

水泥添加量對土壤水泥工程性質之影響

Effect of cement content on the engineering properties of soil-cement mixtures

蔡佩勳¹ 李承峰² 何佳欣³

¹ 朝陽科技大學營建工程系副教授, phtsai@cyut.edu.tw

² 廣隆營造股份有限公司工程師, al9803@ms33.hinet.net

³ 朝陽科技大學營建工程系碩士生, pay_rise@yahoo.com.tw

摘要

本研究主要是將不同高爐水泥添加量的土壤水泥試體，經過夯實試驗、乾濕試驗、單壓試驗、巴西張力試驗與高壓滲透試驗，探討高爐水泥添加量對土壤水泥工程性質之影響。研究結果顯示，土壤之均勻係數越高，所製成的土壤水泥之最佳含水量越低，且最佳含水量隨水泥添加量的增加而減少。以均勻係數越高之土壤製成的土壤水泥，抗磨損能力也較高，且其抗磨損能力隨高爐水泥添加量之增加而增加。28 天土壤水泥的單壓強度約為 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，土壤水泥單壓強度或張力強度隨水泥添加量之增加而增加。在相同水泥添加量下，彈性模數、單壓強度或張力強度隨著土壤均勻係數的增加而增加。土壤水泥的滲透係數隨土壤均勻係數與水泥添加量的增加而降低。整體而言，高均勻係數的土壤越適合作為土壤水泥的拌合材料。

關鍵字：土壤水泥，高爐水泥，工程性質

Abstract

The main purpose of the study is to study the influence of soil composition and slag cement content on the engineering properties of soil-cement mixture. The wetting and drying test, unconfined compression test, Brazilian tensile test, and high pressure permeability test for soil-cement mixtures were performed to study the engineering properties. The results of the study show that the soil-cement mixtures made from higher uniformity coefficient soil have larger maximum dry densities, lower optimum water contents and better abrading resistance capability. The optimum water content of soil-cement mixture decreases with increasing cement content. The 28-day compression strength of the soil-cement mixture is 1.68 times the 7-day compression strength. The 28-day tensile strength of the soil-cement mixture is 1.3 times the 7-day tensile strength. The compression and tensile strength increase with increasing the cement content. The elastic modulus, compression strength and tensile strength of soil-cement mixture made from higher uniformity coefficient soil are higher than

those from lower uniformity coefficient. The permeability coefficient of soil-cement mixture decreases with increasing uniformity coefficient and cement content. Overall, the soil with high uniformity coefficient is suitable as a soil-cement mixing material.

Keywords: soil cement, slag cement, engineering property

一、前言

依據美國混凝土協會(ACI) [1]對土壤水泥的定義，土壤水泥為高度夯實的土壤與水泥及水的混合物。所以，土壤水泥由土壤、水泥和水經過夯實後形成之混合物，因為添加水泥和水，使得土壤水泥硬化，產生適當之強度和抵抗侵蝕能力。此種工法具有普及性、價格低、無化學毒性顧慮等優點。除了有機土壤、高塑性黏土以及含有易引起鹼性反應的土壤外，大部分的土壤都可以做為土壤水泥之材料。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，並且可解決砂石不足的問題。

土壤水泥在 1915 年最早應用在美國佛羅里達州，當時是在道路工程中使用砂、貝屑、波特蘭水泥為材料，以滾壓夯實而成，之後土壤水泥陸續被應用在機場、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，但如果拋石料源離壩址較遠時，無法在經濟範圍內取得適當拋石料時，可以考慮土壤水泥之替代方案，美國墾務局(U.S. Bureau of Reclamation, USBR) [2, 3]針對土壤水泥作為拋石護坡替代案進行研究，試驗結果顯示砂土和水泥拌合而成的土壤水泥，具有良好的耐久性及其抗侵蝕能力，可替代拋石成為水壩護坡之材料。1951 年在科羅拉多州東部的 Bonny 水庫，曾建造一段試驗用的土壤水泥護坡，進行長期現地試驗，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，經過十年的試驗與監測，認定土壤水泥可作為拋石護坡的替代方案。

