

斜面安定 (I)

金 翔 圭*

1. 斜面安定 관련문제와 技術의 發展

1.1 서 론

自然을 편리하게 이용하고자 하는 인간의 욕구는 自然斜面的 형상을 끊임없이 변경하기도 하고 때로는 人工的인 비탈을 만들어 인간의 편익을 위해 이용하고 있다. 변조된 비탈이나 人工的인 비탈은 주로 중력의 작용을 받아 본래의 형태를 유지하지 못하고 아래로 움직여 내려올려고 한다. 만일 비탈이 不安定한 상태가 되어 산사태나 돌사태와 같은 滑動이 발생한다면 엄청난 재난을 가져올 수 있다. 여기서 확실한 통계는 제시하지 못하지만 아마도 우리나라에서의 自然災害는 그 피해정도로 보아 斜面崩壞가 洪水와 颱風 다음으로 기록되리라는 것은 분명하다. 물론 비탈의 崩壞로 인한 災害는 自然斜면을 人爲的으로 바꿈으로써 단독으로 생기는 경우도 있지만 洪水와 颱風 降雨 등이 원인이 되어 발생하기도 한다. 특히 최근에 이르러 道路建設, 産業基地建設, 大規模 宅地開發 등을 위한 自然條件은 더 나빠지고 있으므로 斜面安定과 관련된 문제가 더욱 어려워 지리라는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

여기서 기술하고자 하는 斜面(비탈)은 人工斜面과 自然斜면을 모두 포함하기로 한다. 전자는 선택된 재료를 가지고 요구되는 단면으로 축조되므로 재료의 구분이 분명하고 그 공학적 성질이 잘 밝혀질 수 있다. 반면 후자는 비탈이 자연적으로 이루어져 있거나 自然斜면을 깎아서 만든 것이므로 흙과 岩石이 불규칙하게 뒤섞이고 地層을 이루기도 하며 때로는 岩石이 風化되었거나 斷層, 節理 등이 잘 발달되어 있어서 일반적으로 균질한 경우가 드물다. 따라서 自然斜면에 대한 安定에 관한 문제의 해결

은 土質工學的인 접근과 더불어 地質學的 地形學的 및 岩石工學的인 지식의 도움이 요구되기도 한다.

斜面安定 강좌 중 본인이 취급해야 할 제1장의 내용은 斜面安定에 관련되는 전반적인 문제를 개괄적으로 취급하고 있다. 피상적인 내용이 될는지 모르지만 여기서는 斜面的 安定問題에 관한 개념을 叙述하는데 주력하였으므로 더 자세하고 깊은 지식을 원하는 독자는 제2장 이후의 집필 내용을 읽으면 불만이 해소될 수 있으리라 생각한다.

1.2 斜面滑動의 分類

1.2.1 定義

斜面滑動을 분류하기 전에 먼저 몇가지 용어를 분명히 정의할 필요성을 느낀다. 아마도 우리나라 말의 “비탈”이 일본 또는 한문에서 유래한 斜面이란 말의 가장 적절한 표현일 것이다. 이 말이 學術用語로서 널리 사용되지 못한 것은 일본의 學術문화로부터 영향을 받은 우리들의 관습과 또 이 말을 복합해서 사용할때 생기는 어색함(예를 들면 비탈滑動, 비탈安定解析 등)에서 비롯된 것이 아닌가 생각된다.

비탈은 自然斜面과 人工斜面으로 분류할 수 있다. 自然斜면을 人工的으로 변형시켰을 때에는 이것을 어느쪽으로 분류하느냐 하는 것은 논란이 있을 수 있지만 여기서는 人工斜面에 포함하기로 한다. 人工斜面이든 自然斜面이든 비탈의 일부가 미끄러져 아래로 내려오는 것을 여기서 斜面滑動이라고 말하기로 한다.

斜面滑動과 관련되는 외래어에 대한 定義도 여기에 引用해 보기로 한다. Skempton and Hutchinson(1969)은 “landslide”란 滑動體의 경계에 생긴 剪斷破壞의 결과로 흙덩이 또는 돌덩이가 비탈아래로 내려오는 것이라고 정의

* 正會員, 東國大學校 工科大學 教授

한바 있다. Varnes(1978)는 滑動만을 의미하는 landslide와 기타 滑動으로 분류될 수 없는 地盤變位(즉 포행, creep)를 합쳐서 slope movement란 말을 쓰고 있다. 일본 학자들은 斜面崩壞現象을 地スベリ(landslide)와 斜面崩壞(slope failure) 등으로 나눈다(Sassa, 1985; 小橋, 1975). 전자는 경사진 토지의 일부가 滑動面을 따라 완만하게 미끄러지는 현상이고(土質工學會, 1971), 후자는 가파른 비탈이 갑작스럽게 이동되는 현상으로 定義하고 있다.

우리나라 말에 “산사태”라는 것이 있는데 위의 定義와 견주어 보면 이것은 일본의 “地スベリ”와도 구별되어야 하며 불어에서 由來된 “avalanche”와 同意語라고 생각한다. 왜냐하면 산사태란 폭우나 또는 지진에 의해 일시에 산의 일부가 무너져 내려오는 것을 말하기 때문이다. 따라서 이것은 단순히 산비탈의 滑動을 의미하므로 그 대상이 自然斜面에 국한된다는 것이 필자의 의견이며, 당연히 斜面滑動에 포함되어야 할 것이다.

1.2.2 斜面滑動의 분류

실제로 비탈의 滑動現象은 自然斜面과 人工斜面에 따라 특징은 있으나 명확히 구별되지는 않는다. 따라서 여기서는 모든 비탈의 滑動을 모두 포함하여 몇가지 분류법을 소개하기로 한다.

비탈이 어떤 형태로 崩壞되느냐 하는 것은 비탈의 安定解析을 하는 방법을 선택하는데 있어서 대단히 중요하다. 斜面滑動의 분류방법은 목적에 따라 여러가지 있을 수 있다. Varnes(1978)는 地盤工學의 관점에서 斜面滑動을 脫落(fall), 顛倒(topple), 滑動(slide), 퍼짐(spread) 및 流動(flow)으로 나누고 위와 같은 滑動형태가 2개 이상 겹치는 것은 復合(complex)으로 분류하였다.

