

## 임도사면 녹화식물뿌리의 인발강도특성에 관한 연구

池炳潤\* · 鄭道鉉 · 全權石 · 金鍾閔

국립산림과학원

### Pull-out Strength Characteristics of Revegetation Species Root used for Forest Road Slope

Byoung Yun Ji\*, Do Hyun Jung, Kwon Suk Chun and Jong Yoon Kim

Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

**요약:** 본 연구는 임도사면 녹화에 주로 사용되는 목·초본 18종에 대한 인발강도특성을 정량적으로 구명하여 환경친화적인 녹색임도의 건설을 위한 적정 녹화식물의 선정시 기초자료로 제공하고자 실시하였다. 17개월동안 성장한 종별 뿌리의 신장한계는 족제비싸리가 34.0 cm로 가장 깊은 것으로 나타났고, 페레니얼라이그라스가 17.7 cm로 가장 얇은 것으로 나타났다. 또한 종별 뿌리의 인발강도는 평균적으로 도입초본 0.054 t/m<sup>2</sup>/본, 재래초본 0.085 t/m<sup>2</sup>/본, 재래목본 0.649 t/m<sup>2</sup>/본으로 나타났으며, 도입초본과 재래초본 간에는 커다란 차이가 없었으나, 초본과 목본 간에는 목본이 약 9배 가량 큰 것으로 나타났다. 또한 녹화식물의 개체수별 평균 뿌리밀도는 도입초본 1.398 ml/본, 재래초본 1.471 ml/본, 재래목본 5.377 ml/본의 순으로 나타났다. 따라서 뿌리에 의한 토양의 고정효과와 토양내 공간이용을 극대화하기 위하여는 침식방지용 초본류와 표층붕괴용 목본류를 혼파하는 것이 바람직할 것이다.

**Abstract:** The objective of this study is to offer a basic information to select the plant species for environmentally friendly forest road by quantifying the pull-out strength by 18 species used for a revegetation of forest road slope. In the investigation of the root depth growth during 17 months, Indigobush amompha showed maximum depth of 34.0 cm and perennial ryegrass showed minimum depth of 17.7 cm among all species. The pull-out strength by herb species was 0.054 ton/m<sup>2</sup>/plant for exotic species, 0.085 ton/m<sup>2</sup>/plant for indigenous species, and by shrub species was 0.049 ton/m<sup>2</sup>/plant. There were no large difference among herb species in pull-out strength, but shrub species were approximately 9 times stronger than herb species. Thus, for maximizing tightening effect and use of inner soil space. The mixed seeding using herb for erosion control and shrub for shallow failure protection would make up optimal revegetation of forest road slope.

**Key words :** environmentally friendly forest road, revegetation, depth of root growth, Soil tightening, tensile strength, mixing seeding, erosion control, shallow failure protection

## 서론

임도사면 피해에 대처하기 위하여 사면의 안전율을 증진시킬 수 있는 물리적 안정구조물과 더불어 사면의 안전율을 유지시킬 수 있는 생물학적 녹화공법의 실시가 필요하다. 이러한 방법 중 생물학적 녹화공법은 자체적으로 재생가능한 생물을 이용하기 때문에 야생동물의 서식처 및 먹이를 제공하는 등 건전한 생태계를 유지시키며, 또한 경관보호 측면에서도 그 중요성이 크다고 할 수 있다. 또한 수목의 근계는 토양내부의 버팀벽 역할로 토양을 고정하

여 사면의 붕괴를 방지하며, 토양의 공극상태를 양호하게 하여줌으로써 수자원 함양을 증대시킨다. 또한 수목은 증산작용으로 토양내부의 수분을 적절하게 유지시켜주며, 낙엽 및 지조물 등은 강수의 저장 및 유출수의 흐름을 완화시키는 긍정적인 효과가 있다.

