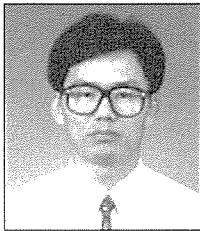
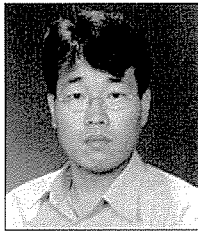


비탈면에서의 식생공법과 보강효과



(주)토탈지오이엔씨, 대표이사,
토질및기초기술사, 공학박사
김 상 수



(주)진신이엔지, 기술연구소 소장,
공학박사
이 종 규

1. 서론

전국적으로 도심지 개발이 포화상태에 이름에 따라 산지의 개발이 증가하고 있으며, 산지개발에 따라 필연적으로 크고 작은 비탈면이 발생하게 된다. 이처럼 인위적으로 형성된 비탈면은 안정성을 갖추어야 하기 때문에 다양한 보강 및 보호공법이 적용되고 있다. 일반적으로 비탈면의 대책은 보호공법과 보강공법으로 나눌 수 있는데, 보호공법은 절개사면이 자체적으로 안정한 상태에서 외부의 사면붕괴 발생요인을 차단하는 방법이며, 보강공법은 사면 자체가 안정성을 확보하지 못한 상태에서 강제적인 조치를 취하여 사면의 안정성을 확보하게 하는 방법이다.

지금까지 비탈면의 보호 보강공법은 별개의 작업으로 시공되기 때문에 상호 연계성이 적었으며, 특히 보호공법으로 주로 사용되는 식생공법에서는 식생을 단순히 표면 보호공법으로만 인식되어왔다. 하지만 외국의 경우 식생의 뿌리, 줄기 등 식생 자체가 사면안정을 위한 보강 구조물로서 역할 할 수 있도록 다양한 시도와 이론적인 체계를 구축해 가고 있다. 즉, 식생의 줄기는 지반활동을 억제하거나 배수를 위하여 지반이나 토류구조물내에 식재되고, 뿌리는 지반의 전단강도 증대 효과가 발휘되도록 고안함으로써, 비교적 적은 비용으로 사면의 얇은 파괴와 침식방지, 우수배제와 식생이 갖고 있는 자연 친화 특성을 살리고자 하는 것이다. 최근 황폐화 된 지구환경을 복원하려는 세계적인 추세에 따라 국내에서도 사전 환경성 검토에서 녹화사업을 반영하려는 노력이 일고 있으며, 식생을 이용한 토양오염 복원, 환경 친화적인 사면 건설과 기존 사면의 환경 친화적인 복원기술 등 식생을 이용한 기술은 지반분야의 큰 관심사로 대두되고 있다. 이에 본 고에서는 식생을 환경적인 측면 뿐만 아니라 구조적인 보강체로서 적용하기 위한 관련이론을 소개하고자 한다.

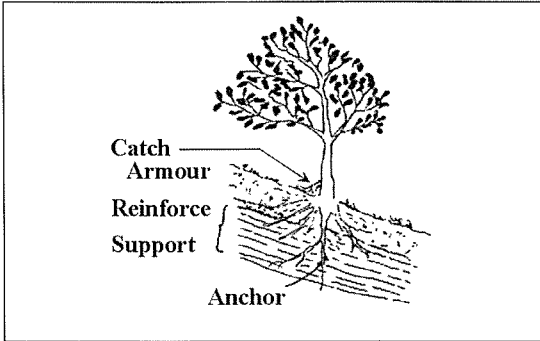


그림 1. 식물의 공학적 기능

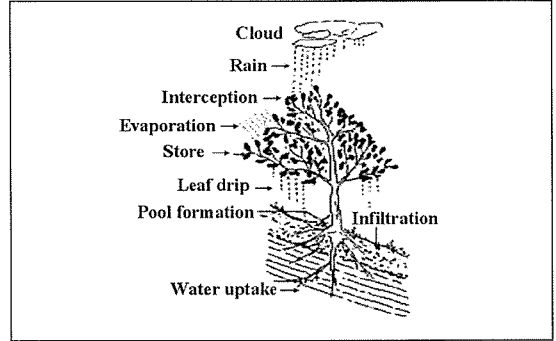


그림 2. 식물의 공학적 수문학적 기능

2. 비탈면에서의 식생의 기능과 특징

일반적으로 비탈면에서 식생이 갖는 기능을 정리하면 다음과 같다.

1) 고정(잡기)기능(Catch function)

느슨한 재료는 침식이나 중력으로 인하여 경사면 아래로 구르려는 경향이 있다. 이러한 현상은 아래로 구르려는 재료를 구조물이 막아줌으로써 제어될 수 있을 것이며 식물의 줄기나 뿌리가 그 역할을 수행하게 된다.

2) 피복기능(Armor function)

보통 토사면은 물에 매우 예민하게 반응한다. 이는 물과 접촉할 때 사면이 움직이기 시작하거나 쉽게 액상화 된다는 것을 의미하며, 이와같이 침투가 활발하게 일어나는 경우에는 후에 사면의 전단파괴가 일어나게 된다. 따라서, 사면은 물이 쉽게 우회할 수 있도록 덮어주어야 하며 이러한 기능을 피복(방호)기능이라 한다.

3) 보강기능(Reinforce function)

흙은 공극이 존재하므로 조밀하지가 못하며, 입자의 결합력도 요구된다. 바이오엔지니어링의 식생기술은 수목의

뿌리를 통하여 흡입자의 결합력 증진을 가져오게 된다.

