

# 土壤水泥力學性質試驗之研究

蔡佩勳\* 李承峰\*

\*朝陽科技大學營建工程系

## 摘要

本研究主要是探討土壤粒徑組成與高爐水泥添加量對土壤水泥力學性質之影響，研究所用的土壤係取自烏溪橋河岸，且通過 200 號篩的細粒土壤含量固定為 10%，均勻係數分別訂為 2、10、20 及 30，即一組均勻級配和三組優良級配的土壤。再添加不同添加量的高爐水泥，製成土壤水泥試體。經過夯實試驗、乾濕試驗、單壓試驗與巴西張力試驗，探討其力學性質隨高爐水泥添加量之影響。由研究結果顯示，級配良好的土壤所製成土壤水泥，其最大乾密度較高，最佳含水量較低。在相同水泥添加量下，土壤均勻係數越高，土壤水泥最佳含水量越低，並且最佳含水量隨水泥添加量的增加而減少。在乾濕試驗方面，級配越良好的土壤，抗磨損能力較高，並且土壤水泥抗磨損能力，會隨高爐水泥添加量增加而增加。在強度試驗方面，土壤水泥的單壓或張力強度會隨著養護齡期增加而增加，同時強度也會隨著水泥添加量增加而增加，土壤水泥的 28 天單壓強度約為 7 天單壓強度的 1.68 倍，28 天張力強度約為 7 天張力強度的 1.30 倍，土壤水泥單壓或張力強度隨著最大乾密度的增加而增加，並且呈現線性關係。在相同水泥添加量下，彈性模數  $E_{50}$  隨著均勻係數的增加而增加，級配越優良，單壓或張力強度越高。級配越優良越適合作為土壤水泥的土壤材料，高爐水泥添加量約為 10% 時，即可達波特蘭水泥協會(PCA)耐久性和強度規範的要求，但仍需依照現場土壤粒徑分佈而有所增減。

**關鍵字：**高爐水泥、土壤水泥、單壓試驗、乾濕試驗

## 一、前言

國內河川砂石料源日漸枯竭，如何尋求替代材料成為一個重要的課題。國內一般土石壩之壩面防護措施，傳統是以拋石料來保護。惟在壩址附近如果無法取得良好之拋石材料，或由於運距過長使成本增加，以及在考量運輸過程可能造成環境之衝擊情況下，尋求另一種替代材料是值得考慮的。

如能依現地土壤，添加適當的水泥和水量，加以均勻拌和，經適當能量之滾壓與養護，則可以改變土壤力學性質，使土壤達到所需工程的強度，此種添加水泥的土壤稱為土壤水泥(soil cement)。土壤水泥應用在壩工方面，除了大壩坡面可使用土壤水泥外，水庫淹沒區之邊坡也可使用土壤水泥。因土壤材料為現地土壤，所以可降低成本。因此，土壤水泥具有經濟性，施做土壤水泥不但可研發出新材料的應用，並且可解決砂石不足的問題。

水泥材料費用在土壤水泥經費中所佔比例很大，因此如何降低水泥用量，並製造出合用之土壤水泥，以符合工程需求，是值得加以研究的。當然不同土壤所需之水泥用量也因此不同，為了達到經濟的目標，以級配優良的土壤，可能會使用較少的水泥用量。因此，配合現地土壤之顆粒組成，來製作土壤水泥試體，可以用優良級配的土壤來施作，以產生出具經濟性的土壤水泥。為了探討土壤粒徑組成對土壤水泥之影響，所以本研究將調配一組均勻級配和三組不同粒徑的優良級配，經過試驗找出符合規範下，添加材料的最佳添加量，並探討其力學性質之變化。研究中的添加材料為高爐水泥，此種水泥目前於國內軟弱土壤之地盤改良方面皆有使用，由於高爐水泥具有卜索蘭特性，若能

善加利用以取代部分水泥用量，不但可以節省材料成本，亦可將廢料做有效資源化再利用，減輕對環境所造成之污染，具環保意義及經濟性。

土壤水泥在 1915 年最早應用在美國佛羅里達州，當時是使用砂、貝屑、波特蘭水泥為材料，以夯實方法在街道施工，之後土壤水泥就陸續被應用在機場、停車場及高速公路等工程上。傳統的土石壩坡面多以鋪設拋石為主要護坡工法，美國墾務局 (U.S. Bureau of Reclamation, USBR)[1]，針對土壤水泥作為拋石護坡替代案進行研究，其結果顯示砂性土壤和水泥拌合而成的土壤水泥具有良好的耐久性及抗侵蝕能力。在 1951 年科羅拉多州東部的 Bonny 水庫建造土壤水泥護坡試驗段，施做長期現地試驗進一步評估土壤水泥使用在護坡之適用性，此試驗段承受天然環境的考驗包括冰撞、浪擊以及凍融循環等考驗，經過十年的評估後，認定土壤水泥可作為拋石護坡的替代方案。

