

유한차분해석을 통한 쏘일네일링 설치각도가 사면 보강효과에 미치는 영향

Influence of Soil Nailing Angle on Slope Reinforcement Effect by Finite Difference Analysis

유 광 호¹ You, Kwang-Ho

민 경 선² Min, Kyoung-Sun

Abstract

LEM (Limit Equilibrium Method) based programs are commonly used for the designs of soil nailing as a slope reinforcement. However, there is a drawback that the interaction between ground and soil nailing is not properly reflected in those programs, which needs to be solved. For economical constructions and designs, research is also required on the support pattern of soil nailing. In this study, therefore, reinforcement effects of soil nailing were compared and analyzed by performing finite difference analyses which could properly consider the interaction between ground and soil nailing. As a result, when the angle from slope to nail is 90°, failure slip surface becomes the largest and thus the factor of safety becomes maximum.

요 지

사면보강을 위한 쏘일네일링 설계 시 한계평형법을 기초로 하는 프로그램이 주로 사용되고 있다. 하지만 사용 프로그램들은 지반과 쏘일네일링의 상호작용을 제대로 반영하지 못하는 단점을 가지고 있어 이를 보완할 필요가 있다. 또한 경제적인 시공 및 설계를 위해 쏘일네일링 보강패턴에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 지반과 쏘일네일링의 상호작용이 고려되는 유한차분해석을 실시하여, 쏘일네일링의 보강효과를 비교·분석하였다. 그 결과 사면으로부터 네일까지의 각도가 90°가 될 때 활동면이 최대로 커짐에 따라 최대안전율을 보였다.

Keywords : Slope, Circular failure, Soil nailing, Finite difference method, Shear strength reduction method

1. 서 론

국토의 효율적인 개발을 위해 도로, 터널 등 각종 시설물의 건설이 점차 늘어남에 따라 대규모 절토사면의 조성이 요구되고 있다. 이러한 절토사면은 태풍, 강우 등의 원인으로 붕괴되어 인명피해와 재산피해가 늘어나고 있는 추세이다. 사면의 붕괴를 사전에 방지하기 위

한 현장조사 및 해석방법, 예측기법, 사면안정공법 등에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이 중 사면 안정 공법에 대한 관심이 증가되고 있다.

사면 안정공법은 크게 안전율을 유지하기 위한 보호공법과 안전율을 증가시키기 위한 보강공법이 있다. 보호공법으로는 배수, 표면보호 등이 있으며, 보강공법으로는 억지말뚝, 앵커, 쏘일네일링, 옹벽 등이 있다. 이중

1 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Univ. of Suwon, Tel: +82-31-220-2566, Fax: +82-31-220-2522, khyou@suwon.ac.kr, 교신저자)
2 비회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Suwon)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

쏘일네일링 공법은 토사층에 보강하여 원지반의 전단강도를 증대시킴으로서 사면의 안정성을 증가시키는 공법으로 기존의 흙막이 가시설이나 절토사면에 주로 적용되고 있다. 이 공법은 Stocker et al.(1979)과 Scholsser (1982)에 의해 처음으로 개발되어 시공되기 시작하였다. 그리고 1980년대 후반 Mitchell and Villet(1987)에 의해 쏘일네일링 이론이 정립되어 적용성이 더욱 확대되었다. 1990년대 초 국내에 도입되어 지반공학의 많은 분야에 사용되고 있으며 현재는 일반적인 지반보강 및 사면 안정공법이 되었다.

하지만 그 동안 국내에서 쏘일네일링 설계 및 시공은 주로 일본, 미국이나 유럽의 자료에 근거하여 이루어져 왔다. 또한 약 10여년의 시공 실적을 통해 많은 현장계측 자료가 축적되어 있음에도 불구하고 이에 대한 체계적인 분석은 상대적으로 부족하다. 아울러 사면의 쏘일네일링 보강설계가 한계평형법에 기초하여 개발된 프로그램에 의해 주로 이루어지고 있는데, 사용 프로그램의 한계로 지반과 쏘일네일링의 상호작용이 제대로 반영되지 못하는 실정이다. 따라서 지반과 쏘일네일링의 상호작용을 고려한 해석의 필요성이 증대되고 있다. 또한 경제적인 시공 및 설계를 위해 네일의 각도, 간격 및 길이로 구성되는 적절한 보강패턴에 대한 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 사면에 쏘일네일링 보강 시 지반과 네일의 상호작용이 고려되는 유한차분해석을 실시하여 네일의 설치각도에 따른 보강효과를 비교·분석하고자 한다. 이를 위해 원호파괴가 발생되는 1:1.5, 1:1.2, 1:1 경사의 가상 토사사면을 대상으로 하였으며, 유한차분법을 기초로 하는 FLAC/slope 5.0(Itasca Consulting Group, Inc., 2005) 프로그램을 이용하였다. 또한 쏘일네

일링 보강 시 설치각도를 달리하였으며, 간격과 길이를 변화시켜 각도와와의 상관관계를 비교·분석하였다.

2. 쏘일네일링 모델링 시 고려사항

기존의 한계평형해석 시에는 활동면이 고정되어 있으며, 쏘일네일링의 전단 및 휨응력이 고려되지 않고 인장저항만이 고려되었다. 이 경우 수평으로 보강된 벽체나 수직에 가까운 벽체에만 적용할 수 있어 경사진 사면과 같이 네일의 휨거동이 뚜렷한 경우에는 적용성의 한계가 있다. 반면 유한차분해석의 경우 네일의 전단 및 인장거동, 그라우트의 파괴를 묘사할 수 있으며, 보강량이 증가함에 따라 활동면의 크기가 증가된다.

