

유한차분해석과 한계평형해석의 비교를 통한 평면파괴 사면 쏘일네일링 보강효과 연구

Reinforcing Effect of a Soil Nailing on Plane Failure of a Slope by Comparing Finite Difference Analysis with Limit Equilibrium Analysis

유 광 호¹ You, Kwang-Ho

Abstract

It is very important to design and construct slopes safely because damage cases are increasing due to slope failure. Recently, Limit Equilibrium Method (LEM) based programs are commonly used for slope designs. Though LEM can give factors of safety through simple calculation, it has a disadvantage that the sliding surface should be assumed in advance. On the other hand, the use of Finite Difference Method (FDM) is increasing since the factor of safety can be easily estimated by using shear strength reduction technique. Therefore the purpose of this study is to present a reasonable slope design methodology by comparing the two commonly used analysis approaches; LEM and FDM. To this end, the reinforcement effects of the two methods were compared in terms of the support pattern of soil nailing reinforced in the section where plane failure is anticipated. As a result, the reinforcement effects by nail angle and nail spacing turned out to be equal. Also it was found that the factor of safety increased in LEM, but not changed in FDM when the nail length increased.

요 지

사면파괴로 인한 피해사례가 늘어남에 따라 사면을 안전하게 설계하고 시공하는 것은 대단히 중요하다. 현재 실무에서 주로 사용되는 한계평형해석은 간단한 계산에 의해 안전율을 산정할 수 있지만 활동면을 미리 가정한다는 단점이 있다. 한편 유한차분해석 시 전단강도감소기법을 이용하여 안전율 산정이 용이해짐에 따라 설계 시 이용되는 빈도가 점차 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 해석방법의 비교를 통해 합리적인 쏘일네일링 설계방안의 제안을 목적으로 한다. 이를 위해 평면파괴 예상구간에 쏘일네일링 보강 시 보강패턴에 따른 보강효과를 비교해보았다. 그 결과 네일의 각도와 간격에 따른 보강효과는 동일하게 나타났다. 하지만 네일 길이가 증가함에 따라 한계평형해석의 경우 안전율이 증가하였지만 유한차분해석의 경우 안전율의 변화가 없었다.

Keywords : Slope stability, Plane failure, Soil nailing, Finite difference method, Limit equilibrium method

¹ 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Suwon, Tel: +82-31-220-2566, Fax: +82-31-220-2522, khyou@suwon.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리나라의 경우 효율적인 국토개발을 위하여 도로, 터널 등 각종 시설물의 건설이 점차 증가하는 추세에 있다. 이러한 시설물들을 건설하기 위해 사면을 조성하는 시공사례가 증가하고 있다. 또한 규모가 커짐에 따라 여러 가지 원인으로 사면파괴가 발생하게 된다. Chung and You(1996)에 의하면 발생한 사면파괴 중 50% 이상이 평면파괴로 나타났으며, 썸피파괴 18%, 원호파괴 13%의 순으로 나타났다. 이러한 사면파괴로 인한 인적피해와 재산상의 피해사례가 증가되고 있다. 따라서 사면붕괴의 피해를 미연에 방지하기 위해 안전하게 설계하고 시공하는 것은 대단히 중요하다. 이를 위해 많은 학자들에 의하여 사면안정해석 방법과 사면의 보강공법에 관한 연구가 진행되어 왔다.

You et al.(2012)은 대표적인 사면파괴 형태인 평면파괴의 발생이 가능한 현장의 안정성 평가를 위해 한계평형해석과 유한차분해석 결과를 비교·분석하였다. 그 결과 건기 시의 안전율은 두 가지 해석방법 모두 유사하게 산정되었으나 우기 시에서는 FLAC의 지하수(ground water, GW)해석을 실시하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 또한 Kim(2013)은 평면 및 원호파괴의 발생이 예상되는 사면에 대하여 한계평형법 기반의 TALREN 97과 유한차분법에 기초한 FLAC 5.0을 이용하여 무보강 시와 쏘일네일링 보강 시로 나누어 두 가지 해석방법을 비교·분석하였다. 그 결과 평면파괴의 경우에는 두 해석방법 모두가 적절하다고 판단하였다. 하지만 원호파괴의 경우에는 동일한 활동면이 고려되는 TALREN 97 해석보다는 보강량에 따라 다른 활동면이 고려되는 FLAC 해석이 더 합리적이라고 판단하였다. 한편 You and Min (2013)은 원호파괴사면에 쏘일네일링의 패턴에 따른 보강효과를 비교하기 위해 유한차분해석을 실시하였다. 그 결과 사면으로부터 네일까지의 각도가 90°가 될 때 최대안전율을 보였으며, 이는 활동면이 최대로 커짐에 따른 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 사면의 대표적 파괴형태인 평면파괴가 발생할 가능성이 있는 사면에 쏘일네일을 보강한 후의 안정성을 확인하기 위해 한계평형해석과 유한차분해석을 실시하여 해석방법에 따른 보강효과를 비교·분석하는 것에 그 목적이 있다. 이를 위해 강원도에 위치한 ○○-○○간 연장 8.8km의 도로 확장 및 포장공사를 대상현장으로 선정하였으며, 평면파괴가 발생할 것으로

예상되는 구간을 연구대상으로 선정하였다. 또한 대표단면을 선정하여 한계평형법을 기반으로 하는 TALREN 97 (TERRASOL, 1997)과 유한차분법을 기초로 하는 지반범용 해석프로그램인 FLAC 5.0(Itasca Consulting Group, Inc., 2005)을 이용하여 사면안정해석을 실시하였다.

그리고 건기 시와 우기 시로 나누어 해석하였으며, 우기 시의 지하수위는 연구대상 사면의 설계 당시 적용하였던 Korea Expressway Corporation(2001)의 기준에 따라 사면의 표면까지 차있는 만수위로 가정하였다. 또한 유한차분해석 시 You et al.(2012)의 연구에서 제안한 간극률이 고려되는 지하수 해석을 수행하였다.

한편 쏘일네일링 보강패턴에 따른 보강효과를 비교·분석하기 위해 네일 각도를 수평면으로부터 하향으로 변화시켰으며, 간격 및 길이를 달리하여 수치해석을 실시하였다. 단 실제 현장에서 네일의 간격은 2m 이하, 길이는 8m 이하의 범위에서 시공되고 있지만, 이론적 연구를 위해 간격과 길이의 제한을 두지 않고 다양한 설치 패턴에 대하여 해석을 실시하였다.

