

전면벽체의 강성이 Soil Nailing 시스템의 전체안정성에 미치는 영향

Influence of Facing Stiffness on Global Stability of Soil Nailing Systems

김홍택* · 강인규** · 권영호***

Kim, Hong-Taek · Kang, In-Kyu · Kwon, Young-Ho

Abstract

In Korea there are recently many attempts to expand a temporary soil nailing system into a permanent soil nailing system since the first construction in 1993. In the soil nailing system, the rigid facing walls act on restraining the deformation of the ground. These are purposed to minimize the damage of adjacent buildings or underground structures. In Korea, to minimize the relaxation of the ground, the soil nailing system in the downtown area is often used experientially together with braced cuts, sheet pile walls, soil cement walls (SCW), or jet grouting walls. However, for the conservative design, the confining effects by the stiff facing have been ignored because the proper design approach of considering the facing stiffness has not been proposed. In this study, various laboratory model tests are carried out to examining the influence the rigidity of facings on the global safety of soil nailing system. Also, the parametric studies using the numerical technique as shear-strength reduction technique are carried out. In the parametric study, the thickness of concrete facing walls is changed to identify the effects of the facing wall stiffness.

Keywords : Soil nailing, Facing wall, Shear strength reduction technique, Laboratory model test

요 지

Soil Nailing 공법은 국내의 경우 1993년 처음으로 적용된 이후 최근에는 가시설용에서 영구용으로 확대되어 적용되고 있다. Soil Nailing 공법에 있어서 강성 전면벽체는 지반의 변형을 억제하는 역할을 하며, 인접한 건물 또는 지하구조물 등의 손상을 최소화 하기 위한 목적으로 사용되고 있다. 국내의 경우 도심지에 적용되고 있는 Soil Nailing 벽체는 지반의 이완을 최소화하기 위해 H-Pile+토류판, 쉬트파일, SCW 및 JSP 등의 흠막이 벽체와 함께 종종 사용되고 있다. 그러나 전면벽체의 강성을 고려하기 위한 적당한 설계방법에 대한 제시가 없는 실정이어서 안전측에서 벽체의 강성에 의한 구속효과를 무시하여 왔다. 본 연구에서는 Soil Nailing 벽체의 전체 안정성에 벽체의 강성이 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 실내모형실험이 수행되었으며, 전단강도감소기법과 같은 수치해석기법을 이용한 매개변수변화연구도 시도되었다. 매개변수변화연구에서는 전면벽체의 강성의 영향을 알아보기 위해 콘크리트 전면벽체의 두께를 변화시켰다.

주요어 : 쏘일네일링, 전면벽체, 전단강도감소기법, 실내모형실험

* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수

** 정회원 · (주)브니엘컨설턴트 수석

*** 정회원 · 한라건설(주) 기술연구소 과장

1. 서론

Soil Nailing 공법은 국내의 경우 1993년 가시철 흠막이 벽체에 처음으로 적용된 이후 주로 지하굴착분야 및 사면보강 등에 보편적으로 사용되고 있는 공법으로 최근 들어서는 영구 사면보강 등에도 많이 적용되고 있는 공법이다. 국내의 경우, 영구 사면보강에 적용된 Soil Nailing 공법은 대체로 두께 15cm 정도의 슛크리트 전면판에 두께 30cm 정도의 현장타설 콘크리트 벽체를 합벽식으로 설치하여 전면벽체를 형성하고 있으며, 네일은 부식방지를 위해 에폭시 코팅을 하여 사용하고 있다.

이와 같이 전면벽체의 강성이 클 경우에는 전면벽체의 구속효과에 의한 Soil Nailing 벽체의 안정성 증가가 예상되나 지금까지의 설계에 있어서는 이를 평가하기 위한 해석방법 등의 부재로 안전측에서 무시되어 왔다. 그러나 최근들어 영구 사면보강을 위해 Soil Nailing 공법을 적용하는 사례가 증가하고 있고 컴퓨터의 계산속도가 급속도로 향상되고 있어 본 연구에서는 수치해석적인 기법을 이용하여 전면벽체의 강성을 고려한 Soil Nailing 벽체의 안정성 평가방법을 소개하고자 한다.

이를 위해 본 연구에서는 Soil Nailing 벽체의 전체 안정성에 벽체의 강성이 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 실내모형실험이 수행되었으며, 사면안정해석시 유한요소법과 같은 수치해석적인 방법으로 가상파괴면과 최소안전율을 결정하기 위해 사용하고 있는 전단강도감소기법(Shear Strength Reduction Technique)을 이용한 접근방법을 소개하였다. 또한 본 연구에서는 FLAC-3D 프로그램을 사용하여 Soil Nailing 벽체의 대표단면에 대한 매개변수 변화연구를 시도하였으며, 두께 30cm 콘크리트 전면벽체에 의한 안정성 증가 정도를 정량적으로 분석하기 위해 한계평형해석법을 기초로 한 Visual Nail 프로그램의 해석결과와 비교·분석이 이루어 졌다.

