

稻殼灰作土壤穩定劑之工程特性

ENGINEERING PROPERTIES OF SOILS
USING RICE HULL AS STABILIZER

胡 邵 敏 SIU-MUN WOO

李 德 河 TEH-HO LEE

原載於中國工程學刊，第一卷，第一期，67年1月
第87 - 95頁

Reprinted from

Journal of the Chinese Institute of Engineers

Vol. 1, No. 1, pp. 87-95, Jan. 1978

ABSTRACT

The study of an effective utilization of rice hull ash, which is produced 100,000 tons per year in Taiwan, becomes necessary. This study investigates the uses of rice hull ash with lime as a soil stabilizer admixture. The primary purposes were to study the compaction characteristics and the factors affecting the strength development of the lime-ash stabilized sandy and clayey soils. Standard compaction test and undrained direct shear test were carried out. Results showed that adding rice hull ash into a soil increased the effectiveness of lime. Lime-ash admixture caused the compacted dry density of a soil to decrease but the as-compacted strength to increase. The shear strength of a lime-ash stabilized soil increased with curing time, but reduced when soaked. The optimum lime-ash weight ratio of soils was found to be 1:2 or 1:3. To produce equivalent strength values, the percentage of lime requirement could be reduced by adding rice hull ash.

稻殼灰作土壤穩定劑之工程特性

胡 邵 敏* 李 德 河**

國立成功大學土木工程研究所

摘 要

臺灣每年廢棄稻殼灰數量達十萬公噸以上，如何有效利用，已是一項重要研究課題。本文在研究利用稻殼灰與石灰混合作為土壤穩定劑，並在瞭解其應用於砂質土壤及粘質土壤時之壓實特性和影響穩定後土壤強度之因素。實驗方式是採取標準壓實試驗及不排水直接剪力試驗。結果證明稻殼灰對砂質及粘質土壤均有增強石灰穩定效果之功能。滲加石灰和稻殼灰減低土壤之壓實乾密度，但增加土壤之壓實後強度。穩定後土壤之強度隨養治時間而增強，受吸水而降低。各土樣之石灰及稻殼灰最佳重量比是1：2或1：3。欲得同樣之穩定強度，使用稻殼灰，可節省石灰之用量。

緒 論

改良劣土之性質，亦稱土壤穩定，(Soil Stabilization)，在工程上日益重要。土壤改良之方法繁多，其中滲加穩定劑方法在國際上已被廣泛應用。各種穩定劑中，又以水泥、石灰採用最為普遍。本篇在研究稻殼灰拌和石灰作混合穩定劑使用之各項特性及其應用之可行性。

本省屬於稻米盛產區，每年稻米產量達數百萬噸之多，稻殼粒經碾磨後剩餘之稻殼殼，以往常用為燃料，餘灰則利用作肥料。近年來，農村民生水準提高，利用稻殼灰作肥料者已不多見。故稻殼灰之處理，極感不方便。例如在「世界穀倉」之稱的泰國，碾米廠往往把稻殼堆棄於附近河川，造成環境污染，河道淤塞等種種公害，稻殼灰苟能善加利用，不僅在工程上有莫大裨益；另一方面，亦無形中解決了稻殼之置棄問題，達到「廢物利用」之雙重目標。所以，稻殼灰在土壤工程上之應用研究，已經漸受重視。

Lazaro 和 Moh (1970) 在亞洲理工學院，首先嘗試於石灰中加入稻殼灰，作為一種混合穩定劑來改良兩種高塑性粘土。其主要結論為：

- 一、滲加石灰及稻殼灰能降低粘土之塑性，增加其工作性 (workability)。
- 二、粘土經石灰稻殼灰穩定後，抗壓強度 (compressive strength) 有顯著增加。
- 三、滲加稻殼灰之結果，可以減少石灰之用量。
- 四、石灰稻殼灰之穩定效果，受土壤本身之特性及石灰、稻殼灰和土壤三者之混合比所影響。

此一研究之成功，證明利用稻殼灰作為土壤穩定劑之構想為可行。此外，石灰稻殼灰二者混合，亦是一種極佳之工程材料。一九七三年，在泰國興建之通普利-拍陶公路 (Thon Buri-Pak Tho Highway)，即曾使用稻殼灰及6%石灰作為橋塞 (abutment) 兩側主要填土之用 (Cox 和 Hengchaovanich, 1973)。經工地試驗

結果證實無論其承載力或彈性，均符合路基材料之要求。又因為稻殼灰質輕，用於該地軟弱沖積土層之高填土，足以大量減少土堤之沉陷量(settlement)。採用稻殼灰作為橋臺引道填土，造價便宜，僅為普通木樁承載沙填土之五分之一。

上列文獻之研究，其範圍尚限於軟弱粘土。然而，石灰稻殼灰是否亦能應用於其他種類土壤，當為土壤工程師所急須瞭解之重要課題。

主旨及範圍

本文之主旨在研究石灰稻殼灰應用於各類土壤中之特性及與其他穩定劑比較其穩定效果，從而研判其在各項土壤工程上應用之可能性。

研究之範圍包括：

- 一、採用三種性質不同之粘土、砂土及含大量粉土之壤土。
- 二、石灰稻殼灰之剪力強度特性。
- 三、各土壤添加石灰稻殼灰後之壓實特性，剪力強度及吸水性。
- 四、變動石灰稻殼灰混合比及養治時間(curing-time)對穩定效果之影響。
- 五、與水泥及石灰穩定效果之比較。

