

## 강성 쏘일네일 보강 사면의 전단저항 효과

### The Effect of Shear Resistance in Rigid Soil-nailed Slope System

권영기\* · 정상섭\*\*

Kwon, Young-Ki · Jeong, Sang-Seom

#### Abstract

In general the stability of soil nail-slope system, the shear resistance is neglected because the tensile resistance of nail acts mainly for slope stabilization. This is because that deformed steel is generally used for nail and it does ductile behavior. In other side when the steel pipe with high rigidity is used for nail, the shear resistance at failure surface work more than deformed steel. In order to analyze effects of shear resistance at the soil nail-slope system with high steel piped nail, a series of numerical analyses were performed. Also numerical analyses at 3 conditions - 5 nailed, 7 nailed, 9 nailed at the same slope were performed for investigating the trend of shear resistance effect. From these 3D numerical analyses, it was found that the maximum shear resistances at each nails were larger in case of steel piped nail and because of this, the factor of safety at the condition of the steel piped nail appears larger than that of deformed steel nail.

Keywords : soil nails, shear resistance, FEM, phi-c reduction, factor of safety

#### 요 지

쏘일네일을 이용한 사면 보강 시 그 보강 효과를 검토하는데 있어서 네일의 전단력은 무시하고 인발에 대한 저항력만 고려하여 보수적으로 설계를 하는 것이 일반적이다. 이는 연성거동을 하는 이형철근이 네일의 주된 재료가 되기 때문인데 강성거동을 하는 강관을 네일의 재료로 하였을 경우, 인발에 대한 저항력 외에도 파괴면에서의 전단저항력이 크게 작용할 것이다. 따라서 본 연구에서는 전단강도감소기법을 이용하여 보강재로 보강된 균질한 사면을 대상으로 강관과 이형철근의 네일 적용시 그 보강 효과를 검토하였다. 각 조건에서 수치해석을 실시하여 안전율과 네일 부재에 작용하는 힘을 통하여 네일의 전단력이 안전율에 미치는 영향을 검토하였으며, 네일 개수를 변화시켜가며 여러 경우에 대한 일반적인 경향도 분석하였다. 본 연구 결과 네일의 보강재 거동시, 네일의 전단력이 인발저항력에 비해 상대적으로 미치는 효과는 강관이 이형철근보다 전단저항력이 크게 작용하는 것을 확인하였으며 이에 따라 강관의 안전율이 보다 큰 것으로 나타났다.

핵심용어 : 쏘일네일, 전단저항력, 유한요소해석, 전단강도감소기법, 안전율

#### 1. 서 론

일반적으로 네일의 보강효과는 인발에 의한 저항력이 지배적으로 보며 그에 따라 설계 역시 전단저항력은 고려하지 않는 실정이다. 실제로 실무에서는 전단에 대한 보강효과를 완전히 무시하고 있다고 해도 과언이 아닐 정도로 네일의 전단보강 효과가 과소평가되고 있다. 이는 쏘일네일로 이형철근을 주로 사용하고 연성거동으로 전단력에 비해 인장력을 보강효과의 주된 요소로 보기 때문이다.

하지만 최근 국내에서는 가압 그라우팅을 적용한 강관네일 등과 같은 새로운 공법들이 증가하는 추세이다. 이처럼 네일의 재료로 강관을 사용하게 될 경우 기존의 이형철근에 비해 그 휨강성이 보다 증대될 것이다. 휨강성이 증가하게 되면 전단 저항력 역시 지반 활동 변형에 보다 크게 저항하게

되므로 그 효과를 고려해주어야 한다. 그림 1은 쏘일네일 보강재를 연성 보강재와 강성 보강재를 사용했을 시의 그 거동을 각각 나타낸 것이다. 그림 1과 같이 연성 보강재를 사용했을 경우 보강재 거동 시 휨거동이 지배적이 될 것이며, 강성 보강재를 사용하였을 경우는 연성 보강재에 비해 임계파괴면 근처에서 전단저항력이 크게 발휘되어 지지력이 증가될 것이다. 따라서 수치해석을 통해 네일이 받는 부재력과 사면전체의 안전율과의 관계를 검토함으로써 휨강성에 따른 보강효과의 차이를 밝혀낼 수 있을 것이다.

기존의 네일에 작용하는 전단저항력에 관한 연구는 이론적인 해법을 통해 축력과 휨모멘트와 전단력 간 관계를 밝혀낸 연구(Jewill and Pedley, 1990)을 필두로 네일의 전단저항력과 지반과 네일의 상호작용을 고려하기 위하여 한계평형해석과 유한요소해석간의 비교연구(Cai and Ugai, 2003)

\*연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (E-mail : kwon0430@gmail.com)

\*\*정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (E-mail : soj9081@yonsei.ac.kr)

