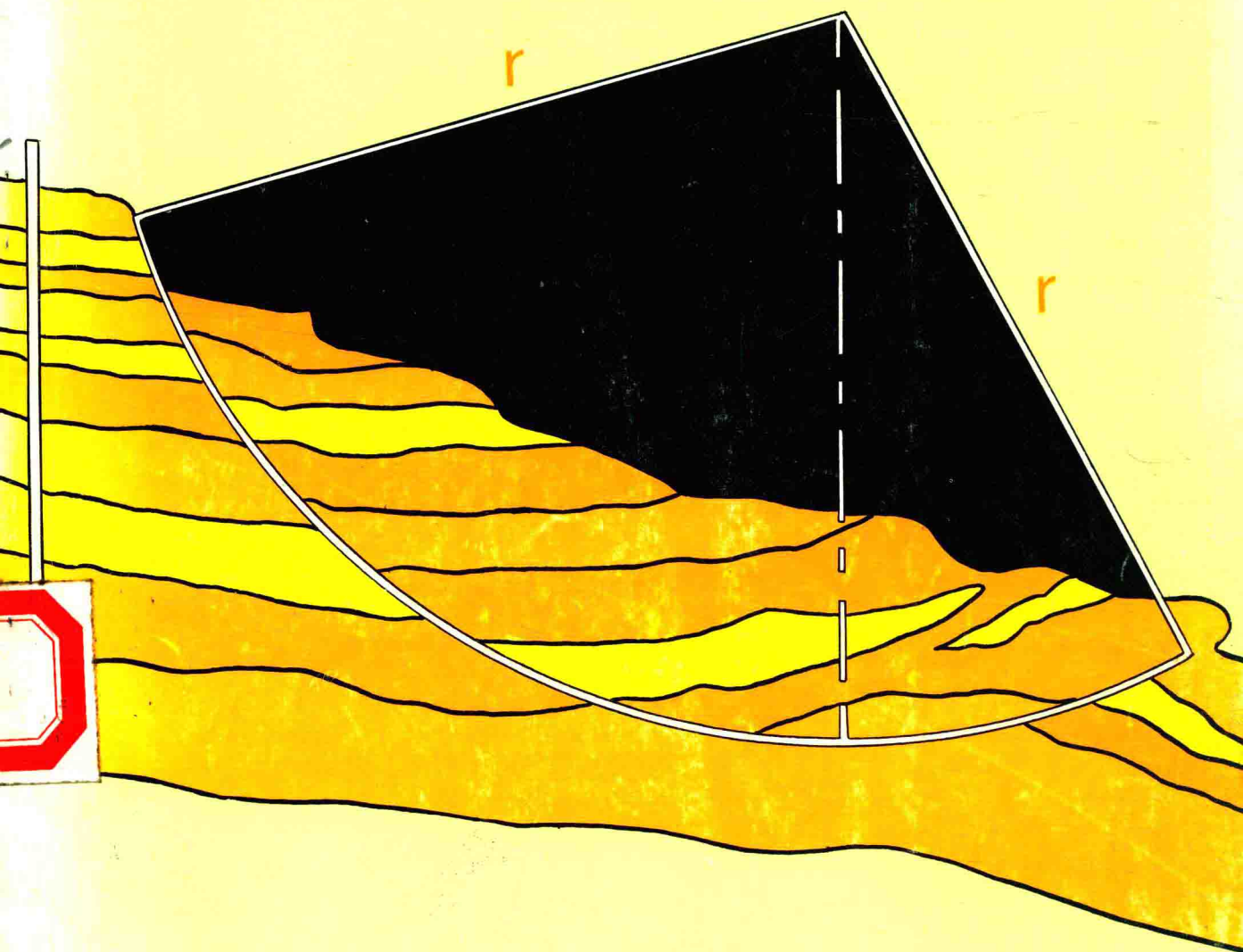


邊坡穩定

之分析方法與運用

吳偉特

國立台灣大學
土木工程學系副教授



邊坡穩定之分析方法與運用

吳偉特 編著

國立台灣大學土木工程學系副教授

榮獲教育部七十一年度大學自然
及
應用科學改進教學資料優良獎

兆林出版叢書

發行人 / 謝明娜

編輯人 / 張嬪嬪

編著者 / 吳偉特

發行所 / 兆林出版社

台北市明德路 188 巷 8 號之 3

電話 18317734

印刷所 / 拾荒者企業社

台北市八德路一段 98 號 4 樓

• 本書如有裝釘錯誤破損缺頁保證退換

行政院新聞局出版事業登記證台業字第 2068 號

》版權所有 ● 翻印必究《

十六開平裝・每冊定價一百元

中華民國六十九年八月卅一日

作者序

本書係著者於台大土木系歷年來教授「土壤力學」與「基礎工程」之經驗及心得撰寫而成。土木工程設計之邊坡穩定分析與運用，相當重要，為大地工程師不能忽視之問題；由於一般土壤力學與基礎工程之教科書內容，有關邊坡穩定分析部份，大多限於篇幅無法詳加敘述，或僅述其基本原則理論，致使研習之學生與工程師們無法得其整體廣泛之認識與了解；且國內至今迄無專門有關邊坡設計分析與運用之手冊，故特以收集整理國內外土木期刊、雜誌、教科書之資料與論著，再加上著者歷年來之教學心得與部份講義，擇其精粹而撰寫此書，期能有助於相關科系學生之研習，亦可為設計工程師之應用參考書籍。

