

가압식 그라우팅 쏘일네일 보강사면의 거동분석

Stability Analysis for a Slope Reinforced with Pressure Grouted Soil Nails

김 용 민¹ Kim, Yong-Min

윤 여 혁² Yun, Yeo-Hyeok

이 성 준³ Lee, Sung-June

정 상 섭⁴ Jeong, Sang-Seom

Abstract

This paper describes a new numerical analysis technique in stability analysis for a slope reinforced with pressure grouted soil nails. The installing effect of pressure grouted soil nails can be simulated in this method. Shear strength reduction method associated with finite element method is used for slope stability analysis. Factors of safety for a slope reinforced with pressure grouted soil nails are compared with those for a natural slope and a slope reinforced with gravity grouted soil nails in order to investigate their reinforcing effects. More than 50% increase in the factor of safety is obtained when the slope is reinforced with pressure grouted soil nails compared to the one with gravity grouted soil nails. The reinforcing effects of pressure grouted soil nails become obvious with increase in their length. The reinforcing mechanism of the pressure grouted soil nails for the slope stability can be explained by the slope failure surface expanding gradually toward the backfill. The increased stability of the slope reinforced with pressure grouted soil nails results mainly from their improved pull-out resistance.

요 지

본 연구에서는 유한요소해석 및 전단강도 감소기법을 적용하여 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의 시공 단계를 고려한 사면안정 해석을 수행하였으며 무보강 자연사면 및 중력식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의 안전율과 비교함으로써 가압식 그라우팅 쏘일네일의 사면 보강효과를 분석하였다. 그 결과, 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의 안전율이 중력식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면에 비해 50% 이상 크게 나타났으며, 쏘일네일의 길이가 증가할수록 가압에 따른 보강효과가 우수한 것으로 나타났다. 또한 가압에 의해 사면 활동파괴영역이 확대됨에 따라 사면 전단저항 능력이 증가하는 것을 확인하였으며, 쏘일네일의 인발저항력이 사면보강에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Pressure grouted soil nail, Shear strength reduction method, Reinforced slope, 3-D finite element analysis

1. 서 론

사면의 안정성을 높이기 위해 쏘일네일을 적용한 보

강공법이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 중력식 그라우팅 쏘일네일이 사용되고 있으나 최근에는 가압식 그라우팅(pressure grouting) 쏘일네일 공법 적용사례가 증

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)

2 극동건설 기술연구소 연구원 (Research Engineer, Kukdong E&C Research Institute)

3 정희원, 청주대학교 토목환경공학과 전임강사 (Full-Time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Cheongju Univ.)

4 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가하고 있는 추세이다. 가압식 그라우팅 쏘일네일은 그라우팅 설치 시 주입압을 통하여 지반과 네일 사이의 간극을 충전 시키는 공법으로써 주입압에 따라 쏘일네일의 유효경이 증가되고 보강재와 주위지반의 마찰력을 증가시킴으로써 중력식 그라우팅에 비해 정착부에서 발휘되는 마찰 저항력이 증가되는 장점이 있다. 하지만 가압에 의한 지반-그라우팅 사이의 거동을 명확히 규명하는 것이 쉽지 않기 때문에 현재 정확한 설계가 이루어지지 않고 있어 이를 규명하고자 하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 배경태 등(2008)과 정경한 등(2008)은 가압식 그라우팅 쏘일네일에 대한 인발거동 특성을 실험적으로 분석하고자 하였으며, Su와 Yin(2010)은 실내실험과 수치해석을 통해 사질토 지반의 팽창각(ψ)을 고려한 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발 저항력을 산정하였다. 또한 서형준 등(2009)과 조재연 등(2010)은 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발거동 특성을 현장실험을 통해 규명하였으며, 가압 시 지반변위를 공동팽창이론으로 예측하여 현장실험 데이터와 비교·분석하였다. 그렇지만 지금까지 가압식 그라우팅 쏘일네일에 대한 연구는 주입압과 유효경 증가에 따른 인발저항력 분석에 초점이 맞춰져 있어 사면에 적용된 쏘일네일의 전단저항과 휨저항에 대한 분석은 거의 이루어지지 않은 상태이다. 물론 쏘일네일 보강사면의 수치해석적 연구는 활발히 진행되어 왔으나(Matsui와 San, 1992; Won 등, 2005; 김낙경 등, 2008; 권영기와 정상섭, 2009), 대부분 중력식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면에 대한 연구로 국한되어 있어 가압식 그라우팅 쏘일네일을 적용한 사면에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

따라서 본 논문에서는 가압식 그라우팅 쏘일네일의

인발저항력을 모사할 수 있는 단계별 수치해석 방법을 제시하였으며 기존의 현장시험 결과와의 비교를 통해 수치해석 모델링 기법을 검증하였다. 이를 바탕으로 사면에 적용된 가압식 그라우팅 쏘일네일의 설치효과 및 지반과의 상호작용을 분석하였고 사면보강효과를 규명하기 위해 전단강도 감소기법을 적용한 3차원 사면안정 해석을 수행하였다.

2. 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법 및 사면안정 해석 이론

2.1 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법

기존의 중력식 그라우팅 쏘일네일 공법은 여러 단계에 걸쳐 그라우트를 주입하기 때문에 충전불량과 시공성 저하라는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하고 정착부의 마찰 저항력을 증가시키기 위해 네일과 지반사이에 그라우트를 약 500~1000kPa 정도로 주입하여 시공하는 것이 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법이며(그림 1), 일반적으로 현장인발시험을 통해 인발저항력 증가양상을 규명할 수 있다. 가압 그라우팅 시 천공면 주변 지반의 거동은 공내재하시험 시와 유사하며 표 1과 같이 주입압(p)이 임계주입압(p_{cr}) 보다 작은 경우 지반은 탄성 거동을 나타내나, 주입압이 임계주입압 보다 크게 되면 지반의 균열을 유발시키고 수압파쇄 현상이 발생되어 탄·소성거동을 하게 된다. 주입압이 더욱 커져 한계주입압(p_{lim})을 초과할 경우 지반은 완전소성거동을 나타내며 공벽주위에 전단파괴가 발생하여 인발저항력의 증가를 기대할 수 없게 된다. 이러한 주입압에 의해 쏘일

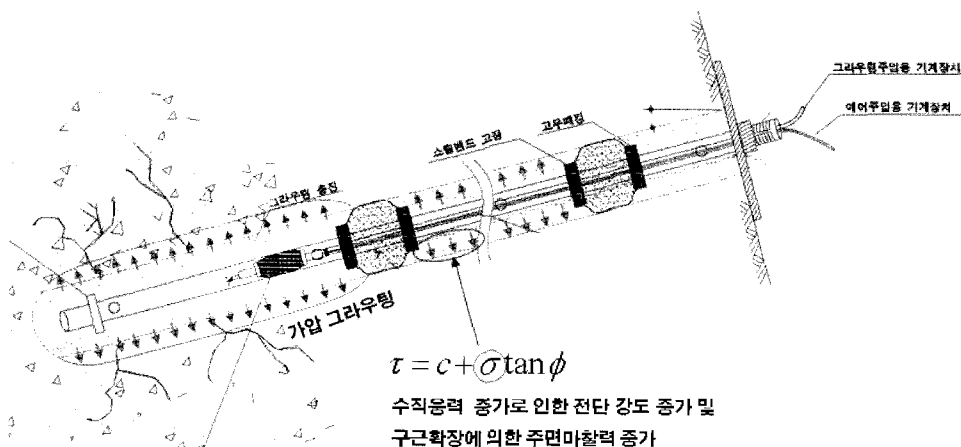
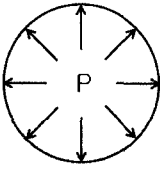
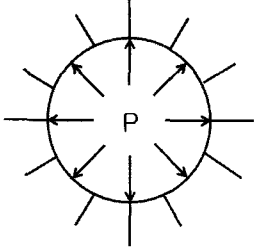
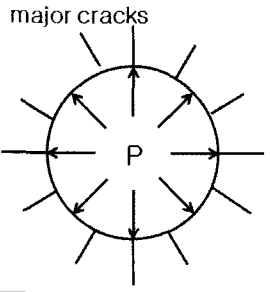
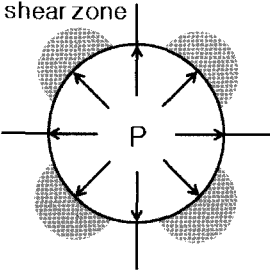