Venkatarama Reddy et al. [4] 以含粘土的土壤製作土壤水泥並進行強度試驗，他們發現粘土含量約 14-16%時可得最高強度，粘土含量越大，土壤水泥之飽和含水量越高。當粘土含量等於 16%時，重量損失率最低。Park [5] 以砂土摻加四種水泥含量製作土壤水泥，他發現養護過程中執行三次反覆的乾濕循環後，其強度已成定值，或因反覆乾濕過程，試體內部水分不足以充分養護，致水化反應不完全，而強度稍微降低。Estabragh et al. [6] 進行土壤水泥強度試驗，他們發現最大乾密度隨水泥添加量之增加而增加，最佳含水量隨水泥添加量之增加而減少。土壤水泥之強度與水泥添加量及養護時間有關。

水泥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，製造出符合工程需求之土壤水泥，是值得加以研究的。當然不同土壤所需之水泥用量也不同，為了達到經濟上的目標，以級配優良的土壤，可能只需較少的水泥用量。為了探討土壤粒徑組成對土壤水泥之影響，所以本研究將使用一組均勻級配和三組不同粒徑級配的土壤，分別製成不同高爐水泥添加量的土壤水泥試體，進行夯實試驗、乾濕試驗、單壓試驗、巴西張力試驗與高壓滲透試驗，以探討高爐水泥添加量對土壤水泥工程性質之影響，並在符合強度等規範下，找出其最佳水泥添加量。

二、試驗材料與流程

2.1 試驗材料

本研究採用烏溪砂石作為土壤水泥之料源，並依此砂土調製成四種級配的土壤(一組不良級配和三組優良級配的土壤)，此四種土壤的細粒含量(通過 200 號篩)皆控制為 10%，而均勻係數則分別取 2、10、20 與 30，後續分別以 CU2、CU10、CU20 及 CU30 表示，其粒徑分布曲線如圖 1 所示。

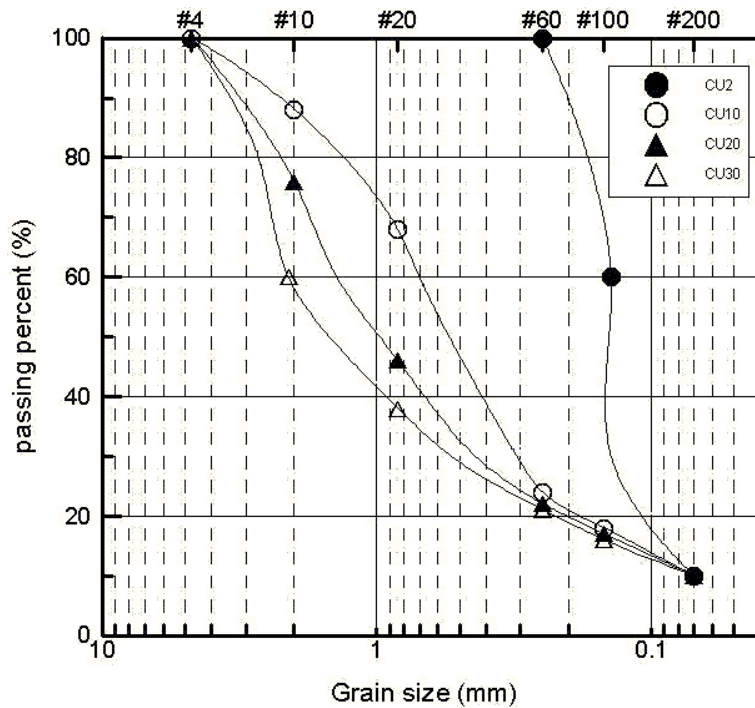


圖 1 四種級配土壤之粒徑分佈曲線

本研究之土壤水泥添加材料為高爐水泥，此種水泥目前已應用於國內地盤改良方面，由於高爐水泥具有卜索蘭之特性，若能善加利用以取代水泥，不但可以節省材料成本，亦能資源再利用，減輕對環境所造成之污染，具環保意義及經濟性。本文所使用之高爐水泥為中聯爐石處理資源化股份有限公司之 HSC301 型高爐水泥。

