

사면보강의 원리 및 방법

Theory and Method of Slope Reinforcement

이상덕¹⁾, Sang-Duk Lee

1) 아주대학교 건설교통공학과 교수, Professor. Dept. of Civil Engineering

1. 서론

사면은 인공적 또는 자연적인 현상에 의하여 발생된 경사진 지반을 말하며, 지반의 종류와 상태, 작용력 및 지하수 등에 의하여 그 안정성이 결정된다. 흙 지반은 흙입자, 물, 공기로 이루어진 복합재료이고 암석이 화학적 또는 물리적인 풍화작용을 받아서 생성되어 그 자리에 있거나 (원적토) 침식-운반-퇴적 과정을 거쳐서 전혀 다른 위치에 존재(운적토)하게 된다. 이러한 흙지반은 균질한 경우가 드물고 대개 다층형상으로 되어 있고, 균질하더라도 각종 균열 등 불연속면이 있어서 역학적으로 취약부가 된다. 또한 원적토에서는 암석의 풍화과정에서 모암이 갖고 있던 절리가 그대로 잔존하는 경우가 많다. 지표에 노출되는 암반은 대개 풍화가 시작되고 있거나 진행중인 상태이므로, 이를 절개하여 조성된 암반사면이나 기존의 암반사면의 안정을 검토할 때에는 암반의 특성과 풍화정도 및 차후의 풍화속도 등을 감안하여야 한다.

현재 국내에서 문제가 발생하는 사면은 대체로 상부에는 토사가 존재하고 하부에는 풍화가 상당히 진행된 풍화암이 존재하여 단순히 토사사면이나 암반사면으로 생각하기 보다는 토사와 암반 혼성사면으로 취급해서 안전을 검토해야 하기 때문에 지반공학기술자들을 당황하게 만드는 경우가 많다. 따라서 현존하거나 계획중인 사면을 안정한 상태로 유지하기 위해서는, 사면을 이루고 있는 지반의 상태를 확실히 파악해서 현상태의 안전율을 정확히 구하여 보강여부 및 보강정도를 결정하고, 차후에 발생할 사면의 안전율 저하요인을 파악하고, 원인을 근절시키거나 개선한 후에 최종적으로 안전율을 재확인해야 한다.

따라서 본 논문에서는 사면의 안전율을 일정한 크기로 유지하기 위해서 사면을 보강하거나, 이미 활동이 시작되었거나 붕괴되어서 안정한 상태로 복구하기 위하여 사면을 보강하는 경우에 대비하여, 사면을 보강하는 원리와 각각의 경우에 가장 적합한 보강방법을 논의해 보기로 한다.

2. 안전율 계산

2.1 사면의 안전율의 정의

사면의 안전율을 구할 때에는 지반의 최대 전단강도보다는 수정된 소성이론에 의한 강도를 적용하는 것이 더 좋은 결과를 구할 수 있다. 사면의 안전율을 정확하게 구하기 위해서는 다음의 3가지 사항에 유의해야 한다.

- 안전율의 정확한 정의
- 활동면의 위치와 형상 파악
- 적절한 계산방법의 적용

사면의 안전율에 대한 정의는 여러 가지가 있으나 그 중에서 다음의 조건을 만족하는 것을 적용해야 한다.

- a) 파괴에 이르는 단면력이 적함
- b) 단면력은 변위에 무관. 소성이론의 적부성 때문에, Coulomb 법칙적용
- c) 강도의 불확실성이 하중의 불확실성 보다 중요
- d) 전체 안전율 계산시 강도의 'characteristic value' 계산
- e) 하중 조합의 신뢰성을 고려
- f) 결과의 오차를 부분 안전율로 표현 가능
- g) 최대한 안정되고 결함 없는 값을 적용
- h) 모든 파괴면 형상에 적용가능
- i) 임의 토질정수 및 지층에 적용가능

기존에 통용되는 안전율에 대한 정의는 다음과 같은 것들이 있으며 위의 조건을 모두 만족시키지 못하는 것도 있으므로 적용시에 주의를 요한다.

2.1.1 외력에 의한 파괴 상태 적용

외력에 의한 파괴상태를 기준으로 사면의 안전성을 정하는 방법으로 다음과 같은 것들이 있다.

- Hultin/Petterson, 사질토에 대한 Fellenius, Borowicka, Fröhlich

이들은 c)조건에 위배되고, 부분적으로 g) h) i)에 위배된다. 이 중에서 Fröhlich정의를 가장 적합하다.

2.1.2 토질 정수가 불리해짐에 따른 파괴 상태 적용

사면지반의 토질정수가 불리해짐을 기준으로 사면의 안정성을 판단하는 기준으로 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 기존 전단력과 소요전단력의 비교

- Fellenius, Sion, Terzaghi/Peck(1961a), Ohde, Lazard

이들은 대체로 2.1.1에서 제시한 정의들보다 유리하다.

- 2) 상호 mobilizing degree

- Taylor

파괴 안전율을 구할 때 작용력의 일부만 사용하며 a)조건을 위배하고 i)에 위배되는 개념이다.

- 3) 회전력을 고려

- Terzaghi/Peck (1961b)

가용모멘트와 소요 전단 강도가 잘못되고 h)에 위배된다.

2.1.3 부분안전율 적용

무리없이 적용가능하나 모든 지반에 같은 값을 사용해서 안된다. 전체 안전율을 구할 수 없는 단점이 있다. a)~i)를 만족하는 것으로 3개의 정의가 가능하다.

- 부분안전율(전체 안전율을 구할 수 없음)
- Lazard (균질한 지반 한정)

- Fellenius(층상지반에도 사용가능, 전체안전을, 따라서 가장 적합)

이들을 구하기 위해 필요한 토질정수는 각각 다르나 실험결과를 고려해야 한다.

2.2 사면안정 계산법의 정확성

2.2.1 평면활동

평면 활동면에서는 응력의 분포가 중요하지 않으므로 Fellenius 안전율을 적용하면 결과가 같게 구해진다.

2.2.2 Kötter식 적용

활동면 상의 응력분포를 Kötter 식으로 계산하여 평형식을 적용하는 방법으로 Kötter식의 상수는 경계조건으로부터 구한다.

- Frontard 법
- Jaky
- Rodriguez
- Brinch Hansen 의 평형법
- Characteristic Method

위에서 Characteristic Method를 제외한 4방법은 활동면의 형상을 선택했으므로 Kötter식이 필요없다. Frontard/Jaky/Rodriguez 방법은 평형이 깨어져서 너무 작은 안전율이 구해진다. 반면에 Brinch Hansen 은 응력 분포의 “실제가능성”만 위배되므로 조금 나은 결과가 구해진다.

