

## 일면전단시험에 의한 수목뿌리의 토양보강효과 평가

차두송<sup>1</sup> · 오재현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 산림과학대학, <sup>2</sup>강원도 산림개발연구원 동부지원

### An Evaluation of Tree Roots Effect on Soil Reinforcement by Direct Shear Test

Du Song Cha<sup>1</sup> and Jae-Heun Oh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea  
<sup>2</sup>Eastern Branch, Forest Research Institute, Gangwon Province, Jeongseon 233-876, Korea

**요 약:** 수목은 뿌리에 의해 토양수분의 제거와 기계적인 보강효과를 통해 토괴가 사면 하부로 이동하는 것을 막아 안정하게 하는 역할을 한다. 본 연구는 자연사면상에서 이런 보강효과를 정량화하기 위해, 표준사에 다른 형태로 수목의 뿌리를 내재시켜 직접전단시험을 실시하였으며, 공시뿌리로서는 잣나무가 이용되었다. 실험은 뿌리가 내재된 것과 그렇지 않은 토양에서 실시하였으며, 여러 수준의 수직구속 압력에서 최대 전단저항력을 측정하였다. 뿌리에 의해 증가된 토양전단저항력은 측정된 토양의 내부마찰각과 점착력 등의 토양변수를 이용하여 계산하였으며, 전단상자 내의 뿌리배열에 의한 효과도 함께 분석하였다. 실험결과 전단저항력은 뿌리의 개수와 직경이 증가할수록 증가하였으며, 뿌리의 배열 형태가 십자 배열일 때 가장 큰 효과를 나타내었다. 또한 실험을 통해 확인한 전통적인 토양보강 모델과의 비교에서는 기존 모델의 선형성으로 실제 실험 결과와 일치하지 않는 경향을 나타내었다.

**Abstract:** Trees enhance slope stability against down slope mass movement through the removal of soil water by transpiration and by the mechanical reinforcement of their roots. To assess the magnitude of this reinforcement on natural slope stability, direct shear tests were made on dry sand reinforced with different array types of roots. *Pinus koraiensis* was used as root specimens. The peak shear resistance at each normal stress level was measured on the rooted and unrooted soil specimens. Increased soil resistance( $\Delta S$ ) by roots was calculated using parameters like internal friction angle and cohesion of tested soil and also evaluated the effects of root array in tested soil. As results, we find that shear resistance increased in tested soil shear box as diameters and arrayed numbers of root specimen increased and cross root array in tested soil had a much greater reinforcing effect than other root arrays. Comparison of traditional root-soil model with experiments showed that simulated reinforce strength by the model was different with those obtained by the experiment due to its linearity.

**Key words :** *Pinus koraiensis*, root-soil model, shear resistance, slope stability

## 서 론

토양 속에 존재하는 수목의 뿌리는 주변의 토양 입자와 더불어 하나의 합성체를 형성하려는 경향을 보이므로 흙 입자와 뿌리 사이에는 비교적 강한 부착력이 생기게 된다. 임의의 사면에서 파괴가 발생하면 위의 합성체는 파괴에 의해 밀려나가는 부분과 그렇지 아니한 두 부분으로 나뉘

게 되고, 전단면상의 양쪽의 토괴를 관통하는 뿌리에는 파괴에 의한 변위가 커질수록 인장력이 증가하게 되며, 이에 의해 전단저항이 증가하게 된다. 이때 뿌리의 길이가 충분히 길어 뿌리와 흙입자간에 발생하는 마찰저항력이 뿌리의 인장력보다 커져야만 확실한 보강효과를 기대할 수 있다. 이런 뿌리의 내재에 의한 전단강도의 증가를 예측하기 위한 간단한 이론적 모델은 여러 공학자들에 의해 연구되어져 왔다(Wu *et al.*, 1979; Waldron and Dakesian, 1981). 그러나 토양의 물리적인 특성과 뿌리의 분포 밀도에 의해서 현장에서의 뿌리보강효과의 실제적인 양들을 결정하는 것은 많은 어려움을 주고 있다. 이와 관련

\*Corresponding author

E-mail: jhoh7083@provin.gangwon.kr

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10699-0) 지원으로 수행되었음.