2. 사면의 안정성 해석방법

사면의 안정성 해석은 대상사면의 구성물질과 붕괴 유형에 따라 해석방법이 다르며 해석목적에 부합되도록 적절한 해석법을 선택해야 한다. 사면의 안정해석 방법은 크게 경험적인 해석, 기하학적인 해석, 운동학적인 해석 등으로 구별할 수 있다. 경험적인 해석에는 SMR (Slope Mass Rating), GSI(Geological Strength Index) 평가 등이 있다. 기하학적인 해석은 운동학적인 해석의 전 단계로서 평사투영법과 블록이론 해석 등이 있다. 한계평형법(Limit Equilibrium Method)은 파괴여부를 판단하기 위해 안전율을 산정하는 해석법이며, 수치해석법은 시설물의 기능성과 관련된 변형정도를 예측하는 해석방법으로서 이러한 해석은 정량적인 결과를 도출한다. 그리고 수치해석방법은 강도감소기법을 이용하여 안전율을 간접적으로 구하는 기법이 연구 발표되고 있다. 그 외에 지반의 불확실성을 반영하는 확률론적인 방법과 Fuzzy 이론(expert system), GIS 해석 등이 있다.

2.1 한계평형법

한계평형법에 기초한 평면파괴의 안정성 해석을 수행하기 위해서는 Fig. 1과 같은 기하학적인 조건을 만족

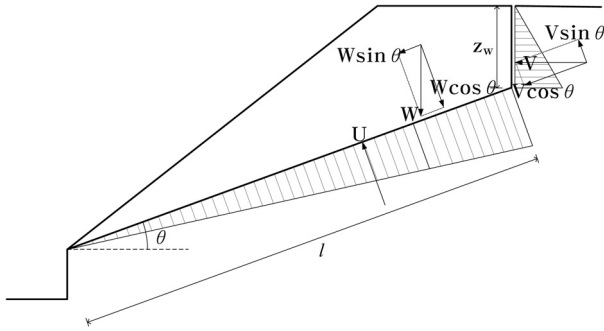


Fig. 1. Geometric condition for plane failure

해야한다. 한계평형법은 암반블록이 경사면 아래로 미끄러지는 힘(D)과 이에 저항하는 힘(R)이 같을 경우 미끄러짐이 일어나려는 순간인 한계평형상태에 있게 된다는 가정을 기초로 한다. 사면의 안전율은 미끄러짐을 유발시키는 힘의 총합과 미끄러짐에 저항하는 힘의 총합의 비율로 계산된다. 안전율은 식 (1)에 의해 계산된다. 단, 건기 시 식 (1)에서 부양력 U 와 수압 V 의 값은 0이 된다.

$$F_s = \frac{R}{D} = \frac{cl + (W \cos \theta - U - V \sin \theta) \tan \phi}{W \sin \theta + V \cos \theta} \quad (1)$$

$$W = \gamma_t A, \quad V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2, \quad U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w l, \quad \gamma_{sat} = \gamma_d + n \gamma_w \quad (2)$$

여기서,

- c : 불연속면의 점착력, l : 활동면의 길이
- W : 암석의 자중
- γ_t : 암석의 단위중량(단, 우기 시 암석의 단위중량을 사용)
- γ_{sat} : 암석의 포화단위중량
- γ_d : 암석의 건조단위 중량
- n : 암석의 간극률, A : 암석의 면적
- V : 인장균열에 작용하는 수압, γ_w : 물의 단위중량
- z_w : 인장균열 내 물의 깊이
- U : 활동면에 작용하는 부양력
- θ : 활동면의 경사각, ϕ : 활동면의 마찰각

2.2 TALREN 97에서 보강재의 적용방법

TALREN 97은 지반의 보강재(nail, anchors, reinforcing strip, braces, piles 등)의 유무에 관계없이 지반구조물의 안정성(절토 및 성토 등)을 평가할 수 있으며 한계평형

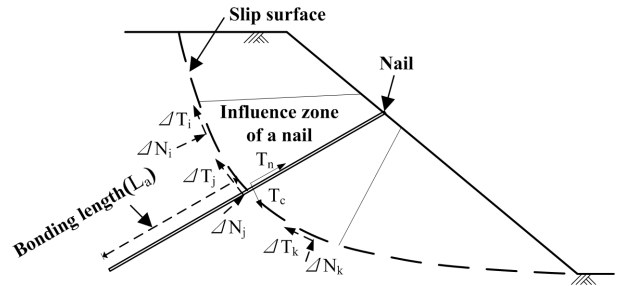


Fig. 2. Influence zone of a nail occurring along a sliding surface

상태에서 지반 활동면을 고려하는 고전적인 사면안정 방법(slope stability method)에 근거를 두고 있다. 각각의 절편에서 보강재에 의한 보강효과는 절편의 저면에서 활동면에 대한 법선 성분(ΔN)과 접선 성분(ΔT)으로 고려된다. 이들 성분들은 보강재에의 허용축력 T_n 과 전단력 T_c 로부터 결정되며, 최대 소성일의 원리에 따라 T_n 은 식 (3)에 의해 구해진다(TERRASOL, 1997).

$$T_n = \min [T_a / \Gamma_{mR}, q_s \pi D L_a / \Gamma_{qs}] \quad (3)$$

여기서, T_a : 네일의 인장강도

Γ_{mR} : T_a 에 대한 부분 안전율

q_s : 거동체(흙 + 네일)의 한계 주변 마찰력

D : 그라우팅 직경 또는 거동체(흙 + 네일)의 등가 직경

L_a : 부착길이(활동면을 초과한 네일 길이)

Γ_{qs} : q_s 에 대한 부분 안전율

보강효과를 보다 정확하게 고려하기 위하여, TALREN 97은 Fig. 2와 같이 활동면을 따라 일정한 영역 내에서 보강효과를 재분배시킨다. 이러한 접근 방법은 이질성이 매우 크고 다양한 흙의 종류에 대하여 변이 효과를 줄이는데 큰 도움이 된다.

2.3 유한차분법을 이용한 안전율 산정

유한차분법(FDM, Finite Difference Method)은 물리적 시스템의 근사해를 구하는 가장 오래된 수치해석기법 중 하나이며 일련의 지배방정식들을 대수적인 차분식으로 변환하여 해를 구한다. 우선 운동방정식으로부터 응력과 힘을 사용하여 새로운 속도와 변위를 구한다. 새로 구한 속도로부터 변형률 속도를 구하고 변형률 속도로부터 새로운 응력을 구하며 이 과정이 반복된다.

사면이나 둑, 제방 등에 있어서 안전율 F 는 ‘파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와 의 비’라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와 의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율 F 는 Duncan(1996)이 지적했듯이 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다.

