

# 高爐水泥對路基土壤穩定之影響

蔡佩勳<sup>1</sup> 王建評<sup>2</sup>

<sup>1</sup>朝陽科技大學營建工程系助理教授

<sup>2</sup>朝陽科技大學營建工程系碩士班研究生

## 摘要

本研究目的在評估高爐水泥與飛灰於路基土壤改良的應用性，在拌合不同比例之高爐水泥與飛灰，分別以阿太堡試驗、單軸壓縮試驗討論改良後塑性、活性、強度隨養護時間之變化。本研究發現紅土與高爐水泥混合後，液性限度與塑性指數有下降的現象，降低土壤之塑性。粘土改良後之無圍壓縮強度，隨高爐水泥添加量之增加而增加，但高爐水泥之添加量超過 20%，其增加情形趨緩。無圍壓縮強度隨著養護時間的增加而增加，在拌合後 7 天內隨養護齡期之增加較為明顯。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。

## 1、前言

添加穩定材料與不良路基土壤進行混合攪拌後滾壓，可以使用的穩定材料繁多，主要還是以水泥和石灰為主。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，並且會造成環境污染之紛爭。此類副生產品與水泥具有相

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。本研究將使用高爐水泥與飛灰添加於臺中大肚山紅土中，以不同的配比分別加入紅土中，混合攪拌製成實驗試體並進行試驗，探討其與紅土混合後，所產生的活性與強度之變化。

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  $57.8 \text{ kg/cm}^2$ ，而添加一般水泥之平均無圍壓縮強度為至  $54.0 \text{ kg/cm}^2$ 。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。

## 2、 研究方法

本研究所使用之紅土土樣，係取自臺中大肚山台地，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內。

高爐水泥係將水泥粒與水淬爐石共同研磨而成，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  $\text{Ca(OH)}_2$ ，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飛灰添加於紅土中，進行阿太堡限度試驗，探討高爐水泥與飛灰添加量對紅土塑性、活性之影響。高爐水泥的添加量分別為乾紅土重量之 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 小時等養護齡期時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。

### 3、 試驗結果與討論

#### 3.1 紅土試驗結果與討論

本試驗所取之紅土土樣，在試驗室進行物理性質試驗，並得試驗結果整理成圖一及表一中。由結果顯示，原始紅土土樣的自然含水量  $w_n=17.17\%$ ，土粒比重  $G_s=2.71$ 。由粒徑分佈曲線可以看出，其細粒含量高達 83.62%，砂含量為 16.38%。原狀紅土之孔隙比  $e=0.658$ 、飽和度  $S=71.18\%$ 、濕土單位重  $\gamma_m=1.92t/m^3$ 、乾土單位重  $\gamma_d=1.64t/m^3$ 。原始紅土之液性限度  $LL=39.77\%$ 、塑性限度  $PL=21.26\%$ 、塑性指數  $PI=18.51$ ，活性  $A_c=PI / <0.2\mu m$ ，此紅土土樣之活性為 1.02，屬正常活性黏土。烘乾後原始紅土之液性限度  $LL=31.06\%$ 、塑性限度  $PL=18.97\%$ 、塑性指數  $PI=12.09$ 。依據統一土壤分類系統，本土壤位於阿太堡限度塑性圖 A 線上方，屬於 CL or OL 區間內。又  $\{ (LL_{烘乾}) / (LL_{未烘乾}) \} = 0.78$ ，根據  $\{ (LL_{烘乾}) / (LL_{未烘乾}) \} < 0.75$  時歸類為有機性黏土此準則【4】，故斷定此紅土為無機性低塑性黏土(CL)。依據 AASHTO 類系統，此土壤歸類為 A-6。

由現地深度約為 2.0m 取回之紅土原狀土塊，經修整成直徑 4cm 高度 8cm 之試體後，進行無圍壓縮強度試驗。由試驗結果得知，其無圍壓縮強度為  $7.91\text{kg/cm}^2$ ，楊氏模數  $E_{50}$  為  $1.50\text{kg/cm}^2$ 。