하여 산림토양을 보강하는 수목 뿌리의 메커니즘을 설명 하려는 많은 모델들이 개발되었고, 이런 연구들은 문헌으로부터 뿌리의 재료특성들에 관한 데이터들을 얻을 수 있기 때문에 재료들의 특성들은 종종 가정하거나(Waldron, 1977), 토양-뿌리 시스템에 적용하지 않은 연구로부터 재료의 특성을 추정하기도 하였다(Shewbridge and Sitar, 1985).

국내에서는 식생에 의한 사면안정(이인모 등, 1991)과 목본 식물에 의한 사면안정(차두송 등, 2002)에 관한 연구가 진행되었으며, 목본식물 뿌리의 인장강도(조주형과 이종성, 2000)에 관한 연구도 진행되었다. 특히 차두송과 지병운(2003)은 실제 수목의 공간분포 예측모델을 구성하여 전단깊이별로 전단면상에 존재하는 뿌리의 면적비율을 예측하므로써 보다 실제에 가까운 붕괴저항 예측이 가능하게 되었다. 그러나, 뿌리의 토양보강효과를 보다 정확히 예측하기 위해서는 뿌리의 강도 특성뿐만 아니라 토양 내에서의 거동에 대해서도 정확한 이해와 예측이 필요할 것으로 사료된다. 그러나 기존의 토양전단 시험기에서는 뿌리를 내재한 전단시험자체가 불가능할 뿐만 아니라, 뿌리의 전단저항력 이외의 보강력으로 추정되는 뿌리와 토양간의 마찰력 즉, 토양의 전단파괴시 발생하는 인발저항력을 측정하는 것에도 무리가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 수목에 의한 사면안정 효과를 예측 및 평가할 때 필요한 수목 뿌리가 내재된 토양의 전단저항력을 측정, 분석하여 뿌리가 내재된 토양의 강도증가분을 정량적으로 파악하고 향후 뿌리가 내재된 자연사면의 안정 해석 및 안정성 평가에 실제로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

기존의 뿌리보강 연구에서 실시된 실험에서는 초본류 및 2-3년생 목본류의 뿌리를 많이 사용하였다. 그러나 이런 뿌리는 가늘고 유연성이 좋지만 실제 붕괴면에서 붕괴방지능을 발휘한다고 생각되는 목질화한 수목의 뿌리와는 분명한 차이가 있으며, 이러한 차이점은 실제로 뿌리가 하고 있는 작용과는 다른 결과를 나타낼 수 있다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 공시재료로서 직경 6~7 mm와 10~12 mm의 잣나무 뿌리를 표준사에 넣어 일면전단시험을 실시, 전단과정 중에서 발휘되는 뿌리보강의 실태를 파악하였다. 사용된 수목뿌리는 강원대학교 학술림내의 IV 영급의 잣나무림을 대상으로 하였고, 공시목의 뿌리에 손상이 가지 않도록 주변의 토양을 주의하여 파낸 뒤 채취하여 사용하였다. 또한 전단시험에 사용된 공시토양은 입경 분포가 0.10 mm~0.30 mm 표준사를 중량비로 혼합하여 사용하였으며 입경분포에 대한 특성은 Figure 1과 같다.

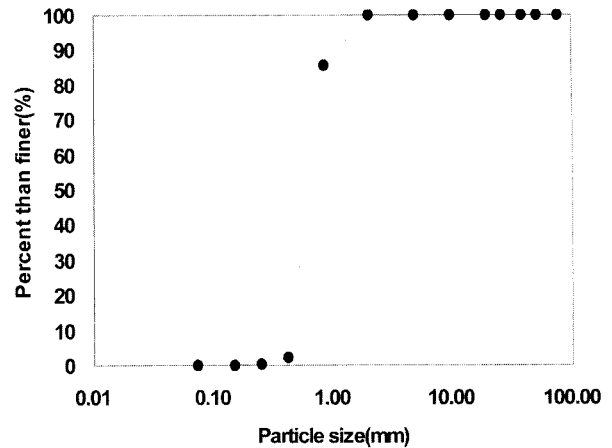


Figure 1. Particle distribution of standard soil used for direct shear test.