그림 1. 대표적인 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법 모식도(조재연 등, 2010)

표 1. 그라우팅 주입압에 따른 주변지반 거동

구분	개요도	주입압	지반거동특성
CASE 1		$p < p_{cr}$	<ul style="list-style-type: none"> 탄성거동 지반내에 균열이 발생하지 않음
CASE 2		$p = p_{cr}$	<ul style="list-style-type: none"> 지반내에 균열이 발생하기 시작함 수압파괴 현상이 발생함
CASE 3		$p_{cr} < p < p_{lim}$	<ul style="list-style-type: none"> 탄소성거동 지반내에 균열이 점점 더 크게 발달함
CASE 4		$p > p_{lim}$	<ul style="list-style-type: none"> 소성거동

네일의 천공경은 확공되며 공동팽창이론(cavity expansion theory)을 통하여 예측 가능하다. 확공량을 통해 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발저항력을 산정 할 수도 있으나 실제 발현되는 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발저항력은 지반조건, 그라우트 주입압, 가압장비 및 천공방법, 지하수위 등의 영향을 많이 받기 때문에 설계 및 시공 시 면밀한 검토가 필요하다.

2.2 지반내에서의 쏘일네일의 저항

그림 2는 사면보강을 위한 쏘일네일 공법 적용 시 사면활동에 대한 쏘일네일의 저항 모식도이다. 토체 자중에 의한 활동에 저항하기 위하여 쏘일네일은 마치 가상 파괴면 바깥쪽에서 설치된 앵커와 같은 저항을 하게 된다. 그러나 앵커의 경우 설치 초기에 앵커의 강선에 축

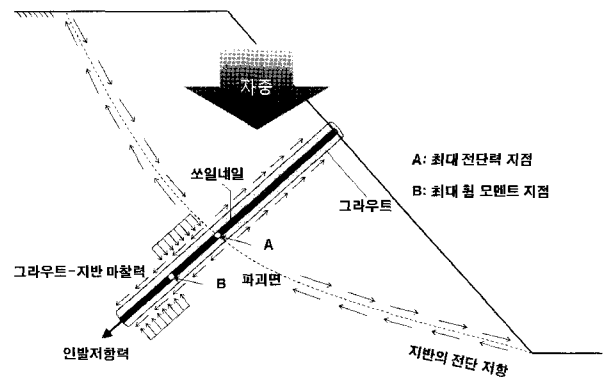


그림 2. 사면의 활동에 대한 쏘일네일의 저항 모식도

력을 주어 사면이 활동하기 전에 보강력이 작용하는 반면, 쏘일네일의 경우에는 사면이 활동할 때 보강효과가 나타나게 된다. 이러한 이유로 일반적으로 앵커를 주동보강재, 쏘일네일을 수동보강재라 한다.

사면 활동에 대한 보강은 크게 보강재의 전단력을 이용한 보강과 보강재의 인장력을 이용한 보강이 있으며, 쏘일네일은 전면판의 설치 여부에 따라 전자와 후자로 계산된다. 하지만 일반적으로 쏘일네일은 인장력을 이용한 보강재로 많이 쓰이며, 인장보강재로서의 쏘일네일의 저항력(P)은 식 (1)과 같이 쏘일네일의 항복강도(T_R)와 지반-그라우트 사이의 마찰저항력 중 작은 값으로 산정할 수 있다.

$$P = \min(T_R, Q_S \cdot L_E \cdot \pi \cdot D) \quad (1)$$

여기서, T_R : 쏘일네일의 항복강도,
 Q_S : 지반-그라우트의 마찰력
 L_E : 쏘일네일의 유효길이(가상파괴면 바깥쪽 쏘일네일의 길이),
 D : 천공경

일반적으로 쏘일네일의 주된 저항은 지반-그라우트 사이의 마찰저항이다. 이러한 마찰저항의 특성을 반영하는 마찰력(Q_S)은 지반조건, 그라우팅별 지반의 한계압력(p_{lim})에 따라 결정된다. 또한 파괴면과 쏘일네일이 교차하는 지점(그림 2-A지점)에서 전단저항이 발생되며, 파괴면을 기준으로 반대방향의 토압이 발생하는 지점(그림 2-B지점)에서 휨 저항을 하게 된다.

2.3 전단강도 감소기법에 의한 사면안정 해석

전단강도감소기법은 일반적으로 사면안정 해석 시 활동 파괴면과 안전율을 예측하기 위한 방법으로 유한요소 해석에서 많이 사용되어 왔다(Zienkiewicz 등, 1975; Naylor, 1981; Jeong 등, 2003; 이선근, 2003; 정상섭과 김영호, 2009). 강도감소법은 안전계수에 의해 강도를 감소시켜가면서 사면파괴상태까지 반복하여 변형률 해석을 수행하여 활동단면을 결정하고 현 응력상태에서 안전율을 산정하는 방법이다(그림 3). 사면안정 해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제지반의 점착력(c)과 내부 마찰각(ϕ)을 시험안전율(F^{trial})로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하며, 시험안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치(c^{trial} 과 ϕ^{trial})와는 식 (2)~(3)의 관계를 갖게 된다. 그러나 파괴변형률 기준을 어떻게 가정하느냐에 따라 활동단면의 형상이 변화될 수 있고 반복되는 유한요소 해석에 상당한 계산시간이 소요된다.

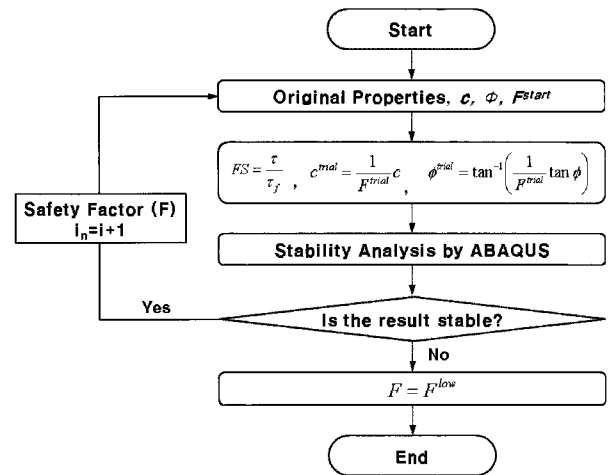


그림 3. 안전율 계산과정의 흐름도

사면 파괴는 사면이 부풀어 오를 때(Snitbhan과 Chen, 1976), 파괴면의 전단응력이 한계에 도달했을 때(Duncan과 Dunlop, 1969), 그리고 정해에 수렴하지 않을 때(Zienkiewicz와 Taylor, 1989)로 정의하며, 본 연구에서는 사면 활동면의 과도한 변위발생에 의해 더 이상 해석이 수행되지 않을 때를 사면이 파괴된 것으로 가정하였다. 이는 발생된 응력 분포가 Mohr-Coulomb 파괴 기준과 평형조건을 만족시키지 못 하는 것이며, 사면 파괴 시 파괴면에서 급격한 변위가 발생했다는 것을 의미한다. 그리고 최대 소성변형률(maximum plastic strain)이 발생된 각 요소들을 연결하여 사면 활동 파괴면으로 간주하였으며, 소성변형률 분포도를 이용하여 이를 확인하였다.

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (2)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi \right) \quad (3)$$

3. 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발거동 분석

쏘일네일 공법의 보강효과는 인발에 의한 저항력이 지배적이기 때문에 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법의 거동을 분석하기 위해서는 인발거동 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 절에서는 유한요소해석을 통해 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발거동을 분석하였으며 기존 연구자에 의해 수행된 현장인발시험 결과와의 비교를 통해 본 연구의 수치해석 모델링 기법 및 가압식 그라우팅 쏘일네일의 사면 적용성에 대한 검증을 수행하였다.

