

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

廢棄物掩埋場穩定性最佳化設計(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-009-013-

執行期間：94 年 08 月 01 日至 95 年 07 月 31 日

執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：單信瑜

計畫參與人員：單信瑜，范佐憲，吳佩萱，王昱雲，陳維良

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☐ 成果報告
☒ 期中進度報告

廢棄物掩埋場穩定性最佳化設計(1/3)

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2211-E-009-013

執行期間：94年 8月 1日至 95年 7月31日

計畫主持人：單信瑜

共同主持人：

計畫參與人員：范佐憲、吳佩萱、王昱雲、陳維良

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學土木工程系

中 華 民 國 95 年 5 月 31 日

廢棄物掩埋場穩定性最佳化設計(1/3)

Optimization of Landfill Stability Design(1/3)

計畫編號：NSC 94-2211-E-009-013

執行期限：94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

主持人：單信瑜 國立交通大學土木工程學系 副教授

摘要

關鍵詞：掩埋場、廢棄物、剪力強度、邊坡穩定

雖然台灣的廢棄物處理逐漸以焚化取代掩埋，然而無論是不可燃的廢棄物、焚化灰渣、或者是離焚化場運距較遠的鄉鎮，仍將繼續以掩埋為其主要的處理方式。台灣因為地狹人稠，所以許多掩埋場位於山坡地上。這些掩埋場破壞的主要原因就是在掩埋場的設計時，並未進行邊坡穩定的分析；在營運期間也並未考量到穩定性的問題。另一方面，台灣過去甚少有對於廢棄物的剪力強度進行研究，因此少數掩埋場在進行穩定分析時，僅能採用國外廢棄物剪力強度的數據資料。本研究的目的是在於利用現地試驗，直接求出廢棄物的剪力強度，並利用這些參數進行邊坡穩定分析。針對常見的山坡地掩埋場配置與斷面，對於掩埋場營運中與封場後的最終填築斷面進行探討，以提出既符合安全要求又能夠將掩埋容積最大化的最佳斷面配置。計畫成果將可以提供掩埋場的管理單位與工程設計者作為掩埋場設計與營運的參考，提高掩埋場的安全性，提高掩埋場的安全性與經濟效益。

Keywords: Landfill, Solid Waste, Shear Strength, Slope Stability

Due to the limitation of population density and availability of land, a large portion of Taiwan's landfills are located in mountainous area. Current regulations do not require slope stability analysis for these landfills. As a result, almost all of the landfills were not designed to maintain a suitable factor of safety against failure. Many of these landfills fail during typhoon season each year. The composition of Taiwan's solid waste differs considerably from that of the United States or any other country in the world. However, the lack of data of local solid waste poses a great limitation to engineers. The objectives of this research are to collect shear strength data from in-situ tests and perform a series of stability analyses. The

stability of various cross-sections of typical hillside landfill during operation and closure will be analyzed to develop a series of optimized design. These optimized cross-sections will facilitate governmental agencies to develop landfill design and operation criteria to ensure the stability of landfills. In addition, the stability criteria will help the landfill operators maximize the capacity of the landfills without compromising stability.

一、前言

1.1 計畫背景

1.1.1 掩埋場邊坡穩定問題

雖然台灣的廢棄物處理逐漸以焚化取代掩埋，然而無論是不可燃的廢棄物、焚化灰渣、或者是離焚化場運距較遠的鄉鎮，仍將繼續以掩埋為其主要的處理方式。此外，在位於各地的數百座老舊掩埋場，雖陸續封場，但其長期穩定性仍然是必須關切的問題。

根據我國一般廢棄物回收清除處理辦法（環保署，2002）第三十條第二款規定，掩埋場終止使用時，應覆蓋厚度五十公分以上之砂質、泥質黏土、皂土或具相同阻水功能之地工材料組合等阻水材料，覆蓋砂石者，並予以壓實。壓實後，平坦面坡度為百分之一以上，斜面坡度為百分之三十以下，並應綠化植被。另根據我國事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準（環保署，2002）規定，掩埋場終止使用時，應覆蓋厚度五十公分以上之砂質、泥質黏土、皂土或具相同阻水功能之地工材料組合等阻水材料，覆蓋砂石者，並予以壓實。壓實後，平坦面坡度為百分之一以上，斜面坡度為百分之三十以下，並應綠化植被。然而，因為國內掩埋場多半超量掩埋或因為於山坡地，因此多未能符合上述坡度低於百分之三十（約為 17.5°）的要求。

截至民國 94 年止，台灣地區營運中的廢棄物掩埋場總計有一百七十餘場，台灣山坡地掩埋場約七十餘場。根據環保署 2003 年委託研究單位訪視 29 個復育掩埋場（行政院環保署，2003）的結果顯示，『邊坡穩定性不足』名列掩埋場問題的榜首。針對這一類掩埋場的穩定問題，國內的主管機關曾提出以下

建議：

1. 掩埋場在平地應不高於 50 公尺，在丘陵則可酌量提高。當掩埋場高度愈高，其坡度則應求其平緩。
2. 掩埋場外緣坡度基本上應不小於 1:3。祇有當掩埋場需要堆積更高時，方予酌情放緩坡度。
3. 當坡面愈趨於上方時，坡度可酌增陡峻，當坡面愈趨於下方時，坡度則勢須放緩。
4. 掩埋場高度每增加 8~10 公尺時，則須加設最少為 4 公尺寬的平台階面一座。階面內側須有排水溝設置。

另一方面，亦有專家提出在目前存在的掩埋場中下述的垃圾邊坡範圍已被觀察為穩定邊坡（陳榮河，1997）：

1. 事業廢棄物：4H：IV ($\approx 14.0^\circ$) 到 3H：IV ($\approx 18.4^\circ$)
2. 包含 40% 固體的污泥式廢棄物：7H：IV ($\approx 8.1^\circ$) 到 6H：IV ($\approx 9.5^\circ$)
3. 飛灰沈積物：7H：IV ($\approx 8.1^\circ$) 到 6H：IV ($\approx 9.5^\circ$)
4. 砂質廢棄物和飛灰：4H：IV ($\approx 14.0^\circ$) 到 3H：IV ($\approx 18.4^\circ$)

對照美國環保署的掩埋場設計要求(USEPA, 1994)，『掩埋場的覆蓋系統必須在 25 年頻率暴雨 24 小時逕流與入滲狀態下保持穩定。坡度較 5H:1V($\approx 11.3^\circ$) 陡者應該設置排水層。並應利用試驗求出覆蓋系統中的各個構件之間在乾燥與飽和狀態下的摩擦角，以其最低之摩擦角作為邊坡之最大坡度。』國內的掩埋場最終覆蓋系統規範並未要求排水層的設置，且並未對於邊坡角度有明確的指引。這對於颱風季節雨量集中、且最終掩埋面頗為陡峭的台灣掩埋場來說，其穩定性較難以確保。

長期穩定的安全係數應大於 1.5。地震時安全係數則必須大於 1.0。（根據 RCRA Subtitle D 採用 USGS 2120 尖峰岩盤加速度圖 90% 機率 250 年重現期地震。相當於 2400 年重現期的地震。）若安全係數小於 1.0，則必須採用更嚴謹的分析方法評估地震時的位移。

