

식생뿌리의 전단강도 보강에 의한 사면안전을 해석 - 잣나무 뿌리를 중심으로 -

조주형* · 이종성**

*환경관리공단 수도권사업본부 · **일리노이대학교 GMS Lab

A Study on the Slope Stability Analysis by Shearing Reinforcement of Vegetation Roots - Focused on the *Pinus Koraiensis* Roots -

Cho, Ju-Hyoung* · Lee, Jong-Sung**

*Metropolitan Area Dept., Environmental Management Corporation

**GMS Lab., Dept. of Landscape Architecture, University of Illinois

ABSTRACT

This study measured the shearing resistance of the roots of the *Pinus Koraiensis* by the tensile strength gained through their individual tensile test for the Root Reinforcement Model. On the basis of the shearing resistance value calculated through such a process, the factor of safety(Fs) was comparatively presented by using the Simplified Janbu Method in PCSTABL5M, the slop-analyzing software which had been developed in Purdue University of the U.S.A according to the shape of a slope and the type of soil. The results to have measured a stress and the factor of safety(Fs) by experiment are as follows.

1) The mean root diameter of the *Pinus Koraiensis* used for this experiment was 2.483mm and the mean tensile stress was calculated as 422.846(kgf/cm²). In the strain ratio of material and the elastic modulus was measured 7.8%, 9,291.92(kgf/cm²).

2) The shearing strength including the resistance of soil and root is expressed as

$R_t = C + Cr + \sigma \cdot \tan \phi$. ΔCr (kgf/cm²) of the shearing resistance calculated by estimating the areal ratio of roots at 10^{-3} is 0.253(kgf/cm²).

3) As the result of making an analysis of the natural slope stability by the soil parameter, the factor of safety(Fs) was calculated at 1.795 in CL, and the stability analysis of the root reinforcement slope, Fs was calculated at 1.952. 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

I. 서론

현재 우리나라의 국토이용 현황은 토지의 경제적 이용이 어려운 산지가 전 국토면적의 65.2%를 차지하고 있어 인구증가, 도시화의 진전 및 경제발전에 필요하도록 토지의 공급에 여러 가지 장애요인으로 작용하고 있다. 이러한 이유로 인하여 최근에는 산악과 구릉지의 개발조건이 어려운 지대에도 개발사업이 시행되고 있으며, 개발규모의 대형화에 따른 거대한 절·성토 비탈면이 형성되어지고 있다.

이로 인하여 발생된 비탈면을 원인별로 살펴보면, 국공립공원개발, 택지조성, 고속도로건설, 단지조성 등의 각종 건설공사로 인하여 인위적인 비탈면이 발생되는 인위적인 면과, 주로 중력침식에 의한 것으로 山崩, 山沙汰, 崩落, 浦落, 地滑(땅밀림) 등에 의한 자연적인 면으로 구분된다.

이와 같이 새로이 만들어진 비탈면이 주로 중력의 작용을 받아 흙의 전단응력이 전단강도를 초과한 경우, 본래의 형태를 유지하지 못하고 땅밀림이 일어나 아래로 미끄러져 내려오는 현상을 사면의 변위(slope movement) 또는 사면의 붕괴(slope failure)라고 말한다.

사면의 붕괴는 도로·녹지의 파괴뿐만 아니라 때로는 재산, 인명에도 엄청난 피해를 가져다주며, 크게 유한사면에서 활동면이 원호인 저부파괴를 유도하는 심층붕괴와 사면의 활동 깊이가 비교적 작은 것에 해당되는 표층붕괴로 구분할 수 있다.

일반적으로 식생의 사면붕괴방지 기능은 주로 토양층 내에 분포하고 있는 식생 뿌리의 분포량에 따라 결정된다고 볼 수 있다 즉, 식생의 뿌리는 강우에 의한 침식이나 붕괴를 방지하기 위하여 중요한 영향을 미치는 인자라고 생각할 수 있으며, 이것은 식생뿌리가 토양의 전단저항력을 증가시키는 요인으로 작용되고 있음을 나타내는 사실이다.

즉, 이것은 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 증가하게되며, 이에 의해 전단저항이 증가하게 된다고 설명할 수 있다.

그러나 사면의 붕괴 방지에 대한 식생과의 관계를

설명하기 위해서는 뿌리의 역학적 성질을 일반적인 수치로 나타내어, 식생뿌리가 토양을 단단하게 견착시켜 전단강도를 증가시키는 문제에 대한 뿌리의 성질을 공학적인 측면에서 명확하게 평가할 필요가 있다.

그러므로 본 연구에 있어서는 뿌리의 전단강도 보강 효과를 공학적 수치로 나타내 보고자 식생의 뿌리저항력을 고려한 식생사면의 안정해석을 시도해 보아, 식생 뿌리가 비탈면 저항력에 미치는 영향에 대해서 고찰해 보고자 한다.

이와 같은 방법론은 절·성토 비탈면의 식생 도입에 있어서 중요한 정량적 자료를 제시할 것으로 보여진다.

II. 연구사 및 이론적 배경

1. 연구사

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 해석해 보면 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.

국내에서 이에 대한 식생뿌리의 저항력에 관한 연구는 이민모 등(1991)이 밤나무 뿌리의 인장강도를 측정하여 전단저항력 값을 도출하였으며, 토양의 강도정수가정치에 의한 사면안전해석을 시도한 연구와 김남춘(1990)이 초본식물의 뿌리전단력을 서로 비교하여 전단력이 우수한 초종들로 지표면을 피복하도록 한 연구, 유희구(1992)의 식생 사면안정 해석시 토양의 강도정수 적용에 관한 연구, 조주형(1998)이 참싸리, 조릿대, 참억새 뿌리의 뿌리보강모델에 의한 비탈면 안정 효과에 관한 연구에 불과하다.

외국에서 사면붕괴의 발생에 대한 수목뿌리의 저항력에 관해서는, 뿌리의 인장강도에서 얻어진 저항력 값과 관계된 인자들을 회귀분석하여 수목뿌리의 붕괴방지 기능을 추정한 北村과 難波(1981)의 연구와 발생직

후의 붕괴지에 잔존하는 뿌리의 인장력에 의한 사면안정을 행한 Abe and Iwamoto(1986)의 연구가 있으며, 흙의 전단저항력과 뿌리깊이에 따른 뿌리분포량과의 관계와 붕괴지에서 잔존하는 뿌리분포의 실태를 고찰한 (阿部, 1984; 1985)와 뿌리의 인장강도 시험을 통해서 樹草根系에 의한 사면안정에 관한 실험연구와 인장강도에 따른 목질근계의 거동특성을 응력-변위곡선으로 제시한 (陶山, 1985; 1986)의 연구가 있다. 阿部 등(1986)은 계속해서 삼나무와 졸참나무 뿌리의 직경과 인장력과의 관계 실험을 통해 林地斜面的 표층 붕괴에 대한 저항력 값을 고찰하였다.