3.1 유한요소 해석 개요

범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS(ver 6-10, 2010)를 이용하여 가압식 그라우팅 쏘일네일의 현장인발시험을 모사하였으며, 2차원 축대칭 모델 및 solid 요소를 이용하여 지반과 쏘일네일을 각각 모델링하였다. 그리고 지반-쏘일네일의 이질적인 재료사이의 거동을 파악하고 그라우팅 주입압을 효과적으로 모사하기 위해 접촉면거동모델(interface model)을 대신할 수 있는 지반의 얇은 요소(thin element)를 사용하였다. 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용하였으며 쏘일네일은 해석이 수행되는 동안 선형탄성(linear elastic)거동을 하도록 설정하였다. 가압식 그라우팅 쏘일네일에서는 네일과 그라우트체를 일체화 하였으며, 식 (4)를 사용하여 원 물성에 등가 환산 단면적을 고려하여 물성을 산정하였다 (표 2).

$$E_{eq} = \frac{E_1 A_1 + E_2 A_2}{A_1 + A_2} \quad (4)$$

표 2. 쏘일네일 등가 치환 물성치

구분		직경(m)	면적(m ²)	단위중량(kN/m ³)	탄성계수(GPa)	포아손비
이형철근 네일	원 물성	0.029	0.00066	77	210	0.2
그라우트		0.076	0.008	24	23	0.3
쏘일네일	치환물성	-		28	37.25	0.29

3.2 경계조건 및 유한요소망(mesh)

지반의 좌·우 측면은 롤러(roller), 하부는 고정단(hinge)으로 설정하였으며, 쏘일네일의 좌측면 및 선단부를 롤러(roller)로 고정하였다. 그림 4에서와 같이 쏘일네일 인발 시 네일과 지반사이에서 응력집중과 큰 변형이 예상되어 이를 중점적으로 확인하기 위해 조밀한 격자망을 사용하였다. 또한 지반과 네일을 8개의 절점과 감소된 적분점(integration point)을 가지고 있는 C3D8R element를 적용하였으며, Mohr-Coulomb 비관련 유동 법칙(non-associated flow rule)과 대변위(large deformation) 해석을 위해 비대칭 행렬 해석을 수행하였다.

3.3 가압식 그라우팅 쏘일네일 인발거동의 단계별 해석

본 절에서는 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발시험에 대한 시공단계를 모사하였으며, 모든 해석단계를 현장에서 수행한 쏘일네일 인발시험과 동일하게 고려되도록 하였다. 또한 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발시험에서 가장 중요한 부분인 가압 그라우팅을 실시하는

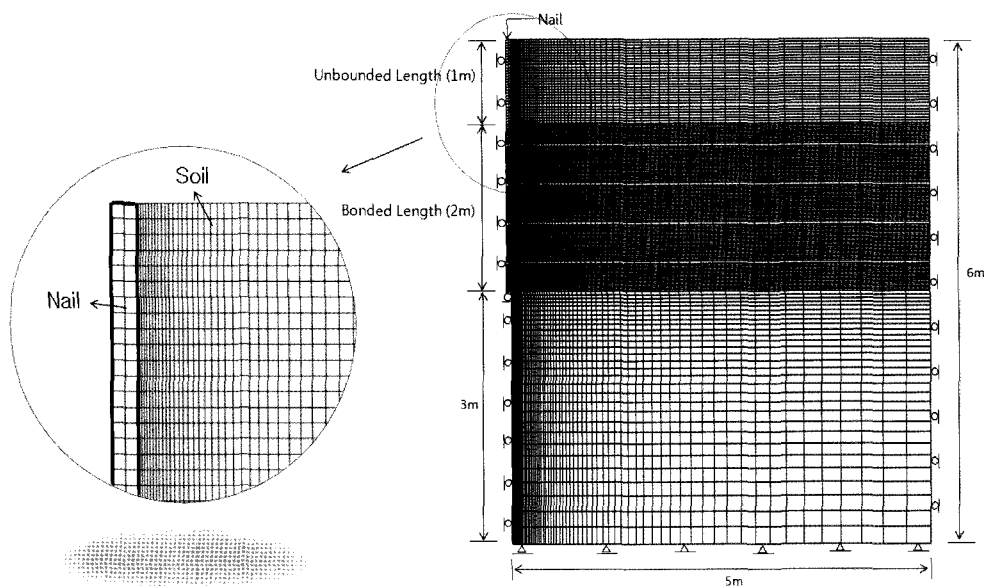


그림 4. 경계조건과 유한요소망(mesh)

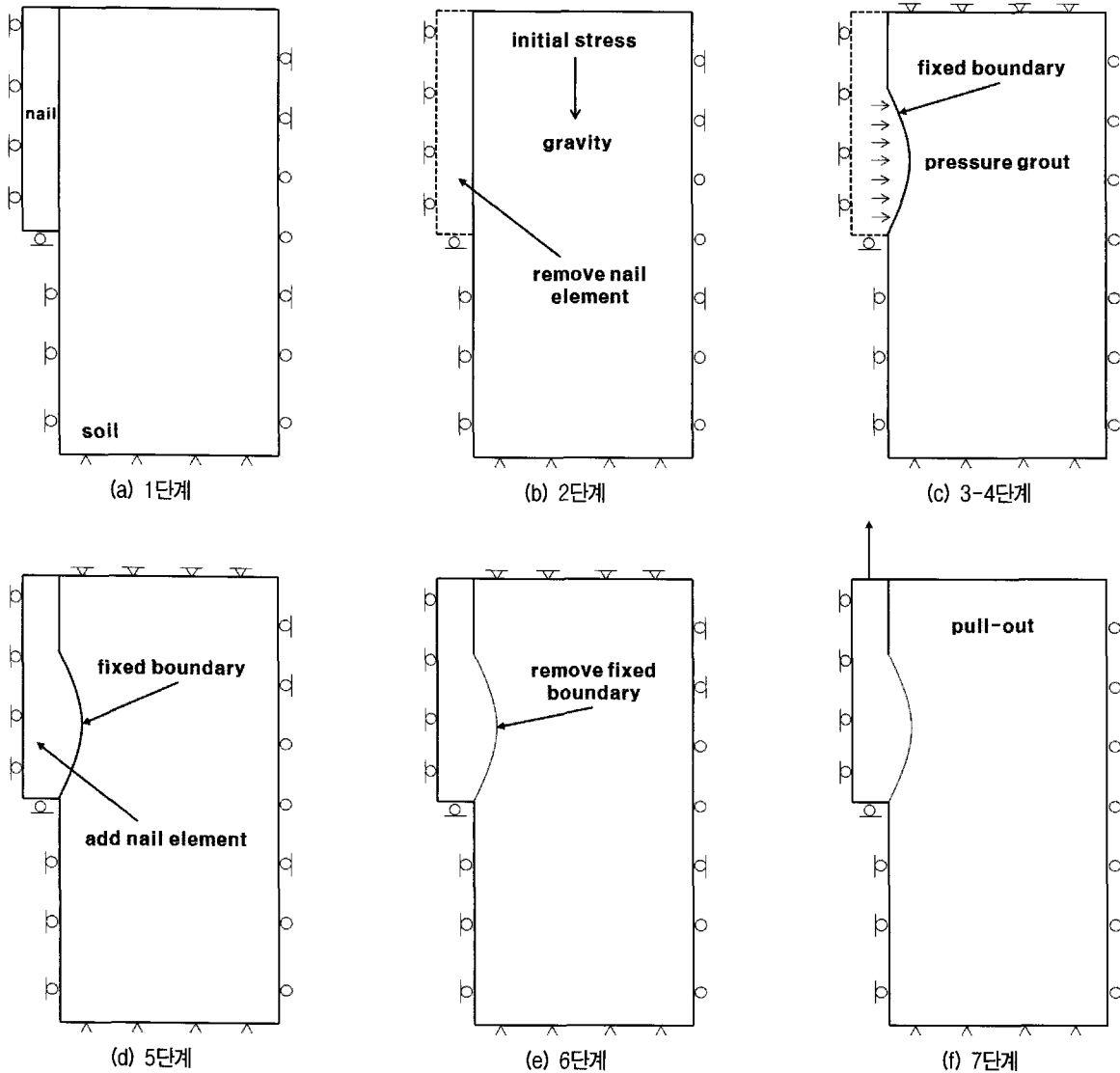


그림 5. 가압식 그라우팅 쏘일네일 인발거동 수치해석 단계

과정과 인발 과정을 모사함에 중점을 두었다. 그림 5에 나타난 바와 같이 총 7단계로 구성된다.