脫落이란 흙이나 돌이 가파른 벼랑이나 비탈에서 떨어져 나와 공중에서 낙하하거나 굴러서 아래로 떨어지는 현상을 말한다. 이때 떨어지는 물체와 비탈 사이에는 전단변위는 거의 없으며 낙하속도는 대단히 빠르다.

顛倒는 하나 또는 몇개의 回轉點을 중심으로 하여 주로 암석기둥이 기울어지는 것을 말

한다.

滑動(slide)으로 인한 斜面崩壞는 滑動物質과 滑動面 사이에 剪斷變形이 발생하는데 특징이 있다. 滑動은 그 형상에 따라 平行滑動(translationl slide)과 回轉滑動(rotationl slide)으로 나눈다. 滑動에 대한 安定解析은 土質工學의 인 측면에서 많은 발전을 가져왔다.

퍼짐(spread)이란 지층중에 剪斷強度가 현저히 약한층이 존재할때 그 층을 따라 흙덩이가 멀리까지 퍼지면서 滑動하는 것을 말한다.

그림 1.1(a)에 보인 것처럼 水平方向으로 연약한 실트층이 존재하고 이 층을 따라 큰 間隙水壓이 존재한다면 이때의 斜面崩壞는 滑動體의 接觸力보다도 間隙水壓의 크기에 의존하므로 滑動과 구별된다. 퍼짐으로 인한 破壞는 滑動으로 인한 것보다 훨씬 빠르다.

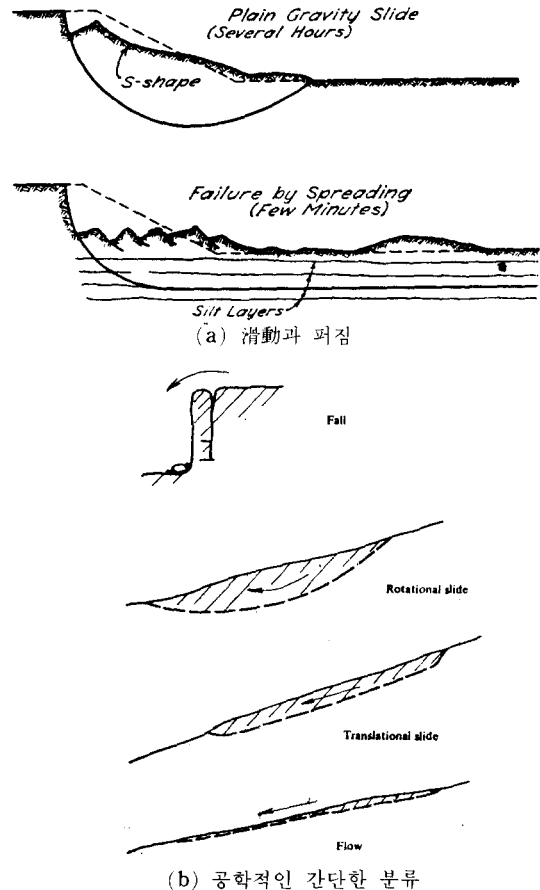


그림 1.1 地盤의 비탈崩壞 類形

流動(flow)이란 剪斷抵抗力의 부족으로 인한 滑動이라기 보다는 소성적인 滑動이 지배적인 경우이다. 따라서 이로 인한 滑動은 대단히 느리며 이로 인해 비탈이 불안정하게 되면 地盤은 포행(creep)이 생긴다.

위의 방법보다 더 단순하지만 공학적으로 유용하고 분류하기가 편리한 방법은 Walker 등(1987)이 제시하였다. 이에 의하면 斜面崩壞는 平行滑動(slides), 回轉滑動(rotation slides), 流動(flows), 脫落(falls)으로 나누고(그림 1.1 (b) 참조), 각 滑動類形에 대해 滑動길이(L)에 대한 滑動깊이(D)의 비와 滑動速度를 명시하여 분류에 참고하도록 하고 있다.(표 1.1 참조)

表 1.1 Walker 등(1987)에 의한 斜面滑動의 分類

활동유형	D/L의 비(%)	활동 속도
평행활동	5-10	mm/sec-m/sec
회전활동	15-30	mm/year-m/day
유동	0.5~3.0	cm/min-m/sec
탈락	-	-

토사와는 달리 岩石斜面的 滑動은 不連續面(discontinuity)이나 岩石傾斜(dip) 또는 節理(joint)를 따라 일어나기 때문에 그 형상이 특이하다. Heok and Bray(1977)는 岩石斜面的 해석을 위하여 平面破壞(plane failure), 쐐기형 파괴(wedge failure), 円形破壞(circular failure) 및 回轉破壞(toppling failure)의 넷으로 분류하였다. 각 파괴유형은 그림 1.2에 나타나 있다.

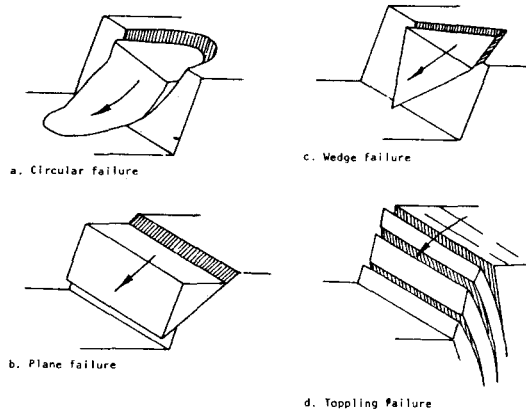


그림 1.2 岩石斜面的 滑動破壞의 分類

1.3 斜面不安定の 原因

비탈이 不安定하게 되는 原因이 무엇인가 하는 것은 Terzaghi(1950)에 의해 잘 정리되었다. Terzaghi는 그 原因을 외적인 要因과 내적인 要因으로 나누어 표 1.2에 보인 바와 같이 제시하였다.

