

## 現地水力回填煤灰之液化強度特性

黃俊鴻<sup>1</sup> 林資凱<sup>2</sup> 楊志文<sup>3</sup>

關鍵詞： 煤灰、水力回填、液化強度、超額孔隙水壓、再壓密。

### 摘要

本研究針對台灣中部某濱海灰塘區之水力回填煤灰地層，規劃一序列現場探查、取樣與試驗以及各種室內物理、化學性質與液化強度試驗，以求得現地煤灰之基本物理指數性質與液化強度曲線。現地探查試驗包括 SPT-N、CPT-qc 以及震測 Vs 試驗；現地取樣包括薄管取樣與試坑塊狀取樣；試驗試體包括原狀與重模試體。研究結果顯示，現地煤灰為一高孔隙比、高含水量、高細料含量、低單位重、低比重、無塑性、無凝聚性、圓形顆粒狀之軟弱土壤。依統一土壤分類法屬低塑性之粉土。雖然現地煤灰頗為軟弱且無塑性，但其液化強度較同地區之水力回填砂土為高，此乃其高細料含量所致。本研究並探討了各種因素對煤灰液化強度之影響以及煤灰之超額孔隙水壓激發特性與液化後再壓密特性。這些試驗資料可作為煤灰地基耐震設計之參考。

## UNDRAINED CYCLIC STRENGTH OF A HYDRAULIC COAL ASH

Jin-Hung Hwang Tze-Kia Lin Chin-Wen Yang

Department of Civil Engineering  
National Central University  
Chung-Li, Taiwan 32054, R.O.C.

*Key Words:* coal ash, hydraulic fill, cyclic resistance, excess pore water pressure, re-consolidation.

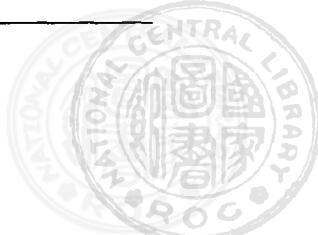
### ABSTRACT

In this paper, a series of in-situ explorations and samplings were carried out in a coal ash deposit at central Taiwan. The deposit was formed with coal ash, a surplus of thermal power plant, by hydraulic filling. Laboratory physical, chemical and cyclic triaxial tests were then conducted to obtain the basic properties of the coal ash and its cyclic resistance. The in-situ explorations included the standard penetration test, seismic cone penetration test and cross-hole seismic survey. The in-situ samplings consisted of tube sampling during boring and block sampling in a pit. The test samples comprised undisturbed samples and remolded samples. It was found that the in-situ coal ash is a high void ratio, high water content, high fines content, low unit weight, low specific gravity, non-plastic, cohesionless, spherical shaped, granular soil. Although the in-situ coal ash is soft and non-plastic, its cyclic resistance is significantly higher than those of the hydraulically filled sandy soils in the same general area. This may

<sup>1</sup> 國立中央大學土木工程學系副教授

<sup>2</sup> 國立中央大學土木工程學系研究生

<sup>3</sup> 國立中央大學土木工程學系博士班研究生



be attributed to its high fines content and fine-grained size. Besides, the influences of many factors on the cyclic resistance of the coal ash were summarized, and the characteristics of excess pore pressure generation and re-consolidation after liquefaction were also presented. These test data may provide a valuable base for seismic design in a foundation soil with coal ash.

## 一、研究動機

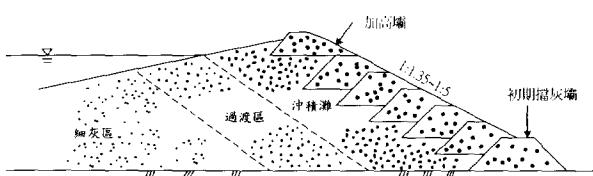
台灣地區的發電能源比例依據民國 77 年至 87 年之統計資料顯示，平均約有 30%來自燃煤發電 [1]，未來政府鼓勵電廠民營化，燃煤發電的比例將會再提高。燃煤發電後會產生大量的煤灰，其中部分煤灰供外界資源再利用，其餘部分則採用水力輸送的方式排放至臨海灰塘區或偏遠的山谷堆置，形成由煤灰回填之地盤，見圖 1 所示。水力排放的煤灰既飽和又疏鬆，為一種特殊顆粒狀物體，具有特殊物理及化學性質，其特性與原煤的成分以及在粉碎、燃燒、輸送、排放等過程中的物理化學變化都有關係。煤灰的成分包含靜電集塵器回收的飛灰及燃燒剩下的爐底灰，故在水力回填時會造成此兩種煤灰材料互層的現象，而形成層狀堆積的煤灰地盤，如圖 2 所示。

有關煤灰材料之相關研究甚多，惟大多數屬於作為摻料或人造材料的研究 [2~6]，如作為混凝土之摻料，或者是夯實煤灰之工程性質研究 [7]。對於煤灰以水力回填方式所形成高含水量、高孔隙比與低強度地盤之工程性質研究，則較為缺乏。究其原因，實為過去從未有在煤灰填築地盤上，建造重型結構物之想法。現今限於環保與用地問題，逐漸有在鬆軟煤灰場址構築重型儲煤廠或電廠之規劃。惟在如此鬆軟之煤灰地基如何安全承載重型結構物之載重與地震力之作用，實為工程設計者應審慎考慮之問題。

民國 88 年 9 月 21 日凌晨 1 時 47 分發生 921 集集大地震，台灣中部地區發生許多土壤液化 (soil liquefaction) 現象，在中部某濱海火力發電廠之灰塘區亦有局部地點發現土壤液化的現象，引起工程界對煤灰土壤液化強度的關切。因此本研究特針對此種特殊煤灰地層之基本物理化學性質與液化強度特性進行深入研究，以瞭解其工程性質與動態特性，期能對此類煤灰地基的工程與耐震安全設計有所幫助。



(a) 以水力沖填煤灰方式所形成之濱海灰塘區



(b) 山谷地區築壠堆儲煤灰之示意圖

圖 1 煤灰儲存方式示意圖

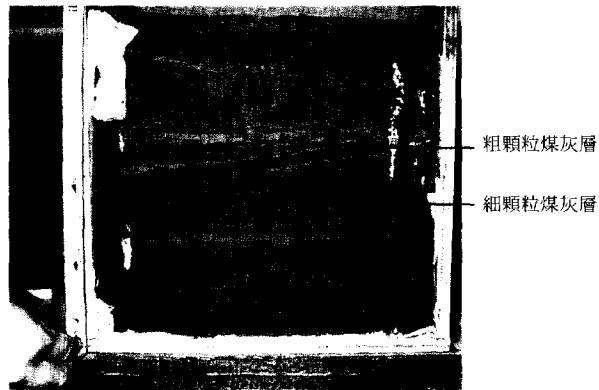


圖 2 現地層狀堆積的煤灰土層

## 二、現地探查、取樣及試驗

本研究在台灣中部地區某濱海火力發電廠之灰塘區進行煤灰地盤之現地探查試驗、現地各種不擾動取樣、以及在實驗室進行各種煤灰土樣之室內試驗，以求得煤灰土壤之基本物理化學性質與液化強度。茲將現地與室內研究工作簡要說明如下：

### 2.1 現地探查與試驗

現地灰塘區有部分地區已進行擠壓砂樁之地盤改良工作，因此本研究於未改良之灰塘區進行 2 孔鑽孔與 SPT 試驗，1 孔 SCPT 試驗及 1 組跨孔震測試驗，於改良過之灰塘區進行 2 孔鑽孔與 SPT 試驗以及 1 孔 SCPT 試驗與 1 組跨孔震測試驗，以資對比改良效果。擠壓砂樁之設計資料為：樁徑 = 70cm，樁長 = 12.5m，樁中心距 = 1.5m。現地探查試驗之剖面佈置如圖 3 所示，現地工作項目與數量如表 1 所示。綜合現地探查試驗結果，可整理成如圖 4(a) 與圖 4(b) 之試驗場址工程性質隨深度之分佈。圖 4(a) 與圖 4(b) 分別為未改良區與改良區之鑽孔、CPT- $q_c$ 、SPT-N、剪力波速  $V_s$  與剪力模數隨深度變化之剖面。茲將上述結果摘要說明如下：

#### 1. 地質剖面

灰塘區的現地鑽孔深度均至地表面下 10m，未改良區土層剖面主要分為三個層次，依次為地表面回填之粉土質砂層 (G.L.0.0 ~ -2.0m)、粉土層 (即煤灰層，G.L.-2.0 ~ -8.8m) 以及原地層之粉土質砂層 (G.L.-8.8 ~ -10.0m)。改良區之土層剖面與未改良區類似，大致上亦可分為三個層次，依次為地表面回填之粉土質砂層 (G.L.0.0 ~ -2.0m)、粉土層 (即煤灰層，G.L.-2.0 ~ -7.0m) 以及原地層之粉土質砂層 (G.L.-7.0 ~ -10.0m)，惟煤灰層間夾一約 60cm 之薄砂層。