Characteristic Method는 영역파괴를 전제로 한다. 실제 지표가 계산치와 일치하면 그 결과는 정해(exact)이다. 이 방법들은 계산시간과 노력이 많이 들고 그 가정 때문에 제한적으로만 사용된다.

2.2.3 곡면활동

1) 정해(exact) 방법

이 방법들을 적용하면 오차가 2% 이내이므로 정해(exact)라고 할 수 있다. 이 오차는 응력분포의 오차에 기인한다. Fellenius 도해법과 logarithmic spiral 및 Morgenstern / Price 등의 방법이 있는데, Fellenius 와 Morgenstern/Price는 파괴형상을 변화시킬 수 있으며, Morgenstern/Price는 Fellenius를 수학적으로 해석한 방법이다.

2) 조사법

완전히 정확(exact)한 응력분포를 가정하여 다음 중에서의 하나 또는 여러 가지 결과의 정확성에 영향을 미친다.

- 형상계수 $\xi = \sum \sigma N / N$: 매우 안정적
- N 의 절대값 : 주로 방향의 함수
- N 의 방향 : 한 방향만 작용하는 응력분포시 오류가 됨
- $\sum M = 0$ 중심점 위치 : 임의 형상 활동면에 적합

2.2.4 사면안정해석법의 비교

수많은 사면 안정해석법을 다음의 3가지 그룹으로 나뉜다.

1) 전체 평형식 적용

전체 시스템에 평형식을 적용하는 방법으로 응력분포의 적합성이 관리되지 않는 문제점이 있다. 부적합한 응력분포에 의한 오차가 차단되므로 수정 마찰원법이 다른 방법들에 비하여 오차가 작다.

- Hultin - Petterson (Fellenius 안전율 적용), 마찰원법, Bell, modified Bishop 법, modified Nonveiller, Spencer 등이 있다.

2) 모멘트 평형식($\sum M = 0$) 적용

반력과 합력의 크기와 위치가 거의 일치(체결 오차)하며 적용한 수직력이 실제와 얼마나 근접한가에 따라 그 결과가 주로 좌우된다.

Krey, Bishop, Nonveiller, Franke, Breth, Sherad, Fellenius 조사법, Terzaghi 등의 방법이 있다.

Bishop 방법이 수직력의 방향이 편찮아서 가장 좋은 것으로 평이나 있다. 전체 평형식을 적용하는 방법과 정확도가 거의 유사하나 계산이 간단하다.

3) 힘의 다각형(힘의 평형)에서 안전율 계산

전체 시스템에 힘의 다각형을 적용하며 모멘트 평형은 관리 되지 않는다. 올바른 결과를 위해서는 수직력을 실제와 같도록 크게 해야 한다. 이에 따른 오차가 매우 크다. 독일 수리조선협회 방법, simplified Janbu, modified Janbu, Borowicka 등의 방법이 있다. 대체로 Borowicka 결과가 가장 우수하다.

2.3 사면에서 지하수의 영향

사면에 지하수가 존재하고 사면내와 선단부의 수위가 다르다면 그 침윤선이 사면내 또는 선단에서 노출되고 침윤선의 기울기는 사면의 경사나 지반 상태에 따라 다르다. 사면내의 물은 그 자체로 자중 증가 요인 즉, 활동력 증가요인이 되고, 침투력이 작용하여 사면의 안정에 절대적으로 불리하게 된다.

이때에 사면내 물의 영향은 유선망을 작도하여 검출해야 하지만 계산을 간편하게 하기 위해서 다음과 같이 간략하게 고려할 수 있다. 참고로 사면안정해석에서 지하수에 의한 정수압은 고려하는 경우는 자주 볼 수 있으나 침투력을 고려하는 방법은 많지 않음을 알아야 한다.

- 활동면 상부에 존재하는 물의 자중을 활동력에 포함 (그림 2.1)
- 사면내 침윤선의 접선에 평행한 침투력을 활동력에 포함 (그림 2.2)

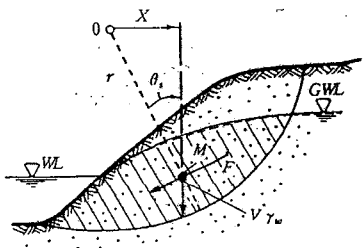


그림 2.1 사면활동과괴에 작용하는 침투력

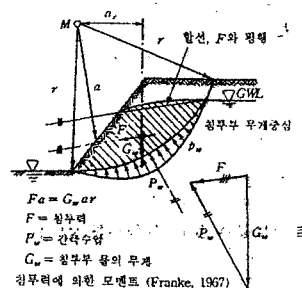


그림 2.2 침투력에 의한 활동모멘트

- 활동면 외부에서 활동면에 작용하는 수평방향 정수압(그림 2.3)을 계산하여 활동력에 포함
- 유선망으로부터 활동면을 따라 작용하는 정수압(그림 2.4)을 구하여 적용

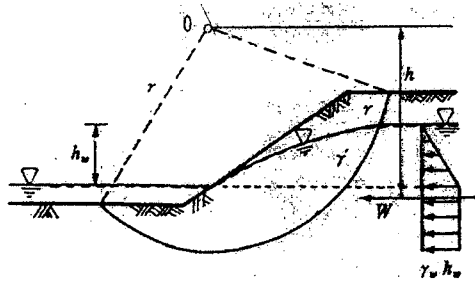


그림 2.3 정수압 적용

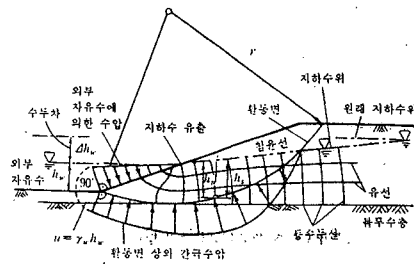


그림 2.4 활동면상의 간극수압분포

특히 사면 선단부근에 불투수층이 존재할 때에는 그 하부 투수층에 존재하는 지하수가 피압상태 일 경우(그림 2.5)가 많으므로 간극수압의 계산시에 이를 고려해야 한다.

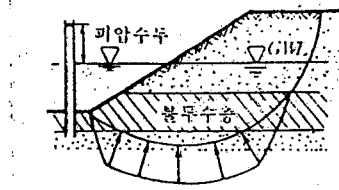


그림 2.5 피압상태의 사면

3. 사면의 활동 파괴

3.1 개요

사면의 활동파괴는 사면을 구성하는 지반내의 전단변형이 국부적으로 집중되어 활동면(선형파괴) 또는 활동영역(영역파괴)이 형성되면서 발생된다. 이때에 지반의 전단변형은 지반의 전단 거동 특성에 의해 결정된다.

