

식생뿌리에 의한 비탈면 안정과 보강에 관한 실험적 연구

조주형¹⁾ · 안봉원²⁾

¹⁾ 환경관리공단 · ²⁾ 경희대학교 조경학과

An Experimental Study on the Reinforcement and Stabilization of Slope by Vegetation Roots

Cho, Ju-Hyoung¹⁾ and Ahn, Bong-Won²⁾

¹⁾ Environmental Management Corporation,

²⁾ Prof. Dept. of Landscape Architecture, Kyung Hee Univ.

ABSTRACT

This study measured the shearing resistance of the roots of the *Sasamorpha purpurascens*, *Miscanthus sinensis*, *Lespedeza cyrtobotrya* by the tensile strength gained through their individual tensile test for the Root Reinforcement Model. The results to have measured this stress by experiment are as follows.

- 1) The mean root diameter of the *Lespedeza cyrtobotrya* used for this experiment was 2.19mm and the mean tensile stress was calculated as 929.489kgf/cm². As for the *Sasamorpha purpurascens*, its mean root diameter was 1.727mm, and the mean tensile stress was 292.069kgf/cm². And as for the *Miscanthus sinensis*, its mean root diameter was 0.814mm, and the mean tensile stress was 696.947kgf/cm². And so, it was grasped that *Lespedeza cyrtobotrya* was highest in tensile stress.
- 2) ΔCr (kg/cm²) of the shearing resistance calculated by estimating the areal ratio of roots at 10⁻³ is 1.069kg/cm² in *Lespedeza cyrtobotrya*, 0.336kg/cm² in *Sasamorpha purpurascens*, and 0.801kg/cm² in *Miscanthus sinensis*. That is, *Lespedeza cyrtobotrya* has the highest shearing resistance. However, since a precise analysis of the controlled factors of the slope analyses are demanded for more accurate dynamic analyses, the future demands a study on this.

Key words : root reinforcement, root tensile strength, slope stability by vegetation

1. 서 론

자연을 편리하게 이용하고자 하는 인간의 욕구는 자연적인 지형을 끊임없이 변경하기도 하고 때로는 인공적인 비탈을 만들어 인간의

편익을 위해 이용하고 있다. 이로 인하여 발생된 비탈면의 안정은 무시할 수 없는 중요한 사항이며, 비탈면 안정을 확보하기 위해 사면 녹화공법과 인공재료에 의한 보호공법이 선택되고 있다. 이중 원지형의 조화 및 경관적인

배려로 인하여 비탈면을 식물로서 피복하여 토양의 침식과 비탈면의 붕괴를 방지하고 훼손된 자연경관을 회복하기 위한 비탈면 녹화공법이 현재 활발히 시행되고 있다.

자연비탈면에서의 식생뿌리의 역할은 비탈면의 붕괴방지에 있어서 중요한 영향을 미치는 인자라고 볼 수 있다. 이것은 식생뿌리가 토양의 전단저항력의 증대에 영향을 준다고 인지할 수 있으나 뿌리를 포함한 흙의 전단저항력을 측정하기는 간단한 문제가 아니다.¹⁾ 그러므로 비교적 측정이 가능한 뿌리의 拔根저항력이 뿌리와 토양을 단단히 묶어주는 土壤緊縛作用의 지표가 된다고 가정하면 전단저항력이 拔根저항력에 비례한다고 볼 수 있다. 즉, 이것은 임의의 비탈면에서 파괴가 발생하면 흙과 뿌리의 합성체는 파괴에 의해 밀려 나가는 부분과 그렇지 않은 두 부분으로 나뉘게 되고, 전단면상의 토괴를 관통하는 뿌리에는 파괴에 의한 변위가 커질수록 인장응력이 증가하게 되며, 이에 의해 전단저항이 증가하게 된다고 설명할 수 있다.