## 二、研究目的

本研究之目的將分述如下

1. 討論不同粒徑分佈之土壤水泥與最佳含水量的關係。
2. 在最佳含水量下，討論土壤水泥之耐久性、單壓強度與張力強度隨高爐水泥添加量之影響。
3. 分析土壤水泥各力學性質與最大乾密度之關係。

## 三、試驗材料與方法

### 3.1 試驗材料

因為烏溪砂石料源充裕，離朝陽科技大學很近，所以本研究採用烏溪砂石作為土壤水泥之料源，粒料取得後經氣乾並進行篩分析，此土壤依據統一土壤分類屬均勻級配砂(SP)，依據 AASHTO 分類屬 A-3 無塑性細砂[2]。

本研究所使用之高爐水泥為中聯爐石處理資源化股份有限公司品管室所提

供之 HSC301 型高爐水泥。

### 3.2 試驗方法

研究流程分列如下：

1. 將土壤以不同篩號篩網(# 4、# 10、# 20、# 60、# 100 及 # 200)組成放入電動搖篩機進行篩分析，並將不同尺寸粒料分別放入加蓋的儲存箱內。
2. 通過 200 號篩的細粒含量固定為 10%，均勻係數分別 2、10、20、30，使用不同篩網控制通過百分比，依據此原則調配一組均勻級配和三組優良級配，如圖 1 所示。

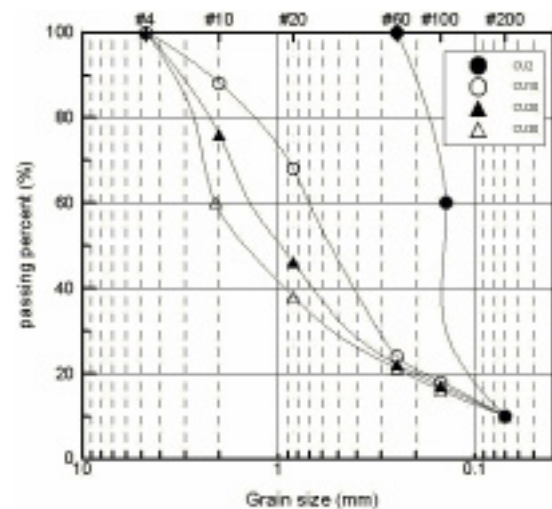


圖 1 粒徑分佈曲線

3. 以最佳含水量來製作土壤水泥試體，進行乾濕試驗並得到符合耐久性規範要求的最低水泥量。
4. 依最低水泥量逐次增加 2% 水泥量，配合夯實試驗求得最佳含水量，製作單壓試驗(compression test)試體以及巴西張力試驗(Brazilian tensile test)試體，分別養護 7 及 28 天後，進行單壓試驗以及巴西張力試驗，探討土壤水泥強度與高爐水泥添加量之關係。

## 四、試驗結果與討論

### 4.1 夯實試驗結果與討論

#### 4.1.1 水泥添加量和最佳含水量之關係

由圖 2 水泥添加量和最佳含水量關係圖顯示，最佳含水量會隨水泥添加量的增加而減少。在同樣水泥添加量下，均勻係數越高者，最佳含水量越低。

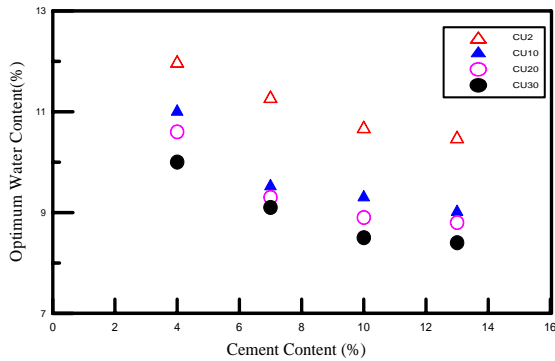


圖 2 水泥添加量和最佳含水量關係圖

#### 4.1.2 水泥添加量和最大乾密度之關係

由圖 3 水泥添加量和最大乾密度關係圖顯示，最大乾密度會隨水泥添加量的增加而增加，但因水泥添加量不高，沒有很明顯的趨勢。在同樣水泥添加量下，最大乾密度會隨均勻係數的增加而增加，江煥洋 (2003) [3] 在他的研究中也有相同的結論。

