

전면벽체의 강성이 Soil Nailing 시스템의 전체안정성에 미치는 영향 Influence of Facing Stiffness on Global Stability of Soil Nailing Systems

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 권영호²⁾, Young-Ho Kwon, 강인규³⁾, In-Kyu Kang,
박사원⁴⁾, Sa-Won Park, 강윤⁵⁾, Yun Kang

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik Univ.

²⁾ 한라건설(주) 기술연구소 과장, Manager, R&D Center, Halla Engineering & Construction Corp.

³⁾ (주)브니엘컨설팅 대표, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd

⁴⁾ (주)에스코컨설팅 대리, Associate Engineer, ESCO Engineers & Consultant Co., Ltd.

⁵⁾ 홍익대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hongik Univ.

SYNOPSIS : 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 downtown area, it is important that the relaxation of the ground is minimized in the ground excavation works. Due to these problems, soil nailing systems are often used the flexible facing such as shotcrete rather than the rigid facing such as SCW, CIP, and jet grout types in Korea. The soil nailing systems with rigid facings are used greatly however it is insufficient researches for design and analysis of soil nailing systems with rigid facings. 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, failure loads, displacement behaviour, axial force acting on the nails, and distribution of earth pressure. Also, the parametric studies are carried out for the typical section of soil nailed walls according to thickness of concrete facings and internal friction angle of soil using the numerical technique as shear strength reduction technique.

Key words : soil nailing, facing stiffness, shear strength reduction technique, laboratory model tests

1. 서론

Soil nailing 공법은 국내의 경우 1993년 가시철 흩막이 벽체에 처음으로 적용된 이후 주로 지하굴착 분야 및 사면보강 등에 보편적으로 사용되고 있는 공법으로 도심지의 지하굴착 등에도 많이 적용되고 있는 공법이다. 그러나 도심지 지반굴착의 경우 인접구조물에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 굴착으로 인한 지반변형을 최소화하는 것이 중요한 문제이며, 이와 같은 이유로 soil nailing 공법을 적용할 경우 종종 슛크리트와 같은 연성 전면벽체보다는 SCW, CIP, 고압분사류 등 상대적으로 강성이 큰 강성 전면벽체를 많이 사용하고 있는 추세이다. 이와 같이 전면벽체의 강성이 클 경우에는 전면벽체의 구속 효과로 인해 soil nailing 시스템의 전체 안정성이 증대될 것으로 예상되나 지금까지의 설계에 있어서는 이를 평가하기 위한 해석방법 등의 부재로 안전측에서 무시되어 왔다. 그러나 최근 들어 주변 인접건물이나 도로 또는 지중매설물 등으로 인해 주변지반의 변형을 억제해야 되는 사례가 증가하고 있기 때문에 강성 전면벽체의 적용이 확대되고 있는 추세이며, 협소한 지하공간의 효율적 활용과 토지활용의 극대화 측면에서 가설벽체와 지하건물 외벽과의 합벽시공이 늘어가고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 전면벽체의 강성이 soil nailing 벽체의 안정성에 미치는 영향을 실내모형실험 및 수치해석적인 방법을 통하여 분석하여 향후 설계시 도움을 주고자 한다.

