

泥岩穩定處理再利用之研究

Stabilization of Mudstone for Re-utilization

國立台灣大學農業工程系講師

陳 增 壽
Tzen-Show Chen

國立中央大學土木工程系副教授

黃 偉 慶
Wei-Hsing Huang

摘 要

本省西南部泥岩覆蓋地區，過去由於泥岩之特殊物理及化學特性，不利於工程建設而未完全開發，但在可預見的未來，公共建設與開發將趨於頻繁。本研究針對此一趨勢，採取西南部泥岩碎屑進行穩定化處理，以利未來可能之再利用。採用水泥及石灰為穩定劑，配合飛灰對泥岩碎屑加以穩定化處理，可有效改善泥岩之工程性質，包括大幅提高其強度、承載力、及降低其對水之敏感程度。在泥岩中添加5~10%的水泥或10~15%的石灰，夯實後可做產業道路或其它次要道路之路基及基、底層使用，而泥岩與10%~15%之水泥混合，經壓實可用於製作低強度土磚或護坡磚使用。此外，在泥岩與水泥或泥岩與石灰混合物中適度添加飛灰，有助於混合物壓實後之強度發展與耐久性，並可降低處理成本。

關鍵詞：泥岩，穩定處理，飛灰。

ABSTRACT

The mudstone-covered area in the southwest region of Taiwan is faced with many development projects. Since mudstone has been considered a problematic soil, it is beneficial to find ways of stabilizing mudstone for potential utilization. This study investigates the feasibility of using cement and lime to improve the engineering properties of mudstone. It was found that the addition of 5 to 10% cement or 10 to 15% lime is effective in increasing the strength and bearing capacity and reducing water sensitivity of mudstone. The modified soil can be utilized as an economical construction material for roadbed or subbase construction. Mudstone stabilized with 10 to 15% cement is suitable for making low-strength earth bricks. Also, the addition of fly ash to the mudstone-cement or mudstone-lime mixtures tends to increase the compressive strength and durability of the stabilized material.

Keywords: Mudstone, Cement stabilization, Fly ash.

一、前言

由於國內重大工程建設的陸續推動進行，對於各項工程建設所產生的大量廢棄土，也帶來相當棘手且難以處理的問題，除了棄土區的尋覓困難外，運送過程中所造成的環境污染問題，使得處理費用也節節升高。另一方面，國內砂石料的供給也逐漸呈現短缺的現象，因此，如能將公共工程的廢棄土使用適當的穩定劑或膠結劑，加以處理利用，應用在產業道路路基的鋪設或作為邊坡護坡工程的素材等，不失為一有效解決廢棄土處置的方法，更可提供一種替代性的工程材料，在經濟價值上將有極大的意義，可謂一舉兩得。

近年來社會經濟的快速成長及政府公共建設投資的增加，促使土地利用的需求漸增，平原附近山麓地區的開發利用，已成為必然之趨勢。而位處台灣西南部地區，北起嘉義玉井，南至高雄岡山，面積廣達一千餘平方公里的泥岩覆蓋地區，由於天生具有特殊的物理與化學特性，既不利於工程建設，也不適合農業墾植，至今尚未完全開發，因此，勢必成為未來開發利用的重要地區，可預見的公共建設與開闢必將十分頻繁，而大規模的挖、填方工程將不可避免。因此，如何針對工程建設的大量廢棄土加以處理，並尋求再利用的途徑，以免廢棄土任意棄置而引發更多環境及水土流失的災害。

國內外做為穩定土壤的材料，大多採用水泥系及石灰系，由於這些材料來源相當豐富，供應不虞匱乏，加上儲存容易且不具危險性，故為非常合適的土壤改良材料。利用水泥或石灰強化土壤改良地盤的相關研究，已有不少學專家進行研究，可是利用處理後的土壤進行再利用之研究，則並不多見。有鑑於此，本研究探討泥岩土壤穩定化處理之途徑，除對泥岩的物理性質加以測試外，也使用不同穩定劑及配方對泥岩加以處理，評估其壓實特性、抗壓強度、承載力及耐久性等，以便決定穩定化處理泥岩之較佳配方。

二、泥岩基本性質

台灣西南部泥岩的發育範圍，主要分佈在西部山麓地帶的官田—新化—關廟—岡山一線以

東，以及玉井—南化—旗山一線以西的區域內，遍及嘉義、台南及高雄三縣市，涵蓋面積廣達一千餘平方公里，厚度則在數千公尺以上[1]。泥岩因含泥量高、岩化程度低，位在西南部乾溼季分明，降雨量集中於雨季影響下，地表風化侵蝕嚴重，極易崩塌，不但植生不易，且地勢崎嶇不平，形成寸草難生之惡地。