사면의 활동파괴는 이같은 활동을 일으키는 힘 즉, 활동력이 지반의 활동저항력에 도달되거나 이를 초과할 때에 일어나게 되며, 일반적으로 활동력과 활동저항력은 다음과 같다.

활동력(Driving force) :

- 활동파괴체와 지보재의 거동
- 활동 파괴체에 불리하게 작용하는 외력
- 지하수에 의한 정수압이나 침투력
- 지반진동이나 지진에 의한 힘

활동저항력(Resisting force) :

- 활동파괴면에 작용하는 전단 저항력 (점착저항력 + 마찰 저항력)
- 활동파괴체에 유리하게 작용하는 앵커력이나 버팀재 저항력
- 활동파괴면에 설치된 지보구조체의 전단 저항력

3.2 사면활동파괴 요인

따라서 사면의 활동파괴는 위의 활동력 증가 요인이나 활동저항력 감소요인이 발생되었을 때에 일어난다. 이 같은 활동파괴는 그림 3.1과 같이 일어나며 그 요인을 구분하면 다음과 같다.

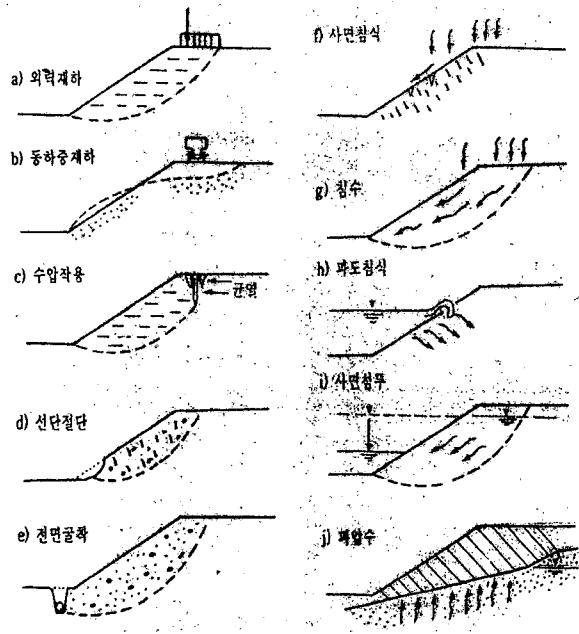


그림 3.1 사면활동 파괴원인 (Kezdi, Striegler Werner)

① 지질학적 요인

완만한 경사(5~10°)의 지질학적으로 젊은 점토질 실트, 모래질 실트, 실트질 모래층이 존재하는 지반에서 투수계수가 상대적으로 큰 지층에 물이 유입될 때에 자주 일어난다. 구조지질학적 힘이 작용하여 발생된 경면이 있는 지층이 일정한 경사를 나타낼 때 갑작스럽게 활동이 일어날 수 있다. 또한 사면을 이루는 지반의 풍화에 의해 이완되거나 연화되었을 때 사면이 활동을 일으키게 된다.

- 지반의 크립거동
- 지반의 유동
- 내부결합력의 손실

② 지형적 요인

사면의 경사와 지형이 중요하며, 주변 환경의 변화나 부주의한 취급 등에 의해 아래의 요인이 발생되었을 때에 사면활동이 일어난다.

- 과도한 경사
- 사면정부의 과도한채하
- 사면 선단부 지반의 연약화에 의한 저항 감소 내지는 침식

③ 물리적 요인

여러 가지 물리적 요인에 의하여 지반의 전단강도 특히 점착력이 감소되었을 경우에 일어난다.

- 시간에 따른 점착력의 손실
- 점착력의 변화 및 손실
- 과압밀된 소성 점토 등의 점진적 파괴
- 강성이 큰 균열 점토에서 균열의 확대
- 지반의 진동이나 지진의 영향

④ 점토와 실트의 물리화학적 구조 변화

점토지반에서 다음과 같은 여러 가지 원인에 의하여 점토 광물의 구조가 변할 때, 이로인하여 물이 유입되어 지반이 팽창하거나 지반에 염류가 용해되어서 이온이 교환되어 지반의 구조가 변화하면 일어난다. 대체로 다음과 같은 원인을 들 수 있다.

- 압축응력 제거와 그에 따른 흡수
- 지반내 수압의 증가
 - ~ 투수층으로의 물의 유입
 - ~ 자연배수 층의 폐색(우물, 출수구)
- 균열, 절리, 틈의 새로운 발생(불투수 재료의 손실)
- 염류의 분산 및 배수(이온 교환)
- 인접한 지층 환원 및 산화된 지층(청색점토-갈색 점토)
- 자연적인 전기침투
- 예민점토

⑤ 지하수의 영향

지반내 물이 유입되어 지반의 컨시스턴시가 변화하거나 간극수압이 높아져서 유효응력이 감소될 때에 사면의 활동이 발생된다.

- 간극수의 영향
 - 다음과 같은 경우에는 간극수가 여러 가지 방법으로 불리하게 작용할 수 있다.
 - ~ 점토질 실트 지반에서 잠재 또는 실제 활동면이나 절리면 간극수가 집중작용
 - ~ 성인이 다른 점토질 실트 지층의 경계면에 간극수가 집중작용
 - ~ 두 개의 불투성 실트질 점토 지층의 사이에 있는 수십센티미터 두께의 투수성 실트질 모래층에 간극수가 작용

- ~ 두꺼운 점토질 실트 지층에 전체적으로 간극수가 작용 - 비교적 적은 수량으로도 전체사면이 이동가능
- 투수성 지층에 침투수가 작용
사면내 침투수가 존재하여 투수성이 큰 층을 흐르면서 사면내 유효응력이 감소되고, 사면 또는 선단에서 유출되면서 침식을 유발시키게 되어 사면이 활동된다.
- ~ 사질토
- ~ 점토질 모래질 실트지반
- 흐르는 지표수의 작용
 - ~ 연직 또는 급경사의 절리성 지층
 - ~ 지표에 있는 지층에 물이 혼합(진흙)
 - ~ 흐르는 지표수에 의해 사면선단이 씻겨져서 활동과괴
- Soilfluction

3.3 활동면의 위치와 형상

사면의 활동과괴는 대체로 그림 3.2와 같은 형상으로 일어나며, 어느 경우에도 적합조건을 만족하는 형태이어야 한다(그림 3.2). 이때에 지반 조건과 지표수의 상태에 따라서는 형상이 달라진다(그림 3.3).

