

뿌리의 強度가 自然斜面 安定에 미치는 影響에 關한 實驗研究

An Experimental Study on the Effect of Vegetation
Roots on Slope Stability of Hillside Slopes

이 인 모*¹
Lee, In-Mo
성 상 규*²
Sung, Sang-Gyu
임 충 모*³
Im, Chung-Mo

Abstract

In the stability analysis of hillside slopes, the roots of vegetation have been considered to act as a soil reinforcement. In order to predict the amount of increase in soil shear resistance, produced by tensile strength of roots that intersect a potential slip surface in hillside slopes, new soil-root interaction models are proposed in this paper. For this purpose, firstly, laboratory tests and in-situ tests were performed on soil-root systems, and experimental results were compared with a couple of soil-root interaction models which had been proposed by Gray, Waldron, and Wu etc. Based on this comparison, a new soil-root interaction model is proposed. Secondly, a probabilistic soil-root model is proposed based on statistical analysis considering random nature of root distribution, root characteristics, and soil-root interactions. Finally, to examine the effect of this root reinforcement system on stability of hillside slopes, a simple three-dimensional stability analysis was performed, and it was shown that root reinforcement had a significant stabilizing influence on shallow slips rather than deep slips in hillside slopes.

要 旨

자연사면의 안정성해석에 있어서, 뿌리는 보강재로써의 역할을 행함이 인식 되어져 왔다. 자연사면의 잠정적인 파괴면을 관통하는 뿌리의 인장강도에 의해 발생하는 흙의 전단저항의 증가량을 예측하기 위하여 본 연구에서는 흙과 뿌리의 새로운 상호작용 모델을 제안하였다. 이를 위하여 첫째로,

*¹ 정희원, 고려대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*² 고려대학교 대학원 토목공학과

*³ 정희원, 목포전문대학 토목과 조교수

흙과 뿌리의 합성체에 대해 실내실험과 현장실험을 실시하고 본 실험의 결과와 기존의 흙과 뿌리의 상호작용 이론적 모델과 비교 검토하여 수정된 흙과 뿌리의 상호작용 모델을 제안하였다. 이와 아울러, 뿌리의 무작위한 분포 및 강도특성을 고려한, 통계적인 이론에 바탕을 둔 확률론적 뿌리보강 모델을 제안하였다. 끝으로, 자연사면의 안정에 미치는 뿌리보강의 효과를 알아보기 위하여 간단한 3차원 사면 안정성 해석을 수행한 결과, 자연사면에서의 뿌리보강은 깊은 파괴보다는 얇은 파괴에 대해 중대한 영향을 미침을 알 수 있었다.

1. 서 론

이제까지의 경험으로 미루어 볼 때 자연사면의 붕괴는 식생이 많지 않은 민둥산이나 과거에는 식생이 울창했으나 벌목이나 기타의 이유로 인해 식생이 상당히 훼손된 지역에서 발생 빈도가 높은 것으로 나타났다.¹⁾ 이 사실은 자연사면에서 식생의 유무가 사면의 안정에 적지 않은 영향을 미침을 잘 대술해 주고 있다.

본 연구에서는 식생과 자연사면이 연계된 여러 역학관계중 식생뿌리가 사면의 전단강도에 미치는 보강효과에 대해서 중점적으로 연구하였다. 따라서, 본 연구의 목적은 뿌리를 내재한 사면과 그렇지 아니한 사면에 대해 직접적인 현장실험과 부수적인 실내실험을 실시하여 뿌리가 가지는 보강효과의 정도를 실제적으로 제시하고, 더불어 이론적인 연구를 병행하여 이론치와 실험치의 차이를 산정하고, 그 이유를 뿌리와 흙의 공학적인 관계에서 규명하며, 여기에 통계적인 분석을 덧붙여 합리적인 보완책을 마련함으로써 우리나라 자연사면의 안정성 해석에 실제적으로 적용할 수 있는 모델을 개발하고, 나아가 향후 사면파괴 위험도추정에 이용할 수 있는 자료를 마련하는데 있다. 이를 위해 각종문헌을 통하여 뿌리의 생태에 대한 조사를 함과 동시에 이를 뿌리보강효과를 고려하는 사면안정해석에 이용할 수 있도록 자료화하고 실험결과의 해석을 통해 뿌리보강효과의 정도를 가늠하고 실험을 통해 얻어진 자료를 기존의 뿌리보강 모델에 적용하여 뿌리에 의한 전단강도의 증가치를 구함과 동시에 실험치와 비교, 분석함으로써 새로운 모델로의 접근을 시도하였다. 또한, 뿌리의 여러 역학적, 외형적 요소를 무작위 변수(random variable)로 하여

확률론적인 기대값을 구함으로써 사면전체 해석을 위한 기초를 마련하고 기존의 문헌과 본 연구를 통해서 얻은 결과를 응용하여 뿌리의 면적비에 따른 전단강도의 증가정도를 추정해 보았다. 끝으로 뿌리의 보강효과를 고려한 사면안정해석을 3차원해석법을 이용하여 시행하였다.

2. 뿌리보강 Model의 기본이론

임의의 사면에서 파괴가 발생하면 흙과 뿌리의 합성체는 파괴에 의해 밀려 나가는 부분과 그렇지 아니한 두 부분으로 나뉘게 되고 전단면상의 토괴를 관통하는 뿌리에는 파괴에 의한 변위가 커질수록 인장응력이 증가하게 되며, 이에 의해 전단저항이 증가하게 된다. 전단강도의 증가를 예측하기 위한 간단한 이론적 모델은 Waldron¹⁾, Wu 등²⁾, 그리고 이와는 별도로 Gray and Leiser⁴⁾ 등과 같은 공학자들에 의해 유사하게 발달되어져 왔다.

2.1. 전단면에 수직인 뿌리보강 모델

이 모델은 그림 1에서 보는 바와 같이 유연하고 탄성적인 뿌리가 평행한 전단영역을 연직하게 관통하고 있다고 가정하고 있다. 이 모델에 따르면 토괴에 전단이 일어날 때 뿌리에 발생하는 인장력은 전단에 대해 직접적으로 저항하는, 전단면에 평행한 부분과 전단영역의 구속응력을 증가시키는, 전단면에 연직인 부분으로 나뉘게 되고 이 두가지의 힘에 의해 전단응력이 증가하게 된다. 한편, 이 모델의 성립을 위해서는 아래와 같은 몇가지 가정을 전제로 한다.¹¹⁾

① 뿌리는 전단영역 주변에 마찰이나 점착에 의해 빠져 나오지 않도록 충분한 길이를 가지고 고정되어 있다.

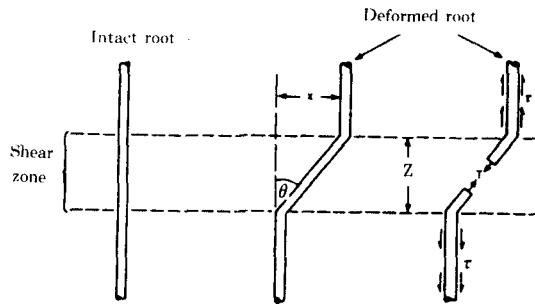


그림 1. 수직인 뿌리보강 Model

② 모든 뿌리는 전단면에 수직하게 방향을 잡고 있다.

③ 모든 뿌리의 인장강도는 전부 동원된다.

④ 뿌리는 흙의 내부마찰각을 변경시킬 수 없다.

그러면 이 모델에 의해 예측되는 뿌리에 의한 전단강도의 증가, ΔS_R 은 아래와 같이 된다.^{10, 11, 13, 15)}

$$\Delta S_R = t_R (\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (1)$$

여기서, t_R = 흙의 단위면적당의 뿌리의 평균 인장강도

θ = 전단 비틀림각

ϕ = 흙의 내부마찰각

흙의 단위면적당의 뿌리의 평균인장강도, t_R 은 아래와 같이 구한다.

$$t_R = T_R (A_R / A) \quad (2)$$

여기서, T_R = 임의의 전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도

A = 임의의 전단면의 면적

A_R = 임의의 전단면속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적

한편, A_R 은 일일이 전단면내의 각개 뿌리의 면적을 재어 구하기는 너무나 번거로우므로 일정한 간격으로 뿌리의 면적을 분류하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A_R = \sum a_i n_i \quad (3)$$

여기서, a_i = i Class 의 평균면적

n_i = i Class 에 속하는 뿌리의 개수

끝으로 식(2)를 식(1)에 대입하면 아래와 같다.

$$\Delta S_R = T_R (A_R / A) (\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (4)$$

W_u 등¹³⁾ 의 실험을 통한 민감도 해석에 의하면

뿌리의 전체인장강도의 동원은 전단비틀림각 (θ)이 $45^\circ \sim 70^\circ$ 일 때 대부분 발생하였고 위의 식(4)의 괄호쳐진 부분의 값은 전단비틀림각과 내부마찰각의 변화에 대해 대체적으로 둔감하게 나타났다. 이에 전단비틀림각(θ)이 $40^\circ \sim 90^\circ$ 일 때 괄호쳐진 부분의 값이 1.0에서 1.3 사이므로 평균값 1.15를 택하여 식(4)에 대입하여 다음과 같이 간단히 하였다.