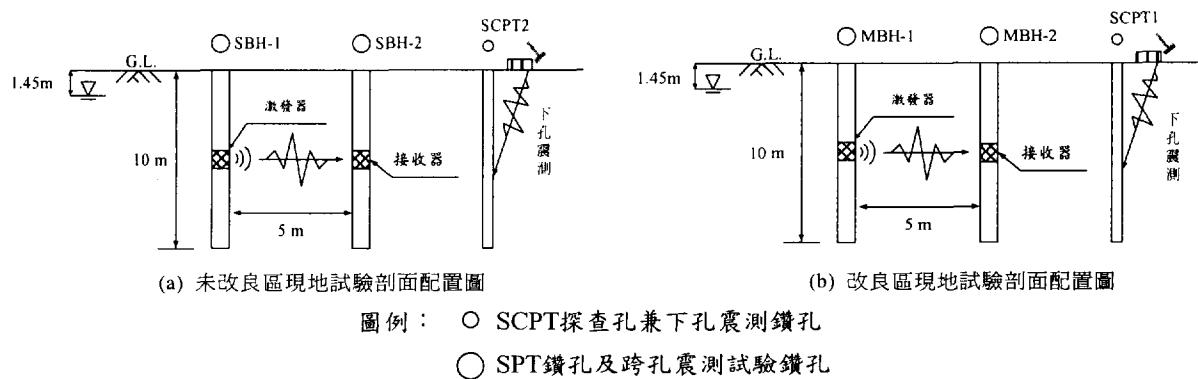


圖 3 現地探查試驗剖面佈置圖

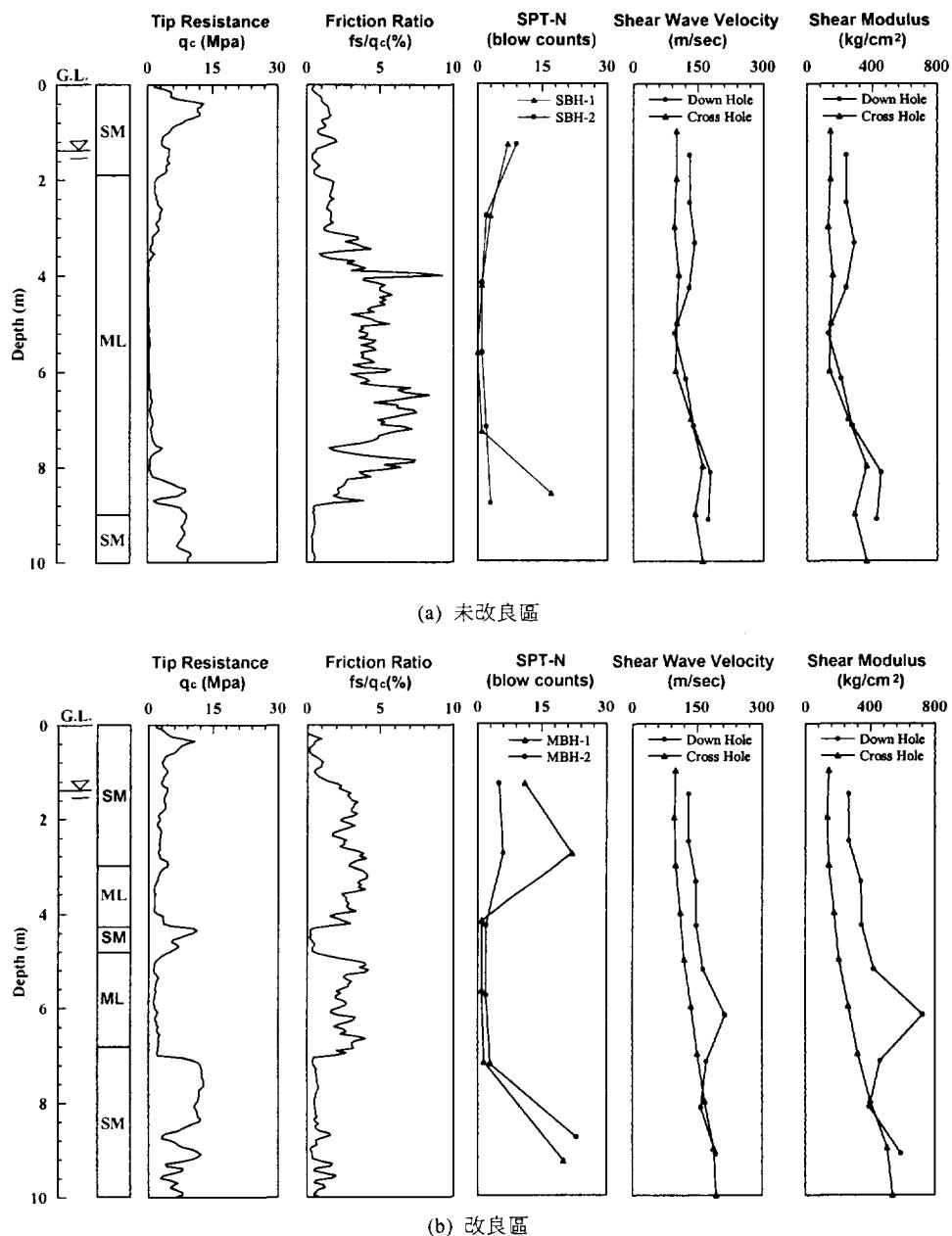


圖 4 灰塘區土層之地質鑽探剖面



表 1 現地探查與試驗之項目與數量

探查與試驗項目	數量	備註
現地探查 與試驗	震測錐貫入試驗 (SCPT)	2 孔 每孔 10m
	標準貫入試驗鑽孔 (SPT)	4 孔 每孔 10m
	跨孔震測試驗 (Vs)	2 組 每 m 測一次 (至 10m 深)
現場不擾動取樣	薄管取樣	20 支 改良區及未改良區均有取樣
	試坑開挖與回填	1 式 含抽水
	塊狀取樣	10 個 僅在未改良區取樣

(G.L.-4.3 ~ -4.9m)，此層可能為煤灰回填過程中所回填之砂層或是擠壓砂樁側向擠入煤灰層之砂層。地下水位約在地表下 1.4m。

#### 2. 標準貫入試驗值 (SPT-N)

由試驗得知，未改良區表面回填之粉土質砂層  $N = 7 \sim 9$ ，純煤灰層  $N = 0 \sim 1$ ，原地層之粉土質砂層  $N = 17$ 。改良區表面回填之粉土質砂層  $N = 5 \sim 22$ ，純煤灰層  $N = 1 \sim 3$ ，原地層之粉土質砂層  $N = 22 \sim 23$ 。可見經擠壓砂樁改良後，煤灰土之 SPT-N 值增加 1~2 下。

#### 3. 錐尖阻抗值 (CPT-q<sub>c</sub>)

震測錐之試驗設備與試驗步驟採用 Robertson 與 Campanella [8] 為 Hogentogler & Company, Inc. 所發展之 SCPT 儀器所建議的標準進行。經試驗得知現地土層圓錐貫入阻抗  $q_c$  之分佈狀況為未改良區表面回填之粉土質砂層之  $q_c$  約為 5~10MPa，純煤灰層之  $q_c$  約為 0.1~1.0MPa，原地層之粉土質砂層之  $q_c$  約為 5~10MPa。改良區表面回填之粉土質砂層之  $q_c$  約為 4~8MPa，純煤灰層之  $q_c$  約為 2~2.5MPa，原地層之粉土質砂層之  $q_c$  約為 8~13MPa。可見經擠壓砂樁改良後，煤灰土層之圓錐貫入阻抗  $q_c$  有明顯之增加。

#### 4. 下孔及跨孔震測試驗

下孔震測試驗係參照文獻 [9] 進行，跨孔震測試驗則參照文獻 [10] 進行。由下孔和跨孔震測試驗得知，未改良區淺層砂土層之  $V_s$  約在 100~150m/sec，煤灰層之  $V_s$  約在 90~130m/sec，原地層砂土層之  $V_s$  約在 130~180m/sec。改良區淺層砂土層之  $V_s$  約在 100~150 m/sec，煤灰層之  $V_s$  約在 110~170m/sec，原地層砂土層之  $V_s$  約在 150~200m/sec。可見經擠壓砂樁改良後，煤灰土之  $V_s$  值平均約增加 30m/sec。而下孔式震測所量測到之剪力波速較跨孔式震測所量測之剪力波速為高。由剪力波速推算現地土壤之剪力模數，若未改良區及改良區煤灰之平均濕土單位重取為  $1.4t/m^3$ ，計算結果顯示，未改良區淺層砂土層之剪力模數  $G$  約在  $140 \sim 290kg/cm^2$ ，煤灰層之剪力模數  $G$  約在  $120 \sim 240kg/cm^2$ ，原地層砂土層之剪力模數  $G$  約在  $250 \sim 460kg/cm^2$ ；改良區淺層砂土層之剪力模數  $G$  約在  $130 \sim$