石灰稻殼灰之穩定原理

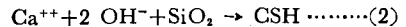
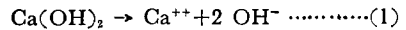
石灰稻殼灰作為穩定劑，在土壤拌合後，其作用可以分為石灰與土壤間之作用及石灰與稻殼灰之作用。

- 一、石灰與土壤顆粒之作用——石灰與土壤，特別是與粘土拌合，首先產生離子交換(ion exchange)與密簇作用(flocculation)。因石灰遇水後，產生大量鈣離子。鈣離子受粘土顆粒負電所吸，而釋出原先吸附在複水層(double layer)內之其他單價離子(例如鈉、鉀、氫等離子)，此為離子交換作用。粘土當帶有鈣離子，並在含高濃度鈣離子之溶液中，表面複水層之擴張受限制，而使顆粒間斥力減少，形成密簇結構(flocculated structure)。

石灰與粘土之間，除了離子交換產生密簇作用外，尚有膠結作用之產生，為增加土壤強度之最大因素。此膠結作用或稱之為普蜀蘭作用(pozzolanic reaction)，是由於石灰之鈣離子與粘土中之矽、鋁礦物產生結合，形成一種矽鈣膠體(calcium-silicate hydrates)或鋁鈣膠體(calcium aluminate hydrates)，此種膠

體能將土壤顆粒粘結起來，一般之普蜀蘭作用很緩慢，延時甚久，新生膠體隨時間變硬而粘結力愈強。

- 二、石灰與稻殼灰間之作用——稻殼灰亦為普蜀蘭(pozzolan)之一種。它含有豐富之矽鋁成份，本身雖不具粘性，但經研磨加水後能與石灰產生膠結物。故石灰與稻殼灰之作用亦屬於普蜀蘭作用。據 Lazaro 和 Moh (1970)之分析「表 1」，稻殼灰之化學成份大部份為二氧化矽(SiO₂)，其普蜀蘭作用之化學代表式，可以簡列如下：



式(2)中之C代表CaO，S代表SiO₂及H代表H₂O，而CSH即為矽鈣膠結物質之簡式。

石灰與土壤之膠結作用純因土壤中含有矽鋁礦物，一般不含此類礦物或含不易溶解之矽鋁礦物如砂土者，則不易與石灰發生作用，而無法產生良好穩定效果。此時便須另添加普蜀蘭，例如飛灰(flyash)，藉以產生膠結作用。可見使用石灰加稻殼灰作為穩定劑，其適用對象可以從粘土到砂土，比獨用石灰只能適用於粘土之應用範圍更為廣泛。

研究方法

一、材料：

- 1.土壤：本論文所試驗之三種土樣(分別以A、B、C名之)乃取自本省南北高速公路南段數處路堤所使用之築堤材料。其一般特性如列表2所示。土樣A為級配不良之砂土；土樣B為含大量粉土之砂質壤土，土樣C為砂土、粉土及粘土各佔三分之一之高塑性粘土。
- 2.石灰：本篇所用石灰為一般商用熟石灰(Ca(OH)₂)。其純度未經詳細鑑定，但從初步試驗結果反應良好，顯示該石灰不含有害雜質。
- 3.稻殼灰：本研究所用稻殼灰取自新營一磚窯廠。此稻殼灰已燃燒甚為徹底均勻，且極少雜物。故試驗時只須搗碎，篩過即可使用。

二、試驗方法：本篇試驗步驟，分三部份進行

- 1.初步試驗：三種土樣經試驗室內風乾後，則進行一般指數性質(index properties)試驗及初步試驗。初步試驗之目的在選擇三種土樣之最佳石灰添加量，作為配合稻殼灰使用量之準則。選擇標

實後，即以直接剪力試驗取樣器自壓實筒內土體上下兩面小心各取一土樣，同一步驟進行兩次，取得兩組樣本，一組進行壓實後不排水直接剪力試驗 (undrained direct shear test)。第二組則放置於水盤濕紙上，進行毛細吸水一天後，作不排水剪力試驗，以求其濕剪強度 (wet shear strength) 及其吸水量。各剪力試驗均無垂直荷重，剪斷速率為 0.15 cm/min ，剪斷過程約三、四分鐘。剪強度以試體每單位面積之最大剪力表示。本文內之剪強度為兩組同樣試驗數據之平均值。

- (2) 為求土樣強度經養治後之變化，各組土樣壓實取樣後，即分別置入一高濕度之容器內，在室溫下養治最少七天，然後進行吸水或不吸水之直接剪力試驗，其步驟與前節(1)完全相同。各土壤與穩定劑之混合量，及其試驗情形，詳列於表 4。