2. Soil Nailing 공법에서 강성 전면벽체의 활용

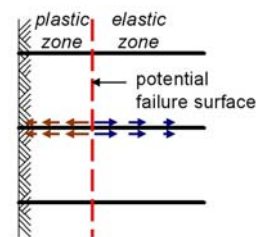
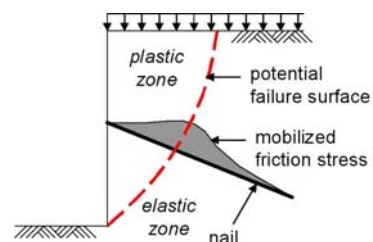
2.1 개요

Soil Nailing 공법에서 가설벽체에 적용되는 강성벽체는 대부분 굴착전 사전 지반보강에 의해 이루어진다. 이때 설치되는 강성벽체는 대부분 지반변형(수평변위, 침하 등)을 억제하기 위함이며, 이를 통해 굴착으로 인한 인접건물이나 지하매설물에 미치는 영향을 최소화하려는 것이 목적

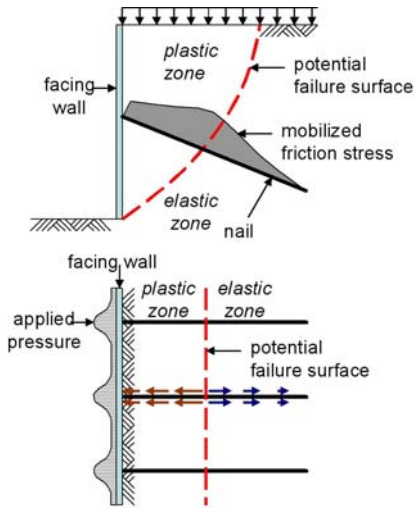
이다. 이러한 방식은 주로 국내에서 경험적으로 적용되고 있으며, 특히 최근에 도심지에서 시공되는 Soil Nailing 공법에서 가설벽체의 시공에 강성 전면벽체의 활용이 증가하고 있다. Soil Nailing 공법에 있어 가설벽체에 적용되는 강성 전면벽체로는 H-Pile+토류판, SCW, CIP, JSP 및 Sheet Pile 등이 있다. 또한 Soil Nailing 공법에서 지하영구벽체에 적용되는 강성벽체는 주로 일반 Soil Nailing 벽체와 지하외벽이 시공상의 편리성과 횡도압의 경감효과 및 양압력 등에 유리한 이점 때문에 합벽화하여 시공하는 경우가 많다.

2.2 전면벽체의 강성에 따른 영향

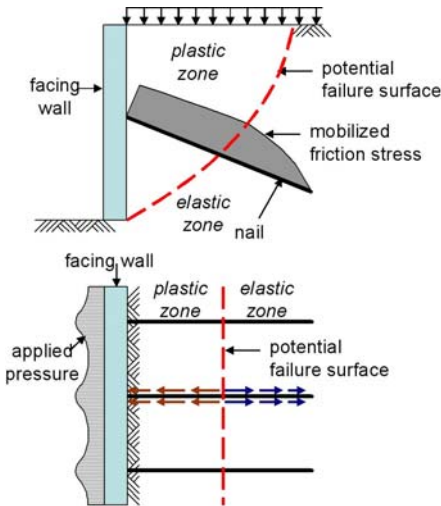
Soil Nailing 공법에 있어서 전면벽체의 유무와 강성 정도에 따른 Soil Nailing 구조체의 파괴거동 특성과 전면벽체의 구속효과는 그림 1과 같이 정리할 수 있다(김홍택 등 2002). 그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 네일제원 및 하중조건이라면 전면벽체의 강성이 증가함에 따라 Soil Nail 보강토체의 가상파괴영역은 전면벽체의 구속효과로 인하여 점점 커지며, 네일에 발휘되는 마찰력은 점점 증가할 것으로 예상된다. 또한 전면벽체의 강성에 따라 발생하는 전단력 및 휨모멘트는 벽체의 깊이방향 및 길이방향으로 발생된 상대적인 변위차에 의해 발휘되므로 전면벽체의 강성을 최대한 이용하기 위해서는 벽체의 상대적인 변위차에 의해 허용가능한 범위내에서 크게 발생할 수 있도록 네일의 간격을 상대적으로 넓게 설치하는 것이 효과적일 수 있을 것이다.



(a) 전면벽체가 없는 경우



(b) 전면벽체의 강성이 작은 경우



(c) 전면벽체의 강성이 큰 경우

그림 1. 전면벽체의 강성에 따른 Soil Nailing 구조체의 파괴거동특성

2.3 전면벽체의 강성을 고려한 해석적 접근

사면의 안정성은 일반적으로 2차원 한계평형해석법을 사용하여 평가하고 있으나 이들 방법들은 복잡한 지형조건이나 대규모 사면에서의 안정성을 평가하는 데에는 다소의 문제들로 인하여, 최근에 컴퓨터 공학의 발전과 계산기법의 향상으로 종전에는 계산시간 때문에 쉽게 접근할 수 없었던 유한요소법 또는 유한차분법을 이용한 사면의 안정성 평가방법이 개발되고 사용되고 있다. 유한요소법에 의한 사면안정해석시 안전율의 평가방법은 그림 2와 같이 여러 가지 제안된 방법이 있으며, 이 중에서 파괴시까지 지반의

전단강도를 감소시켜가면서 계산하는 방법을 전단강도감소기법이라 부른다.