사면의 안정해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 시험안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여 안전율을 구한다. 이때 시험안전율(trial factor of safety)과 이에 의해 감소된 지반 물성은 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며 원래의 물성과 식 (4)와 식 (5)의 관계를 갖게 된다(You et al., 2000; You et al., 2001). 한계평형 해석에서는 인장파괴를 고려하지 않으므로 인장강도는 변화시키지 않는다. 그러나 사면 해석 시에는 필요에 따라 동일한 방법으로 인장강도도 감소시킬 수 있다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (4)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{F^{trial}}\right) \quad (5)$$

사면의 파괴가 발생하는 시점의 시험안전율을 구하기 위해서는 먼저 시작값(F^{start})과 증분값(F^{inc})을 정한다. 이때 시작 값은 해석 결과가 평형 상태, 즉 사면의 파괴가 발생하지 않는 시험안전율이 되어야 하며, 증분 값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데, 해석 과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다.

해석결과가 수렴되면 사면의 파괴가 발생하지 않는 것이므로 시험안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이때 시험안전율은 F^{low} 로 저장된다. 이러한 상태로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 반복 수행한다. 어느 시

점에서 해석 결과가 수렴하지 않으면, 이 시험안전율은 실제 안전율보다 높은 값이므로 바로 전 단계의 안전율인 F^{low} 를 새로운 시작점으로 하여 다음 단계로 넘어가 감소된 증분 값을 사용하여 동일한 계산을 수행한다.

3. 연구 대상현장

3.1 개요

본 연구의 대상현장은 2008년에 설계되고 대우조선건설(주)가 시공한 현장으로서, Fig. 3에서 표시된 바와 같이 강원도에 위치한 ○○-○○간 연장 8.8km의 도로 확장 및 포장 공사현장이다(D.S.M.E. Construction Co., LTD., 2008).

대상현장의 14개 절토사면 구간에서 시공 중 파괴가 발생하였거나 발생이 예상되었다. 그리고 암질 경계부 및 풍화작용을 받은 표층부에서 심한 파쇄가 진행되고 있는 상태임을 확인하였다. 이에 따라 사면에 대한 안정성 평가와 보강대책이 요구된다. 사면의 안정성 평가 및 보강대책이 필요한 구간은 전체 노선 중 STA.1+280~6+300까지 총 14개 구간이며, 연구대상 구간은 평면파괴가 발생할 것으로 예상되는 STA.2+310~2+490이다.

3.2 평면파괴 예상구간

지반조사 결과 평면파괴가 발생할 것으로 예상되는



Fig. 3. The construction site of interest



Fig. 4. The condition of the slope of interest

구간의 주요 암종은 사암, 자색 셰일이며, 지층은 토사와 암반으로 이루어져 있다. 또한 풍화정도는 약간풍화와 심한풍화 사이 정도이며, 다수의 절리와 층리를 보이고 있다. 대상사면의 현황은 Fig. 4와 같으며, 대규모 붕괴는 발생되지 않았으나 불연속면에 의한 암괴 탈락이 발생되었다. 절리면은 Fig. 5와 같이 풍화작용을 받아 이완되어 있으며 점토가 협재되어 있다. 또한 암질 경계부는 파쇄가 심하고 단층작용에 의한 토사화가 진행되었다.

한편 주 절리군의 간격은 0.05~1m의 간격으로 조사되었고, 연장은 모두 0.5~1.0m 이상의 연속성을 보이며, 풍화도는 약간풍화에서 심한풍화정도를 보이고 있다. 틈새는 수 mm 이상이었으며, 사면 하단부분의 일축 압축강도는 21MPa이었다. Table 1은 대상사면의 불연속면 특성을 나타낸다.

Table 1의 대상구간 불연속면의 방향성을 이용하여 평사투영 해석을 통해 안정성 검토를 실시하였다. Fig. 6은 평사투영해석 결과로 전도파괴 및 썩기파괴에 대해

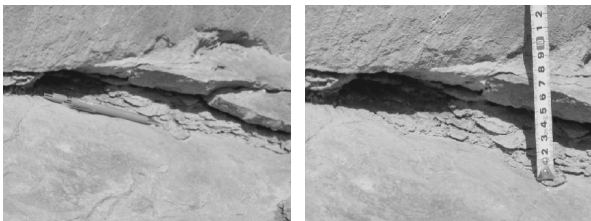


Fig. 5. Clay infilled in weathered joints

서는 안전한 것으로 나타났다. 하지만 현 상태의 경사에서는 평면파괴가 발생할 가능성이 있는 것으로 예상되었다.

대상구간에서 평면파괴가 발생할 가능성이 있는 것으로 예상되었기 때문에 보다 정확한 안정성 평가가 필요한 것으로 판단된다. 이를 위해 Fig. 7과 같은 대표단면(STA.2+420)을 선정하였다. 대표단면은 수직절리(인장균열)와 층리면이 존재하고 발파암과 토사로 이루어져 있다. 사면 상단부는 1:1.5의 경사를 가지고 있으며, 사면 하단부의 경사는 1:1이다. 또한 수직절리와 층리면을 따라 활동이 가능한 것으로 예상된다.

4. 수치해석 모델링

본 연구에서는 실제 시공 중인 현장을 대상으로 평면파괴가 예상되는 구간의 대표단면을 선정하였다. 대표단면의 안정성 평가를 위해 TALREN 97을 이용한 한계평

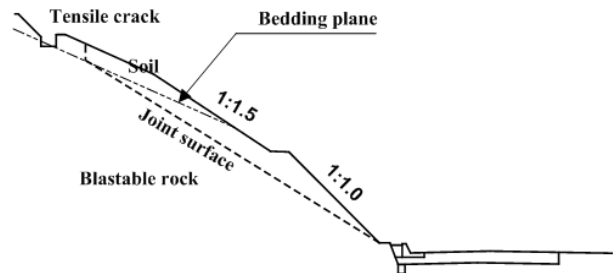


Fig. 7. Representative cross section (STA.2+420)

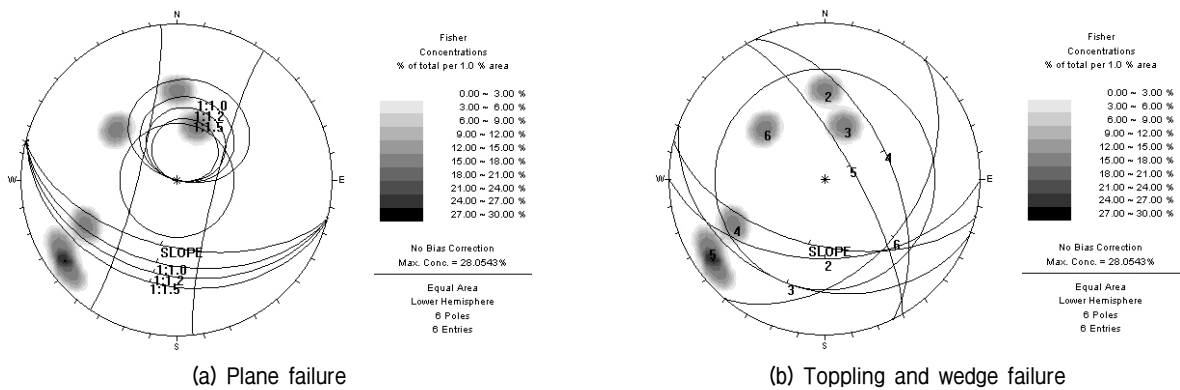


Fig. 6. Stereographic projection analysis results

Table 1. Discontinuities properties

Joints	Orientation	Persistence (m)	Spacing (cm)	Aperture (mm)	Weathering	Filling	Roughness
1	30/200	1.0	100	3	Heavy	Little	5
2	42/130	0.7	20	3	Normal	No	4
3	75/060	0.15	5	1	Normal	No	5

형해석과 FLAC을 이용한 유한차분해석을 실시하였다.

