

Nylon Net(대체근계)의 토질강도보강효과에 대한 실험적 연구  
- 토양수분제어하의 단순전단시험에 의한 해석 -

이창우 · 윤호중 · 정용호

국립산림과학원 산림환경부 임지보전과

Experimental Study on Reinforcement Effects of  
Soil Shear Strength by Nylon Net  
(Substitute Materials Simulating a Root System)  
- Analysis using Simple Shear Tester under Soil Suction Control -

**Lee, Chang-Woo · Youn, Ho-Joong and Jeong, Yongho**

Div. Forest Soil Conservation, Korea Forest Research Institute.

**ABSTRACT**

The reinforcement of soil shear strength by nylon net as substitute materials simulating a fine root system was evaluated by soil strength parameters(apparent cohesion( $c$ ) and internal friction angle( $\tan\phi$ )), using simple shear tester which clearly depicts shear deformation and controls soil suction. And the results of shear test by using bamboo as a substitute materials simulating a main root system and using nylon net as a substitute materials simulating a fine root system were compared.

The reinforcement of soil strength by nylon net are expressed by apparent cohesion more than internal friction angle. In addition the increment of apparent cohesion by nylon net reached a peak in suction 60 cmH<sub>2</sub>O. Different from with bamboo, the possibility of the change on internal friction angle( $\tan\phi$ ) caused by the soil water condition was shown in shear strain 20% condition. These results show that the mechanism of reinforcement by substitute materials simulating root system may be different in the condition of various soil water content.

*Key Words : Soil strength, Root, Soil suction, Reinforcement, Shear strain.*

---

**Corresponding author** : Lee, Chang-Woo, Div. of Forest Soil Conservation, Dept. of Forest Environment, Korea Forest Research Institute 207 Cheongnyangni 2-Dong, Dongdaemoongu, Seoul Republic of Korea, 130-712,  
Tel : +82-2-961-2558, E-mail : leecw@foa.go.kr; 2changwoo@hanmail.net

**Received** : 2 May, 2006. **Accepted** : 5 June, 2006.

## I. 서 론

수목근계의 산사태 붕괴방지효과에 관한 평가는 크게 통계적 수법에 의한 것과 수목근계의 역학적정량화 수법에 의한 것으로 나눌 수 있다(李利雨, 1998). 통계적 수법은 산림의 상황(벌채지, 임령 등)을 붕괴발생개소수(또는 면적)와 관련시켜 통계적으로 해석하여 수목의 영향을 평가하는 방법이다.

통계적수법에 의한 연구는 대부분이 산림벌채, 임령과 붕괴와의 관계, 인공림과 천연림의 붕괴방지효과 등으로 평가하여 왔다. 하지만, 대부분의 조사지역의 지질조건이 화강암에 편중되어 있으며 근계의 효과가 토질, 지형 등 타 입지인자와도 관련이 있어 모든 조건에 동일하게 적용하기가 곤란하다는 지적을 받고 있다(塚本良則, 1987).

한편, 수목근계의 역학적정량화 수법은 수목근계가 붕괴발생에 영향하는 정도를 정량화하고 그 메커니즘을 파악하고자 하는 방법이다. 흠속에 존재하는 식물의 뿌리는 흠 입자들을 응집시켜주는 역할을 하기 때문에 흠속에 수목근계가 넓고 뻗뻗하게 존재할수록 응집력을 증가시켜 붕괴를

저지시킨다. 이 힘을 토양의 긴박력이라 하며, 이를 표현하는 방법으로 인장강도, 인발(引拔)저항력 등을 측정한다(阿部和時, 1991). 하지만 인장강도의 평가연구는 뿌리가 끊어지기 전에 뽑힐 수가 있어 과대치가 나올 우려가 있으며, 인발저항력에 의한 평가 역시 현장시험의 경우는 실제 붕괴면이 아닌 곳에서의 평가가 이루어질 우려가 있다는 지적을 받고 있다(執印康裕, 1997). 따라서 흠의 변형과 강도를 면밀히 파악하기 위한 방법으로 주로 전단시험을 실시한다. 전단시험은 붕괴면을 가상하여 뿌리가 있는 토양을 직접 전단함으로써 뿌리에 의한 산사태 방지효과 정도를 파악할 수 있는 가장 확실한 방법이다. 즉, 뿌리의 양, 종류 등과 토질강도정수와의 관계를 명확히 하므로 그 결과를 사면안정해석 등에 직접 활용할 수 있다.