表 1.2 斜面 不安定の 原因(Terzaghi, 1950)

- | |
|---|
| 1. 외적인 要因 |
| 1) 地形의 幾何學的 변화(人爲的인 切土, 유수에 의한 침식 등) |
| 2) 土被荷重의 除去(침식, 인위적인 절토 등) |
| 3) 荷重의 增加(하중의 추가, 비탈높이의 증가, 수위강화로 인한 흙무게의 증가 등) |
| 4) 衝擊과 振動 |
| 5) 인접한 호수 또는 저수지의 수위강화 |
| 6) 降雨 |
| 2. 내적인 要因 |
| 1) 진행성 파괴 |
| 2) 風化作用(동결융해, 건조 수축 등) |
| 3) 물의 침투로 浸蝕(용해에 의한 침식, 파이핑현상 등) |

이 표에 수록된 斜面不安定の 要因中 아마도 우리나라에서는 降雨로 인한 것만큼 큰 재난을 가져오고 또 不安定の 예측이 어려운 것은 없을 것이다. 강우가 비탈의 안정에 끼치는 영향은 斜面崩壞를 직접적으로 일으킨 경우와 그 이전의 누적된 降雨量과의 관계로부터 통계적으로 많이 조사되어 왔다. 그림 1.3은 Nilsen and Turner(1975)의 조사보고인데 이것은 미국 California Contra Costa County의 1959~1971년간의 통계로서 여기서 흥미있는 것은 누적된 降雨量이 비탈의 崩壞事故數와 밀접하게 관련이 있다는 것이다. 즉 비탈의 崩壞를 일으킨 폭풍우 이전의 누적강우량이 많으면 소량의 降雨에도 사고가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

비슷한 통계는 홍콩지역에 대하여 Lumb(19

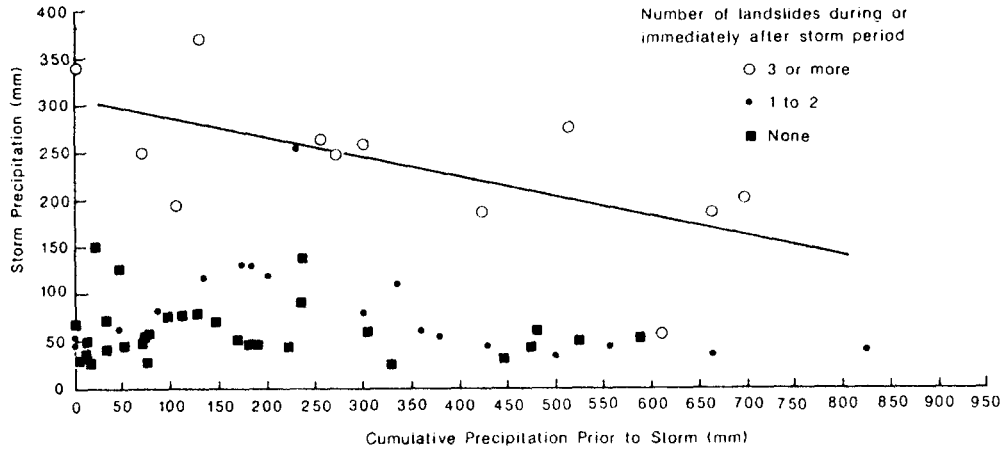


그림 1.3 1959~1971년간 캘리포니아주 Contra Costa군의 폭풍우와 누적강우량 및 사고발생수

75)에 의해서도 발표되었다. Lumb는 사고를 발생시킨 1일降雨량과 그 이전 15일간의 누적강우량을 대비시켜서 斜面滑動의 위험 정도를 예측할 수 있는 도표를 그림 1.4와 같이 발표하였다. 여기서도 사고당일의降雨量 뿐만 아니라 그 이전의 누적된降雨량이 크게 영향을 끼친다는 사실을 알 수 있다.

우리나라에서는 아직 이런 통계는 발표되어 있지 않지만 필자의 경험으로는 경남 거제지방에서 3일간의 누적강우량이 576mm에 이르렀을 때 斜面에 세워진 옹벽이 일부분은 완전히 파괴되었고, 나머지 부분도 거의 모두 피해를 입은 일이 있다(Kim, 1978).

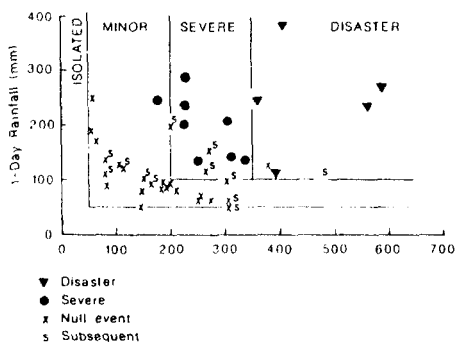


그림 1.4 降雨強度를 근거로한 홍콩의 斜面滑動 발생의 예측(Lumb, 1975)

1.4 斜面不安定の 조사

비탈이 不安定하다고 예상되는 지역을 조사하는 목적은 그 原因을 정확히 파악하여 현재의 安定狀態를 評價하고, 필요하다면 安定對策을 세울 수 있도록 현장에 관한 충분한 정보를 얻는데 있다. 不安定을 판정하기 위한 조사는 다음 4 단계를 거쳐 이루어진다.

- 1) 예비조사
- 2) 현장조사
- 3) 실내시험
- 4) 자료의 정리

여기서 예비조사는 해당지역에 관한 地盤工學的, 地質學的 및 地形學的 資料들을 충분히 수집하여 이들을 통해서 문제점을 가능한 정확히 파악하는데 목적이 있다. 제2단계의 현장조사는 지형측량, 시료채취, 현장시험, 간단한 계측 등 현장에서 수행하는 모든 活動을 포함한다.

조사가 정확할수록 비용과 精度는 증가되나 이것은 인명과 재산의 예상되는 피해정도를 고려하여 결정되어야 한다. 제3단계는 시험실에서 安定解析을 위한 土質 및 岩石試驗을 하는 일이다. 시험은 土質 分類試驗과 剪斷強度 測定試驗으로 나눌 수 있으며 전단 시험에 대해서는 다음 절에서 더 자세히 언급하기로 한다.

