ$  較符合其力學性質，然而土壤及礫石層剪力模數參數值之改變對其樁頂變位量之影響不大。使用基因演算法推估現地土層參數值，可得到與現地監測值相接近的曲線，並能有效反應現地土層之力學性質。

關鍵詞：FLAC、敏感度分析、基因演算法

地質分類	地層厚度
粉土質黏土：黃褐色細砂色，極細砂中質型 實際厚度中質型：(CL)	0~4.7m 地層厚度 0.7m
粉土質砂：灰色，黏粒含量：偶含黏土或粉土質層：(SM)	4.7~14m
粉土質黏土：灰色，中質型，黏粒及細砂含量：偶含細砂層及偶含煤片：(CL)	14~32m
粉土質中細砂：灰色，中質型，黏粒及細砂含量：偶含細砂層及偶含煤片：(SM)	32~34.6m
粉土質黏土：粉紅色，極細砂中質型，中質型，含黏土質粉土層：(CL)	34.6~40.4m
礫石層：礫石粒徑約5~15mm 填充物為灰色粉土，砂：(SP-SM)	40.4~45.2m
礫石層：礫石粒徑約15~45mm 填充物為灰色粉土，砂：(SP-SM)	>45.2m

圖 1 分析土層資料

## 1. 前言

國內樁基礎應用已經十分普遍，無論是超高大樓、高架橋、精密廠房等，需要高承載力之結構物，工程師們常採用各種基樁來做為結構物的基礎。

本研究為建立單樁在多層土壤的垂直承載力，因此進行了土層影響參數之敏感度分析，現地土壤力學參數值之基因演算分析，極限載重-沉陷預測曲線之推估等，以台北市某一工地試樁監測結果，利用有限差分 FLAC 程式與基因演算模擬分析比較，作為施工之參考。

## 2. 現地土層材料參數

本研究工址位於台北市忠孝東路復興南路西南隅，試驗場址附近地質屬沉泥質砂與黏土互層，依鑽探所得資料將基地地層概況簡化如表 1 所示，其地下水位於地表下 3.8m 處。

表 1 基地地層概況簡表

深度(M)	土壤性質	SPT-N值
0~0.7	回填土及磚塊、含柏油、混凝土	7
0.7~4.7	粉土質黏土(CL)	2~4
4.7~14	粉土質砂(SM)	7~12
14~32	粉土質黏土(CL)	3~22
32~34.6	粉土質中、細砂(SM)	19~31
34.6~40.4	粉土質黏土(CL)	18~25
40.4~41.3	粉土質砂(SM)	66~104
41.3~47.65	礫石層	>100

## 2.1 參數之選取

本研究將土壤分為六層做分析。第一層土壤在地表下 4.7m 為粉土質黏土(因回填土層太薄，所以與粉土質黏土層合併為一層做分析)，SPT-N 值為 4；第二層土壤在地表下 14m 為粉土質砂，SPT-N 值為 9；第三層土壤在地表下 32m 為粉土質黏土，SPT-N 值為 19；第四層土壤在地表下 34.6m 為粉土質中、細砂，SPT-N 值為 31；第五層土壤在地表下 40.4m 為粉土質黏土，SPT-N 值為 18；第六層土壤在地表下 47.65m 為礫石層(因粉土質砂層太薄，故將其與礫石層合併為同一土層做分析)，SPT-N 值 >100，如表 2 所示，鑽孔資料如圖 1。

表 2 分析使用之土層

層次	深度(M)	土壤性質	SPT-N值
第一層	0~4.7	粉土質黏土(CL)	4
第二層	4.7~14	粉土質砂(SM)	9
第三層	14~32	粉土質黏土(CL)	19
第四層	32~34.6	粉土質中、細砂(SM)	31
第五層	34.6~40.4	粉土質黏土(CL)	18
第六層	>45.2	礫石層	>100

## 2.2 基樁之力學參數

本研究僅對混凝土樁作探討，表 3 為本分析模式中基樁之基本參數。其中混凝土樁的楊氏模數，根據建築技術規則一百零八條至一百一十一條中規定，混凝土抗

壓強度在  $175 \sim 350 \text{ kg/cm}^2$  之間，其楊氏模數  $E_p$  可概估為  $E_p = 15000\sqrt{f'_c}$  故  $E_p$  的範圍在  $2 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  之間。依據黃兆龍，一般混凝土之柏松比  $\nu$  介於  $0.15 \sim 0.33$  之間。

表 3 基樁分析參數

樁徑 D(m)	2.2
樁長 L(m)	45.2
楊氏模數 $E_p$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$2 \times 10^5$
柏松比 $\nu$	0.2