本書綜合歸納各學者專家有關土壤與岩層之穩定分析方法，比較安全因數之差異性，並提供各種分析方法之適用程度範圍，限制與範例，以得到各種不同形態邊坡問題之最佳分析方法。

本書之編寫採手冊形式，行文力求簡單曉暢，且內容亦求汰繁就簡，重點著重於一般學生或工程師皆能瞭解與運用，故所舉範例皆以簡明便於手算為主，有關較複雜須使用電子計算機處理者，概未列入，僅述其方法與原則，設計者若有需要，可參考坊間之專著。

筆者才疏識淺，疏漏之處，在所難免，尚祈學者專家與工程師，不吝指正是幸。

吳偉特 謹誌於台大土木系土壤力學試驗室
中華民國六十九年七月

目 錄

	頁次
一、前 言	1
二、安全因數之選擇	2
三、土壤與岩層強度之參數性質	2
(A)無凝聚性材料	5
(B)軟弱之飽和粘土與粘土質沉泥材料	5
(C)硬裂紋粘土與頁岩	5
(D)黃土	5
(E)殘留土壤與重力土層	5
(F)靈敏性土壤	6
(G)岩石	6
四、各種邊坡問題之特性與臨界形態	6
(A)位於堅實土壤或岩石上之無凝聚性填土	6
(B)位於堅實土壤或岩石上之凝聚性填土	6
(C)位於軟弱底土上之填土	7
(D)開挖斜坡	11
(E)自然斜坡	11
(F)岩層斜坡	12
五、邊坡穩定分析設計之步驟	12
六、現地觀測與經驗判斷之分析方法	12
七、地質調查與現地勘測內容	13
八、簡易圖表之穩定分析方法	14
(A)凝聚性土壤($\phi = 0$)且土壤強度不隨深度變化之穩定分析圖表法	14
(B)一般性土壤(c 與 ϕ)之穩定分析圖表法	17
(C)無限斜坡之穩定分析圖表法	18
(D)凝聚性土壤($\phi = 0$)且土壤強度隨深度增加之穩定分析圖表法	20
(E)Hoek & Bray 圓弧破壞圖表分析法	24
九、詳細計算之穩定分析方法	32
(A)極限平衡分析法	32
(I)土壤邊坡之總應力分析($\phi = 0$)	33
(→)均質等向性土層	33
(1)Culmann 分析法	33

(2) Taylor 分析法	34
(3) 摩擦圓分析法	34
(二) 非均質等向性土層	37
(三) 不規則土壤層次或地表面——一般切片分析法或瑞典圓分析法或 Fellenius 方法	39
(1) 破壞土體之整體力矩平衡法	40
(2) 破壞土體之一般切片力矩平衡法	43
(II) 土壤邊坡之有效應力分析	46
(一) 平面滑動面	46
(二) 弧面滑動面	46
(1) 一般切片分析法或瑞士圓分析法或 Fellenius 分析法	47
(2) Bishop 修正分析法	48
(3) Bishop & Morgenstern 方法或穩定係數分析法	51
(4) Lowe & Karafiath 分析法	57
(5) Morgenstern 分析法	58
(6) Morgenstern & Price 分析法	61
(7) Spencer 分析法	63
(8) Janbu 之切片綜合分析法	66
(9) 對數螺線分析法	74
(10) 各分析方法之適用範圍與比較	78
(三) 楔形破壞面	79
(1) 圖解方法	80
(2) 計算方法	83
(B) 變形分析法	83
(C) 極限平衡分析法與有限元素分析法之比較	85
十、岩石邊坡之穩定分析法	86
(A) 平面破壞穩定分析	86
(B) 翻倒破壞穩定分析	93
(C) 楔形破壞穩定分析	94
(一) 分析 $c = 0$, $\phi_A = \phi_B$ 之楔形破壞	95
(二) 分析 $c \neq 0$, $\phi_A \neq \phi_B$ 與水壓力之楔形破壞	100
(三) 分析 $c = 0$, $\phi_A \neq \phi_B$ 且為完全排水情況之楔形破壞	102
(D) 圓弧破壞穩定分析	107
十一、結 論	107
十二、誌 謝	108
參 考 文 獻	108

附圖目錄

	頁次
圖 1 土壤之一般應力狀態	3
圖 2 斜坡內主應力軸之轉變形態	4
圖 3 不排水強度 S_u 與壓密壓力 $\bar{\sigma}_v$ 之關係 (取自 Duncan & Buchignani, 1975)	7
圖 4 室內十字片剪強度修正係數 (取自 Bjerrum, 1973)	8
圖 5 位於軟弱粘土基礎上土堤之持續漸進破壞折減係數 R_E 與 R_F (取自 Chirapuntu & Duncan, 1975)	9