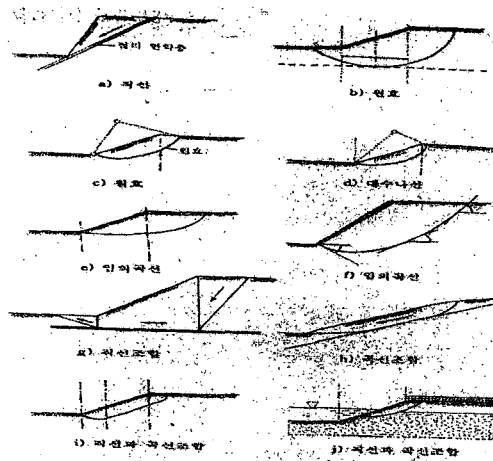


그림 3.2 사면활동 파괴형상

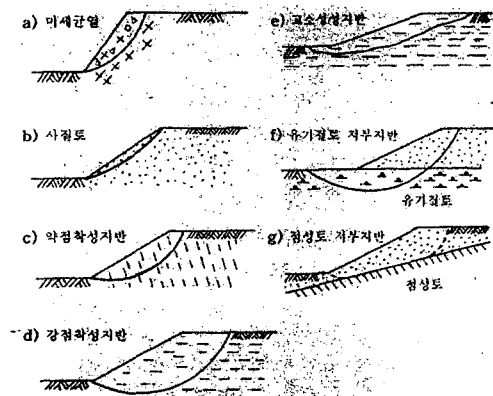


그림 3.3 지반조건에 따라 사면활동 파괴형상(Smolczyk/Browika)

3.3.1 이론적인 방법:

이론적으로 사면활동파괴 형상을 구할 때는 대체로 다음과 같이 구분한다.

- 1) 자중이 작용하는 반무한체
사질토 : 평면
점성토 : 곡면
- 2) 굴곡 지형
3개 영역으로 구분된다. 즉, 지표부는 반무한체와 유사하나, 중간부분은 곡면으로 나타난다.
- 3) 선형-영역 파괴의 혼합형태
다양한 활동면
체력(massive force) 각도변화 : 곡면

3.3.2 현장 관찰 및 실험적 방법

사면활동파괴면의 형상은 현장에서 관찰하거나 실험을 통하여 알 수 있다. 대체로 균질지반에서 사질토는 평면, 점성토에서는 곡면이 되며, 층상지반에서는 지층구조에 따라 다르다.

- 1) 균질한 지반
사질토 : 평면, 대략 평면
점성토 : 곡면, 점착력이 클수록 깊은 곡면
형상 : 원형, cycloide
- 2) 층상지반
강성이 큰 지층을 기피하고 전단 저항이 가장 작은 길로 활동이 일어난다. 상부층의 강도가 크면 급경사의 활동면이 형성된다.

3.4 자연사면의 활동파괴형상

특히 자연사면에서는 지반의 크립거동에 의하여 활동파괴면이 형성되지 않은채 상대적으로 구속이 약한 지표에서 변형이 크게 일어난다.

자연 사면에서 그 이동은 다음과 같은 형태로 일어난다.

- 지반분할 : 구조지질학적 원인에 의해 지반이 분할되어 이동
- 토괴이동 : 강도가 비교적 약한 암반에 인장력이 형성되어 연직으로 쪼개져서 이동
- 전 도 : 급경사 사면에서 표면에 수평한 분리면을 따라 판형으로 파괴
- 부풀음 : 수평에 가까운 혹은 중심으로 회전파괴
- 토석유동 : 다양한 크기의 흙입자와 물이 혼합되어 이동
- 층상유동 : 컨시스턴시가 변하고 유효응력이 작아져서 층상으로 유동
- 갈고리형 파괴 : 2개 이상의 판상암체가 선단을 중심으로 전도하여 전체적으로 갈고리모양으로 파괴
- 붕 락 : 암체가 분리되어 미끄러지지 않고 자유낙하

3.5 사면활동파괴의 관찰

사면의 활동파괴는 지형이나 지반상태에 따라 갑작스럽게 일어나기도 하지만 지반이 균질 할수록 대체로 점진적으로 일어난다. 특히 사면 선단부근의 전단변위가 크게 발생되거나 사면 상부지반에 큰 인장응력이 발생되어 균열이 발달되고 균열부에 지표수가 유입되어 지반이 연화될 때에 자주 일어난다. 이때 활동파괴의 속도는 사면의 경사와 기발생된 변위의 크기에 따라 결정된다. 이때에 사면의 활동이 멈추면 지반의 전단저항력이 회복되는 수가 많으므로, 사면의 활동이 감지된 곳에서는 계측을 통해, 활동상태와 속도 등을 관찰하여 보강여부를 결정해야 한다. 사면의 활동속도가 갑작스럽게 증가되면 사면이 붕괴될 징조이다. (그림 3.4)

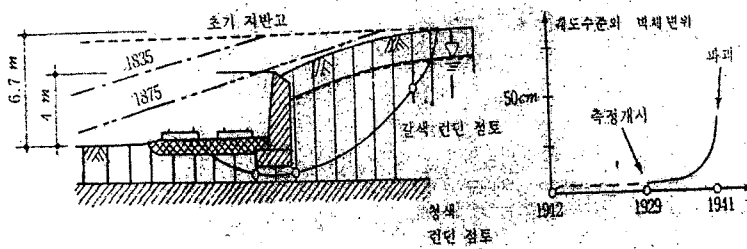


그림 3.4 사면의 점진적 활동파괴거동 보기

3.6 암반사면의 파괴

3.6.1 개요

암반은 현재에는 풍화가 진행 중에 있으며 대개 대기과 우수에 노출된 절리를 따라 풍화가 급진전된다. 특히 굴착 등 인위적인 행위가 가해지면 암반내 응력이 이완되고, 암반의 절개면은 대기 습도와 온도변화에 직접적으로 노출되므로 풍화속도가 빨라져서 안전율이 급격히 낮아질 수 있다.

암반은 풍화 정도에 따라 연속체 또는 불연속체로 거동하며 풍화가 심할수록 토사지반과 유사하게 연속체 거동을 나타낸다.

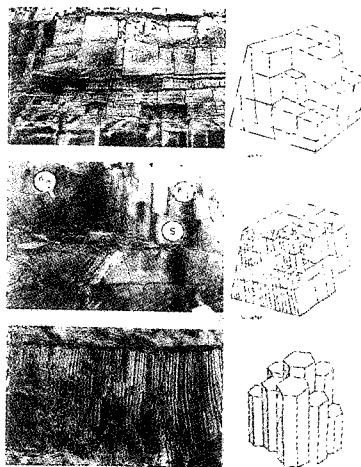


그림 3.5 암석의 형상

3.6.2 불연속면

암반사면은 토사사면과는 달리 암석의 강도보다는 단층이나 절리 등 불연속면의 상태나 주향과 경사에 따라 안정성이 좌우되므로, 암반사면의 안정성은 암반내에 존재하는 불연속면을 우선적으로 고려하여 검토해야 한다.

