

靜動載重試驗的動態行為之探討

梁正育¹ 蔡佩勳² 馮正一³

¹朝陽科技大學營建工程系碩士班研究生

²朝陽科技大學營建工程系助理教授

³中興大學水土保持學系副教授

摘 要

本文主要是以有限差分軟體 FLAC 程式來進行樁基礎在靜動載重試驗時受力與變形之數值模擬，探討樁體之動態力學行為。同時也將以台灣地區某兩個工址的試驗結果進行數值分析，以驗證本數值分析模式的合理性。數值分析時，首先利用地層剖面資料建立樁與土層之 FLAC 分析網格，為了模擬基礎與土壤之互制行為，在樁與土壤間也使用介面元素。土層的材料模式則選用 Mohr-Coulomb 及 Finn 模式，而樁體則以彈性材料來模擬，再依分析案例之土層資料及標準貫入試驗 SPT-N 值，決定其材料參數。然後加入靜動載重試驗之載重歷程時，計算在不同時間的樁頂垂直位移量、樁體速度、樁體加速度、樁體與土壤間的摩擦阻力、樁底承载力與所激發的超額孔隙水壓阻力等反應值，再依據動態平衡方程式，計算阻尼力的大小，以探討阻尼力之決定方式。由於分析結果與試驗結果相差不大，所以本研究所採用的分析模式應可模擬靜動載重試驗。同時，由數值分析結果發現，阻尼力約只有靜動荷重的 5%，影響不大可忽略不計，而且超額孔隙水壓阻力的影響也不大。阻尼係數在試驗過程中，隨時間而異其值並非常數。

關鍵詞：靜動載重試驗、阻尼力、數值模擬。

STUDY ON THE DYNAMIC BEHAVIOR IN STATNOMIC LOADING TEST ABSTRACT

This study used the finite difference code, FLAC, to simulate the load- deformation characteristics of piles in Statnomic loading test. The dynamic behavior of pile with Statnomic loading will be discussed, too. In order to verify the accuracy of analysis process, two in-situ tests will be modeled and compared. First, we employ site investigate data to establish the mesh of FLAC and confirm the material properties of soil in numerical analysis. Interaction elements between pile and soil were used in order to analyze bearing capacity of pile. The soil is assumed to satisfy elastic-plastic constitutive equation, the Mohr-Coulomb model and the Finn model. Pile will be assumed as elastic material in this study. And then the tip of pile is modeled to load with Statnomic loading. The displacement of pile tip, velocity of pile, acceleration of pile, friction force on pile shafts, resistance force of pile tip, and excess pore water pressure in any period will be analyzed. Damping force is calculated by equilibrium equation, and its determining method will be discussed. From the results, it showed that the numerical results are closed to those of in-situ test. The damping force is about 5% of the Statnomic loading, and it may be neglected in numerical analysis. At the same time, the influence of pore water resistance force can be insignificance. Damping coefficient is a function of time in this study. It seems to not be a constant value.

Key Words: Statnomic loading tests, damping force, numerical simulation.

一、前言

基樁工程為建築結構中重要的一環，近年來由於重大公共工程及超高層建築蓬勃發展，基樁被廣泛使用於軟弱土層，以克服基礎承载力不足之問題，並減少結構物的沈陷量。然而，由於基樁之承載理論尚未完善，加上同一地區土層具有差異性，基樁之承载力除了仰賴設計者之經驗判斷外，尚須以現地載重試驗來確認基樁承载力是否達到當初設計者的要求。礙於每個工程經費有限，往往一個工地僅能進行少量的樁載重試驗，對整個基樁工程之安全性實在難以掌控。靜動載重試驗是國外發展的一種高應變檢測樁承载力的方法，主要是使用在樁頂的衝擊荷重之延時較長，這樣可使樁有較大的貫入量又不破壞樁頂，更重要的是，在這種衝擊力作用下，樁身的應力和位移與應力波傳行為無關，而接近於靜態行為，由於靜動載重試驗所得的結果可靠且又有快速、經濟的優點。所以，在國內外較為工程界所接受與應用。