2.2 試驗流程

本研究之流程分述如下，整個試驗流程如圖 2 所示。

1. 每種級配土壤添加高爐水泥分別為 4%、7%、10%、13%，依土壤水泥規範進行夯實試驗，求出土壤水泥之最佳含水量及最大乾密度，以各級配對應之最佳含水量來製作後續之土壤水泥試體。
2. 進行一系列乾濕試驗，得到符合耐久性規範的最低水泥添加量。
3. 依最低水泥量逐次增加 2% 水泥量，配合夯實試驗之最佳含水量，製作後續試驗之試體，分別養護 7 及 28 天。

4. 進行單壓試驗以及巴西張力試驗，探討土壤水泥之彈性模數及強度與高爐水泥添加量之關係。
5. 符合上述耐久性與強度等規範的最低水泥添加量，配合其最佳含水量，製作土壤水泥試體，經養護 28 天後，進行高壓滲透試驗，以了解土壤水泥的滲透係數。

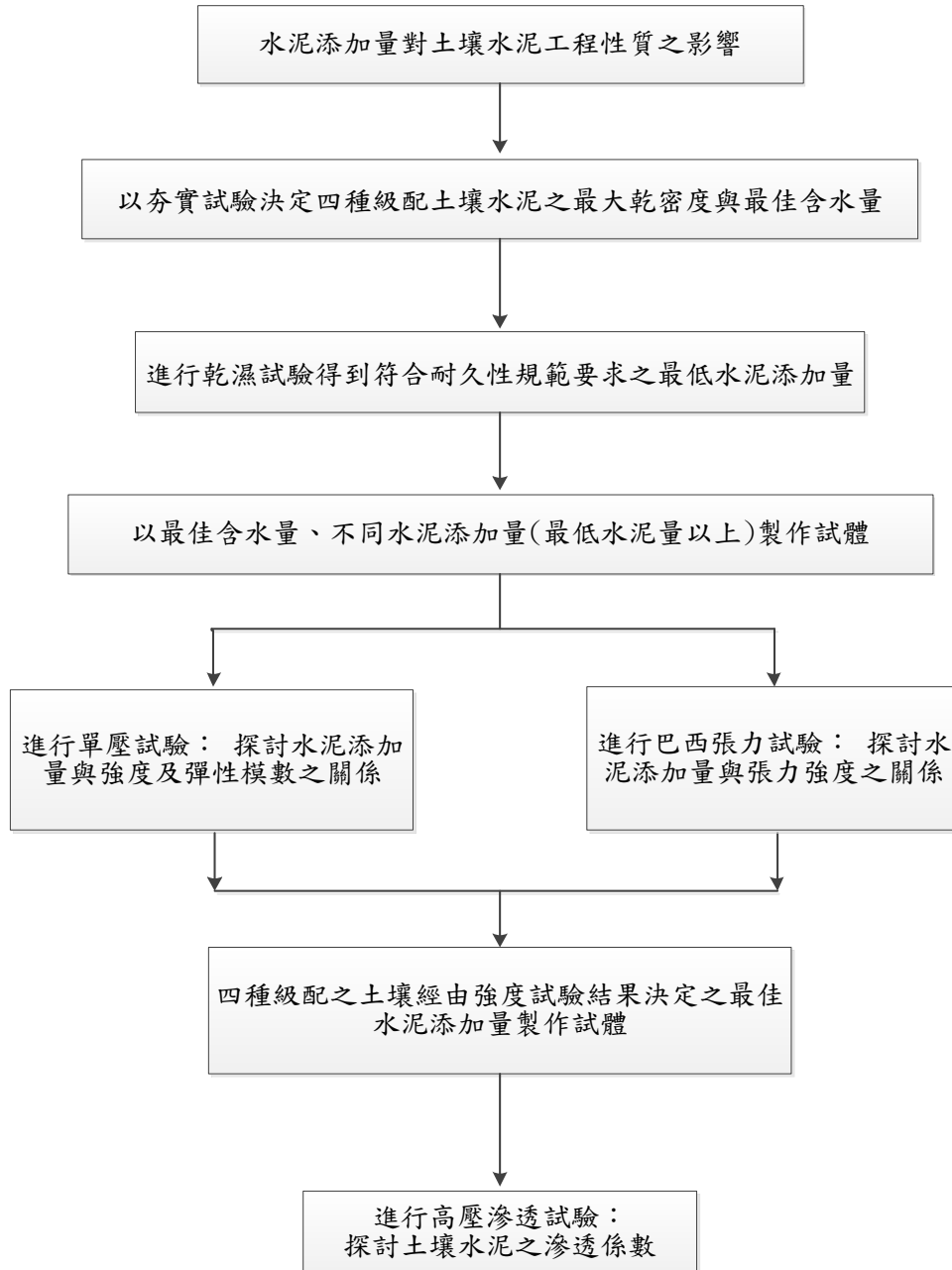