泥岩是一種沉積岩，由粉土與黏土所組成。其礦物組成則主要為伊萊石（illite）、綠泥石（chlorite）、石英、長石及雲母等，具膨脹性之黏土蒙特石（montmorillonite）含量極為有限。泥岩含有大量之 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等陽離子，pH 值高達 8—9，尤其本區泥岩黏土礦物中，含有高量鈉離子 Na^+ [2]，使附著的水分愈多，容易吸水軟化。

泥岩具有回脹特性，吸水即會引起體積膨脹。泥岩在沉積壓密過程中，黏土顆粒間產生一些物理及化學變化，形成所謂的固結變質鍵，而主要膠結物為黏土礦物及膠體，當遭遇水份或電解質溶液入侵時，鍵結及膠體被破壞，且儲存的應變能逐漸釋出，因而產生回脹現象[3]。

泥岩於乾燥時呈現相當強度，但遇潮溼時，由於黏土表面與孔隙水間的滲透壓升高，使黏土礦物迅速吸水，而外圍黏土接觸水份後黏土顆粒迅速膨脹，水份無法滲入內部，於是內外因膨脹量差異過大，造成相對位移而崩解（slaking）[4]。當表面層逐漸乾燥時，由於內層排水速率較慢而形成內弛外張，造成外層剝落及大量裂紋。而這些裂紋使水分得以更深入泥岩，循環破壞的結果，使泥岩的崩解情形更趨嚴重或蔓延[5]。

三、穩定處理原理

在土壤中添加適量的水泥或石灰為穩定劑，加水拌合後，不僅可改變土壤的塑性，並可改善其強度及壓縮性等工程性質，成為一具經濟性的工程材料。而土壤與穩定劑混合後工程性質得以改良之原理，隨穩定劑之不同而有差異，以下分別說明其反應機理。

1. 水泥穩定反應機理 [6]

波特蘭水泥由多種成份組成，主要為 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF ($\text{C} = \text{CaO}$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$)，此外尚有少許氧化鐵、氧化鎂、鹼、

無水硫酸等，其中以 C_3S 含量最多，也是產生膠結物的主要成份。當水泥與水混合產生水化作用時，其化學反應生成三種產物($H=H_2O$)：

a. 鈣矽水合物， $C_3S_2H_x$ 或 C_2SH_x

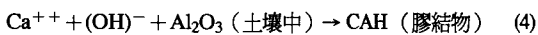
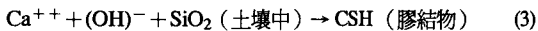


b. 鈣鋁水合物， C_3AH_x 或 C_4AH_x ，反應式為

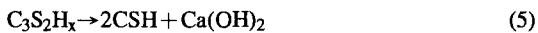


c. 石灰 (hydrated lime)

其中前兩項產物為水泥自身水化作用所產生的主要膠結物。除水泥之水化作用外，由(1)式中產生的 $Ca(OH)_2$ ，即石灰，在鹼性環境下隨即解離成離子狀態，並與土壤中分解出來的矽及鋁化合物(SiO_2 及 Al_2O_3)發生化學反應，生成CSH及CAH之膠結物，如(3)、(4)式。



此外，在(3)、(4)式中的反應消耗了氫氧根離子(OH^-)，使pH值降低，在低鹼性環境下， $C_3S_2H_x$ 不穩定而易於解離為CSH及石灰，如下式



以上所述即為土壤以水泥進行穩定處理時所發生的系列反應。根據(1)至(5)式的說明，可見在土壤—水泥混合物中，有相當份量的膠結物是由土壤參與反應所生成的，因此，土壤與水泥拌合後產生的膠結物事實上較純由水泥水化所產生的膠結物為多，但由於一般以水泥對土壤進行穩定處理時，水泥之使用量甚為有限，如水泥用量過低時則僅能在少量的水泥顆粒周圍產生膠結物，而欲產生土壤穩定的效果，則水泥的使用量必需足夠，使各水泥顆粒本身水化及與土壤反應後生成的膠結物互相重疊，在土壤—水泥間形成較具連續性的強硬骨架，方能達到穩定處理的效果。

2. 石灰穩定作用 [7]