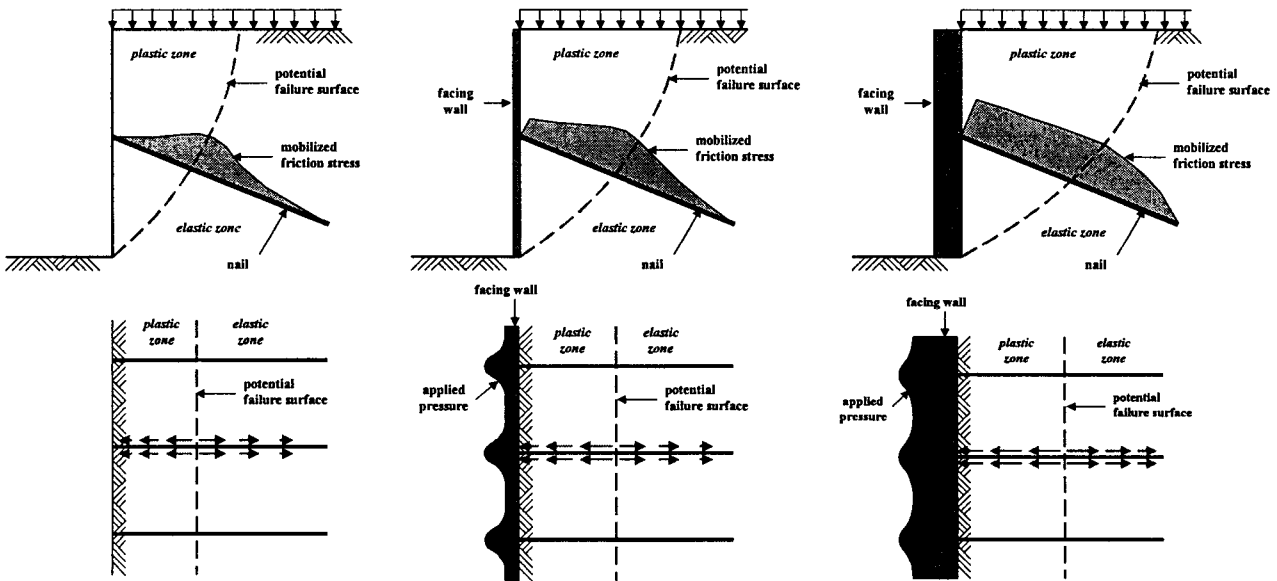
2. Soil Nailing System에서 강성 전면벽체의 활용

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 목적이다. 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 지하 영구벽체에 적용되는 강성벽체는 주로 일반 soil nailing 벽체와 지하외벽이 시공상의 편리성과 횡토압의 경감효과 및 양압력 등에 유리한 이점 때문에 합벽화하여 시공하는 경우가 많이 있다.

2.2 전면벽체의 강성에 따른 영향

Soil nailing 공법에 있어서 전면벽체의 유무와 강성정도에 따른 soil nailing 구조체의 파괴거동 특성과 전면벽체의 구속효과는 그림 1과 같이 정리할 수 있다(김홍택 등 2002). 그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 내일제원 및 하중조건이라면 전면벽체의 강성이 증가함에 따라 soil nail 보강토체의 가상파괴영역은 전면벽체의 구속효과로 인하여 점점 커지며, 내일에 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 내일의 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

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 전면벽체의 강성을 고려한 해석적인 접근은 유한요소법 또는 유한차분법을 이용하여 안전율을 평가하는 방법인 전단강도감소

기법(Shear Strength Reduction Technique)을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

전단강도감소기법(SSR 기법)은 수치해석적인 방법을 이용하여 식(1)과 같이 지반의 전단강도를 좌우하는 지반의 내부마찰각 및 점착력에 대해 안전율을 고려하여 감소시키면서 파괴시까지 반복 계산함으로써 파괴시 최종적으로 적용된 안전율과 가상파괴면을 평가하여 한계평형해석기법과 유사한 안정성 평가를 할 수 있는 해석기법이다(김홍택 등, 2002 & 정우철 등, 2000).

$$\tan \phi_m = \frac{\tan \phi_o}{F_{S\phi}}, \quad c_m = \frac{c_o}{F_{S_c}} \quad (1)$$

여기서, ϕ_o , c_o : 원지반의 내부마찰각 및 점착력

ϕ_m , c_m : 안전율을 고려하여 수정된 내부마찰각 및 점착력

$F_{S\phi}$, F_{S_c} : 내부마찰각 및 점착력에 대한 안전율

3. 실내모형실험

3.1 개요

Soil nailing 공법에서 전면벽체의 강성이 구조체의 전체안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실내모형실험이 수행되었으며, 실내모형실험의 제원 및 조건을 요약하면 표 1과 같다(권영호, 2002).