表 1 美國環保署對於掩埋場穩定安全係數之規範 (USEPA, 1994)

類別	安全係數	
	土壤或廢棄物強度參數可靠度高者	土壤或廢棄物強度參數可靠度低者
崩塌後對生命無立即危害	>1.25	>1.5
崩塌後對環境無重大影響	>1.2	>1.3
崩塌後對生命產生立即危害	>1.5	>2.0 或更高
崩塌後對環境產生重大影響	>1.3	>1.7 或更高

1.1.2 廢棄物、焚化灰渣工程性質與地工合成材料剪

力強度

廢棄物剪力強度

現地掩埋物之剪力強度參數，受限於取樣代表性與試驗設備之限制，不易求得，一般多利用室內重模大型剪力試驗、現地大型剪力試驗、反算分析(back analysis)等方法推估。

有研究者提出廢棄物內聚力 c 值在 0–67 kPa 之間，摩擦角(ϕ) 在 10–53° 之間(Knochenmus et al., 1998; Kavazanjian et al., 2000)。Vam Impe (1998) 綜合了 24 個利用邊坡穩定迴歸分析與室內與現場試驗的廢棄物剪力強度研究，他整理所得的結果：(1) $0 \leq \phi \leq 20^\circ$, $c \approx 20$ kPa, $\phi = 0^\circ$; (2) $20 \leq \phi \leq 60^\circ$, $c = 0$ kPa, $\phi \approx 38^\circ$; (3) $20 \leq \phi \leq 60^\circ$, $c \geq 20$ kPa, $\phi \approx 30^\circ$ 。這些數值與 Kavazanjian et al. (2000) 所提出之結果相近。根據游中揚 (1998) 整理前人數據後指出，國外於掩埋場現地以標準貫入試驗及現場載重破壞性試驗等試驗結果顯示，垃圾之摩擦角(ϕ) 與凝聚力(c) 大致呈反比關係，其摩擦角約在 12°–26° 之間，凝聚力約在 0.45–0.02 kg/cm² 間。另一方面，Landva and Clark (1986) 年久廢棄物，摩擦角 38°–42°，內聚力 16–19 kPa。但一年後求得的數據為摩擦角 33°，內聚力 16 kPa。Howland and Landva (1992) 的研究則得出 10–15 年的廢棄物，摩擦角 33°，內聚力 17 kPa。Gabr and Valero (1995) 10–15 年的廢棄物，摩擦角 20°–39°，內聚力 0–28 kPa。

Landva 與 Clark (1990) 曾針對數個不同掩埋場之固體廢棄物進行直剪試驗（試體大小為 43.4 cm X 28.7 cm），發現凝聚力介於 0.0 至 23.0 kPa 間、摩擦角則介於 24° 至 41° 間，受廢棄物組成成分影響很大。Landva 與 Clark (1990) 更進一步指出，傳統上將剪力強度與正向應力表示成單一線性之關係可能不適用於固體廢棄物。

Kavazanjian 等人 (1995) 依據平鈹載重試驗反算分析、實驗室與現地大型直剪試驗，配合已知穩定之現地掩埋場反算分析結果，建議取強度分佈之下限值，以雙線性來描述固體廢棄物之強度特性，如圖 10 所示，當正向應力低於 30.0 kPa 時，取凝聚力 24.0 kPa、摩擦角 0 度；當正向應力大於 30.0 kPa 時則取凝聚力 0.0 kPa、摩擦角 33°。

Eid 等人 (2000) 則綜合大型直剪試驗結果及已發生破壞之現地掩埋場邊坡反算分析結果，建議固體廢棄物之強度參數可取凝聚力 25.0 kPa、摩擦角 35 度。此外，固體廢棄物之應力應變關係也明顯與一般土壤材料不同。固體廢棄物之三軸壓縮試驗顯示，在軸向應變超過 30% 後，其應力仍持續上升，並無達到穩定值之跡象(Singh 與 Murphy, 1990; Machado 等人, 2002)。因固體廢棄物之破壞應變明顯遠高於一般土壤材料，當掩埋場之基礎土壤達到尖峰強度時，固體廢棄物只發揮了部分強度，直到累積足夠剪應變，固體廢棄物達到破壞強度後，才會發生明顯可見穿透廢棄物堆填邊坡之破壞，此時其下之基礎土壤可能已達到其殘餘強度。因此，進行掩埋場

邊坡穩定性分析時，若基礎土壤及固體廢棄物同時採用尖峰強度可能導致不保守的結果。

國內掩埋場廢棄物參數之量測

國內掩埋場中廢棄物的工程性質研究甚少。以往對內湖垃圾山之穩定性分析所採用之參數，則參考日本實際資料、並折減其強度至 75%，分別為 $\phi=24.2^\circ$ ， $c=33\text{ kPa}$ (3.38 t/m^2)，垃圾之單位重則取 6.3 kN/m^3 (0.7 t/m^3)。另福德坑衛生掩埋場於規劃階段之穩定性分析，所採用摩擦角及擬聚力與內湖垃圾山一致，但單位重取更保守之 8.1 kN/m^3 (0.91 t/m^3) (陳榮河，1990)。

相較於一般土壤材料，固體廢棄物因成分複雜、顆粒形狀與尺寸差異極大，及長期掩埋後化學或物理變化的影響，使其強度性質不僅變異性高且會隨時間改變。再加上一般土壤強度試驗無法真正適用於廢棄物材料，因此，進行掩埋場邊坡穩定分析時，如何合理評估固體廢棄物之強度參數為主要工作。廢棄物剪力強度的取得方式有直接量測和間接量測。直接量測的方法包括：標準貫入試驗、錐貫入試驗、壓力儀(Pressuremeter)、現地直剪試驗、間接量測的方法包括了：波速量測、電阻量測、平鈹載重試驗、沈陷觀測、側向變形觀測、邊坡滑動回饋分析等。

ASTM D5321 大型直剪試驗的直剪盒為 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ ，高度 10 cm ，雖已較傳統的直剪試驗 ASTM D3080 試體尺寸大許多，但是對於廢棄物來說，因廢棄物尺寸不一， $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的尺寸仍嫌無法對於具代表性的廢棄物進行試驗。而且此儀器所能提供之正向力相當低，多半僅適用於覆蓋系統的狀況。基於前述廢棄物的非均質與尺寸效應，廢棄物的性質藉由現場的試驗可以求得最為可靠的數據。

灰渣剪力強度

國內外對於焚化灰渣的再利用雖有部分學者專家的研究成果，但是對於灰渣的工程性質，尤其是剪力強度性質幾乎沒有研究。

土工合成材料界面剪力強度

土工合成膜與土壤介面剪力強度參數隨著土工合成膜表面處理方式不同而差異極大，對具平滑表面之土工合成膜(smooth geomembrane)，其典型靜態摩擦角約為 8° ，而織物類(textured)土工合成膜其典型靜態摩擦角可達到 25° ，Mitchell et al. (1990)之研究指出介面靜態視摩擦角受材質本身、接觸介面性質與介面濕潤度影響，而 Kavazanjian et al. (1991)與 Yegian and Lahlaf (1992)利用震動台與離心機研究土工合成膜與土壤介面其動態與靜態視摩擦角差異，發現其差異有限，因此可利用靜態試驗值進行擬靜態分析。對於複合式襯墊層中夯實黏土與土工合成膜介面摩擦角，其值受黏土夯實時水分與介面濕潤度影響極大，摩擦角分佈可從 6° 至 30° ，實務上多利

