

坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析

研究生：王昱雲

指導教授：單信瑜 博士

國立交通大學土木工程研究所碩士班

中文摘要

台灣地區由於人文社經條件的考量，掩埋場往往只能興建於城鄉邊緣的山坡地，目前台灣山坡地掩埋場營運中尚約有 53 場。由於掩埋場相關法令以及設計規範尚不完善，因此目前台灣的掩埋場設計之時大多未曾做過詳盡之邊坡穩定分析。此外，操作單位也並未根據工程計畫進行廢棄物的填埋，導致最終掩埋面往往超過預期的高度。上述情形導致坡地型掩埋場的破壞潛能提高，其穩定性值得深入探討。此外，掩埋場底部因地工膜布與相接觸之材料間的界面剪力強度頗低，形成最易發生滑動的弱面，因此本研究以掩埋場底部弱面破壞為對象，利用二維極限平衡之邊坡穩定分析法，探討山坡地掩埋場幾何設計參數安全係數之關係。

研究方法採用邊坡穩定分析程式 SLOPE/W，首先以程式內建的五種破壞面搜尋形式探討各切片分析法之適用性，以決定後續參數變異性分析，進行的搜尋方式及分析法，再針對下列掩埋場穩定設計因子：掩埋面坡高(H)、掩埋場底部長度(L)、掩埋場底部邊坡角度(α)、掩埋面邊坡角度(β)、廢棄物剪力強度(c 、 ϕ) 及地工合成材料界面剪力強度(c_a 、 δ_a)，進行一階與二階等一系列組合的分析。同時，考慮地震力作用下，一階及二階廢棄物掩埋場之界面摩擦角參數變異性分析。

邊坡穩定分析結果顯示，界面摩擦角愈大、坡地型掩埋場之高度愈高、掩埋體長度愈短、背靠之開挖山壁坡角愈平緩、掩埋完成面之坡角愈平緩，則界面滑動之安全係數愈小。平台寬度對於二階掩埋場之邊坡滑動安全係數，影響不大，但仍可看出平台愈寬安全係數愈高之趨勢。掩埋體長度小於 60m 時，破壞模式由滑動界面控制，掩埋體長度大於 70m 時，破壞模式由淺層圓弧破壞控制。

分析結果顯示，坡地型廢棄物掩埋場之標準斷面($\delta=15^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=45^\circ$ 、 $H=10\text{ m}$ 、 $L=30\text{ m}$ 、 $B_l=3\text{ m}$)，考慮界面滑動破壞，則可提出下列建議，以供設計及分析之參考：(1)界面摩擦角(δ)至少大於 19° ，(2)掩埋高度需小於15 m或每階高度不得大於8 m，(3)掩埋長度(L)建議大於40 m，(4)背靠的邊坡之平台寬

度(B_f)建議不得小於3 m，(5)則背靠的坡角(α)可建議 $30^\circ \sim 45^\circ$ 或 $60^\circ \sim 75^\circ$ ，(6)掩埋面坡角(β)建議介於 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

考慮地震力作用下，與未考慮地震力作用的分析結果比較。在界面滑動破壞模式時，安全係數平均下降約 36%~59%，抵抗界面滑動之界面摩擦角提高 $8^\circ \sim 12^\circ$ 。在淺層圓弧破壞模式時，安全係數平均下降約 25%~39%。由分析結果建議，一階坡地型廢棄物掩埋場，界面摩擦角必需大於 21° ；二階坡地廢棄物掩埋場，界面摩擦角必需大於 25° 。

關鍵字：掩埋場，邊坡穩定，平台寬度，參數分析。



Stability Analysis of Municipal Solid Waste Landfills on Slope

Student : Yu-Yun Wang

Advisor : Hsin-yu Shan Ph.D

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Due to high population density in narrow coastal plains and the resistance of the public arisen from the not-in-my-backyard (NIMBY) attitude, a large portion of landfills in Taiwan are located in mountainous area. Current regulations on landfills do not require slope stability analysis while designing these landfills. As a result, the potential risk of slope failure of these landfills is very high. Furthermore, although the interfacial shear strength between the waste and geosynthetics is very important to landfill slope stability, it has seldom been considered in the design. The objective of this study is to perform stability analyses on block failures through weak interface in the bottom lining system for typical landfills on slopes. Two-dimensional slope stability analyses were conducted with SLOPE/W 2004. Geometric parameters such as height, slope angle of the back, the slope angle of the waste body, the length of the base, the width of the berm, and also the interfacial friction angle were varied to investigate their effect on the factor of safety against slope failure. In addition, slope analyses are also performed for earthquake conditions.

The results of 2-D stability analyses show that the factor of safety increases with lower height of wastes, longer length of waste body, higher slope angle of the back of the excavation, steeper face slope of waste body and higher interfacial friction angle. On the other hand, the factor of safety is only hardly affected by the berm width. While the length of waste body is smaller than 60m, failure is dominated by the interface sliding. While the length of waste body is greater than 70m, failure is governed by the rotational sliding within the waste body.

According to analysis, the standard section of MSW Landfills on Slope ($\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10$ m、 $L = 30$ m、 $B_l = 3$ m). When it concerned to interface slide, we can provide the following suggestions in order to offer references of design and analysis: (1) the interfacial friction angle (δ) more than 19° at least, (2) the height of the wastes must less than 15 m or the height of every layer not more than 8 m, (3) the length of the base (L) should more than 40 m, (4) the width of the berm (B_l) should not

less than 3 m, (5) slope angle of the back (α) should $30^\circ \sim 45^\circ$ or $60^\circ \sim 75^\circ$ (6) the waste should be filled to a slope angle between $30^\circ \sim 60^\circ$

When the effect of earthquakes is taken into account, the decrease of safety factor ranges from 36% to 59%, which corresponds to an increase of the required minimum interface angle against translation slope failure from 8 degrees to 12 degrees.

According to the results of this study, it can be concluded that the interfacial friction angle between the materials of the lining system should be carefully determined and stability analysis must be performed when designing the landfills on slopes.

Furthermore, it is suggested that the minimum friction angle of the interfaces must be larger than 20 degrees to prevent translational slope failures.

Key Words: Landfill, Slope stability, Berm width, Parametric study.



誌謝

承蒙恩師 單信瑜博士兩年來悉心指導，於研究理念和學業上皆給予莫大的啟發，以及為人處事的道理上給予諄諄教誨，使學生獲益良多，僅此致上最誠摯的謝意。

論文口試期間，感謝中興大學 廖文彬博士、暨南大學 劉家男博士及朝陽科技大學 賴俊仁博士悉心指正，並對本文提出諸多寶貴的建議與指正，使本論文更臻完善。

感謝曾經指導與教導過我的老師們，以及維良學長在課業上的熱心指導；在論文研究期間，感謝陪我一同在研究生生活中奮鬥及相互勉勵的同學范范、佩萱、八欽、candy、鄒哥、阿諾、叮噹、阿山哥、小白、搖一拳、小驤、柏翰、雞嘴、价民、小 bird 及史考提，以及政輝學弟在許多事務上的協助，使論文研究能順利進行，在此一並致上最深的謝意。

最後，感謝我的父母親以及我所有的家人們，在我的求學生涯中給予我許多支持與鼓勵。要感謝的人實在太多，那些曾經在我生命過程中關心及幫助過我的朋友們，謝謝你們。

僅以本論文，獻給所有給予我指導及協助之師長、家人、同窗好友及關心我的朋友們，在此謹致上最深的感謝，願您們永遠平安、快樂。

王昱雲 謹誌

國立交通大學 土木工程系

中華民國九十六年八月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xii
第一章 緒論.....	1
1.1研究動機.....	1
1.2研究目的.....	1
1.3研究方法.....	2
1.4研究流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1廢棄物掩埋場基本概念與設計原則.....	5
2.1.1 掩埋場的基本概念.....	5
2.1.2 台灣廢棄物掩埋場概況.....	17
2.1.3 掩埋場的邊坡穩定.....	20
2.1.4 掩埋場的破壞案例.....	26
2.2固體廢棄物及地工合成材材料工程參數.....	29
2.2.1 基本參數不確定因素.....	29
2.2.2 固體廢棄物單位重.....	30
2.2.3 固體廢棄物剪力強度參數.....	32
2.2.4 地工合成材介面剪力強度參數.....	35
2.2.5 軟岩材料參數.....	37
2.3邊坡穩定極限力平衡分析法.....	39

2.3.1 坡地型掩埋場邊坡穩定分析模式	39
2.3.2 極限平衡法.....	40
2.3.3 切片分析法.....	42
2.3.4 切片間之作用力.....	48
2.4 邊坡穩定分析程式介紹	50
第三章 研究方法	57
3.1 研究流程.....	57
3.2 邊坡穩定分析架構.....	60
3.3 SLOPE/W分析程式	61
3.3.1 分析程式簡介.....	61
3.3.2 程式主要運算功能及實務應用.....	63
3.3.3 SLOPE/W 程式執行步驟.....	64
3.4 破壞面搜尋形式及切片分析法之適用性探討	71
3.5 一階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析	75
3.6 二階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析	78
第四章 分析結果與討論	81
4.1 以破壞面搜尋形式探討各切片法的適用性	81
4.2 一階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析	86
4.2.1 一階掩埋場參數變異性分析結果	86
4.2.2 一階掩埋場參數變異性分析結果討論	94
4.3 二階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析	95
4.3.1 二階掩埋場參數變異性分析結果	95
4.3.2 二階掩埋場參數變異性分析結果討論	104
4.4 考慮地震力作用下之邊坡穩定分析	106
4.4.1 一階坡地型廢棄物掩埋場分析結果	106

4.4.2 一階坡地型廢棄物掩埋場分析結果討論	110
4.4.3 二階坡地型廢棄物掩埋場分析結果	111
4.4.4 二階坡地型廢棄物掩埋場分析結果討論	116
第五章 結論與建議	117
5.1 結論	117
5.2 建議	120
參考文獻	121



圖目錄

圖 1-1 台灣廢棄物處理場(廠)分布圖(環保署，2006)	2
圖 1-2 研究流程	4
圖 2-1 一般廢棄物(Municipal Solid Waste, MSW)掩埋場底部襯砌系統示意圖(RCRA Subtitle D)	8
圖 2-2 有害事業廢棄物(Hazardous Waste)掩埋場底部阻水系統示意圖(RCRA Subtitle C)	9
圖 2-3 日本一般廢棄物掩埋場平面阻水層(日本總理府厚生省，2004)	12
圖 2-4 日本掩埋場襯砌系統構造(日本總理府厚生省，2004)	13
圖 2-5 我國「垃圾全分類零廢棄」實施架構(行政院環保署，2006)	20
圖 2-6 無設置襯墊層的掩埋場 2D 分析剖面(Koerner and Soong, 2000)	27
圖 2-7 有設置襯墊層的掩埋場 2D 分析剖面(Koerner and Soong, 2000)	28
圖 2-8 固體廢棄物單位重深度曲線(Kavazanjian et al., 1995)	31
圖 2-9 圓弧滑動面每一切片之作用力	42
圖 2-10 人工設定滑動面每一切片之作用力	43
圖 2-11 各種切片間之剪力函數 $f(x)$	48
圖 2-12 美國陸軍工兵團所建議的切片間作用力函數(林卓倫，2004)	49
圖 2-13 Lowe-Karafiath 所建議的切片間作用力函數(林卓倫，2004)	50
圖 3-1 分析流程圖	59
圖 3-2 程式執行步驟	66

圖 3-3	67
圖 3-4	67
圖 3-5	68
圖 3-6	68
圖 3-7	69
圖 3-8	69
圖 3-9	70
圖 3-10	70
圖 3-11	71
圖 3-12 二階掩埋場基本剖面	72
圖 3-13 Fully Specified 分析示意圖	73
圖 3-14 Block Specified 分析示意圖	74
圖 3-15 Grid and Radius 分析示意圖	74
圖 3-16 Entry and Exit 分析示意圖	75
圖 3-17 一階掩埋場基本剖面形狀因子定義	76
圖 3-18 二階掩埋場基本剖面	79
圖 3-19 分析結果示意圖	79
圖 4-1 界面滑動破壞示意圖	81
圖 4-2 切片底部剪應力與距離關係示意圖	82
圖 4-3 切片底部正向應力與距離關係示意圖	82
圖 4-4 一階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角 δ 之關係	86
圖 4-5 一階掩埋場滑動安全係數與掩埋高度 H 之關係	88
圖 4-6 一階掩埋場滑動安全係數與掩埋體長度 L 之關係	89
圖 4-7 一階掩埋場界面滑動及淺層破壞與安全係數之關係(考慮 L)	90
圖 4-8 一階掩埋場滑動安全係數與現地邊坡角度 α 之關係	91

圖 4- 9 一階掩埋場滑動安全係數與掩埋完成面角度 β 之關係.....	92
圖 4- 10 二階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角 δ 之關係.....	96
圖 4- 11 二階掩埋場滑動安全係數與掩埋高度 H 之關係.....	98
圖 4- 12 二階掩埋場滑動安全係數與掩埋體長度 L 之關係.....	99
圖 4- 13 二階掩埋場界面滑動及淺層破壞與安全係數之關係(考慮 L)	100
圖 4- 14 二階掩埋場滑動安全係數與背靠邊坡之平台寬度 B_1 之關係	101
圖 4- 15 二階掩埋場滑動安全係數與現地邊坡角度 α 之關係.....	102
圖 4- 16 二階掩埋場滑動安全係數與掩埋完成面角度 β 之關係.....	103
圖 4- 17 一階掩埋場滑動安全係數與界面摩擦角之關係($K_h = 0.23 g$)	106
圖 4- 18 一階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.23 g$).....	108
圖 4- 19 一階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.33 g$).....	108
圖 4- 20 一階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.33 g$).....	110
圖 4- 21 二階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.23 g$).....	111
圖 4- 22 二階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.23 g$).....	113
圖 4- 23 二階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.33 g$).....	114
圖 4- 24 二階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係 ($K_h = 0.33 g$).....	115

表目錄

表 2- 1 歷年垃圾產生量統計(公噸/年)(行政院環保署，2006).....	18
表 2- 2 美國環保署對於掩埋場穩定安全係數之規範(USEPA，1994)	24
表 2- 3MSW 掩埋場一般容許預估地震沉陷量(Kavazanjian，1999) .	25
表 2- 4 OII Landfill 地震性能準則(Kavazanjian et al.，1998).....	25
表 2- 5 掩埋場破壞案例(Koerner and Soong，2000).....	26
表 2- 6 固體廢棄物單位重之國外文獻 (Dixona, N.and Jones, D.R. V.， 2005).....	31
表 2- 7 固體掩埋物單位重之國內文獻.....	32
表 2- 8 廢棄物剪力強度(Sake,S.M. and Manasseh, C. G.).....	34
表 2- 9 土工膜布(Smooth HDPE)之界面強度參數值(劉家男，2004)	37
表 2- 10 國際岩石力學學會(ISRM，1981)單壓強度分級.....	38
表 2- 11 國內文獻之軟岩材料參數表(張吉佐等人，1998).....	38
表 2- 12 切片法比較(1/2)(Duncan et al. 2005，周功台等人 2003).....	46
表 2- 13 STABLPRO for Windows 程式之功能及特色(堅尼士，2007)	51
表 2- 14 UTEXAS4 程式之功能及特色(Pockoski and Duncan，2000)	51
表 2- 15 SLOPE/W 之功能及特色(堅尼士，2007).....	52
表 2- 16 TALREN 97 程式之功能及特色(堅尼士，2007).....	53
表 2- 17 CLARA 程式之功能及特色(堅尼士，2007).....	54
表 2- 18 各邊坡穩定分析程式特色整理(Pockoski and Duncan，2000)	55
表 2- 19 各邊坡穩定分析程式評分表(Pockoski and Duncan，2000) ..	56
表 3- 1 二階掩埋場邊坡穩定分析標準剖面尺寸.....	72
表 3- 2 邊坡穩定分析材料參數.....	72

表 3-3 一階掩埋場邊坡穩定分析標準剖面尺寸	75
表 3-4 一階掩埋場邊坡穩定分析材料參數	76
表 3-5 一階掩埋場各參數變異性範圍	78
表 3-6 二階掩埋場邊坡穩定分析標準剖面尺寸	78
表 3-7 二階掩埋場邊坡穩定分析材料參數	80
表 3-8 二階掩埋場各參數變異性範圍	80
表 4-1 破壞面搜尋形式求得之安全係數	83
表 4-2 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 δ)	87
表 4-3 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 H)	89
表 4-4 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 α)	92
表 4-5 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 β)	93
表 4-6 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 δ)	97
表 4-7 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 H)	98
表 4-8 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 α)	102
表 4-9 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 β)	104
表 4-10 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表 ($K_h = 0.23 g$)	107
表 4-11 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表 ($K_h = 0.33 g$)	109
表 4-12 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表 ($K_h = 0.23 g$)	112
表 4-13 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表	

($K_h = 0.33$ g)115



第一章 緒論

1.1 研究動機

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，在考慮經濟效益之下，仍將繼續以掩埋為其主要的處理方式。

台灣地區地狹人稠，加上近年來人民環保意識與對生活環境品質的要求提升，導致台灣地區的掩埋場往往只能利用人跡較少的山坡地或河岸來興建。但由於目前法令禁止於行水區內設置掩埋場，日後掩埋場幾乎只能興建於城鄉邊緣的山坡地或山谷。

截至民國 94 年底，台灣地區營運中的焚化廠及廢棄物掩埋場總計有 201 場，其中廢棄物掩埋場佔 175 場(環保署，2006)，其分布圖，如圖 1-1 所示。另外，目前台灣山坡地掩埋場已經復育有 96 場，尚在營運中有 53 場(環保署，2006)，其邊坡穩定性有待探討，且位於各地陸續封場之數百座老舊掩埋場，其長期穩定性亦是必須關切的問題。

1.2 研究目的

由於掩埋場相關法令、設計規範以及設計與施工之審查制度尚不完善，因此目前台灣的掩埋場設計之時大多未曾做過詳盡之邊坡穩定分析。此外，操作單位也並未根據工程計畫進行廢棄物的填埋，導致最終掩埋面往往超過預期的高度。上述情形導致坡地型掩埋場的破壞潛能提高，其穩定性值得深入探討。此外，掩埋場底部因地工膜布與相接觸之材料間的界面剪力強度頗低，形成最易發生滑動的弱面，因此本研究以掩埋場底部弱面破壞為對象，利用二維極限平衡邊坡穩定分析法，探討山坡地掩埋場幾何設計參數安全係數之的關係。

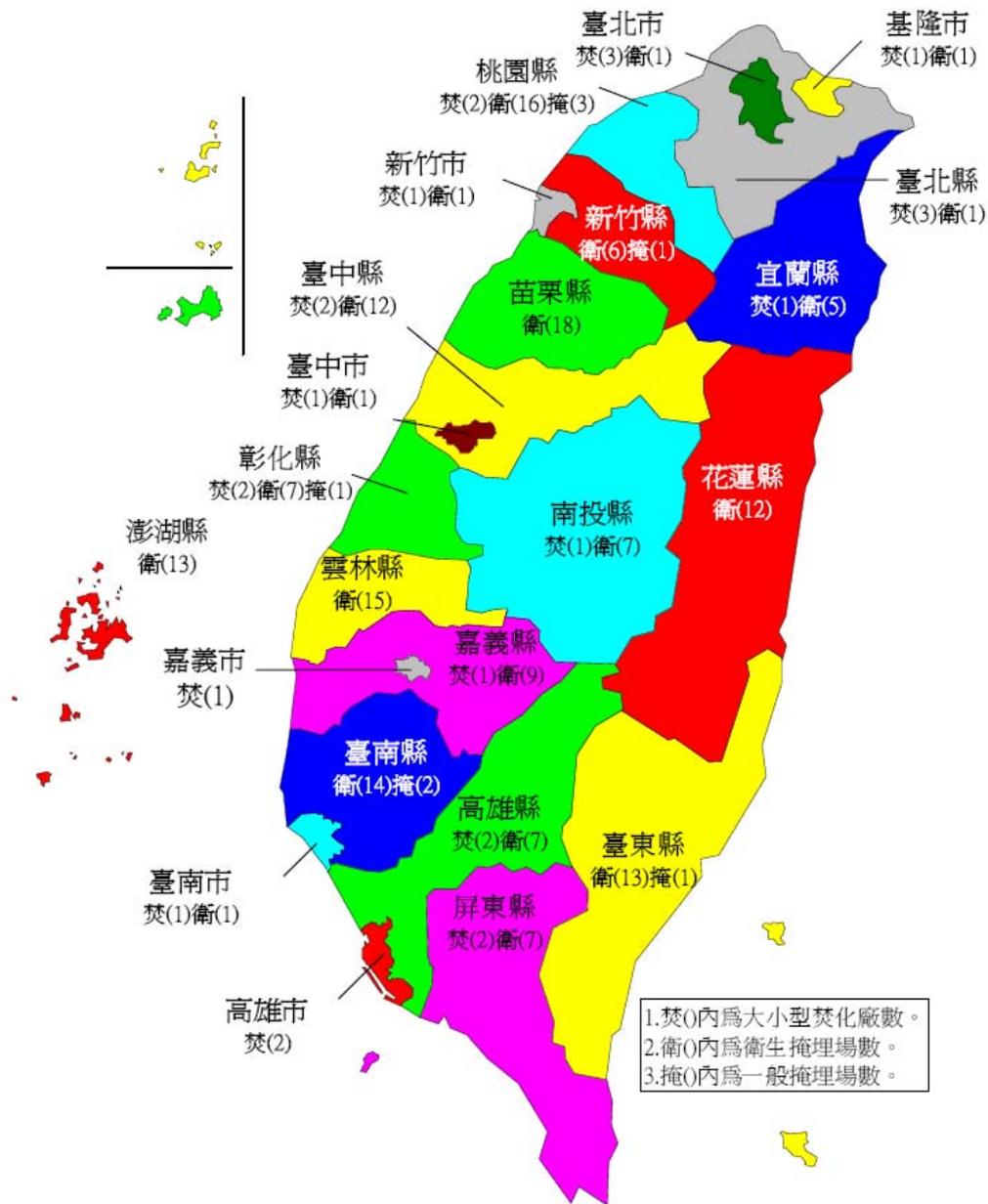


圖 1-1 台灣廢棄物處理場(廠)分布圖(環保署，2006)

1.3 研究方法

研究方法採用邊坡穩定分析程式 SLOPE/W，針對下列掩埋場穩定設計因子：掩埋面坡高(H)、掩埋場底部長度(L)、掩埋場底部邊坡角度(α)、掩埋面邊坡角度(β)、廢棄物剪力強度(c 、 ϕ)及土工合成材料界面剪力強度(c_a 、 δ_a)，進行一階與二階等一系列組合的參數變異性

分析。

分析步驟首先建立一階、二階廢棄物掩埋場標準斷面，再以二階為例，進行各種破壞面搜尋形式及各切片分析法之適用性，再分別探討沿界面滑動及淺層滑動破壞模式之各參數異性分析，將兩者分析結果進行比較。另外，考慮地震力作用下，一階及二階廢棄物掩埋場之界面剪力強度參數變異性分析。最後提出結論與建議。

1.4 研究流程

本研究主要研究流程步驟如圖 1-2。



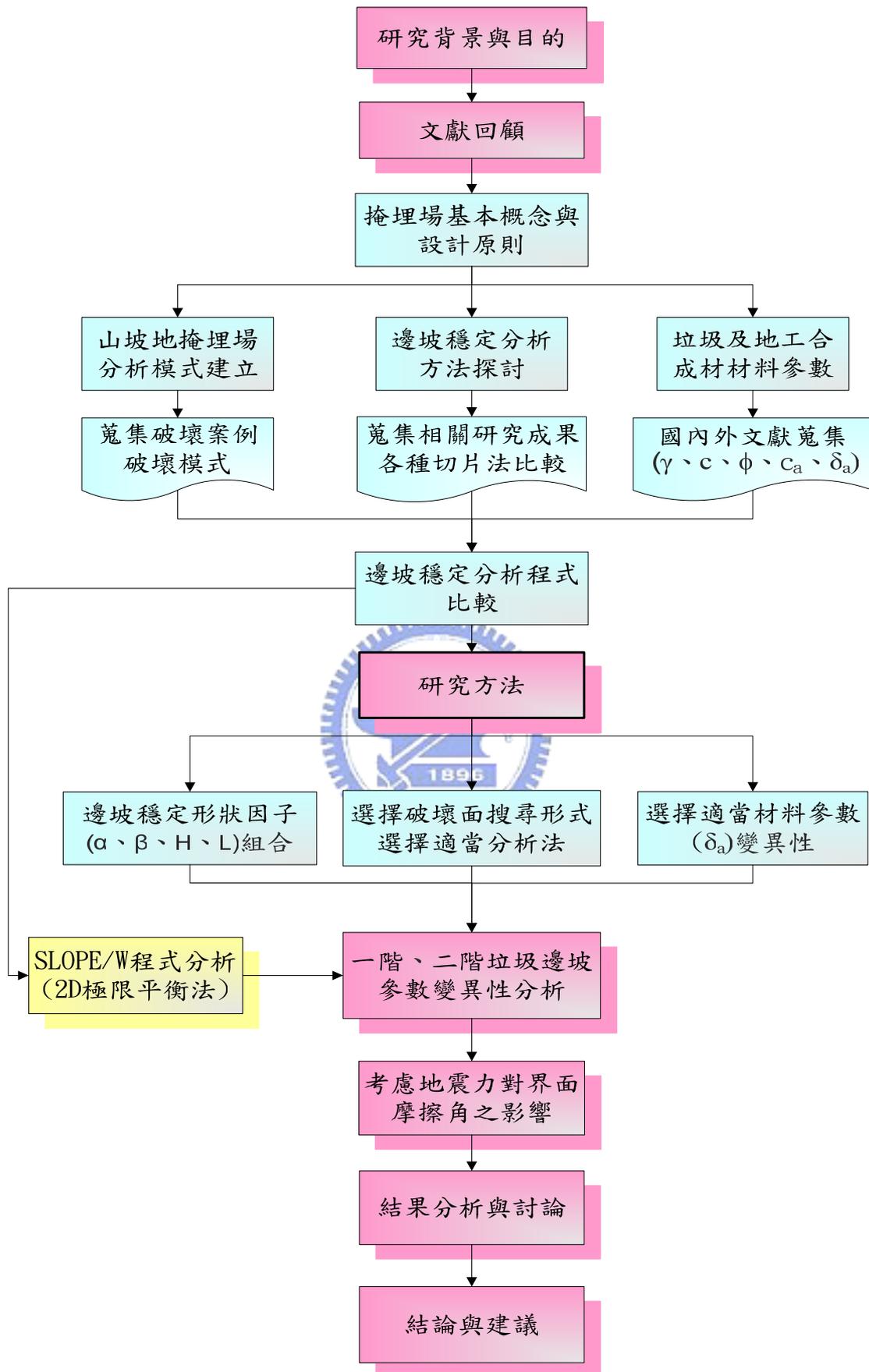


圖 1-2 研究流程

第二章 文獻回顧

本研究主要是探討台灣地區坡地型掩埋場邊坡穩定之設計因子，各參數變異性分析，所以文獻回顧主要內容包括下列四大部分：(1)掩埋場基本概念與設計原則，(2)廢棄物及各材料參數蒐集，(3)邊坡穩定極限力平衡分析法，(4)邊坡穩定分析軟體介紹。

掩埋場基本概念主要是介紹掩埋場國內外概況及設計規範，並蒐集掩埋場的破壞案例及掩埋場相關邊坡穩定分析之文獻及研究。另外，各材料參數的選擇對分析結果的影響很大，所以針對固體廢棄物單位重、剪力強度，還有土工合成材界面剪力強度及軟岩材料參數等進行廣泛的資料蒐集，包括國內外的相關文獻。同時探討傳統邊坡穩定分析方法(極限平衡法)運用於坡地型掩埋場邊坡穩定分析模式，並簡單的比較目前常用的商用邊坡穩定分析程式。

2.1 廢棄物掩埋場基本概念與設計原則

2.1.1 掩埋場的基本概念

現代衛生掩埋場是有控制地處理城市固體廢棄物的一種方法，其設置的目的在於存放廢棄物，阻絕對環境的污染，進而降低污染源，最後依賴自然的力量分解廢棄物。城市固體廢棄物一般包括生產垃圾、商業垃圾和生活垃圾。台灣廢棄物清理法(2004)所定義的廢棄物包括一般廢棄物及事業廢棄物(有害事業廢棄物、一般事業廢棄物)。目前，衛生掩埋方法在各開發國家應用非常廣泛，例如英國在 1978 年~1979 年佔廢棄物處置量的 89%，前西德 1979 年佔 62%，日本是以追求廢物能源化為目標的國家，但填埋處置量在 1979 年仍佔 52%，在美國，每年填埋處置的廢棄物占 80%美國聯邦環保局(USEPA)和很多州都已經詳細制定了關於掩埋場的選址、設計、施工、運行、

水氣監測、環境美化、封閉性監測以及 30 年內維護的有關法規。目前，工業開發國家在設計掩埋場時，多採用多重屏障的觀念，利用天然和人工屏障，盡量使所處置的廢棄物與生態環境相隔離。不但注意滲出水的末端處理，更強調首端控制，力求減少滲出水產生量，提高廢棄物的穩定性和掩埋場的長期安全性，盡量降低掩埋場操作和封閉後的費用(錢學德等人，2000)。

廢棄物之掩埋處理係多元垃圾處理體系中所必備之設施，衛生掩埋場除了可接受廢棄物以外，尚可容納焚化爐之灰渣、一般事業廢棄物及資源回收後之殘餘物。廢棄物處理過程包括貯存、收集、清運、中間處理及最終處置等。在處理過程中，原則上儘可能將其中有價物質回收再利用，難以再利用者其可燃物可藉焚化、熱解、堆肥等化學及生化處理技術回收熱能、燃料及有機肥等。至於不能再利用者或焚化殘渣，則依一定之準則安全衛生地處置之，稱為「最終處置」。目前國內比較常見之廢棄物最終處置設施為處理廢棄物之標準衛生掩埋場，焚化灰渣掩埋場則併入焚化廠工程一起考慮。

掩埋場設計可分為三個部份，包括襯底系統(Liner System)、滲出水收集系統(Leachate Collection System)及覆蓋系統(Cover System)。底部襯墊系統的功能為阻止滲出水外滲並收集處理，覆蓋層系統的主要功能為控制地表逕流、避免地表水入滲、阻止廢氣散逸與植生美化。

掩埋場設計之原則，最重要者為保護地下水不受污染。為達此目的，最直接的辦法是使用阻水材料，使廢棄物滲出水不會滲漏。除非考慮現地有厚層的低導水度土壤，否則鋪設地工止水膜等人造不透水材料是最簡便的方式。雖然以往各國因工程觀念不同，所以所規範的掩埋場阻水設施差異頗大，但目前先進國家在掩埋場的設計上，都有

一致的傾向採用地工止水膜與夯實黏土(Compacted Clay Liner, CCL)或地工皂土毯(Geosynthetic Clay Liner, GCL)做為複合阻水層。然而，根據地域自然條件的不同有些地區有優越的自然條件，並不一定仰賴人造的材料，例如法國較傾向於採用夯實黏土阻水層；美國的威斯康辛州的掩埋場也長期仰賴夯實黏土阻水層(單信瑜，1999)。

歐美國家在衛生掩埋設計方面較國內先進，且相關規定也較為仔細與嚴謹，國內在規範參考上大多是參照美國規範為主。另外，日本一般廢棄物掩埋場的整體設施與我國的相仿，且因其掩埋場多位於山坡地，故其掩埋場之整體配置可供作台灣的參考。所以下面將分別介紹我國與美、日掩埋場相關規範與襯砌系統概況。

一、美國掩埋場底部襯砌系統設施規範

美國掩埋場的相關法規係基於1976年美國國會通過的資源保護與回收法案(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)。該法案責成其環保署(USEPA)制定各種與廢棄物相關之法規。其中，Subtitle C係有害廢棄物(Hazardous Waste)之管制規定；Subtitle D則為一般廢棄物(Municipal Solid Waste, MSW)之規範。

1. Subtitle D一般廢棄物掩埋場(如圖2-1所示)

根據Subtitle D美國環保署當時並未制定規定一般廢棄物掩埋場之設置規範，而由各州自行管理，通常僅須單一天然或人工建造之土壤阻水層(Natural or Compacted Soil Liner)或單一之不透水布(Geomembrane)阻水層，美國環保署亦未要求滲出水之收集與處理。

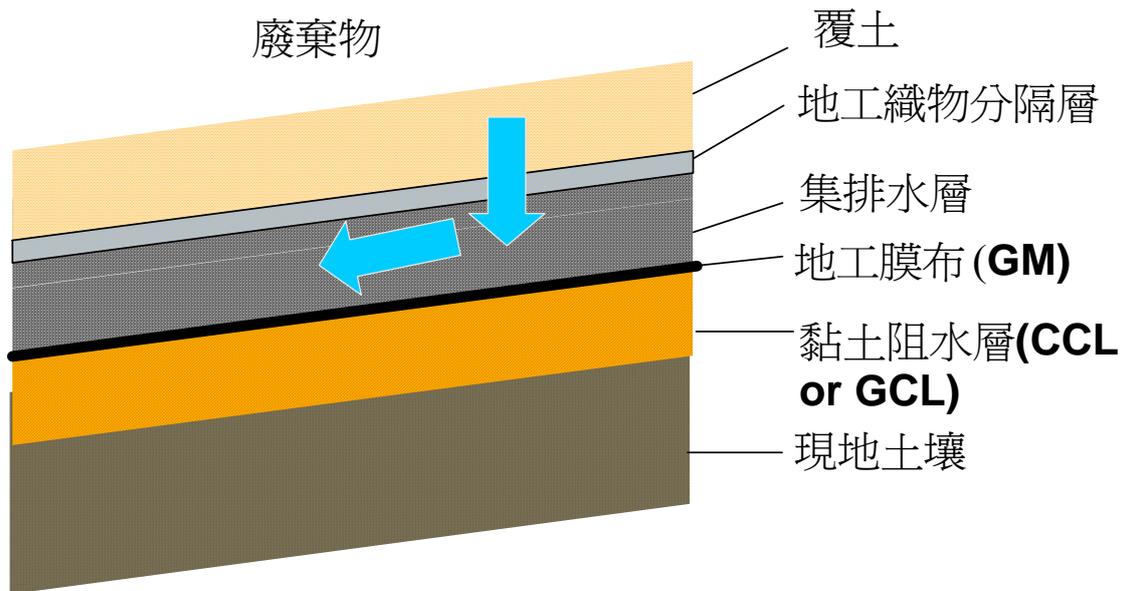


圖 2-1 一般廢棄物(Municipal Solid Waste, MSW)掩埋場底部襯砌系統
示意圖(RCRA Subtitle D)

2.Subtitle C有害廢棄物掩埋場(如圖2-2所示)

於1980年，根據 Subtitle C 美國環保署完整地定出有害廢棄物由產生到最終處置(From Cradle to Grave)所有相關事項之管理規則，也制定了有害廢棄物掩埋場之設置規範。規定有害廢棄物掩埋場至少需要兩套滲出水收集系統(Leachate Collection and Removal System, LCRS; Leachate Detection and Removal System, LDRS)與兩套阻水層(Primary and Secondary Liners)。其中下層之阻水層，即掩埋場中底部之次要阻水層(Secondary Liner)必須是一複合阻水層，至少有不透水布及導水度小於 1×10^{-7} cm/sec 之0.9 m(3 ft)厚之夯實土壤兩種構件共同組合而成。

美國環保署在掩埋場設計方面，除了法規之外，亦提供許多的設計手冊與指引，提供地方主管機關與工程師參照。

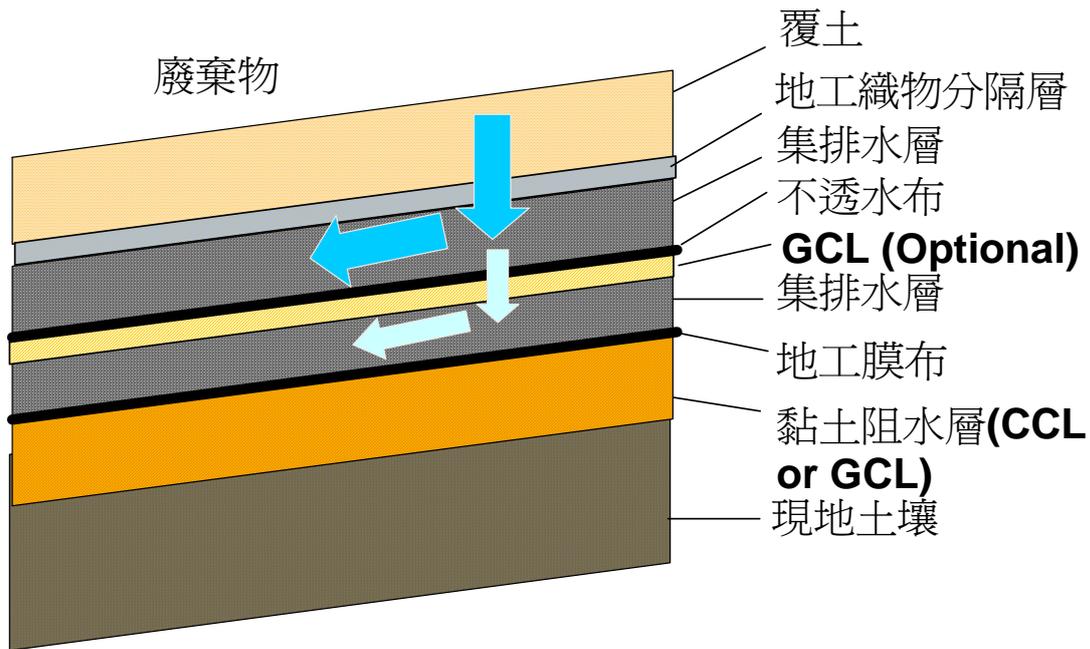


圖 2-2 有害事業廢棄物(Hazardous Waste)掩埋場底部阻水系統示意圖
(RCRA Subtitle C)

目前台灣的有害事業廢棄物掩埋場規範亦已修定訂為相仿之系統。此系統由底而上可分下列數層：

1. 次要阻水層(Secondary Liner)：由土工止水膜與夯實黏土共同組成之複合阻水層。基於有效空間和效能上的考慮，夯實黏土層可用地工皂土毯代替。地工皂土毯僅0.6-1.0 cm厚，導水度(Hydraulic Conductivity, k)極小，阻水效果常遠較夯實黏土佳，目前已被歐美各國廣泛使用(單信瑜，1995)。
2. 滲出水偵測排除系統(Leachate Detection and Removal System, LDRS)：土工複合物(Geocomposite)，由土工流網(Geonet)與土工不織布(Nonwoven Geotextile)組成。
3. 主要阻水層(Primary Liner)：土工止水膜。

4. 滲出水收集排除系統(Leachate Collection and Removal System, LCRS)：為30 cm厚之顆粒性土壤如礫石與粗砂構成，其導水度 k 須在1 cm/sec以上。此系統可用土工複合物代替。唯須符合法規要求之輸水率(Transmissivity)在 $30 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 以上，使阻水層上水頭不會超過30 cm。
5. 土工織物分隔層：分隔覆土並過濾滲出水，使集排水層不致被細粒料堵塞。
6. 覆土：保護其下之系統不被機具及工作人員意外破壞，其上即堆置廢棄物。

在覆蓋系統方面，自1993年起必須符合新的要求，亦即覆蓋系統的透水性(Permeability)必須小於或等於底部的阻水層之透水性或小於 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 中較小者。入滲層(Infiltration Layer，包括各覆蓋系統構件)厚度至少需18 in(45 cm)以上，同時必須有厚度至少6 in (15 cm)的土壤防止沖蝕層以提供植物生長來減緩沖蝕防止覆蓋系統崩解(40 CFR Part 258 Subpart F)。

就上述的要求而言，沒有設置阻水層的掩埋場，覆蓋系統的透水性可以僅要求小於 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ ；但對於具有複合阻水層的掩埋場來說，覆蓋系統也必須有土工止水膜透水性才能符合此一要求，這是唯一的可行方式。此外，EPA也提供一定的彈性，讓各州的主管機關可以核准可以達到相同功效的最終覆蓋系統設計(United States Environmental Protection Agency, 1993a)。其他各國一般設計要求之比較如表2-1所示。