표 1. 실내모형실험 제원 및 조건

구 분	벽체두께 (mm)	네일길이 (cm)	네일직경 (mm)	설치각도 (°)	네일 개수	네일배치 형태	재하판	비 고
A-1	-	-	-	-	-	-	20cm×60cm (b = 0cm)	b : 벽체에서 재하판까지의 거리
A-2	-	20	3	0	20	Type-I		
A-3	2	20	3	0	20	Type-I		
A-4	4	20	3	0	20	Type-I		
A-5	6	20	3	0	20	Type-I		
B-1	-	-	-	-	-	-	20cm×60cm (b = 10cm)	
B-2	-	30	3	0	20	Type-I		
B-3	2	30	3	0	20	Type-I		
B-4	4	30	3	0	20	Type-I		
B-5	6	30	3	0	20	Type-I		
C-1	2	30	3	0	4	Type-III	20cm×60cm (b = 10cm)	
C-2	2	30	3	0	12	Type-II		
C-3	6	30	3	0	4	Type-III		
C-4	6	30	3	0	12	Type-II		
D-1	2	30	3	0	-	-	30cm×60cm (b = 0cm)	
D-2	2	30	3	0	20	Type-I		
D-3	6	30	3	0	-	-		
D-4	6	30	3	0	20	Type-I		

(a) Type-I

(b) Type-II

(c) Type-III

3.2 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-5에서는 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 2와 같다.

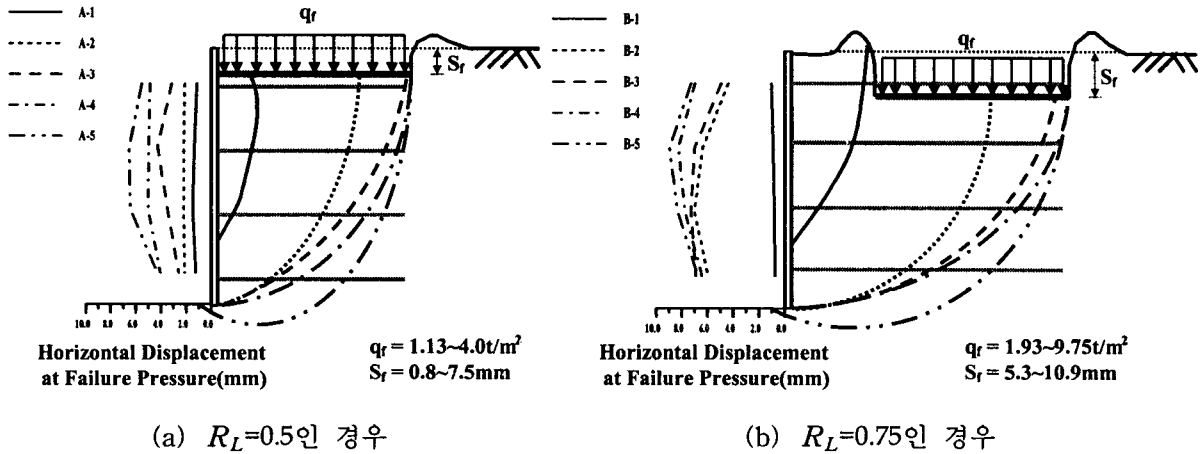


그림 2. 전면벽체의 강성에 따른 파괴면과 수평변위 양상

3.3 전면벽체의 강성과 파괴하중

전면벽체의 강성변화에 따라 쏘일네일링 구조체의 전체안전성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 네일의 길이를 변화시켜 전면벽체의 강성에 따른 파괴하중의 변화를 도시한 결과 그림 3과 같이 전면벽체의 강성이 증가함에 따라 파괴하중의 크기가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 네일의 길이가 길수록 벽체의 강성증가로 인한 파괴하중의 증가량은 큰 것으로 나타났다.

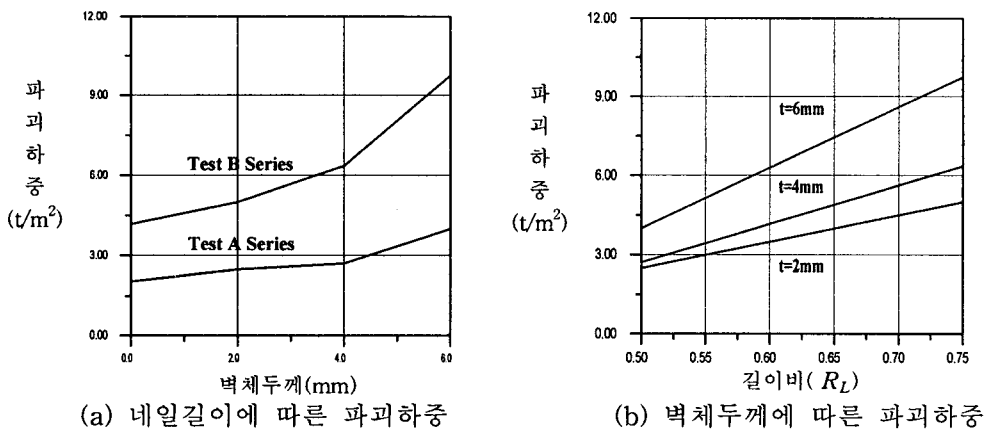
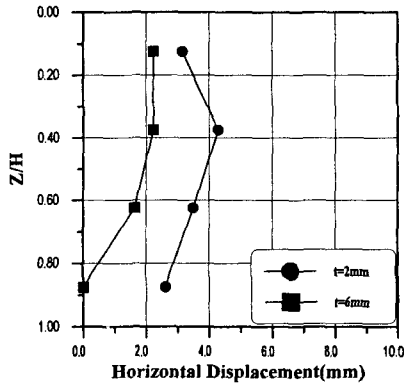