2.1 지반과 네일의 상호작용

쏘일네일링으로 보강된 사면에서의 거동은 변위해석 방법과 한계평형법을 이용한 설계가 일반적이며 네일과 파괴면이 교차하는 지점에서의 변위, 벡터성분 파악이 중요하다. 네일에 발현되는 힘은 구조물의 기하학적인 형태, 흙의 파괴거동 및 두 재료의 상호작용에 의한 거동 등에 의해 결정된다. 네일의 효과가 발휘하려면 한계상태에서 흙과 네일이 같이 거동한다는 전제조건에서 시작해야 한다.

수평 네일로 보강된 수직에 가까운 벽체에서는 네일의 인장응력에 의한 보강효과가 지배적이고 전단과 휨응력에 대한 분포는 적게 나타난다. 실제 설계에서 사용하중 조건하의 전단과 휨저항은 무시할 수 있고 파괴조건에서도 마찬가지이다. 일반적으로 휨과 전단응력은 사용하중 상태에서 인장응력의 10%보다 작게 나타난

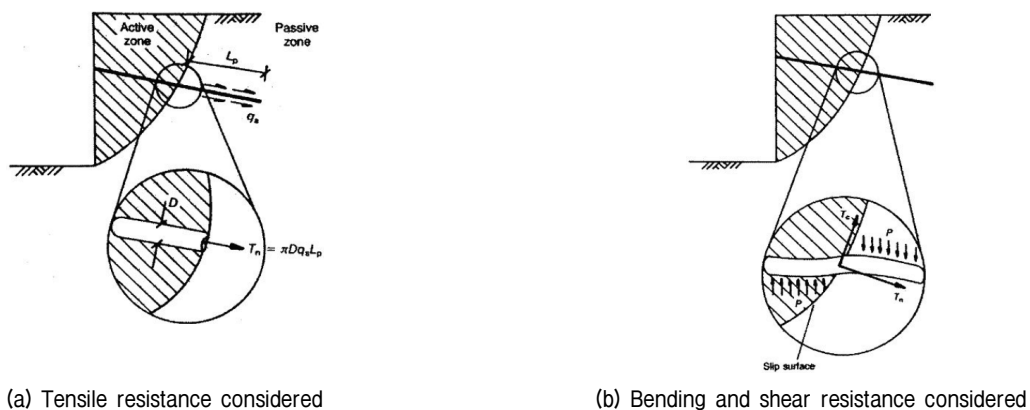


Fig. 1. Reinforcement mechanism of a nail (Ortigao et al., 1995)

다. 이로 인해 대부분의 네일 설계나 해석 프로그램에서도 인장하중만을 고려한다. 그러나 이러한 설계개념은 수직 벽체 혹은 수평에 가까운 각도로 네일이 설치된 벽체 구조물의 경우에 유효한 것으로 사면과 같이 네일의 휨거동이 뚜렷한 경우에는 적용성의 한계가 있다. 특히, 극한상태로 갈수록 전단 및 휨응력의 영향이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 인장력만을 고려하는 현재의 설계개념으로 네일 보강 사면을 설계할 경우 휨 거동을 고려하지 않아도 될 정도의 충분한 인장저항을 확보하는 방안을 강구해야 한다. Fig. 1은 네일에 발생하는 저항력을 도시한 것으로 Fig. 1(a)는 인장저항만을 고려한 경우를 Fig. 1(b)는 휨 및 전단저항까지 고려한 경우를 나타낸 것이다.

2.2 유한차분해석 시 모델링 방법

FLAC/slope를 이용하여 쓰일네일링 보강 시의 수치 해석을 위해 사용되는 케이블 요소(cable element)는 축방향 거동과 그라우팅과의 전단거동으로 묘사되어 1자유도 1차원 요소로 취급된다. 축방향 거동의 경우에는 식 (1)과 같이 케이블의 단면적(A)과 탄성계수(E)로 정의되어 각 절점에서 변형률에 의한 축력증분(ΔF^t)이 계산된다.

$$\Delta F^t = -\frac{EA}{L} \Delta u^t \quad (1)$$

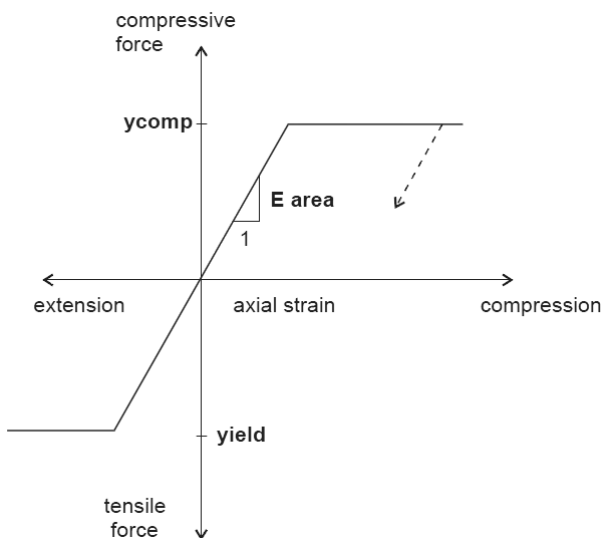


Fig. 2. Cable material behavior for cable elements (Itasca Consulting Group, Inc., 2005)

여기서, ΔF^t : 축력증분, E : 보강재의 탄성계수, A : 보강재의 단면적, L : 보강재의 길이, Δu^t : 축변위 증분

인장항복강도(yield)와 압축항복강도(ycomp)는 케이블에 할당될 수 있으며, Fig. 2와 같이 케이블 축력은 압축 또는 인장 강도 이상으로 발달할 수 없다. 인장 및 압축항복강도가 지정되지 않는다면 그 방향으로의 강도는 0이다.