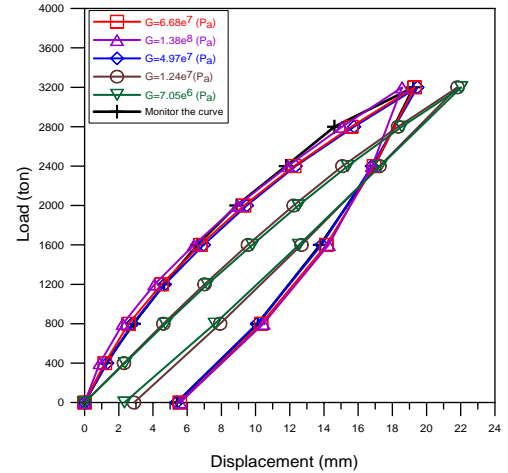


圖 2 改變土壤剪力模數之載重-位移圖

### 3 參數敏感度分析

基樁與土壤互制關係對於設計參數改變的敏感度可做為分析時使用參數的參考，尤其在大地工程中因使用之參數是經由假設的模式或模擬現狀的試驗方式取得，以不同模式所獲得的參數可能會有相當程度的差異，因此參數敏感度分析對於尚未大量使用的分析方法或工具確實有其必要性。

為了解 Flac 程式各項輸入參數改變對輸出結果的影響，分別將土壤與礫石層個別進行參數敏感度分析。

#### 3.1 土壤的敏感度分析

本研究模擬之土壤為使用台北盆地土壤，分析採用的基準參數如表 4 所示之簡化土層參數，應用吳偉特與各國外學者提出之經驗參數，分別對土壤剪力模數、凝聚力及摩擦角做敏感度分析，分析結果如下：

表 4 土壤簡化土層參數值

土壤基準參數	土壤參數改變值
$G = 4.97 \times 10^7 (P_a)$	$G = 1.24 \times 10^7 (P_a)$ 、
	$G = 7.05 \times 10^6 (P_a)$ 、
	$G = 1.38 \times 10^8 (P_a)$ 、
	$G = 6.68 \times 10^7 (P_a)$
$\gamma = 1.7 (t/m^3)$ $c = 16340.3 (P_a)$ $\phi = 12.7^\circ$	$c = 0 (kP_a)$ 、
	$c = 65.36 (kP_a)$ 、
	$c = 32.68 (kP_a)$ 、
	$c = 15.17 (kP_a)$
註：G 表剪力模數、 $\gamma$ 表單位重、 C 表凝聚力、 $\phi$ 表摩擦角	$\phi = 0^\circ$ 、 $\phi = 19^\circ$ 、
	$\phi = 30^\circ$ 、 $\phi = 40^\circ$

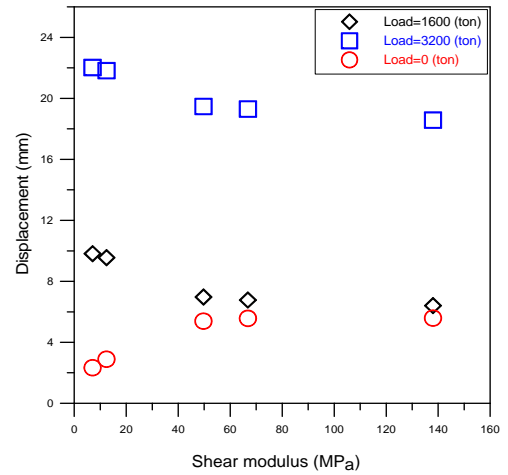


圖 3 不同載重下土壤剪力模數-位移圖

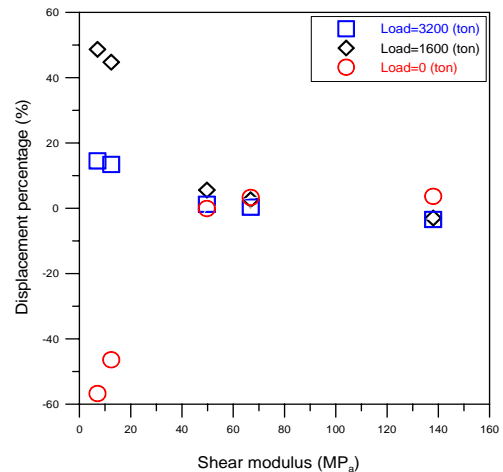


圖 4 土壤剪力模數之敏感度

#### 1. 改變土壤剪力模數 G：

在原基準參數條件下，調整剪力模數 G，以不超過礫石層 G 值為原則做分析，凝聚力及摩擦角等參數值固定不變，其分析結果如圖 2~4 所示，圖 4 當載重為 1600(ton)時，其變位變化幅度為  $-2.99\% \sim 48.66\%$ ；加載

至 3200(ton)時，其變位變化幅度為-3.42%~14.53%；解載為 0(ton)時，其變位變化幅度為 3.65%~56.74%，可知當載重為 3200(ton)時剪力模數的變化對其位移影響不大，隨剪力模數增大位移將減小，但剪力模數取值太小  $G = 9.94 \times 10^7 (P_u)$ 、 $G = 7.65 \times 10^8 (P_u)$ 時，將有較大位移量變化。