$$\Delta S_R = 1.15 T_R (A_R / A) \quad (5)$$

2.2. 전단면에 기울어진 뿌리보강모델

앞에서 설명한 모델에서는 앞의 ②의 가정에서와 같이 뿌리는 전단면에 직각으로 관통되어 있다고 가정하고 해석하였다. 하지만 실제로 뿌리는 무작위하게 분포하므로 좀더 현실적으로 해석하기 위해서는 뿌리의 초기기움각을 고려해 주어야 할 것이다. 그림 2는 이를 고려한 모델의 설명이다. 이 모델에 의하면 뿌리에 의한 전단강도의 증가, ΔS_R 은 아래와 같다.³⁾

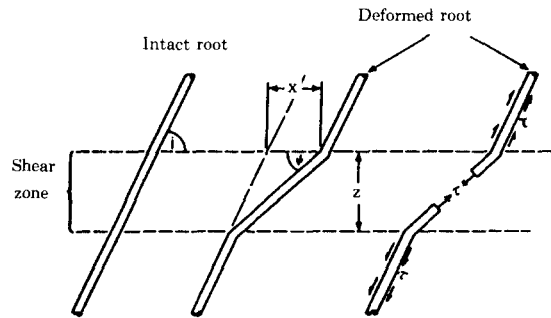


그림 2. 기울어진 뿌리보강 Model

$$\Delta S_R = t_R [\sin(90 - \phi) + \cos(90 - \phi) \tan\phi] \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{m + (\tan^{-1} i)^{-1}} \right] \quad (7)$$

$$m = X / Z \quad (8)$$

여기서, i = 뿌리의 초기기움각

한편, Gray and Ohashi³⁾는 전단면에 직각인 섬유(fiber)와 무작위하게 분포한 섬유에 대해 같은 조건에서 실내전단실험을 실시하여 그림 3과 같이 두경우간에 매우 유사한 결과를 얻음으로써 무작위하게 분포한 뿌리에 대해서도 전자의 모델을 사용할 수 있음을 밝혔다.

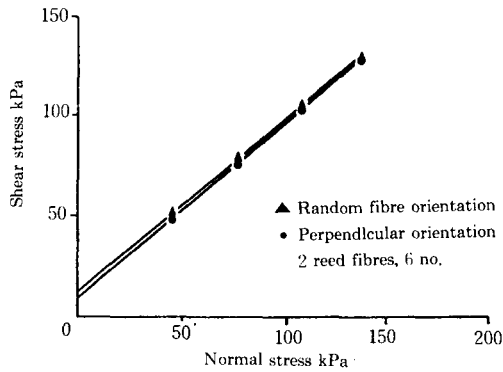


그림 3. 수직한 섬유보강과 Random 한 섬유보강에 전단강도 비교

2.3. 동원된 뿌리의 인장응력을 고려한 모델

이제까지의 뿌리보강 모델의 전개는 앞의 가정 ③에 준하여 행하였다. 하지만 실제의 경우 사면 파괴가 일어날 때 이와 같이 뿌리의 인장강도 전부가 동시에 동원되는 극한 경우는 생기지 않으며 미끄러져 나오는 도중에 뿌리가 전단되더라도 이는 동시에 일어나지 않는다. 더우기 실험에서 뿌리를 포함한 전단실험을 한 결과, 흙의 최대전단강도를 지난 후에도 뿌리의 전단발생은 미미했다. 그러므로 앞의 식(4)에서와 같이 인장강도(T_R) 전체를 사용하는 것은 무리가 있다. 이에 Waldron¹¹⁾과 Gray³⁾는 T_R 대신에 전단도중에 발생가능한 인장응력, σ_R 을 제시하였다.

한편, Waldron¹²⁾은 뿌리와 흙간의 마찰응력(τ_R)값이 0.1kg/cm^2 이상이면 뿌리가 흙으로부터 거의 빠져나오지 않는다는 것을 실험을 통해 밝혔다. 이때는 뿌리가 흙속에 확실히 고정되어 있는 관계로 토피의 전단도중 뿌리가 전단방향으로 빠져나오지 않고 전단변위에 따라 길이방향으로 인장변형된다. 대부분의 자연사면내의 뿌리는 흙속에 단단히 고정되어 있으며, 이 상태를 고려한 식은 아래와 같다.

$$\sigma_R = \left(\frac{4 E_R \tau_R Z}{d_p} \right)^{1/2} (\sec \theta - 1)^{1/2} \quad (9)$$

3. 현장 및 실내실험

본 연구를 위하여 현장실험이 실시된 전라남도

무안군 몽탄면의 야산은 밤나무 조림지로 과거에 사면파괴의 경험이 있는 곳이다. 대부분의 수종은 밤나무(목체의 평균직경이 약 20cm)였으며 뿌리는 지표 아래의 실트질 점토와 그 아래의 풍화층(residual soil)에 대부분 내재되어 있었다. 실험현장의 흙은 통일분류법에 의하면 SC로 판명된다. 하지만 실제로 현장상태는 크고 작은 자갈이 존재한 경우도 많았으며 이런 경우에는 SC 보다는 오히려 GC에 가깝지 않나 생각된다. 현장실험은 총 15 장소에서 행해졌으며 뿌리를 포함한 전단시 Peak 치일 때와 Residual 치일 때를 비교해 봄으로써 흙만의 파괴이후 뿌리의 보강효과 정도를 가늠해 보았다.

3.1. 뿌리 인장실험

실험의 결과로, 그림 4는 각 직경의 뿌리에 대한 인장강도를 나타낸 것이다. 이때, 회귀분석 곡선식은 아래와 같다.

$$T_R = 202.155(d_R^{-0.2474}) \quad (10)$$

이 결과로부터 뿌리의 지름이 커지면 인장강도가 줄어들음을 알 수 있다. 한편, 아래의 식은 뿌리의 탄성계수를 직경별로 나타낸 회귀분석 곡선식이다.

$$E_R (\text{kg/cm}^2) = 4267.83(d_R^{-0.4720}) \quad (11)$$

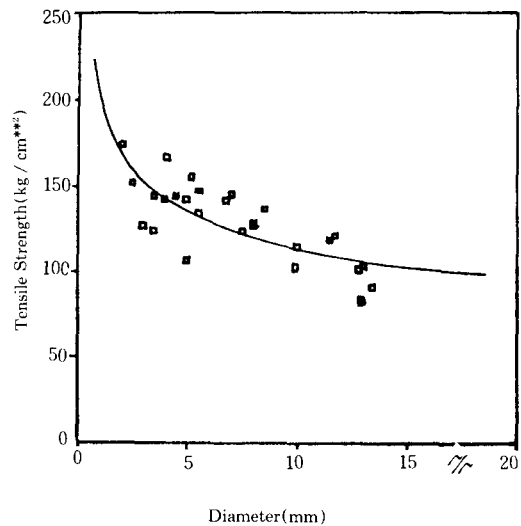


그림 4. 뿌리의 직경별 인장강도

3.2. 현장 3면 전단실험

이 실험은 실제로 뿌리를 내재한 흙에 대해 직접전단실험을 행함으로써 뿌리에 의한 보강효과 정도의 정도를 알아보는 데 목적이 있다. 사면에서 뿌리의 전단은 대체적으로 파괴면의 옆부분에서 발생함을 알 수 있으므로 3면 전단실험 체계는 양 옆면에서의 뿌리에 의한 보강효과에 중점을 두고 고안되었다.^{2, 16)} 뿌리를 내재한 흙을 그림 5와 같이 좌우면과 아래면을 남기고 전후 두면을 파낸 후에 실험장치(Jack, Dial Gauge 2개, 토괴 전단판)를 설치한다. 이때, 토괴와 토괴전단판의 한변길이는 35cm이며 Jack 설치 이전에 받침부분의 흙에 철판을 강하게 박음으로써 실험도중에 발생하는 반력에 의한 Jack 자체의 수평변위를 최대한 줄였다. 전단영역을 알아보기 위하여 그림 5에서와 같이 두꺼운 철사를 토괴중앙의 가장자리에서부터 바깥쪽으로 박았다. 그림 6은 실험의 결과로 나타난 하중-변위곡선이다.