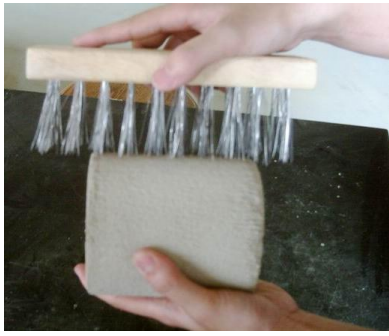
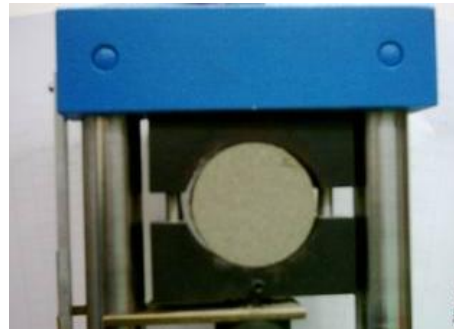


圖 2 本研究之試驗流程



相片 1 乾溼試驗以鋼刷刮刷試體



相片 2 巴西張力試驗



相片 3 單壓試驗



相片 4 高壓滲透試驗儀

上述試驗除巴西張力試驗依國際岩石力學協會 (ISRM) 規範外，其餘試驗均參照美國材料試驗協會 (ASTM) 之規範對土壤水泥進行試驗。

三、試驗結果與討論

3.1 四種級配之土壤水泥的最大乾密度與最佳含水量

四種級配土壤分別添加高爐水泥分別為 4%、7%、10%、13% 進行夯實試驗 (ASTM D558-96)，求出土壤水泥之最佳含水量及最大乾密度。由夯實試驗結果顯示，土壤水泥之最佳含水量介於 8.4 至 12.1%，最大乾密度介於 1.63 至 2.11t/m^3 。