사면보호를 위한 종의 선택시 식생활차이 양호하고, 뿌리의 근계발달 및 토양보강효과가 우수한 종을 선정하여 사용하는 것이 바람직할 것이다. 뿌리에 의한 토양의 보강효과는 직접적으로 토양내의 뿌리량과 관련이 깊고(遠藤과 鶴田, 1968), 표층붕괴를 방지하는데 무식생과 비교할 때 30%정도의 효과가 있으며(阿部, 1997), 초본과 목본 모두 뿌리에 의한 토양보강효과가 있으나 목본의 경우

\*Corresponding author  
E-mail: by83700@foa.go.kr

가 더욱 큰 효과를 발휘하는 것으로 보고되고 있다(Waldron and Dakessian, 1982; Waldron *et al.*, 1983). 지표면으로부터 식생의 근계가 작용하는 깊이는 초본이나 목본에 따라 차이를 지닌다. 주로 초본은 지표면의 침식 방지에 유효하고, 목본은 지하부의 사면붕괴억지에 효과적이라 할 수 있으며, 이인모 등(1991)은 뿌리의 강도 및 한계깊이에 따라 보강영역은 대략 1 m 정도라고 하였다.

이러한 뿌리보강효과의 메커니즘을 정량적으로 파악하기 위한 많은 연구(Gray and Ohashi, 1983; 陶山과 下井, 1999; 遠藤과 鶴田, 1968; Waldron and Dakessian, 1981; Zimmer, 1977; Waldron, 1977; Waldron *et al.*, 1983)가 수행된바 있다. 그러나 국내 연구는 주로 식생이 사면안정에 미치는 효과(이인모 등, 1991)과 목본 식물에 의한 사면안정(조주형과 이종성, 2000; 지병윤 등, 2004)에 관한 연구가 진행되고는 있으나 아직 초본 및 관목에 대한 연구는 미진한 상태로 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 임도사면 녹화에 주로 사용되는 목·초본 18종에 대한 인발강도특성을 정량적으로 구명하여 환경친화적인 녹색임도의 건설을 위한 녹화식물 선정의 기초자료로 활용하고자 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

임도사면 녹화식물뿌리의 특성을 살펴보기 위하여 Table 1과 같이 현행 임도사면에서 주로 이용되고 있는 도입초본 5종, 재래초본 9종, 재래목본 4종 등 총 18종을 선

정하였다.

### 2. 시험 및 분석 방법

녹화식물뿌리의 특성에 대한 시험을 위하여 산림생산기술연구소 포지에 가로 1 m, 세로 1 m의 규모로 각 18개 plot을 설치하였고, 2001년 5월에 파종하여 17개월간 생육시킨 후 2002년 10월에 종별 뿌리의 신장한계깊이, 개체수당 뿌리밀도, 인발강도를 측정하였다.

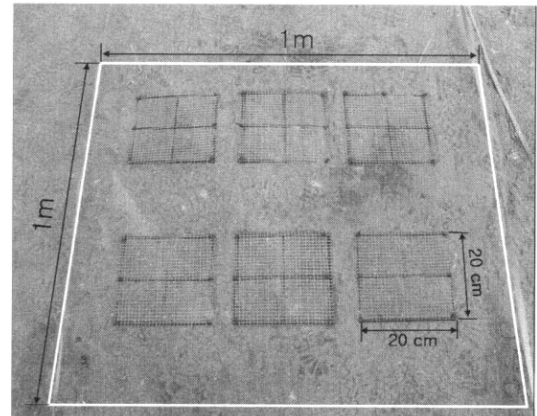


Figure 1. Establishment of the wire mash.

종별로 뿌리의 신장한계깊이는 생육기간내 자라난 뿌리의 깊이를 삼을 이용하여 수직적으로 단면을 만들어 뿌리의 출현이 없는 곳까지의 깊이를 측정하였다. 또한 인발시험을 위하여 Figure 1과 같이 파종전 6개의 장방형 스테인리스 철망(20×20 cm)을 묘상위에 깊이 4 cm로 매설한 후 파종하였으며, 묘상의 수직방향으로 6개의 철망 중

Table 1. Species for pull-out testing.

