

# 生石灰樁降低軟弱黏性土壤含水量之評估

## Estimation of Quicklime Pile Induced Water Content Reduction in Soft Cohesive Soil

洪明瑞

Ming-Jui Hung

### 摘要

對高含水量軟弱黏性土壤進行強制且迅速脫水之消化作用，為生石灰樁之主要改良功效之一，然在分析設計及現場施工中，由於相關研究之缺乏及理論分析之不足，往往無法有效地量化其降低地盤含水量之功效。有鑑於此，本研究以理論分析結合空間單元模型試驗之方式，於實驗室中進行生石灰樁複合土體含水量變化之系列研究，期能對於其降低樁周土壤含水量之特性與能力有進一步之瞭解，以作為評估改良成效之依據。

關鍵詞：生石灰樁、黏性土壤、複合土體、消化作用，含水量

### ABSTRACT

One of the major mechanisms in the improvement of soft cohesive soil by quicklime pile is the forced and rapid drainage due to the slaked reaction. However, owing to the lack of theoretical and experimental investigations, the improvement effects of this mechanism still cannot be estimated correctly. This paper studies the slaked reaction of quicklime pile within composite soil by laboratory model tests and theoretical analysis. Results about the reduction of water content of the soil around the quicklime pile is reported and used for evaluation the effect of soil improvement.

**Key Words:** quicklime pile, cohesive soil, composite soil, slaked reaction, water content.

### 一、前言

細顆粒之黏性土壤，主係由黏土礦物所組成，而黏土礦物則為岩石或土壤經風化作用後所形成之鋁-矽酸鹽類(Alumino-Silicates)微小結晶物。由於其粒徑小、形狀扁平且具有極大之比表面積，在結晶面上常帶有負電荷以及滯留水分之能力，故作用於顆粒表面之電化力(Electro-Chemical Forces)往往主宰其力學行為與工程性質[1]。而黏土顆粒電化力之表現形態，主要則受顆粒間水分含量所控制，意即黏性土壤將因含水量之高低而呈現軟弱或堅硬等不同程度之工程特性。此外，隨著黏土礦物含量之增加，土壤之特性就愈趨向於黏性土壤之反應，當含量達 50% 以上時，砂土及沉泥等顆粒則飄浮於黏土基體(Matrix)中，整體之工程行為幾乎全為黏土所控制[2]。

細顆粒土壤之所以深受水分含量多寡所左右，尤  
洪明瑞 明志科技大學環境與安全工程系助理教授

其粒徑小於  $2\mu\text{m}$  之黏性土壤，主要係因其具有大量的比表面積，加以顆粒表面負電荷與偶極水分子(Dipolar Molecule)以靜電力、氫鍵或氧離子等方式吸附，使黏性土壤具有高度之電化活性以及對水分與應力變化之靈感性(Sensitivity)[2]。換言之，經水化作用(Hydrated)後之黏土顆粒，其四周將為水層所包覆而成高孔隙結構之分散(Dispersion)或團聚(Flocculation)型態，降低顆粒間應力傳遞架構之緊密性與連續性。故當土壤中含水量越高時，黏性土壤之土質便愈軟弱，而工程行為則更顯得不穩定。

黏土礦物為土壤結構本身之一部分，不易受外在因素或人為手段而改變，但存於土壤顆粒間之游離水分，則可利用化學或物理的方式加以變化，進而影響其工程行為。故對於含水量高之黏性土壤而言，若於工程建造之初，即能以合宜的地盤改良手段降低其含水量，不但有利於施工之進

行，更能藉此提高整體之穩定性。其中，利用乾燥之生石灰材料與水分間特有的消化反應(*Slaked Reaction*)，於軟弱黏性地盤中設置生石灰樁體，使其對周圍土壤進行強烈的脫水(*Dehydration*)作用，進而改善工程性質並提高地盤穩定性之改良方式，因具有快速且顯著功效，在各種軟弱黏性土壤之改良工法中，已逐漸受到普遍的肯定與重視。

生石灰樁降低黏性土壤之含水量極具功效，諸多試驗成果或現地改良案例，皆可證明其優越的脫水能力[3-6]；然因改良過程牽涉複雜的物理反應與化學作用，致使目前相關之評估模式，仍未能對其降低土壤含水量的能力，提出合理的估算方式。有鑑於此，本研究藉由空間單元模擬的觀念，於實驗室中進行一系列改良前、後土壤含水量變化試驗，除驗證其降低含水量之功效與改良特性外，同時配合理論分析的推導與試驗結果的驗證，提出一能更合理地評估生石灰樁複合土體(*Composite Soils*)降低含水量之分析模式。

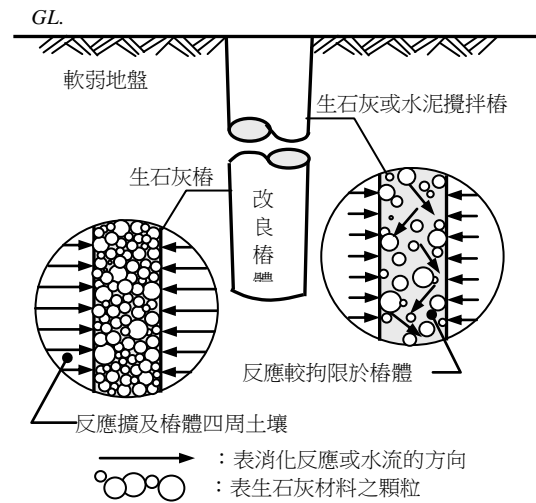
## 二、簡要文獻回顧

### 2.1 生石灰樁之反應機制

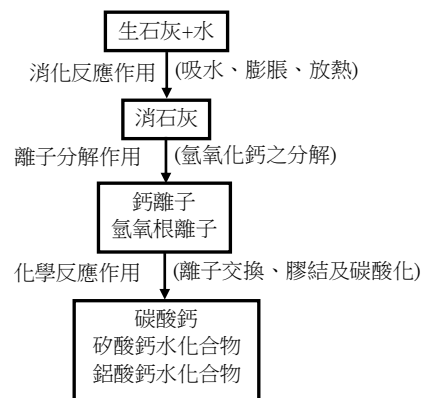
生石灰材料在軟弱地盤之深層處理上，除了設置純生石灰樁體外，亦逐漸發展出土壤與石灰混合攪拌(*Lime-Soil Mixtures*)的改良方式[7, 8]。此兩種施工方法之改良原理，雖均利用石灰、土壤與水分三者間之交互作用與化學反應，然就其改良範圍與處理功效而言，兩者間則有顯著的差異。其中，生石灰拌合樁之影響範圍大部分僅侷限於樁體本身，對於樁周軟弱土層之改良效果較為有限，不若生石灰樁可充分對周圍土壤進行強烈的脫水與擠壓作用，如圖一所示。此外，生石灰樁在軟弱地盤中所形成之樁體，日後更成為地層之排水通路，有效縮短黏性土壤之排水路徑。

生石灰樁與土壤間之反應相當複雜，生石灰材料埋入土層中形成之柔性樁體，與水泥等其他固化材料所形成之複合地盤將有所差異。此因生石灰樁體在土壤中一方面快速吸水，另一方面則膨脹並擠壓周圍之土壤，迫使土體產生徑向壓密；隨後更積極地與樁周土壤進行一連串的化學反應。因而樁體與周圍土壤間並非僅是單純的摩擦接觸，而是經歷著複雜反應並產生化學成分相互滲

透和演變的土質變化，以及土壤顆粒膠結與團聚(*Coagulation*)等過程[6]。圖二所示為生石灰材料與土壤間之反應流程，而表一[9]則為生石灰之基本化學反應量。



圖一 生石灰樁與攪拌樁反應之差異



圖二 生石灰與土壤之反應流程

表一 生石灰材料之基本化學反應量[9]

	生石灰	水	消石灰	反應效果
反應式	$CaO$	$+ H_2O$	$\rightarrow Ca(OH)_2$	放熱
分子量	56	18	74	-
比重	3.2	1	2.24	-
重量比	1	0.32	1.32	消化、吸水
體積比	1	1.06	1.99	膨脹、擠壓
	$Ca(OH)_2 + SiO_2(或 Al_2O_3) \rightarrow$ 水化物			膠結、硬化

### 2.2 含水量降低量之評估方式

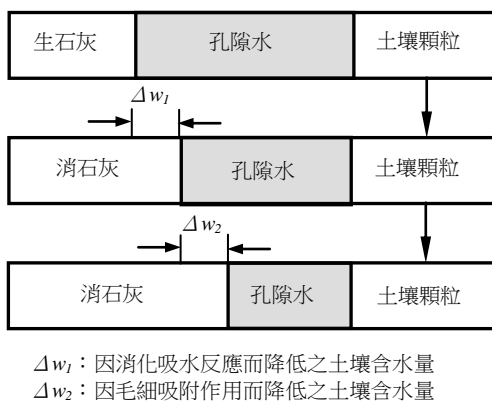
生石灰樁降低黏性土壤含水量之功效，若依整個反應過程之先後順序，則可約略劃分為消化吸水作用、高溫蒸散作用(*Transpiration*)以及毛細(*Capillarity*)吸水現象等三個階段。其中，生石灰在消化吸水過程，將吸收相當於本身重量 32%之

孔隙水反應成消石灰[10]。其次，生石灰樁在消化反應之同時釋放大量熱能，每公斤生石灰約釋放 278.6 kcal 之熱量，迫使樁體溫度升高及加速水分之蒸發。至於，毛細吸水反應係指消石灰之含水狀況與周圍土壤在吸力(Suction)平衡前，樁體將持續進行毛細吸水作用以成為濕潤狀態之消石灰，而此項毛細吸水量可假設等於生石灰樁飽和時之水量[9]。

近年來學者對於樁周土體含水量降低之研究，常將其簡化為消化反應階段以及毛細作用之吸水等兩部分來討論，忽略高溫放熱效應所能蒸發水分之貢獻，如圖三[11]所示。根據伊東範雄(1969) [12] 之研究指出，生石灰樁進行消化反應須吸取樁周土壤中 32% 石灰含量之水分，且消化反應後樁體之體積約為原體積之 2 倍，若同時考慮樁徑與改良範圍之配置型態，則樁周土體中水分體積之變化量  $\Delta V_w$  可表為

$$\frac{\Delta V_w}{V} = \left[ 0.32 \left( \frac{\gamma_c}{\gamma_w} \right) + n'(1 + \epsilon_v) \right] a_v \quad (1)$$

式中， $V$  為改良地盤之體積， $\gamma_c$  與  $\gamma_w$  分別為生石灰樁與水之單位重， $n'$  為生石灰樁反應後之孔隙率， $\epsilon_v$  為生石灰樁之體積膨脹率，而  $a_v$  則為體積改良率，定義為剛設置時生石灰樁之原體積與反應完成後所負擔改良體積之比值。