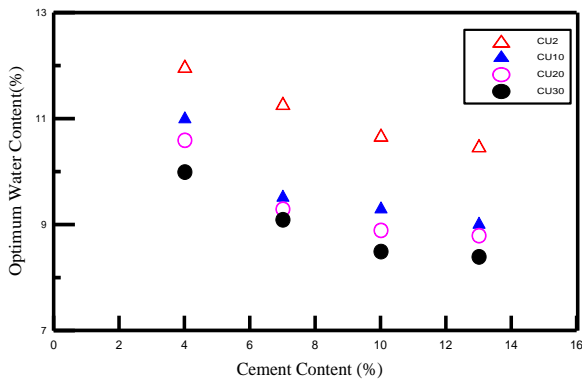


圖 3 水泥添加量與最佳含水量之關係

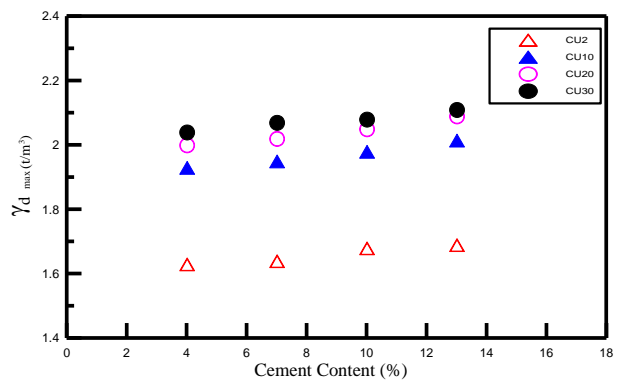


圖 4 水泥添加量與最大乾密度之關係

水泥添加量與最佳含水量及最大乾密度之關係分別如圖 3、4 所示，由圖 3 顯示，最佳含水量隨水泥添加量的增加而減少，且在同一水泥添加量下，均勻係數越高的土壤，所製成土壤水泥的最佳含水量越低。由圖 4 顯示，最大乾密度隨水泥添加量的增加而增加，在同一水泥添加量下，土壤水泥最大乾密度隨均勻係數的增加而增加。均勻係數越大的土壤，代表其屬於優良級配，由於其夯實後孔隙較小，所以其最大乾密度較高，最佳含水量較低。

3.2 水泥添加量對土壤水泥耐久性之影響

乾濕試驗主要是決定土壤水泥之耐久性的試驗，試驗過程中記錄土壤水泥試體在經過 12 次浸水-烘乾循環之重量損失率[7]。水泥添加量和土壤水泥重量損失率(L)之關係，如圖 5 所示。依據 PCA 規範[8]，土壤水泥重量損失率不得超過 14%，由圖 5 可看出，在符合 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%。由圖 5 看出土壤重量損失率隨著均勻係數增加而減少，即均勻係數越高(優良級配)的土壤所製作之土壤水泥，在經過 12 次乾濕循環後，其重量損失較少，越能抵抗磨損。

