

高爐水泥及其摻料對粘土剪力強度之影響

蔡佩勳¹ 周德威² 李承峰²

摘要

本研究以高爐水泥及其摻料以不同配比方式添加於台中大肚山紅土、高雄月世界泥岩與台東池上黏土中，將各種配比所需材料量與土壤混合攪拌，藉以模擬現地攪拌樁之施作方式，製作出改良土塊體，經養護後再進行無圍壓縮試驗，由研究結果顯示無圍壓縮強度與楊氏係數 E_{50} ，隨著高爐水泥添加量之增加而增加，也隨著養護齡期增加而增加。台中大肚山紅土改良後之強度大於其他兩者，飛灰之添加對改良土之強度無助益。隨著高爐水泥添加量及齡期的增加，改良土之力學行為呈脆性破壞。

關鍵詞：高爐水泥、土質改良、飛灰。

SHEARING PROPERTIES OF SLAG CEMENT AND ADMIXTURES STABILIZED CLAYS

Pei-Hsun Tsai Te-Wei Shou Cheng-Fung Lee

ABSTRACT

The main purpose of this research is to discuss the influence of slag cement and fly ash on three clays, such as the Taichung lateritic, the Kaohsiung mudstone, and the Taitung clay. Specimens treated with various percentage of slag cement and fly ash binder were cured for 30 hours, 72 hours and so on, after which they were subjected to unconfined compression tests. After the treated clay specimens were prepared in the laboratory, the stress and strain of specimens were measured, and the strengths of the treated clay were obtained. The results of this study show that the unconfined strength and the modulus E_{50} of stabilized clay increase with the contain of slag cement or curing time. Additional strength gains of the Taichung lateritic mixed with slag cement could have been increased further. Admixed fly ash into stabilized clay does not matter to additional strength gains. The property of stabilized clay is brittle, in which the contain of slag cement or curing time increases.

Key Words: Slag cement, soil improvement, fly ash.

一、前言

添加穩定材料於軟弱土壤進行混合攪拌，以改善其強度，可以使用的穩定材料繁多，主要還是以水泥或石灰為主。高爐爐石 (blast-furnace-slag) 與飛灰在早期均被視為工業廢料，未能加以妥善利用，且會造成環境污染之紛爭。此類副產品與水泥具有相同之卜作嵐特性，若能善加利用取代部分水泥用量，進行軟弱土壤工程性質的改善，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影響。因此，用高爐水泥與飛灰作為路基土壤改良劑是具環保意義及經濟性。本研究比較含有不同粘土礦物 - 台中大肚山紅土、高雄月世界泥岩與台東池上粘土，以不同的配比分別加入高爐水泥與摻料，混合攪拌製成試體，進行無圍壓縮試驗，探討改良後土壤強度之變化。

石悅欽 (1996)【1】以飛灰、石灰對紅土作改良，其研究結果指出，添加飛灰 20%、石灰 10% 於紅土，經養護 28 天之改良強度最高可達原狀土之 9 倍。若僅添加飛灰 20% 於紅土改良時，養護 28 天之改良強度最高可達原狀土之 1.5 倍，他認為飛灰凝聚性較低，其強度改良效果有限，而

添加固定石灰量後，其強度隨著石灰含量增加而增加，可能是石灰與紅土所能發生卜作嵐反應較高。廖洪鈞等人(2001)

【2】研究黏土加入高爐水泥之攪拌樁強度，他們之研究結果顯示，添加高爐水泥之平均無圍壓縮強度為 57.8 kg/cm^2 ，而添加一般水泥之平均無圍壓縮強度為至 54.0 kg/cm^2 。同時，高爐水泥和土壤拌合之無圍壓縮強度試驗結果發現，7 天齡期的強度即可到達一般水泥 28 天齡期之強度，顯示高爐水泥強度發展相當迅速。吳秉宸 (2001)【3】將高爐水泥依照不同 (0%、3%、5%、10%) 比例添加於淺層軟弱地盤中，其研究結果發現 CBR 試驗貫入阻抗值，隨著高爐水泥的添加量增加而增加。無圍壓縮強度試驗中，在中低高夯實能量下，試驗室強度增加均隨著高爐水泥的增加而增加。