一般所稱的石灰分為生石灰(CaO)及消石灰

[$Ca(OH)_2$]，生石灰係將石灰岩鍛燒而得，而消石灰則為生石灰與水起反應所得的產物。

泥岩以石灰進行穩定處理主要可產生兩種作用：

a. 陽離子交換 (cation exchange) 與密簇、凝聚 (flocculation-agglomeration) 作用

石灰與細粒黏土加水拌合後，高價的鈣離子 Ca^{2+} 游離，會取代黏土顆粒表面複水層中的低價離子，發生離子交換作用，因而大量減少土壤的吸水能力。離子交換作用完成後，鈣離子附著於黏土顆粒表面，會限制黏土顆粒表面複水層的發展，使土壤產生密簇及凝聚現象，而降低土壤之塑性及體積變化的潛能。

b. 膠結作用 (cementing action)

石灰中的鈣離子與黏土礦物中的矽酸及鋁酸鹽產生膠結反應，形成矽鈣膠體(CSH)及鋁鈣膠體(CAH)，即(3)、(4)式，此種作用稱為卜作嵐反應 (pozzolanic reaction)。卜作嵐反應產生的物質具有膠結作用，可將黏土顆粒包圍，並填充於顆粒間的孔隙，因此是石灰穩定土壤後強度增加的主要來源。由於卜作嵐反應需要土壤分解矽及鋁化物參與，因此石灰穩定處理的效果視泥岩中含有可作用之矽鋁礦物含量而定。如砂土或礫石中所含之矽、鋁化物(SiO_2, Al_2O_3)構造穩定，不易解析出來與鈣離子起反應，故以石灰穩定處理之效果將十分有限。

上述兩種型式的作用中，離子交換與密簇、凝聚作用係在短時期內即完成，而膠結作用則依賴鈣離子的擴散，進行相當緩慢，可持續達數年之久，因此，以石灰穩定處理土壤，其強度之增加以後期較為顯著。如欲在短時間內使強度產生顯著改善，可以提高養治溫度的方式，加速強度的發展。國內曾進行以石灰、稻殼灰穩定處理泥岩之研究，結果顯示混合物在 $60^\circ C$ 下養治一天所發展出之強度與在常溫下養治28天的強度相當[8]。

3. 添加飛灰的效果

飛灰是燃煤火力電廠中煤粉內一些礦物質及燃燒不完全的粉塵，經靜電集塵器收集者稱之。飛灰本身不具膠結性，在常溫下有水份存在時，

能與氫氧化鈣發生化學反應，形成具有膠結性質的化合物，因此飛灰為一卜作嵐材料 (pozzolan)。飛灰之化學組成，隨燃煤之產地不同而有差異，但一般以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及 CaO 為主，此外尚有少量的 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 、 SO_3 及 TiO_2 等，表1所示為較接近泥岩分佈地區台中、興達、大林等電廠所生產飛灰之化學成份[9]，由表中可見，各電廠飛灰之化學組成差異不大，其相關性質變異的情形亦屬有限。因此，應用於泥岩穩定處理時，各電廠飛灰所產生的效果應相當接近。

國內燃煤電廠生產的飛灰，根據CNS3036的標準，均屬於F類飛灰，即 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 之含量大於70% [10]。但事實上以台中、興達、大林三電廠為例，其平均之 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量均超過75%（見表1），兩者與石灰反應產生的膠結物可將顆粒周圍與其他物質膠結起來，為土壤穩定處理時強度增加的主要來源，因此在泥岩穩定處理時添加飛灰，可提供大量卜作嵐反應所需的材料，加強穩定處理的效果。

表 1. 興達、大林、台中電廠飛灰化學成份 [7]

化學組成 (重量%)	興達	大林	台中
SiO_2	50.4	49.7	52.3
Al_2O_3	27.3	25.5	25.6
Fe_2O_3	3.7	5.2	6.0
CaO	3.7	3.3	5.2
MgO	1.2	1.2	1.6
K_2O	2.0	2.4	1.4
Na_2O	0.5	0.5	0.4
SO_3	0.5	0.3	0.3
TiO_2	1.4	1.3	1.2
燒失量	6.0	6.8	7.8
pH 值	9.2	10.1	11.0

註：表中數據為民國79年7月至82年4月之平均值

目前國內計有深澳、林口、台中、興達及大林等火力發電廠生產飛灰，年產量約180萬公噸，目前台電提供外界免費取用，因此為一相當經濟而有用的資源。其它常見的卜作嵐材料尚有稻殼焚燒灰燼、鋼鐵工業的高爐爐渣、廢電石渣等，