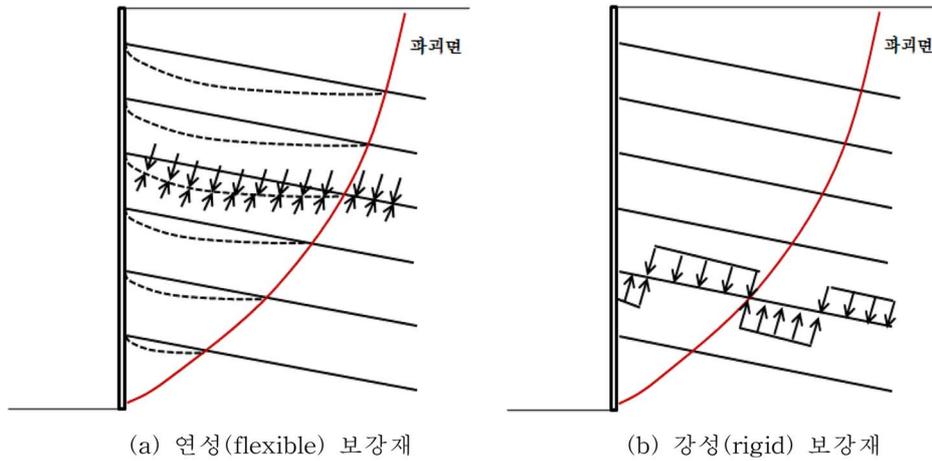


그림 1. 보강재에 작용하는 수동토압

가 진행되어 왔으며 수치해석을 통하여 하중에 따라 각 네일 길이별 작용하는 전단저항력의 크기를 밝히는 연구(Smith and Su, 1997) 등이 꾸준히 이루어져왔다.

하지만 이는 보강된 사면에서 네일이 받게 되는 부재력을 검토한 것으로 재료 자체의 강성이 변할 경우 이에 따른 전단저항력이 미치는 효과에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 이와 같이 강성거동을 하는 강관을 네일의 재료로 사용할 경우 전단 저항력이 사면 전반적으로 미치는 영향을 분석하고자 전단강도감소기법을 이용한 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 주어진 사면에서 이형철근으로 네일이 보강된 경우와 강관으로 네일이 보강된 경우 이 두 가지를 수치해석한 결과를 비교 분석함으로써 연구를 수행하였다. 또한 각 재료에 따라 동일한 사면에서 보강된 네일의 개수를 변화시킴에 따른 수치해석 결과를 토대로 두 경우에서의 안전율과 네일에 걸리는 부재력을 검토함으로써 쓰일네일로 보강된 사면의 전단 저항 효과를 분석하였다.

## 2. 사면안정 해석이론

### 2.1 유한요소해석에 의한 사면안정 해석 기법

유한요소법을 이용한 사면해석에서 안전율은 실제 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜 가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 이러한 전단강도 감소기법은 현재 흔히 쓰이고 있는 절편법(method of slice)에 비하여 여러 가지 장점이 있다. 가장 큰 장점은 임계파괴면이 자동으로 찾아지기 때문에 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 원호, log spiral, 부분선형 등으로 가정할 필요가 없다는 점이다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 관련 유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 전단강도 감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기 응력, 혹은 응력 경로와 무관하다고 알려져 있다(Dawson et al., 1988). 전단강도 감소법(SSR)은 이미 1975년에 Zienkiewicz 등에 의하여 사용된 바 있으며, 그 이후에도 Naylor(1981), Donald와 Giam(1988), Matsui와 San(1992), Ugai와 Leshchinsky(1995), Jinoh Won(2005) 등에 의하여 사용된 바 있다.

사면안정 해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제

지반의 점착력  $c$ 와 내부 마찰각  $\phi$ 를 시험 안전율  $F^{trial}$ 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하며, 시험안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치와는 다음의 관계를 갖게 된다.

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

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

이 때 지반의 파괴포락선과 시험 안전율( $F^{trial}$ )에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 3에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 단지 기울기만 감소한 직선으로 나타내게 된다.

본 연구에서는 한계상태를 찾기 위해, 점진적으로 전단강도를 낮추어 가며 찾는 방법(incremental search method)을 사용하였다. 즉, 초기 시험안전율을 1.0으로 정하고 이 결과가 수렴하면 시험안전율을 0.2 간격으로 증가시켜가며(즉 1.0, 1.2, 1.4) 해석을 수행한다.

이 때 해석에 사용되는 지반의 강도는 점차 감소하게 된다. 만일 해석결과가 1.4에서 수렴하지 않을 경우, 실제 안전율은 1.2에서 1.4의 값을 가지게 되므로 다시 1.2에서부터 0.1 간격으로 시험안전율을 증가시켜가면서 해석을 수행하며, 1.3에서도 결과가 수렴하지 않으면 실제 안전율은 1.2에서 1.3 사이에 존재하므로 1.2에서부터 0.02의 간격으로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 수행한다. 이러한 절차는  $F^{inc}$ 가 사용자가 정의한 허용오차( $\epsilon$ )보다 작아질 때까지 되풀이 된다.  $F^{low}$ 의 최종값은 한계평형해석에서의 것과 동일하다. 그러나 유한요소법과 유한차분법에 의한 방법은 어느 지점에서나 국부적인 평형조건을 만족하지만, 한계평형해석법은 해석에서 고려한 활동지반 전체 평형조건만을 만족한다. 이상