한편, 실제로 사면파괴면을 살펴보면, 뿌리는 대체적으로 파괴면의 옆면 윗부분에서 지표면에 거의 수평하게 나온 상태에서 끊어져 있는 것을 볼 수가 있었다. 이는 곧, 지표면에 수평으로 발달한 뿌리에 의해 사면파괴시 보강효과가 유발

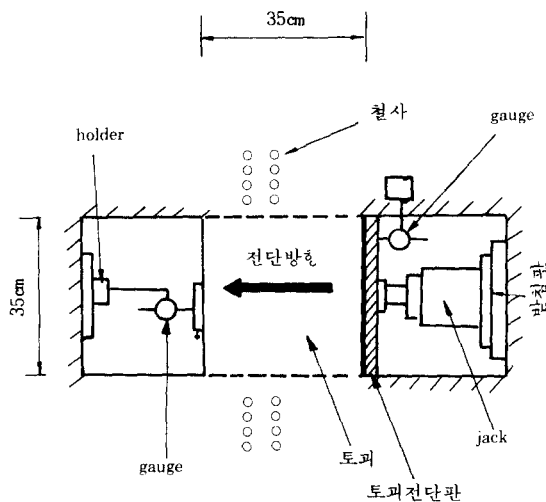


그림 5. 3면전단실험 전경

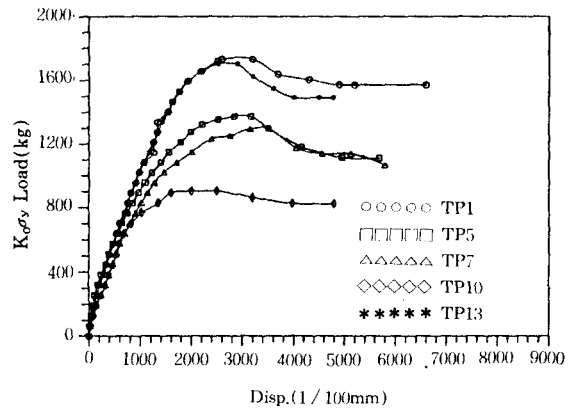


그림 6. 3면전단실험의 결과

되는 것을 단적으로 보여주므로 뿌리의 면적비 (root area ratio)는 양옆 전단면에 분포하는 뿌리를 중심으로 구했다. 한편, 측정된 전단영역 (Z)은 거의가 10cm 안팎이었다.

3.3. 실내 직접전단실험

이 실험의 목적은 현장에서의 뿌리를 포함한 직접전단실험에 비해 흙만의 강도정수를 구함으로써 뿌리의 보강효과를 배제한 흙만의 전단강도를 제공하는 데 있다. 그림 7은 이 실험의 결과를 나타낸 것이다.

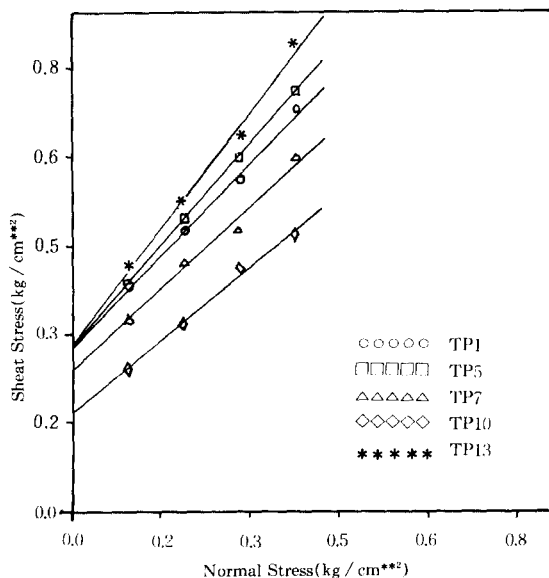


그림 7. Peak 상태의 직접전단실험 결과

3.4. 현장 1면전단실험

실제로 현장에서 토괴의 양 옆면을 미리 전단하면 아래면에는 뿌리가 거의 존재치 않으므로 뿌리에 의한 보강효과를 기대하기가 거의 힘들다. 이러한 이유로 아래면, 즉, 1면에 대한 전단실험을 시행하면 실제로 현장에서의 흙만의 전단저항을 구할 수 있으므로 실내 직접전단실험의 미비점을 보완할 수 있다. 실험은 3면전단실험과 동일한 방법으로 시행되 실험전에 양 옆면을 파버린다. 그림 8은 이 실험의 결과로 나타난 하중-변위곡선이다.

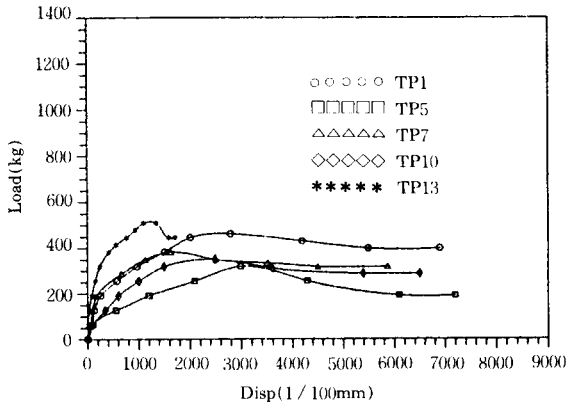


그림 8. 현장 1면전단실험의 결과

4. 실험결과와 Model을 이용한 해석

4.1. 실험결과와 해석

우선 실내실험에서 얻어진 흙의 강도정수를 현장상태의 흙이 가지는 강도정수로 보고 해석해 보았다. 그림 9는 3면전단실험 토괴의 단면도이다. 그림 9에서 ①, ②, ③면의 전단저항력은 다음과 같이 구한다.

$$\text{①} : S = (c + \sigma_v \times \tan \phi) \times H^2 \quad (12)$$

$$\text{②, ③} : S = (c + 1/2 \times K_o \times \sigma_v \times \tan \phi) \times H^2 \quad (13)$$

여기서, $K_o = 1 - \sin \phi$

한편 밑부분(①)의 계산시에는 1면전단실험의 결과도 고려하였다. 위의 식에 의해 구한 값은

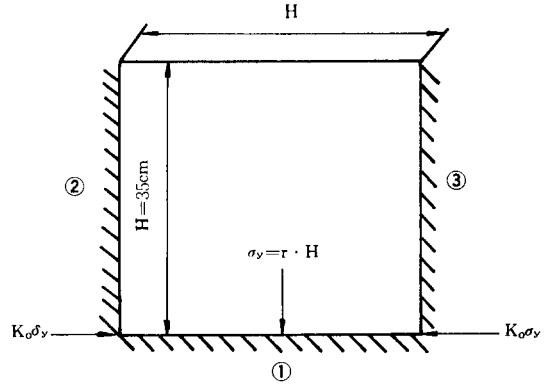


그림 9. 3면전단실험의 토괴단면도

흙만에 의한 전단저항력이므로 3면전단 실험의 결과에서 나온 전체의 전단저항력에서 여기에서 구한 값을 빼준 값이 뿌리의 보강효과에 의한 전단저항력이라 생각할 수 있다. 표 1은 이렇게 구한 값들을 전단면의 면적으로 나눈 ΔS_R 을 나타냈으며 각 실험장소에서 구한 뿌리의 면적비와 함께 도시하면 그림 10과 같다. 이 그림으로부터 뿌리의 면적비가 증가함에 따라 뿌리에 의한 전단강도의 증가치는 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

표 1. 뿌리에 의한 전단강도의 증가치(실험치)

실험장소	$\Delta S_R (\text{kg} / \text{cm}^2)$	
	Peak	Residual
TP1	0.211	0.238
TP2	0.058	0.067
TP3	0.030	0.034
TP4	0.147	0.159
TP5	0.081	0.092
TP6	0.101	0.110
TP7	0.128	0.141
TP8	0.201	0.214
TP9	0.140	0.149
TP10	0.050	0.057
TP11	0.203	0.217
TP12	0.169	0.179
TP13	0.184	0.202
TP14	0.041	0.048
TP15	0.101	0.111

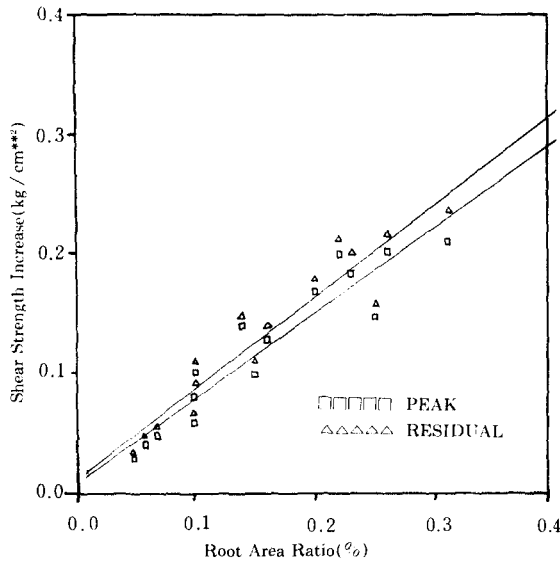


그림 10. 뿌리의 면적비에 따른 전단강도 증가치

4.2. 수직한 뿌리보강 모델에 의한 해석

현장의 실험결과로 나온 자료를 이용하여 앞에서 제시한 바 있는 모델(식)로 해석해 보았다. 해석은 아래와 같은 순서로 하였다.