4) 지지기능(Support function)

길이가 15m 이상 되는 사면의 경우 측방의 토압은 외부로의 사면활동을 야기시키게 되는데 이러한 현상은 구조물 자체의 형태를 유지함으로써 억제될 수 있다.

5) 앵커기능(Anchor function)

안정한 하부층을 갖고 있지만 불안정한 상부토층의 파괴가 일어나는 경우, 불안정한 상부토층을 하부토층까지 편에 의해 지지될 수 있도록 하는 역할을 수행한다.

6) 배수기능(Drain function)

물은 사면에 있어서 불안정성을 가져오는 주된 요인이다. 물은 표면수와 지하수로써 존재하며, 식생을 사용한 사면에서는 안전하게 처리될 수 있다.

상기와 같은 기능을 갖는 식생은 영구구조물과 강도 및 환경적인 측면에서 서로 상이한 특성을 갖고 있으며, 과거의 경우 안정서로 단기적인 측면에서 구조물을 활용할 수 있는 공법들이 많이 작용되어 왔으나 최근에는 환경성과 장기적인 측면에서 식생공법의 적용이 증가하고 있다. 보통 구조물의 기능을 발휘하기 위해서는 구조물 자체의

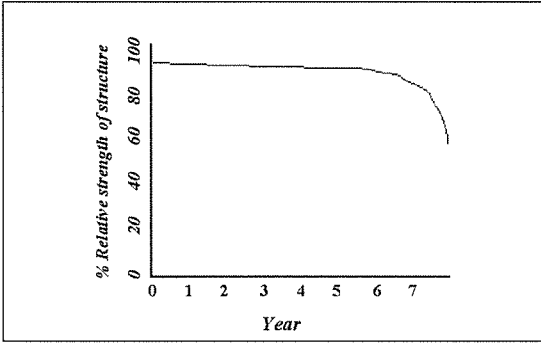


그림 3. 트목구조물의 생명기간

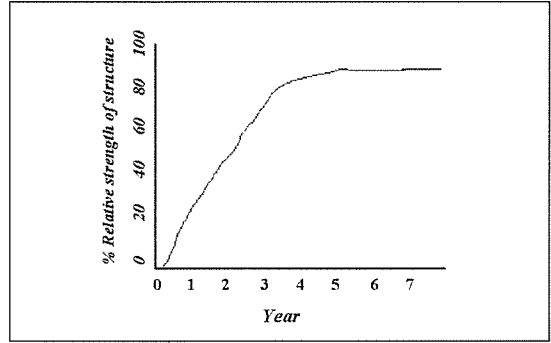


그림 4. 식생구조물의 생명기간

표 1. 식생이 사면안정에 미치는 영향

사면에 미치는 식생의 효과	분류
식생의 뿌리는 투수성을 증가시키고 이에 따라 공극압력이 증대된다.	수리특성
식생은 강우의 차단과 기화를 촉진시킴에 따라 공극압력을 감소시킨다.	수리특성
식생은 식생 자체의 중량에 의해 사면에 외력이 증가된다.	역학특성
식생의 뿌리는 지반보강효과를 발휘하며 강도를 증가시킨다.	역학특성
식생은 바람에 대한 저항력을 증가시켜 사면의 하중을 증가시킨다.	역학특성
식생에 의해 사면내 표토의 손실과 침식을 방지할 수 있다.	역학특성

강도가 중요한 부분을 차지하게 된다. 따라서, 두 구조물의 관계를 이해하기 위해 각각의 단계에 따른 구조물의 강도를 구조물의 최대강도와의 상대강도로 묘사하였으며 다음과 같다. 그림과 같이 공학적 구조물의 상대강도는 시간에 따라 감소하는데 반해 식생구조물의 강도는 최대강도에 대해 상대적으로 증가함을 알 수 있다.

3. 식생의 보강효과

식생의 공학적 보강효과에 있어서 식물재료는 뿌리의 인장력을 흙의 전단강도, 버팀력, 아칭효과 등으로의 변환을 통하여 흙 자체의 강도를 증가시키게 되며 따라서 식물 하나가 제공하는 기능에 지지기능을 추가적으로 제공하고 식물이 성장하면서 강도는 증가하고 자연력에 대한 저항도 증가하게 된다. 따라서, 비교적 적은 비용으로

사면의 얕은파괴와 침식방지, 우수배제와 식생이 갖고 있는 자연 친화 특성을 살릴 수 있다.

식생으로 인한 사면의 효과는 지반내의 수리특성과 역학특성으로 구분된다. 따라서 식생이 사면에 미치는 영향을 정확하게 고려하기 위해서는 두 가지 측면 모두에서 접근하여야 한다.

지반내의 수리 특성은 지형, 강우 등에 의해 다양하게 변화하기 때문에 식생의 영향은 간접적이지만 식물의 기화와 차단작용을 통하여 공극압력과 모관력에 영향을 미치게 되며, 식생의 도입에 의해 투수성은 증가하는 반면에 함수비의 급격한 변화를 둔화시키는 효과가 있다. 식생의 도입에 따른 투수특성의 고찰은 정성적으로는 나타나 있지만 정량적인 평가는 아직까지는 어려운 상황이다. 최근 식생 중 뿌리의 지반보강효과에 대한 공학적 규명이 활발하게 이루어지고 있으며, 뿌리의 보강효과는 다음과 같은 원리로 규명이 시도되고 있다.