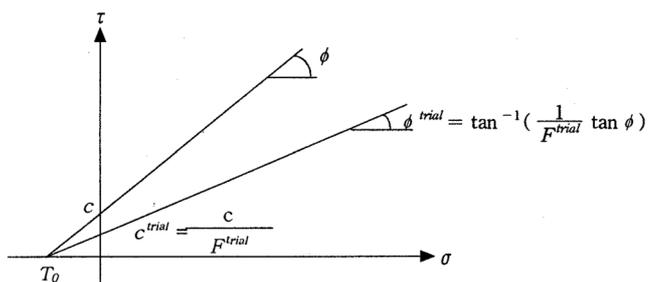


그림 2. 지반의 전단강도와 시험 전단강도와의 관계

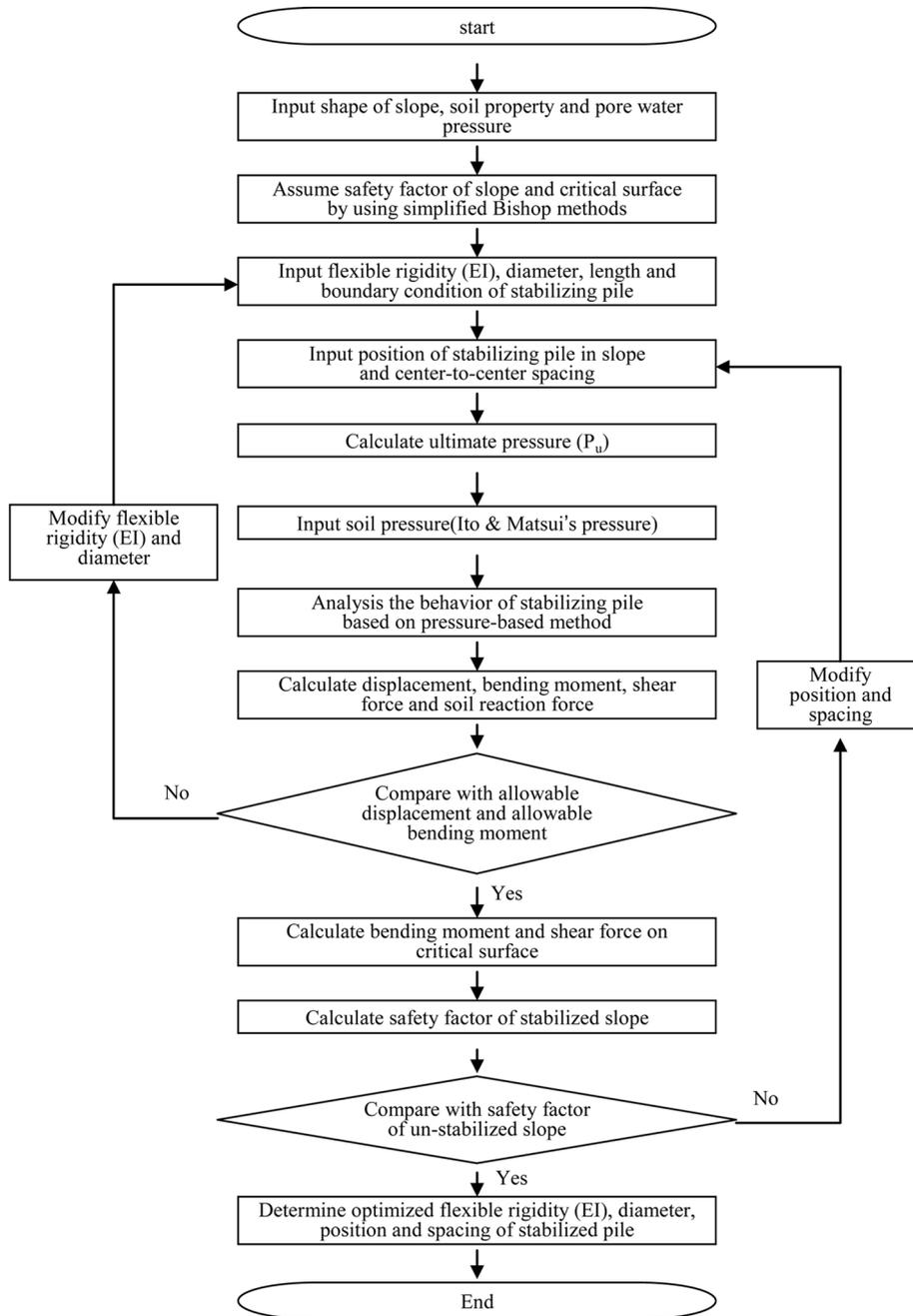


그림 3. 수치해석 흐름도

과 같은 수치해석은 그림 3에 나타나 있다.