試驗結果與討論

一、稻殼灰之性質：

乾稻殼經燃燒後，變成黑色餘灰，其重量約為稻殼重之五分之一，據 Williams and Sukpatrapirome (1971) 及 Cox and Hengchaovanich (1973) 之試驗結果，稻殼灰之比重約為 2.2 至 2.4。在顯微鏡下，其結構呈細胞組織狀，(cellular structure)，有甚多密封氣室，故稻殼灰之總單位重甚低，在極鬆狀態下，其乾單位重量只有 0.2 t/m^3 。壓實過程中壓實能量足以使稻殼灰顆粒破碎。標準壓實所得之乾單位重為 0.5 至 0.6 t/m^3 ，約為普通土壤經壓實後乾單位重之三分之一。稻殼灰之壓實曲線極為平坦，乾密度幾乎不受含水量之影響。圖 1 顯示稻殼灰與灰混合後在不同含水量下之壓實結果。Williams and Sukpatrapirome (1971) 和 Cox and Hengchaovanich (1973) 曾把壓實含水量增至 80%，所壓實曲線依然為一平直線。稻殼灰具此特性，故雨天施工時，仍可照常壓實。稻殼灰雖然質輕，但因為灰粒表面粗糙，所以其內摩擦角 (angle of shearing resistance) 頗高。圖 2 為稻殼灰經壓實後由直接剪力試驗所測得結果，圖中包絡線 (failure envelope) 尚顯示稻殼灰具凝聚力 (cohesion intercept)。此凝聚力之產生相信只是由於試驗土樣為不飽和孔隙水所產生之表面張力所致 (含水量 43% 時，飽和度約為 30%)。稻殼灰之剪應力與應變曲線形態跟鬆砂所得甚為相似，特色是缺乏明顯尖峯強度 (peak strength)。

，其剪強度由顆粒間摩擦力而產生。

當稻殼灰與石灰 (重量比 3:1) 壓實養治七天後，其剪力與應變曲線則呈現極明顯之尖峯，尖峯強度之出現，表示稻殼灰與石灰化合產生凝結力量。其破壞包絡線如圖 3，在正向壓力大於 1 kg/cm^2 時，剪強度由凝結力與摩擦力組成；在正向壓力小於 1 kg/cm^2 時，剪強度主要由凝結力支配，此一現象，在 Cox 和 Hengchaovanich (1973) 一文中亦有類同之發現，該文作者以外加壓力 (surcharge pressure) 為 0.08 t/m^2 及 1.45 t/m^2 分別作工地加州載重比試驗 (field CBR test)，結果所得之 CBR 值相同。值得注意的一點是經過穩定後之稻殼灰其內摩擦角為 36° ，為未穩定前之兩倍。假若養治時間超過七天，其凝結力量則更為增強，其內摩擦角因土粒粘結增大亦會相對提高。當試體之剪應變甚大，剪斷面之凝結力量盡被破壞後，所得之強度為殘餘強度 (residual strength)。由稻殼灰石灰之殘餘強度所繪之包絡線 (圖 4 B) 與圖 2 B 與只由稻殼灰本身強度所得之包絡線相比較，兩者幾乎一致。證明稻殼灰與石灰作用七天後，大部份稻殼灰原質尚未消失。此可能是由於普蜀菌作用緩慢所致，但部份稻殼灰與石灰作用即足以產生凝結力量，此結果已殆無疑義。部份學者 (例如 Williams 和 Sukpatrapirome, 1971) 認為稻殼灰顆粒過粗，對其與石灰之化學結合可能性表示懷疑。本篇結果證明彼等之顧慮為不必要。

二、壓實特性：

三種未添加穩定劑之試驗土樣，經過標準壓實試驗後，均呈現明顯之最大乾土單位重及最佳含水量。添加石灰與稻殼灰後，其最大乾土單位重均降低，而最佳含水量則增加 (圖 4)。獨加石灰或稻殼灰，均可以改變土壤之壓實特性。一般而言，少量之石灰即可降低粘土之最大乾土單位重，此乃由於石灰對粘土所引起之密實作用。石灰對非塑性土壤之壓實影響，尚無肯定結論，胥視土壤之級配 (gradation) 及所加石灰量而定。本篇所用之三種土壤中，添加石灰只對土壤 C (粘土) 引起最大乾土單位重下降；對土壤 A 及 B 則隨石灰之用量而有增減 (圖 5)，但添加質輕的稻殼灰，均能減低一般土壤之最大乾土單位重。由圖 4 可見，所加稻殼灰百分比愈多，最大乾土單位重則愈低，而最佳含水量則愈高。此一特性對土壤之影響有二：其一是添加稻殼灰後之土壤可以用作輕質材料 (light weight material)。其二是土壤之壓實後強度 (as compacted strength) 可能因而降低。這一點，下節將有較詳細之討論，除