本文將敏感度分析圖上的 0% 定義為現地監測值的基準值百分比，此值為：

$$\text{基準值百分比} = \frac{(\text{現地監測值} - \text{模擬數值})}{\text{現地監測值}} \times 100\% \quad (\text{式}1)$$

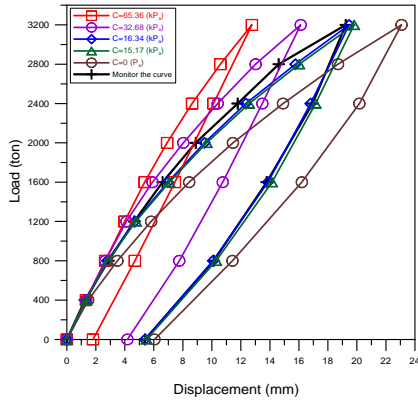


圖 5 改變土壤凝聚力之載重-位移曲線

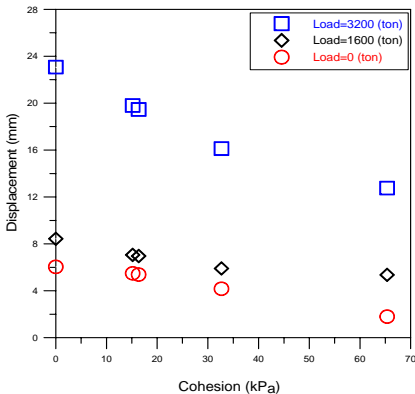


圖 6 不同載重下土壤凝聚力-位移圖

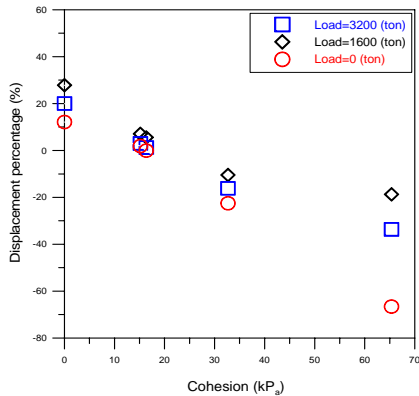


圖 7 土壤凝聚力之敏感度

2. 改變土壤凝聚力 C：

在原基準參數條件下，調整土壤凝聚力 C 進行分

析，其他參數值則固定不變如剪力模數、摩擦角等，其分析結果如圖 5~7 所示，圖 7 當載重為 1600(ton)時，其變位變化幅度為-18.72%~27.82%；加載至 3200(ton)時，其變位變化幅度-33.65%~20%；解載為 0(ton)時，其變位變化幅度為-66.6%~12.12%，圖 6 可看出隨著土壤凝聚力的增加，樁頭所承受之位移將會變小。

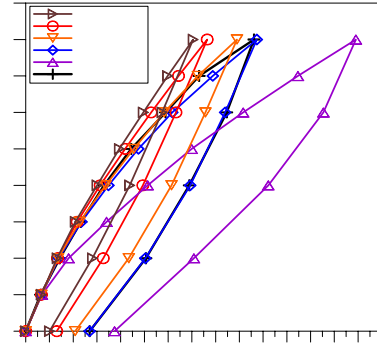


圖 8 改變土壤摩擦角之載重-位移圖

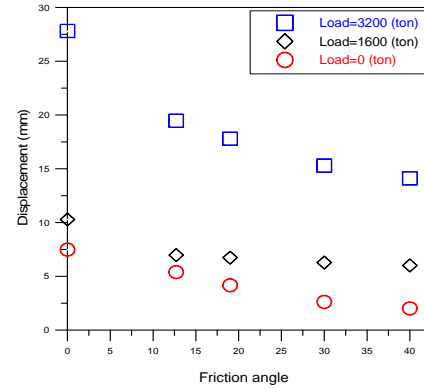


圖 9 不同載重下土壤摩擦角-位移圖

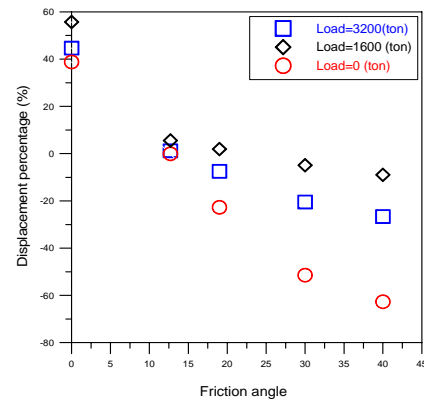


圖 10 土壤摩擦角之敏感度

3. 改變土壤摩擦角  $\phi$ ：

在原基準參數條件下，調整土壤摩擦角  $\phi$  進行分析，其他參數值則固定不變如剪力模數、凝聚力，其分析結果如圖 8~10 所示，圖 10 當載重為 1600(ton)時，其變位變化幅度為-8.97%~55.72%；加載至 3200(ton)時，其變位變化幅度-26.63%~44.67%；解載為 0(ton)時，其變位變化幅度為-62.7%~38.81%。由圖 9 知摩擦