### 3.2 改良土阿太堡試驗結果與討論

原始紅土其液性限度  $LL=39.77\%$ ，塑性限度  $PL=21.26\%$ ，塑性指數  $PI=18.51$ 。當紅土添加高爐水泥後，其阿太堡限度與高爐水泥添加量之關係，如圖二所示。由圖可知，在添加高爐水泥後，其液性限度隨著高爐水泥的添加量的增加而下降。塑性限度在高爐水泥添加量為 10% 時，塑性限度有下降的現象，但隨著添加量的增加有上升的趨勢。因此，在添加高爐水泥後，改良土塑性指數隨著高爐水泥的含量的增加而下降。液性限度隨著飛灰添加量之增加而下降，塑性限度隨著飛灰添加量之增加而增加。因此，於高爐水泥改良土中添加飛灰，改良土塑性指數隨著飛灰量的增加而下降，如圖三所示。

改良土之液性限度與塑性指數會因添加物的摻入後，發生下降的現象。因此，改良土之活性也隨之跟著減小，對於土壤的工程性質而言，液性限度、塑性指數、活性的下降，顯示著土壤產生壓縮和回脹的能力減小，也意味著土壤在經過添加添加物改良之後，其原有的工程性質已經產生改變，使得土壤更為穩定。

### 3.3 改良土無圍壓縮試驗結果與討論

圖四為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，高爐水泥改良後之紅土強度，無圍壓縮強度均隨著養護齡期的增加而增加。其原因為高爐水泥與紅土之間提供足夠的離子交換與水化反應作用的機制，產生了足夠的膠結體，使得改良土壤強度的發展上已具有相當的強度。但在高爐水泥添加量為 10% 時，養護齡期在 72 小時之前的無圍壓縮強度，反而比原狀紅土的強度來的低，約略降低 0.1%~0.3% 之間。此可能是紅土在拌合之擾動使紅土原有強度機制遭到破壞之故。土壤顆粒與顆粒之間原有的排列組合、鍵結力遭受到破壞，以致於發生強度比未改良前為低的現象。又當改良土體中添加高爐水泥含量偏低時，在短期間所能提供的卜作嵐反應速率慢，且反應之後所產生的膠結物量少，使得重模擾動後土壤顆粒與顆粒間的孔隙，尚未由膠結物充分填充和膠結，導致改良土體強度尚未發展出來，才会有改良後強度比未改良前為低的現象。在經過 72 小時養護後，其強度隨著養護時間的增加而增加。

由圖四中亦可以發現到，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，高爐水泥與紅土發生化學反應，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】曾添加高爐水泥於台北粉土質黏土中，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。

由圖五中可以發現到，改良後紅土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均較為陡峭，強度增加量較為明顯，而在 25%~30% 的添加量時，在各個養護齡期之曲線斜率均較為緩和，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，高爐水泥最經濟之添加量為 20%。

由本試驗結果顯示，添加飛灰摻料於高爐水泥與紅土混合土壤後，無圍壓縮強度隨著養護時間的增加而有增強的趨勢，如圖六所示。與僅添加高爐水泥這一組作比較，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之下，無圍壓縮強度均未超過僅添加高爐水泥這一組。若飛灰摻料添加量為 20% 時，強度均有增加。因此，飛灰添加量宜大於 20%，對強度之提升方有助益。

為研究改良土在小應變之變形特性，本研究擬以楊氏模數  $E_{50}$  為代表，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。圖七為改良土在不同養護齡期，楊氏模數  $E_{50}$  隨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。

由圖八與圖九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，其試體破壞的模式亦屬於柔性破壞。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，且有較明顯的尖峰強度值的出現，試體破壞模式屬於脆性破壞。