稻殼灰作土壤穩定劑之工程特性

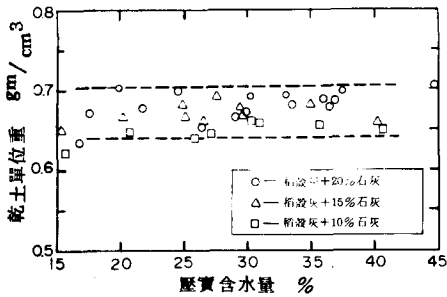


圖1 稻殼灰添加石灰後之壓實特性。

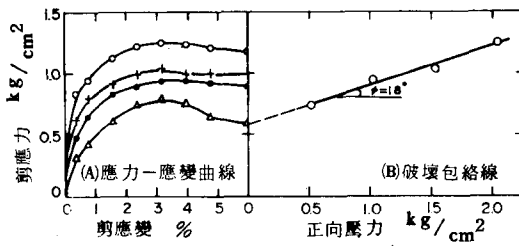


圖2 稻殼灰之應力-應變曲線及破壞包絡線

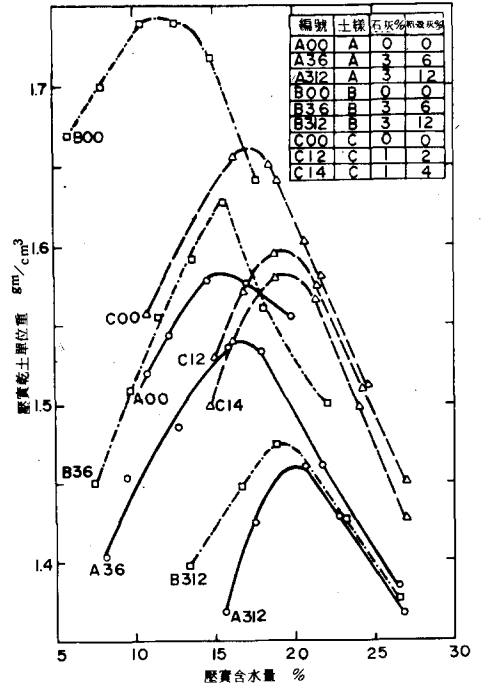


圖4 各土樣添加穩定劑後之壓實特性

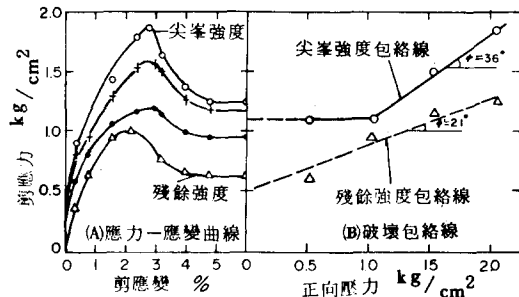


圖3 稻殼灰添加石灰之應力應變曲線及破壞包絡線

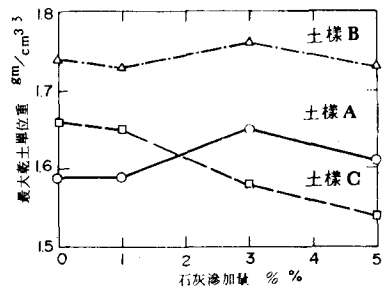


圖5 各土樣添加石灰後之壓實最大乾土單位重

表1. 稻殼灰之化學成份分析

組成 Composition	百分比
二氧化矽 Silicon Dioxide (SiO ₂)	88.66
氧化鋁 Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	1.48
氧化鐵 Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.36
硫酸根 Sulphates (SO ₄)	微量
氧化鈣 Calcium Oxide (CaO)	0.75
氧化鎂 Magnesium Oxide (MgO)	3.53
二氧化碳 Carbon Dioxide (CO ₂)	0.51
燃燒散逸 Loss on Ignition	3.80

資料來源：LAZARO and MOH, (1970)

非稻殼灰滲加量很多，否則對土壤之壓實後強度影響甚微。通常所謂穩定後土壤之強度，是指養治後強度 (as cured strength)，以穩定劑之化合效果影響此強度比其本身之單位重較為重要。

土壤之壓實含水量，視實際之需要而決定。有時採用最佳含水量，有時却選用乾邊 (dry side of optimum) 或濕邊 (wet side of optimum)。所以為了瞭解石灰稻殼灰穩定後土壤之剪力強度與壓實含水量之關係，經選用土壤 A、B 及 C 作試驗，結果如圖 6 所示。三種土壤均出現所謂強度最佳含水量 (optimum moisture content for strength)，而此強度最佳含水量與壓實最佳含水量均不相符。換言之，穩定後土壤在相同之情況下 (同一土壤，同量之穩定劑及養治期)，其乾土單位重愈大，其所得之剪力強度未必愈強。故此，利用稻殼灰石灰作穩定劑，土壤在壓實時，欲得最高之剪力強度，須以強度最佳含水量壓實為宜。

三、土壤之壓實後強度：

若干土壤結構物，例如土堤，其邊坡穩定之安全係數直接與土壤之剪力強度有關，若以石灰稻殼灰穩定之土壤為材料，則在剛壓實完畢時，土堤邊坡之安全係數為最小，因為此時強度最低。因此，材料之壓實後強度往往影響土堤之坡度，高度及建造速率 (rate of construction)，其重要性不容忽視。表 5 是原土樣 (不加穩定劑) 與滲加不同份量之石灰及稻殼灰後之剪力強度比較。各土壤是以其最佳含水量壓實至最大乾土單位重。在表 5 所列之範圍內，所有滲加穩定劑後之土壤均比其原土樣之剪力強度為高。可見石灰稻殼灰加入土壤內，會迅速生效。雖然變動稻殼灰滲加量至四倍於石灰量，多數土壤之剪力強度並無改變。證明在滲加稻殼灰後，縱使土壤之 γ_d (max) 降低，但其壓實後強度，尤其是濕強度並不因而減弱，反而增加甚多。土樣 B 為級配良好土壤，雖然加入稻殼灰稍減其強度，但結果仍然比原土樣高出甚多。顯然，用石灰稻殼灰作穩定劑，對於土壤壓實強度之改善，即有肯定之效果。