절편법은 절편 측면에 작용하는 힘을 가정하여야 하며 활동면을 사전에 설정해주고, 수많은 예상 활동면에 대해 해석한 후 임계면을 찾아내는 등의 단점이 있으나 본 수치해석 시 사용된 전단강도 감소기법은 3차원해석이 보다 정확하며 파괴시만이 아니라 응력-변형률 거동을 고려한 사면안정 해석 혹은 보강사면 해석시 매우 유용하다는 장점이 있다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 해석대상사면

본 연구에서 사용한 모델은 그림 4와 같다. 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따랐으며 네일의 경우 linear elastic 거동을 하는 것으로 가정하였다. 이는 실제 네일 거동시 항복 직전까지는 탄성거동을 하기 때문이며 이를 수치해석시

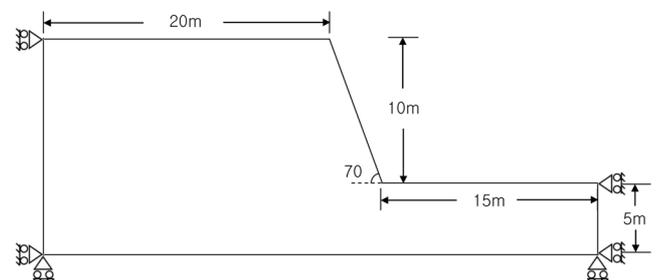


그림 4. 해석대상 사면의 모델링

가장 잘 구현할 수 있는 것이 linear elastic의 beam 요소이기 때문이다. 사면의 높이는 10m이고 사면 경사는 70°이며 단위 폭만을 모델링하여 수치해석을 실시하였다.

#### 3.2 재료정수

본 연구에서 해석시 사용한 지반은 풍화토로서 Mohr-

표 1. 수치해석 시 사용된 지반의 물성치

구분	모델	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (kN/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (kPa)	프라이송비
풍화토	Mohr-Coulomb	20	35	10	1.3×10 <sup>4</sup>	0.3

표 2. 수치해석 시 사용된 네일의 물성치

구분	직경 (m)	면적 (m <sup>2</sup> )	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	단면이차모멘트 (m <sup>4</sup> )
이형철근네일	0.029	0.00066	76.911	2.100E+08	3.284E-08
강관네일	0.043	0.00143	35.826	6.577E+07	1.632E-07

Coulomb의 파괴규준을 적용하였다. 지반 내부의 지하수위나 압밀침하는 고려하지 않았다. 해석시 사용한 지반의 물성치는 표 1과 같다. 네일의 경우 실제 거동시 항복 이전에는 탄성거동을 하므로 linear elastic 거동을 가정하여 beam 요소로 모델링하였다. 또한 길이는 10m로 고정하였으며 이형철근과 강관을 이용한 두가지 경우를 고려하여 각각 수치해석을 수행하였다. 이형철근네일과 강관네일 각각의 물성치는 표 2와 같다. 이형철근네일의 경우 실무에서 사용되는 D29를 기준으로 산정하였고, 강관네일의 경우 항복응력은 1078725.14kPa이며 규격 Φ42.7×2.6t(mm)인 재질을 기준으로 산정하였다.

강관네일의 경우는 강관 내부에 콘크리트를 채워넣기 때문에 강관과 콘크리트를 함께 고려한 등가의 물성치로 치환하여 해석하였다. 치환결과 나타난 EI값을 비교해 본 결과 강관이 이형철근에 비해 크게 나타난 것으로 보아 휨강성이 크게 고려한 것을 알 수 있으며 또한 강관네일 물성산정시 단위중량과 탄성계수는 강관과 콘크리트의 단위 체적비와 단위 면적비를 이용하여 치환하였다. 이 때 사용한 강관과 콘크리트의 물성은 표 3과 같다.

### 3.3 수치해석 방법과 절차

본 수치해석에서는 쏘일네일로 보강된 사면에서 전단저항 효과를 분석하기 위하여 그림 5과 같이 세가지 모델링에 대하여 수치해석을 수행, 그 결과를 비교 분석하였다. 동일한 조건의 사면에 네일이 5개, 7개, 9개 보강하였을 경우, 단위 폭을 고려하여 각각을 모델링 하였다. 이 세가지 조건에 대해 네일의 물성을 강관과 이형철근에 대해 각각 수치해석을 실시하였으며, 해석 결과를 토대로 안전율과 각 네일에 작용하는 최대 인장력과 최대 전단력을 산정하였다.