$310kg/cm^2$ ，煤灰層之剪力模數  $G$  約在  $180 \sim 390kg/cm^2$ ，原地層砂土層之剪力模數  $G$  約在  $320 \sim 660kg/cm^2$ 。可見經擠壓砂樁改良後，煤灰土壤之剪力模數  $G$  值平均約增加  $130kg/cm^2$ 。

#### 2.2 現地取樣

本研究試體現地取樣方式分別為以活塞式薄管取樣器所進行之薄管取樣與開挖試坑塊狀取樣等二種方式，其目的為取得不擾動土樣進行相關室內試驗。茲摘要說明如下：

##### 1. 不擾動薄管取樣

薄管取樣係在鑽孔同時，以固定式活塞取樣器進行三英吋薄管取樣，以靜壓將薄管壓入土中，壓入時活塞固定於土樣頂部，以減少土樣的滑落流失，取樣器與薄管之規格與取樣方法大致參照文獻 [11] 之建議。擠壓砂樁改良區之鑽孔取樣位置係位於砂樁間隔之中央點，砂樁之位置係用推土機將表土刮掉，再加以確認。

##### 2. 試坑塊狀取樣

試坑開挖主要目的有二，其一為觀察煤灰之沉積狀況，其二為取得以人力小心修裁之塊狀試體，此塊狀試體可視為擾動程度最小之試體。試驗步驟首先開挖一試坑至地下水位下預定的深度（約在地表下 3~4m），在試坑底部挖一蓄水坑將試坑內的地下水導入此坑，並用抽水馬達將蓄水坑內的水抽出至地表的儲水坑內，保持取樣地點在地下水位以上，之後，使用人力在試坑底部小心挖除試體周圍的土壤，使試體成為塊狀，隨即使用木板將試體密封，並將試體和木板間以臘填滿，防止試體水分流失。總計取得 10 個塊狀試體，現地取樣情形如圖 5 所示。

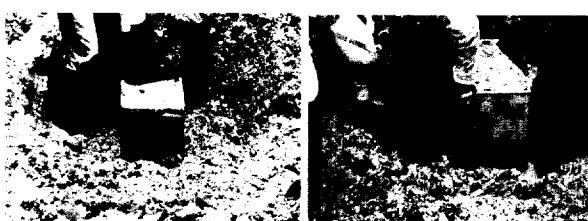
試坑開挖至地下水位以下時，使用抽水機將試坑內的地下水抽至另一儲水池內，但因地下水不斷從開挖面滲出，使得垂直的開挖面壁不斷的坍落，造成取樣人員的不便及安全上之顧慮，由此現象可推知，煤灰之滲透性良好且自立性甚差，可視為不具凝聚力之土壤。



(a) 開挖試坑



(b) 挖取試體



(c) 修整試體

(d) 封裝試體

圖 5 現地塊狀試體取樣



### 2.3 室內試驗項目與數量

為瞭解煤灰的基本物理化學性質與液化強度，本研究進行了一系列的室內試驗，物理性質試驗部分包括：含水量、比重、單位重、孔隙比、粒徑分析、相對密度、阿太堡限度、電子顯微鏡掃瞄及凝聚力觀察等試驗；化學性質試驗則為粉末 X 光繞射試驗 (XRD)；液化強度試驗則為三軸動態試驗與液化後再壓密試驗。本研究煤灰室內試驗之工作項目與數量見表 2，各項試驗之試驗設備與規範因限於篇幅，請參見文獻 [12]。

## 三、煤灰之基本物理化學性質

### 3.1 基本物理性質

本研究之塊狀煤灰土樣取自灰塘區地表面以下 3 ~ 4m 處，薄管土樣則在地表下 8m 深度範圍內，因水力回填的煤灰包括飛灰和底灰兩種，故現地取樣之煤灰皆呈互層狀態。試驗之土樣計有八種，分別為：

- 互層煤灰塊狀土樣 (代號為 BS)
- 未改良區煤灰薄管土樣 (代號為 ST)
- 改良區煤灰薄管土樣 (代號為 MT)
- 粗顆粒煤灰層塊狀小試體 (代號為 SB)
- 粗顆粒煤灰層之重模土樣 (代號為 A)
- 細顆粒煤灰層之重模土樣 (代號為 B)
- 重模粗顆粒煤灰經多次三軸試驗後之土樣 (代號為 AA)
- 重模細顆粒煤灰經多次三軸試驗後之土樣 (代號為 BB)

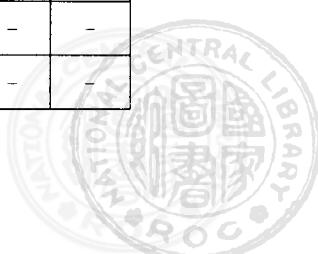
各種試驗土樣之基本物理性質如表 3 所示，粒徑分佈曲線如圖 6 所示。以下簡要說明其物理性質。

表 2 室內試驗工作項目與數量

試驗項目	上樣種類 組數	互層煤灰 塊狀土樣	粗顆粒煤灰層 塊狀小試體	未改良區煤灰 薄管土樣	改良區煤灰 薄管土樣	塊狀試體內 粗顆粒 煤灰層土樣	塊狀試體內 細顆粒 煤灰層土樣	粗顆粒煤灰 經多次重模 試驗後土樣	細顆粒煤灰 經多次重模 試驗後土樣
		互層煤灰 塊狀土樣	粗顆粒煤灰層 塊狀小試體	未改良區煤灰 薄管土樣	改良區煤灰 薄管土樣	塊狀試體內 粗顆粒 煤灰層土樣	塊狀試體內 細顆粒 煤灰層土樣	粗顆粒煤灰 經多次重模 試驗後土樣	細顆粒煤灰 經多次重模 試驗後土樣
動態試驗	動態強度試驗	1	1	1	1	3	3	2	1
	再壓密試驗	1	1	1	1	3	3	-	-
基本物理化學性質試驗	比重	3	1	1	3	1	1	1	1
	粒徑分析	3	1	1	3	1	1	1	1
	含水量	3	1	1	3	1	1	-	-
	單位重	3	1	1	3	1	1	-	-
	液性限度	-	-	-	-	1	1	-	-
	塑性限度	3	1	1	3	1	1	-	-
	孔隙比	3	1	1	3	1	1	-	-
	相對密度	3	1	1	3	1	1	-	-
	電子顯微鏡掃瞄	1	-	-	-	1	1	-	-
	化學成分分析	1	-	-	-	-	-	-	-

表 3 煤灰物理性質試驗結果

試驗土樣	試驗編號	比重 G <sub>s</sub>	孔隙比 e	單位重 t/m <sup>3</sup>	含水量 %	液性限度 %	塑性限度 %	黏粒含量 %	細料含量 %	均勻係數 C <sub>u</sub>	D <sub>50</sub> (mm)	土壤分類	相對密度 %	最大孔隙比 e <sub>max</sub>	最小孔隙比 e <sub>min</sub>
互層煤灰塊狀土樣	BS-1	2.21	2.05	1.34	86	-	NP	14	72	35.7	0.004	ML	51	2.62	1.51
	BS-2	2.23	2.04	1.34	82			12	85	25.0	0.066	ML	53	2.62	1.51
	BS-3	2.26	2.05	1.38	87			19	68	*	0.021	ML	51	2.62	1.51
未改良區薄管	ST-1	2.26	2.06	1.34	84	-	NP	12	93	7.44	0.026	ML	-	-	-
改良區薄管	MT-1	2.32	2.24	1.38	92	-	NP	13	83	12.4	0.041	ML	92.0	4.09	2.08
	MT-2	2.34	2.23	1.35	95			7	80	31.3	0.043	ML	92.5	4.09	2.08
	MT-3	2.32	2.21	1.36	89			13	80	1.9	0.050	ML	93.5	4.09	2.08
粗顆粒煤灰層小試體	SB-1	2.15	2.20	1.20	79	-	NP	4	61	9.13	0.045	ML	-	-	-
粗顆粒煤灰層土樣	A	2.20	2.21	1.20	76	96.1	NP	10	50	22.9	0.075	ML	42	2.68	1.58
細顆粒煤灰層土樣	B	2.27	2.11	1.38	89	68.3	NP	18	97	6.4	0.015	ML	72	3.17	1.69
多次受剪之粗顆粒煤灰	AA	2.19	-	-	-	-	-	6	67	8.8	0.042	-	-	-	-
多次受剪之細顆粒煤灰	BB	2.27	-	-	-	-	-	15	97	4.5	0.015	-	-	-	-