또한 陶山(1988)은 수목뿌리의 역학적 평가에서 전단면 파괴시 뿌리전체의 인장강도가 동원되지 않는 단면에서 파괴가 이루어 짐을 밝혔고, 池本 등(1986)은 山腹斜面에서 삼나무, 편백, 해송, 졸참나무의 뿌리분포 조사를 통해서 각 수종 뿌리성장 패턴에 의한 모델을 제시하였다.

Gray and Ohashi(1983)는 자연적인 갈대류의 뿌리와 인조섬유를 인장시험한 결과 인장력이 크게 상이하지 않으므로 인하여 임의의 전단면적의 섬유면적 비율에 의한 응력 변형곡선을 나타냈고, Gray and Al-Refeai(1986)의 연구에서는 삼축압축시험을 통해서 전단면에 직각인 섬유와 랜덤하게 기울어진 섬유와의 뿌리보강 효과를 비교하였다

Scott and Nicholas(1989)는 전단시험을 통해서 뿌리로 보강된 면과 보강되지 않은 면의 변형 특성을 비교하였다. Maher and Gray(1990) 또한 랜덤하게 분포된 뿌리의 보강효과와 여러 가지 역학적 특성을 삼축압축시험을 통해 비교 평가하였다.

전단강도의 증가를 예측하기 위한 간단한 이론적 모델은 Waldron(1977), Wu et al.(1979) 그리고 이와는 별도로 Gray and Leiser(1982)와 같은 공학자들에 의해 유사하게 발달되어져 왔다. 직접 전단시험하는 이들의 연구는 붕괴전단면의 붕괴저항력(Cr)을 흙의 Coulomb강도 식에 넣어, 붕괴발생에 대한 흙과 뿌리의 저항력을 포함한 강도 Rt를 아래의 식에 의하여 구하였다.

$$R_t = C + C_r + \sigma \tan \phi \quad (\text{식 1})$$

점착력(C) : 수직응력(σ) : 내부마찰각(ϕ)

이것들의 연구에 의하면 붕괴지에서의 殘存根 조사에서는 대체로 인장력에 의한 절단의 상태를 표시하고 있다. 이것으로 보아 붕괴발생시 뿌리에는 인장력이 작용하고 있다는 것을 추정할 수 있다.

붕괴전단면에 있어서 뿌리의 저항력은, 單根의 인장파단력 T를 측정한Abe and Iwamoto(1986)와 인장파단력 T의 합계를 붕괴면적 A로 나눈, Wu et al.(1979), Waldron(1977)의 방법이 있으며, 野々田稔郎 등(1994)은 뿌리의 인장강도와 휨강도에서 추정된 수목뿌리의 사면안정효과를 Janbu법의 간편법에 의해서 제안하였다.

본 연구에 있어서는 각 절편의 분할측면에 작용하는 전단력은 0이라고 가정하는 Janbu의 간편법을 이용하여 일반적인 자연사면의 안전율(Fs)과 뿌리보강 효과에 의한 안전율(Fs)을 野々田稔郎 등(1994)이 제안한 간편 Janbu법으로 비교 평가해 보았다. 이러한 연구들의 이론적 배경을 명확하게 정리할 필요성이 있어 몇 가지로 구분하여 요약하면 다음과 같다.

2. 이론적 배경

Wu(1976)는 흙의 전단강도에 있어서, 뿌리로 인하여 전단력의 증가를 예측하기 위한 전단면에 수직인 뿌리보강 모델을 개발하였다.

이 모델에 의해 예측되는 인장력에 의한 단위면적당의 뿌리 저항력, 즉 뿌리에 의한 전단강도의 증가 ΔCr 은 아래 식 2와 같다.

$$\Delta Cr = St (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi) \quad (\text{식 2})$$

St: 흙의 단위면적당의 뿌리의 평균 인장강도

θ : 전단 비틀림각 : $\tan^{-1}(x / z)$

ϕ : 흙의 내부 마찰각

x: 뿌리 변형거리

z: 전단영역

흙의 단위면적당 뿌리의 평균인장강도는 식 3에 의해 구할 수 있다.

$$St = Tr (Ar / A) \quad (\text{식 3})$$

Tr: 임의의 전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도

Ar: 임의의 전단면속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적

A: 임의의 전단면의 면적

$$\Delta Cr = St[\sin(90 - \theta) + \cos(90 - \theta) \tan \phi] \quad (\text{식 6})$$

$$\theta : \tan^{-1}[1 / m + (\tan i)^2]$$

$$m : X / Z$$

i : 뿌리의 초기 기울각

그러므로, 전단강도의 증가 ΔCr 는 식 4가 된다.

$$\Delta Cr = Tr(Ar/A) (\sin\theta + \cos\theta \tan \phi) \quad (\text{식 4})$$

위의 식 4에 의하면 전단강도의 증가는 뿌리의 인장력과 면적비율, 또한 전단비틀림각과 흙의 내부마찰각에 의한 값에 의존한다고 보여진다.

Gray and Leiser(1982)의 현장 및 실험에 의해 관찰된 전단비틀림각(θ)은 40~70°에서 대부분 발생하였고, 식 4에서 흙의 내부마찰각(ϕ)이 25~40°와 전단비틀림각(θ)이 40~90°일 때 괄호쳐진 부분의 값이 1.0에서 1.3사이로 전단비틀림각(θ)과 내부마찰각(ϕ)의 변화에 대해서 비교적 둔감하게 나타났다. 그래서 Wu et al.(1979)은 평균값 1.15를 택하여 식 4를 다음과 같이 간단히 하였다.

$$\Delta Cr = 1.15 Tr (Ar / A) \quad (\text{식 5})$$

이 식에 의하면 전단력의 증가는 뿌리의 면적비율과 인장력에 의하여 결정되어 진다. 그러나 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 뿌리 분포의 면적비율 0.05~0.15%의 범위에서 인장강도가 비례적으로 측정되는 점을 밝혔다.

Wu 등의 모델은 뿌리가 전단면에 직각으로 관통되어 있다고 가정하고 해석하였다. 그렇지만 실제로 뿌리는 무작위 하게 분포하므로 뿌리의 초기 기울각을 고려한 전단면에 기울어진 뿌리보강모델을 생각해 볼 수 있다. 초기 기울각이 $i > 90^\circ$ 이상일 경우는 인장보다는 압축을 받는 경향이 강한 것으로 관찰되었다. 그러므로 Gray and Leiser(1982)는 이 모델에 의한 ΔCr 을 식 6과 같이 나타냈다.