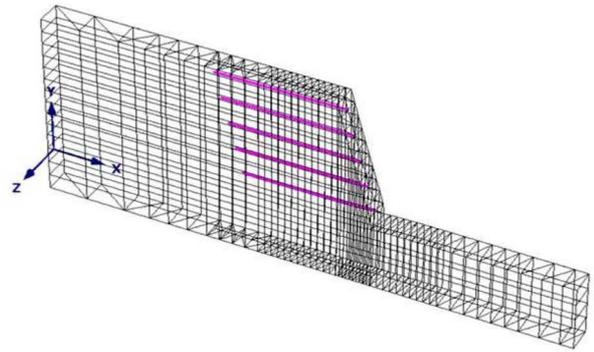
표 3. 강관네일 등가 치환시 사용된 강관과 콘크리트 물성치

구분	직경 (m)	면적 (m <sup>2</sup> )	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )
강관	0.043	0.00032	77	2.100E+08
콘크리트	0.038	0.00113	24	2.300E+07

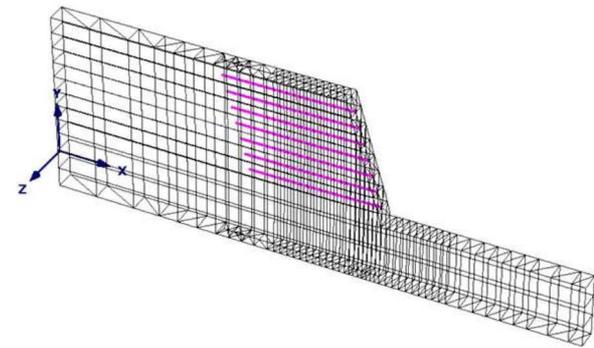
## 4. 결과 분석

### 4.1 Contour 및 deformed mesh

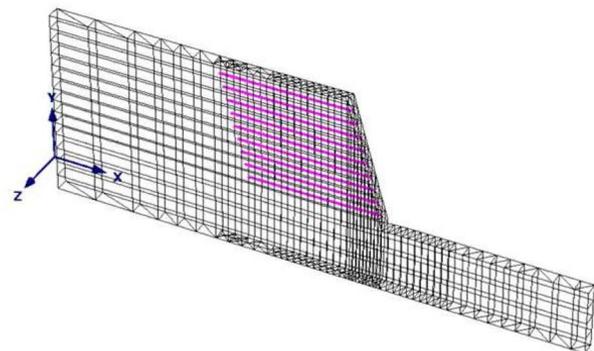
그림 6은 네일 개수에 따른 보강사면의 contour 및 deformed mesh이다. 수치해석을 통해 본 contour는 안전율



(a) 네일 5개 보강 시



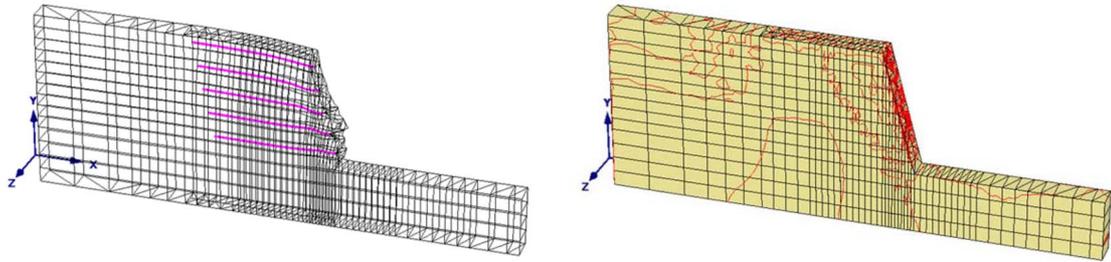
(b) 네일 7개 보강 시



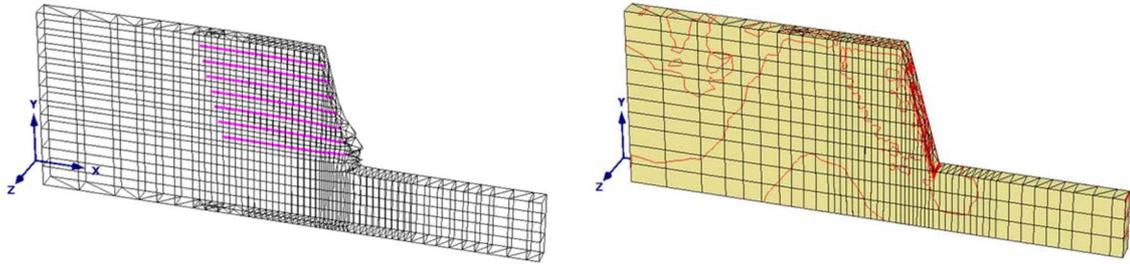
(c) 네일 9개 보강 시

그림 5. 네일 개수에 따른 해석 대상사면 mesh

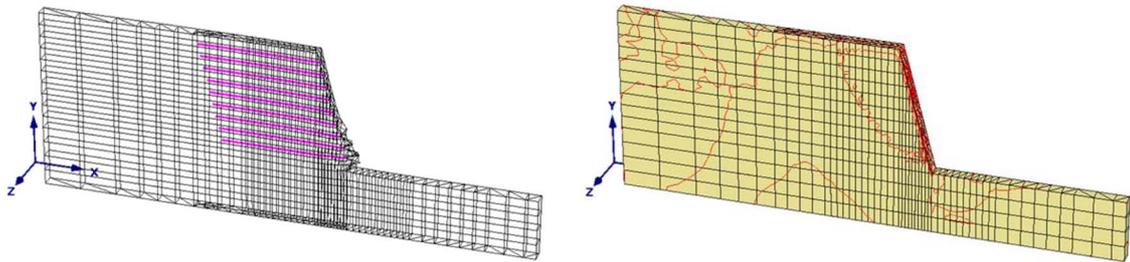
산정시 얻어진 것으로 전단변형율이 가장 큰 부분을 나타낸 것이며, deformed mesh는 소성변형을 나타낸 것이다. 같은 개수의 네일이 근입되어 있을 경우, 강관 네일과 이형철근 네일 간 큰 차이를 보이지 않았으며 예상되는 파괴 양상은 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이를 통해 보강재의 강성 차이가 파괴 양상에는 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다.