제 4 단계에서는 안정해석을 위한 圖面을 作成하고 地層의 境界를 分明히 定하여 각 지층의 强度定數를 确定한다. 이것은 安定解析을 위한 기본모형이 될 뿐만 아니라 對策工法을 세우는데 대단히 중요하다. 어떤 滑動類形이 确定되면 거기에 알맞는 해석방법을 선택하여 비탈의 滑動에 대한 安定性을 평가한다.

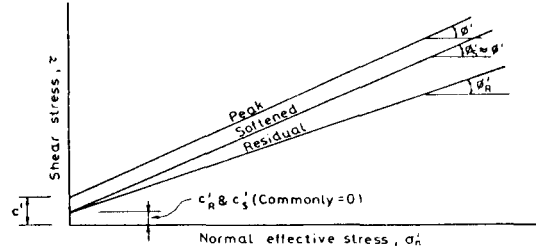


그림 1.6 强度定數의 결정

1.5 斜面安定解析에 쓰일 剪斷强度의 결정

斜面安定解析은 全應力解析法(total stress analysis)으로 할 수도 있고 有效應力解析法(effective stress analysis)으로 할 수도 있다. 이에 대해서는 후속되는 강좌에서 더 자세한 논의할 기회가 있으므로 다음으로 미루고 여기

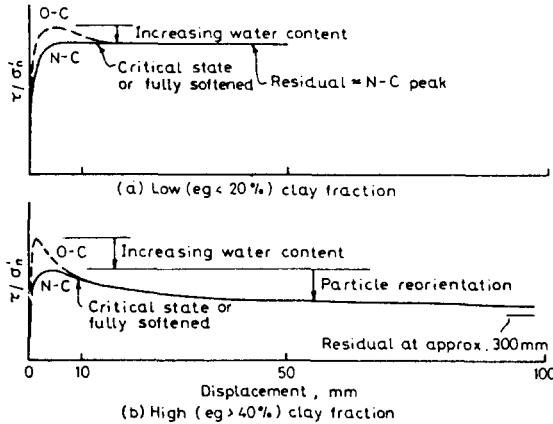


그림 1.5. 일정한 수직력을 작용시켰을 때의 변위와 전단응력과의 관계 (Skempton, 1985)

서는 有效應力解析에 쓰일 强度定數에 대해서만 언급하기로 한다. 간극수압이 전혀 생기지 않도록 하여 흙을 천천히 전단시키면 그림 1.5에 보인 바와 같은 변위와 전단응력과의 관계 곡선을 얻는다(Skempton, 1985). 즉 과압밀 점토는 어떤 작은 변위에서 전단응력은 최대가 되나 변위가 더 진행되면 이것이 감소하고 더욱 큰 변위에서는 점토성분이 많으면 더욱 더 감소한다. 이 전단력을 순서대로 最大(peak), 完全軟化(fully softened), 殘留(residual) 상태의 應力이라고 말하기도 한다. 그러면 각 상태에서의 전단력을 취하여 수직응력과의 관계로부터 强度定數 c' 과 ϕ' 를 결정할 수 있다(그림 1.6 참조). 각 상태에서의 强度定數는 最大는 p, 軟化는 s, 殘留는 r의 添字를 붙여서 표시하기로 한다.

점토지반의 切土斜면에 대한 安定解析에 있어서는 표 1.3과 같이 흙의 성질에 따라 强度

表 1.3 Skempton의 强度定數 선택에 대한 제안

흙의 종류	변형 상태	전 단 강 도 정 수	
		c'	ϕ'
흙없는 점토(intact clay)	처음으로 滑動	c_p'	ϕ_p'
과압밀 되고 쪼개지는 점토(fissured clay), 단 팽창성과 과압밀비가 크지 않을때	처음으로 滑動	c_s'	ϕ_s'
과압밀되고 쪼개지는 점토, 단 팽창성이 크고 과압밀비가 클때	처음으로 滑動	0	ϕ_r'
과압밀 점토	전에 큰 변형이 생겼을 경우	0	ϕ_r'

定數를 구별하여 적용할 것을 권장하고 있다.

Fell and Jeffery(1986)는 斜面安定解析에 있어서 最大強度, 軟化強度 및 殘留強度中 어느 것을 취하느냐 하는 것은 현재의 滑動面の 존재와 쪼개진상태(fissuring)에 따라 다르다고 주장하고 다음과 같은 지침을 제시하고 있다.

- * 현재 滑動面이 존재한다면 그 滑動面에 대해서는 現場殘留強度를 적용한다.
- * 岩層이나 습곡(folding)으로 형성된 성층면 bedding plane)은 잔류강도를 사용한다.
- * 다진 흙이나 쪼개짐이 없는 흙(no fissuring soil)은 C_p 와 ϕ_p 를 사용한다.
- * 쪼개지는 흙(fissured soil)은 쪼개짐의 성질, 방향, 간격 및 연속성에 따라 最大強度와 殘留強度 사이의 강도를 사용한다.

그런데 最大強度는 일반적으로 배수삼축압축 시험 또는 間隙水壓을 측정하는 압밀비배수 시험으로 쉽게 결정되지만 C_s , ϕ_s 또는 C_r , ϕ_r 을 결정하기에는 적절하지 못하다. 이들을 결정하려면 충분히 변위를 일으킬 수 있는 링(ring) 剪斷試驗 또는 直接剪斷試驗으로 결정해야 한다.

사실상 直接剪斷試驗으로 殘留強度를 얻으려 하여도 일반적으로 실험실에서 이용되는 시험기의 최대변위가 6mm~10mm 정도에 지나지 않으므로 일시의 판단으로는 변위가 충분하지 못하다. 그러나 다음중 어느 한 방법으로 殘留強度를 측정할 수 있다(Fell and Jeffery, 1986).

- 1) 전단시험기가 변위할 수 있는데까지 흙을 전단한 다음 수직하중을 일부 제거하고 시험 시작때와 동일 상태가 되도록 역으로 빨리 변위시킨다. 다음부터는 最小剪斷強度가 얻어질때 까지 위의 과정을 반복한다.
- 2) 剪斷強度가 최대치에 도달되면 곧 수직하중을 일부 제거되고 역으로 변위시켜 빨리 原狀態로 회복시킨다. 다시 먼저 전단한 변위까지 빨리 전단한 다음 1)과 같은 방법으로 最小強度가 얻어질 때까지 반복해서 剪斷試驗을 행한다. 이 경우의 대표적인 剪斷力變位 曲線은 그림 1.7에 나타나 있다.