평면파괴의 경우 절리면에서 파괴가 일어나기 때문에 TALREN 97 모델링 시 절리면을 활동면으로 가정하였으며 FLAC 해석 시 불연속면의 특징을 구현할 수 있는 경계요소(interface element)를 적용하여 모델링하였다. 그리고 절리면에서 일어나는 평면파괴에 대한 안정성 평가만을 위해 지반모델링 시 원지반의 파괴가 일어나지 않는 탄성모델을 적용하였다.

우기 시의 지하수위는 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011)에 의해 사면이 토사와 풍화암으로 이루어져 있는 경우에는 지반조사 결과, 지형조건 및 배수조건 등을 종합적으로 고려하여 지하수위를 설계자가 임의로 결정하도록 되어있다. 하지만 본 연구의 대상사면은 2008년에 설계된 사면으로서 당시 적용되었던 Korea Expressway Corporation(2001)의 기준에 따라 지하수위는 사면의 표면까지 차있는 만수위로 가정되었다. 우기 시 FLAC 해석의 경우 You et al.(2012)이 제안한 간극수압이 고려되는 GW 해석을 실시하였다. 한편 쓰일네일의 설치패턴에 따른 효과를 비교·분석하기 위하여 각도, 간격, 길이를 다양하게 하여 모델링하였다.

4.1 해석 개요 및 모델링 방법

평면파괴가 발생될 것으로 예상되는 지점(STA. 2+420)의 해석영역을 Fig. 8과 같이 폭 33.05m, 높이 19.60m로 하였다. 지층은 토사와 발파암으로 이루어져 있으며, 활동면은 0.99m의 인장균열 및 절리면이 존재하는 사면이다.

TALREN 97을 이용한 평면파괴면의 모델링 시 Fig. 9와 같이 인장균열과 절리면(Fig. 9에서 \overline{az})을 활동면으로 가정하였다. 활동면에 점토가 협재되어 있다는 지반조사 결과에 따라 점토질의 충전물이 존재하는 것으로 모델링하였다.

그리고 유한차분법을 기반으로 하는 FLAC을 이용하

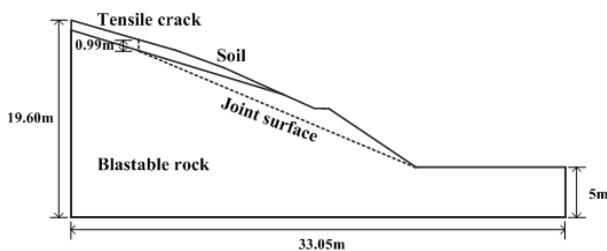


Fig. 8. The outline of numerical analysis

여 Fig. 10과 같이 모델링하였다. 인장균열과 활동면은 불연속면의 특징을 구현할 수 있는 경계요소(Fig. 10에서 *)를 이용하여 모델링하였다. 좌·우 측면경계는 수평방향변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하도록 경계조건을 설정하였다. 그리고 절리면에서 일어나는 평면파괴에 대한 안정성 평가만을 위해 지반모델링 시 원지반의 파괴가 일어나지 않는 탄성모델을 적용하였다. 이는 탄성모델이 아닌 탄소성(Mohr-Coulomb)모델을 적용할 경우 원지반의 파괴가 고려되어 평면파괴뿐만 아니라 국부적인 원호파괴가 일어나 TALREN 97 해석과 동일한 조건에서 안정성 평가가 이루어지지 않기 때문이다.

우기 시 해석의 경우에는 You et al.(2012)의 연구에서 제안한 지하수(ground water, GW) 흐름해석을 실시하였다. GW 해석은 식 (2)와 같이 간극물이 고려된 암반의 포화단위중량을 사용하는 방법이다. 또한 우기 시 수위는 안정성이 제일 낮을 때인 만수위로 가정하였다.

4.2 지반 및 쓰일네일 물성치

평면파괴에 대한 안정성 해석에 사용될 지반물성치

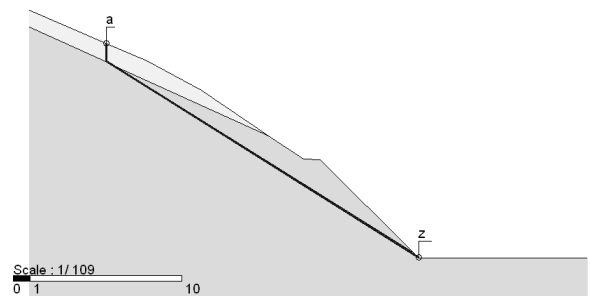


Fig. 9. TALREN 97 modeling

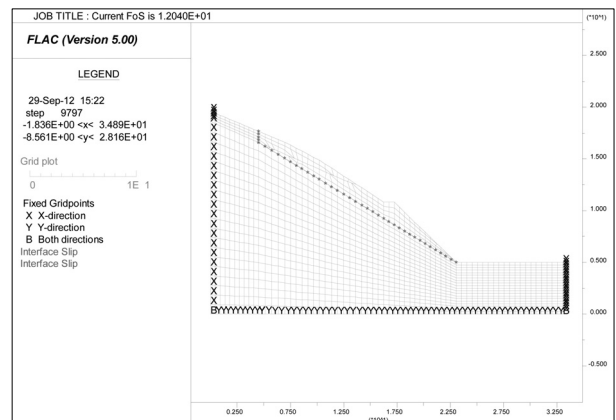


Fig. 10. Mesh for FLAC modeling

는 D.S.M.E. Construction Co.(Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Construction Co., 대우조선해양건설)보고서(2008)에서 사용된 기존 문헌자료와 설계 자료를 바탕으로 Table 2와 같은 물성치를 적용하였다. 단, 인장강도는 점착력의 0.5배를 사용하였다.