二、研究方法

本研究所使用之台中大肚山紅土、高雄月世界泥岩與台東粘土之軟弱土壤，係取地表下 2 公尺處深處。經攝氏 60 氣乾後，利用橡皮槌予以擊碎，取其通過美國標準篩 #10 者，隨即裝入黑色大塑膠袋中，密封後再儲存於萬能塑膠桶

1.朝陽科技大學營建工程系助理教授

2.朝陽科技大學營建工程系碩士班研究生

內。

本研究使用之高爐水泥係由中聯公司所提供，一般水淬爐石與水作用並不會產生膠結作用，此是因為爐石與水接觸的一瞬間會產生一層 $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 的不透水膜，阻礙進一步的水化作用。故為了促進爐石水化，需藉助水泥水化所產生的 Ca(OH)_2 ，破壞此一水膜，方能使得爐石不斷的水化。飛灰中氧化鈣含量並不高，所能提供之穩定效果有限，故常和其他添加物（如石灰）互相混合，以發揮穩定作用。此類反應，所形成的矽鈣膠結體和鋁鈣膠結體，具有膠結硬化的作用，當膠結體填充於顆粒間的孔隙時，使其產生互相連結的效果。

本研究利用不同量高爐水泥與摻料飛灰添加於前述三種土壤中，高爐水泥添加量分別為土壤乾重量之 10%、15%、20%、25%、30% 等五組。然後固定高爐水泥添加量為 20%，再增添飛灰於改良土中，而飛灰之添加量分別為 5%、10%、15%、20%。經由攪拌機使其充分混合攪拌，分三層倒入已塗抹了礦油之木模內。完成試體澆置後，立即以保鮮膜將木模的頂部包裹住，以防止改良土塊體內之水分消散。製成改良後土塊體，經鑽心機鑽心取樣後，將試體(直徑為 40.0mm、長 80.0mm 之圓柱試體)放入濕砂養護槽中進行養護，在齡期為 30 小時、50 小時、72 小時、120 小時、168 小時、336 小時等養護齡期後，進行無圍壓縮強度試驗，以期能瞭解改良土之應力應變關係 高爐水泥與飛灰含量對強度之影響、養護齡期對強度發展之影響。

三、試驗結果與討論

3.1 現地土壤試驗結果

本試驗所取之土樣，在試驗室進行物理性質試驗，並得試驗結果整理成圖 1、圖 2、圖 3 及表 1 中。台中大肚山紅土與高雄月世界泥岩以及台東池上粘土之軟弱土樣根據圖表資料，依據統一土壤分類系統的分類準則，阿太堡限度圖繪點在塑性圖 A 線上方，坐落於 CL or OL 此區間內。根據 $[(LL-烘乾)/(LL-未烘乾)] < 0.75$ 時歸類為有機性之準則，故斷定這三種土壤皆為無機性低塑性黏土(CL)。為了對照未改良土壤之應力應變行為與強度之增加，並且模擬地下水位下三種土壤力學行為，本研究將現地土壤飽和後，進行不排水試驗，量測其應力應變曲線與剪力強度。由表一可看出，台中大肚山紅土之塑性與不排水強度大於月世界泥岩、台東粘土，而月世界泥岩的顆粒較細，通過#200 篩之百分比，較其他兩種土壤為多。

表 1 一般物理性質試驗結果

物理性質	台中紅土	月世界泥岩	台東粘土
自然含水量 w_n (%)	17.17	22.08	31.65
土粒比重 G_s	2.71	2.78	2.68
液性限度 LL (%)	39.77	26.77	24.79
塑性限度 PL (%)	21.26	16.54	15.72
塑性指數 PI (%)	18.51	10.23	9.07
飽和度 S (%)	71.18	66.96	84.62
孔隙比 e	0.658	0.917	1.00
濕土單位重 γ_m (t/m ³)	1.92	1.771	1.76
乾土單位重 γ_d (t/m ³)	1.64	1.45	1.34
不排水強度 (kg/cm ²)	0.44	0.36	0.34
通過#200百分比	83.62	98	73.2