표 2. 뿌리의 보강원리

뿌리의 보강원리	주요내용	비 고
뿌리의 지반의 강도 증진 이론	뿌리의 성장과 시간 경과에 따른 지반 구속효과를 뿌리의 형태와 인장강도, 전단강도를 이용하여 구명하고자 함	
뿌리 네트워크 시스템의 응력전달	이론뿌리의 성장방향은 다양하기 때문에 뿌리 네트워크와 지반 네트워크간의 연계를 통하여 힘을 전달한다고 가정	
뿌리와 지반간의 화학적 결합력 이론	뿌리와 지반간에 존재하는 유기물의 고결작용을 통하여 강도증가 특성 규명	
뿌리와 지반간의 화학적 생물학적 작용이론	유기물질의 작용으로 인하여 화학적 생물학적 반응이 발생하여 지반과 뿌리가 하나의 유기체로 작용	

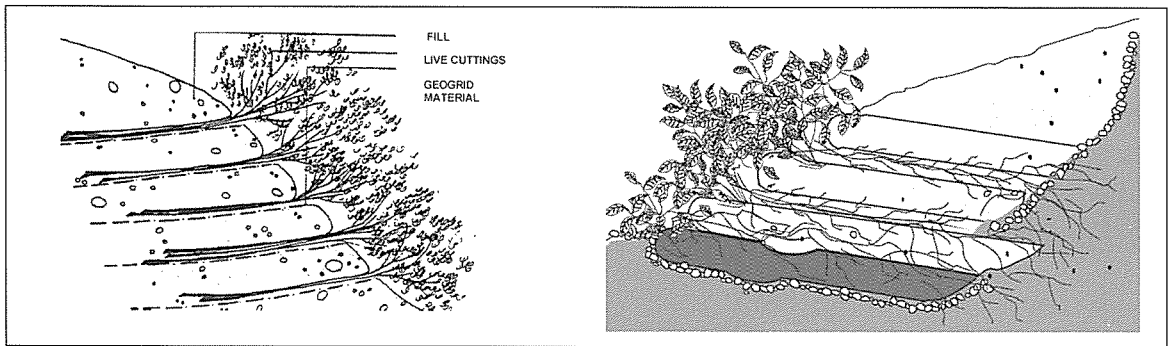


그림 5. 식생지오텍스타일 공법

4. 줄기를 보강체로 이용한 공법

전술한 바와 같이 식생공법의 보강기능은 식생 줄기의 보강기능과 뿌리의 강도증진 및 배수 기능을 들 수 있다. 식생줄기를 보강체로서 사용하는 주요공법을 정리하면 다음과 같다.

1) Vegetated Geotextile

본 공법은 토체를 지오텍스타일로 보강하는 동시에 각 층마다 식생을 삽입하여 시공함으로써 보강재가 갖고 있는 보강효과와 식생이 갖고 있는 자연친화적인 특성을 동시에 살릴 수 있는 장점이 있다. 본 공법은 사면의 침식속도를 완화하고 성토제방을 안정화시킬 수 있으며, gabion 혹은 옹벽공법에 비하여 경제적인 장점이 있으며, 시공시

일반적으로 증장비가 요구되며, 식물은 동면기에 설치되어야 하는 시간적 제약이 있다.

2) 식생 크립월

식생크립월은 통나무 재료를 이용하여 내부가 비어 있도록 격자형을 쌓아 올려 시공한다. 격자형 내부에는 표토로 채운 후 식생이 자랄 수 있도록 생가지 등을 설치함으로써 식생이 성장하여 내부의 흙에 뿌리가 내릴 수 있도록 하고 가지는 구조물 외부로 자라게 함으로써 사면을 보강하는 공법이다. 크립월 배면으로는 경사가 표면으로부터 약 10% 경사를 이루도록 설계한다. 식생이 성장하면서 식생은 하나의 구조체로서 작용하게 된다.

