

수치해석을 이용한 토목섬유망 네일의 사면보강에 대한 적용성 연구

유광호*, 정연학, 하지영

Applicability Study of Geotextile Mesh Soil Nail on Slope
Reinforcement Using Numerical Analysis

Kwang Ho You*, Yeun Hak Jung, Ji Young Ha

Abstract In this study, the applicability of geotextile mesh soil nails on slopes was evaluated by numerical analysis to reduce environmental problems which a general soil nailing might produce and to improve its economical efficiency and construction convenience. To this end, in situ pull-out tests were conducted for both general soil nail and geotextile mesh soil nail and their pull-out characteristics were analyzed. Also, finite difference method was used to verify the suitability of numerical simulation. Parameters for nail and ground conditions were selected and sensitivity analysis was performed for the evaluation of slope stability. In addition, analysis was performed by limit equilibrium method which is widely used for slope stability analysis in practice. As a result, if the nail diameter was same, there is no big difference between geotextile mesh soil nails and general soil nails in terms of slope stability. Therefore it can be expected that geotextile mesh soil nails could be effective for slope reinforcement since they could keep a slope as stable as general soil nails and give better economical efficiency and construction convenience than general soil nails.

Key words Geotextile mesh soil nail, Soil nailing method, Pull-out test, Numerical analysis

초 록 본 연구에서는 일반적인 쏘일네일링이 야기할 수 있는 환경문제를 줄이고, 경제성과 시공성을 향상하기 위해 토목섬유망 네일의 사면 적용성을 수치해석을 통해 평가하였다. 이를 위해 일반 네일과 토목섬유망 네일의 현장 인발시험을 수행하여 각 네일의 인발특성을 분석하였다. 또한 유한차분법을 이용하여 수치모델링의 적합성을 검증하고, 네일과 지반조건에 대한 매개변수를 선정하여 사면 안정성 평가를 위한 민감도분석을 수행하였다. 추가로 실무에서 사면안정해석을 위해 널리 사용되고 있는 한계평형법을 이용한 분석을 수행하였다. 연구 결과, 직경이 동일하다면 토목섬유망 네일로 보강한 사면과 일반네일로 보강한 사면은 안정성 측면에서 큰 차이가 없었다. 따라서 일반 네일로 보강된 사면만큼의 안정성 확보가 가능하며, 경제성과 시공성이 뛰어난 토목섬유망 네일이 사면보강을 위해 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 토목섬유망 네일, 쏘일네일링 공법, 인발시험, 수치해석

1. 서 론

산지가 대부분인 우리나라의 지형 특성상 사면이 있

는 시공현장이 많이 존재한다. 시공과정에서 사면의 붕괴로 인한 사고가 종종 발생하고 있다. 이러한 사면의 붕괴로 발생할 수 있는 피해를 최소화하기 위하여 사면 안정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

사면안정을 위한 공법 중 하나인 쏘일네일링 공법은 지반굴착 후 철근과 시멘트 그라우팅을 이용하여 지반과 구조물사이에서 발생하는 마찰로 지반을 보강하는 공법이다. 이러한 쏘일네일링 공법은 인장재의 주재료인 철근이 시공 후 지반에 잔류함에 따라 철근부식에 의한 지하수 및 토양오염과 같은 환경문제와 네일의 일

Received: Apr. 31, 2015

Revised: May 15, 2015

Accepted: May 15, 2015

***Corresponding Author:** You, Kwang Ho

(Tel) +82312202566, (Fax) +82312202522

E-Mail) khyou@suwon.ac.kr

17 Bongdam-eup, Wauan-gil Hwaseong-si Gyeonggi-do, Republic of Korea

부가 인접부지를 침범함으로써 발생할 수 있는 민원 등의 문제점이 야기될 수 있다. 이 같은 철근을 이용한 쏘일네일의 문제점을 해결하기 위해 철근을 대체할 수 있는 인장부재를 이용한 네일링 공법에 대한 관심이 증가하고 있다(Lee and kim, 2014). 그 중 하나인 FRP 네일은 유리섬유와 합성수지의 복합재료를 사용한 친환경적 소재라는 점에서는 토목섬유망 네일과 유사하나, 강도를 높이기 위한 유리막 코팅 때문에 네일과 그라우트의 미끄러짐이 발생하는 문제점이 있다(Kim et al., 2006). 반면, 토목섬유망 네일은 별도의 코팅이 없으므로 네일과 그라우트 사이에서 미끄러짐이 상대적으로 적을 수 있다. 또한, 사전에 별도의 제작공정이 필요한 FRP 네일과 달리 토목섬유망 네일은 현장에서 직접 제작이 가능하므로 시공성이 우수하다는 장점이 있다.

You et al.(2014)은 토목섬유망 네일과 일반 네일의 현장인발시험을 실시하여 두 네일의 특성을 비교 분석하였다. 그 결과 토목섬유망 네일과 일반 네일의 극한 인발 하중이 동일함을 확인하였다. 이를 통해 토목섬유망 네일이 일반 네일 이상의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 예상했다. 또한 Lee and Kim(2014)은 실내 인발시험을 통하여 토목섬유망 네일의 인발성능을 평가하고자 하였다. 실험결과 토목섬유망 네일의 인장강도와 그라우팅 부착력이 우수함을 확인하였다. 이를 근거로 토목섬유망 네일이 이형철근의 대체재로 사용될 수 있음을 언급하였다.