- (1) 1단계: 그림 4에 나타난 것과 같이 쏘일네일 및 지반을 포함한 모든 유한요소망을 생성한다(그림 5(a)).
- (2) 2단계: 쏘일네일이 시공될 위치의 유한요소들을 제거하여 굴착단계를 모사하고 지반 물성을 적용하여 초기 지중응력을 구현한다. 경계조건의 경우 측면, 바닥면 요소들은 롤러와 힌지로 각각 구속한다(그림 5(b)).
- (3) 3단계: 굴착된 공벽에 가압 그라우팅 주입압을 작용시킨다(그림 5(c)). 이때 상부에 위치한 요소들의 변위를 구속시킨다.
- (4) 4단계: 그라우팅 가압에 따른 변위와 응력상태를

유지하기 위해 3단계에서 주입압이 작용되었던 절점들을 구속시킨다(그림 5(c)).

- (5) 5단계: 쏘일네일의 설치를 모사하기 위해 2단계에서 제거한 유한요소들을 다시 원래 위치에 설치한다. 이때 주입압을 가했던 위치의 경계조건은 유지한다(그림 5(d)).
- (6) 6단계: 4단계에서 구속시킨 쏘일네일과 지반과의 경계면에 설치된 경계조건을 제거하여 주입압으로 인해 지반에 발생된 응력이 쏘일네일로 전이 되도록 한다(그림 5(e)).
- (7) 7단계: 경계면의 구속조건은 1-2단계에서와 같이 인발저항력 해석을 위한 경계조건으로 바꾼 후 원하는 인발력을 쏘일네일 상단부에 적용하여 해석을 수행한다(그림 5(f)).

표 3. 부산 풍화토지반의 물성값(서형준 등, 2009)

구분	단위중량, γ_t (kN/m ³)	탄성계수, E (kPa)	포아송비, ν	점착력, c (kPa)	내부마찰각, ϕ (°)	팽창각, ψ (°)
부산 풍화토층	16.66	33,320	0.34	15.88	31	10.5

3단계와 4단계의 가압 그라우팅에 의해 유효경이 증가하게 되면 절점들을 구속시킴에 따라 응력상태도 유지하게 된다. 이후 쓰일네일을 설치한 후 구속조건들을 제거함으로써 응력이 전이되고 증가했던 유효경이 일부 회복되어 최종적으로 가압 그라우팅에 의한 쓰일네일을 구현하게 된다.

3.4 현장시험을 통한 수치해석기법의 검증

본 절에서는 2개의 시험부지에서 수행된 가압식 그라우팅 쓰일네일 인발시험 사례와의 비교분석을 통하여 본 연구에서 수행된 수치해석 기법의 타당성을 검토하였다. 또한 중력식 그라우팅 쓰일네일 공법에 대한 해석 결과도 함께 도시하여 가압식 그라우팅 쓰일네일 공법의 보강효과를 분석하였다.

3.4.1 부산 풍화토사례(2009)

본 연구에서 수행한 수치해석기법의 타당성을 분석하기 위해 2009년 부산과학지방 산업단지 풍화토 지역에서 실시된 현장재하시험 자료를 이용하였다. 본 현장 인발시험에서 사용된 쓰일네일의 길이는 중력식의 경우 자유장 1.0m, 정착장 2.0m이며, 가압식의 경우 자유장 0.5m, 패커 0.5m, 정착장 2.0m이다. 인발시험은 변형률 제어방식으로 수행되었으며 주입압은 490kPa이다. 중력식 그라우팅 쓰일네일은 3분, 가압식 그라우팅 쓰일네일은 4분이 각각 수행되었으며 지반 물성값은 표 3과 같다.

그림 6은 쓰일네일 공법에 따른 인발력-연직변위 곡선을 비교한 것이다. 현장재하시험 결과는 각 결과들의 평균값을 사용하였으며 연직변위가 증가해도 인발력이 증가하지 않은 상태를 극한인발저항력이라고 판단하였다. 그 결과, 본 연구의 수치해석적 방법이 현장재하시험에 비해 극한인발저항력을 과소평가하는 경향은 있으나 전반적으로 현장재하시험을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한 중력식 그라우팅 쓰일네일 공법에 비해 가압식 그라우팅 쓰일네일 공법의 인발저항력이 더 큰

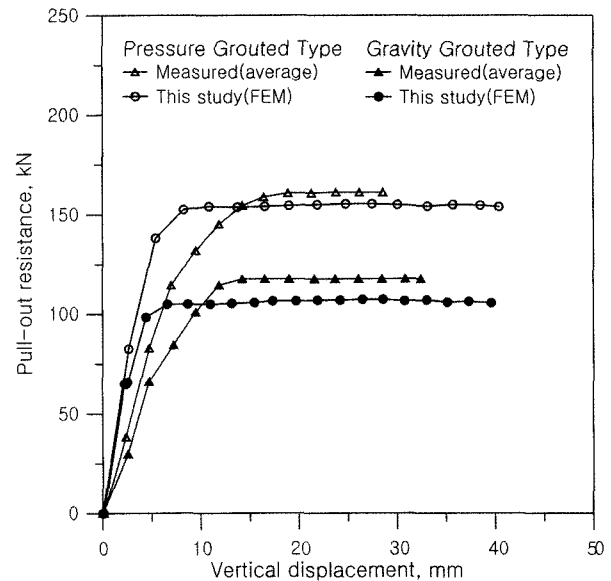


그림 6. 수치해석결과와 현장재하시험결과와의 비교(부산 풍화토지역)

것으로 나타났다.

3.4.2 경기 풍화토사례(2007)

본 재하시험 사례는 경기도 이천 풍화토 지역에서 수행된 가압식 그라우팅 쓰일네일의 인발시험 자료를 이용하였다. 현장은 고속도로 폐 램프구간으로 두께 20cm의 콘크리트 덧씌우기 포장이 되어있는 상태이며, 표층 하부는 약 10cm의 아스팔트 포장이 50cm 두께의 쇠석 기층 및 보조기층상에 포설(매립층으로 분류)되어 있는 상태이다. 매립층 하부는 기반암의 완전풍화에 의해 조성된 풍화토이며 층후는 6.4m이다. 표준관입시험(SPT) 결과 N치는 50/17~50/11(회/cm)로 나타나 대단히 조밀한 상태이며 충격과 물에 의해 쉽게 부서지는 현상을 보인다. 시험네일은 2~6m의 길이로 설치되었으며 가압 그라우트 주입압은 490kPa이다. 본 절에서는 시험네일의 3m, 4m에 대해 모델링 하였으며 수치해석에 사용된 가압 그라우트 주입압은 현장실험과 동일하게 사용하였다. 3m 네일의 경우에는 2m의 정착장과 1m의 자유장으로 구성되며, 4m 네일의 경우에는 3m의 정착장과 1m의 자유장으로 구성하여 실험이 실시되었다. 경기 풍화토사례의 지반 물성값은 표 4와 같다.

표 4. 경기 풍화토지반의 물성값

구분	단위중량, γ_t (kN/m ³)	탄성계수, E (kPa)	포아송비, ν	점착력, c (kPa)	내부마찰각, ϕ (°)	팽창각, ψ (°)
경기 풍화토층	17.67	34,370	0.30	6.00	42	5.0

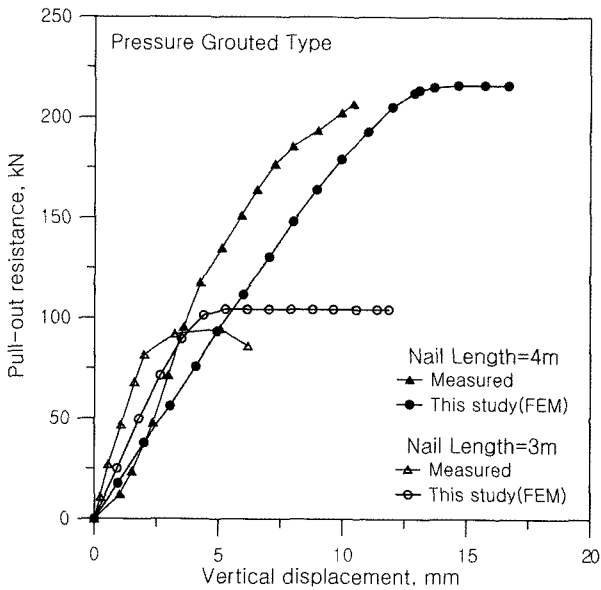


그림 7. 수치해석결과와 현장재하시험결과와의 비교(경기 풍화토지역)

그림 7에 나타난 바와 같이 본 연구에서 수행한 수치 해석 방법이 현장재하시험 경향을 잘 예측하는 것으로 나타났으나 앞서 분석한 부산 풍화토 사례와는 반대로 극한인발저항력을 다소 과대평가하는 것으로 나타났다. 또한 쏘일네일의 길이가 길수록 더 큰 인발저항력을 발휘하는 것으로 나타났다.