나 있다.

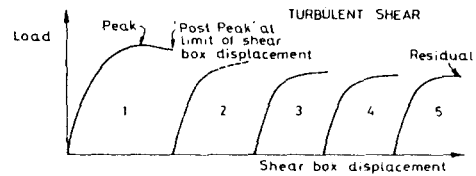


그림 1.7) 直接剪斷試驗에 의한 殘留強度 측정시의 대표적인 剪斷力 變位曲線(Fell and Jeffery, 1987)

1.6 解析方法

1.6.1 비탈의 地形學的 및 地質學的 安定性 評價

自然斜面的 安定性 여부를 정확히 예측하는 일은 설사 정교한 방법이 동원되었다 하더라도 여간 어려운 일이 아니다. 비탈을 이루는 自然斜面的 토사는 일반적으로 깊이에 따라 그 성질을 달리할 뿐더러 節理, 습곡 및 斷層 등이 있는 경우도 있어서 지반의 성질이 극히 불규칙하기 때문이다. 이런 때에는 地形學的 및 地質學的 측면에서 현지조사를 통하여 安定性を 評價하는 것이 경제적이고 효과적이다. 그러나 이러한 評價는 評價者의 주관에 따라 다소 차이가 있을 수 있고, 評價項目에 따라 결과가 달라질 수 있는 문제점이 있다. 여기서는 호주의 빅토리아주의 한 지역을 대상으로 시행되었던 한 評價方法을 소개하기로 한다(Joyce and Evans, 1976).

이 方法에서는 표 1.4에 보인바와 같이 評價項目을 斜面傾斜角, 植生狀態 등으로 나누어 점수를 정하고 이것을 합산하여 安定性を 결정했다.

安定等級은 다음과 같이 정한다.

안정	< 5
불안 잠재	6~9
불안	10~13
대단히 불안	14~15

1.6.2 岩石斜面的 安定解析

岩石斜面的 안정은 인장균열, 지층경사, 不連續面, 節理 등의 존재에 지배되므로 解析을 하기전 철저한 조사가 무엇보다도 중요하다.

表 1.4 斜面安定의 等級評價表 (Joyce and Evans, 1976)

1. 사면경사각	
a) 0 - 5	0
b) 6 - 15	1
c) 16 - 26	2
d) 27 - 42	3
e) > 42	4
2. 식생상태	
a) 촘촘이 있는 초목	0
b) 드문 드문 있는 초목	1
c) 물	2
d) 초목 없음	3
3. 비탈을 도로로 절토	4
4. 비탈이 목초지	1-2
5. 지하수위와 근접 또는 용수	0-4
6. 강의 유수에 의한 침식	1
7. 절리	1
8. 활동방향으로 지층경사	1-2
9. 과거의 활동 흔적	2

Hoek and Bray (1977)는 1.2 절에서 설명된 것처럼 滑動類形을 4 가지로 분류하였고 각 유형에 대한 자세한 解析方法을 그의 저서에 잘 수록하고 있다. 後述될 斜面安定 강좌의 내용에서도 자세한 설명이 있을 것이므로 여기서 더 이상 언급할 필요를 느끼지 않는다.

1.6.3 回轉滑動에 대한 安定解析

비교적 균질한 人工 또는 切土斜面은 대부분 回轉滑動으로 붕괴된다. 滑動面을 원호로 가정하고 滑動體를 여러개로 切片으로 나누어 解析하는 方法은 1972년 처음으로 Fellenius에 의해 개발되었다. 그후에 Taylor (1948)는 摩擦円法을 발표하였지만 이것은 균질한 지반에만 적용될 수 있는 제한이 있어서 최근까지 발전된 回轉滑動에 대한 解析方法은 모두 切片法을 근간으로 하고 있다. 또한 切片法은 滑動形象이 원이 아닌 경우에도 적용될 수 있도록 개발되었다. 切片法에 있어서는 豫想滑動斜面을 n 개의 절편으로 나누었다고 할 때 힘과 모멘트에 관한 平衡方程式은 $3n$ 개 밖에 쓸 수 없으나 미

지수는 $(5n-2)$ 개가 된다(Lambe and Whitman, 1969). 따라서 $(2n-2)$ 개의 不靜定力이 있으므로 한 切片에 생기는 힘들의 평형에 관한 어떤 가정을 設定하지 않으면 安定解析을 위한 공식이 유도되지 아니한다. 표 1.5는 切片法으로 지금까지 개발되어온 여러가지 方法과 이들 方法의 개발에 근거가 된 가정을 일목요연하게 정리한 것이다. 이 표에서 제시한 여러가지 方法 중에서 어느 方法이 가장 신뢰성이 있는냐 하는 것은 대단히 흥미있는 일이다. 그러나 이것은 가상 滑動원호가 어느 위치를 통과하느냐에 따라 차이가 있을 수 있다.

표 1.6은 주어진 滑動形狀과 強度定數에 대하여 여러가지 解析方法으로 구한 安全率을 보인 것이다(Duncan, 1975). Fellenius 方法이 다른 方法에 비해 安全率이 훨씬 적게 계산되고, 스웨덴의 수정方法(Corps of Engineers, 1970)은 過多하게 계산된다는 것을 유의할 필요가 있다.