圖三 生石灰樁降低含水量示意圖[11]

福岡正己(1982) [13]認為消化反應之吸水、膨脹以及放熱等作用，除了降低樁體本身之含水量外，將對周圍土壤有進一步之影響；且其降低土壤含水量之能力則與生石灰之填充量、膨脹效應以及樁體之配置型態等因素有關，並建議以下式估算樁體周圍土壤含水量之變化情形

$$\Delta w = \frac{1 + (w_o/100)}{\gamma_t} \left( 100a_s \left[ h \cdot \gamma_c + \gamma_w \left( \frac{n'}{100} \right) \left( 1 + \frac{\epsilon_v}{100} \right) \left( \frac{s'_r}{100} \right) \right] \right) \quad (2)$$

式中， $w_o$  為土壤之初始含水量， $\gamma_t$  為原土壤之單位重， $a_s$  為生石灰樁面積比， $\gamma_w$  為水之單位重， $h$  為生石灰消化反應之吸水當量(一般為 0.25-0.3)， $\gamma_c$  為生石灰樁之填充密度， $n'$  為生石灰消化反應後之孔隙比(一般為 0.4-0.7)， $\epsilon_v$  為生石灰消化反應後之體積膨脹率(一般為 0.4-0.9)，而  $s'_r$  則為生石灰樁消化反應後之飽和度(一般為 0.75-0.95)。

在現地應用上，奧村樹郎(1976) [14]基於實務經驗與簡化分析之觀點，建議以下式作為初步推算生石灰樁複合土體含水量變化之依據

$$\Delta w = 0.8a_v(1 + w_o) \quad (3)$$

此外，趙國華等人(1962)[3]利用生石灰樁體處理台北沉泥之研究，獲得在室溫 20-30° C 之條件下含水量減少之實驗式，藉以建議改良地盤含水量降低量之估算式，如下

$$\log w = \left[ 1 - \frac{0.126}{R-1} - \frac{0.072}{(R-1)^2} \right] \log w_o \quad (4)$$

式中， $R$  稱為影響圈之半徑比或樁距比，定義為影響圈之直徑  $D_e$  與生石灰樁體原直徑  $D_o$  之比值。

### 三、生石灰樁降低含水量之理論分析

粉末狀生石灰材料為一乾燥物質，與土壤中之孔隙水接觸後立即進行消化反應，成為濕潤狀態之消石灰，並於消石灰吸水飽和前持續進行毛細吸水作用；且生石灰在消化反應過程中，將因氧化鈣與水分子反應所釋放之熱量而產生高溫，有助於土壤中水分之蒸發及其他化學反應之進行 [15]。故欲評估生石灰樁降低地盤含水量之功效時，則應考慮消化吸水、毛細吸水及高溫蒸發作用等三部分的貢獻。本文嘗試由生石灰與土壤間特有的消化反應，配合土壤力學之基本相態關係，推導生石灰樁所能降低地盤含水量之能力。

#### 3.1 消化反應之吸水作用

生石灰在吸水消化過程中，吸收相當於本身重量 32% 之孔隙水反應成消石灰，且膨脹後消石灰之體積為生石灰原體積之 1.98 倍 [9, 10, 15]。故於吸水消化反應階段，生石灰樁所能降低土壤中之含水量  $\Delta w_1$  可依下列方法加以推估。

首先，假設改良前土壤之初始含水量為  $w_o$ ，即

$$w_o = \frac{W_w}{W_s} \quad (5)$$

式中， $W_w$  為改良前土壤中之水重， $W_s$  則為土壤顆粒之重量。當生石灰樁設置後，將吸取周圍土壤相當 32% 樁體重量之水分，故改良後土壤之平均含水量  $\bar{w}$  為

$$\bar{w} = \frac{W_{ws}}{W_s} = \frac{W_w - 0.32\gamma_c \cdot V_o}{W_s} = w_o - \frac{0.32\gamma_c \cdot V_o}{W_s} \quad (6)$$

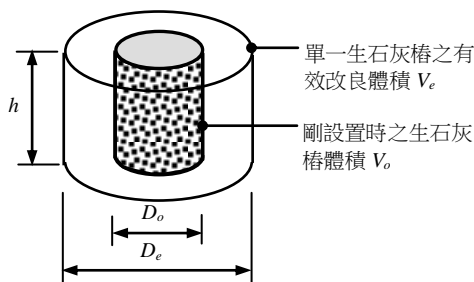
式中， $W_{ws}$  為消化反應後土壤中之水重， $\gamma_c$  為生石灰樁之單位重，而  $V_o$  則為剛設置時之生石灰樁體積。

今如圖四所示，定義生石灰樁複合土體之樁距比  $R$  及體積改良率  $a_v$  之比值分別如下

$$R = \frac{D_e}{D_o} \quad (7)$$

$$a_v = \frac{V_o}{V_e} = \left(\frac{D_o}{D_e}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 \quad (8)$$

式中， $V_e$  為每支生石灰樁之有效改良體積， $D_o$  為剛設置時之樁體直徑，而  $D_e$  則為每支生石灰樁之有效改良直徑。其中，每支樁體確實的改良或影響範圍，由於牽涉本身的物理性質、改良條件之差異以及樁周土壤特性等諸多因素，故其估算相當困難。因此，上述之  $D_e$  或  $V_e$  並非真正反應機制上之影響範圍，而是在實務上以群樁進行處理時，限定每一生石灰樁必須負擔某一改良面積，而所限定之區域即定義為該樁體改良範圍之  $D_e$  或  $V_e$ 。



$D_o$ ：剛設置時之生石灰樁直徑  
 $D_e$ ：單一之生石灰樁改良範圍之有效直徑  
 $h$ ：改良單位深度  
 定義：樁距比  $R=(D_e/D_o)$   
 體積改良率  $a_v=(V_o/V_e)=(D_o/D_e)^2=(1/R)^2$

圖四 體積改良率與樁距比示意圖

此外，在生石灰樁複合土體之改良單元中，土壤

之乾單位重  $\gamma_d$  可表為

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_e - V_o} \quad (9)$$

將式(8)及式(9)代入式(6)中，可得

$$\bar{w} = w_o - \frac{0.32\gamma_c \cdot a_v}{\gamma_d(1-a_v)} \quad (10)$$

土壤乾單位重  $\gamma_d$  與濕單位重  $\gamma$  間具有下列關係：

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w_o} \quad (11)$$

將式(11)代入式(10)中，得

$$\bar{w} = w_o - \frac{0.32\gamma_c \cdot a_v(1+w_o)}{\gamma(1-a_v)} \quad (12)$$

故在吸水消化階段所能降低之含水量  $\Delta w_1$  為

$$\Delta w_1 = w_o - \bar{w} = \frac{0.32\gamma_c \cdot a_v(1+w_o)}{\gamma(1-a_v)} \quad (13)$$

### 3.2 毛細吸水作用

生石灰樁吸水膨脹後，土體中的孔隙水因樁體之強烈吸引而成輻向流動地向樁體匯集，隨後經由樁體逸出受熱之水分並於樁體內留下細微孔道，故消石灰樁體可視為一多孔介質 (Porous Medium)，有利於後續水分之排除，而此功效即為消石灰樁體之毛細吸水作用。換言之，消石灰之含水狀況與周圍土壤在吸力平衡前，逐漸進行毛細吸水以成為濕潤狀態之消石灰。此項毛細管吸水量假設大約等於生石灰樁飽和時之水量，故毛細吸水造成地盤含水量之降低量  $\Delta w_2$  可推估如下

$$S_c \cdot e_c = w_c \cdot G_{sc} = 2.24 \left( \frac{W_{wc}}{W_{sc}} \right) \quad (14)$$

式中， $S_c$  為消石灰樁體之飽和度， $e_c$  為消石灰樁體之孔隙比， $w_c$  為消石灰樁體之含水量， $G_{sc}$  為消石灰樁體之比重， $W_{wc}$  為消石灰樁體中之水分重量，而  $W_{sc}$  則為消石灰樁固體之重量。

今假設樁體之吸水為飽和狀態，故  $S_c=1$ ，而消石灰之比重  $G_{sc}=2.24$ ，可由實驗中以一般土壤比重試驗方式測得。此外，消石灰樁體中之水重  $W_{wc}$  即等於土壤中因毛細吸水所降低之水重  $\Delta W_{wc}$ ，此時消石灰樁體之重量  $W_{sc}$  則為

$$W_{sc} = \gamma_c \cdot V_o + 0.32\gamma_c \cdot V_o = 1.32\gamma_c \cdot V_o \quad (15)$$

將式(15)及上述條件代入式(14)，可得

$$e_c = \frac{2.24\Delta W_{wc}}{1.32\gamma_c \cdot V_o} \quad (16)$$

又

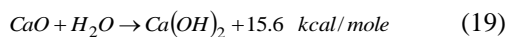
$$\Delta w_2 = \frac{\Delta W_{wc}}{W_s} \quad (17)$$

再將式(8)、(9)、(11)以及(16)代入式(17)中，最後可求得毛細吸水階段所能降低之含水量 $\Delta w_2$ 為

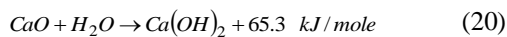
$$\Delta w_2 = \frac{0.59\gamma_c \cdot a_v \cdot e_c(1+w_o)}{\gamma(1-a_v)} \quad (18)$$

### 3.3 高溫蒸發作用

生石灰樁在消化反應過程中，每莫爾分子之氧化鈣將產生約 65.3 仟焦耳之熱量[16]，可以化學反應式表示如下



或



此熱量促使樁體溫度升高及加速水分之蒸發，並促進其他化學反應的達成。理論上，若氧化鈣(CaO)之含量達 100%時，則每公斤生石灰所產生之熱量 $C_s$ 為

$$C_s = 1,000 \left( \frac{C_m}{M_m} \right) = 1,000 \left( \frac{65.3}{56} \right) = 1,166 \text{ kJ/kg} \quad (21)$$

式中， $C_m$ 為每莫爾分子之氧化鈣所產生的熱量，而 $M_m$ 則為氧化鈣之分子量。

今為評估生石灰樁體所產生之熱量及高溫現象對土壤孔隙水之蒸發作用，引用熱力學中當溫度( $T - \Delta T/2$ )的物體加熱到溫度( $T + \Delta T/2$ )時，經過該物體之熱量變化 $\Delta Q$ 與 $\Delta T$ 之關係為[17-19]

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = c \cdot W \cdot \Delta T \quad (22)$$