또한 식생의 뿌리는 토양에서 양분을 흡수해서 식물의 생육에 필요한 물질을 저장함과 동시에 지상부를 지지하는 작용을 하고 있다. 이러한 뿌리의 지지력은 토양의 무게 및 긴박력, 흙의 전단저항력에 직접적인 관계가 있다고 본 Noboru(1979)의 말을 역학적으로 해석해보면 토양의 강도정수가 서로 다른 토양에 있어서 뿌리를 포함한 흙의 전단강도는 흙의 강도를 표시하는 점착력 C , 내부마찰각 ϕ 의 성분가운데 식생뿌리에 의한 강도증가는 주로 점착력 C 성분의 증가로 볼 수 있다는 것을 의미한다. 전단강도의 증가를 예측하기 위한 연구의 이론적 기초는 뿌리의 인장강도에서 저항력을 구한 연구(北村·難波, 1981)와 뿌리에 의

한 사면안정화의 실험연구(陶山·原, 1986) 등이 있으며, 간단한 이론적 모델은 Waldron(1977), Wu et al.(1979), 그리고 이와는 별도로 Gray and Leiser(1982)와 같은 공학자들에 의해 유사하게 발달되어 왔다. 이들의 연구는 붕괴전단면의 붕괴저항력 C_r 을 흙의 Coulomb강도식에 넣어, 붕괴발생에 대한 흙과 뿌리의 저항력을 포함한 강도 $R_t = c + C_r + \sigma \cdot \tan \phi$ (c : 점착력 σ : 수직응력 ϕ : 내부마찰각)에 의하여 구하였다.

그러므로 본 연구에 있어서는 표층붕괴의 발생에 대한 식생뿌리의 저항력을 흙의 단위면적당의 평균인장강도로 측정한 Wu et al.(1979), Waldron and Dakessian(1981)의 공학자들에 의해 제시된 뿌리보강 Model을 기초로 하여 비탈면에서 생육이 가능한 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya*)와 조릿대(*Sasamorpha purpurascens*), 참억새(*Miscanthus sinensis*)를 대상으로 뿌리의 인장시험을 통해서 뿌리에 의한 전단강도의 증가를 측정하고자 하였다.

실험 결과를 토대로 뿌리의 보강효과를 공학적 수치로 나타내 보고자 하였으며, 식생뿌리가 비탈면 저항력에 미치는 영향에 대해서 고찰해 보았다. 본 연구 방법과 결과는 앞으로 지형변화로 인하여 발생하는 절·성토 비탈면에 있어서 전단저항력이 강한 식생수종의 선발과 함께 식생비탈면의 안정 해석에 있어서 중요한 정량적 자료를 제시할 것으로 사료된다.

II. 실험재료 및 방법

1. 공시재료 선정 및 시료채취

식생 뿌리에 의한 전단강도의 증가를 예측하기 위하여 시험재료는 원산지가 우리나라이면서, 비탈면 식재계획에 있어서 경관적 이미지 요소가 강한 조릿대와 비탈면 식생공법에서 종자파종 및 식재로 이용되며, 고속도로 절토비탈면에서 상대우점도가 높은 식물로써 자연 침입하여 생육하고 있는 식물(우보명·권태호·김남춘, 1993) 중 참억새와 참싸리를 선정하였다.

1) 왜냐하면 탄성체에 있어서는 응력이 어느 한계에 도달하면 파괴가 일어나므로 강도가 분명하지만, 탄소성 또는 소성 유동을 보이는 흙에 있어서는 과도한 변형이 일어나서 그 값이 어느 한계를 넘는다면, 이것을 파괴라고 볼 수도 있으므로 흙의 강도를 정확히 정의하기란 대단히 어렵기 때문이다(김상규, 1996:179)

시료의 채취에 있어서 참싸리는 김포매립지 비탈면 내에 종자뽑어붙이기 공사를 실시한 후 발아하여 성장한 수고(H)1.5m×수관폭(W)1.0m의 규격을 선정하여 1m²의 범위로 표토 주변을 정리한 후 뿌리가 손상이 가지 않도록 주의하여 굴취하였다. 파종으로 인한 번식보다는 이식한 후 분지로 인한 번식력이 강한 참억새와 조릿대는 중부지방의 강화도 문수산 삼림욕장 내에 자생하고 있는 것을 굴취 후 현장에서 뿌리를 선별하여 시험편을 조작하였다.