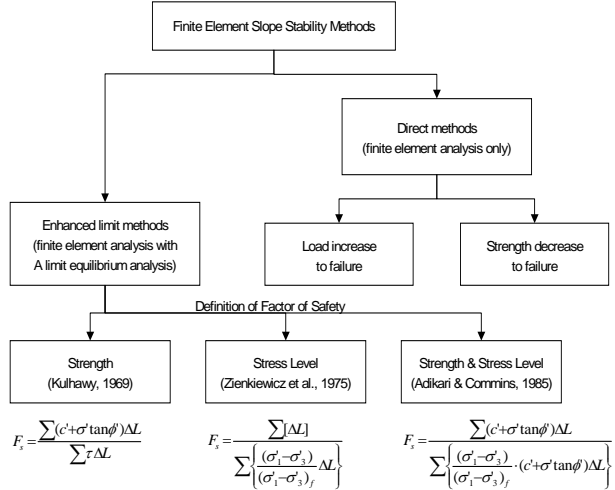


그림 2. 유한요소법에 의한 안정해석시 안전율의 평가방법 (Fredlund 등, 1999)

전단강도감소기법은 Zienkiewicz 등(1975)이 처음으로 사용한 이후, Naylor(1982), Donald & Giam(1988), Matsui & San(1992), Ugai(1989), Ugai & Leshchinsky (1995), Dawson 등(1999) 많은 학자들에 의해 소개된 바 있다. 본 기법은 사면안정해석에 있어서 일반적으로 사용하고 있는 절편법에 비해 많은 이점이 있다. 그 중에서도 가장 중요한 것은 파괴면과 파괴 메커니즘을 자동적으로 찾아 준다는 점을 들 수 있다(Dawson 등 2000). 전단강도감소기법은 수치해석적인 방법을 이용하여 식 (1) 및 (2)와 같이 지반의 전단강도를 좌우하는 지반의 점착력(c) 및 내부마찰각(ϕ)에 대해 안전율(F_{trial})을 고려하여 감소시켜가면서 파괴시까지 반복 계산함으로써 파괴시 최종적으로 적용된 안전율과 가상파괴면을 평가하여 한계평형해석기법과 유사한 안정성 평가를 할 수 있는 해석기법이다.

$$c_{trial} = \frac{1}{F_{trial}} \cdot c \quad (1)$$

$$\phi_{trial} = \arctan \left(\frac{1}{F_{trial}} \cdot \tan \phi \right) \quad (2)$$

여기서, c , ϕ : 원지반의 내부마찰각 및 점착력

c_{trial} , ϕ_{trial} : 안전율을 고려하여 수정된 내부마찰각 및 점착력

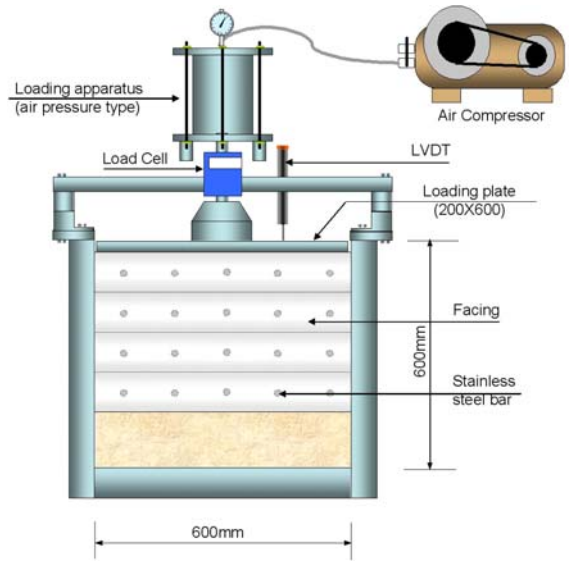
Soil Nailing 벽체의 안정성 평가는 일반적으로 2차원 한계평형해석법을 기초로 한 접근방법이 사용되고 있으나 한계평형해석법을 토대로 전면벽체의 강성을 고려하기에는 전면벽체의 구속효과에 대한 평가 등이 정립되어야 하나 아직까지는 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전단강도감소기법을 이용하여 전면벽체의 강성을 고려한 Soil Nailing 벽체의 안정성을 평가하였다.

3. 실내모형실험

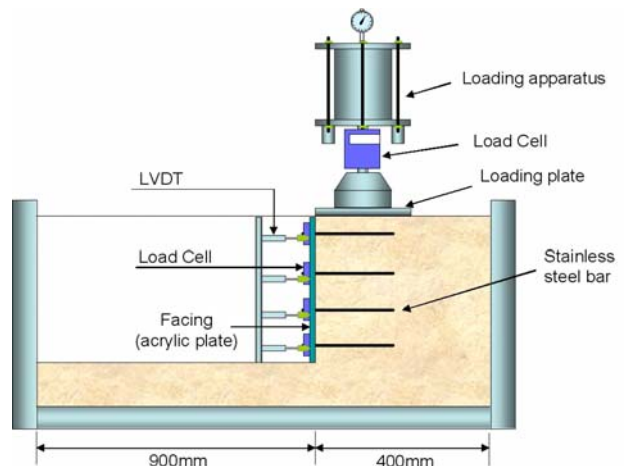
3.1 개요

실내모형실험은 Soil Nailing 공법에서의 전면판 강성의 변화가 Soil Nailing 구조체에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실시되었다. 실내모형실험에 사용한 토조(600mm×600mm×1300mm) 및 장치개요는 그림 3과 같으며, 실내 모형지반은 Soil Nailing 공법의 시공절차를 고려하여 단계별 굴착후 일정시간동안 자립이 가능하도록 주문진표준사와 화강풍화토를 1:1.5의 비율로 혼합하여 조성하였다.