뿌리초기 기울각이 30~60° 일 경우 인장으로 변형된 비율($m = X/Z$)에 따라 괄호쳐진 수식의 값은 식 5와 같은 값의 범위를 갖는다.

이러한 두 가지의 뿌리보강모델에 있어서 Gray and Ohashi(1983)는 전단면에 직각인 섬유(fiber)와 무작위 하게 분포한 섬유에 대해 같은 조건에서 실내전단실험을 실시하여 두 경우간에 매우 유사한 결과를 얻음으로써 무작위 하게 분포한 전단면에 기울어진 뿌리에 대해서도 전단면에 수직인 뿌리보강모델을 적용할 수 있음을 밝혔다. 그러나 목질화 된 $d \geq 20.0\text{mm}$ 굵은 뿌리의 경우는 휨 파괴에 의해서 파괴된 경우도 있을 수 있다고 보아 野々田稔郎 등(1994)은 인장응력만으로 계산된 값이 휨응력에 의한 뿌리의 저항력 값보다 상당히 과대 평가되고 있다고 밝혔다.

이러한 이유를 설명할 수 있는 연구가 이인모 등(1991)에 의해서 조사되었었다 이 연구에 의하면 실제 자연사면에서는 흙의 전단파괴시 뿌리의 인장응력은 전체 인장강도의 40~50% 정도가 동원되므로 Wu et al.(1979)에 의해서 제안된 식 5에 대해 상수 1.15를 0.6으로 수정하여

$$\Delta Cr = 0.6Tr (Ar / A) \quad (\text{식 7})$$

로 하였다.

그러므로 본 연구에 있어서는 Gray and Leiser(1982)에서 관찰된 뿌리분포 면적비율과 식 7을 바탕으로 뿌리의 면적비를 10⁻¹으로 하여 뿌리의 전단저항력을 측정하였다.

III. 재료 및 방법

1. 뿌리 인장강도시험 방법

시험재료는 우리나라 고유의 수종으로 현재 산림 및 조경공사 식재용으로 널리 이용되고 있는 상록침엽교목인 잣나무(*Pinus Koraiensis*)를 선정하였다.

시료의 채취는 수고(H)4.0×수관폭(W)2.0m의 규격을 선정하여 1.5×1.5m의 범위로 표토 주변을 정리한 후 뿌리가 손상이 가지 않도록 주의하여 파내려가 굴취하였고, 굴취후 현장에서 시험편 조작용을 위한 뿌리

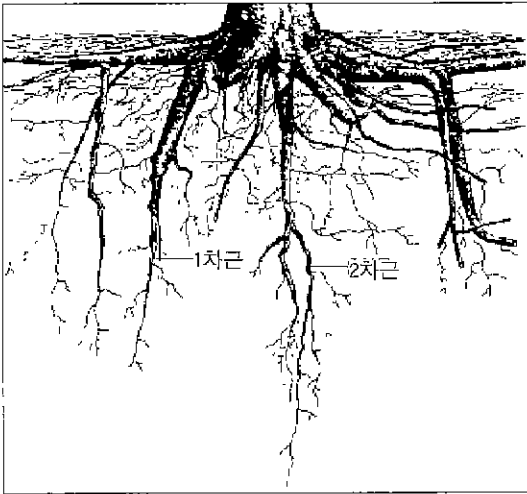


그림 1. 잣나무 뿌리 분포도

를 선별하였다.

뿌리의 분포형태는 그림 1과 같이 垂直深根 水平分散型으로 표층에 집중되고 있지만, 根株의 下部 또는 굵은 水平根의 基部에 뚜렷한 垂下根이 발달하고 있는 것으로 관찰되었다.

뿌리에 의한 토양의 긴박력과 뿌리저항력은 근원경, 뿌리의 부패도, 목질의 강약등과 함께, 시험재료의 채취 후 경과시간과도 수중에 따라서 뿌리의 인장력이 깊은 상관관계가 있는 것으로 연구되어 있는 바, 뿌리의 상대적인 비교를 하기 위해 수분상태는 시험조건을 기건상태로 하였고, 흠속에서의 인장강도를 추정하기 위함이기 때문에, 한 번 기건상태로 된 것이 뿌리의 변질도 있을 수 있다고 고려될 수 있지만 채취한 뿌리를 흠

속의 상태로 재현시키기 위해 침수된 토양속에 24시간 재침수 후 실내온도 20°C, 습도 65%인 상태에서 시험 실시하였다.

시료의 시험편은 비교적 상태가 양호한 1차근과 2차근중에서 직경에 따라 다르지만, 시험편의 평균 길이를 10cm(7.2~14.5cm)로 하여 중앙부에 금속재료의 인장시험법에서 실시하고 있는 단면축소부를 만드는 방법(이하 '수정시험편' 라고 한다.)을 채택하여 수정시험편을 20편 조각하여 선정하였다.

인장강도의 시험은 만능재료 강신도 시험기(Instron C.R.E 4302)를 이용하여 시험편의 양단부 파괴를 최소한으로 줄일 수 있도록 시험기의 크로스헤드 속도(Crosshead Speed)를 300mm/min으로 조정하여 시행하였고, 시험편의 길이에 따른 면이 불균칙하므로 맞물림 거리(Grip Distance)를 30~50mm의 범위 내에서 실시하였다

이러한 방법으로 식생 뿌리의 인장강도시험법을 국제공인시험 검사기관인 한국원사적물시험연구원에서 시험을 실시하였다.

2. 토성 시험

토양의 분류법(soil classification system)은 성질이 비슷한 여러 가지 흠에 대하여 여러 군으로 분류 배열한 것이다. 또한 학문분야에 따라 보는 시각이 다르며 그 표현이 갖는 의미나 범위가 다소 다르다.

본 연구는 식재가 가능한 토양의 사면안정 계산에 필요한 토질정수를 추출함이 목적이므로 김포 수도권 매립지역 내에 반입되어 제방 성토제로 이용되고 있는 토양의 토질설계정수 값을 인용하였다. 이 자료에 의한 대표적인 흠의 물리적 성질은 교란시료 채취로 하였고 역학적 성질을 요구하는 자료는 비교란시료 채취방법을 선택하였다. 모래, 실트, 점토의 함유율에 의해 삼각분류법으로 구분되는 농공학적 입장에서 토성은 Pipette법으로 실험 후 국제법으로 분류하였다.