시험재료의 규격과 뿌리 특성은 Table 1과 같다. 뿌리분포는 참싸리가 지표부를 橫走하는 형태로 세근의 분포는 표층에 집중되어 있고, 주근의 일부는 밑으로 뻗어내려 심토에 박혀 있었다. 조릿대의 지하경은 10~20cm 내에 분포하며, 單軸分岐와 假軸分岐型的 혼합형으로 지하경의 節 및 基部的 節에서 芽가 성장하여 근계를 형성하고 있었다. 참억새의 세근은 根株의 주변에 밀생하고 있었으며, 근경의 節에서 1차근이 分岐하는 것으로 관찰되었다.

시료의 시험편은 참싸리는 비교적 상태가 양호한 1차근과 2차근 중에서 시험편을 20편 선정하였으며, 조릿대의 뿌리는 지하경이 空洞이므로 지하경 節에서 分岐한 1차근 중에서 20편을 참억새는 뿌리가 細根하여 根莖에서 分岐한 1차근 중에서만 20편을 선별하였다(Fig. 1, 2, 3 참조).

시험편의 縱방향(섬유방향)의 인장에서는 뿌리의 섬유가 橫 또는 斜방향으로 절단되어 이웃하는 섬유 사이의 부착이 끊어져서 파괴가 일어난다. 이러한 파괴를 일으키게 하는 시험편의 고정과 함께 인장시험시 양단부의 고정된 부분에서 압축파괴가 일어나지 않도록 하는 일은 그리 쉬운 일이 아니다. 그러므로 본 실험에 있어서는 시험편의 중앙부에 Fig. 4와

같이 시험편의 길이를 7~10cm로 하여 중앙부에 단면축소부를 만드는 방법(이하 수정시험편)을 채택하여 시행하였다.

뿌리에 의한 토양의 緊縛力과 根系抵抗力은 근원경, 뿌리의 부패도, 목질의 강약등과 함께, 시험재료의 채취 후 경과시간과도 수중에 따라서 뿌리의 인장력이 깊은 상관관계가 있는 것으로 연구(陶山·原, 1985)되어 있는 바, 수분상태는 상대적인 비교를 하기 위해 시험조건을 기건상태로 하였다. 본 연구는 흙 속에서의 인장강도를 추정하기 위한 것이므로, 한 번 기건상태로 된 것이 뿌리의 변질도 있을 수 있다고 가정할 수 있지만 채취한 뿌리를 흙 속의 상태로 재현시키기 위해 침수된 토양 속에 24시간 재침수 후 실내온도 20℃, 습도 65%인 상태에서 시험 실시하였다.

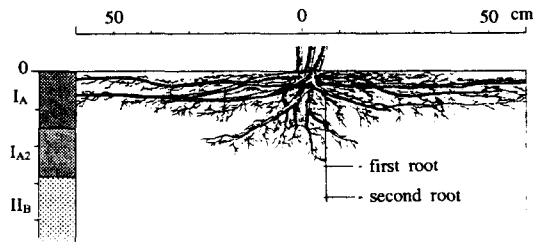


Fig. 1. Distribution of *Lespedeza cyrtobotrya* roots (depth : 80cm)

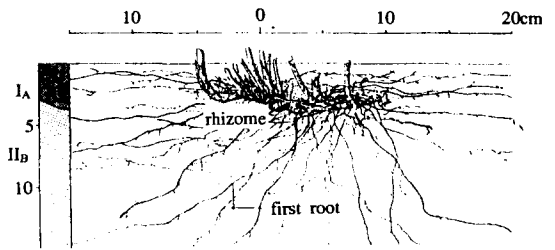


Fig. 2. Distribution of *Miscanthus sinensis* rhizomes (depth : 60cm)

Table 1. Standard of plant materials.