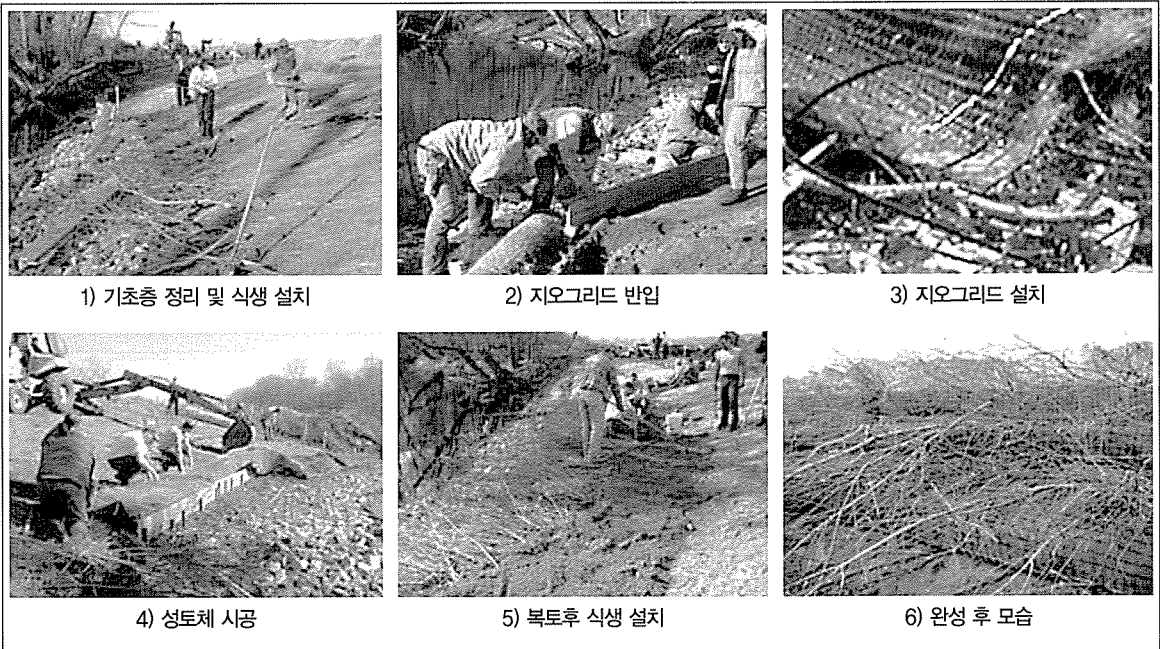


그림 6. 식생지오토크스타일 공법 시공순서

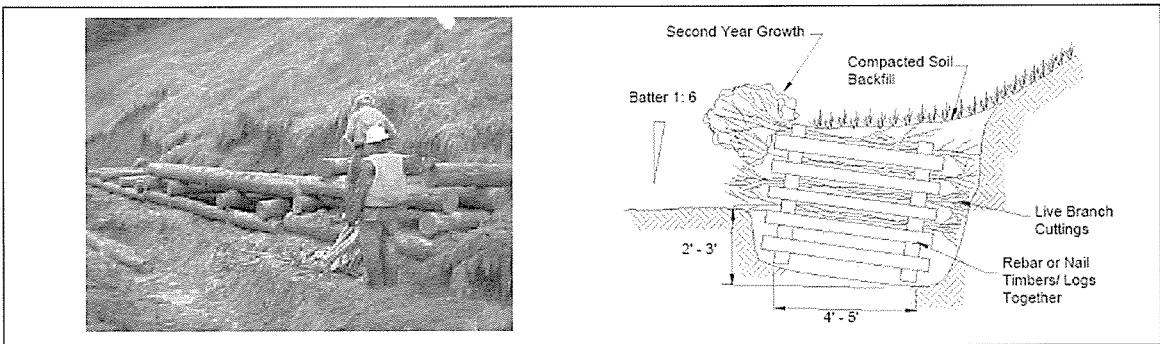


그림 7. live cribwall 공법

3) 식생 계비온

Gabion 옹벽은 코팅된 철사망을 상자형으로 제작한 후 자갈 등으로 속채운 돌망태를 brush layer와 동시에 단계적으로 쌓아올려 토압에 저항하는 구조물이다. 식생은 돌망태 사이로 성장하면서 뒷채움 토사에 뿌리를 내려 뒷채움 토사의 안정화하고 줄기는 돌망태 외부로 나와 시각적인 효과를 제공한다.

5. 뿌리의 보강 이론

식생의 보강효과와 관련하여 식물 뿌리가 사면안정에 미치는 영향은 토체의 전단강도 증가와 뿌리의 우수배제를 통한 공극수압변화를 통하여 역학적인 안정성 평가가 가장 활발하게 시도되고 있으며 주요 이론을 소개하면 다음과 같다.