圖 6	張力裂縫發生時路堤之臨界高度(取自 Chirapuntu & Duncan, 1975)	10
圖 7	範例——野外觀測資料分析邊坡穩定之方法	13
圖 8	凝聚性土壤($\phi = 0$)之穩定分析圖表法(取自 Janbu, 1968)	14
圖 9	一般性土壤($\phi = 0$ 與 $\phi > 0$)穩定分析圖表法之折減係數 μ_a , μ_w 與 μ_w (取自 Janbu, 1968)	15
圖 10	一般性土壤($\phi = 0$ 與 $\phi > 0$)穩定分析圖表法之折減係數 μ_c (取自 Janbu, 1968)	16
圖 11	一般性土壤(c 與 ϕ)之穩定分析圖表法(取自 Janbu, 1968)	17
圖 12	無限斜坡理想化切片之作用力	18
圖 13	無限斜坡之穩定分析圖表法(取自 Duncan & Buchignani, 1975)	19
圖 14	凝聚性土壤($\phi = 0$)且土壤強度隨深度增加之穩定分析圖表法(取自 Hunter & Schuster, 1968)	20
圖 15	範例——凝聚性土壤($\phi = 0$)且土壤強度不隨深度變化之圖表法	21
圖 16	範例——一般性土壤(c 與 ϕ)之圖表法	22
圖 17	範例——無限斜坡之圖表法	23
圖 18	範例——凝聚性土壤($\phi = 0$)且土壤隨深度增加之圖表法	24
圖 19	斜坡內地下水位變化與地下水位置之分佈情況(取自 Hoek & Bray, 1977)	25
圖 20	Hoek & Bray 圓弧破壞圖表法示例程序步驟	26
圖 21	Hoek & Bray 圓弧破壞圖表法——圖解 1(取自 Hoek & Bray, 1977)	26
圖 22	Hoek & Bray 圓弧破壞圖表法——圖解 2(取自 Hoek & Bray, 1977)	27
圖 23	Hoek & Bray 圓弧破壞圖表法——圖解 3(取自 Hoek & Bray, 1977)	27
圖 24	Hoek & Bray 圓弧破壞圖表法——圖解 4(取自 Hoek & Bray, 1977)	28
圖 25	Hoek & Bray 圓弧破壞圖表法——圖解 5(取自 Hoek & Bray, 1977)	28
圖 26	範例——Hoek & Bray 圓弧破壞圖表分析法	29
圖 27	斜坡完全排水情況下之臨界破壞圓與張力裂縫位置(取自 Hoek & Bray, 1977)	30
圖 28	斜坡部份排水情況下之臨界破壞圓與張力裂縫位置(取自 Hoek & Bray, 1977)	31
圖 29	平面破壞土體之平衡條件	33
圖 30	圓弧滑動破壞之平衡條件	34
圖 31	摩擦圓分析法	35
圖 32	Taylor 穩定分析圖表($\phi = 0$)(取自 Taylor, 1948)	36
圖 33	Taylor 穩定分析圖表($\phi > 0$)(取自 Taylor, 1937)	36
圖 34	範例——Taylor 穩定分析圖表法	37
圖 35	範例——Taylor 穩定分析圖表法	38
圖 36	正常壓密土壤之強度與深度關係	39

圖 37	範例—— Hunter & Schuster 穩定分析圖表法	40
圖 38	切片圓弧分析法之幾何形狀	41
圖 39	範例—— 破壞土體之整體力矩平衡法	42
圖 40	範例—— 一般切片力矩平衡法	43
圖 41	範例(續)—— 一般切片力矩平衡法	44
圖 42	範例(續)—— 一般切片力矩平衡法	45
圖 43	切片上所有作用力之示意圖	46
圖 44	一般切片分析法之切片側力假設	47
圖 45	Bishop 修正分析法之切片側力假設	48
圖 46	$M_1(\alpha)$ 值之圖形(取自 Bishop, 1955 ; Janbu, 1956)	49
圖 47	安全因數值定取法	49
圖 48	範例—— Bishop 修正分析法	49
圖 49	範例(續)—— Bishop 修正分析法	50
圖 50	範例(續)—— Bishop 修正分析法	50
圖 51	Bishop 修正分析法之數值收斂困難	51
圖 52	穩定係數分析之斜坡幾何因數	52
圖 53	穩定係數 m, n 值($\bar{c}/rH = 0.05, D = 1.0$)(取自 Bishop & Morgenstern, 1960)	53
圖 54	穩定係數 m, n 值($\bar{c}/rH = 0.05, D = 1.25$)(取自 Bishop & Morgenstern, 1960)	53
圖 55	穩定係數 m, n 值($\bar{c}/rH = 0.05, D = 1.5$)(取自 Bishop & Morgenstern, 1960)	54
圖 56	穩定係數 m, n 值($\bar{c}/rH = 0.025, D = 1.0$)(取自 Bishop & Morgenstern, 1960)	54
圖 57	穩定係數 m, n 值($\bar{c}/rH = 0.025, D = 1.25$)(取自 Bishop & Morgenstern, 1960)	55
圖 58	穩定係數 m, n 值($\bar{c}/rH = 0$)(取自 Bishop & Morgenstern, 1960)	55
圖 59	範例—— 穩定係數分析法	56
圖 60	Lowe & Karafiath 分析法之側力假設	57
圖 61	Morgenstern 分析法之洩降安全因數($\tau/rH = 0.012$)(取自 Morgenstern, 1963)	59
圖 62	Morgenstern 分析法之洩降安全因數($\tau/rH = 0.025$)(取自 Morgenstern, 1963)	60
圖 63	Morgenstern 分析法之洩降安全因數($\tau/rH = 0.05$)(取自 Morgenstern,	