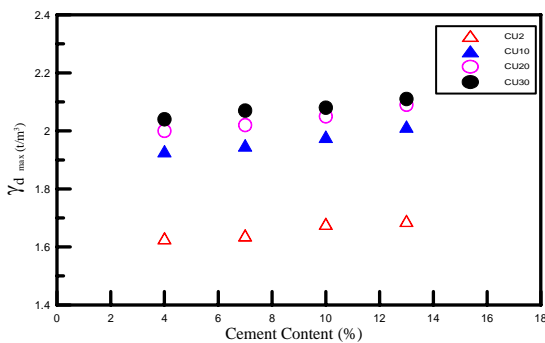


圖 3 水泥添加量和最大乾密度關係圖

#### 4.1.3 最佳含水量和最大乾密度之關係

由圖 4 不同土壤級配的最佳含水量和最大乾密度關係圖顯示，土壤水泥最大乾密度隨最佳含水量的增加而減少，且最大乾密度隨均勻係數的增加而增加，級配良好的土壤材料，即 CU 值較大，土壤水泥的最大乾密度會較高，而最佳含水量會較低。

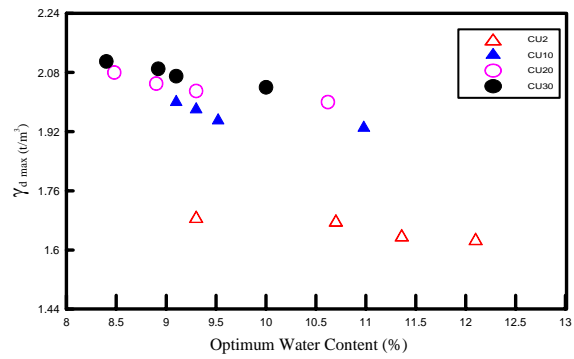


圖 4 最佳含水量和最大乾密度關係圖

### 4.2 乾濕試驗結果與討論

#### 4.2.1 水泥添加量和土壤損失率之關係

為了評估土壤水泥在乾濕試驗之耐久性，本文將以土壤重量損失率作為評估標準，而土壤重量損失率  $L$  為乾濕試驗前之土壤水泥乾重量與經過 12 次乾濕循環後土壤水泥之乾重量之差值除以乾濕試驗前之土壤水泥乾重量。如果依據 PCA [4] 規範之規定，土壤水泥重量損失率不得超過 14%，由圖 5 水泥添加量和土壤損失率關係圖可看出，符合 PCA 規範下，CU2 和 CU10 最低水泥添加量為 7%，CU20 和 CU30 最低水泥添加量為 4%，並且發現土壤損失率會隨著均勻係數增加而減少，即 CU 值越高，優良級配的土壤所製作之土壤水泥，重量損失率較少，因此優良級配的土壤水泥較能抵抗磨損。由圖中可看出水泥添加量為 10% 時，土壤水泥之重量損失率皆不超過 1.5%，當水泥添加量達 13% 時，其重量損失率皆不超過 1%。所以土壤損失率會隨著水泥添加量增加而減少。

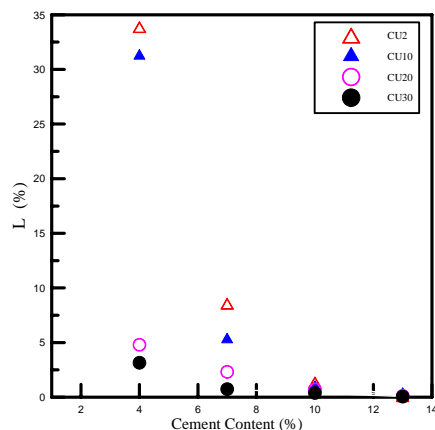


圖 5 水泥添加量和土壤損失率關係圖

#### 4.2.2 養護歷時和重量變化率之關係

為了了解土壤水泥在整個乾濕試驗過程中，土壤水泥隨試驗歷時之變化，本研究將參考中興工程顧問社（2003）[5]所採用之重量變化率，來分析土壤水泥在試驗過程中重量隨時間變化。而重量變化率  $W$  的計算方法為每次循環後土壤水泥之乾重量與土壤水泥初始乾重量之差值除以土壤水泥初始乾重量。每一次乾濕循環後，於試體周圍分成 18~20 等份，每等分用標準鋼刷施以正向力 11.3N 刷 2 下，試體頂面、底面亦用相同力刷 4 下。由圖 6 可看出重量變化率會隨著水泥量減少而增加，由圖中也可發現土壤水泥試體隨著試驗時間的增加，其重量變化率隨之增加。水泥添加量固定為 7%，討論不同土壤級配所製成之土壤水泥試體，在乾濕試驗過程中重量變化率與時間之關係，如圖 7 所示，由圖中可看出，級配良好的土壤材料，所製成土壤水泥之重量變化率越小，其可能原因為均勻級配土壤顆粒膠結程度較差，刷試體時較易損失其重量。所以，土壤水泥級配優良時，越具耐久性。