如何透過扣除靜動載重試驗中動態效應影響，獲得一個工程師們所需要之靜態樁-土壤間之承载力合理估算方法，是靜動載重試驗發展至今所面臨之挑戰。過去靜動載重試驗在計算樁的極限承载力，常利用動態平衡方程式，即利用靜動荷重減去阻尼力與慣性力求出樁的極限承载力。土壤材料藉由阻尼模擬能量消耗之效果，然而至今尚未有合理的評估方法來描述阻尼的機制，阻尼一般可分為幾何阻尼(geometry damping)與材料阻尼(material damping)兩大類。而阻尼力中阻尼係數的決定是一個分析的重點，過去常以位移達到最大時，速度為零，而不計阻尼力，直接由靜動荷重扣去慣性力求出樁的極限承载力。

從靜動試驗曲線推估靜載重試驗曲線方面，常利用修正初始勁度法(modified initial stiffness method)與卸載點法(unloading point method)，它們都是利用某一時段所得的阻尼係數，將其視為定值，套用至試驗整個加載過程以計算阻尼力。再依動態平衡方程式估算樁的靜載重試驗曲線，這些方法僅是阻尼係數的決定方法不同而已，但都是假設阻尼係數是一個定值。但是阻尼係數是否為定值？或是阻尼力是否直接可用速度與阻尼係數的乘積來計算？是值得探討的。本文將利用 FLAC 數值分析軟體計算靜動載重試驗時，各

時段阻尼力及樁體速度的大小，探討一個合理從靜動載重試驗曲線預估靜載重試驗曲線的方法。

二、靜動載重試驗之數值模擬

本研究是使用有限差分軟體FLAC 5.0 程式，對台北和高雄各一個工程案例之全尺寸靜動載重試驗進行數值模擬，並由分析結果與現地試驗結果進行比較，以驗證分析模式及材料參數之合理性。分析時首先製作樁與土壤之元素網格，再加入靜動載重試驗之載重延時於樁頂，計算基樁的變位歷時、速度歷時、加速度歷時，以及不同時間下樁所承受的摩擦阻抗，樁底土壤的抗力與所激發的超額孔隙水壓阻力。

本研究分析之土壤模式係選用 Mohr-Coulomb 模式和 Finn 模式，因為 Mohr-Coulomb 模式可以模擬土壤材料在彈塑性範圍內的應力-應變關係，Finn 模式乃由土壤骨架受反覆剪應力作用之基本反應來建構，較能準確地模擬孔隙水壓力的變化。而 FLAC 分析所需之地層參數，係依現地標準貫入試驗 SPT-N 值來求得，本研究數值分析參數決定方法如下：

土壤主要輸入之參數有剪力模數 G 、統體模數 B 、摩擦角 ϕ 、凝聚力 C 、土壤單位重 γ 等，文中假設砂土層的凝聚力 C 為零。依分析案例之土層特性及標準貫入試驗 SPT-N 值，依據 Kulhawy 等人建議的經驗公式[4]計算土層的材料參數。本研究之靜動載重試驗的模擬案例，分別為台北工地之 Shaft S81 案例與台灣高鐵在高雄工地之 D195 #24 案例。所選取之土層參數與現地基本資料分述如下：

1. Shaft S81 [5]

此現地靜動載重試驗是 1999 年於台北市所施作，其試樁長 $L=81.1\text{m}$ 直徑 $D=1.5\text{m}$ 貫入砂岩深至 19m，現地樁載重試驗也作了一些土壤試驗求得凝聚力 C 與摩擦角 ϕ 。本基地各土層數值分析所用之參數如表 1 所示。

2. 某工程 D195 #24 [5]

本案例試樁直徑為 1m，樁長則為 51m，最大試驗載重為 2000T。本基地數值分析所用之土層參數如表 2 所示。

三、數值分析結果

在完成靜動載重試驗之FLAC數值分析，本研究所得的結果，分述如下：

1. Shaft S81 案例

Shaft S81位於台北市區之地層，因為樁長達81m，貫入風化砂岩與未風化砂岩，砂岩SPT-N值大於50。FLAC分析出來之樁頂變位歷時曲線如圖1所示，圖中“*This study*”曲線為FLAC所得之結果，其最大沉陷量為21mm。“S81”曲線則是現地試驗之試驗結果，其最大沉陷量為17mm，研判可能是界面元素的參數與現地情況尚有差異。FLAC也模擬出現地試驗之試樁受載重後出現樁回彈之現象。

阻尼力的計算係由動平衡方程式求出，動力平衡方程式如公式 1 所示：

$$F_{stn}(t) = F_u(t) + F_v(t) + F_a(t) + P_p(t) \text{-----}(1)$$

$F_{stn}(t)$ =量測之靜動荷重力

$F_u(t)$ =土壤承载力

$P_p(t)$ =孔隙水壓阻力

$F_v(t) = c \cdot v(t)$ 土壤產生之阻尼力

$F_a(t) = m \cdot a(t)$... (樁之慣性力)