### 2. 실험 장치 및 방법

일면일내전단시험에 사용된 실험장치는 Figure 2와 같이 직경이 30 cm, 두께가 2 cm인 황동 원형 파이프를 30 cm 높이로 구성된 전단상자를 이용하여 높이 15 cm의 장소에서 상부 상자와 하부 상자로 나누어, 하부상자가 고정된 상태에서, 상부 상자에 전단력을 부가해서 전단변위를 발생시키도록 하였다(오재현 등, 2004).

실험은 수직응력을 0, 0.07, 0.14, 0.28, 0.42 및 0.57 kgf/cm<sup>2</sup>의 6개 수준으로 실시하였으며, 전단상자는 상하방향에 최대 5분의 뿌리를 넣을 수 있도록 고려하였다. 실험은 뿌리의 분수(0, 1, 3 및 5분)와 굵기(6~7 mm, 10~12 mm)를 다르게 배치하여 Figure 3과 같이 6종류의 뿌리배열형태에 대해서 실시하였다. 즉, 뿌리 배열방법은 중앙 1분 배열, 3분 횡 및 종방향 배열, 5분 횡 및 종방향 배열, 5분 십자형 배열로 하였다. 전단시험에 사용된 표준사는 미리 기건시켜 정해진 밀도가 될 때까지 층별로 다짐을 실시하면서 정해진 밀도로 조정하였다. 시료로 사용한 뿌

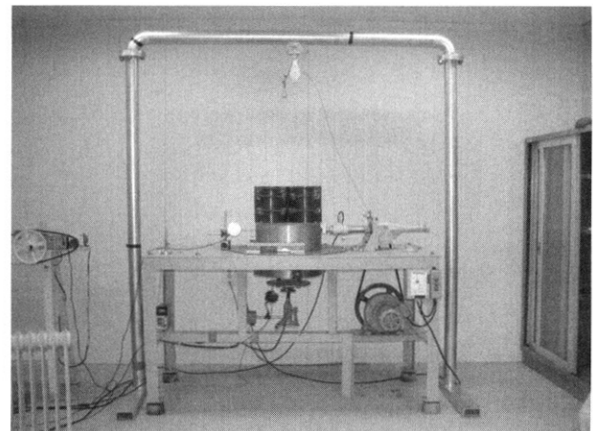


Figure 2. Shearing apparatus for rooted soil.

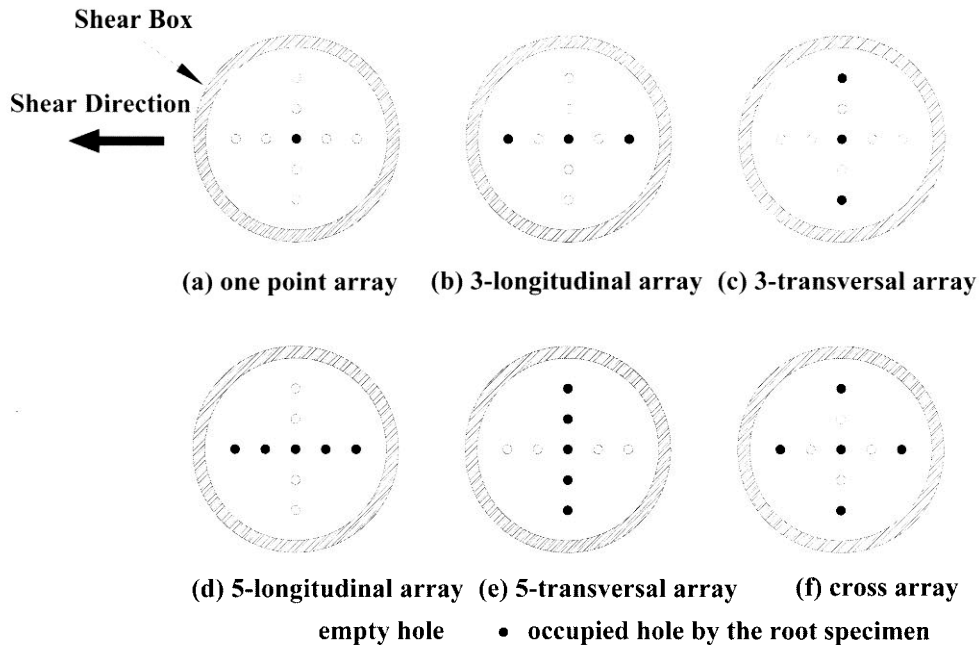


Figure 3. Plan view of tested root arrays.