Fig. 3과 같이 보강재 내에 발생하는 축력을 계산하는데 있어서 변위가 보강재 선상에 있는 절점에서 계산된다. 각 절점에서 불평형력이 보강재 내에서의 축력으로 계산되고, 그라우트 고리에 따라 발생하는 전단작용을 통해 발생하는 전단력도 계산된다. 그라우트의 전단거동은 절점에 점착강도와 마찰저항의 합으로 표시되는 그라우팅의 전단강성을 적용하여 묘사된다.

그라우트 고리의 전단거동은 절점에 위치한 스프링(spring)-슬라이더(sliding)시스템으로 표현된다. 그라우트 고리의 전단거동은 그라우트의 전단강성(K_{bond})에 의해서 기술된다. 요소의 단위길이 당 그라우트 내에서 발생할 수 있는 최대전단력은 그라우트의 점착강도와 응력에 종속적인 마찰저항의 함수이다. 식 (2)는 최대전단력(F_s^{max})을 산정하는 식이다.

$$\frac{F_s^{max}}{L} = S_{bond} + \sigma'_c \times \tan(S_{friction}) \times perimeter \quad (2)$$

여기서, F_s^{max} : 최대 전단력, S_{bond} : 그라우트의 점착강도, σ'_c : 요소에 수직인 방향의 유효봉압, $S_{friction}$: 그라우

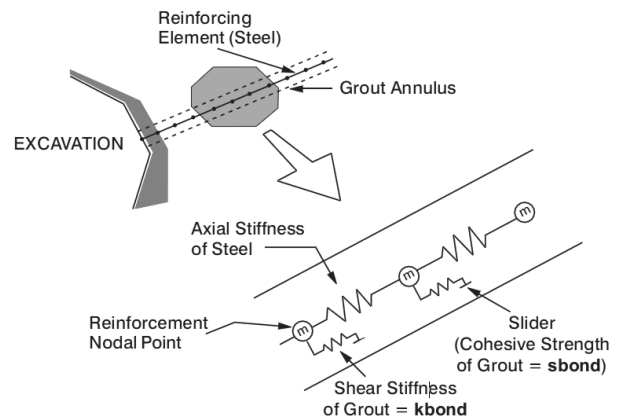


Fig. 3. Conceptual mechanical representation of fully bonded reinforcement which accounts for shear behavior of the grout annulus (Itasca Consulting Group, 2005)

트의 내부마찰각, *perimeter* : 요소의 노출된 주변장

축 케이블방향에 수직인 평균 속도성분은 바로 절점으로 전달된다. 즉 케이블절점이 수직방향의 그리드 운동에 종속된다. 만약 절점 양쪽의 케이블 세그먼트가 일직선상에 있다면 절점은 그리드 상에서 수직력을 발휘하지 못하지만 세그먼트가 서로 각을 이룬다면 축력의 일부가 평균 수직방향으로 작용한다. 따라서 이 합력은 그리드와 케이블절점에 같이 작용하여 수직하중을 견딜 수 있다.

케이블 요소의 입력 물성은 케이블의 단면적, 탄성계수, 인장항복강도, 압축항복강도, 노출된 주변장, 밀도와 그라우트의 전단강성, 점착강도, 마찰저항이다. 케이블과 관련된 물성은 문헌을 통해 쉽게 찾을 수 있으나 그라우트와 관련된 물성은 평가하기가 어렵다. 그라우트 고리는 완전 탄소성체로서 거동하는 것으로 가정한다. 상대전단변위(u^t)의 결과로서 케이블의 단위길이 당 동원되는 전단력(F^t)은 그라우트의 전단강성(K_{bond})과 관련된다. 이 모델에서 사용된 전단강성 추정식은 식 (3)과 같다(Itasca Consulting Group, Inc., 2005).

$$K_{bond} \cong \frac{2\pi G}{10\ln(1+2t/D)} \quad (3)$$

여기서, G : 그라우트의 전단탄성계수, t : 그라우트의 두께, D : 보강재의 직경.

그라우트 내에서의 케이블 길이 당 최대전단력은 식 (4)로 결정한다. 점착강도와 마찰각은 서로 다른 구속압력 하에서의 인발시험을 통해 결정할 수 있으며 이 같은 결과가 없을 경우 단위길이 당 최대전단력은 최대 전단강도로부터 근사될 수 있다(St. John and Van Dillen, 1983).

$$\tau_{peak} = \tau_f Q_B \quad (4)$$

τ_f 는 암석이나 그라우트 중 더 약한 재료의 일축압축강도의 반 정도가 되며 Q_B 는 그라우트와 암석간의 결합 품질을 나타낸다(완전결합의 경우 $Q_B = 1$). S_{bond} 는 식 (5)로 구할 수 있다.

$$S_{bond} = \pi(D+2t)\tau_{peak} \quad (5)$$

3. 수치해석 모델링

본 논문에서는 원호파괴 사면에 쓰일네일링 보강 시 보강패턴에 따른 사면 보강효과를 비교하기 위해 가상의 사면을 대상으로 하였다. 안정성 평가 시 FLAC/slope를 이용한 유한차분해석을 실시하였으며, 전단강도감소 기법에 기초한 'solve fos' 기능을 이용하여 안전율을 산정하였다.

FLAC/slope 해석 시 지반은 탄소성(Mohr-Coulomb) 모델이 적용되었으며, 건기 시와 우기 시로 구분하여 모델링하였다. MLTMA(2011)에 의하면 사면이 토사와 풍화암으로 이뤄져 있는 경우에는 지반조사 결과, 지형조건 및 배수조건 등을 종합적으로 고려하여 우기 시 지하수위를 설계자가 임의로 결정하도록 되어있다. 따라서 본 논문에서 우기 시의 지하수위는 가장 위험성이 높을 때인 지표면까지 차있는 만수위로 가정하였다.

한편 FLAC/slope 해석 시 쓰일네일링은 전단거동이 고려되는 케이블요소로 모델링하였다. 그리고 보강패턴에 따른 효과를 비교·분석하기 위하여 네일 각도, 간격, 길이를 다양하게 변화시켜 가며 모델링하였다.