암반은 그 종류에 따라 특이한 불연속면을 포함하는 경우가 많고 (그림 3.5), 암반의 불연속면의 상태는 암반사면의 안정에 절대적인 영향을 미치므로 다음의 내용을 고려하여 안정성을 검토해야 한다.

- 표면조도 (거침, 보통, 경면상태)
- 벌어진 및 충전상태 (벌어진, 충전물 존재, 풍화잔류물 존재, 폐쇄)
- 연속성 (연속, 불연속)

3.6.3 암반사면의 파괴 형태

암반에서는 불연속면의 풍화정도나 분포, 주향과 경사 및 절취면의 주향과 경사에 따라 파괴형태가 다르게 나타난다. 암사면의 파괴는 미끄러짐, 탈락, 회전, 비틀림, 전도 등의 형태로 일어나고 그 파괴형상은 원호파괴, 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴 및 복합 활동파괴 등이 있을 수 있다(그림 3.6). 따라서 불연속면의 충전물과 절리수, 주향과 경사, 연속성, 간격, 투수성, 조도, 강도 등을 조사하여 안정성을 검토해야 한다.

특히 절리의 방향과 절리면 또는 충전물의 전단각이 안정성에 중요한 역할을 한다.

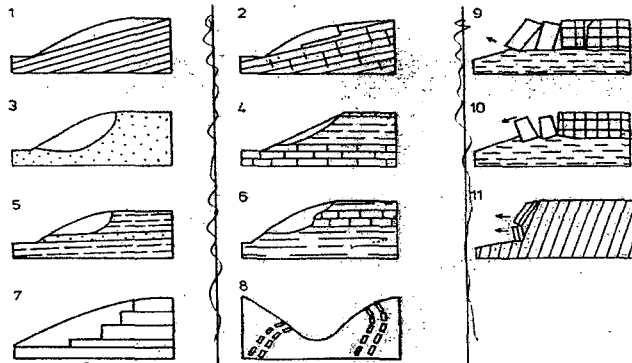


그림 3.6 암반사면의 파괴형태

1) 원호 파괴

일정방향의 구조특성이 없는 표토, 잡석더미 및 풍화가 심하고 절리가 불규칙하고 심하게 발달된 암반에서는 대체로 토사지반에서와 같은 형태의 파괴가 일어난다.

2) 평면 파괴

불연속면의 주절리가 한 방향으로 발달되어 있고 그 경사방향이 절개면의 경사방향과 거의 평행하고 주향차가 20° 미만일 때 주로 일어나며 파괴면의 양단이 저항력을 갖지 못하는 이완면일 때에 파괴면의 경사각이 파괴면의 마찰저항각보다 크고 사면의 경사각보다는 작을 때에 일어난다.

3) 쉐기 파괴

암반내에 존재하는 주절리가 한개 또는 두 개이상의 불연속면을 갖고 활동면의 전단저항력이 활동

력보다 작으면 썩기형태의 암체가 한 개 이상의 활동면을 따라 미끄러지거나 회전하면서 파괴된다.

4) 전도 파괴

연직에 가까운 급경사의 불연속면이 발달된 암반에서 발생되고 절리면의 경사방향과 절개면의 방향이 반대일 때에 일어난다. 각 암주들이 간격이 넓은 직교절리에 의해 블록형태로 분리되어 일어나는 경우가 많다.

3.6.4 암반의 종류에 따른 붕괴 유형

암반은 그 생성원인(화성암, 변성암, 퇴적암)에 따라 그 구조적인 특성이 다르므로 불연속면의 형상이나 배치가 다르다. 따라서 암반의 종류에 따라 붕괴유형을 구분할 수 있다.

1) 화성암

화성암에서는 특정한 불연속면이 존재하지는 않으나 온도변화나 생성시 수축에 따른 대규모 절리가 있는 경우가 많고 이에 따라 풍화가 진전된 경우가 많아져 대체로 다음의 유형으로 붕괴된다(그림 3.7).

- 수직절리에 따른 전도파괴
- 핵석형 붕락
- 평면 절리에 의한 평면 및 썩기 파괴
- 낙석

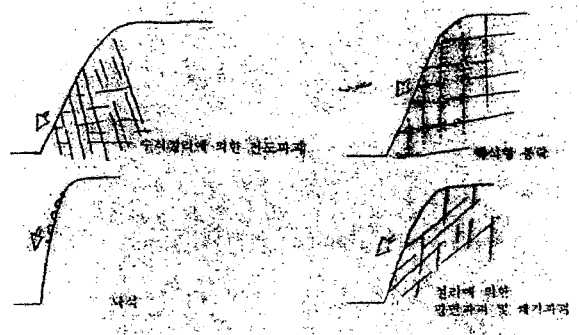


그림 3.7 화성암에서의 붕괴유형

2) 퇴적암

퇴적암을 대체로 여러 종류의 이질적인 암석층이 교호상태로 나타나서 노출표면의 풍화정도가 다르고 대체로 3방향 절리가 뚜렷한 특성이 있어서 대체로 다음유형의 파괴가 일어난다(그림 3.8).

- 층리를 따른 평면파괴
- 풍화상태 변화에 따른 붕락
- 두꺼운 암층의 풍화에 따른 파괴
- 단층과쇄대에 의한 평면파괴

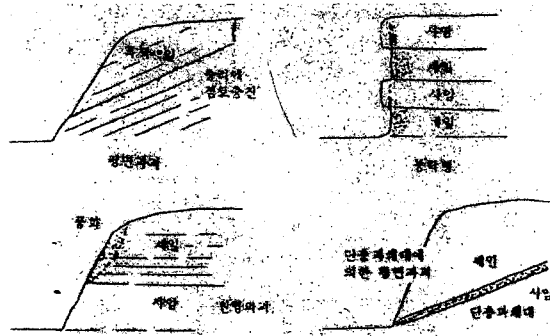


그림 3.8 퇴적암에서의 붕괴유형

3) 변성암

변성암은 그 생성과정에서 단층이나 습곡작용을 받거나 그 구성광물의 재배치에 의한 풍화취약부가 존재하는 경우가 많아서 대체로 다음의 유형으로 파괴가 일어난다(그림 3.9).