1.6.4 應力經路法

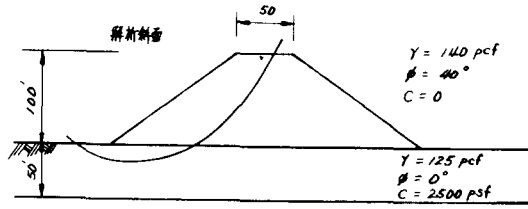
應力經路法에 의한 斜面의 安定解析 方法은 Lambe and Marr (1979)에 의해 제안되었다. 이 方法은 豫想滑動面上에 대표적인 위치를 정하고 그 위치에서의 剪斷強度와 載荷(loading)의 변화로 유발되는 應力經路上的의 應力을 비교하여 비탈의 安定을 추정하는 方法이다. 安全率은 주어진 위치에서의 剪斷應力에 대한 剪斷強度로 정의된다. 應力經路法에 의한 安定解析의 한 예로서 베네주엘라의 Amuay 지역 斜面滑動의 安定解析 결과를 소개하기로 한다(Lambe, 1985; Lambe et al, 1987)

그림 1.8(a)는 Amuay 지역 切土斜面의 豫想滑動面上的의 B점에 대한 解析方法을 보인 것이다. B점의 剪斷強度는 변위가 진행됨에 따라 最大強度로부터 殘留強度까지 변하는데(1.5절 참조) 각 상태의 強度曲線은 C, P, Pc, R 등으로 표시되어 있다. 절토면이 형성된 후 間隙水壓은 음의 값($u = -5t/m^2$)으로 부터 양의 값($u = 8.5t/m^2$)으로 변화하며 剪斷應力도 약간 증가되므로 그 應力經路는 $l-m-n$ 으로 표시된다. 切土斜面이 완성된 직후에는 強度曲線은 C이고 이때의 應力은 l 점에 있으므로 安全

表 1.5 여러가지 安定解析 方法에 대한 가정

해석 방법	가정	적용
<p>Fellenius 方法 (1927)</p>	<p>1) 절편의 측방향력은 각절편의 저면과 평행</p> <p>2) 절편저면과 수직한 방향의 힘의 평형만 고려</p>	<p>원호滑動</p> <p>원호滑動</p>
<p>Bishop의 간편법 (1955)</p>	<p>1) 측방향력의 수직성 분합력은 영</p> <p>2) 수직방향의 힘의 평형만 고려</p>	<p>원호滑動</p>
<p>Janbu의 方法 (1954, 1973)</p>	<p>1) 횡방향력의 작용 위치를 가정</p>	<p>원호滑動</p> <p>非원호滑動</p>
<p>Morgenste- ern and Price方法 (1965)</p>	<p>1) 측방향력의 경사각 은 $\theta = \lambda f(x)$로 표시 λ : 상수</p>	<p>원호滑動</p> <p>非원호滑動</p>
<p>Spencer의 方法 (1967, 1981)</p>	<p>1) 경사각 θ는 모든 절편에서 동일</p>	<p>원호滑動</p> <p>非원호滑動</p>

表 1.6 여러가지 方法에 의한 安定解析 결과 (Duncan, 1975)



해 석 방 법	안 전 율
Fellenius 方法	1.07
Bishop 方法	1.23
Sweeden의 修正方法 (미공병단 方法)	1.45
Spencer 方法	1.20
Morgenstern & Price 方法	1.33

率 $F.S.=2.7$ 이다. 마찬가지로 方法으로 P_1 곡선 상에서는 $F.S.=1.7$ 이고 P_c 곡선식에서는 $F.S.=1.0$ 이다. 따라서 間隙水壓이 점차로 증가하여 $u=8.5t/m^2$ 이 되었을 때에는 이 斜面은 붕괴된다는 것을 의미한다. 그림 1.8(b)는 댐 하류면의 安定解析 結果를 보인 것이다. G점과 $\sigma_n' \text{ Int}/m^2$

E점에서 應力の 증가는 없고 間隙水壓만이 증가한다면 應力經路는 그림에서 보인 바와 같이 수평선이 될 것이다. 간극수압이 0이 되었을 때 G점의 安全率은 $F.S.=1.3$ 이고 E점의 安全率은 $F.S.=1.6$ 으로 계산된다.

1.7 斜面不安定 방지대책

斜面安定解析結果 비탈이 不安全하다고 판명 되면 安定對策이 요구되며 그 원리는 斜面 不安定の 원인을 제거하는 것이다. 그 方法을 적으면 다음과 같다.

- * 비탈표면과 비탈내부에 있는 물을 제거하므로서 間隙水壓을 감소시킨다.
- * 滑動面 위에 있는 흙이나 滑動을 일으키는 물체를 제거하므로서 활동을 일으키는 힘을 감소시킨다.
- * 滑動面을 따라 흙 또는 암석의 剪斷強度를 증가시키거나 引張力, 壓縮力 또는 剪斷力에 저항하는 물체를 비탈속에 삽입하여 滑動에 대한 抵抗力을 증가시킨다.
- * 滑動防止 구조물(예 옹벽, 말뚝)을 설치하여 불안한 비탈의 滑動을 저지시킨다.