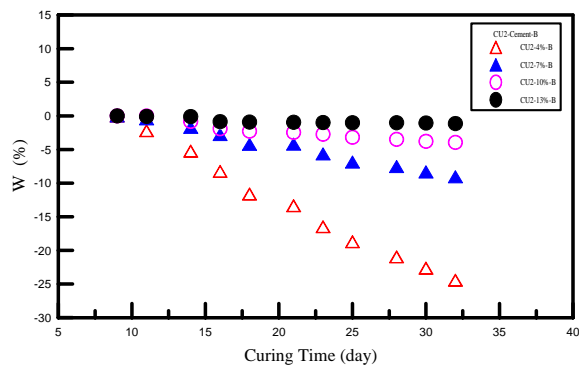


圖 6 試驗歷時和重量變化率關係圖(CU2)

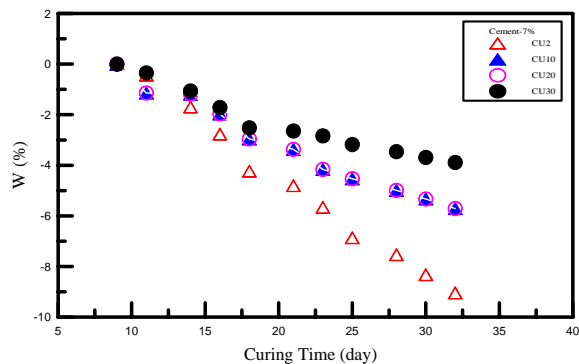


圖 7 試驗歷時和試體重量變化率關係圖

#### 4.3 單壓試驗結果與討論

本研究單壓試驗主要是求土壤水泥單壓強度或  $E_{50}$  與水泥添加量之關係。彈性模數  $E_{50}$  為應力等於 50% 單壓強度時之應力-應變曲線的割線模數，即 50% 單壓強度之應力與應變之比值。依據土壤水泥單壓試驗方法(ASTM 1633-00)，進行單壓試驗，本研究為了了解土壤水泥耐久性與強度要求之高爐水泥添加量。因此本研究擬先控制土壤水泥以滿足 PCA 在耐久性之規範下，再來討論水泥添加量與單壓強度之關係。所以添加的水量為夯實試驗求出的最佳含水量，高爐水泥添加量為乾濕試驗所得的最低高爐水泥量，再逐次增加 2% 的高爐水泥量，因此 CU2 和 CU10 高爐水泥添加量將定為 7%、9%、11% 及 13%，CU20 和 CU30 高爐水泥添加量為 5%、7%、9% 及 11%。每組試驗將製作兩個試體，試體均勻拌合後，經養護 7、28 天進行單壓試驗。

##### 4.3.1 水泥添加量和單壓強度之關係

由圖 8、9 顯示，水泥添加量 9% 之土壤水泥經過養護 7 天後，CU2 的單壓強度為  $26.61 \text{ kg/cm}^2$ ，CU10 的單壓強度為  $30.1 \text{ kg/cm}^2$ ，CU20 的單壓強度為  $54.81 \text{ kg/cm}^2$ ，CU30 的單壓強度為  $70.97 \text{ kg/cm}^2$ 。所以，在同一水泥添加量下，級配越優良，單壓強度會越高。並且單壓強度也隨著水泥添加量的增加而增加。如果將土壤水泥在養護 28 天後之強度與養護 7 天之強度的比值來討論，發現由圖 4.10 發現 28 天單壓強度約為 7 天單壓強度的 1.7 倍左右。

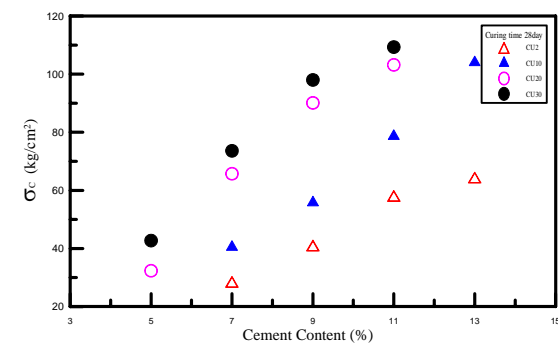


圖 8 水泥量和單壓強度關係圖(養護 7 天)