1) T_R 의 산정

T_R 값을 구하려면 우선 임의의 전단면속에 포함된 모든 뿌리를 단면적에 따라 여러개의 등급으로 구분하고 아래와 같이 구한다.

$$T_R = \frac{\sum S_i n_i}{\sum a_i n_i} \quad (14)$$

여기서, $S_i = i$ Class의 대표값에 해당하는 뿌리의 인장저항력

실험장소에서 구한 뿌리면적비는 좌, 우면의 평균값이므로 여기에서 T_R 값은 양쪽면 전체에 대해 구하였다.

2) θ 의 산정

θ 는 아래와 같이 구한다.

$$\theta = \tan^{-1}(X/Z) \quad (15)$$

여기서, $X =$ 전단변위

$Z =$ 전단영역 두께

위의 식에 의해 계산된 θ 의 값은 Peak와 Residual 각각의 상태에서 $15^\circ \sim 25^\circ$ 와 $25^\circ \sim 30^\circ$ 의 범위에서 산출되었다. 이를 보면, 앞의 2.1절에서 언급한 Wu 등¹³⁾의 실험결과로 나온,

뿌리의 인장강도 전체가 동원될 경우의 전단비를 립각과는 많은 차이가 있음을 볼 수가 있다. 즉, 금번 실험에서 흙의 전단 파괴시 뿌리의 전체 인장강도가 동원되지 못했음을 짐작할 수 있다.

3) ΔS_R 의 계산

식(4)에 의해 ΔS_R 을 구하면 표 2와 같다.

표 2. Model 해석에 의한 전단강도의 증가치 (식 4 사용)

실험장소	Root Area Ratio (%)	ΔS_R (kg/cm ²)	
		Peak	Residual
TP1	0.31	0.47	0.41
TP2	0.10	0.18	0.16
TP3	0.05	—	—
TP4	0.25	0.35	0.33
TP5	0.10	0.20	0.15
TP6	0.10	0.21	0.17
TP7	0.16	0.25	0.23
TP8	0.22	0.32	0.31
TP9	0.14	—	—
TP10	0.07	0.10	0.12
TP11	0.26	0.42	0.39
TP12	0.20	0.32	0.30
TP13	0.23	0.45	0.41
TP14	0.06	0.13	0.13
TP15	0.15	0.29	0.27

4) 실험결과와의 비교

위의 계산결과인 표 2와 실험결과인 표 1을 비교해 보면 실험에 의해 구한 값보다 대체적으로 크게 산정됨을 볼 수가 있다. 이는 앞의 모델 설명에서도 언급한 것처럼 실제로 전단 실험시의 뿌리의 인장응력 동원치가 모델에서 제시한 뿌리의 전단강도 전체(T_R)에 미치지 못한다는 것이 가장 큰 이유가 있다. 한편, 위의 계산결과를 보면 실험치와는 반대로 Residual일 때가 Peak일 때보다 오히려 전단강도 증가값이 적게 산출됨을 볼 수가 있다. 이는 두 경우 모두에 대해 T_R 값을 같이 적용했다는 점에 이유가 있다. 변위가 증대되면 뿌리의 인장응력이 그에 준하여 증가하므로 Residual일 때보다 뿌리의 인장응력(σ_R) 값이 크게 나와야 한다.

한편, 각각 실험장소에 대하여 이 절에서 구한

ΔS_R 치의 계산결과와 실험치를 비교하여 비(실험치/계산치)를 구한 결과, 이의 평균값(\bar{R}_p, \bar{R}_r)은 Peak일 때가 0.446, Residual 상태가 0.536이었으며, 표준편차는 각각 0.085, 0.096이고 변동계수(COV)가 0.19, 0.18이므로 표준편차는 평균값의 20% 이내에 있음을 알 수 있었다. Wu 등¹³⁾의 연구에 의하면 식 (1)의 괄호쳐진 부분의 값은 흙의 내부마찰각과 뿌리의 기움각(θ)의 변화에 둔감하므로 금번 실험현장의 ϕ 의 평균값($\bar{\phi}$)과 θ 의 평균값($\bar{\theta}$)을 \bar{R}_p, \bar{R}_r 값과 더불어 식 (4)에 대입시키면 실제 실험현장에서의 뿌리에 의한 전단강도의 증가치, ΔS_R 은 아래의 식으로 구할 수 있다. 한편 $\bar{\phi}$ 와 $\bar{\theta}$ 는 Peak와 Residual 상태일 때 각각 45.4°, 39.4°와 17.9°, 27.4°이다.

$$\text{Peak} : \Delta S_R = K_p T_R (A_R / A) \quad (16)$$

$$\text{Residual} : \Delta S_R = K_r T_R (A_R / A) \quad (17)$$

$$\text{여기서, } K_p = \bar{R}_p (\sin \bar{\theta} + \cos \bar{\theta} \tan \bar{\phi})$$

$$K_r = \bar{R}_r (\sin \bar{\theta} + \cos \bar{\theta} \tan \bar{\phi})$$

위의 식을 Wu 등¹³⁾이 제안한 식(5)와 비교해보면 K_p, K_r 값이 식 (5)의 상수 1.15의 50%에 근접함을 알 수가 있다. 한편, 식 (5)가 실제로 뿌리의 기움각이 45°~70°일 때, 즉, 인장강도 전체가 동원된 상태에서 실험을 통해 도출한 식임을 감안하면 인장강도 전체를 동원하는 모델에 의한 해석을 위해서는 전단변위를 더욱 증가시킨, 즉, θ 값을 57.5° 정도로 두고 해석함이 옳을 것으로 판단된다. 실제의 현장에서의 뿌리를 포함한 토피의 전단파괴시의 뿌리의 기움각이 Wu 등¹³⁾의 실험에 의해 나타난 각보다 현저히 작으므로 그만큼 인장응력의 동원량이 감소하게 된다. θ 값을 57.5°로 두고 모델 해석한 결과, \bar{R}_p 와 \bar{R}_r 은 각각 0.409, 0.493이므로 금번 현장실험에서는 토피의 전단파괴시 뿌리의 전체인장강도의 40~50% 정도가 동원되었음을 알 수 있다. 결국, ΔS_R 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Peak} : \Delta S_R = 0.567 T_R (A_R / A) \quad (18)$$

$$\text{Residual} : \Delta S_R = 0.637 T_R (A_R / A) \quad (19)$$

4.3. 동원된 뿌리의 인장응력을 고려한 모델에 의한 해석

식 (9)를 이용하여 아래의 순서로 해석한다.

1) τ_R 의 산정

τ_R 의 값은 아래의 식에 의해 구한다.

$$\tau_R = c_a + \sigma_{ave} \tan \delta \quad (20)$$

여기서, c_a = 뿌리와 흙의 부착력

σ_{ave} = 토피내의 구속응력

δ = 뿌리와 흙간의 마찰각

$$\sigma_{ave} = 0.5 [0.5 \gamma_t H + 0.5 \gamma_t H (1 - \sin \phi)] \quad (21)$$

Wu¹⁷⁾에 의하면 어림잡아 δ 와 ϕ 는 $\tan \delta = 0.5 \tan \phi$ 의 관계에 있으므로 ϕ 로부터 δ 를 구하고, 일반적으로 흙속에 보강재가 있을 경우의 마찰각과 부착력 및 점착력간에는 $\tan \delta / \tan \phi = c_a / c$ 의 관계가 있으므로 부착력(c_a)을 구할 수 있다. 이때, 내부마찰각에 의해 유도되는 뿌리와 흙간의 마찰각의 영향은 미소하고 상대적으로 흙의 점착력에 의해 발생하는 뿌리와 흙간의 부착력의 영향이 크게 된다. 위의 식 (20)에 의해 마찰응력을 산정한 결과, 대략적으로 0.11~0.17 kg/cm² 정도의 범위에서 산출되었다. 하지만 실제로 뿌리에 대해 τ_R 값을 구하기 위한 실험을 수행한 결과 대략적으로 0.65 kg/cm² 정도의 측정 값을 구할 수 있었다. 이로부터 산출결과와 실제 값 사이에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

2) σ_R 의 산정

σ_R 을 산정하는 식을 보면 임의의 직경을 가지는 하나만의 뿌리에 대하여 해석함을 알 수 있다. 그러므로 그림 4를 이용하여 앞의 4.2절에서 구한 각각의 실험장소에서의 T_R 값을 가지는 뿌리의 직경(d_R)을 구한후 식(11)을 이용하여 이 직경에 해당하는 E_R 값을 구하여 식 (9)에 대입한다.

3) ΔS_R 의 산정

식 (4)에 T_R 대신에 σ_R 을 대입시킨다. 표 3은 이 식을 이용한 계산 결과이다. 괄호안의 것은 실험에서 구한 τ_R 값(0.65 kg/cm²)을 사용하여 구한 것이다.