표 1 토질설계정수

구 분	단위중량(t/m ³)	포화단위중량(t/m ³)	3축 압축시험		간극비(%)	함수비(%)
			점착력(kg/cm ²)	내부마찰력(Deg)		
채 방 범위값	1.85	2.0	0.1~0.5	22~27	0.6	9~14
성토제 대표값	1.85	2.0	0.2	25	0.6	13

표 2. 토성시험 성과표

구 분	탄성계수(kg/cm ²)	포아손비	입도분석			토성 (국제법)
			모래 (%) 2~0.02mm	실트 (%) 0.02~0.002	점토 (%) 0.002이하	
계방 성토제	200	0.30	61	25	14	식양토

토층의 공학적 매개변수(Parameter)를 파악하기 위해 실시된 토질설계정수 및 토성은 표 1, 표 2와 같다.

3. 사면안정 해석 방법

사면은 여러 가지 형태로 붕괴되는데, 어떤 형태로 붕괴되느냐 하는 것은 안정해석을 하는 방법을 선택하는 데 있어서 대단히 중요하다. 일반적으로 붕괴사면의 안정성을 지배하는 요인에는 사면높이, 구배, 단위체적 중량, 점착력, 전단저항각, 간극수압비 등이 고려되므로 토양에 의한 개략적인 강도정수를 표 3으로 정리하였다.

사면의 활동 가능성에 대한 해석을 하는 데 있어서 는 한계평형해석 방법"을 많이 사용하고 있다. 이 방법

으로 해석하기 위해서는 먼저, 예상되는 활동면을 가정해야 한다. 이 활동면은 지층의 구성과 흙의 균질성 등에 좌우되는데, 원호·비원호·직선과 곡선의 조합 등 여러 가지 형상이 가능하다. 균질한 토층인 경우에는 일반적으로 원호형상이 실제와 가깝다.

다음에는 활동체에 대하여 힘 또는 모멘트의 평형, 또는 이 모두의 평형을 고려해야 한다. 다시 말하면, 평형조건이 만족되었을 때의 활동하려는 흙덩이의 전단력과 활동면을 따라 저항하려는 저항력을 계산할 수 있다.

여기서 한 가지 유의해야 할 것은 활동면의 가정에 따라 평형조건이 달라진다는 것이다. 따라서, 여러 가지 가능한 활동면에 대하여 힘 또는 모멘트의 평형상태를 여러 번 가정해서 최소의 안정조건을 찾는 것이 중

표 3 토양구분에 의한 개략적인 강도정수*

종 류	재 료 의 상 태		단위체적중량 (t/m ³)	내부마찰각 (Deg)	점착력 (t/m ²)	분류기호 (통일분류)	
성 토	자갈 및 자갈 섞인 모래	다진것	2.0	40	0	GW,GP	
	모래	다진것	입도가 좋은것	2.0	35	0	SW,SP
			입도가 나쁜것	1.9	30	0	
	사질토	다진것	1.9	25	3이하	SM,SC	
점성토	다진것	1.8	15	5이하	ML, CL MH, CH		
자 연 지 반	자갈	밀실한 것 또는 입도가 좋은것	2.0	40	0	GW, GP	
		밀실하지 않은 것 또는 입도가 나쁜것	1.8	35	0		
	자갈섞인 모래	밀실한 것	2.1	40	0	GW, GP	
		밀실하지 않은것	1.9	35	0		
	모래	밀실한 것 또는 입도가 좋은것	2.0	35	0	SW, SP	
		밀실하지 않은 것 또는 입도가 나쁜것	1.8	30	0		
	사질토	밀실한 것	1.9	30	3이하	SM, SC	
		밀실하지 않은것	1.7	25	0		
	점성토	굳은것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)		1.8	25	5이하	ML, CL
		약간 무른것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)		1.7	20	3이하	
무른것(손가락이 쉽게 들어감)		1.7	20	1.5이하			
점토 및 실토	굳은것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)		1.7	20	5이하	CH, MH ML	
	약간 무른것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)		1.6	15	3이하		
	무른것(손가락이 쉽게 들어감)		1.4	10	1.5이하		

* : 일본도로공단 설계기준(1993)*

요하다.

그러므로 본 연구에 있어서도 사면이 원호활동으로 파괴된다고 가정했을 때, 원의 중심에 관한 모멘트의 평형을 생각하여 $F_s = R_s / Z_s$ 즉 저항모멘트에 의한 회전하려는 구동모멘트의 값으로 해석하였다. 사면안정해석은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 실시하였으며 본 연구에서는 STABL5M[®]을 사용하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 뿌리의 역학적 성질

토양의 특징에 따른 뿌리에 의한 전단강도의 증가를 설명하기 위한 Waldren(1977)의 실험결과에서 뿌리의 저항력은 뿌리의 면적 비에 따라서는 비례적으로 증가하지만 뿌리에 의해 단단하게 견착된 토양의 종류에 따라서는 현저한 차이가 나지 않았다. 그러므로 본 연구는 수목의 인장저항력에 관계되는 인자 가운데에서도 가장 관계가 높은 뿌리 직경과의 관계를 파악하였다.

분석과정에서 얻어진 뿌리직경에 따른 응력 및 역학적 성질은 표 4와 같다

재료에 외력이 작용하면 재료 내부에 저항력, 즉 내력이 일어난다. 이 외력의 크기를 응력(stress)이라 하며, 외력 P가 인장으로 작용할 때의 단면적에 미치는 내력을 인장응력($\sigma = P/A$)이라 한다. 본 시험 결과에서 얻어진 평균값은 422.846kgf/cm²로 나타났다.

또한 길이 L의 재료를 힘 P로써 인장하면 길이 L이 ΔL 이라는 신장과정을 가져오는데 이를 변형율($\epsilon = \Delta L/L$)이라 하며, 단위는 %로 표시하고 있다. 시험 결과 평균 변형율은 0.078로 7.8%이며, 응력과 변형율의 비 $E = \sigma/\epsilon$ 를 탄성계수 또는 영계수라 하는데 시험결과 평균 탄성계수 값은 9,291.92kgf/cm²로 측정되었다.