본 연구에서는 쏘일네일의 인장재인 철근의 대체재로써 토목섬유망을 선정하고 네일의 인발특성을 평가하기 위해 현장인발시험을 실시하였다. 또한 현장인발시험과 동일한 조건을 적용한 수치인발시험을 이용하여 역해석을 수행하고 현장인발시험의 결과와 일치하도록 함으로써 수치인발시험의 적합성을 검증하였다. 또한 역해석을 통해 얻은 결과를 바탕으로 네일 길이 및 네일의 수직간격 등을 매개변수로 선정하여 사면의 안전율을 비교하기 위한 민감도분석을 수행하였다. 해석을 위해 FLAC(Fasf Lagrangian Analysis Continua) 2D와 TALREN 97이 이용되었다. 해석결과, 토목섬유망 네

일과 일반 네일로 보강한 사면의 안전율은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 시공성과 경제성이 좋은 토목섬유망 네일이 사면의 안정성 측면에서 보다 합리적일 것으로 사료된다.

2. 토목섬유망 네일

토목섬유는 고분자 재료로 구성되어 토목공사에서 널리 사용되고 있는 섬유질의 일종으로, 초기에는 단순한 직포, 부직포의 형태를 이루었으나 기술의 발달과 함께 다양한 재질과 형태의 토목섬유가 개발 및 상용화되고 있다. 토목섬유는 여과, 분리, 보강, 배수, 방수 등의 목적으로 사용되어왔으며 취급의 용이성, 소재의 친환경성, 경제성 등의 장점을 바탕으로 그 사용이 점차 증가하고 있는 추세다(Kim, 2002).

최근 들어 국내에서는 이러한 토목섬유를 네일의 형태(토목섬유망 네일)로 말아서 쏘일네일의 대체재로 사용하고 있다. Fig. 1은 제작된 토목섬유망 네일의 모습을 나타낸 것이다. 토목섬유망 네일의 시공법은 Fig. 2와 같이 기존 쏘일네일링 공법과 동일한 절차를 통해 이루어진다. 하지만 공장에서 제작하여 운반되는 일반 네일(이형철근)과는 달리 현장에서 직접 제작이 가능하다. Fig. 3과 같이 경사방향(Warp)과 위사방향(Weft)의 직물로 구성된 격자 모양의 토목섬유를 말아서 제작이 가능하다. 따라서 좁은공간에서 취급이 불편한 이형철근에 비해 운반 및 저장이 용이하며 현장에서 네일의 직경 및 길이 조절이 자유로운 토목섬유망 네일의 시공성이 우수할 것으로 사료된다.

한편 토목섬유망 네일은 일반 네일보다 우수한 경제성을 갖추고 있다. Table 1은 길이가 8.0m인 토목섬유망 네일과 일반 네일의 공당 단가를 비교한 표이다(KTR, 2013). 경제성을 평가하기 위해 직경이 2.54cm인 이형철근의 일반 네일과 토목섬유망 네일 비교하였다. 단 동일한 직경으로 제작하기 위해 폭이 1.0m인 토목섬유망을 말아서 네일을 제작하였다. 단가는 자재비, 노무비, 기계 운임비를 포함하여 산정하였다. Table 1



Fig. 1. Geotextile mesh soil nail

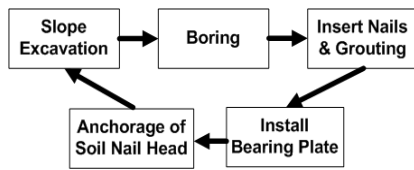


Fig. 2. Procedure for soil nailing method

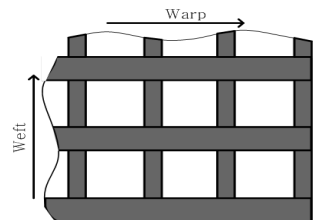


Fig. 3. Overview of geotextile mesh

Table 1. Comparison of unit cost

Unit Cost (₩/hole)		Difference (₩/hole)	Reduction Ratio (%)
General Soil Nail	Geotextile Mesh Soil Nail		
117,725	111,479	-6,246	5.31

로부터 토목섬유망 네일을 사용할 경우 공당 5.31%의 시공비 절감효과가 발생함을 확인하였다. 즉, 대규모 공사일수록 공사비 절감효과가 증가할 것으로 사료된다. 또한 친환경 소재를 사용한 만큼 지층보강이 완료된 후, 네일의 제거공정이 불필요하여 추가공정에 의한 시공비 절감이 가능하다.

3. 현장인발시험

3.1 시험개요 및 방법

본 연구에서는 토목섬유망 네일의 인발특성을 분석하기 위해 토목섬유망 네일과 일반 네일에 대한 현장인발시험을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 “경기도 화성시 장안면 수촌리 ○○회사 사옥 신축공사현장”을 대상현장으로 선정하였다.

대상현장의 지층분포를 확인하기 위해 표준관입시험 (Standard Penetration Test, SPT)을 실시하여 매립층, 풍화토, 그리고 풍화암으로 구성된 복합지반임을 확인하였다. Table 2는 지층별 두께와 N치를 정리한 것이다. 인발시험에서 사용된 네일의 제원은 Table 3과 같이 정리하였다.