수목근계의 사면안정에 미치는 영향파악을 위해 Table 1과 같이 전단강도 측정을 통한 연구가 수행되어왔다(예를 들면, 近藤泰造·鶴田武雄, 1968; 小橋澄治·西井洋史, 1987; 塩野裕司 등, 1988; Gray, D. H. and H. Ohashi, 1983; Waldron, L. J. and Suren Dakessian, 1981). 하지만, Table 1에서 알 수 있듯이 많은 실험결과에

**Table 1.** Results of reinforcement by root and substitute materials by direct-shear test(李利雨, 1998).

Place	Root Type	Water condition	Reinforcement effect(kg/cm <sup>2</sup> )	Influence of parameter		Scientist
				c	φ	
In-situ	Alder, Birch	Natural	0.01-0.12	○	×	Kondo(1968)
In-situ	-	Saturation	0.02	—	—	Marui(1981)
In-situ	Cryptomeria	Saturation	0.015	○	×	Abe(1984)
In-situ	bamboo	Saturation, Unsaturation	0.06-0.21	○	×	Yagi(1990)
Indoor	Alder	Saturation, Unsaturation	0.05-0.15	○	○	Sioya(1983)
Indoor	Pine, alfalfa	Saturation	0.008-0.17	○	×	Waldron(1977)
Indoor	Cryptomeria	Saturation	0.2-0.6	○	×	Abe(1991)
Indoor	Nylon	Dry	0.1-0.3	×	○	Kobashi(1987)
Indoor	reed	Saturation	0.05	○	○	Gray(1983)
Indoor	Bamboo, Nylon net	Saturation, Unsaturation	0.2-0.12	○	○	Shuin(1997)

도 불구하고 뿌리의 전단강도보강효과가 토질강도정수의 점착력과 내부마찰각 증가에 미치는 영향이 명확하지 않다. 이창우(2004)는 그 이유로 수목근계의 종류 및 수분조건이 영향을 충분히 고려되지 않았다는 점과 기존의 모든 시험이 파괴에 이를 때까지의 변형-응력관계를 명확히 파악할 수 없는 일면전단시험을 실시하였다는 점을 지적하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 李禎雨 등(1999)은 신형단순전단시험기를 개발하였고, 대체근계로 식물의 주근의 성질을 반영하는 물질로 대나무를 이용하여 전단변형중의 토질강도보강효과와 토양수분의 영향을 평가 검토하였다(이창우, 2004). 대체뿌리로 대나무는 식물뿌리의 목질부인 주근에 해당하므로 식물뿌리 전체에 대한 평가를 위해서는 주근에 대한 평가이외에 부드러운 성질의 세근에 의한 영향까지 검토해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 이창우(2004) 논문의 후속으로 식물의 세근의 성질을 반영하는 물질인 Nylon net를 이용하여 전단변형중의 토질강도보강효과와 토양수분의 영향을 평가 검토하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

실험에 사용된 전단시험기는 자연사면의 표층붕괴에 대응한 저구속압 조건하에서 전단 strain과 전단응력관계를 파악할 수 있고, 강우의 침투에 의해 불포화에서 포화상태로 전환되는 토양수분변화에 의한 토질강도특성 파악을 목적으로 고안된 대형 단순전단시험기로서 이창우(2004)에 자세한 시험기의 구조 및 특징을 소개하였으며, 구체적인 시험내용 또한 동일하므로 본 논문에서는 생략한다.

시험시료는 Toyoura 표준사를 사용하였으며, 수직하중, 수분조건을 제어하면서 실시하였다. 대체뿌리의 토질강도보강효과를 구명하기 위해 표준사만의 시험과 Nylon net를 삽입한 시험으로

나누어 각 조건의 전단응력을 비교하였다. 하중조건은 실제 산림사면의 표층붕괴에 대응시키기 위해, 저압력하중인 25, 50, 75gf/cm<sup>2</sup>의 3종류로 하였으며, 전단상자내 흙의 자중은 평가하지 않았다. 수분조건은 전단상자 최상부(높이 15cm)에서 수면이 있는 경우를 suction 0 cmH<sub>2</sub>O로 정의하고 수위를 15cm 간격으로 낮추어서 suction 0 cmH<sub>2</sub>O ~ 60 cmH<sub>2</sub>O의 범위 내에서 실험을 실시하였다.