	1963)	頁次 60
圖 64	範例—— Morgenstern 分析法	61
圖 65	範例—— Morgenstern & Price 分析法	62
圖 66	Spencer 分析法之側力假設	62
圖 67	範例—— Spencer 分析法 (取自 Spencer , 1967)	64
圖 68	Spencer 之圖表分析法 (取自 Spencer , 1967)	65
圖 69	範例—— Spencer 之圖表分析法	65
圖 70	Janbu 之切片綜合分析法之側力假設	66
圖 71	Janbu 分析法之 η_α 值 (α 為正值) (取自 Janbu , 1973)	67
圖 72	Janbu 分析法之 η_α 值 (α 為負值) (取自 Janbu , 1973)	68
圖 73	切片間接觸面之平均水平總應力與垂直剪應力分佈	69
圖 74	範例—— Janbu 之切片綜合分析法	69
圖 75	範例 (續) —— Janbu 之切片綜合分析法	70
圖 76	範例 (續) —— Janbu 之切片綜合分析法	70
圖 77	Janbu 簡便分析法之修正因素 f 值 (取自 Janbu , 1956)	73
圖 78	Janbu 簡便分析法示意圖	73
圖 79	範例—— Janbu 簡便分析法	73
圖 80	範例 (續) —— Janbu 簡便分析法	74
圖 81	對數螺旋線分析法之示意圖	75
圖 82	極限平衡分析法之綜合比較表	77
圖 83	楔形滑動破壞之圖解方法—— 範例	79
圖 84	楔形滑動破壞機制之初擬	80
圖 85	楔形滑動土塊重量之計算	81
圖 86	楔形滑動破壞之圖解方法—— 範例 (續)	82
圖 87	決定楔形滑動安全因數之方法	83
圖 88	楔形滑動破壞計算方法—— 範例 (續)	84
圖 89	岩層平面滑動之幾何條件	86
圖 90	張裂縫發生於坡頂平面與坡面之岩坡幾何形狀	87
圖 91	作用於岩坡滑動面上之正應力 σ (取自 Hoek & Bray , 1977)	88
圖 92	單一岩體滑動之幾何形狀	88
圖 93	不同岩坡幾何形狀之 P 與 S 值 (取自 Hoek & Bray , 1977)	90
圖 94	不同岩坡幾何形狀之 Q 值 (取自 Hoek & Bray , 1977)	90
圖 95	範例—— 岩坡平面滑動破壞分析	91
圖 96	乾岩坡之臨界張裂縫位置與深度 (取自 Hoek & Bray , 1977)	92

	頁次
圖 97 岩坡之補強方法	93
圖 98 岩坡平面滑動分析之圖解法	93
圖 99 岩坡翻倒與滑動破壞之條件(取自Hoek & Bray, 1977)	94
圖 100 岩坡楔形滑動破壞之幾何形狀	95
圖 101 岩坡楔形滑動岩體之平衡狀態	95
圖 102 楔因素K值(取自Hoek & Bray, 1977)	96
圖 103 岩層與坡面之傾角, 傾向與走向	97
圖 104 立體投影圖之大圓與極	97
圖 105 立體投影之等面積投影法	97
圖 106 球體之赤道等面積投影網(取自Hoek & Bray, 1977)	98
圖 107 球體之極等面積投影網(取自Hoek & Bray, 1977)	99
圖 108 立體投影法之作圖示例	99
圖 109 範例——單一層面之立體投影圖	100
圖 110 範例——兩不同層面之立體投影圖	100
圖 111 楔形滑動岩體之立體投影圖	102
圖 112 岩坡楔形滑動破壞之幾何形狀(考慮凝聚力與水壓力之影響)	100
圖 113 範例——楔形滑動穩定分析之立體投影法	101
圖 114 範例(續)——楔形滑動穩定分析之計算表	101
圖 115 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 0°)(取自Hoek & Bray, 1977)	102
圖 116 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 10°)(取自Hoek & Bray, 1977)	103
圖 117 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 20°)(取自Hoek & Bray, 1977)	103
圖 118 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 30°)(取自Hoek & Bray, 1977)	104
圖 119 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 40°)(取自Hoek & Bray, 1977)	104
圖 120 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 50°)(取自Hoek & Bray, 1977)	105
圖 121 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 60°)(取自Hoek & Bray, 1977)	105
圖 122 僅考慮摩擦力之楔形穩定圖表法(傾角差異度 = 70°)(取自Hoek & Bray, 1977)	106

邊坡穩定之分析方法與運用

吳偉特^{*}

摘 要

本書綜合歸納各學者專家有關土壤與岩層之穩定分析方法，比較安全因數之差異性，並提供各種分析方法之適用程度範圍，限制與範例，以得到各種不同形態邊坡問題之最佳分析方法。

* 國立台灣大學土木工程學系副教授

一 前 言

坡地之利用價值，隨著人類工商業及社會的進步，已愈來愈趨重要；舉凡坡地住宅、觀光、開墾等開發計劃，無不與坡地具有密切關係；而與坡地相關之一些工程設施，諸如開挖、填土、擋土牆、公路、鐵路、隧道堤防等，皆須考慮邊坡地之穩定性問題。由於不可避免之自然或人為因素影響，一般坡地多少都會有變形行為產生，對工程設施常造成安全性之威脅，故預測邊坡地