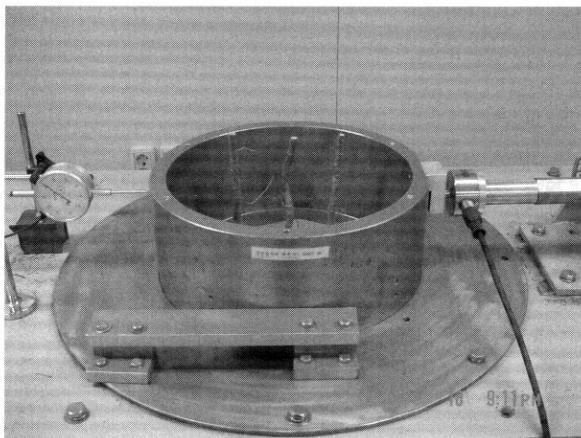


Figure 4. Transducers for measuring shear force and displacement of rooted soil.

리는 가능한 통직한 것을 선정하였으며, Waldron(1977)의 뿌리보강모델의 초기조건과 일치하도록 하였다.

일면 직접전단 실험시 뿌리가 내재된 토양의 전단변위와 힘을 측정하기 위해 Figure 4와 같이 전단상자의 측면

부에 변위계와 압축용 로드셀을 설치하였다. 실험에 사용한 센서 및 자료수집 장치는 Table 1과 같다.

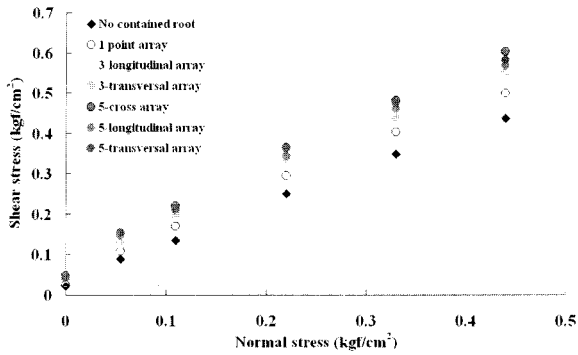
### 결과 및 고찰

#### 1. 뿌리의 직경별, 배치별 토양전단저항력의 변화

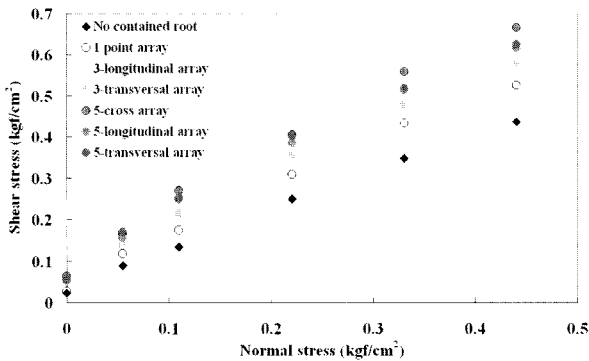
Figure 5의 (a)와 (b)는 각각 뿌리직경 6~7 mm와 10~12 mm일 때 전단상자내의 뿌리배치별로 표준사내에서 수직 구속압 변화에 따라 실험한 결과이다. 표준사의 함수율은 12%(dry basis)로 기건상태의 것을 이용하였는데, 본 실험과 같은 경우 반복실험을 통해 처리별로 전단저항력 변화를 정량화 하는 것이 주목적이므로 표준사와 같이 일정한 효과를 나타내는 토양이 요구되어 적용하였다. 표준사만을 이용하여 전단실험한 결과는 Figure 6과 같다. Waldron and Dakessian (1981)가 제안한 뿌리에 의한 토양강도 증가분( $\Delta S$ )을 실험을 통해 정량화한 결과, 직경이 커질수록 전단저항력이 커지고, 수직 구속압이 증가할수록 각 처리별로 뿌리가 내재되지 않은 경우보다 전단저항력의 증가폭이 커지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 구속압력이

Table 1. Instrumentation devices and sensors used for direct shear test of rooted soil.