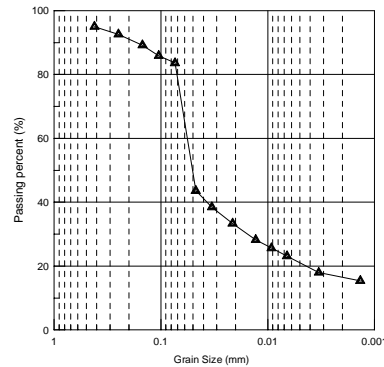


圖 1 台中紅土之粒徑分佈曲線圖

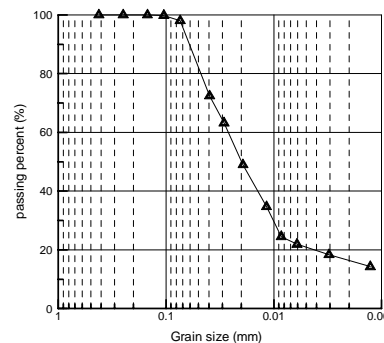


圖 2 月世界泥岩之粒徑分佈曲線圖

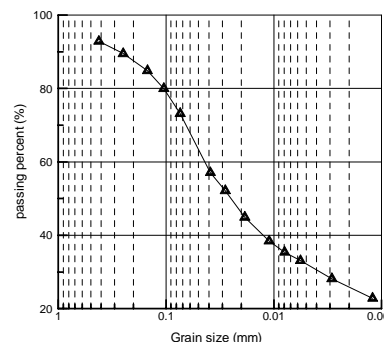


圖 3 台東粘土之粒徑分佈曲線圖

3.2 改良土無圍壓縮結果與討論

圖 4、圖 5、圖 6 為添加高爐水泥後改良土在不同養護齡期，無圍壓縮強度隨高爐水泥添加量之變化情形。由圖可看出，高爐水泥改良後之土壤無圍壓縮強度隨著養護齡期的增加而增加，其原因可能是高爐水泥與三種實驗土壤之間產生足夠的離子交換與水化反應作用，有足夠的膠結體，使得改良土壤強度的發展上具有相當的強度。

由圖 4、圖 5、圖 6 中亦可以發現到，各組配比在 168 小時（7 天）養護齡期前後之曲線作比較，曲線斜率有明顯差異。因此，高爐水泥與土壤發生化學反應，在七天養護齡期之前較為劇烈，改良土所能提供的強度增加較快。而 168 小時（7 天）之後到 336 小時（14 天）之間的養護齡期，其所能提供的反應和強度成長變化就日漸趨緩，隨著時間的增加而不再有強烈的增加現象，顯示高爐水泥添加物在養護齡期 7 天時，幾乎就已經達到 14 天的強度。廖洪鈞（2001）【2】也曾添加高爐水泥於台北粉土質黏土中，其研究結果顯示，其改良後之無圍壓縮強度，在養護齡期 7 天時強度就已達 28 天之強度。

由圖 7、圖 8、圖 9 中可以發現到，不同土壤改良後之無圍壓縮強度隨著高爐水泥添加量的增加而有增強的趨勢。在 0%~20% 間的高爐水泥添加量時，各個養護齡期之曲線斜率較大，強度增加量較為明顯，在 25%~30% 的添加量時，強度的發展反而沒有如預期的，有很明顯的相對增加量。所以，高爐水泥最佳之添加量為 20%。由圖也可看出，台東粘土之強度關係曲線較為平緩，即在同樣之高爐水泥添加量下，台東粘土改良後其強度較其他兩組為低，這可能是因為其塑性指數較小，與高爐水泥化學反應之物質較小之故。

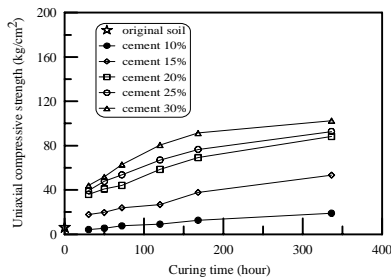


圖 4 養護齡期對改良土強度之影響 (台中紅土)

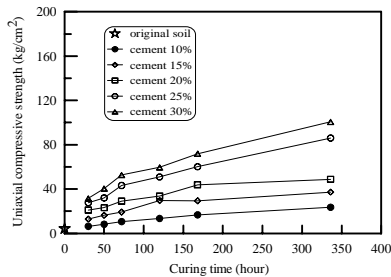


圖 5 養護齡期對改良土強度之影響 (月世界泥岩)