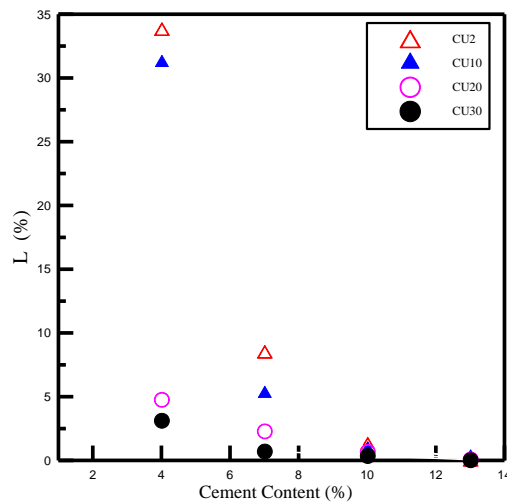


圖 5 水泥添加量和土壤損失率之關係

3.3 水泥添加量和土壤水泥單壓強度之關係

單壓試驗主要是求土壤水泥單壓強度或彈性模數 E_{50} 與水泥添加量之關係，依土壤水泥單壓試驗方法(ASTM 1633-00)進行單壓試驗。在控制土壤水泥滿足 PCA 耐久性規範下，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所得的最佳含水量，高爐水泥添加量為乾濕試驗所得之最低水泥量，再逐次增加 2% 的高爐水泥量，因此 CU2 和 CU10 之水泥添加量將定為 7%、9%、11% 及 13%，而 CU20 和 CU30 水泥添加量為 5%、7%、9% 及 11%。每組試驗將製作兩個試體，試體經均勻拌合後，養護 7、28 天進行單壓試驗。圖 6 為水泥添加量與土壤水泥單壓強度之關係，由圖 6 顯示單壓強度也隨著水泥添加量的增加而增加，在同一水泥添加量下，土壤均勻係數越高，單壓強度越高。土壤水泥的單壓強度隨著養護齡期的增加而增加，28 天單壓強度約為 7 天單壓強度的 1.68 倍。

依據美國墾務局(USBR) [2]、PCA [8] 規範規定，單壓強度 7 天強度不得低於 42 kg/cm^2 ，28 天強度不得低於 61 kg/cm^2 ，由本研究之單壓試驗結果顯示，符合上述單壓強度規範的最低水泥量分別為 CU2 的 13%，CU10 的 11%，CU20 的 9%，CU30 的 7%。

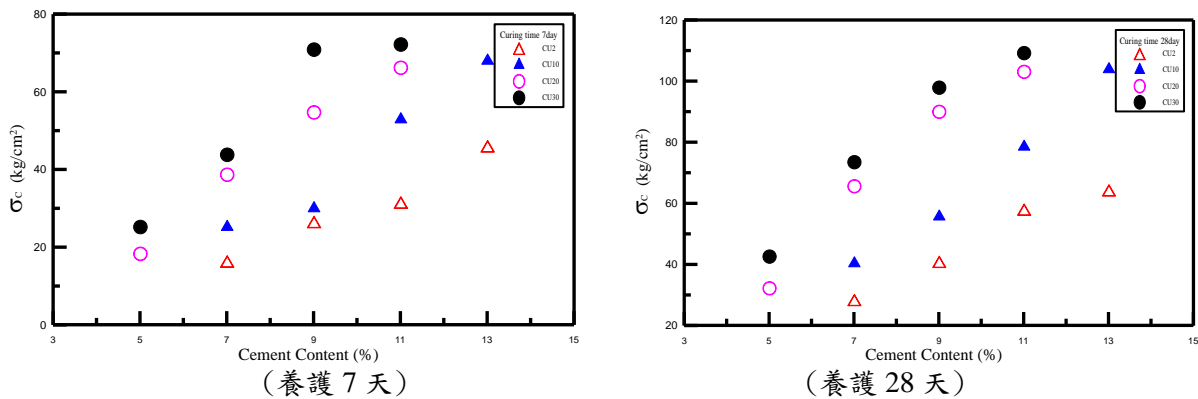


圖 6 水泥添加量與土壤水泥單壓強度之關係

3.4 水泥添加量和土壤水泥彈性模數 E_{50} 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，由圖 7 可看出，土壤水泥彈性模數 E_{50} 隨高爐水泥添加量的增加而增加，其關係趨近於線性。在同一水泥量下，彈性模數 E_{50} 隨均勻係數的增加而增加，土壤水泥之彈性模數 E_{50} 介於 $3,000$ 與 $14,000 \text{ kg/cm}^2$ 之間。

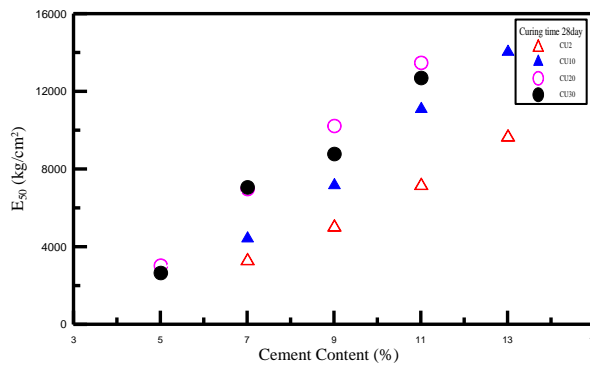


圖 7 水泥添加量與土壤水泥 E_{50} 之關係 (28 天)