用此介面為滑動面時之反算值代表。另外夯實黏土襯墊層其剪力強度介於 $44\sim 83\text{ kPa}$ (Augello et al. 1995)。

根據 Martin et al. (1984)的研究，HDPE 土工膜布與砂之間的摩擦角約 18° ，PVC 土工膜布與砂之間的摩擦角約 23° 。HDPE 土工膜布與土工織物之間的摩擦角約 $6^\circ - 11^\circ$ ，PVC 土工膜布與土工織物之間的摩擦角約 $11^\circ - 24^\circ$ 。其他的研究數據顯示，砂和光面土工止水膜的摩擦角大約在 $17^\circ - 25^\circ$ 之間(Koerner, 1994; Orman, 1994; Stamatopoulos and Kotzias, 1996; Day, 1998; Liu et al., 1998; Stamatopoulos, 1998; Luellen et al., 1999)。織布和糙面土工止水膜的尖峰摩擦角則在 $19^\circ - 27^\circ$ 之間，殘餘摩擦角在 $17^\circ - 24^\circ$ 之間 (Luellen et al., 1999)。

1.1.3 研究目的

本計畫的目的為針對國內的掩埋場：

1. 求得台灣一般廢棄物與焚化灰渣的剪力強度參數與其他工程性質參數
2. 探討控制山坡地掩埋場穩定性設計的因子：掩埋面坡高、掩埋面邊坡角度、掩埋場底部邊坡角度、廢棄物剪力強度、土工合成材料界面剪力強度、孔隙水壓
3. 探討山坡掩埋場設計的最佳分析方法與各種分析方法適用的條件與限制
4. 利用數值分析探討創新掩埋場掩埋剖面的可行性

二、研究方法

2.1 研究規劃

本年度之研究內容包括：

- (1)灰渣與廢棄物試驗
 - a. 廢棄物現地直接剪力試驗一組(四個正向應力)
 - b. 廢棄物平鈹載重試驗一組
 - c. 廢棄物物理性質試驗
 - d. 灰渣與土壤試驗
- (2)掩埋場坡面測量：營運中與已封閉掩埋場坡面測量(三場)。
- (3)二維(2D)邊坡穩定分析

2.2 廢棄物基本性質分析

廢棄物之基本性質分析

1. [一般廢棄物\(垃圾\)採樣方法](#) (NIEA R124.00C)
2. [一般廢棄物\(垃圾\)單位容積重測定方法—外觀密度測定法](#) (NIEA R215.00C)
3. [一般廢棄物\(垃圾\)水分測定方法](#) (NIEA R213.20C)

2.3 現地試驗

1. 廢棄物現地直接剪力試驗(現地直剪)

本計畫現地直接剪力試驗採“傾斜載重直接剪力試

驗”(Inclined load direct shear test)，此一試驗原本目地為求得岩體弱面之強度參數。試驗配置及建議剪力施加傾斜角度如圖一所示。試驗流程可參考國際岩石力學協會(ISRM)建議之岩體節理試驗方法(Lama and Vutukuri, 1978; Brown, 1981)，ASTM 關於現地直剪試驗規範為 D4554-90 亦可參考(ASTM, 1993)。

剪動流程簡述於下：

- (1) 施加正向力至預定載重，當位移計連續 10 分鐘記錄沈陷量小於 0.05 mm 時即可進行下一步驟。
- (2) 初始剪位移施加速率不超過 0.1 mm/min，隨剪應力增加可酌量增加位移速率但不超過 0.5 mm/min，剪應力達尖峰峰值位移速率可調至 1.0 mm/min，尖峰剪應力附近位移速率應調整於 0.02 – 0.2 mm/min 之間以完整繪製剪應力-變位曲線。剪力施加過程持續至連續四次剪應力讀數變化小於 5% 且剪位移大於 2 cm 時停止，若剪應力始終未達尖峰峰值則加載至剪應變量達 20% 以上停止。
- (3) 為保持正向力不變，剪力施加過程中需遞減正向千斤頂之力，遞減量與剪力方向千斤頂垂直方向分量之力相同。

呆重或反力地錨提供之載重

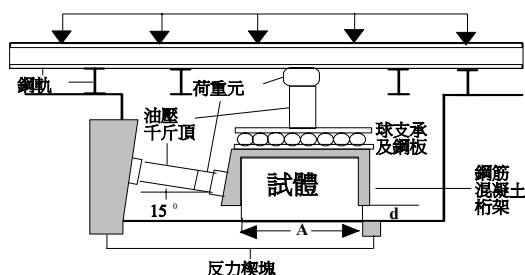


圖 1 直接剪力試驗現場佈設示意圖

2. 廢棄物平鈑載重試驗

承壓鈑採用方形或圓形鋼鈑進行試驗。靜載重採用挖土機作為上部荷重，挖土機型式依現地土壤狀況而定。荷重樑採用挖土機下方底盤作為荷重樑。沉陷計及基座使用 4 組日本 TML 公司製造，衝程 10.0 公分，精度 0.001" 以上之電子式變位計(LVDT)，安裝於平鈑四個角落利用磁鐵座連接於參考樑上。加壓設備採用容量 50 噸之分離式油壓千斤頂進行加載。壓力量測設備採用美國 INTERFACE 公司製造容量 22.7 噸(50 kips)之電子式荷重計(Load Cell)進行量測。資料量測系統採用日本 TML 公司生產之 Data Logger 自動資料擷取系統進行資料記錄。

整體試驗步驟如下：

- (1) 以挖土機開挖壕溝至業主指定深度並選定試驗點。
- (2) 架設載重台，以每支長 9m，重約 1300 公斤之 40cm*40cmH 型鋼樑總共 12 支，及 1 部型號 200 之挖土機，8m³ 鐵筒 4 個、6m³ 鐵筒 2 個、提供約 60 噸呆重。

- (3) 試驗面以人工整平，鋪上一層約 2 公分厚之細砂，放置 75 公分圓型平鈑，並調整使保持水平且完全與地面接觸之狀態。
- (4) 架設參考樑，參考樑之支點距離試驗點至少 5ft(1.5 公尺)以上。
- (5) 由下而上依序裝置方型平鈑(採用 75cm、60cm、45cm 之平鈑疊成，荷重傳遞於 75.0cm 直徑之墊鈑上，以減小彎曲之產生)、油壓千斤頂、荷重計、球形承座及適當長度之承壓支柱。
- (6) 裝設電子式位移感測計(LVDT)三組，以適當距離平均裝置，於方形平鈑邊緣約 3cm 處，並歸零。
- (7) 設備完畢後啟動記讀系統，並開始加壓。依據實際載重與沉陷量相對關係，微壓操作油壓千斤頂至變形，並記讀鈑位移量與荷重變化情形，每次加壓至少記錄共約 15 分鐘，且連續 3 分鐘沈陷率小於 0.02cm/min 方可進行下一階載重，過程中千斤頂之荷重維持穩定；記讀於加壓後 1 分、2 分、4 分、6 分、8 分、10、12 及 15 分記讀測微錶讀數。
- (8) 施加預定荷重增量，重複上述步驟，至預定最大荷重約二分之一時，荷重解壓。
- (9) 再重新施加荷重至荷重達預定最大荷重後，所有荷重平分 3 次解，每次解壓同加壓步驟記讀荷重、時間及沈陷量三者之關係。