그림 3. 네일길이 및 벽체두께에 따른 파괴하중

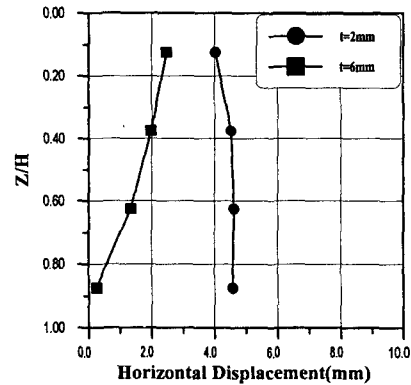
3.4 전면벽체의 강성과 수평변위

그림 4는 2mm 모형벽체의 파괴하중을 기준으로 하여 네일의 길이가 각각 20cm ($R_L=0.5$)인 경우와 30cm ($R_L=0.75$)인 경우에서의 깊이별 수평변위를 도시한 것이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 동일한 하

중조건에서 벽체의 강성이 클수록 수평변위가 억제되는 경향을 알 수 있으며, 네일의 횡방향 설치간격과 수평변위와의 관계를 살펴본 결과 그림 5와 같이 벽체의 강성이 클수록 네일의 횡방향 설치간격에 대한 영향을 적게 받는 것으로 분석되었다.

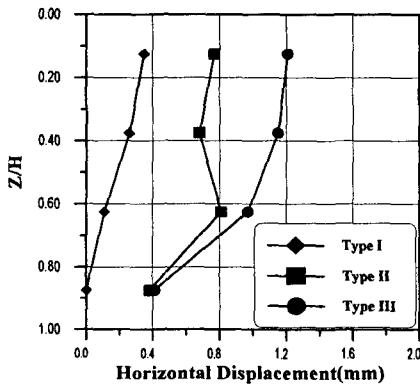


(a) $R_L=0.5$ 인 경우

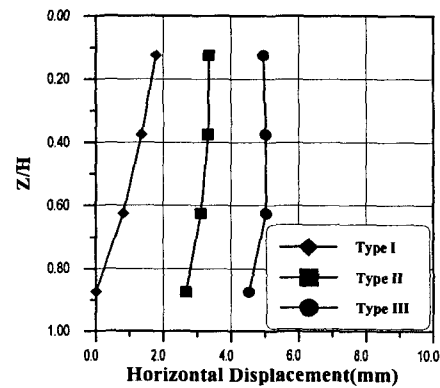


(b) $R_L=0.75$ 인 경우

그림 4. 전면벽체의 강성과 수평변위와의 관계



(a) $t = 2\text{mm}$



(b) $t = 6\text{mm}$

그림 5. 수평간격과 수평변위와의 관계

3.4 네일설치밀도의 영향

본 분석에서는 파괴시 네일에 발생하는 최대 인장력 값을 바탕으로 전면벽체의 강성변화에 따른 Gigan(1986)이 제시한 네일설치밀도(D)의 변화를 분석한 결과 그림 6과 같이 전면벽체의 강성이 증가함에 따라 파괴하중 및 네일설치밀도(nail density)가 함께 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 동일한 제원으로 보강된 soil nailing 구조체에 있어서 전면벽체의 강성에 의한 구속 효과는 네일이 더욱 조밀하게 설치된 것과 동일한 효과를 나타내는 것으로 분석된다. 본 분석에 사용한 Gigan의 네일설치밀도(Schlosser 등, 1991)는 식(2)와 같다.