현장인발시험은 천공, 네일 삽입, 그라우트재 주입 그리고 인발의 순서로 진행되었다. 천공은 Crawler Drill

을 사용하여 천공경 10.5 cm, 천공장 6.5 m, 천공각도는 지표면과 90°를 이루도록 천공을 실시하였다. 그리고 인발을 위한 자유부 1.5 m를 포함하여 총 길이 8.0 m의 네일을 삽입하였다. 물·시멘트의 배합비(W/C)가 45.0%, 팽창률이 1.3%, 불리딩률이 0.0 %인 그라우트재를 타설하고 7일간의 양생 후 인발시험을 수행하였다. 네일의 인발은 최대 계획인발하중인 200 kN을 25 kN씩 총 8단계의 인발하중을 작용시켜 각 단계별 변위를 계측하였다. 여기서, 하중은 유압펌프와 연결된 유압게이지를 이용하여 측정하고, 변위는 네일의 두부에 설치된 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 측정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 현장인발시험의 전경 및

Table 3. Property of used nail on test site

Type of Soil Nail	Diameter (cm)	Tensile Yield Strength
General	2.54	400 MPa
Geotextile Mesh	2.54	200 kN/m (Warp), 30 kN/m (Weft)



Fig. 4. The Location of Test Site

Table 2. Characteristic of layer on test site

Layer	Depth (m)	N Value (strike/cm)
Landfill	0.6	-
Weathered Soil	3.7	36/30 ~ 41/30
Weathered Rock	4.7	50/10 ~ 50/5



Fig. 5. A panorama view of pull-out test

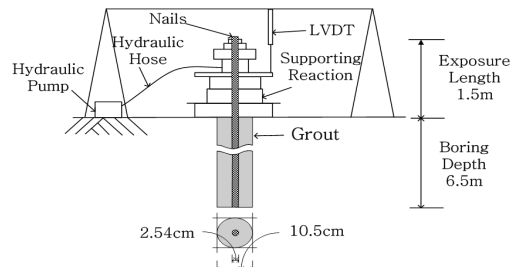


Fig. 6. The outline of pull-out test

시험의 개요도이다.

3.2 시험결과와 정리 및 분석

네일의 인발특성을 분석하기 위해 현장인발시험을 수행하여 각 네일의 단계별 하중에 따른 변위를 얻었다. 그리고 현장인발시험을 통해, 175 kN 이상의 하중이 작용될 때 두 종류의 네일 모두 인발이 발생함을 확인하였다. 또한, 자유부 변위를 제외한 극한인발하중-변위 곡선을 나타낸 Fig. 7에서 변위증가에 따른 하중증가를 감소가 발생하여 그래프가 꺾일 때의 하중인 175 kN을 극한인발 하중으로 설정하였다.

또한 인발시험의 하중-변위 관계곡선을 통해 극한인발하중에 대한 탄성계수를 산정한 결과, 토목섬유망 네일과 일반 네일이 각각 15.7 GPa, 26.5 GPa임을 확인하였다. 현장인발시험의 결과가 합당하지 확인하기 위해 Eq. (1)과 같이 면적의 가중평균을 이용한 복합탄성계수와 비교하였다.

$$E_{complex} = \frac{A_1 \times E_1 + A_2 \times E_2}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

- 여기서 A_1 : 네일 인장재의 단면적($5.07 \times 10^{-4} m^2$)
- A_2 : 네일 그라우트재의 단면적($8.15 \times 10^{-3} m^2$)
- E_1 : 네일 인장재의 탄성계수(토목섬유망 네일=17 GPa, 일반 네일=210 GPa)
- E_2 : 네일 그라우트재의 탄성계수(15.3 GPa)

이론식을 통해 산출한 복합탄성계수는 토목섬유망 네일이 15.4 GPa, 일반 네일이 26.7 GPa로 산정되어 실험을 통해 얻은 탄성계수와 거의 동일함을 확인하였다. 이를 통해 현장인발 실험결과가 합당함을 확인하였다.

또한, Fig. 7의 분석을 통해 인발하중이 증가할수록 변위가 증가하여 비례하는 경향임을 알 수 있었다. 그리고 동일한 하중단계에서 토목섬유망 네일이 일반 네

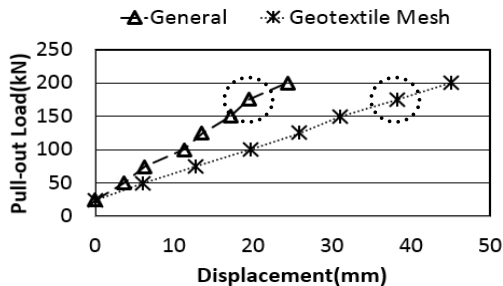


Fig. 7. Pull-out load - displacement curve

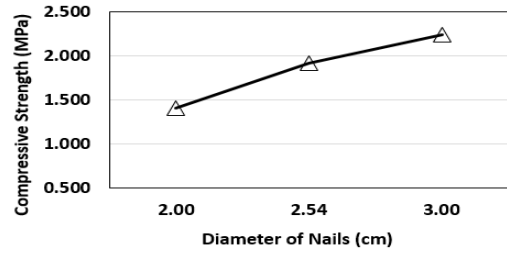


Fig. 8. Compressive strength vs nail diameter

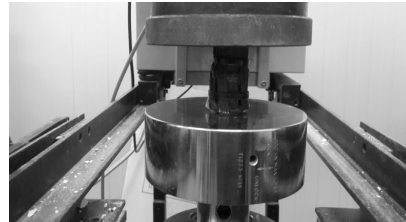


Fig. 9. Compressive strength test of geotextile mesh soil nail

일보다 약 2배 정도 큰 변위를 가짐을 확인하였다.

4. 토목섬유망 네일의 일축압축강도시험

FLAC 2D 해석에 필요한 네일의 물성치 중 하나인 S_{bond} 산정에 이용되는 일축압축강도를 얻기 위해 토목섬유망 네일의 자체 일축압축강도시험을 실시하였다. 시험시편은 폭 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m의 토목섬유망을 위사방향으로 말아서 각각 직경이 2.00 cm, 2.54 cm, 3.00 cm, 높이는 직경과 1:2의 비를 갖도록 시편을 제작하였다. 그리고 케이블 타이로 고정시킨 후 INSTRON사의 만능재료시험기(최대용량 10 ton)를 이용하여 일축압축강도시험을 실시하였다. 시험은 2.0 mm/min의 속도로 압축하였으며 직경별 3회씩 시험을 실시하였다. Fig. 8은 시편의 직경에 따른 일축압축강도의 평균값을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 9는 토목섬유망 네일의 일축압축시험 모습을 나타낸 것이다.