由圖2看出，在本案例中所激發的超額孔隙水壓阻力不大，其超額孔隙水壓阻力可忽略不計。此外，由圖中的樁底抗力曲線得知，其樁底抗力亦很小，初步判斷可能此樁屬於摩擦樁，樁底面積較小之故，所以樁底抗力和孔隙水壓阻力在本案例中相對很小。同時，由圖2看出靜動荷重曲線與樁靜態承载力曲線相近，在動態的效應中，阻尼力很小似乎可忽略不計。圖3為阻尼力的歷時曲線，此曲線與圖5的速度歷時曲線較無相關，但與圖4的加速度歷時曲線相關。本研究在計算慣性力時，混凝土的單位重是取 $2.4t/m^3$ ，如果取較小值時，可能阻尼力將更小。圖6為阻尼係數之歷時曲線，由圖可看出阻尼係數並非常數，而且如果以最大變位的反應值來估算阻尼係數，可能因速度較小，而高估其阻尼係數，造成分析數據的誤差。

2. D195 #24 案例

D195 #24基樁位於高雄地區，其地層土壤大多為砂性土層，且試樁貫入砂岩層達10m，砂岩SPT-N值遠大於50，FLAC分析出來之樁頂變位歷時曲線如圖7所示。圖中“*This study*”曲線為FLAC分析之結果，最大沉陷量為34mm。“D195#24”曲線則是現地試驗之試

驗結果，最大沉陷量29mm，數值分析之沉陷量較試驗量測的沉陷來得大，但兩者的曲線的趨勢相同，其中之差異可能是樁與土壤間界面元素的參數有關。

由圖8看出，在本案例所激發的超額孔隙水壓阻力不大，其超額孔隙水壓阻力可忽略不計。此外，由圖中的樁底抗力曲線得知，其樁底抗力亦很小，初步判斷可能此樁亦屬於摩擦樁，樁底面積較小之故，所以樁底抗力和孔隙水壓阻力在本案例中相對很小。同時由圖8看出靜動荷重與樁靜態承载力相近，動態的效應中阻尼力很小似乎也可忽略不計。圖9為阻尼力的歷時曲線，此曲線與圖11的速度歷時曲線較無相關，但與圖10的加速度歷時曲線相關。圖12為阻尼係數之歷時曲線，由圖可看出阻尼係數也非常數。

四、結論與建議

本研究以FLAC程式模擬靜動載重試驗，由數值模擬結果得到以下之結論：

1. 因數值模擬的結果與現地試驗結果相近，所以本研究採用的FLAC分析模式可有效地模擬靜動載重試驗。
2. 阻尼力由動態載重扣除樁身摩擦力、樁底抗力與孔隙水壓阻力而得，阻尼力約為靜動荷重的5%左右，所以阻尼力不大。
3. 阻尼力歷時曲線圖與加速度函數的關係較相近，而非與速度函數相接近。因為我們考慮樁的單位重為 $2.4t/m^3$ ，若降低其單位重，阻尼力將更小，所以阻尼力可考慮忽略不計。
4. 阻尼係數c並非是一個常數，隨著時間而改變。
5. 孔隙水壓阻力在分析的案例中，確定可忽略不計，過去其他文獻的作法是成立的。

參考文獻

- [1] 葉樹機，「以SUPM法解釋靜動載重試驗結果適用性之初步研究」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程研究所，台北 (1999)。
- [2] 洪菁隆，「以結構阻尼詮釋靜動樁載重試驗結果」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程研究所，台北 (2000)。
- [3] San-Shyan Lin, J.L. Hong, Wei F. Leeb, Y.H.