$$D = \frac{T_L}{\gamma S_h S_v L} = \frac{q_s}{\gamma S_h S_v} \quad (2)$$

여기서, T_L : 네일두부에서 발휘되는 최대 인장력, q_s : 단위길이당 주면마찰력

S_h, S_v : 네일의 횡방향, 연직방향 설치간격, L : 네일의 길이

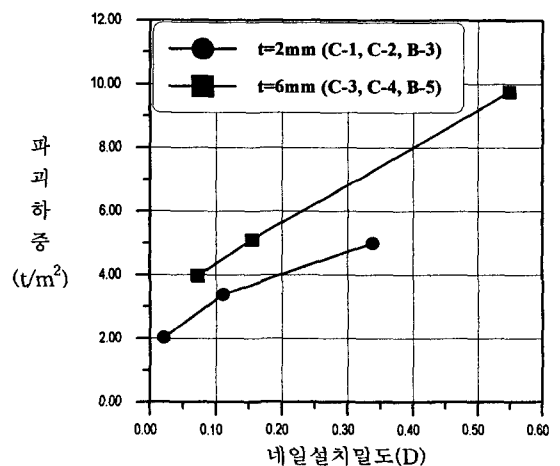


그림 6. 전면벽체의 강성에 따른 네일 설치밀도의 변화

3.5 Soil Nailing 벽체와 합벽으로 시공된 지하 영구벽체에서의 작용토압

본 분석에서는 지하주차장 등과 같이 지하 굴착시 적용된 soil nailing 벽체와 지하구조물의 외벽을 합벽으로 시공하여 지하 영구벽체를 만들 경우, 이에 대한 설계를 위해 필요시 되는 지하 영구벽체에서의 작용토압을 실험적으로 분석하였다. 실험결과는 그림 7 및 8과 같이 상재하중이 증가할수록 수평토압의 합력은 증가하는 것으로 나타났으며, 네일이 설치된 지중 영구벽체는 동일한 상재하중 조건에서 수평방향토압을 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 전면벽체의 강성이 증가할수록 토압의 경감효과는 증가하는 것으로 나타났다. 분석에 사용한 수평력비(R_{LP})는 식(3)과 같다.

$$R_{LP} = \frac{\sum P}{Q} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서, $\sum P$: 전면벽체에 작용하는 수평토압, Q : 상재하중

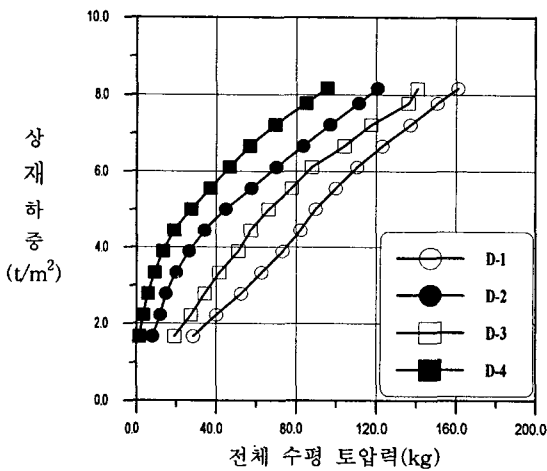


그림 7. 지하 영구벽체에서의 전체 수평 토압력의 변화

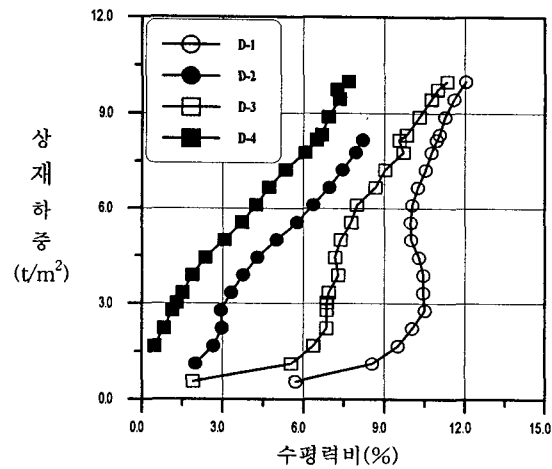


그림 8. 지하 영구벽체에서의 수평력비의 변화

4. 수치해석기법을 이용한 분석

4.1 개요

본 분석에서는 지반공학용 유한차분법 상용프로그램인 FLAC-3D를 이용하여 전단강도감소기법(SSR 기법)을 토대로 대표단면에 대한 안전율을 평가하였다. Soil nailing 벽체의 보강정도를 결정하는 무차원 변수에는 길이비(R_L , length ratio), 정착비(R_B , bond ratio) 및 강도비(R_S , strength ratio)가 있으며 이에 대한 정의는 식(4)와 같다. 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.