TALREN 97 해석에 적용한 지반물성치 중 주면마찰저항과 지반의 한계압력 및 횡방향 변형계수는 Korean Geotechnical Society(1997a, 1997b)에서 제시한 값을 사용하였다. 적용된 주면마찰저항은 토사의 경우 모래의 값을 사용하였으며, 발파암의 경우 풍화암, 충전물의 경우에는 모래 중 가장 작은 값을 적용하였다. 또한 한계압력 및 횡방향 변형계수는 토사의 경우 모래로 적용하였으며, 발파암은 암석에 대한 자료가 없어 자갈의 값을 사용하였다. 또한 충전물은 연약점토의 값을 적용하였다. 한편 우기 시 FLAC 해석의 수압 고려방법 중 GW 해석에는 지반의 포화단위중량이 사용되기 때문에 간극률 값이 필요하다. 현장에서의 지반조사자료 중 간극률에 대한 자료가 부족하여 토사층의 경우 0.2, 발파암의 경우 0.1로 가정하였다.

본 연구에서 보강재로 사용된 네일은 D-25 이형철근으로 물성치는 Table 3과 같다. TALREN 97 해석 시 보강재의 인장력과 전단력을 동시에 고려하는 IND-3 조건을 이용하여 네일을 모델링하였다. IND-3 조건을 이용하기 위하여 Table 3과 같은 소성모멘트와 휨강성을 산정하였다.

또한 FLAC 해석에서 네일의 휨 및 전단거동을 고려하는 록볼트 요소를 이용하여 모델링하였다. 본 연구에

서 적용된 록볼트 요소의 입력 물성치 중 그라우트의 전단강성 및 점착강도는 Itasca Consulting Group, Inc. (2005)이 제안한 식에 의해 계산되는 케이블 요소 물성치와 동일하게 사용하였다. 단, 그라우트의 전단강성 및 점착강도를 계산하기 위한 일축압축강도, 포아송비, 탄성계수는 Lee(2012)의 값을 사용하였다. 또한 그라우트의 점착강도 계산 시 파괴는 지반과 그라우트 사이에서 일어나는 것으로 가정하였다. Table 4는 본 연구에서 적용된 그라우트 물성치이다.

4.3 쓰일네일의 보강패턴

본 연구에서 보강공법으로 선정한 쓰일네일의 설치패턴에 따른 보강효과를 알아보기 위하여 Fig. 11과 같이 모델링을 실시하였다. 이를 위해 네일 각도(θ), 간격(S), 길이(L)를 달리하여 동일한 설치패턴을 TALREN 97 및 FLAC 해석에 적용하였다.

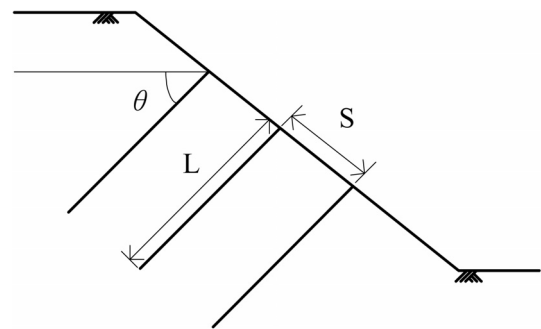


Fig. 11. Support pattern of soil nailing

Table 2. Ground properties

Classification	Density (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Porosity	Skin friction resistance (kN/m ²)	Limit pressure (kN/m ²)	Strain modulus (kN/m ²)
Soil	17.66	19.62	30	0.2	196.2	1,177.2	7,848
Rock	23.54	49.05	35	0.1	588.6	4,905	39,240
Infilling material	16.68	4.91	20	-	98.1	49.05	491

Table 3. Soil nail properties

Size	Diameter (m)	Cross-section area (m ²)	Allowable tensile stress (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Hole diameter (m)	Plastic moment (N·m)	Bending stiffness (N·m ²)
SD 400	0.0254	5.067×10 ⁻⁴	392.4	210	0.1	618	4,208

Table 4. Grout properties

Compressive strength (MPa)	Poisson's ratio (ν)	Elastic modulus (GPa)	Bond stiffness (MN/m/m)	Bond strength (MN/m)
20	0.2	15.3	2,922	0.314

평면파괴에 대한 쏘일네일링 보강 시 네일 각도(θ)는 수평면과 네일 사이의 각도이며, 시공현장에서 많이 적용되고 Eom(2009)의 연구결과로 제시된 15°, 20°, 25°를 적용하였다. 그리고 실제 시공현장에서는 간격(S)이 2m를 넘지 않으나 이론적 연구를 위해 간격을 2m, 3m, 4m로 결정하였으며, 길이(L)는 사면의 표면으로부터 활동면까지의 길이를 고려하여 3m, 4m, 5m를 적용하였다.

5. 해석방법에 따른 쏘일네일링 보강효과

본 연구에서는 해석방법에 따른 쏘일네일링 보강효과를 비교하기 위해 한계평형해석 및 유한차분해석을 실시하였다. 이를 위해 대상현장 중 대표적인 사면파괴 형태인 평면파괴의 발생이 예상되는 구간의 대표단면에 대해 해석방법 별로 안전율을 산정하였다. 그리고 건기 시와 우기 시로 나누어 해석을 실시하였다. 한계평형해석 시 TALREN 97에서 사용할 수 있는 방법(Fellenius 법, Bishop 법, perturbations 법) 중 Bishop 법을 이용하였으며, 유한차분해석 시 전단강도감소기법을 이용하여 각각의 안전율을 산정하였다. 이를 위해 FLAC의 프로

그래밍 언어인 FISH로 작성된 안전율 산정 프로그램 (Park and You, 1998)을 사용하였다.

Fig. 12는 TALREN 97에 의한 해석결과로 네일 길이가 4m인 경우 각도 별로 간격을 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 건기 시 Fig. 12(a)와 같이 각도가 수평면으로부터 하향으로 증가함에 따라 안전율이 감소하며, 감소폭이 증가하는 경향을 보였다. 이 때 간격이 증가할수록 감소폭이 감소하는 것으로 나타났다. 각도가 20° 이상이 되면 안전율이 급격하게 감소하여 보강효과가 떨어질 것으로 사료된다. 한편 우기 시는 Fig. 12(b)와 같이 건기 시와 동일한 경향을 보였지만, 각도와 간격에 상관없이 모두 1.0 이하로 건기 시보다 낮은 안전율을 보였다.