式中， $C$ 為熱容量(Thermal Capacity，即溫度為 $T$ 之物體升高單位溫度時所必要之熱量)， $c$ 為比熱(Specific Heat，即使單位質量之物質每升高一溫度之過程所需之熱量)，而 $W$ 則為物體之質量。此外，若同時考慮該物體在某一溫度 $T$ 時之蒸發作用時，則式(22)可進一步表為

$$\Delta Q = c \cdot W \cdot \Delta T + L \cdot \Delta W \quad (23)$$

式中， $L$ 為蒸發熱或潛熱(Latent Heat)，即在液體氣化之相轉移中，該物體單位質量所吸收或放出之熱量，而 $\Delta W$ 則為物體質量之變化量。

引用上述觀念評估生石灰樁降低含水量之能力時，必須考慮在消化與化學反應過程中，生石灰樁體吸水所產生之熱量將迫使樁周土體之溫度升高、孔隙中之游離水分蒸發以及促進其他物理與化學作用之進行等功效。換言之，生石灰樁體所產生之熱量 $\Delta Q$ 應等於土體溫度升高、孔隙水蒸發與其他物理化學反應之總和。至於，樁周土壤比熱之測定，因其由土粒、水分以及空氣所組成，故通常依權重由各成分之比熱混合求得。今假設單位體積所佔之土粒、水分及空氣之體積比率分別為 $V_s$ 、 $V_w$ 以及 $V_a$ ，其比熱分別為 $c_s$ 、 $c_w$ 以及 $c_a$ ，則樁周土壤之比熱 $c$ 為

$$c = c_s \cdot V_s + c_w \cdot V_w + c_a \cdot V_a \quad (24)$$

式中， $V_s + V_w + V_a = 1$ 。然就氣體之熱特性而言，因其比熱常隨組成分子之差異有較大之變化，測定過程亦較為繁複；且從實務應用之觀點，土壤單元在地表下處於一封閉之系統，壓密後土壤中之空氣含量相對而言極微小，故可將土壤視為飽和狀態，而令式(24)中之 $V_a = 0$ ，故式(23)可進一步表為

$$\Delta Q = c_s \cdot W_s \cdot \Delta T + c_w \cdot W_w \cdot \Delta T + L_w \cdot \Delta W_{wt} + \Delta Q^* \quad (25)$$

或

$$\Delta Q = c_s \cdot W_s \cdot \Delta T_1 + c_w \cdot \Delta W_w \cdot \Delta T_2 + L_w \cdot \Delta W_{wt} + \Delta Q^* \quad (26)$$

式中， $W_s$ 為土壤顆粒之重量， $W_w$ 為水分之重量， $\Delta T$ 為生石灰樁改良前後土體中之溫差， $\Delta W_{wt}$ 為蒸發造成水分之變化量，而 $\Delta Q^*$ 則為生石灰樁高溫作用對其他物理化學反應所作之貢獻。

由式(25)或式(26)可進一步得知，等式右邊第一項與第二項之和係針對 $\Delta Q$ 促使土體溫度上升之功效，然飽和狀態下，土體係由土粒與孔隙水所組成，故須分別考慮其差異。意即，當土體之溫度由 $T_o$ 上升至 $T$ 而產生一 $\Delta T_1$ 之溫差時，無論 $T$ 值為何，可假設土壤顆粒之重量 $W_s$ 保持恆定；然當土體溫度由 $T_o$ 升高並產生一 $\Delta T_2$ 變化之過程中，

當  $T$  達  $100^{\circ}\text{C}$  時，孔隙水將產生蒸發現象，使得水分之重量  $W_w$  產生  $\Delta W_w$  之變化(此時之  $\Delta W_w = \Delta W_{wt}$ )。此外，在  $\Delta Q^*$  甚小時，式(26)便可進一步簡化為

$$\Delta Q \cong c_s \cdot W_s (T - T_o) + c_w \cdot \Delta W_{wt} (100 - T_o) + L_w \cdot \Delta W_{wt} \quad (27)$$

在生石灰樁吸水放熱效應對樁周土體影響之考量上，土體之增溫與孔隙水之蒸發應為兩大主要消耗熱量之反應，其他後續物理與化學作用所能耗損之熱量相對而言甚小，故在實務上應可接受  $\Delta Q^* = 0$  之假設。今再將上式整理成

$$\Delta W_{wt} = \frac{\Delta Q - c_s \cdot W_s (T - T_o)}{c_w (100 - T_o) + L_w} \quad (28)$$

由於土壤顆粒重量  $W_s$  在溫度變化過程中恆為定值，且土壤中之孔隙水假設為連續分佈，故在高溫蒸發作用階段，土壤重量之變化  $\Delta W$  應等於土壤中水分因蒸發作用之變化量  $\Delta W_{wt}$ 。而生石灰樁提供給土壤之熱量  $\Delta Q$  則可表為

$$\Delta Q = C_s \cdot \gamma_c \cdot V_o = 1166 \gamma_c \cdot a_v \cdot V_e \quad (29)$$

將式(29)代入式(28)中可得

$$\Delta W_{wt} = \frac{1166 \gamma_c \cdot a_v \cdot V_e - c_s \cdot W_s (T - T_o)}{c_w (100 - T_o) + L_w} \quad (30)$$

故生石灰樁設置後所產生的熱量與蒸發作用，對土壤含水量之降低效果  $\Delta w_3$ ，可表為

$$\Delta w_3 = \frac{\Delta W_{wt}}{W_s} = \frac{1166 \gamma_c \cdot a_v (V_e / W_s) - c_s (T - T_o)}{c_w (100 - T_o) + L_w} \quad (31)$$

進一步將式(9)及式(11)代入式(31)中，可得

$$\Delta w_3 = \frac{1166 \gamma_c \cdot a_v (1 + w_o) - c_s (T - T_o) \cdot \gamma (1 - a_v)}{\gamma (1 - a_v) [c_w (100 - T_o) + L_w]} \quad (32)$$

在工程應用上，水分之比熱  $c_w$  在溫度  $20-100^{\circ}\text{C}$  左右時，常採用  $4.187 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$  [17, 18]，水分之潛熱  $L_w$  則視溫度之高低而定，須由相關圖表查得 [19]，而土粒之比熱則須進行相關之試驗加以測定。

綜合 3.1 節至 3.3 節之推導與說明，理論上生石灰樁所能降低地盤之含水量  $\Delta w$  為  $\Delta w_1$ 、 $\Delta w_2$  與  $\Delta w_3$  之和，意即

$$\begin{aligned} \Delta w &= \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 \\ &= \frac{a_v \cdot \gamma_c (1 + w_o)}{\gamma (1 - a_v)} (0.32 + 0.59 e_c) \\ &\quad + \frac{1166 \gamma_c \cdot a_v (1 + w_o) - c_s (T - T_o) \cdot \gamma (1 - a_v)}{\gamma (1 - a_v) [c_w (100 - T_o) + L_w]} \end{aligned} \quad (33)$$

#### 四、研究內容與試驗項目

本研究主要之內容包括上一節所提出之生石灰樁複合土體含水量評估模式之推導，其次為實驗室改良前、後土體含水量變化試驗，以及分析模式與試驗結果之驗證等三部分。其中，在實驗室試驗方面，針對未改良土含水量之特性、生石灰樁複合土體在不同改良條件上之差異以及分析模式參數值之律定等進行相關之試驗。茲將各試驗項目與條件、試驗土樣與改良材料、土樣準備與試體之製作、實驗儀器與相關設備以及試驗方法等分別簡要說明如下。

##### 4.1 試驗項目與條件

於實驗室中利用單向度壓密儀，以空間單元模型進行相關之試驗。首先，進行未改良土含水量試驗，測定在正常壓密狀態下，黏性土壤覆土壓力(或壓密應力)  $\sigma$  與含水量  $w_o$  之關係，作為評估生石灰樁降低土體含水量成效之依據與比較之基準。其次，進行生石灰樁複合土體含水量試驗，考慮在不同改良條件下，生石會樁對於黏性土壤含水量之變化情形，並據此作為驗證分析模式可行性之依據。此外，利用本文所推導之分析模式以推估生石灰樁降低土體含水量之能力時，有關未改良土本身之單位重  $\gamma$ 、消石灰之孔隙比  $e_c$  以及生石灰材料使用前先行吸水之修正係數  $\alpha$  等參數，亦必須於實驗室中先行加以測定。表二所示為本文所進行之各項試驗項目與目的，而表三則為各項試驗之條件與試體尺寸之大小。

表二 主要試驗項目與試驗目的

試驗項目	試驗內容與目的
未改良土(原土)含水量試驗 ( $w_o$ )	測定未改良土覆土壓力(或壓密應力)與含水量間之關係，除可掌握未改良土特性外，主要則作為比較改良前、後降低含水量的基準以及生石灰樁之改善功效
生石灰樁複合土體平均含水量試驗 ( $\bar{w}$ )	測定反應時間、體積改良率(或樁距比)及樁體單位重等因素之改良成效，作為驗證分析模式的適確性以及評估不同改良條件間之差異
未改良土單位重試驗 ( $\gamma$ )	測定未改良土覆土壓力與單位重間之變化關係，作為驗證分析模式所需參數之用

消石灰孔隙比測定( $e_c$ )	測定消石灰孔隙比與覆土壓力(或壓密應力)之變化關係,作為驗證分析模式所需參數之用
先行反應修正係數測定( $\alpha$ )	測定生石灰材料於使用前先行吸水量之大,作為驗證分析模式所需參數之用

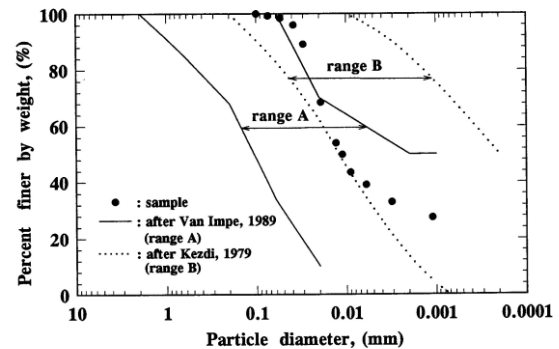
表三 主要試驗條件與試體尺寸

試驗項目	試體尺寸	試驗條件
未改良土含水量試驗	試體直徑 6cm, 高 2cm	模擬 22 個不同深度之覆土壓力, 先後各重覆進行八組試驗
生石灰椿複合土體平均含水量試驗	試體高 2cm, 每支生石灰椿所擔負改良範圍之直徑 $D_e$ 為 6cm, 而剛設置之直徑 $D_o$ 則視椿距比 $R$ 之改良條件而定, 其中 $R=(D_e/D_o)$	模擬 16 個覆土壓力, 分別針對反應時間、椿距比與椿體單位重等因素進行試驗: (1)時間因素 $t$ 固定 $R=5$ , $\gamma_c=9.81\text{kN/m}^3$ , 變化 $t=1、3、7、14、30$ 以及 $t=60$ 天 (2)椿距比 $R$ 或體積改良率 $a_v$ 固定 $t=7$ 天, $\gamma_c=9.81\text{kN/m}^3$ , 變化 $R=2、3、4、5、6$ 以及 $R=10$ (3)椿體之填充單位重 $\gamma_c$ 固定 $t=7$ 天, $R=5$ , 變化 $\gamma_c=8.83、9.81、10.79、11.77、12.75$ 以及 $\gamma_c=13.73\text{kN/m}^3$
未改良土單位重試驗	試體直徑 6cm, 高 2cm	模擬 14 個不同深度之覆土壓力, 以測定未改良土之單位重
消石灰孔隙比之測定	試體高 2cm, 每支生石灰椿所擔負改良範圍之直徑 $D_e$ 為 6cm, 而剛設置之直徑 $D_o$ 則視椿距比 $R$ 之改良條件而定	試體消化反應之時間為 7 天, 針對: (1)固定 $R=5$ , $\gamma_c=9.81\text{kN/m}^3$ , 變化 12 個不同大小之覆土壓力 $\sigma$ (2) 固定 $\sigma=48.58\text{kPa}$ , $\gamma_c=9.81\text{kN/m}^3$ , 變化 $R=2、3、4、5、6$ 以及 $R=10$ (3)固定 $\sigma=194.34\text{kPa}$ , $R=5$ , 變化 $\gamma_c=9.81、10.79、11.77、12.75$ 以及 $\gamma_c=13.73\text{kN/m}^3$
先行反應修正係數之測定	容量 100c.c. 之蒸發皿, 生石灰材料重 20g, 蒸餾水 10g	生石灰吸水反應後於室溫中養治並加以氣乾