移除各項試驗設備並採取試驗位置下方廢棄物密封於塑膠袋內送回試驗室試驗。

平鈑載重試驗承载力估計係由試驗資料繪得"載重～沉陷量關係曲線"，並以其降伏點或沉陷量達 0.5 英吋時之對應載重為極限承载力(q_u)，並取極限承载力之一半為容許承载力(q_a)。

2.4 灰渣與土壤室內工程性質試驗

焚化灰渣之採樣係依據環保署環境檢驗所公布之廢棄物焚化灰渣採樣方法 (NIEA R119.00C)進行。

焚化灰渣與土壤的試驗包括一般物理性質試驗與力學試驗。一般物性試驗包括粒徑分析、比重、單位重、含水比、阿太堡試驗、土壤分類，試驗規範如表 2。

表 2 焚化灰渣與土壤物性試驗依據之試驗規範

試驗項目	試驗規範
粒徑分析(含篩分析及比重計沈降分析)	CNS 11776 A3251 土壤粒徑分析試驗法
比重	CNS 5090 A3089 土壤比重試驗法
單位重	CNS 11777 A3252 土壤含水量與密度關係試驗法
含水比	ASTM D2216 實驗室中土壤、岩石及土壤、骨材混合物含水量(濕度)測定法
阿太堡試驗	CNS 5087 A3086 土壤液性限度試驗法 CNS 5088 A3087 土壤塑性限度試驗與塑性指數決定法
土壤分類	ASTM D420 工程用土壤及岩石分類試驗法

灰渣與土壤之剪力強度將利用直接剪力試驗(ASTM

D3080-04)求得。正向應力範圍與廢棄物現地直剪試驗相同，為正向力 50, 100, 200, 400 kPa (約 0.5, 1, 2, 4 kg/cm²)。灰渣與土壤之壓縮性質將採單向度壓密試驗(ASTM D2435-04)進行。

2.5 邊坡穩定分析

本計畫因經費不足，僅購置 GEOSLOPE/w 軟體以進行 2D 邊坡穩定分析，無法購買 FLAC/Slope 軟體。GEOSLOPE/w 為 2D 邊坡穩定分析程式，可選用的分析方法包括了 SBP、Janbu 等常用的方法。在可分析的滑動面形狀上，也都可以考慮圓弧、非圓弧、平面式破壞面，並且對於圓弧式滑動面可以型尋找滑動中心與圓弧半徑，求出最小安全係數。分析步驟如下：

- (1) 利用圖形界面或資料檔設定掩埋場剖面
- (2) 輸入廢棄物與土壤相關參數。
- (3) 輸入地下水位或孔隙水壓條件
- (4) 輸入地震參數
- (5) 進行分析
- (6) 檢視程式輸出結果：安全係數、正向應力與剪應力分佈
- (7) 輸出數值與圖形檔案

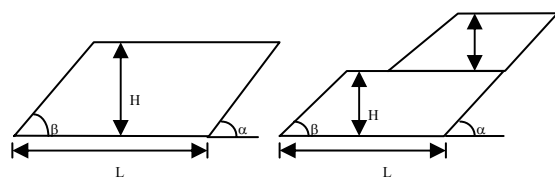


圖 2 邊坡穩定分析類型示意圖

三、研究結果

3.1 現地試驗

現地試驗之場址為新竹縣湖口鄉垃圾掩埋場。湖口鄉位於新竹縣之北端，北與桃園縣楊梅鎮交界，南與竹北市為鄰，東界為新埔鎮，西界為新豐鄉。地勢東北與北稍高，除一部份為丘陵地帶之外，其餘均相當平坦。

湖口鄉區域性掩埋場位於湖口鄉祥湖段 172、175、176、177、178、179、180、181 等八筆地號上，基地面積約 4 公頃(39624.19 m²)。場內掩埋面積約 1.713 公頃，容量已達 68,000 萬公噸。預定 95 年 4 月封閉。

本次現地試驗由交通大學公開招標，由衷毅土壤工程技術顧問公司得標。該公司負責進行現地直剪試驗與平鉸載重試驗。試驗於民國 95 年 2 月執行。

3.1.1 廢棄物性質

試驗位置之廢棄物年齡約三年左右。



圖 試驗之廢棄物



圖 第 10 號廢棄物試體

表 3 廢棄物試體單位重試驗結果彙整表

試體	總重量 W_t (kg)	淨重(kg)	單位重(t/m^3)
1	26.466	22.058	0.22058
2	31.092	26.684	0.26684
3	29.870	25.462	0.25462
4	34.182	29.774	0.29774
5	29.116	24.708	0.24708
6	29.094	24.686	0.24686
7	27.026	22.618	0.22618
8	32.678	28.27	0.2827
9	35.496	31.088	0.31088
10	34.616	30.208	0.30208
容器重 W_0 =	4.408	kg	
體積 V =	0.1	m ³	

表 4 廢棄物含水比試驗結果彙整表

試體	濕重 W_1 (kg)	乾重 W_2 (kg)	水重(kg)	含水比(W)
1	4.558	2.300	2.258	0.9817391
2	3.582	1.764	1.818	1.0306122
3	4.402	2.852	1.550	0.5434783
4	4.406	3.298	1.108	0.3359612

3.1.2 現地直剪試驗

本計畫之現地直剪試驗共四個，其配置如圖 3。

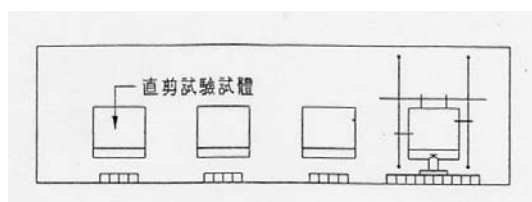


圖 3 現地直剪試驗平面佈置示意圖

試體製作步驟：

- (1) 以挖土機開挖試驗壕溝至指定試驗深度，則將壕溝尺寸酌予適當增大。在壕溝內將試體位置標示清楚，先以挖土機約略修出試體雛形，並小心操作以避免擾動試體。
- (2) 以人工修裁出底面積為 80 公分×80 公分，40 高公分之試體，將靠近壕溝壁之試體面修飾成傾斜面，使合力能通過試體受剪面之中心線，傾斜角為 22°。
- (3) 於試體之頂部及四週澆置一層厚約 12 公分之鋼筋混凝土，澆注混凝土之前，在試體底緣四週鋪墊一層厚約 5 公分之保麗龍，以分隔混凝土帽與地面，預留剪力槽，於試驗前再將其剝除之。
- (4) 試體後側以長 40*40cm*8 公尺之型鋼，作為試體受剪時抵抗下方土體移動之反力牆。