- 단층면에 따른 평면파괴
- 쉼기파괴
- 파쇄대의 파괴
- 절리면에 따른 평면파괴

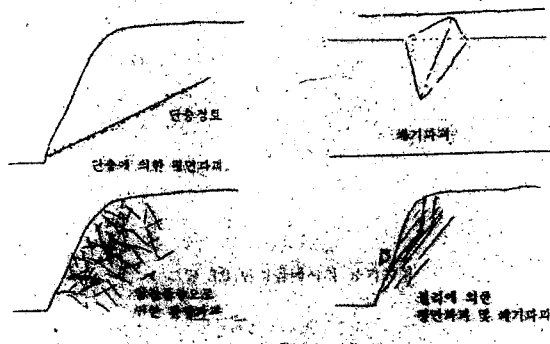


그림 3.9 변성암에서의 붕괴유형

3.6.5 암반사면의 안정해석

암반사면의 안정은 암반을 연속체로 가정하거나 강체 메커니즘을 적용하여 해석한다.

1) 연속체 모델

암반사면의 안정을 해석하기 위해서 수치해석 기법을 적용할 때에는 암반을 등방 또는 이방성 연속체로 이상화하여 적용하고 (그림 3.10) 불연속면에 의해 분리된 암체로 각각 강체로 가정하고 유한요소법(FEM)이나 경계요소법(DEM) 등의 방법을 적용한다. 이때에 구조물 또는 하중에 대한 불연속군의 상대적인 크기에 따라 구분하여 연속체 또는 불연속체 모델을 적용한다. (그림 3.11)

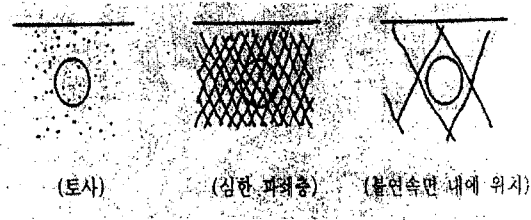


그림 3.10 연속체 가정 모델

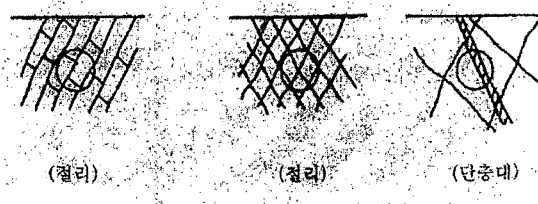


그림 3.11 불연속체 가정 모델

2) 강제메커니즘

암반에 존재하는 절리나 단층등의 불연속면을 고려하고 이들에 의해 분리된 암체들은 강체로 가정한다. 불연속면의 전단저항력은 강체와 강체사이의 전단저항력으로 가정하고 힘 또는 모멘트 평형식을 적용하여 안정성을 구한다. 암반사면에서 강체모델은 곧 썪기형이며, 한 개 또는 두 개이상의 불연속면을 따라 활동면 상에서 활동하는 썪기를 검토한다. 이때에 활동력은 작용외력과 수압 및 썪기의 자중이 되고 활동저항력은 활동면의 전단저항력이 된다.

4. 사면보강 방법

4.1 개요

사면의 보강은 많은 비용과 노력이 소요되는 문제이므로 보강하기 전에 우선 사면의 안전율을 정확히 구하고 소요안전율에 도달하기 위해 필요한 조치를 취해야한다. 사면의 보강은 사면의 파괴원인을 분석하여, 그 원인을 제거하는 방향으로 이루어져야 한다. 사면의 안전율 저하요인은 앞에서 언급한 바와 같이 활동력 증가요인과 지반의 전단저항력 감소요인으로 분류되므로 우선 현장상태가 어떤 요인인지 분석해야 한다. 사면의 보강은 이와 같이 안전율 저하요인을 제거하거나 반대로 안전율 상승을 시도하는 방향으로 이루어져야 한다. 이때 안전율 상승은 안전율 저하요인의 반대개념을 적극적으로 도입하는 단계를 말한다. 사면의 안정공법은 토사사면과 암반사면으로 구분하여 적용하는 것이 바람직하다.

4.2 토사사면의 보강

토사지반은 대체로 연성이고 흙입자가 결합되어 있지 않은 상태이므로 보강방법에 따른 효과가 다양하게 나타날 수 있다. 따라서 보다 면밀한 원인분석과 안전율의 관리가 필요하다. 토사사면의 보강은 원지형의 형태를 유지하는 경우와 원지형의 형태를 부분적으로 변형시키는 경우로 구분하여 적용한다.

4.2.1 원지형형상 유지

아름다운 경관을 유지하고 인문사회적 환경이나 산업공간 및 역사적인 유적을 보존할 필요가 있는 경우등은 원지형의 형태를 유지하면서 사면을 보강한다. 이에 따라 작업공간과 구조물형태 등이 제약을 받게 되므로 다음의 조치들이 시행된다.

- ① 이동 지층에 저항 구조물 설치(그러나 활동을 완전히 저지못함)
- ② 이동 지층의 이동을 저지
- ③ 이동구조물의 이동을 저지
- ④ 간극수압의 감소
 - 배수구를 통한 간극수압의 감소
 - 수평배수우물을 통한 간극수압의 감소
 - 우물을 이용한 간극수압 감소
 - 짧은 도관을 이용한 간극수압 감소
- ⑤ 내부마찰력의 증대, 기반고결
 - 시멘트 주입에 의한 고결
 - Casagrande 식 전기 침투에 의한 배수 및 고결
 - 칼슘, 마그네슘, 알루미늄, 철 등의 도입에 의한 고결

4.2.2 원지형이 부분적으로 변형

현지상황이 원지반의 형상을 굳이 유지할 필요가 없거나 불가능한 경우에는 다음의 방법들을 적용한다.

- ① 활동과괴 사면의 안정조건 개선
 - 불안정 사면의 정점을 낮춰서 하중제거
 - 과중한 성토를 교량등으로 대체
- ② 앵커설치 및 보강 슛크리트층을 설치하여 급경사 토사지반 고결
- ③ 활동과괴 선단에 암석쌓기를 설치하여 부분적으로 마찰력을 증가하고 선단 배수하고 선단재하
- ④ 댐설치지반의 지반을 치환
- ⑤ 절토면의 바닥과 측면에 자갈 성토
- ⑥ Terzaghi 필터를 설치하여 이동성 세립모래층의 침식 방지
- ⑦ 사면에 평행하여 암석 rib나 안정지층을 설치 (활동과괴원이 이를 통과하지 않으면 부적합)
- ⑧ 댐선단을 지지하기 위한 압성토
- ⑨ 기타 지지벽
 - 조립식 옹벽
 - 개비온 옹벽
 - 보강토
 - 선형조립식 옹벽
 - 쏘일 네일링
 - FRT 네일링

4.3 암반사면의 안정공법

암반사면의 안정은 주로 절리나 단층 등의 불연속면에 대한 처리로 귀추되며, 대체로 활동면의 전단저항을 증가시키는 방법이 적용된다.