二、日本掩埋場法規與設置規範

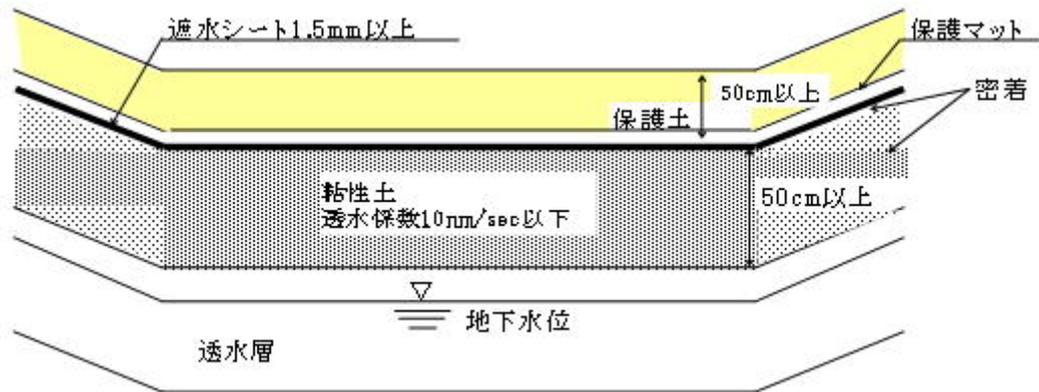
日本的一般廢棄物掩埋場稱為『一般廢棄物最終處分場』，且依照廢棄物種類不同，分為安定型掩埋場、管理型掩埋場及遮斷型掩埋場等三種。和我國一般廢棄物掩埋場相同類別者為管理型掩埋場(日本總理府厚生省，2004)。日本的掩埋場法令為『一般廢棄物の最終處分場及び産業廢棄物の最終處分場に係る技術上の基準を定める省令』，昭和52年(1977)頒佈，平成16年(2004)修正。

阻水層可分為垂直阻水層與平面阻水層。在貯存構造物(如鋼筋混凝土擋土牆)下方必須設置垂直阻水層。襯砌系統中的平面阻水層，可區分為三種類型：

1. 黏土+地工止水膜(圖2-3(a))：黏土厚度50 cm以上、導水度 1×10^{-9} m/sec以下，地工止水膜厚度1.5 mm以上；保護層+覆土50 cm以上
2. 水密混凝土+地工止水膜(圖2-3(b))：水密混凝土厚度5 cm以上、導水度 1×10^{-9} m/sec以下，地工止水膜厚度1.5 mm以上；保護層+覆土50 cm以上
3. 雙重地工止水膜+中間保護砂層(圖2-3(c))：地工止水膜厚度1.5 mm以上；保護層+覆土50 cm以上

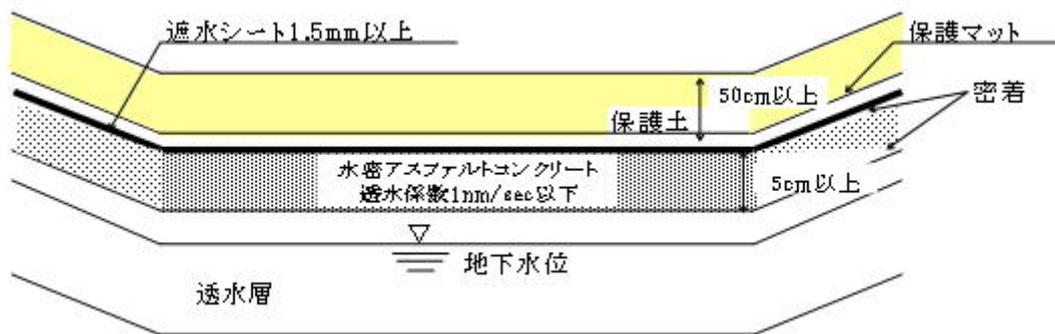
日本規範中，地工止水膜(遮水シート)可使用以LDPE、MDPE、HDPE、PP等各種聚合物材料。完整的襯砌系統構造顯示於圖2-4中。

【タイプ1】粘性土+遮水シート



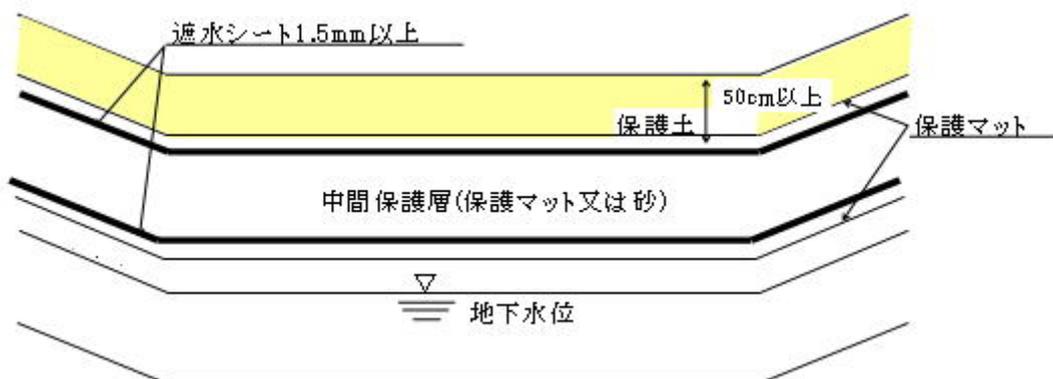
(a) 黏土+土工止水膜

【タイプ2】水密アスファルトコンクリート+遮水シート



(b) 水密混凝土+土工止水膜

【タイプ3】中間保護層の上下を遮水シートで挟んだ構造（二重遮水シート）



(c) 雙層土工止水膜

圖 2-3 日本一般廢棄物掩埋場平面阻水層(日本總理府厚生省, 2004)

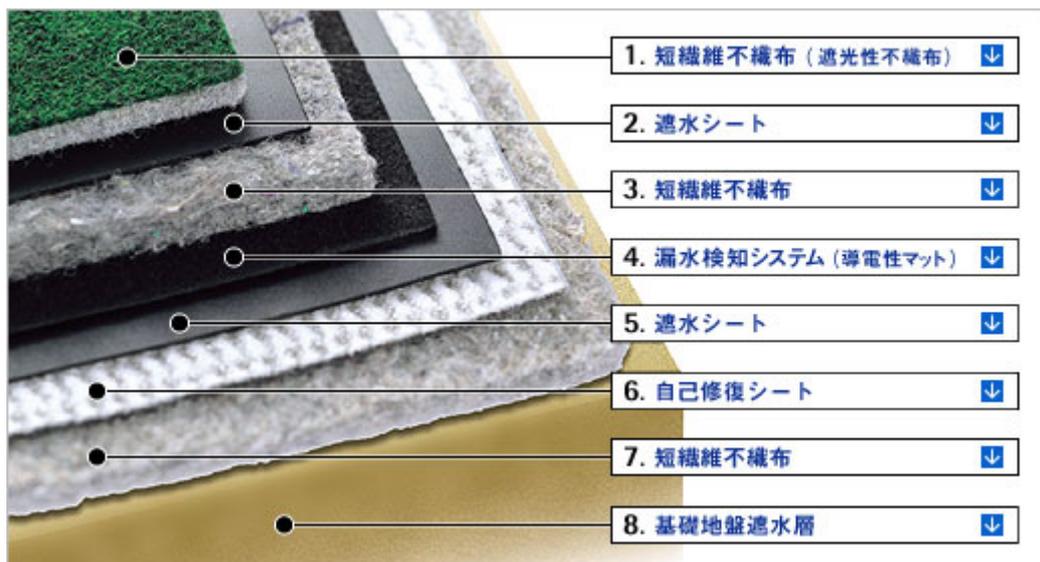


圖 2-4 日本掩埋場襯砌系統構造(日本總理府厚生省，2004)

三、我國掩埋場覆蓋系統之規定

1. 「一般廢棄物回收清除處理辦法」(環保署，2002)

我國的掩埋場相關規定，係以「一般廢棄物回收清除處理辦法」(環保署，2002)為依據。其中在襯砌系統方面，該法之第二十九條第四款規定如下：

「底層及周圍應以透水係數低於 1×10^{-7} cm/sec，並與廢棄物或其滲出水具相容性，厚度六十公分以上之黏土質、皂土或其他具相同阻水功能之地工材料組合做為基礎，或以透水係數低於 1×10^{-10} cm/sec，並與廢棄物或其滲出水具有相容性，厚度0.15 公分以上之人造不透水材料做為基礎。」

2. 「一般廢棄物衛生掩埋場設置規範」(衛生署，1985)

根據「一般廢棄物衛生掩埋場設置規範」(1985)中「第四章設施構造、第二節阻斷結構物」中所述，在阻水設施中，周圍阻水設施除利用天然地形之岩盤(不透水層)外，必要時須設置鋼板樁或混凝土、

粘土壁，或鋪設不透水材料。混凝土、粘土等可採用現場灌注法，其強度須符合土木結構物標準，深度則視掩埋場之地形、地質而異。周圍阻水設施透水係數不得大於 1×10^{-6} cm/sec。

而底部阻水設施則係為阻止掩埋場內之滲出水污染地下水，在設置掩埋場時，除利用天然地形之不透水層外，須依地下水層之位置及高水位，地下水流方向及水量，及水井等地下水利用狀況等作綜合判斷，並實施掩埋場內地盤之透水實驗，以決定是否須設置底部阻水設施。且要求掩埋場內部透水係數如大於 1×10^{-5} cm/sec，宜設置底部阻水設施。現場之透水實驗，可用掩埋預定深度0.5~1倍深之鑽探孔(直徑66-116 mm)，以掩埋深度1.5~2倍水頭實施。

底部阻水設施如無天然不透水層(如岩層)可供利用時，須考慮掩埋場之地形、土質、地下水狀況，以及掩埋廢棄物種類和掩埋作業方式等，選擇適當之不透水材料或粘土、膠質粘土等做成不透水層，其透水係數須在 1×10^{-6} cm/sec以下。

選擇人工不透水材料時應考慮不透水性、抗張力、接縫處抗張力、伸長率、撕裂力、耐老化性、抗穿性、就地性、耐候性、耐酸性、耐鹼性及耐腐蝕性等性質及厚度。

法規中亦規定，鋪設不透水層時應注意下列事項：

- (a) 施工前確實整地，並因應需要於不透水層上下各鋪設緩衝層及保護層。整地時應儘量減少填土範圍，填土區之壓實度應達90%以上。
- (b) 為減輕地下水之上昇壓力，必要時應在不透水層之下側設置收集排除地下水之盲溝、箱涵等。

- (c) 鋪設時應清除任何足以損毀不透水材料之物。必要時散佈除草劑等避免雜草穿刺。
- (d) 施工時須注意接縫部份，搭接時應清除泥砂等異；如天候惡劣或風沙太大時不得進行搭接工作。
- (e) 於軟弱地盤上施工時應確實壓實後始得鋪設不透水層。
- (f) 湧泉排水設施

在掩埋場內底部集、排水設施方面，本規範要求為：

- (a) 排水設施可由構築於底部阻水設施或不透水層上之有孔管、透水盲溝或蛇籠等構成。
- (b) 有孔管或透水盲溝應鋪設成樹枝狀。其周圍應鋪覆30~50公分厚，粒徑30~100公釐之碎石，以防孔隙阻塞。
- (c) 有孔管之流速應維持在1 m/sec以上，其幹管之最小直徑應在60公分以上，支管之直徑為20~30公分。
- (d) 無法實施重力排水時，應設置集水井以抽水排水。

3. 「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」(環保署，2003)

在事業廢棄物方面，我國掩埋場的相關標準為「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」(環保署，2003)。其中第二十五條將事業廢棄物的最終處理區分為四種類別：

- (a) 安定掩埋法
- (b) 衛生掩埋法
- (c) 封閉掩埋法

(d) 海洋棄置法

以衛生掩埋處理者，其掩埋場之底層及周圍應以透水係數低於 10^{-7} cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，厚度60 cm以上之砂質或泥質黏土或其他相當之材料做為基礎，或以透水係數低於 1×10^{-10} cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，單位厚度0.2 cm以上之人造不透水材料做為基礎。

有害事業廢棄物則應以封閉掩埋法處理，掩埋場之周圍及底部設施，應以具有單軸抗壓強度 245 kg/cm^2 以上之混凝土或其他具有同等封閉能力之材料構築；且掩埋面積每超過 50 m^2 或掩埋容積超過 250 m^3 者，應予間隔，其隔牆及掩埋完成面以具有單軸抗壓強度 45 kg/cm^2 、壁厚10 cm以上之混凝土或其他具同等封閉能力之材料構築。掩埋場底層，應以透水係數低於 1×10^{-7} cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，厚度60 cm以上之砂質或泥質黏土或其他相當之材料做為基礎，及以透水係數低於 1×10^{-10} cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，單位厚度0.2 cm以上之人造不透水材料做為襯裡。

封閉掩埋場設置下列連續三層設施者，不受前項第四款、第五款及第七款之限制：

- (a) 掩埋場底層及周圍設施覆以透水係數低於 1×10^{-7} cm/sec、厚度90 cm之黏土，再覆以單位厚度0.076 cm以上雙層人造不透水材料。
- (b) 中層須覆以透水係數大於 1×10^{-2} cm/sec、厚度30 cm以上之細砂、碎石或其他同等材料並設置滲出液偵測及收集設施，再覆以透水係數低於 1×10^{-7} cm/sec、厚度30 cm黏土層。
- (c) 上層須覆以透水係數大於 1×10^{-2} cm/sec、厚度30 cm以上之細砂、

砂石或其他同等材料，並設置滲出液收集設施，再覆以厚度30 cm 砂質或泥質黏土。

2.1.2 台灣廢棄物掩埋場概況

台灣地區全國平均每人每日垃圾清運量，由78年0.863公斤逐年增至86年1.143公斤，87年開始下降至94年(1至10月平均)0.677公斤。垃圾處理方式已漸由「掩埋」轉採「焚化」為主，至94年1至10月焚化處理佔垃圾清運量的比率為78.15%；掩埋處理佔21.75%。全國垃圾妥善處理率由78年60.17%，提昇至94年(1至10月平均)99.47%。同時期垃圾資源回收率29%，其中整體資源回收率為22.64%、廚餘回收再利用率為5.99%、巨大垃圾回收再利用率0.38%。有關歷年垃圾產生量統計如表2-1所示。(行政院環保署，2006)

台灣地區垃圾處理在73年以前大多為任意棄置，遂於74年至91年中央政府陸續訂定6年「都市垃圾處理方案」及12年「垃圾處理計畫」，協助地方政府完成興建垃圾衛生掩埋場584處，目前仍在營運有205處，總投資達521億元，佔各垃圾妥善處理方式之34.8%(行政院環保署，2003)。於92年至95年基於大型焚化廠興建政策、歲修停爐狀況、天然災害應變支援、封場滲出水集中處理、河川行水區垃圾場移除、早期露天堆置場及焚化灰渣場追蹤處置等因素，92年中央政府賡續「台灣省垃圾處理第三期計畫」訂定「台灣地區垃圾處理後續計畫」，自92年至95年底總計編列79.79億元推動「垃圾處理計畫」、「封閉掩埋場垃圾移除及土地再生復育計畫」及「垃圾掩埋場滲出水(含水肥)區域集中處理廠興建計畫」三項計畫，協助地方設置34座區域性一般廢棄物衛生掩埋場，增加垃圾掩埋容量約800萬立方米(含焚化廠停爐歲修及天然災害應變垃圾處理約200萬立方

米)、117 處掩埋場封閉復育綠化及5 處移除處置再生復育棄置場，可提供面積達450 公頃復育再利用土地，垃圾滲出水(含水肥)集中處理廠7 處將處理3,500 噸/日等多項目標。

表2- 1歷年垃圾產生量統計(公噸/年)(行政院環保署，2006)

年別	垃圾產生量(公噸 / 年)						垃圾回收再利用及處理比率(%)						垃圾重要指標		
	總計	垃圾清運量	垃圾回收量				垃圾清運量之處理方式比率		垃圾回收率				平均每人每日垃圾產生量	平均每人每日垃圾清運量	垃圾妥善處理率
			小計	整體資源回收量	廚餘回收再利用量	巨大垃圾回收再利用量	焚化率	掩埋率	小計	整體資源回收率	廚餘回收再利用率	巨大垃圾回收再利用率			
78	6,258,655	6,258,655					1.36	88.98					0.863	0.863	60.17
79	6,844,846	6,844,846					1.14	88.04					0.963	0.963	60.93
80	7,239,045	7,239,045					0.40	93.01					1.000	1.000	60.20
81	8,001,236	8,001,236					3.19	90.44					1.087	1.087	66.87
82	8,217,318	8,217,318					3.03	91.76					1.101	1.101	64.98
83	8,492,821	8,492,821					4.86	89.88					1.121	1.121	70.51
84	8,707,696	8,707,696					14.94	79.24					1.138	1.138	65.12
85	8,736,420	8,736,420					15.62	79.15					1.135	1.135	70.87
86	8,880,775	8,880,775					19.05	75.06					1.143	1.143	76.97
87	9,434,697	8,880,487	554,210	554,210			19.61	75.30	5.87	5.87			1.206	1.135	83.67
88	9,190,862	8,565,699	625,163	625,163			23.59	72.66	6.80	6.80			1.161	1.082	87.39
89	8,729,501	7,875,511	853,990	853,990			41.01	57.38	9.78	9.78			1.092	0.982	90.60
90	8,334,407	7,277,054	1,057,353	1,057,353			51.35	47.44	12.69	12.69			1.031	0.900	93.70
91	7,984,837	6,743,000	1,241,837	1,241,837			64.01	35.00	15.55	15.55			0.982	0.829	96.33
92	7,708,019	6,160,260	1,547,759	1,379,158	168,601		69.90	29.73	20.08	17.89	2.19		0.941	0.752	98.17
93	7,714,958	5,862,890	1,852,068	1,552,804	299,264		73.47	26.23	24.01	20.13	3.88		0.943	0.708	98.95
94 (1-10)	6,580,689	4,672,074	1,908,615	1,489,876	393,907	24,832	78.15	21.75	29.00	22.64	5.99	0.38	0.953	0.677	99.47

自96 年以後，除偏遠地區外，生垃圾不再進入掩埋場，同時亦因考量資源日益匱乏與垃圾處理成本提高等因素，政府將由過去採末端處理方式調整「配合資源回收再利用之規定，以源頭減量、資源回收為主，搭配中間處理及最終處置」垃圾處理執行方向，在垃圾清理架構(如圖2-5)下逐年達成「以綠色生產、綠色消費、源頭減量、資源回收、再使用、再利用等方式，將資源有效循環利用，達成垃圾全回收、零廢棄」之「垃圾零廢棄」目標(行政院環保署，2004)。

我國「垃圾零廢棄」政策目標是以民國90年為計算基準年，預計於96年以後，除偏遠地區外，垃圾將不進掩埋場，且處理前之總減量目標達25%，100年達40%，109年達75%，期與先進國家同步建立「零廢棄社會」。

在焚化廠興建計畫的推動與生垃圾不進掩埋場之政策下，台灣地區未來垃圾處理問題將面臨如何處理垃圾焚化所產生之灰渣，並再生利用，以減少掩埋所需土地面積。有鑒於此，台灣地區垃圾處理後續發展以「持續垃圾掩埋場體檢及輔導改善」、「垃圾焚化廠及飛灰穩定化設施查核輔導」、「推動焚化底渣再利用」及「推動飛灰熔融技術」等四個方向為具體執行方式。(惠元環境資源股份有限公司，2007)

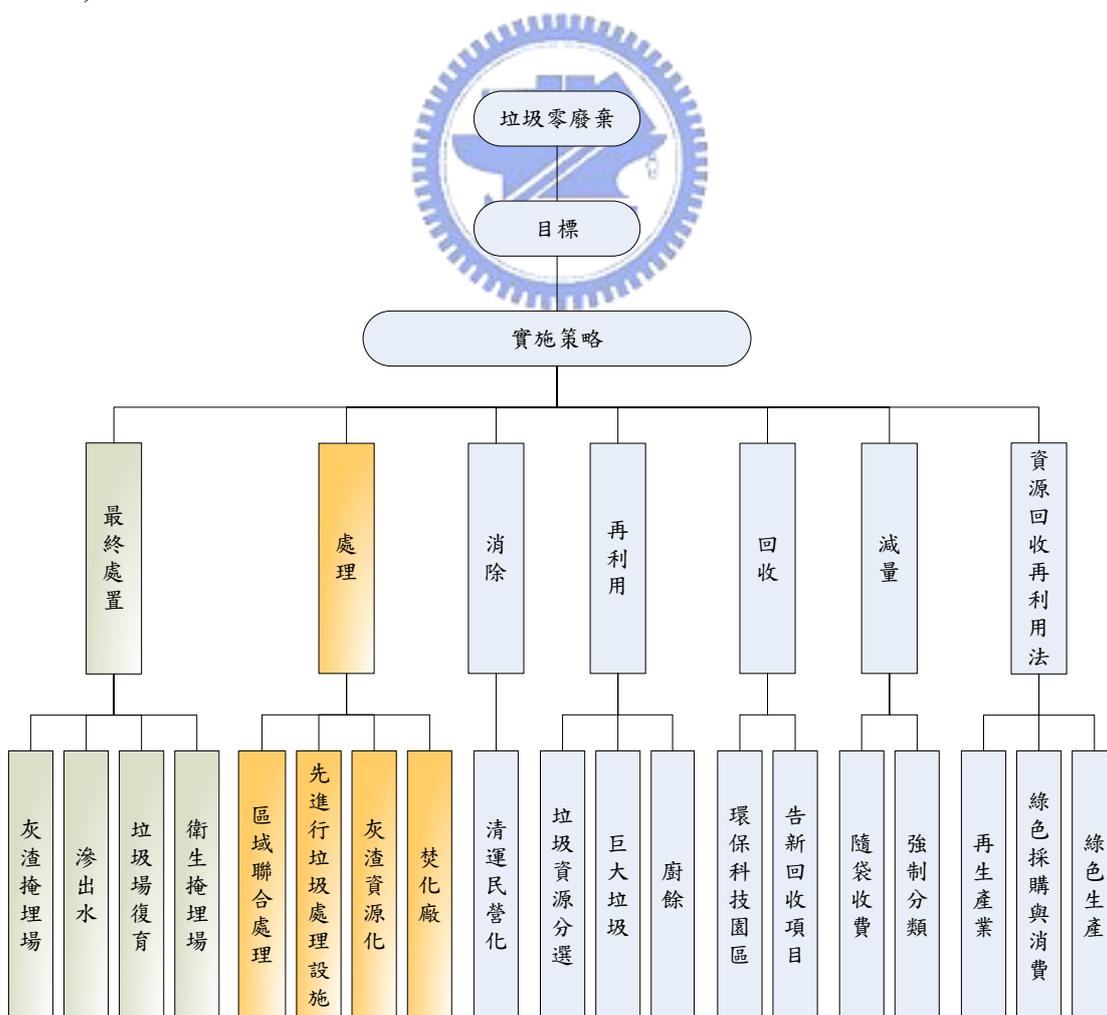


圖 2-5 我國「垃圾全分類零廢棄」實施架構(行政院環保署，2006)

截至民國94 年底，營運中的廢棄物掩埋場共計175 處(行政院環保署，2007)，台灣山坡地掩埋場約53 場。台灣地區山坡地掩埋場所面臨的問題有下列幾項(單信瑜，1999)：

- 1.地形：掩埋場多位於山坡地與山谷，在設計與施工上都有其困難處。
- 2.工程品質：設計與施工品質不良。
- 3.工程制度：受限於掩埋區設施一次發包施工完成的制度。
- 4.營運管理制度：掩埋場缺乏適當的人力營運管理，且未按掩埋計畫作業。
- 5.法規：國內之廢棄物掩埋場相關法規不完善，且亦無適當之官方技術文件可供參考。



2.1.3 掩埋場的邊坡穩定

陳榮河及陳國賢(2002)針對廢棄物掩埋場可能之破壞模式及分析方法，完整歸納區分為五大類：

1.廢棄物內部之破壞

破壞面發生於填築之廢棄物內部，主要因素為廢棄物剪力強度不足所產生之破壞模式，常發生於廢棄物填築邊坡高度較高(超高)、坡角過大(過陡)、廢棄物夯實不足或不當堆置之狀況下。此類破壞之穩定分析可採用傳統圓弧破壞穩定分析方法，如Bishop、Janbu...等模式分析。

2.邊坡及基礎土壤之整體破壞

破壞面由上方垃圾層開始，穿過垃圾場底層之阻水襯墊層，一般多為不透水布或皂土布...等，再延伸至下方基礎土壤。此類型之破壞模式，主要因為基礎下方土壤剪力強度不足而發生剪力破壞，導致承载力不足，使上層之垃圾邊坡同時誘發破壞。通常較易發生於下方存在軟弱土層之情況，尤其是軟弱黏土層。其破壞面通常呈圓弧形，可用傳統式圓弧破壞穩定分析法來進行分析，惟需考量垃圾場底部襯墊層（土工合成材料）之張力強度所提供之抵抗力。

3. 襯墊層界面之滑動破壞

主要破壞面發生於垃圾場底部襯墊層系統之內外部界面，因界面之剪力強度不足，致上方垃圾塊體沿此界面產生滑動破壞，常發生於掩埋場邊坡較陡時，而襯墊系統界面強度較低之情況。此類破壞之穩定分析可用塊體平衡進行分析評估。

4. 襯墊層之拉出或斷裂破壞

掩埋場於營運期間，因填埋垃圾與襯墊層界面之摩擦力所產生之向下牽引拉力，超過襯墊系統與下方土壤間之摩擦力及襯墊層之錨定力或張力時，發生襯墊層被拉出或斷裂之破壞，使垃圾發生向下滑移。此類型之破壞多發生於襯墊層之錨定力或張力強度不足時，其分析方法可採用Koerner（1994）塊體平衡分析法，進行分析與評估。

5. 覆蓋層之破壞

此類破壞包括頂部覆土因與下方覆蓋襯墊層間之剪力強度不足，而導致覆土向下滑動破壞、及覆蓋襯墊層內部界面間之剪力強度不足，致部份襯墊層系統發生向下滑動之破壞。此類破壞之分析法亦可採用Koerner（1994）塊體平衡分析法，進行分析與評估。

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 30% 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 1% 以上，斜面坡度為 30% 以下，並應綠化植被。

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 3H:V。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，亦有國內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 ($\approx 18.4^\circ$)

國外學者Koerner and Soong(2000)透過案例分析，針對十個大型掩埋場破壞案例，探討邊坡破壞機制。進行2-D及3-D邊坡穩定分析；2-D分析，使用GEOSLOPE程式並採用Simplified Bishop、Simplified Janbu進行求解；3-D分析，使用CLARA程式，採用相同的切片法分析，同時比較2-D及3-D之安全係數。在有襯墊層的掩埋場當中，考慮邊坡滑動啟動機制時，其形狀因子($WF = FS_{3-D} / FS_{2-D}$)介於1.15~ 1.43之間；不考慮時，形狀因子介於1.10~1.33之間。分析結果顯示所有之邊坡引發機制，皆與內部滲出水之累積有關。破壞之誘發作用尚包括邊坡過度填築(填築高度超過設計值)、地震、降雨、坡趾開挖或沖蝕等。

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2- 2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

Orr and Finch (1990)觀察美國加州十個廢棄物掩埋場經過地震後(0.1g~0.45g)之情況，發現掩埋場表面極少有裂縫產生，而認為此一現象顯示廢棄物掩埋場具有良好消滅能量或高阻尼之特性，使其在地震作用下，具有良好之穩定性。

Anderson et al. (1992)進行廢棄物掩埋場之數值模擬，結果顯示掩埋場頂部之加速度只有底部地面尖峰加速度之 50%，此證明垃圾具有良好之消滅地震能量之特性。

Singh and Murphy (1990)以 SHAKE 程式進行動態分析，亦得到相同的結論。

Kavazanjian (1999)指出固體廢棄物封場設施之地震設計，一般採用容許沉陷量控制(如表 2-3)，這些值是基於傳統預估地震位移方法假設求得，一階等效線性反應分析(One-dimensional Equivalent-linear Response Analyses)、殘餘強度預估降服加速度(Yield Accelerations Calculated with Residual Shear Strengths)及 Newmark 地震位移分析(Newmark-type Seismic Displacement)等。表 2-4 則是 Operating Industries, Inc. Landfill，對於現場封場設計所提出的地震性能準則，

該場位於美國加州蒙特瑞公園市，場址緊鄰住宅社區，且穿越 65m 高之主要高速公路，(Kavazanjian et al. , 1998)。

表 2- 3MSW 掩埋場一般容許預估地震沉陷量(Kavazanjian , 1999)

Component	Allowable Calculated Displacement	Comment
Liner System	150 to 300 mm	Actual expected deformation is very small.
Cover System	300 mm to 1 m	Damage is repairable.
Waste Mass	1m	For displacement not impacting cover or liner.
Roadways, Embankments	1m	Conventional geotechnical criteria.
Surface Water Controls	1m	Conventional geotechnical criteria.
Gas Collection System	No Limit	Breakage common under normal operating conditions.

表2- 4 OII Landfill地震性能準則(Kavazanjian et al. , 1998)

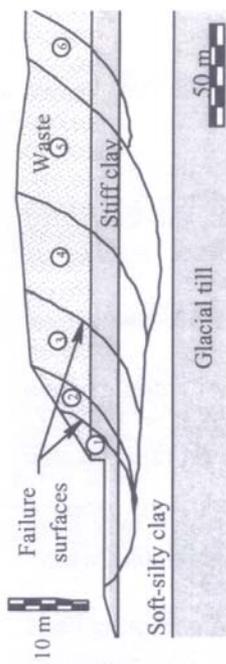
Cover System Component	Design Criteria and Performance Standard	Interim Remediation to Restore Compliance	Repair to Pre-Earthquake Condition
Final Cover Soil Monocover on Side Slopes	150mm of soil deformation. Partial failure contained on site.	3 months to strip vegetation, re-grade and re-compact areas of cracking.	12 months to restore vegetation.
Landfill Gas Control Collection wells Headers Vacuum Pumps	Up to 25 percent of wellheads broken. Up to 25 percent of header pipes cracked or broken. Power loss. No structural damage.	1 month to route headers around broken wellheads. 1 month to by pass broken header pipes. None required.	12 months to repair/replace broken wells heads. 3 months to repair/replace broken heads. 1 month to restore off-site power.
Leachate Transmisson Pipes	Acceptable breakage of pipes with double containment.	1 month to by pass broken pipes.	3 months to repair broken pipes.
Surface Water Management Conveyance Systrms (Bench Channels, Down Drains, Culverts) Sedimentation Basin	Cracking and up to 300 mm of displacement. Minor cracking of concrete	2 months to completely restore surface pathways. 2 weeks to 1 month to patch the cracks.	9 months to replace/rebuild surface pathways. 9 months to rebuild the basin (if needed).
Access Roads	300 mm displacement (cracking).	2 months to patch the cracks.	12 months for full repair

2.1.4 掩埋場的破壞案例

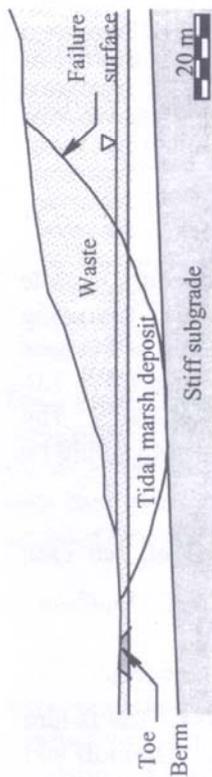
Koerner and Soong (20000)，收集1980年至2000年間，世界各地十個大型掩埋場的破壞案例如(表2-1)，其中掩埋場底部有無設置襯墊層系統的案例各佔一半。廢棄物邊坡破壞造成的坍方量 $60,000\text{m}^3 \sim 1,200,000\text{m}^3$ ，主要分為兩種典型的破壞模式即圓弧滑動及平面滑動，有時亦會有複合型邊坡破壞，表2-6中，破壞類型以平面滑動居多，有設置襯墊層的掩埋場，則全部屬於沿著襯墊層界面之滑動破壞。無設置襯墊層的掩埋場2D分析剖面如圖2-6所示，有設置襯墊層的掩埋場2D分析剖面如圖2-7所示，其中L-1案例既為美國加州著名的廢棄物掩埋場破壞案例，Kettleman Hills Landfill (Byrne et al.1992)。

表2- 5掩埋場破壞案例(Koerner and Soong，2000)

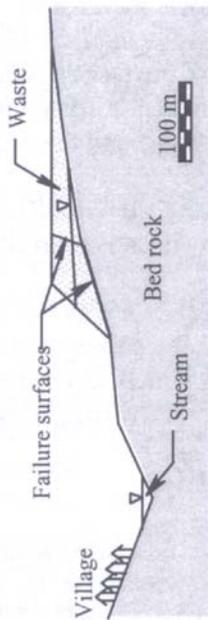
Case History	Year	Location	Type	Quantity Involved
Unlined				
U-1	1984	N.America	Single rotational	110,000 m ³
U-2	1989	N.America	Multiple rotational	500,000 m ³
U-3	1993	Europe	Translational	470,000 m ³
U-4	1996	N.America	Translational	1,100,000 m ³
U-5	1997	N.America	Single rotational	100,000 m ³
Lined				
L-1	1988	N.America	Translational	490,000 m ³
L-2	1994	Europe	Translational	60,000 m ³
L-3	1997	N.America	Translational	100,000 m ³
L-4	1997	Africa	Translational	300,000 m ³
L-5	1997	S.America	Translational	1,200,000 m ³



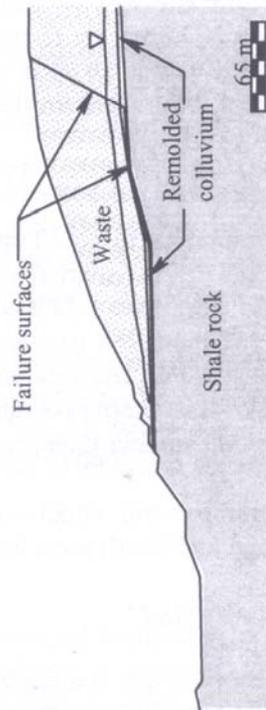
U - 2 (1989)



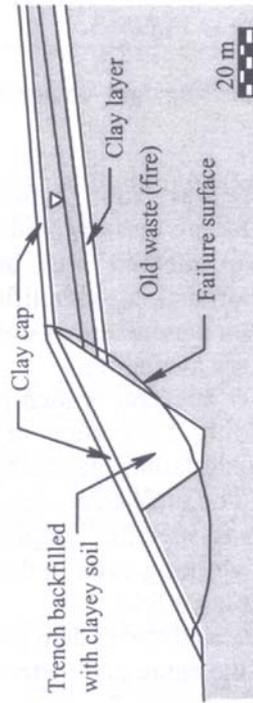
U - 1 (1984)



U - 3 (1993)



U - 4 (1996)



U - 5 (1997)

圖 2- 6 無設置襯墊層的掩埋場 2D 分析剖面(Koerner and Soong, 2000)

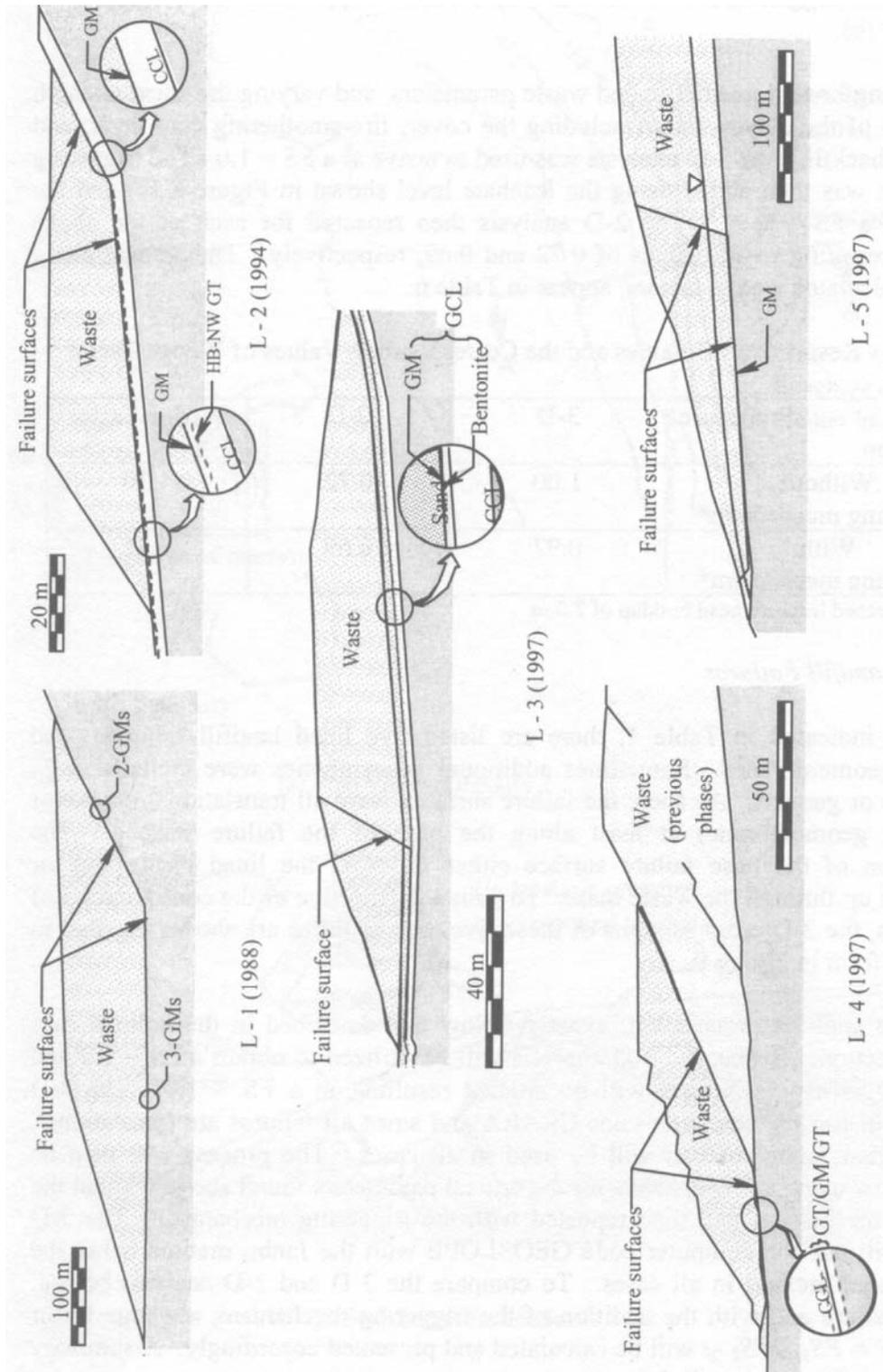


圖 2-7 有設置襯墊層的掩埋場 2D 分析剖面(Koerner and Soong, 2000)

2.2 固體廢棄物及地工合成材材料工程參數

2.2.1 基本參數不確定因素

在垃圾邊坡穩定分析中，須具備廢棄物之基本參數，即合理之剪力強度參數(單位重(γ)、凝聚力(c)、摩擦角(ϕ))，以及地工材料之界面強度，但因垃圾本身具有極大不確定性，致以傳統土壤力學方法進行評估分析，所得之分析結果，實難令人完全信任與採納，而主要之不確定因素如下：

1. 許多有機性廢棄物，在掩埋的短短幾年，便開始發生化學反應，起初為好氧性分解，爾後經覆蓋土層後，行成厭氧性分解，分解過程中排出甲烷及二氧化碳，將影響試驗之準確性。
2. 掩埋場中腐敗性廢棄物會隨時間不斷腐化，廢棄物剪力強度具變化性，導致採樣時間之控制度，不易掌握具代表性採樣時間。
3. 一般廢棄物掩埋場具高度不均質性，其中含有大型固體廢棄物，在一般採樣下(採樣試體較小)，所得試驗結果，將無法足以代表整體之廢棄物性質。
4. 在實驗室進行廢棄物壓實，有其困難度。
5. 除特殊性分類之掩埋場(如灰渣掩埋場、固化物掩埋場)，可得較為代表性之均質土質參數外，一般分析均假設廢棄物層為均質均向，實際上有某種程度上之差異性。
6. 不均質之廢棄物，造成極為差異之孔隙比，影響廢棄物單位重(γ)...等土壤性質。
7. 一般掩埋場在進行封閉復育階段，皆會採取植被做為綠美化之手段，有效之植被亦能提昇邊坡穩定，而植被種類之選擇，亦影響復育後之邊坡穩定度，在穩定分析時，並未能有模擬之參考數據，加以納入考量。

8.近年在資源回收觀念之倡導下，掩埋場堆置廢棄物之組成明顯改變，新舊廢棄物之改變，即使使用國外經驗參數或本土建置之廢棄物參數，仍值得商榷。

2.2.2 固體廢棄物單位重

廢棄物單位重受廢棄物層本身物理組成、掩埋時間、掩埋方式、掩埋年代、化學分解速率、堆置時壓密程度、排水狀況及沉陷因素等影響，產生相當大的變化。且由於掩埋物取樣困難，因此不易求得。廢棄物經掩埋壓實後單位重依壓實程度不同約在 $4\sim 9\text{ kN/m}^3$ ($0.4\sim 0.9\text{ t/m}^3$)間，但年代較久之廢棄物層經生物分解及壓密沉陷後單位重可高達 $9\sim 10\text{ kN/m}^3$ ($1.0\sim 1.1\text{ t/m}^3$)。