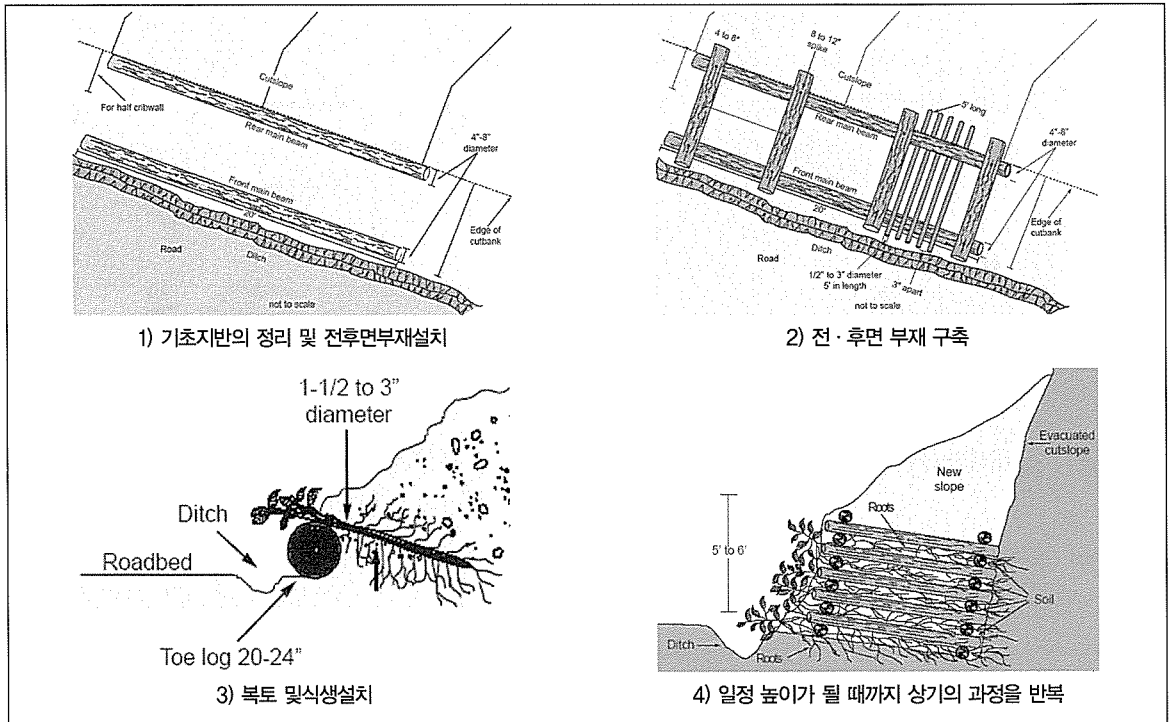


그림 8. live cribwall 공법 시공순서

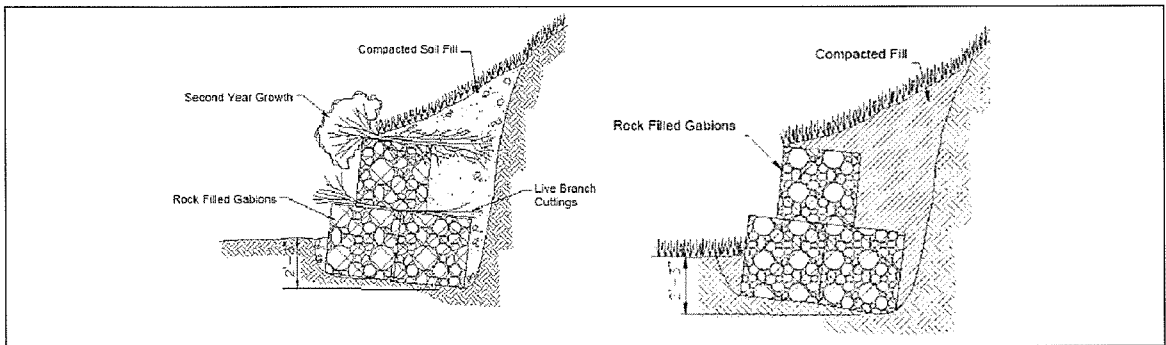


그림 9. Vegetated Gabions 공법

1) 뿌리의 면적비 이론

뿌리의 면적비 이론은 시료를 채취하여 뿌리가 차지하고 있는 면적비를 측정하여 적용하며, 뿌리의 면적비가 클수록 인장강도 및 전단강도가 증가하는 것을 감안하여 문헌에 근거하여 지반의 강도를 산정하는 방법으로 비교적 많은 문헌에서 제시되고 있는 방법이다.

$$\text{뿌리의 면적비 (root Area Ratio)} = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum n_i a_i}{A}$$

여기서 A_r : 전체면적 중 뿌리가 차지하고 있는 면적

A : 토체 전체면적

n_i : 유사한 크기의 뿌리 개수

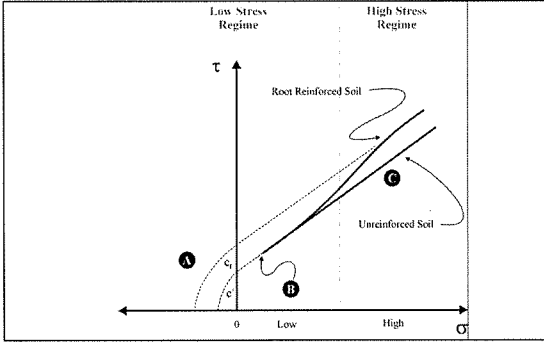


그림 10. 구속압에 따른 뿌리 보강이론

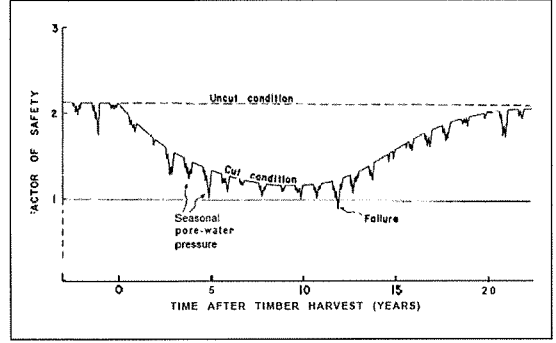


그림 11. 식생 유무에 따른 안정성

a_i : 해당 그룹 뿌리의 단면적

2) 뿌리 보강이론

뿌리는 보강이론은 뿌리 시스템이 지반의 전단강도를 증가시키는 역할을 한다는 이론으로 견고한 층에 뿌리를 내리고 전단응력을 인장응력으로 변환시키기 위해서는 충분한 구속압이 주어져야 한다. 반면에 낮은 구속압 조건에서는 전단강도는 상재하중을 지지하는 정도이면 충분하다. 따라서 구속압이 클 경우엔 뿌리의 보강효과가 크지만 낮은 구속압 조건에서는 뿌리의 보강효과가 작음을 나타내고 있다. 구속압에 따른 보강이론을 도식화하면 다음과 같다.

뿌리의 최대전단강도는 뿌리의 깊이와 지반의 전단저항각에 의해 변화하며 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\tau_{\max} = z \gamma (1 - \sin \phi) f \tan \phi$$

여기서, τ_{\max} : 최대전단강도

z : 뿌리의 깊이

γ : 흙의 단위중량

f : 뿌리와 지반의 마찰저항각

ϕ : 지반의 전단저항각

또한 모든 뿌리 보강이론은 지반이 파괴시 뿌리의 인장강도가 충분히 발생한다고 가정하였기 때문에 뿌리의 최소인장강도를 산정하는 방법이 필요하며 다음 식과 같다.