滑動之可能性，計算抵抗滑動之安全因數，解釋邊坡曾滑動地區之產生原因，與預防措施等之邊坡穩定分析方法，乃為坡地開發計劃中相當重要之一環，不可忽略之。

台灣為山坡地佔大部份面積之島嶼，山坡地開發為必然之趨勢；而經由邊坡不穩定現象造成之工程問題，諸如橫貫公路坍方、高速公路沿線之邊坡滑動，基隆市山坡社區之岩盤滑動，雙溪中央國宅社區之坡地坍方等，已使得政府每年支出為數可觀之維護與保養費用。邊坡不穩定時，

輕者僅為錢財損失，重者則影響人民之生命安全，故大地工程師應充份明瞭並靈活運用一般邊坡穩定分析方法，以達到經濟與安全之設計。

簡單之分析方法，對於大部份較複雜問題，常可得到合理而正確的答案；其正確性係決定於分析方法之假設，應儘量與實際情況接近，而一般精密分析之困難，乃在估算該邊坡地處於最惡劣情況時之安全可能性程度；故一般須充份知曉地層與邊坡分析之設計參數資料，如土重、摩擦抗力、凝聚力、被動土壓、孔隙水壓力等，對這些資料知道得愈詳細愈正確者，愈提高安全性。

本文綜合歸納各學者專家研究有關土壤與岩層之邊坡穩定分析方法，比較安全因數之差異性，並提供各種分析方法之適用程度範圍、限制與範例，以得到各種不同形態邊坡問題之最佳分析方法。

二 安全因數之選擇

邊坡破壞之發生，係當邊坡某一臨界面上，發生之剪應力超過該土壤之抗剪強度時，即發生崩坍。而邊坡穩定分析即在核算破壞面上之抗剪強度與產生之剪應力關係，並由兩者之比值，以安全因數 (Factor of Safety) 表示之。

一般引起邊坡破壞的原因，分析如下：

(A)剪應力增加：

- (a)由於荷重增加：坡頂土加建房屋，堆積材料等。
- (b)或由於土壤重量提高：土內含水量增加。
- (c)或由於部份邊坡土壤流失或挖除而失去平衡。
- (d)或由於坡腳支承力降低：開挖隧道、坑道或滲漏等。

(B)土壤抗剪強度降低：

- (a)由於吸水膨脹，孔隙水壓力增大。
- (b)或由於反覆脹縮而引起土壤之裂縫。
- (c)或靈敏性土壤的變形或持續性破壞。
- (d)或解凍時膠結材料之老化或喪失等原因。

安全因數之決定，可用下列諸形式表示之：

- (a)沿著可能滑動破壞面之抵抗力 (Resisting Forces) 與驅動力 (Driving Forces) 之比值。

(b)抗剪力對可能滑動破壞弧面圓心之力矩與驅動破壞力對同一圓心的力矩之比值。

(c)沿著可能滑動破壞面之抗剪強度 (Shear Strength) 與土壤之平均剪應力 (Average Shear Stress) 之比值。

(d)由理論計算所得允許最大高度 (臨界高度) 與實際坡高之比值。

(e)經由安全因數，可使沿著某一已知滑動面之抗剪強度參數值降低，使邊坡坡面成為極限平衡狀態 (State of Limiting Equilibrium) 之情況。

最小允許安全因數 (Minimum Allowable value of Safety Factor) 之決定，係由下列諸因素決定之：

- (a)抗剪強度參數、孔隙水壓分佈、土層性質與類型、邊坡幾何形狀等資料獲得之可靠性程度。
- (b)施工控制與技術之水準。
- (c)工程經費，包括穩定邊坡措施之維護與保養等。
- (d)邊坡設計問題之所須資料是否充份，諸如邊坡之人為、自然等環境條件，邊坡失敗之重要性，現有邊坡之暫時或永久性等。

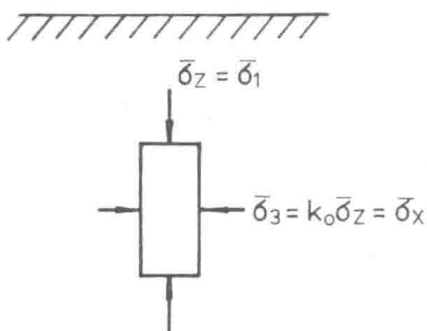
一般言之，獲取資料之可靠性程度愈低，安全係數決定值愈高；下列所示之安全因數值，可作為參考之用：

邊坡破壞之重要性與損失	設計參數之可靠性	
	高	低
1.修護費用相當於施工費用 2.不危及人民生命與財產之安全	F.S=1.25	F.S=1.5
1.修護費用大於施工費用甚多 2.危及人民生命與財產之安全	F.S=1.5	F.S ≥ 2.0