$$(\text{길이비}) R_L = \frac{L}{H} \quad (\text{정착비}) R_B = \frac{d_{hole} \cdot L}{S_h \cdot S_v} \quad (\text{정착비}) R_S = \frac{d_{bar}^2}{S_h \cdot S_v} \quad (4)$$

여기서, L : 네일의 길이, H : 사면높이, d_{hole} : 천공직경, d_{bar} : 천공직경
 S_h : 네일의 횡방향 설치간격, S_v : 네일의 연직방향 설치간격

분석에서 사용한 대표단면 및 격자요소망은 그림 9 및 그림 10과 같다. FLAC-3D 프로그램을 이용한 전단강도감소기법의 적용에 있어서 soil nailing 벽체의 안전율은 지반의 내부마찰각을 식(1)과 같이 단계별로 저하시켜가면서 해석하여 1000 step 계산 후의 최대 불평형력(maximum unbalanced force)과 안전율과의 관계로 부터 최대 불평형력이 급격히 증가하는 시점으로 결정하였다(김홍택 등, 2002).

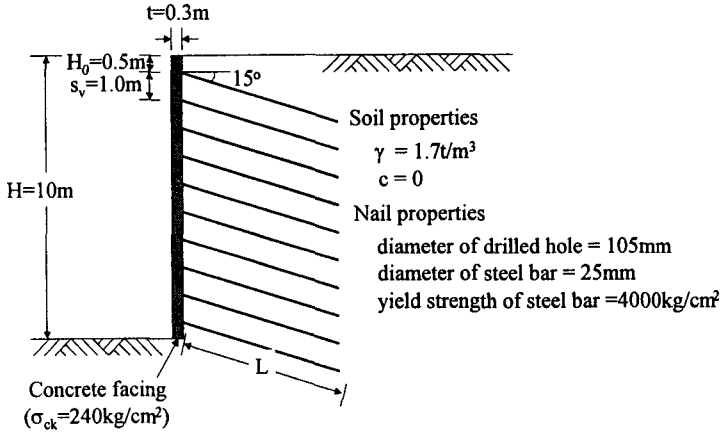


그림 9. 분석에 사용된 대표단면

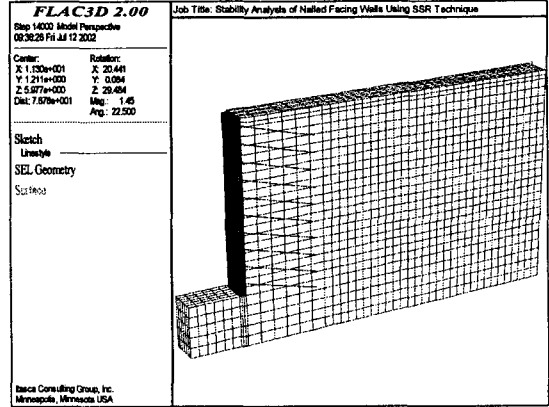


그림 10. 분석에 사용된 격자요소망

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 2와 같다.