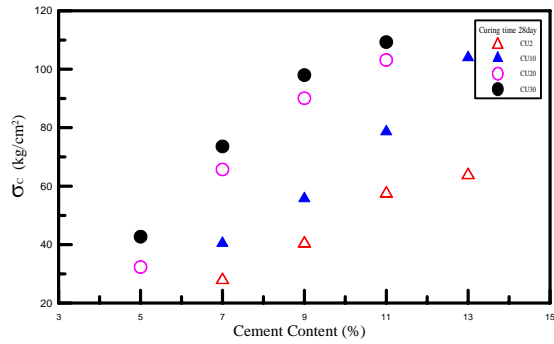


圖 9 水泥量和單壓強度關係圖(養護 28 天)

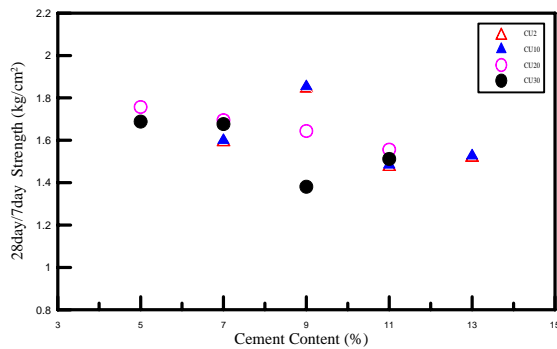


圖 10 水泥添加量和單壓強度關係圖

#### 4.3.2 水泥添加量和 E<sub>50</sub> 之關係

由圖 11 可看出，彈性模數 E<sub>50</sub> 隨著高爐水泥添加量的增加而增加，其關係趨近於線性。在同水泥量下，彈性模數 E<sub>50</sub> 隨著均勻係數的增加而增加。

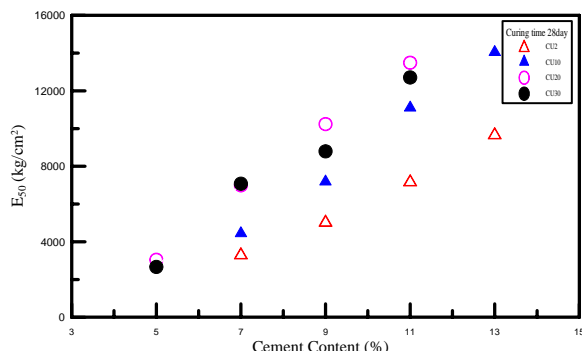


圖 11 水泥添加量和 E<sub>50</sub> 關係圖(28 天單壓強度/7 天單壓強度)

#### 4.3.3 單壓強度和彈性模數 E<sub>50</sub> 關係

土壤水泥之單壓強度和彈性模數 E<sub>50</sub> 之關係圖，如圖 12、圖 13 所示。彈性模數 E<sub>50</sub> 隨著單壓強度之增加而增加。同時 28 天單壓強度和 E<sub>50</sub> 的關係比 7 天者更接

近線性關係。

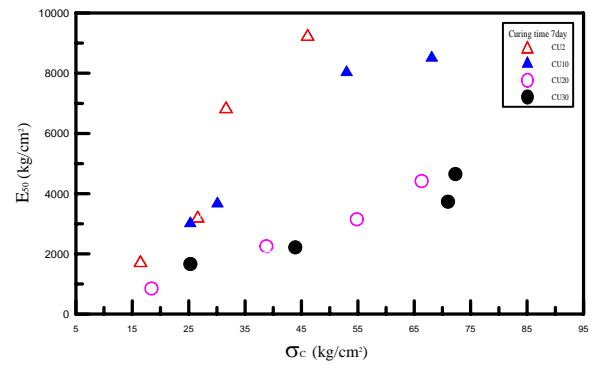


圖 12 單壓強度和 E<sub>50</sub> 關係圖(7 天)

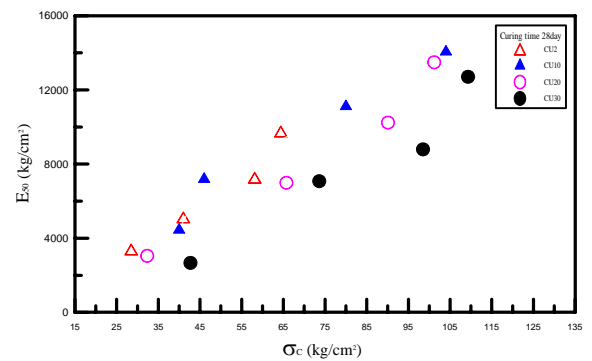


圖 13 單壓強度和 E<sub>50</sub> 關係圖(28 天)

#### 4.3.4 養護齡期和單壓強度關係

土壤水泥單壓強度與養護齡期之關係，如圖 14、15 所示。由圖可看出，土壤水泥的單壓強度隨著養護齡期的增加而增加，並且隨著水泥添加量增加時，單壓強度也隨之增加。試驗中發現，高爐水泥會填補試體孔隙，夯實後的試體更為緊密，試體單壓破壞時，易產生脆性破壞。並且試體會因養護時間越長，強度越強時，破壞時更容易產生脆性破壞。