3.5 水泥添加量和土壤水泥張力強度之關係

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，為使土壤水泥也符合耐久性之規範要求，張力強度試驗的試體所添加之水量與水泥量皆與單壓強度試驗之準備試體相同，即添加的水量為夯實試驗所得的最佳含水量，高爐水泥添加量為乾濕試驗所得之最低水泥量，再逐次增加 2% 的高爐水泥量。

水泥添加量與土壤水泥張力強度之關係，如圖 8 所示，由圖 8 可看出，均勻係數越高，土壤水泥之張力強度越高，且張力強度隨著水泥添加量的增加而增加，28 天張力強度皆大於 7 天張力強度，28 天張力強度約為 7 天張力強度的 1.30 倍。

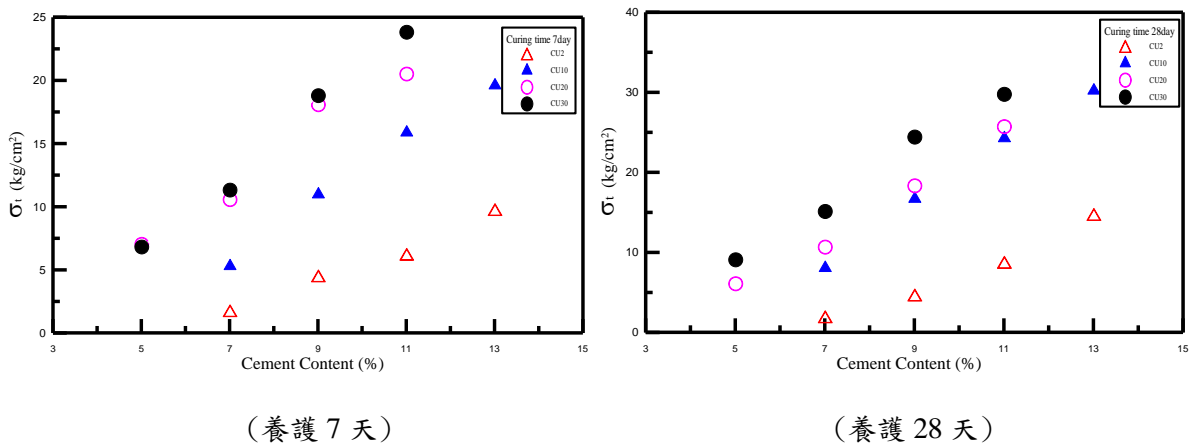


圖 8 水泥添加量與土壤水泥張力強度關係

3.6 水泥添加量和土壤水泥滲透係數之關係

高壓滲透試驗主要是求土壤水泥的滲透係數，土壤水泥滲透試驗依據 ASTM D5084-00 進行試驗。土壤水泥之耐久性與單壓強度的工程性質是相對重要的，當滿足土壤水泥耐久性與強度之規範要求時，其滲透性為何？是值得討論之課題。

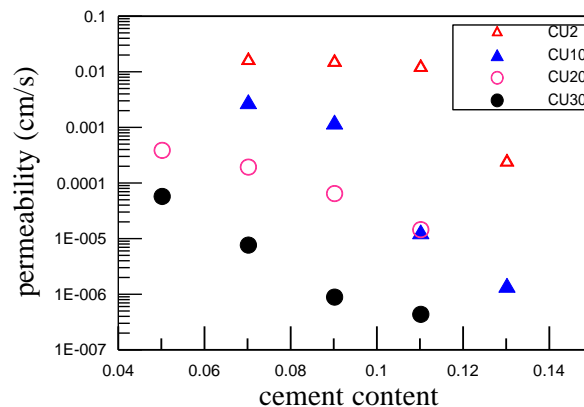


圖 9 水泥添加量與土壤水泥滲透係數之關係

水泥添加量與土壤水泥滲透係數之關係，如圖 9 所示，土壤水泥滲透係數隨水泥添加量之增加而下降。若滿足土壤水泥耐久性與強度之規範要求時，CU2 高爐水泥添加量需大於等於 13%，CU10 高爐水泥添加量需不小於 11%，CU20 高爐水泥添加量需不小於 9%，CU30 高爐水泥添加量需不小於 7%，這些土壤水泥之滲透係數皆低於 $3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ，此時土壤水泥已可視為透水性差的材料。