Chang, "Capacity evaluation of statnamic tested long piles," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No.24, pp.829-838. (2004)

[4] Kulhawy, FH. and Mayne PW. "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design," Research Project 1493-6 (EL-6800), Electric Power Research Institute. (1990)

[5] 馮正一、李俊男、蔡佩勳，靜動樁載重試驗之數值分析，第11屆大地工程研討會，台北萬里(2005)。

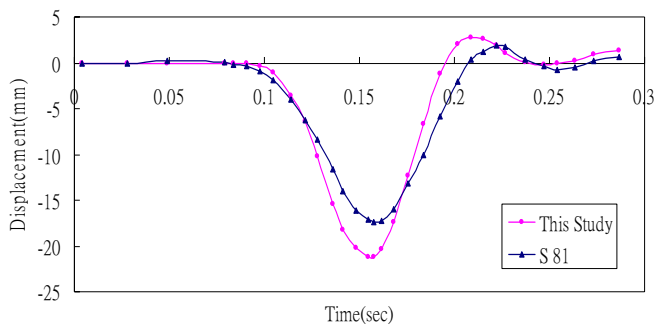


圖 1 Shaft S81 案例樁頂變位量和時間之關係圖

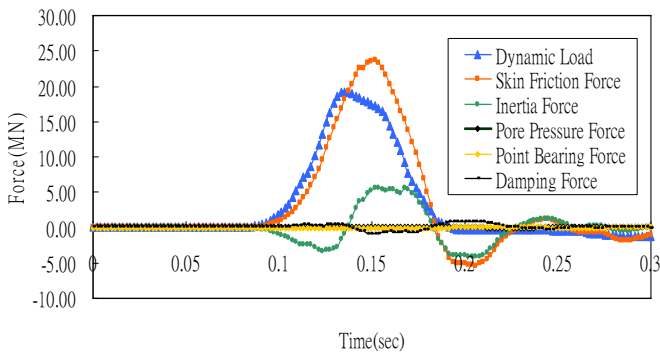


圖 2 Shaft S81 的靜動載重-孔隙水壓阻力-樁身摩擦力-樁底抗力-阻尼力-慣性力和時間之關係圖

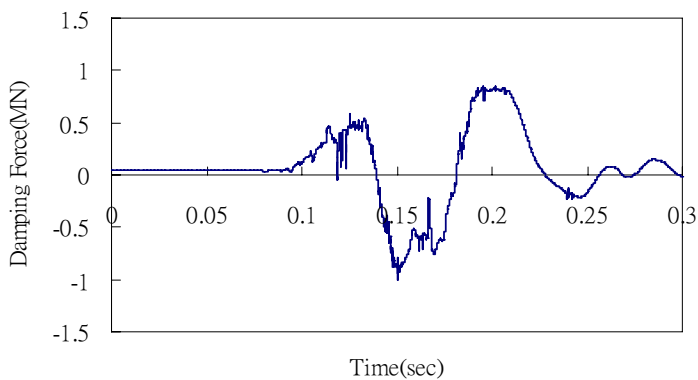


圖 3 Shaft S81 的阻尼力和時間之關係圖

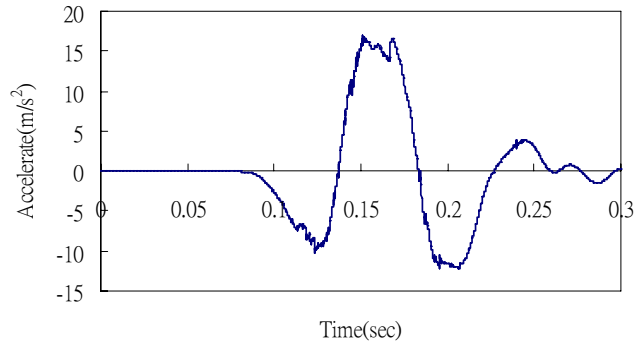


圖 4 Shaft S81 的加速度和時間之關係圖

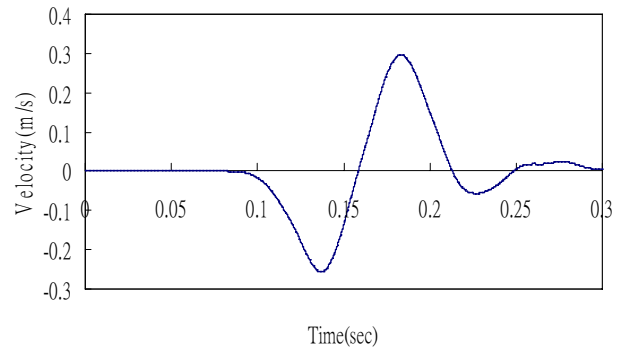


圖 5 Shaft S81 的速度和時間之關係圖

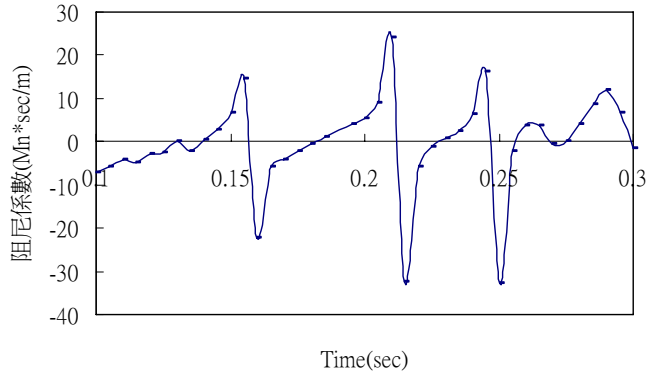


圖 6 Shaft S81 的阻尼係數和時間之關係圖

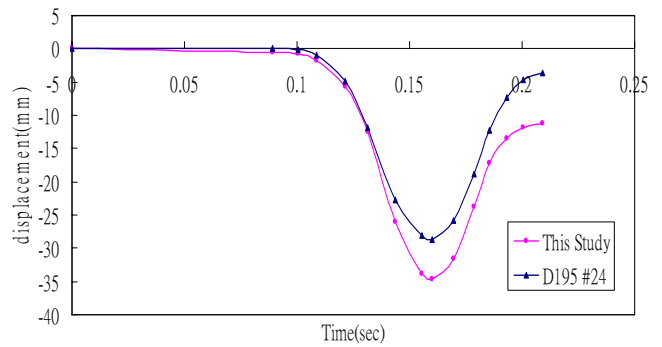