Species	Standard	Root Type	Note
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	H1.5×W1.0	horizontal dispersion	shrub
<i>Sasamorpha purpurascens</i>	H0.6×W0.3	rhizome	shrub
<i>Miscanthus sinensis</i>	H1.2, 3-4 tiller	rhizome divergence	herbaceous perennial

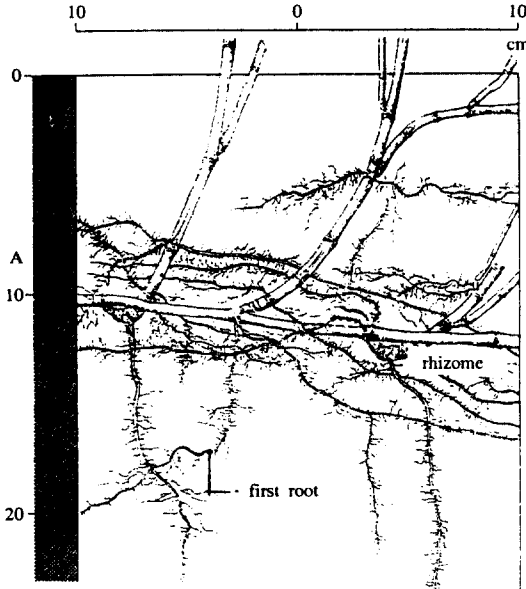


Fig. 3. Distribution of *Sasamorpha purpurascens* rhizomes (depth : 50~120cm)

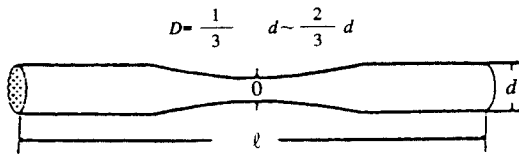


Fig. 4. Amendment material piece

2. 인장강도 실험

인장강도의 시험은 목재의 인장강도시험법 (KS F 2207), 섬유질의 인장강도시험법(KS K0410) 중 만능재료 강신도 시험기(Instron C.R.E 4302)를 이용하여 시험편의 양단부 파괴를 최소한으로 줄일 수 있도록 시험기의 Crosshead Speed를 100~300 mm/min으로 조정하여 시행하였고, 시험편의 길이에 따른 면이 불규칙하므로 Grip Distance를 30~50mm의 범위내에서 실시하였다.

이러한 방법으로 식생 뿌리의 인장강도시험법을 국제공인시험 검사기관인 한국원사직물 시험연구원에서 시험 실시하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 뿌리의 역학적 성질

1) 뿌리의 인장강도

일반적인 표층붕괴와 비탈면 파괴시 뿌리의 저항력은 뿌리의 면적비에 따라 비례적으로 증가하지만 뿌리에 의해 단단하게 전착된 흙의 종류에 따라서는 현저한 차이가 나지 않는다는 Waldron and Dakessian(1981)의 연구결과를 바탕으로 해서, 수목의 인장저항력에 관계

Table 2. Material of tensile strength

Species	Number	No. of collection	Collection rate (%)
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	20	15	75
<i>Sasamorpha purpurascens</i>	20	13	65
<i>Miscanthus sinensis</i>	20	13	65
Total	60	41	68.3

Table 3. Tensile strength and root diameter

Species	Number	Root diameter range (Mean)	Tensile strength range (Mean)
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	15	1.2 - 3.0 mm (2.19)	9.852 - 70.50 kgf (36.359)
<i>Sasamorpha purpurascens</i>	13	1.2 - 2.7 mm (1.727)	3.407 - 11.90 kgf (6.675)
<i>Miscanthus sinensis</i>	13	0.65 - 1.0 mm (0.814)	1.772 - 5.718 kgf (3.671)

되는 인자 가운데에서도 가장 관계가 높은 뿌리 직경과의 관계를 파악하였다.

시험결과 수정시험편의 실험방법이 적절하다고 인정되었으며, 시험과정 중 뿌리 양단부의 조기파괴로 인하여 시험 결과가 부정확하다고 판단된 일부 채취 시료는 분석에서 제외시켰다.

분석과정에서 얻어진 뿌리직경의 범위와 평균 값, 인장강도의 범위와 평균 값은 Table 3 과 같다.