대체뿌리는 가로 10cm, 세로 30cm, 두께 0.05cm의 Nylon net를 식물세근의 성질을 반영하는 물질로 간주하여 사용하였다. 전단상자 안에 설치한 Net는 5cm 간격으로 총 3매를 설치하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. Nylon Net를 포함한 시료의 변형과정 및 토양수분이 토질강도정수에 미치는 영향

토양수분변화가 전단변형에 미치는 영향을 동일 전단strain에서  $\sigma$ - $\tau$ 관계의 y축 절편인 점착력(c)과 기울기인 내부마찰각( $\tan\phi$ )을 각 전단strain과 수분조건에서 구하였으며 그 결과를 Figure 2의 (a)에 나타내었고, 각 전단변형과정과 토양수분의 영향을 토질강도정수로 분석한 결과를 (b)에 나타내었다. Figure 2에서 점착력(c)은 전단 strain의 증가와 함께 증가하는 경향을 보였다. 또한 점착력은 수분조건에 따라 명확한 차이를 보였으며 전단 strain이 1%에서부터 수분조건의 영향을 받아 20%에 이르기까지 그 경향이 변하지 않고 suction 60cm H<sub>2</sub>O에서 최대치를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 전단변형이 진행될수록, 수분조건이 불포화일수록 Nylon net를 포함한 토양의 점착력은 증가하는 것을 알 수 있다.

한편 내부마찰각( $\tan\phi$ )은 전단이 진행됨에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으나, 전단변형이 20% 정도 진행된 상태에서 수분상태가 불포화일수록 감소하는 경향을 보였다.

대체뿌리로서 대나무를 포함한 실험결과(이창

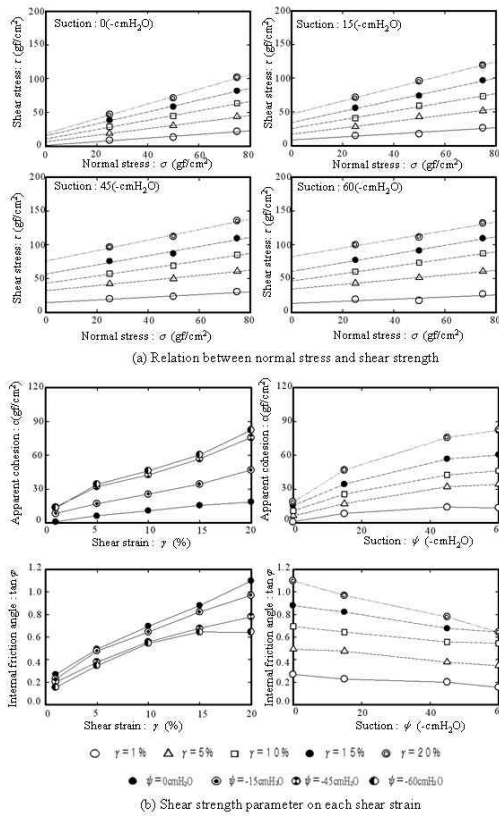


Figure 2. Relation between normal stress and shear strength on each shear strain.

우, 2004)에서 대나무를 포함한 토양의 전단강도 정수는 전단변형의 진행에 따라 증가한다는 점이 Nylon net에서의 실험결과와 동일하다. 그러나 대나무를 사용한 경우와 Nylon net를 사용한 경우의 결과를 나타낸 Figure 3에 의하면 성질이 다른 두 대체뿌리를 포함한 토양의 전단강도정수가 수분변화에 따라 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 대나무의 경우는 점착력이 모관관계수 두 부근인 suction 45 cmH<sub>2</sub>O에서 최대를 나타내고 다시 suction 60 cmH<sub>2</sub>O에서 감소하는 경향을 보였으나, Nylon net의 경우는 suction 60 cmH<sub>2</sub>O에 까지 계속해서 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 즉, 본 결과는 대체뿌리의 성질차이가 수분조건변화에 따라 흙의 변형에 대한 저항이 다를 수 있다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

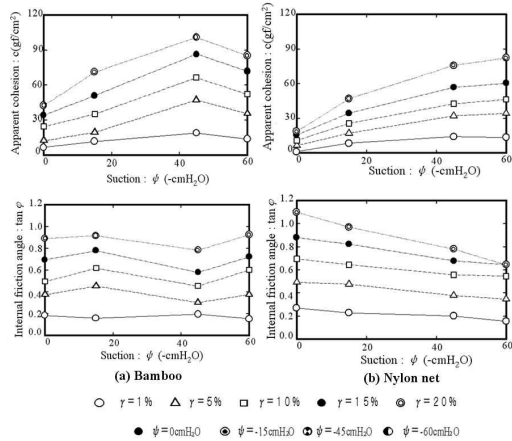


Figure 3. Comparison of reinforcement by substitute materials simulating a root system on  $c$ ,  $\tan\phi$ .