4) 실험결과와의 비교

위의 결과를 보면 대체적으로 실험에 의한 결과치 보다 뿌리에 의한 전단강도의 증가가 작게 산출됨을 알 수가 있다. 이는 표 3에서 보는 바와 같이 모델에 의한 계산치보다 실험에 의해 구한 실제의 τ_R 값을 사용한 결과가 현저한 차이

표 3. Model 해석에 의한 전단강도의 증가치
(식 9 사용)

실험장소	ΔS_R (kg/cm ²)	
	Peak	Residual
TP1	0.080(0.161)	0.126(0.254)
TP2	0.043(0.087)	0.058(0.117)
TP3	-	-
TP4	0.683(0.201)	0.098(0.238)
TP5	0.057(0.115)	0.081(0.163)
TP6	0.070(0.141)	0.088(0.177)
TP7	0.062(0.134)	0.085(0.183)
TP8	0.058(0.125)	0.099(0.213)
TP9	-	-
TP10	0.018(0.046)	0.038(0.096)
TP11	0.114(0.237)	0.134(0.279)
TP12	0.059(0.123)	0.098(0.204)
TP13	0.074(0.149)	0.108(0.218)
TP14	0.031(0.062)	0.056(0.113)
TP15	0.074(0.145)	0.099(0.194)

로 크게 나타나는 것에 가장 큰 이유가 있다. 모델해석시에는 단일의, 직경이 일정한 뿌리가 길이방향으로 굴곡없이 흙속에 내재되어 있다는 가정아래 마찰저항응력을 산출하였지만 실제의 뿌리는 앞의 가정과는 매우 틀리게 직경이 일정하지 않을 뿐더러 본뿌리 주위의 잔뿌리와 본뿌리에서 갈라진 뿌리등에 의해 실제의 본뿌리의 마찰면적보다 훨씬 많은 면적이 마찰저항을 위해 동원되고 또, 뿌리는 흙속에 심하게 굽어진 상태로 내재되어 있으므로 계산에 의해 산출되는 값보다는 당연히 크게 나타난다. 실제 τ_R 값은 계산된 τ_R 값의 4.58 배 정도이다. 한편, 실제의 τ_R 값을 사용하여 구한 ΔS_R 값과 실험에 의해 구한 ΔS_R 값과의 비(실험치/계산치)를 구해 본 결과, 구해진 각 실험장소의 계산치와 실험치의 비의 평균값(\bar{R}_p , \bar{R}_r)은 Peak 일 때가 0.969, Residual 상태가 0.716 이었으며 이의 표준편차는 각각 0.308, 0.173 이고 변동계수(COV)가 0.32, 0.24 이므로 표준편차가 평균의 32% 이내에 있음을 알 수가 있다. 위의 결과로부터 \bar{R}_p 값이 0.967 이므로 실제의 τ_R 값을 사용할 경우 실험치와 매우 근접한 값을 가짐을 알 수 있다. 그러므

로 Peak 상태의 ΔS_R 값은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sqrt{4.58 K_r \cdot \sigma_r (A_R/A) \sigma}$$

$$\text{Peak: } \Delta S_R = \sqrt{4.58 K_p \sigma_r (A_R/A)} \quad (22)$$

$$\text{Residual: } \Delta S_R = \sqrt{4.58 K_r \sigma_r (A_R/A)} \quad (23)$$

앞절에서도 밝혔듯이 위의 K_p 식의 괄호안의 값은 ϕ 와 θ 의 변화에 둔감하므로 앞의 4.2 절에서 사용한 ϕ 과 θ 값을 사용하면 ΔS_R 은 다음과 같이 된다.

$$\text{Peak: } \Delta S_R = 2.638 \sigma_r (A_R/A) \quad (24)$$

$$\text{Residual: } \Delta S_R = 1.823 \sigma_r (A_R/A) \quad (25)$$

위의 식에 식(9)를 대입하면 다음과 같다.

$$\text{Peak: } \Delta S_R = 2.638 \left[\left(\frac{4 E_R \tau_R Z}{d_p} \right)^{1/2} (\sec \theta - 1)^{1/2} \right] (A_R/A) \quad (26)$$

여기에 앞의 실험 결과의 전단영역(Z)의 평균 값 9cm 와, 식 (21)에 의한 산정결과, 거의 변화가 없는 σ_{ave} 값(0.02kg/cm²)을 대입하여 구한 τ_R 값을 대입하면 금번현장의 전단강도 증가치는 다음의 식에 의해 예측할 수 있다.

$$\text{Peak: } \Delta S_R = 1.345 (E_R/d_r)^{1/2} (A_R/A) \quad (27)$$

$$\text{Residual: } \Delta S_R = 1.455 (E_R/d_r)^{1/2} (A_R/A) \quad (28)$$

4.4. 종합적인 실험결과와 모델해석간의 비교

앞의 실험결과와 해석과 모델에 의한 해석을 비교해 보기 위하여 우선 4.1, 4.2, 4.3 절의 해석결과인 각 실험장소의 ΔS_R 값의 분포에 대한 평균, 표준편차 그리고 변동계수(COV)를 구하였다. 표 4, 5는 산정결과이며, ()는 사용한 식의 번호이다. 이 표에서 실험결과에 대한 확률론적 분포를 살펴보면 뿌리에 의한 전단강도의 증가치는 표준편차가 평균치의 50% 정도이므로 실제사면의 흙의 성질이 거의 동일하다고 본다면 뿌리의 면적비, 직경, T_R , 그리고 E_R 값등과 같은 요소의 변화에 상당히 민감한 반응을 보임을 알 수 있다. 한편, 모델에 의한 계산결과와 확률론적 분포를 살펴보면 4.2 절의 식 (18), (19)와 4.3 절의 식(27), (28)에 의한 계산결과와 실험치의 분포에 가장 근접함을 알 수 있으며, 이중에서도 식 (18), (19)에 의한 계산결과와 실험치의 분포가 식(27), (28)에 의한 것에 비해 표준편차나 COV의 값이 실험치에 좀더 가까운 것으로

표 4. Peak에서의 전단강도 증가치의 확률론적 분포

Chapter	평균(kg/cm ²)	표준편차	COV
4-1(실험결과)	0.123	0.06033	0.49
4-2(4)	0.272	0.13620	0.50
4-2(18)	0.118	0.05110	0.43
4-3(9)	0.058	0.02646	0.46
*4-3(9)	0.133	0.04954	0.37
4-3(27)	0.120	0.03810	0.32

*는 실험을 통해 구한 τ_R 이용

표 5. Residual에서의 전단강도 증가치의 확률론적 분포

Chapter	평균(kg/cm ²)	표준편차	COV
4-1(실험결과)	0.134	0.06449	0.48
4-2(4)	0.243	0.11709	0.48
4-2(19)	0.132	0.05740	0.43
4-3(9)	0.087	0.03755	0.43
*4-3(9)	0.188	0.05324	0.28
4-3(28)	0.130	0.04120	0.32

*는 실험을 통해 구한 τ_R 이용

나타났다. 그림 11, 12는 각 실험장소의 ΔS_R 값에 대한 실험치와 계산치의 비교이다. 이 그림에서 각 실험장소당의 실험치와 여러 모델에 의한 계산치와의 비의 평균과 표준편차 그리고 변동계

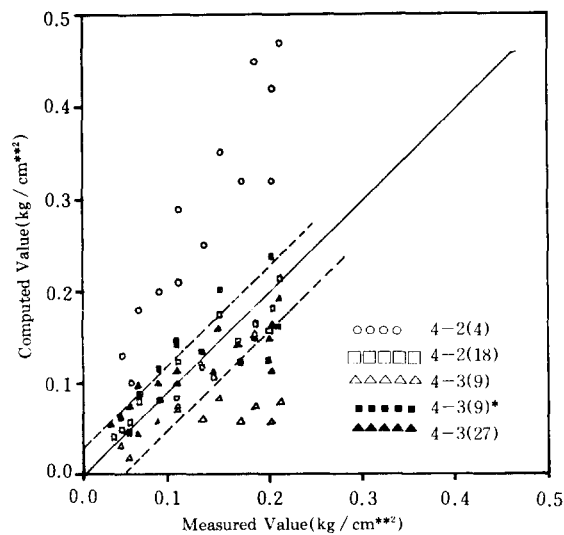


그림 11. ΔS_R 값의 실험치와 계산치와의 비교(Peak)

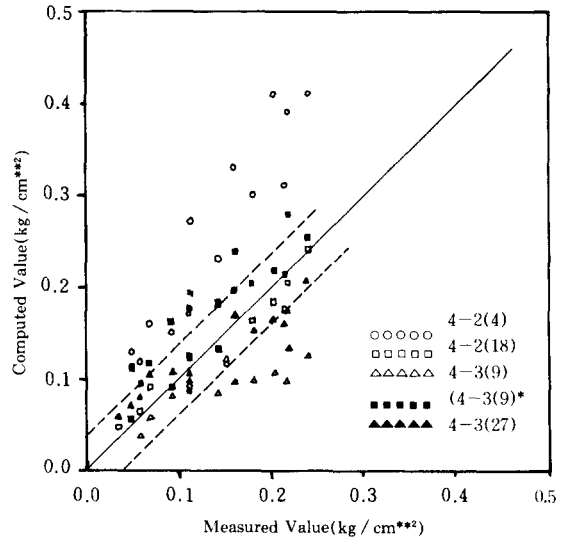


그림 12. ΔS_R 값의 실험치와 계산치와의 비교(Residual)