但仍以飛灰之產量最大且最為經濟。因此對泥岩進行穩定處理時，如能添加適量的飛灰，不僅節省國家天然資源，降低處理成本，更可提高穩定處理的成效，可謂一舉數得。

四、試驗材料與方法

1. 試驗材料

- (1) 泥岩：本研究採用之泥岩選取自台南烏山頭水庫集水區路邊之風化泥岩。本土樣比重為2.712，統一土壤分類為ML。
- (2) 水泥：採用市售袋裝之波特蘭第一型水泥。
- (3) 石灰：為市售袋裝之消石灰，其化學成份見表2。
- (4) 飛灰：台中火力發電廠生產之飛灰，比重為2.21，化學組成見表1。

表 2. 市售消石灰化學成份

成份	含量 (重量%)
Ca(OH)_2	51.5
MgO	30.6
SiO_2	0.4
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	0.3
SO_2	1.1
燒失量	16.0

2. 試驗方法：

本試驗之泥岩分別以水泥及石灰進行穩定處理，並添加飛灰，探討泥岩穩定處理後之工程性質，做為處理時選擇配方之依據。各材料配合比例皆以乾重量計算，在經濟性的考量下，水泥及石灰之使用量皆不超過20%，且為處理較多量之泥岩，飛灰添加量以30%為限。

泥岩由現地取回後，即加以風乾保存，試驗時取出與水泥或石灰及飛灰按配方比例拌合，然後再行加入適量水分充分拌勻。拌合完成之試樣先進行標準夯實試驗決定最佳含水量，並對夯實試體加以養治，至預定齡期進行無圍抗壓強度試驗。此外，考慮泥岩對水之敏感性，夯實試體在養治室內溼治一天後拆模，然後將試體分為三組分別以不同方法養治，至七天時取出進行抗壓強

表 3. 水泥 (10 %) - 泥岩 (90 %) 混合物不同養治方法所得抗壓強度

養治方法	溼治 7 天	溼治 3 天後取出 大氣中養治 4 天	拆模後即置於 大氣中養治
7 天抗壓強度(kg/cm ²)	5.9	6.8	8.1

度試驗，以評估較佳的養治方法。其中第一組仍置於養治室中繼續溼治，第二組係於溼治三天後取出於大氣環境下養治，另一組則於拆模後即置於大氣中養治，表 3 所示為使用 10 % 水泥處理之泥岩夯實後七天時，三組試體之強度比較，其中以拆模後即置於大氣中養治之試體可得較大之強度，因此建議泥岩穩定處理後即置於大氣中養治較有利於其強度發展。

各組配比夯實試驗完成後，試驗時之拌含水量即以夯實最佳含水量為準，製作多量試體分別於養治 7 天，28 天及 60 天時量測抗壓強度及回脹率。由於泥岩的回脹現象約在 24 小時內趨於穩定 [3]，因此，經穩定處理的泥岩混合土試體在達到預定齡期後，將其浸於水中 24 小時後量測試體之回脹率。此外，對石灰 - 泥岩混合物亦於上述齡期測定其承載力 (CBR)；而水泥 - 泥岩混合土則於 28 天齡期時進行 12 次乾溼循環，評估泥岩處理後抗侵蝕、風化之耐久性。

五、結果與討論

1. 夯實試驗結果

分別以石灰及水泥為穩定劑改良泥岩時，隨飛灰添加量不同所得之最大乾密度與最佳含水量列於表 4。表中顯示在泥岩中添加石灰或飛灰都會使壓實後的乾密度降低，這是因為石灰、飛灰的比重（約 2.2）較泥岩之比重 (2.71) 為小，因此石灰及飛灰的使用量愈多，則其與泥岩混合物壓實後之最大乾密度愈小。另外，石灰與泥岩拌合後短期內即產生的密簇、凝聚作用使土壤結構增強而不易於壓實，亦使最大乾密度降低。在泥岩中添加水泥時，由於水泥比重較大（約 3.15），故有利於乾密度的增加，但水泥水化作用的進行亦使壓實趨於困難，在此兩種效應交互作用下，增加水泥使用量對泥岩壓實後最大乾密度並未產生

顯著的影響。

在最佳含水量方面，由於石灰及飛灰均具有極佳的吸水能力，且其顆粒細小，吸附之水量亦多，故於泥岩中添加石灰及飛灰將使壓實之最佳含水量顯著增加。而添加水泥於泥岩中時，其最佳含水量亦略有增加，但增加的趨勢與水泥用量間的關係並不明顯。