또한 수목 뿌리직경과 인장저항력과의 관계를 알아보기 위해 상관관계 분석이 이루어 졌으며, 각 종속변수 인장력에 대한 독립변수 뿌리직경과의 설명력과 영향력을 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4에서 얻어진 예측가능한 뿌리직경과 인장강도의 1차 회귀식과 각 직경과 강도와의 분포관계를 살펴보면 뿌리직경이 커짐에 따라 인장강도는 정관계로 보아 커짐을 알 수 있다.

2) 인장응력, 변형율, 탄성계수

재료에 外力이 작용하면 재료 내부에 저항력, 즉 内力이 일어난다. 이 외력의 크기를 응력(stress)이라 하며, 외력 P가 인장으로 작용할 때의 단면적에 미치는 내력을 인장응력 $\sigma = P/A$ 이라 한다. 단위는 (kgf/cm^2)를 사용하며, 본 시험 결과에서 얻어진 평균 값은 참싸리가 929.489kgf/cm^2 , 조릿대가 292.069kgf/cm^2 , 참억새가 696.947kgf/cm^2 로 측정되었다. 조릿대가 예상 외로 낮은 값을 나타낸 것은 응력을 균일하게 측정하기 위하여 洞空이 있는 지하경을 제외하고 지하경에서 분지한 1차근으로만 측정한 결과 때문인 것으로 판단된다.

또한 길이 L의 재료를 힘 P로써 인장하면 길이 L이 ΔL 이라는 신장과정을 가져오는데 이를 변형율 $\epsilon = \Delta L/L$ 이라 하며, 단위는 대개 %로 표시하고 있다. 각각의 평균 변형율은 참싸리가 0.065로 6.5%, 조릿대가 0.153으로 15.3%, 참억새가 0.111로 11.1%의 변형율을 보여 조릿대가 그 중 높은 결과치를 나타내고 있다. 이 결과로 추정하여 보면 인장응력이 적은 재료가 변형율이 높은 것으로 판단된다.

길이 L의 재료를 힘 P로 인장하면 ΔL 만큼 늘어나고, 힘 P를 제거하면 원래의 길이 L로 돌아갔다고 하면 이 재료를 탄성체(elasticity body)라고 하는데 완성탄성체는 거의 없다. 재료는 비례한계 이하에서는 응력 σ 와 변형율 ϵ 은 비례한다. 이 성질을 Hooke의 법칙이라 하고, 이때 응력과 변형율의 비 $E = \sigma/\epsilon$ 를 탄성계수 또는 영계수라 한다. 각각의 평균 탄성계수 값은 참싸리 $15,007.78\text{kgf/cm}^2$, 참억새 $7,208.003\text{kgf/cm}^2$, 조릿대 $1,946.808\text{kgf/cm}^2$ 의 순서로 측정되었다.

2. 뿌리의 전단저항력

Wu *et al.*(1979)은 전단강도의 증가는 뿌리의 인장력과 면적비율, 또한 전단비틀림각과 흙의 내부마찰각에 의존한다고 보았다. 이것을 식으로 표현하면 뿌리의 전단 저항력 $\Delta Cr = Tr (Ar/A) (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi)$ 로 나타난다. 그리고 실험을 통한 해석에서 $(\sin \theta + \cos \theta \tan \phi)$ 의 값이 흙의 내부마찰각(ϕ) $25 \sim 40^\circ$ 와 전단비틀림각(θ)이 $40 \sim 90^\circ$ 일 때 팔호 안의 값이 1.0에서 1.3 사이로 전단비틀림각(θ)과 내부마찰각(ϕ)의 변화에 대해서 비교적 둔감하게 나타

Table 4. Relationship between tensile strength and root diameter

Species	Number	Correlation coefficient	Regression equation
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	15	0.914*	$P = 29.446D - 28.128$
<i>Sasamorpha purpurascens</i>	13	0.840*	$P = 3.971D - 0.464$
<i>Miscanthus sinensis</i>	13	0.841*	$P = 8.312D - 3.093$