4.3.1 활동력을 감소하거나 제거

활동과괴의 원인이 되는 활동력은 대체로 상재하중이나 자중인 경우가 많으므로 이를 감소하거나 제거하여 사면의 안정을 확보할 수 있다.

- 상재하중 제거
- 사면의 경사완화
- 위험 암괴의 제거

4.3.2 활동저항력의 증가

활동면의 전단저항력은 점착력에 의한 저항과 마찰저항력으로 구분하며 경우에 따라서 구조부재를 설치하여 그 전단 저항력을 이용하는 수가 있다.

점착력은 대체로 그라우팅 등으로 증가시킬 수 있고, 마찰저항력은 활동면에 수직방향으로 앵커 등을 설치하여 수직력을 가하여 증가시킬 수 있다. 이때에 불연속면의 연속성, 풍화상태, 조도, 충전 상태에 따라서 방법을 선택하여 점착력을 증가시키는 편이 효과가 좋다.

- Rock Bolt : 활동면의 전단저항력을 Bolt의 전단저항력 만큼 증가
- Rock Anchor : 활동면의 수직력을 증가시켜서 마찰 저항력 증가
- 도수로 설치 : 활동면의 수압을 감소시켜 유효 수직력 증가
- 지하수 배제
- 말뚝설치 : 활동면의 전단저항력을 말뚝의 전단저항력 만큼 증가
- 그라우팅 : 활동면의 점착 저항력 증가
- 켄기 설치

4.3.3 표면 낙석방지

암반은 절개하여 공기 중에 노출되면 습도나 온도변화에 따라 표면의 물리적 또는 화학적 풍화가 급진전되고 이에 따라 전체 사면의 안정에는 큰 영향이 없더라도 끊임없이 분리되어 낙석되는 경우가 많다.

따라서 암사면에서는 반드시 표면 낙석에 대한 대책이 필요하다.

- 철망 덧씌우기
- 슛크리트 타설
- 펜스 설치

4.4 자연친화적인 사면의 보강공법

사면을 보강하는 방법은 가능한 한 자연친화적으로 시행하는 추세이며, 불가피한 경우에만 구조물을 설치하더라도 식생을 통한 사면의 처리공법이 적용되는 것이 바람직하다. 그러나, 이를 위해서는 식물이 성장하기 위한 토대를 마련해 주어야 하고, 토착식물을 개량하거나 찾아내는 일이 중요하나 국내에서는 이에 대한 연구가 매우 부족한 형편이다. 너무 거대하게 자라는 노거수 등을 피해서 근착성이 우수하고 현장의 토질에 적합하며 뿌리발달이 왕성하고 사면이라는 열악한 환경에서도 잘 자랄 수 있는 수관이 수려한 상록수 계통의 수명이 긴 다년생 수종이 적합하다. 이들의 식재 방법과 설치방법은 수종과 사면 여건에 따라 매우 다양하며, 그림 4.1은 몇 가지 예를 나타낸다.

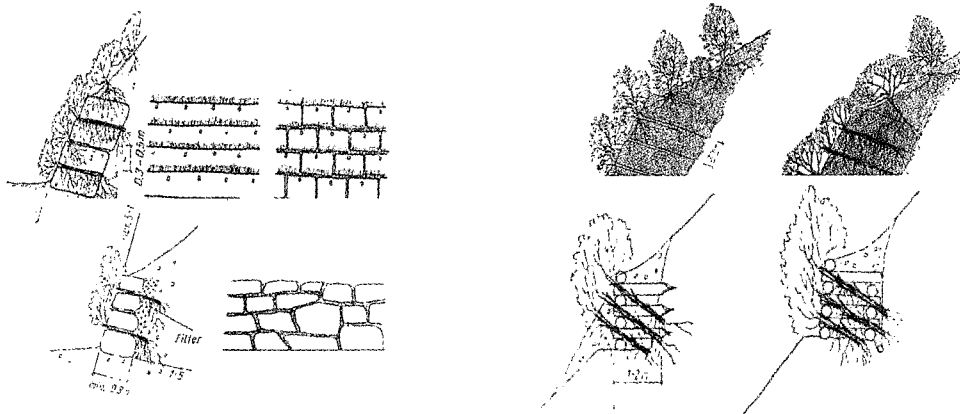


그림 4.1 식재방법 및 설치방법

4.5 구조체를 설치하는 사면 보강공법

사면의 활동파괴면의 형성을 저지하거나 기 형성된 활동면의 전단저항을 증가시켜서 사면의 안정을 획득하기 위한 적극적인 방법으로 지지벽체를 설치할 수 있다.

이때에 지지벽체는 주로 활동 저항력을 증가시키기 위하여 설치하며 사면의 소요 안전율을 유지하기 위하여 필요한 소요전단력을 확보하기 위해 필요한 소요량을 결정하여 시공하며 대체로 다음의 방법들이 있다.

- 말뚝벽체
- 우물통 벽체
- 슬러리 월
- 젯트 그라우팅벽
- 앵커벽
- 지지옹벽
- FRT 보강그라우팅

1) 말뚝 벽체

말뚝을 현장 타설하여 주열식 벽을 형성하거나 큰 전단강도를 발휘할 수 있는 형태로 배치하며, 전단 저항력이 충분히 커야 하므로 직경이 90~120cm로 크게 필요에 따라 철근 보강한다. (그림 4.2)

말뚝의 횡 저항력은 수평방향 지반 반력 계수를 적용한다.

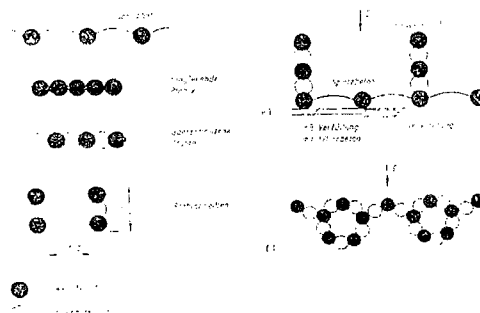


그림 4.2 말뚝벽체

2) 우물통 벽체

사면의 활동파괴에 저항하기 위하여 선단부에 전단저항을 극대화한 큰 우물통 벽체를 일정간격으로 설치하고 그 주변은 슛크리트 벽체를 마감한다. (그림 4.3)

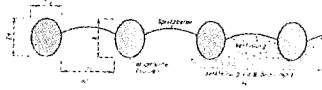


그림 4.3 우물통 벽체

3) 슬러리월

사면을 지지하고 안정성을 높이기 위하여 사면의 선단에 슬러리월을 설치할 수 있다. 슬러리월의 휨강성을 증가시키기 위하여 셀형으로 하거나 부벽을 설치할 수 있다. 벽체간의 연결성을 보완하도록 앵커를 설치하거나 벽체간의 맞물림을 좋게 할 수 있다. (그림 4.4)