### 2. Nylon Net의 토질강도 보강효과

Nylon Net에 의한 토질강도 보강효과를 파악하기 위해, Figure 2의 결과를 표준사만의 시험결과와 함께 Figure 4에 비교하였다. Figure 4의 (a)에는 Nylon net를 포함한 시료와 포함하지 않은 시료의 점착력( $c$ )을 전단변형과정과 수분조건별로 나타내었다. 전단 strain 5% 시점부터 Nylon net의 보강효과가 점착력의 차이로 나타나기 시작하며 특히 suction 60cm H<sub>2</sub>O에서 그 차이가 최대가 되는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 식물세균에 상응하는 부드러운 보강재의 경우 목질부를 가진 주근(대나무)과 달리 토양 수분이 불포화 일수록 점착력의 효과를 증대시키는 것으로 해석할 수 있다. 또한 모든 변형과정에서 전단초기에는 미세하지만 거의 전 전단 과정에서 Nylon net에 의한 점착력의 증분이 발생하고 있으며, 전단이 진행됨에 따라 증분이 더욱 커지는 경향을 보였다.

한편, Figure 4의 (b)에는 수분조건과 전단변형에 따른 Nylon net를 포함한 시료와 포함하지 않은 시료의 내부마찰각( $\tan\phi$ )의 비교결과를 나타내었다. 그 결과 수분변화에 따라 Nylon net에 의한 마찰각의 변화 경향이 나타났다. 특히 전단 strain 20%에서 포화상태일수록 마찰각이 커지고

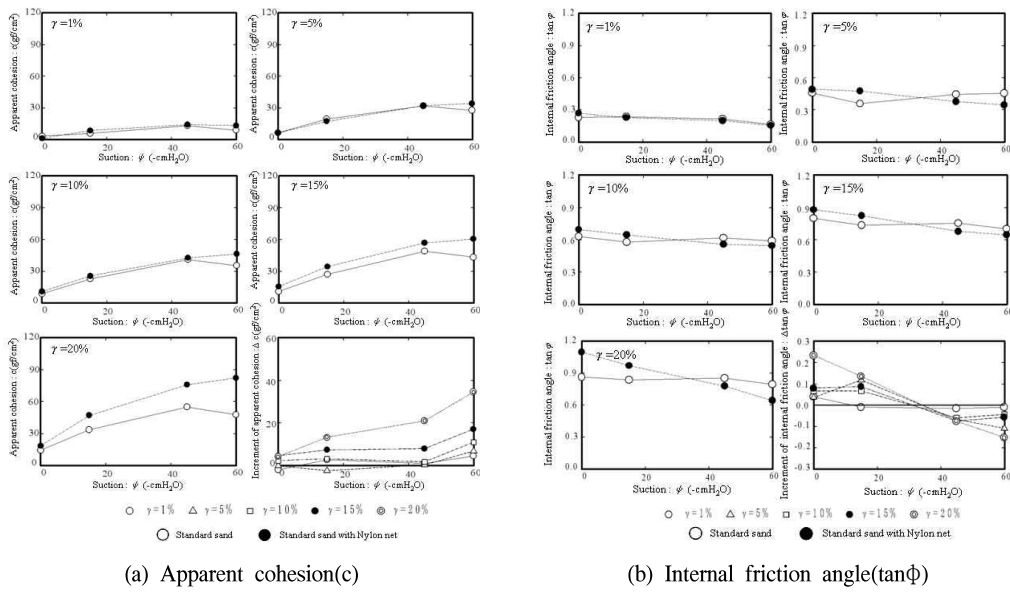


Figure 4. Influence of soil suction and shear strain on shear strength parameters by Nylon net.

불포화상태일수록 마찰각이 감소하는 경향을 보였다. 이는 Nylon net가 점착력의 성분 이외에도 마찰각의 증가 혹은 감소에도 영향을 하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 하지만, 이러한 경향의 차이는 전단 strain 20%에서만 나타났으며 15% 이하에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있어 본 실험결과만을 가지고 단정하기는 어렵다.

식물근계의 세근과 같이 부드러운 성질을 가진 근계의 대체뿌리로 본 시험에 이용된 Nylon net에 의한 토질강도보강효과는 점착력성분에 의한 것이며, 내부마찰각 또한 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 점착력의 증가성분은 한계 모관수두를 넘어 suction 60cm H<sub>2</sub>O에서 최대로 보이는 것으로 나타나, 불포화상태일수록 점착력이 증가하는 경향이 있는 것으로 판단되었다.