4. 가압식 그라우팅 쏘일네일의 사면보강 효과 분석

본 절에서는 검증된 2차원 해석기법을 바탕으로 가압식 그라우팅 쏘일네일을 적용한 사면 보강효과를 분석하기 위해 쏘일네일이 사면에 시공되는 과정과 가압식 그라우팅에 의한 마찰 저항력 증가를 모사할 수 있는 단계별 수치해석을 수행하였다. 사면 활동 시 쏘일네일에 작용하는 인발저항력과 전단저항력 그리고 파괴형태를 분석하기 위해 3차원해석을 수행하였다.

4.1 대상 사면 및 지반 모델링

본 연구에서 사용된 기본적인 해석 대상 사면의 높이는 10m, 사면의 경사(θ)는 60°이며 쏘일네일 시공 시

가압에 따른 영향을 고려하여 사면의 폭을 3m로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 좌우측 경계면과 바닥 경계면까지의 깊이는 사면 활동에 따른 영향이 미치지 않도록 설정하였다.

지반은 8-nodes solid hexahedral 요소를 사용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴규준을 사용하였다. Mohr-Coulomb 모델에서 필요한 탄성계수(E)와 포아송비(ν)는 사면 파괴 시 변위 계산에 큰 영향을 미치나 사면 안전율에는 영향을 주지 않으며(Griffiths와 Lane, 1999), 사면안정 해석에서는 구속압의 영향이 작기 때문에 팽창각(ψ)을 고려하지 않았다. 지반 조건은 풍화토로 가정하였으며 수치해석에 사용된 물성은 표 5에 나타내었다.

4.2 쏘일네일 및 보강판 모델링

쏘일네일과 보강판은 해석이 수행되는 동안 선형 탄성(linear elastic)거동을 하도록 설정하였으며 지반과 같은 3차원 solid요소를 사용하였다. 쏘일네일은 경사면에 직각으로 설치되었으며 구성요소인 이형철근의 네일과 그라우트의 합성체로 가정하였다. 수치해석에 사용된 쏘일네일의 물성은 표 2와 같이 원 물성에 등가 환산 단면적을 고려하여 물성치를 산정하였다. 보강판의 경우 사면경사에 따라 달리 적용되지만, 본 연구에서는 현장타설 콘크리트 보강판을 적용하였다.

4.3 가압식 그라우팅 쏘일네일 보강사면의 단계별 해석

유한요소해석에 사용된 3차원 유한요소망(mesh)은 그림 8과 같다. 지반의 좌·우 측면은 롤러(roller), 하부는 고정단(hinge) 조건을 적용하였다. 쏘일네일과 같이 현장타설 지반구조물의 경우 매우 거친 표면을 가지며 전단파괴는 구조물과 지반사이의 경계면에 발생하기 보다는 경계면 주위 지반에서 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 지반의 얇은 요소(thin element)를 적용하여 쏘일네일과 지반사이의 전단거동을 모사하였다. 사용된 얇은 요소의 두께는 5mm 이하를 적용하였다.

가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의 단계별

표 5. 사면안정해석에 사용된 지반정수

구분	단위중량, γ_t (kN/m ³)	탄성계수, E (kPa)	포아손비, ν	점착력, c (kPa)	내부마찰각, ϕ (°)	팽창각, ψ (°)
풍화토	20.00	100,000	0.30	20.00	25	0.0

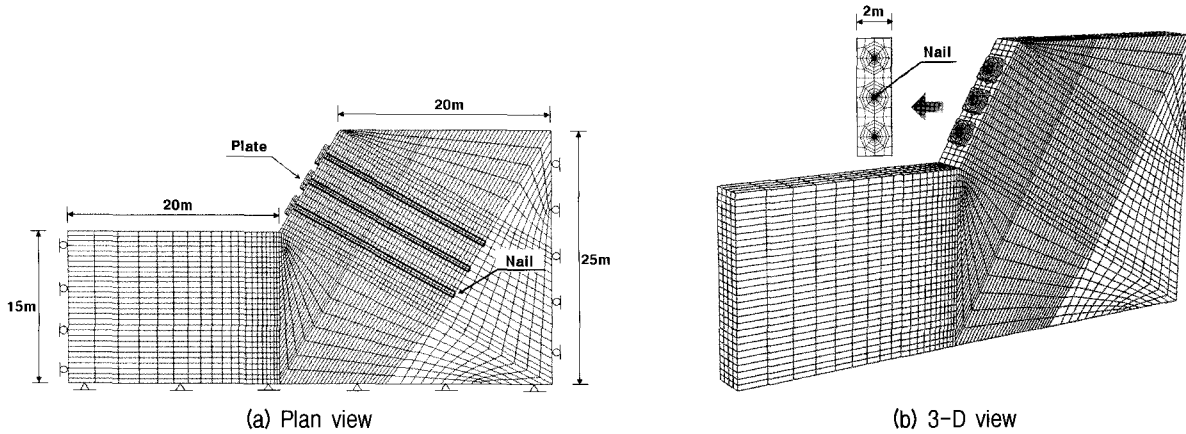


그림 8. 경계조건과 3차원 유한요소망(mesh)

해석 방법은 2차원 해석단계와 같이 가압식 그라우팅 쏘일네일의 시공단계별 모사와 사면안정해석을 위해 다음과 같이 총 7단계로 구성된다(그림 9).

- (1) 1단계: 그림 4에 나타난 것과 같이 보강판, 쏘일네일 및 지반을 포함한 모든 유한요소망을 생성한다(그림 9(a)).
- (2) 2단계: 보강판은 제거하고 쏘일네일은 지반의 물성을 적용한 후 초기 지중응력을 구현하고 경계조건을 설정한다(그림 9(b)). 이때 측면, 바닥면 및 상부의 요소들도 모두 구속한다.
- (3) 3단계: 쏘일네일이 시공될 위치의 유한요소들을 제거하여 굴착단계를 모사하고 그라우팅 가압 위치에 주입압을 작용시킨다(그림 9(c)).
- (4) 4단계: 그라우팅 가압에 따른 변위와 응력상태를 유지하기 위해 3단계에서 주입압이 작용되었던 절점들을 구속시킨다(그림 9(d)).
- (5) 5단계: 쏘일네일의 설치를 모사하기 위해 3단계에서 제거한 유한요소들을 다시 원래 위치에 설치하고 2단계에서 제거되었던 보강판도 원위치에 다시 설치한다(그림 9(e)). 이때 보강판과 쏘일네일의 물성치를 다시 입력한다.
- (6) 6단계: 4단계에서 구속시킨 쏘일네일과 지반과의 경계면에 설치된 경계조건을 제거하여 주입압으로 인해 지반에 발생된 응력이 쏘일네일로 전이 되도록 한다(그림 9(f)). 2단계에서 5단계를 수행

함으로써 가압식 그라우팅 쏘일네일의 설치를 모사할 수 있다.

- (7) 7단계: 경계면의 구속조건은 그림 5에 나타난 바와 같이 사면해석을 위한 경계조건으로 바꾼 후 중력을 작용시켜 지반의 자중에 의한 사면안정 해석을 수행한다(그림 9(g)).

또한 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법과의 비교를 위해 무보강 사면 및 중력식 그라우팅 쏘일네일 보강사면에 대한 수치해석을 수행하였으며 그 과정은 다음과 같다. 무보강 사면의 경우에는 4.4절의 1단계 및 2단계 해석 과정을 실시한 후, 바로 7단계 해석을 수행함으로써 완료하게 되며, 중력식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면 해석 과정은 가압 부분을 제외하고는 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면 해석과 동일하다.