실내 모형지반의 입도분포곡선 및 지반특성치는 그림 4 및 표 1과 같다. 또한 실험에 사용한 네일은 길이 200mm 및 300mm, 네일의 직경은 3mm 스테인레스봉을 사용하였으며, 네일 두부에 10mm 정도 나사선을 만들어 전면판 및 함석판과 너트로 결합시켜 일체식 거동을 할 수 있도록 제작하였다. 또한 실내모형실험에서는 연성벽체에 해당하는 쏫크리트의 역할을 모사하기 위해 두께 0.2mm의 함석판(600mm×100mm)을 사용하였으며, 강성벽체를 모사하기 위해 두께 2mm, 4mm 및 6mm의 아크릴판(600mm×400mm)을 사용하였다. 하중재하판은 600mm×200mm의 크기로 제작하여 사용하였다. 실험시 사용된 계측장비로는 LVDT 5개, 재하하중 측정용 로드셀(load cell) 1개 (49.1kN 용량) 및 네일의 인장력 측정용 로드셀 4개 (29.4N 용량)를 각각 하중재하판 및 전면부에 부착하였으며, 이를 자료수집장치(data logger)에 연결하여 단계별 굴착시 및 하중재하시 유발되는 수직·수평변위 및 네일에 작용하는 인장력 등을 측정하였다.



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 3. 실내모형실험 장치개요

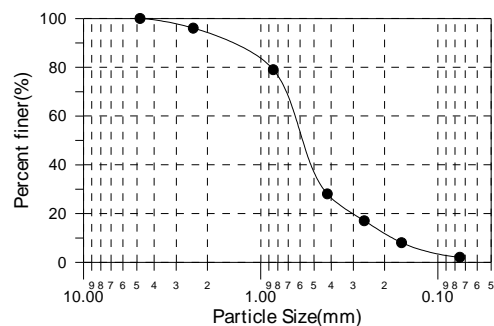


표 1. 모형지반의 특성치

단위중량 (kN/m ³)	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	액성한계 (%)	소성한계 (%)
14.6	34	7.85	28.8	17.6

3.2 실험방법

본 실내모형실험은 정적하중재하방식으로 실시됐으며, 재하하중은 공기압축장치(compressor)를 이용한 공압식 하중재하장치에 의해 파괴하중까지 단계별로 재하하였다. 하중은 Soil Nailing 보강토체에 균등하게 작용할 수 있도록 하기 위해 하중재하장치에서 전달되는 집중하중을 강성 재하판(steel plate, 600mm×200mm, t=12mm)에 전달시켜 Soil Nailing 보강토체에 하중이 등분포로 작용하도록 하였다.

또한 Soil Nail과 전면판이 분담하는 각각의 하중을 측정하기 위해 전면판 외부로 돌출된 Soil Nail을 고정링에 의해 연결시키고 고정링 사이에 로드셀을 설치하여 각 단의 중앙에 위치한 Soil Nail 두부에 작용하는 인발력을 직접적으로 측정하였으며, Soil Nailing 구조체에 작용하는 하중은 하중재하장치와 강성재하판 사이에 로드셀을 설치하여 측정하였다. 침하량 및 수평변위는 Soil Nailing 구조체에 총 5개의 LVDT를 설치하여 측정하였으며, LVDT의 위치는 수직변위를 측정하기 위해 강성재하판 상단에 1개, 각단의 중앙부에 각각 설치하여 침하량 및 수평변위를 측정하였다. 이상의 실험과정에 대한 전경은 사진 1과 같다.



(a) 벽체 완성



(b) 전면판 및 load cell 부착



(c) LVDT 설치



(d) 하중재하

사진 1. 실험전경

Soil Nailing 공법에서 전면벽체의 강성이 구조체의 전체안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실내모형실험이 수행되었으며, 실내모형실험의 제원 및 조건을 요약하

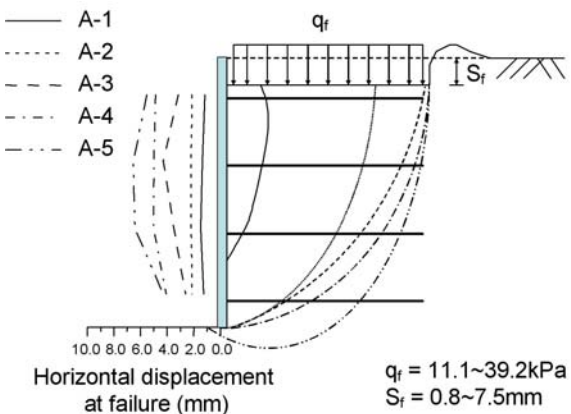
면 표 2와 같다(권영호, 2002).

표 2. 실내모형실험 제원 및 조건

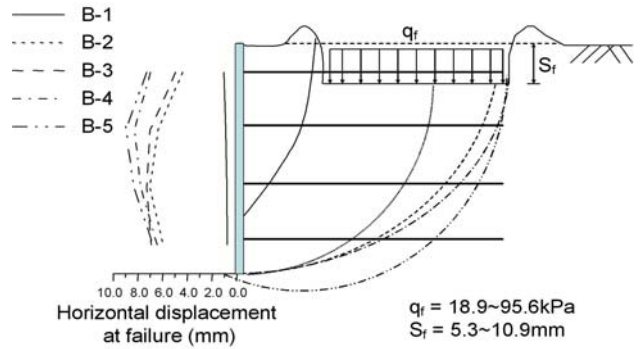
구 분	벽체 두께 (mm)	네일 길이 (cm)	네일 직경 (mm)	설치 각도 (°)	네일 개수	재하판	비 고
A-1	-	-	-	-	-	20cm×60cm (b=0cm)	b : 벽체에서 재하판까지의 거리
A-2	-	20	3	0	20		
A-3	2	20	3	0	20		
A-4	4	20	3	0	20		
A-5	6	20	3	0	20		
B-1	-	-	-	-	-	20cm×60cm (b=10cm)	
B-2	-	30	3	0	20		
B-3	2	30	3	0	20		
B-4	4	30	3	0	20		
B-5	6	30	3	0	20		