$$L_{\min} = \frac{T_r d}{4\tau_{\max}} \quad (\text{Gray, 1996})$$

여기서, L_{\min} : 뿌리가 충분한 인장강도를 발휘하기 위한 최소길이

T_r : 뿌리의 최대강도

d : 뿌리의 직경

τ_{\max} : 최대전단응력(= $z\gamma(1-\sin\phi)f \tan\phi$)

z : 뿌리의 깊이

ϕ : 지반의 내부마찰각

f : 뿌리와 지반의 마찰계수

3) 뿌리의 공극수압 감소 이론

뿌리의 공극수압 감소 이론은 뿌리의 존재가 공극비를 감소시키는 현상에 착안하여 발전된 이론이다. 보통 사면 내에서 발생하는 과잉공극수압은 사면의 파괴를 초래하게 되며, 이는 포화된 토사에서의 공극수압은 지반의 유효응력을 감소시켜, 전단강도를 감소 시키는데 이유를 찾을 수 있다. 실제 뿌리가 제거된 사면과 뿌리가 있는 사면

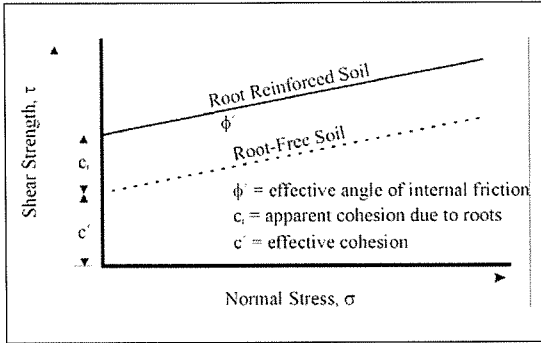


그림 12. 뿌리의 전단강도 증가 모식도

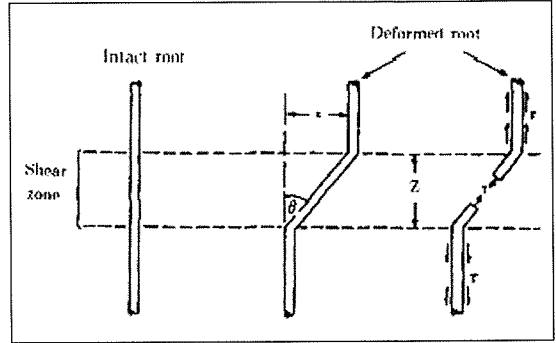


그림 13. 전단면에 수직인 뿌리 모델

의 공극수압을 계측한 결과 그림과 같이 전단강도가 크게는 약 60% 감소되는 것으로 측정되어 그 차이는 매우 큰 것으로 나타났다.(Swanston, 1969)

따라서 수정된 Terzaghi 식을 적용하여 공극수압 감소 효과를 나타내면 다음과 같다.

$$\tau = c' + c_r(\sigma - u) \tan \phi + (u - \Psi) \tan \phi_0$$

여기서, τ : 전단강도

c' : 흙의 유효 점착력

c_r : 뿌리 보강으로 인한 증가 점착력

u : 공극수압

ϕ : 지반의 전단저항각

Ψ : 모관압력

ϕ_0 : 모관압력과 공극수압의 관계각

4) 뿌리의 전단모델

뿌리의 전단모델은 뿌리의 강도 증가효과를 겹보기 점착력으로 평가하는 방법으로 뿌리의 전단면적과 뿌리의 인장강도에 따라서 증가점착력은 결정된다.

Wu(1976)는 흙의 전단강도에 있어 뿌리로 인한 전단력의 증가를 예측하기 위하여 전단면에 수직인 뿌리 모델을

고안하여 예측되는 인장력에 의한 단위면적당 뿌리 저항력을 다음과 같이 예측하였다.

$$\Delta C_r = T_r (A_r / A) (\sin \theta + \cos \theta \tan \Phi)$$

여기서, ΔC_r : 뿌리에 의한 전단강도 증가량

θ : 전단회전각

Φ : 지반의 전단저항각

T_r : 뿌리의 평균인장강도

A_r : 임의의 전단면속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적

A : 임의의 전단면 면적

Gray와 leiser(1982) 등은 뿌리가 전단면에 직각이 아닌 점을 감안하여 뿌리와 전단면이 이루는 경사각을 고려한 모델을 제안하였다. 전단면과 뿌리가 이루는 각(i)이 90° 이상일 경우 인장보다는 압축을 받는 경향이 큰 것을 관찰하고 뿌리의 전단강도 증가량을 다음 식과같이 제안하였다.

$$\Delta C_r = S_r (\sin(90^\circ - \theta) + \cos(90^\circ - \theta) \tan \Phi)$$

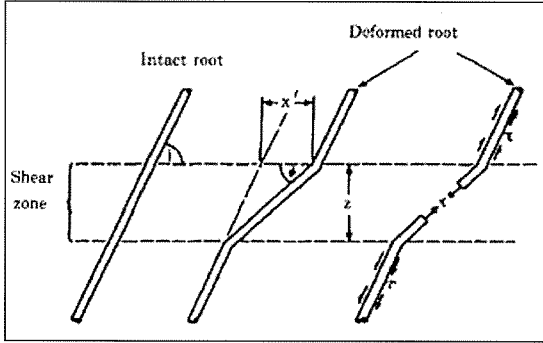


그림 14. 전단면에 경사진 뿌리 모델

여기서 S_r : 흙의 단위면적당 뿌리의 인장강도
 i : 뿌리와 전단면이 이루는 경사각
 m : 뿌리가 인장으로 변형된 비율(=x/z)
 θ : $\tan^{-1} \left(\frac{1}{m} + (\tan i)^2 \right)$