Species	Botanical name	General name	symbol
Exotic	<i>Festuca rubra</i> L.	Creeping redfescue	CRE
	<i>Poa pratensis</i> L.	Kentucky bluegrass	KEN
	<i>Festuca arundinacea</i> SCHREBER	Tall fescue	TAL
	<i>Lolium perenne</i> L.	Perennial ryegrass	PER
	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Orchard grass	ORC
Herb	<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i> (PAMPAN) HARA	Mugwort	MUG
	<i>Miscanthus sinensis</i> ANDERSS	Eulalia	EUL
	<i>Arundinella hirta</i> (THUNB.) TANAKA	Cogongrasses	COG
	<i>Lespedeza cunneata</i> G. DON	Chinese Lespedeza	CHL
	<i>Oenothera biennis</i> L.	Evening primrose	EVE
	<i>Zoysia japonica</i> STEUD.	Korean Grass	KOR
	<i>Chrysanthemum boreale</i> MAKINO	North chrysanthemum	NOR
	<i>Coreopsis drummondii</i> TORR. et GRAY	Golden wave	GOL
Shrub	<i>Iris pallasi</i> var. <i>chinensis</i> Fisch.	Chinese pallas iris	CHP
	<i>Lespedeza cyrtobotrya</i> MIQ.	Shortstalk Bushclover	SHO
	<i>Amorpha fruticosa</i> L.	Indigobush Amorpha	IND
	<i>Indigofera pseudotinctoria</i> MATSUMURA	False Indigo	FAL
	<i>Vitex negundo</i> var. <i>incisa</i> (LAM.) C. B. CLARKE	Chinese Chaste Tree	CHC

3개에 대해 인발시험을 실시하였다. 그리고 종별 개체수 당 뿌리밀도는 인발시험이 끝난 후 시험구(20×20 cm)에 출현한 뿌리를 모두 채취하여 1,000 ml 매스실린더 내의 물에 침수시킨 후 침수전과 침수후의 물의 증가분을 측정하고 종의 개체수로 나누어 측정하였다.

인발력 측정을 위해 제작한 뿌리 인발장치는 Figure 2 와 같다.

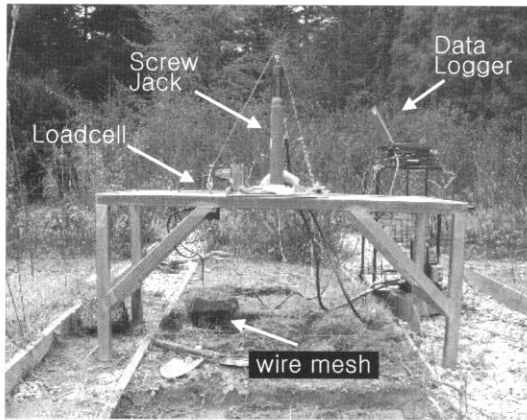


Figure 2. Equipment for pull-out testing.

Figure 2에서 보는 바와 같이 뿌리인발장치는 인발부에 로드셀을 장착하여 이로부터 출력되는 전압신호를 컴퓨터를 이용하여 자동계측할 수 있도록 제작하였고, 측정시의 인발속도는 20 mm/min로 하였다. 종별 토양고정효과와 측정은 뿌리에 의한 최대저항치(최대인발력)에서 토양 무게를 제외한 값이 뿌리만의 순수한 인발저항이며, 이를 단위면적(20×20 cm<sup>2</sup>, 0.04 m<sup>2</sup>)으로 나누어 인발강도를 산출하였다. 뿌리의 인발력 시험은 각 대조구 포함 18종에 대하여 종별로 3회씩 총 57회를 실시하였다.

분석내용은 종별로 뿌리의 신장한계깊이, 개체수당 뿌리밀도 등을 조사하여 종별 뿌리의 특성과 인발강도와의 관계를 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 종별 뿌리의 신장한계

토층 내에 분포하는 식생뿌리는 집중강우시 토립자의 이송 및 토괴의 활동을 억제시키는 효과가 있는 것으로 밝혀지고 있다. 즉, 식생의 뿌리는 토양의 강도정수 중 점착력을 증가시켜 강우에 의한 침식이나 표층붕괴를 방지하는 중요한 역할을 수행한다고 볼 수 있다(Nilaweera and Nutalaya, 1999; 조주형, 이종성, 2000; 塚本, 1987; 陶山과 玉井, 1999).

뿌리의 신장깊이는 사면의 붕괴가 주로 표층붕괴로부터 발생하기 때문에 식생뿌리의 신장깊이를 살펴봄으로써 식생에 의한 사면의 안정효과와 적용한계를 살펴볼 필요가 있다. 파종후 17개월이 경과한 목·초종별 뿌리신장한계의 차이를 구명하기 위하여 Table 2와 Figure 3과 같이 종별 뿌리신장깊이의 차이에 대한 분산분석과 Duncan의 다중검정(유의수준 5%)을 실시한 바, 종에 따라 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다.