표 2. 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

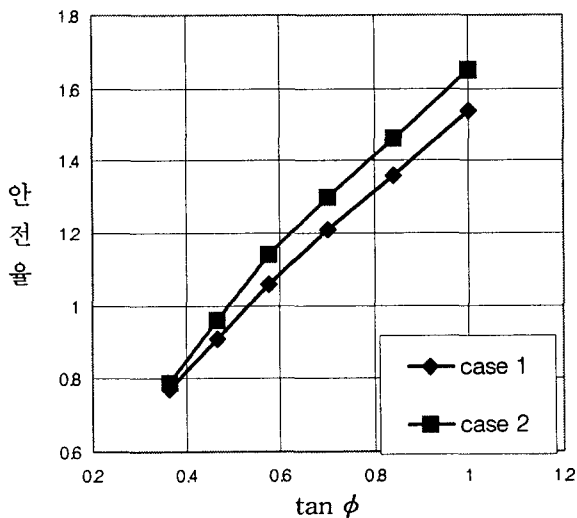


그림 11. 전면벽체의 유무에 따른 안전율

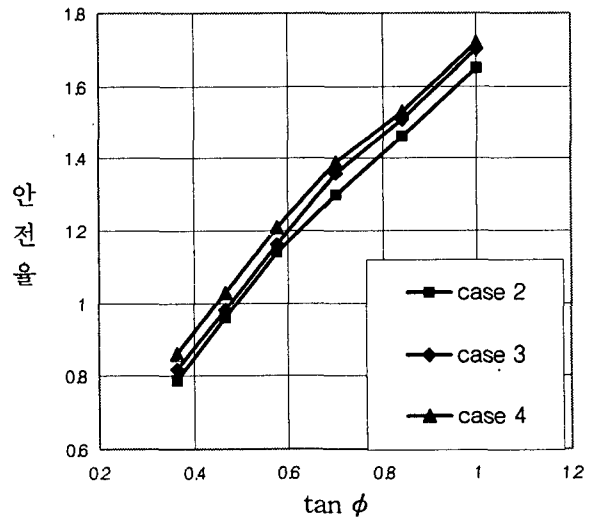


그림 12. 전면벽체의 강성변화에 따른 안전율

그림 11은 전면벽체의 유무에 따른 안전율의 변화를 도시한 것으로 지반의 전단강도가 증가할수록 전면벽체의 구속효과에 의한 안전율의 증가량이 점차 증가하는 경향으로 나타났다. 또한 그림 12는 콘크리트 벽체의 강성에 따른 안전율의 변화를 도시한 것으로 벽체의 강성이 커질수록 전체 안전율은 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 실내모형실험 및 전단강도감소기법(SSR, Shear Strength Reduction Technique)을 이용하여 전면벽체의 강성이 soil nailing 시스템의 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.
- (2) 실내모형실험결과 전면벽체의 강성이 증가함에 따라 파괴하중의 크기가 크게 증가하였으며, 네일의 길이가 길수록 벽체의 강성증가로 인한 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한 동일한 하중조건에서 벽체의 강성이 클수록 수평변위가 억제되었고 횡방향 설치간격에 대한 영향을 적게 받는 것으로 분석되었다. 따라서 전면벽체의 강성을 고려할 경우 네일의 횡방향 설치간격을 넓게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.
- (3) 실내모형실험결과 전면벽체의 강성이 증가함에 따라 파괴하중 및 네일설치밀도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 동일한 제원으로 보강된 soil nailing 구조체에 있어서 전면벽체의 강성에 의한 구속효과는 네일이 더욱 조밀하게 설치된 것과 동일한 효과를 나타내는 것으로 분석된다.
- (4) 지하주차장 등과 같이 지하 굴착시 적용된 soil nailing 벽체와 지하구조물의 외벽을 합벽화하여 시공된 지하 영구벽체에 대한 실내모형실험결과, 상재하중이 증가할수록 수평토압의 합력은 증가하는 것으로 나타났으며, 네일이 설치된 지중 영구벽체는 동일한 상재하중 조건에서 수평방향토압을 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 전면벽체의 강성이 증가할수록 토압의 경감효과는 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 전단강도감소기법을 이용한 수치해석적인 분석에서 전면벽체의 유무에 따른 안전율의 변화를 살펴본 결과, 지반의 전단강도가 증가할수록 전면벽체의 구속효과에 의한 안전율의 증가량이 점차 증가하는 경향으로 나타났다. 또한 전면벽체의 강성이 증가할수록 soil nailing 벽체의 전체 안정성에 미치는 영향은 증가하는 경향으로 나타났다.

참고문헌

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. 정우철, 박형동, 박연준, 유광호 (2000), “볼록 및 오목 사면 형상에 따른 거동에 대한 수치해석 모형 연구”, 2000년 한국지반공학회 사면안정 학술발표회, pp. 213-220.
4. Schlosser, F., Gigan, J. P., Plumelle, C., et al.(1991), Recommendations Clouterre ; Soil Nailing Recommendations, French National Research Project Report, Ponts et Chaussees.