Fig. 13은 FLAC 해석결과로 네일 길이가 4m일 경우 네일 각도 별로 간격을 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 간격이 2m인 경우 큰 안전율이 산정되어 Fig. 13에 도시하지는 않았다. 건기 시 Fig. 13(a)와 같이 각도가 증가할수록 간격에 상관없이 안전율이 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 간격이 작을수록 안전율은 크고 각도가 15°에서 25°로 커질수록 설치간격에 대한

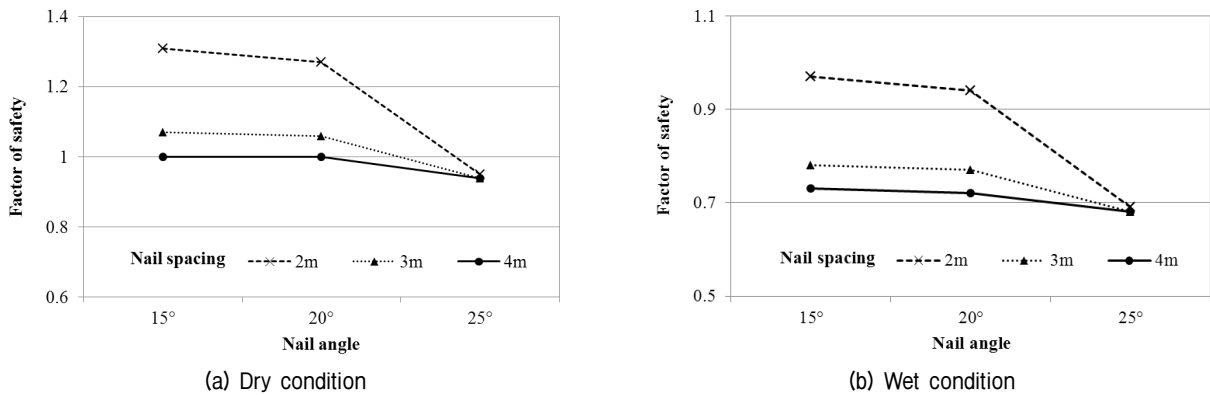


Fig. 12. Factor of safety vs. nail angle as a function of nail spacing (TALREN 97, nail length 4 m)

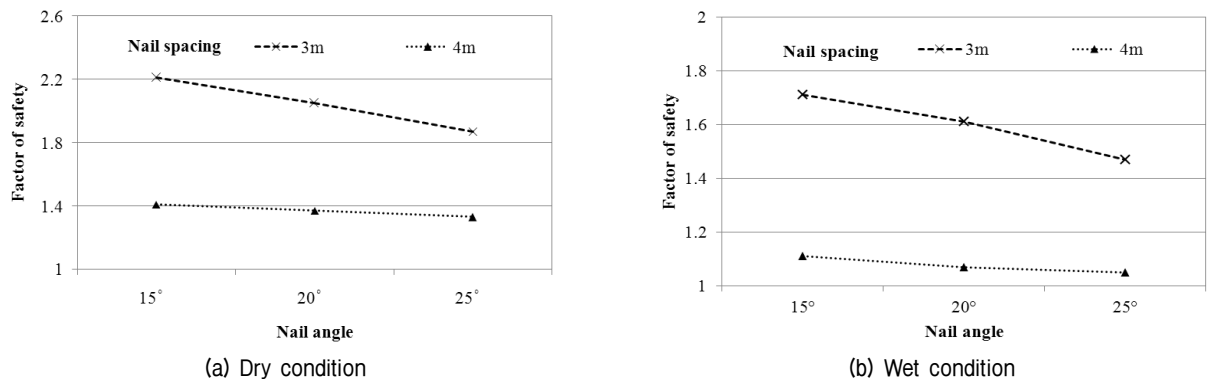


Fig. 13. Factor of safety vs. nail angle as a function of nail spacing (FLAC, nail length 4 m)

안전율 증가폭이 작아지는 것으로 나타났다. 한편 우기 시는 Fig. 13(b)와 같이 건기 시 경향과 유사하지만, 건기 시의 안전율보다 최대 0.50, 최소 0.28이 낮은 경향을 보였다. 그리고 TALREN 97 해석 결과와는 달리 안전율이 모두 1.0 이상으로 나타났다.

평면파괴면에 쓰일네일의 보강 시 네일 각도에 대한 안전율의 변화를 비교·분석해 보았다. TALREN 97 해석의 경우 건기 시와 우기 시 모두 각도가 수평면으로부터 하향으로 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다. 또한 간격이 증가함에 따라 안전율이 감소하는 폭은 점점 줄어드는 것으로 나타났다. 한편 FLAC 해석의 경우도 TALREN 97 해석결과와 유사하게 각도가 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다. Fig. 12에서 보듯이, TALREN 97의 경우에는 과소평가되는 네일의 보강효과로 인해 사면의 파괴(안전율이 1.0 이하)가 발생한 것으로 판단된다. 하지만 해석방법의 비교·분석을 위한 본 연구에서는 안전율이 1.0 이하로 산정되는 것에 초점을 맞추기보다는 오히려 네일의 보강효과를 살펴보기 위해 안전율의 경향을 분석하였다.

Fig. 14는 네일 각도에 따른 작용력을 나타낸 것이다. 각도가 15°와 25°인 네일에 동일한 활동력(D)이 작용할

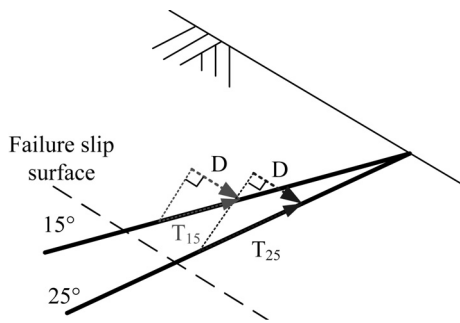


Fig. 14. Comparison of force according to nail angle

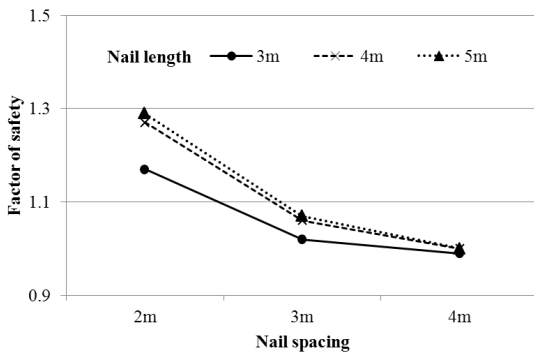


Fig. 15. Factor of safety vs. nail spacing as a function of nail length (TALREN 97, dry condition, nail angle 20°)

경우 네일에 작용하는 축력은 각각 T_{15} , T_{25} 와 같다. 이 때 Fig. 14에서 보는 바와 같이 T_{25} 가 T_{15} 보다 크게 되기 때문에 네일 각도가 25°일 경우의 안전율이 15°일 경우보다 작게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 TALREN 97의 해석결과로 건기 시 네일 각도가 20°일 때 네일 간격 별로 길이를 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 안전율은 길이에 상관없이 간격이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 길이가 증가할수록 안전율은 증가하며 이 때, 간격이 증가할수록 안전율 감소폭이 낮아지는 것으로 나타났다. 한편 간격이 4m일 경우 길이를 증가하더라도 보강효과가 미미한 것으로 확인되었다.