表 4. 夯實試驗結果

配合比例 (重量%)	最大乾密度 (g/cm ³)	最佳含水量 (%)
純泥岩	1.75	16.2
泥岩：石灰：飛灰		
95:5:0	1.67	18.4
90:5:5	1.62	19.0
85:5:10	1.59	20.8
80:5:15	1.52	22.7
90:10:0	1.64	19.2
85:10:5	1.58	20.7
80:10:10	1.55	22.2
75:10:15	1.49	23.3
泥岩：水泥：飛灰		
95:5:0	1.72	17.0
90:10:0	1.71	17.6
85:15:0	1.75	16.8
80:20:0	1.74	17.2

為了解泥岩穩定處理後，壓實乾密度與其無圍抗壓強度之關係，各配比壓實完成之試體均加以養治，至七天齡期時測試其抗壓強度，結果顯示壓實泥岩之乾密度愈大，養治後試體之強度愈高。以添加 10 % 水泥之泥岩為例，其壓實試體乾密度與七天抗壓強度之關係示於圖 1。由圖中可見壓實時乾密度的提高確實有助於混合物養治後的

強度，因此，對泥岩進行穩定處理時，宜選擇在最佳含水量加以壓實，以提高混合物之乾密度，進而得到較佳的強度。

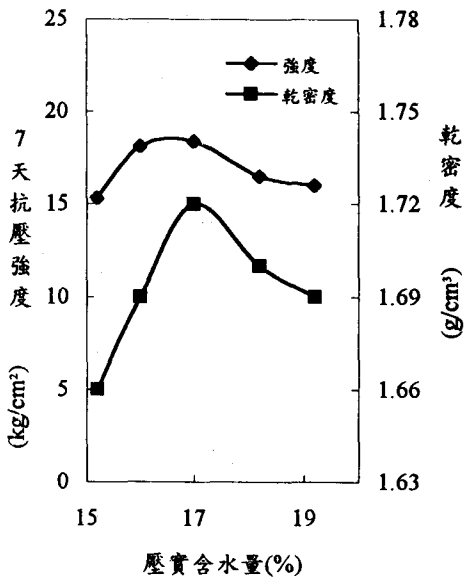


圖 1. 水泥 (10 %) - 泥岩混合土壓實乾密度與抗壓強度關係

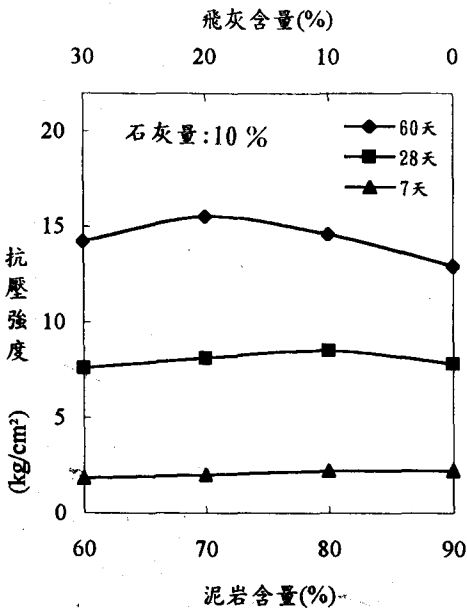


圖 2. 10 %石灰配合不同比例之泥岩、飛灰混合土之抗壓強度

2. 抗壓強度

以石灰配合飛灰改良泥岩，其強度之生成係

由短期的密簇作用及長期的膠結作用發展而來，因此，石灰、飛灰與泥岩混合物之無圍抗壓強度隨石灰含量之增加而略為增加，且隨混合物養治齡期之增長而有明顯的增加。圖 2、3 分別繪出石灰含量為 10 % 及 15 % 時，不同飛灰用量與壓實混合物強度之關係，此二圖顯示石灰含量一定時，飛灰添加量的改變對混合物的抗壓強度並未有顯著的影響，而值得注意的是以石灰及飛灰處理後泥岩之抗壓強度隨齡期有大幅的成長，此乃因石灰的膠結作用（卜作風反應）係持續緩慢進行，加上飛灰的參與，使混合物的晚期強度明顯提高。另一方面，比較圖 2 與 3 可見增加石灰用量對於壓實泥岩的強度僅有微量提升的效果，因此欲提高壓實泥岩的強度，延長其養治時間較增加石灰用量可獲得更好的效果。