그리고 수목 뿌리직경과 인장강도와와의 관계를 알아보기 위해 두 요인의 상관관계분석을 실시한 결과 그림 2에서와 같이 뿌리직경과 인장력 사이에 양의 상관관계를 확인할 수 있었으며, 종속변수 인장력에 대한 독립변수 뿌리직경과의 설명력과 영향을 예측하기 위해 회귀분석을 실시한 결과 $Y = 4.446X^{1.4662}$ ($R_s = 0.7203$)

표 4. 잣나무 뿌리의 역학적 성질

번호	직경(mm)	강도(kgf)	응력(kgf/cm ²)	변형율(mm/mm)	초기탄성계수(kgf/cm ²)
1	2,200	15,110	397 502	0,045	8,820 83
2	4,200	26,680	192,578	0 045	2,267.15
3	3,150	15,700	201 464	0,068	3,182 86
4	1,950	17 150	574,268	0,035	14,771.07
5	2,500	23,090	170,396	0,079	8,531.73
6	2 600	12,810	241,281	0 029	6,620.40
7	3,000	10,790	152 651	0,059	2,843.26
8	4,300	50,580	348 307	0,156	7,616.45
9	1,000	7,114	905,803	0,056	18,970.79
10	1,600	2,980	148,216	0,092	2,136.36
11	1,600	16,810	836 08	0,068	14,366.12
12	0,800	2,872	571 379	0 125	9,079.50
13	2,400	20,110	444,539	0,072	10,652.08
14	1,750	13,290	552 546	0,077	10,659.07
15	0,800	2,362	469,916	0,074	9,613.57
16	3,700	59,010	548 835	0,070	13,283.14
17	2,500	16,860	343,477	0,145	6,371.45
18	3,600	22,150	217 615	0,122	6,593,68
19	3,000	21,610	305 726	0,108	9,096 11
20	3,000	37,770	534,348	0,027	20,362,88
평 균	2,483	19,742	422,846	0,078	9,291.92

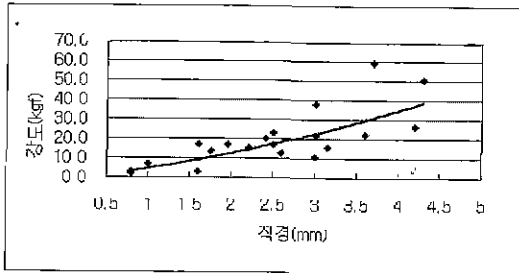


그림 2. 잣나무 뿌리직경과 인장강도의 관계

의 회귀식을 도출하였다.

2. 뿌리의 전단저항력

뿌리에 의한 흙의 전단저항력을 측정하기 위하여 본 연구에 있어서는 흙의 전단강도를 증가시킬 수 있는 식생뿌리에 의한 점착력의 증가를 뿌리의 개체 인장강도 시험을 통해서 나타난 수치로 식 7 뿌리의 보강모델에 대입하여 뿌리의 저항력(ΔCr) 값을 도출한 후 식생뿌리가 비탈사면의 안정에 미치는 영향에 대하여 공학 수치인 안전율(F_s)로 나타내고자 하였다. 수목 굴취시 현장관찰 및 문헌에 의한 Noboru(1979), Gray and Leiser(1982), Schiechl(1980)의 연구를 바탕으로 하여, 본 연구의 해석에 적용되는 잣나무의 붕괴전단력에 미치는 뿌리의 최대깊이는 평균 1m, 뿌리면적 비율은 0.1% 즉, 10^{-3} 으로 하여 뿌리의 전단저항력을 측정하였다.

모델식에 의한 뿌리의 인장강도에 의한 전단저항력은 표 5와 같다.

3. 사면안전율 해석 비교

사면의 안정성은 이른바 안전율(factor of safety)을 근거로 하여 판단하고 있다. 즉 안전율이란 주어진 활동면에 대해 흙의 전단강도를 현재의 전단응력으로 나눈 값이다. 다른 말로 표현하면 안전율이란 사면이 한계평형 상태에 도달하도록 강도정수를 나누어주는

계수이다. 이러한 사면안정 해석에 있어서 널리 사용되어 있는 한계평형해석법은 절·성토 사면의 안정해석에 널리 사용되고 있으며, 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다.

그러므로 본 연구에 있어서는 간극수압을 고려하지 않은 전형적인 원호 파괴를 일으키는 일부지역을 임의의 유한사면으로 가상하여 토성시험에 의해 측정된 강도정수 값들이 비탈사면 안정에 있어서 어떠한 변수로 작용하고 있는지, 자연사면과 뿌리보강사면을 미국 Purdue대학에서 개발한 사면해석 소프트웨어인 STABL5M에서의 간편Janbu법을 적용하여 자연사면의 안전율(F_s)과 뿌리의 보강효과를 고려한 사면안전율($F_{>s}$)를 서로 비교해 봄으로써 뿌리가 사면에 미치는 영향을 공학적 수치로 나타내었다.

이러한 계산을 위해서 임의형상의 활동면에 대하여 적용할 수 있는 분할계산법인 간편Janbu법에 의한 안전율식 식 8과 이를 변형한 뿌리보강모델을 근간으로 한 간편Janbu법의 안전율식 식 9를 적용하여 비교 검토해 보았다.

1) 간편Janbu법에 의한 사면안정 해석

$$F_s = \frac{\sum [(C_i \cdot \Delta l_i \cdot \cos \alpha_i + \sigma_i \cdot \tan \phi_i) / n_i]}{\sum \{ (\Delta W_i) \cdot \tan \alpha_i \}} \quad (\text{식 8})$$

n_i : $\cos \alpha_i \{ \cos \alpha_i + (\sin \alpha_i \cdot \tan \phi_i) / F_s \}$:

ϕ : 내부마찰각 :

i : 각각의切片 :

σ_i : $\Delta W_i - u_i \cdot \Delta l_i \cdot \cos \alpha_i$:

C : 점착력 :

Δl : 切片저면의 길이 :

α : 切片저면의 정사각 :

ΔW : 切片에 작용하는 흙의 중량 :

u : 간극수압

위 식 8의 분자는 붕괴에 대한 저항력 R_s , 분모는 붕괴를 발생시키는 구동력 Z_s 이다.

표 5. 잣나무 뿌리의 전단저항력

수 종	평균인장강도(kg/cm ²)	면적비율(A _r /A)	전단저항력(kg/cm ²)	모델식 적용
잣나무(<i>Pinus Koraiensis</i>)	422.846	10^{-3}	0.253	식 7

2) 간편Janbu법에 의한 뿌리보강 사면안정 해석

$$F_s = \frac{\sum [(C_i + C_{*i}) \Delta l_i \cdot \cos \alpha_i + \sigma_i \cdot \tan \phi_i] / n_i}{\sum [(\Delta W_i + P) \tan \alpha_i]} \quad (식 9)$$

野々田稔郎 등(1994)은 이 식에서 수목 P를 切片에 작용하는 수목의 중량으로 붕괴를 발생시키는 구동력 (Zs)으로 보았고, 뿌리보강 전단저항력 (C_{*i})을 i 절편의 뿌리보강 계산치로 보아 붕괴에 대한 저항력 (R_s)으로 산정하였다.