#### 4、 結論

由本研究之試驗結果與分析，我們可歸納成下列之結論：

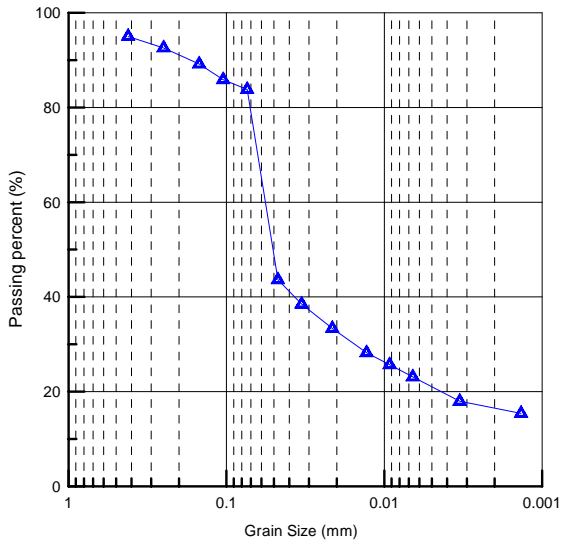
- (1) 紅土與高爐水泥混合後，液性限度下降，且隨著添含量的增加而下降量有增加的趨勢。塑性限度在添加高爐水泥添加量為 10% 時有下降的現象，隨後隨著添加量的增加有上升的趨勢。塑性指數有下降的現象，並且隨著添加量的增加而下降量有增加的趨勢。於高爐水泥改良土增添飛灰也有塑性指數隨著飛灰量的增加而下降之趨勢。
- (2) 改良土液性限度、塑性指數下降，活性也隨之跟著減小，顯示著土壤產生壓縮和回脹的能力減小，也意味著高爐水泥對於紅土土壤，具有穩定的效果。
- (3) 改良土的平均無圍壓縮強度隨著高爐水泥添加量與養護齡期的增加而增加，高爐水泥添加量為被改良土乾重量的 20% 為最佳。當養護齡期超過 7 天時，強度的增加幅度並不大。
- (4) 對強度而言，飛灰添加量以被改良土乾重量的 20% 為最佳。
- (5) 改良土的割線模數  $E_{50}$  隨著高爐水泥添加量和不同養護齡期的增加而增加。
- (6) 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。

## 5、 參考文獻

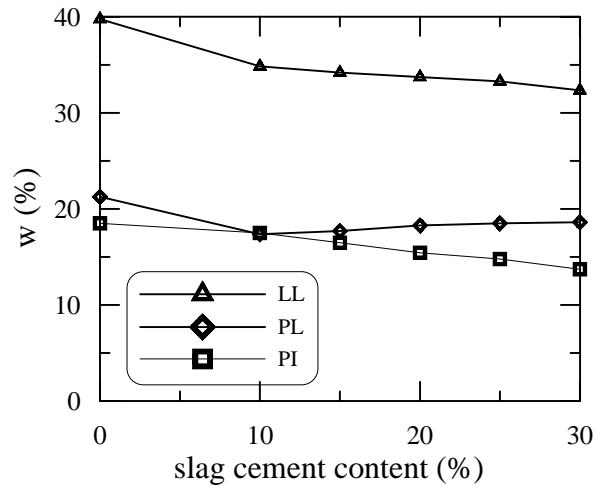
- (1) 石悅欽，「利用飛灰與石灰改良淡水紅土之工程性質研究」，碩士論文，私立淡江大學，臺北，1996。
- (2) 廖洪鈞，陳威飲，林威廷，黃永智，「黏土中高爐水泥攪拌樁之樁體強度和復合土壤強度評估」，第九屆大地工程學術研討會論文集，桃園，2001。
- (3) 吳秉宸，「爐石地質改良劑應用軟弱地盤承载力之改良」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，臺南，2001。
- (4) Das Braja M., Principles of Foundation Engineering, Third Edition, California State University, Sacramento,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