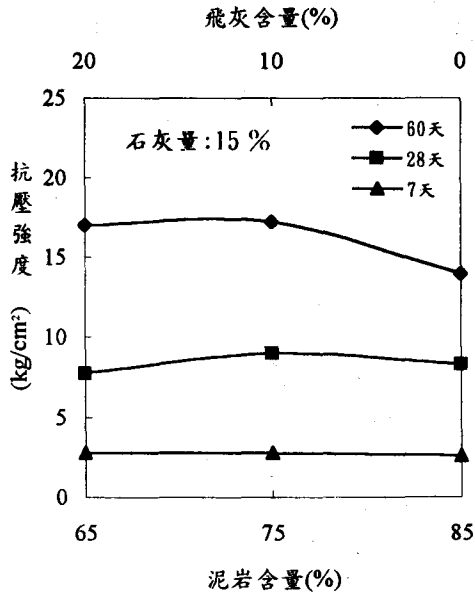


圖 3. 15 %石灰配合不同比例之泥岩、飛灰混合土之抗壓強度

使用水泥穩定處理泥岩的效果，以增加水泥使用量對於混合物之強度具有較顯著的提升，此乃因水泥與泥岩混合土中強度的主要來源為水泥水化之膠結物，因此水泥顆粒的濃度愈高對混合土之強度愈有幫助，圖 4 所示為水泥用量與強度之關係。混合土隨齡期增長之強度發展情形示於圖

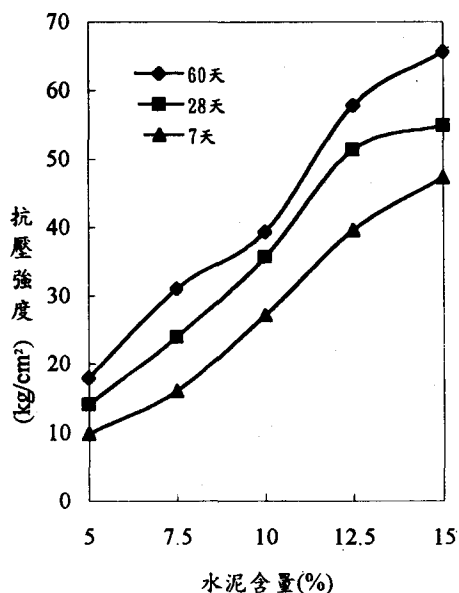


圖 4. 水泥含量與混合土強度關係圖

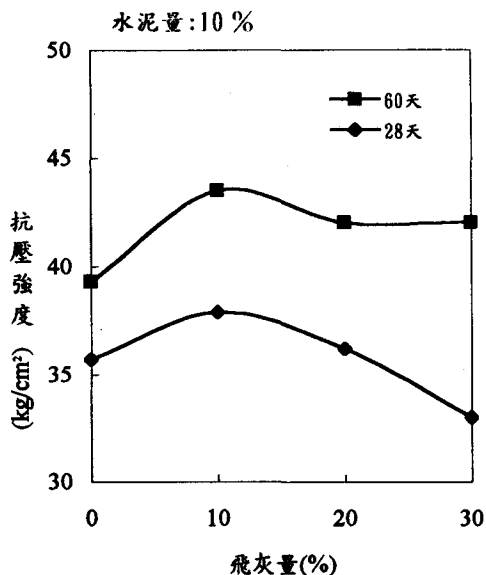


圖 6. 飛灰用量與混合土強度關係 (水泥量 = 10 %)

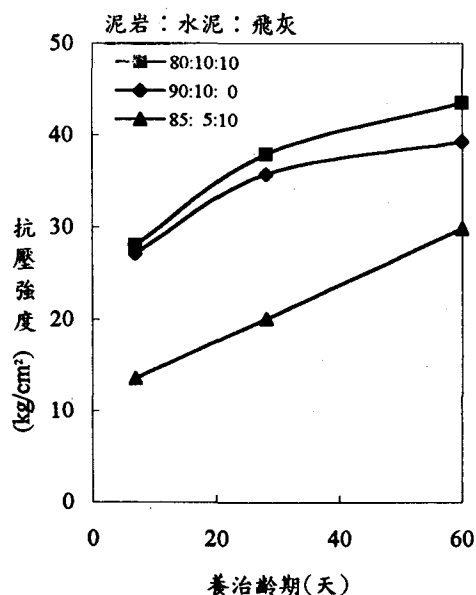


圖 5. 各不同配合比例之泥岩—水泥—飛灰混合土強度發展情形

5，圖中顯示混合土在早期（7天）即已發展出相當不錯的強度，以後隨水化作用的持續進行強度僅有小幅度的成長。由此可見，以水泥穩定處理泥岩，可在短時間內即產生良好的效果，且水泥用量的增加對於混合土的強度發展有明顯的幫