表2. 試驗土壤之一般特性

土壤特性	土樣 A	土樣 B	土樣 C
顆粒組成			
砂 2.0-0.074mm, %	91	58	34
粉土 0.074-0.005mm, %	6	33	33
粘土 <0.005mm, %	3	9	33
<0.002mm, %	2	7	22
土壤分類			
三角座標法	砂土	砂質壤土	粘土
AASHO	A-2-4	A-4	A-7-5(15)
統一分類法	SP~SM	SM	CH
指數特性			
液性限度 W_L , %	-	-	56.0
塑性限度 W_P , %	-	-	30.4
塑性指數 I_P , %	-	-	25.6
比重	2.67	2.72	2.74
pH, 值	7.5	9.0	8.6
最佳含水量, %	15	11.4	17
最大乾土單位重 g/cm ³	1.58	1.74	1.66

表 3. 壓實試驗各組材料之重量比

	土 樣								
	A			B			C		
石 灰 %*	0	3	3	0	3	3	0	1	1
稻 殼 灰 %*	0	6	12	0	6	12	0	2	4
乾 土 %*	100	91	85	100	91	85	100	97	95

* % 為總重量百分比

表 4. 石灰—稻殼灰穩定處理之試驗

土 樣	石灰添加量 %	稻 殼 灰 添加量 %	養 治 時間, 天	吸 水 時間, 天	試 驗
A	3	0,3,6,9,12	0,7	1	直接剪力試驗
			0,7,14,21	0	pH 值
			0,7,14,21,40	0	
B	3	0,3,6,9,12	0,7	1 0	直接剪力試驗
C	1	0,1,2,3,4	0,7	1 0	
-	-	100	-	0 0	
-	25	75	7		

表 5. 壓實後土壤之剪力強度

石灰:稻殼灰 重量比*	土 樣 A		土 樣 B		土 樣 C	
	$\gamma_d(max), g/cm^3$	剪 力 強 度 $\tau, kg/cm^2$	$\gamma_d(max), g/cm^3$	剪 力 強 度 $\tau, kg/cm^2$	$\gamma_d(max), g/cm^3$	剪 力 強 度 $\tau, kg/cm^2$
1:0	1.65	0.145	1.76	0.254	1.65	0.681
1:1	1.57	0.147	1.67	0.245	1.60	0.681
1:2	1.54	0.134	1.63	0.234	1.60	0.761
1:3	1.51	0.142	1.56	0.214	1.59	0.685
1:4	1.47	0.147	1.48	0.180	1.58	0.516
原 土 樣	1.58	0.102	1.74	0.138	1.66	0.445

* 土樣 A 及 B 之石灰量為 3%，土樣 C 為 1%

四、石灰與稻殼灰之重量比：

在本篇之試驗中，每土壤只添加一定之石灰量，而改變稻殼灰之重量，所以，石灰稻殼灰重量比之改變亦即穩定劑含量之影響。圖7所示為各土樣在不同重量比（或稱拌合比）下經七天養治後之剪力強度。各曲線呈現最高強度處之拌合比為此養治時間內之最佳拌合比（optimum lime-ash weight ratio）。各土樣之不同拌合比間壓實強度原相差不遠，但經七日養治後，土樣A以石灰稻殼灰拌合比1:3之強度最高，而土樣B與C則以1:2為最佳拌合比，顯示稻殼灰在此期間內，已與石灰發生作用，使土壤剪力強度增加，最佳拌合比通常均隨養治時間之延長而增加。Lazaro and Moh (1970) 利用高塑性粘土所求得之最佳石灰稻殼灰拌合比為3:7與本篇所得結果頗為相近。最佳拌合比之存在，是因石灰與稻殼之普蜀蘭作用過程緩慢，在一定時間內，只有一定量之石灰與稻殼灰作用，其餘未作用之石灰與稻殼灰，或足以妨礙土壤強度之發展。

五、養治時間與強度之關係：

土壤經穩定後，石灰與稻殼灰及土壤作用產生矽鈣化合物（及或矽鋁化合物），其作用過程緩慢，故一般土壤在添加穩定劑壓實後，均須養治一段時期，以冀較高之強度。養治期間，最好能使周圍環境之濕度保持飽和，則土壤含水量不致消失。提高養治溫度可以加速作用之進行，但本篇因研究環境所限，只以最方便之室溫下養治。隨養治時間之延長，普蜀蘭作用愈久，則新生化合物愈多。同時，早期產生之化合物逐漸硬化，黏結力量增加。假若普蜀蘭作用良好，則穩定後土壤之強度會隨養治時間之延長而增加。本篇三種土樣在養治七天後，其強度均有顯著增加（表6）。為了可以更瞭解土壤強度之變化，乃選土壤A在不同拌合比之下養治至廿一天，其強度增加如圖8所示。拌合比為1:3之土樣，在養治廿一天後，其強度為原強度（壓實後強度）之2.3倍；拌合比為1:1者，增至1.6倍，若只添加3%石灰（拌合比1:0），則只有1.3倍，可見添加稻殼灰，對土壤養治後之強度，亦有增強之效益。

石灰與稻殼灰在化合過程中，定有消耗。養治時間愈長，土中所殘餘之石灰量必逐漸減少。殘餘之石灰量直接試測比較困難。但可以由測試土壤之pH值間接觀察之。石灰之pH值為13.4，在加入土樣A與稻殼灰後，其pH值為13.1。加入稻殼灰之多寡，對pH值影響甚微。Cox 和 Hengchovanich (1973) 曾混合不同含量之石灰與稻殼灰，測得pH值如表7所示。可見石灰