圖 7 D195 #24 案例樁頂變位量和時間之關係圖

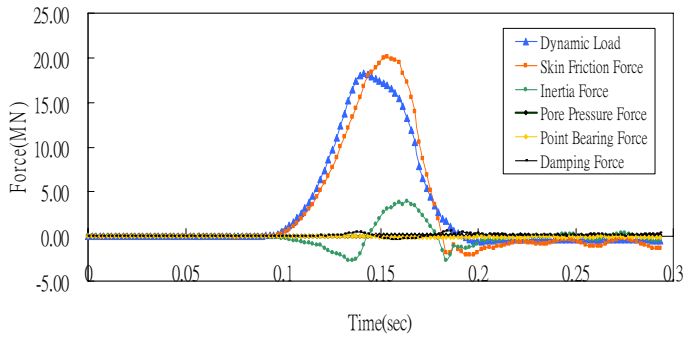


圖 8 D195 #24 的靜動載重-孔隙水壓阻力-樁身摩擦力-樁底阻力-阻尼力-慣性力和時間之關係圖

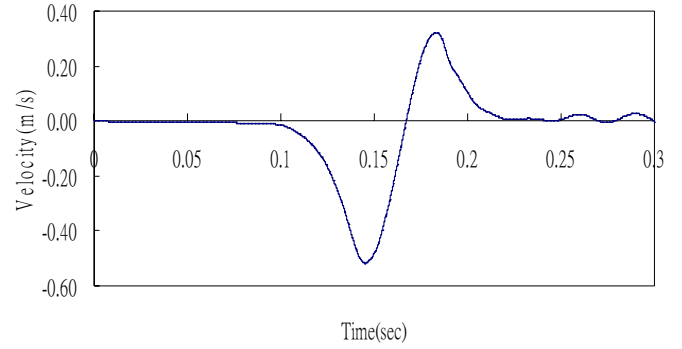


圖 11 D195 #24 的速度和時間關係圖

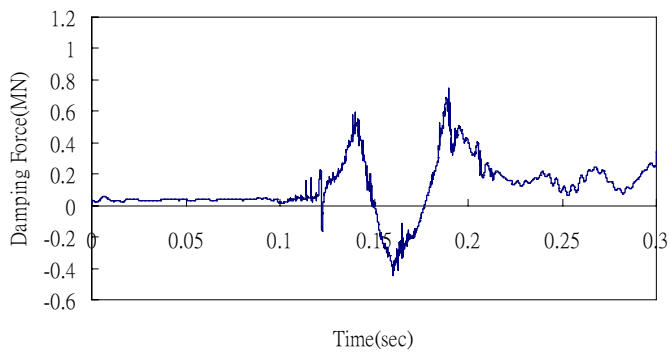


圖 9 D195 #24 的阻尼力和時間關係圖

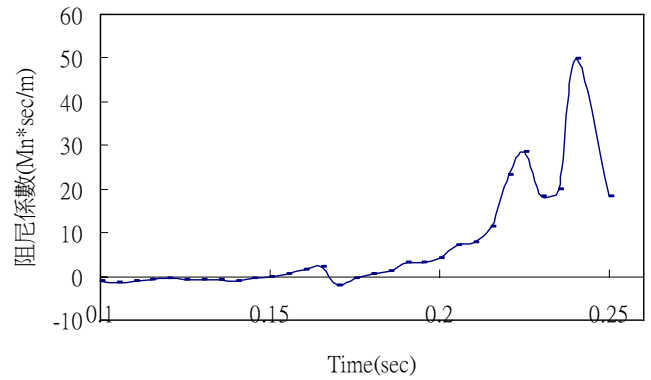


圖 12 D195 #24 的阻尼力和時間關係圖

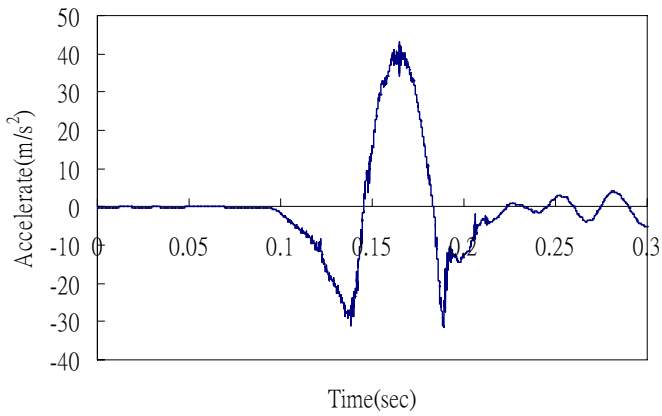


圖 10 D195 #24 的加速度和時間關係圖

表1 Shaft S81 案例之數值分析選用參數

Soil Type	SPT	Density	Shear Modulus	Bulk Modulus	C	Phi Angle	Poisson's Ratio	Young's Modulus	Kn	Ks	Φ
	N	kg/m ³	N/m ²	N/m ²	Nm ²	deg	nu	N/m ²	N/m	N/m	deg
sand (0~2m)	8	1.715E+3	2.30E+6	5.00E+6	0	30	0.3	5.0E+7	2E+11	2E+11	30
CL (2~19.4m)	7	1.760E+3	2.30E+6	1.10E+7	25000	28	0.4	4.5E+7	2E+11	2E+11	30
SM (19.4~28.9m)	18	1.910E+3	3.20E+6	1.50E+7	0	32	0.4	6.0E+7	2E+11	2E+11	30