(a) 네일 5개 보강시 deformed mesh 와 contour

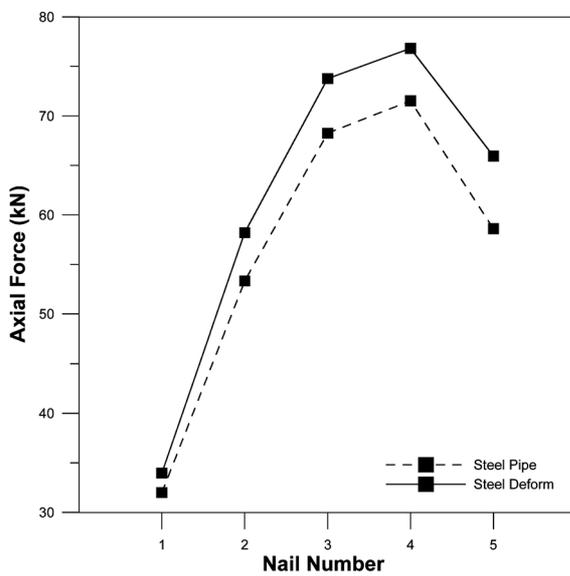


(b) 네일 7개 보강시 deformed mesh 와 contour

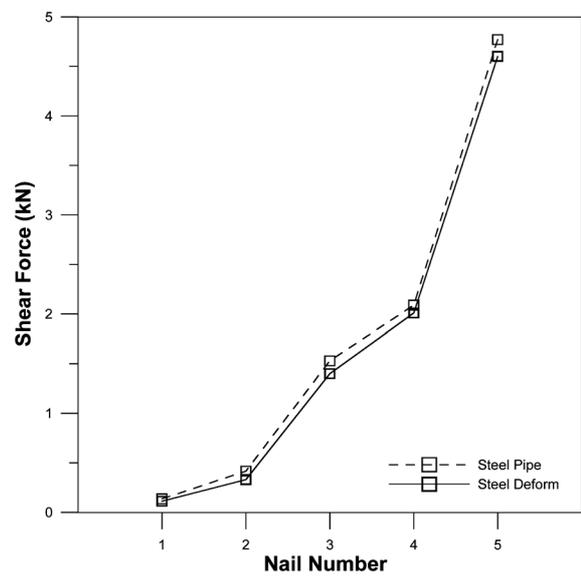


(c) 네일 9개 보강시 deformed mesh 와 contour

그림 6. 보강된 네일 개수에 따른 deformed mesh와 contour



(a) axial force



(b) shear force

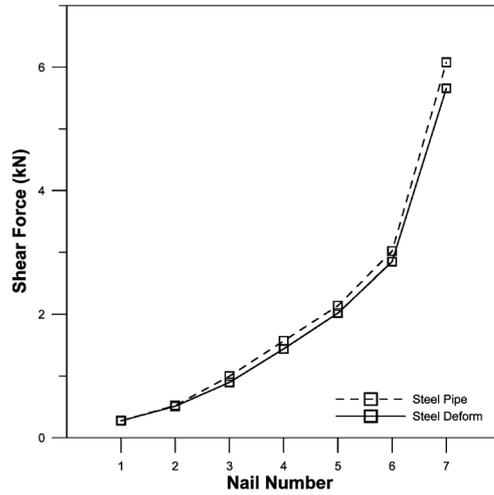
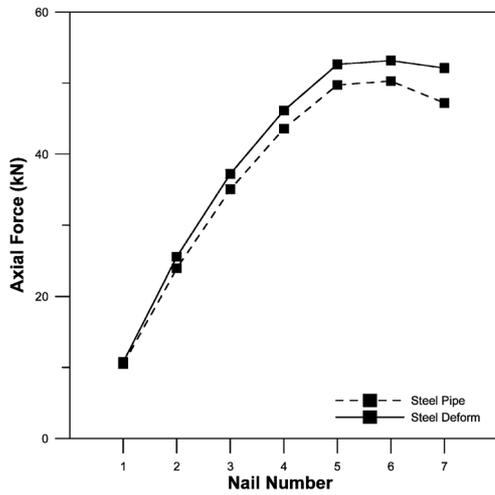
그림 7. 네일 5개 보강 시 작용 최대 부재력

한편, 네일 개수의 증가에 따라서는 조금씩 변화하는 양상을 보였으며 그 양상은 그림 6과 같다.