Kavazanjian et al. (1995)等整理相關文獻並由大型開挖結果，提出圖2-3之單位重深度曲線(實線)，其結果顯示表面之掩埋物之單位重為 6.5 kN/m^3 並隨著深度增加而呈線性增加，至30公尺深度其單位重為 11.5 kN/m^3 ，至此深度以下呈曲線變化，50公尺以下約為定值 12.5 kN/m^3 ，常見之掩埋物平均單位重約為 kN/m^3 ，若無現場量測資料，可利用此曲線配合表面開挖加以推估。Dixon and Jones (2005)搜集各國文獻，整理出不同國家廢棄物的單位重，如表2-6所示。

國內文獻方面，整理如表2-7所示。台大環工所(1985)調查台北市廢棄物平均單位重約為 2.6 kN/m^3 ，經掩埋壓密後，估計約為 5.6 kN/m^3 ，另外，鄭介眉(2004)，針對台北縣八里下罟子掩埋場進行取樣調查結果，得到單位重為 $6.9\sim 9.8\text{ kN/m}^3$ ；范佐憲(2007)針對湖口、竹南掩埋場進行取樣調查，得到單位重分別為 5.0 、 6.4 kN/m^3 。

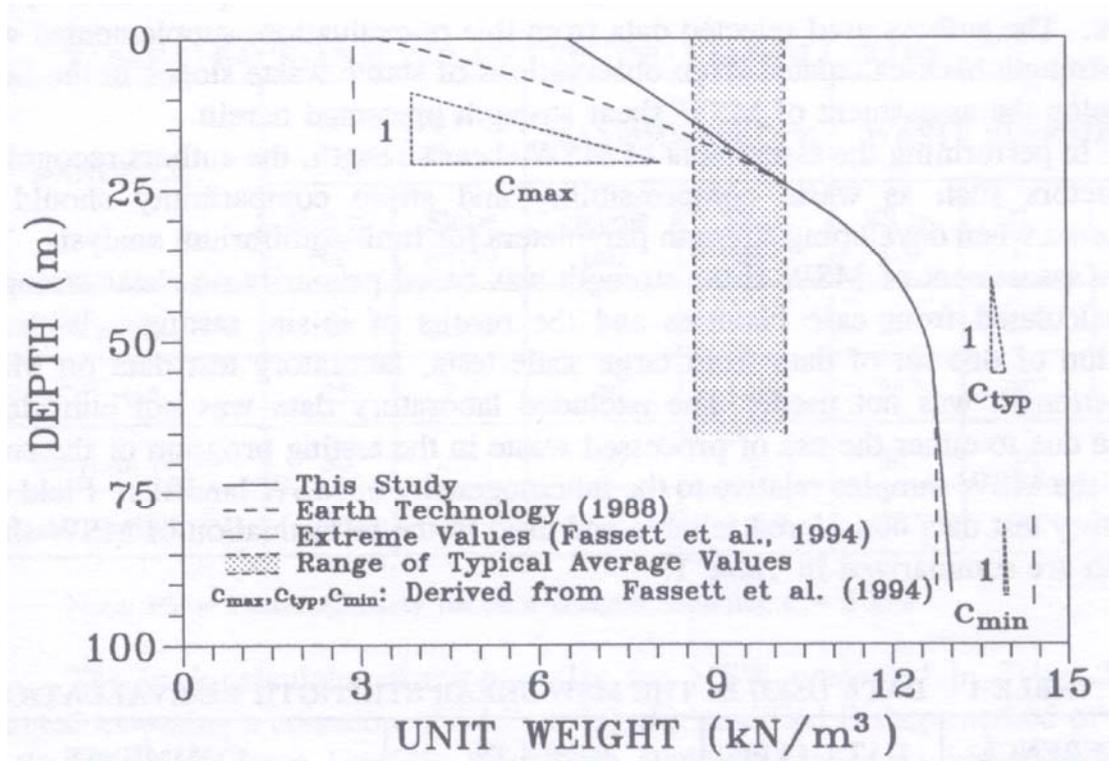


圖 2- 8 固體廢棄物單位重深度曲線(Kavazanjian et al. , 1995)

表2- 6固體廢棄物單位重之國外文獻 (Dixona, N.and Jones, D.R. V. , 2005)

國家	單位重(kN/m ³)	備註	文獻
英國	5.98	使用21噸的夯錘，離地2 m	Watts and Charles (1990)
	8.04	使用21噸的夯錘，離地0.6 m	
比利時	5.00~10.01	不同的夯實程度	Manassero et al. (1996)
法國	6.97	地表的新鮮一般廢棄物	Gourc ea al. (2001)
美國	5.98~6.97	新掩埋的一般廢棄物	Kavazanjian(2001)
	14.03~20.01	高度降解	

表 2-7 固體掩埋物單位重之國內文獻

文獻來源	單位重(kN/m ³)	備註
范佐憲(2007)	6.4	竹南掩埋場(現場取樣)
范佐憲(2007)	5.0	湖口掩埋場(現場取樣)
鄭介眉(2004)	6.9~9.8	八里下罟子掩埋場
鄭介眉(2004)	9.8	八里三期規劃設計值
鄭介眉(2004)	4.9~6.9	西青掩埋場(4 m~5 m)
陳榮河(1990)	6.3	內湖掩埋場設計值
陳榮河(1990)	8.1	福德坑掩規劃設計值
鄭介眉(2004)	8.3	山豬窟掩埋場設計值
台大環工所(1985)	2.6 5.8	台北市廢棄物(不夯實) 台北市廢棄物(掩埋夯實後)

2.2.3 固體廢棄物剪力強度參數

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、三軸試驗、反算分析(backanalysis)等方法推估。表2-8為國外一些學者以上述方法求得之剪力強度。

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) $0 \leq \sigma \leq 20$ kPa, $c \approx 20$ kPa, $\phi = 0^\circ$ ；(2) $20 \leq \sigma \leq 60$ kPa, $c = 0$ kPa, $\phi \approx 38^\circ$ ；(3) $20 \leq \sigma \leq 60$ kPa, $c \geq 20$ 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，廢棄物之摩擦角(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 $0.45 \sim 0.02 \text{ kg/cm}^2$ 間。另一方面，Howland and Landva (1992) 的研究則得出10~15年的廢棄物，摩擦角(ϕ) 33° ，內聚力 17 kPa 。Gabr and Valero (1995) 10~15年的廢棄物，摩擦角(ϕ) $20^\circ \sim 39^\circ$ ，內聚力 $0 \sim 28 \text{ kPa}$ 。

Landva and 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 $43.4 \text{ cm} \times 28.7 \text{ cm}$ ），發現凝聚力介於 0 至 23 kPa 間、摩擦角(ϕ)則介於 24° 至 41° 間，受廢棄物組成成分影響很大。Landva and 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 et al. (1995)依據平板載重試驗反算分析、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，建議取強度分布之下限值，以雙線性來描述固體廢棄物之強度特性，當正向應力低於 30.0 kPa 時，取凝聚力 24.0 kPa 、摩擦角(ϕ) 0° ；當正向應力大於 30.0 kPa 時則取凝聚力 0.0 kPa 、摩擦角(ϕ) 33° 。

Eid et al. (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(ϕ) 35° 。

陳榮河 (2002)彙整國內外文獻，提出摩擦角與凝聚力相對關係式 $c(\text{kPa}) = -2.35\phi(^{\circ}) + 81 \pm 17$ 另外，鄭介眉 (2004)，針對台北縣八里下罟子掩埋場進行取樣進行室內直剪試驗，求得 $c = 1.05 \text{ t/m}^2$ ， $\phi = 38.9^\circ$ ；范佐憲(2007)針對新竹縣湖口、竹南掩埋場進行現場大型直剪試驗，分別求得 $c = 33.55 \text{ kPa}$ ， $\phi = 32.07^\circ$ ， $c = 34.9 \text{ kPa}$ ， $\phi = 37.9^\circ$ 。

表 2- 8 廢棄物剪力強度(Sake,S.M. and Manasseh, C. G.)

METHOD	REFERENCE	SHEAR STRENGTH		METHOD	REFERENCE	SHEAR STRENGTH		
		c (kPa)	ϕ (°)			c (kPa)	ϕ (°)	
Direct Shear (LAB)	Landva & Clark'86	19	42	Back analysis	Pagotto & Rimoldi'87	29	22	
		16	38			78	1	
		10	33.6			80	8.5	
	Landva & Clark'90	16	33			60	5	
		19	39			60	15	
		22	24			57	3	
	Singh & Murphy'90	35	0			40	13	
		70	20			0	35	
		65	3			0	38	
		0	38			35	14	
		0	42			2	20	
		15	31			18	20	
	Siegel et al. '90	0	39			27	19.5	
		0	53			24	20.5	
	Golder Assoc.	0	41			2	20.5	
	Del Greco & Oggeri'93	5	40		Misc.	Martin & Genthe'93	0	35
		40	39			Cowland'93	10	25
		5	20			Jessberger et al.'94	10	15
		24	22				10	17
		24	22			Singh & Murphy'90	15	35
		10	25				23.5	20
		70	20				0	35
	23.5	22	Kolsh et al'93			6	23	
	Jessberger et al. '94	7				42	8	30
28		26.5		11		32		
Gabr & Valero'95	27.5	20	Fasset ea al'93	10		23		
	0	39		10		32		
Jones et al.'97	10.5	31	Jessberger et al.'94	7		38		
Pelkey '97	50	35		0		30		
	0	26		0		40		
Kavazanjian et al'99	43	31	Kolsh'95	15		15		
Mazzucato et al'99	24	18		18		22		
Field testing	Singh & Murphy'90	80	1	Jones et al.'97		5	25	
		100	1	Eid et al.2000		0-50	35	
	Richardson & Reynolds'91	10	18	Traiaxial tests(LAB)		Gabr & Valero'95	100	0
		10	43				(c_u, ϕ_u)	40
	Whitiam et al.'95	10	30			(c', ϕ')	16.8	34
	Thomas et al.2003	22	18.2					

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 and Murphy, 1990; Machado et al., 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。

2.2.4 土工合成材介面剪力強度參數

土工膜布通常用來分隔廢棄物與地下水，防止潛在的地下水污染，具有施工迅速、不須嚴格控制含水量及夯實度、不易因伸縮產生裂縫等優點，在現代掩埋場中已大量使用，不只要了解它們的受力情形，它們與覆土中間的界面作用力，在台灣的斜坡地掩埋場更是重要的技術指標，因此土工止水系統的界面參數選用是非常關鍵的，通常台灣是以光滑的高密度聚乙烯(Smooth HDPE)為不透水層。

土工膜布與土壤介面剪力強度參數隨著土工膜布表面處理方式不同而差異極大，對具平滑表面之土工膜布(Smooth geomembrane)，其典型靜態摩擦角約為 8° ，而織物類(Textured)土工膜布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膜布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膜布介面摩擦角，其值受黏土夯實時水分與介面濕潤度影響極大，摩擦角分布可從

6°至30°，實務上多利用此界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44~83 kPa (Augello et al. 1995)。

根據Ellithy and Gabr (2000)的研究，平滑面之地工膜布與粘土間的尖峰剪力強度，在飽合時， $c_p = 6\sim 11$ kPa， $\phi_p = 2.2^\circ\sim 8.2^\circ$ ；未飽合時， $c_p = 3\sim 15$ kPa， $\phi_p = 4.8^\circ\sim 19^\circ$ 。粗糙面之地工膜布與粘土間的尖峰剪力強度，在飽合時， $c_p = 6\sim 10$ kPa， $\phi_p = 3.2^\circ\sim 14.5^\circ$ ；未飽合時， $c_p = 17\sim 27$ kPa， $\phi_p = 5.7^\circ\sim 24.5^\circ$ 。

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

另外，國內學者劉家男 (2004)，整理國外學者的試驗結果(根據ASTMD5321)，求得各種土壤與光滑面高密度聚氯乙烯之地工膜布間的尖峰剪力強度如表2-9所示。

Mithell and Mithell (1992)進行各種界面之直接剪力試驗及拉出試驗，試驗結果顯示界面之尖峰摩擦角一般高於殘餘摩擦角約1~2°，而達到尖峰剪力強度之應變值一般僅為3~4%，故考量在施工及廢棄物掩埋期間，界面之應變量應已超過此值，建議在穩定分析及設計中，界面剪力強度皆採殘餘值。

表2- 9地工膜布(Smooth HDPE)之界面強度參數值(劉家男，2004)

Geosynthetics	Soil	Test Condition	σ_n (kPa)	Shear Rate (mm/min)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)	Reference
Sm HDPE	sand	hydrated	20-60	0.0025-0.25	26-28	0	Koutsourais et al. (1991)
Sm HDPE	sand	staurated	14-100	0.127	17-18	0	Martin et al. (1984)
Sm HDPE	sand	staurated	5-25	0.3	19-27	0.6-0.7	Williams,Houlihan (1987)
Sm HDPE	Sapolite	staurated	5-25	0.3	21	0.4	Williams,Houlihan (1987)
Sm HDPE	clay	staurated	5-25	0.3	25	1	Williams,Houlihan (1987)
Sm HDPE	sand	drain	-	-	18	0	Mitchell et al.(1992)
Sm HDPE	clay	壓實	-	-	15	-	Mitchell et al.(1992)

2.2.5 軟岩材料參數

軟岩之材料性質大致介於土壤與硬岩之間，土壤、軟岩及硬岩之性質大致為連續性的變化，但是在定量上並沒有明確的分界，如粗略地以材料之單軸壓縮強度來區分，軟岩的單軸壓縮強度約為數 kg/cm^2 以上至 200 kg/cm^2 以下，特別是指單軸壓縮強度在 100 kg/cm^2 以下者。軟岩由於其顆粒間膠結不良且孔隙較大，因此具有強度低及變形性大的工程特性，其力學性質隨含水量而變化，一般而言軟岩之抗風化能力差，開挖解壓或反覆乾濕所造成之風化及消散(slaking)，易使其材料性質發生急速劣化。

軟岩依成因可分為沉積軟岩、風化軟岩及火山軟岩三類，台灣地區沉積軟岩主要分布於西部麓山殆及海岸山脈，包括更新世及第三紀之沉積岩層，岩性主要為砂岩、粉砂岩、頁岩及泥岩等；風化軟岩為硬岩風化過程之中間產物，受母岩性質、岩覆厚度、節理分布及環境因素所控制，因此其分布範圍變異性較大；而火山軟岩主要分布於大屯山區，第四紀火山活動噴出之碎屑，岩性主要為凝灰岩及凝灰角礫岩。

表 2-10 為國際岩石力學學會(ISRM, 1981)單壓強度分級, 表 2-11 為國內文獻軟岩材料參數表(張吉佐等人, 1998)。

表 2- 10 國際岩石力學學會(ISRM, 1981)單壓強度分級

強度分級	編號	單壓強度 (kg/cm ²)
極弱岩(Extremely Weak Rock)	R ₀	2.5~10
甚弱岩(Very Weak Rock)	R ₁	10~50
弱岩(Weak Rock)	R ₂	50~250
中強岩(Medium Strong Rock)	R ₃	250~500
強岩(Strong Rock)	R ₄	500~1000
甚強岩(Very Strong Rock)	R ₅	1000~2500
極強岩(Extremely Strong Rock)	R ₆	2500 以上

表 2- 11 國內文獻之軟岩材料參數表(張吉佐等人, 1998)

地區	岩性描述	試驗參數		
		γ_t (t/m ³)	ω_n (%)	q_u (kg/cm ²)
大屯山分區	凝灰角礫岩	2.19~2.25	9.6~12.9	5.5~35.9
	粉砂岩	2.25	11.2	10~17
	砂岩	2.13~2.36	9.8~14.2	1.7~15.9
	泥岩	2.16~2.38	5.3~18.9	1.9~16
	凝灰岩	2.16	13.5	70.3
苗栗丘嶺分區	砂岩	1.88~2.26	2.2~21.6	0.2~26.9
	泥岩	1.9~2.21	3.8~23.9	0.3~34.5
八卦山分區	砂岩	1.82~2.00	9.0~14.4	-
	泥岩	1.91~2.15	8.5~28.6	1.2~9.7
嘉義分區	砂岩	1.83~2.19	6.8~24.8	1.0~25.4
	泥岩	1.81~2.23	8.9~24	0.9~31.2
	砂泥岩互層	1.84~2.14	16.3~25.3	-
南化分區	均質粉砂岩	2.57~2.62	1.05~3.06	85~269.9
	紋層狀粉砂岩	2.57~2.63	1.09~4.27	105~559
	層狀細砂岩夾薄層粉砂岩	2.51	1.1~2.0	168~559

2.3 邊坡穩定極限力平衡分析法

2.3.1 坡地型掩埋場邊坡穩定分析模式

坡地型掩埋場之穩定分析，不謹須考慮常時靜態之穩定性，亦須考慮在動態作用時之穩定性，分別敘述如后(陳榮河，1990)：

一、靜態穩定分析

常用之土壤邊坡靜態穩定分析方法皆可應用於廢棄物填築邊坡，其中極限平衡法，因方便、迅速，而最常被使用。而此類方法可依破壞面形狀而分為兩類：(1)破壞面呈平面時，可用塊體平衡法分析之，此類破壞面多發生於襯墊層界面強度較弱時，或覆蓋層之破壞；(2)破壞面呈一圓弧形，可採用切片法，以力學平衡求其安全係數。然極限平衡法沒有考慮變形行為之影響，故亦有用有限元素法來研究廢棄物邊坡變型行為及應力分布。

二、動態穩定分析

因地震或其他震動導致廢棄物邊坡破壞情形有：基礎土壤之液化、邊坡之滑動破壞、底部襯墊層及頂部覆蓋層之滑動破壞等，其中底部襯墊層系統之各界面，更為廢棄物填築邊坡受震之一潛在弱面。廢棄物填築邊坡之動態反應，主要受廢棄物之動態強度、動態勁度、阻尼特性、幾何形狀及重量等因素所控制，而襯墊系統各界面之動態穩定性，則受界面動態剪力強度及降伏應變所控制。然目前為止，有關廢棄物材料之剪力模數衰減曲線及阻尼曲線等資料仍尚未建立，而各種襯墊系統之動態強度相關資料亦不多，故現階段動態穩定分析之方法，最常使用擬靜態分析法，即將地震作用視為引致一等值水平力(=地震係數×潛在滑動塊體重量)，施加於潛在滑動之塊體，以評估其穩定性。擬靜態分析法為一極為簡化且保守之方法，因此 Seed 提出一動應力分析法，地震力以假靜力模擬，考慮因地震引致之反覆應

力，及由試驗求得材料在設計頻率下之破壞剪力強度，據以求得一較為合理安全係數。

此外為評估邊坡因地震所引致之永久變形量以考量邊坡之穩定度與完整性則常採用Newmark法 (Newmark, 1965)；亦有利用電腦程式(Seed and Bonaparte, 1992)及現地資料之反算分析(Aderson et al., 1992)等方法來分析之。

2.3.2 極限平衡法

極限平衡法(Limit Equilibrium Method)基本假設：

1. 假設邊坡未破壞前時土體為剛體且無變形。
2. 破壞發生時為完全剪力破壞。
3. 沿破壞面均達塑性。
4. 破壞面上的每一點安全係數均相等。

極限平衡法分析步驟：

1. 先假設依最可能之滑動面。
2. 由作用於滑動體上所有力或力矩之靜力平衡，可算出滑動面上所受之剪力。
3. 以材料之強度與剪力相比較，可得此滑動面之安全係數。
4. 再假設另一可能之滑動面，重複步驟 1 到 4，而得另一安全係數，由步驟 1 到 4 反覆數次後，其中最小之安全係數，即為分析所欲得之值。

極限平衡法分為無限邊坡及有限邊坡穩定方法。若坡角一定且無限延伸滑動土體的厚度較坡高小很多時，是所謂的無限邊坡，此種破壞一般發生於許多土層均平行於坡面的邊坡、薄層風化表土覆蓋於堅

實土層、或岩盤上的情況。當滑動土體較厚坡高有限時，是為有限邊坡。常用分析方法如下：

1.圓弧分析法，此法適用於僅有凝聚力作用於滑動面之分析，亦即 $\phi=0$ (不排水之情況)。安全係數可由塊體之重量 W ，相對於圓心所產生之抵抗力矩，相平衡而得。

2.摩擦圓分析方法，此法也可以分析 $c-\phi$ 材料之邊坡。此法假設滑動面上作用力與摩擦圓相切，摩擦圓之圓心為滑動圓弧之圓心，半徑為 $R \sin\phi$ 。但嚴格說起來作用於滑動面之力並不恰與摩擦圓相切，而是與半徑為 $K R \sin\phi$ 之摩擦圓相切， K 為校正值，視滑動圓弧之夾角而定 (Taylor, 1948)。

3.對數螺線形分析法，為當土壤的摩擦角不等於零時，圓弧形破壞面上作用力之方向無法得知，若假設破壞面為對數螺線形，則可以解決此問題。因為此時破壞面上之作用力均通過螺線之中心，安全係數之求法與圓弧形之求法相同。

4.切片法。由於以上所述之圓弧形、對數螺線形及摩擦圓法適用於地層不複雜之狀況，若土壤為非均質，且考慮地勢變動、孔隙水壓力之分布等因素，則以切片法分析最適當。此方法是將滑動體分成許多個垂直片段；分段的地方，以有地勢變動之處，如坡頂、坡趾、或土層變化之處、水壓力不同之處等為佳。常用之切片法有：

Ordinary、Simplified Bishop、Simplified Janbu、Morgenstern and Price、Spencer、Corps of Engineers、Lowe-Karafiath、Janbu Generalized及Sarma等。各分析法將於下節概述。

2.3.3 切片分析法

工程設計與分析中慣用安全係數表示其是否發生破壞，極限平衡法安全係數之定義一般表示：

$$F.S. = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{容許剪力強度}}{\text{剪應力}} \quad (2.1)$$

邊坡破壞的發生，係當邊坡某一臨界面上，發生剪應力超過該土壤之抗剪強度時，即發生崩塌。而邊坡穩定分析即在核算破壞面上抗剪強度與剪應力關係，並由兩者之比值以安全係數(Factor of Safety)表示之。圖 2-9 與圖 2-10 分別為圓弧滑動面及人工設定滑動面邊坡穩定分析之各項作用力及各項變數示意圖。

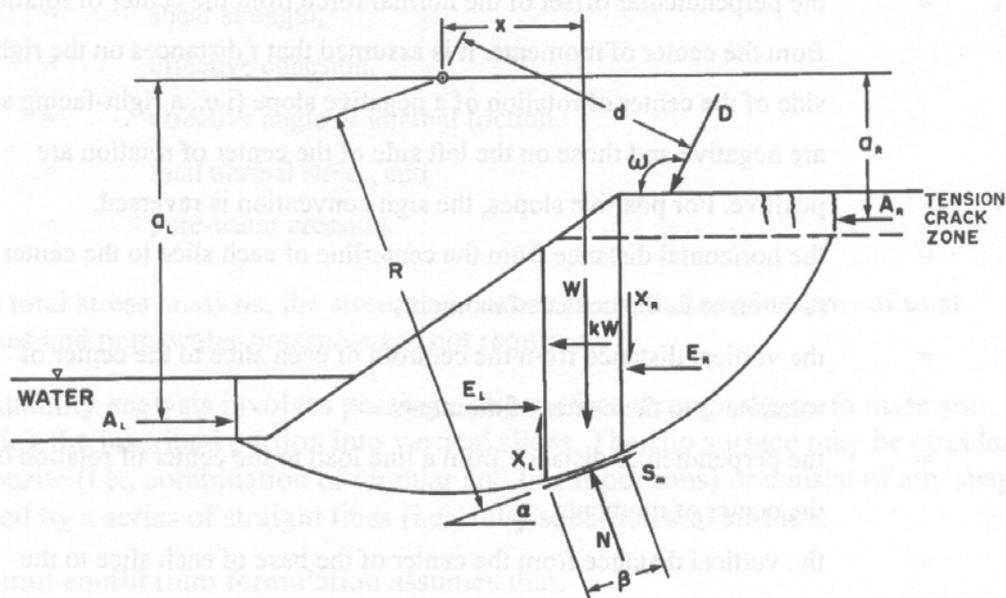


圖 2-9 圓弧滑動面每一切片之作用力

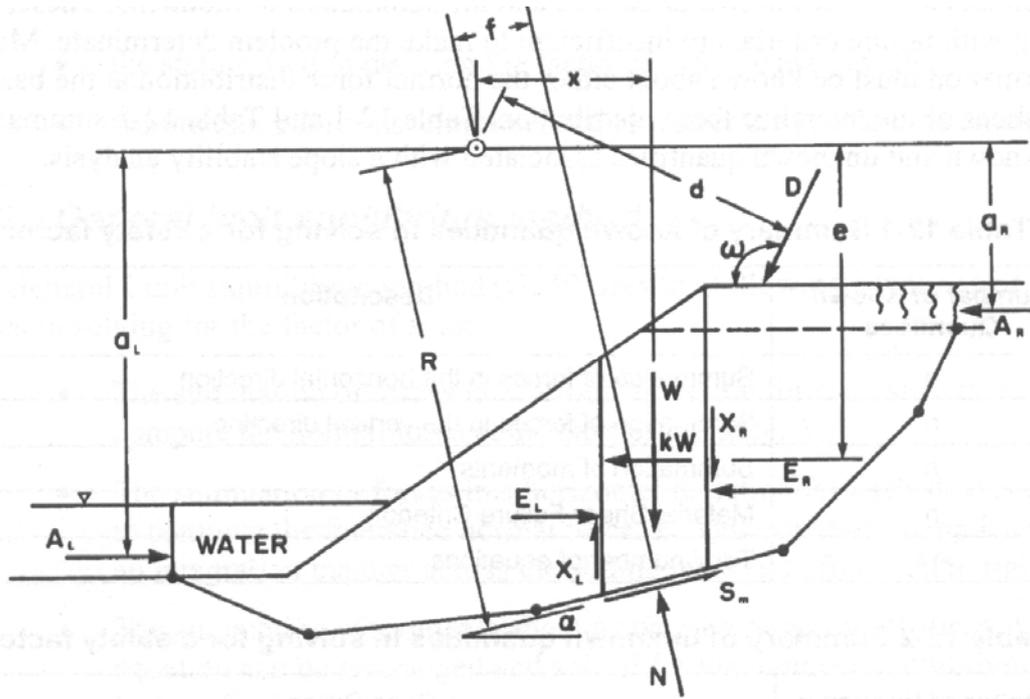


圖 2-10 人工設定滑動面每一切片之作用力

W = 寬度 b 高度 h 之切片總重量

N = 作用於切片底面之總正向力

S = 在每一個切片底面所啟動之剪力

E = 切片間水平正向作用力

X = 切片間垂直作用力

D = 外部線荷重

Kw = 通過切片重心之水平地震荷重

R = 圓弧滑動面之半徑或任何形狀滑動面與啟動剪力 S_m 相關之力臂

f = 由旋轉中心或力矩中心至切片底面正向作用力之垂直偏距

x = 切片中心線至旋轉中心或力矩中心之水平距離

e = 切片形心至旋轉中心或力矩中心之垂直距離

d = 線載重至力矩中心或旋轉中心之垂距

h = 切片底面中心至邊坡幾何最上方邊界線（一般為地表面）之垂直

距離

a = 外部水壓力至旋轉中心或力矩中心之垂直距離（下標 L 及 R 分別表示邊坡之左側或右側）

A = 水壓力之合力（下標 L 及 R 分別表示邊坡之左側或右側）

ω = 線載重與水平線之夾角，角度由 X 軸正向往逆時方向量測

α = 切片底面中心與水平線之夾角（符號規定：當 α 角之傾斜方向與邊坡方向相同時， α 角取為正值）

極限平衡方法為大地工程師在探討土壤邊坡穩定經常使用之方法，其中切片法因能適切地模擬邊坡之幾何形狀、土層之變異及水壓力狀況，因此成為較常用之方法(Terzaghi 與Peck, 1967)。採用切片法以進行邊坡穩定之分析已發展出甚多的方法，其中最主要之不同為：(a)用以求得安全係數之方程式；(b)為達成靜定解所作的假設(Fredlund,1975)。

此外Duncan (1996)對各種傳統邊坡穩定分析方法之計算精度與適用範圍作了以下之論述：

- 1.對各種邊坡穩定分析之圖表，在邊坡之幾何形狀、單位重、剪力強度及孔隙水壓力已知的情況下，可得到初步之結果，而其主要之限制在於這些圖表係針對實際情況作一些近似及簡化處理所發展而成。使用圖表法時其優點在於可以快速地獲取安全係數，通常可先使用這些圖表進行初步分析，最後再使用電腦程式進行校核。
- 2.一般切片法(the Ordinary Method of Slices, OMS)在平緩邊坡且具有高孔隙水壓力情況下，以有效應力分析其準確度不高，而在 $\phi = 0$ 之總應力分析中則較為準確。
- 3.除了遇到一些特別情況外，Bishop 簡化法在一般情況下都可得到合

宜之結果，其限制在於僅適用於圓弧滑動面以及某些情況下會遭遇數值分析問題。假使Bishop 簡化法計算所獲得之安全係數較一般切片法(OMS)為小，那麼可認定Bishop 簡化法中存在有數值問題，在此情況下，一般切片法(OMS)可得到較好之結果。基於此，較好的方法是同時以一般切片法(OMS)與Bishop 簡化法進行計算，並比較其安全係數值。

4.以靜力平衡方法計算所得之安全係數，其對所假設切片間作用力之傾角(inclination)極為敏感，不適當之假設將導致安全係數有嚴重的誤差。

5.滿足所有平衡條件的方法(如Janbu 法、Morgenstern and Price 法與Spencer 法)在任何情況下都是準確的，除非是遇到數值問題，這些方法計算所得之結果其誤差不超過12%，相對於一般認為是正確之答案其誤差也不會超過6%，而所有的這些方法在某些情況下也都存在有數值問題。

各切片分析法基本假設、方法特性、滿足的平衡條件及適用滑動面破壞形式如表 2-12 所示。

表 2- 12 切片法比較(1/2)(Duncan et al. 2005 , 周功台等人 2003)

方法名稱	破壞形式	假設條件概述	分析方法特性	力系平衡	力矩平衡
Fellenius's 或 Ordinary 法 (1927)	圓弧破壞	<ul style="list-style-type: none"> 切片內力大小相等，方向相反(即不考慮切片間之作用力) 	<ol style="list-style-type: none"> 因本方法係假設側力之合力作用方向，平行於每一個切片之底端，亦即作用於切片底端垂直方向之側力合力為零；故分解正應力垂直於底端且消除側力作用，可滿足整體之力矩平衡。總計為 1 個方程式與 1 個未知數 於高水位之平坦邊坡，其分析誤差甚大(50%) 方法簡便分析結果偏安全 		◎
Bishop 簡易法 (1955)	圓弧破壞	<ul style="list-style-type: none"> 不考慮切片間之垂直剪力(X) 	<ol style="list-style-type: none"> 圓弧破壞分析採用本分析法，在各種狀況下，皆得到較為正確之安全係數，且其數值較為穩定(<10%) 在破壞面屬於較深層滑動之破壞圓時，因破壞面兩端接近垂直面，分析之收斂較為困難，惟現今之電腦處理較快，可克服此項問題 N+1 個方程式及未知數 		◎
Janbu 簡易法 (1956)	不規則形狀破壞 (含圓弧破壞)	<ul style="list-style-type: none"> 切片間之剪力為 0 設 $\sum(E_L - E_R) = 0$，即設總水平力為 0 安全係數需乘以一修正係數 	<ol style="list-style-type: none"> 破壞面可為任意形狀。 安全係數相當低於其他嚴謹法。 2N 個方程式及未知數 	◎	
Janbu 嚴謹法 (1956)	不規則形狀破壞 (含圓弧破壞)	<ul style="list-style-type: none"> 考慮切片間剪力，但於求起始安全係數時，先設剪力為 0，再反覆計算安全係數 定義切片間作用力之作用線(Thrus Line)反覆運算，求得安全係數 	<ol style="list-style-type: none"> 分析數值較不穩定，常有不易分斂之情形 分析結果與 Spencer 及 Morgenstern-Price法接近 3N個方程式及未知數 	◎	◎
Spencer (19567)	不規則形狀破壞 (含圓弧破壞)	<ul style="list-style-type: none"> 切片內力之合力傾角 θ 為定值(即 $X/E=\tan\theta$) 假定某一 θ 值，求得 F_m 及 F_f，當 $F_m=F_f$ 時即為安全係數 	<ol style="list-style-type: none"> 數值最穩定之分析法 Morgenstern-Price法中 $f(x)$ 函數為 1 時，則分析方法與本法相同 切片側力之合力傾角 θ 值，對力矩平衡求出之 FS 值影響不大 若 $\theta=0$ 時，與 Bishop 法分析模式相同 3N 個方程式及未知數 	◎	◎

表 2-12 切片法比較(2/2 續) (Duncan et al. 2005, 周功台等人 2003, TRB 1996)

Morgenstern-Price (1965)	不規則形狀破壞(含圓弧破壞)	<ul style="list-style-type: none"> 考慮切片間之垂直與水平力為一函數關係即 $X/E=\lambda f(x)$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1.本切片法適用性最廣 2.切片內力隨 $f(x)$ 函數之改變而變化,並經反覆運算,直至合理之應力分布為止 3.實際分析所得安全係數並不隨 $f(x)$ 函數的改變而有太大的變化,故實用上而言,使用本法分析較為費時若不須求取較精確之分析結果,採用本法並非屬必要 4.3N 個方程式及未知數 	◎	◎
Corps of Engineers #1 (1970)	不規則形狀破壞	<ul style="list-style-type: none"> 切片間合力方向呈一平均斜度此斜度,等於滑動面於坡頂入口及坡趾出口處地表坡度之平均值 	<ol style="list-style-type: none"> 1.安全係數計算對側力 E 與 X 傾斜程度相當靈敏。側力的合力方向從 0 度變化到 21.8 度時(與水平方向夾角), FS 變化達 25% 	◎	
Corps of Engineers's modified Swedish (1970)	不規則形狀破壞	<ul style="list-style-type: none"> 切片間之合力方向隨著邊坡地表坡度而改變 	<ol style="list-style-type: none"> 2. FS 會大於其他較嚴謹的方法,因此所求得的 FS 不太合理 3.2N 個方程式及未知數 	◎	
Lowe-Karafiath (1959)	不規則形狀破壞	<ul style="list-style-type: none"> 切片側力與合力作用方向,等於斜坡坡面與剪力破壞面坡度之平均值 	<ol style="list-style-type: none"> 1.安全係數計算對側力 E 與 X 傾斜程度相當靈敏,故若為 $\phi > 0$ 之土壤,使用本法較為合理,若 $\phi = 0$ 之土壤,則 FS 值將顯得較高(10%~15%),本法主要應用於分析具有心牆之土石壩於洩降時之斜坡穩定問題 2.2N 個方程式及未知數 	◎	
Sarma (1973)	不規則形狀破壞(含圓弧破壞)	<ul style="list-style-type: none"> 考慮切片間之垂直與水平力關係類似 Mohr-Coulomb 剪力強度方程式(即為 $X=\lambda f(x)S_v$; $S_v=c_h+E\tan\phi$) 分析時需先給定材料本身 c、ϕ 	<ol style="list-style-type: none"> 1.本法是考慮地震係數造成邊坡破壞時,最簡單的分析法 2.對於一般簡單邊坡,其側向力假設是最困難的 3.3N 個方程式及未知數 	◎	◎

2.3.4 切片間之作用力

切片間之剪力 X 之設定主要用於計算切片底部滑動面上所需要之正向力 N 根據經驗方程式(Morgenstern and Price, 1965) X 值可表為切片間正向力 E 之某一百分比如

$$X = \lambda f(x)E \quad (2.2)$$

其中 $\lambda = f(x)$ 函數使用百分比(權重)

$f(x)$ = 切片間之力函數(interslice force function)間以決定垂

直剪力相 X 與水平正向力 E 之合力之相對方向(作用方向)

依上述公式各家學者再依研究成果提出各種切片間之剪力函數

$f(x)$ 以便計算 X 與 E 之關係值如圖 2-11 所示

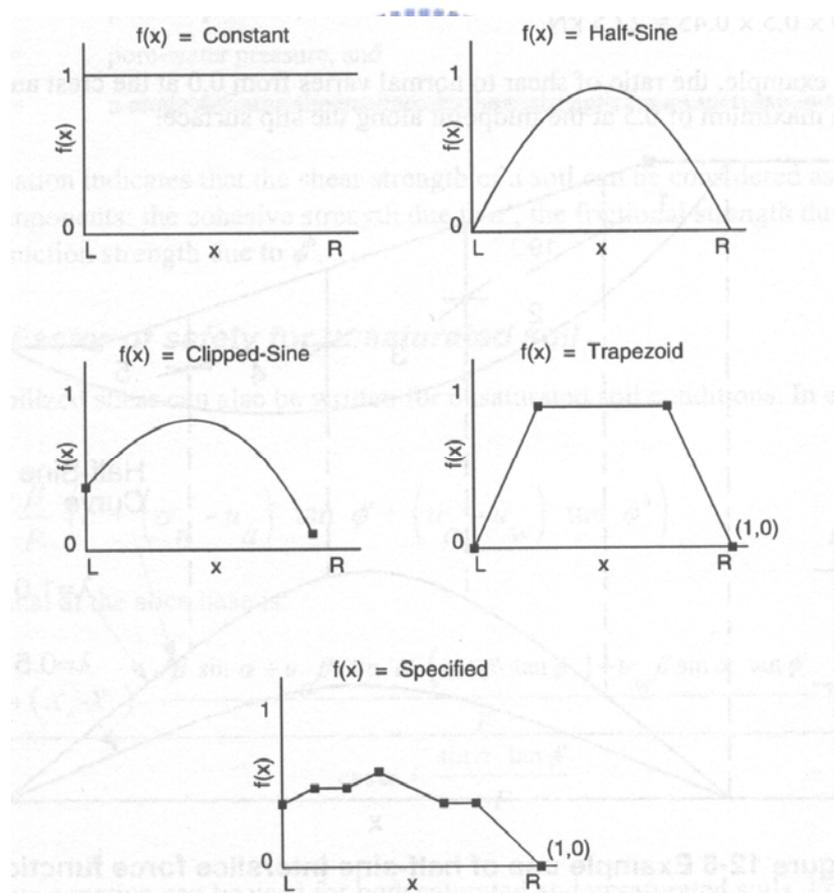


圖 2- 11 各種切片間之剪力函數 $f(x)$

1. 美國陸軍工兵團所採用的切片間作用力

對於整個邊坡本法只滿足力平衡，並對切片間之力函數做下列假設：

假設 1: 假設切片間之合力方向呈一平均斜度，此斜度等於滑動面於坡頂入口及坡趾出口處地表坡度之平均值。

假設 2: 假設切片間之合力方向隨著切片所在位置之邊坡地表坡度而變化。

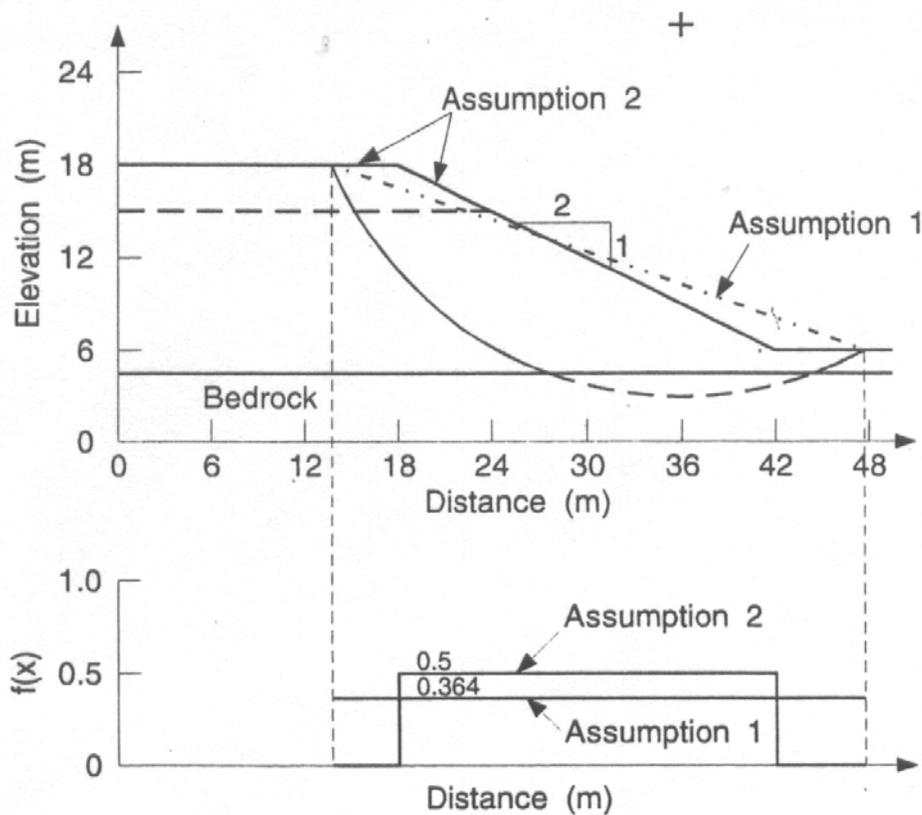


圖 2-12 美國陸軍工兵團所建議的切片間作用力函數(林卓倫，2004)