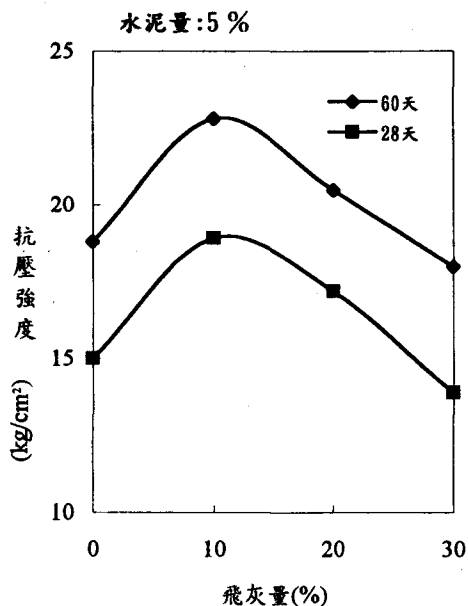


圖 7. 飛灰用量與混合土強度關係 (水泥量 = 5 %)

助。
以水泥混合飛灰穩定處理泥岩時，已知飛灰使用量如超過 30 % 將使混合土強度略為降低 [11]。圖 6 及 7 分別顯示水泥用量為 10 % 及 5 % 時，飛灰使用量與混合土強度之關係，由圖中可發現

峰，顯示在水泥－泥岩混合物中使用過多的飛灰並無意義，換言之，以水泥穩定處理泥岩時添加飛灰有一最佳使用量，在此最佳飛灰使用量下，混合土可獲得最大強度。

3.加州承載比(CBR)

由穩定處理後混合土無圍抗壓強度的試驗結果，可知石灰、飛灰與泥岩混合土符合路基、基層或結構物填方的強度要求，因此進行加州承載比試驗，確實加以評估，所得結果如表5。表中養治齡期0天的CBR值係將混合物壓實完成後不經養治即浸於水中4天進行試驗，故此時泥岩混合物

表 5. 石灰－泥岩混合土之 CBR 值

泥岩：石灰：飛灰 (%)	養治齡期		
	0 天	28 天	60 天
100:0:0	2.5		
90:10:0	42	63	74
80:10:10	39	70	88
70:10:20	40	72	92
85:15:0	51	94	106
75:15:10	47	99	110
65:15:20	50	98	105

承載力改善的主要來源是石灰－泥岩混合物的離子交換與密簇、凝聚反應，而膠結作用尚未開始。以10%石灰改良之泥岩而言，壓實試體未經養治其CBR值已達30，顯示石灰穩定處理在短時期內亦可發揮相當效果；以後隨養治齡期增長，

膠結作用逐漸進行，至28天時CBR值可達70以上。此外，各CBR試體之浸水回脹率皆限制在0.4%以內。因此，以石灰改良之泥岩其承載力已可充分做為產業道路或其他次要道路之路基或基、底層使用，如應用於結構物填方，則石灰之使用量尚可視情況減少，以降低處理成本。

4.耐久性

以水泥穩定處理後之泥岩強度甚高，為進一步評估其製作邊坡護坡塊或農用低強度土磚之可行性，故進行乾溼循環耐久性試驗。壓實之水泥、泥岩、飛灰混合土試體經28天之養治後，浸泡於水中5小時（室溫）取出，再置於70℃之烘箱中42小時，此為一個乾溼循環，每個循環間量測試體之含水量及體積變化情形，並以鋼刷在試體全部表面刷過二次後量測其重量損失，稱為土壤～水泥損失量(soil-cement loss)[12]，共經過12次乾溼循環，以評估試體抵抗環境侵蝕、風化之耐久性。

各種不同配比之混合土其乾溼循環試驗結果如表6所示。表中顯示以10%水泥穩定處理泥岩後，可有效限制原泥岩之回脹而維持其體積穩定性，使混合土經12次乾溼循環所得之最大體積變化量皆不超過2%，而土壤－水泥之重量損失在3.5%以內，遠低於波特蘭水泥協會建議之7%上限[13]。比較表6中各不同配合比例之試驗結果，可知在水泥－泥岩中添加飛灰對於乾溼循環產生之體積變可有效減少，而對混合土受乾溼循環後之重量損失則沒有明顯影響趨勢。此外，表6亦列出混合土受乾溼循環後之強度損失情形，其中僅