Fig. 16은 FLAC의 해석결과로 건기 시 네일 각도가 20°일 때 간격 별로 길이를 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 간격 2m일 때 안전율이 큰 값이 나왔기 때문에 안전율 축을 로그 스케일로 변환하였다. 길이가 3m, 4m, 5m인 경우 비교적 유사한 값이 산정되었으며, 간격이 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다. 간격이 2m에서 3m로 증가하는 구간에서의 안전율 감소폭이 3m에서 4m로 증가하는 구간의 감소폭보다 크게 나타났다. 또한 간격이 증가함에 따라 안전율의 감소폭이 줄어드는 것으로 나타났다.

평면파괴면에 쓰일네일의 보강 시 네일 간격이 안전율에 미치는 영향을 정리하였다. TALREN 97 해석의 경우 건기 시와 우기 시 모두 간격이 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다. 또한 간격이 늘어남에 따라 안전율이 감소하는 폭이 점점 줄어들었으며, 길이가 증가할수록 안전율이 증가하였다. 한편 FLAC 해석결과에서는 건기 시와 우기 시 모두 간격이 증가함에 따라 안전율이 감소하였으며, 간격이 증가함에 따라 안전율의 감소폭이 줄어들었다.

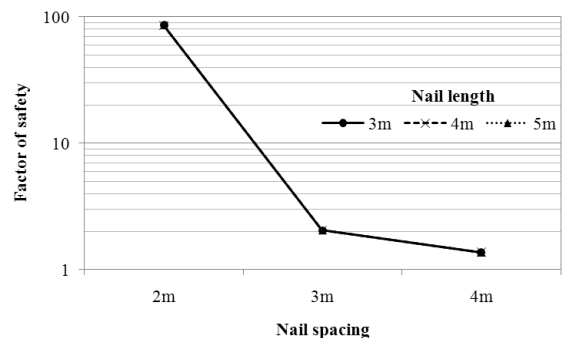


Fig. 16. Factor of safety vs. nail spacing as a function of nail length (FLAC, dry condition, nail angle 20°)

Fig. 17은 TALREN 97의 해석결과로 건기 시 네일 각도가 20°일 때 네일 길이 별로 간격을 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 간격에 상관없이 길이가 증가할수록 안전율이 증가하는 경향을 보였다. 또한 간격이 증가할수록 낮은 안전율을 보이며 이 때, 길이가 증가할수록 안전율 증가율이 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 간격이 증가하고 길이가 감소할수록 네일의 보강효과가 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 18은 FLAC의 해석결과로 건기 시 네일 각도가 20°일 때 네일 길이 별로 간격을 달리하여 안전율을 나타낸 것이다. 간격 2m인 경우에는 안전율이 크게 나와서 Fig. 18에 도시하지 않았지만 길이가 증가함에 따라 안전율의 변화는 없었다. 또한 간격 3m와 4m인 경우도 길이가 증가함에 따른 안전율의 변화는 없었다.

한편 평면파괴면에 쓰일네일 보강 시 네일 길이에 따른 안전율을 비교·분석해 보았다. TALREN 97 해석의 경우 Fig. 17에서 보는 바와 같이 길이가 증가함에 따라 안전율이 증가하는 경향을 보였으며, 길이가 증가할수록 안전율의 증가폭은 줄어들음을 알 수 있었다. 하지만 FLAC 해석의 경우 Fig. 18에서 보는 바와 같이 길이가

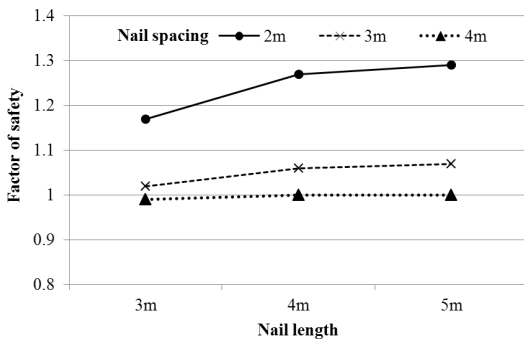


Fig. 17. Factor of safety vs. nail length as a function of nail spacing (TALREN 97, dry condition, nail angle 20°)

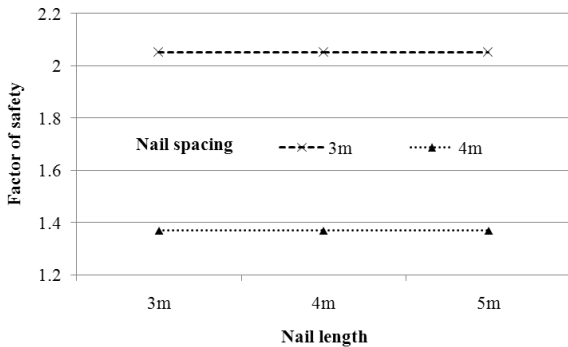


Fig. 18. Factor of safety vs. nail length as a function of nail spacing (FLAC, dry condition, nail angle 20°)

안전율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이를 확인하기 위해 Fig. 19와 같이 건기 시 네일각도가 20°, 간격 3m, 길이 4m일 때, 파괴양상을 조사해 보았다. 모든 네일의 파괴면 부근에서 그라우트 간의 전단파괴(× 표시)가 발생하였지만, 축력(axial force)과 허용인장강도(yield tensile strength)의 비(F-Y ratio)가 1.0 이하로 나타나, 네일의 인장파괴는 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

TALREN 97 해석에서는 TERRASOL(1997)에 의해 네일의 허용축력(T_n)은 네일의 인장강도를 부분안전율로 나눈 값과 흙과 네일의 한계 주면마찰력과 표면적의 곱을 부분안전율로 나눈 값 중, 작은 값을 사용한다. 따라서 TALREN 97 해석에서는 네일의 부착길이(L_n)가 길어질수록 네일의 축력이 증가하여 안전율이 증가한 것으로 판단된다. 반면에 FLAC 해석의 경우에는 그라우트 간의 전단파괴만이 발생하여 안전율이 네일 길이의 영향을 받지 않기 때문에 네일의 길이에 상관없이 일정하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 각 해석에서 네일의 모델링 방법이 다르기 때문에 평면파괴면에 쓰일네일링 보강 시 네일 길이에 따른 안전율의 경향이 다르게 나타는 것으로 판단된다.