2. Lowe-Karafiath 所採用之切片間作用力

此方法只滿足力平衡，如圖 2-13 所示，對於切片間之力函數做了下列假設：即切片間合作用力之方向為該切片所在位置、邊坡地表坡度與滑動面坡度之平均值。

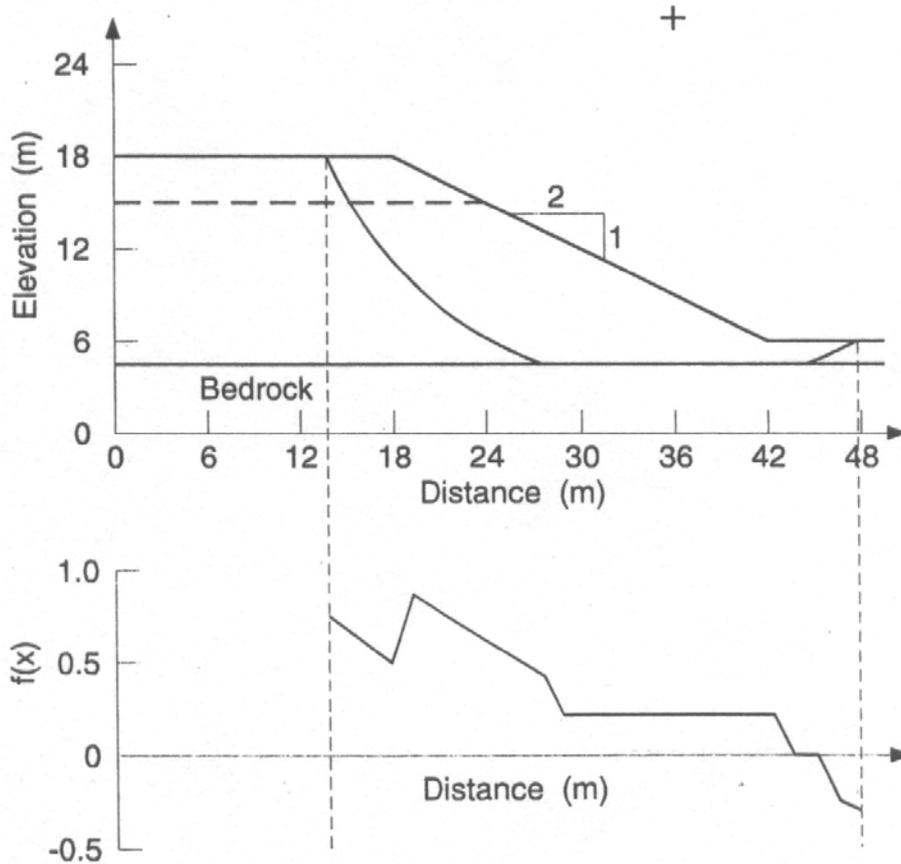


圖 2- 13 Lowe-Karafiath 所建議的切片間作用力函數(林卓倫，2004)

2.4 邊坡穩定分析程式介紹

計算機應用在邊坡穩定分析肇始於1950年代，一般使用的邊坡穩定分析軟體非常多，其中較著名且被廣泛使用的極限平衡法程式有：STABL、UTEXAS4、SLOPE/W、TALREN 97、CLARA等。

每一個程式的發展均有其特定的需求、限制及過程，因此在功能上也必然有所不同。將分別簡單介紹各軟體的功能及特色，如表2-13~表2-17所示。另外，Pockoski and Duncan (2000)的研究報告，針對各種UTEXAS4、SLOPE/W、SLIDE、XSTABL、WINSTABL、RSS、SNAIL及GoldNAIL等分析軟體，以11個假設案例探討，求得安全係數之差異，並比較各程式的特色同時作出評分表提供工程界參考，如表2-18~2-19所示。

表 2- 13 STABLPRO for Windows 程式之功能及特色(堅尼士，2007)

程式名稱	STABLPRO for Windows
版次及年份	2.0 (1999)
作者及研發單位	Ensoft
主要運算功能	1.以 STABL 4/4M 為基礎所發展出之 Window 版邊坡穩定分析程式。 2.本程式特點乃將原先 STABL4/4M 以指令方式輸入法改為對話交談式視窗顯示法，可在視窗上直接鍵入資料並立即顯示修改內容。 3.1999 年 7 月新加入 STABL6M 為計算核心，且增加剖面即時檢測功能。
使用單位制	1.公制 2.英制
基本理論依據	以極限平衡法計算土壤邊坡之安全係數，包括：Bishop 簡化法、Janbu 簡化法、Spencer 法等。
輸入方式	1. 視窗方式輸入所需資料
輸出結果	1. 在螢幕上直接繪出計算結果之圖形

表 2- 14 UTEXAS4 程式之功能及特色(Pockoski and Duncan，2000)

程式名稱	UTEXAS4
版次及年份	4.0.0.6 (2000)
作者及研發單位	Stephen G. Wright
主要運算功能	1.功能強大的邊坡穩定前後處理程式，可精確的分析 2D 之邊坡穩定問題。 2.可搜尋圓形及非圓形破壞面
使用單位制	1.公制 2.英制
基本理論依據	極限平衡法： Bishop 簡化法、Janbu 簡化法、Spencer 法、Army Corps of Engineers' Modified Swedish 法、Lowe-Karafiath 法等。
輸入方式	1. 必須 Keyin 輸入檔，沒有圖形界面
輸出結果	1. 在螢幕上直接繪出計算結果之圖形並顯示出臨界圓的細部資料 2. 搭配 TEXGRAF4 使用，可靈活運用圖形顯示界面，例如畫出安全係數等高線或輸出成 CAD 圖檔

表 2- 15 SLOPE/W 之功能及特色(堅尼士，2007)

程式名稱	SLOPE/W
版次及年份	2004(2004)
作者及研發單位	Fredlund ,Geo-Slope Inc. , Canada
主要運算功能	<ol style="list-style-type: none"> 1.土層部份可考慮(a)多層 (b)部份飽和 (c)不連續分布以及 (d)乾或濕之張裂縫 2.滑動面之形狀包括：(a)自訂圓心、半徑或滑動面 (b)複合形狀 (c)折線 3.孔隙水壓條件輸入包括：(a)孔隙水壓係數 (b)水位線 (c)孔隙水壓等值線 (d)SEEP/W 計算值 4.材料模型包括：(a)莫耳-庫侖模型 (b)雙直線應力應變關係 (c)不飽和土壤強度 (d)非等向性強度 (c)曲線應力應變關係 5.外載重型式：(a)回填超載 (b)集中荷重 (c)錨碇力 (d)加勁力 (e)振動及地震力 6.繪圖功能：(a)採用類似 CAD 交叉之功能繪出邊坡穩定之剖面及著色，並顯示各切片之作用力 (b)可能滑動面彎矩旋轉中心之 FS.等值線 7.應用範圍：(a)自然土/石坡 (b)斜坡開挖 (c)土堤 (d)錨碇擋土結構之邊坡穩定問題 8.可能性分析：不需侷限於機率分析的正規分布參數。每個參數現下能有它自己的分發 9.敏感性分析：由參數的選取變化了解安全係數變化的敏感度。 10.可自動定位張力裂縫深度。
使用單位制	1.公制 2.英制
基本理論依據	以極限平衡法計算土壤(或岩石)邊坡之安全係數，包括：一般法、Fellenius 法、Bishop 簡化法、Janbu 簡化法、Spencer 法、Morgenstern-Price 法、Corps of Engineers 法、Lowe-Karafiath 法、GLE(General Limit Equilibrium)法、Sarma 法等
輸入方式	<ol style="list-style-type: none"> 1.以滑鼠直接在螢幕上輸入點位 2.以 SEEP/W、SIGMA/W 之計算結果直接輸入
輸出結果	<ol style="list-style-type: none"> 1.各切片自由體圖和非關鍵性滑動面的各種圖表及計算資料輸出 2.圖形為 WYSWYG 模式，所見即所得(What You See; What You Get)-顯示圓弧滑動面、指定破壞面、擋土結構及載重輸出 3.分析結果可顯示安全係數等高線及安全地圖

表 2- 16 TALREN 97 程式之功能及特色(堅尼士，2007)

程式名稱	TALREN 97
版次及年份	1.01 (1998)
作者及研發單位	Terrasol Geotechnical Consultants
主要運算功能	<ol style="list-style-type: none"> 1.工程應用可分析自然邊坡、土壩、堤岸及挖填邊坡於平時及地震之極限平衡安全穩定問題 2.可考慮之擋土結構型態：地錨、土（岩）釘、基樁或微形樁、壓力支撐構材、土工合成（或金屬）加勁材 3.可分析圓弧及平面型滑動模式之安全係數 4.土（岩）釘、微形樁（或基樁）之破壞模式可為：抗拉、抗剪及抗彎 5.多種邊坡幾何設計、水位面設定方式 6.土壤及結構桿件之力學性質可考慮以部份安全係數（Partial safety factor）予以折減 7.可考慮不同擋土結構型態同時作用之安全穩定分析 8.可於水位面設定後考慮額外之水壓力作用 9.可考慮外加均佈載重、集中載重及彎矩於邊坡安全穩定係數之計算，其中集中載重可考慮作用面的寬度及分布角度
使用單位制	SI 制
基本理論依據	極限平衡法
輸入方式	視窗交談式
輸出結果	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報表 2. 圖形為 WYSWYG 模式，所見即所得(What You See; What You Get)-顯示圓弧滑動面、指定破壞面、擋土結構及載重，可選擇彩色及單色輸出

表 2- 17 CLARA 程式之功能及特色(堅尼士，2007)

程式名稱	CLARA
版次及年份	2.31(1988)
作者及研發單位	Oldrich Hungr O. Hungr Geotechnical Research Inc., Canada
主要運算功能	<ol style="list-style-type: none"> 1.提供三種方法，產生一般式軸對稱之幾何形狀網格 2.交談式螢幕具自動編輯及檢核功能 3.不當滑動面及條件之警示功能 4.三種材料模型：(a)Coulomb 等向性材料(b)Coulomb 不等向性材料(c)Hoek & Brown 非線性材料 5.節理面或弱面兩側可具有不同強度及水力條件 6.水壓輸入方式：(a)孔隙水壓比 r_u(b)直接輸入壓力水頭 7.滑動面形狀：(a)橢圓面(b)球面(c)柱狀(d)複合形(e)多面楔形(f)非旋轉滑動面 8.可自三維輸入資料中進行二維分析 9.可考慮：外加點荷重、張力裂縫、水平地震加速度 10.可選擇由螢幕、繪圖機、印表機輸出縱、橫剖面、三維及柵欄圖，其中三維之圖形可旋轉，並可以標準 Auto Cad 圖檔儲存 11.五種解題模式：(a)單一滑動面分析 (b)臨界滑動面分析(單一網格) (c)臨界滑動面分析(任意) (d)多平面楔形滑動分析 (e)任意形狀滑動面分析 12.錯誤訊息說明
使用單位制	1.公制 2.英制 3.SI 制（由輸入之水平單位重數值控制）
基本理論依據	<ol style="list-style-type: none"> 1.2D & 3D 之 Bishop's Simplified Method of Silces 2.其他分析方法：Janbu、Spencer、Morgenstern-Price。
輸入方式	<ol style="list-style-type: none"> 1.螢幕交談式 2.批次擋
輸出結果	<ol style="list-style-type: none"> 1.滑動面之面積，柱體號碼、體積、重量 2.地震力、水作用力、不平衡力 3.安全係數

表 2- 18 各邊坡穩定分析程式特色整理(Pockoski and Duncan , 2000)

	UTEXAS4	SLOPE/W	SLIDE	XSTABL	WINSTABL	RSS	SNAIL	GoldNail
Vertical Walls?	yes	no	yes	no	no	no	yes	no
Tension Crack Option?	yes	yes	yes	yes	no	no	no	no
Search Below Toe?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no
Graphics During Input?	no	yes	yes	yes	yes	yes	no	yes
Seismic Option?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Error Checking?	yes	yes	yes	yes	no	yes	Only Water Table	no
On Screen Help?	yes	yes	yes	yes	no	yes	yes	yes
# of Soil Types?	infinite	infinite	500	20	infinite	128	7	13
Slope Face Direction?	Right or Left	Right or Left	Right or Left	Right or Left	Lift Only	Lift Only	Lift Only	Lift Only
Distributed Loads?	Tangential and Normal	Vertical and Normal	Horizontal, Vertical, or Normal	Horizontal or Vertical	Horizontal or Vertical	Horizontal, or Vertical	Vertical	Horizontal or Vertical
Line Loads?	Horizontal and Vertical Components, or Magnitude and Direction	Magnitude and Direction	Normal or Horizontal and Vertical Components, or Magnitude and Direction	Use Distributed Load Option, Magnitude and Direction	Use Distributed Load Option, Magnitude and Direction	Use Distributed Load Option, Magnitude and Direction	none	none
Circular Search?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no	yes
Non-circular Search?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no
Composite (circular-noncircular) Search	no	yes	yes	no	no	no	no	no
Piezometric or Phreatic Surface?	Piezometric	Piezometric	Either	Either	Phreatic	Piezometric	Either	Piezometric
Coordinate System	First Quadrant	First Quadrant	First Quadrant	First Quadrant	First Quadrant	First Quadrant	First Quadrant	Fourth Quadrant
Negative Coordinates Allowed?	yes	yes	yes	no	yes	no	yes	yes
More than one Piezometric or Phreatic Surface?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no	no
Axes on output?	Numbers without units	Numbers with units	Numbers with units	Numbers with units	Numbers without units	Numbers with units	no	Numbers with units
Plot F Contours?	yes in TexGraf4	yes	yes	no	no	no	no	no
Ways to Model Strength	*Mohr-Coulomb C-Phi *Su=Linear increase below profile line *Su=Linear increase below datum *Constant c/p *Anisotropic Strength *Nonlinear, Curved Envelope *Su grid interpolation *Two-Stage Linear *Two-Stage Nonlinear *Very Strong	*Mohr-Coulomb C-Phi *Undrained *No Strong *Very Strong (bedrock) *Bi-linear Envelope *Su= Function of Depth *Su= Function of Overburden *Su= Function of Datum Reference *Anisotropic Strength *User-defined Normal Stress Function (Isotropic and Anisotropic)	*Mohr-Coulomb C-Phi *Undrained *No Strong *Very Strong *Infinite Strength *Anisotropic Strength *User-defined shear-Normal Stress Function *Su= Function of Depth *Su= Function of Datum Reference *Hoek-Brown *Gen. Hoek-Brown	*Mohr-Coulomb C-Phi *Su= Function of s/v *Bi-linear Envelope (Each may be Isotropic or Anisotropic)	*Mohr-Coulomb C-Phi (Isotropic and Anisotropic)	*Mohr-Coulomb C-Phi	*Mohr-Coulomb C-Phi	*Mohr-Coulomb C-Phi *Bi-linear Envelope
Ways to Input Pore Water Pressure	*Constant *Constant r_u *Piezometric Line *Interpolation from grid *Interpolation of r_u from grid *Negative Allowed	*Piezometric Line * r_u Coefficients * r_u Contours *Heads *Finite Element Grid of Pressures	*Phreatic Surfaces *Piezometric Surfaces * r_u Coefficients *Grid of Total Head *Grid of Pressure Head *Grid of Pore Pressure	*Phreatic Surfaces *Piezometric Surfaces * Pore Pressure Grid * r_u Coefficients *Constant	*Phreatic/Piezometric Average * r_u Coefficients *Pressure Head	Piezometric Surfaces	Phreatic or Piezometric Surface	Piezometric Surfaces

表 2- 19 各邊坡穩定分析程式評分表(Pockoski and Duncan , 2000)

	UTEXAS4	SLOPE/W	SLIDE	XSTABL	WINSTABL	RSS	SNAIL	GoldNail
Accuracy	5	4.5	4.5	4	3.5	4	2	4
Program Computation Time	5	5	5	5	4(1*)	4	2	4
Time to Enter Data & Complete Analysis	3	5	5	4	3.5	3.5	3	3.5
Ease of Reinforced Slope Design	3	5	5	4.5	4	3.5	3	2.5
Ease of Unreinforced Slope Data Design	1.5	2.5	2.5	5-initial only-no final design capabilities	3	5-horizontal reinforcement only	4	5
Ease of Soil Nail Data Entry	3.5	5	5	4	3.5	3	3	3.5
Ease of Tieback Data Entry	2.5	3.5	3.5	NoProvision for Reinforcement	3.5	5-horizontal reinforcement only	5	4.5
Ease of Geogrid Data Entry	2.5	5	5	NoProvision for Reinforcement	4	5-horizontal reinforcement only	3	3.5
Slope Face Direction?	2.5	3.5	3.5	NoProvision for Reinforcement	4.5	5	3	3.5
Time Req'd to Make Output Report Ready	4	5	5	3	2	3	3	1
Quality of Graphical Output	4	5	5	3	2	3	3	1

*In WINSTABL , Spencer's Method has a computation time of up to several minutes.

1-Poor 2-Fair 3-Average 4-Good 5-Excellent

第三章 研究方法

本章節主要說明本研究之研究方法，主要內容可分為四大部份：
(1)研究流程(2)邊坡穩定分析架構(3)分析工具 SLOPE/W 程式介紹 (4)
研究分析的方法。

邊坡穩定分析架構主要說明基本斷面的建立及廢棄物及各材料參數的輸入假設原則。另外，簡單介紹 SLOPE/W 程式的沿革、運算功能跟特色，以及程式分析執行的流程與步驟。最後說明研究分析方法如何進行，包括破壞面搜尋形式及切片分析法之適用性探討，以及一階、二階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析(參數變異性分析)。

3.1 研究流程

掩埋場底部因地工膜布與相接觸之材料間的界面剪力強度頗低，形成最易發生滑動的弱面，因此本研究以掩埋場底部弱面破壞為對象，利用二維極限平衡邊坡穩定分析法，探討山坡地掩埋場幾何設計參數安全係數之關係。

研究方法採用邊坡穩定分析程式 SLOPE/W，首先以程式內建的五種破壞面搜尋形式探討各切片分析法之適用性，以決定後續參數變異性分析進行的搜尋方式及分析法，再針對下列掩埋場穩定設計因子：掩埋面坡高(H)、掩埋場底部長度(L)、背靠邊坡之平台寬度(B)、掩埋場底部邊坡角度(α)、掩埋面邊坡角度(β)、廢棄物剪力強度(c 、 ϕ)、地工合成材料界面剪力強度(c_a 、 δ_a)，進行一階與二階等一系列組合的參數變異性分析。同時探討考慮地震力作用下，地工合成材料界面剪力強度(c_a 、 δ_a)，參數變異性分析。詳細分析流程如圖 3-1 所示。

分析步驟首先建立一階、二階廢棄物掩埋場標準斷面，再以二階為例，檢視各種破壞面搜尋形式及各切片分析法之適用性，再分別探

討沿界面滑動及淺層滑動破壞模式之各參數變異性分析，將兩者分析結果進行比較。另外，考慮地震力作用下，一階及二階廢棄物掩埋場之界面剪力強度參數變異性分析。最後提出結論與建議。



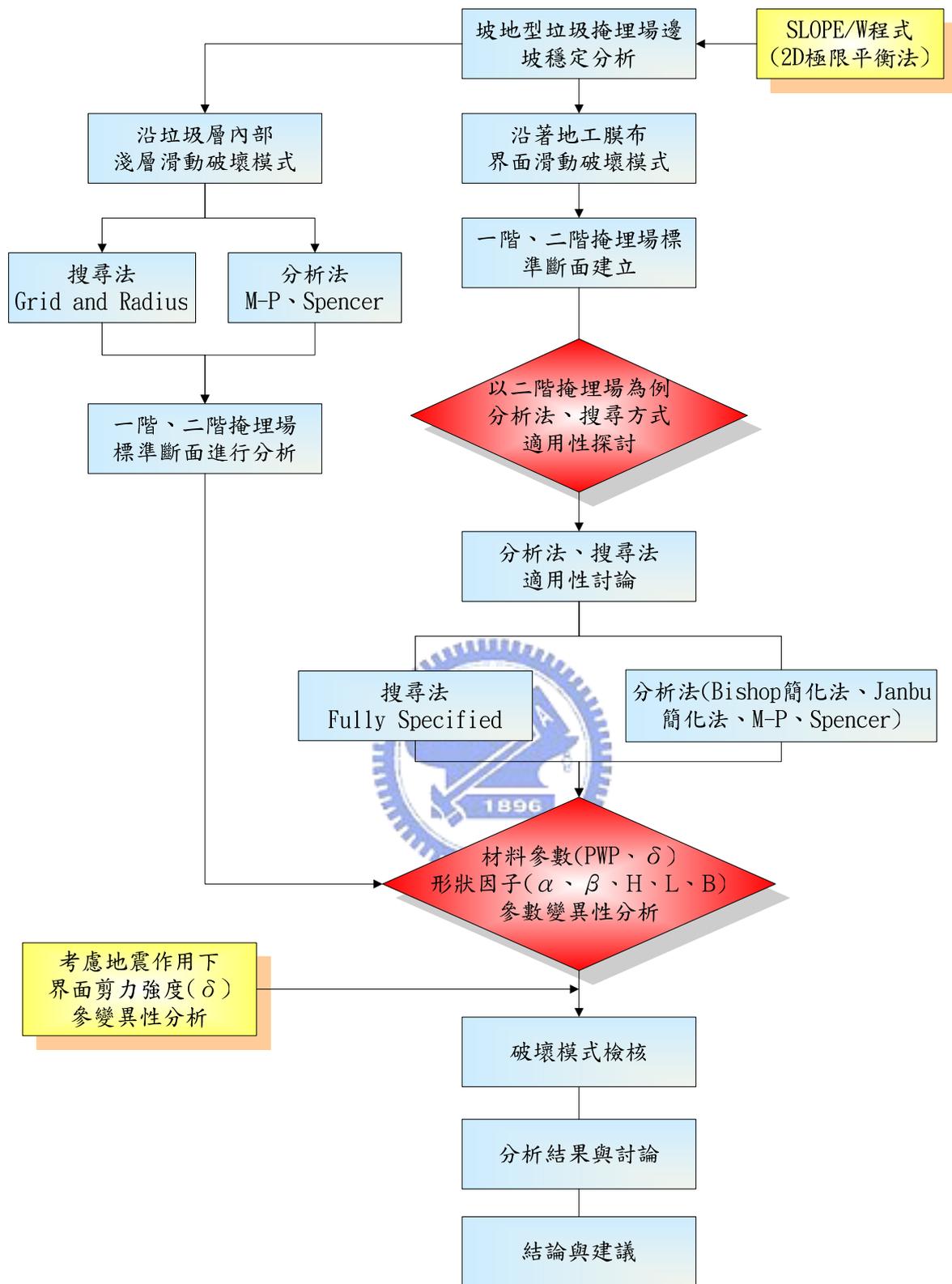


圖 3- 1 分析流程圖

3.2 邊坡穩定分析架構

一、基本斷面幾何模式建立

一般掩埋場堆置沒有設置平台者定義為「一階」掩埋場，當掩埋場之填埋較高而區分為兩個台階時，此處定義為「二階」掩埋場。

邊坡分析幾何模式建立，將掩埋場土層分為三層，最上層為填埋的垃圾層，最下層為掩埋場基礎土壤，上下層以土工合成材加以分隔，做為阻水襯墊層，為了簡化分析，將土工合成材視為一個薄的弱層，其厚度考慮掩埋場現場開挖整地時，地面不可能完全平整，地勢會有所起伏，且襯墊層施工鋪設時，也未必會完全平整，所以假設土工合成材界面層厚度為 0.1 m。另外，掩埋場基礎土壤假設為不穿透岩層或軟岩層進行分析。



二、廢棄物性質及各材料參數

由於目前台灣的掩埋場設計之時大多未曾做過詳盡之邊坡穩定分析，且國內垃圾強度參數資料也不甚健全，所以建立垃圾本土化參數及分析案列為當務之急。所以材料參數採用本土化參數，根據蒐集的文獻及范佐憲(2007)現場試驗結果，進行各參數的假設。

三、考慮地震力作用

一般使用邊坡穩定分析應用軟體時，地震係數之大小，均以民國八十八年十二月廿九日修正之「建築技術規則建築構造編耐震設計規範與解說」有關台灣地區震區劃分（台灣地區之震區劃分由四個震區修正為二個震區：地震甲區及地震乙區）。

調整後地震甲區和乙區的震力係數分別為0.33 和0.23，所謂的震

區水平加速度「震力係數」，係代表建築物工址所屬震區在475年回歸期的地震地表加速度，其單位為重力加速度 g 。分析演算時依垃圾場址所處位置，認定為甲區或乙區後，取該區之震力係數，填入動態分析欄位中，一般動態分析時震力係數，須區分為水平力及垂直力，定義時通常水平力取震力係數甲區取0.33或乙區取0.23，而垂直力約取水平力之一半，震力係數分別為甲區取0.165或乙區取0.115。

本研究目的乃在探討參數變異性，並非案例分析，所以分別針對一階及二階掩埋場標準斷面進行分析，考慮水平地震力係數0.33 g 、0.23 g ；垂直地震力係數0.165 g 、0.115 g ，探討界面剪力強度之參數變異性。

3.3 SLOPE/W 分析程式

3.3.1 分析程式簡介

一、程式沿革

GEO-SLOPE 公司總部設於加拿大亞伯達省，自1977年起即開始發展並行銷地工電腦軟體。早期推出之SLOPE-II係用於大電腦之邊坡穩定分析套裝程式，隨著80年代早期IBM PC的發展及普及，SLOPE-II也被改寫成可在IBM PC上執行的PC-SLOPE；此時期，該公司其他以PC為主之FEM程式，如PC-SEEP及PC-SIGMA亦陸續發展行銷，惟尚不具有Window版上將有之CAD繪圖功能。迨至90年代，該公司所有產品重新改成可在微軟視窗作業環境下執行之版本，如SLOPE/W、SEEP/W、SIGMA/W、QUAKE/W、CTRAN/W及TEMP/W等。2004年推出最新版本，將上述軟體統整為GeoStudio2004系列，各軟體介面可彼此相互支援。目前該公司之軟體已行銷全球六大洲，超過五十個國家(堅尼士，2007)。



二、程式基礎理論及特性

本論文採用最新的版本 SLOPE/W 2004 進行分析。SLOPE/W 程式其理論係依據極限平衡法處理一般邊坡穩定分析問題，以切片法進行土壤(或岩石) 邊坡之分析與安全係數計算，切片法乃簡化問題為靜力狀態，將滑動面分成許多個垂直片段，利用力與力矩之平衡求得臨界安全係數。此軟體可計算圓弧、不規則形、複合型狀及平面滑動破壞之邊坡安全係數。使用的分析方法有 Ordinary 法、Bishop 簡化法、Janbu 簡化法、Spencer 法、Morgenstern-Price 法、Corps of Engineers 法、Lowe-Karafiath 法、Janbu 廣義法、Sarma 法及 GLE(General Limit Equilibrium)法等。破壞面搜尋形式共有五種，包括：完全人為設定破壞面(Fully Specified)、區塊搜尋法(Block Specified)、圓心及半徑搜尋(Grid and Radius)、指定滑動面起始與離開區域(Entry and Exit)及自動搜尋(Auto Locate)等。輸入方式有兩種，包括以滑鼠直接在螢幕上輸入點位或以 SEEP/W、SIGMA/W 之計算結果直接輸入。SLOPE/W 程式擁有強大的人性化圖形界面，繪圖功能採用類似 CAD 交叉之功能繪出邊坡穩定之剖面及著色，同時可顯示任意滑動面切片的計算並展示，亦可觀看自由體圖和非關鍵性滑動面的各種圖表。另外可以顯示臨界滑動面彎矩旋轉中心之安全係數等值線；或選擇顯示「安全地圖」，可展示全部滑動面的彩色「安全地圖」，可觀看與全部分析有關的關鍵滑動面位置。安全地圖的每個顏色區域描述多種計算得到的安全係數。AUTOCAD 所繪之圖面可直接匯入使用。動態標籤，可將輸入的參數顯示出來，並隨著輸入變更而變更顯示；另外可加入註解用之標籤(堅尼士，2007)。

3.3.2 程式主要運算功能及實務應用

一、主要運算功能

SLOPE/W 程式進行邊坡穩定分析時，可採用的方法有三種，簡述如下，本研究採用極限平衡法進行分析。

1. 通用極限平衡法(General Limit Equilibrium Method,GLE):所有一般所採用之切片法可視為 GLE 的特殊狀況。
2. 有限元素應力法(Finite Element Method,FEM):本法利用有限元素應力分析求得之土體應力狀態來計算邊坡之穩定安全係數。
3. 蒙地卡羅法(Monte Carlo Method,MCE):利用 MCE 機率理論來分析邊坡之穩定性。

主要運算功能及特色功能說明如后。土層部份可考慮多層、部份飽和、不連續分布以及乾或濕之張裂縫。滑動面之形狀包括自訂圓心、半徑或滑動面、複合形狀及折線。孔隙水壓條件輸入包括孔隙水壓係數、水位線、孔隙水壓等值線及 SEEP/W 計算值。材料模型可使用莫耳-庫倫模型、雙直線應力應變關係、不飽和土壤強度、非等向性強度、曲線應力應變關係及 Hoek-Brown 破壞準則。加勁支撐形式包含地錨、土工織物、土釘、岩栓，不同參數可用於任一加勁形式；材料參數有材料安全係數、結合力之安全係數、間距、結合直徑、表面摩擦力，以及加勁後的安全係數估算值；土工織物的抗連結係數可由過載重及土壤-織物間的連結力及摩擦角估計之。外載重型式有回填超載、集中荷重、錨碇力、加勁力、振動及地震力。可能性分析，每個參數有它自己的分發，包括正規分布、Lognormal、Uniform 和 Triangular，亦能使用功能鍵指定你需要的形狀。切片表面允許改變不同點位的材料性質。敏感性分析，由參數的選取變化了解安全係數

變化的敏感度。

二、程式實務應用

SLOPE/W 用在邊坡穩定分析時，其功能極大可分析非均質土層、複雜性層次之土層、各種幾何形狀之滑動面和各種不同孔隙水壓力分布情況。應用範圍包括自然土/石坡、斜坡開挖、土堤及錨碇擋土結構之邊坡穩定問題。

3.3.3 SLOPE/W 程式執行步驟

SLOPE/W 分析邊坡穩定之分析流程圖，如圖 3-2 所示。其分析步驟簡述如下：

步驟一 決定基本資料

1. 設定頁面大小
2. 選擇單位及比例尺(圖 3-3)
3. 標示座標軸



步驟二 材料參數的輸入

1. 決定土層種類
2. 決定強度模式
3. 輸入材料單位重(γ)、強度參數(c 、 ϕ)，如圖 3-4 所示

步驟三 邊坡剖面形狀輸入

1. 利用格點、鎖點功能直接繪出邊坡形狀(圖 3-5)
2. 直接繪出土層分布

步驟四 選擇分析方法

- 1.選擇分析方法，共有 11 種分析法可以選擇(圖 3-6)
- 2.決定側邊力函數分布型態，當分析法採用 Morgenstern-Price 或 GLE 時需給定側邊力函數之分布型態，其型態有下列五種：
 - a.定值函數(Constant function)
 - b.半正弦函數(Half-sine function)
 - c.縮減正弦函數(Clipped-sine function)
 - d.梯形函數(Trapezoidal function)
 - e.人為設定函數(Fully function)

步驟五 選擇破壞面搜尋方式(圖 3-7)

- 1.選擇破壞面搜尋方式，共有 5 種搜尋法可以使用
- 2.依預計破壞面形狀給定搜尋範圍或給定破壞面
 - a.完全人為設定破壞面(Fully Specified)：給定破壞面
 - b.區塊搜尋法(Block Specified):給定區塊位置及網格數
 - c.圓心及半徑搜尋(Grid and Radius):給定半徑網格數及半徑線數
 - d.指定滑動面起始與離開區域(Entry and Exit):沿著地面線給定滑動範圍
 - e.自動搜尋(Auto Locate):無須任何設定
- 3.調整容許安全係數誤差值(圖 3-8)

步驟六 顯示分析結果及相關資訊

- 1.顯示最小安全係數及邊坡破壞面形狀
- 2.展示安全係數等值線及「安全地圖」(圖 3-9)
- 3.查詢各切片自由體圖及計算資料(圖 3-10)
- 4.檢視應力分布圖(圖 3-11)