* Significant at 1% level

Table 5. Dynamical properties of *Lespedeza cyrtobotrya* roots

No	Diameter (mm)	Load (kgf)	Stress (kgf/cm ²)	Strain (mm/mm)	Modulus (kgf/cm ²)
1	2.750	65.260	1,098.757	0.058	18,944.09
2	1.200	9.852	871.128	0.045	19,358.40
3	2.800	60.000	974.449	0.201	4,848.005
4	2.600	41.640	784.393	0.062	12,651.50
5	1.500	20.130	1,139.150	0.049	23,247.96
6	2.700	48.640	849.544	0.075	11,327.25
7	1.850	20.080	747.034	0.043	17,372.88
8	2.400	37.100	820.108	0.077	10,650.75
9	2.050	28.300	857.439	0.045	19,054.20
10	3.000	70.500	997.393	0.055	18,134.42
11	2.050	22.010	666.856	0.051	13,075.61
12	1.600	25.530	1,269.787	0.051	24,897.78
13	2.400	40.940	904.993	0.055	16,454.42
14	2.500	34.680	706.511	0.058	12,181.22
15	1.450	20.720	1,254.797	0.43	2,918.133
Mean	2.19	36.359	929.489	0.065	15,007.78

Table 6. Dynamical properties of *Sasamorpha purpurascens* roots

No	Diameter (mm)	Load (kgf)	Stress (kgf/cm ²)	Strain (mm/mm)	Modulus (kgf/cm ²)
1	1.850	7.884	293.307	0.132	2,222.023
2	1.350	4.821	336.814	0.163	2,066.344
3	1.750	4.838	201.145	0.130	1,547.269
4	1.200	3.407	301.252	0.203	1,484.000
5	1.500	6.706	379.490	0.158	2,401.835
6	1.300	5.535	417.014	0.202	2,064.426
7	1.950	6.776	226.895	0.137	1,656.168
8	2.700	10.650	186.012	0.110	1,691.018
9	1.500	4.838	273.781	0.167	1,639.407
10	1.500	6.338	358.665	0.227	1,580.022
11	1.850	5.090	189.363	0.137	1,382.212
12	2.000	11.900	378.797	0.114	3,322.781
13	2.000	7.987	254.363	0.113	2,251.001
Mean	1.727	6.675	292.069	0.153	1,946.808

Table 7. Dynamical properties of *Miscanthus sinensis* roots

No	Diameter (mm)	Load (kgf)	Stress (kgf/cm ²)	Strain (mm/mm)	Modulus (kgf/cm ²)
1	.800	2.121	421.969	0.052	8,114.788
2	.850	4.376	771.186	0.106	7,275.340
3	.950	4.349	613.567	0.140	4,382.621
4	.800	3.705	737.103	0.123	5,992.707
5	.700	2.816	732.519	0.082	8,933.159
6	.600	2.604	920.997	0.056	16,446.380
7	.800	3.785	753.019	0.104	7,240.567
8	.900	3.678	578.158	0.052	11,118.420
9	.980	5.557	736.730	0.145	5,080.897
10	.850	4.617	813.658	0.167	4,872.204
11	1.000	5.718	728.055	0.160	4,550.344
12	.700	1.772	460.455	0.092	5,004.344
13	.650	2.631	792.892	0.169	4,691.669
Mean	0.814	3.671	696.947	0.111	7,208.003

난다는 사실을 인용하여 뿌리의 전단 저항력을 $\Delta Cr = 1.15 Tr (Ar/A)$ 로 간단히 하였다.

여기서, ΔCr = 뿌리의 전단저항력

Tr = 임의의 전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도

Ar = 임의의 전단면 속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적

A = 임의의 전단면의 면적

즉, 뿌리의 보강모델에 의한 전단력의 증가는 뿌리의 면적비율과 인장력에 의하여 결정된다. 또한 Gray and Leiser(1982)의 연구에 있어서도 현장 및 실험에 의해서 얻어진($\sin \theta + \cos \theta \tan \phi$)의 괄호쳐진 부분의 값은 전단비틀림각과 내부마찰각의 변화에 크게 작용되지 않았다.