4.4 가압 그라우팅에 의한 사면보강 효과

가압에 의한 사면보강효과를 분석하기 위해 동일한 지반 조건하에서 무보강 사면, 중력식 그라우팅 쏘일네일 보강사면 그리고 가압식 그라우팅 쏘일네일 보강사면에 대한 안전율을 비교하였다. 안전율은 전단강도감소기법을 통해 감소된 물성의 안전율에 따른 무차원 변위($E_s \delta_{max} / \gamma H^2$)와의 관계를 통해 산정할 수 있다(Zienkiewicz와 Taylor, 1989). 여기서 δ_{max} 는 최대 절점변위, H 는 사면

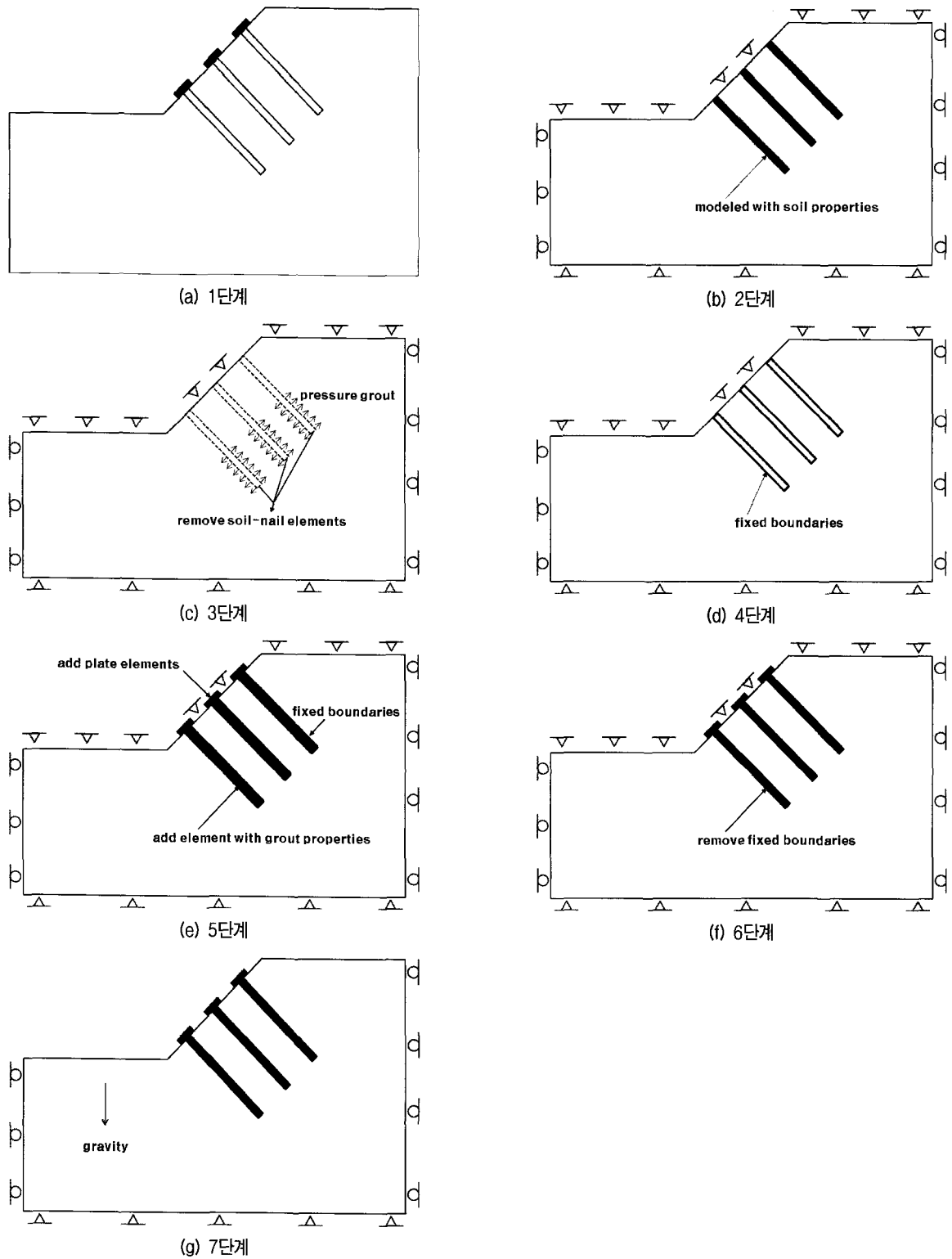


그림 9. 가압식 그라우팅 쏘일네일 보강사면의 수치해석 단계

의 높이, E_s 는 지반의 탄성계수이다. 그 결과, 그림 10에
 서와 같이 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의
 안전율은 무보강 사면에 비해 약 50%, 중력식 그라우팅
 쏘일네일 보강 사면에 비해 약 11% 정도 증가하는 것을
 확인 하였다.

또한 가압식 그라우팅 쏘일네일 사면의 보강효과를
 분석하기 위해 쏘일네일 길이에 따른 보강사면의 안전
 율을 비교 분석하였으며 그 결과는 그림 11과 같다. 이
 때 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면은 쏘일네
 일 길이가 증가함에 따라 안전율이 선형적으로 증가하

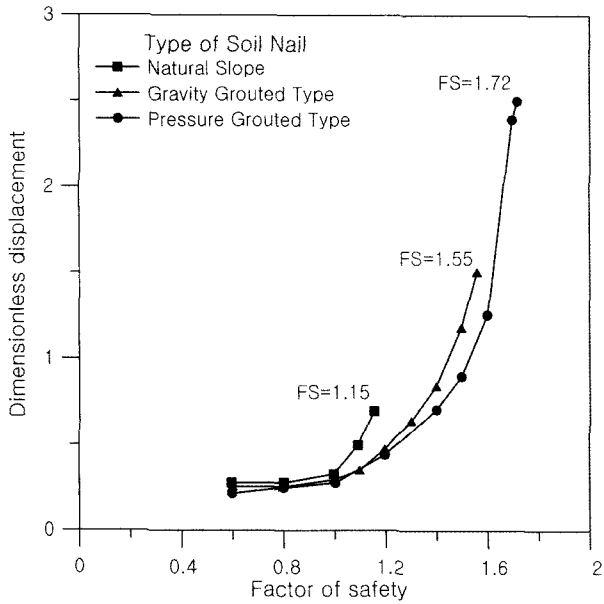


그림 10. 가압에 의한 사면안전율

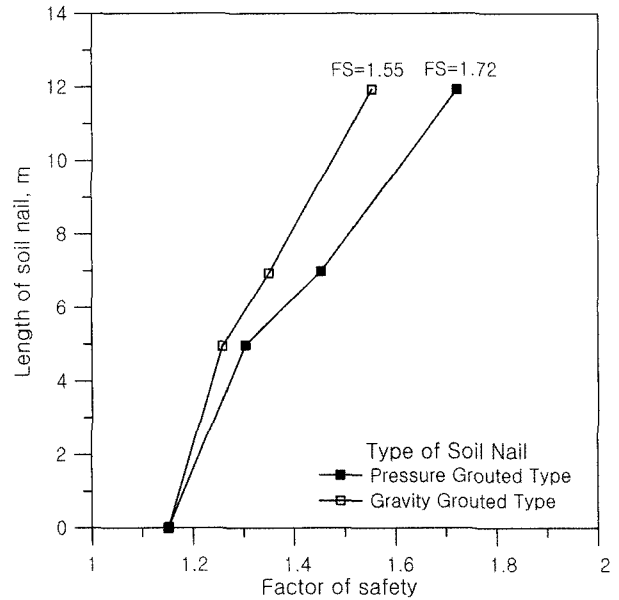
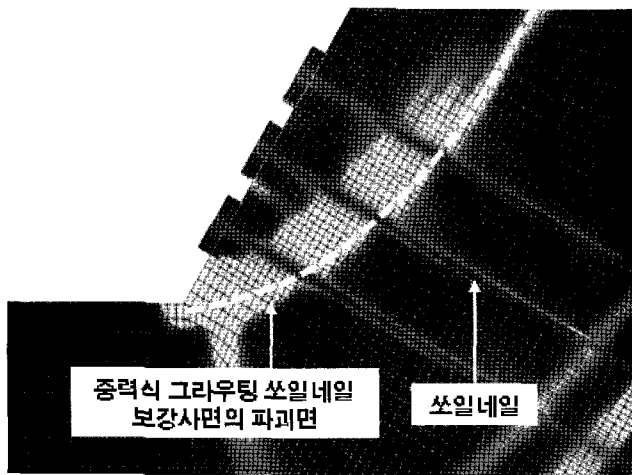
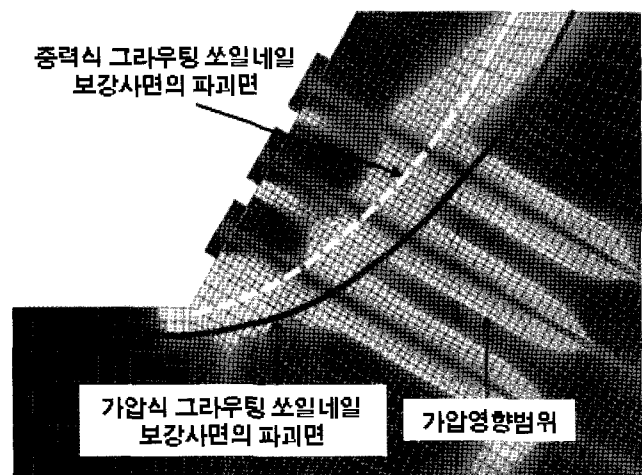