5. 토목섬유망 네일의 수치해석 모델링

5.1 수치인발시험 개요 및 모델링 방법

본 연구에서는 유한차분법을 기반으로 한 FLAC 2D를 이용하여 수치인발시험의 적합성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 Fig. 10과 같이 네일의 자유부를 제외한 근입된 네일의 길이인 6.5 m에 대한 해석영역을 설정하였다. 가로 방향의 해석영역은 좌·우로 네일 길이의 1.5배, 세로 방향의 해석영역은 바닥으로부터 1.5 m

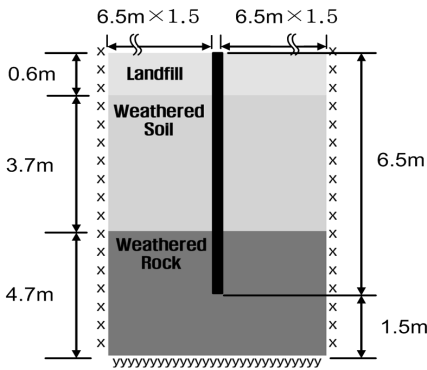


Fig. 10. Layout of analysis

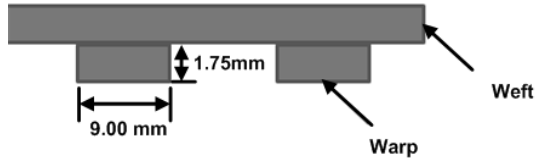


Fig. 11. The cross section of geotextile mesh

의 여유장을 설정하여 해석영역이 결과에 영향을 미치지 않도록 충분한 크기로 설정하였다.

지층은 대상현장과 유사하도록 매립층, 풍화토 그리고 풍화암으로 구성된 복합지반으로 모델링하였다. 해석에 사용된 지반물성치는 Promotion Planning Office for Hub City of Asian Culture(2006)의 지질보고서에 근거하여 Table 4와 같이 정리하였다.

네일은 cable 요소를 사용하여 모델링하였다. 사용된 네일의 제원은 Table 5와 같이 정리하였으며, 인장강도는 재료자체의 인장실험을 통해서 얻은 값을 적용하였다. 또한 공극이 많은 토목섬유망 네일의 단면적은 Fig. 11과 같은 폭 1.0 m의 토목섬유망에 존재하는 경사방향

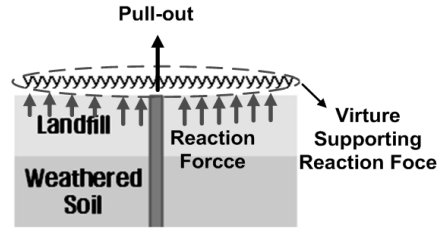


Fig. 12. Mimetic diagram of pull-out test

(Warp) 직물의 개수와 한 개의 면적을 곱하여 경사방향 직물의 면적만을 고려함으로써 더 큰 인장력에 저항할 수 있도록 하였다. 또한 그라우팅 된 네일의 특성을 분석하기 위해 네일의 자유부를 제외한 근입된 네일에 대해서만 해석을 수행하였다.

단계하중의 수치해석적 구현은 네일의 두부에 일정속도(1×10^{-6} m/step)를 가하여 인발함으로써 모사하였다. 인발하중은 지층상부에 Fig. 12에서와 같이 수직방향 변위를 구속하여 만든 가상의 반력대에 작용하는 반력을 FLAC의 내부 프로그래밍 언어인 FISH를 이용하여 산정하였다. 수치인발시험에서 극한인발하중과 변위는 그라우트의 전단강성인 K_{bond} 와 전단강도인 S_{bond} 의 영향을 받는 것으로 확인하였다. Eq. (2)와 Eq. (3)은 K_{bond} 와 S_{bond} 의 이론식을 나타낸 것이다(Itasca Consulting Group, 2005).

$$K_{bond} = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + 2t/D)} \tag{2}$$

$$S_{bond} = \pi(D + 2t)\tau_{peak} \tag{3}$$

여기서, G : 그라우트전단탄성계수(Pa), t : 그라우트 두께(m), D : 네일의 직경(m),

Table 4. Property of each layer

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Elastic Modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Poisson's Ratio	Internal Friction Angle (°)
Landfill	17.5	10.0	3.0	0.275	31.5
Weathered Soil	20.0	57.5	15.0	0.375	33.0
Weathered Rock	21.0	150.0	80.0	0.375	35.0

Table 5. Property of used nail in numerical test

Type of Soil Nail	Elastic Modulus (GPa)	Area (m ²)	Tensile Yield Strength (kN)
General	210.0	5.067×10^{-4}	325.0
Geotextile Mesh	17.0	5.067×10^{-4}	203.0

Table 6. Results of back analysis

Parameter	Type of Soil Nail	
	General	Geotextile Mesh
Kbond (MN/m/m)	330.0	170.0
Sbond (MN/m)	6.40	6.50
Ultimate Pull-Out Load (kN)	176.0	176.4
Displacement of Nail (mm)	19.40	38.24

Table 7. Error ratio comparison between test on site and numerical test

Sort	General Soil Nail		Geotextile Soil Nail	
	Pull-Out Load (kN)	Displacement (mm)	Pull-Out Load (kN)	Displacement (mm)
Test on Site	175.00	19.44	175.0	38.27
Numerical Test	176.00	19.40	176.4	38.24
Error Ratio (%)	0.57	0.21	0.8	0.08

τ_{peak} : 지반 일축압축강도와 그라우트 일축압축강도 중 작은 값의 0.5배

이론식은 단일지반에 적합하나, 본 연구의 대상현장은 3개의 지층으로 구성된 복합지반으로 이론식의 적용이 어려웠다. 따라서 이론식이 아닌 K_{bond} 와 S_{bond} 에 대한 역해석을 통해 현장인발시험의 극한인발하중 및 변위와 유사한 값을 산정하였다.