Items	Model	Specification	Maker
Displacement transducer	DT-50D M150	500 mm	KYOWA Co.
Load cell	LCN-A-10kN	10 kN	KYOWA Co.
Strain amplifier	WGA-710A	1 ch	KYOWA Co.
A/D converter	DAQCard-AI-16XE-50	20 kHz sampling	National Instruments Co.
Software	LabVIEW 6.1	-	National Instruments Co.



(a) diameter class of 6~7mm



(b) diameter class of 10~12mm

Figure 5. Comparisons of shear strength by the various root array.

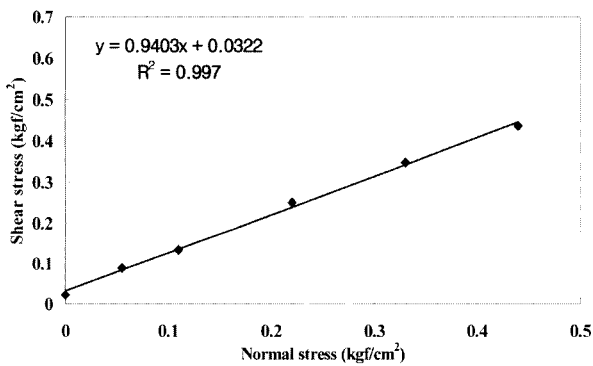


Figure 6. Particle size distribution and Mohr-Coulomb curves of standard sand.

증가하면서 뿌리표면과의 마찰력이 증가하기 때문으로 판단되며, 종방향으로 뿌리를 배열한 것보다는 횡방향으로 배열한 경우가 전단저항력 증가분이 더 크게 나타났다. 직경급 6~7 mm의 경우 3개의 뿌리를 종으로 배열했을 때와 횡으로 배열했을 때 19.3%, 5개의 뿌리를 배열한 경우는 11.0%의 비율로 횡방향으로 배열한 것이 전단저항력 증가분이 크게 나타났다. 십자형으로 배열한 경우는 3개의 뿌리를 횡으로 배열한 경우보다 44.1%, 5개의 뿌리를 횡으로 배열한 경우보다 7.7% 전단저항력증가분이 더 크게 나타나 가장 효과가 큰 것으로 분석 되었다. 직경급 10~12 mm의 경우에서도 횡방향으로 배열한 뿌리가 3개

인 경우와 5개인 경우 종방향 배열에 비해 각각 7.7%와 6.9% 전단 저항력 증가분이 크게 나타났다. 십자형의 배열에서는 6~7 mm급 뿌리의 경우와 마찬가지로 3개의 뿌리를 횡으로 배열한 경우와 5개의 뿌리를 횡으로 배열한 경우 각각 54.9%, 13.7%의 전단저항력 증가분이 크게 나타났다.

또한 뿌리의 직경급이 커질수록 전단저항력의 증가폭이 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉 전단면적에 대해 뿌리가 차지하는 비율이 커질수록 뿌리의 배열형태에 대한 효과가 작아지는 경향이 있다고 할 수 있다. 그러나, 본 연구와 같은 경우 수목의 뿌리가 말뚝처럼 작용하는 것으로 생각 할 수도 있지만, 뿌리의 경우는 유연성이 말뚝의 경우보다 크기 때문에 뿌리자체가 토압을 받아 견디는 형태라기보다는 뿌리의 인장저항력과 인발저항력에 의해 토괴자체를 잡고 있는 형태가 된다고 볼 수 있다. 따라서 직경이 클수록 인장력과 인발력에 대한 정수가 증가하므로 전단저항력이 커지는 것은 당연한 결과일 것이다.