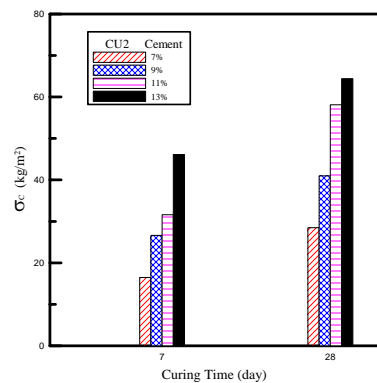


圖 14 養護齡期和單壓強度關係圖(CU2)



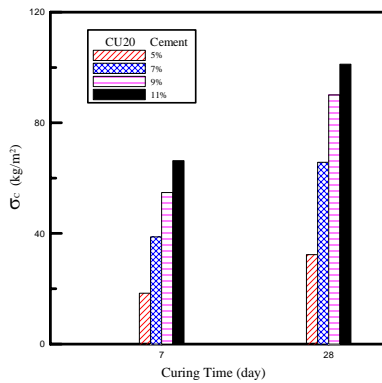


圖 15 養護齡期和單壓強度關係圖( CU20 )

#### 4.3.5 最大乾密度和單壓強度之關係

圖 16 為土壤水泥最大乾密度和單壓強度圖之關係，並進行迴歸分析，由圖中可發現土壤水泥之單壓強度會隨著最大乾密度的增加而增加，並且大致為線性關係，此點和江煥洋(2003)[3]所做的研究結果相似。

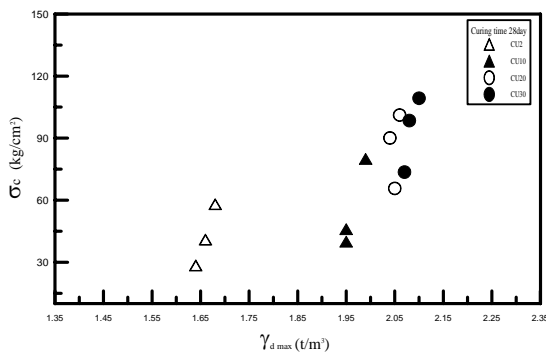


圖 16 最大乾密度和單壓強度關係圖(養護 28 天)

#### 4.3.6 符合 PCA 強度規範的最少水泥量

依據 PCA[4]、美國墾務局(USBR)[1] 規範規定：

- (1) 無圍壓縮強度(ASTM D1633)7 天強度不得低於 42 kg/cm<sup>2</sup>。
- (2) 無圍壓縮強度(ASTM D1633)28 天強度不得低於 61 kg/cm<sup>2</sup>。

由本研究之單壓試驗結果顯示，符合上述規範之單壓強度規範的最少水泥量分別為 CU2 最少水泥量為 13%，CU10 最小水泥量為 11%，CU20 最少水泥量為 9%，CU30 最少水泥量為 7%。

## 4.4 巴西張力試驗結果與討論

本研究巴西張力試驗主要是求土壤水泥的張力強度與水泥添加量的關係。本研究擬以單壓試驗之水泥量來製作張力試驗之土壤水泥試體，再來討論水泥添加量與張力強度之關係。每組試驗將製作兩個試體，經過養護 7 與 28 天再進行巴西張力試驗。

### 4.4.1 水泥添加量和張力強度之關係

水泥添加量和張力強度關係如圖 17 及圖 18 所示。由圖可看出，級配越優良，即 CU 值越高，張力強度會越高，而且張力強度會隨著水泥添加量的增加而增加。

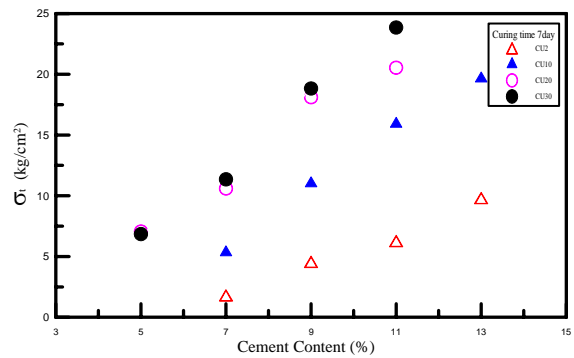


圖 17 水泥量和張力強度關係圖(7 天)