한편 종합적으로 판단해 볼 때, 평면파괴 해석 시 FLAC 해석이 TALREN 97 해석 보다 큰 안전율을 주는 것을 알 수 있었다. 특히 네일간격이 4m인 경우 TALREN 97 해석 결과를 도시한 Fig. 17에서 보듯이 안전율이 1.0 정도로 산정된 반면, FLAC의 경우는 Fig. 18로부터 알 수 있듯이 안전율이 1.37로 나타났다. 이러한 경향은 한계평형법에 기초한 TALREN 97 해석 결과와 전단강도

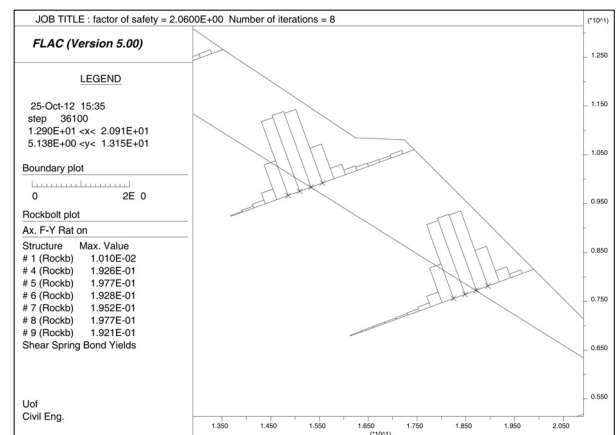


Fig. 19. Axial force diagram of soil nails and shear failure of grout (FLAC, dry condition, nail angle 20°, spacing 3 m, length 4 m)

감소기법에 기초한 FLAC 해석 결과를 직접 비교하기는 쉽지 않으나, FLAC의 경우가 TALREN 97의 경우보다 네일의 보강효과를 과대평가하기 때문인 것으로 판단된다. 한편 이러한 차이는 네일의 허용축력이 네일의 인장파괴와 그라우트의 전단파괴로 나뉘어 각각 단일 값으로 허용값이 입력되는 FLAC의 경우와 달리, TALREN 97의 경우에는 최대소성일의 원리에 의해 해석과정에서 부착길이를 고려하여 결정되고, 또한 네일과 관련하여 입력되는 물성들이 서로 같지 않은 것에 기인한다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 강원도에 위치한 ○○-○○간 연장 8.8km의 도로 확장 및 포장공사 현장 중 평면파괴 발생 예상지점을 대상으로 한계평형법과 유한차분법을 이용하여 쓰일네일 보강패턴에 따른 보강효과를 비교·분석하였다. 단, 절리면에서 일어나는 평면파괴에 대한 안정성 평가만을 위해 FLAC 해석 시 원지반의 파괴가 일어나지 않는 탄성모델을 적용하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) TALREN 97 해석과 FLAC 해석결과 모두 쓰일네일 설치각도가 수평면으로부터 하향으로 증가함에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 각도가 클 경우 네일에 작용하는 축력이 증가함에 따라 안전율이 감소하는 것으로 판단된다.
- (2) 쓰일네일 보강 시 네일 길이가 증가함에 따라 TALREN 97 해석의 경우 안전율이 증가하였지만, FLAC 해석에서는 변화가 없었다. TALREN 97 해석의 경우 네일의 허용축력이 부착길이에 영향을 받아 증가하지만, FLAC 해석의 경우 그라우트 간의 전단파괴만이 발생하여 네일 길이가 안전율에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 지반물성치 중 극한마찰저항력, 한계압력 횡방향 변형계수 등은 문헌조사를 통해 대표적인 값을 이용하여 실제 지반물성치와 차이가 있을 수 있다. 또한 FLAC을 이용한 평면파괴면의 지반모델링 시 탄성모델을 적용하였으므로 실제거동과 다를 수 있음을 유념해야한다.

참고문헌 (References)

1. Bishop, A. W. (1955), "The use of pore pressure coefficient in practice", *Geotechnique*, Vol.5, pp.7-17.
2. Chung, H. S. and You, B. O. (1996), "Failure types in rock slopes according to geological characteristics", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.12, No.6, pp.37-49.
3. D.S.M.E. Construction Co., LTD. (2008), Safety examination report of pavement and extension work from ○○ to ○○, 83p.
4. Duncan, J. M. (1996), "State of the art : limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", *J. of Geotechnical Engineering*, Vol.122, pp.577-596.
5. Eom, K. H. (2009), *A study on slope-stabilizing effect of soil nailing in soil slopes*, Chungang University, Graduate School of Construction Engineering, Master's Degree Thesis, 93p.
6. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), *Fast Lagrangian analysis of continua, Ver. 5.0*, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
7. Kim, K. S. (2013), *A Comparative Case Study on the Analysis Method for Slope Stability Estimation of Plane and Circular Failures*, University of Suwon, Graduate School, Doctoral Dissertation, 133p.
8. Korea Expressway Corporation (2001), *Road design know-how Part 2: Drainage and earthwork*, 664p.
9. Korean Geotechnical Society (1997a), *Geotechnical Series I: Analysis and utilization of geotechnical investigation results*, 266p.
10. Korean Geotechnical Society (1997b), *Geotechnical Series III: Excavation and earth retaining methods*, 389p.
11. Lee, J. K. (2012), *Applicability evaluation of reinforced ribs of shotcrete and cablebolts as tunnel supports*, University of Suwon, Graduate School, Doctoral Dissertation, 165p.
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), *Ministry of land, transport and maritime affairs enactment : Construction work, Slope design criteria*, 122p.
13. Park, Y. J. and You, K. H. (1998), "Stability analysis for jointed rock slope using ubiquitous joint model", *J. of the Korean Society for Rock Mech.*, Vol.8, No.4, pp.287-295.
14. TERRASOL Geotechnical Consultants (1997), *TALREN 97; Program for the stability analysis of geotechnical structures*, TERRASOL Geotechnical Consultants, France.
15. You, K. H. and Min, K. S. (2013), "Influence of soil nailing angle on slope reinforcement effect by finite difference analysis", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.8, pp.27-36.
16. You, K. H., Min, K. S. and Kim, K. S. (2012), "A comparative study on the evaluation stability of rock slope's plane failure using finite difference method", *Korean Geotechnical Society Fall National Conference*, pp.888-892.
17. You, K. H., Park, Y. J. and Bae, G. J. (2000), "An assessment of safety factor for tunnels excavated in a weak rock layer", *J. of the Korean Tunnelling Association*, Vol.2, No.3, pp.47-57.
18. You, K. H., Park, Y. J. and Kang, Y. (2001), "A numerical study on the estimation of safety factor of tunnels excavated in jointed rock mass", *J. of the Korean Society for Rock Mech.*, Vol.11, No.3, pp.279-288.

Received : December 24th, 2013

Revised : February 28th, 2014

Accepted : July 14th, 2014