그림 11. 가압식 쏘일네일 길이에 따른 사면 안전율



(a) 중력식 그라우팅 쏘일네일 보강사면



(b) 가압식 그라우팅 쏘일네일 보강사면

그림 12. 보강사면의 파괴영역

는 것을 알 수 있다. 중력식 그라우팅 쏘일네일의 경우에는 쏘일네일 길이가 증가함에 따라 안전율은 증가하나 그 크기는 가압식 그라우팅 쏘일네일보다 작게 나타났다. 길이가 길어질수록 안전율의 차이는 커지는 경향을 나타냈다. 이는 그림 12에서와 같이 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의 활동 파괴면이 중력식 그라우팅 쏘일네일보다 더 깊게 확장되어 사면의 전단저항이 증가되고, 쏘일네일의 길이가 길어질수록 네일에 의한 인발 저항력이 증가되기 때문으로 판단된다. 또한 쏘일네일의 위치에 따른 가압 영향범위가 서로 중첩되지 않아 가압에 의해 충분한 인발저항력이 발휘되는 것으로 판단된다. 활동 파괴면의 이동은 쏘일네일로 보강

된 옹벽에 관한 연구결과에서도 나타났으며 벽체의 강성이 증가할수록 그 이동량이 증가하는 것으로 나타났다(김홍택 등, 2004). 따라서 가압식 그라우팅 쏘일네일의 적용은 보강된 사면 전체 시스템의 강성을 증가시킬 수 있다.

4.5 쏘일네일 보강위치에 따른 영향

쏘일네일 보강위치의 영향을 알아보기 위해 그림 13과 같이 세 가지 경우로 나누어 매개변수 해석을 수행하였다. 사면의 경사는 60°를 적용하였으며, 길이 12m의 쏘일네일을 사용하였다. 보강판의 경우에는 2m × 2m

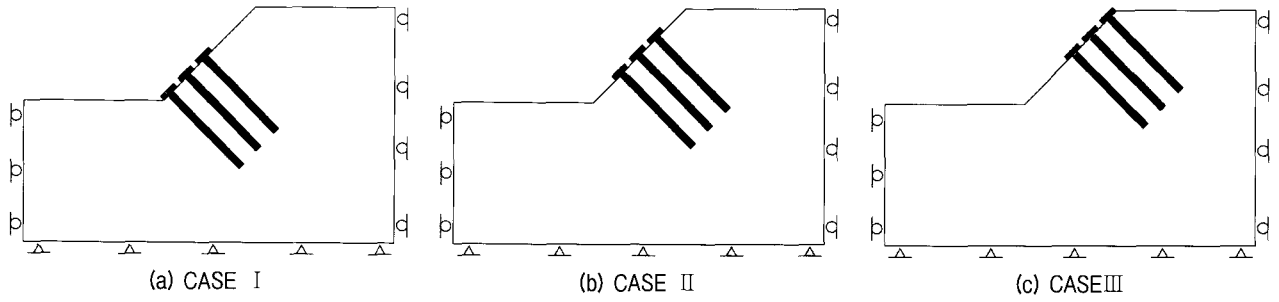
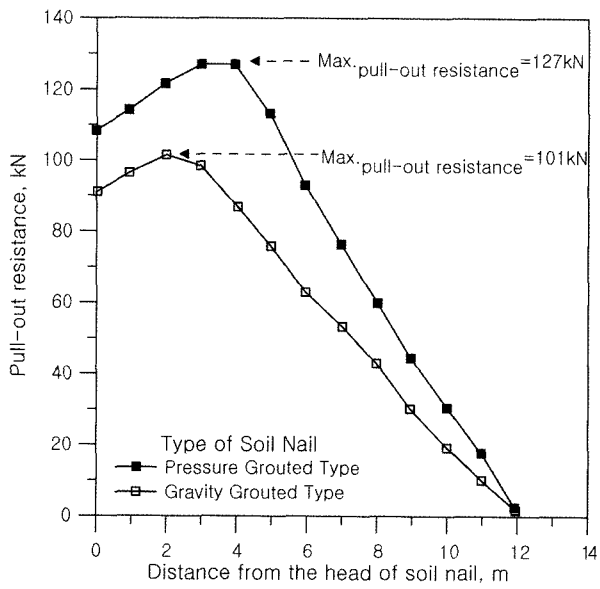


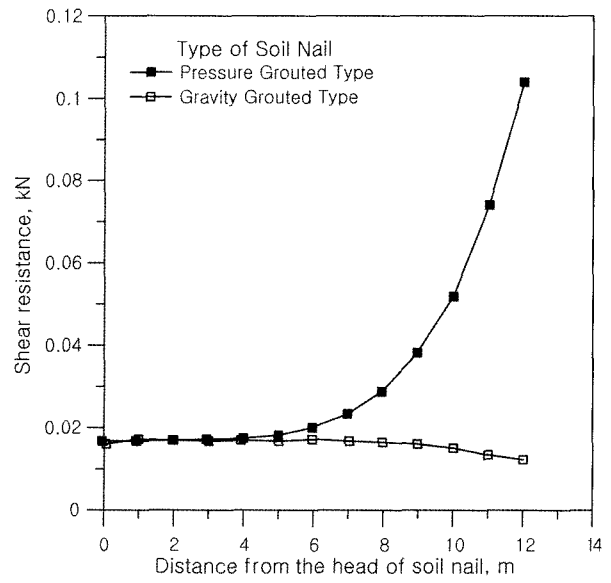
그림 13. 사면 보강 형태

표 6. 보강형태에 따른 안전율 변화

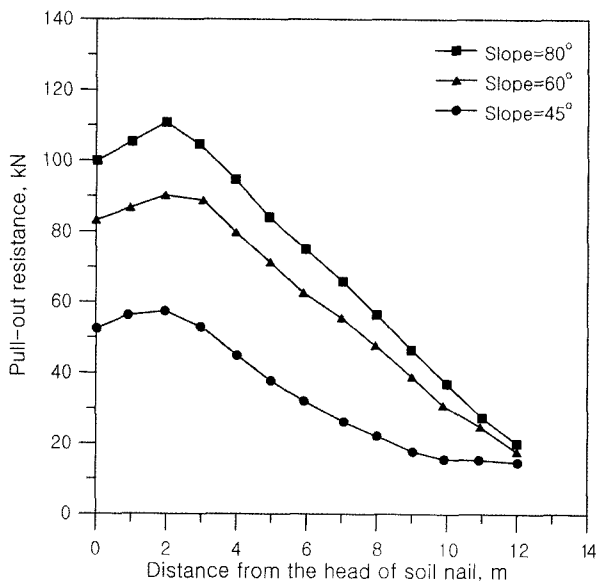
보강형태	CASE I	CASE II	CASE III
안전율	1.75	1.72	1.73