5) 강우강도를 이용한 사면안정 증대 효과

최근 국내에서도 우기시 지하수위의 합리적인 산정을 위하여 강우강도를 이용한 침투해석을 실시하고 지하수 위 및 공극수압을 산정하고 있다. 따라서 강우시 식생이 갖고 있는 강우의 차단효과와 뿌리가 갖고 있는 강우흡수 능력이 정량적으로 평가된다면 사면안정 증대효과를 보다 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

Keim(2001)등은 현장에서 공극수압과 강우강도를 측정된 결과를 이용하여 강우에 따른 사면의 안전율을 평가하였으며, 해석에 적용된 강우에 따른 침투이론(Iverson, 2000)은 다음과 같다.

$$\frac{\Psi}{Z} (Z, t \leq T) = \beta \left(1 - \frac{d}{z} \right) + \frac{I_z}{K_z} (R(t^*))$$

$$\frac{\Psi}{Z} (Z, t > T) = \beta \left(1 - \frac{d}{z} \right) + \frac{I_z}{K_z} (R(t^*) - R(t^* - T^*))$$

$$t^* = \frac{t}{Z/D} \text{ and } T^* = \frac{T}{Z/D}$$

여기서, θ : 지반의 체적함수비
 T : 강우강도기간
 β : 지하수의 흐름방향
 a : 사면경사
 d : 지하수의 흐름 깊이
 I_z : 사면에서의 침투율
 K_z : 지반의 수리전도도
 Ψ : 공극수압

실측된 자료를 이용하여 평가하였을 경우 식생이 없는 경우에 비해 식생이 있을 경우 침투량이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이와 같은 침투량 감소는 안전율을 증가시키는 작용하는 것을 보여준다.

6) 사면의 인장파괴 저항 이론

사면의 인장파괴 저항 이론은 뿌리가 식생의 인장파괴를 감소시킨다는 가정하에 출발한 것으로 뿌리가 갖고 있는 인장파괴 저항성을 이용하여 강도증가효과를 평가하였다.(Abermethy, 1999). 그림과 같이 사면이 전도되어 파괴될 때 임의의 절편에서의 뿌리가 파괴를 방지하는 방향으로 인장력이 발휘되는 것을 감안하여 사면의 안전율을 평가하였다. 또한 수치해석을 이용하여 뿌리효과가 발휘되었을때 상당량의 변위 감소효과를 얻을수 있는 것으로 보고되고 있다.

6. 사례를 통한 보강효과 확인

본 사례는 관련문헌에 보고된 것을 수록하였으며, 사면을 구성하는 토층은 지표면으로부터 잔류토층, 실트질모래, 파쇄가 심한 암반으로 구성되어 있다. 사면경사는