角愈大樁頂位移量愈小。

### 3.2 礫石層之敏感度分析

礫石層敏感度分析依舊是使用台北盆地土壤，分析採用的基準參數如表 5 簡化礫石層參數，仍是應用吳偉特與各國外學者提出之經驗參數，分別對樁底礫石層剪力模數、凝聚力及摩擦角做敏感度分析，分析結果如下：

角等參數值則固定不變，其分析結果如圖 11~13 所示，圖 11 可看出剪力模數在載重為 1600(ton)時對其礫石層位移之變化幅度影響不太，其變位變化幅度為 -1.41%~18.60%，但當其剪力模數參數取值太小與土壤剪力模數參數相接近時，將有較大位移百分比的變化。

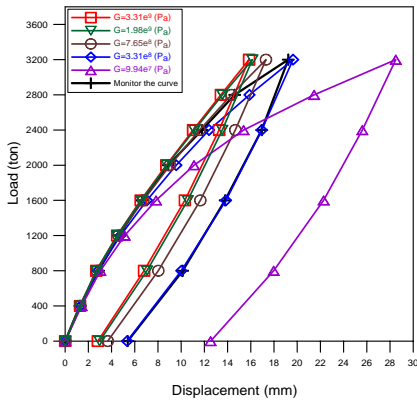


圖 11 改變礫石層剪力模數之載重-位移圖

礫石層基準參數	礫石層參數改變值
$G = 3.31 \times 10^8 (Pa)$	$G = 9.94 \times 10^7 (Pa)$ 、
	$G = 7.65 \times 10^8 (Pa)$ 、
	$G = 1.98 \times 10^9 (Pa)$ 、
	$G = 3.31 \times 10^9 (Pa)$
$\gamma = 2.0 (t/m^3)$ $c = 59443 (Pa)$ $\phi = 40^\circ$	$c = 14.86 (kPa)$ 、
	$c = 29.72 (kPa)$ 、
	$c = 89.16 (kPa)$ 、
	$c = 118.88 (kPa)$
$\phi = 35^\circ$ 、 $\phi = 45^\circ$	
註：G 表剪力模數、 $\gamma$ 表單位重、 C 表凝聚力、 $\phi$ 表摩擦角	