그리고 Noboru(1979)의 연구에 의하면 임의의 비탈면에 존재하는 뿌리의 분포량은 여러 요소들의 복합적 관계에 의해 좌우되며, 수종별 토양 및 토심의 깊이에 따라 뿌리의 면적비는 상이하게 관찰되었으므로 실험에 의한 전단면의 뿌리 단면적 비율을 정확하게 측정하기란 곤란하다. 이에 Gray and Leiser(1982)는 인장강도의 힘에 따라 뿌리 분포의 양이 수종별로 다르게 측정된다는 사실을 바탕으로 뿌리분포의 면적비율 0.05~0.15%의 범위에서 인장강도가 비례적으로 측정되는 점을 밝혔다.

이러한 연구를 바탕으로 본 연구에서는 참싸리와 조릿대의 뿌리 최대 깊이가 평균 80cm, 참억새의 뿌리 최대 깊이가 60cm로 분포된다는 Noboru(1979)의 문헌조사를 바탕으로 하여

Table 8. Shearing resistance by vegetation roots

Species	Mean of Tr (kg/cm ²)	Root area Ratio (Ar/A)	ΔCr (kg/cm ²)	Note
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	929.489	10^{-3}	1.069	Wu Model
<i>Sasamorpha purpurascens</i>	292.069	10^{-3}	0.336	"
<i>Miscanthus sinensis</i>	696.947	10^{-3}	0.801	"

임의의 전단면을 참싸리와 조릿대는 지표면 이하 60cm, 참억새는 지표면 이하 30cm에서 Gray and Leiser(1982)의 연구에 의한 뿌리면적 비율의 중간값인 0.1% 즉 뿌리의 면적비를 10^{-3} 으로 하여 뿌리의 전단저항력을 측정하였다. 이 결과 Table 8과 같이 전단저항력은 참싸리가 1.069kg/cm^2 , 조릿대는 0.336kg/cm^2 , 참억새는 0.801kg/cm^2 로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 비탈면안정 해석에 있어서 식생이 갖는 비탈면안정 효과에 대하여 공학적인 측면에서 정량적인 수치를 제시하고자 우리나라의 고유수종인 조릿대와 현재 고속도로 절토 비탈면에서 상대 우점도가 높은 식물로써 자연 침입하여 생육하고 있는 참억새와 참싸리 뿌리의 개체시험을 통해서 얻은 인장강도를 가지고, 기존의 모델식에 대입하여 뿌리의 전단 저항력을 측정하였다.

1. 뿌리에 외력(흙덩어리의 전단)이 작용하면 뿌리 내부에 저항력 즉 내력이 일어난다. 이 내력의 크기를 응력(stress)이라 하며 토피에 전단이 일어날 때 뿌리에 발생하는 인장력은 전단에 대해 직접적으로 저항하는, 전단면에 평행한 부분과 전단영역의 구속응력을 증가시키는, 전단면에 연직인 부분으로 나뉘게 되고 이 두 가지의 힘에 의해 전단응력이 증가하게 된다. 이러한 응력을 실험을 통해서 측정하였다. 이 결과 뿌리의 저항력은 뿌리직경이 커짐에 따라 인장강도(kgf)가 커지는 정상관을 나타내었다.

1) 실험에 이용된 참싸리의 평균 뿌리직경은 2.19mm로 인장강도(kgf) 평균 값인 36.359(kgf)에서 파괴되었으며, 인장응력(kgf/cm²) 평균 값은 929.489kgf/cm²로 계산되었고, 조릿대는 뿌리직경 평균 값 1.727mm로 인장강도(kgf) 평균 값 6.675, 인장응력(kgf/cm²) 평균 값은 292.069이며, 참억새는 뿌리직경 평균 값 0.814mm, 인장강도(kgf) 평균 값 3.671, 인장응력(kgf/cm²) 평

균 값 696.947로 측정되어 참싸리의 뿌리가 가장 높은 인장응력임이 파악되었다.

2) 각 재료의 변형율은 참싸리가 6.5%, 조릿대가 15.3%, 참억새가 11.1%로 조릿대가 변형율이 높은 것으로 추정할 수 있었으며, 탄성계수는 참싸리가 $15,007.78(\text{kgf/cm}^2)$, 참억새 $7,208.003(\text{kgf/cm}^2)$, 조릿대 $1,946.808(\text{kgf/cm}^2)$ 순으로 측정되었다.