5.2 수치해석 및 현장시험 결과 비교·분석

수치해석을 이용한 인발시험과 현장인발시험의 결과가 일치하도록 하기 위해 가장 기본적인 역해석 방법 중 하나인 시행착오법(Trial & error method)을 이용하였다. 이를 위해, FLAC 2D에서 사용되는 네일의 물성인 K_{bond} , S_{bond} 를 변경시켜가며 현장인발시험의 단계별 하중에 따른 변위결과와 유사한 값을 얻을 때 까지 반복적으로 해석을 수행하였다. 그 결과, Table 6과 같이 현장인발시험의 극한인발하중 및 변위와 유사한 값이 되도록 하는 K_{bond} 와 S_{bond} 를 얻을 수 있었다. 역해석 과정을 통해 K_{bond} 가 증가할수록 변위가 감소하며, S_{bond} 가 증가할수록 극한인발하중이 증가함을 확인하였다. 이때 수치해석을 통해 얻은 하중-변위 관계곡선을 Fig. 13과 같이 도시하였다.

수치인발시험과 현장인발시험을 통해 얻은 각 네일의 극한인발하중 및 변위를 비교하기 위해 Table 7과 같이 시험결과를 정리하였다. 그 결과, 두 시험의 결과값 차이가 1% 미만으로 나타나 FLAC 2D를 이용한 현장인발시험의 모사는 적합한 것으로 판단된다.

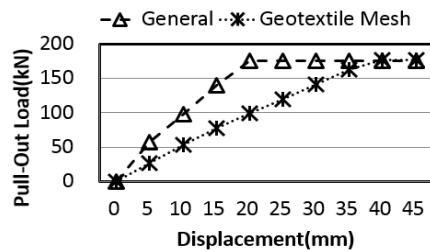


Fig. 13. Pull-out load - displacement curve in numerical pull-out test

6. 사면안정에 대한 민감도분석

이형철근의 대체 인장재로써 토목섬유망 네일의 적합성을 분석하기 위해 유한차분법을 기반으로 하는 FLAC 2D를 이용하여 사면의 안정성에 대한 민감도분석을 수행하였다. 또한 연구의 신뢰도를 높이기 위해 실무에서 사면안정해석에 널리 이용되고 있는 한계평형법을 기반으로 한 TALREN 97을 이용하여 민감도분석을 추가적으로 수행하여 결과를 비교·분석하였다.

6.1 FLAC 2D 해석

토목섬유망 네일을 적용한 사면의 안정성을 분석하기 위해 Min(2013)이 이용한 매개변수를 참고하여 사면의 안전율에 대한 민감도분석을 수행하였다. 이를 위해 네일의 타입각도는 수평면과 20°를 이루도록 하였다. 또한 지반조건, 네일 길이(L), 네일 사이 간격(S), 네일 직

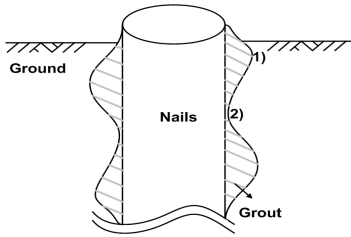


Fig. 14. Mimetic diagram for failure mode

경(θ), 네일의 파괴양상에 따른 S_{bond} 비율을 매개변수로 선정하였다. 지반조건은 발파암, 토사로 구성된 2개의 사면을 대상으로 했다. 네일 길이는 사면으로부터 활동면까지 거리를 고려하여 7.0 m, 8.0 m, 9.0 m로 선정하였다. 그리고 네일 간격은 현장에서 주로 사용되고 있는 네일 간격인 1.0 m~2.0 m를 고려하여 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m로 적용하였다. 네일 개수는 네일 간격이 1.0 m일 때 9개, 1.5 m일 때 6개, 2.0 m일 때 4개의 네일을 사면에 적용하였다. 네일 직경은 토목섬유망 네일의 경우 폭 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m를 말았을 때의 직경인 2.00 cm, 2.54 cm, 3.00 cm를, 일반 네일의 경우는 2.54 cm를 적용하였다. Fig. 14는 네일 인발시 발생 가능한 파괴를 나타내기 위한 모식도이다.

FLAC 2D에서는 S_{bond} 선정 시 Eq. (3)과 같이 τ_{peak} 을

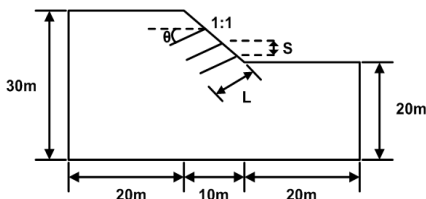
지반과 그라우트 각각의 일축압축강도 중 작은 값의 0.5배를 적용하였다. 이는 지반과 그라우트사이의 결합이 깨졌을 경우만 고려할 경우로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 네일과 그라우트 사이의 파괴를 추가적으로 고려하여 네일과 그라우트의 일축압축강도를 이용한 τ_{peak} 를 통해 S_{bond} 를 산출하였다. 또한, 네일 인발시 발생하는 파괴양상에 따른 S_{bond} 의 차이를 적용하여 파괴조건에 따른 해석을 수행하였다. 네일과 그라우트 사이에서만 파괴가 일어났을 경우(100:0), 지반과 그라우트사이의 파괴와 네일과 그라우트 파괴가 각각 50% 일 경우(50:50), 지반과 그라우트에서만 파괴가 일어났을 경우(0:100)로 분류하여 S_{bond} 를 산정하였다. 따라서 민감도분석을 위해 토목섬유망 네일의 경우 지반조건(2) × 네일 길이(3) × 네일 간격(3) × 네일 직경(3) × 네일의 파괴 양상에 따른 S_{bond} 비율(3)로 총 162 case를 수행하였다. 그리고 일반 네일의 경우 지반조건(2) × 네일 길이(3) × 네일 간격(3) × 네일 직경(1) × 네일의 파괴 양상에 따른 S_{bond} 비율(3)개로 총 54 case에 대해 분석하였다. Table 8은 해석에 사용된 매개변수를 정리한 것이다. 사면의 모델링은 Min(2013)이 적용한 경사도 1:1을 적용하였고, 적용된 지반 물성치는 Kim(2013)이 적용한 사면의 물성을 참고하여 Table 9와 같이 정리하였다. Fig. 15(a)는 민감도분석을 위해 모델링한 사면의