수는 표 6, 7과 같다. 그림에서 점선은 식 (18), (19)에 의해 계산된 점들의 한계선이다. 이 표를 통해 앞에서도 언급하였듯이 식 (18)과 (19)가 실험치에 가장 근접한 식임을 알 수 있다. 그러므

표 6. 실험치와 전체 계산치와의 비교(Peak)

계산식	실험치 / 계산치		
	평균	표준편차	COV
4-2(4)	0.446	0.085	0.19
4-2(18)	1.013	0.192	0.19
4-3(9)	2.058	0.687	0.33
*4-3(9)	0.969	0.308	0.32
4-3(27)	0.963	0.256	0.27

*는 실험을 통해 구한 τ_R 이용

표 7. 실험치와 전체 계산치와의 비교(Residual)

계산식	실험치 / 계산치		
	평균	표준편차	COV
4-2(4)	0.536	0.096	0.18
4-2(19)	1.992	0.166	0.17
4-3(9)	1.513	0.368	0.24
*4-3(9)	0.716	0.173	0.24
4-3(28)	0.977	0.238	0.24

*는 실험을 통해 구한 τ_R 이용

로 직접적인 전단실험을 통하지 않더라도 이 두식을 사용하면 한 장소에서의 뿌리에 대한 기본적인 성질만 주어지면 그 장소에서의 뿌리에 의한 전단강도의 증가량을 공학적인 측면에서 만족할 만한 정도로 예측할 수 있다.

5. 확률론적인 방법에 의한 해석

앞에서는 실험결과와 모델에 의한 해석결과의 비교분석을 통해 실제의 자연사면에 적용할 수 있는 새로운 모델로 접근해 보았다. 이절에서는 앞의 결과를 바탕으로 임의의 자연사면에 적용할 수 있는 ΔS_R 값에 대한 확률론적 모형화를 시도하였다. 이에 임의의 사면에서의 흙과 뿌리의 특징에 대한 확률론적인 분석을 통하여 사면전체에 대해 이용 가능한 기대값을 구하고자 하였다.⁸⁾

아래의 순서대로 진행하면, 임의의 사면에서의 흙과 뿌리의 기본적인 특징과 대략적인 뿌리의 실제 분포상태를 조사하면 뿌리에 의한 보강효과 정도를 알 수 있다.

5.1. 흙의 Parameter와 뿌리의 E_R , T_R 값의 결정

임의의 사면에서의 뿌리의 보강효과 정도를 가능하기 위해서는 흙의 성질이 강도정수의 형태로 주어져야 한다. Waldron¹³⁾은 여러 종류의 흙속에 같은 수종의 뿌리를 관입시킨 상태에서 여러

번 전단실험을 실시함으로써 흙의 특징에 따라 뿌리에 의한 전단강도의 증가치가 어떻게 달라지는가를 보여주었다. 그의 실험결과를 보면 잘 다져진 실트질 점토가 모래나 비교적 입자가 작은 자갈성분과 함께 있을 때 다른 흙에 비하여 뿌리에 의한 전단강도의 증가에 다소 유리한 것으로 나타났다. 하지만, 그는 뿌리의 면적비를 변화시키면서 같은 종류(Barley)의 뿌리를 포함한 여러종류의 흙에 대해 또 다른 전단실험을 시행한 결과, ΔS_R 값은 뿌리의 면적비에 따라서는 비례적으로 증가하지만 흙의 종류에 따라서는 현저한 차이가 나지 않음을 보였다.¹⁴⁾ 그러므로 사면에서의 뿌리에 의한 전단강도 증가치를 구하고자 할 때는 흙의 성질보다는 뿌리의 것에 대한 고려를 중점적으로 하여야 하리라 본다. 표 8은 기존의 실험을 통하여 측정된 여러수목의 뿌리에 대한 대표적인 인장강도를 Wu¹⁷⁾가 정리한 것이다.

5.2. 뿌리직경의 확률론적 기대값(d_p) 산정

Noboru⁹⁾의 연구에 의하면 대부분 수종의 나무는 몸체의 직경에 관계없이 d_p 의 값이 거의 일정하게 나타났다. 한편, 여러문헌의 조사결과 대부분 수종의 나무는 직경이 0.05cm 이하의 뿌리 분포를 무시하면, d_p 값이 약 0.15~0.50cm 인 것으로 나타났으며 이들의 평균은 0.322cm, 그리고 변동계수는 0.360으로 산출되었다.

표 8. 여러가지 수목의 역학적 Property

Species	Common Name	T_R (kg/cm ²)	E_R (kg/cm ²)
Salix	Willows	90~360	2000~3000
Populus	Poplars	50~380	2000~3000
Alnus	Alders	40~740	
Pseudotsuga	Douglas Fir	190~610	
Acer Sacharinum	Silver Maple	150~300	6000
Tsuga Heterophylla	Western Hemlock	270	1700
Vaccinum	Huckleberry	160	
Hordeum Vulgare	Barley	150~310	400~900
	Grass, Forbs	20~200	
Aleurites	Candlenut	60	
Acacia	Acacia	110	

5.3. 뿌리의 면적비 산정

임의의 사면에 존재하는 뿌리의 양(면적비)은 여러요소들의 복합적 관계에 의해 좌우된다. 같은 장소의 뿌리의 면적비라 하더라도 지표면으로부터의 깊이가 달라질 수록 면적비가 변화한다. 수목의 뿌리는 토양의 심부가 깊어질 수록 토양이 견밀하게 되고 통기가 나빠지는 등 성장에 부적합한 환경조건이 되므로 어느 깊이부터는 수직생장이 억제된다. Heilman⁶⁾은 회귀분석으로, 흙의 단위중량이 1.74~1.83kg/m³ 이상이면 Douglas Fir 묘목의 근계발달이 제한을 받으며 토심이 깊어짐에 따라 단위중량이 증가하므로 견밀도가 낮은 표토를 따라 근계가 발달한다고 하였다. 또한, Noboru⁹⁾에 의한, 몇몇 수종의 뿌리에 대한 회귀분석의 결과로부터 흙고단면적(나무가슴높이의 몸체 단면적)이 발달함에 따라 뿌리의 수직생장이 둔화되며, 대부분 2m 내외까지 주근이 발달함을 알 수 있었다.⁷⁾ 문헌조사의 결과 대부분 사면에서의 뿌리의 면적비는 거의 10⁻⁴~10⁻² 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 한편, 이 분포의 평균값은 0.0013, 그리고 변동계수는 1.128이었으며, 더불어 Median 값은 0.0007이었다. 그러므로 위의 결과를 토대로, 일반적인 사면에서의 뿌리의 면적비는 0.001 정도로 보아도 무난하리라 판단된다.

5.4. ΔS_R 값의 확률론적 모형화

앞의 자연사면에 무작위하게 분포하는 뿌리에 대한 확률론적 해석을 근거로 하여 빈약한 자료만이 주어진 경우에 일반적으로 ΔS_R 값의 추정에 이용가능한 확률론적 모델로의 접근을 아래와 같이, 주어지는 자료의 정도에 따라 몇가지로 구분하여 시도해 보았다.

1) 뿌리의 T_R 값이 주어지는 경우

앞의 문헌조사과정에서 구한 일반적인 사면에서의 뿌리의 면적비(0.001)와 대표값 직경(0.32cm)을 이용하면, 임의의 사면에서 이 대표값 직경에 해당하는 뿌리의 T_R 값만을 문헌조사나 직접실험을 통하여 구한 후, 앞에서 이용한 식(18), (19)에 이들 값들을 대입하면 대략적인 ΔS_R 값을 구할 수 있으리라 판단된다. 예를 들

어, 본 연구의 실험현장에 분포하는 뿌리의 T_R 값을 이용하여 ΔS_R 값을 구해 본 결과 실험결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

2) 뿌리의 면적비(a_r)가 주어지는 경우

지금까지의 연구결과, 수목의 종류에 따른 뿌리의 인장응력에 따라 정도의 차이는 있겠지만 면적비와 ΔS_R 값 간에는 비례적인 관계가 있음을 알았다. 한편, 임의사면의 흙의 성질이 일반적인 경우의 것에 비해 특별히 다르지 않다면 ΔS_R 값의 변화에 큰 영향을 미치지 않는다는 사실도 알았다. 또한 추정컨데, 수목의 탄성계수값이 상호간에 큰 차이가 없다면 인장강도의 차가 다소 나더라도, 실제사면의 Peak 상태 파괴시 인장강도 전체가 동원되지 않음을 감안할 때 뿌리의 면적비만으로 뿌리에 의한 전단강도의 대략적인 증가량을 추정할 수 있으리라 사료된다. 아래의 식은 금번 현장실험에서 구한 ΔS_R 과 뿌리의 면적비(a_r)간의 수치적인 관계를 나타낸 것이다.