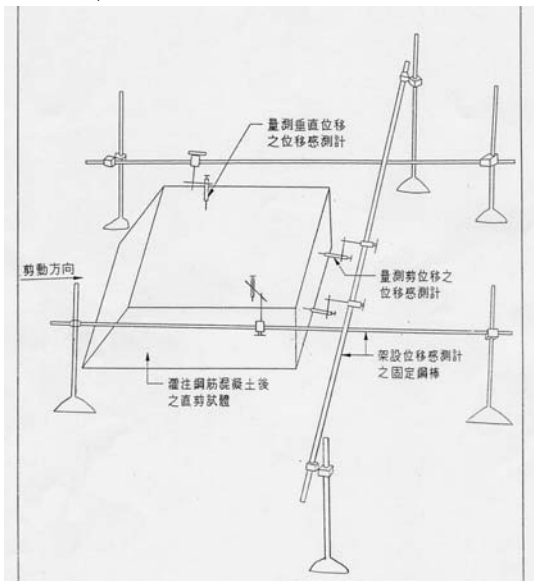


圖 4 現地直剪試驗位移感測計佈置示意圖

試體製作完成，並待混凝土硬化 7 天之強度後進行試驗。

- (1) 按所需之垂直正應力大小，分別為 0.3、0.5、1.0、1.5 (kg/cm^2)，以怪手、鐵筒及型鋼組成之載重台，並以千斤頂及荷重計控制應力大小。
- (2) 將位移感測計安裝於試體後側、上側及側向，以量測其剪位移、沉陷量、側向位移。架設儀器之固定桿需固定於距離試體 80 公分(一倍試體寬度)以上位置，避免土層因受壓力推擠而移動固定桿，導致無法測得試體之真正位移量(圖 4)。
- (3) 將位移感測計及壓力傳感器連接完成後，即開始以手控油壓機將正向應依序分別加壓應力，後開始加剪應力，每隔 30 秒記錄剪應力與各位移量乙次。
- (4) 剪應力到達尖峰值後，千斤頂所施壓力即逐漸下降，位移量仍持續增加，至剪力下降已趨平緩，即視為已達殘餘強度。
- (5) 翻開已試驗完畢之試體，檢視、拍照及記錄

剪力面之情形。



圖 5 廢棄物開挖



圖 6 試體修飾及紮筋



圖 7 組裝模板



圖 8 直剪試體灌漿



圖 9 架設反力牆



圖 10 反力架鋼樑吊放



圖 11 反力架上方加載



圖 12 架設千斤頂、位移感測計與荷重元



圖 13 量測試體受剪面中心線之傾角



圖 14 軸向加壓油壓機



圖 16 資料擷取系統

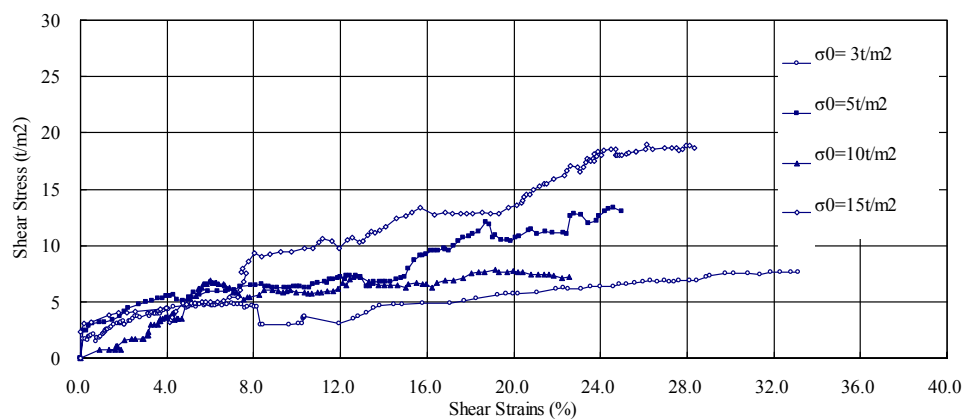


圖 17 現地直剪試驗應力應變圖

現地直剪試驗所得之應力-應變曲線如圖 17 所示。為因應廢棄物之特性，本試驗之剪位儀達 20 cm 以上。由圖中可看出，剪應力隨位儀持續增加，其中

可能因為試體所含廢棄物之差異性以及試體在較大剪位移時之影響，導致在大應變時，10 t/m² 試體之剪應力低於 5 t/m² 試體之剪應力。圖 18 為現地直剪

試驗所求出之莫爾庫倫破壞包絡線，線性迴歸所得之內聚力為 3.44 t/m^2 ，摩擦角為 32.1° 。這一組的剪力強度在過去學者研究所歸納之範圍內，但因本試驗直接在現場進行，且試體遠較過去研究所使用大，因此數據之可靠性更高。惟 5 t/m^2 試體與 10 t/m^2 試體之剪應力仍將進一步分析，或許採取捨棄其中 10 t/m^2 試體之資料進行分析，以求出更精確之剪力強度數據。

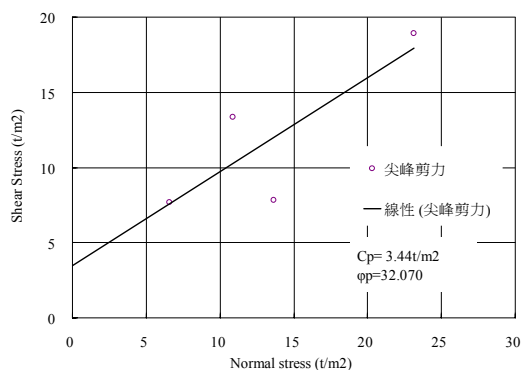


圖 18 現地直剪試驗結果曲線圖

3.1.3 平鈹載重試驗

平鈹載重試驗進行之過程如圖 19~23 所示。



圖 19 清除表土



圖 20 放置平鈹與千斤頂



圖 21 反力架吊放鋼樑



圖 22 架設 LVDT 與 Load Cell、加載



圖 23 數據記錄

現地平鈹載重試驗所得之沈陷~載重曲線如圖 24 所示。由圖中可知曲線無明顯破壞點，表 5 為本試驗之結果彙整，試驗沉陷量等於 $0.5''$ 所對應之承载力為 0.58 t/m^2 。惟因廢棄物之壓縮性高，沈陷量大，故其極限承载力之訂定與土壤試驗不同， 0.58 t/m^2 應僅為參考；更實際之數據尚待進一步分析。

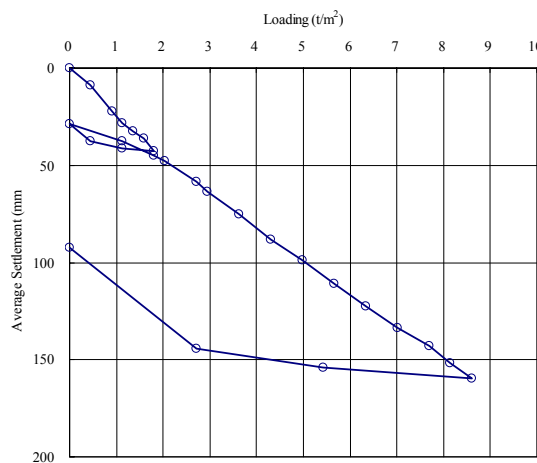


圖 24 平鈹載重試驗沈陷~載重曲線

表 5 現地平鈹載重試驗結果彙整表

項目 位置	極限承载力 $q_u \text{ (t/m}^2\text{)}$	容許承载力 $q_a \text{ (t/m}^2\text{)}$	地盤反力係數 $K_v \text{ (t/m}^3\text{)}$
P-1	0.58	0.29	50.39