#### 4.2 試驗土樣與改良材料

本研究採用之土樣取自於台北市信義計劃區內之工地, 屬基 1 區(K1)第四次層之灰色沉泥質黏土, 在統一土壤分類法上歸類為 CL 之土壤。土樣在進行改良之前, 進行相關之物理性質試驗, 測得其比重  $G_s$  為 2.68, 自然含水量  $w_n$  在 34-35%之間, 液性限度  $w_L$  為 34.7%, 塑性指數  $I_p$  則為 15.8。從土壤粒徑分佈曲線試驗之結果顯示, 礫石與砂土為 0%, 沉泥為 62%, 黏土則為 38%。此外, 經由 X 光繞射模式研究顯示, 台北沉泥質黏性土壤之主要黏土礦物成分則為伊利土(Illite)及綠泥土(Chlorite)[3]。

進一步將粒徑分佈曲線與 Kezdi(1979)[20]與 Van Impe(1989)[16]所建議的生石灰改良適用土層進行比較, 並將其結果繪製成圖五, 得知其落於兩位學者所建議之範圍內; 換言之, 若單由土壤組成粒徑之觀點, 本土樣相當適合以生石灰椿進行穩定處理。至於, 試驗用之改良材料, 係採用含有 94%以上氧化鈣之甲級工業用粉末狀生石灰, 其比重約為 3.24 左右。



圖五 本試驗土樣之粒徑分佈曲線

#### 4.3 土樣準備與試體之製作

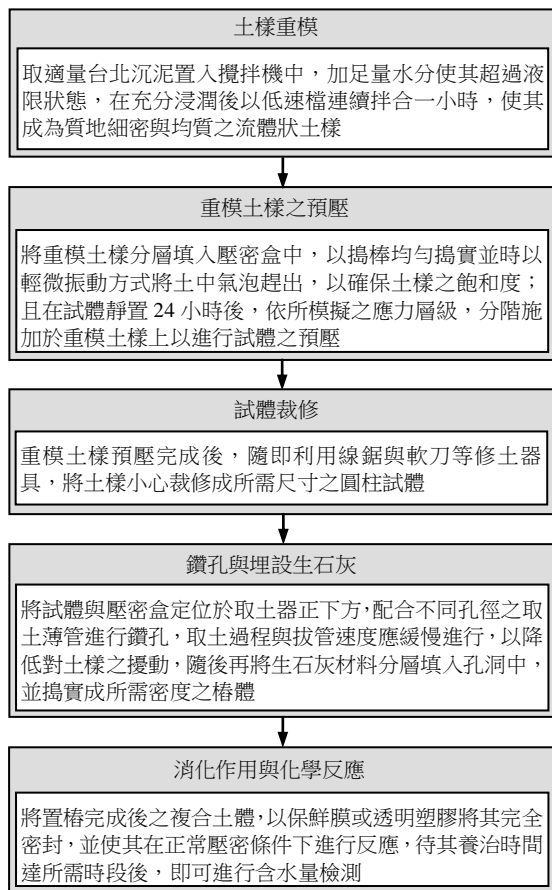
##### 4.3.1 重模土樣之準備

取適量原狀土樣置放於攪拌機中, 加入超過液限狀態時之水分, 使其浸泡及充分濕潤後, 隨之啟動攪拌機以低速檔連續拌合一小時。此重模(Remold)過程將使得土樣的非保守性(Nonconservative)或記性受到嚴重的擾動與破壞, 土壤結構及應力歷史將被重新的塑造, 土體之應力狀態即可依試驗所需之應力條件進行模擬。此外, 經充分攪拌而成為流體狀之重模土樣, 由於質地細密且均勻, 基本上可將其視為均質體(Homogeneous Matrix), 除有利於試驗工作之進行, 更能符合理論分析上視土體為均質材料之假設。至於, 土樣重模後, 隨之將其收集於密閉器皿中, 以避免水分之蒸發與保持土樣之潔淨。

##### 4.3.2 複合土體之製作

將重模土樣分層並充分搗實於壓密盒中, 使試體在飽和狀態下先靜置一天, 隨後依所模擬之應力層級, 分階施加於重模土樣上, 並在壓密完成後進行土樣之裁修(Trimming)。至於, 當試體裁修完成後, 依所擬定之各種改良條件, 於試體中央鑽

取所需之孔徑及填入定量之生石灰材料，隨即再施加先前之壓密應力使其進行消化反應，以模擬現地覆土壓力作用下之生石灰樁複合土體。圖六所示及為生石灰樁複合土體之主要製作過程，包括土樣之重模、預壓、裁修、鑽孔、埋設生石灰材料以及在正常壓密狀態下進行消化作用與化學反應等步驟。



圖六 生石灰樁複合土體之製作流程

本研究試體之製作方法，有別於一般薄管重模土樣預壓之方式。由於重模土樣直接搗實於壓密盒中，可免除先於薄管預壓再以壓密環取樣過程時之擾動，試體製作品質較為可靠。此外，以薄管進行土樣之預壓時，由於薄管較為細長，壁面阻力相對地較高，搗實過程與應力之傳遞均較難掌握，且須耗費較長之時間方能完成土樣之預壓工作；故在試體飽和度、均勻性以及製作時間等各方面之控制上，本試驗方法應為一較佳之試體製作方式。

至於，在生石灰樁複合土體製作方面，為避免鑽孔過程栓塞效應(Plug Effect)對土體之擾動，取樣器之管壁應盡量光滑且薄，內、外徑大小則滿足

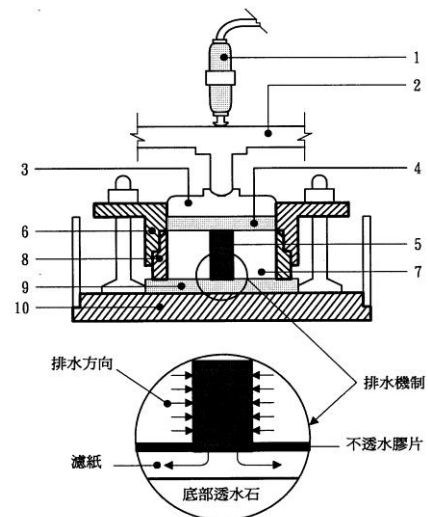
取樣器面積比低於 10% 之要求，如下

$$A_R(\%) = \frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2} (100) \quad (34)$$

式中， $A_R$  為面積比， $D_o$  為取樣薄管之外徑，而  $D_i$  則為取樣薄管之內徑。此外，試體與壓密盒本身應固定在一平整之基座上，取土薄管壓入及拔取之速度均應緩慢、輕微以及平穩，儘量消除可能之擾動因素以獲得良好之鑽孔品質。

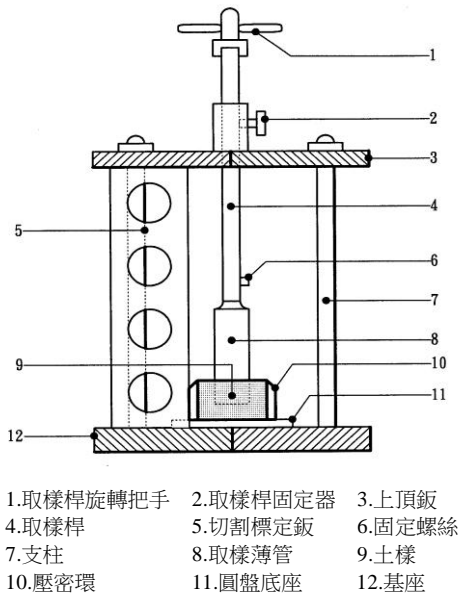
#### 4.4 實驗儀器及相關設備

為顧及試體製作之便利性、模擬機制與邊界條件之適確性、大量試體製作之需求以及滿足消化與化學作用所需等待時間等之考量，本研究同時採用八組單向度壓密試驗儀進行一系列改良前、後土體含水量變化之試驗，儀器剖面與排水機制如圖七所示。其中，覆土壓力之模擬係以槓桿配合砝碼加壓方式，確保長期試驗期間載重之穩定性，同時輔以變位計觀測試體之沉陷量，作為判斷壓密完成與否之依據。至於，其它相關設備尚包括：烘箱、電子秤及一般土壤含水量測定所需器皿、取土器與線鋸及軟刀等裁修設備，如圖八所示。此外，考量生石灰吸水放熱過程，溫度梯度(Temperature Gradient)具瞬變特性，需以極速熱電偶(Thermocouple)式溫度量測設備，同時配合數字式電表擷取裝置，以記錄反應期間溫度之變化情形。



- 1. 垂直變位計
- 2. 加壓架
- 3. 剛性加壓頂板
- 4. 上透水石
- 5. 生石灰樁體
- 6. 延伸環
- 7. 沉泥質黏土
- 8. 壓密環
- 9. 下透水石
- 10. 底座

圖七 單向度壓密儀剖面及排水機制示意圖



圖八 試體鑽孔示意圖

為有效模擬生石灰樁複合土體在現地之排水機制，試體上、下方皆以不透水膠片加以阻隔，迫使樁周土體內之水分向樁體呈徑向流動，最後再由樁體收集後上、下排出，如圖七中排水機制放大圖之說明。至於，在複合土體消化與化學反應過程中，為避免空氣中之水分進入土體或試體中之水分蒸發，進而影響反應機制之進行，則以保鮮膜將壓密盒加以密封。