量愈少，pH值愈降。圖9繪出穩定後土壤A之pH值隨養治時間而漸減，其中尤以石灰稻殼灰拌合比1.4之土樣下降最為劇烈，證明在較長之養治時間，稻殼灰添加量愈大，則需要較多之石灰與之化合。

六、吸水量對剪力強度之影響：

壓實土壤最忌吸水。吸水後，不但能引起回脹，同時亦會降低剪力強度。所以，穩定改良土壤之另一目標在減少土壤之吸水性。稻殼灰為一鬆軟物體，最易吸存大量水份，其含水量可達150%，因此，利用稻殼灰作穩定劑，不能不顧及其吸水性。本試驗乃利用直接剪力試驗試體（直徑6.3cm，厚度1.3cm）進行吸水一天，然後測其含水量之增加及剪力強度之降低。表8列出三種土壤在不同情況下之吸水量。未穩前土樣A及B吸水量均相當高。土樣C為粘土。壓實後，滲透性甚低，故一天之吸水量只有1.7%。各土樣在經過穩定改良後，砂質土樣A及B之吸水量有顯著降低。而高塑性粘土樣C則稍有增加。增加稻殼灰之添加量，三種土樣均並未引起吸水量大增，此一現象，或可解釋為稻殼灰在經過化合後，其吸水特性已告減弱。另一原因可能是化合後，新生黏結物開始產生黏結力量，黏固土粒，抵抗吸水回脹，由圖10比較土樣在壓實後以及養治七天後之吸水量可得明證。相信在較長之養治期（超過七天），吸水量將更減少。

表6. 養治七天後土壤之剪力強度

土 壤	石灰稻殼灰重量比 1:2		石灰稻殼灰重量比 1:3	
	壓 實 後 剪 力 強 度 kg/cm ²	養 治 七 天 後 剪 力 強 度 kg/cm ²	壓 實 後 剪 力 強 度 kg/cm ²	養 治 七 天 後 剪 力 強 度 kg/cm ²
土 樣 A	0.134	0.218	0.142	0.236
土 樣 B	0.234	0.427	0.214	0.409
土 樣 C	0.761	0.854	0.685	0.823

表7. 稻殼灰與石灰混合物 pH 值

混 合 物	pH 值
石 灰	13.4
稻 殼 灰 + 12% 石 灰	13.0
稻 殼 灰 + 9% 石 灰	12.2
稻 殼 灰 + 6% 石 灰	12.0
稻 殼 灰 + 3% 石 灰	12.0
稻 殼 灰	10.8

資料來源 Cox and HENGCHAOVANICH, (1973)