3.1 연구 대상사면 및 모델링 개요

본 연구의 해석단면은 Fig. 4와 같이 경사가 1:1.5, 1:1.2, 1:1인 토사사면을 대상으로 하였다. 해석단면은 높이가 10m인 사면을 좌측과 우측, 그리고 하부측 모두 사면 높이의 2배인 20m씩 넓혀 총 높이 30m, 폭 55m로 토사로 구성하였다. 이는 FLAC/slope 해석 시 충분히 해석영역을 넓히지 않을 경우 활동면의 형상이 해석영역을 벗어나기 때문이다.

FLAC/slope를 이용한 유한차분해석을 실시하기 위하여 사면 경사가 1:1.5일 경우 Fig. 5의 요소망을 이용하여 모델링하였다. 좌·우 측면경계에서 수평방향변위를

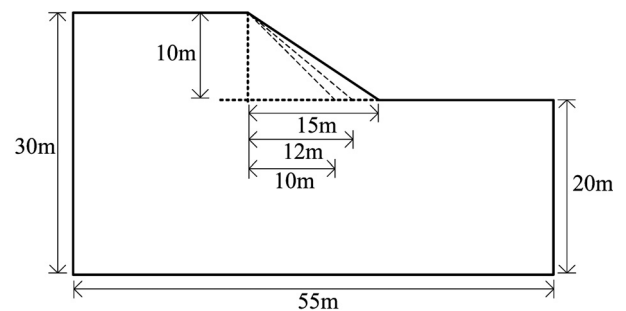


Fig. 4. Analysis section

Table 1. Ground properties

classification	density (kN/m ³)	cohesion (kPa)	friction angle (°)	porosity
soil	19	10	28	0.3

Table 2. Soil nail properties

size	diameter (m)	cross-section area (m ²)	allowable tensile stress (MPa)	elastic modulus (MPa)	hole diameter (m)
SD400	0.0254	5.067 × 10 ⁻⁴	392.4	210	0.1

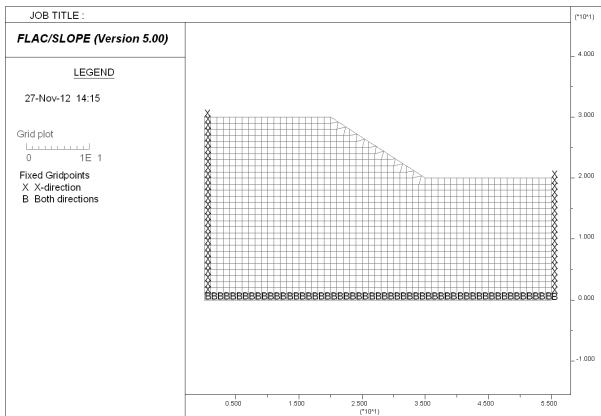


Fig. 5. Analysis mesh and boundary conditions (slope angle 1:1.5)

Table 3. Grout properties

compressive strength (MPa)	bond strength (MN/m)	friction angle (°)
20	0.314	30

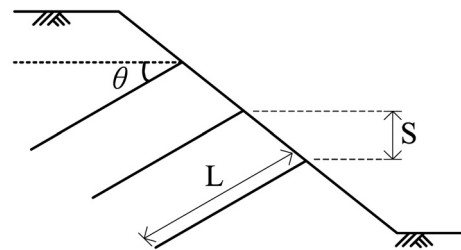


Fig. 6. Soil nailing support pattern

구속하고, 하부경계는 수직방향과 수평방향을 구속하도록 경계조건을 설정하였다. 그리고 지반모델링 시 지반 물성치와 해석단면 형상에 따라 원호파괴 활동면이 생성되는 탄소성(Mohr-Coulomb)모델이 적용되었다. 우기 시 지하수위는 지표면까지 차있는 만수위로 모델링하였다. 한편 사면 경사가 1:1.2와 1:1인 경우도 1:1.5인 경우와 동일하게 모델링하였다.

대상사면의 안정성 해석을 실시하기 위하여 적용된 지반의 물성치는 Table 1과 같으며, Eom(2009)이 적용한 물성치를 동일하게 사용하였다. 단 지반의 인장강도는 점착력의 0.5배를 사용하였다. 한편 우기 시 FLAC/slope 해석에 사용되는 간극률은 Eom(2009)의 연구에서는 사용되지 않았으나, 본 논문에서는 ‘조밀하고 균등한 모래’의 간극률에 해당하는 값인 0.3(Jang, 2010)을 사용하였다.

3.2 쏘일네일링 모델링

3.2.1 적용물성치

본 논문에서 보강재로 사용될 네일은 D-25 이형철근으로 물성치는 Table 2와 같다. FLAC/slope에서 쏘일네일링

모델링 시 네일의 전단거동을 고려하는 케이블 요소를 이용하여 모델링하였다. 케이블 요소의 입력 물성치 중 그라우트의 점착강도는 식 (5)에 의하여 계산하여 적용하였으며, 이때의 그라우트의 일축압축강도는 Lee(2012)의 값을 이용하였다. 또한 그라우트의 점착강도 계산 시 파괴는 지반과 그라우트 사이에서 일어나는 것으로 가정하였다. 그리고 그라우트의 내부마찰각은 Bang et al.(2003)이 사용한 30°를 적용하였다. Table 3은 본 연구에서 적용된 그라우트의 물성치이다.

3.2.2 보강패턴

본 연구에서 보강공법으로 선정한 쏘일네일링의 설치각도에 따른 보강효과를 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 모델링을 실시하였다. 이를 위해 네일 각도(θ)는 수평면과 네일 사이의 각도이며, 10°, 20°, 30°, 40°를 적용하였다. 또한 각도와 간격 및 길이 간의 영향을 알아보기 위해 간격(S)은 네일과 네일사이의 수직간격으로서 실제 시공에서 많이 쓰이는 1m, 1.5m, 2m를 사용하였다. 한편 길이(L)는 사면의 표면으로부터 활동면까지의 거리를 고려하여 6m, 7m, 8m를 적용하였다.