Table 2. ANOVA of the maximum root depth by species.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value
Model	17	837.31	46.52	3.01*
Error	36	589.19	15.51	
Total	53	1,426.50		

\* : significantly different at the significance level of 5%

종별 뿌리신장 최대깊이는 Figure 3과 같이 족제비싸리가 34.0 cm로 가장 컸고, 페레니얼라이그라스가 17.7 cm로 가장 작은 것으로 나타났다. 유의적인 차이가 없는 종별 뿌리신장 한계깊이의 범위는 타래붓꽃·억새·참싸리가 27.0~28.3 cm, 달맞이꽃·좁목형·쑥이 25.7~6.0 cm, 안고초·틀웨스큐·비수리·잔디·낭아초·오차드그라

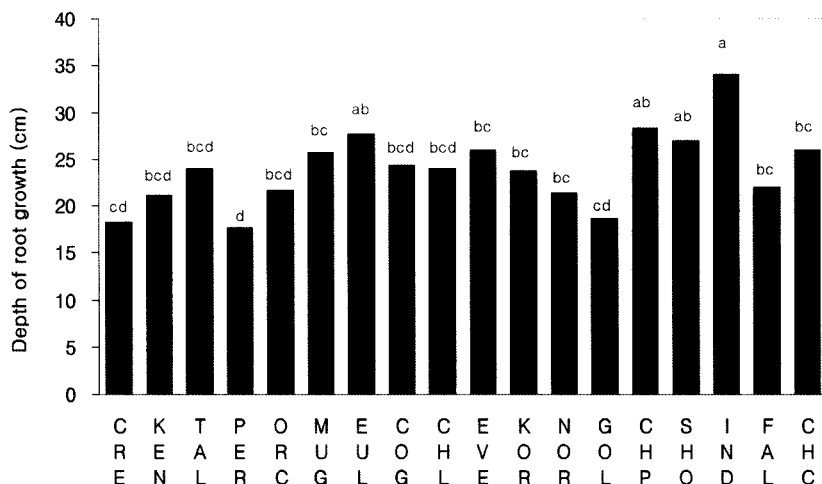


Figure 3. The maximum depth of root growth by species.

스 · 산국 · 캔터키블루그라스가 21.2~24.3 cm, 금계국 · 크리핑레드웬스큐가 18.3~18.7 cm인 것으로 나타났다.

일반적으로 뿌리의 신장한계를 표층봉피의 파괴면으로 가정한다면 뿌리의 깊이가 깊을수록 표층봉피방지에 효과적이라 할 수 있다.

2. 종별 뿌리의 인발강도

Figure 4는 억새와 무처리구에서 얻어진 데이터를 변위-인발력 그래프로 나타낸 예시이다.

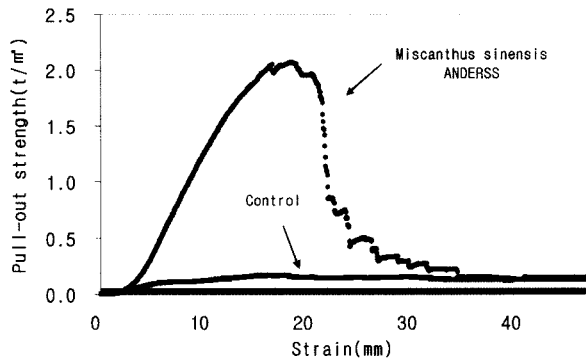


Figure 4. Strain-pullout stress curve.

Figure 4에서 보면 식물뿌리에 의한 인발강도는 억새뿌리에서와 같이 최대인발강도에 도달한 후 인발저항은 급격히 감소하여 인발변형이 증가함에 따라 거의 일정한 값에 도달하게 된다. 또한 항복점은 뿌리와 토양과의 긴박력으로 인하여 공업용 재료의 항복점과는 달리 2차이상의 생체항복점이 발생하고 있었다. 이러한 원인은 뿌리세포나 일부조직의 파괴 등 미시적 구조(Microstructure)의 파괴로 볼 수 있고, 최대인발력이 소요되는 최종항복점에서의 파괴점은 뿌리전체의 파괴인 거시적 구조(Macrostructure)로 볼 수 있다(Mohsenin, 1978). 그러나 식생이 존재하지 않는 무처리구에서는 변형이 점점 커지면서 전단저

항은 어떠한 최고점이 발생되지 않았으며, 지상부로 들어올려진 토양의 무게가 최대인발력인 것으로 나타났다. 따라서 순수한 종별 인발력은 뿌리 최대인발력에서 무처리구의 토양무게를 감한 값이 식물고유의 인발력이 되고, 이를 시험구의 단면적으로 나눈 값이 인발강도가 되며, 그 값이 클수록 토양보강효과가 크다고 할 수 있다.