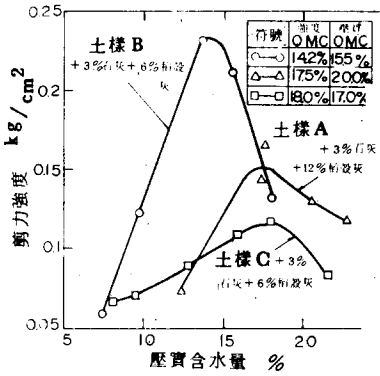


圖 6 壓實含水量對剪力強度之影響

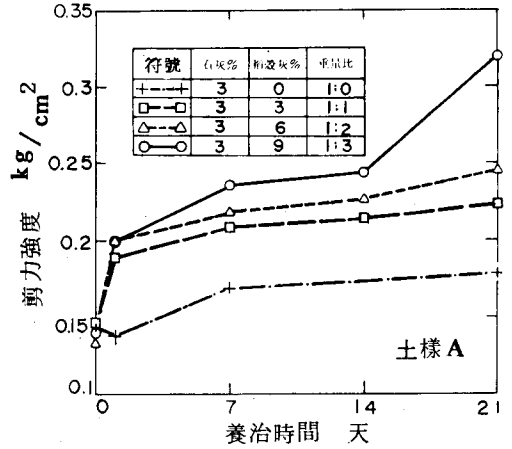


圖 8 養治時間對剪力強度之影響

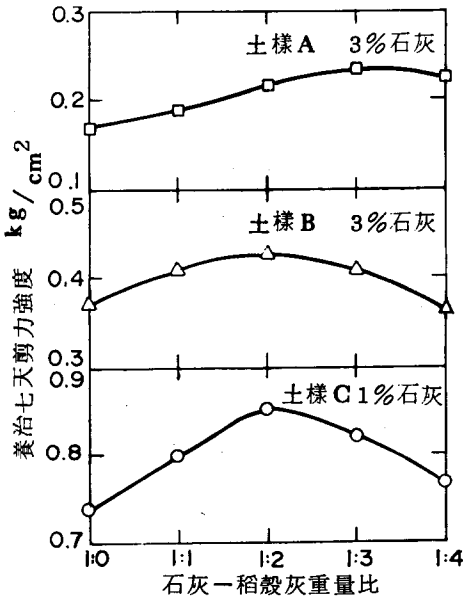


圖 7 各土樣之石灰稻殼灰重量比對剪力強度之影響

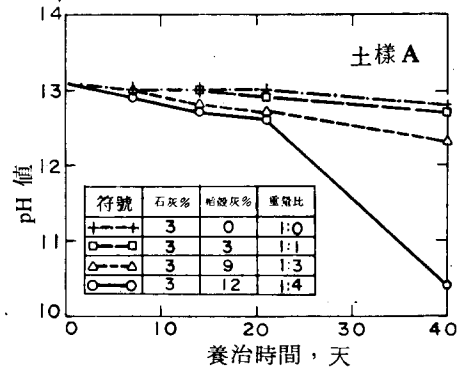


圖 9 pH 值與養治時間之關係

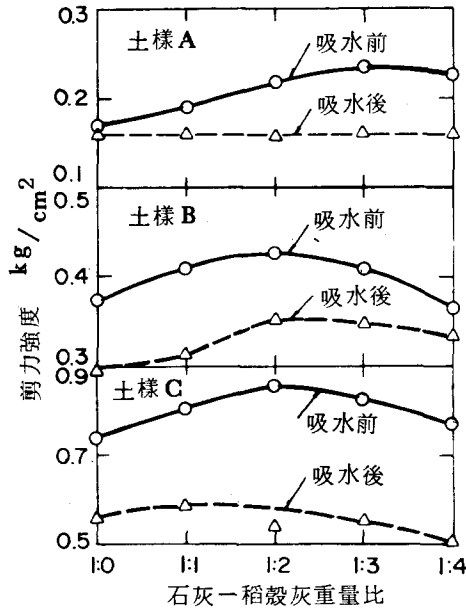


圖10各土樣之吸水量

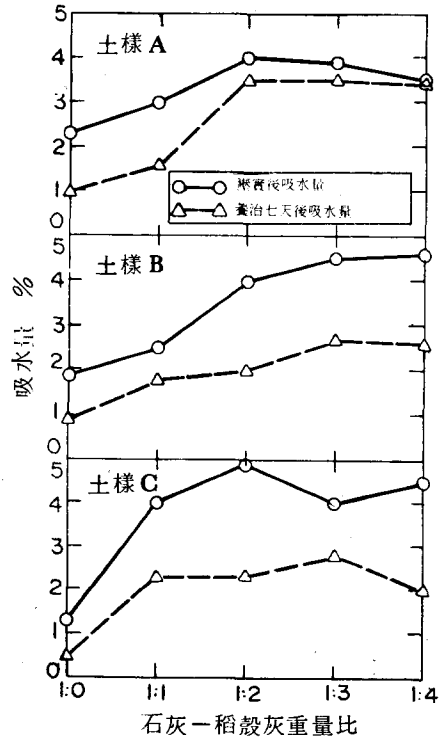


圖11各土樣吸水前後之剪力強度

表8. 各種定土壤經養治七天後之吸水量

土 壤	原土樣	石灰—稻殼灰重量比				
		1:0	1:1	1:2	1:3	1:4
土 樣 A	6.8%	2.3%	3.0%	4.0%	3.9%	3.5%
土 樣 B	6.0%	1.9%	2.5%	4.0%	4.5%	4.6%
土 樣 C	1.7%	0.5%	2.3%	2.3%	2.8%	2.0%

* 吸水時間為一天

土壤在吸水過程中，回脹壓力(swelling pressure)足以破壞黏結鍵；長期泡水，亦足以軟化黏結物之黏結力量。所以，穩定土壤在吸水後，其剪力強度均告減弱。圖11繪出各土樣在吸水前與吸水後之強度，其要點如下：

- 三種土樣在吸水後，剪力強度均減低。
- 低塑性土樣A及B在養治七天後，吸水一天之濕強度(wet shear strength)土樣A最高為0.16 kg/cm²，土樣B最高為0.35 kg/cm²，均比其壓實後強度(土樣A為0.14 kg/cm²，土樣B為0.23 kg/cm²)為高，證明穩定效果並未完全因吸水而破壞。
- 土樣C之一天吸水量雖然最低，但強度却下降最多。可見粘質土壤對含水量之變化較為敏感。此土樣之濕強度劇烈下降，可能是因為所用1%石灰量過少。

因此，在實際工程應用上，養治期間應避免外界水份侵入實為一重要措施。

七、與石灰及水泥穩定效果之比較：

為了研判石灰稻殼灰穩定效果之優劣，特別選出兩種使用最普遍之穩定劑，石灰及水泥，作相同之試驗，以比較各土樣之強度。其結果列於表9。

祇用石灰作穩定劑之試驗中，各土樣加入1, 3, 5%之石灰，經過七天養治之後，結果顯示其剪力強度隨石灰量之增加而增強。雖然如此，其效果却不如石灰稻殼灰混合使用，三種土樣在經過石灰稻殼灰穩定，養治七天之後強度均比單獨採用5%石灰之強度為高。其中尤以土樣C之結果最為突出。土樣C只用1%石灰2%稻殼灰來穩定，表示2%之稻殼灰在此土中，即可節省4%之石灰用量。除用稻殼灰外，土樣A, B及C之石灰量各為3%，3%及1%。若把穩定後之強度與只用同量之石灰穩定效果比較，可得各土樣中稻殼灰之化合效果(reactivity)。由表9可見，各土樣之化合效果均為正值，證明稻殼灰確已加強石灰穩定之力量。