#### 4.2 부재력 비교 분석

부재력으로 각 네일에 작용하는 최대 인장력과 최대 전단

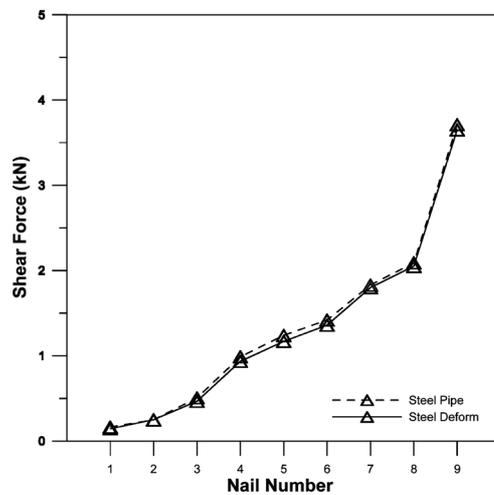
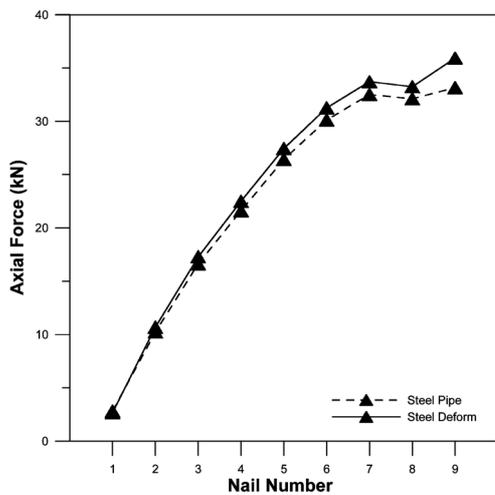
력을 검토하였다. 각 부재력은 인장력의 경우 이형철근네일이, 전단력의 경우 강관네일이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이는 강관네일의 경우가 이형철근네일의 경우에 비해 휨강성이 크에 따라 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다. 또한 강관과 이형철근, 두 경우에 대해서 네일 개수를



(a) axial force

(b) shear force

그림 8. 네일 7개 보강 시 작용 최대 부재력



(a) axial force

(b) shear force

그림 9. 네일 9개 보강 시 작용 최대 부재력

변화시켜가며 수치해석을 수행하였는데, 각 케이스마다 강관 네일의 경우가 전단저항력을 크게 받으며 이형철근이 인장 저항력을 크게 받는다는 경향성을 확보할 수 있었다. 네일 번호는 사면상단에서부터 아래로 순서를 정했으며 그림 7, 8, 9와 표 4는 각 조건에 따른 작용 최대 부재력을 나타낸 것이다.

#### 4.3 안전을 비교 분석

강관네일을 보강한 경우가 이형철근네일에 비해 안전율이 높게 나타났다. 이를 통하여 4.2 부재력 비교 분석에서 나타난 휨강성 증가로 인하여 커진 전단저항력이 안전율에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 그림 10과 표 3은 네일 개수에 따른 강관네일과 이형철근 네일의 안전율 변화 양상이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 쏘일네일 보강사면의 전단저항효과를 분석하기 위하여 3차원 유한요소 수치해석을 실시하였다. 임의의 사면에 보강재인 네일은 강관과 이형철근, 이 두 가지로 수

치해석 시 비교분석을 하였다. 또한 이와 같이 두 가지 네일 종류 각각에 대하여 네일을 5개, 7개, 9개를 보강한 모델에 대한 해석 역시 수행하여 경향성을 확보하고자 하였다. 이 때 각 경우에 대하여 사면의 안전율과 각 네일에 걸리는 부재력을 검토하여 사면에서의 전단효과를 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 부재력의 경우, 각 네일에 작용하는 최대 인장력은 이형철근네일이 강관네일에 비해 큰 것으로 나타났으며 최대 전단력은 강관이 이형철근보다 크게 나타났다. 이는 휨강성 증가로 인해 네일이 받는 최대전단력이 증가한 것으로 본 논문의 취지에 부합한다고 할 수 있다.
2. 안전율의 경우 같은 조건에서 강관이 이형철근에 비해 크게 나타났다. 이는 이형철근에 비해 상대적으로 강관의 휨강성이 증가하였으며 그에 따라 전단저항력이 더 크게 되기 때문이다. 이와 같은 결과는 추가의 수치해석으로 경향이 검증되었으며 네일 개수가 증가함에 따라 강관네일과 이형철근네일의 안전율 차는 벌어졌다.
3. 네일이 받는 부재력에서 전단력의 경우 작은 차이임에도 불구하고 안전율에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 강관의 경우 강성의 증가로 전단 저항력이 이형철근