목 · 초종별 개체수당 인발강도 및 뿌리밀도를 산출한 결과는 Figure 5와 같다.

종별 개체수당 뿌리의 인발강도를 조사한 결과, 도입초본은 평균 0.054 t/m<sup>2</sup>/본이었으며, 종별로는 오차드그라스가 0.080 t/m<sup>2</sup>/본으로 가장 컸고, 크리핑레드웬스큐가 0.017 t/m<sup>2</sup>/본으로 가장 작게 나타났다. 재래초본은 평균 0.085 t/m<sup>2</sup>/본이었고, 종별로는 비수리가 0.176 t/m<sup>2</sup>/본으로 가장 컸고, 달맞이꽃이 0.028 t/m<sup>2</sup>/본으로 가장 작았다. 또한 재래목본은 평균 0.649 t/m<sup>2</sup>/본이었고, 종별로는 남아초가 1.191 t/m<sup>2</sup>/본으로 가장 컸고, 좁목형이 0.064 t/m<sup>2</sup>/본으로 가장 작게 나타났다.

이상의 결과에서 도입초본과 재래초본 간의 뿌리의 평균인발강도는 커다란 차이가 없었으나, 초본과 목본 간에는 목본이 약 8.8배 가량 큰 것으로 나타났다.

또한 뿌리체적(X)과 인발강도(Y)와의 관계를 살펴본 결과는 Figure 6과 같이 Y=0.0984X(R<sup>2</sup>=0.698)의 식으로서 나타났으며, 뿌리 밀도가 증가할수록 인발강도가 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다.

녹화식물의 개체수별 뿌리밀도는 도입초본(평균 1.398 ml/본), 재래초본(평균 1.471 ml/본), 재래목본(평균 5.377 ml/본)의 순으로 나타났다. 초종별로는 도입초본 중 오차드그라스가 2.833 ml/본으로 가장 컸고, 크리핑레드웬스큐가 0.543 ml/본으로 가장 작았다. 재래초본은 금계국이 3.099 ml/본으로 가장 컸고, 잔디가 0.302 ml/본으로 가장 작았으며, 재래목본은 참싸리가 9.667 ml/본으로 가장 컸고, 좁목형이 0.831 ml/본으로 가장 작았다.

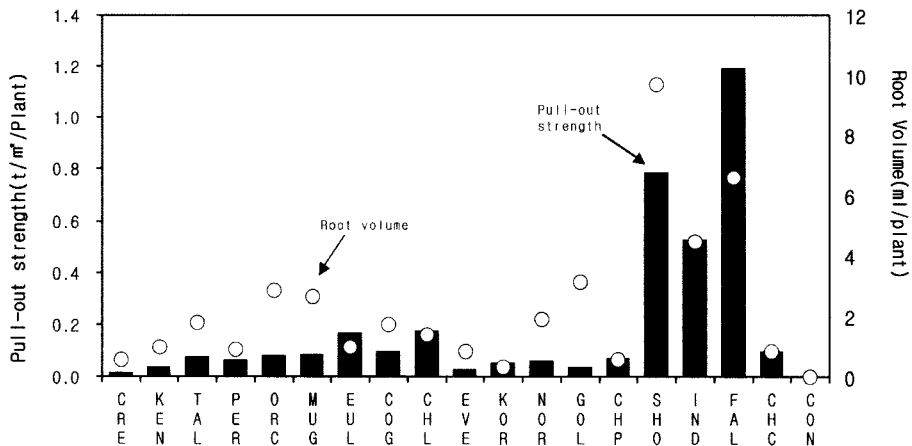


Figure 5. Pull-out strength and root volume for each of the species.