2. Mohr-Column의 파괴 기준에 의한 검토

전술한 바와 같이 Figure 5에서 토양속 뿌리의 개수가 증가할수록 점착력과 내부마찰각이 증가하는 경향을 볼 수 있는데, 단순히 점착력의 증가뿐만 아니라 수직응력이 커질수록 전단저항력의 변화가 뿌리의 내재 개수별로 차

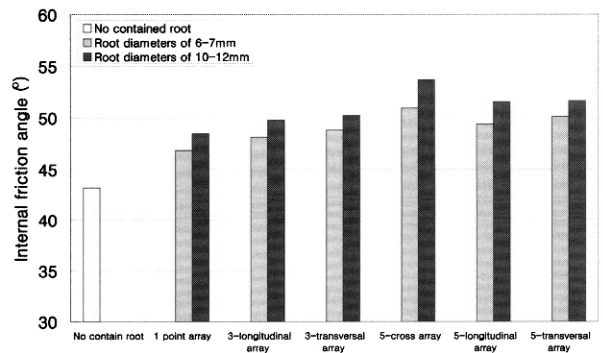


Figure 7. Comparisons of internal friction angle by diameters and array of tree roots.

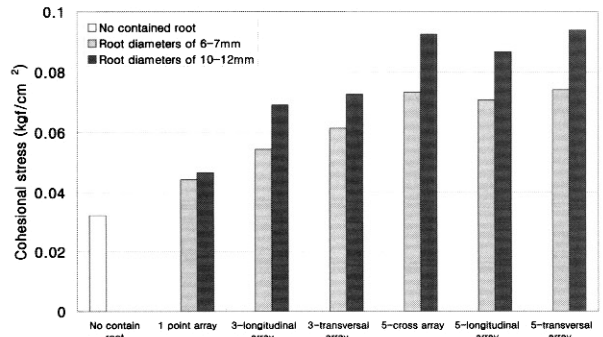


Figure 8. Comparisons of cohesion stress by diameters and array of tree roots.

Table 2. Comparison of  $\Delta S$  between theoretical and experimental values.

Root diameter (mm)	Root array	Theoretical $\Delta S$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Experimental $\Delta S$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Difference (kgf/cm <sup>2</sup> )	Percent (%)
6~7	1 point	0.044	0.036	0.008	23.1
	3-longitudinal	0.054	0.057	0.003	4.6
	3-transversal	0.061	0.068	0.007	9.7
	5-cross	0.073	0.098	0.025	25.2
	5-longitudinal	0.071	0.082	0.011	13.8
	5-transversal	0.074	0.091	0.017	18.6
	Average				
10~12	1 point	0.047	0.051	0.004	8.6
	3-longitudinal	0.069	0.084	0.015	17.7
	3-transversal	0.073	0.091	0.018	20.2
	5-cross	0.093	0.141	0.049	34.4
	5-longitudinal	0.087	0.116	0.029	25.3
	5-transversal	0.094	0.124	0.030	24.4
	Average				

이가 더 커지는 것을 볼 수 있다. 즉 내부마찰각의 변화가 있음을 나타내는 것이다. 이러한 변화에 대한 산술적인 수치를 알아보기 위하여 각 실험처리별로 모어 쿨롱의 파괴곡선을 구하여 내부마찰각과 점착력의 변화를 분석하였다(Figure 7과 Figure 8). 분석결과 점착력의 증가뿐만 아니라 내부마찰각의 증가현상도 함께 나타났다.

이러한 사실로 미루어 뿌리의 토양 보강효과는 단순히 점착력의 증가분으로만 해석할 것이 아니며 내부마찰각 즉, 모어 쿨롱의 파괴곡선에 있어서 직선의 기울기에도 영향을 미친다고 할 수 있다. 이러한 현상은 구속압력이 증가할수록 뿌리의 표면에 작용하는 마찰력이 증가하여 토양이 전단파괴 될 때 인발저항력 자체가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 구속압력이 증가할수록 전단저항력의 증가폭이 커지는 것이다.