表 6. 水泥－泥岩混合物耐久性試驗結果

配合比例 泥岩：水泥：飛灰	12次乾溼循環後 體積變化量(%)	最大體積 變化量(%)	土壤－水泥重 量損失(%)	28天強度 (kg/cm ²)	12次乾溼循環 後強度(kg/cm ²)	強度變化 率(%)
90:10:0	1.29	1.84	2.52	35.7	34.9	- 2.2
80:10:10	0.40	1.15	3.10	37.9	44.5	+ 17.4
70:10:20	0.20	0.51	2.96	36.2	47.9	+ 32.3
95:5:0	1.60	2.21	4.22	13.5	12.8	- 5.2
85:5:10	0.57	1.49	3.79	14.3	18.8	+ 31.5
75:5:20	0.36	0.66	3.70	13.0	18.0	+ 38.5

* 強度變化率為+號表示強度增加，-號表示強度損失

有未添加飛灰之混合土顯示5%以內之強度損失，其他添加飛灰混合土則皆顯現相當程度的強度增加，可見飛灰的卜作嵐反應不僅可提升混合土的晚期強度，同時對於其耐久性的改善確實具有明顯的助益。

六、結 論

1. 使用石灰為穩定劑經壓實處理可有效改善泥岩之工程性質並提升其承載力，混合土可做為產業道路或其他次要道路之基、底層材料，或做為結構性填方使用。
2. 使用石灰對泥岩進行穩定處理時，增加石灰之用量僅使混合物之無圍壓強度微量增加，而隨養治時間之增長其強度有較顯著的成長，因此如欲提高泥岩、石灰混合物之強度，增加養治齡期將較提高石灰混合比例為有效。此外，在泥岩、石灰混合物中添加飛灰對其晚期強度具有正面的幫助。
3. 以水泥對泥岩進行穩處理可大幅增加泥岩的強度與耐侵蝕風化能力，壓實後之混合土可製成護坡塊或低強度土磚，供非結構性之水土保持、景觀、農藝等方面應用。
4. 在泥岩、水泥混合土中添加飛灰不僅可降低穩定處理的成本，且對於混合土之晚期強度及耐久性有顯著的改善效果，但使用量應不超過20%，以獲得最佳成效。
5. 由於泥岩受水份入侵時極易造成岩質軟化而降低強度，故經穩定處理後之泥岩宜在大氣中養治，不需進行濕治，是以進行泥岩穩定處理的時機以選擇乾季為宜。

七、參考文獻

1. 耿文溥，「台南以東丘陵區之地質」，經濟部中央地質調查所彙刊，第1號，第1-31頁，1981。
2. 顏富士、蔡鑑輝，「台灣西南部泥岩坡地所含泥岩之物化性質」，國科會防災科技研究報告74-09號，1985。
3. 李德河、許琦、周墩堅，「泥岩剪力強度特性研究」，國科會防災科技研究報告77-70號，1989。
4. Surendra, M., Lovell, C.W., and Wood, L. E., 1982, "Laboratory Studies of the Stabilization of Nondurable Shales," Transportation Research Record 790, TRB, Washington, D. C.
5. 顏富士，「以活化爐渣加強泥岩坡面穩定性之研究」，國科會防災科技研究報告76-42號，1988。
6. Moh, Z. C., 1962, "Soil Stabilization with Cement and Sodium Additives," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 88, No. SM6, pp. 81-105.
7. TRB, Soil Stabilization, State of the Art Report 5, 1987, Transportation Research Board, Washington, D. C.
8. 王訓濤，「土壤添加石灰、稻殼灰穩定處理後之工程特性研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，1977。
9. 台灣電力公司，「台灣地區煤灰利用之研發及其應用之調查研究」，1993。
10. 中國國家標準，總號3036，類號A2040，「卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或鍛燒卜作嵐攪和物」，經濟部中央標準局，1984。
11. 金永斌、曾哲鳴、李林少華、郭晉榮，「台灣西南部泥岩坡地表面防治穩定處理」，國科會防災科技研究報告74-10號，1985。
12. ASTM, "Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil Cement Mixtures," ASTM Annual Book, Vol.04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
13. Portland Cement Association, 1971, Soil Cement Laboratory Handbook.

收稿日期：民國84年10月18日

接受日期：民國84年11月3日