이와 같은 계산방법으로 STABL5M 프로그램에서 토양의 강도정수 값은 뿌리에 의한 분포영역 1.0m에 대하여 점착력을 증가시켜 입력하였고, 사면위의 단위면적당 수목자체의 고정하중과 설하중, 풍하중 등을 고려한 등분포하중은 100kgf/m²로 환산하여 입력 후 자동 계산된 프로그램을 해석하였다.

자연사면의 프로그램 계산을 위해 단면을 그리기 위한 지하수위를 고려한 임의의 자연사면에서 경계면의

위치와 높이, 토양의 강도정수의 적용, 명령 LIMIT로 정의된 파괴면의 발생이 방지되는 기반암 내에서의 가정에 따라 계산된 과정은 부록1에 나타나 있다.

본 프로그램에서는 수평인 X축은 오른쪽으로 갈수록 증가하고, 수직인 Y축은 윗쪽으로 갈수록 증가하며, 주어진 가상파괴면의 좌표를 명시한 임의발생의 활동면에서 사면의 형상과 계산 결과인 임계면을 볼 수 있으며, 이와 같이 계산된 안전율(F_s)는 그림 3과 같이 임계면의 최소안전율은 1.80으로 추정되었다.

또한 잣나무 뿌리보강 사면의 단면을 그리기 위한 경계좌표와 토양의 강도정수 증가, 등분포 하중에 따라 계산된 과정을 요약하면 부록2와 같으며, 임의의 자연사면과의 비교해석을 위하여 지하수위와 명령 LIMIT로 정의된 파괴면의 발생이 방지되는 기반암 내에서의 가정은 자연사면의 경우와 같도록 하였다. 그러므로 뿌리보강에 의한 점착력의 증가분으로 측정된 임계면에 의한 최소안전율은 그림 4와 같이 임계사면의 최소안전율(F_s)은 1.95로 계산되었다

이와 같이 토양분류에 의한 자연사면과 뿌리보강사면의 안전율은 그림 3, 4에서 보는 바와 같이 부록1, 2

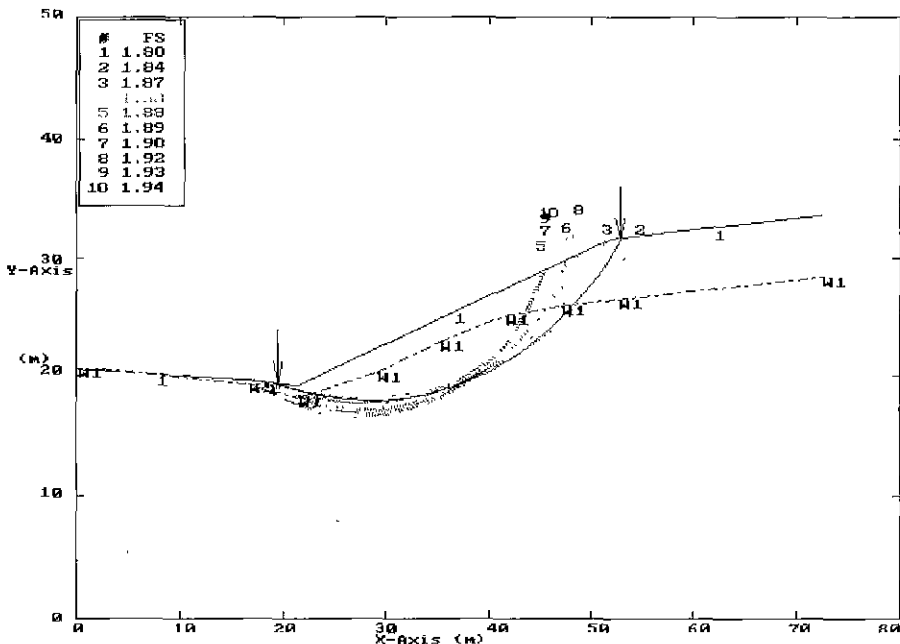


그림 3 임의의 자연사면 단면도

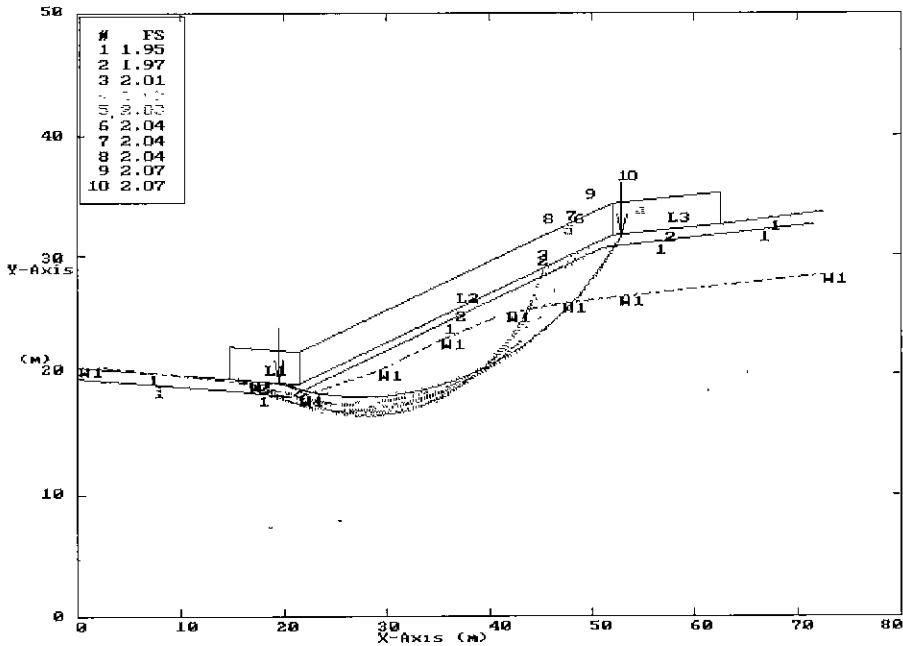


그림 4. 잣나무에 의한 뿌리보강사면 단면도

의 계산과정을 거쳐 표 6과 같이 요약할 수 있으며 이 결과 임의의 자연사면에 있어서 원호형상의 사면파괴가 이루어 질 때, 잣나무의 식생 도입에 의한 뿌리에 의한 사면보강 효과가 상대적으로 커짐을 정량적인 계산에 의하여 증명할 수 있었다.