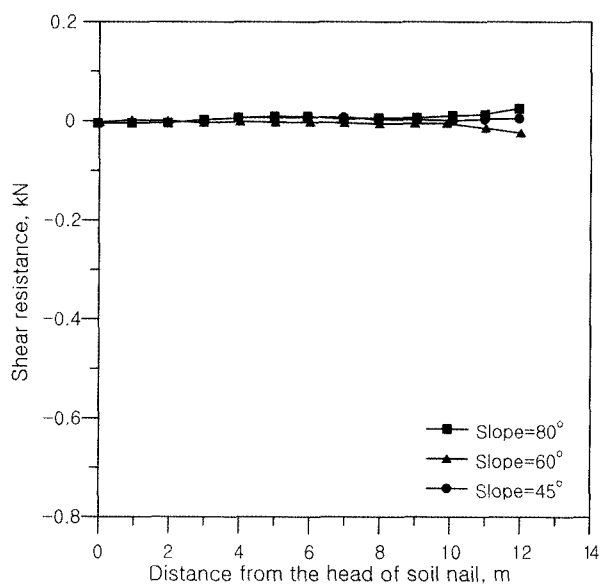
(a) 기압에 따른 깊이별 인발저항력



(b) 기압에 따른 깊이별 전단저항력



(c) 경사에 따른 깊이별 인발저항력



(d) 경사에 따른 깊이별 전단저항력

그림 14. 하단부 쏘일네일에 작용하는 인발저항력과 전단저항력

× 0.5m 크기의 콘크리트를 사용하였다.

해석 결과, 표 6에서와 같이 CASE I의 보강위치에서 사면 안전율이 가장 크게 나타났으며 나머지 경우에는 큰 차이를 보이지 않았다. 사면의 파괴가 진행되면서 사면 하단부에 변위와 응력이 집중되기 때문에 CASE I 위치가 활동파괴면에 저항하는 가장 적절한 위치라고 판단된다.

4.6 쏘일네일의 거동분석

사면에 보강된 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발저항력과 전단저항력을 분석하기 위해 쏘일네일에 작용하는 단면력을 산정하여 그림 14(a)와 14(b)에 비교 도시하였다. 3단으로 보강된 쏘일네일 중 인발저항력과 전단저항력이 가장 크게 나타난 하단부 쏘일네일에 대한 결과를 도시하였다. 그 결과, 가압식 그라우팅 쏘일네일의 인발저항력이 약 25%정도 크게 나타나 중력식 그라우팅 쏘일네일 공법보다 보강효과가 큰 것을 알 수 있다. 전단저항력의 경우에는 가압에 따라 보강효과가 증가하는 것으로 나타났지만 그 차이는 미미하다고 할 수 있다.

또한 본 절에서는 사면 경사에 따른 쏘일네일의 저항력을 분석하기 위해 45°, 60°, 80° 사면에 대해 추가적인 수치해석을 수행하였다. 그림 14(c)와 14(d)에서와 같이 최하단부 쏘일네일에 작용하는 인발저항력은 가파른 사면일수록 크게 나타났으며 경사가 완만해짐에 따라 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 전단 저항력은 사면 경사에 관계없이 보강효과가 미미한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면의 해석기법 개발을 위한 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 사면안정해석에 따른 보강효과를 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 적용된 가압식 그라우팅 쏘일네일 해석기법은 쏘일네일의 인발거동을 적절히 예측할 수 있으며, 중력식 그라우팅 쏘일네일 공법에 비해 가압식 그라우팅 쏘일네일 공법의 인발저항력이 우수한 것으로 나타났다.

(2) 가압식 그라우팅 쏘일네일 해석기법을 통해 사면 보강효과를 분석한 결과, 가압식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면이 무보강 및 중력식 그라우팅 쏘일네일로 보강된 사면에 비해 최대 50% 이상 안전율이 큰 것으로 나타났으며, 쏘일네일의 길이가 증가할수록 가압에 의한 효과가 더 커지는 것을 확인하였다.

(3) 가압식 그라우팅 쏘일네일로 사면을 보강한 경우 사면의 파괴 영역이 커지며 보강된 사면 전체 시스템의 강성을 높임으로써 보강 사면의 안전율을 증가시키며, 최대인장력 위치가 사면으로부터 멀어지는 것을 확인하였다. 또한 쏘일네일이 사면 하단부 쪽으로 설치될수록 보강효과가 우수한 것으로 나타났다.

(4) 가압 그라우팅에 따른 쏘일네일에 작용하는 인발저항력은 중력식 그라우팅 쏘일네일과 비교하여 최대 25%정도 증가하였으며, 사면의 경사가 급할수록 보강효과는 우수한 것으로 나타났다. 하지만 쏘일네일의 전단저항력은 가압에 따라 증가하는 경향은 보이고 있으나 그 차이는 설계에 반영될 만큼 크지 않다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030842)

참고 문헌

1. 권영기, 정상섭 (2009), 강성 쏘일네일 보강 사면의 전단저항 효과, *대한토목학회 논문집*, 제29권 제6C호, pp.295-301.
2. 김낙경, 김성규, 박종식 (2008), 앵커 하중전이에 따른 사면의 안전율 비교 연구, *한국지반공학학회논문집*, 제24권 제11호, pp.55-60.
3. 김홍택, 강인규, 권영호 (2004), 전면벽체의 강성이 Soil Nailing 시스템의 전체안정성에 미치는 영향, *한국지반환경공학학회 논문집*, 제5권 제3호, pp.51-60.
4. 배경태, 최경집, 조국환, 김현정, 김지환 (2008), 고무막 패커시스템을 적용한 가압그라우팅 쏘일네일링 공법의 인발거동 특성, *한국지반공학학회 봄 학술발표회 논문집*, pp.405-411.
5. 서형준, 박성원, 정경환, 최항석, 이민도 (2009), 공평창이론에 의한 압력식 쏘일네일링의 인발저항력 산정, *한국지반공학학회 특별 논문집*, 제25권 제7호, pp.35-46.
6. 신희건설·배재대학교 (2007), *강관 다단 쏘일네일링 공법의 최적 시공 및 설계법 개발*, 최종 연구보고서.
7. 이선근 (2003), 전단강도 감소기법을 이용한 보강사면의 상호작용

용 효과, 석사학위 논문 연세대학교

8. 정경현, 박성원, 최항석, 이충원, 이인모 (2008), 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력 증가 원인에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제24권 제4호, pp.101-114.
9. 정상섭, 김영호 (2009), 탄소성 방법과 유한요소법에 의한 붕괴 토류벽의 거동차이 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제25권 제4호, pp.19-30.
10. 조재연, 이성준, 정상섭 (2010), 가압그라우팅 쏘일네일링 공법의 인발거동 특성, *한국지반공학회 논문집*, 제26권 제2호, pp.15-22.
11. ABAQUS (2010), Theoretical user's manual (ver. 6-10). Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.
12. Duncan, J. M., and Dunlop, P. (1969), "Slopes in stiff fissured clays and soils", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol.95, No.5, pp.467-492.
13. Griffiths, D. V., and Lane, P. A. (1999), "Slope stability analysis by finite elements", *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403.
14. Jeong, S. S., Kim, B. C., Won, J. O., and Lee, J. H. (2003), "Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes", *Computers and Geotechnics*, Vol.30, No.8, pp.671-682.
15. Matsui, T., and San, K. C. (1992), "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, pp.59-70.
16. Naylor, D. J. (1981), "Finite element and slope stability", *Numer. Meth. in Geomech. and Proc. NATO Advanced study Institute*, Lisbon, Portugal, pp.229-244.
17. Snitbhan, N., and Chen, W. F. (1976), "Elastic-plastic large deformation analysis of soil slopes", *Comput. Struct.*, Vol.9, pp.567-577.
18. Su, L. J., and Yin, J. H. (2007), "Numerical simulation of pressure grouting in soil nail pull-out tests", *Key Engineering Material*, Vols.353-358, pp.1037-1040.
19. Won, J. O., Jeong, S. S., and Kim, S. I. (2005), "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems", *Computers and Geotechnics*, Vol.32, pp.304-515.
20. Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L. (1989), "The finite element method", Vol.1, 4th edn, London, New York: McGraw-Hill.
21. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., and Lewis, R. W. (1975), "Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics", *Geotechnique*, Vol.25, No.4, pp.671-689.

(접수일자 2011. 5. 30, 심사완료일 2011. 12. 20)