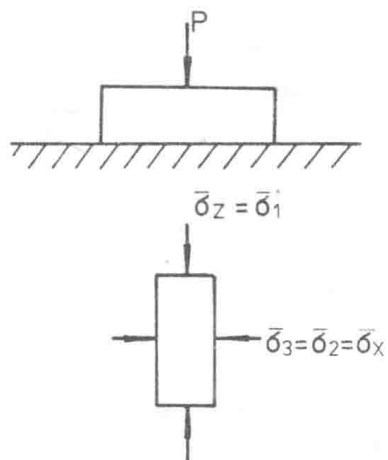
三 土壤與岩層強度之參數性質

可能滑動面上之土壤與岩層抗剪強度，係設計參數相當重要之影響因素；由於土壤與岩石抗剪強度，於荷重作用時，受排水情況之影響甚大

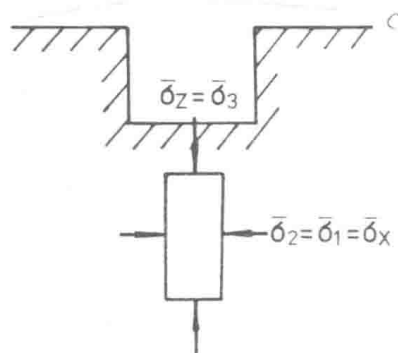
(a) 初始靜止狀態



(b) 荷重P作用狀態



(c) 開挖狀態



(d) 平面應變狀態

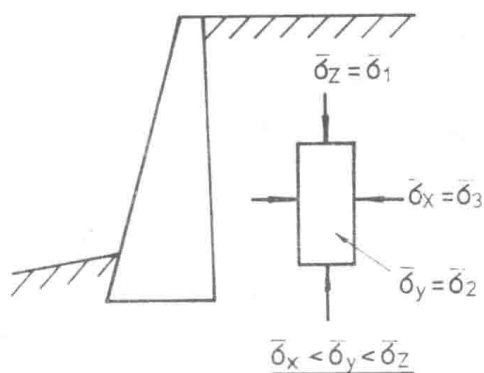


圖1 土壤之一般應力狀態

，故一般分析方法係分總應力分析法 (Total Stress Analysis) 與有效應力分析法 (Effective Stress Analysis)：

$$S = c + \sigma \tan \phi \quad \text{—— 總應力分析}$$

$S = \bar{c} + \bar{\sigma} \tan \bar{\phi}$ —— 有效應力分析
式中 S ：剪力強度

σ ：總應力

$\bar{\sigma}$ ：有效應力， $\bar{\sigma} = \sigma - u$

u : 孔隙水壓力

c, ϕ : 總應力強度之凝聚力與抗剪角

$\bar{c}, \bar{\phi}$: 有效應力強度之凝聚力與抗剪角

土壤抗剪強度一般隨排水情況之發生而改變。若改變後產生較高強度時，則臨界狀況為短期不排水穩定性問題，且穩定程度隨時間而增加；若改變後產生較低強度，則不排水剪力強度僅可做為短期或臨時情況分析之用。

土層若為部份排水或為不排水情況時，通常經由荷重產生之超額孔隙水壓力 (Excess Pore Water Pressure) 較難測定。在某些情況下，可用總應力剪力強度，作為分析之用，一般稱之

為 $\phi = 0$ 分析方法。若土層在長期情況下達到完全排水狀況，超額孔隙水壓力可完全消散，且經由地下水流作用之孔隙水壓亦可測定，則一般採用有效應力剪力強度，分析邊坡之穩定問題。

穩定分析中之主應力 (Principal Stress)，應考慮中主應力 (Intermediate Principal Stress) $\bar{\sigma}_2$ 對於抗剪強度之影響。一般邊坡與擋土牆可大致當作平面應變 (Plane-strain) 情況，因此中主應變 (Intermediate Principal Strain) E_2 可視為零，且中主應力 $\bar{\sigma}_2$ 為 $\bar{\sigma}_y$ ，並介於 $\bar{\sigma}_1$ 與 $\bar{\sigma}_3$ 之間，茲將一般土壤之應力情況