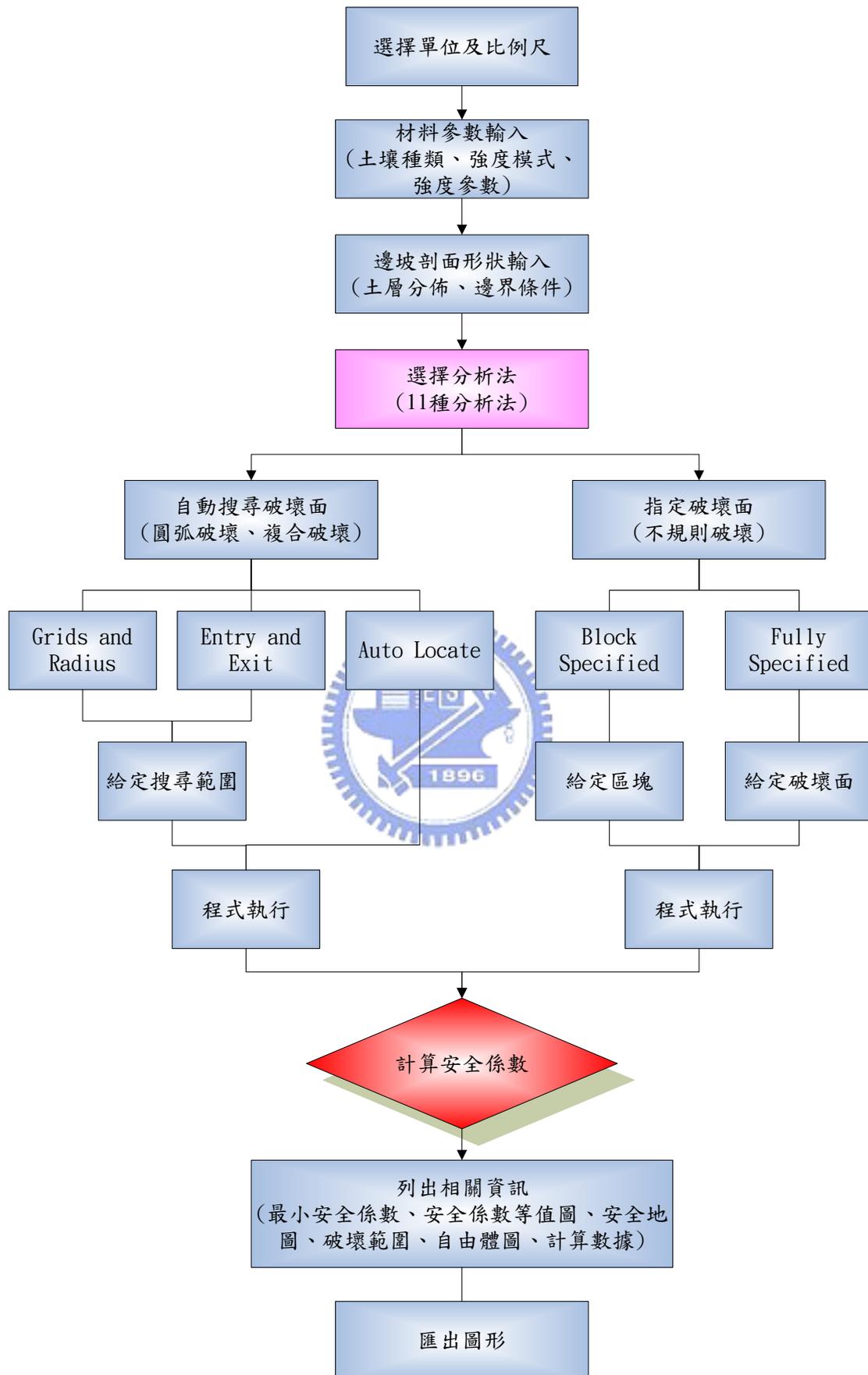


圖 3-2 程式執行步驟

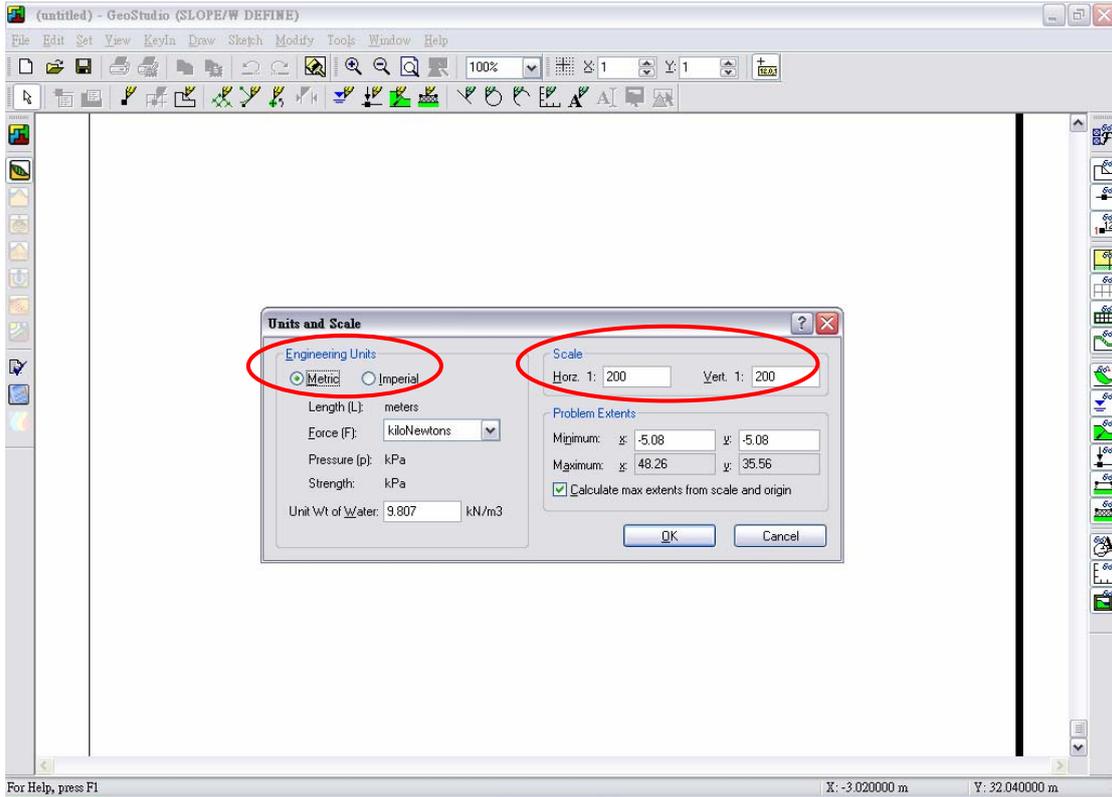


圖 3-3

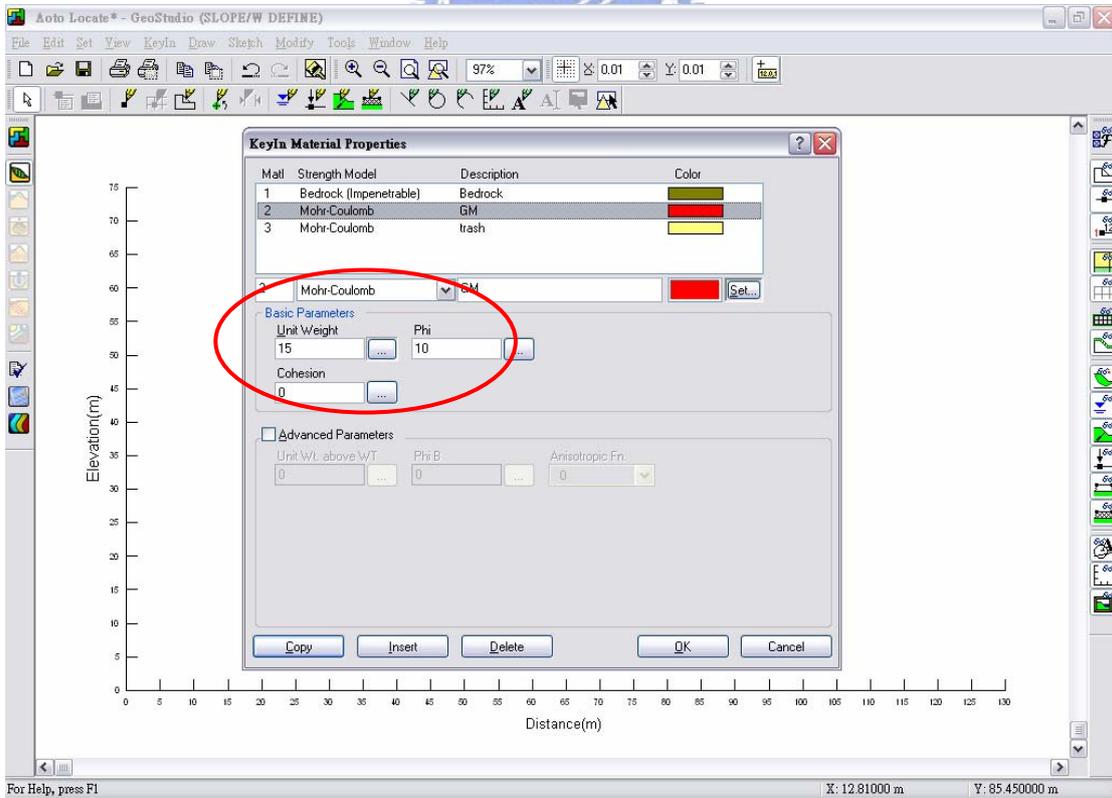


圖 3-4

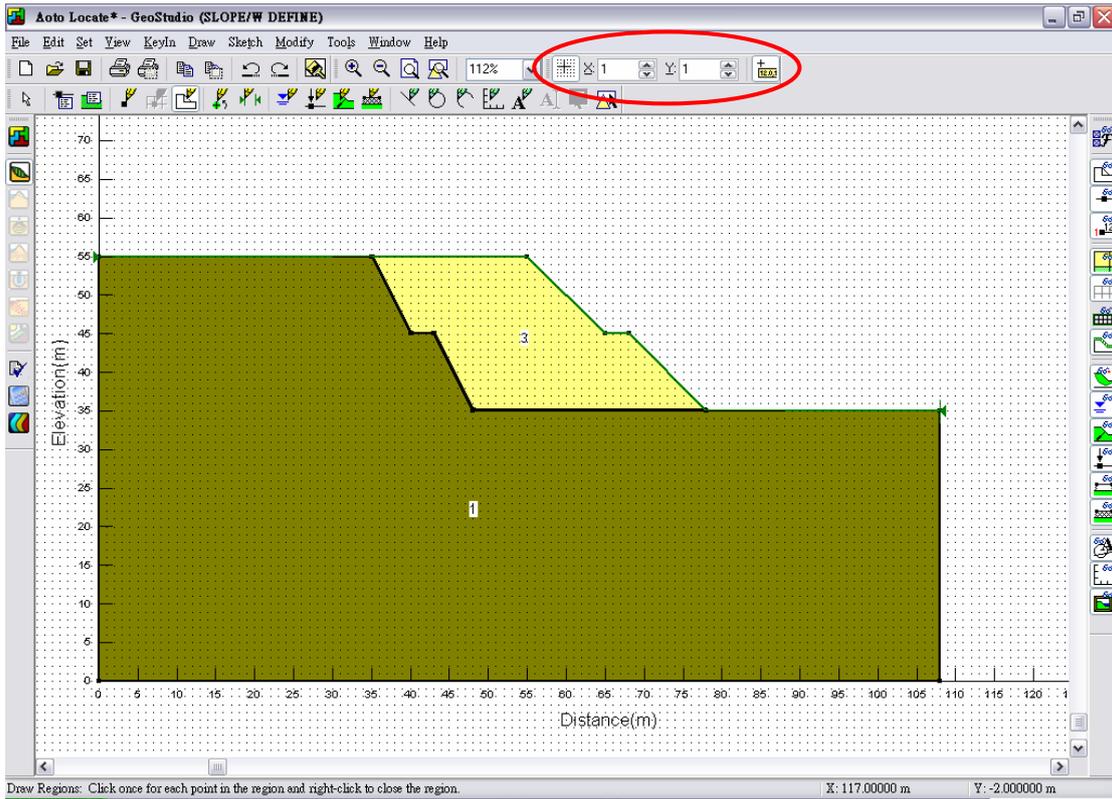


圖 3-5

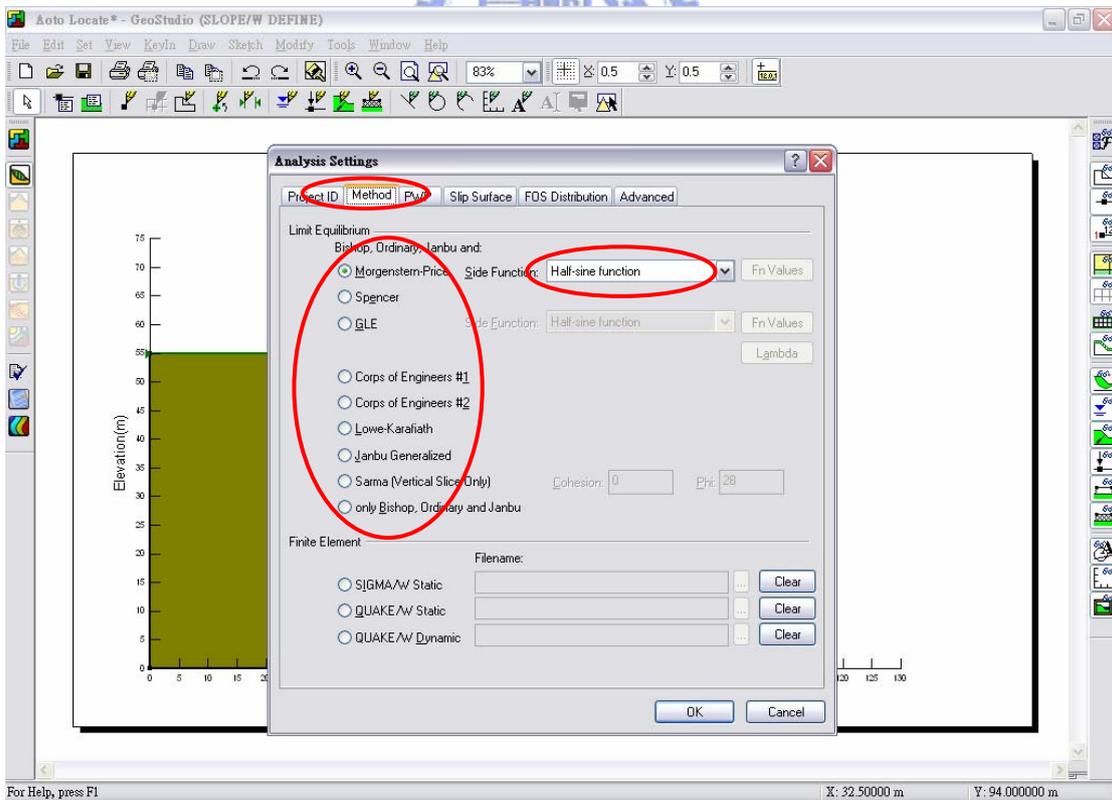


圖 3-6

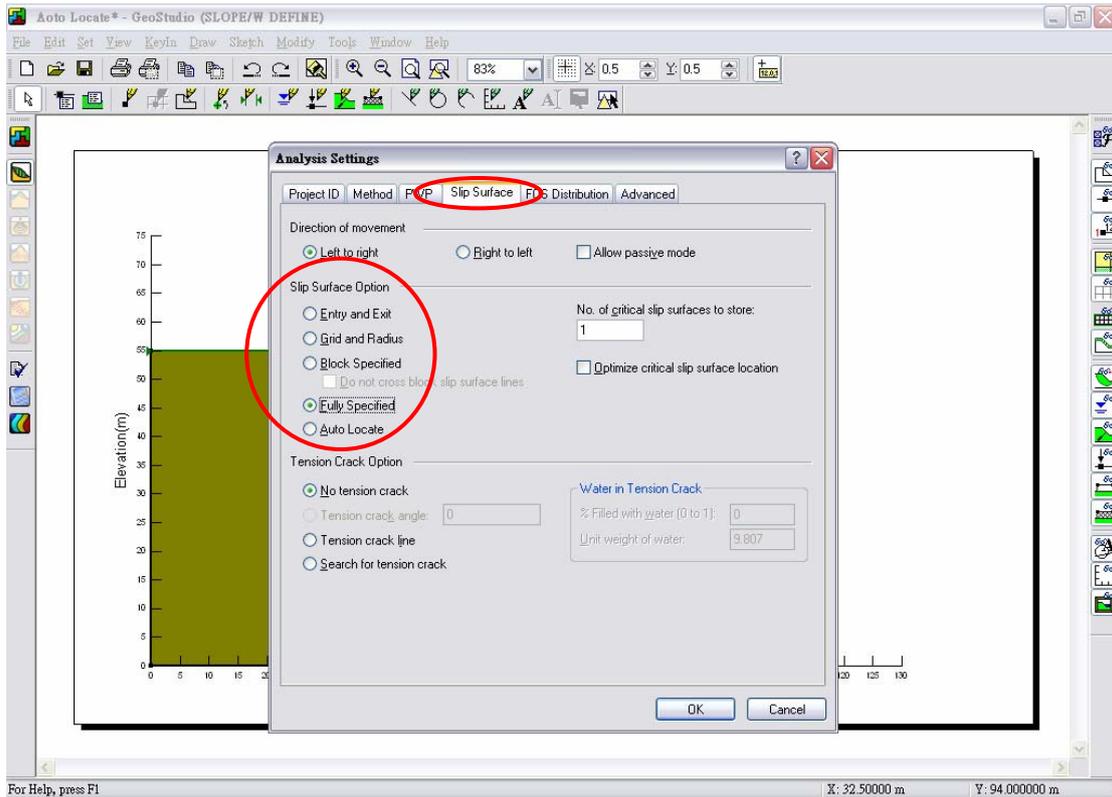


圖 3-7

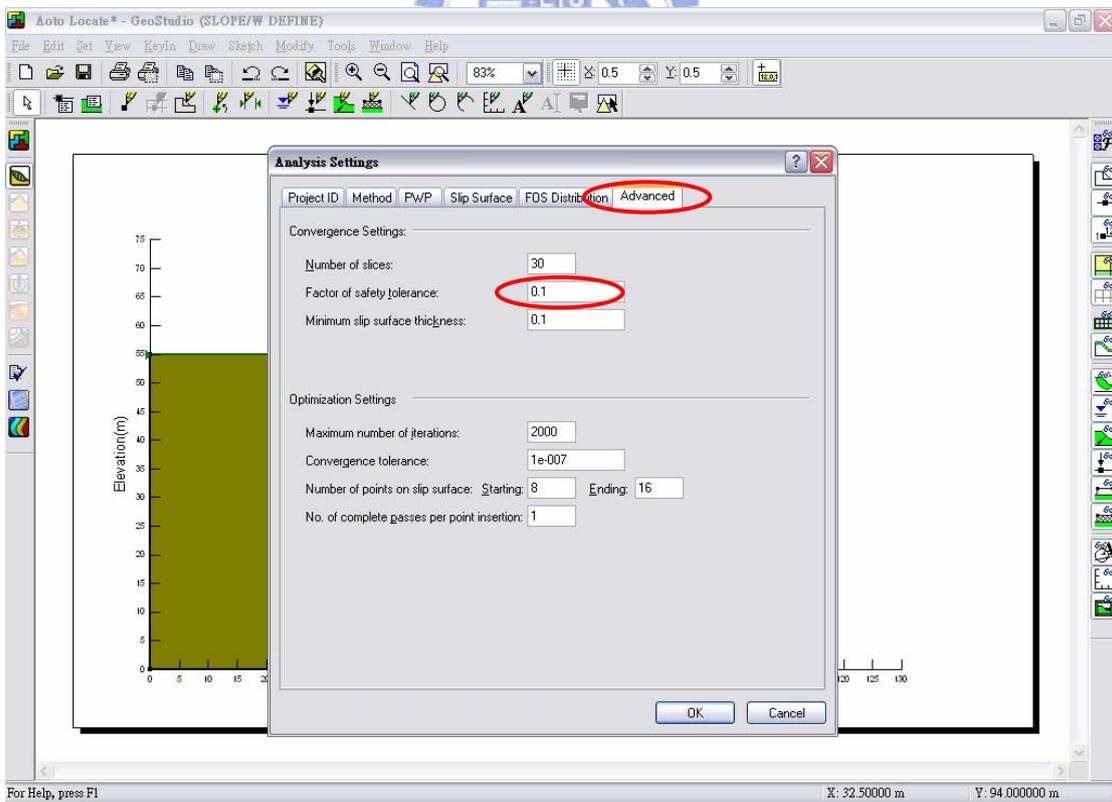


圖 3-8

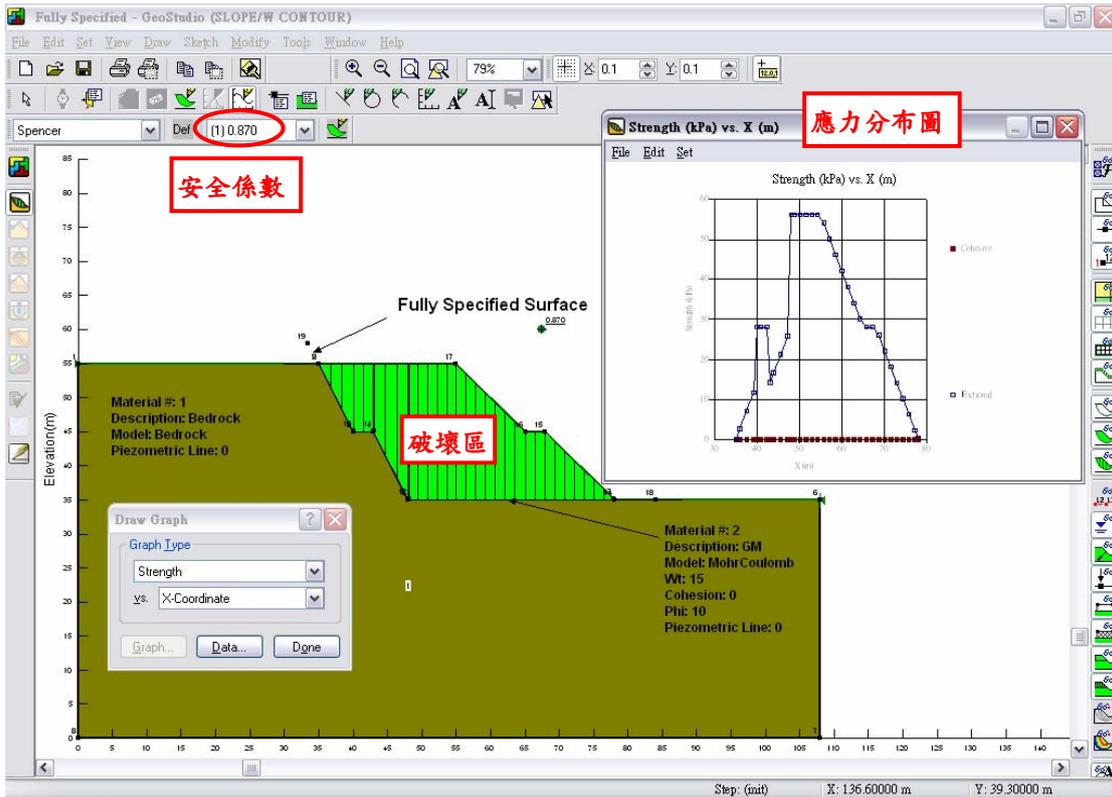


圖 3-9

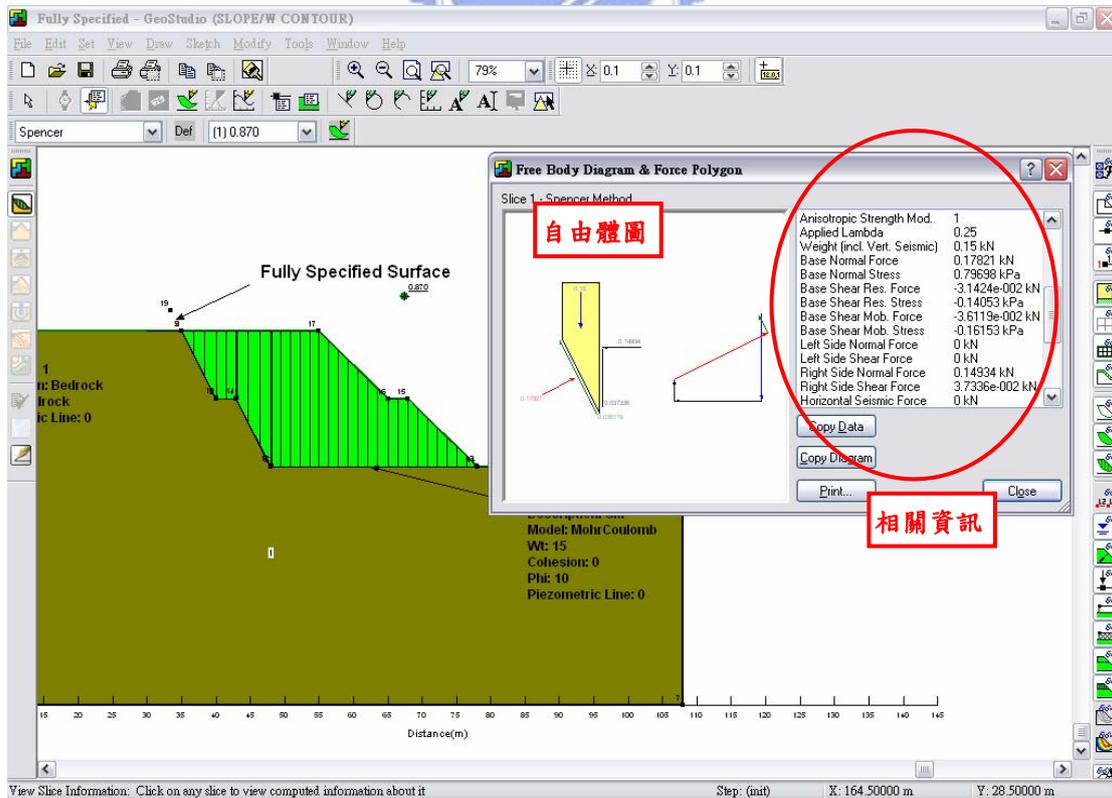


圖 3-10

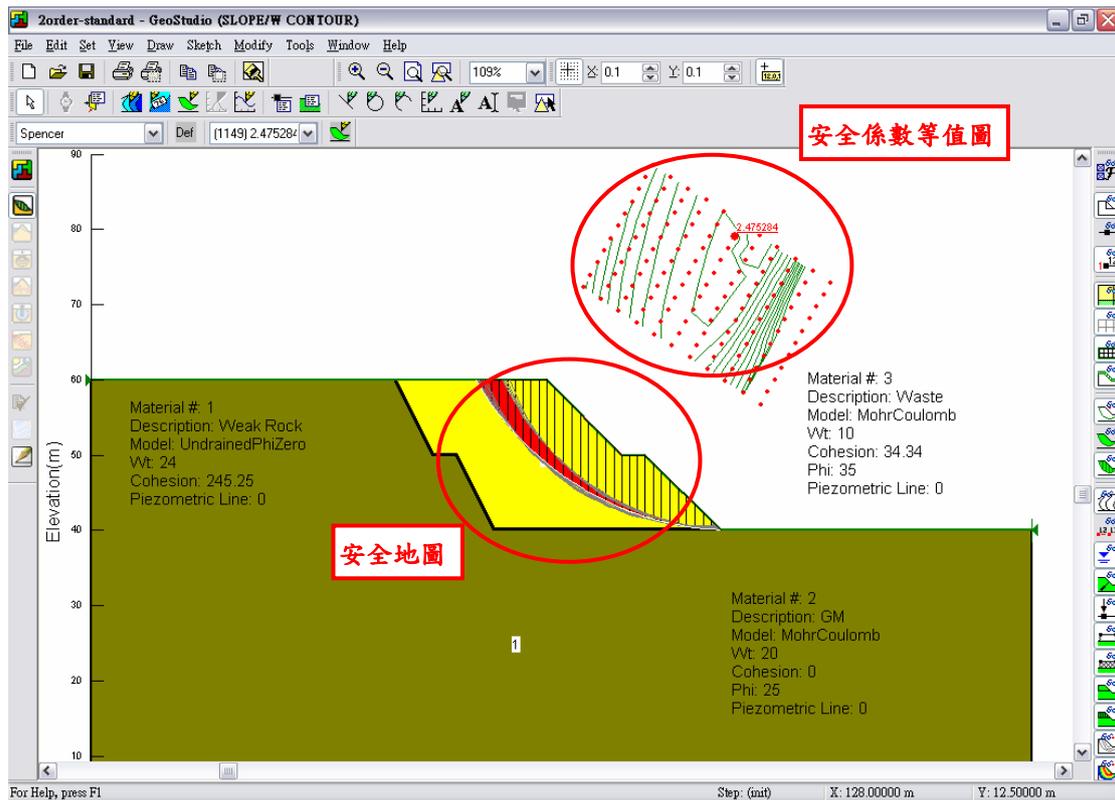


圖 3-11

3.4 破壞面搜尋形式及切片分析法之適用性探討

SLOPE/W 程式內建的破壞面搜尋形式共有五種，包括: Fully Specified、Block Specified、Grid and Radius、Entry and Exit 及 Auto Locate 等。前兩者屬於已知弱面位置，強制破壞面發生位置；後三者則為傳統圓弧破壞面搜尋方式；SLOPE/W 程式內建的切片分析方法共有 11 種。所以必須先對程式進行測試，以二階掩埋場為例進行分析探討，選擇適當破壞面搜尋方式及切片分析法，作為後續一階、二階掩埋場參數變異性分析之評估方法。

破壞面搜尋形式及各切片法適用性之探討，以二階掩埋場為例進行分析探討，二階掩埋場邊坡穩定分析之基本剖面圖如圖 3-12 所示，尺寸列於表 3-1 中。材料參數性質如表 3-2 所示。

表 3-1 二階掩埋場邊坡穩定分析標準剖面尺寸

台階	H(m)	L(m)	B(m)	α (°)	β (°)
1	10	30	3	63.43(1H:2V)	45
2	10	25	3	63.43(1H:2V)	45

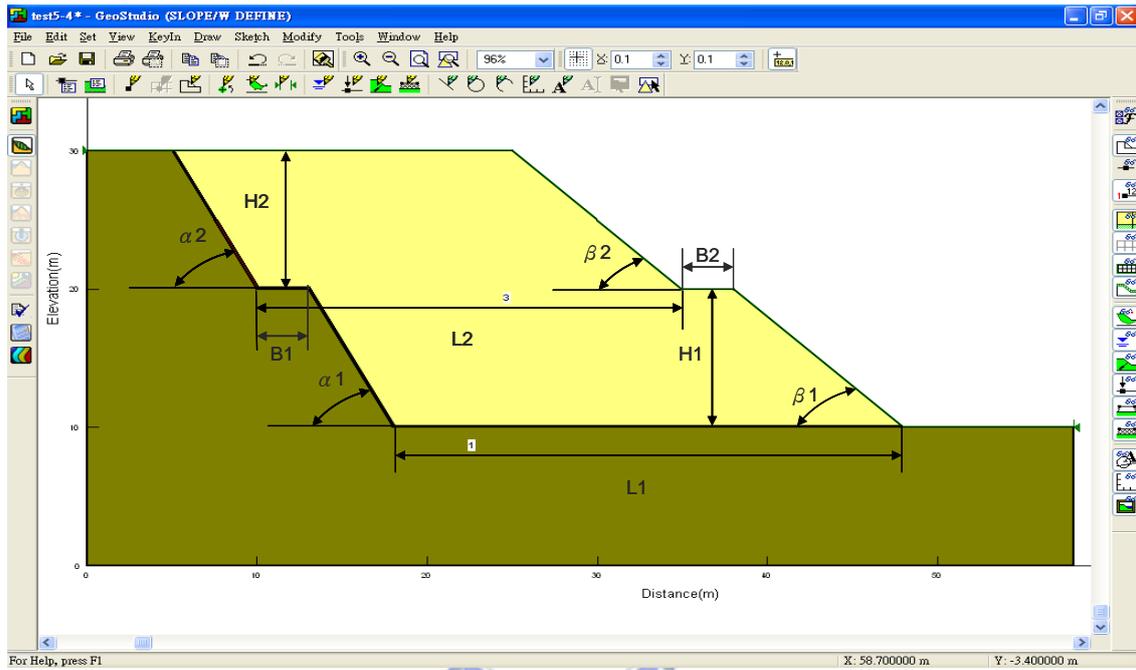


圖 3-12 二階掩埋場基本剖面

表 3-2 邊坡穩定分析材料參數

	單位重(kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
不穿透(BedRock)	-	-	-
土工膜布(GM)	15	$c_a = 0$	$\delta_a = 15$
垃圾層(Waste)	15	$c = 10$	$\phi = 28$

適用性探討程式執行如后，Fully Specified 方法係將滑動面直接定義於掩埋場底部土工合成材與土壤或其他土工合成材之界面，分析模式示意圖，如圖 3-13 所示；Block Specified 方法係定義左右兩個區塊

分別由 3×3 網格點組成，Lift Block 設定滑動面進入起始角限制在 116.5°，Right Block 設定滑動面離開角度限制為 0°，其分析模式，如圖 3-14 所示；Grid and Radius 方法係以圓心 11×11 的網格點為範圍，半徑線以 11 條基準面為範圍進行搜尋，其分析模式，如圖 3-15 所示；Entry and Exit 方法，Entry 設定為不穿透層上邊坡坡頂約 1/2 處至土工膜布與廢棄物界線為止，Exit 設定為土工膜布與廢棄物界線至不穿透層下邊坡坡趾約 1/2 處為範圍，其分析模式，如圖 3-16 所示。Auto Locate 方法不用任何設定，程式會自行搜尋破壞面，其採用原理類似 Entry and Exit。安全係數容許誤差取 0.1%。

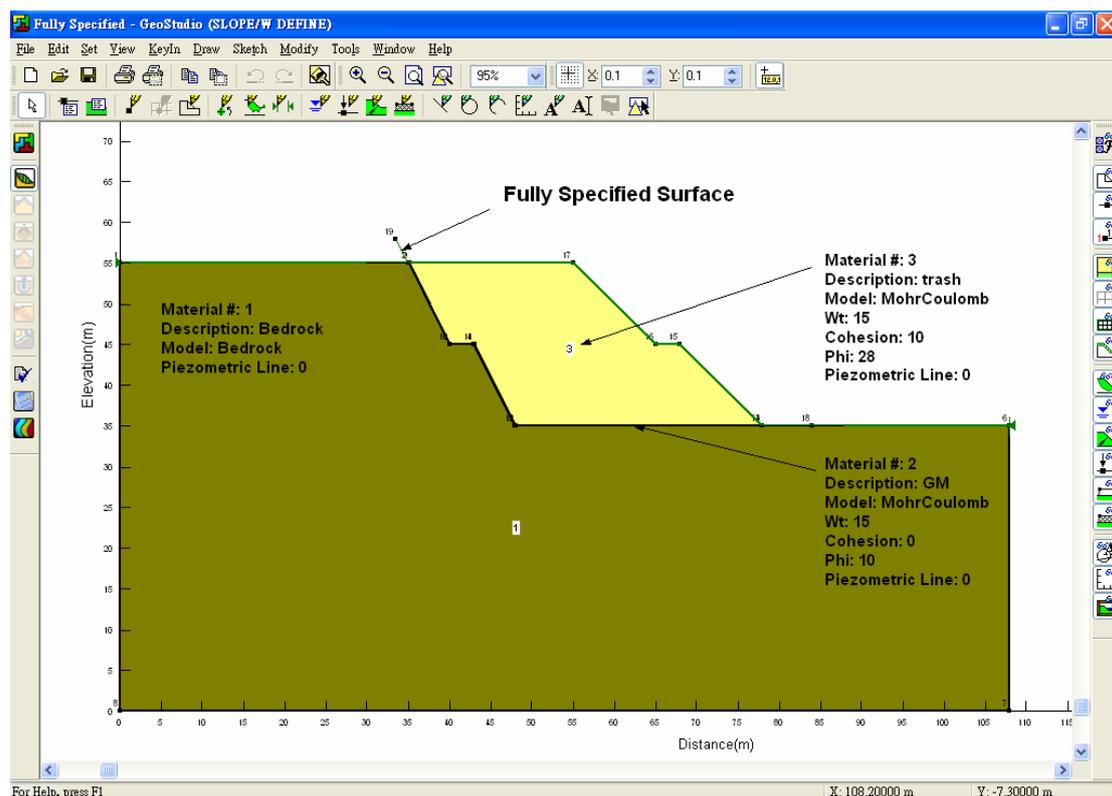


圖 3- 13 Fully Specified 分析示意圖

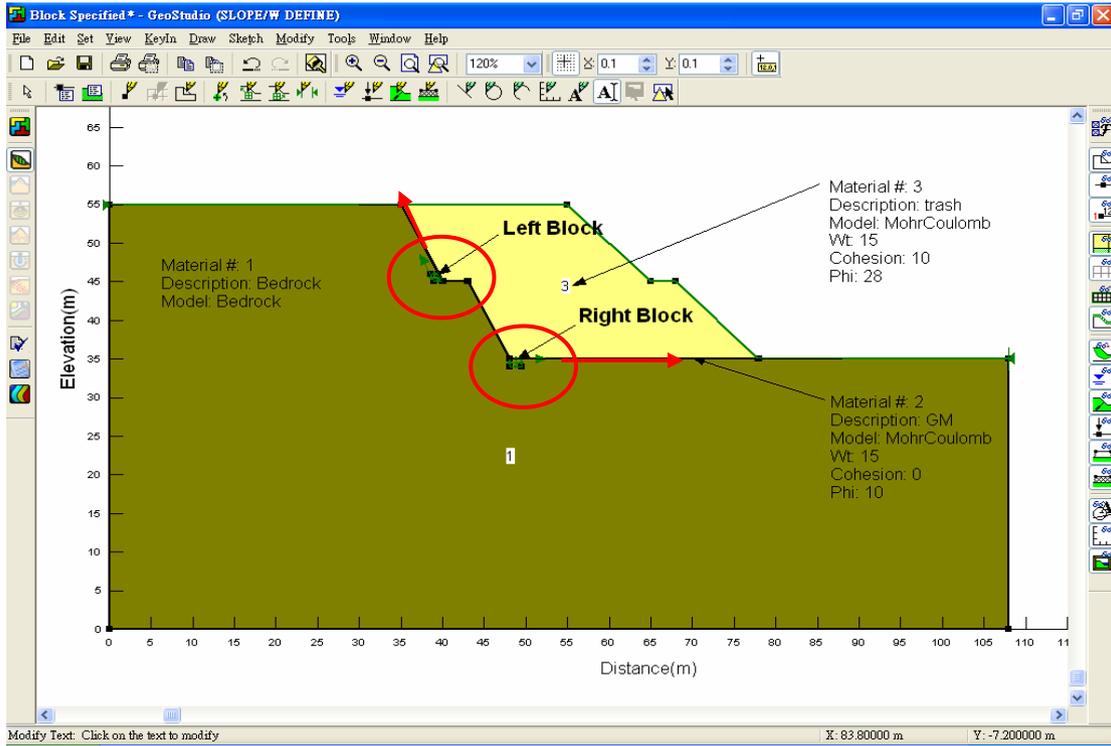


圖 3- 14 Block Specified 分析示意圖

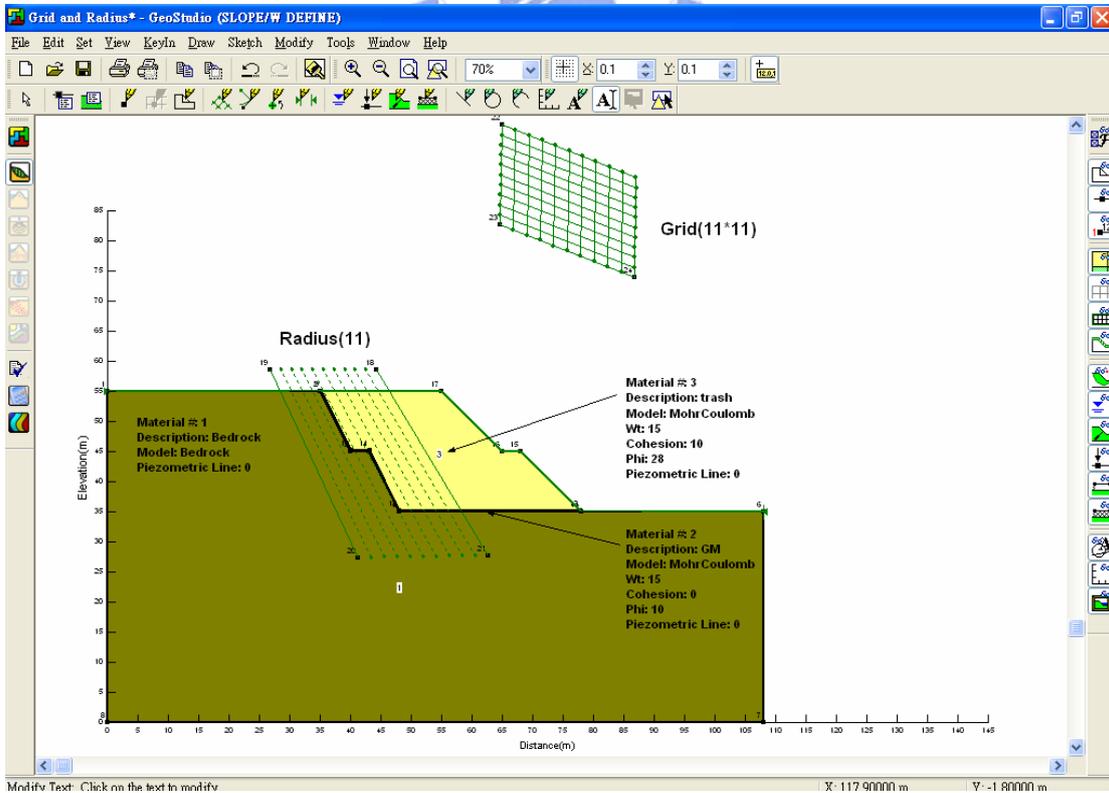


圖 3- 15 Grid and Radius 分析示意圖

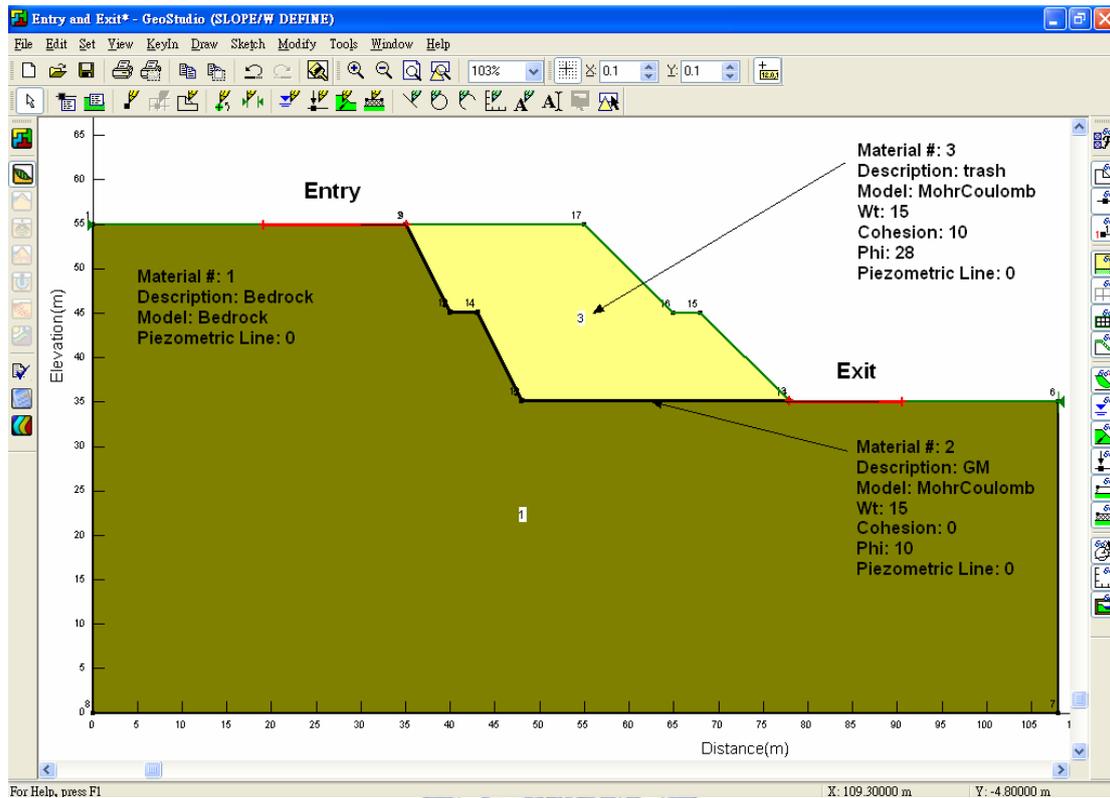


圖 3- 16 Entry and Exit 分析示意圖

3.5 一階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析

一階掩埋場基本剖面之形狀因子如圖 3-17 所示，其標準剖面尺寸列於表 3-3 中，為了簡化分析，分析時以標準斷面為基本剖面，探討掩埋場穩定設計因子：掩埋面坡高(H)、掩埋場底部長度(L)、掩埋場底部邊坡角度(α)、掩埋面邊坡角度(β)等參數，一次只變動一個參數，進行參數變異性分析。

表 3- 3 一階掩埋場邊坡穩定分析標準剖面尺寸

台階	H(m)	L(m)	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	10	30	60	45

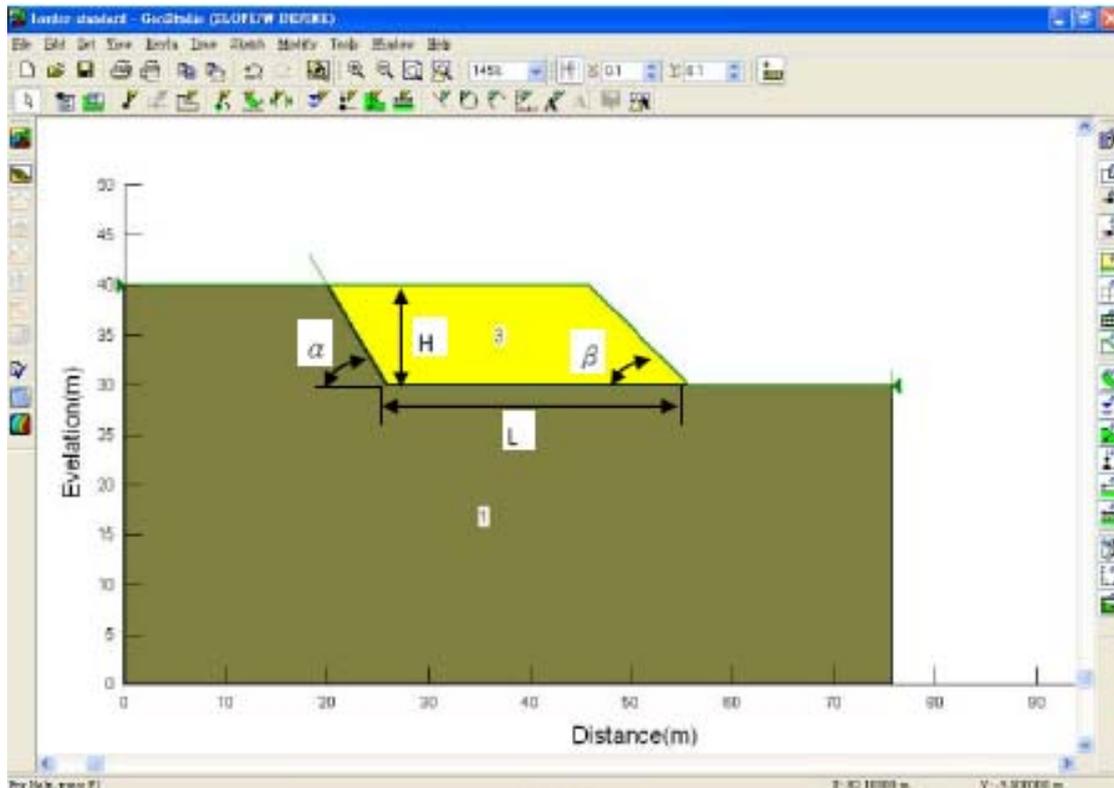


圖3-17 一階掩埋場基本剖面形狀因子定義

一階掩埋場標準斷面之材料性質如表3-4所示，各參數假設說明如下：

表 3-4 一階掩埋場邊坡穩定分析材料參數

	單位重 (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
軟岩(Weak Rock)	24	$S_u = 245.25$	$\phi_u = 0$
土工膜布(GM)	20	$c_a = 0$	$\delta_a = 15$
垃圾層(Waste)	10	$c = 34.34$	$\phi = 35$