3.2 灰渣試驗

本計畫之灰渣取自新竹市焚化廠，取樣時間為 95 年 4 月，取樣數量約 50 kg 。灰渣之現地含水量 (2006.4.10 量測) 約為 32.2% ，工程含水量約為

26.7%。灰渣之比重 G_s 為 2.30，較土壤小。灰渣之粒徑分佈曲線如圖 25 所示。因廢棄物資源回收與分類未盡完善，因此灰渣中仍含有鐵鋁罐、玻璃等較大尺寸之顆粒。

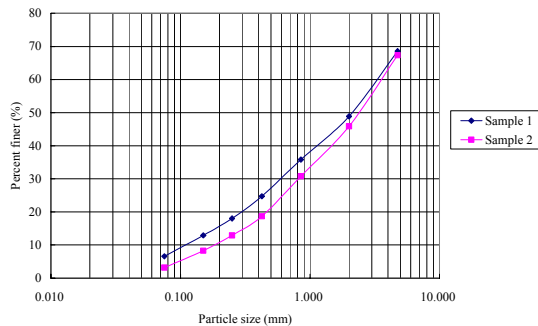


圖 25 灰渣粒徑分佈曲線圖

兩組灰渣試體之粒徑參數分別為：均勻係數 $C_u = 29.75$ ，曲率係數 $C_z = 0.87$ ；均勻係數 $C_u = 20.94$ ，曲率係數 $C_z = 0.94$ 。液性限度試驗中，因渣樣加水拌和後，仍屬滑動而非流動，且打擊數仍少於 25 次，故判其液性限度無法測定，LL 為 NP。而塑性限度亦無法測定，揉搓加水後仍會分散，故判定灰渣似極度砂質土，故 PL 為 NP。利用『統一土壤分類』(即 CNS 中所規範者)如以原始粒徑分佈，則灰渣分類約為 GP。如以粒徑修正之試樣，則設 $R_d/R_{200} < 50\%$ ，可判定底渣約為 SP，屬不良級配。AASHTO 分類可歸類為 A-3。

3.3 邊坡穩定分析

邊坡穩定分析部分，已完成建立分析模組。

3.3.1 斷面與材料性質

邊坡形狀建立如圖 26。材料性質如下：

1. 廢棄物：

$H=10\text{m}$, $L=30\text{m}$, $\alpha = V2:H1$, $\beta = V1:H1$

單位重 15 kN/m^3 $c=0\text{ kPa}$ $\phi=28$

2. 土壤：

單位重 20 kN/m^3 $c=15\text{ kPa}$ $\phi=35$

分析方法採用 Morgenstern-Price 切片法，滑動面形狀與破壞面之假設採用 Fully specified surfaces。

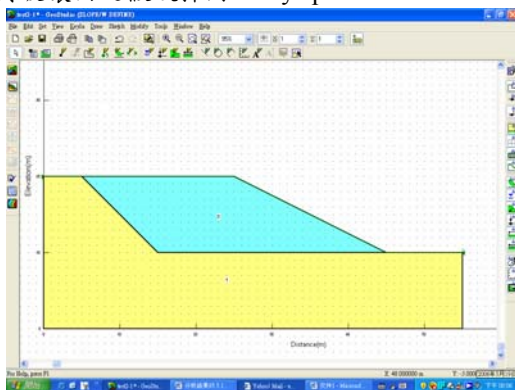


圖 26 GEOSPLOE/w 分析基本斷面

3.3.2 初步分析結果

基本斷面之分析結果如下：

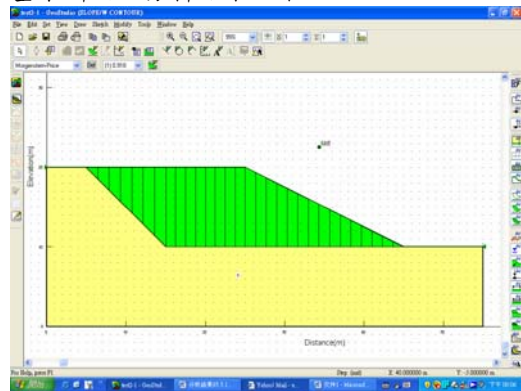


圖 27 分析結果示意圖

1. 廢棄物與地工止水膜界面以弱層模擬 厚度 0.01 m 單位重 1 kN/m^3 $c=0\text{ kPa}$ $\phi=\delta=8$, $FS=0.918$ 。
2. 廢棄物與地工止水膜界面 $c=0$ $\delta=10$, $FS=1.151$ 。
3. 廢棄物與地工止水膜界面 $c=0$ $\delta=15$, $FS=1.750$ 。
4. 廢棄物與地工止水膜界面 $c=0$ $\delta=20$, $FS=2.372$ 。
5. 廢棄物與地工止水膜界面 $c=0$ $\delta=25$, $FS=3.307$ 。

3.4 工作進度檢討

本計畫預定於年度內完成之工作項目之進度如下：

1. 現地試驗：現地直剪與平鈺載重試驗完成 100%。
2. 灰渣試驗：基本物性分析已完成，直剪試驗進行中，整體進度約 75%。
3. 邊坡穩定分析：分析模式已建立，並完成部分分析，整體進度約 75%。

計畫研究工作預定於七月底可按照既定進度全部完成。

四、初步結論

根據目前之研究成果，可歸納出以下之結論：

1. 廢棄物之性質不易掌握，現地試驗所得之結果較實驗室試驗結果具有更高之代表性。
2. 直剪試驗顯示廢棄物之剪力強度與土壤相當，惟因其壓縮性較高，較近似鬆軟土壤，剪力強度必須在較大剪應變下才能發揮。
3. 平鈺載重結果顯示在試驗進行之沈陷範圍內沈陷與荷重曲線並無明顯之彎曲點，故不易求出極限承载力與反算剪力強度參數。
4. 因垃圾分類尚未嚴格執行，因此本計畫所取樣之焚化灰渣內仍含有較大粒徑之材料，對於剪力強度試驗與其他工程試驗而言難度較高。灰渣之比重較土壤低，但仍在預期範圍之內。灰渣之物性分析顯示，可歸類為 GP 或 SP。
5. 邊坡穩定分析之基本模式建立完成，顯示 GEOSLOPE/w 可分析具有地工止水膜界面之邊坡。以過去國外研究所得之黏土與地工止水膜界面分析，掩埋場之邊坡確有滑動可能；完整之分析尚待進行。