四、結論

本研究以四組不同均勻係數的土壤製作成土壤水泥試體，進行夯實試驗、乾濕試驗、單壓試驗、巴西張力試驗與高壓滲透試驗，探討水泥添加量對工程性質之影響，試驗結果經分析與討論後，得到下列結論：

1. 最佳含水量隨水泥添加量的增加而減少，且在同一水泥添加量下，均勻係數越高的土壤，所製成土壤水泥的最佳含水量越低。最大乾密度隨水泥添加量的增加而增加，在同一水泥添加量下，土壤水泥最大乾密度隨均勻係數的增加而增加。
2. 在經過 12 次乾濕循環後，均勻係數越高的土壤水泥重量損失量越少，抗磨損能力較高，且土壤水泥之抗磨損能力，隨高爐水泥添加量的增加而增加。
3. 土壤水泥的單壓強度隨水泥添加量的增加而增加，在同一水泥添加量下，土壤均勻係數越高，單壓強度越高。單壓強度也隨養護齡期的增加而增加，土壤水泥 28 天單壓強度約為 7 天單壓強度的 1.68 倍。
4. 土壤水泥之彈性模數 E_{50} 隨高爐水泥添加量的增加而增加，約呈線性正比關係。在同一水泥添加量下，彈性模數 E_{50} 隨土壤均勻係數的增加而增加。
5. 土壤之均勻係數越高，所製成土壤水泥之張力強度越高，且張力強度隨著水泥添加量的增加而增加，養護 28 天之張力強度皆大於 7 天張力強度，可見養護有助於土壤水泥強度之提昇，28 天張力強度約為 7 天張力強度的 1.30 倍。
6. 土壤水泥之滲透係數隨水泥添加量之增加而下降，符合強度與耐久性規範的土壤水泥已可視為透水性差的材料。

致謝

本研究承蒙行政院國科會(計畫編號 NSC 92-2211-E-324-010) 之經費支持，使本研究得以順利進行，特此致謝。

五、參考文獻

- [1] ACI Committee 230. "State-of-the-Art Report on Soil Cement," ACI Materials Journal, American Concrete Institute, Vol. 87, No. 4, pp. 395-417 (1990).
- [2] Casias, T.J. and Howard, A.K., "Twenty-Year Performance of Soil-Cement Dam Facings,"

- International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Paper 49, pp. 1307-1312 (1984).
- [3] Powledge, G., Ralston, D., Miller, P., Chen, Y., Clopper, P., and Temple, D., "Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II: Hydraulic and Design Considerations," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 8, pp. 1056-1075 (1989).
- [4] Venkatarama Reddy, B., Lal, R., and Nanjunda Rao, K., "Optimum Soil Grading for the Soil-Cement Blocks," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 19, No. 2, pp. 139-148 (2007).
- [5] Park, S., "Effect of Wetting on Unconfined Compressive Strength of Cemented Sands," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 136, No. 12, pp. 1713-1720 (2010).
- [6] Estabragh, A., Beytollahpour, I., and Javadi, A., "Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 23, No. 7, pp. 969-976 (2011).
- [7] 李承峰，「土壤水泥工程性質試驗之研究」，朝陽科技大學碩士論文，台中 (2004)。
- [8] Portland Cement Association, *Soil-Cement Construction Handbook*, (1969).