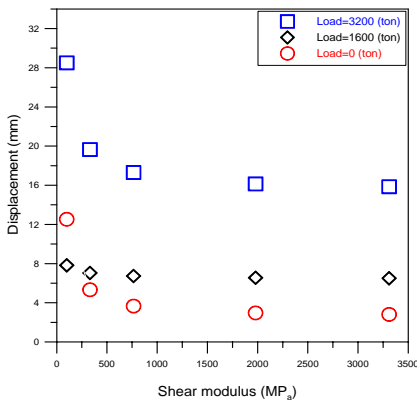


圖 12 不同載重下礫石層剪力模數-位移圖

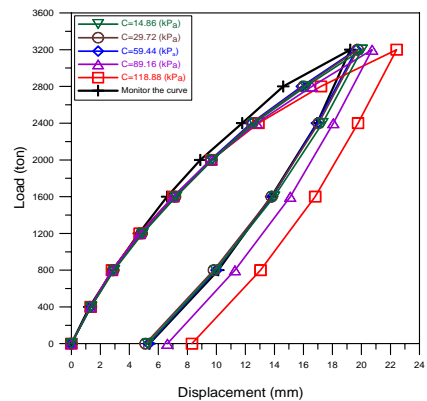


圖 14 改變礫石層凝聚力之載重-位移圖

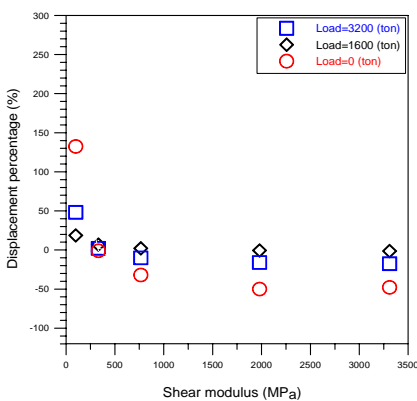


圖 13 礫石層剪力模數之敏感度

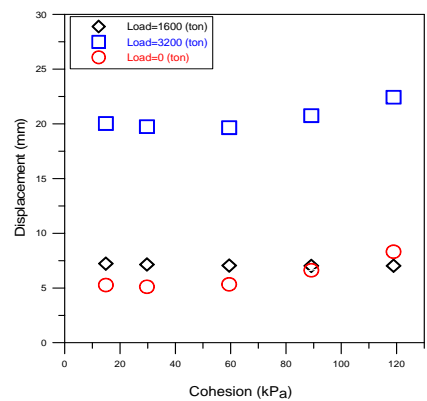


圖 15 不同載重下礫石層凝聚力-位移圖

#### 1. 改變礫石層剪力模數 G

在原基準參數條件下，調整礫石層剪力模數 G，以不小於土壤 G 值為原則做分析，礫石層凝聚力及摩擦

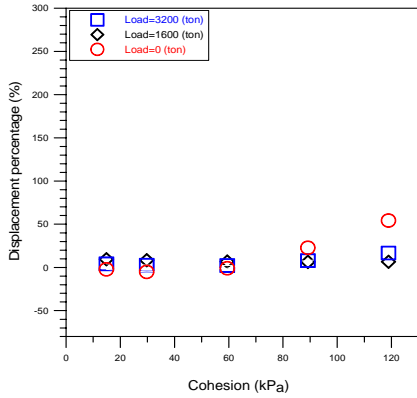


圖 16 礫石層凝聚力之敏感度

## 2. 改變礫石層凝聚力 C

由於台北盆地礫石層深度位於地表下 40 公尺處，此深度之土層大多未做剪力強度之參數分析，故多將礫石層之凝聚力假設為 0，但本研究仍舊對其凝聚力做敏感度分析，以觀看其分析結果。在原基準參數條件下，調整礫石層凝聚力 C 進行分析，其他參數值則固定不變如剪力模數、摩擦角，分析結果如圖 14~16 所示，由圖 16 得知當載重為 1600(ton)時及 3200(ton)時，其變位變化幅度分別為 6.53%~9.46%及 16.63%~4.14%，得知礫石層位移之變化幅度影響不大。

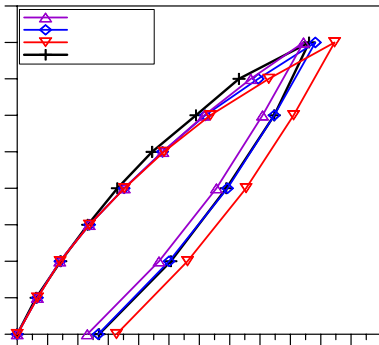


圖 17 改變礫石層摩擦角之載重-位移圖

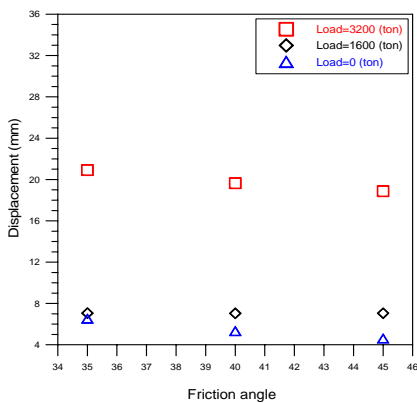


圖 18 不同載重下礫石層摩擦角-位移圖

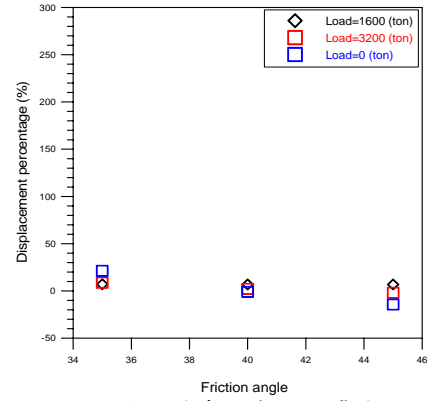


圖 19 礫石層摩擦角之敏感度

## 3. 改變礫石層摩擦角 $\phi$

在原基準參數條件下，調整礫石層摩擦角  $\phi$  進行分析，其他參數值則固定不變如剪力模數、凝聚力，其分析結果如及圖 17~19 所示。由圖 19 可看出此礫石層摩擦角  $\phi \geq 35^\circ$  以上較為合適，且依據張吉佐等人於台灣地區中北部卵礫石層工程性質及施工探討中知道礫石層之摩擦角  $\phi$  值範圍多為  $30^\circ$  以上，所以本研究  $\phi$  值範圍合理。

## 4 基因演算法

基因演算法乃是根據「物競天擇」原理及基因演變的理論來尋求最佳解的演算法。基因演算法最主要的理論依據乃是自然界生物的演化，也就是達爾文進化論中的「最適者生存」原理。基因演算法的主要三個運算方式為複製、交配、突變。計算流程如圖 20 所示：