#### 4.5 試驗方式

##### 4.5.1 土體含水量變化試驗

包含未改良土(即重模土樣)含水量( $w_0$ )試驗以及生石灰樁複合土體平均含水量( $\bar{w}$ )試驗兩部分。試驗過程中，基於改良前、後含水量差異之比較基準與試體再現性(*Reappearance*)需求等考量，經適當的流程規劃與試驗安排，於未改良土含水量試驗後，隨之進行生石灰樁複合土體平均含水量試驗。使其在同一試驗過程與同一試體上同時完成兩部分之試驗工作，主要程序如下：

- (1) 土樣重模後，將其分層搗實於壓密盒中，時以振動方式將土樣中之氣泡趕出，確保土樣之均勻性與飽和度，並使試體在飽和狀態下靜置 24 小時，隨後依所模擬之覆土壓力，分階施加所需之上方載重壓密之，壓密時間約需 24 小時。
- (2) 重模土樣預壓完成後，從壓密儀中移出壓密盒，利用線鋸將延伸環部分之土樣切除，並以

軟刀或鋼尺將試體表面修飾整平，然後再施以先前壓密時之應力壓密之。而由延伸環切除下來之土樣，則依含水量測定法之規定，取適量進入烘箱中烘乾 24 小時，以作為測定未改良土在正常壓密狀態下，覆土應力與含水量之關係。

- (3) 壓密完成後，移出壓密盒置於取土器正下方，依所需之體積改良率與樁體單位重等改良條件，以不同直徑之取土薄管將試體鑽孔，分層填入生石灰並搗實成所需密度之樁體，隨之埋設溫度感應棒於預定位置，最後再施以先前之壓密應力，使其在正常壓密狀態下進行消化反應。而在消化反應期間，則持續觀察並記錄數字式電表溫度之歷時變化。
- (4) 消化反應期間，為了避免土體中水分之蒸發及空氣進入試體而影響化學反應之進行，以保鮮膜加以密封，俟複合土體在不同上方載重作用下達所需之反應時間後，取出試體送入烘箱中，以測定樁周土體之平均含水量。

##### 4.5.2 土體濕單位重試驗

以本文所推導之分析模式評估生石灰樁降低土體含水量之能力時，須利用土壤本身之濕單位重 $\gamma$ 等參數進行計算。就某一改良土壤而言，雖然土壤濕單位重之變化範圍不大，但其值則與覆土壓力之大小有一曲線關係存在。試驗進行時，將重模土樣置於單向度壓密盒中，使其在不同覆土壓力作用下進行壓密，最後再測得土樣之重量，即可求得不同覆土壓力作用時土體所對應之濕單位重。

##### 4.5.3 消石灰樁體孔隙比試驗

消石灰樁體之孔隙比  $e_c$  亦為本文分析模式計算時所必須之參數，其值主要隨拘束壓力或覆土壓力之大小而異，可於實驗室中利用生石灰樁複合土體加以測定，主要試驗程序如下：

- (1) 將攪拌後之重模土樣輕輕搗實於直徑 6cm 之單向度壓密盒中，使土樣達延伸環約八分滿左右，並時以振動方式將土樣中之氣泡趕出，然後於室內靜置 24 小時。
- (2) 依所模擬之覆土壓力，分別將各壓密盒中之重模土樣分階逐次進行壓密之工作，以達所須模擬之覆土壓力層級，而各土樣之預壓約歷時 24

小時。

- (3) 壓密完成後，移出壓密盒置於取土器正下方，依所需之體積改良率與樁體單位重等改良條件，以不同直徑之取土薄管將試體鑽孔，分層填入生石灰並搗實成所需密度之樁體，使其在正常壓密狀態下進行消化反應。
- (4) 消化反應期間，壓密盒與試體以保鮮膜加以密封，俟複合土體在不同上方載重作用下達所需之反應時間後，由土體中取出樁體送入烘箱中，以測定樁體本身之含水量  $w_c$ ，即可由式 (14) 求得消石灰孔隙比  $e_c$  值之大小

#### 4.5.4 先行反應修正係數試驗

先行反應修正係數  $\alpha$  值可由實驗室中簡易求得，其測定方法如下：

- (1) 將實驗用之生石灰材料以四分法取出，然後再取定量(約 20g)之生石灰放入蒸發皿中，以作為測定其先行吸水反應之用。
- (2) 量取定量之蒸餾水(約 10g)加入裝有定量生石灰材料之蒸發皿中，並輕輕加以振動以使生石灰材料完全濕潤，隨後將其密封並靜置於室溫下以充分進行吸水反應。
- (3) 靜置 24 小時後，每隔 6 小時左右測定消石灰之重量，待其重量保持恆定時，即可分別測定消石灰材料在氣乾狀態下之重量及參與反應之水分重量。
- (4) 理論上生石灰材料可吸收相當於本身重量 32% 之水分以反應成消石灰，若其已有部分吸取空氣中之水分先行反應，則測定時所能吸取之水分必將低於理論值，故經由上述之試驗過程即可求得  $\alpha$  值之大小，意即

$$\alpha = \frac{W_{wa}}{W_{wt}} = \frac{W_{wa}}{0.32W_{sq}} \quad (35)$$

式中， $W_{wa}$  為實際參與反應之水分重量， $W_{wt}$  為理論上參與反應之水分重量，而  $W_{sq}$  則為生石灰材料之重量。

### 五、試驗結果與分析

首先探討未改良土覆土壓力與含水量之關係，其次再說明生石灰樁複合土體含水量之變化特性。

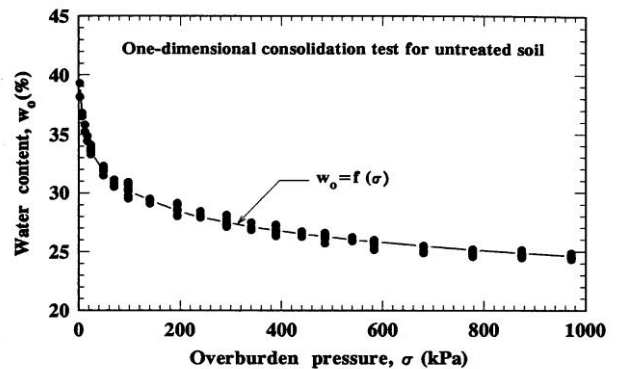
而在影響生石灰樁降低地盤含水量之因素中，本試驗分別針對時間之依存性(*Time-Dependence*)、樁體填充單位重與體積改良率等不同改良手段來進行分析。

#### 5.1 未改良土覆土壓力與含水量之關係

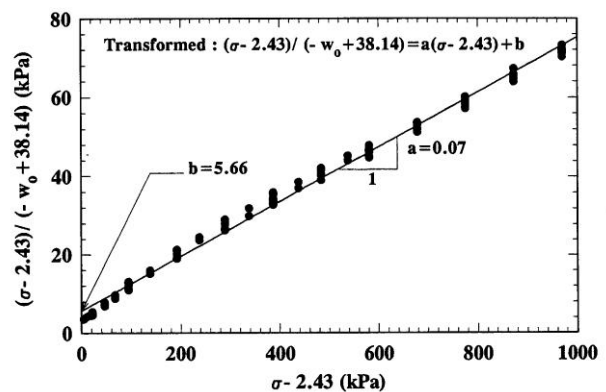
圖九顯示在單向度正常壓密條件下，未改良土覆土壓力與含水量間之關係，此即為本土樣在改良前初始含水量之大小，亦為評估生石灰樁降低樁周土體含水量功效時之比對依據。今為尋求一數學方程式以描述未改良土含水量與覆土壓力之關係曲線，進一步引用雙曲線模式(*Hyperbolic Model*)的觀念與作法[21]，進行座標軸之平移與轉換，將其正規化(*Normalize*)為圖十之轉換雙曲線，而土體含水量與覆土壓力間之關係即可表為

$$\frac{\sigma - 2.429}{-w_o + 39.279} = 2.573 + 0.068(\sigma - 2.429) \quad (36)$$

式中， $\sigma$  為覆土壓力(或壓密應，以 kPa 表之)，而  $w_o$  則為土體含水量之百分比。



圖九 未改良土覆土壓力與含水量關係之試驗結果



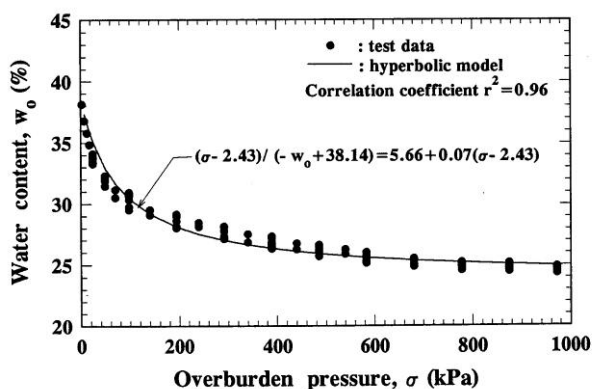
圖十 正規化後之未改良土覆土壓力與含水量關係

為說明雙曲線模式應用於本試驗結果之適確性，進一步引用統計學中之模式合宜性檢定因子 (Testing Factor)  $r^2$ ，稱為複判定係數(Coefficient of Multiple Determination)或相關係數(Correlation Coefficient) [22]，以作為衡量分析模式與實驗數據間配合程度之良莠，其數學表達式為

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (37)$$

式中， $0 \leq r^2 \leq 1$ ， $Y_i$  為各試驗數據之反應變數 (Response Variable，即縱座標之物理量)， $\bar{Y}$  為試驗數據之平均反應變數(即縱座標物理量之平均值)，而  $\hat{Y}_i$  則為分析模式中之反應變數。因  $r^2$  代表試驗資料中，反應變數值的變異部分可用最小平方迴歸方程式解釋之部分，故  $r^2=0$  表示模式完全無法解釋試驗結果，而  $r^2=1$  則是完美的配合，即模式通過試驗數據之每一點；換言之， $r^2$  值越大，則表示分析模式與實驗結果之相關性越強，兩者之配合度越高。

圖十一所示進一步指出，利用雙曲線模式模擬試驗資料之適確性，由其複判定係數  $r^2$  高達 0.96，顯示分析模式與試驗數據吻合之程度相當高；此即表示雙曲線模式可相當合理地用於描述本土樣覆土壓力與含水量之關係。此外，針對此未改良土含水量特性之試驗結果，吾人應可發現，台北沉泥質黏性土壤之重模土樣，其覆土壓力或壓密應力與含水量間具有雙曲線關係存在。