五、參考文獻

行政院環保署，1995，事業廢棄物儲存清理處理方法及設施標準。

- 行政院環保署, 2003, 「九十二年度一般廢棄物衛生掩埋場封閉復育綠化及再利用維護管理工程成效評估」, EPA-92-Z102-02-103
- 陳榮河, 1997, 「垃圾掩埋場復育工程: 垃圾掩埋場之公害防治-大地工程」, 行政院環境保護署「建立垃圾掩埋場復育工程及技術規範」86.5.1.第二次技術研討會, 本署廢管處主辦
- 陳榮河, 衛生掩埋場之穩定分析, 地工技術雜誌第 31 期 (1990)。
- 陳榮河, 邊坡穩定之分析方法, 地工技術雜誌第 17 期 (1987)。
- 游中揚, 1998, 衛生掩埋場復育技術與實例探討, 「第一屆廢棄物清理實務研討會論文集」, 行政院環境保護署與台北市政府環境保護局)
- 游以德、陳榮河、林鎮洋、劉志堅、陳玉峰、楊明德, 建立垃圾掩埋場復育工程及技術規範(環保署計畫研究報告)(1997)。
- 環保署, 2002, 一般廢棄物回收清除處理辦法, 中華民國九十一年十一月二十七日發文字號: 環署廢字第○九一〇〇八一六二八號
- 環保署, 2002, 事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準, 91.09.25 環署廢字第 0910064717 號令修正發布
- Anderson, D.G., B. Hushmand, and G.R. Martin. "Seismic Response of Landfill Slopes." Stability and Performance of Slopes and Embankments, II: Proceedings of a Specialty Conference; Berkeley, California, June 29-July 1, 1992 (Geotechnical Special Publication 31). Raymond B. Seed and Ross Boulanger, eds. New York: American Society of Civil Engineers, 1992, volume 2, p. 973-989. SEL TA760.S73 1992 v.2.
- Augello, A.J., Bray J.D., Abrahamson, N.A. and Seed, R.B. (1998). "Dynamic Properties of Solid-Waste Based on Back-Analysis of the OII Landfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 124, No. 3, pp. 211- 222.
- Augello, A.J., Matasovic, N. Bray, J.D., Kavazanjian, E., Jr., and Seed, R.B. (1995), "Evaluation of Solid Waste Landfill Performance During the Northridge Earthquake," In: *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 54, pp. 17-50
- Bagchi, Amalendu. Design, Construction, and Monitoring of Landfills. New York: John Wiley & Sons, 1994. SEL TD795.7 B34 1994.
- Bray, J.D. and Rathje, M. (1998). "Earthquake-Induced Displacements of Solid-Waste Landfills," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(3), pp. 242-253.
- Byrne, R.J., 1994, "Design Issues with Strain-Softening Interfaces in Landfill Liners", Proceedings of Waste Tech '94, Charleston, South Carolina, USA, January 1994, Session 4, Paper 4.
- Byrne, R.J., J. Kendall, and S. Brown. "Cause and Mechanism of Failure: Kettleman Hills Landfill B19, Unit 1A." Stability and Performance of Slopes and Embankments, II: Proceedings of a Specialty Conference; Berkeley, California, June 29-July 1, 1992 (Geotechnical Special Publication 31). Raymond B. Seed and Ross Boulanger, eds. New York: American Society of Civil Engineers, 1992, volume 2, p. 1188- 1215. SEL TA760.S73 1992 v.2.
- Duncan, J.M. (2000) "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, Apr., pp. 307-316.
- Fassett, J., Leonards, G.A. and Repetto, P. (1994), "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and their Use in Landfills". WASTETECH '94
- Gabr, M., (2002), "Shear strength parameters of Municipal Solid Waste with Leachate Recirculation," 2nd Intercontinental Landfill Research Symposium, Asheville NC, USA, 13-16 October 2002
- Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management: Proceedings of the 9th Annual Symposium on Geo-Aspects of Waste Management; Colorado State University, Fort Collins, February 1- 6, 1987. Dirk J.A. Van Zyl, et al., eds. [Fort Collins, CO]: Colorado State University, Department of Civil Engineering, 1987. SEL TD896.S92 1987.
- Gilbert, R.B. and Byrne, R.J., 1996, "Strain-Softening Behavior of Waste Containment Interfaces", *Geosynthetics International*, Vol. 3, No. 2, pp. 181-203.
- Grisolia, M. and Napoleoni, Q., 1996, "Geotechnical Characterisation of Municipal Solid Waste: Choice of Design Parameters," Proceedings of the 2nd Int. Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Vol. 2, pp. 641-646.
- Ho, S.K. and R.K. Rowe. Finite Element Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls. London, Ontario: Geotechnical Research Centre, University of Western Ontario, 1992. SEL TD785.B46 no.GEOT-7-92.
- Howland, Jonathan D. "Stability Analysis of a Municipal Solid Waste Landfill." Stability and Performance of Slopes and Embankments, II: Proceedings of a Specialty Conference; Berkeley, California, June 29-July 1, 1992 (Geotechnical Special Publication 31). Raymond B. Seed and Ross Boulanger, eds. New York: American Society of Civil Engineers, 1992, volume 2, p. 1216-1231. SEL TA760.S73 1992 v.2.
- Idriss, I.M., Fiegel, G., Hudson, M.B., Mundy, P.K. and Herzig, R. (1995), "Seismic Response of the Operating Industries Landfill," In: *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 54, pp. 83-118
- Jessberger, H. L. and Kockel, R., 1993, "Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste," Proceedings, 4th International Landfill Symposium, Sardinia '93, pp. 312-322.
- Jones, R., Taylor, D., and Dixon, N., 1997, "Shear Strength of Waste and Its Use in Landfill Stability Analysis," Proceedings, Conference on Geoenvironmental Engineering, University of Wales, Cardiff, pp. 343-350.
- Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N. Bonaparte, R. and Schmertmann, G.R. (1995), "Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis," In: *Geoenvironment 2000*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 46, Vol. 2, pp. 1126
- Kavazanjian, E., Matasovic, N., Bonaparte, R., and Schmertmann, G.R., 1995, "Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis," *Geoenvironment 2000*, Geotechnical Special Publication, Yalcin B. Acar and David E. Daniel, Eds., Vol. 2, No. 46, ASCE, New Orleans, LA, 1995, pp. 1126- 1142.
- Knochenmus, G., Wojnarowicz, M., and Van Impe, W. F., "Stability of Municipal Solid Wastes," Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, S'eco e Pinto, Ed., Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, 1998, pp. 977-1000.
- Koehler, Cortus T. Solid Waste Management: A Bibliography. Monticello, IL: Vance Bibliographies, 1988. LML Z7164.A2 P7 number P-2343.
- Koerner, R. M., 1994, Designing with Geosynthetics, 3rd ed. Koerner, Robert M. and David E. Daniel. "Better Cover-ups." *Civil Engineering*, v.62, n.5, May 1992, p. 55-57. SEL Per TA1.C452.