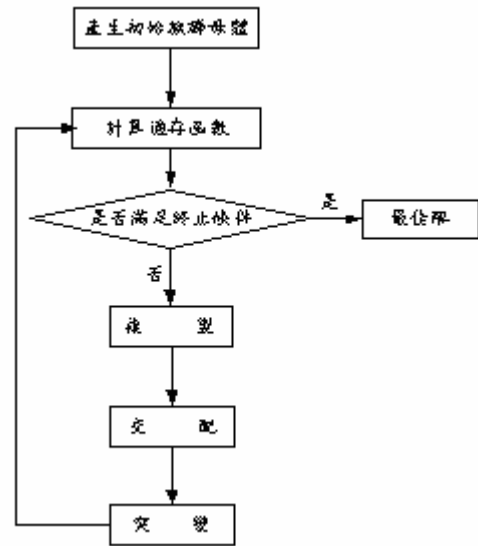


圖 20 演算模式流程圖

### 4.1 現地土層參數範圍

本研究欲推估符合現地土層材料參數之值，需建立與其相關因子之資料範圍，其中必需輸入之土層參數包括黏土層、砂土層及礫石層之剪力模數、土層單位重、凝聚力及摩擦角。所以參考使用吳偉特所提出之台北盆



地土層土壤工程性質表中之單位重、凝聚力及摩擦角之範圍，但由於吳偉特僅針對大台北地區之土壤材料參數做分析，而本研究之工址雖位於台北盆地內，可現場工址之土層材料參數仍不確定，所以需以基因演算法求工地之最佳參數值，表 6 為所設定之各參數範圍。

將現地監測資料以基因演算法方式，推估現地土層最佳參數值。分析時所預設之族群數目為 30 個、複製方式使用輪盤法方式、交配過程為將兩交配點間的染色體進行對換之情況下作探討及分析。

表 6 土層參數範圍

土壤性質 材料參數	黏土層	砂土層	礫石層
剪力模數 $G (kg/cm^2)$	230-1300	390-2600	1500-3600
單位重 $\gamma (t/m^3)$	1.7-2.3	1.7-2.3	1.7-2.3
凝聚力 $C (kg/cm^2)$	0-0.5	0-0.8	0
摩擦角 $\phi$	17-36.5	23-36	36-45

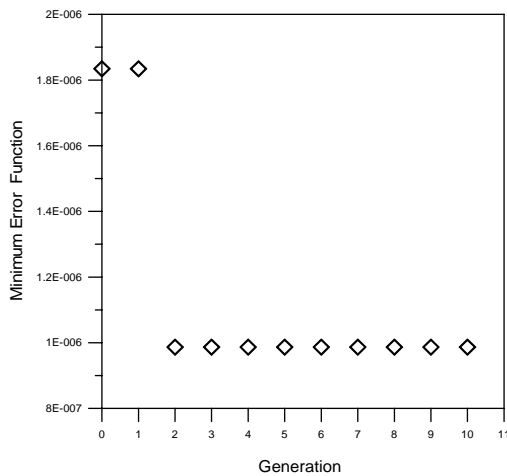


圖 21 最小誤差值

#### 4.2 基因演算法求現地土層最佳參數值

取台北某工地試樁資料，運用基因演算法並配合 FLAC 有限差程式，推估現地六層土壤之最佳參數值。所考慮現地土層參數範圍，如表 6 所示。表 7 為各世代之最大適存值與最小誤差值，由表中可得知模擬至第 10 代，其最大適存值已不再變動，而此時的誤差值為  $9.866 \times 10^{-7}$ ，且無出現更佳參數值，所以將第 10 代之參數值視為最佳解(誤差最小)而終止演算，圖 21 為每一世代所記錄之最小誤差值。

$$\text{最小誤差值} = 0.001 \cdot \text{最大適存值} \quad (\text{式 } 2)$$

表 8 為基因演算法模擬所得各土層之最佳參數值。

表 7 各世代之最大適存值與最小誤差值

世代數	最大適存值	最小誤差值
0	$9.981659 \times 10^{-4}$	$1.8341 \times 10^{-6}$
1	$9.981659 \times 10^{-4}$	$1.8341 \times 10^{-6}$
2	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
3	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
4	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
5	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
6	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
7	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
8	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
9	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$
10	$9.990134 \times 10^{-4}$	$9.8660 \times 10^{-7}$

表 8 基因演算模擬之最佳參數值

材料參數 土層數	剪力模數 $G (Pa)$	單位重 $\gamma (t/m^3)$	凝聚力 $C (Pa)$	摩擦角 $\phi$
第一層 粉土質黏土	$6.087 \times 10^7$	2.108	173.8	20
第二層 粉土質砂	$1.291 \times 10^8$	2.245	1288.34	30.5
第三層 粉土質黏土	$1.212 \times 10^8$	1.705	201.56	27.7
第四層 粉土質砂	$2.376 \times 10^8$	2.283	72.11	27.72
第五層 粉土質黏土	$1.222 \times 10^8$	1.817	2912.84	26.1
第六層 礫石層	$3.408 \times 10^8$	2.246	0	43.13