表一 原始紅土之一般物理性質

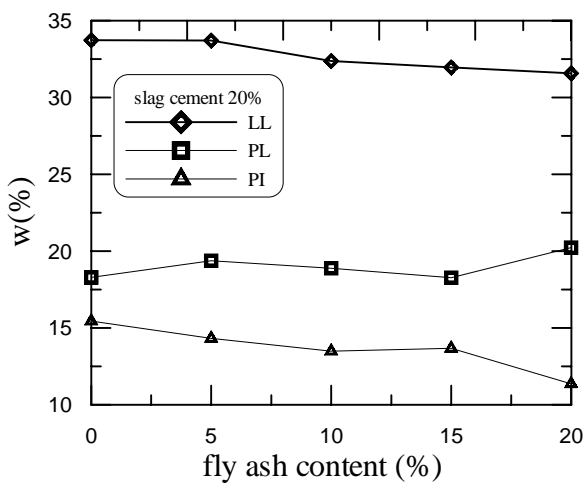
比重	2.71
液性限度 (%)	39.77
塑性限度 (%)	21.26
塑性指數	18.51
活性	1.02
孔隙比	0.658
濕土單位重	1.92t/m <sup>3</sup>
無圍壓縮強度	7.91kg/cm <sup>2</sup>
楊氏係數	1.5kg/cm <sup>2</sup>