(1) 비탈의 不安定이 주로 間隙水壓의 增加로

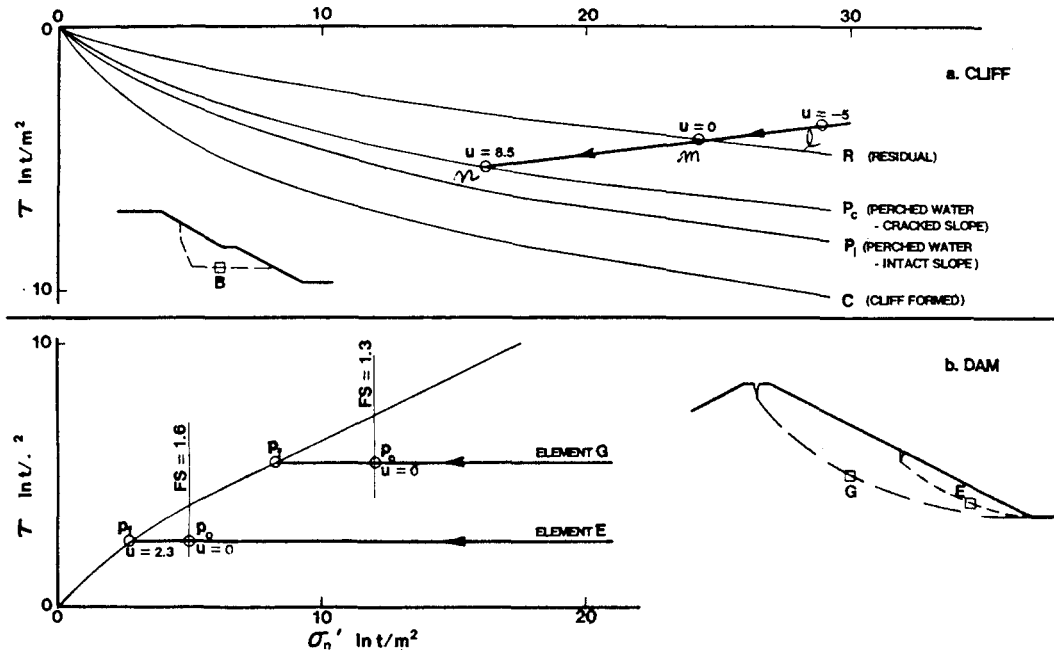


그림 1.8 應力經路法에 의한 Amuay 지역의 斜面安定解析

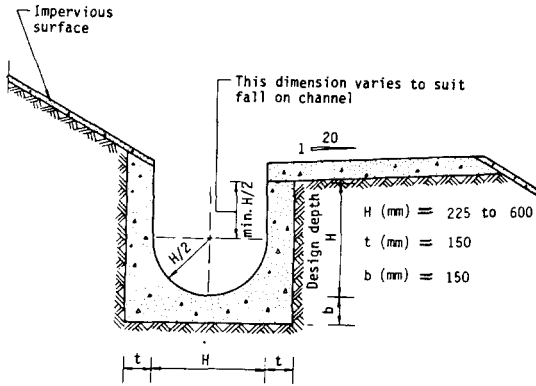


그림 1.9 홍콩에서 행해지고 있는 배수시설의 한 예 (Geotechnical Control Office, 1984)

인한 것임을 이해한다면 비탈 내부로의 물의 유입을 방지하는 일은 아무리 강조해도 지나치지 않을 것이다. 地表水는 원하는 위치에서 집수하여 비탈내부로 침투되지 않고 거의 모두 流出 되도록 해야 한다. 특히 多雨地方에서는 이런 배수시설이 요구되는데 그림 1.9는 홍콩에서 행해지고 있는 한 예를 보인 것이다 (Geotechnical Control Office, 1984).

集中豪雨が 잦은 우리나라에서는 비탈의 浸蝕으로 인한 피해가 심하다. 浸蝕은 강우량과 지속시간, 斜面傾斜 및 비탈을 이루는 흙의 입자크기와 깊이가 관련된다. 특히 風化土 지반이 절토로 표면에 노출될 때에는 실트질의 가는 입자들은 유속이 빠르면 쉽게 씻겨져 내린다. 浸蝕에 대한 방지는 비탈 전체를 덮을 수 있는 植生工法이 효과적이다. 이에 대한 자세한 내용은 Greenway (1987) 또는 Geotechnical Control Office (1984)의 문헌을 참고하기 바란다.

(2) 비탈에 인접한 땅을 충분히 이용할 수만 있다면 비탈을 완만하게 하거나 滑動이 예상되는 흙덩이를 제거하여 그 형상을 바꾼다면 安定性이 크게 증가한다. 일반적으로 보면 滑動面上의 중앙 1/3의 상부에 있는 흙이나 암석은 滑動을 일으키는데 영향을 끼치고 그 하부에 있는 흙은 滑動에 저항하는데 기여한다. 回轉滑動이 예상되면 斜面先端(toe) 부근에 배수가 잘되는 사질토나 岩片을 두면 安全率을 크게 증가시킬 수 있다. 비탈 아래 軟弱地盤이

있으면 押盛土(berm)를 두어 安全率을 증가시키는 것이 效果的이다.

(3) 滑動하려는 비탈속으로 滑動하는 힘에 저항하는 물체를 삽입하면 저항력을 크게 증가시킨다. 그 예로서는 수동말뚝(passive pile), soil nailing, micro pile, 돌기둥(stone column) 석회말뚝(lime column) 등이 있다. soil nailing이란 흙속으로 길쭉한 강봉, 또는 앵글을 박아 흙과 합성하여 剪斷強度의 증가를 기대하는 공법이다. 이에 대한 設計方法, 施工方法은 Byuce and Jewell(1986,1987)의 문헌을 참고하면 될 것이다. micro pile은 일명 root pile이라고도 하는데 마치 식물의 뿌리처럼 작은 말뚝을 박아서 비탈의 安定을 증가시키는 것이다. 한 시공 예가 그림 1.10에 나와 있다.

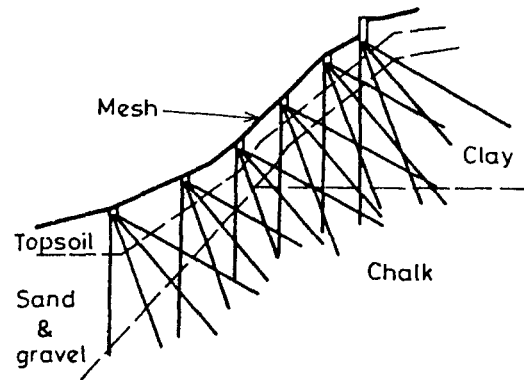


그림 1.10 대표적인 micro pile의 시공단면

암석을 굴착하여 비탈을 형성한 후에는 비탈 전체의 安定은 물론 국부적으로 비탈면에 결함이 생길 수 있다. 이런 경우의 보수공법은 rock anchor, rock bolt, dowel 등 여러가지가 있다. 그림 1.11은 암석사면을 보수하는 여러가지 방법을 보인다 (Geotechnical Control Office, 1984).