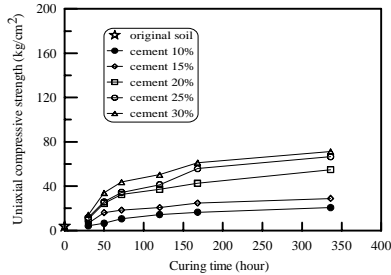


圖 6 養護齡期對改良土強度之影響 (台東粘土)

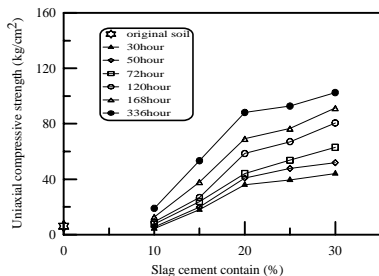


圖 7 爐石水泥添加量對強度之影響 (台中紅土)

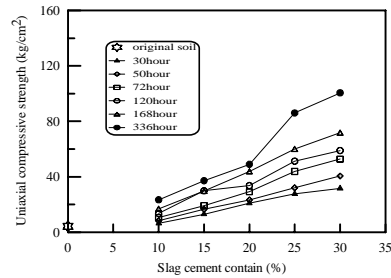


圖 8 爐石水泥添加量對強度之影響 (月世界泥岩)

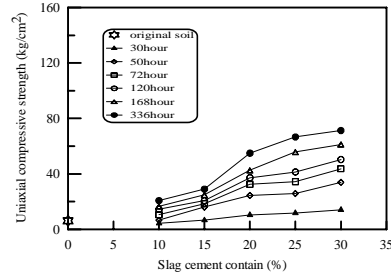


圖 9 爐石水泥添加量對強度之影響 (台東粘土)

為了討論飛灰之添加對高爐水泥改良土強度之影響，本研究先固定高爐水泥添加量為 20%，再添加不同量之飛灰於改良土中。由試驗結果顯示，添加飛灰摻料於高爐水泥改良土中，無圍壓縮強度隨著養護時間的增加而有增強的趨勢，如圖 10 所示。與僅添加高爐水泥這一組試驗結果作比較，飛灰摻料添加量為 5%~15% 時，在養護齡期 14 天之前各個養護齡期，無圍壓縮強度均未超過僅添加高爐水泥這一組。而飛灰摻料添加量為 20% 時，強度僅些微高於未添加飛灰者。因此飛灰之添加，對強度之提升助益不大。

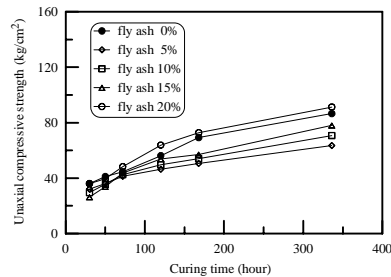


圖 10 飛灰添加量對改良土強度之影響 (台中紅土)

為研究改良土在小應變之變形特性，本研究擬以楊氏模數 E_{50} 來表示，此值為無圍壓縮強度之半值應力點的應力-應變關係曲線割線模數。圖 11、圖 12、圖 13 為不同養護齡期，楊氏模數 E_{50} 隨著高爐水泥添加量之變化情形。由以上結果顯示，楊氏模數 E_{50} 隨著高爐水泥添加量的增加而增加，且隨著養護時間的增長而增加。同時，台東粘土改良後其楊氏係數或隨齡期之增率較其他兩種土壤為小。

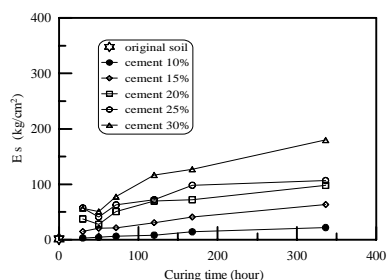


圖 11 養護齡期對改良土 E_{50} 之影響 (台中紅土)