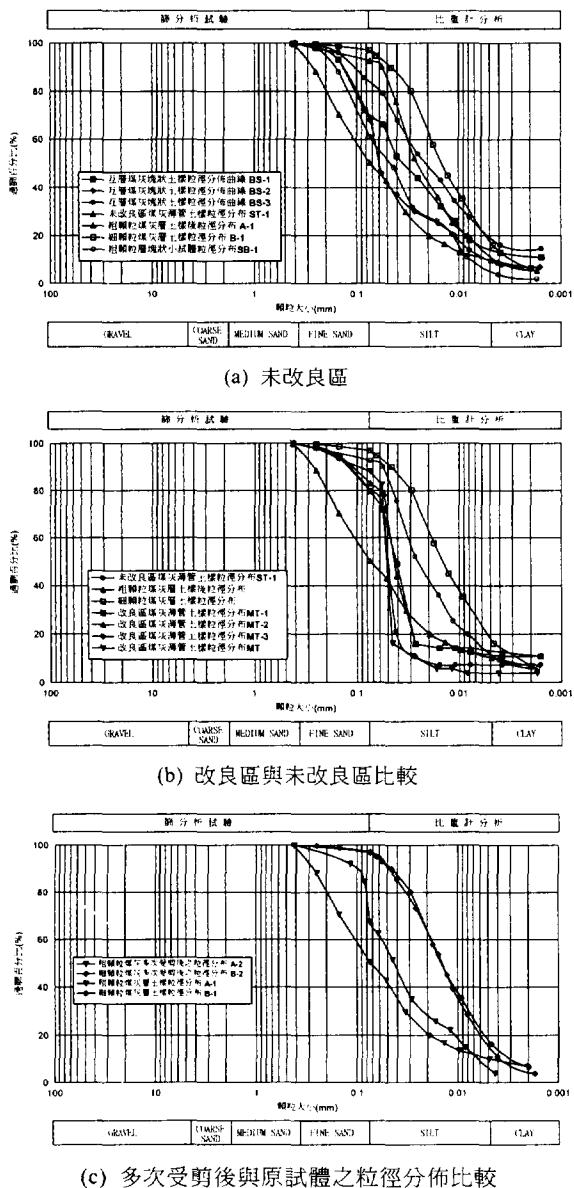


圖 6 煤灰粒徑分布曲線

### 1. 自然含水量與濕土單位重 (ASTM D2216-80)

試驗結果顯示煤灰自然含水量甚高，一般約在 70% ~ 100% 之間，試體烘乾前和烘乾後重量差異極大。濕土單位重約為  $1.2 \sim 1.4 t/m^3$  之間，遠較一般土壤為輕，這可能是由於土壤顆粒物理組成與化學成分不同所致。

各種土樣含水量由高而低排列順序為：MT = B > BS = ST > SB > A。改良區之煤灰薄管土樣的含水量和塊狀試體內細顆粒煤灰層土樣相當，約在 90% 左右，原互層煤灰塊狀土樣含水量次之，約在 85% 左右，塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣含水量最低，但亦高達約 76%，此乃煤灰顆粒較細較容易吸水之故。一般濕土單位重隨著含水量增加而增加。

煤灰因顆粒小，能儲存大量水分，當試體未受擾動時，因毛細作用，煤灰略有自立性，但將煤灰土樣稍微搓揉後，土樣立刻會釋出大量水分形成黏稠的流體，這可能是由於煤灰受到擾動時，激發煤灰孔隙中的水壓，使得煤灰排出顆粒內部的水分所造成。

### 2. 孔隙比

煤灰孔隙比約在 2.0 ~ 2.3 之間，遠較一般土壤之孔隙比為高，這是由於煤灰含水量高且顆粒內部多為中空所造成。

各種土樣孔隙比由高而低排列順序分別為：MT = SB = A > B > BS = ST。塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣和改良區之煤灰薄管土樣的孔隙比最高，約在 2.2 左右，塊狀試體內細顆粒煤灰層土樣次之，約在 2.1 左右，原互層煤灰塊狀土樣及未改良區之煤灰薄管土樣最低，但亦高達 2.05 左右。改良區煤灰因含水量高，且顆粒較均勻，故孔隙比較大。粗顆粒煤灰則因顆粒較大，堆積較鬆散，故孔隙比亦較大。

### 3. 顆粒粒徑分佈 (ASTM D452-85)

煤灰之細料含量 (FC) 在 50% ~ 96% 之間，黏土顆粒含量 (CC) 一般低於 20%，屬級配廣泛之細粒土壤 ( $Cu \geq 9, 1 < Cd < 3$ )。土壤顆粒大小多在粉土粒徑範圍，且不具塑性，依統一土壤分類法屬於粉土類 (ML) 之土壤。

各種土樣細料含量由高而低排列分別為：B > ST > MT > BS > SB > A。由圖 6(a) 可知原互層煤灰塊狀土樣之粒徑範圍介於塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣及細顆粒煤灰層土樣之間。塊狀試體內細顆粒煤灰層土樣幾乎全通過 200 號篩，塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣只有約 50.2% 通過 200 號篩。

由圖 6(b) 可知，改良區之煤灰薄管土樣的粒徑分布和原互層煤灰塊狀土樣大不相同，其粒徑分布集中在 0.03 ~ 0.05mm 之間，屬於不良級配曲線，且顆粒較其它煤灰土樣為大。

由圖 6(c) 可知，細顆粒煤灰經多次三軸液化強度試驗後，土樣粒徑分佈和原先之塊狀試體內細顆粒煤灰層之粒徑分佈情形接近，並無太大變化，但粗粒煤灰層土樣的顆粒卻在多次三軸液化強度試驗後發生嚴重的破碎情形，這可能是由於粗顆粒層煤灰為爐底灰組成，顆粒較大，因試驗受剪磨損而使顆粒破碎；細顆粒層煤灰因為飛灰組成，燃燒較為完全，顆粒較小，故經多次試驗後其粒徑並未發生太大變化。

### 4. 比重 (ASTM D854-83, D422-63)

試驗結果顯示煤灰之比重約在 2.2 ~ 2.4 之間，而一般土壤之比重約在 2.6 ~ 2.8 之間，故其比重較一般土壤為小，這是由於煤灰的化學成分和一般土壤不同所致。

各種土樣之比重由大而小之排列順序分別為：MT > B = ST > BS > A > SB。塊狀試體內細顆粒煤灰層土樣的比重較塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣的比重大。改良區之煤灰薄管土樣比重較原塊狀土樣互層煤灰大，這可能是由於地盤改良時混入部份砂土，而砂土比重較煤灰大所致，或當水力排放煤灰時，較重的煤灰會先沉積，較輕的煤灰會漂浮較遠而沉積，導致較遠離排灰泵的未改良區煤灰比重較小。

### 5. 阿太堡限度 (Atterberg Limits)

煤灰之液性限度很難以傳統液限儀進行試驗確定，因煤灰未受擾動前呈塊狀，實驗時需加以搓揉才能於液限皿抹平，但稍加抹平時，土壤快速變成黏稠狀態，故試驗結果變異性很大。當含水量約 40% 時，土壤狀態變化很大，使得含水量和打擊次數關係有很大的跳動，而無法繪出其



流性曲線，得出準確之液限。為此，改用針入法 (Cone Penetrometer Method; BS 1377-75, Test 2(A)) 進行試驗，所得之液限較為合理，試驗結果顯示粗顆粒煤之平均液限約在 96.1%，細顆粒煤灰之平均液限約為 68.3%。因為法作出煤灰之塑限，故可將其視為無塑性 (NP) 之土壤。

#### 6. 相對密度 (日本土質工學會 JSF T26-81T)

試驗結果顯示原塊狀土樣互層煤灰之  $e_{\max} = 2.62$ ,  $e_{\min} = 1.51$ 。現地煤灰相對密度 (Relative Density) 經計算約為 50% 左右，屬中等緊密程度。塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣之  $e_{\max} = 2.68$ ,  $e_{\min} = 1.58$ ，相對密度 Dr 經計算約為 42% 左右，屬中等緊密程度。塊狀試體內細顆粒煤灰層土樣之  $e_{\max} = 3.17$ ,  $e_{\min} = 1.69$ ，相對密度 Dr 經計算約為 72% 左右，屬緊密程度。由此可知塊狀試體內粗顆粒煤灰層土樣較疏鬆，此亦可能為灰塘區局部地點發生土壤液化的原因。改良區煤灰之  $e_{\max} = 4.09$ ,  $e_{\min} = 2.08$ ，相對密度經計算約為 92% 左右，屬緊密程度，可見經擠壓砂樁改良後，煤灰土之相對密度增加約 40%。