3.3 전면벽체의 강성에 따른 파괴형태

전면벽체의 강성에 따른 파괴형태를 분석한 결과, 무보강 상태인 A-1 및 B-1의 경우에는 파괴형태가 국부파괴형태로 나타났으며, 전면벽체없이 네일만 보강된 A-2 및 B-2(함석판)의 경우에는 파괴형태가 내부파괴형태로 발생되었다. 또한 전면벽체가 설치된 실험 A-3~A-5 및 B-3~B-5 에서는 혼합파괴 형태로 나타났으며, 전면벽체의 강성이 증가할수록 파괴면은 배면부쪽으로 더욱 확장되어 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 이때의 파괴시 하중과 수평변위 및 연직변위는 전면벽체의 강성이 클수록 높은 하중수준 및 변위에서 파괴됨을 알 수 있었으며, A 및 B그룹에 대한 강성별 파괴면의 형태 및 전면벽체의 수평변위를 도시하면 그림 5와 같다.



(a) L=20cm



(b) L=30cm

그림 5. 전면벽체의 강성에 따른 파괴면과 수평변위 양상

4. 분석 및 고찰

4.1 개요

본 분석에서는 지반공학용 유한차분법 상용프로그램인 FLAC-3D를 이용하여 SSR 기법을 토대로 대표단면에 대한 안전율을 평가하였으며, 한계평형법 설계프로그램인 Visual Nail을 이용하여 통상적인 소일네일링 공법의 해석결과와 비교하였다. 또한 전면벽체의 강성에 따른 Soil Nailing 벽체의 안정성을 보다 효과적으로 분석하기위해 Soil Nailing 벽체의 보강정도를 결정하는 무차원변수를 변화시켜 분석하였다. Soil Nailing 벽체의 보강정도를 결정하는 무차원변수(Bruce & Jewell 1986, 1987)에는 길이비(R_L , length ratio), 정착비(R_B , bond ratio) 및 강도비(R_S , strength ratio)가 있으며 이에 대한 정의는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{(길이비)} \quad R_L &= \frac{L}{H} \\
 \text{(정착비)} \quad R_B &= \frac{d_{hole} \cdot L}{S_h \cdot S_v} \\
 \text{(강도비)} \quad R_S &= \frac{d_{bar}^2}{S_h \cdot S_v}
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, L : 네일의 길이

H : 사면높이

d_{hole} : 천공직경

d_{bar} : 천공직경

S_h : 네일의 횡방향 설치간격

S_v : 네일의 연직방향 설치간격

Soil Nailing 벽체에 있어서 일반적으로 적용되고 있는 길이비, 정착비 및 강도비의 범위는 그라우트 네일의 경우 일반적으로 $R_L=0.5\sim 0.8$, $R_B=0.3\sim 0.6$ 및 $R_S=(0.3\sim 0.5)\times 10^{-3}$ 이며, 본 분석에서는 $R_L=0.5$, $R_B=0.3$, $R_S=0.36\times 10^{-3}$ 인 경우에 대해서 분석이 이루어 졌다. 분석에서 사용한 대표단면 및 격자요소망은 그림 6 및 7과 같으며, 제반 설계제원은 표 3과 같다.

표 3. 분석에 사용한 제반 설계제원

구 분	R_L	R_B	H (m)	L (m)	S_h (m)	S_v (m)	d_{hole} (mm)	해석방법
길이비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	10.0	5.0	1.75	1.0	105	SSR, LEM
	0.6			6.0	2.10			LEM
	0.7			7.0	2.45			LEM
	0.8			8.0	2.80			LEM
정착비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	10.0	5.0	1.75	1.0	105	SSR, LEM
				4.0	1.31			LEM
				5.0	1.05			LEM
				6.0	0.88			LEM

주) SSR : 전단강도감소기법, LEM : 한계평형해석법

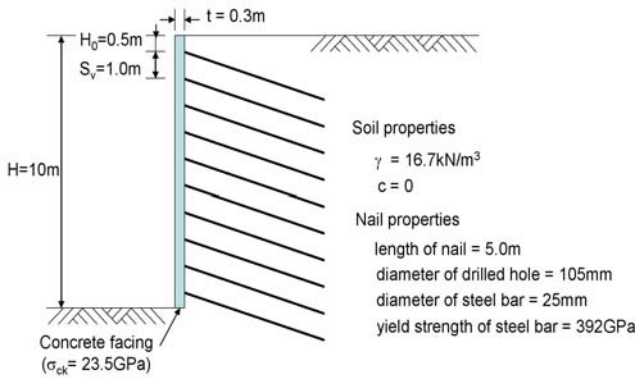


그림 6. 분석에 사용된 대표단면

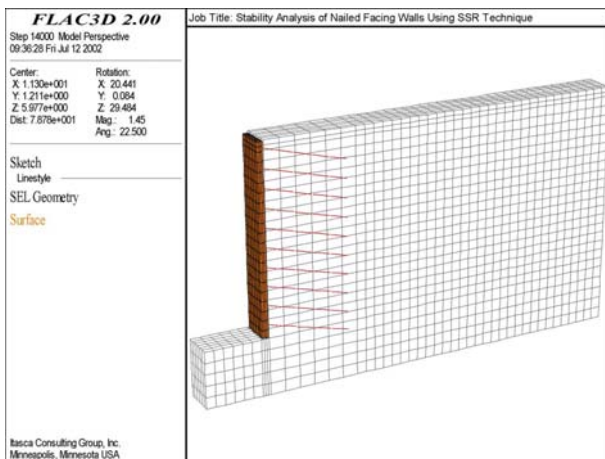


그림 7. 분석에 사용된 격자요소망

FLAC-3D 프로그램을 이용한 전단강도감소기법의 적용에 있어서 Soil Nailing 벽체의 안전율은 Dawson 등 (2000)의 연구결과에 따라 지반의 전단강도를 식 (1)에 의해 단계별로 저하시켜가면서 해석하여 1000 step 계산 후의 최대 불평형력(maximum unbalanced force)과 안전율과의 관계로 부터 최대 불평형력이 급격히 증가하는 시점으로 결정하였다. 그림 8은 전단강도감소기법을 이용하여 그림 6의 대표단면에 대해 지반의 내부마찰각 30°이고 nail의 길이 및 횡방향 설치간격이 각각 5m 및 1.05m인 경우에서의 전단강도감소기법을 통한 최대 불평형력과 안전율과의 관계를 도기한 것이다.