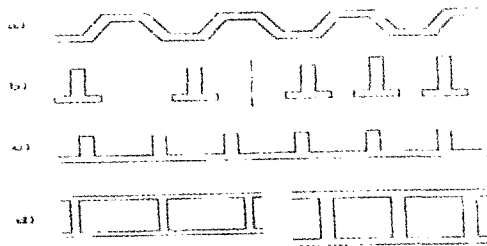


그림 4.4 슬러리월 벽체

4) 젯트그라우팅벽

사면의 선단 부근에 고압분사주입하여 지반을 고결시켜서 지지벽체를 형성하는 방법으로 예상활동면의 전단 저항을 증가시키고 벽체의 전단저항력으로 버티고 배후 사면의 경사를 완만하게 유지할 수 있다. (그림 4.5)

주입재는 시멘트를 많이 사용하고 필요에 따라 앵커를 설치할 수 있다.

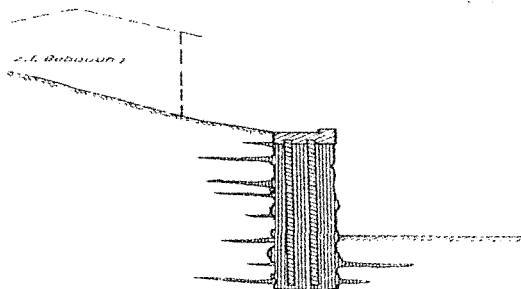


그림 4.5 젯트그라우트벽

5) 앵커벽

주로 원지반 굴착면을 안정시키기 위해 적용하여 굴착면에 기성의 판재를 지반에 접착성이 좋도록 부착하고 앵커는 설치하여 안정성을 유지하는 공법이다. 판재를 설치할 수 있을 만큼의 자립성을 갖고 있는 지반에 적용한다.

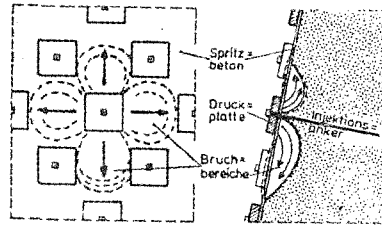


그림 4.6 앵커벽

6) 지지용벽

사면의 하부에 파쇄성 암반이나 풍화가 잘되는 암반이 노출될 경우에 이를 보호하고 상부사면의 경사를 완만하게 유지시킬 목적으로 사면하부를 급경사로 굴착한 후에 벽체를 설치하는 방법이다. 현장 상황에 따라 네일이나 앵커를 설치한다.

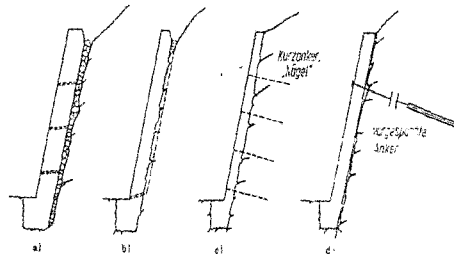


그림 4.7 지지용벽

7) FRP 보강그라우팅

사면에 일정한 간격으로 천공한 후에 FRP 관을 설치하고 팩커그라우팅하여, 주변의 일정영역의 지반을 보강하여 사면의 안정을 획득하는 방법으로, 지반의 활동저항력 특히 지반의 점착력을 증가시키는 효과적인 방법이다.

5. 결론

이상에서 사면의 안정을 유지하기 위해서 필요한 안정공법에 대해서 원리적으로 취급하였다. 자연적 또는 인위적으로 발생된 사면은 적절히 처리하지 않으면 인명과 재산의 피해를 일으킬 가능성이 있는 위험구조물로 남거나 그 자체가 자연파괴의 증거물이 될 수 있다.

따라서 생활과 인접해서 필수적으로 나타나는 사면은 영구적으로 안정해야 하고 또한 아름다워야 한다. 이를 위하여 수많은 안정화 공법들이 국내외에서 개발되어 실무에 적용되고 있으나 지반 공학적 측면에서 보편적으로 타당한 절대적인 방법이란 있을 수 없다.

다만, 지반공학 전문가들이 사면의 형상과 지반 상태 및 주변의 입지조건을 고려하여 환경훼손이 아닌 자연 친화적인 사면을 경제적으로 설치해야 할 것이다.

이때에 장기적인 시각으로 사면의 안정성 저해요인을 면밀하게 분석하여, 이를 제거함은 물론, 필요한 경우에는 구조물을 설치해서 소요안전성을 확보해야 할 것이다.

특히 자손만대에 물려줄 국토를 아름답고 깨끗하게 유지하기 위하여 기술자의 철학이 담겨진 아름다운 사면을 건설하고 유지해야 하겠다.

6. 참고문헌

이상덕, 토질역학, 새론출판, 1998.

Bishop, A.W. : Progressive Failure with Special Reference to the Mechanism Causing

Borowicka, H.R. : Die Rutschungen an der Autobahn Salzburg-Wien, Dissertation, Uni Wien, 1968.

Brinch Hansen, J./Lundgren, H. : Hauptprobleme der Bodenmechanik, Springer, 1960.

Casagrande, L. : Electro-osmosis in Soils, Geotechnique 1. Nr. 3, pp. 159~177, 1949.

Eigenberger, K. : Standsicherheit von Böschungen, Uni Graz H2, 1972.

Fröhlich, O.K. : Anwendung von Palisadenwänden zur Übertragung von Seitenschün auf den Untergrund. Uni Wien, H2, 1959.

Skempton, A.W. : Long-Term Stability of Clay Slopes, Geotechnique 14, pp. 77~100

Soos, P. : Standsicherheit von Böschungen. VDI Berichte, N.142 pp45~53, 1970

Terzaghi, K. : Critical Height and Factor of Safety of Slopes against Sliding. Proceed 1st ICSMFE, Cambridge, Mass. Vol. 1 pp 156, 1936.

Veder, Ch. : Rutschungen und ihre Sanierang, Springer, 1979.

Gussmann, P. : Böschungsgleichgewicht in Lockergestein, Grundbau Taschenbach, T.III, Ernst & Sohn, 1987.

Wittke, W. : Böschungsgleichgewicht, T.III, Ernst & Sohn, 1987.

Brandtl, H. : Kanstruktive Hangsicherung, Grundbau Tadchenbach, T.III, Ernst & Sohn, 1987.

Smolczy, U. : Bodenmechanik und Grundbau Vorlesumdruck Uni Stuttgart, 1984.