#### 3.2 掃描式電子顯微鏡觀察

塊狀試體內粗顆粒層煤灰與細顆粒層煤灰之電子顯微鏡掃描結果如圖 7 所示。由圖可知，兩種煤灰顆粒形狀皆近似球形，周圍附著許多燃燒未完全的海綿狀顆粒，但在相同放大倍率下，顆粒大小差異甚大，完整球形的粗顆粒煤灰的顆粒尺寸最大可達  $47\mu\text{m}$ ，最小則小於  $1\mu\text{m}$  以下，但完整球形的細顆粒煤灰的顆粒尺寸最大僅可達  $20\mu\text{m}$ ，最小則小於  $1\mu\text{m}$  以下，由此可知此兩層煤灰的最大顆粒粒徑大小差距 2.4 倍。

#### 3.3 礦物成份

本研究煤灰之 X 光繞射試驗結果如圖 8 所示，化學成份如表 4 所示。其化學成份主要以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等成份居多，分別為 45.2%、29.2% 及 5.4%，次要成份如  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3$  則分別為 1.01% 及 0.01%。

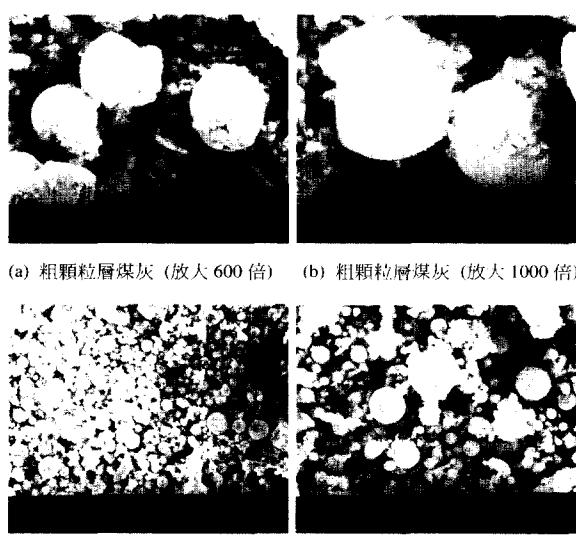


圖 7 煤灰之電子顯微鏡掃描照片

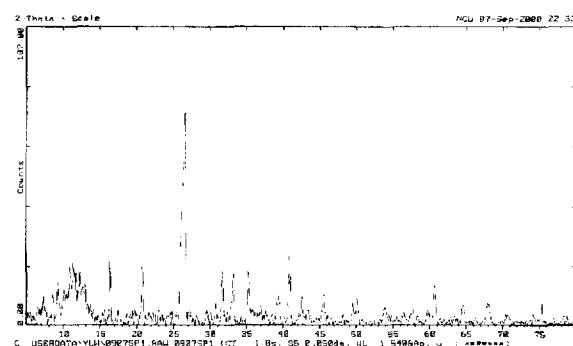


圖 8 煤灰之 X 光繞射試驗結果

表 4 台中火力發電廠灰塘區煤灰化學成分分析結果

化學成份	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$
含量百分比 (%)	45.2	29.2	5.4	1.01	0.01

#### 3.4 凝聚力觀察

為瞭解煤灰是否具有凝聚力，將互層煤灰塊狀土樣放入大玻璃杯內，將水沿杯子的內壁緩慢倒入，直到淹沒試體為止。當倒入水的過程中，試體內粗顆粒煤灰層立即崩解，細顆粒煤灰層經短暫時間後也相繼崩解，如圖 9 所示。由此可知，飽和煤灰土壤的凝聚力非常小，而試體未飽和時尚有自立性，可能是因為顆粒較小，具有毛細作用而產生假凝聚力之故 (Lambe 和 Whitman)[13]，故可將飽和煤灰視為無凝聚力之土壤。此項凝聚力觀察試驗為自行構思，並無相關試驗規範可參考。

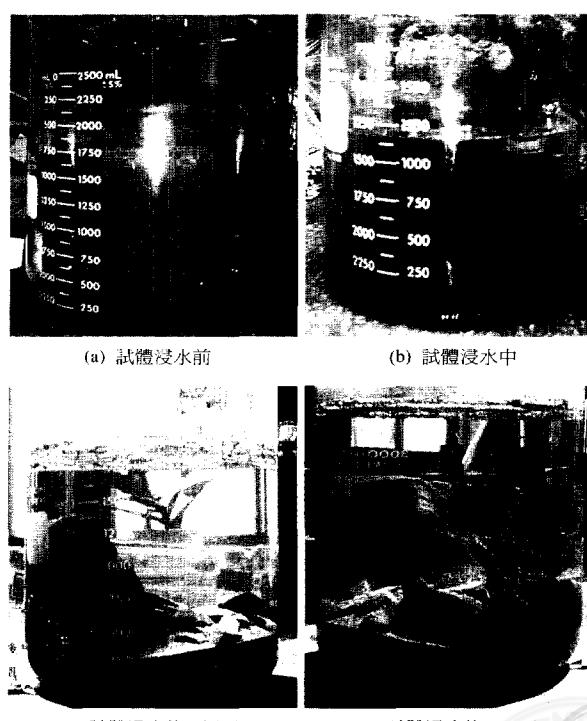


圖 9 煤灰試體凝聚力試驗觀察



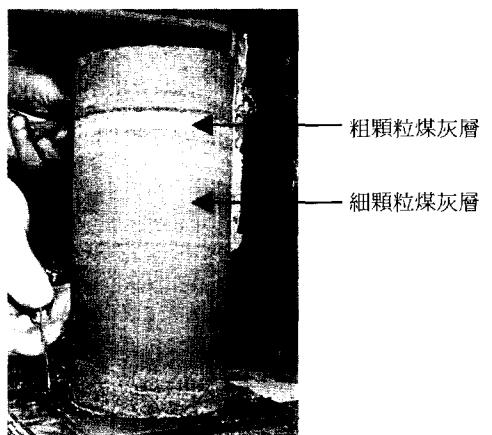
## 四、煤灰之液化強度

### 4.1 現地土樣之液化強度

本研究之現地土樣包括薄管試體、試坑塊狀試體。土樣之液化強度以進行三軸動態強度試驗求取，液化強度之定義取試驗結果雙向軸向應變達 5% 或超額孔隙水壓等於初始有效圍壓之狀態為破壞標準，液化強度曲線定義為使試體達到此狀態之反覆剪應力比 ( $\sigma_{dc} / 2\sigma'_{3c}$ ) 與反覆作用次數  $N_c$  之關係 [14~16]。試體有明顯粗細煤灰互層，進行動力三軸試驗時，試體多從粗顆粒煤灰層破壞，如圖 10 所示。本研究除求得各種試體之液化強度曲線外，亦探討各種條件對煤灰液化強度之影響。

#### 1. 取樣方式對煤灰液化強度之影響

試坑塊狀取樣試體與薄管試體之液化強度曲線比較如圖 11 所示，圖中顯示塊狀試體的液化強度較薄管試體為高，但當反覆剪應力比 (CSR) 低於 0.22 時，試體在 200 個作用週數內不會發生破壞。塊狀試體可能因為取樣時的擾動程度最小，較能代表現地土層的情況，而薄管試體可能因為受到的擾動程度較大，故試驗時的液化強度較塊狀試體為低。



(a) 試驗前



(b) 試驗後

圖 10 試驗前後之試體觀察

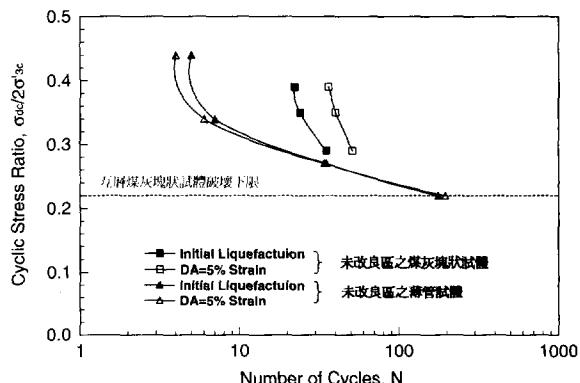


圖 11 不同取樣方式對煤灰液化強度之影響

#### 2. 粗、細煤灰互層比例對煤灰液化強度之影響

因灰塘區土層呈粗顆粒與細顆粒煤灰層狀堆積，互層之厚度比例對土壤液化強度會有影響。本試驗由塊狀試體內取出含有均勻互層的土樣 (高度 15 公分、直徑 7.5 公分) 及粗顆粒煤灰層塊狀小試體 (高度 10 公分、直徑 5 公分)，進行動力三軸試驗，發現粗顆粒煤灰層塊狀小試體的液化強度較互層煤灰塊狀試體為低，如圖 12 所示。而互層煤灰試體之破壞亦發生於粗顆粒之層次，如圖 10 所示。顯示粗顆粒煤灰層之液化強度較弱。由基本物理性質試驗亦顯示粗顆粒煤灰層土壤的相對密度和細粒料含量較互層煤灰塊狀試體為低，故其液化強度較低。