그림 8은 $F_{trial}=1.04$ 에서 시작하여 조금씩 전단강도를 감소시켜 가면서 불평형력을 도기한 것으로 지반의 전단강도는 F_{trial} 값이 증가함에 따라 감소하게 된다. 또한 $F_{trial}=1.14$ 까지는 최대 불평형력의 변화가 거의 없이 일정한 경향을 나타내나, $F_{trial}=1.15$ 부터는 크게 증가하게 되는데 이것은 붕괴가 발생한 것을 의미한다. 따라서 Soil Nailing 벽체의 붕괴발생 직전의 안전율은 1.14와 1.15 사이의 값이 될 것이며, 본 연구에서 Soil Nailing 벽체의 안전율은 최대 불평형력이 급격히 변하는 시점인 1.14로 결정되며, 이 때의 전단변형률 분포는 그림 9와 같다.

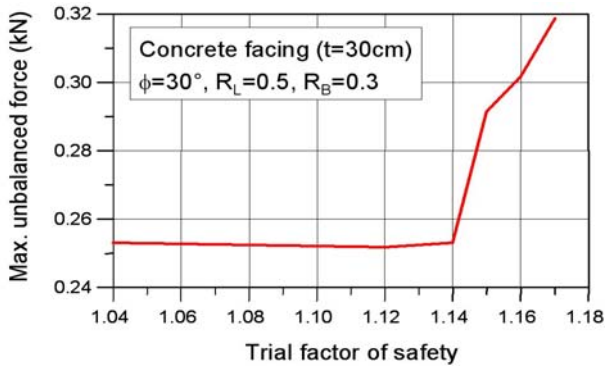


그림 8. SSR기법에 의한 최대 불평형력의 변화

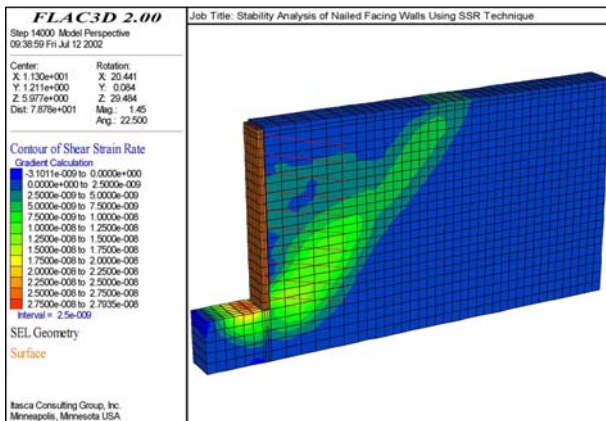


그림 9. 전단변형률 분포 ($F_{trial}=1.14$ 인 경우)

4.2 벽체의 강성변화에 따른 영향

본 연구에서는 벽체의 강성변화가 벽체의 안정성에 미치는 영향을 알아보기로 콘크리트 벽체의 두께를 30cm, 60cm, 90cm로 정한 벽체에 대하여 FLAC-3D 프로그램을 사용한 전단강도감소기법을 이용하여 대표단면에 대한 안전율을 평가하였으며, 해석에 사용한 벽체의 휨강성 및 계산된 Soil Nailing 벽체의 전체 안전율은 표 4와 같다.

표 4. 전면벽체의 강성을 고려한 Soil Nailing 벽체의 전체 안전율(SSR 기법 적용)

구분	벽체의 종류	벽체의 휨강성 ($m^4 \cdot GPa/m$)	지반의 내부마찰각 (°)					
			20	25	30	35	40	45
case 1	without facing	-	0.77	0.91	1.06	1.21	1.36	1.54
case 2	t=0.3m concrete	0.0518	0.79	0.96	1.14	1.30	1.46	1.65
case 3	t=0.6m concrete	0.4140	0.82	0.98	1.16	1.36	1.51	1.70
case 4	t=0.9m concrete	1.3973	0.86	1.03	1.21	1.39	1.53	1.72