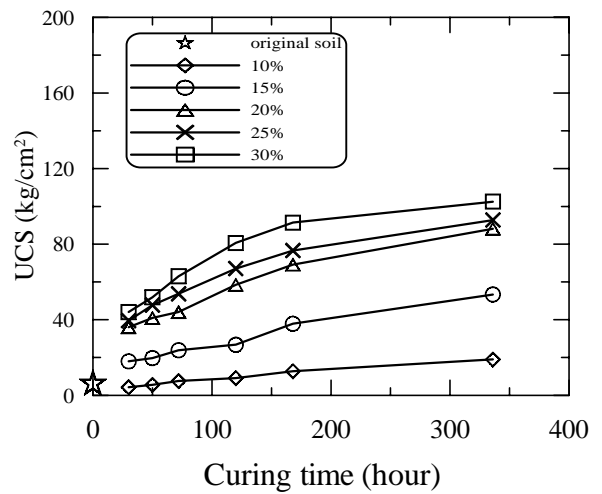
圖一 紅土粒徑分佈曲線



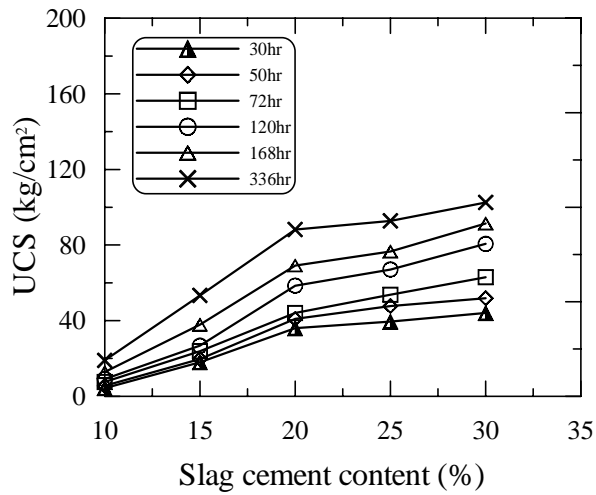
圖二 爐石水泥對紅土阿太堡限度之影響



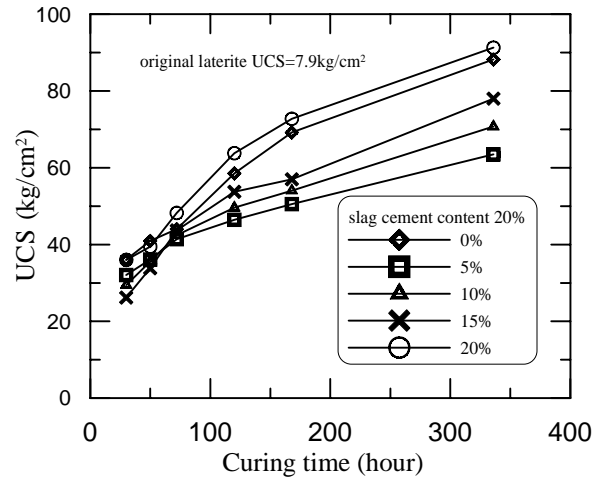
圖三 飛灰對改良土阿太堡限度之影響



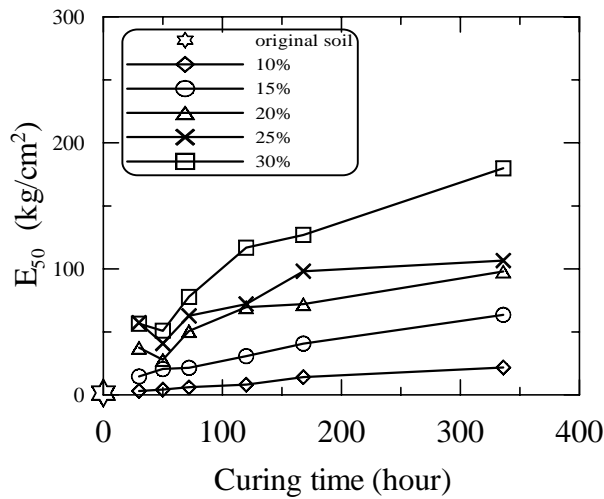
圖四 養護齡期對改良土強度之影響



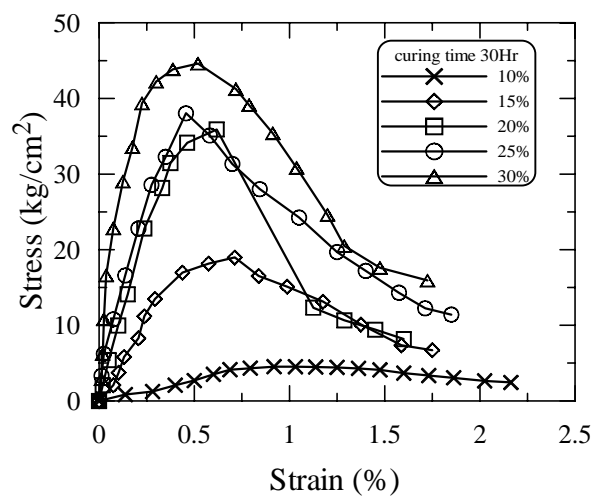
圖五 爐石水泥添加量對改良土強度之影響



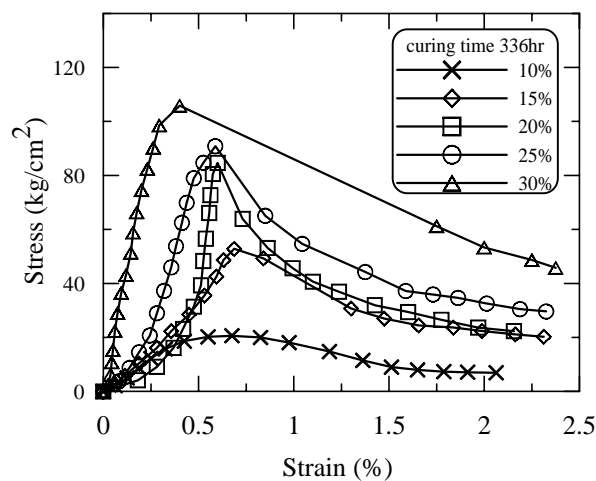
圖六 飛灰添加量對改良土強度之影響



圖七 養護齡期對改良土 E<sub>50</sub> 之影響



圖八 爐石水泥對改良土應力應變曲線之影響 (養護時間 30hr)



圖九 爐石水泥對改良土應力應變曲線之影響 (養護時間 336hr)