Table 8. Parameter for sensitivity analysis

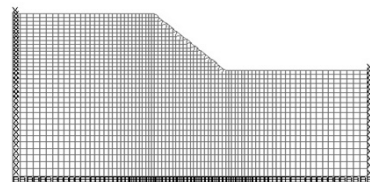
Layer	Length of Nail (m)	Vertical Spacing (m)	Diameter (cm)	S_{bond} , Ground-Grout Failure: Nail-Grout Failure (%)
Blastable Rock	7.0	1.0	2.00	100 : 0
	8.0	1.5	2.54	50 : 50
Soil	9.0	2.0	3.00	0 : 100

Table 9. Soil properties used for sensitivity analysis for FLAC 2D

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Elastic Modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Internal Friction Angle (°)	Poisson's Ratio
Blastable Rock	23.54	1000.0	49.0	35	0.280
Soil	17.66	20.0	19.6	30	0.375



(a) Analysis area



(b) Mesh and boundary conditions

Fig. 15. Modeled slope for sensitivity analysis (FLAC 2D)

Table 10. Factor of safety obtained from sensitivity analysis when S_{bond} 50 : 50 (FLAC 2D)

Layer	Length of Nail (m)	Vertical Spacing (m)	Safety Factor of Soil Nail			
			Geotextile Mesh			General $\phi=2.54$ cm
			$\phi=2.00$ cm	$\phi=2.54$ cm	$\phi=3.00$ cm	
Blastable Rock	7	1.0	3.07	3.11	3.15	3.23
		1.5	2.97	3.03	3.05	3.19
		2.0	2.87	2.91	2.95	3.07
	8	1.0	3.21	3.25	3.27	3.37
		1.5	3.11	3.15	3.17	3.29
		2.0	2.97	3.03	3.05	3.21
	9	1.0	3.35	3.37	3.41	3.53
		1.5	3.23	3.27	3.31	3.47
		2.0	3.07	3.15	3.17	3.21
Soil	7	1.0	2.17	2.21	2.23	2.31
		1.5	2.07	2.13	2.15	2.27
		2.0	1.97	2.03	2.07	2.17
	8	1.0	2.27	2.33	2.35	2.43
		1.5	2.17	2.25	2.27	2.37
		2.0	2.07	2.13	2.17	2.29
	9	1.0	2.41	2.45	2.47	2.57
		1.5	2.27	2.35	2.37	2.51
		2.0	2.15	2.23	2.27	2.43

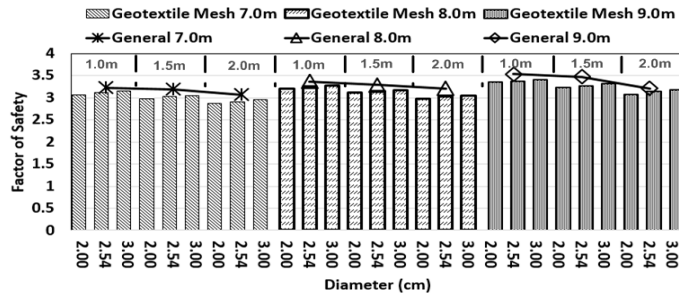


Fig. 16. Sensitivity analysis result in case of blastable rock (FLAC 2D)

규격과 매개변수를 나타낸 개요도이고, Fig. 15(b)는 사면에 적용된 경계조건과 요소망을 나타냈다.

한편, 민감도분석에 적용되는 지반은 단일지층으로 적용하여 네일의 S_{bond} , K_{bond} 를 Eq. (2), Eq. (3)의 이론식을 통해 얻은 값을 적용하였다. 그러나 K_{bond} 의 이론식은 네일의 특성을 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서 토목섬유망 네일의 K_{bond} 는 K_{bond} 가 증가할수록 변위가 작아지는 경향과 일반 네일보다 약 2배 정도 더 큰 변위가 발생하는 것을 고려하여 이론적 K_{bond} 의 절반으로 가정하였다. 또한 사면의 안전율 산정은 실제지반의 강도를 사면파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하는 전단강도 감소기법을 이용하였다(Park and You, 1998).

Table 10은 S_{bond} 산정 시 지반과 그라우트사이의 파괴와 네일과 그라우트사이 파괴를 각각 50 %씩 고려한

case의 결과를 정리한 표이다. 그리고 각 매개변수가 안전율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 사면의 지반조건별로 각각 Fig. 16과 Fig. 17에 도시하였다.