4. 쏘일네일링 설치각도에 따른 보강효과

본 연구에서는 유한차분해석을 통한 쏘일네일링 설치각도의 변화에 대한 원호파괴 사면의 안정성 평가를 실시하였다. 이를 위해 경사가 1:1.5, 1:1.2, 1:1인 가상의 사면을 대상으로 하여 쏘일네일링의 보강패턴을 변화시켜가며 안전율을 비교하였으며, 건기 시와 우기 시로 나누어 해석을 실시하였다.

유한차분법을 기초하는 FLAC/slope 5.0(Itasca Consulting Group, Inc., 2005)을 이용하였다. 사면의 안전율 산정 시 전단강도감소기법에 기초한 FLAC/slope의 'solve fos'기능을 이용하였다.

우기 시 해석을 위해 지반의 간극률을 고려하였으며, 지하수위는 MLTMA(2011) 기준에 의하면 대상사면이 토사로 구성된 경우에는 지반조사 결과 등을 종합적으로 고려하여 지하수위를 설계자가 임의로 결정할 수 있기 때문에 안정성이 가장 낮을 때인 만수위로 가정하였다.

또한 쏘일네일링의 보강 시 네일 각도를 달리하여 안정성평가를 실시하였으며, 각도와 간격, 길이의 상관관계를 비교·분석하기 위해 간격과 길이 또한 변화시켰다. 네일 각도는 10°, 20°, 30°, 40°로 정하였으며, 간격은 1m, 1.5m, 2m로 하였다. 길이는 사면에서부터 활동면까지의 거리를 고려하여 6m, 7m, 8m를 적용하였다.

Fig. 7은 건기 시 네일 간격 1.5m, 길이 7m 일 때 네일 각도별로 사면 경사를 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 사면 경사가 1:1.5인 경우 네일 각도가 수평면으로부터 하향으로 증가함에 따라 안전율이 일정한 증가폭을 보였다. 한편 사면 경사 1:1.2, 1:1일 경우도 네일 각도가 증가함에 따라 안전율이 증가하였으나 각도가 증가할수록 안전율의 증가폭이 줄어드는 것으로 나타났다. 사면 경사가 1:1.5, 1:1.2, 1:1의 순으로 안전율이 크

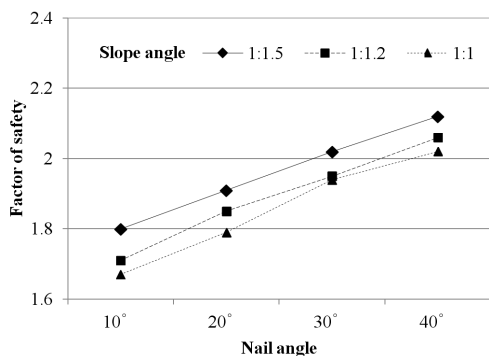


Fig. 7. Factor of safety vs. nail angle as a function of slope angle (dry condition, nail spacing 1.5 m, nail length 7 m)

게 산정되었으며, 1:1.2와 1:1의 안전율 차이가 적게 나타났다. 우기 시도 건기 시와 동일한 경향을 보였다.

Fig. 8은 건기 시 사면 경사 1:1.2, 길이 7m 일 때 네일 각도별로 간격을 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 네일 간격이 1m인 경우 각도가 수평면으로부터 하향으로 증가함에 따라 안전율이 증가하였으며, 증가폭은 네일 각도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 간격 1.5m, 2m인 경우도 같은 경향을 보였으며, 간격이 1m, 1.5m, 2m 순으로 안전율이 크게 나타났다. 또한 우기 시도 건기 시와 동일한 경향을 보였다.

Fig. 9는 건기 시 사면 경사 1:1.2, 간격 1.5m 일 때 네일 각도별로 길이를 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 길이가 6m인 경우 각도가 증가함에 따라 안전율이 증가하였으며, 증가폭은 각도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 한편 네일 길이 7m, 8m에서도 같은 경향을 보였으며, 각도가 증가함에 따라 길이에 대한 영향은 커지는 것으로 나타났다. 또한 우기 시도 건기 시와 동일한 경향을 보였다.

한편 본 논문에서 실시한 네일 각도에 따른 안전율의 경향이 Eom(2009)과 상반되는 결과를 보여 쏘일네일링

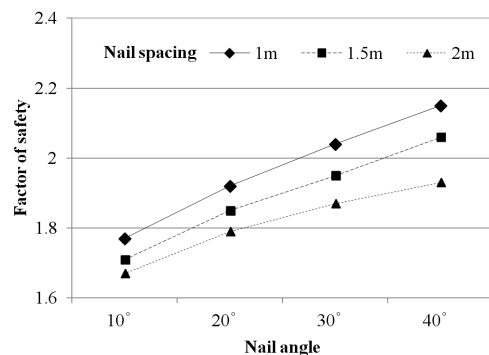


Fig. 8. Factor of safety vs. nail angle as a function of nail spacing (dry condition, slope angle 1:1.2, nail length 7 m)

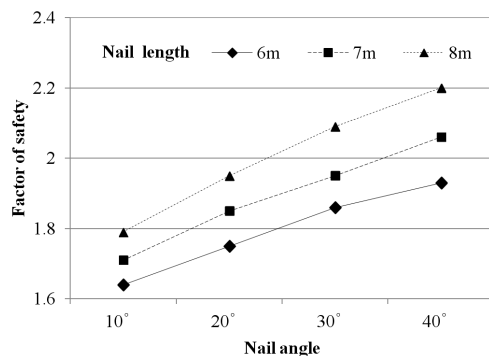


Fig. 9. Factor of safety vs. nail angle as a function of nail length (dry condition, slope angle 1:1.2, nail spacing 1.5 m)

의 각도에 따른 안전율의 변화를 자세히 알아보려고 추가적인 수치해석을 실시하였다. 이를 위해 수평면으로부터 네일 각도를 50°부터 10°씩 증가시켜 80°까지 적용하였으며, 간격도 추가적으로 3m, 4m인 경우를 고려하였다.