V. 결론

본 연구는 사면안정 해석에 있어서 식생이 갖는 사면안정 효과에 대하여 공학적인 측면에서 정량적인 수치를 제시하고자 우리나라 교유의 수종으로 현재 산림 및 조경공사 식재용으로 널리 이용되고 있는 상록침엽 교목인 잣나무(*Pinus Koraiensis*) 뿌리의 개체시험을 통해서 얻은 인장강도를 가지고, 기존의 모델식에 대입하여 뿌리의 전단 저항력을 측정 한 후, 미국 Purdue 대학에서 개발한 사면해석 소프트웨어인

STABC5M에서의 간편Janbu법을 이용하여 안전율(Fs)를 비교 평가하여 제시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 잣나무 뿌리의 인장실험에 이용된 평균 뿌리직경은 2.483mm, 인장강도 평균값은 19.742(kgf), 인장응력 평균값은 422.846kgf/cm², 재료의 변형율은 평균 7.8%, 탄성계수는 평균 9,291.92kgf/cm²로 계산되었으며, 뿌리의 저항력은 뿌리직경이 커짐에 따라 인장강도(kgf)가 커지는 정상관을 나타내었다.

2. 흙과 뿌리의 저항력을 포함한 전단강도는 $R_t = C + Cr + \sigma \tan \phi$ (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 강화

표 6. 자연사면과 잣나무 뿌리보강에 의한 사면안정해석 결과

토양분류	점착력(L/m ²)	내부마찰(Deg)	뿌리보강치(kgf/cm ²)	등분포하중(kgf/m ²)	안전율(Fs)	비 고
식양토	2.0	25	-	-	1.795	자연사면
	2.0	25	0.253	100	1.952	뿌리보강사면

게 보강시킨다. Cr은 뿌리의 면적 비에 따라 변할 수 있으나 일반적인 비탈면에 있어서 뿌리의 면적 비를 10'로 추정하여 식 7에 의해 계산된 전단저항력은 0.253kgf/cm²로 측정되었다.

3. 김포 수도권 매립지내의 부토 및 마운딩 성토용으로 반입된 토양을 채취하여 토성시험을 한 결과 식양토(CL)는 C=2.0t/m², ϕ =25 로 측정되어 사면 해석시 토질의 강도정수로 인용하였으며, 이 수치는 표 3에서 제시한 토양구분에 의한 개략적인 강도정수(일본도로공단 설계기준)와 큰 차이를 보이지 않으므로 추후 삼각분류법에 의한 토양분류의 개략적인 사면해석에 있어서 본 자료가 이용될 수 있음을 보여 주었다.

4. 임의의 자연사면에 있어서 원호형상의 사면파괴가 이루어 질 때 지하수위를 고려한 자연사면에서 경계면의 위치와 높이, 토양의 강도정수를 적용한 안정해석을 실시한 결과 식양토(CL)의 안전율(Fs)은 1.795로 측정되었다. 또한 뿌리보강사면의 안정해석에 있어서 안전율(Fs)은 1.952로 측정되어 식생 도입에 의한 사면안전율의 증가를 예측할 수 있었다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 본 연구는 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 사면해석의 통제되는 요인에 대한 명확한 분석이 요구되므로 추후 이에 대한 연구가 요망된다.

주1. 한계평형방법(Limit Equilibrium Method)의 목적은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것이다. 문제를 단순화하기 위한 가정을 설정하고 이 방법을 사용하면 간단한 정역학 이론으로 해를 얻을 수 있게 된다. 이러한 해를 얻기 위해서는 미지수의 수와 방정식 수의 차이를 보완할 수 있는 개수만큼의 가정을 도입하고 있다.

주2 STABL5M은 1975년 Indiana주 Purdue대학교 R.A Siegel 등이 수정 Bishop 방법을 적용하여 사면안정 문제를 다룰 수 있도록 개발한 컴퓨터 프로그램이다. 본 프로그램은 사면안정 문제의 일반적인 해를 2차원 한계평형

법으로 구하며, 사면의 불안정에 대한안전율은 질편법으로 계산한다.

주3. 흙의 단위체적 중량이나 전단강도 등의 토공설계에 사용하는 토질정수는 토질시험 결과에 근거하여 결정하는 것을 원칙으로 하나, 현지상황 등에 의해 토질시험을 할 수 없는 경우 또는, 개략적인 검토를 하는 경우에는 본 수치를 사용할 수 있으며, 지하수위 이하에 있는 흙의 단위체적 중량은 각각 표 중의 값에서 1.0을 뺀 값으로 적용한다.

인용문헌

1. 김남춘(1990) 도로비탈면 녹화에 사용되는 주요 초본식물의 지하부 생육이 토양안정에 미치는 효과에 관한 연구, 한국조경학회지18(2), 45-55
2. 수도권매립지 운영관리조합(1995) 수도권매립지(3공구) 기반시설 조성공사 실시계획보고서, pp. 48-65.
3. 유희구(1992) 식생사면안정해석시 흙의 강도정수적용에 관한 연구 건국대학원 석사학위 논문.
1. 이인모,성상규,임충모(1991) 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구 대한토질공학회지 7(2): 51-66
- 5' 조주형(1998) 식생도입에 의한 비탈면 안정 효과에 관한 연구, 경희대학원 박사학위논문
6. 한국지반공학회(1997) 사면안정, 서울: 구미서관
7. 陶山正憲,原 敏男(1985) 樹草根系による斜面安定化機構:に關する實驗的研究(Ⅰ) 日林論 96 643-644.
8. 陶山正憲,原 敏男(1986) 樹草根系による斜面安定化機構:に關する實驗的研究(Ⅲ) 日林論 97, 599-600.
9. 陶山正憲(1988) 森林の公營的機能發現に係る樹木根系の力學的評價 日林論 99 589-590
10. 北村嘉一,柴波宣七(1981) 抜根試験を通して林木根系の崩壊防止機能 林試年報 333 175-208
11. 町々 田彦郎,林 拙郎,川邊洋(1994) 根系の引張強度と逃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) 156-161
12. 日本道路公團 編(1993) 道路土工構造設計, 圓技術, pp 27-28.
13. 竹内美次,岩崎勇作(1988) 林木根系の強度(Ⅰ), 日林論 99, 587-598
14. 池小 鴻,兵藤和弘,竹下敬司(1986) 山腹斜面における樹木根系の分布調査 日林論 97, 587-589
15. 阿部和時(1984) 上のセン斷抵抗力と根系分布量の關係 日林論 95, 595-596
16. 阿部和時,岩元 賢,青野昭一,石垣逸朗,並水秀樹(1985) 崩壊地における林木根系分布の實態 日林論 96, 639-642.
17. 阿部和時,岩元 賢(1986) 上層のセン斷強度に及ぼす樹根の影響(Ⅱ), 日林論 97 591-593.
18. 阿部和時,岩元 賢,三森利昭,石垣逸朗,並水秀樹(1986) 斜面安定に影響する根系分布と引き抜き抵抗に關する一考察 日林論 97: 595-598
19. Abe, K and Iwamoto, M.(1986) An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength J

Jpn. For. Soc. 68 505-510.