$$\Delta S_R = K f(a_r) \quad (29)$$

여기서, K=수정계수

이제까지의 타연구의 문헌을 보면 대부분이 ΔS_R 과 a_r 과의 관계를 선형적으로 나타내었고 실험의 결과를 보더라도 이것이 합당한 것으로 나타났다. 그러므로 각 실험장소의 ΔS_R / a_r 값(β)을 상수로 하는 함수관계에 오차수정을 위한 수정계수를 곱하여 ΔS_R 을 구할 수 있다. 즉 식(29)는 아래와 같이 된다.

$$\Delta S_R = K \beta a_r \quad (30)$$

아래의 식은 금번실험결과와 a_r 과 ΔS_R 의 관계를 회귀분석을 통하여 구한 식이다.

$$\Delta S_R = 76.88 a_r (\text{kg} / \text{cm}^2)$$

이 관계식에서 ΔS_R 의 기대값과 COV는 다음과 같다.

$$E(\Delta S_R) = \beta E(K) E(a_r) = 76.88 E(K) E(a_r) \quad (31)$$

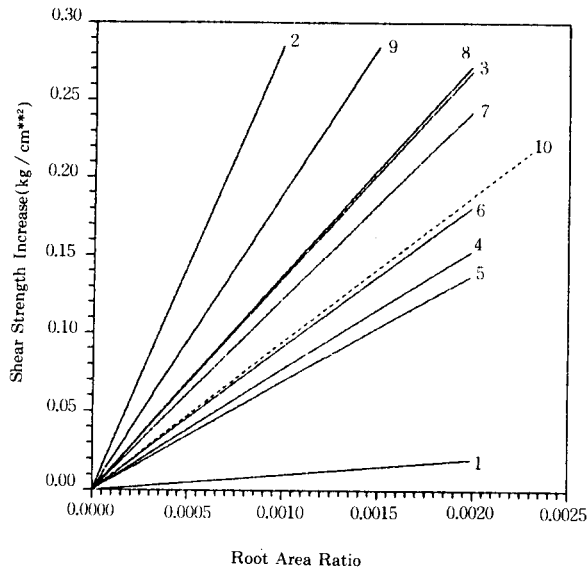
$$\text{COV}(\Delta S_R) = \sqrt{\text{COV}(K)^2 + \text{COV}(a_r)^2} \quad (32)$$

여기서, E(·) = (·)의 기대값

이때, 금번실험현장의 E(K)와 COV(K)는 1.0, 0.173이고, E(a_r)과 COV(a_r)는 0.0016, 0.491이었다. 이를 위의 식에 대입하여 계산한 결과, E(ΔS_R)과 COV(ΔS_R)는 각각 0.123kg/cm².

0.520 이었다. 그림 13은 금번실험결과와 선형 회귀분석 곡선($\Delta S_R - a_r$)을 타연구의 결과와 함께 나타낸 것이다.

한편, 실험을 통해 관찰된 자료가 없는 경우에 일반적으로 우리나라의 야산에 적용할 수 있는 면적비와 ΔS_R 간의 수치적 관계를 지금까지 마련된 자료를 이용하여 식(30)과 같은 형태로 유도



No.	수종	연구자
1	Alder	Endo & Tsurut(1969)
2	Sugar Maple	Riesterberg & Sovonickdunford(1983)
3	Western Hemlock	Wu et al(1987)
4	밤나무	본 연구의 실험결과
5	Candlenut(도토리)	
6	Spruce-hemlock	
7	Rocky Mtn. Douglas Fir	Gray and Leiser(1982)
8	Acacia	
9	Chinese Banyan	
10	4 5 8의 평균	

그림 13. 뿌리의 면적비와 ΔS_R 값

해 보았다. 그림 13에 나타난 우리나라의 야산에 대체적으로 많이 분포하는 도토리나무(Candlenut), 아카시아 그리고 금번 실험현장의 밤나무의 뿌리 면적비에 따른 전단강도의 증가량 곡선을 사용하여 식을 구해 보면 다음과 같다.

$$\Delta S_R = 94.3K a_r (\text{kg/cm}^2) \quad (33)$$

여기서, $E(K)$ 와 $COV(K)$ 가 1.0, 0.342 이므로 문헌만을 이용함으로 생기는 모델 오차가 30~40% 정도 됨을 알 수 있다. 그림 13의 10번 곡선은 식 (33)의 관계를 나타내는 것이다.

3) 극히 자료가 부족한 경우

앞절에서 문헌조사를 통해 구한 일반적인 사면에서의 면적비의 $E(a_r)(=0.00125)$ 과 $COV(a_r)(=1.128)$ 을 식 (33)의 관계로 식(31), (32)에 대입하여 강도증가를 구하여 보면 아래와 같다.

$$E(\Delta S_R) = 94.3 E(K) E(a_r) = 0.118 \text{kg/cm}^2$$

$$COV(\Delta S_R) = \sqrt{COV(K)^2 + COV(a_r)^2} = 1.2$$

위의 값은 실험자료 없이 문헌조사만에 의한 결과로서 그 전단강도 증가값을, 첫 예측치로서 0.12kg/cm^2 정도로 보고 사면안정해석을 할 수 있음을 나타내며, 이때의 변동계수는 필연적으로 커서 평균값의 1.2배가 됨을 보여준다.

6. 뿌리의 보강효과를 고려한 사면안정 해석

뿌리의 보강효과를 고려치 아니한 상태의 사면 파괴에 대한 안전율과 이를 고려한 상태의 안전율과 비교해봄으로써 사면전체에서의 뿌리가 가지는 보강효과의 정도를 가늠해 볼 필요가 있으리라 본다.

일반적인 사면안정해석방법은 한계평형상태를 기본으로 하므로 금번 연구의 Peak 상태를 이와 동일한 경우로 두고 해석함에 무리가 없으리라 보며, 현장실험이 시행된 장소가 전형적인 원호 파괴의 경험이 있는 곳이란 점을 고려하여 일반적인 유효사면해석 방법을 동원하여 안정성검토를 하였다. 하지만 앞절에서도 언급했듯이 식생의 뿌리는 대부분 표토를 따라 분포하므로 사면 파괴면 전체에 걸쳐 뿌리의 보강효과가 유발되지는 못한다. 이러한 이유로 일반적인 2차원 사면 해석으로는 이를 고려한 안정성 검토가 어려우므로 3차원 사면안정해석을 하여야 한다. Wu¹⁰⁾는 그림 14에서 보는 바와 같이 사면파괴모형을 간단히 하여 아래와 같이 3차원 해석을 시행하였다.⁹⁾ 그림 14에서 뿌리보강영역(D)은 실제사면의

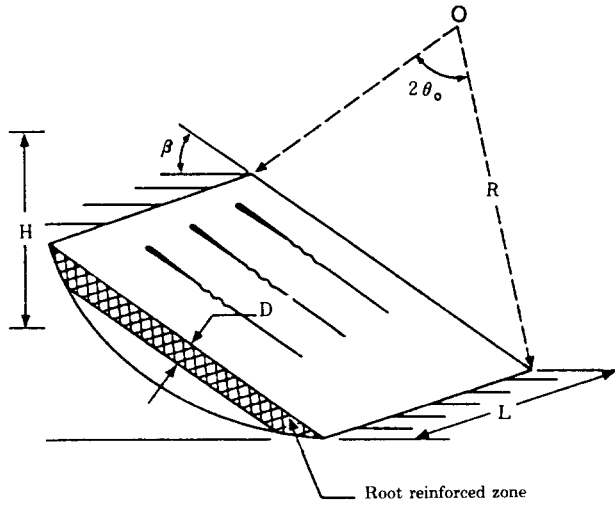


그림 14. 3차원 해석 Model

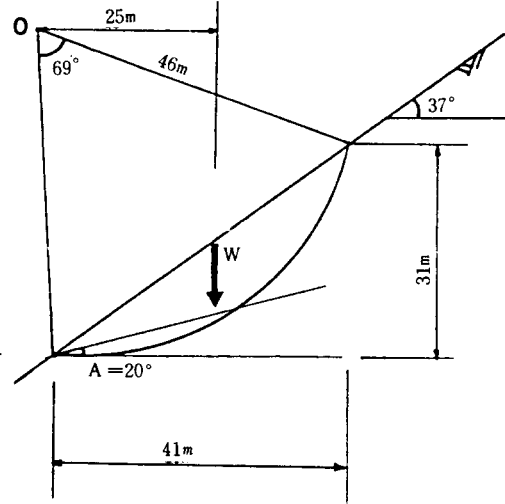


그림 15. 현장실험지의 과거 사면파괴 모형

뿌리의 분포상태를 간단히 한것으로 평균적으로 뿌리가 거의 분포하는 깊이까지를 말한다.