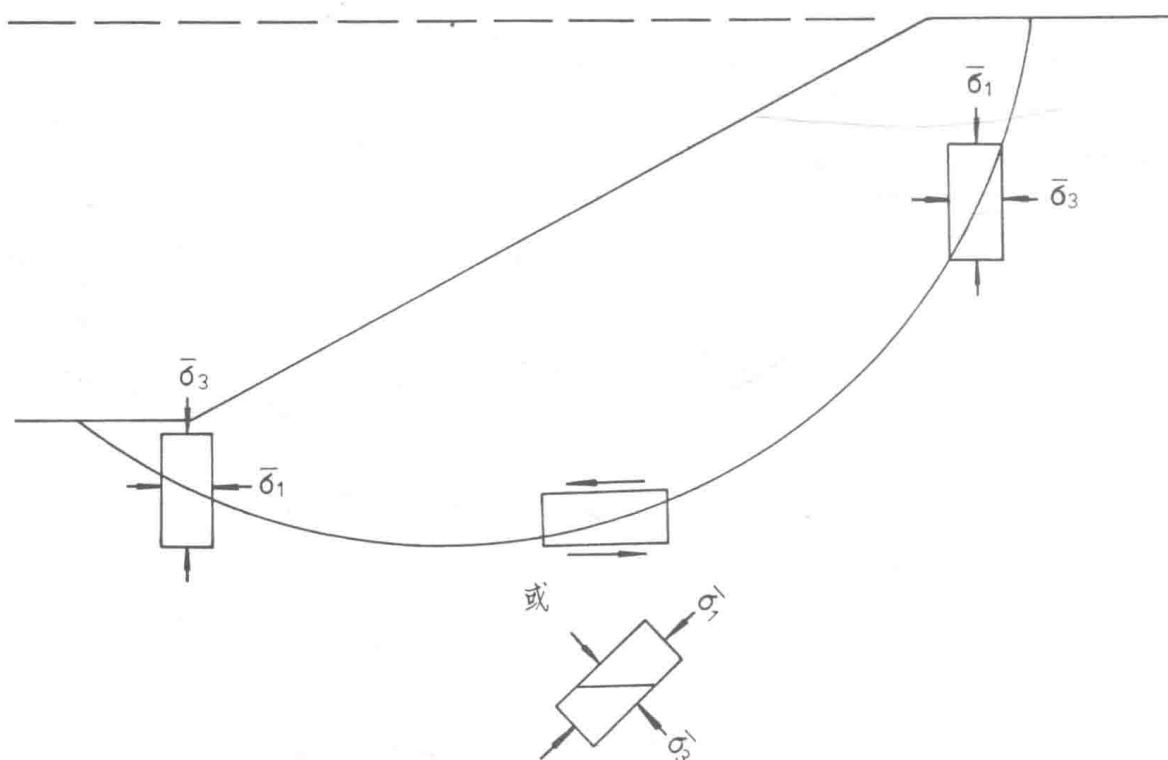


圖 2 斜坡內主應力軸之轉變形態

示於圖 1 之中。此外，經由荷重或開挖產生之邊坡形態，主應力軸 (Principal Stress Axes) 隨其位置不同而轉向 (圖 2)，此現象將引致某些軟弱粘土之抗剪強度降低，這一點必須加以注意。

由於現地土層承受之最初應力情況，係不等向性 (Anisotropy)，故試驗試體應考慮非等向性之壓密情況，以與現地相符合。試驗結果顯示，雖然大部份土壤試體之應力與應變關係，對其等向性或非等向性壓密特性，有明顯的不同，但有效應力抗剪強度參數却幾乎皆相同。

試驗室內求取土壤剪力強度之方法，一般為簡易強度試驗 (包括無圍壓縮、錐形貫入或十字片剪試驗)，三軸抗剪試驗、直接剪力試驗、平面應變試驗 (Plane-Strain Test) 與純剪力試驗 (Simple Shear Test) 等。其中以後二者試驗方法最接近邊坡之實際情況。

土壤受壓之應力應變關係，通常分尖峰強度 (Peak Strength) 與剩餘強度 (Residual Strength)。邊坡穩定分析設計時，究應採用何值，大地工程師應根據實際情況與土質類型而決定之。

有關岩石之抗剪強度性質，與土壤大致相同，惟岩石因含節理、裂縫與不連續等特性，一般大多採有效應力分析。

茲將一般土壤與岩石對於自然邊坡或開挖工程，於分析設計時之考慮事項，略述如下：

(A) 無凝聚性材料

高滲透性之砂質或礫石材料，承受荷重時，可視為排水情況，此因體積變化甚為快速，無法產生超額孔隙水壓之故，故一般採用有效應力強度參數設計。

沉泥質土壤之超額孔隙水壓，可能產生於整個受壓過程中，故若採用有效應力分析時，應考慮並測定孔隙水壓之大小。

飽和鬆性砂土可能在某些情況下 (諸如地震作用時)，於極短時間內破壞，而仍保持超額孔隙水壓之存在，此時可考慮不排水之剪力強度參數。

(B) 軟弱之飽和粘土與粘土質沈泥材料

此類低滲透性細粒土壤，可視為不排水或部分排水情況。若荷重作用或應力改變產生超額孔

水壓正值 (填土情況) 時，不排水強度低於排水強度，穩定性將隨時間之增長與孔水壓力之消散而增加。反之，若產生超額孔水壓負值 (開挖情況) 時，不排水強度大於排水強度，此時即使邊坡在不排水情況下達到穩定。但邊坡破壞却可能在施工完畢後發生，因此對於正常壓密性或低靈敏性之輕度過份壓密均質粘土，其短期穩定性分析，可採用不排水剪力強度；長期穩定性問題，則採用有效應力分析。

重度過份壓密性粘土由於裂縫 (Fissures) 之存在，尖峰強度與剩餘強度之不同，與光滑擦痕面 (Slicken-slides) 之發生等現象，穩定分析一般較正常壓密性土壤要複雜些。一般皆須考慮長期與短期穩定性分析；由於裂縫將造成土壤排水作用與軟化影響，且擦痕面之剪力強度趨近於剩餘強度，過份壓密強度應採用整個滑動面之平均值，因此皆採用剩餘強度設計值，則顯得太過於保守。

(C) 硬裂紋粘土 (Stiff-fissured) 與頁岩 (Shales)

此類材料當剪力變形大於尖峰強度相對應之剪應變時，剪力強度將顯著地降低。此種硬裂紋粘土與頁岩之邊坡破壞，將呈長期性持續進行狀態，且剪力強度將逐漸降低至剩餘強度。某些邊坡之傾斜坡度，將可在僅由剩餘強度驅動之角度更陡情況下，屹立數十或數百年之久，此類情況之邊坡設計，可運用當地之實際經驗 (Local Experience and practice)，得到合適解答。

(D) 黃土 (Loess)