考慮廢棄物和覆土的比例以及長期掩埋發生分解沉降以後，廢棄物趨於穩定狀態，廢棄物之單位重，從地表以下假設為10 kN/m³。另外，根據文獻及范佐憲(2007)針對新竹縣湖口、竹南掩埋場進行現場大型直剪試驗，分別求得垃圾強度參數 $c = 33.55$ (kPa)， $\phi = 32.07^\circ$ ，

$c=34.9$ (kPa), $\phi=37.9^\circ$ 。取兩者大約的平均值，故假設廢棄物強度參數 $c=34.34$ (kPa), $\phi=35^\circ$ 。

一般土壤之單位重約為 $16\sim 20$ kN/m³，而軟岩單位重會比土壤再高一些，故軟岩層單位重假設 24 kN/m³。另外，根據國際岩石力學學會 (ISRM, 1981)單壓強度分級，極弱岩單壓強度介於 $2.5\sim 10$ kg/cm²之間，故取軟岩單壓強度 5 kg/cm²，即不排水剪力強度為 2.5 kg/cm² (Su=245.25 kPa)。

土工膜布置於軟岩層上，取較保守，所以單位重假設 20 kN/m³。且根據劉家男(2004)整理國外文獻，得到光滑面HDPE土工膜布與粘土及砂土的界面剪力強度， $c_a=0\sim 0.7$ (kPa), $\delta_a=15^\circ\sim 28^\circ$ ，所以界面剪力強度，假設 $c_a=0$, $\delta_a=15^\circ$ 。

一階掩埋場標準斷面，假設沒有地下水，亦沒有地震力作用。一階參數變異性分析程式執行，分析方法，同時採用 Simplified Bishop、Simplified Janbu、Morgenstern and Price 及 Spencer 等四種分析法進行分析。切片間之作用力乃在側向力函數選項(Side Function)中，將函數設定為半正弦函數(Half-sine Function)。在分析設定 (Analysis Settings)選項中之滑動面選項(Slip Surface Option)採用完全人為設定(Fully Specified)之方式來設定滑動面。對邊坡之移動方向採用由左邊向右邊之方向(Left to Right)。切片數目設定為 30 片。安全係數容許誤差取 0.01% 。一階掩埋場邊坡各參數變異性範圍如表 3-5。

表 3-5 一階掩埋場各參數變異性範圍

參數種類		參數變異性範圍
材料參數	$\delta (^{\circ})$	5、8、10、12、15、20、25
幾何形狀 因子	$H(m)$	10、15、20、25、30、35
	$L(m)$	5、10、15、20、25、30、35
	$\alpha (^{\circ})$	30、45、60、75
	$\beta (^{\circ})$	15.95(4H:1V)、18.43(3H:1V)、21.8(2.5H:1V)、 26.56(2H:1V)、30、45、60

3.6 二階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析

二階掩埋場邊坡穩定分析之基本剖面之尺寸與一階掩埋場相同。唯一不同的地方在於此處為求分析之明確簡單，因此兩台階之高度 H 及掩埋體長度 L 採同時變化，兩階之邊坡角度 α_1 、 α_2 以及 β_1 、 β_2 亦採同步變化，只變動背靠邊坡之平台寬度 B_1 ，而掩埋完成面之平台寬度 B_2 固定不變(圖 3-18)，破壞面亦強制由弱面通過(圖 3-19)。

分析之標準剖面形狀因子定義如圖 3-12 所示，形狀因子幾何參數如表 3-6 所示。二階掩埋場邊坡穩定分析之材料參數與一階掩埋場相同。材料性質如表 3-7 所示。

二階掩埋場參數變異性分析，程式設定及執行與一階掩埋場皆相同，各參數變異性範圍如表 3-8。惟安全係數容許誤差取 0.15%，可得到合理的結果。

表3- 6二階掩埋場邊坡穩定分析標準剖面尺寸

台階	$H(m)$	$L(m)$	$B(m)$	$\alpha (^{\circ})$	$\beta (^{\circ})$
1	10	30	3	63.43(1H:2V)	45
2	10	25	3	63.43(1H:2V)	45

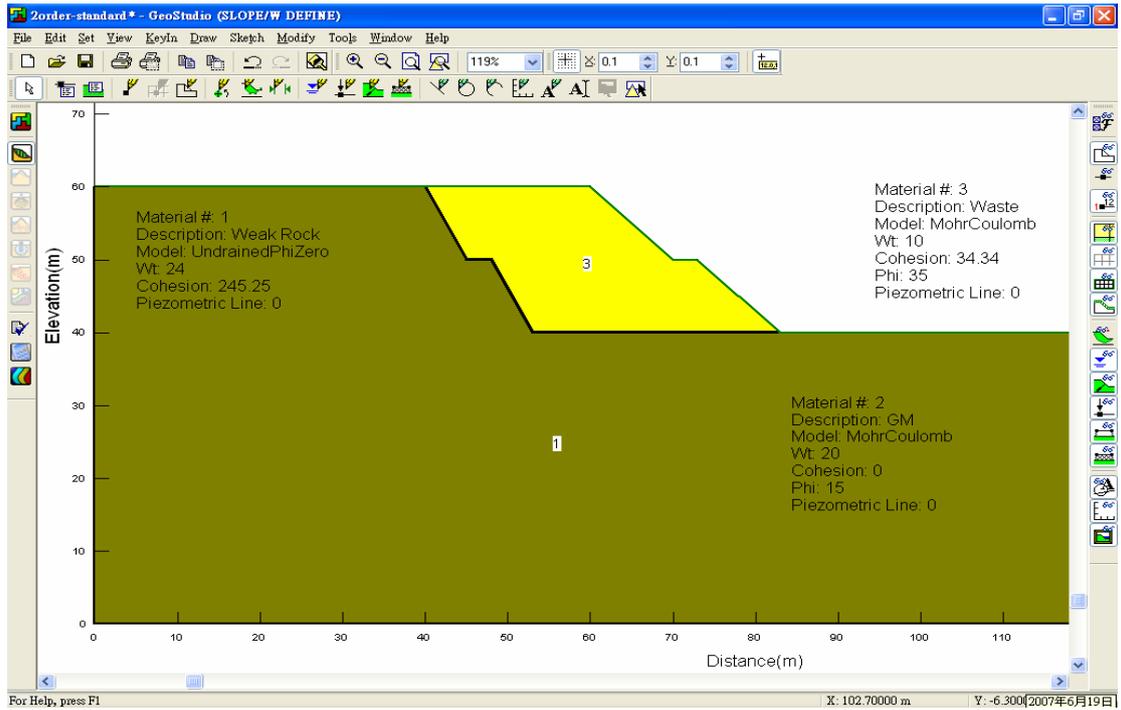


圖 3- 18 二階掩埋場基本剖面

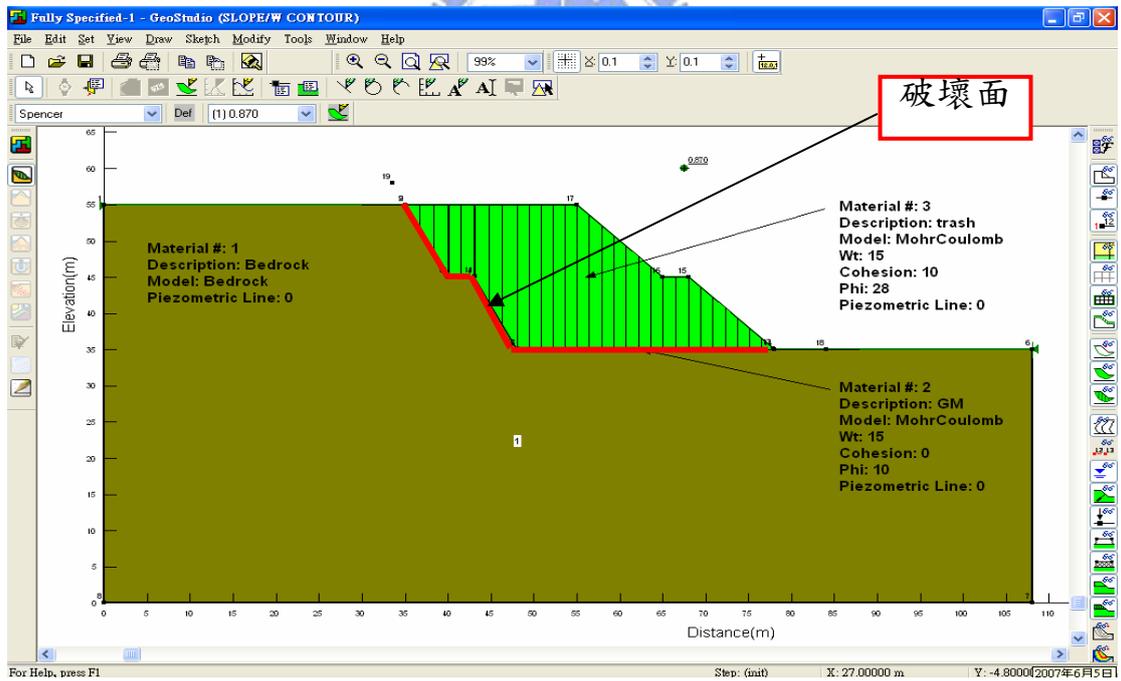


圖 3- 19 分析結果示意圖

表 3-7 二階掩埋場邊坡穩定分析材料參數

	單位重(kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
軟岩(Weak Rock)	24	$S_u=245.25$	$\phi_u=0$
地工膜布(GM)	20	$c_a=0$	$\delta_a=15$
垃圾層(Waste)	10	$c=34.34$	$\phi=35$

表 3-8 二階掩埋場各參數變異性範圍

參數種類		參數變異性範圍
材料參數	δ (°)	5、8、10、12、15、18、20、25
幾何形狀 因子	H (m)	5、10、15、20
	L (m)	20、25、30、40、50、60
	B (m)	0、0.5、1、2、3、4、5
	α (°)	30、45、63.43、75
	β (°)	26.56(2H:1V)、30、45、60

第四章 分析結果與討論

本章將邊坡穩定分析的結果加以整理與討論，主要內容分為四個部份：(1)各破壞面搜尋形式及各切片法之適用性討論，(2)一階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析結果與討論，(3)二階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析結果與討論，(4)考慮地震力作用下之邊坡穩定分析結果與討論。

4.1 以破壞面搜尋形式探討各切片法的適用性

分析結果以下列原則進行研判合理性。當下列三者同時滿足時，則所得到的安全係數才是合理的。(1)臨界滑動面沿著地工膜布底部呈階梯狀破壞(圖 4-1)。(2)切片底部剪應力與距離關係圖分布是否正常，即剪應力無極大值或張力產生且內聚力應保持為零，(圖 4-2)。(3)切片底部正向應力與距離關係圖正常分布，如圖 4-3 所示。

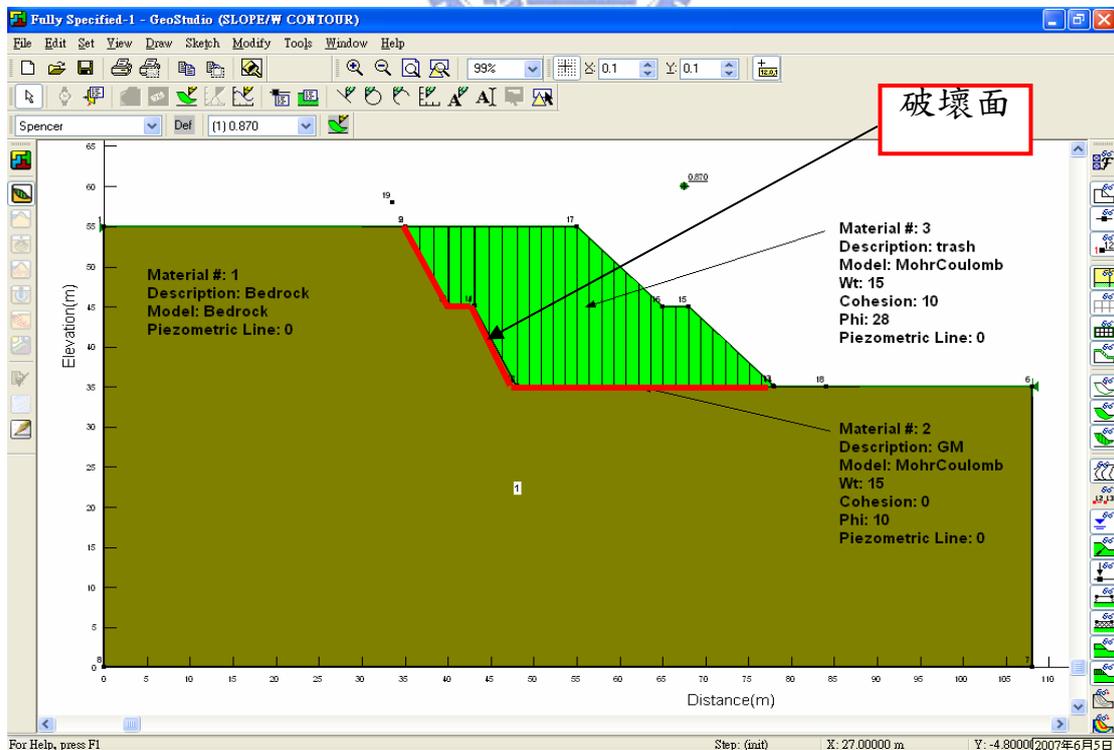


圖 4-1 界面滑動破壞示意圖

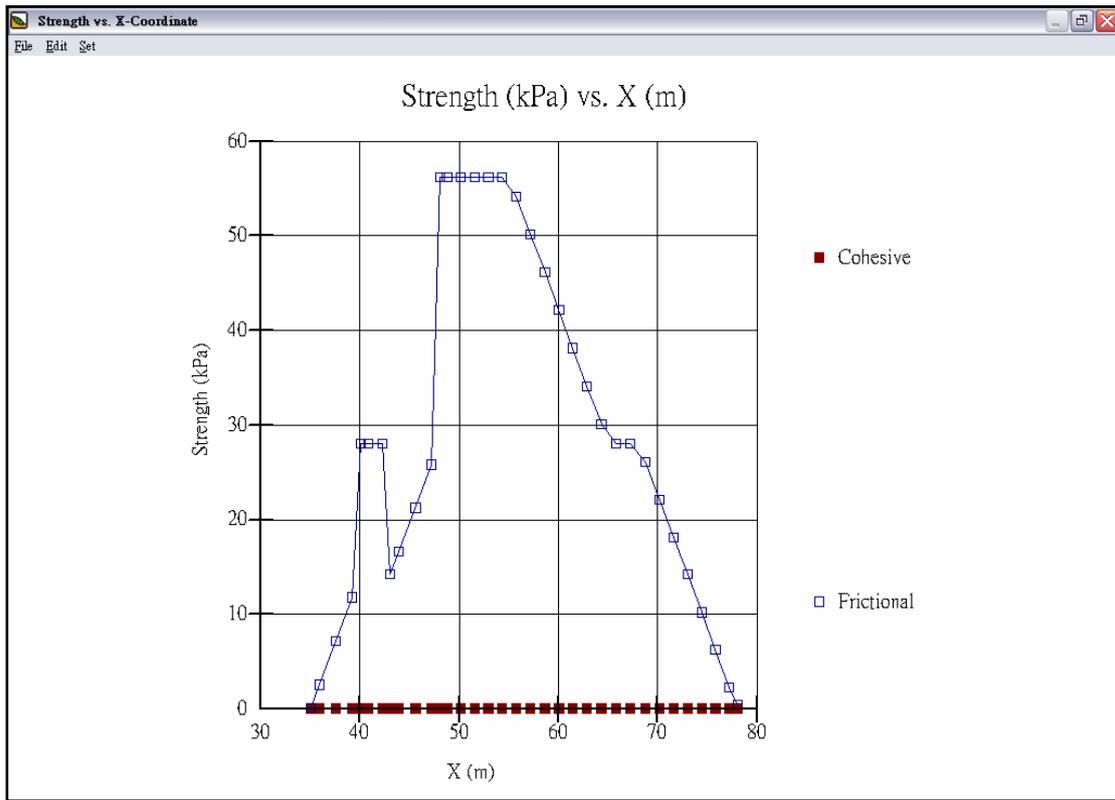


圖 4- 2 切片底部剪應力與距離關係示意圖

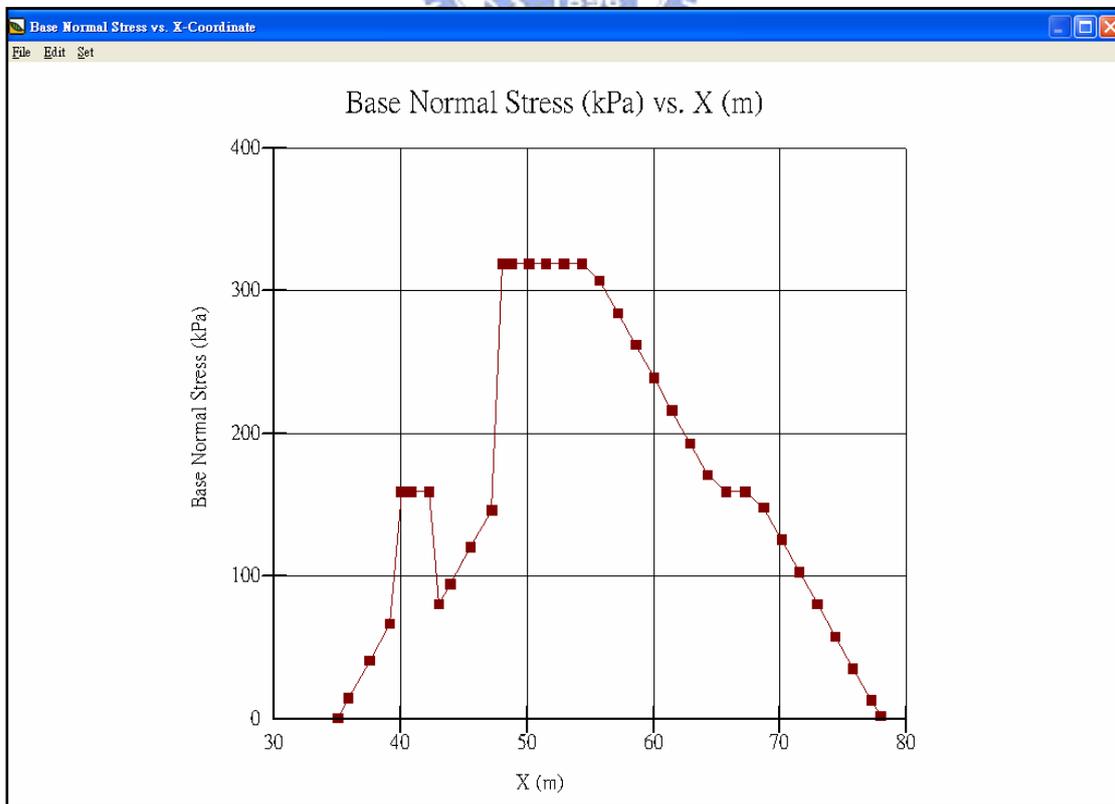


圖4- 3切片底部正向應力與距離關係示意圖

分析結果如表 4-1 所示，粗體斜字表應力及破壞面皆不合理，粗體字表應力分布不合理(應力分布呈現不規則跳動變化，有極大應力值且有張力產生或坡頂應力起始值非從零開始)，NG 表安全係數程式無法求得。Fully specified 搜尋破壞面時，其中 GLE 分析法，其應力分布及滑動面形狀合理，惟安全係數容許誤差須放大至 0.3%，安全係數才能收斂。

表 4-1 破壞面搜尋形式求得之安全係數

	FS				
	Fully specified	Block specified	Grid and Radius	Entry and Exit	Auto Locate
Ordinary	0.741	0.736	0.850	1.081	1.303
Bishop simplified	0.771	0.769	0.696	0.694	0.654
Janbu simplified	0.672	0.671	0.670	0.672	0.672
M-P	0.843	0.840	0.754	0.780	0.192
Spencer	0.870	0.866	0.791	0.785	0.731
GLE	0.892*	0.912	0.854	0.876	0.289
Corps of Engineers #1	0.902	0.840	0.776	0.787	0.771
Corps of Engineers #2	0.639	0.637	0.634	0.637	0.634
Lowe-Karafiath	1.030	0.912	0.867	0.868	0.823
Janbu Generalized	NG	0.324	0.475	0.825	0.100
Sarma	0.926	0.821	0.742	0.745	0.516

註:粗體斜字表分析結果不合理，粗體字表應力分布不合理，NG表安全係數程式無法求得

由分析結果，可以看出，在考慮地工膜布界面滑動破壞的情形下，Auto Locate 及 Entry and Exit 兩種方式，安全係數不合理的情況較多；Fully specified、Block Specified 及 Grid and Radius 等三種方法，安全係數不合理的情況較少。但是在使用上，後兩者在給定搜尋範圍上，需要一些設置技巧才能克服一些不合理的安全係數，同時必須以試誤法反覆計算較耗時，Fully specified 顯得較方便且快速。故後續參數變異性分析，破壞面搜尋方式採用 Fully specified 進行分析。

以Fully specified搜尋破壞面時，滑動面形狀設定，線段必須超過地表面，如此可得到較合理的分析結果；沒有設置軸點，對於只滿足力矩平衡之分析法(Ordinary、Simplified Bishop、Simplified Janbu)，數值會有影響，但其他較嚴謹的方法(Morgenstern and Price、Spencer)不會受到軸點影響。另外，在採用較嚴謹分析法及只滿足力系平衡之分析法進行分析時，若安全係數無法收斂，可稍微放大安全係數容許誤差(程式設定值為0.01%)，作適當調整，使安全係數收斂，同時也可以得到理想的破壞面形狀及應力分布。

Block specified搜尋時，區塊設定的位置必須為弱面滑動的位置，且亦須注意軸點與安全係數容許誤差的影響。

Grid and Radius搜尋時，除了安全係數容許誤差的影響以外，臨界圓圓心格點及半徑線的設置位置需特別注意。砂土($c=0$)，臨界圓圓心的位置會位於垂直坡面中點的向上延伸線上，半徑有可能是無限延伸，即屬於淺層破壞；黏土($\phi=0$)，臨界圓圓心的位置會位於坡面中點的鉛垂線方向上，臨界圓通常會切過黏土層底部，但不是總是如此。所以同時有內聚力及摩擦角之土壤，臨界圓圓心的位置會位於坡面中點的垂直線及鉛垂線之間範圍內，並落於坡頂上方1~2倍坡高之間，(Duncan and Wright, 2005)另外，半徑線的設置最好跟臨界圓相切，否則分析結果，坡頂會產生張應力。

Entry and Exit搜尋時，滑動弧坡頂與坡趾的範圍需要有所斟酌，範圍的大小會明顯影響分析數值，需謹慎評估。以本模式為例，搜尋範圍上下邊坡皆需包含地工膜布，但卻不宜延伸到廢棄物(如圖3-6)，如此方可得到合理的分析結果。否則坡頂會產生張應力或發生淺層圓弧滑動。

Auto Locate搜尋原理與Entry and Exit相同，然分析結果卻不甚理想，此法應該較適用於一般圓弧破壞邊坡。

以極限平衡法分析邊坡穩定性時，邊界條件可能影響破壞面的形成與位置，分析邊界(深度與前後方距離)應設於至少為邊坡高度一倍的距離之外，以降低邊界效應對分析結果，否則實際邊界狀況皆應予以模擬(黃亦敏、李維峰、洪勇善等人，2001)。本模式分析結果顯示，邊界效應對只滿足力矩平衡之分析法(Ordinary、Simplified Bishop、Simplified Janbu)會有影響，其他分析法影響較小。

由表4-1結果顯示，考慮土工膜布界面滑動破壞時，Ordinary、Simplified Bishop、Simplified Janbu、Spencer及Corps of Engineers #1，在各種破壞面搜尋方式皆可得到合理的安全係數；Corps of Engineers #2、Lowe-Karafiath及Janbu Generalized 等三種分析法，在不同搜尋方式皆無法得到合理的安全係數。

另外，如果不考慮 Auto Locate，只考慮其他四種搜尋方式，再各別針對八種合理的分析法進行比較。可以看出 Ordinary、GLE、Corps of Engineers #1 及 Sarma 等四種分析法最大值與最小值變動的範圍，到達小數點第一位，即相差 0.1，其中 Ordinary 差異性最大，達 0.3 左右；而 Simplified Bishop、Simplified Janbu、Morgenstern and Price 及 Spencer 等四種分析法最大值與最小值變動的範圍，到達小數點第二位，即相差 0.01，其中 Simplified Janbu 差異最小，差異值 0.001，其他三者差異值介與 0.07~0.08 之間。同時考慮一般業界使用邊坡穩定分析程式多採用 Simplified Bishop、Simplified Janbu 及 Spencer 等三種方法，且 Morgenstern and Price 基本假設較為嚴謹，適用性最廣。基於上述的探討，後續參數變異性分析，將以 Simplified Bishop、

Simplified Janbu、Morgenstern and Price 及 Spencer 等四種分析法進行分析。

4.2 一階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析

4.2.1 一階掩埋場參數變異性分析結果

1. 界面摩擦角(δ)

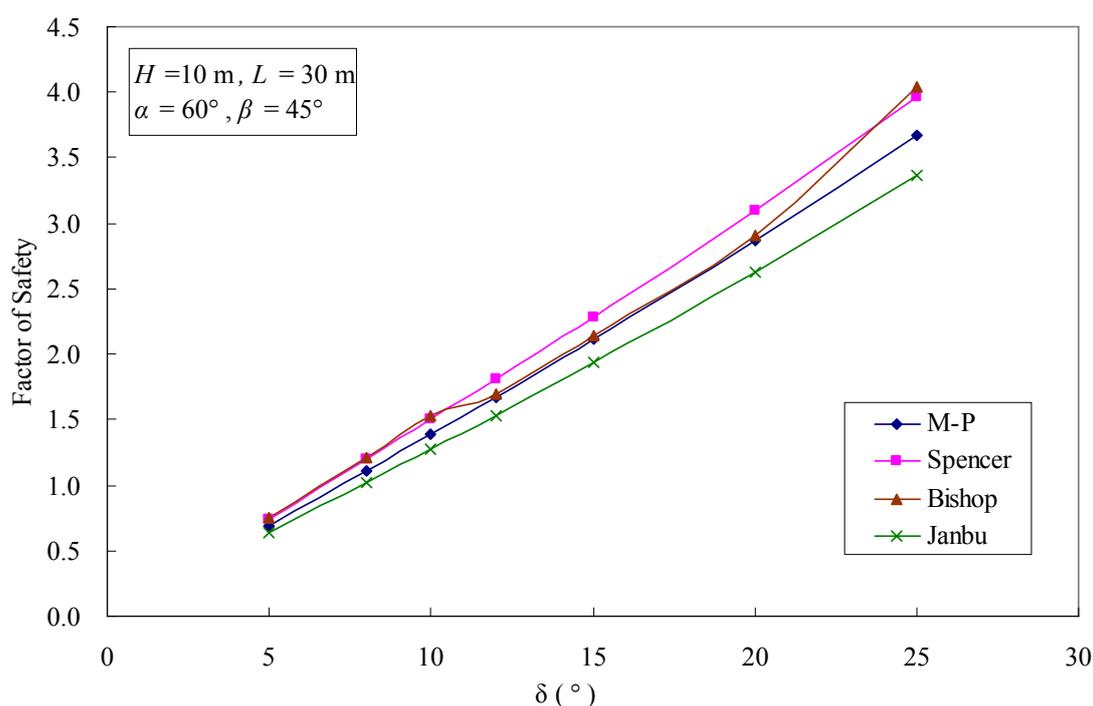


圖 4-4 一階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角 δ 之關係

由圖 4-4 可以看出，界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係，幾乎呈線性變化，界面摩擦角由 5° 增加到 25° 時，安全係數由 0.7 增加到 3.7 左右，當界面摩擦角小於 7° 時，安全係數會低於 1，由此可知界面摩擦角對安全係數值有很大的影響。此外 Morgenstern and Price、Spencer、Simplified Janbu 三種方法線形一致，Simplified Bishop 曲線較不規則，其中 Spencer 所得安全係數最高，Simplified Janbu 所得安全係數最低。探討各分析法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified

Bishop 差異值變動幅度約 -1.8%~6%，Simplified Janbu 差異維持約 15%，Morgenstern and Price 差異保持約 7%。

表 4-2 為一階掩埋場界面滑動破壞之安全係數，與局部淺層破壞之安全係數比較表，由表 4-2 可以看出，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，故掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外，淺層破壞之安全係數亦與界面摩擦角(δ)成正比關係，但影響幅度明顯小很多。

表 4-2 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 δ)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
$\delta(^{\circ})$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	0.691	0.744	3.510	3.521
8	1.108	1.195	3.534	3.543
10	1.391	1.500	3.550	3.558
12	1.674	1.807	3.564	3.573
15	2.110	2.278	3.589	3.596
20	2.867	3.096	3.632	3.638
25	3.674	3.965	3.678	3.683

2.掩埋高度(H)

填埋高度(H)與安全係數成反比，高度愈高滑動之安全係數愈小，如圖 4-5 所示。填埋高度由 10 m 增加到 35 m 時，安全係數由 2.1 遞減至 0.7 左右，由此可知填埋高度對安全係數值有絕對的影響。各種分析法線形較一致，惟 Morgenstern and Price 曲線較不規則，Simplified Janbu 曲線偏保守。探討各方法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 隨著掩埋高度增加差異值由 6%遞增到 23%；Simplified Janbu 亦同，隨著掩埋高度增加差異值由 15%遞增到 29%；

Morgenstern and Price 差異值變動無一定趨勢，變動範圍約-0.7%~13%。另外，當安全係數等於 1 時，相對應的掩埋高度，Simplified Janbu 為 20 m，Morgenstern and Price 為 30 m，表示掩埋高度的參數變異性頗大。綜合上述可以看出，在分析掩埋高度時，不同分析法所得的安全係數差異頗大，必須慎選分析法。

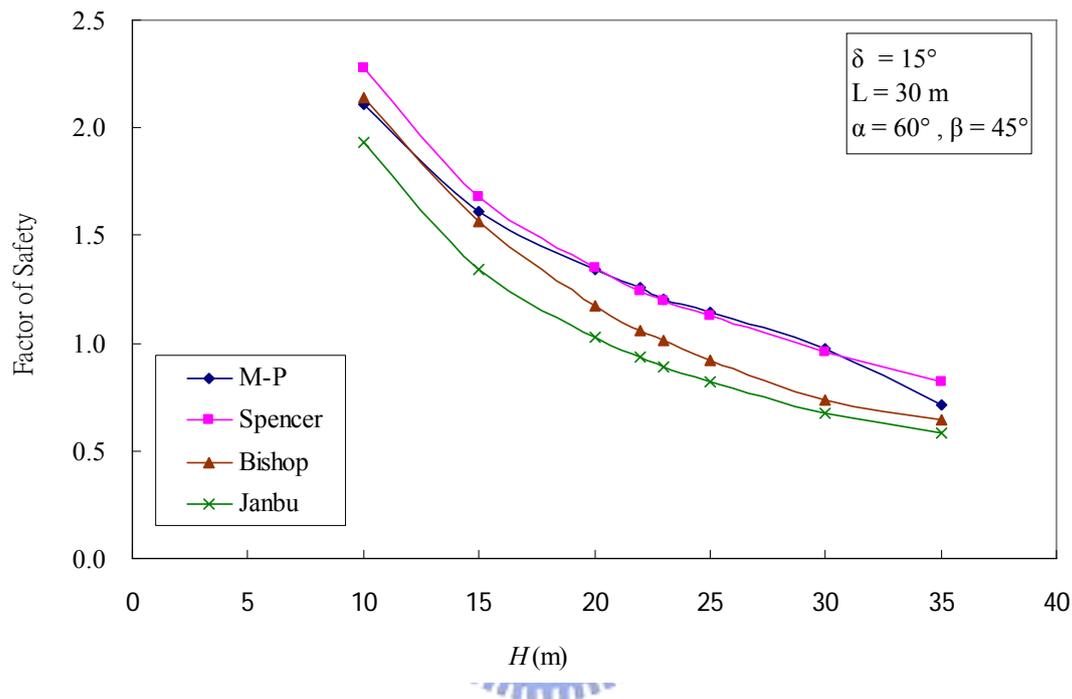


圖4- 5一階掩埋場滑動安全係數與掩埋高度 H 之關係

表 4-3 為一階掩埋場界面滑動破壞之安全係數，與局部淺層破壞之安全係數比較表，由表 4-3 可知，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，故掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外，淺層破壞之安全係數亦與埋高度(H)成反比，且斜率明顯大於界面滑動破壞之安全係數，由此顯見埋高度，無論是界面滑動破壞或局部淺層破壞，皆有明顯的影響，且皆為反比關係。

表 4-3 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 H)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
	Fully Specified		Grid and Raidus	
H(m)	M-P	Spencer	M-P	Spencer
10	2.110	2.278	3.589	3.596
15	1.611	1.680	2.741	2.742
20	1.344	1.350	2.321	2.323
25	1.142	1.128	2.029	2.030
30	0.976	0.955	1.854	1.823
35	0.714	0.818	1.727	1.736

3.掩埋長度(L)

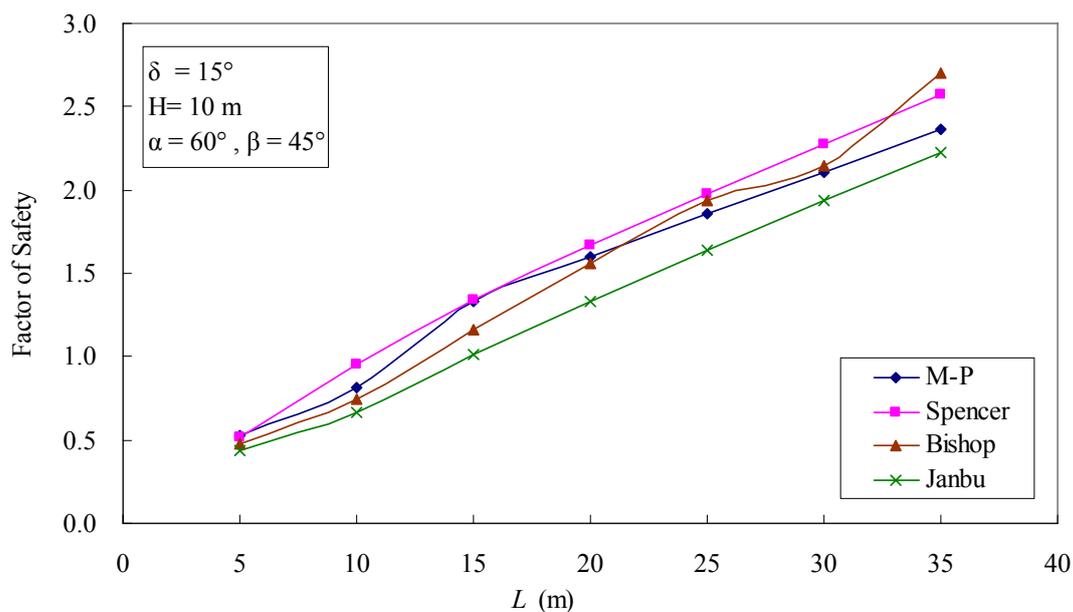


圖4-6 一階掩埋場滑動安全係數與掩埋體長度 L 之關係

垃圾掩埋長度(L)與滑動安全係數成正比(如圖 4-6)，因掩埋體水平長度愈長，在填埋高度不變的狀況下，相對地抗滑動的摩擦力量愈大。掩埋長度由 5 m 增加到 35 m 時，安全係數由 0.5 遞增至 2.4 左右，當掩埋長度小於 15 m 時，安全係數會小於 1。Spencer 及 Simplified

Janbu 曲線變化趨勢較一致，Morgenstern and Price 及 Simplified Bishop 線形較不規則。探討各方法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值變動幅度約-5%~22%，Simplified Janbu 差異約 14%~30%，Morgenstern and Price 差異約-0.8%~14%。

檢視局部淺層破壞模式，如圖 4-7 所示，淺層破壞之安全係數不受垃圾掩埋長度(L)影響；隨著長度增加，淺層破壞之安全係數維持在約 3.4 上下。比較一階掩埋場界面滑動安全係數與淺層破壞安全係數之趨勢線，兩者在 $L = 60$ m 處相交，表示掩埋體長度小於 60 m 時，破壞模式由滑動界面控制；掩埋體長度大於 60 m 以後，破壞模式由局部淺層破壞控制。

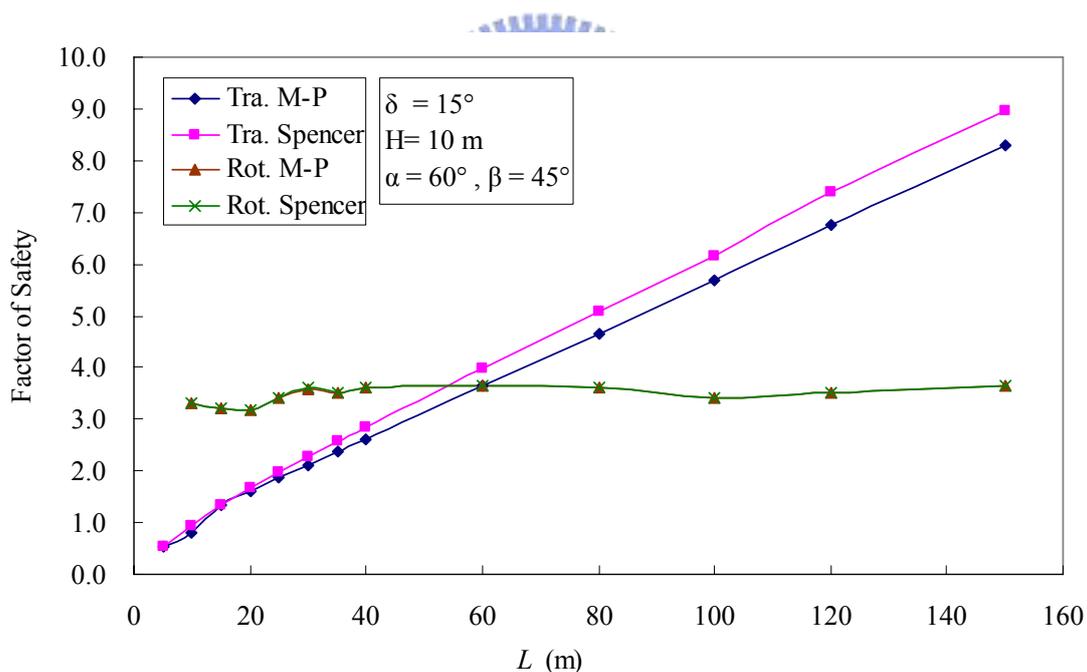


圖 4-7 一階掩埋場界面滑動及淺層破壞與安全係數之關係(考慮 L)

4. 掩埋場背靠的邊坡角度(α)

在其他形狀因子不變的狀況下，安全係數隨掩埋場背靠的邊坡角度(α)增加而提高(如圖 4-8)，其原因係當 α 角提高時，雖然坡面上滑

動的力量增加，但相對地坡長縮短，反而導致下滑面上的量體造成之下滑合力減小，二者權衡之結果，反而是角度愈大時安全係數愈高。但前提是，底部土壤是軟岩，本身強度夠高，直立性好，破壞時不會從底部軟岩滑動。 α 由 30° 增加到 75° 時，平均安全係數由 2 遞增至 2.5 左右，然而儘管掩埋場底部坡角會影響安全係數，但是相對影響程度較小，且安全係數並非完全隨著 α 角增加而遞增，而是在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 時，所得的安全係數是最低的。各分析法分析結果與界面摩擦角線形一致，由基本假設可充分解釋此狀況。探討各方法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值變動幅度約 $-18\% \sim 13\%$ ，Simplified Janbu 差異約 $0.2\% \sim 28\%$ ，Morgenstern and Price 差異約 $-0.5\% \sim 20\%$ 。