$$F_s = M_R / M_L \quad (34)$$

여기서, M_R = 저항모멘트

M_L = 활동모멘트

한편, 저항모멘트는 흙의 전단강도에 의한 것 (M_{RS})과 뿌리가 유발시키는 전단강도의 증가치에 의한 것 (M_{RR})의 합이므로 다음과 같이 된다.¹⁷⁾

$$M_R = M_{RS} + M_{RR} \quad (35)$$

$$M_{RS} = 2S_s L R^2 \theta + 2S_s R^3 \sin^3 \theta / 3 \quad (36)$$

$$M_{RR} = 4S_r D R^2 \theta \cos^2 \theta + 2S_r D L R / \sin \theta \quad (37)$$

$$M_L = \gamma_t L R^2 (\theta - \cos \theta \sin \theta) X \quad (38)$$

여기서, X = 중심점(O)에서 파괴단면 도심까지의 거리

측량을 통해 실험이 행해진 장소의 대략적인 지형을 파악하고 이를 이용하여 3차원 해석법에 적용할 수 있는 자료를 구하기 위하여 그림 15와 같이 간단히 하였다. 여기에서 파괴면은 현상

실험시 측정해 두었던 실제 사면파괴면의 아래에서 중심까지의 각도(A)를 근거로하여 가정하였다. 이에 의해 안전율을 계산한 결과 표 9와 같았으며, 이 결과로 현장실험이 실시된 곳의 과거의 사면파괴시, 뿌리에 의한 보강효과가 상당히

표 9. 사면안정해석 결과(실험현장)

M_{RS}	M_{RR}	M_L	F_{ss}	F_{sr}
(ton-m)				
1.3×10^5				
4.7×10^5	6.6×10^3		3.61	3.67

* F_{ss} 는 뿌리의 보강효과를 고려치 않은 경우의 안전율
 F_{sr} 보강효과를 고려한 안전율

미미했을 것으로 판단된다. 한편, 앞의 경우보다는 얇은 사면파괴면을 임의로 가정하고, 흙의 강도정수를 조금 낮추어, 도해법에 의해 표 10과 같이 각각의 자료를 구하여 앞의 사면안정해석과 동일한 과정으로 해석해 보았다. 표 11은 계산결과이다. 이로부터 흙의 강도정수가 작을

표 10. 사면안정해석을 위한 Parameter(가정치)

γ_t	ϕ	C	σ_y	S_s	S_r	L	R	X	D	θ
(ton-m)	(degree)			(ton/m ²)			(m)			(degree)
1.74	37	1.0	1.97	2.97	1.3	8	16.4	8.9	1	26

표 11. 사면안정해석 결과(가정치)

M_{Rs}	M_{Rr}	M_L	F_{ss}	F_{sr}
(ton-m)				
6.5×10^3	1.3×10^3	1.9×10^3	3.42	4.11

* F_{ss} 는 뿌리의 보강효과를 고려치 않은 경우의 안전율
 F_{sr} 보강효과를 고려한 안전율

때와 사면파괴의 규모가 적을 때 그리고 얇은 사면파괴가 생길 때에 상대적으로 뿌리의 보강효과가 커짐을 알 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 뿌리와 흙의 합성체에 대한 전단시, 뿌리에 의한 전단강도의 보강효과에 대해 중점적으로 알아보았다. 이 과정에서 기존의 뿌리보강 모델에 의한 계산치와 실제 현장실험을 통해 측정된 실험치와의 비교를 확률론적인 방법으로 수행함으로써 실제 자연사면에 적용 가능한 모델로의 접근을 시도하였다. 한편, 앞에서 구한 전단강도의 보강치를 뿌리의 보강효과를 고려하는 기존의 사면안정해석방법에 적용하여 해석하는 과정에서, 뿌리의 보강효과에 의한 안전율의 증가가 뚜렷하게 나타나기 위한 조건을 알아보았다.

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 뿌리와 흙간의 마찰응력은 계산치와 실험치 사이에 상당한 차이가 있었는데, 이는 계산시 뿌리를 일반적인 보강재와 같이 균일한 상태의 끈은 섬유로 보지만 실제의 뿌리는 흙속에서 매우 불규칙적인 모양을 가짐으로 계산식을 적용하기에는 부적합한데 그 이유가 있다. 그러므로 일반적인 점토성분을 많이 함유한 사질토 사면에서는 계산치에 4.5를 곱해 줌으로써 실제 뿌리와 흙간의 마찰응력을 구할 수 있으리라 판단된다.
- 2) 무작위하게 분포하는 전단면에서의 뿌리의 초기기움각은 90° 로 보아도 무리가 없으리라 본다.
- 3) 흙의 종류변화에 따른 뿌리에 의한 전단강도의 증가량은 매우 둔감하므로 ΔS_R 계산시 흙에 대한 것보다는 뿌리의 성질에 대한 고려가 중점

이 되어야 하리라 본다.

4) 사면안정에 영향을 미치는 뿌리는 대부분 측근이며, 또한 거의 대부분의 뿌리가 지표로부터 1~3m 내에 분포하므로 사면안정해석시 뿌리의 보강영역(D)은 1m 내외로 합이 합당하리라 사료된다.

5) 자연사면에서의 뿌리직경의 기대값(d_p)은 문헌조사가 결과 0.15~0.5cm 정도였으며, 평균값은 0.32cm, 변동계수는 0.36이었다. 그러므로 극히 자료가 부족한 경우에는 공학적인 견지에서 이 값을 d_p 로 보아도 무난하리라 사료된다.

6) 문헌조사결과 면적비는 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 사이에 분포하였으며 평균은 0.001 정도로 나타났고 이의 변동계수는 1.13이었다.

7) 실험치와의 비교결과, 실제 사면에서는 흙의 전단파괴시, 뿌리의 인장응력은 전체인장강도의 50% 정도가 동원되므로 Wu 등⁽³⁾에 의해 제안된 식, $\Delta S_R = 1.15 T_R a_r$ 을 자연사면에 적용하기 위해서는 상수 1.15를 0.6으로 수정하여 $\Delta S_R = 0.6 T_R a_r$ 로 하여야 하리라 본다.

8) ΔS_R 을 산정키 위한 자료가 극히 부족한 경우에 이를 추정하기 위해 기존의 자료를 사용하여 면적비와의 관계를 도출한 결과, 우리나라 자연사면에서는 ΔS_R 과 뿌리의 면적비간에 $\Delta S_R = 94.3 a_r$ 의 수치적 관계를 적용하여도 무리가 없으리라 사료되며, 특히, a_r 값을 측정치 못한 경우 ΔS_R 을 추정해 본 결과 0.118 kg/cm^2 이었으며, 이의 변동계수는 1.2이었다.

9) 뿌리 보강효과로 인한 사면에서의 안전율 증가는 사면파괴의 규모가 대체로 작은, 얇은 파괴가 예상되는 지역이 유리하다.

감사의 글

본 연구는 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 이루어진 것으로, 이에 깊은 감사를 표한다.

참 고 문 헌

1. Brown, C.B., and Sheu, M.S.(1975). "Effect of deforestation on slopes," J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 101(2), 147~166.

2. Gray, D.H.(1974). "Reinforcement and Stabilization of soil by vegetation," J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 100(6), 695~699.
3. Gray, D.H., and Ohashi, H.(1983). "Mechanics of fiber reinforcements in sand", J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 109(3), 335~353.
4. Gray, D.H., and Al-Refeai, T.(1986). "Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand," J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 112(8), 804~820.
5. Greenway, D.R., Anderson, M.G., and Brian-Boys, K.C.(1984). "Influence of vegetation on slope stability in Hong Kong." Proc. 4th Int. Symp. Landslides, Toronto, Canada, Vol.1, 399~404.
6. Heilman, P. (1981). "Root penetration of Douglas-Fir Seedlings into compacted soil." Forest sci. 27,660~666.
7. Kozlowsky, T.T.(1971). Growth and development of tree, pp.196~250.
8. Maher, M.H., and Gray, D.H.(1990). "Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers," J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 116(11), 1661~1677.
9. Noboru, K.(1979). Illustration of tree roots, pp. 121~139.
10. Scott, E.S., and Nicholas, S. (1989). "Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear," J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 115(8), 1134~ 1147.
11. Waldron, L. J.(1977). "Shear resistance root permeated homogeneous and stratified soil," J. Soil Sci. Soc. Am., 41, 843~849.
12. Waldron, L.J., and Dakessian, S.(1981). "Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties," Soil Sci., 132(6), 427~35.
13. Wu, T.H., McKinnell, W.P., and Swanston, D.N. (1979). "Strength of tree roots and andslides on prince of Wales Island, Alaska," Can. Geotech. J., 16, 19~33.
14. Wu, T.H. (1984). "Soil movements on permafrost slopes near fairbanks, Alaska," Can. Geotech. J., 21, 699~709.
15. Wu, T.H., McOmber, R.M., Erb, R.T., and Beal, P.E.(1988). "Study of soil-root interaction," J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 114(12), 1351~1375.
16. Wu, T.H., Beal, P.E., and Lan, C.(1988). "In situ shear test of soil-root system." J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 114(12), 1376~1394.
17. Wu, T.H.(1990). "Soil stabilization using vegetation." by personal Communication.

(접수일자 1991. 3. 30)