#### 3. 據壓砂樁改良對煤灰液化強度之影響

為瞭解據壓砂樁改良對煤灰液化強度之影響，本研究以經據壓砂樁改良地區的薄管土樣和未改良區之薄管土樣進行三軸動態強度試驗，試驗結果發現煤灰經地盤改良後，其液化強度大幅增加，見圖 13，其 20 cycles 之液化阻抗  $SR_{20}$  由未改良前的 0.28 大幅增加至改良後之 0.42，增幅約為 50%。由基本物理性質試驗可知，經地盤改良的煤灰，相對密度顯著增加，細粒料含量亦高達 80%，故其液化強度較高。

### 4.2 重模土樣之液化強度

由於無法取得單一三軸尺寸的粗顆粒及細顆粒煤灰層原狀試體，故採用乾搗法分別準備粗顆粒及細顆粒煤灰之重模土樣，初始相對密度控制為 30%、50% 及 70% 等三種緊密程度。三軸壓密完成後，粗顆粒煤灰重模土樣相對密度變為 32%、50% 和 70%；細顆粒煤灰重模土樣相對密度變為 36%、53% 和 72%。粗顆粒及細顆粒煤灰重模試體之液化強度曲線如圖 14 所示。

#### 1. 主要試驗結果

試驗結果顯示：

- 煤灰相對密度越大，其液化強度越高。
- 不同相對密度的重模煤灰土樣，其液化曲線大致互相平行。
- 重模煤灰土樣承受反覆荷載時多先達到 5% 雙向軸向應變之狀態，再達到初始液化狀態。
- 粗顆粒和細顆粒煤灰重模土樣，在相同相對密度條件下，其液化強度相差不大。



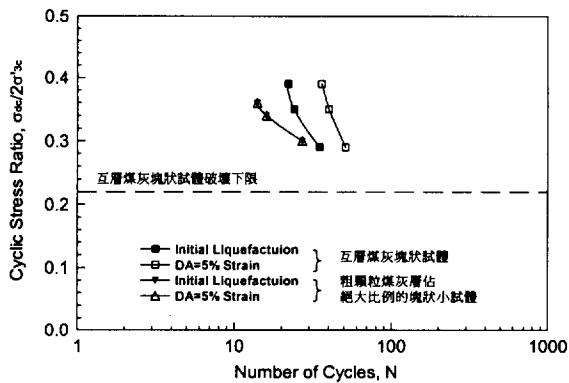


圖 12 不同粗細煤灰夾層比例對其液化強度之影響

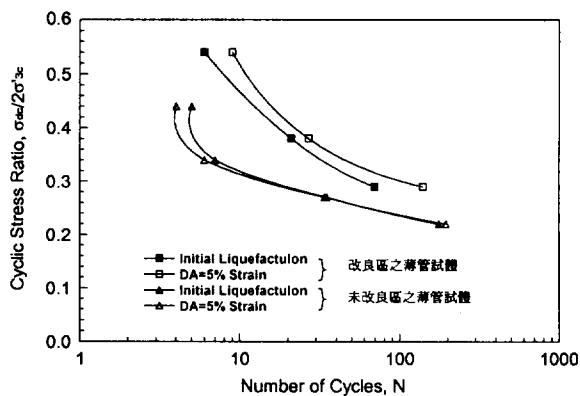


圖 13 擠壓砂樁改良對煤灰液化強度之影響

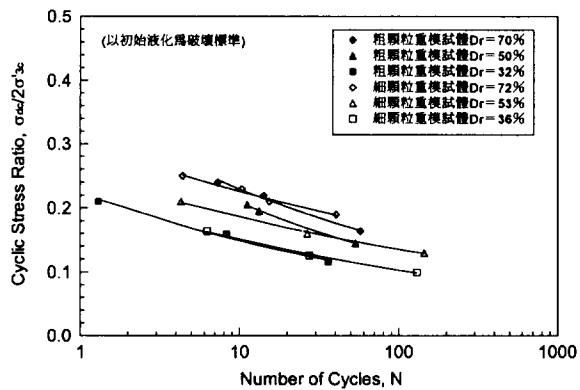


圖 14 粗、細煤灰重模土樣液化強度之比較

## 2. 重模煤灰與現地煤灰土樣液化強度之比較

由圖 15 所示，乾搗法準備之重模煤灰試體其液化強度較薄管試體為低，也比塊狀試體為低。液化強度之大小排列順序為塊狀試體大於薄管試體，薄管試體再大於乾搗法重模試體。由於塊狀試體深度較淺，且在地下水位線附近，可能因地下水位的起伏，而有過壓密或膠結的現象，因此液化曲線較陡峭。薄管試體之位置離地表較深，現地探查資料顯示其實入試驗值較小，且又受薄管壓入扭轉的影響，因此膠結作用較小，所以液化強度較塊狀試體小，但液化曲線較平緩。而重模試體之膠結作用完全喪失，故液化強度最小，而液化強度曲線最平緩。

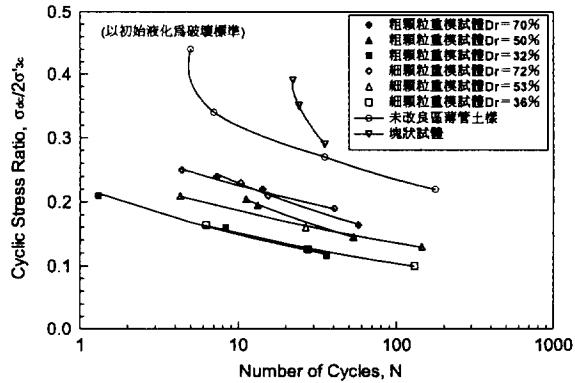


圖 15 重模試體和未改良區原狀試體液化強度之比較

## 3. 多次受剪煤灰顆粒破碎對液化強度之影響

將相同粗顆粒和細顆粒煤灰土樣重複進行三軸動態強度試驗，經多次試驗後進行土壤粒徑分析，結果發現粗顆粒煤灰發生顯著的顆粒破碎情形。經多次試驗後之粗顆粒煤灰土樣，在相同的條件下所準備的試體，其液化強度明顯降低，如圖 16 所示。而細顆粒煤灰土樣經多次三軸試驗後則無顆粒破碎情形，其液化強度亦無降低之現象。

## 4.3 與其他土壤液化強度之比較

為了與其他土壤之液化強度進行比較，本研究在 921 集集大地震後，隨即在發生液化的台中港、霧峰太子城堡、南投貓羅溪等液化地區和彰化員林國小等非液化地區進行不擾動薄管取樣，經三軸動態強度試驗結果發現，若以雙向軸向應變 5% 為試體液化的定義來比較，非液化地區之員林國小地區土壤液化強度最高，霧峰太子城堡次之，貓羅溪再次之，台中港地區最弱，如圖 17 所示。若同樣以薄管土樣之試驗結果加以比較，煤灰土樣的液化強度遠較同地區的台中港砂土為高，但和非液化之員林國小地區的液化強度相當。煤灰土樣、台中港土樣與員林國小土樣之液化強度 SR<sub>20</sub> 分別為 0.28、0.158 和 0.285。由此可知，煤灰土壤的液化強度遠較一般會發生土壤液化的砂土還高，這是由於煤灰土壤細粒料含量較高所致。

## 4.4 超額孔隙水壓之激發特性

由煤灰之液化強度試驗資料，亦可整理出其在動態載重作用下之超額孔隙水壓激發特性，一般均將之整理成超額孔隙水壓比  $\Delta u/\sigma'_{3c}$  隨作用週數比  $r_N = N/N_t$  之上升曲線。茲將原狀與重模煤灰之超額孔隙水壓比上升曲線之特性說明如下：