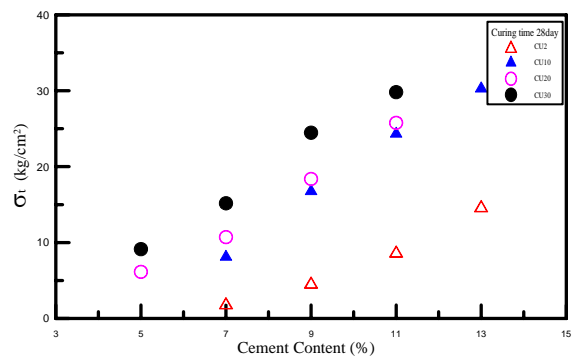


圖 18 水泥量和張力強度關係圖(28 天)

由圖 19、圖 20 可看出，土壤水泥單壓強度皆大於張力強度，7 天單壓強度與張力強度的比值介於 2.73 到 9.13 之間，且平均比值為 4.3，28 天單壓強度與張力強度的比值介於 2.74 到 14.1 之間，且平均比值為 4.8。由圖中可發現，級配越優良，即 CU 值越大，單壓強度與張力強度的比值會趨於定值。

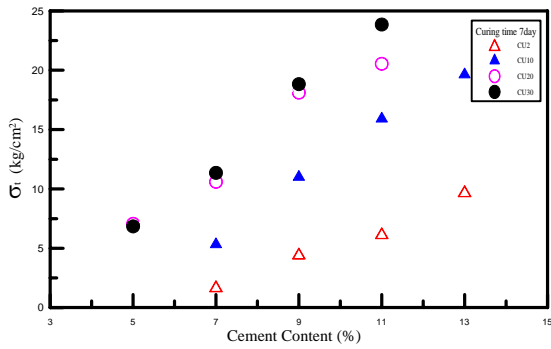


圖 19 水泥添加量和單壓強度/張力強度關係圖 (7 天)

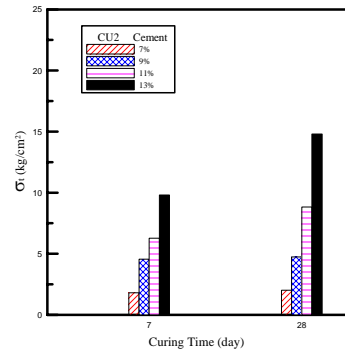


圖 22 養護齡期和張力強度關係圖 (CU2)

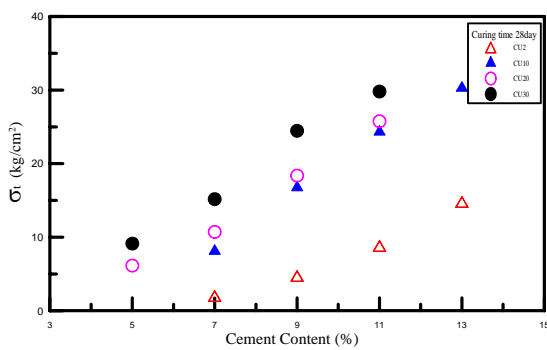


圖 20 水泥添加量和單壓強度/張力強度關係圖 (28 天)

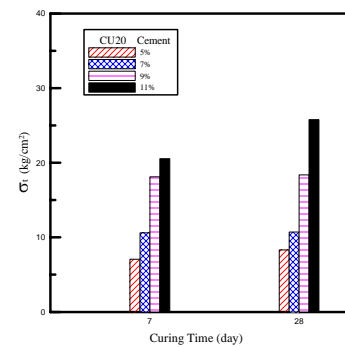


圖 23 養護齡期和張力強度關係圖 (CU20)

#### 4.4.2 養護齡期和張力強度之關係

由圖 21 可看出，28 天張力強度約為 7 天張力強度的 1.30 倍左右。圖 22、圖 23 為土壤水泥張力強度和養護齡期之關係圖，由圖中可看出，28 天張力強度均大於 7 天張力強度，所以土壤水泥的張力強度隨著養護齡期的增加而增加，且隨著水泥添加量的增加時，張力強度也隨之增加。

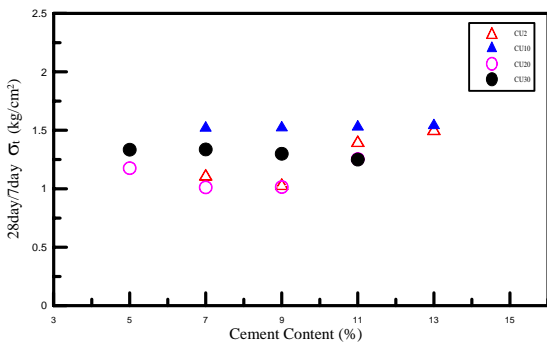


圖 21 水泥添加量和張力強度關係圖 (28 天/7 天張力強度)

#### 4.4.3 最大乾密度和張力強度之關係

圖 24 為土壤水泥最大乾密度和張力強度之關係圖，由圖可發現在相同水泥添加量下，張力強度隨著最大乾密度的增加而增加，大致為線性關係，此線性相關性，隨著水泥量的增加而越明顯。