Fig. 16과 Fig. 17로부터 안전율은 네일의 직경에 비례하고, 네일의 간격과 반비례함을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 직경의 경우 일반 네일을 적용한 사면의 안전율이 토목섬유망 네일을 적용한 사면보다 평균적으로 안전율이 0.14정도 더 높게 산정되었다. 미소한 안전율의 차이가 있지만 시공성과 경제성을 갖춘 토목섬유망 네일을 보강하여 일반 네일로 보강한 사면과 유사한 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

6.2 TALREN 97 해석

연구의 신뢰도를 높이기 위해 FLAC 2D와 달리 한계평형법을 기반으로 하며 실무에서 사면안정해석에 많

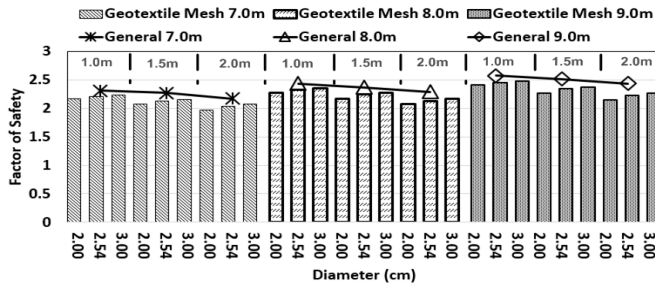


Fig. 17. Sensitivity analysis result in case of soil (FLAC 2D)

Table 11. Soil properties used for sensitivity analysis for TALREN 97

Layer	Skin Friction Resistance (kN/m ²)	Limit Pressure (kN/m ²)	Horizontal Soil Modulus (kN/m ²)
Blastable Rock	588.6	4,905.0	39,240.0
Soil	196.2	1,177.2	7,848.0

Table 12. Factor of safety obtained from sensitivity analysis (TALREN 97)

Layer	Length of Nail (m)	Vertical Spacing (m)	Safety Factor of Soil Nail			
			Geotextile Mesh			General
			ø=2.00 cm	ø=2.54 cm	ø=3.00 cm	ø=2.54 cm
Blastable Rock	7	1.0	3.06	3.18	3.18	3.18
		1.5	2.93	3.04	3.10	3.07
		2.0	2.80	2.91	2.95	2.93
	8	1.0	3.19	3.28	3.33	3.29
		1.5	2.97	3.17	3.24	3.20
		2.0	2.80	2.99	3.10	3.04
	9	1.0	3.30	3.43	3.43	3.44
		1.5	2.97	3.25	3.36	3.34
		2.0	2.80	2.99	3.11	3.04
Soil	7	1.0	2.17	2.22	2.22	2.22
		1.5	2.04	2.11	2.14	2.14
		2.0	1.90	2.01	2.02	2.03
	8	1.0	2.27	2.30	2.30	2.30
		1.5	2.07	2.21	2.24	2.23
		2.0	1.90	2.06	2.14	2.12
	9	1.0	2.38	2.44	2.44	2.44
		1.5	2.07	2.33	2.34	2.34
		2.0	1.90	2.06	2.20	2.15

이 사용되고 있는 TALREN 97을 이용한 토목섬유망 네일의 사면 적용성을 분석하였다. 대상지반과 사용된 매개변수는 FLAC 2D에서 사용된 변수와 동일하게 적용하였다. 지반물성 또한 FLAC 2D에서 사용한 값을 그대로 적용하였으나 FLAC 2D에서 사용하지 않는 주면마찰저항력, 지반의 한계압력, 지반의 횡방향 변형계수는 Korean Geotechnical Society(1997a, 1997b)에서 제시된 값을 적용하여 Table 11과 같이 적용하였다.

한편, TALREN 97을 통한 사면의 안정해석은 인장력과 전단력을 모두 고려하는 조건을 적용하여 해석을

실시하였다. 그리고 원호파괴의 활동면을 가정하기 위해 활동면의 중심점을 x축, y축 간격이 1 m인 5 × 5의 격자에 위치하도록 하여 총 25개의 중심에서 활동면이 자동으로 설정되도록 하였다.

TALREN 97을 이용한 사면안정성 분석을 위한 민감도분석 수행 결과를 Table 12와 같이 정리하였다. 그리고 Fig. 18, Fig. 19와 같이 매개변수에 따른 안전율을 도시하였다.

민감도분석 결과, 전체적인 경향은 FLAC 2D를 이용한 해석결과와 동일하게 네일의 직경과 사면의 안전율

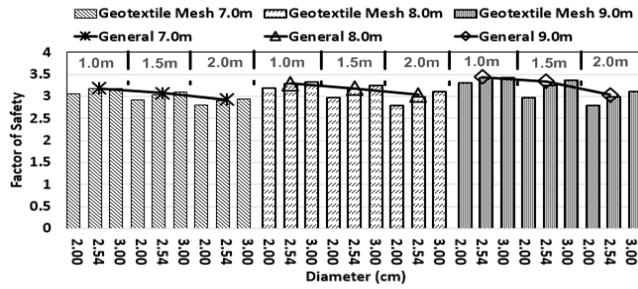


Fig. 18. Sensitivity analysis result on blastable rock (TALREN 97)

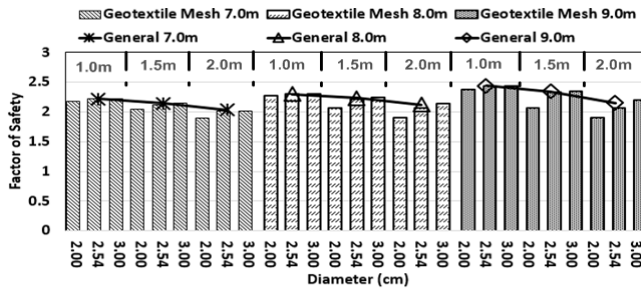


Fig. 19. Sensitivity analysis result on soil (TALREN 97)

은 비례하고, 네일의 간격과 사면의 안전율은 반비례하였다. 하지만 동일직경 조건에서 토목섬유망 네일과 일반 네일의 안전율 차이는 평균 0.03으로 매우 작게 산정되었다. 또한 토목섬유망 네일의 직경이 3.0 cm일 경우에는 일반 네일을 적용한 사면의 안전율보다 평균 0.02 높게 나타났다. 이를 통해 토목섬유망 네일을 이용하여 보강한 사면에서도 일반 네일을 적용한 사면과 같은 안정성 확보가 가능함을 확인하였다.