表9. 各種穩定劑之穩定效果比較

土壤	穩定劑百分比	養治七天剪力強度kg/cm ²	稻殼灰化合效果(reactivity) kg/cm ²
土樣A	石灰3%+稻殼灰9%	0.236	0.066
	石灰1%	0.145	
	石灰3%	0.170	
	石灰5%	0.196	
	水泥2%	0.227	
土樣B	石灰3%+稻殼灰6%	0.427	0.053
	石灰1%	0.307	
	石灰3%	0.374	
	石灰5%	0.410	
	水泥2%	0.712	
土樣C	石灰1%+稻殼灰2%	0.854	0.115
	石灰1%	0.739	
	石灰3%	0.783	
	石灰5%	0.841	
	水泥2%	0.886	

土樣A中，三種穩定劑之效果仍以石灰稻殼灰為最佳。其餘兩土樣B及C，則以添加2%水泥所得強度最高。這是因為水泥有較高之早期強度(此為採用水泥作穩定劑優點之一)。但由於水泥之價格高於石灰甚多，而且施工限制亦較嚴，例如混合，壓實都必須在水泥凝結(setting)之前完成等，所以實際使用時，須先考慮情況之緊急及經費的條件而選擇最適當之穩定方法。

結 論

本篇經試驗結果分析後，可得下列結論：

- 稻殼灰與石灰混合，可以作為良好之土壤穩定劑。加入稻殼灰，可以節省石灰用量，且增強石灰之穩定效果，其適用對象，由砂質土壤以至粘土皆可。
- 利用稻殼灰石灰作穩定劑，土壤以最佳含水量，壓實至強度最佳含水量為宜。
- 添加適量之稻殼灰(本篇所用最高為12%)與石灰，雖然減低土壤之壓實密度，但其壓實後強度反而增加。
- 穩定後土壤之剪力強度，受石灰與稻殼灰之重量比所影響。最佳之重量比亦因土壤之性質及養治時間之不同而改變。

表10 稻殼灰在工程上之可能應用範圍

工 程 項 目	要 求 條 件	稻殼灰適用類別	使用稻殼灰之優點	參 考
1.公路或跑道之路基,基層 (base and subgrade of high-way or runway)	易壓實,承載力高,壓縮量低,不易受水影響	第 三 類 第 二 類	適用範圍廣泛,從砂土至粘土	Cox & Hengchaovanich (1973) Williams & Sukpatraprome (1971)
2.高填土(embankment-fill)	易壓實,強度高,沉陷量小	第 二 類 第 三 類	土單位重輕,特別適用於軟弱土層	Cox & Hengchaovanich (1973)
3.擋土回填 (backfill of retaining wall)	土壓力小	第 二 類 第 三 類	土單位重輕,內摩擦角高,透水性大	Peck & Ireland (1957)
4.土堤護坡 (slope protection)	耐雨水打擊,地面逕流冲刷	第 三 類	增加砂土凝聚力黏結粘土小土粒,使不易流失	李德河 (1976)
5.涵管回填 (backfill of conduit)	低覆蓋壓力	第 一 類 第 二 類	質輕	Spangler (1962)
6.防震壕填充料 (fill material for wave screening trench)	能吸收震動波能量,主要特性為密度低彈性係數小,滯性(hysteresis)大	第 一 類	質輕,滯性大,或可與木屑,鬆沙,蒙脫土等混合使用	Richart et al (1970)

五、穩定後土壤之剪力強度隨養治時間之延長而增強。

六、稻殼灰與石灰作穩定劑,養治七天後,不會引起大量吸水。但土壤吸水後,仍然可以降低石灰稻殼灰之穩定效果。

建 議

稻殼灰在土壤工程上之應用,按其性質,可以分爲三大類:

第一類:單獨使用稻殼灰作填充劑。

第二類:利用石灰來穩定稻殼灰,作爲輕質工程材料。

第三類:使用石灰及稻殼灰加入土壤作爲穩定劑。

此三類材料之應用範圍很廣,依各項工程之性質要求,可概括列如表10。然而,目前對稻殼灰之應用,未有完整之規範,故尚賴學者在這方面之研究。近日,更有人士提倡研究利用稻殼灰作輕質混凝土,過濾池等,惟其應用非本篇之討論範圍,因而從略。

致 謝

本文之試驗工作,得國立成功大學土木工程系土壤試驗室之協助完成,謹此誌謝。

參 考 文 獻

1. Cox, J. B. & D. Hengchaovanich, "Use of Rice Husk Ash as a Light Weight Fill in Highway Construction", Technical Report R-3, Submitted to the Dept. of Highways, Thailand, Leo-Geco Int., Bangkok, (1973).
2. Lazaro, R. C. & Z. C. Moh, *Proc. Second Southeast Asian Conf. on Soil Engineering*, Singapore, 215, (1970).
3. Peck, R. B. & H. O. Ireland, *J. of Structural Div. ASCE*, 83 (ST4), 1321-1, (1957).
4. Richart, Jr., F. E., Jr. J. R. Hall & R. D. Woods, "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. T., 244, (1970).
5. Spangler, M.G., "Culverts and Conduits", *Foundation Engineering*, G.A. Leonards, ed., McGraw-Hill, New York, 965, (1962).
6. Williams, F. H. P. & S. Sukpatraprome, "Some Properties of Rice Hull Ash", *Geotechnical Engineering, J. of Southeast Asian Society of Soil Engineering*, 2 (1), 75, (1971).
7. 李德河, (1976), 穩定處理後土壤強度與沖蝕特性之研究國立成功大學土木工程研究所碩士學位論文。