### 1. 原狀煤灰土樣液化過程中之孔隙水壓激發特性

各種原狀煤灰試體之孔隙水壓比上升曲線如圖 18 所示，此上升曲線有一變化帶寬，可以下列經驗公式加以模擬，如圖 19 所示。

$$r_u = (4/\pi) \cdot \tan^{-1}(r_N^{1/\alpha})$$

其中，  $r_u = \Delta u/\sigma'_{3c}$ ：超額孔隙水壓比

$$r_u = N/N_t$$
：反覆作用次數比



試驗結果顯示：

- 原狀煤灰土樣之孔隙水壓比上升曲線分佈在一較小之帶寬內。
- 當施加的反覆剪應力比越大時，水壓激發速度就越快，且前幾個作用週數對水壓之貢獻就更重要。
- 水壓激發情形並無一般砂土的三階段上升趨勢（開始和最後水壓呈急速增加，中間階段水壓呈緩慢穩定上升）。
- 若要模擬煤灰受到較大的反覆剪應力比作用下（除 CSR = 0.54、0.44 例外，因此種 CSR 太大，液化破壞都在 1~2 個作用次數內產生，所以水壓上升趨勢較為不同），孔隙

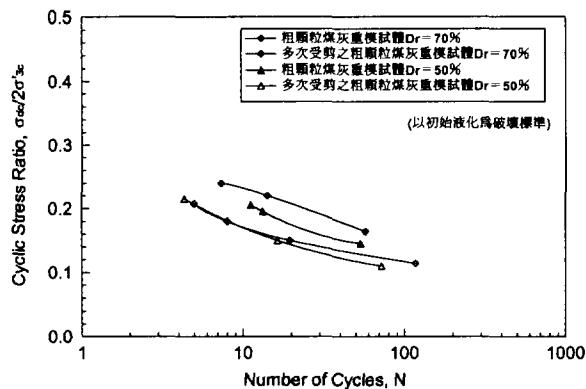


圖 16 多次受剪煤灰顆粒破碎對液化強度之影響

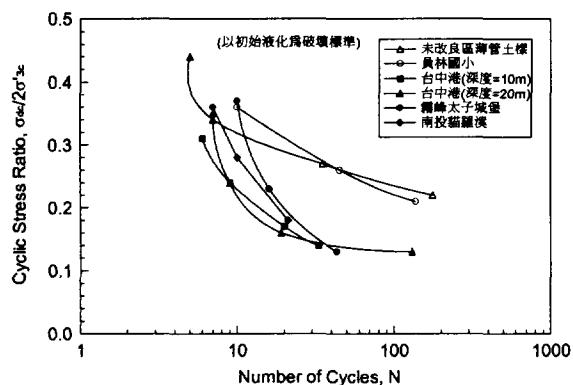


圖 17 煤灰與其它地區土壤液化強度之比較

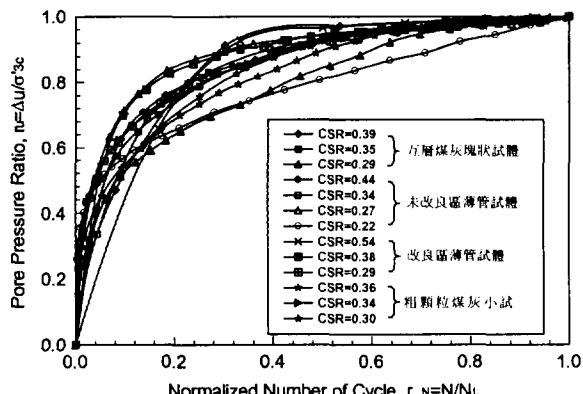


圖 18 原狀煤灰土樣之超額孔隙水壓激發曲線

水壓上升之情形，可使用圖 19 所建議之水壓上升上限曲線公式來模擬；若要模擬煤灰受較小的反覆剪應力比作用下，孔隙水壓上升之情形，可使用圖 19 所建議之水壓上升下限曲線公式來模擬。亦可使用平均之水壓上升曲線公式來代表煤灰土樣的平均超額孔隙水壓上升情形。

## 2. 重模煤灰土樣液化過程中之孔隙水壓激發特性

粗顆粒和細顆粒煤灰重模土樣之三軸動態強度試驗所得之超額孔隙水壓比上升曲線分別如圖 20(a) 及圖 20(b) 所示。試驗結果顯示：

- 由圖 20 可知，粗、細顆粒重模煤灰試體之水壓上升情形不大相同，水壓一開始皆急速增加，當作用週數比達 0.1 後，粗顆粒煤灰試體之水壓開始以較緩慢的速率增加，細顆粒煤灰試體之水壓則以等速率穩定增加。在中間之水壓上升階段，粗顆粒煤灰的水壓激發速率較細顆粒煤灰為快。
- 當施加的反覆剪應力比越大時，初始之水壓激發速率就越快。
- 重模土樣在反覆剪應力比較小時，由於到達液化狀態所需要的反覆作用次數較多，水壓在開始和最後階段呈快速增加，中間階段則保持一定速率穩定上升。但在較大之反覆剪應力比作用下，到達液化狀態所需要的反覆作用次數較少，則無此種現象發生。

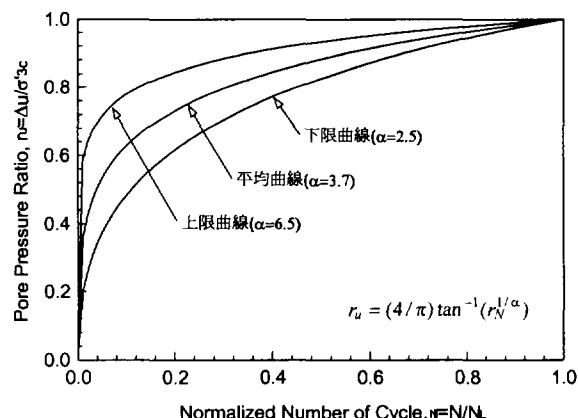


圖 19 原狀煤灰土樣超額孔隙水壓上升曲線之經驗公式

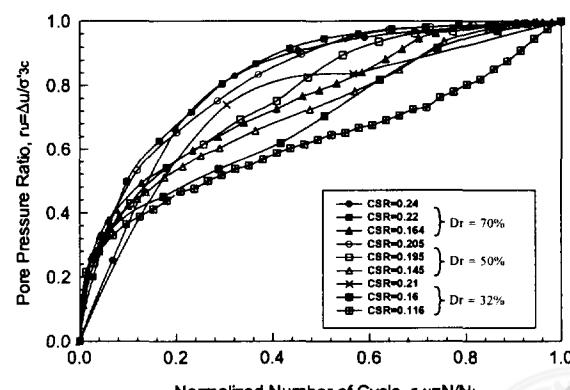
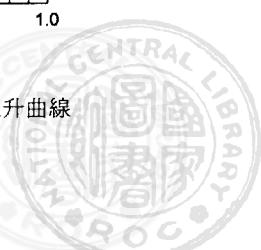


圖 20(a) 粗顆粒煤灰層重模土樣之超額孔隙水壓上升曲線



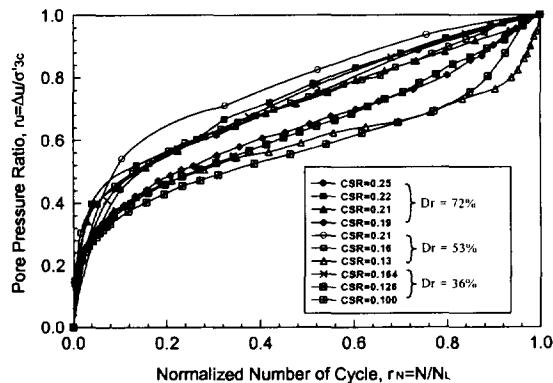


圖 20(b) 細顆粒煤灰層重模土樣之超額孔隙水壓上升曲線

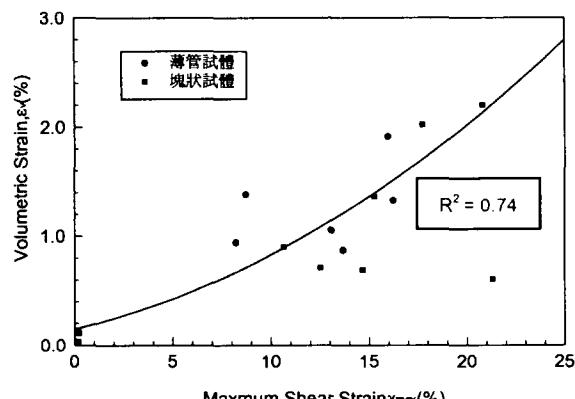


圖 21 原狀煤灰土樣再壓密試驗結果

#### 4.5 液化後再壓密特性

在進行三軸動態強度試驗，試體到達液化狀態時，可打開排水閥，使試體之超額孔隙水壓排出，量測其排水量，即為其試體液化後再壓密之體積變化。一般，可據此資料評估土壤液化後之震陷量。圖 21 為所有煤灰土樣之液化後再壓密試驗結果，由試驗結果可知煤灰土樣在液化後，其體積應變量 ( $\epsilon_v$ ) 隨試體之最大剪應變 ( $\gamma_{max}$ ) 的增加而增大，當試體未達破壞時，試體幾乎無體積應變產生。此種行為與前人之研究結果相仿 [17~21]。