결론적으로 대나무의 경우와 Nylon net의 경우를 비교한 Figure 5에 나타낸 바와 같이 대체뿌리로서 사용한 대나무와 Nylon net의 의한 토질강도정수의 변화는 점착력에서 수분변화에 따라 그 경향이 명확히 달라진다는 것은 알 수 있었으며, 이는 식물뿌리의 주근과 세근의 토질강도 보

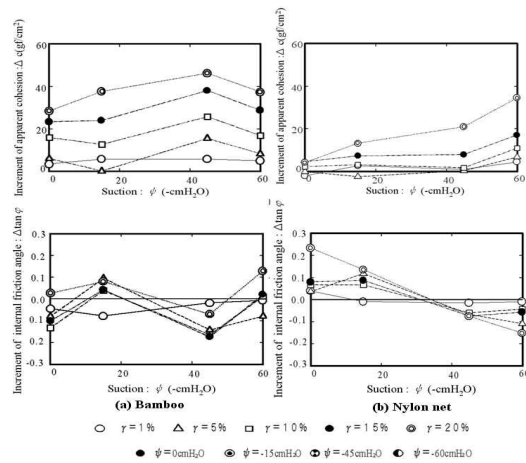


Figure 5. Comparison of increment of c, tanφ by substitute materials simulating a root system.

강효과의 메커니즘이 다르다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 또한 내부마찰각의 경우 부드러운 소재인 Nylon net의 경우는 전단강도정수 중 점착력의 증분 이외에도 마찰각의 증분에도 기여하고 있는 가능성을 보여주고 있으며, 이에 대해서는 추후에 보다 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 전단과정과 토양수분변화의 제어가 가능한 전단시험기를 이용하여 식물뿌리의 세근의 대체뿌리로 Nylon net를 포함한 흙의 토질강도보강효과 및 토양수분의 영향을 토질강도정수로 분석·검토하였다. Nylon net를 포함한 토양의 토질강도보강효과는 대나무의 경우와 달리 불포화일수록 증가하고 이는 토질강도정수 중 점착력의 증가성분으로 나타났다. 한편 전단이 20% 진행된 상태에서 내부마찰각이 수분변화에 따른 변화가 보여 대체뿌리가 부드러운 성질의 것은 수분변화에 따라 내부마찰각에도 영향하고 있을 가능성을 시사하고 있다. 본 결과는 대체뿌리의 성질에 따라 보강효과 메커니즘이 다를 수 있다는 것을 내포하고 있으며 추후에 두 가지 대체뿌리를 이용한 추가적인 실험 및 구체적인 분석과 해석을 통해 그 메커니즘을 밝히고 식물뿌리가 토질강도에 미치는 영향을 일반화 할 필요가 있는 것으로 사료된다.

#### 인 용 문 헌

近藤泰造·鶴田武雄. 1968. 樹木の根が土のせん断強さに与える作用(第1報). 林業試験場北海道支場年報 : 167-189.  
 小橋澄治·西井洋史. 1987. 根系に似た材料を含む土の一面せん断試験. 第98回日林論 607-608.  
 阿部和時. 1991. 根系の引き抜き抵抗力によるせん

断強度の推定. 日本緑化工學會誌 16(4) : 37-54.

塩野裕司·小橋澄治·丸井英明. 1983. 斜面崩壊に及ぼす根系の影響について. 斜面緑化研究 5 : 27-35.

李昶雨. 1998. 模擬根系の土質強度補強効果に関する研究-土壤水分制御下における單純せん断試験による解析-.東京大學大學院博士論文.

李昶雨·執印康裕·鈴木雅一·太田猛彦. 1999. 土壤水分制御が可能な新型單純せん断試験装置の開発. 砂防學會誌 52(3) : 43-10.

이창우. 2004. 대나무(대체근계)의 토질강도보강 효과에 관한연구-토양수분제어하의 단순전단시험에 의한 해석-. 한국환경복원녹화기술학회지 7(2) : 46-51.

執印康裕. 1997. 土壤水分變化が樹木根系の土質強度定數補強効果に与える影響評価に関する實驗的研究. 東京大學大學院博士論文.

塚本良則. 1987. 樹木根系の崩壊防止効果に関する研究. 東京農工大學農學部演習林報告 23 : 65-123.

Gray, D. H., and H. Ohashi. 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sands. ASCE. J. Geotech. Engineering 109(3) : 335-353.

Waldron, L. J., and S. Dakessian. 1981 Soil Reinforcement by Roots : Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil Science 132(6) : 427-435.