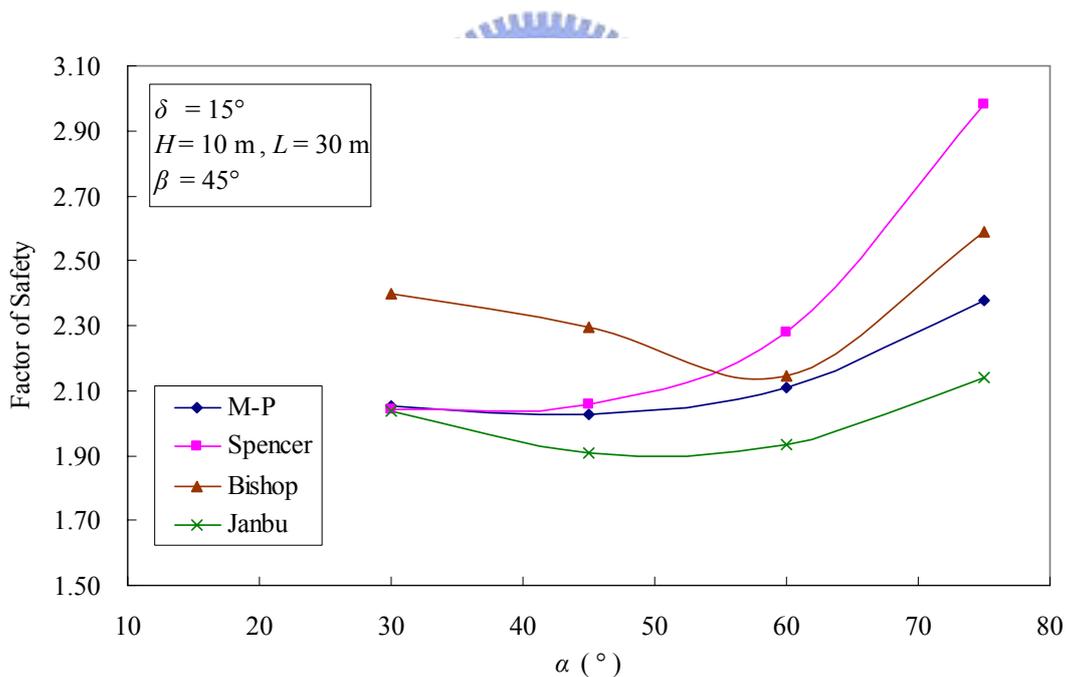


圖4- 8一階掩埋場滑動安全係數與現地邊坡角度 α 之關係

由表 4-4 可知，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，故掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外，淺層破壞之安全係數隨著掩埋場背靠的邊坡角度(α)增加而遞減，初始坡角遞增時

安全係數降的很快，但當 α 增加到 45° 以後，安全係數即不隨 α 增加而降低，維持在 3.59 左右。顯示當垃圾掩埋場背靠的坡角大於 45° 時，淺層滑動安全係數即不受坡角的影響。

表 4-4 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 α)

破壞類型 搜尋方法	FS			
	Translational		Rotational	
	Fully Specified		Grid and Raidus	
$\alpha(^\circ)$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
75	2.377	2.980	3.590	3.597
60	2.110	2.278	3.589	3.596
45	2.024	2.057	3.590	3.597
30	2.052	2.041	4.357	4.369

5. 掩埋完成面的邊坡角度(β)

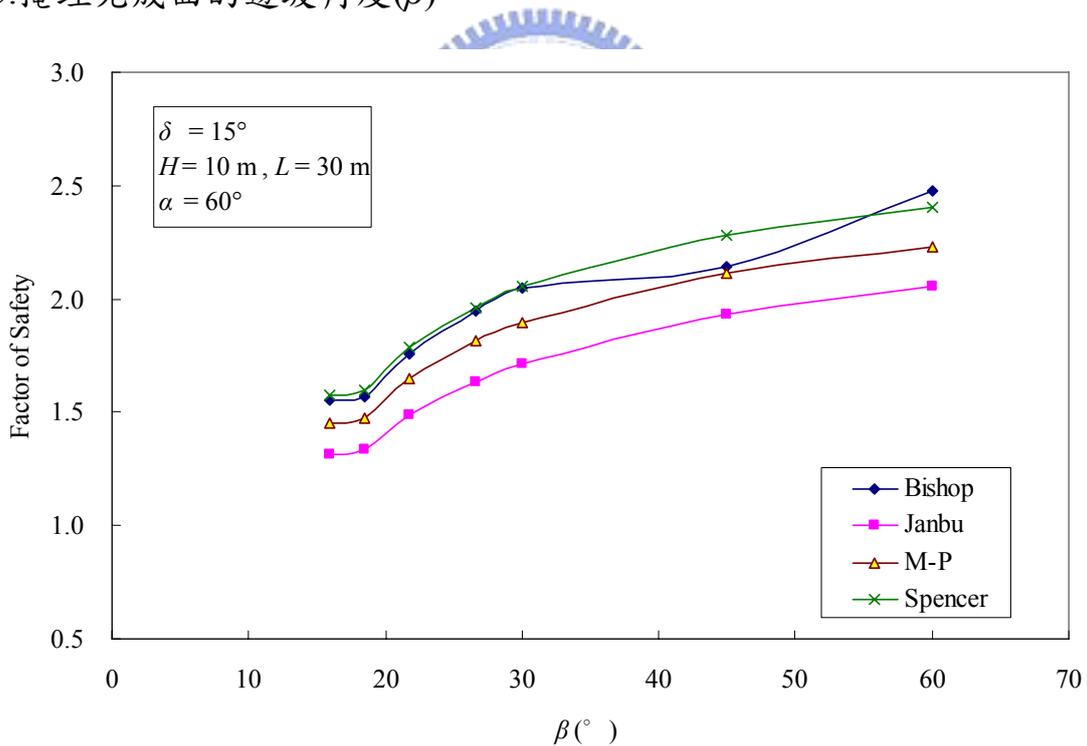


圖4-9 一階掩埋場滑動安全係數與掩埋完成面角度 β 之關係

當掩埋完成面的邊坡角度 β 增加時，界面滑動的安全係數亦增加，如圖 4-9 所示。當 β 角增加時，通過廢棄物本身的滑動安全係數

一定會降低，但是對於掩埋體底部的界面來說反而因為上方廢棄物的體積與重量增加，所以水平面上的摩擦阻抗因正向應力提高而增加。掩埋面的坡角 β 由 15.95° (3.5H:1V) 增加到 60° 時，平均安全係數由 1.4 遞增至 2.3 左右；相對其他參數而言，掩埋面的坡角 β 對安全係數的影響程度較小。各分析法分析結果與界面摩擦角線形一致；比較各方法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值變動幅度約 -3%~6%，Simplified Janbu 差異約 14%~17%，Morgenstern and Price 差異保持約 7%。

檢核一階掩埋場廢棄物內部破壞，分析結果顯示，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，如表 4-5 所示，因此掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外，淺層破壞之安全係數隨著掩埋完成面的坡角增加而遞減，且斜率明顯大於界面滑動破壞之安全係數，顯示完成面的坡角對淺層破壞之安全係數有很大的影響。



表 4-5 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 β)

		FS			
破壞類型		Translational		Rotational	
搜尋方法		Fully Specified		Grid and Raidus	
$\beta(^{\circ})$	H:V	M-P	Spencer	M-P	Spencer
60	$\sqrt{3}:1$	2.230	2.402	2.997	3.052
45	1:1	2.110	2.278	3.589	3.596
30	$1:\sqrt{3}$	1.897	2.052	3.953	3.962
26.56	1:2	1.814	1.963	4.232	4.245
21.8	1:2.5	1.651	1.786	5.280	5.291
18.43	1:3	1.474	1.594	5.640	5.650
15.95	1:3.5	1.453	1.572	6.404	6.414

4.2.2 一階掩埋場參數變異性分析結果討論

一階掩埋場底部滑動的安全係數與界面摩擦角成正比，與 L 、 α 、 β 等三個因子成正比，與 H 成反比。比較各參數變異性對安全係數的影響，界面摩擦角(δ)對安全係數影響最大，其次是垃圾掩埋體長度(L)及，填埋高度(H)再來是垃圾掩埋面坡角(β)及掩埋體背靠的坡角(α)。

一階掩埋場淺層破壞之安全係數與界面摩擦角成正比，與 H 、 α 、 β 等三個因子成反比。比較各參數變異性對安全係數的影響，廢棄物填埋高度(H)對安全係數影響最大，其次是、垃圾掩埋面坡角(β)及掩埋體背靠的坡角(α)，再來是垃圾掩埋體長度(L)，界面摩擦角(δ)則幾乎不影響。

比較各種分析法，Spencer所得安全係數最高，Simplified Janbu所得安全係數最低，相對較保守。Spencer及Simplified Janbu曲線線形一致；Morgenstern and Price在 H 及 L 兩參數時，曲線線形較不規則；而Simplified Bishop各參數線形皆不規則，惟在 H 情況下，其線形較一致。根據基本假設，Simplified Bishop只滿足力矩平衡，且只適用於圓弧滑動，而本分析模式屬於平面滑動，因此分析結果線形較不規則；Simplified Janbu只滿足力系平衡且適合平面滑動；Morgenstern and Price、Spencer則同時滿足力系及力矩平衡，且適合不規則破壞，所以後三者分析結果較一致。以Spencer為基準做比較，Morgenstern and Price差異值約7%左右，Simplified Bishop差異值約為-2%~6%，Simplified Janbu差異值約14%~17%。

根據民國九十年十二月編印之「建築物基礎構造設計規範」有關邊坡穩定分析安全係數之建議，常時需大於1.5。一階掩埋場之標準斷面($\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$)，在界面滑動破壞模式下，由分析結果可提出下列建議，以提供設計及分析之參考：

1. 當 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，界面摩擦角(δ)建議大於 12° 。
2. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，掩埋高度(H)建議小於 15 m 。
3. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 時，掩埋長度(L)建議大於 20 m 。
4. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，且背靠邊坡為軟岩，直立性好，則背靠的坡角(α)可建議介於 $30^\circ \sim 45^\circ$ 或 $60^\circ \sim 75^\circ$ 。
5. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，掩埋面坡角(β)建議介於 $20^\circ \sim 60^\circ$ 。

4.3 二階坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析

二階掩埋場的分析結果顯示，安全係數與界面摩擦角以及 H 、 L ， α 、 β 等四個因子的變化趨勢與一階掩埋場一致。惟二階掩埋場設定的高度較高，因此安全係數相對略低。此外，二階掩埋場分析中與一階不同的是平台寬度 B 的影響，事實上由分析結果來看，雖然安全係數確實會隨著平台寬度增加而提高，但變化並不大。換言之，加寬平台對於地工合成材的錨定來說是較為方便且確實的，對於掩埋場封閉後表面(Vaneer Cover)邊坡穩定性有重要的影響，但對於沿底部弱面的邊坡穩定性來說影響不大。

4.3.1 二階掩埋場參數變異性分析結果

1. 界面摩擦角(δ)

界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係。界面摩擦角由 5° 增加到 25° 時，安全係數由 0.4 增加到 1.7 左右，當界面摩擦角小於 12° 時，安全係數會低於 1 ，所以界面摩擦角對安全係數值有絕對的影響，如圖

4-10所示。四種分析法線形一致。探討各方法之差異，若以Spencer為基準，Simplified Bishop 差異值變動幅度約11%~19%；Simplified Janbu差異約15%~30%；Morgenstern and Price差異保持約3%~4.5%。

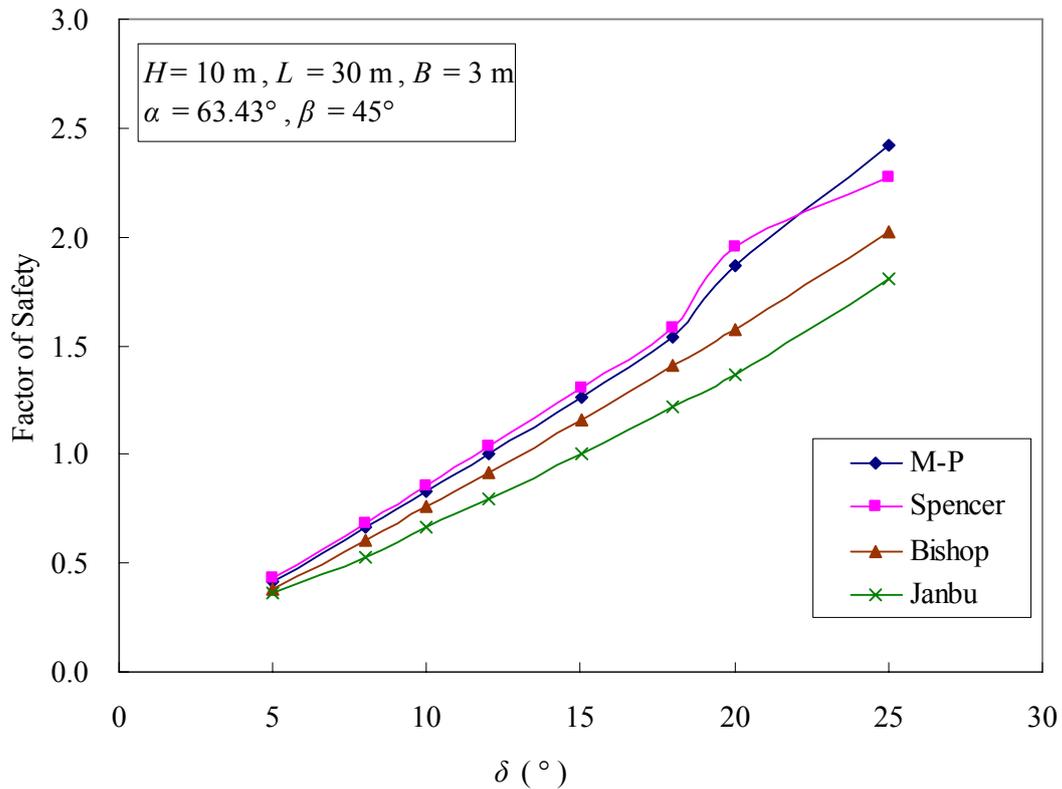


圖4- 10二階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角 δ 之關係

表 4-6 為二階掩埋場界面滑動破壞之安全係數，與局部淺層破壞之安全係數比較表，由表可以看出，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，故掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外淺層破壞之安全係數亦與界面摩擦角(δ)成正比關係，但影響幅度明顯小很多。

表 4-6 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 δ)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
$\delta(^{\circ})$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	0.414	0.428	2.320	2.331
8	0.664	0.685	2.360	2.362
10	0.833	0.859	2.417	2.418
12	1.004	1.035	2.439	2.440
15	1.266	1.305	2.475	2.475
20	1.535	1.583	2.296	2.296
25	1.864	1.952	2.467	2.467

2. 掩埋高度(H)

埋埋高度(H) 與安全係數成反比，高度愈高滑動之安全係數愈小，如圖4-11所示。埋埋高度由10 m增加到35 m時，安全係數由2.2遞減至0.7左右，另外，當掩埋高度大於10 m時，既有機會發生坡壞；由此可知埋埋高度對安全係數值有很大的影響。各分析法線形一致，惟Simplified Bishop曲線線形較不規則。探討各方法之差異，若以Spencer為基準，Simplified Bishop隨著 H 增加，差異值由2%遞增到12%；Simplified Janbu亦同，隨著 H 增加，差異值由18%遞增到23%；Morgenstern and Price則隨 H 遞增而降低，差異值由6%遞減到0.1%。

由表4-7可知，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，故掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外，淺層破壞之安全係數亦與埋埋高度(H)成反比，且斜率明顯大於界面滑動破壞之安全係數，由此顯見埋埋高度，無論是界面滑動破壞或局部淺層破壞，皆有明顯的影響，且皆為反比關係。

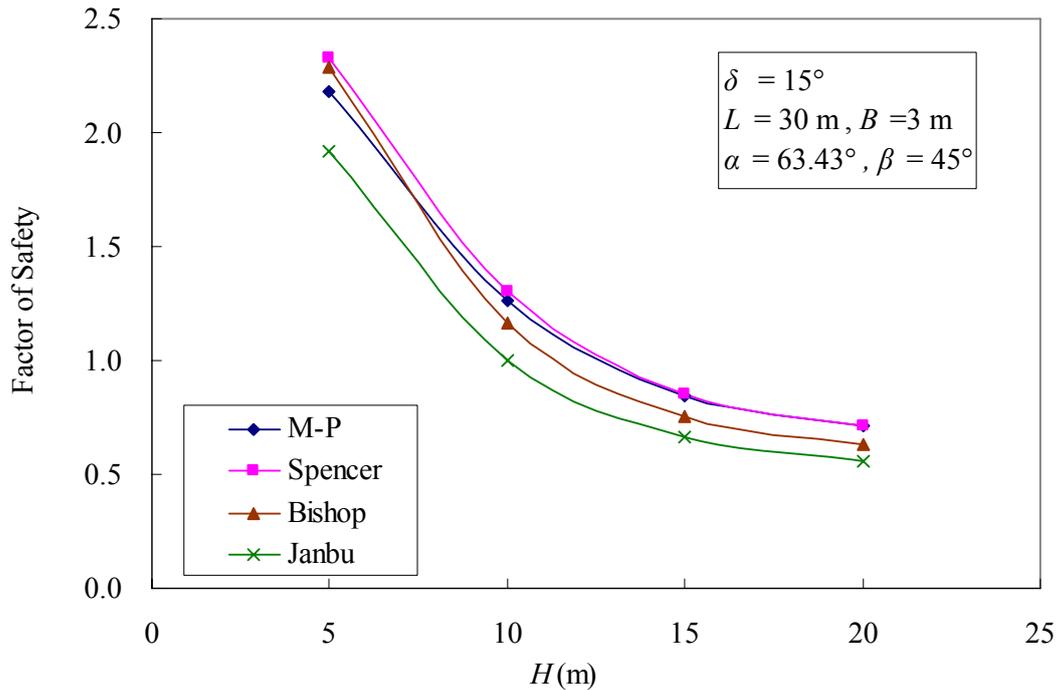


圖4- 11二階掩埋場滑動安全係數與掩埋高度 H 之關係

表 4- 7 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 H)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
H(m)	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	2.184	2.328	4.027	4.035
10	1.266	1.305	2.475	2.475
15	0.844	0.852	2.209	2.029
20	0.715	0.716	1.834	1.835

3.掩埋長度(L)

垃圾掩埋長度(L)與安全係數成正比(如圖4-12)。掩埋長度由20 m增加到60 m時，安全係數由0.8遞增至2.2左右，當掩埋長度小於30 m時，安全係數會小於1，可知填埋長度對安全係數有很大的影響。各分析法線形一致，惟Morgenstern and Price曲線線形較不規則。探討各方法之差異，以Spencer為基準，Simplified Bishop隨 L 遞增而降低，差

異值由12%遞減到2%；Simplified Janbu差異約18%~23%；Morgenstern and Price隨著 L 增加，差異值由1%遞增到8%。

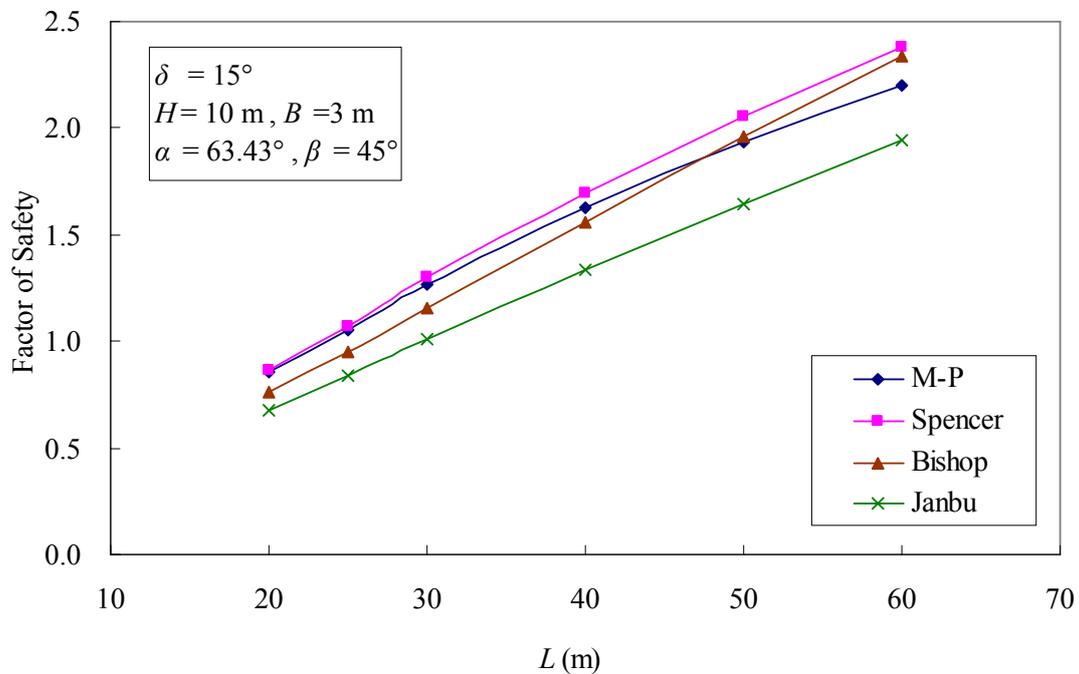


圖 4-12 二階掩埋場滑動安全係數與掩埋體長度 L 之關係

檢視局部淺層破壞模式(圖4-13)，淺層破壞之安全係數與垃圾掩埋長度(L)之間無明顯趨勢；隨著長度增加，淺層破壞之安全係數維持在約2.5左右。比較二階掩埋場界面滑動安全係數與淺層破壞安全係數之趨勢線，兩者在 $L=70$ m處相交，表示掩埋體長度小於70 m時，破壞模式由滑動界面控制；掩埋體長度大於70 m以後，破壞模式由局部淺層破壞控制。

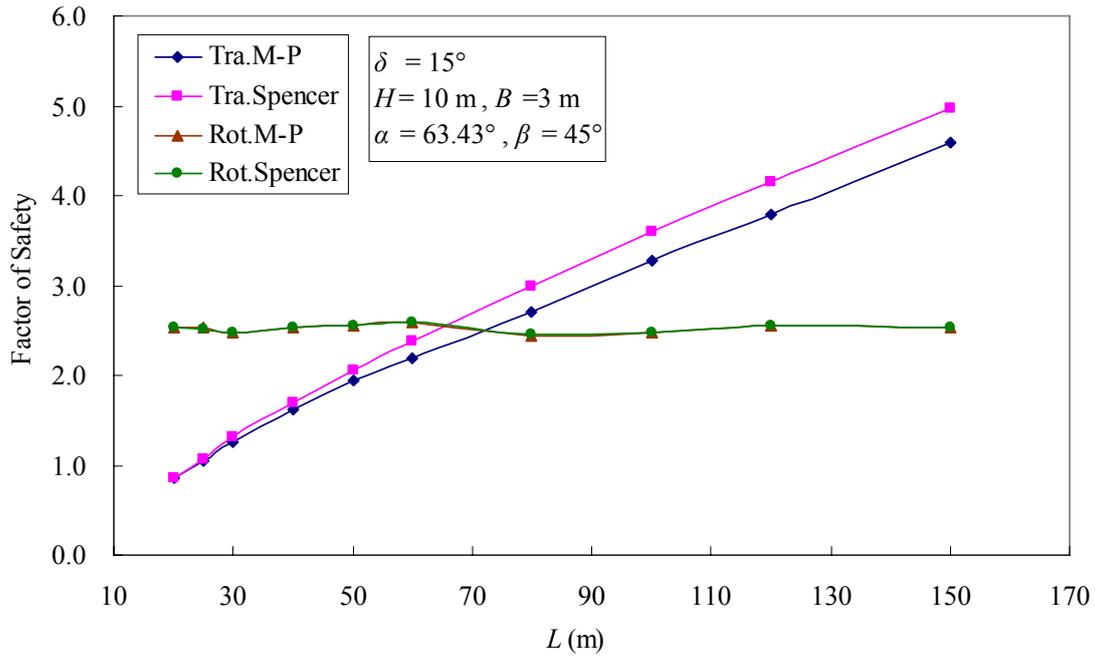


圖 4-13 二階掩埋場界面滑動及淺層破壞與安全係數之關係(考慮 L)

4. 台階寬度(B_l)

安全係數隨著平台寬度(B_l)增加而提高，但變化並不大，如圖4-14所示。平台寬度由0 m增加到5 m時，安全係數由1.1遞增至1.2左右。各分析法線形一致，比較各方法之差異，以Spencer為基準，Simplified Bishop隨 B 遞增，差異值由10.6%遞增到11.5%；Simplified Janbu隨 B 遞增而降低，差異值由23.4%遞減到22.2%；Morgenstern and Price隨著 B 遞減，差異值由3.5%遞減到2.8%。

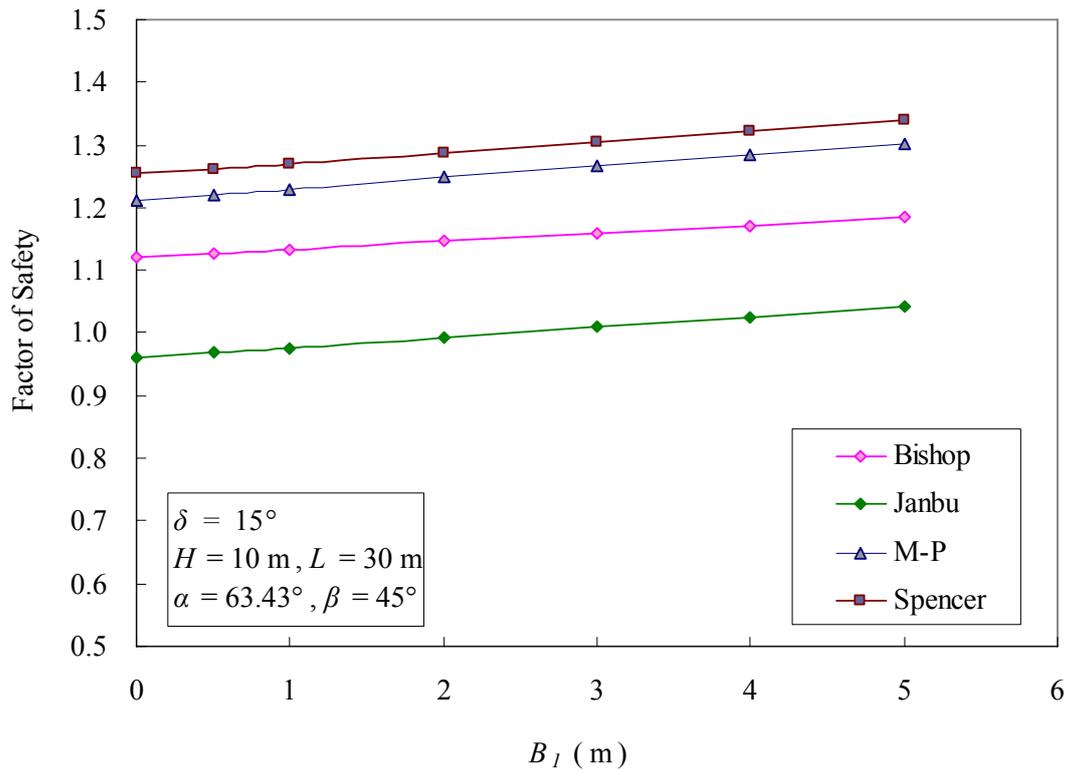


圖 4-14 二階掩埋場滑動安全係數與背靠邊坡之平台寬度 B_1 之關係

5. 掩埋場背靠的邊坡角度(α)

安全係數隨掩埋場底部的邊坡角度(α)增加而提高(如圖4-15)。掩埋場底部坡角 α 由 30° 增加到 75° 時，平均安全係數由1.2遞增至1.4左右， α 對安全係數相對影響較小，且在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 時，安全係數是最低的。各分析法線形一致；探討各方法之差異，以Spencer為基準，其他三者差異值皆隨 α 增加而增加，Simplified Bishop 差異值約-4%~21%，Simplified Janbu差異約6%~26%，Morgenstern and Price差異約-1%~10%。

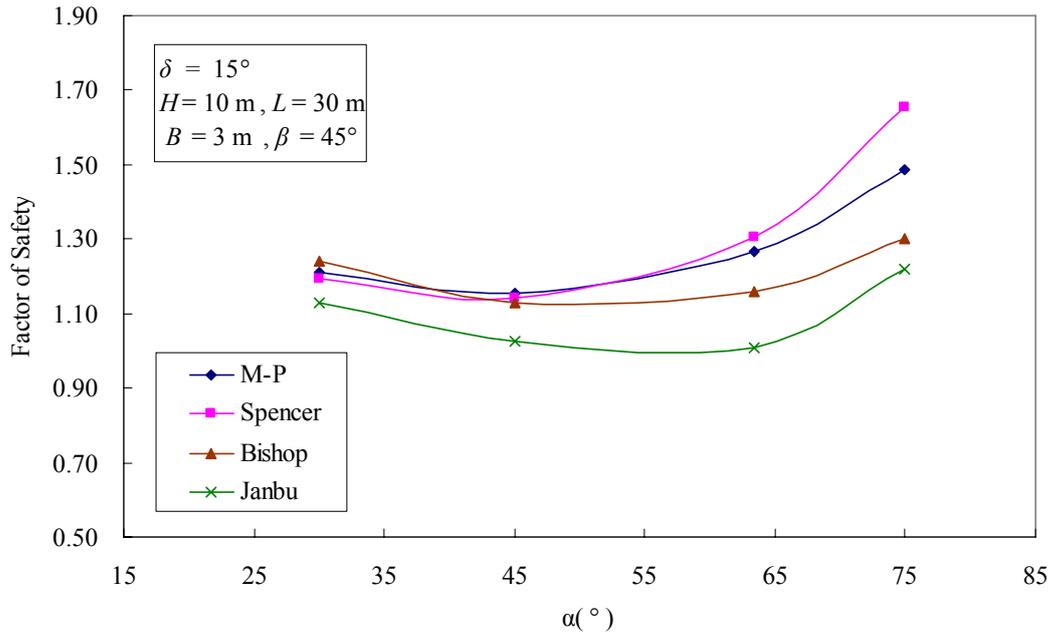


圖4- 15二階掩埋場滑動安全係數與現地邊坡角度 α 之關係

由表4-8可知，局部淺層破壞之安全係數皆大於界面滑動破壞之安全係數，故掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。另外，淺層破壞之安全係數隨著掩埋場背靠的坡角(α)增加而遞減，但影響不多。

表4- 8二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 α)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
α (°)	M-P	Spencer	M-P	Spencer
75	1.488	1.653	2.535	2.536
63.43	1.266	1.305	2.475	2.475
45	1.155	1.144	2.456	2.456
30	1.210	1.195	2.685	2.685

6.掩埋完成面的邊坡角度(β)

當掩埋完成面的邊坡角度(β)增加時，界面滑動的安全係數亦增加(如圖4-16)。坡角 β 由 15.95° (3.5H:1V)增加到 60° 時，平均安全係數由

1.1遞增至1.4左右；相對其他參數而言， β 對安全係數相對影響較小，但 $\beta = 30$ 時，安全係數最低。各分析法線形一致；比較各方法之差異，若以Spencer為基準，Simplified Bishop 差異值變動範圍約10%~11%；Simplified Janbu差異約22%~23%；Morgenstern and Price 差異保持約3%。

檢核二階掩埋場廢棄物內部破壞，局部淺層破壞之安全係數分析結果與一階掩埋場相同，如表 4-9 所示。掩埋場破壞會沿著界面滑動破壞。淺層破壞之安全係數與掩埋面坡角(β)成反比。

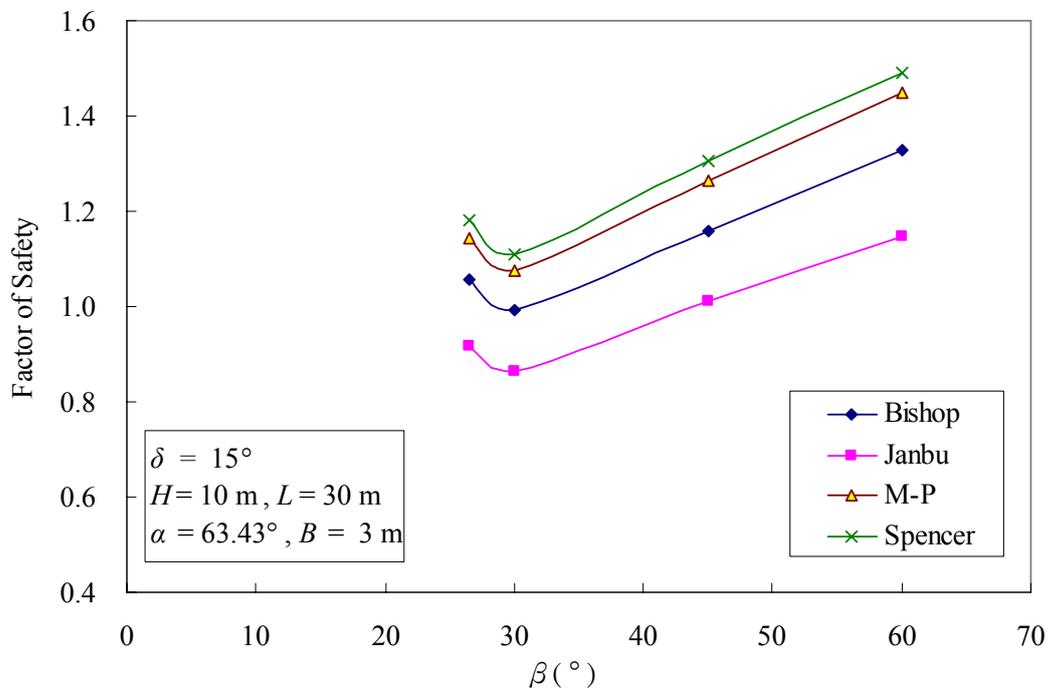


圖4- 16二階掩埋場滑動安全係數與掩埋完成面角度 β 之關係

表 4-9 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表(考慮 β)

		FS			
破壞類型		Translational		Rotational	
搜尋方法		Fully Specified		Grid and Raidus	
$\beta(^{\circ})$	H:V	M-P	Spencer	M-P	Spencer
60	$\sqrt{3}:1$	1.448	1.492	2.258	2.259
45	1:1	1.266	1.305	2.475	2.475
30	$1:\sqrt{3}$	1.076	1.108	3.451	3.452
26.56	1:2	1.145	1.180	4.017	4.017

4.3.2 二階掩埋場參數變異性分析結果討論

二階掩埋場底部滑動的安全係數與界面摩擦角以及 L 、 B 、 α 、 β 等四個因子成正比，與 H 成反比。比較各參數變異性對安全係數的影響，界面摩擦角(δ)、垃圾填埋高度(H)及掩埋體長度(L)對安全係數影響最大，其次是垃圾體背靠平台寬度、垃圾掩埋面坡角(β)及掩埋體背靠的坡角(α)。

二階掩埋場淺層破壞之安全係數與界面摩擦角成正比，與 H 、 α 、 β 等三個因子成反比。比較各參數變異性對安全係數的影響，填埋高度(H)對安全係數影響最大，其次是垃圾掩埋面坡角(β)，再來是界面摩擦角(δ)、垃圾掩埋體長度(L)及掩埋體背靠的坡角(α)，後三者影響很小。

比較各種分析法，Spencer安全係數最高，Simplified Janbu相對較保守。各分析法線形皆一致，惟Morgenstern and Price在掩埋體長度 L 因子下，曲線線形較不規則；而Simplified Bishop 在垃圾填埋高度 H 因子下，其線形較不規則。以Spencer為基準做比較，Morgenstern and Price差異值約3%左右，Simplified Bishop差異值約為10%~12%，Simplified Janbu差異值約22%~23%。

根據民國九十年十二月編印之「建築物基礎構造設計規範」有關邊坡穩定分析安全係數之建議，常時需大於1.5。二階掩埋場之標準斷面($\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 、 $B_l = 3\text{ m}$)，在界面滑動破壞模式下，由分析結果可以提出下列建議，以提供設計及分析之參考：

1. 當 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 、 $B_l = 3\text{ m}$ 時，界面摩擦角(δ)建議大於 19° 。
2. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $L = 30\text{ m}$ 、 $B_l = 3\text{ m}$ 時，各階掩埋高度(H)建議小於 8 m 。
3. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $B_l = 3\text{ m}$ 時，掩埋長度(L)建議大於 38 m 。
4. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，背靠的邊坡之平台寬度(B_l)建議不得小於 3 m 。
5. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 、 $B_l = 3\text{ m}$ 時，且背靠邊坡為軟岩，直立性好，則建議背靠的坡角(α)介於 $30^\circ \sim 40^\circ$ 或 $60^\circ \sim 75^\circ$ 。
6. 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 、 $B_l = 3\text{ m}$ 時，掩埋面坡角(β)建議介於 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

4.4 考慮地震力作用下之邊坡穩定分析

4.4.1 一階坡地型廢棄物掩埋場分析結果

1. 水平地震力係數($K_h = 0.23 g$)

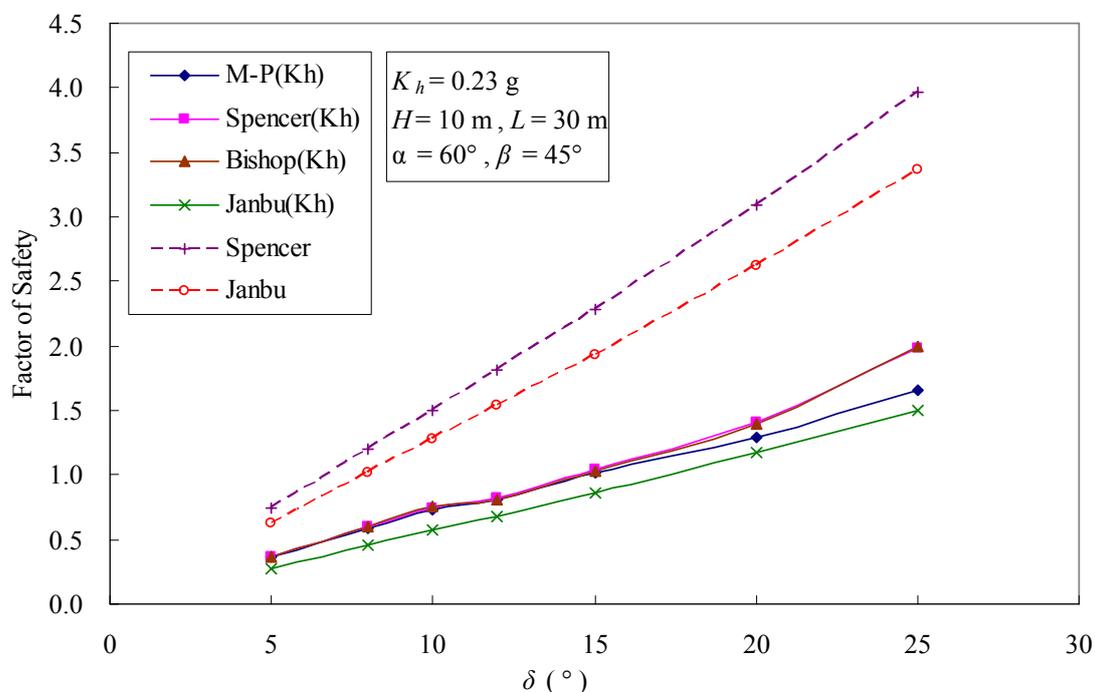


圖 4-17 一階掩埋場滑動安全係數與界面摩擦角之關係($K_h = 0.23 g$)

由圖 4-17 可以看出，在地震力作用下，考慮水平地震力係數 $K_h = 0.23 g$ ，界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係，界面摩擦角由 5° 增加到 25° 時，安全係數由 0.34 增加到 1.79 左右，當界面摩擦角小於 15° 時，安全係數會低於 1。與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 51%，產生滑動破壞之界面摩擦角，由 7° 增為 15° ，由此顯見地震力對界面摩擦角之滑動安全係數有很大的影響。

比較各分析法，Spencer 所得安全係數最高，Simplified Janbu 所得安全係數最低。Simplified Janbu 幾乎呈線性變化，與未考慮地震力作用的分析結果相同。Spencer、Morgenstern and Price、Simplified Bishop 三種方法線形一致，但在 $10^\circ \sim 12^\circ$ 之間，斜率突然變緩，此與

未考慮地震力作用的分析結果不同之處。

探討各分析法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 安全係數值差異很小，幾乎重疊一致，差異值約-1%~1.5%，Morgenstern and Price 前半段差異值亦很小約 2%，在後半段(界面摩擦角大於 15°)，差異值擴大至 16%，Simplified Janbu 17%~27%。

檢核一階掩埋場廢棄物內部破壞，在水平地震力係數 $K_h = 0.23 g$ 作用下，界面摩擦角(δ)與安全係數約略成正比關係，如圖 4-18 所示。其結果與未考慮地震力的分析結果比較，安全係數平均下降約 25%。比較界面滑動與淺層破壞之安全係數，淺層破壞之安全係數均大於界面滑動之安全係數且皆大於 1，顯示地震時，破壞模式由界面滑動破壞控制，分析結果如表 4-10 所示。