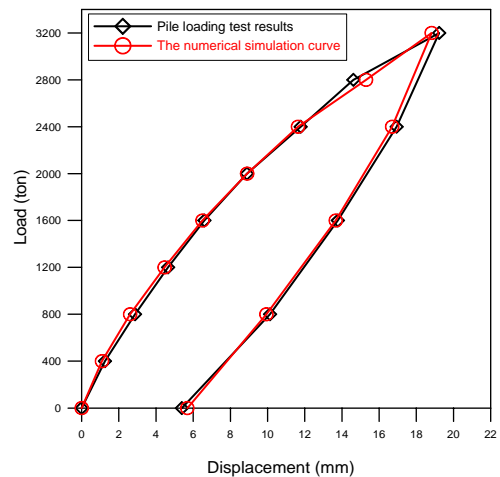


圖 22 現地與模擬監測之載重-位移曲線

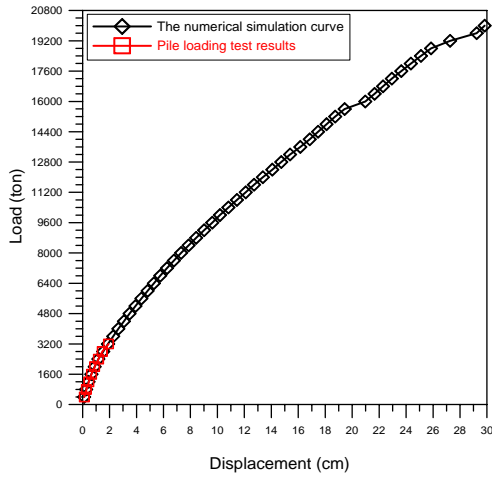


圖 23 模擬試樁極限載重-沉陷預測曲線與現地監測曲線

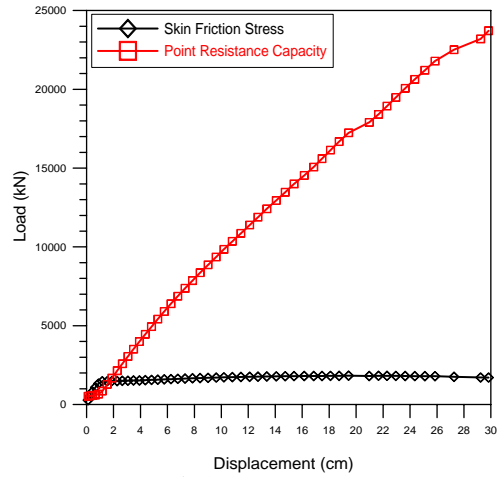


圖 25 樁身摩擦阻力與樁底抵抗力對應載重-位移之變化圖

### 4.3 預測現地試樁載重-沉陷曲線

將基因演算模擬所得之監測數值與現地監測值相比較，預測基樁載重-沉陷曲線，如圖 22 所示，由圖中可看出模擬數值與現地監測數值幾乎在同一曲線上，說明使用基因演算方法與 FLAC 模擬所得之值可得到與現地土層相接近之曲線值，且認為模擬所得之材料參數，尚能反應現地土層之力學性質。

又因大多數現地樁載重試驗都只進行到工作載重階段，少有將基樁加載至極限破壞階段，所以本研究將基因演算法所得之現地土層參數值，使用 FLAC 有限差分程式模擬基樁極限載重-沉陷預測曲線，如圖 23 所示，與現地監測曲線值相比較得知監測曲線仍在工作載重階段，因此本文採用持續加載方式(400、800、1200...)預測基樁極限載重破壞，研究中使用之基樁直徑為 220 公分，參照 Terzaghi 所定義之基樁樁頂沉陷量達樁徑 10%時，所對應的荷載為極限承载力之依據，由圖中可知當樁頂位移量達 22.3 公分時，基樁已達極限載重狀態。