CL (28.9~34.5m)	15	1.860E+3	8.90E+6	4.17E+7	100000	30	0.4	7.5E+7	2E+11	2E+11	30
Sandstone (34.5~61.9m)	33	1.940E+3	2.68E+7	1.25E+8	0	35	0.4	7.5E+7	2E+11	2E+11	30
Sandstone (61.9~89.3m)	50	2.156E+3	7.00E+8	2.68E+9	350000	45	0.4	1.0E+8	2E+11	2E+11	30

表2 D195 #24 案例之數值分析選用參數

Soil Type	SPT	Density	Shear Modulus	Bulk Modulus	C	Phi Angle	Poisson's Ratio	Young's Modulus	Kn	Ks	Φ
	N	kg/m ³	N/m ²	N/m ²	Nm ²	deg	nu	N/m ²	N/m	N/m	deg
Sand (0~4.6m)	13	1.9E+3	1.96E+7	9.17E+7	0	31.3	0.4	5.5E+7	2E+11	2E+11	30
SM (4.6~17.2m)	11	1.9E+3	1.82E+7	8.50E+7	0	30.8	0.4	5.1E+7	2E+11	2E+11	30
SM (17.2~29.5m)	18	1.9E+3	2.14E+7	1.00E+8	0	33.2	0.4	6.0E+7	2E+11	2E+11	30
SM (29.5~39.7m)	62	2.1E+3	3.57E+7	1.67E+8	0	45	0.4	1.0E+8	2E+11	2E+11	30
CL (39.7~44.6m)	10	1.8E+3	1.69E+7	4.17E+8	1.0E+5	0	0.48	5.0E+7	2E+11	2E+11	30
Sandstone (44.6~55.2m)	>50-100	2.3E+3	1.79E+7	8.33E+7	0	50	0.4	5.0E+7	2E+11	2E+11	30