表 4-10 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表

($K_h = 0.23 g$)

	FS			
破壞類型	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
$\delta(^{\circ})$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	0.364	0.371	2.397	2.518
8	0.586	0.597	2.419	2.536
10	0.736	0.749	2.434	2.481
12	0.807	0.826	2.450	2.495
15	1.017	1.041	2.451	2.516
20	1.289	1.414	2.320	2.525
25	1.663	1.980	2.458	2.533

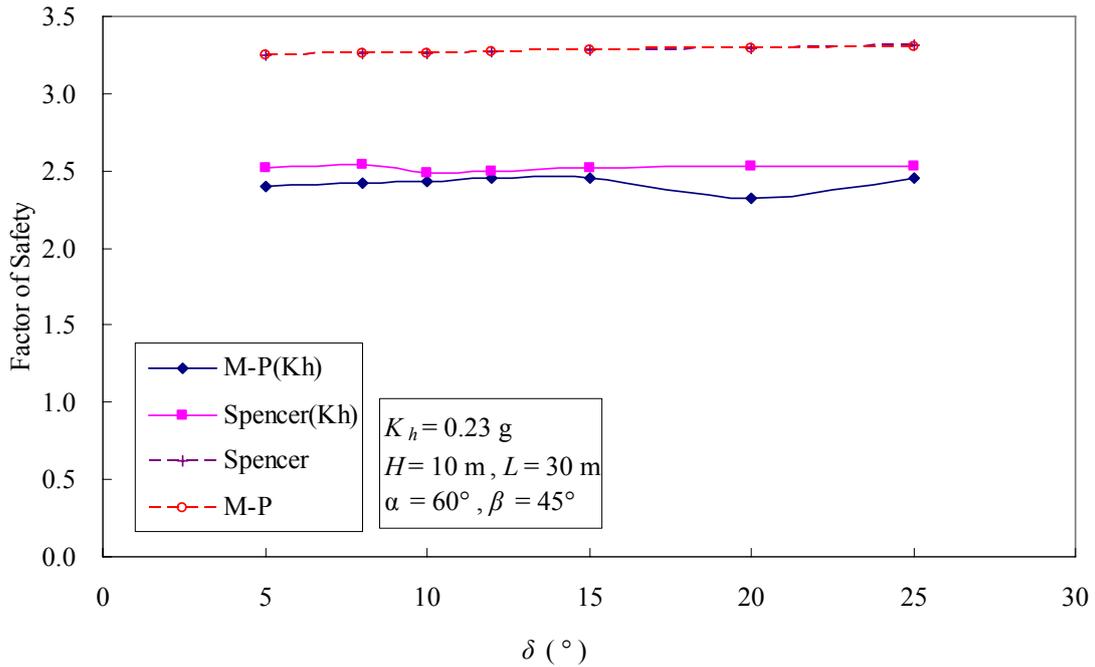


圖 4-18 一階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係

($K_h = 0.23 g$)

2. 水平地震力係數($K_h = 0.33 g$)

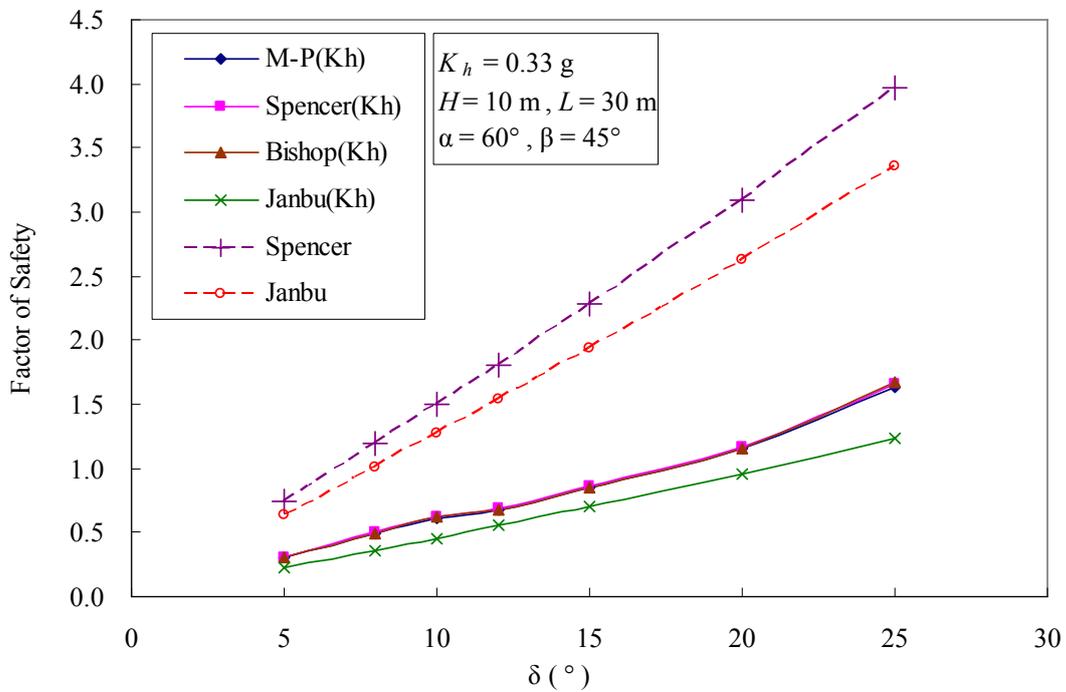


圖 4-19 一階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角之關係

($K_h = 0.33 g$)

在地震力作用下，考慮水平地震力係數 $K_h = 0.33 g$ ，界面摩擦角 (δ) 與安全係數成正比關係，如圖 4-19 所示，當界面摩擦角由 5° 增加到 25° 時，安全係數由 0.29 增加到 1.55 左右，當界面摩擦角小於 18° 時，安全係數會低於 1。與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 59%，產生滑動破壞之界面摩擦角，由 7° 增為 18° 。

各分析法之線形變化與水平地震力係數 $K_h = 0.23 g$ 之分析結果相同。探討各分析法之差異，若以 Spencer 為基準，Morgenstern and Price 及 Simplified Bishop 安全係數值與 Spencer 差異很小，幾乎重疊一致，Simplified Bishop 差異值約 -1%~1.2%，Morgenstern and Price 差異值約 1.4%~1.9%，Simplified Janbu 18%~28%。

檢核一階掩埋場廢棄物內部破壞，在 $K_h = 0.33 g$ 作用下，界面摩擦角 (δ) 與安全係數約略成正比關係，如圖 4-20 所示。其結果與未考慮地震力的分析結果比較，安全係數平均下降約 31%。比較界面滑動與淺層破壞之安全係數，如表 4-11 所示，淺層破壞之安全係數均大於界面滑動之安全係數且皆大於 1，顯示地震時，破壞模式由界面滑動破壞控制。

表 4-11 一階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表

($K_h = 0.33 g$)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
$\delta(^\circ)$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	0.364	0.371	2.040	2.372
8	0.586	0.597	2.056	2.382
10	0.736	0.749	2.068	2.389
12	0.807	0.826	2.080	2.396
15	1.017	1.041	2.099	2.408
20	1.289	1.414	2.137	2.429
25	1.663	1.980	2.148	2.453

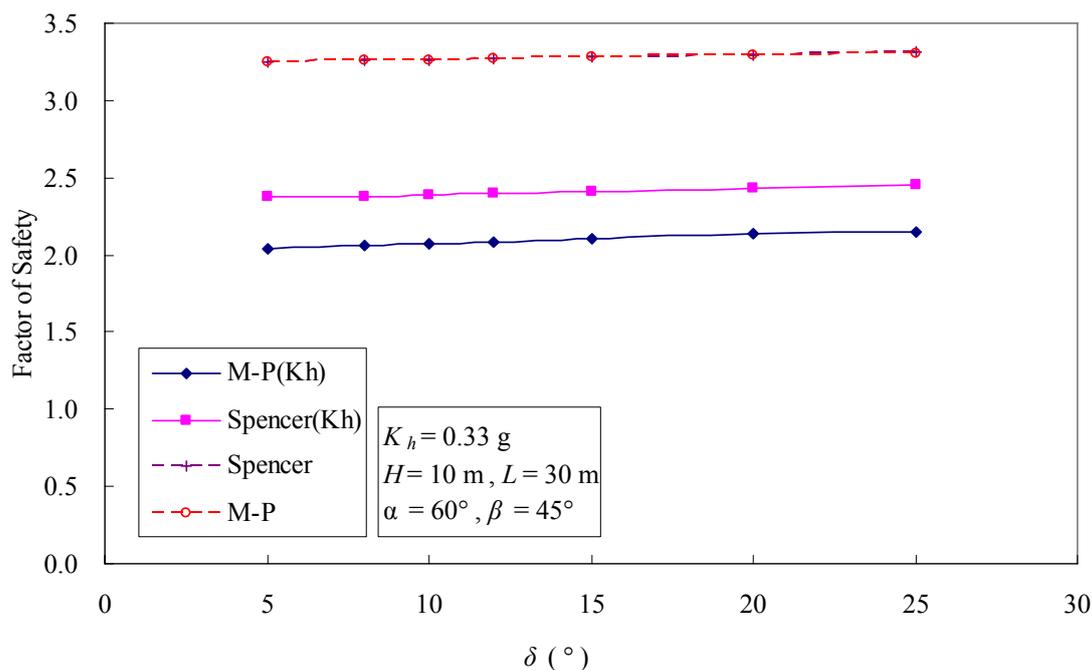


圖 4-20 一階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係

($K_h = 0.33 \text{ g}$)

4.4.2 一階坡地型廢棄物掩埋場分析結果討論

考慮地震力作用下，界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係。與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 51%~59%，抵抗界面滑動之界面摩擦角提高 $8^\circ\sim 11^\circ$ ，由此顯見地震力對界面摩擦角之滑動安全係數有很大的影響。檢核淺層破壞，其結果與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 25%~31%。

比較各分析法，Spencer 所得安全係數最高，Simplified Janbu 所得安全係數最低。Spencer、Morgenstern and Price、Simplified Bishop 三種方法線形一致，且安全係數值幾乎重疊一致，但在 $10^\circ\sim 12^\circ$ 之間，斜率突然變緩；Simplified Janbu 則幾乎呈線性變化。

比較各分析法之差異，以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值約 -1%~1.2%，Morgenstern and Price 差異值約 1.5%~2%，

Simplified Janbu 18%~27%。考慮地震力作用下，Simplified Bishop 及 Morgenstern and Price 差異值均縮小；Simplified Janbu 差異值則增加。

參考民國九十年十二月編印之「建築物基礎構造設計規範」有關邊坡穩定分析安全係數之建議，地震時需大於1.2。考慮在界面滑動破壞模式下，由分析結果建議，當 $K_h = 0.23\text{ g}$ ，界面摩擦角必需大於 20° ；當 $K_h = 0.33\text{ g}$ ，界面摩擦角必需大於 21° 。

4.4.3 二階坡地型廢棄物掩埋場分析結果

1. 水平地震力係數($K_h = 0.23\text{ g}$)

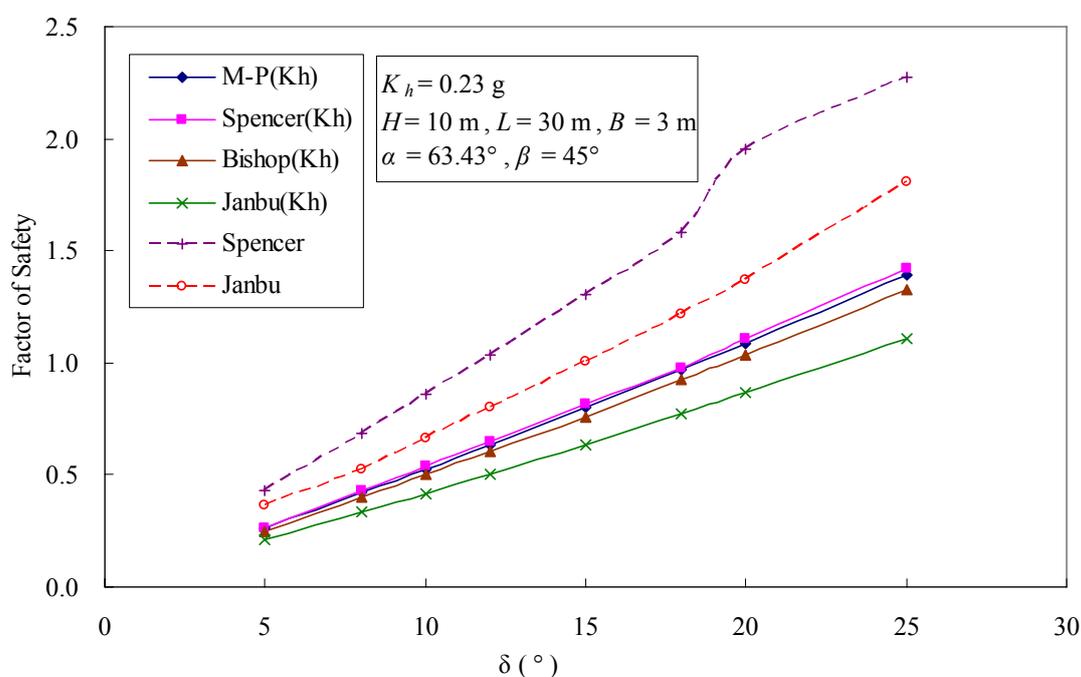


圖 4-21 二階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角之關係

($K_h = 0.23\text{ g}$)

由圖 4-21 可以看出，在地震力作用下，考慮水平地震力係數 $K_h = 0.23\text{ g}$ ，界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係。界面摩擦角由 5° 增加到 25° 時，安全係數由 0.25 增加到 1.31 左右，當界面摩擦角小於 21° 時，安全係數會低於 1。與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全

係數平均下降約 38.5%~ 35.8%，且抵抗界面滑動之界面摩擦角提升 9°，由此可知，地震力對界面摩擦角之滑動安全係數有很明顯的影響。

比較四種分析法，四種分析法線形一致，與未考慮地震力作用的分析結果相同。探討各分析法之差異，以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值維持約 6.5%；Simplified Janbu 差異約 21.8%；Morgenstern and Price 差異保持約 1%~2%。

檢核二階掩埋場廢棄物內部破壞，在水平地震力係數 $K_h = 0.23 g$ 作用下，界面摩擦角(δ)與安全係數約略成正比關係，如圖 4-22 所示。與未考慮地震力的分析結果比較，安全係數平均下降約 32%。比較界面滑動與淺層破壞之安全係數，淺層破壞之安全係數均大於界面滑動之安全係數且皆大於 1，顯示地震時，破壞模式由界面滑動破壞控制，分析結果如表 4-12 所示。

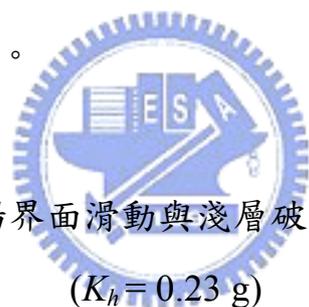


表 4-12 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表
($K_h = 0.23 g$)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
搜尋方法	Fully Specified		Grid and Raidus	
$\delta(^{\circ})$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	0.261	0.266	1.633	1.650
8	0.420	0.427	1.606	1.612
10	0.527	0.536	1.619	1.621
12	0.635	0.646	1.646	1.647
15	0.800	0.815	1.640	1.644
18	0.971	0.98	1.698	1.704
20	1.087	1.107	1.768	1.778
25	1.393	1.418	1.767	1.768

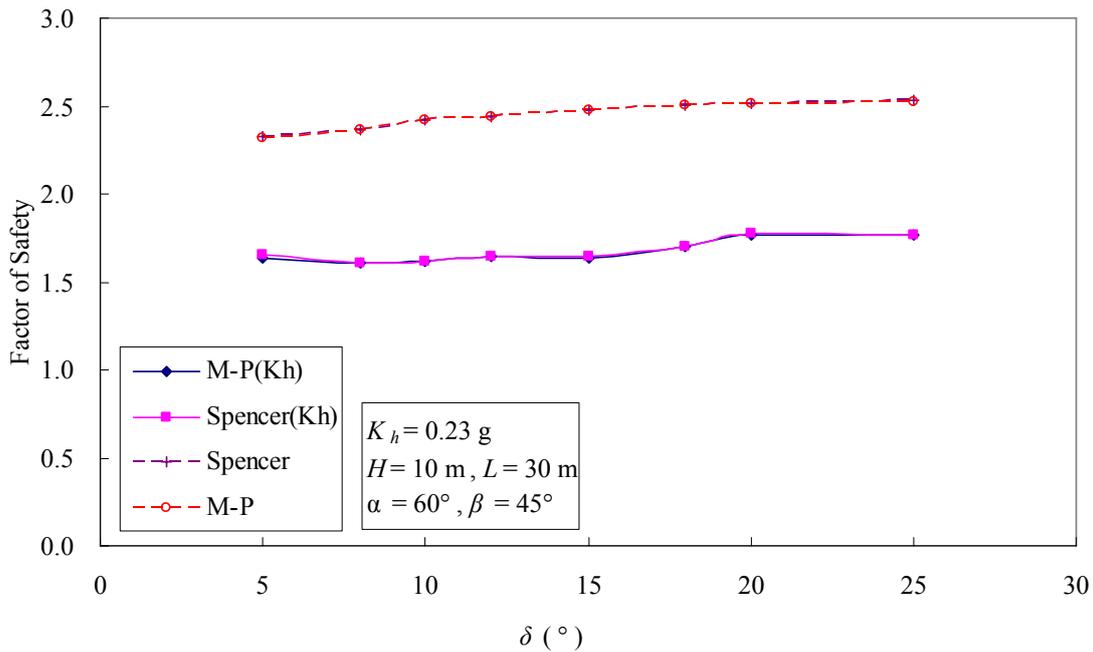
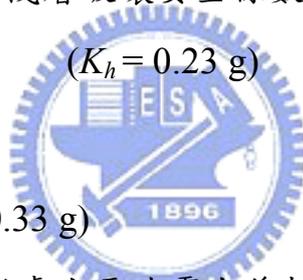


圖 4-22 二階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係



($K_h = 0.23 \text{ g}$)

2. 水平地震力係數($K_h = 0.33 \text{ g}$)

在地震力作用下，考慮水平地震力係數 $K_h = 0.33 \text{ g}$ ，界面摩擦角 (δ) 與安全係數成正比關係。如圖 4-23 所示，當界面摩擦角由 5° 增加到 25° 時，安全係數由 0.21 增加到 1.14 左右，當界面摩擦角小於 28° 時，安全係數會低於 1。與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 48%，抵抗界面滑動之界面摩擦角亦上升 12° 。

各分析法之線形變化與水平地震力係數 $K_h = 0.23 \text{ g}$ 之分析結果相同。探討各分析法之差異，若以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值維持約 5.8%；Simplified Janbu 差異約 23%~28.5%；Morgenstern and Price 差異保持約 1.3%~1.7%。

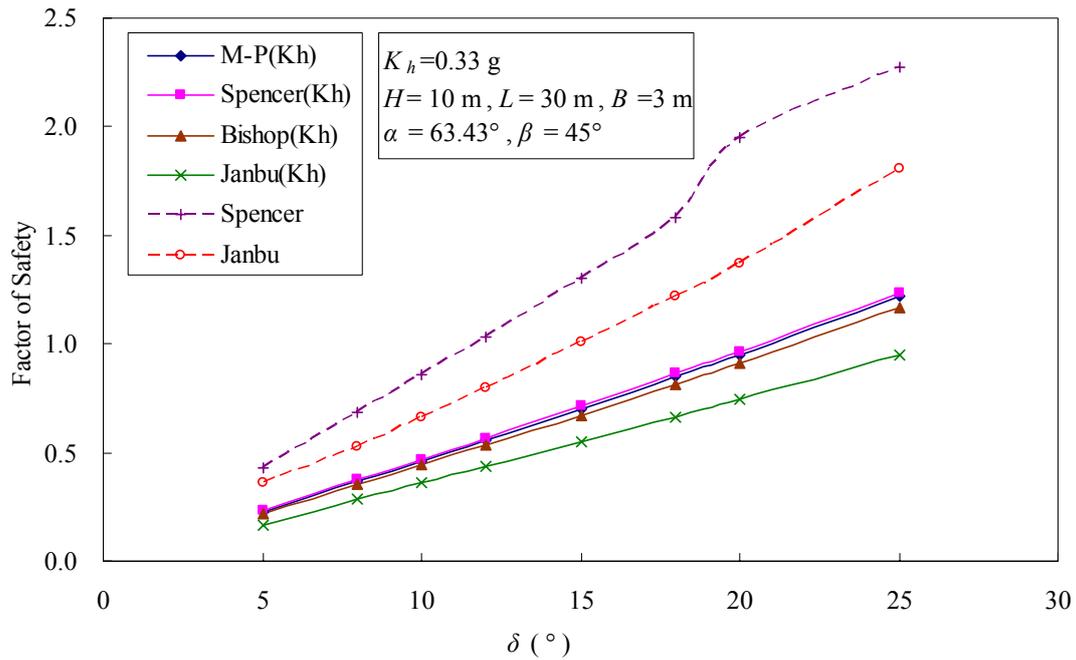


圖 4-23 二階掩埋場滑動安全係數與弱面界面摩擦角之關係



($K_h = 0.33 \text{ g}$)

檢核二階掩埋場淺層破壞，在 $K_h = 0.33 \text{ g}$ 作用下，界面摩擦角(δ)與安全係數約略成正比關係，如圖 4-24 所示。與未考慮地震力的分析結果比較，安全係數平均下降約 39%。比較界面滑動與淺層破壞之安全係數，如表 4-13 所示，淺層破壞之安全係數均大於界面滑動之安全係數且皆大於 1，顯示地震時，破壞模式由界面滑動破壞控制。

表 4-13 二階掩埋場界面滑動與淺層破壞之安全係數比較表

($K_h = 0.33 \text{ g}$)

破壞類型	FS			
	Translational		Rotational	
	Fully Specified		Grid and Raidus	
搜尋方法	M-P	Spencer	M-P	Spencer
$\delta(^\circ)$	M-P	Spencer	M-P	Spencer
5	0.228	0.231	1.453	1.467
8	0.367	0.373	1.414	1.420
10	0.461	0.468	1.451	1.456
12	0.556	0.564	1.445	1.446
15	0.700	0.712	1.457	1.461
18	0.849	0.863	1.491	1.494
20	0.951	0.966	1.543	1.576
25	1.219	1.238	1.564	1.566

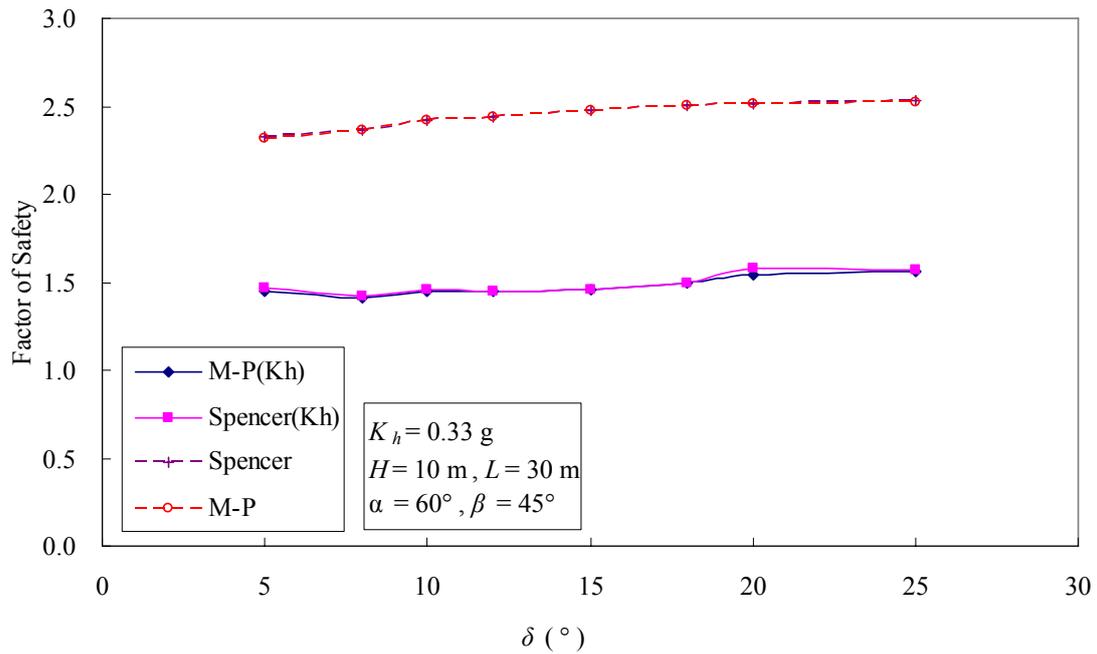


圖 4-24 二階掩埋場淺層破壞安全係數與界面摩擦角之關係

($K_h = 0.33 \text{ g}$)

4.4.4 二階坡地型廢棄物掩埋場分析結果討論

考慮地震力作用下，界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係，呈雙曲線分布，在 $\delta = 15^\circ$ 時斜率變緩。與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 35.8%~48%，抵抗界面滑動之界面摩擦角提高 9° ~ 12° ，因此地震力對界面摩擦角之滑動安全係數影響很大。檢核淺層破壞，其結果與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 32%~39%。

比較各分析法，Spencer 所得安全係數最高，Simplified Janbu 所得安全係數最低。Spencer、Morgenstern and Price、Simplified Bishop 及 Simplified Janbu 四種方法線形皆一致。

比較各分析法之差異，以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值約 5.8%~6.5%，Morgenstern and Price 差異值約 1.3%~1.7%，Simplified Janbu 21.8%~23.2%。考慮地震力作用下，Simplified Bishop 及 Morgenstern and Price 差異值均縮小；Simplified Janbu 差異值則增加。

參考民國九十年十二月編印之「建築物基礎構造設計規範」有關邊坡穩定分析安全係數之建議，地震時需大於 1.2。考慮在界面滑動破壞模式下，由分析結果建議，當 $K_h = 0.23 g$ ，界面摩擦角必需大於 24° ；當 $K_h = 0.33 g$ ，界面摩擦角必需大於 25° 。

第五章 結論與建議

5.1 結論

儘管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。本研究探討台灣地區坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定之設計因子，各參數變異性分析得到下列結論與建議。

一、坡地型廢棄物掩埋場破壞面搜尋形式及各切片法之適用性

1. 界面滑動破壞模式，可以Fully Specified搜尋方式分析，惟常會有安全係數無法收斂之情形，安全係數容許誤差作適當調整，可使安全係數收斂，並可得到理想之破壞面形狀及應力分布。
2. 淺層圓弧破壞模式，可以Grid and Radius搜尋方式分析，除了安全係數容許誤差的影響以外，臨界圓圓心格點及半徑線的設定須特別注意。
3. 界面滑動破壞模式。坡地型垃圾掩埋場可以Simplified Bishop、Simplified Janbu、Morgenstern and Price及Spencer等四種分析法進行分析。

二、坡地型廢棄物掩埋場參數變異性分析

1. 參數變異性分析結果顯示，Spencer安全係數最高，Janbu simplified最低，此與理論相符合。
2. 界面滑動破壞模式，界面摩擦角越大、掩埋場之高度愈高、掩埋體長度愈短、背靠之開挖山壁坡角愈平緩、掩埋完成面之坡角愈

平緩，則界面滑動之安全係數愈小。平台寬度對於二階掩埋場之邊坡滑動安全係數，影響不大，但仍可看出平台愈寬安全係數愈高之趨勢。各參數變異性對安全係數的影響，界面摩擦角(δ)、垃圾填埋高度(H)及掩埋體長度(L)對安全係數影響最大，其次是垃圾體背靠平台寬度(B)、垃圾掩埋面坡角(β)及掩埋體背靠的坡角(α)。

3. 掩埋體長度小於60 m時，破壞模式由滑動界面控制，掩埋體長度大於70 m時，破壞模式由淺層圓弧破壞控制。
4. 界面滑動破壞模式，由分析結果提出下列建議，以提供設計及分析之參考：
 - (1) 當 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，界面摩擦角(δ)建議大於 19° 。
 - (2) 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，掩埋高度建議小於15 m或每階高度不得大於8 m。
 - (3) 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 時，掩埋長度(L)建議大於40 m。
 - (4) 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 63.4^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，背靠的邊坡之平台寬度(B_l)建議不得小於3 m。
 - (5) 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，且背靠邊坡為軟岩，直立性好，則背靠的坡角(α)可建議 $30^\circ \sim 45^\circ$ 或 $60^\circ \sim 75^\circ$ 。
 - (6) 當 $\delta = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $H = 10\text{ m}$ 、 $L = 30\text{ m}$ 時，掩埋面坡角(β)建議介於 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。
5. 淺層圓弧破壞模式，安全係數與界面摩擦角成正比，與 H ， α ， β 等三個因子成反比。比較各參數變異性對安全係數的影響，填埋高度(H)對安全係數影響最大，其次是掩埋面坡角(β)及掩埋體背靠的坡角(α)，另外，界面摩擦角(δ)、廢棄物掩埋體長度(L)，影響較

小。

三、地震力作用之影響

1. 考慮地震力作用下，界面摩擦角(δ)與安全係數成正比關係，安全係數平均下降約 36%~59%，抵抗界面滑動之界面摩擦角提高 8°~12°。檢核淺層破壞，與未考慮地震力作用的分析結果比較，安全係數平均下降約 25%~39%。
2. 分析法之差異，以 Spencer 為基準，Simplified Bishop 差異值，一階掩埋場約-1%~1.5%，二階掩埋場約 5.8%~6.5%，Morgenstern and Price 差異值約 1.5%~1.7%，Simplified Janbu 21%~23%。考慮地震力作用下，Simplified Bishop 及 Morgenstern and Price 差異值均縮小；Simplified Janbu 差異值則增加。
3. 考慮在界面滑動破壞模式下，由分析結果建議，一階坡地廢棄物掩埋場，界面摩擦角必需大於 21°；二階坡地廢棄物掩埋場，界面摩擦角必需大於 25°。

5.2 建議

由上述分析結果可以使主管機關、操作單位、設計單位對於掩埋場的穩定性有明確的瞭解，並提供掩埋場設計與營運、封場期間訂定出掩埋場坡高與坡角的基本規劃。在此，提出後續相關研究的建議。

1. 廢棄物缺乏本土化參數資料庫，實際案例分析時，建議應取現場具代表性試體進行室內試驗或施作現場直剪，取得代表性強度參數進行分析。
2. 本研究僅探討界面滑動破壞模式及淺層圓弧破壞模式，建議可以針對基礎為軟弱土壤破壞模式之掩埋場進行分析。
3. 本研究針對邊坡穩定設計因子進行參數變異性分析，惟實際坡地型廢棄物掩埋場，坡腳大都會設置擋土牆，所以建議分析模式可於坡腳處增設加勁擋土牆、重力式擋土牆或懸臂式擋土牆，再進行邊坡穩地性分析。



參考文獻

- [1] 行政院環境保護署網頁，(2007)，
<http://www.epa.gov.tw/main/index.asp>。
- [2] 行政院環保署，(2006)，「一般廢棄物全分類零廢棄推動計畫」。
- [3] 行政院環保署，(2003)，「垃圾處理方案之檢討與展望」。
- [4] 行政院環保署，(2004)，「台灣地區垃圾處理後續計畫」。
- [5] 行政院環保署，(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○○八一六二八號。
- [6] 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」。
- [7] 行政院衛生署，(1985)「一般廢棄物衛生掩埋場設置規範」中華民國七十四年一月七日行政院衛生署(七四)衛署環字第四九九七○號
- [8] 行政院環保署，(2003)，「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」，中華民國九十二年十二月三十一日行政院環境保護署環署廢字第○九二○○九三四八一號令修正發布第三十七條條文
- [9] 林卓倫，(2004)，「邊坡穩定數值模擬分析-以林肯大郡坡地災害為例」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- [10] 范佐憲，(2007)，「廢棄掩埋場現地試驗與三維穩定分析」，國立交通大學土木工程系碩士論文。
- [11] 周公台、廖瑞堂、林士誠、林錦宏、陳信吉、詹穎裕、蕭秋安，(2003)，「邊坡穩定及保護之設計準則研訂與解說」，國道東部公路蘇澳和平段工程初步設計暨配合工作，交通部台灣區國道新建工程局。

- [12]陳榮河，(1987)，「邊坡穩定之分析方法」，土工技術，第 17 期，pp.70-84。
- [13]陳榮河(1990)，「衛生掩埋場之穩定分析」，土工技術，第 31 期，pp.6-21。
- [14]陳榮河、陳國賢(2002)，「垃圾填築邊坡之穩定分析」，土工技術雜誌，第 94 期，P53-P60。
- [15]陳盈文，(2006)，「掩埋場復育邊坡穩定分析之工程參數探討」，海洋大學海洋工程系碩士論文。
- [16]單信瑜，(1995)，「廢棄物掩埋場邊坡穩定分析」，第六屆大地工程學術研討會，嘉義。
- [17]單信瑜，(1999)，「土工合成材料於山坡地掩埋場之應用」，土工技術雜誌，第 73 期，pp.57-66。
- [18]堅尼士工程顧問公司，(2007)，「世界各國邊坡穩定分析程式簡介」。
- [19]黃亦敏、李維峰、洪勇善，(2001)，「電腦程式於坡地穩定性與整治分析之應用」，山坡地安檢及監測研討會論文集，台北，pp.19-47。
- [20]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)。
- [21]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)。
- [22]惠元環境資源股份有限公司，(2007)，「垃圾掩埋場總體檢委託專案工作計畫」，行政院環境保護署，EPA-95-Z102-02-201。
- [23]張吉佐、方仲欣、蔡宜璋、王瀛恭、楊維和，(1998)，「土層土工參數訂定方法彙整與檢討」，中興工程顧問社。

- [24]鄭介眉，(2004)，「垃圾衛生掩埋場垃圾層邊坡穩定分析之研究」，私立朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文。
- [25]劉家男，(2004)，「土工合成材料於環境地工之應用」，地工技術雜誌，第 102 期，pp.5-14。
- [26]錢學德、郭志平、施建勇、盧廷浩，(2000)，「現代衛生填埋場的設計與施工」，中國建築工業出版社。
- [27]Anderson, D.G., Hushmand, B. and Martin, G.R.,(1992), “Seismic Response of Landfill Slopes,” Proceedings of Stability and Performance of Slopes and Embankments II, ASCE, pp.973-989.
- [28]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.
- [29]Byrne, R.J., J. Kendall, and S. Brown. , (1992), “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 (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.
- [30] Duncan, J.M. and Buchignani , A.L.,(1975), ”An Engineering Manul for Slope Stability Studies”, University of California, Berkeley, March .
- [31] Duncan, J. M., (1996), ”State of the Art : Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of Slopes,” *Journal of Geotechnical Engineering*,ASCE, Vol. 122, No. 7, pp. 577-596.
- [32]Duncan, J. Michael, and Wright,Stephen G.,(2005), Soil Strength and

Slope Stability,USA.

- [33]Neil Dixon , D. Rusell V . Jones., (2005), “Engineering Properties of Municipal Solid Waste,” Geotextiles and Geomembrances 23, pp.205-233.
- [34]Ellithy, G.S, and Gabr, M.A,(2000), “Compaction Moisture Effect on Geomembrane/Clay Interface Shear Strength,” Advanced in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics,Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000,August 5-8,Denver,Colorado,pp.39-53.
- [35]Fredlund,D.G.,(1975), “A Comprehensive and Flexible Slope Stability Program,” Presented at the Roads and Transportation Association of Canada Meeting, Calgary, Alta.
- [36]ISRM, (1981), Rock Characterization Testing and Monitoring, Suggested Methods ,Dergamon ,Oxford .
- [37]Jones,D.R.V. and Dixon,N.,(1998), ”The Stability of Geosynthetic Landfill Lining Systems,” Geotechnical Engineering of Landfills,Thomas, London.
- [38]Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N. Bonaparte, R. and Schmertmann, G.R.,(1995), “Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis,” In: Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication, ASCE No. 46, Vol. 2, pp. 1126.
- [39]Kavazanjian, E., Jr., Caldwell, J., and Matasovic, N.,(1998), Damage Criteria for Solid Waste Landfills. Proc. Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering (on CD ROM). Seattle, Washington, 31 May - 4 June.
- [40]Kavazanjian, E.,Jr.,(1999),“Siesmic Design of Solid Waste Containment Facilities,” Proceesings of the Eight Candian Conference on Earthquake Engineering, pp.51-89.
- [41]Knochenmus, G., Wojnarowicz, M., and Van Impe, W. F., (1998),

“Stability of Municipal Solid Wastes,” Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sˆeco e Pinto, Ed., Balkema, Rotterdam, ISBN 905809 006x, pp. 977-1000.

- [42] Koerner, R. M., (1999), Designing with Geosynthetics, 4th ed.
- [43] Koerner, R.M. and Soong, T.Y.,(2000),”Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures,” Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics,ASCE,pp.1-38.
- [44] Landva, A.O. and J.I. Clark. ,(1990), "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, pp. 86-103. SEL TD795.7 G46 1990.
- [45] Liu, C.-N., Gilbert, R. B., and Wright, S. G.,(1998), “EarthSlide on Geomembrane: Closure,” Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 124, No. 7, pp. 650.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Machado S.L., Carvalho M.F. and Vilar O. M.,(2002), ”Constitutive Model for Municipal Solid Waste,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 11, pp. 940-951.
- [49] Mitchell, J.K., R.B. Seed, and H.B. Seed., (1990), "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, pp. 207-239. SEL TD795.7 G46
1990.

- [50] Mitchell, Richard A. and Mitchell, James K.,(1992),”Stability evaluation of waste landfills,” Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, ASCE,pp.1152-1187.
- [51]Neil Dixon , D. Rusell V . Jones. ,(2005), “Engineering Properties of Municipal Solid Waste,” Geotextiles and Geomembrances 23, pp.205-233.
- [52]Orr, W. R, and Finch, M.O.,(1990), “Solid Waste Landfill Performance during the Loma Prieta Earthquake,” Geotechnics of Waste Fills Theory and Practice, ASTM STP 1070,pp.22-30.
- [53]Orman, M. E., “Interface Shear-Strength Properties of Roughened HDPE,(1994), ” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,Vol. 120, No. 4, pp. 758-761.
- [54]Pockoski, Michael, and Duncan, J. Michael, (2000), “Comparison of Computer Programs for Analysis of Reinforced Slope”,Report of a study performed by the Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research.
- [55]Qian, X. D.,(1994c) “Analysis of Allowable Reintroduction Rate for Landfill Leachate Recirculation,”Michigan Department of Environmental Quality, Waste Management Division, November.
- [56]Salah M. Sadek and Christian G. Manasseh., “A Large Shear Apparatus for Testing Solid Waste and Waste-Liner Interfaces,”.
- [57] 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.
- [58]Stamatopoulos, A. C., and Kotzias,(1996), “Earth Slide on Geomembrane,” Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122,No. 5, pp. 408-411.

- [59]Stamatopoulos, A. C., “Earth Slide on Geomembrane:Closure, (1998), ” Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 124, No. 7,pp. 651-652.
- [60]Terzaghi, K. and Peck, R. B., (1967), Soil mechanics in engineer practice (2end ed.), John Wiley and Sons, Inc., NewYork, N.Y.
- [61]Transportation Research Board, (1996), “Landslides – Investigation and Mitigation”, TRB Special Report No.247.
- [62]USEPA, Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfills,(1994), EPA/625/R-94/008, Office of Research and Development.
- [63]U.S. EPA, (1993), Criteria for Solid Waste Disposal Facilities - A Guide for Owners/Operators, EPA/530-SW-91-089, Solid Waste and Emergency Response (OS-305).
- [64]U.S. EPA, (1987), Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste Landfill Ceils and Surface Impoundments. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/52-87/097.
- [65]U.S.EPA, (1995), RCRA Subtitle D (258) Seismic Design Guidance for Municipal Solid Waste Landfills, Office of Research and Development, NRMRL, Cincinnati, OH, EPA/600/R-95/051.
- [66]U.S. Environmental Protection Agency,(1985) ,“Draft Minimum Technology Guidance on Double Liner Systems for Landfills and Surface Impoundments -- Design, Construction, and Operation,” 2nd Version, Reposrt No. EPA/530-SW-85-014, 70. p.
- [67]U.S. Environmental Protection Agency,(1989), Technical Guidance Document, Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments, Reposrt No. EPA/530-SW-89-047, Washington, DC.
- [68]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.
- [69] Yegian, M.K., and Lahlaf, A.M., (1992) ”Dynamic Interface Shear Strength Properties of Geomembranes and Geotextiles, (1992),” *Journal of Geotechnical Engineering*, v 118, n 5, May, pp. 760-779.
- [70] 日本総理府厚生省，(2004)，『一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令』（昭和五十二年三月十四日総理府・厚生省令第一号），最終改正：平成一六年一〇月二七日環境省令第二四号。