- Landva, A. O. and Clark, J. I., 1986, "Geotechnical Testing of Waste Fill," Proceedings, 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, pp. 371-385.
- Landva, A. O., and Clark, J. I., 1990, "Geotechnics of Waste Fill," *Geotechnics of Wastefills—Theory and Practice*, ASTM STP 1070, pp. 86-103.
- Landva, A. O., Valsangkar, A. J., and Pelkey, S. A., 2000, "Lateral Earth Pressure at Rest and Compressibility of Municipal Solid Waste," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 6, pp. 1157-1165.
- Landva, A.O. and J.I. Clark. "Geotechnics of a Waste Fill." *Geotechnics of Solid Waste Fills: Theory and Practice*. Arvid Landva and G. David Knowles, eds. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, pages 86-103. SEL TD795.7 G46 1990.
- Ling, H.I.; Leshchinsky, D. Seismic stability and permanent displacement of landfill cover systems, 1997 Feb 01 *Journal of Geotechnical Engineering* ; VOL. 123 ; ISSUE: 2 pp. 113-122
- Liu, C.-N., Gilbert, R. B., and Wright, S. G., 1998, "Earth Slide on Geomembrane: Closure," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 650
- Long, J. H., Gilbert, R. B., and Dally, J. J., "Effect of Waste Settlement on Sloped Lining Systems," *Geosynthetics* 95, NAGS, pp. 729 - 744
- Luellen, J. R., Dove, J. E., and Swan, R. H., 1999, "Seismic Engineering for Interfaces in a Landfill-Containment System," *GFR*, Volume 11, Number 1, January/February 1999, pp. 24-29
- Ma, Max Y., Albert T. Yeung and An-Bin Huang. "Seismic Stability Analysis of Landfill." *Engineering Mechanics: Proceedings of the Ninth Conference*; College Station, TX, May 24-27, 1992. Loren D. Lutes, et al., eds. New York: American Society of Civil Engineers, 1992, pages 721-724. SEL TA349.E44 1992.
- Martin, J. P., Koerner, R. M., and Whitty, J. E., (1984), "Experimental Friction Evaluation of Slippage between Geomembranes, Geotextiles, and Soils," *Proc. Intl. Conf. Geomembranes*, St. Paul, MN: IFAI, pp. 191 - 196
- Matasovic, N. and Kavazanjian, E., Jr. (1998), "Cyclic Characterization of OII Landfill Solid Waste," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 3, pp. 197-210.
- Matasovic, N., Kavazanjian, E., Jr., Augello, A.J., Bray, J.D., and Seed, R. B., (1995), "Solid Waste Landfill Damage Caused by 17 January 1994 Northridge Earthquake", In: *The Northridge California 17 January 1994*, California Department of Conservation, Division of Mines and Geology Special Publication 116, pp. 61-69.
- Mitchell, J.K. (1996), "Geotechnics of Soil-Waste Material Interactions," 2nd International Congress Environmental Geotechnics, Osaka, Japan. A.A. Balkema, Vol. 3, pp. 1311-1328.
- Mitchell, J.K., R.B. Seed, and H.B. Seed. "Stability Considerations in the Design and Construction of Lined Waste Repositories." *Geotechnics of Solid Waste Fills: Theory and Practice*. Arvid Landva and G. David Knowles, eds. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, pages 207-239. SEL TD795.7 G46 1990.
- Mitchell, R.A. and J.K. Mitchell. "Stability Evaluation of Waste Landfills." *Stability and Performance of Slopes and Embankments, II: Proceedings of a Specialty Conference*; Berkeley, California, June 29-July 1, 1992 (Geotechnical Special Publication 31). Raymond B. Seed and Ross Boulanger, eds. New York: American Society of Civil Engineers, 1992, volume 2, p. 1151-1187. SEL TA760.S73 1992 v.2.
- Mitchell, R.A., S.E. Hatch., and R. Siegel. "Closure Design for a Landfill Founded on Soft Mud and Peat." *Stability and Performance of Slopes and Embankments, II: Proceedings of a Specialty Conference*; Berkeley, California, June 29-July 1, 1992 (Geotechnical Special Publication 31). Raymond B. Seed and Ross Boulanger, eds. New York: American Society of Civil Engineers, 1992, volume 1, p. 685- 704. SEL TA760.S73 1992 v.1.
- Morris, D.V. and C.E. Woods. "Settlement and Engineering Considerations in Landfill and Final Cover Design." *Geotechnics of Solid Waste Fills: Theory and Practice*. Arvid Landva and G. David Knowles, eds. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, pages 9-21. SEL TD795.7 G46 1990.
- Orman, M. E., 1994, "Interface Shear-Strength Properties of Roughened HDPE," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 4, pp. 758-761
- Oweis, Issa S. and Raj Khera. *Geotechnology of Waste Management*. Boston: Butterworths, 1990. SEL TD795.7.O93 1993.
- Robert M. Koerner, Honorary Member, ASCE and Te-Yang Soong, (2000), "Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures," (Proceedings of sessions of Geo-Denver 2000 held in Denver, Colorado, August 5-8, 2000 and sponsored by the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers) by Jorge C. Zornberg, (editor) and Barry R. Christopher, (editor), pp. 1-38
- Sharma, Hari D. and Sangeeta P. Lewis. *Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation*. New York: J. Wiley, 1994. SEL TD793.S43 1994.
- Siegel, Ronald A., Richard J. Robertson, and Donald G. Anderson. "Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California." *Geotechnics of Solid Waste Fills: Theory and Practice*. Arvid Landva and G. David Knowles, eds. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, pages 259-284. SEL TD795.7 G46 1990.
- Singh, S. and B. Murphy. "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills." *Geotechnics of Solid Waste Fills: Theory and Practice*. Arvid Landva and G. David Knowles, eds. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, pages 240-258. SEL TD795.7 G46 1990.
- Singh, S. and Murphy, B., 1990, "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills," *Geotechnics of Wastefills—Theory and Practice*, ASTM STP 1070, pp. 240-258.
- Stamatopoulos, A. C., 1998, "Earth Slide on Geomembrane: Closure," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 651-652
- Stamatopoulos, A. C., and Kotzias ??, 1996, "Earth Slide on Geomembrane," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 5, pp. 408-411
- Stark, T., O'Leary, P., and Walsh, P. (2002), "Static and Seismic Stability of Landfill Slopes", In: *Landfill Continue Education Course*, www.wasteage.com.
- Taylor, L. R., Pan, T. M., Dellinger, A.S., and Yen, B. C., (1995), "Seismic Stability Analysis for Geosynthetic Clay Liner Landfill Cover Placement on Steep Slopes," In: *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 54, pp. 196-211.
- Thiel, R. and Maubeuge, K. von. (2002) "Current Industry Performance and Construction Issues Related to GCLs" *Proceedings of the 16th GRI Conference on Hot Topics in Geosynthetics II. Geosynthetic Institute, Folsom, PA, December 16-17, pp. 227-241.*
- USEPA, 1994, *Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfills*, EPA/625/R-94/008, Office of Research and Development

- Van Impe, W. F. and Bouazza, A., 1998, "Large Shear Tests on Compacted Bales of Municipal Solid Wastes," *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 3, pp. 199–200.
- Van Impe, W. F., "Environmental Geotechnics: ITC5 activities – State of the art," *Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto, Ed., Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, 1998, pp. 1163–1187.
- Van Impe, W. F., 1998, "Environmental Geotechnics: ITC 5 Activities, State of Art," *Proceedings, 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, Vol. 4, pp. 1163–1187.
- Watts, K. S. and Charles, J. A., 1999, "Settlement Characteristics of Landfill Wastes," *Proceedings, Institution of Civil Engineers, U.K., Geotechnical Engineering*, Vol. 137, pp. 225–233.