Fig. 10은 추가해석의 결과이며, 건기 시 네일 간격 1.5m, 길이 7m 일 때 네일 각도별로 사면 경사를 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 사면 경사가 1:1.5와 1:1.2인 경우 네일 각도가 수평면으로부터 하향 50°일 때까지 증가하였으며, 50°를 초과할 경우 안전율이 감소하였다. 한편 1:1일 경우에는 40°까지 안전율이 증가하였으나 40°를 초과할 시 안전율이 감소하였다. 네일 각도

가 15°일 경우 최대안전율을 보인 Eom(2009)의 연구결과와 비교할 때 40°와 50° 사이로 나타난 본 연구의 결과가 다소 차이를 보이는데, 이는 해석 시 사용된 쏘일 네일링의 물성치 차이 때문인 것으로 판단된다. 한계평형법에 기반을 둔 TALREN 97을 이용한 쏘일네일링 보강 해석에는 본 연구에 사용된 그라우트의 점착강도와 유사한 주변마찰저항값을 사용하는데, Eom(2009)의 연구에는 제시되지 않았지만 본 연구에서 사용한 그라우트의 점착강도보다 1/10배 작은 약 30kN/m 정도의 주변마찰저항값이 적용된 것으로 추정된다. 따라서 그라우트의 점착강도를 Eom(2009)의 연구에서 사용된 주변마찰저항과 유사한 값을 적용한다면 기존연구에 부합하

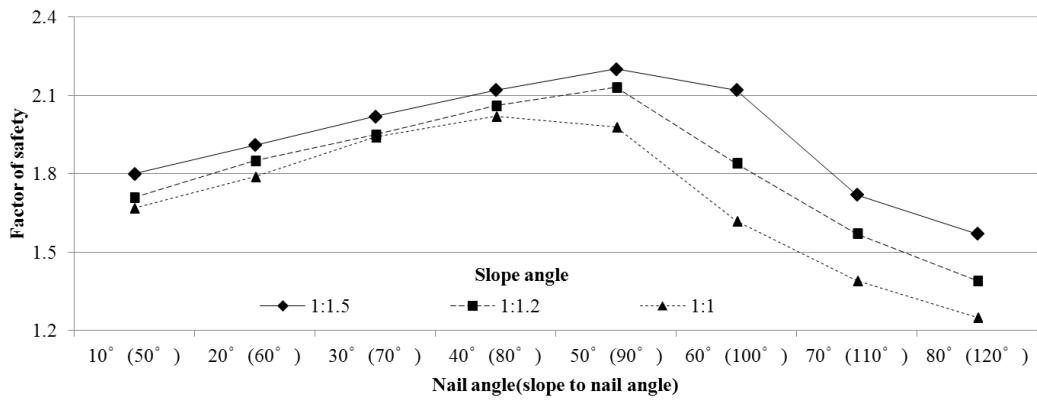


Fig. 10. Factor of safety vs. nail angle as a function of slope angle (additional analysis, dry condition, nail spacing 1.5 m, nail length 7 m)

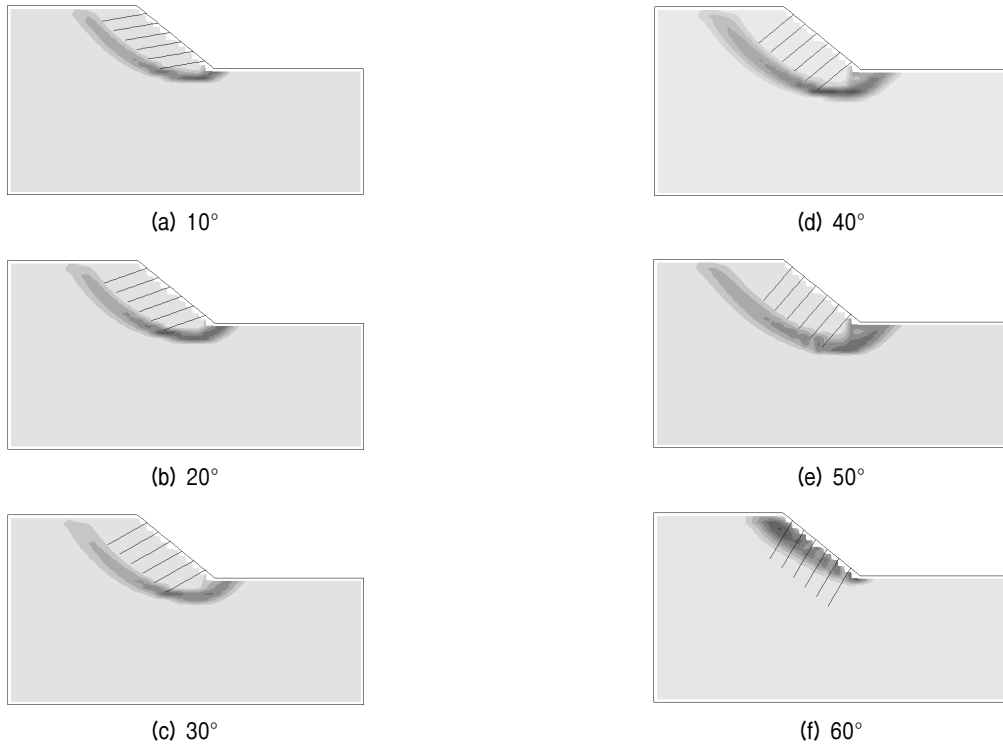


Fig. 11. Comparison of failure slip surfaces according to nail angle (dry condition, slope angle 1:1.2, nail spacing 1.5 m, nail length 7 m)