20. Anderson, M G. and Richards, K S (1987) Slope Stability. John Wiley & Sons Ltd pp. 187-230.

21. Gray, D. H. and Leiser, A. J.(1982) Biotechnical Slope Protection and Erosion Control. Van Nostrand Reinhold, New York, p. 271

22. Gray, D H and Ohashi, H.(1983) Mechanics of fiber reinforcements in sand J. of Geotech. Eng Div., ASCE. 109(3) 335-353.

23. Gray, D. H and Al-Refoua, T.(1986) Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. J. of Geotech. Eng Div., ASCE 112(8) 804-820.

24. Maher, M. H and Gray, D H.(1990) Static response of sands reinforced with randomly distributed fiber. J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 116(11) 1661-1667.

25. Noboru, K (1979) Illustration of tree roots Tokyo' 誠文堂新光社

26. Schiechl, H.M.(1980) Bioengineering for Land Reclamation and Conservation. Univ. Alberta Press Edmonton, Canada, p. 401

27. 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.

28. Waldron, L. J.(1977) The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Sic Soc. Am. J. 41. 843-849

29. Wu, T H.(1976) Investigation of Landslides on Prince of Wales Island. Geotechnical Engineering Report 5 Civil Engineering Department Ohio State Univ., Columbus, Ohio, USA p 94

30. 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 16 19-23.

부록 1. 자연사면의 사면안정계산 STABL5M 프로그램

BOUNDARY COORDINATES

Boundary No.	X-Left(m)	Y-Left(m)	X-Right(m)	Y-Right(m)	Soil Type	Below Bnd
1	.00	20.70	16.70	19.70		1
2	16.70	19.70	21.60	19.20		1
3	21.60	19.20	52.10	31.50		1
4	52.10	31.50	72.50	33.50		1

ISOTROPIC SOIL PARAMETERS

Soil Type No	Total Unit Wt. _a (kg/m ³)	Saturated Unit Wt. (kg/m ³)	Cohesion Intercept (kg/m ²)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (kg/m ²)	Type(s) of Soil Piez. Surface No.
1	1850.0	2000.0	2000.0	25.0	.00	.0	1

1 PIEZOMETRIC SURFACE(S) HAVE BEEN SPECIFIED

Unit Weight of Water = 1000.00 kg/m³

Piezometric Surface No 1 Specified by 9 Coordinate Points

Point No.	X-Water(m)	Y-Water(m)	Point No.	X-Water(m)	Y-Water(m)
1	.00	20.70	6	41.70	25.00
2	16.70	19.40	7	47.20	25.90
3	21.60	18.20	8	52.70	26.50
4	29.20	20.30	9	72.50	28.30
5	35.30	22.80			

Searching Routine Will be Limited to an Area Defined by 8 Boundaries Of Which The First 8 Boundaries Will Deflect Surfaces Upward

Boundary No.	X-Left(m)	Y-Left(m)	X-Right(m)	Y-Right(m)
1	.00	4.60	18.80	7.30
2	18.80	7.30	25.50	7.90
3	25.50	7.90	33.80	17.10
4	33.80	17.10	38.70	19.80
5	38.70	19.80	44.40	19.50
6	44.40	19.50	50.50	17.10
7	50.50	17.10	59.10	17.70
8	59.10	17.70	72.50	23.20

A Critical Failure Surface Searching Method, Using a Random Technique for Generating Circular Surfaces, has been Specified.

100 Trial Surfaces have been Generated.

10 Surfaces Initiate from Each of 10 Points Equally Spaced

Along The Ground Surface Between $X = 15.00\text{m}$ and $X = 20.00\text{m}$
 Each Surface Terminates Between $X = 40.00\text{m}$ and $X = 60.00\text{m}$
 Unless Further Limitations were Imposed, The Minimum Elevation
 At Which a Surface Extends is $Y = .00\text{m}$
 3.50m Line Segments Define Each Trial Failure Surface.

Following are Displayed the Ten Most Critical of The Trial Failure Surfaces Examined. They are Ordered - Most Critical First.

Safety Factors are Calculated by the Modified Janbu Metho

Failure Surface Specified by 12 Coordinate Points

Point No	X-Surf(m)	Y-Surf(m)	Point No.	X-Surf(m)	Y-Surf(m)
1	19.44	19.42	7	39.97	20.35
2	22.83	18.52	8	43.08	21.94
3	26.29	18.03	9	45.98	23.91
4	29.79	17.98	10	48.61	26.21
5	33.27	18.35	11	50.95	28.82
6	36.68	19.14	12	52.87	31.58

*** 1.795 ***

부록 2 잣나무 뿌리보강에 의한 사면안정계산 STABL5M 프로그램

BOUNDARY COORDINATES

Boundary No.	X-Left(m)	Y-Left(m)	X-Right(m)	Y-Right(m)	Soil Type	Below Bnd
1	.00	20.70	14.70	19.70	1	
2	14.70	19.70	21.60	19.20	2	
3	21.60	19.20	52.10	31.50	2	
4	52.10	31.50	62.50	32.50	2	
5	62.50	32.50	72.50	33.50	1	
6	.00	19.70	15.70	18.70	1	
7	15.70	18.70	20.60	18.20	1	
8	20.60	18.20	51.10	30.50	1	
9	51.10	30.50	61.50	31.50	1	
10	61.50	31.50	71.50	32.50	1	

ISOTROPIC SOIL PARAMETERS

Soil Type No	Total Unit Wt. (kg/m ³)	Saturated Unit Wt. (kg/m ³)	Cohesion Intercept (kg/m ²)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (kg/m ²)	Piez. Surface No.
1	1850.0	2000.0	2000.0	25.0	.00	.0	1
2	1850.0	2000.0	4530.0	25.0	.00	.0	2

BOUNDARY LOAD(S)

3 Load(s) Specified

Load No.	X-Left(m)	Y-Left(m)	Intensity(kg/m ²)	Deflection(deg)
1	14.70	21.60	100.0	.0
2	21.60	52.10	100.0	.0
3	52.10	62.50	100.0	.0

NOTE - Intensity Is Specified As A Uniformly Distributed Force Acting On A Horizontally Projected Surface.

Safety Factors are Calculated by the Modified Janbu Method

Failure Surface Specified by 12 Coordinate Points

Point No.	X-Surf(m)	Y-Surf(m)	Point No.	X-Surf(m)	Y-Surf(m)
1	19.44	19.36	7	39.99	20.68
2	22.86	18.57	8	43.11	22.27
3	26.33	18.18	9	46.02	24.22
4	29.83	18.21	10	48.68	26.49
5	33.31	18.63	11	51.07	29.05
6	36.71	19.46	12	52.92	31.58

*** 1.952 ***