2. 흙과 뿌리의 저항력을 포함한 전단강도는 $R_t = c + Cr + \sigma \cdot \tan \phi$ (c : 점착력 σ : 수직응력 ϕ : 내부마찰각)로 표시되며, 여기서 Cr은 인장력에 의한 단위면적당의 뿌리저항력 즉 뿌리에 의한 전단강도의 증가치로 보아, 점착력 C 값을 증가시켜 흙의 전단강도를 강하게 보강시킨다. Cr은 뿌리의 면적비에 따라 변할 수 있으나 일반적인 비탈면에 있어서 뿌리의 면적비를 10^{-3} 로 추정하여 계산된 전단저항력 $\Delta Cr(\text{kg/cm}^2)$ 은 참싸리가 1.069kg/cm^2 , 조릿대가 0.336kg/cm^2 , 참억새가 0.801kg/cm^2 로 참싸리가 가장 높은 전단 저항력을 가진다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 본 연구는 일반적으로 인식된 식생비탈면의 붕괴방지 기능에 대하여 공학적인 해석을 통해서 설명하고자 하였다. 즉, 비탈면 식생공법의 적용에 있어서 식생 뿌리에 의한 점착력의 증가를 뿌리의 개체 실험을 통한 실험적 결과치로 제시할 수 있으며, 이를 바탕으로 식생 도입에 의한 비탈면의 계획안전율을 추정하는데 있어서 기초적 자료가 될 것으로 사료된다.

그러나 보다 정확한 역학적 해석을 위해서는 사면 해석의 통제되는 요인에 대한 명확한 분석이 요구되므로 추후 이에 대한 연구가 요망된다 하겠다.

V. 인용문헌

김상규. 1996. 토질역학의 기본원리, 동명사. pp.179~210.
 유희구. 1992. 식생사면안정해석시 흙의 강도 정수적용에 관한 연구. 건국대학원 석사

- 학위논문.
- 우보명 · 권태호 · 김남춘. 1993. 임도비탈면의 자연식생 침입과 효과적인 비탈면녹화 공법개발에 관한 연구. 한국임학회지 82(4) : 381~395.
- 이인모 · 성상규 · 임충모. 1991. 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구. 대한토질공학회지 7(2) : 51~66.
- 陶山正憲 · 原 敏男. 1985. 樹草根系による斜面安定化機構に関する實驗的研究(I). 日林論 96 : 643~644.
- 陶山正憲 · 原 敏男. 1986. 樹草根系による斜面安定化機構に関する實驗的研究(III). 日林論 97 : 599~600.
- 陶山正憲. 1988. 森林の公益的機能發現に係る樹木根系の力學的評價. 日林論 99 : 589~590.
- 北村嘉一 · 難波宣士. 1981. 拔根試驗を通して林木根系の崩壊防止機能. 林試年報. 333 : 175~208.
- 野々田稔郎 · 林 拙郎 · 川邊洋. 1994. 根系の引張強度と曲げ強度から推定した樹木根系の斜面安定效果. 日林誌 76(5) : 456~461.
- 竹内美次 · 岩崎勇作. 1988. 林木根系の強度(I). 日林論 99 : 587~598.
- 阿部和時 · 岩元 賢. 1986. 土層のせん断強度に及ぼす樹根の影響. 日林論 97 : 591~593.
- Gray, D. H. and A. J. Leiser. 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. Van Nostrand Reinhold. New York. 271pp.
- Noboru, K. 1979. Illustration of tree roots. 誠文堂新光社.
- 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.
- Waldron, L. J. 1977. The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Sic. Soc. Am. J. 41 : 843~849.
- Wu, T. H., W. P. Mckinnell and D. N. Swanston. 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Can. Geotech. J, 16 : 19~23.
- Wu, T. H. 1984. Soil movements on permafrost slopes near Fairbanks, Alaska, Can. Geotech. J, 21 : 699~709.

接受 1998年 9月 30日