(4) 滑動防止를 위한 구조물로서는 옹벽, 앵커 벽체(anchored wall), 크립 벽체(crib wall), 補強土壙壁 등이 있다. 이러한 구조물을 滑動防止用으로 설계하는데 있어서는 일반적인 安定解析方法 즉 顛倒, 水平滑動, 기초바닥의 地耐力 등의 安定이 만족되도록 검토되어야 하지만 構造物의 위와 아래에 있는 지반을 통과하

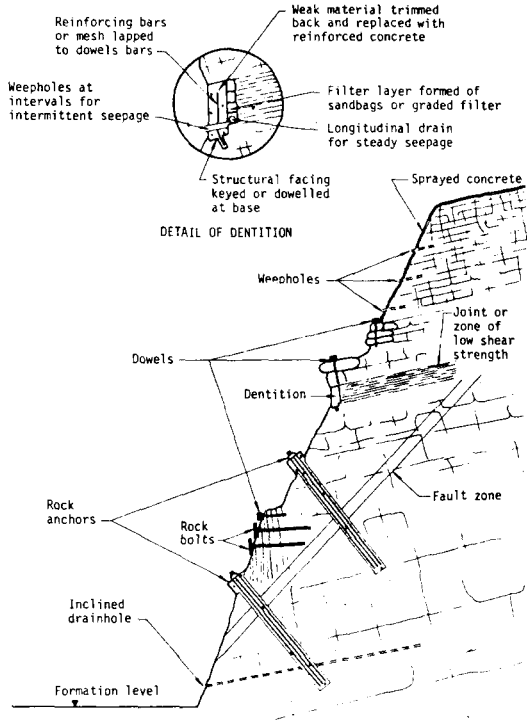


그림 1.11 岩石斜面的 여러가지 補修方法 (Geotechnical Control Office, 1984)

는 滑動에 대한 安定檢討가 반드시 추가되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 土質工學會, (1971), 土質工學用語解説集, 日本土質工學會.
2. 小橋燈治, (1975), 斜面安定, 土質工學基礎총서 9, 慶島出版會.
3. Bishop, A.W., (1955), "The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes." *Geotechnique*, Vol. 5, No.1, pp. 7-77.
4. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., (1986), Soil Nailing: Application and Practice. part I, *Ground Engineering*, Nov., pp.10-15.
5. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., (1987), Soil Nailing: Application and Practice. part 2, *Ground Engineering*, Jan., pp.21-38.

6. Corps of Engineers, (1970), *Engineering and Design, Stability of Earth and Rock-Fill Dams*, Dep of the Army, Washington.
7. Duncan, J. M., (1975), *Slope Stability Analysis*, Note on Recent Developments in the Design, Construction, and Performance of Embankment Dams, U. C. Berkeley.
8. Fell, R. and Jeffery, R. P., (1987), Determination of Drained Shear Strength for Slope Stability Analysis, *Proc. of Soil Slope Instability and Stabilization*, Sydney, pp.53-70.
9. Geotechnical Control Office, 1984, *Geotechnical Manual for Slopes*, Government of Hong Kong, 2nd ed.
10. Greeway, D. R., (1987), "Vegetation and Slope Stability," *Slope Stability edited by Anderson and Richards*. John Wiley and Sons, New York, pp.187-230.
11. Hoek, E. and Bray, J., (1977), *Rock Slope Engineering*, The Institute of Mining and Metallurgy, London.
12. Janbu, N., (1954), "Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis." *European Conf. on Stability of Earth Slopes*, Stockholm, Sweden.
13. Janbu, N. (1973), "Slope Stability Computation." *Embankment-Dam Engineering*, Casagrande Vol. John Wiley and Sons, New York, pp.47-86.
14. Joyce, E.B. and Evans, R.S., (1976), *Some Areas of Landslide Activity in Victoria*, Australia, Proceedings, Royal Society of Victoria 88, pp. 95-108.
15. Kim, S.K., (1987), "Retaining Wall Failure due to Heavy Rainfall," *Proc. of the US-Asia conf. on Engineering for Mitigating Natural Hazards Damage*, Bangkok. C 11-1-C 11-8.
16. Lambe, T. W. and Whitman, R. V., (1969), *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.
17. Lambe, T. W., (1985). "The First Terzaghi Oration: Amuay Landslides," *Proc. of the 11th ICSMFE Golden Jubilee Volumn*, San

- Francisco, pp.137-158.
18. Lambe, T. W., Silva, F., and Lambe P.C., (1987), "Stability of on Unloaded Slope," *Proc., the 9 th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Bangkok, pp.1-1-1-16.
 19. Lumb, P., (1975), "Slope Failure in Hong Kong," *Quarterly Journal, Engg. Geology* 8, pp.31-65.
 20. Morgenstern, N. and Price, V.E., (1965), "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces," *Geotechnique*, Vol. 15, No.1, pp.79-93.
 21. Nilson, T. H., and Turner, B. L., (1975), *Influence of Rainfall and Ancient Landslide Deposit on Recent Landslides (1950-1971) in Urban Area of Contra Costa County, Cal.*, USGS Bulletin 1388, pp.1-18.
 22. Sassa, K., (1985), "The Geotechnical Classification of Landslide," *Proc. 4 th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides*, Tokyo, pp.31-40.
 23. Skempton, A.W. and Hutchinson, J.N (1969), "Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations," *State-of-the-Art Proc., the 7 th ICSMFE*, Vol.2, Mexico City, pp.291-340.
 24. Skempton, S. W., (1985), "Residual Strength of Clays in Landslides Folded Strata and the Laboratory," *Geotechnique* 35, No.1.
 25. Spencer, E., (1967), "A Method of Analysis of the Stability of Embankment Assuming Parallel Inter-Slice Forces," *Geotechnique*, Vol. 7, No.1, pp.11-26.
 26. Spencer, E. (1981), "Slip Circles and Critical Shear Planes," *Journal of the Geot. Engg. Div., ASCE*, Vol. 107, No. GT 7, pp. 929-942
 27. Taylor, D.W., (1948), *Foundational of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.
 28. Terzaghi, K., (1950), *Mechanism of Landslides*, Geological Society of America, Berkeley Volume, pp.83-123.
 29. Varnes D.J. (1978), Slope Movement Types and Processes, *Landslides Analysis and Control*, Special Report 176, Transportation Research Board, Washington. D.C..
 30. Walker, B. F., Blong, R. J., and Macgregor, J.P. (1987), Landslide Classification, Geomorphology, and Site Investigation, *Proc. of Soil Slope Instability and Stabilization*, Sydney, pp.1-52.