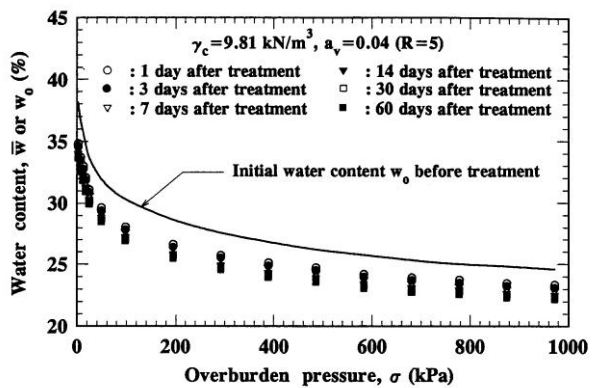
圖十一 未改良土覆土壓力與含水量之雙曲線方程

## 5.2 生石灰椿降低含水量之特性

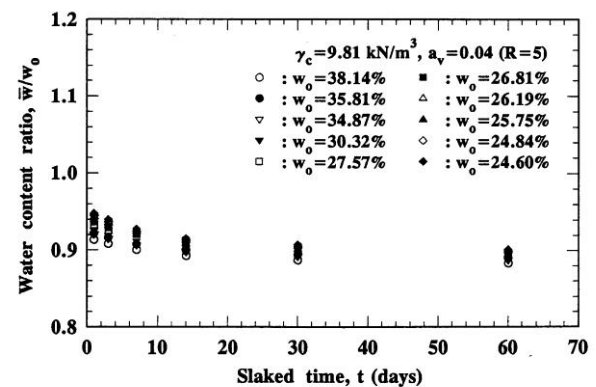
### 5.2.1 生石灰椿降低含水量之時間依存性

圖十二所示為在體積改良率  $a_v=0.04$ (或椿距比

$R=5$ )以及填充密度  $\gamma_c=9.81\text{kN/m}^3$  之改良條件下，生石灰椿複合土體於消化反應後，覆土壓力與含水量之關係。由圖中可得知，改良後壓密壓力與含水量間亦具有一類似雙曲線之關係，且不論消化反應時間  $t$  為 1、3、7、14、30 或 60 天，其變化趨勢均相類似。圖十三則為生石灰椿降低椿周土體含水量時間依存性之關係，圖中顯示，在實驗初始含水量 25%-40% 情況下，生石灰椿埋設後 1-3 天的時間，可迅速降低椿周土壤含水量達初始含水量之 10% 左右，與埋設後 30 或 60 天所能降低之能力相差極為微小。顯見乾燥之粉末狀生石灰材料對土體消化吸收之能力，可於椿體設置後極短時間內充分發揮，在降低軟弱黏性土壤之含水量上極具時效性。



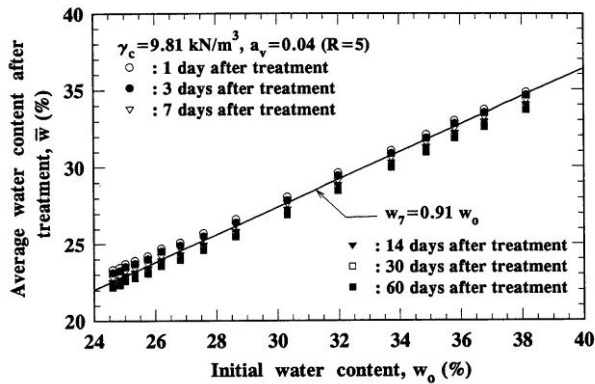
圖十二 生石灰椿複合土體覆土壓力與含水量關係



圖十三 生石灰椿降低土體含水量之時間依存性

隨著消化作用與化學反應之進行，椿周土壤之含水量雖可在毛細吸水作用下持續地降低，然因其成效已不明顯，故在實務應用上，評估生石灰椿降低地盤含水量之能力時，採消化吸收之短期效應即已足夠。因此，本試驗採用 7 天作為計算各種不同改良條件下生石灰椿降低含水量能力之依據。至於，圖十四之結果則進一步顯示，改良前

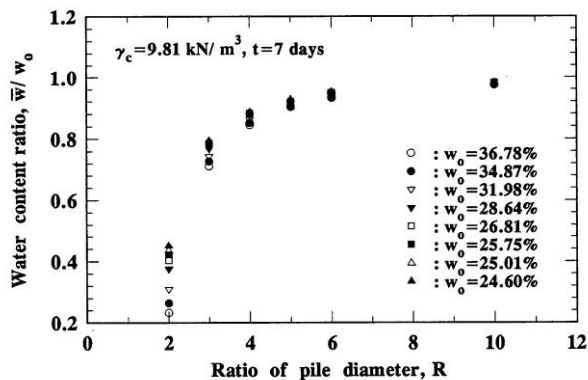
土壤初始含水量  $w_0$  與改良後樁周土壤之平均含水量  $\bar{w}$  間具有線性關係之變化，即在改良後約一週的時間，可降低達土壤初始含水量之 10% 左右。



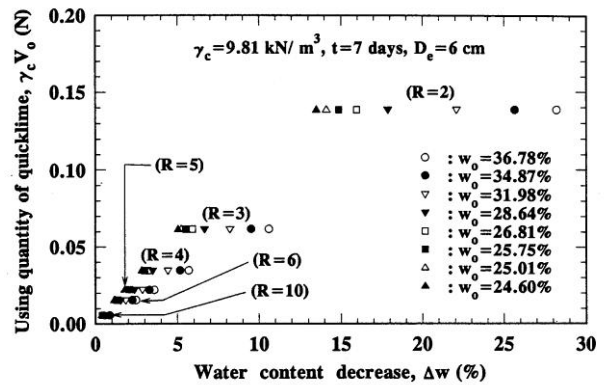
圖十四 改良前、後土體含水量之變化關係

### 5.2.2 體積改良率與含水量之降低量

現場施工中，以不同之體積改良率或樁距比設置生石灰樁時，由於生石灰材料投入量及徑向排水路徑之變化，其對改良土體含水量之降低能力將有所不同。圖十五顯示各種樁距比降低含水量之情形，在樁距比  $R \geq 6$  以上時，其能降低之含水量約在土體初始含水量之 5% 左右，顯然並不理想；然在樁距比  $R \leq 2$  以下時，雖能降低含水量高達土體初始含水量之 60% 左右，但其材料使用量將大為增加，如圖十六所示，反而不利於材料成本與經濟觀點。故在實務之改良上，基於生石灰材料之用量成本以及降低土體含水量能力之雙重考量下，採用樁距比  $R=3-5$ ，將可在含水量降低量上獲得較令人滿意之改良成效。此結果與趙國華等人(1962)[3]之試驗結果以及山村真澄等人(1991)[5]與宮本和夫等人(1992)[23]之施工實例所建議之結論相當一致。



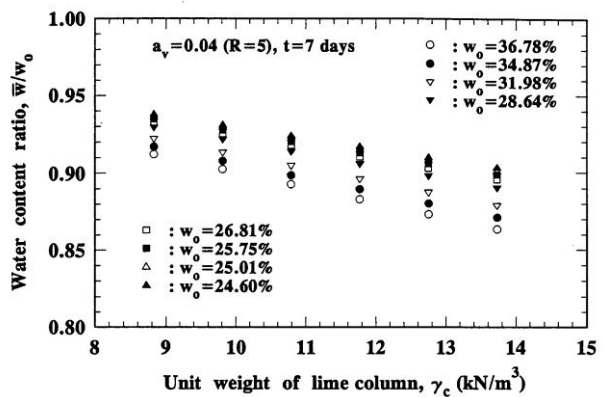
圖十五 各種不同樁距比降低土體含水量之差異



圖十六 含水量降低量、樁距比及石灰用量間之關係

### 5.2.3 樁體填充密度與含水量之降低量

生石灰樁體需具有足夠的填充密度與投入量，為保證其成樁後不軟心之重要條件[6]，且填充量之多寡與其降低土體含水量之能力亦息息相關，故採用適當之樁體填充密度，亦為現場降低地盤含水量主要之施工手段之一。依日本地區之經驗顯示，現場改良時採用之樁體填充密度一般約在  $\gamma_c = 11.77 \pm 0.98 \text{ kN/m}^3$  [16] 左右，圖十七則為各種不同樁體填充密度降低含水量之試驗結果。



圖十七 各種樁體填充密度降低土體含水量之差異

若進一步比較利用增加體積改良率及樁體填充密度之改良手段，兩者對於生石灰樁降低樁周土體含水量能力之良窳時，由上述圖十五及圖十七結果之比對可得知，採用提高體積改良率或降低樁距比的施工方式，由於生石灰投入量大為增加以及徑向排水(Radial Drainage)路徑的縮短等有利因素，故在降低樁周土體含水量之能力上，顯然較單純的提高樁體填充密度有較佳之改良功效。在日本地區，此結果對於天然含水量高於 50% 以上甚至 70% 或 80% 之極軟弱黏性土壤而言，在現地改良應用上，更常見將其作為調整改良條件之

首要考量。

## 六、分析模式之修正與驗證

### 6.1 分析模式之修正

理論上，生石灰樁降低地盤含水量之能力可由本文所提出之分析模式，即式(33)來加以評估，但在實際應用上，則須考慮生石灰材料本身之氧化鈣含量之純度，使用前是否因密封或儲藏不當等造成與空氣中水分接觸而先行反應，以及使用後未能充分吸水及放熱等問題，故式(33)之理論值應進一步修正，方能較符合實際之情形。

#### 6.1.1 先行反應部分之修正

由於生石灰之風化或使用前未完全密封，致使部分之生石灰材料與空氣中之水分先行吸水反應，無法完全如理論值吸取生石灰重量 32% 之水分，故吸水消化階段所能降低之含水量  $\Delta w_1$  應修正為

$$\Delta w_1 = \alpha \frac{0.32\gamma_c \cdot a_v(1+w_o)}{\gamma(1-a_v)} \quad (38)$$

式中， $\alpha$  為先行反應修正係數，可於實驗室中先測定生石灰吸水反應後之消石灰絕對乾重，再算出反應水之重量即可求得，其值通常約為 0.9 左右。本試驗用生石灰材料先後共進行八組試驗，測得其值介於 0.85-0.90 之間，故選用  $\alpha = 0.85$  作為修正之用。

#### 6.1.2 毛細反應不完全之修正

消石灰毛細階段之吸水能力，係假定其達充分飽和之濕潤狀態，然消石灰樁體在與周圍土壤達吸力平衡時，事實上可能無法完全達到飽和，且生石灰在反應過程將可能由於時間不充分或含有雜質等因素而反應不完全，故毛細吸水階段所能降低之含水量  $\Delta w_2$  應修正為

$$\Delta w_2 = \beta \frac{0.59\gamma_c \cdot a_v \cdot e_c(1+w_o)}{\gamma(1-a_v)} \quad (39)$$

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{(1+0.32\alpha)}{1.32} \cdot \beta_2 \quad (40)$$

式中， $\beta_1$  為生石灰消化反應不完全之修正值，而  $\beta_2$  則為消石灰不完全飽和之修正值。根據日本地區之研究資料，消石灰之飽和度一般介於 0.75-0.95 之間，而設計上則常採用 0.85 作為分析