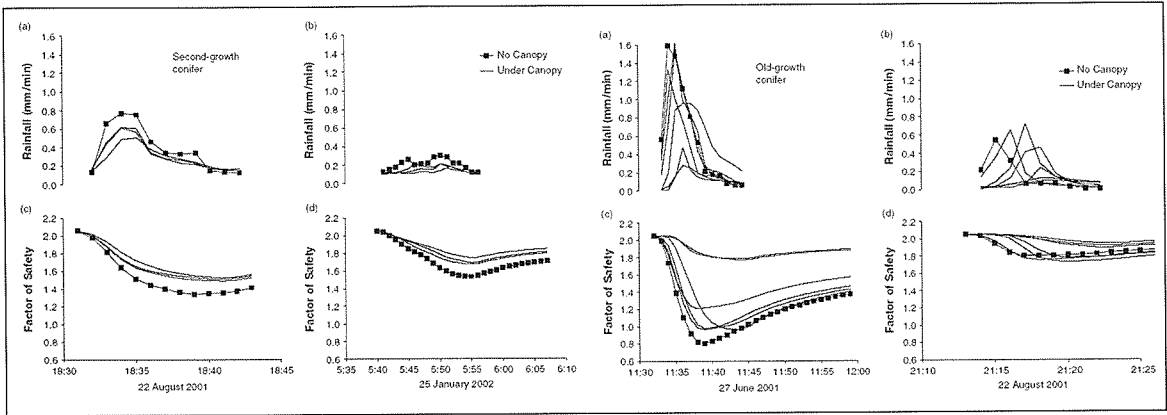


그림 15. 식생적용에 따른 안전율 변화

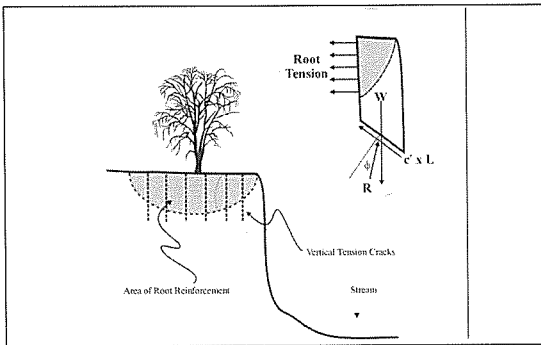


그림 16. 사면의 인장파괴저항이론 모식도

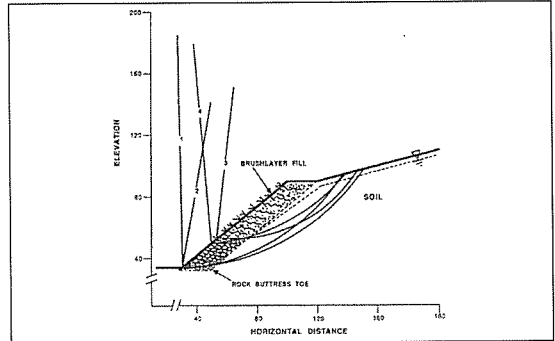


그림 17. 보강사면의 활동계산 예

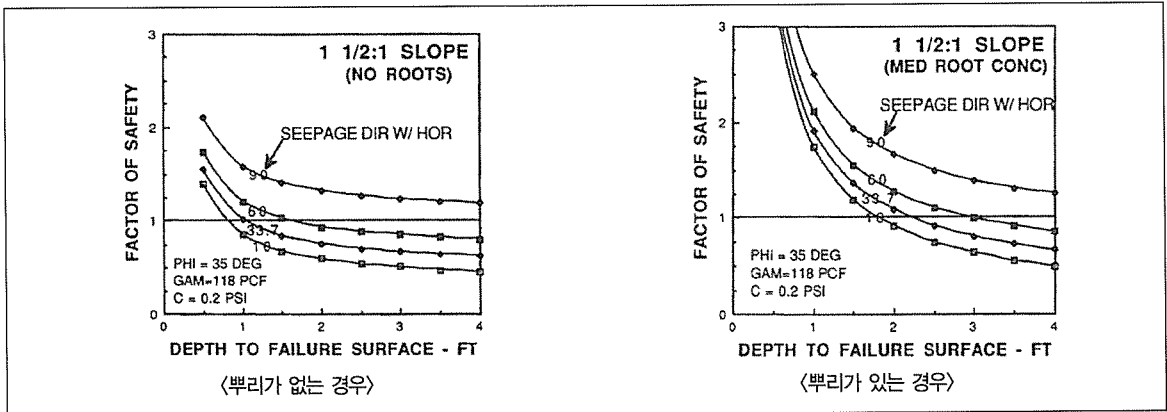


그림 18. 실내실험을 통한 식생보강효과

1:1.5로 설계되었으며, 절취사면 상부는 1:3 경사, 사면고는 20~60 ft 로서, 당초 계획에는 전면 버트레스형식으로

계획되어 있었으나, 일부 하부구간만 버트레스로 계획하고 상부구간은 식생공법으로 변경하였으며, 현장실험과

실내실험을 통한 보강효과를 평가한 결과 안전율을 확보할 수 있었으며 공사비도 크게 감소시킬 수 있었다.

상기의 현장실험과 더불어 실내실험을 실시하였으며 실내실험은 낮은 점착력의 모래질 토사로 이루어진 1: 1.5 경사의 사면에 대하여 실험을 통하여 안전율을 평가하였다. 또한 실험은 파괴면의 깊이와 우수의 침투경사를 변화시켜가며 실시하였으며 실험결과 뿌리의 존재에 따라 안전율은 크게 차이가 있는 것으로 평가되었으며, 파괴면이 얇을 수록, 우수의 침투경사가 클수록 안전율 증가 효과가 큰 것으로 나타났다. 이를 통하여 뿌리의 보강효과가 비교적 얇은깊이에서 크게 발휘되며, 뿌리의 보강효과와 더불어 뿌리의 수평배수효과로 인하여 침투경사가 급한 사면일수록 안전율 증가 효과가 큰 것으로 평가되었다.

7. 결어

최근 다양한 식생공법이 도입되고 있지만 경관적인 요소만을 고려하여 주로 보호공법만으로 인식되고 있다. 하지만 외국의 경우 상당부분의 구조물 공법이 친환경적인 공법으로 대체되고 있으며, 식생공법이 보호공법으로서 뿐만 아니라 사면의 안전율을 증가시키는 하나의 보강공법으로 자리잡아가고 있는 추세이다.

국내에서도 최근들어 사면안정성 평가를 위하여 공극수압의 정밀적용과 강우에 따른 침투해석이 설계에 반영되고 있으며, 뿌리의 보강효과를 구명하기 위한 연구가 진행되고 있다. 따라서 친환경적이며, 공학적으로 우수한 식생공법의 개발과 더불어, 보강효과가 정량적으로 규명된다면 보호공법 뿐만 아니라 보강공법으로서도 기존의 공법에 대한 충분한 대안으로 성장할 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

1. Coppin, N.J., and Richards, I. (1990). Use of vegetation in Civil Engineering, Butterworths, Sevenoaks, Kent
2. Gray, D.H. and Sotir, R (1996). "Biotechnical stabilization of cut and fill slopes." Stability and Performance of slopes and embankments, ASCE Geotechnical Special Publication No. 31, Vol. 2, pp. 1395 -1410.
3. Gray, D., and R. Sotir. 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control. A Wiley-Interscience Publication, New York, New York. 378 pages.
4. Land man, <http://www.land-man.net/pilotc/pagine/pag01.html>
5. Lisa Lewis, "Soil Bioengineering an alternative for Roadside Management", USDA Forest service, 2000.
6. Lance D. Yarbrough, 2000.3 Channel bank stability analysis and design considering the effect of riparian vegetation and root reinforcement, University of Mississippi
7. R. P. C. Morgan and R. J. Rickson, "Slope stabilization and erosion control", E&FN SPON, 1995.
8. Robin B. Stir & Associates, Inc. (2001), Soil bioengineering slope stabilization and revegetation for construction on an unstable slope,
9. 이인모, 성상규, 조충모(1991) 뿌리의 강도가 자연사면안정에 미치는 영향에 관한 실험 연구, 대한토질공학회지 7(2), pp.51-65
10. Schiechl, H. 1996a. Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control. Blackwell Science Inc.