표 4. 네일의 위치별 최대 부재력

nail number	강관네일		이형철근네일	
	maximum axial force (kN)	maximum shear force (kN)	maximum axial force (kN)	maximum shear force (kN)
1	31.99	0.14	33.96	0.11
2	53.33	0.42	58.2	0.33
3	68.25	1.53	73.76	1.40
4	71.52	2.09	76.81	2.01
5	58.61	4.77	65.94	4.60
1	10.49	0.28	10.77	0.28
2	23.9	0.52	25.53	0.51
3	35.04	1.00	37.22	0.90
4	43.58	1.57	46.14	1.44
5	49.75	2.14	52.66	2.02
6	50.29	3.02	53.17	2.85
7	47.21	6.08	52.13	5.66
1	2.81	0.16	2.66	0.14
2	10.23	0.25	10.68	0.25
3	16.62	0.51	17.29	0.47
4	21.61	1.00	22.49	0.94
5	26.43	1.24	27.44	1.17
6	30.12	1.42	31.25	1.36
7	32.51	1.83	33.71	1.8
8	32.11	2.09	33.24	2.05
9	33.16	3.71	35.93	3.65

에 비해 커졌으며 인장력이 더 작음에도 불구하고 안전율이 더 높게 나타난 것으로 보아 전단저항력이 사면안정에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

김병철, 이대수, 김대홍, 정상섭, 김대학(2004) 쏘일 네일(soil nail)로 보강된 현장타설말뚝의 적용성 및 보강효과 분석, 한국지반공학학회논문집, 한국지반공학회, 제20권 제5호 pp. 87-98.

김홍택(2001) 쏘일네일링의 원리 및 지침, 평문각.

김홍택(2001) Soil Nailing 공법의 과거·현재·미래, 평문각.

이선근(1999) 전단강도 감소기법을 이용한 보강사면의 상호작용 효과, 석사학위논문, 연세대학교.

정상섭, 원진오, 박중배, 김성열(2001) 역지말뚝 간편설계법 및 적용성 분석, 한국지반공학학회논문집, 한국지반공학회, 제17권, 제6호, pp. 5-14.

Cai, F. and Ugai, K. (2000) Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles, *Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, Vol. 40, No. 1, pp. 73-84.

Cai, F. and Luo, J. (2003) Reinforcing mechanism of anchors in slope : A numerical comparison of results of LEM and FEM, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 27, pp. 549-564.

Dawson, E.M. Roth, W.H. and Drescher, A. (1999) *Slope stability factors of safety by strength reduction*, Technical Note Submitted to Geotechnique.

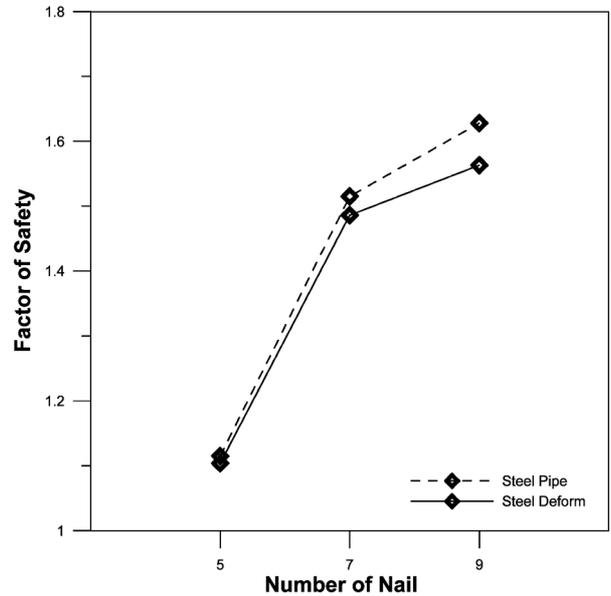


그림 10. 강관네일과 이형철근네일 보강사면의 네일 개수에 따른 안전율

표 5. 네일 개수에 따른 안전율 변화 양상

구 분	Factor of Safety	
	강관네일	이형철근네일
5개	1.115	1.104
7개	1.515	1.486
9개	1.628	1.563

Donald, I.B. and Giam, S.K. (1988) Application of the nodal displacement method to slope stability analysis, *Proc. 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Sydney, Australia, pp. 456-460.

Fan, C. and Ugai, K. (2008) Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes, *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, Issue 4, pp. 585-599.

Jewell, R. A. and Pedley, M. J. (1990) Soil nailing design-the role of bending stiffness, *Ground Engrg.*, Vol 22, No. 10, pp. 30-36

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.

Naylor, D.J. (1981) Finite element and slope stability, *Numer. Meth. in Geomech. and Proc. NATO Advanced study Institute*, Lisbon, Portugal, pp. 229-244.

PLAXIS 3D Foundation (2006) *Program manual, version 2*, PLAXIS Inc.

Ugai, K. and Leshchinsky, D. (1995) Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis a comparison of result, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 4, pp. 1-7.

Smith, I. M. and Su, N. (1997) Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 21, pp. 583-597.

Won, J., You, K., Jeong, S., and Kim, S. (2005) Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems, *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, pp. 304-315.

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.

(접수일: 2009.8.11/심사일: 2009.9.15/심사완료일: 2009.10.21)