由於黃土堆積層含有縱橫交錯，經由植物根部腐化後形成之槽渠，故垂直方向具有高度滲透性。若地表面水向下滲透而破壞顆粒間之微弱膠結材料時，將引致邊坡侵蝕與破壞，故垂直開挖之黃土層，若能阻止地面水滲漏，可維持相當之穩定性。一般採用不同層面之水平台階 (Benches)，並於坡面頂端與底部，施以鋪面或耕植等設施方法，防止地表水滲透，再配合當地之實際經驗，將可得到邊坡穩定之良好分析設計。

(E) 殘留土壤 (Residual Soils) 與重力土層 (Colluvium)

平緩地形風化岩層產生之殘留土，亦稱為滲蝕土層 (Eluvium)，或沿邊坡面移動之風化土

壤或岩石重力土層 (Colluvium)，其性質隨母岩材料、氣候與風化程度而不同，變化範圍相當廣泛，故經由試驗結果決定設計之剪力強度參數數據，將十分困難。一般可採用邊坡破壞反算分析法 (Back-Analyzing Method of Slope Failures) 求取較具代表性之剪力強度參數，或基於當地實際之經驗設計步驟決定之。

(F) 靈敏性土壤

靈敏性土壤當擾亂後，將喪失大量之強度，而呈流體狀態，形成崩瀉滑動 (Flow Slide) 破壞。此種擾亂作用之強度喪失特性，使得試驗室方法求取之參數數據代表性，有甚大疑問，應小心判斷之。一般以十字片剪試驗結果較接近之，再配合當地實際經驗，可得到可靠合宜之設計數據。

(G) 岩石

岩石之剪力強度，受節理 (Joint) 之結構配置與節理表面性質而決定。由於岩石節理之傾向、排列、性質、應力情況、填塞物等因素甚為複雜，故岩石之強度範圍變化甚大。一般具有節理的岩石破壞包絡線 (Failure Envelope)，呈曲線形狀；應力應變關係呈尖峰強度與剩餘強度之兩種強度出現。

四 各種邊坡穩定問題之特性與臨界形態

(A) 位於堅實土壤或岩石上之無凝聚性填土

填土材料包括無凝聚性礫石、砂土與沉泥，穩定性決定於填土料之抗剪角 ϕ 、斜坡傾角、填土之單位重與孔隙水壓，一般該類材料之臨界破壞機制 (Critical Failure Mechanism)，係為淺層表面滑動 (Surface Ravelling or Shallow Sliding)，可用簡單之無限邊坡分析法 (Infinite Slope Analysis) 分析。

抗剪角 ϕ 之求取，採用排水式三軸或直接剪力試驗，或經由顆粒級配、相對密度與顆粒形狀三者之關係得出。經由滲透產生之孔隙水壓力，將減少邊坡穩定性，但位於邊坡內與坡外同一層面水位之靜止水壓力，則對坡面無影響。

由於地表面逕流較易侵蝕細砂、沉泥質砂土與沉泥材料之邊坡坡面，一般應考慮台階分佈、鋪面、溝渠或種植草木等方法，減少逕流速度並阻止侵蝕之發生。

飽和無凝聚性材料之邊坡，於地震期間較易發生液化與崩瀉現象。此外乾砂較易產生沉陷，故一般要求砂土之相對密度至少須大於 75 % 以上，以確定地震期間之安全性。

(B) 位於堅實土壤或岩石上之凝聚性填土

填土材料包括粘土、粘土質砂土、粘土質礫石，穩定性決定於填土料之強度 (c , ϕ 與 $\bar{c}$, $\bar{\phi}$)、填土單位重、填土高度、坡度傾角與孔隙水壓力。該類材料之臨界破壞機制，通常滑動位置為較深層之滑動面，且與底下之硬實層相切。

由於凝聚性土壤排水較慢，邊坡穩定分析應依據不同之孔隙水壓力情況而決定：

(1) 短期或施工完畢情況：

使用總應力分析方法。試驗試體應夯壓至與現地土層相同之密度與含水量，並進行不壓密不排水 (UU 或 Q) 三軸抗剪或直剪試驗，求取土壤強度參數 c 與 ϕ 值。

填土層之內孔隙水壓力 (Internal Pore pressure)，在分析中並未明確考慮之，此因不排水試驗之孔隙水壓，一般反應在強度參數 c 與 ϕ 值中。若試驗試體情況與現地相同，則當荷重載重為不排水情形時，試體內引致之孔水壓力將與現地同一總應力作用下，產生之短期孔隙水壓 (Short-term Pore Pressure) 相同，因此對於短時期不排水情況之穩定性分析，應用總應力強度參數設計，仍屬相當合理。

邊坡外之外部孔水壓力 (External Pore Pressure)，對坡面具有穩定性作用，對於所有不同形態之邊坡問題，該外部孔水壓力皆須在總應力與有效應力分析中考慮之。

(2) 長期情況：

使用有效應力分析方法。試驗試體夯壓至現地土層相同之密度與含水量，進行排水式 (CD 或 CS) 三軸或直剪試驗，或壓密不排水 (CU) 三軸試驗兼測孔隙水壓力，求取土壤強度參數 $\bar{c}$ 與 $\bar{\phi}$ 值。

運用流網 (Flow net) 或其他滲流分析法，求取孔水壓力之變化，坡面之內外孔水壓力皆應在穩定分析中考慮之。

(3) 急速洩降情況，或當斜坡承受某一荷重壓密作用時，若快速地改變荷重作用，填土材料無充份時間排水之情況：