최종적으로 일반 네일보다 시공성과 경제성이 우수한 토목섬유망 네일로 보강된 사면의 안전율이 일반 네일을 이용하여 보강된 사면과 비슷한 안전율 확보가 가능하므로 토목섬유망 네일의 사면적용은 합리적인 것으로 사료된다.

7. 결론

본 연구에서는 유한차분법을 기반으로 한 FLAC 2D와 한계평형법을 기반으로 한 TALREN 97을 이용하여 기존 쓰일네일링의 인장재인 이형철근의 대체재로써 토목섬유망 네일의 적합성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 수치해석적 모사를 이용하여 얻은 결과와 현장인발시험의 결과를 비교·분석하였다. 그리고 네일 조건에 대한 매개변수를 선정하여 사면의 안전율에 대한 민감도분석을 수행하였다. 연구 결과, 다음과 같은 결론을

도출하였다.

1. 현장인발시험을 통해 토목섬유망 네일과 일반 네일의 동일한 인발하중이 작용될 때 토목섬유망 네일의 변위가 일반 네일보다 약 2 배 크게 발생함을 확인하였다.
2. 현장인발시험과 수치인발시험의 극한인발하중과 변위를 비교·분석한 결과, 두 시험의 결과 값 차이가 1%미만으로 매우 유사하게 산정되었다. 이를 통해, FLAC 2D를 이용한 토목섬유망 네일과 일반 네일의 인발시험 모사가 적합하였음을 확인하였다.
3. FLAC 2D와 TALREN 97을 이용한 민감도분석을 통해 동일직경조건에서 토목섬유망 네일과 일반 네일의 안전율 차이는 각각 0.14와 0.03정도로 산정되어 안전율의 차이가 거의 없음을 확인하였다. 그리고 TALREN 97에서 토목섬유망 네일의 직경이 3.0 cm인 경우에는 일반 네일로 보강된 사면안전율보다 0.02정도 더 크게 나타났다. 이를 통해 토목섬유망 네일을 적용한 사면에서도 일반 네일을 적용한 사면과 동일한 안정성 확보가 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 토목섬유망 네일의 사면 적용성을 평가하기 위해 수치인발시험의 적합성 검증과 민감도분석을 통해 사면의 안전율을 수치해석적으로 비교·분석

하였다. 향후에는 토목섬유망 네일이 적용된 실제 사면에서의 거동분석이 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 연구의 신뢰도를 높이기 위해 다양한 지반조건, 네일의 타입각도 변경과 같은 추가적인 매개변수 설정을 통한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. Itasca Consulting Group, Inc., 2005, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
2. Kim, H.R., 2002, A Study on the Evaluation of Reinforcement Force in the Reinforced Soil Structure Using Strain Gauge, Master's dissertation, Chonbuk National University, 69p.
3. Kim, H.T., Lee, H.J., Jung, W.C. and Koh, H.S., 2006, An estimation on the applicability of hollow FRP soil nailing system, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 6, 385-393
4. Kim, K.S., 2013, A Comparative Case Study on the Analysis Method for Slope Stability Estimation of Plane and Circular Failures, Ph.D. dissertation, The University of Suwon, 145p.
5. Korea Testing and Research Institute, 2013, Patent Technology Evaluation Report : Flexible Soil-nails and Flexible Soil-nailing Method, No. 10-1060286, 103p.
6. Korean Geotechnical Society, 1997a, Series of Geotechnical Engineering 1 : Interpretation and Use of Site Investigation Results, Goomiseogwan, 734p.
7. Korean Geotechnical Society, 1997b, Series of Geotechnical Engineering 3 : Excavation and Earth Retaining Method, Goomiseogwan, 670p.
8. Lee, D.Y. and Kim, S.K., 2014, A study of geosynthetic soil nailing method using pull out test, 2014 Conference Proceedings of Korean Society of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, 1093-1094.
9. Min, K.S., 2013, A Study on Soil Nailing Support Pattern of Circular Failure Slopes by Finite Differences Analysis, Master's dissertation, The University of Suwon, 73p.
10. Park, Y.J. and You, K.H., 1998, Stability analysis for jointed rock slope using ubiquitous joint model, Tunnel and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 8, No. 4, 287-295.
11. Promotion Planning Office for Hub City of Asian Culture, 2006, Geological Investigation Report for Construction Site of the Asian Culture Complex, Ministry of Cultures and Tourism, 88p.
12. You, K.H., Kim, H.R., Jung, Y.H. and Ha, J.Y., 2014, A characteristic analysis of a geotextile mesh nail by filed pull-out tests, 2014 Conference Proceedings of Korean Society of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, 571-572.

유 광 호



1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1992년 University of Minnesota Geo-
Engineering 박사

Tel: 031-220-2566
E-mail: khyou@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 공과대학 토목공학과
교수

정 연 학



2014년 수원대학교 공과대학 토목공학과
공학사

Tel: 031-220-2566
E-mail: yeunhak07@hanmail.net
현재 수원대학교 공과대학 토목공학과
석사과정 재학

하 지 영



2002년 경희대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2011년 연세대학교 공학대학원 토목공
학과 공학석사
2014년 수원대학교 일반대학원 토목공
학과 공학박사 수료

Tel: 031-220-2566
E-mail: ha@ktr.or.kr
현재 한국화학융합시험연구원 선임연
구원