由圖 21 可知，原狀煤灰土壤液化後，其體積應變比在 0.5% ~ 2% 之間，略為保守估計，平均值約為 1.5%，比一般砂土為小。以本試驗場址而言，若煤灰在地震作用下真的發生液化，以保守之煤灰層厚度 7m ~ 8m 估計，其液化後之地盤沉陷量約為 10cm ~ 12cm。

## 五、結論與建議

本研究針對中部某火力電廠灰塘區之水力回填煤灰進行一序列現地探查、取樣與試驗以及室內物理、化學性質與液化強度試驗。根據試驗結果，得到下列初步結論與建議供各界參考。

1. 試驗場址之煤灰，屬 F 級煤灰，主要成份為  $\text{SiO}_2$  、

$\text{Al}_2\text{O}_3$  、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，由物性試驗結果知其比重約為 2.2 ~ 2.4，平均含水量約為 80%，平均單位體積重量約為  $1.3 \text{ t/m}^3$ ，遠低於一般土壤之比重與單位重。其顆粒分佈曲線至少含 70% 以上之細粒料，為無塑性、無凝聚性之圓形顆粒狀土壤，按統一土壤分類可定為無塑性之粉土類 (ML) 土壤。

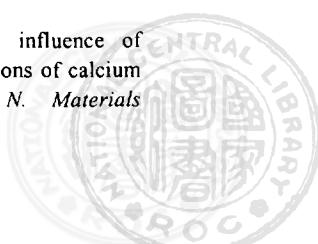
2. 現地煤灰土層雖然軟弱，但其為細料含量甚高之細顆粒土壤，故其液化強度遠較一般會液化土壤之抗液化強度為高。
3. 現地互層煤灰之平均相對密度約為 50%，粗顆粒底灰之平均相對密度約為 42%，細顆粒飛灰之平均相對密度約為 72%。因此現地細顆粒煤灰之液化強度大於互層煤灰，互層煤灰之液化強度又大於粗顆粒煤灰。
4. 以試驗所得液化強度曲線之變化趨勢相比較，塊狀試體之液化強度高於薄管試體，薄管試體之液化強度又高於乾搗法準備之重模試體。
5. 擠壓砂樁改良區薄管試體之液化強度遠大於未改良區薄管試體之液化強度。
6. 雖然粗顆粒和細顆粒煤灰重模土樣在相同的相對密度下，兩者之液化強度相當接近，但試驗結果顯示現地細顆粒煤灰層的相對密度明顯較粗顆粒煤灰層為高，其液化強度也較現地粗顆粒煤灰層土樣大。
7. 在相同的重模試體準備條件下，粗顆粒煤灰經反覆剪應力作用後，其顆粒較容易破碎，使得多次受剪後土樣之液化強度會明顯降低。
8. 現地煤灰土壤之超額孔隙水壓比上升曲線分佈在一較小帶寬內，若擬對煤灰土壤進行有效應力分析時，可參考本文所建議之超額孔隙水壓比上升曲線之經驗公式。
9. 根據多組液化後再壓密試驗結果，顯示試驗場址之煤灰土層若於地震時發生液化，其平均震後體積應變量約為 1.5%。
10. 煤灰具有特殊的物理和化學性質，其特性與原煤的成分與在粉碎、燃燒及輸送等生產過程的細節都有關係，故各地區的煤灰回填土之特性均略有差異，故建議需對其它地區的回填煤灰土層進行研究，再與本研究之結果進行比對驗證。

## 誌謝

本研究承蒙台灣電力公司核火工處提供部分研究經費，特此誌謝。研究過程中台大土木系陳正興教授的指導，邱忠弘工程師的協助，由衷感謝。

## 參考文獻

1. 陳惠峰、林志棟，「台灣電力公司之火力電廠產灰概要」，台灣地區飛灰混凝土應用研討會（一）專輯，中壢，第 19-1-19-8 頁（1992）。
2. Plowman, C., and Gabrea, J.G., "The influence of pulverized fuel ash on the hydration reactions of calcium aluminates," *Proceedings Symposium N. Materials*



- Research Society, Annual Meeting*, pp. 54–59 (1982).
3. Creek, D.N., and Shackelford, C.D., "Permeability and leaching characteristics of fly ash liner materials," *Transportation Research Record*, No. 1234, pp. 74–83 (1992).
  4. Torrey, S., "Coal ash utilization," Noyes Pates Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., pp. 1–53 (1978).
  5. Lai, C.I., "Strength characteristics of flowable mortars containing coal ash," *Proceedings: Fourth International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Turkey, Volume 1 (1991).
  6. Toth, P.S., Chan, H.T., and Cragg, C.B., "Coal ash as structural fill, with special reference to Ontario experience," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 694–704 (1988).
  7. 梁明德, 「煤灰填地處理之工程性質研究」, 國立台灣海洋大學, 基隆 (1993)。
  8. Robertson, R.K., and Campanella, R.G., *Guidelines for Geotechnical Design Using the Cone Penetrometer Test and CPT with Pore Pressure Measurement*, Fourth edition, Hogentogler & Co., Inc., Columbia, U.S.A. (1989).
  9. Robertson, R.K., and Campanella, R.G., Gillespie, D., and Rice, A., "Seismic CPT to measure in-site shear wave velocity," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 791–803 (1986).
  10. Stokoe, K.H., and Woods, R.D., "In situ shear wave velocity by cross-hole method," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, SM5, pp. 443–460 (1972).
  11. Hvorslev, M.J., "Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes," Waterways Experiment Station (reprinted and available from Engineering Foundation, NY), 521p (1949).
  12. 林資凱, 「水力回填煤灰之動態特性」, 碩士論文, 國立中央大學土木工程學系, 中壢 (2001)。
  13. Lamb, T.W., and Whitman, R.V., *Soil Mechanics, SI Version*, Chapter 16, pp. 241–250 (1979).
  14. 日本土質工學會編, 「土質試驗的方法與解說—第 7 編 第 9 章 土的反覆非排水三軸試驗」, 東京 (1986)。
  15. Ishihara, K., *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press Inc., New York, pp. 208–246 (1996).
  16. Seed, H.B., and Lee, K.L., "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, SM6, pp. 105–134 (1966).
  17. Ishihara, K., and Yoshimine, M., "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes," *Soils and Foundations*, Vol. 32, pp. 173–188 (1992).
  18. Nagase, H., and Ishihara, K., "Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquake," *Soils and Foundations*, Vol. 28, pp. 66–76 (1988).
  19. Tatsuoka, F., Sasaki, T., and Yamada, S., "Settlements in saturated sand induced by cyclic undrained simple shear," *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco*, Vol. 3, pp. 95–102 (1984).
  20. Shamoto, Y., Sato, M., and Zhang, J.M., "Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits," *Soils and Foundations*, Vol. 36, pp. 39–50 (1996).
  21. 黃俊鴻、李崇正、黃富國, 「新化斷層與南二高交會處之土壤液化評估與防制建議」, 國立中央大學土木工程研究所研究報告, No. 101, 中壢 (1998)。
  22. 汪紹聞、秦蔚琴, 「電廠粉煤灰的強度和液化特性以及對儲灰壩設計的看法」, 第二屆全國土動力學會議: 全國土工建築物與地基抗震學術討論會論文集, 西安, 第 156–161 頁 (1986)。
  23. Seed, H.B., and Lee, K.L., "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105–134 (1966).
  24. Vaid, Y.P., Chern, J.C., and Tumi, H., "Confining pressure, grain angularity, and liquefaction," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 1229–1235 (1985).
  25. Helmuth, R., "Fly ash in cement and concrete," PCA R and D Laboratories, Illinois, pp. 101–112 (1987).
  26. Sidney D., "The occurrence of duplex film on fly ash surfaces," *Cement and Concrete Research*, pp. 697–701 (1980).
  27. Joshi, R.C., and Mardh, B.K., "Fly ash and coal conversion by products: characterization, utilization and disposal III," Vol. 86, pp. 113–125 (1989).
  28. Sivasundaram, V., Carette, G.G., and Malhotra, V.M., "Mechanical properties, creep and resistance to diffusion of chloride ions of concrete incorporation high volumes of ASTM class F fly ashes from seven different sources," *ACI Materials Journal*, pp. 407–416 (1991).
  29. Sakai, A., Samang, L., and Miura, N., "Behavior of soft soils under undrained cyclic loading with initial shear stress," *Journal of Southeast Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 2, pp. 1–22 (1994).

---

90 年 8 月 9 日	收稿
92 年 3 月 10 日	修改
92 年 3 月 19 日	接受