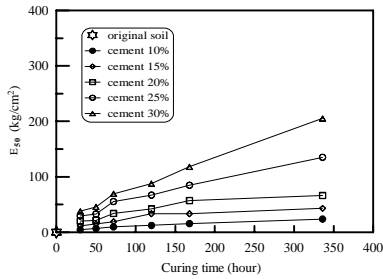


圖 12 護齡期對改良土 E_{50} 之影響 (月世界泥岩)

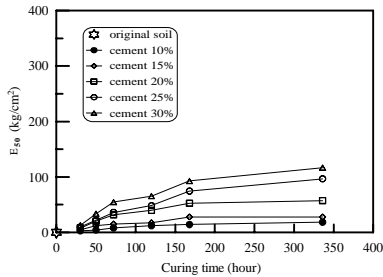


圖 13 護齡期對改良土 E_{50} 之影響 (台東粘土)

由圖 14、圖 15、圖 16 可以知道高爐水泥添加量為 10% 之改良土曲線斜率最小，而且尖峰強度並不明顯，其試體破壞的模式屬於柔性破壞。應力 - 應變曲線的斜率，依序隨著高爐水泥含量增加逐步增加，亦隨著養護齡期的增加也增加，且有較明顯的尖峰值的出現，試體破壞模式屬於脆性破壞。

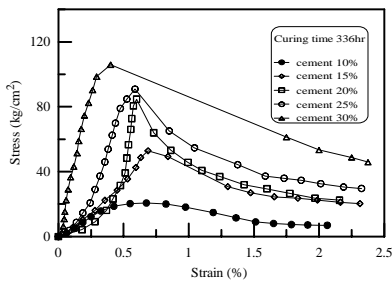


圖 14 爐石水泥對改良土應力應變曲線之影響 (養護時間 336hr—台中紅土)

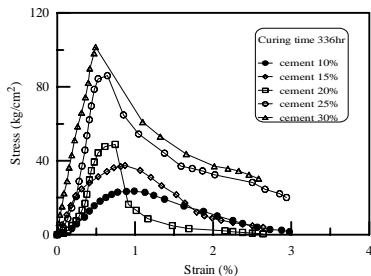


圖 15 爐石水泥對改良土應力應變曲線之影響 (養護時間 336hr—月世界泥岩)

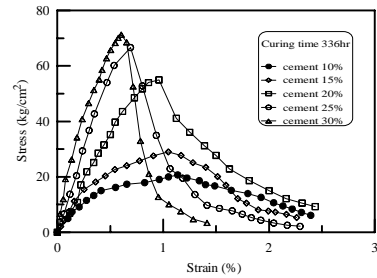


圖 16 爐石水泥對改良土應力應變曲線之影響 (養護時間 336hr—台東粘土)

四、結論

- (1) 高爐水泥改良後之土壤其無圍壓縮強度均隨著養護齡期的增加而增加。且當養護齡期超過 7 天時，強度的增加幅度並不大。
- (2) 改良土的無圍壓縮強度隨著高爐水泥添加量的增加而增加，高爐水泥添加量為被改良土乾重量的 20% 為最佳。在三種土壤中，以台中紅土改良後強度大於月世界泥岩，又大於台東粘土之強度。
- (3) 添加摻料飛灰對改良土之強度，增加影響不大。
- (4) 改良土的楊氏係數 E_{50} 隨著高爐水泥添加量和不同養護齡期的增加而增加。
- (5) 尖峰強度值隨著高爐水泥添加量的增加和養護齡期的增加越趨明顯，試體破壞時呈現脆性破壞

誌謝

感謝國科會在九十一學年度提供本計劃 (NSC 91-2211-E-324-011) 之補助，使研究得以完成，在此特別致謝。

參考文獻

- (1) 石悅欽，「利用飛灰與石灰改良淡水紅土之工程性質研究」，碩士論文，私立淡江大學，臺北，1996。
- (2) 廖洪鈞，陳威引，林威廷，黃永智，「黏土中高爐水泥攪拌樁之樁體強度和複合土壤強度評估」，第九屆大地工程學術研討會論文集，桃園，2001。
- (3) 吳秉宸，「爐石地質改良劑應用軟弱地盤承载力之改良」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，臺南，2001。
- (4) Das Braja M., Principles of Foundation Engineering, Third Edition, California State University, Sacramento, 1995, pp.723-773.