之用[10, 11]。因此，消石灰不完全飽和之修正值  $\beta_2$  可取為 0.85，故毛細反應不完全之修正值  $\beta$  約為

$$\beta = \frac{(1+0.32 \times 0.85)}{1.32} \cdot 0.85 = 0.82 \quad (41)$$

#### 6.1.3 高溫反應不完全之修正

式(32)中高溫對土壤含水量之蒸發作用，係考慮生石灰樁體氧化鈣(CaO)之含量為 100% 時所能提供之熱量。然生石灰材料在燒製過程，其成分尚包含氧化鎂、氧化矽、氧化鋁、氧化鐵以及少量之二氧化碳等不同成份，並非百分之百為氧化鈣；加以搬運儲藏期間，部分生石灰材料可能已先與空氣中之水分反應成消石灰，以及生石灰消化期間可能產生不完全反應等因素，均將影響樁體之放熱作用與溫度變化。因此，進行高溫降低土壤含水量  $\Delta w_3$  之修正時，應同時考慮上述情況，所以

$$\Delta w_3 = \theta \frac{1166\gamma_c \cdot a_v(1+w_o) - c_s(T-T_o) \cdot \gamma(1-a_v)}{\gamma(1-a_v)[c_w(100-T_o) + L_w]} \quad (42)$$

式中， $\theta$  為高溫反應不完全之修正值，其值應為生石灰材料先行反應修正係數  $\alpha$  與生石灰消化反應不完全修正值  $\beta_1$  之乘積，如下

$$\theta = \alpha \cdot \beta_1 = 0.85 \frac{(1+0.32 \times 0.85)}{1.32} = 0.82 \quad (43)$$

綜合以上各反應過程之修正，生石灰樁降低地盤含水量之能力  $\Delta w$  可表為

$$\Delta w = \frac{a_v \cdot \gamma_c(1+w_o)}{\gamma(1-a_v)}(0.27+0.48e_c) + \frac{956\gamma_c \cdot a_v(1+w_o) - c_s(T-T_o) \cdot \gamma(1-a_v)}{\gamma(1-a_v)[c_w(100-T_o) + L_w]} \quad (44)$$

## 6.2 試驗結果之驗證

### 6.2.1 驗證前之準備工作

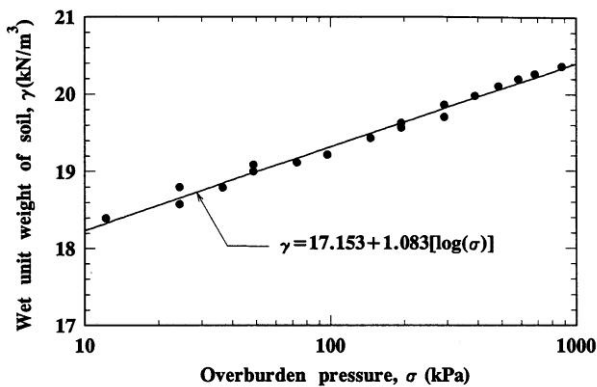
於實驗室進行試驗結果與分析模式之驗證時，由於複合土體單元模型之生石灰材料用量極少，以體積改良率  $a_v=0.04$ ，填充密度  $\gamma_c=9.81\text{kN/m}^3$  之改良條件為例，生石灰用量僅 0.022N 或 2.24g，實無法如同現場施工採用大量生石灰而產生高溫現象。根據日本部分地區之施工案例指出，現場消化反應所產生之放熱作用，依不同之改良條件而

異，其溫度可高達 300-600°C 左右[5, 15]。換言之，欲於實驗室中進行生石灰樁含水量降低量之評估時，由於受限於樁體材料用量及其熱源對土體水分之蒸發無法提供貢獻，故以式(44)進行估算時，高溫項所能降低之含水量應可忽略不計，意即

$$\Delta w = \frac{a_v \cdot \gamma_c (1 + w_o)}{\gamma (1 - a_v)} (0.27 + 0.48 e_c) \quad (45)$$

至於，欲將上式代入生石灰樁降低土體含水量之試驗結果，藉以驗證本文所提出之理論推導是否適確時，因必須同時獲得土樣之濕單位重與樁體之孔隙比大小，故實驗室中亦先後完成改良前土壤濕單位重以及消石灰樁體孔隙比隨覆土壓力之變化試驗。圖十八顯示土壤濕單位重  $\gamma$  與覆土壓力  $\sigma$  間具有一關係曲線存在，在半對數座標軸上約成線性變化，其數學式則可表為

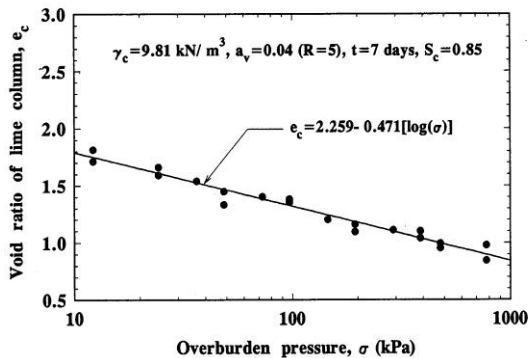
$$\gamma = 17.153 + 1.083 \log \sigma \quad (46)$$



圖十八 未改良土濕單位重與覆土壓力之關係

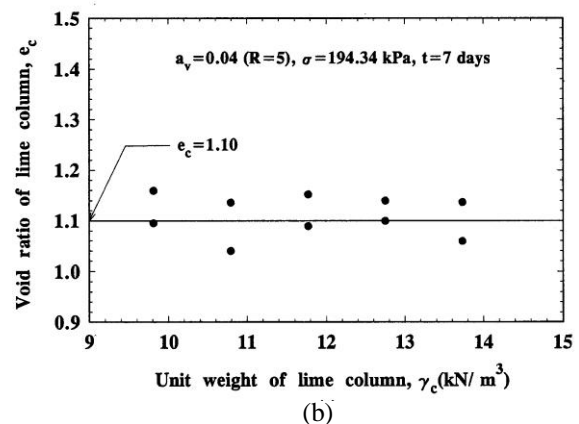
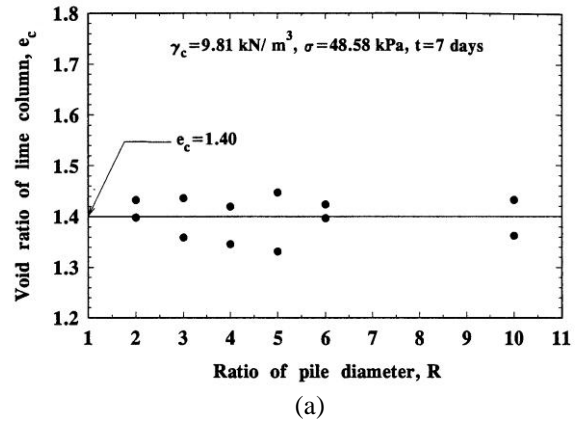
圖十九之試驗結果則進一步顯示，在某一改良條件下，消石灰樁體孔隙比  $e_c$  值隨覆土壓力  $\sigma$  之變化情形。由圖中可得知，兩者在半對數座標軸上亦有一類似線性之關係存在，如下

$$e_c = 2.392 + 0.531 \log \sigma \quad (47)$$



圖十九 消石灰樁體孔隙比與覆土壓力之關係

樁體孔隙比主要雖隨覆土壓力之大小而變化，然不同之改良條件亦可能影響  $e_c$  值之反應，故為進一步檢視可能之相關影響變因，於實驗室中針對樁距比  $R$  與樁體之填充單位重  $\gamma_c$  等改良條件進行試驗，其結果分別如圖二十(a)、(b)所示。圖中顯示，針對某一覆土壓力作用下，樁體孔隙比之反應並不受樁距比或樁體單位重等改良條件之影響。換言之，消石灰樁體孔隙比主要隨覆土壓力之大小而改變，而與樁距比及樁體單位重之大小無關。



圖二十 不同改良條件下之消石灰樁體之孔隙

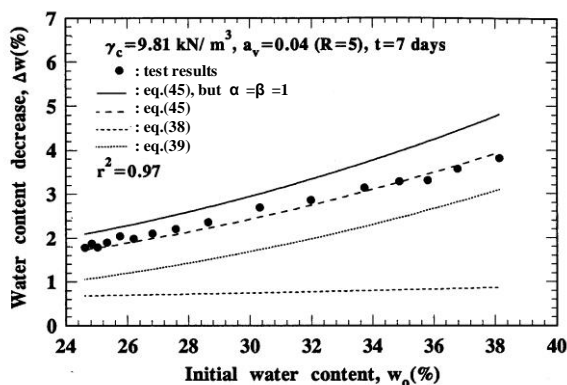
### 6.2.2 驗證過程

利用式(45)進行生石灰樁複合土體含水量降低量  $\Delta w$  之計算，以及進一步與試驗結果比對並檢驗其在評估上之適用性時，主要之步驟如下：

- (1) 首先，選定或針對未改良土之某一初始含水量  $w_o$ ，由圖九或式(36)求得該  $w_o$  值所對應之  $\sigma$  值大小。其中，不同之土壤初始含水量即表示該土壤所處之深度或所承受之覆土壓力不同。
- (2) 一旦覆土壓力之大小決定後，分別由圖十八或式(46)以及圖十九或式(47)求得土壤濕單位重  $\gamma$  與樁體孔隙比  $e_c$  值之大小。

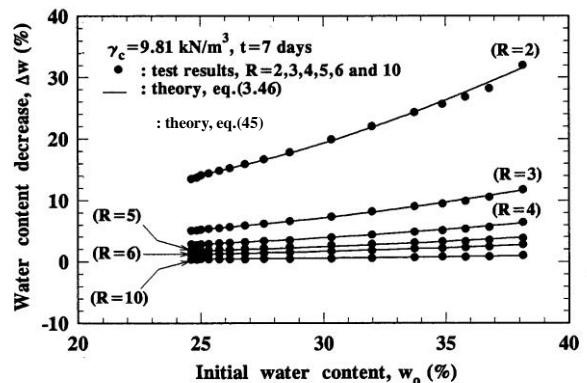
- (3) 確定改良條件體積改良率  $a_v$  與樁體填充單位重  $\gamma_c$  值之大小。
- (4) 將上述未改良土之  $w_0$  與  $\gamma$  值，改良條件  $a_v$  與  $\gamma_c$  值，以及樁體之  $e_c$  值代入式(45)中，即可計算某一初始含水量之未改良土經生石灰樁處理後所能降低之含水量 ( $\Delta w$ ) 大小。
- (5) 最後，比對式(45)所計算出之  $\Delta w$  值與試驗所獲得之  $\Delta w$ ，由兩者間之吻合與否，即可得知理論值與試驗值間之差異性及理論分析之適用性。