는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

한편 Fig. 10의 가로축 팔호안의 숫자는 사면과 네일이 이루는 각도이며, 80°~90°일 경우 최대안전율을 보였다. 또한 Fig. 11은 네일 각도에 따른 활동면을 나타내는 것으로서 네일의 각도가 증가함에 따라 활동면이 커졌으며, 사면과 네일의 각도가 직각(네일 각도 50°)보다 클 경우 Fig. 11(f)와 같이 활동면이 줄어들었다. 이러한 경향은 간격이 1m일 때와 2m일 경우도 마찬가지로 나타났다. 따라서 네일 각도가 증가함에 따라 활동면의 크기가 커짐으로서 안전율이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 추가해석의 결과이며, 건기 시 사면 경사 1:1.2, 길이 7m 일 때 네일 각도별로 간격을 달리하여

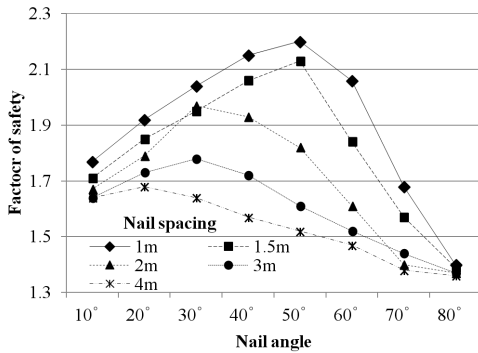


Fig. 12. Factor of safety vs. nail angle as a function of nail spacing (additional analysis, dry condition, slope angle 1:1.2, nail length 7 m)

안전율을 나타낸 것이다. 네일 간격이 1m와 1.5m일 경우 최대안전율은 각도가 50°일 때로 나타났다. 반면에 네일 간격이 2m와 3m일 경우 각도가 30°일 때로 나타났다. 또한 간격이 4m일 경우에는 최대안전율을 나타낸 각도가 20°로 나타났다. 네일 간격이 늘어남에 따라 최대안전율을 보이는 각도가 작아지는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 네일 간격에 따른 활동면을 나타낸 것이다. 간격이 1m, 1.5m, 2m인 경우 최하단부 네일의 끝을 지나는 것으로 나타났다. 간격이 3m인 경우 모든 네일의 끝을 지나는 것으로 나타났으며, 간격이 4m인 경우에는 네일의 중간부를 관통하여 생성되었다. 따라서 간격이 증가하면 활동면이 네일을 가로질러 생성되기 때문에 최대안전율을 주는 각도가 작아지는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 추가해석의 결과이며, 건기 시 사면 경사 1:1.2, 간격 1.5m 일 때 네일 각도별로 길이를 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 네일 길이가 6m, 7m인 경우 네일 각도가 50°일 때 최대안전율을 보였다. 8m인 경우 각도가 40°와 50°일 때 같은 안전율로 최대값을 보였다. 한편 네일 각도가 증가함에 따라 최대안전율을 주는 각도를 초과할 경우 길이에 대한 영향은 없는 것으로 나타났다.

사면에 쏘일네일링 보강 시 설치각도에 따른 안전율

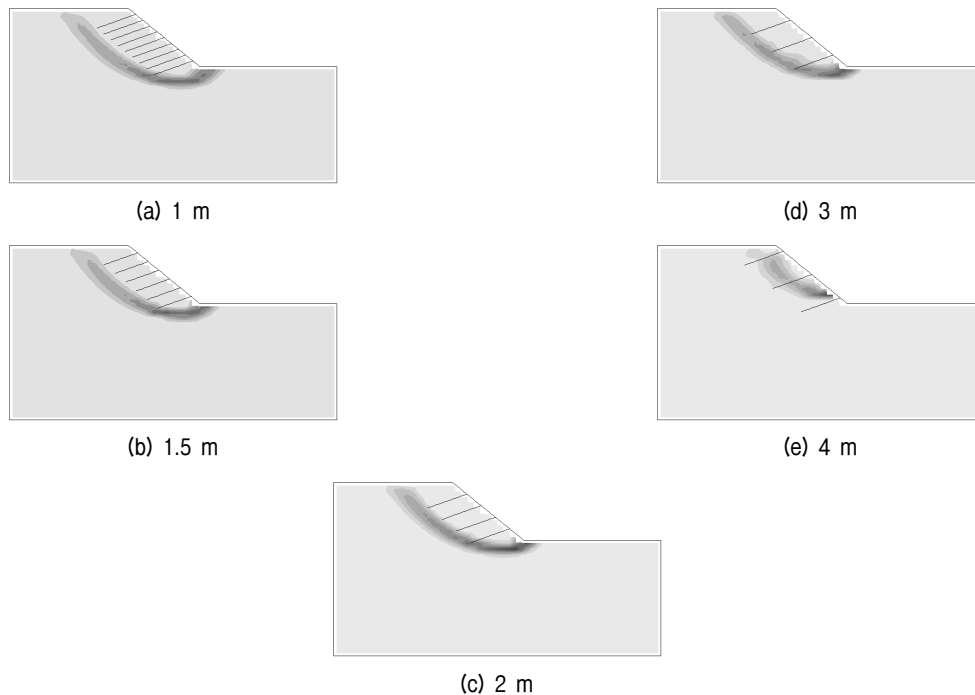


Fig. 13. Comparison of failure slip surfaces according to nail spacing (dry condition, slope angle 1:1.2, nail angle 20° , nail length 7 m)