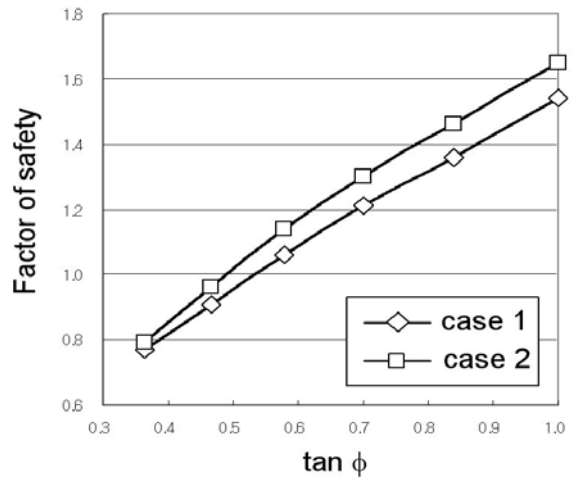


그림 10. 전면벽체의 유무에 따른 안전율

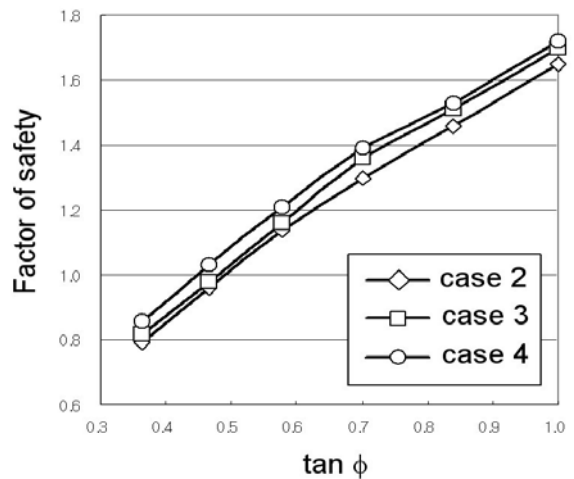


그림 11. 전면벽체의 강성변화에 따른 안전율

그림 10은 전면벽체의 유무에 따른 안전율의 변화를 도시한 것으로 지반의 전단강도가 증가할수록 전면벽체의 구속효과에 의한 안전율의 증가량이 점차 증가하는 경향으로 나타났다. 또한 그림 11은 콘크리트 벽체의 강성에 따른 안전율의 변화를 도시한 것으로 벽체의 강성이 커질수록 전체 안전율은 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

4.3 설계변수의 변화에 따른 영향

설계변수의 변화에 따른 Soil Nailing 벽체의 안정성 평가결과를 정리하면 표 5와 같다. 표 5에서 한계평형해석에 의한 안전율은 전면벽체의 구속효과가 무시된 상태에서의 결과로서 전면벽체가 없을 경우 전단강도감소기법에 의해

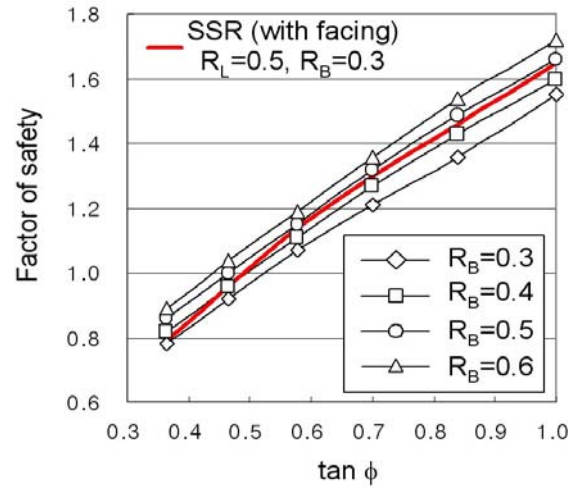
계산된 안전율과 유사한 결과를 나타냈다.

두께 30cm의 콘크리트 전면벽체가 Soil Nailing 벽체의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 길이비와 정착비를 변화시켜 분석한 결과를 도시하면 그림 12와 같다. 그림 12에서 알 수 있듯이 두께 30cm의 콘크리트 전면벽체의 구속효과는 벽체의 구속효과를 고려하지 않는 기존의 한계평형해석법에 의한 결과와 비교해 볼 때, $\tan \phi=1$ 인 경우(즉, 지반의 내부마찰각 $\phi=45^\circ$ 인 경우) 길이비의 변화에 따른 분석결과 $R_L=0.6$ 인 경우와 유사한 안전율을 보였으며, 정착비의 변화에 따른 분석결과 $R_B=0.5$ 인 경우와 유사한 결과를 나타내었다.

표 5. Soil Nailing 벽체에 대한 안정성 평가결과

해석 방법	구 분	R_L	R_B	지반의 내부마찰각($^\circ$)					
				20	25	30	35	40	45
LEM	길이비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	0.78	0.92	1.07	1.21	1.36	1.55
		0.6		0.85	0.99	1.14	1.30	1.45	1.63
		0.7		0.89	1.05	1.20	1.37	1.53	1.72
		0.8		0.94	1.11	1.27	1.44	1.61	1.80
	정착비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.3	0.78	0.92	1.07	1.21	1.36	1.55
			0.4	0.82	0.96	1.11	1.27	1.43	1.60
			0.5	0.86	1.00	1.15	1.32	1.49	1.66
			0.6	0.89	1.04	1.19	1.36	1.54	1.72
SSR	without facing	0.5	0.3	0.77	0.91	1.06	1.21	1.36	1.54
	with facing	0.5	0.3	0.79	0.96	1.14	1.30	1.46	1.65

주) LEM : Visual Nail 프로그램 해석결과,
SSR : FLAC-3D 프로그램 해석결과



(b) 정착비의 변화에 따른 영향

그림 12. 설계변수의 변화에 따른 영향

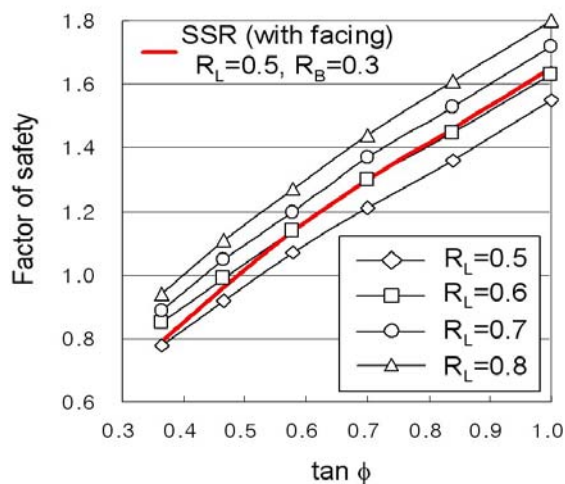
이를 구체적으로 설명하면, 두께 30cm 콘크리트 전면벽체의 구속효과는 $\phi=45^\circ$ 인 지반에 있어서 nail 길이가 5m에서 6m로 증가하여 안정성이 증대되는 효과와 유사하며, nail의 횡방향 설치간격 측면에서는 1.75m에서 1.05m로 조밀하게 설치하여 안정성이 증대되는 효과와 유사한 것을 나타내고 있다.