圖二十一顯示在樁距比  $R=5$ ，樁體單位重  $\gamma_c=9.81 \text{ kN/m}^3$  之改良條件下，於消化反應一週後，生石灰樁降低樁周土體含水量之試驗結果與理論值式(45)之比較。由圖中可初步得知：在忽略熱量降低土壤含水量之情況下，若評估之理論值未進行修正時(即  $\alpha = \beta = 1$ )，理論值將高估生石灰樁降低含水量之能力；但在修正後，理論值與試驗結果則相當吻合，兩者之相關係數  $r^2$  高達 0.97，顯示式(45)可適確地描述實驗數據。換言之，修正後之分析模式可合理地評估樁體降低土壤含水量之大小。至於，在生石灰樁埋設後之吸水過程中，毛細階段對土壤含水量之降低能力  $\Delta w_2$ ，將遠比吸水消化階段  $\Delta w_1$  有較高之貢獻；此乃由於消化吸水反應之速率雖快速，但其歷時卻極為短暫，不若毛細吸水作用隨著消化與化學反應之進行，持續地對樁周土壤進行較長時間之吸水作用。此外，在初始含水量 25-40% 的試驗條件下，當土壤之初始含水量愈高時，生石灰樁所能降低的含水量則愈顯著；此意味著在現地之實務改良上，對於高含水量之極軟弱黏性地盤，生石灰樁將可充分且持續地發揮其降低土體含水量之效益。

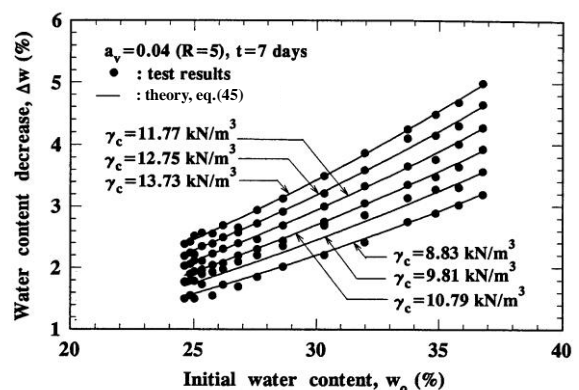


圖二十一 含水量降低量試驗值與評估模式之比較

圖二十二與圖二十三所示，係分別在各種不同樁距比與不同樁體單位重之改良條件下，式(45)計算值與實驗結果之比對情形。圖中顯示，理論分析與各種實驗條件之驗證皆可獲得令人滿意之結果；換言之，利用本文所自行推導之理論分析模式，應可有效地作為實驗室中評估生石灰樁降低樁周土體含水量能力之依據。此外，為比較本分析模式與參考文獻中[3, 12-14]等其他學者所提出方法在實際評估上之差異，進一步將改良試驗條件與相關參數分別代入式(1)、式(2)、式(3)、式(4)以及式(45)中，並將各式之分析值與試驗結果繪製於圖二十四。圖中顯示，各分析模式與試驗結果之相關性中，以本文及式(2)之分析方式最能合理地描述生石灰樁複合土體含水量之變化情形，式(1)及式(4)次之，而式(3)之差異性則最大(因其將高溫蒸散之功效考量在內)。



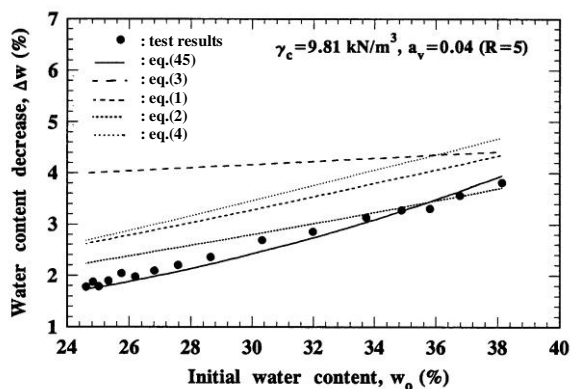
圖二十二 不同樁距比試驗值與評估模式之比較



圖二十三 不同樁體密度試驗值與評估模式之比較

本文所提出之分析模式，雖係以黏性土壤為改良對象，然在推導過程中，僅以生石灰樁消化反應之基本特性、土壤之相態關係、改良配置條件以及配合熱力學等基本定理，分別考慮消化吸水、毛細吸水及高溫蒸發作用各階段所能降低含水量

能力之總和，完全不涉及土壤本身之工程特性。故就適用性而言，只要待改良之土壤其含水量能滿足消化反應所須之基本要求(即原地盤之含水量低於 6%時，埋入的生石灰樁體將毫無作用，又當埋設於含水量低於 15%之土層中時，生石灰樁體與土壤間之化學反應即不能完全反應[24])，理論上則式(45)之應用應不侷限於軟弱之黏性土壤。然就工程效益而言，生石灰樁工法一般並不適用於砂性土壤之改良。



圖二十四 各種不同評估模式與試驗值之比較

### 七、結論

本研究結合理論分析及模型試驗之結果，可獲得下列幾點結論：

(1)台北基 1 區第四次層之沉泥質黏土，其重模土樣之覆土壓力  $\sigma$  與含水量  $w_o$  間，可以雙曲線模式加以描述，兩者間並具有如下之關係

$$\frac{\sigma - 2.429}{-w_o + 39.279} = 2.573 + 0.068(\sigma - 2.429)$$

(2)生石灰樁埋設於高含水量之軟弱黏性土壤中，可在 1-3 天內迅速降低地盤之含水量達土壤初始含水量之 10% 以上，顯見其降低土壤含水量之能力極具時效性與功效性。

(3)利用提高體積改良率  $a_v$  或樁體填充密度  $\gamma_c$  之施工方式，對於降低土壤含水量皆具功效，然提高體積改良率的作法將比增加樁體密度之方式具有較佳之改良成效。

(4)在不同改良條件之效益中，利用樁距比  $R=3-5$  以及樁體密度  $\gamma_c=10.79-12.75\text{kN/m}^3$  之改良條件，在顧及材料成本與樁降低土壤含水量能力之雙重考量下，可獲得令人滿意之改良效果。

(5)未改良土之初始含水量愈高，生石灰樁之處理成效則愈顯著。此外，在生石灰樁埋設後之吸水過程中，毛細階段對土壤含水量之降低能力  $\Delta w_2$ ，將遠比吸水消化階段  $\Delta w_1$  有較高之貢獻。

(6)本文所提出之分析模式，在忽略熱效應的貢獻下，對於實驗室中預測生石灰樁降低周圍土體含水量之能力，可獲得令人滿意的結果，其方程式為

$$\Delta w = \frac{a_v \cdot \gamma_c (1 + w_o)}{\gamma (1 - a_v)} (0.27 + 0.48e_c)$$

(7)本文分析模式用於現場施工時之預測，由於國內目前尚未見合適案例可茲分析，無法於本文說明其適確性，然由理論分析的觀點與實驗室之驗證結果，推論其在現地預測之適用性應可信賴，方程式為

$$\Delta w = \frac{a_v \cdot \gamma_c (1 + w_o)}{\gamma (1 - a_v)} (0.27 + 0.48e_c) + \frac{956\gamma_c \cdot a_v (1 + w_o) - c_s (T - T_o) \cdot \gamma (1 - a_v)}{\gamma (1 - a_v) [c_w (100 - T_o) + L_w]}$$

### 參考文獻

[1]Lambe, T. W. and R. V. Whitman, Soil Mechanics, SI Version, John Wiley and Sons, New York, pp.52-60 (1979).

[2]Holtz, R. D. and W. D. Kovacs, An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, pp.77-637 (1981).

[3]趙國華、邱錕源，「用生石灰柱體處理台北沉泥之研究」，國立台灣大學工學院工程學刊，第 7 期，第 1-9 頁(1962)。

[4]Broms, B. B. and P. Boman, "Lime Column-A New Foundation Method," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.105, No.GT4, pp.539-556 (1979).

[5]山村真澄、山崎光行，「生石灰杭工法 最近施工例」，基礎工，第 19 卷，第 6 期，第 68-73 頁(1991)。

[6]唐念慈、韓選江，建築物增層改造基礎拖換技術應用，南京大學出版社，南京，第 117-128 頁(1992)。

- [7]Brandl, H., "Alternation of Soil Parameters by Stabilization with Lime," Proceedings of 10th ICSMFE, Vol.2, Stokeholm, pp.587-594 (1981).
- [8]Holm, G., Bredenberg, H. and B. B. Broms, "Lime Column as Foundation for Light Structures," Proceedings of 10th ICSMFE, Vol.2, Stokeholm, pp.761-764 (1981).
- [9]稻田倍穗, 軟弱地盤 土質工學, 鹿島出版會, 第 347-348 頁(1981)。
- [10]松尾新一郎 監修, 特許 石灰安定處理工法, 日刊工業新聞社, 第 1-194 頁(1977)。
- [11]日本石灰協會石灰安定處理工法委員會編, 石灰 軟弱地盤 安定處理工法, 鹿島出版社, 第 1-233 頁(1983)。
- [12]伊東範雄, 「生石灰 地盤改良」, 日刊工業新聞社, 第 106-110 頁(1969)。
- [13]福岡正己, 最新 之軟弱地盤處理工法, 近代圖書, 東京(1982)。
- [14]奧村樹郎, 「生石灰杭工法 設計 . . . 」, 第 11 回土質工學會研究發表會講演集, 第 278-281 頁(1976)。
- [15]Hausmann, M. R., Engineering Properties of Ground Modification, McGraw-Hill Publishing Company, pp.308-314 (1990).
- [16]Van Impe, W. F., Soil Improvement Techniques and Their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.42-72 (1989).
- [17]Cravalho, E. G and J. L. Smith, Engineering Thermodynamics, Yi Hsien Publishing Co., Taipei, pp.218-274 (1984).
- [18]Zemansky, M. W. and R. H. Dittman, Heat and Thermodynamics, McGraw-Hill Book Co., New York, pp.3-24 (1981).
- [19]Brutsaert, W., Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel Publishing Co., Boston, pp.37-56 (1982).
- [20]Kezdi, A., Stabilized Earth Roads, Developments in Geotechnical Engineering 19, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, pp.103-174(1979).
- [21]Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S. and P. Mabry, "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses," Report No. UCB/GT/80-01, College of Engineering Office of Research Services, University of California Berkeley, California, pp.4-10 (1980).
- [22]戴久永, 統計概念與方法, 三民書局印行, 台北, 第 437-551 頁(1991)。
- [23]宮本和夫、小尺弘毅、山村真澄, 「生石灰杭地盤改良工事. 安全管理」, 基礎工, 第 20 卷, 第 7 期, 第 50-56 頁(1992)。
- [24]蕭信雄, 「石灰柱體在沉泥中發生固結作用之分析」, 碩士論文, 國立台灣大學土木工程研究所, 台北(1964)。