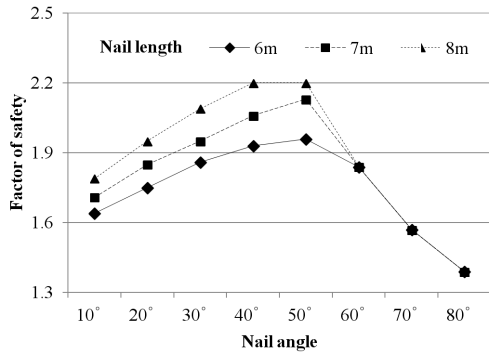


Fig. 14. Factor of safety vs. nail angle as a function of nail length (additional analysis, dry condition, slope angle 1:1.2, nail spacing 1.5 m)

을 비교·분석해 보았다. 쏘일네일링 보강 시 네일 간격이 1m~1.5m일 경우 네일의 각도가 수평면으로부터 하향으로 증가함에 따라 안전율이 증가하다가 사면을 기준으로 네일이 이루는 각도가 80°~90°가 될 때를 기점으로 안전율이 감소하였다. 이는 사면과 네일사이의 각도가 90°일 경우 활동면의 크기가 최대가 되기 때문이다. 따라서 네일 간격이 좁을 경우 유한차분해석 시 네일과 사면이 이루는 각도가 90°이 될 때 쏘일네일링의 보강효과가 최대로 나타날 것으로 판단된다.

한편 네일 간격이 2m~3m일 경우 최대안전율을 보이는 네일 각도가 수평면으로부터 하향 30°로 나타났으며, 간격이 4m일 경우 20°로 나타났다. 이는 간격이 늘어남에 따라 활동면이 네일을 통과하여 생성되려하기 때문이다. 따라서 간격을 충분히 넓게 할 경우 최적의 쏘일네일링 각도가 수평면으로 기준으로 15°~25°로 나타난 기존의 한계평형해석 결과와 유사해질 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 유한차분해석을 통해 원호파괴 사면에 쏘일네일링 보강 시 설치각도가 보강효과에 미치는 영향을 비교하였다. 이를 위해 경사가 1:1.5, 1:1.2, 1:1인 가상의 토사사면을 대상으로 하였으며, 네일 각도를 다양하게 달리하여 수치해석을 실시하였다. 또한 네일 간격 및 길이도 변화시켜 각도와 상관관계를 비교·분석해 보았다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 네일 간격이 증가할수록 네일 길이가 감소할수록 안

전율은 감소하고, 네일 각도가 수평면으로부터 40° 이하일 경우는 각도가 증가할수록 안전율은 증가하나 그 증가폭은 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

- (2) 쏘일네일링 보강 시 네일 간격이 촘촘한 경우 사면과 네일사이의 각도가 90°일 때 활동면의 크기가 가장 크게 나타나 최대안전율을 보였다. 따라서 네일 간격이 좁을 경우 유한차분해석 시 네일과 사면이 이루는 각도가 90°이 될 때 쏘일네일링의 보강효과가 최대로 나타날 것으로 판단된다.
- (3) 네일 간격이 넓은 경우 활동면이 네일을 통과하여 생성되기 때문에 간격이 좁을 경우보다 최대안전율을 보인 각도가 작게 나타났다. 따라서 간격을 넓게 할 경우 최적의 쏘일네일링 각도가 15°~25°로 나타난 기존의 한계평형해석 결과와 유사해질 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 실시한 유한차분해석에 사용된 지반물성치는 기존문헌을 고찰하여 얻은 값을 사용하였다. 또한 단일층의 토사로 이루어졌으며, 소단이 없는 사면을 대상으로 하였다. 따라서 실제 현장에 사용 시에는 지반 조사를 통하여 얻은 지반물성치를 적용하여야 할 것이다. 그리고 다양한 지층이 존재하거나 소단이 있는 사면을 대상으로 유한차분해석을 실시할 경우 본 연구결과와 다를 수 있음을 유념해야한다.

참 고 문 헌

1. Bang, C. S., Lee, J. S., Lee, H. U., and Go, D. C. (2003), "Numerical analysis of reinforcement effect with grouting method around rail tunnel", 2003 Fall Conference of the Korean Society for Railway, pp.579-584.
2. Eom, K. H. (2009), *A study on slope-stabilizing effect of soil nailing in soil slopes*, Chungang University, Graduate School of Construction Engineering, Master Thesis, 93p.
3. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0*, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
4. Jang, Y. S. (2010), *Soil Mechanics*, Book Publisher CIR, 613p.
5. Lee, J. K. (2012), *Applicability evaluation of reinforced ribs of shotcrete and cablebolts as tunnel supports*, University of Suwon, Graduate School, Ph.D. Thesis, 165p.
6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), *Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Enactment : Construction Work, Slope Design Criteria*, 122p.
7. Mitchell, J. K. and Villet, W. C. B. (1987), "Reinforcement of earth slopes and embankment", National Cooperative Highway Research Program, Washington, pp.258-323.
8. Ortigao, J. A. R., Palmeira, E. M., and Zirlis, A. C. (1995),

- “Experience with soil nailing in Brazil”, *Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.2, pp.93-106.
9. Schlosser, F. (1982), “Behavior and design of soil nailing”, *Proceedings of the Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques*, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp.399-413.
10. Stocker, M. F., Korber, G. W., Gassler, G., and Gudehus, G. (1979), “Soil nailing”, *International conference on soil reinforcement*, Paris, Vol.2, pp.469-474.
11. St. John, C. M. and Van Dillen, D. E. (1983), “Rockbolts: a new numerical representation and its application in tunnel design in rock mechanics - theory - experiment - practice”, *Proceedings of the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Texas A&M University, pp.13-26.
- (접수일자 2013. 1. 4, 수정일 2013. 4. 10, 심사완료일 2013. 8. 20)