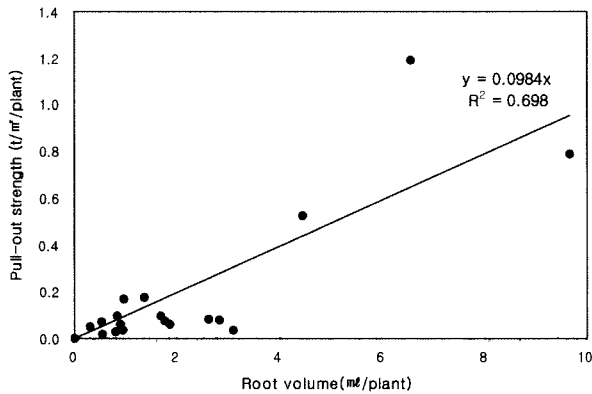


Figure 6. Relationship between pull-out strength and root volume.

기존의 연구결과(遠藤과 鶴田, 1968)에 의하면 뿌리밀도가 클수록 사면의 침식 및 표층붕괴에 효과적임이 입증되고 있으며, 이상의 결과로 볼 때 토양의 고정효과와 토양내 공간이용을 극대화하기 위하여 침식방지용 초본류와 표층붕괴용 목본류를 혼파하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 결론

임도사면 녹화에 주로 사용되는 목·초본 18종에 대한 인발강도를 정량적으로 구명하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 종별 뿌리의 신장한계는 죽제비싸리가 34.0 cm로 가장 깊은 것으로 나타났고, 페레니얼라이그라스가 17.7 cm로 가장 얇은 것으로 나타났다.

2) 종별 뿌리의 인발강도는 평균적으로 도입초본 0.054 t/m²/분, 재래초본 0.085 t/m²/분, 재래목본 0.649 t/m²/분으로 나타났으며, 초본보다 목본이 약 9배 가량 큰 것으로 나타났다.

3) 녹화식물의 개체수별 평균 뿌리밀도는 도입초본 1.398 ml/분, 재래초본 1.471 ml/분, 재래목본 5.377 ml/분의 순으로 나타났다.

본 연구결과는 환경친화적 녹색임도 구현을 위한 적정 사면녹화식물 선정에 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 현장 임도사면을 대상으로 한 적용성연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 인용문헌

1. 陶山正憲, 玉井幸治. 1999. 樹木根系の斜面安定化の評價方法に關する一考察. 静岡大學農學部附屬演習林報告 23: 37-44.
2. 阿部和時. 1997. 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評價方法に關する研究. 森林總合研究所研究報告 373: 105-181.
3. 遠藤泰造, 鶴田武雄. 1968. 土の抗張力にあえる根の補強作用について. 林業試驗場北海道支場年報: 183-189.
4. 이인모, 정상규, 임충모. 1991. 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구. 대한토질공학회 7(2): 51-66.
5. 조주형, 이종성. 2000. 식생뿌리의 전단강도 보강에 의한 사면안전을 해석 -갯나무 뿌리를 중심으로-. 한국조경학회지 27(5): 80-93.
6. 지병윤, 오재현, 최병구, 전근우, 차두송. 2004. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(IV)-갯나무 뿌리의 인장특성-. 한국임학회지 93(1): 103-107.
7. 塚本良則. 1987. 樹木根系の崩壊抑止効果に關する研究. 東京農工大學部演習林報告 23: 65-123.
8. Gray, D.H and Ohashi, H. 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 109(3): 335-353.
9. Mohsenin N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers. pp. 51-87.
10. Nilaweera, N.S and Nutalaya, P. 1999. Role of tree roots in slope stabilisation. Bull. Eng. Env. Geol. 57: 337-342.
11. Waldron L.J. 1977. The shear resistance of root permeated homogenous and stratified soil. Soil Science Society of America Journal 41: 843-849.
12. Waldron, L.J. and Dakessian, S. 1981. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil resistance form root properties. Soil Science 132(6): 427-435.
13. Waldron, L.J. and Dakessian, S. 1982. Effect of grass, legume and tree roots on soil shearing resistance. Soil Science Society of America Journal 46: 894-899.
14. Waldron, L.J., Dakessian, S., and Nemson, J.A. 1983. Shear Resistance Enhancement of 1.22-Meter Diameter Soil Cross Section by Pine and Alfalfa Roots. Soil Science Society of America Journal 47: 9-14.
15. Zimmer, R.R and Swanston, D.H. 1977. Root strength changes after logging in southeast Alaska. USDA Forest Service Research Note, PNW-306: 1-10.