Figure 7과 8을 통해 얻은 모어 쿨롱의 파라미터를 통해 얻은 점착응력의 값을 Figure 6과 같이 뿌리를 내재하지 않은 경우의 점착응력과 차를 이용해 이론적인 뿌리에 의한 강도증가분을 계산하였다. 또한 각 뿌리의 개수별 인장강도의 증가분을 수직응력별로 구한 뒤 이것을 평균낸 값을 실험값으로 하여 모어 쿨롱의 이론식을 통해 구한 값과 비교하였다. 그 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 이론적인  $\Delta S$ 값과 실험값으로 구한  $\Delta S$ 값의 차이는 실험자료의 회귀방정식의 결정계수값이 높을수록 이론치와 실험치의 차이가 적게 나타났다. Table 2와 같이 6~7 mm는 평균 15.8%의 차이를 보이고 있으며, 뿌리직경 10~12 mm는 21.8%의 결과 차이를 보이고 있다. 물론 이 자료만으로 선형적으로 증가하는 점착력 증가분의 이론이 틀리다고 할 수는 없지만 다소 차이가 있는 것으로 판단된다. 즉 선형적으로 거동하는 모어 쿨롱의 파괴식이 지금과 같은 저구속 압에서는 선형적으로 거동하지 않을 수도 있다는

가정을 할 수 있게 된다. 따라서 보다 많은 실험과 분석을 통해 현상에 가까운 모델을 정립할 필요가 있다.

## 결론

토양내 뿌리에 의한 전단강도의 증가를 정량화하기 위한 시도는 여러 과학자들에 의해서 이루어져 왔지만 대부분 선형적인 모델을 기반으로 하고 있으며 복수의 뿌리에 대한 토양보강모델은 거의 없다. 특히 국내의 경우는 뿌리의 인장강도 및 전단강도 특성에 대한 보고만이 있을 뿐 토양과 수목의 뿌리가 함께 고려된 실험자료는 보고된 바가 없는 실정이다. 이에 본 연구는 수목 뿌리의 토양보강 효과를 정량적으로 파악하는데 매우 큰 의미를 가질 것으로 판단되며, 이를 토대로 실제 자연사면의 정확한 안정해석에 기여하므로써 안정구조물 설계의 합리화를 도모하는데 이바지 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 기존의 선형적인 토양보강 모델은 실제의 토양파괴거동과는 차이가 있으므로, 차후 함수율이 고려된 토양전단 실험과 다양한 수목뿌리의 강도특성과 함께 재고려 해야 할 것으로 판단된다.

## 인용문헌

- 오재현, 최병구, 지병운, 차두송. 2004. 뿌리의 토양보강 효과 평가를 위한 실험장치의 구축. 산림공학기술 2(1) : 42-50.
- 이인모, 정상규, 임충모. 1991. 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험 연구. 대한토질공학회지 7(2) : 51-66.
- 조주형, 이종성. 2000. 식생뿌리의 전단강도 보강에 의한 사면안전을 해석. 한국조경학회지 27(5) : 81-93.

4. 차두송, 오재현, 지병윤, 전근우. 2002. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(I)-소나무 뿌리의 공간분포와 물리적 특성-. 한국임학회지 91(1) : 71-78.
  5. 차두송, 지병윤. 2003. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(III)-잣 나무 뿌리의 공간분포-. 한국임학회지 92(1) : 33-41.
  6. Shewbridge, S. and Nicholas. S. 1985. The influence of fiber properties on the deformation characteristics of fiber-soil composites, Geotechnical engineering, Report No. UCB/GT85-02, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, pp. 100.
  7. Waldron, L. J. 1977. The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of American Journal 41 : 843-849.
  8. Waldron, L. J. and Dakessian, S. 1981. Soil reinforcement by roots : calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil Sci., 132(6) : 427-435.
  9. Wu, T. H., McKinnell, W. P. and Swanston, D. N. 1979. Strength of tree roots and landslides on prince of Wales Island, Alaska, Can. Geotech. J., 21 : 699-709.
- 
- (2005년 8월 21일 접수; 2005년 9월 16일 채택)