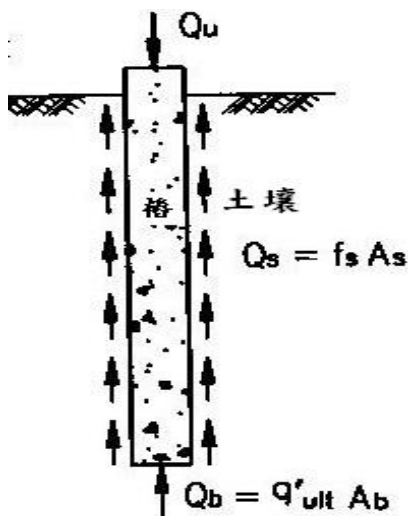


圖 24 基樁受垂直載重作用之受力機制圖

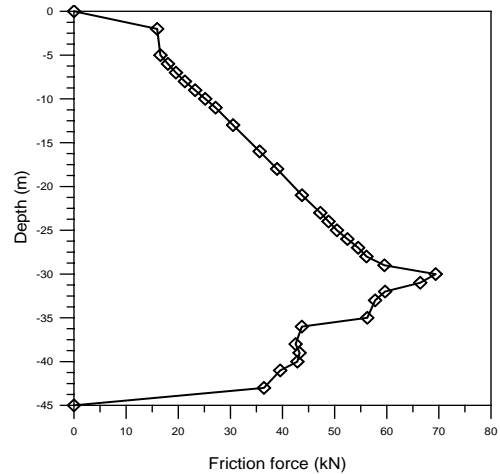


圖 26 樁身摩擦力沿深度變化之分佈圖

### 4.4 樁身摩擦阻力與樁底抵抗力

基樁之垂直承载力可視為由樁底土壤提供的點承力(Point bearing capacity)與樁周圍土層所提供的摩擦力(Skin friction resistance)兩者所貢獻，其力學表現可由圖 24 所示。本研究對預測所得之極限載重分析結果，僅探討其樁身表皮摩擦阻力與樁底抵抗力兩者對基樁承载力之分佈影響。

圖 25 為樁身摩擦阻力與樁底抵抗力對應各階段載重之變化圖、圖 26 為樁身摩擦力沿深度變化的分佈圖。由圖 25 可知所對應之載重變化關係與變化趨勢，即基樁在載重初期，主要由樁身表皮摩擦阻力來提供抵抗，此時樁底抵抗力亦有相當之發揮；而隨著樁頂荷重逐漸的增加，基樁與土壤開始產生相對滑動，樁身表皮摩擦力達到極限狀態，此時承载力的提高則主要依賴樁底之抵抗力。

## 5 結論

本研究使用有限差分 FLAC 程式，對土層參數進行敏感度分析，探討土壤與礫石層材料參數對基樁受載行為之影響，且配合基因演算程式推估現地土層材料參數最佳值，並預測現地土層極限載重-沉陷曲線，經由

上述分析結果，歸納以下之結論：

1. 運用 FLAC 進行土壤敏感度分析過程中，剪力模數  $G$  參數值的改變對基樁受載重後樁頂位移量之影響不大，而凝聚力  $C$  及摩擦角  $\phi$  的改變則有較大位移量產生，因此本研究建議對於此二參數的估算宜慎重，以避免對基樁受載行為有重大影響。
2. 樁底礫石層的敏感度分析過程中，礫石層的剪力模數  $G$  參數值對其樁頂位移量之影響不大。至於礫石層摩擦角建議取  $\phi \geq 35^\circ$  較為適合，因參數值太小容易有位移量過大之情形發生。
3. 研究中證實使用基因演算法可得到與現地監測結果相近之曲線，並在經過 10 代基因演算模擬後得到現地土層最佳參數值。
4. 本文使用持續加載方式模擬基樁極限破壞之載重，參照 Terzaghi 所定義之基樁樁頂沉陷量達樁徑 10% 時，所對應的荷載為極限承载力之依據，由分析結果可知當樁頂位移量為 22.3 公分時，此時基樁已達極限載重狀態。

## 6 致謝

本文所採用的現場試樁資料係根據富國技術工程股份有限公司總經理何樹根先生提供之試樁資料，始得完成，特此申謝。

## 7 參考文獻

- [1] 富國工程股份有限公司，「台北市政府捷運工程局 CN255B 標聯開大樓反循環基樁載重試驗成果報告書」，1998。
- [2] 吳偉特，「台北盆地地盤分區土壤之工程特性」，地工技術，第 22 期，第 5-27 頁，1976。
- [3] 黃兆龍，簡編混凝土性質與行為，詹氏書局，臺北，第 424-425 頁，1996。
- [4] 廖南華，「土壤經驗參數於數值分析之應用」，碩士論文，國立成功大學土木工程所，臺南，2002。
- [5] 張吉佐、陳逸駿、嚴世傑、蔡宜璋，「台灣地區中北部卵礫石層工程性質及施工探討」，地工技術，第 55 期，第 135-46 頁，1996。
- [6] 施國欽，大地工程學-基礎工程篇，文笙書局，臺北，第 5-34~5-39，2001。
- [7] Budhu, M., *Soil Mechanics and Foundations*, Wiley, pp.84-89, 2000.
- [8] Das, B. M., *Principle of Geotechnical Engineering*, PWS Publishing Company, 1998.
- [9] Coduto, D. P., *Foundation Design: Principles and Practices*, Prentice-Hall, pp.502,602, 1994.
- [10] Terzaghi, K., "Discussion of the Progress Report of the Committee on the Bearing Value of the Pile Foundation," Proc., ASCE, Vol.68, pp.331-323, 1942.