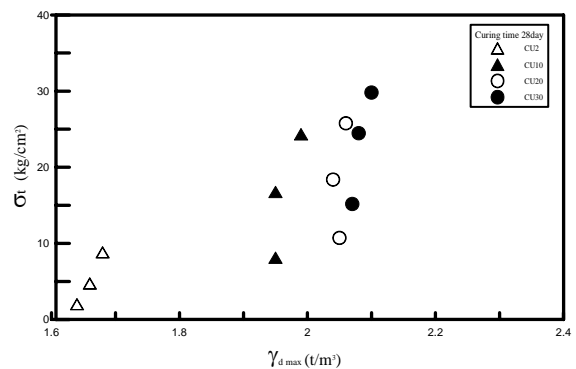


圖 24 最大乾密度和張力強度關係圖 (養護 28 天)

## 五、 結論

本研究進行了一系列的土壤水泥力

學性質試驗，試驗結果經分析與討論後，得到了下列結論：

1. 在同一水泥添加量下，土壤均勻係高，土壤水泥之最佳含水量越低，並且最佳含水量隨水泥添加量之增加而減少。
2. 土壤水泥之最大乾密度隨最佳含水量之增加而減少，土壤級配優良所製成的土壤材料的最大乾密度較高，最佳含水量較低。
3. 級配優良的土壤水泥，抗磨損能力較高，並且土壤水泥抗磨損能力，會隨高爐水泥添加量的增加而增加。
4. 在本研究所採用的材料級配與環境，並符合 PCA 土壤水泥之耐久性與強度規範下，CU2 最少高爐水泥量為 13%，CU10 最少高爐水泥量為 11%，CU20 最少高爐水泥量為 9%，CU30 最少高爐水泥量為 7%。
5. 土壤水泥的單壓強度隨著養護齡期的增加而增加，單壓強度會隨著水泥添加量和最大乾密度增加而增加。土壤水泥張力強度隨著最大乾密度的增加而增加。
6. 土壤水泥 28 天單壓強度約為 7 天單壓強度的 1.68 倍。土壤水泥 28 天張力強度約為 7 天張力強度的 1.30 倍左右。
7. 在同一水泥添加量下，土壤水泥彈性模數  $E_{50}$  隨著均勻係數的增加而增加。
8. 土壤級配越優良，土壤水泥之張力強度越高，並且土壤水泥張力強度隨著水泥添加量的增加而增加。

## 誌謝

本研究承蒙行政院國科會(計畫編號 NSC 92-2211-E-324-010)支持研究經費，特此致謝。

## 參考文獻

1. U. S. Bureau of Reclamation, "Performance of Soil-Cement Dam Facing- 20- Year Report," Report No. REC- ERC- 84- 25, Denver, Sept. (1984).
2. 李承峰，「土壤水泥工程性質試驗之

研究」，碩士論文，朝陽科技大學，(2004)。

3. 江煥洋，「級配與水泥含量對土壤水泥性質之影響」，碩士論文，朝陽科技大學，(2003)。
4. Portland Cement Association, *Soil-Cement Construction Handbook*, (1971).
5. 財團法人中興顧問社，「土壤水泥之性質試驗與適用性探討研究」，(2003)。



## Experiments of Mechanical Properties of Soil Cement

P. H. Tsai\*      C. F. Lee\*

\* Department of Construction Engineering  
Chaoyang University of Technology

### ABSTRACT

The main purpose of this study is to study the influence of soil gradation and slag cement content on the mechanical properties of soil cement. The soil was taken from Wu-xi river bank, the sample of soil passed the sieve number 200 of 10% and uniformity coefficients of 2, 10, 20 and 30. The soil was mixed with various slag cement contents to make soil cement specimens. To study the durability and strength of soil cement, laboratory tests, including the wetting and drying test, uniaxial compression test, and Brazilian tensile test for soil cement, were performed. The results of the study show that the well-graded soil cements have the highest dry densities and the lowest optimum water contents. The higher uniformity coefficient of soil cement is, the less optimum water content is. As the mixed cement content increased, the durability of soil cement increased during the wetting and drying test. The compression or tension strength of soil cement is dependent on curing time and the mixed cement content. The 28-day compression strength of the soil cement is 1.68 times larger than the 7-day compression strength, and 1.3 times for the tension strength. The relation between the strength and time is approximately linear from the results of this study. Modulus of elastic, uniaxial compressive strength, and tensile strength of the well-graded soil cement are higher than those for poor-graded soils.

**Keywords:** slag cement, soil cement, uniaxial compression test, wetting and drying test