따라서 Soil Nailing 벽체에 일반적으로 시공되고 있는 콘크리트 전면벽체의 경우 강성벽체의 구속효과를 최대한 반영하여 nail의 설치간격을 넓게 하거나 nail의 길이를 짧게 하여 최적의 설계를 시도하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 실내모형실험 및 전단강도감소기법(SSR, Shear Strength Reduction Technique)을 이용하여 전면벽체의 강성이 Soil Nailing 벽체의 전체 안정성에 미치는 영향을 평가하였으며, 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내모형실험결과 전면벽체의 강성에 따른 파괴형태를 살펴보면 전면벽체없이 네일만 보강된 경우에는 내부파괴형태의 파괴양상을 보였으며, 전면벽체가 있는 경우에는 혼합파괴형태의 파괴양상을 나타냈다. 또한 전면벽체의 강성이 증가할수록 파괴면은 배면부쪽으로 더욱 확장되어 커지는 경향으로 나타났다.



(a) 길이비의 변화에 따른 영향

- (2) FLAC-3D 프로그램을 이용한 전단강도감소기법의 적용에 있어서 Soil Nailing 벽체의 안전율은 지반의 전단강도를 단계별로 저하시켜가면서 해석한 후 최대 불평형력(maximum unbalanced force)과 안전율과의 관계로부터 최대 불평형력이 급격히 증가하는 시점으로 결정하였으며, 한계평형해석결과와 비교한 결과 대체로 일치되는 결과를 나타내었다.
- (3) 전단강도감소기법을 이용한 수치해석적인 분석에서 전면벽체의 유무에 따른 안전율의 변화를 살펴본 결과, 지반의 전단강도가 증가할수록 전면벽체의 구속 효과에 의한 안전율의 증가량이 점차 증가하는 경향으

로 나타났다. 또한 전면벽체의 강성이 증가할수록 Soil Nailing 벽체의 전체 안정성에 미치는 영향은 증가하는 경향으로 나타났다.

- (4) 두께 30cm의 콘크리트 전면벽체가 Soil Nailing 벽체의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 길이비와 정착비를 변화시켜 분석한 결과, 강성벽체의 구속효과로 nail의 설치간격을 넓게 하거나 nail의 길이를 짧게 하여 최적의 설계를 시도하는 것도 가능할 것으로 판단되었다.

(접수일자 : 2004년 8월 12일)

참 고 문 헌

1. 권영호 (2002), 전면벽체의 강성이 소일네일링 시스템의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구, 박사학위논문, 홍익대학교.
2. 김홍택, 권영호, 강인규 (2002), 전면벽체의 강성을 고려한 영구 소일네일링 보강사면의 안정성 평가, 2002년 한국지반공학회 사면안정 학술발표회, pp. 171-178.
3. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., Soil Nailing: Application and Practice Part 1, Ground Engineering, The Journal of the British Geotechnical Society, Vol. 19, No. 8, 1986, Nov., pp. 10-15.
4. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., Soil Nailing: Application and Practice Part 2, Ground Engineering, The Journal of the British Geotechnical Society, Vol. 20, No. 1, 1987, Jan., pp.21-28.
5. Dawson, E. M., Roth, W. H. and Drescher, A., Slope Stability Analysis by Strength Reduction, Geotechnique, Vol. 49, No. 6, 1999, pp. 835-840.
6. Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S. and Roth, W. (2000), Geotechnical Stability Analysis by Strength Reduction, Geotechnical Special Publication No. 101, Slope Stability 2000, ASCE, Denver, Colorado, pp. 99-113.
7. Donald, I. B. and Giam, S. K. (1988), Application of the Nodal Displacement Method to Slope Stability Analysis, Proceedings of 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Sydney, Australia, pp. 456-460.
8. Fredlund, D. G. and Scoular, R. E. G. (1999), Using Limit Equilibrium Concepts in Finite Element Slope Stability Analysis, Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Engineering, Balkema, pp. 31-47.
9. Kim, Hong-Taek, Kang, In-Kyu, Kwon, Young-Ho, Park, Si-Sam and Cho, Yong-Hoon, An Experimental Study of the Soil Nailed Wall Behavior with Front Plate Rigidity, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 18, No. 3. 2002, Jun, pp.87-94.
10. 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.
11. Naylor, D. J. (1982), Finite Elements and Slope Stability, Numerical Mathematics in Geomechanics, Proceedings of NATO Advanced Study Institute, London, Portugal, pp. 229-244.
12. Ugai, K. (1989), A Method of Calculation of Total Factor of Safety of Slopes by Elasto-Plastic FEM, Soils and Foundations, Vol. 29, No. 2, pp. 190-195 (in Japanese).
13. Ugai, K. and Leshchinsky, D. (1995), Three-Dimensional Limit Equilibrium and Finite Element Analysis : A Comparison of Results, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp. 1-7.
14. 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.