

선단확장식 소일네일링 공법의 적용성에 관한 실험적 연구

이상은¹ · 장윤호¹ · 문창열² · 정교철³ · 박영선⁴

¹강원대학교 에너지자원공학과, ²강원대학교 토목공학과

³안동대학교 지구환경과학과, ⁴(주)하남기초건설 이사

An Experimental Study on the Application of End-Expanded Soil Nailing Method

Sang-Eun Lee¹, Yun-Ho Jang¹, Chang-Yeul Moon², Gyo-Cheol Jeong³, and Young-Sun Park⁴

¹Dept. of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University

²Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

³Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

⁴Hanam Construction Co. Ltd.

선단 확장식 소일네일링 공법의 특징은 천공홀보다 큰 직경의 특수 비트로 공저 30 cm 정도를 확장하고, 천공직경보다 큰 쐐기형 몸체를 접어서 공저에 삽입한 다음, 쐐기형 몸체를 펼쳐 공벽에 밀착되도록 한 후 그 주위를 그라우팅하고 지반에 정착시키는 공법이다. 본 연구에서는 개발된 공법의 효과를 입증하기 위해 길이 1,300 mm, 폭 1,000 mm, 높이 1,100 mm의 토조에 모형지반을 조성한 후 인발 및 하중재하실험을 실시하였고, 동일한 실험조건으로 일반 소일네일링과 비교하였다. 선단 확장식 네일링이 일반 네일링 공법에 비하여 인발력은 23% 정도 증가하였으며, 벽체의 수평변위는 1.2~9.1% 정도 감소하였다. 또한 네일에 작용하는 축력은 선단 확장식은 7 tonf, 일반 네일은 5 tonf 이후에서 크게 증가하였으며, 축인장 변형을 분석결과 예상 파괴선이 변체로부터 먼거리에 선단 확장식이 위치하고 있음을 확인하였다. 이들 결과로부터 선단 확장식 네일링이 일반적인 소일네일링 공법에 비하여 보강효과면에서 우수한 공법임을 입증하였다.

주요어 : 선단 확장식 소일네일링 공법, 쐐기형 몸체, 인발력, 축력, 축인장 변형률

The peculiarity of end-expanded soil nailing method(EESNM) is in fixing the wedge-type steel body spreaded by collars and grouting its surroundings by cement milk within soils, after extending hole bottom over drilling hole diameter with top drill bit. The present study was done to establish the effect of this method. Laboratory model test were carried out to investigate the behavior characteristics with the performance of the pull-out test and failure experiment, after preparing soil test box having 1,300 mm length, width 1,000 mm, and height 1,100 mm, and the same experimental condition was set up to compare with the general soil nailing method(GSNM). The pull-out force of about 23 percentage was increased, and the horizontal displacements 1.2 from 9.1 percentage in soil-nailed wall decreased in EESNM compare with GSNM. The axial force acting on nail increased considerably at load level over 7 ton in EESNM and 5 ton in GSNM. The predicted failure line from the maxima analyzed by axial tensile strain located at long distance from soil-nailed wall in EESNM. The EESNM demonstrated the superiority of reinforcement effect in comparison with GSNM from the results above mentioned.

Key words : End-expanded soil nailing method, Wedge-type steel body, Pull-out force, Axial force, Axial tensile strain

서 론

소일네일링 공법은 토류 구조물 벽체나 인위적인 굴

착에 의해 불안정해진 비탈면 등의 안정성을 확보하는 목적으로 널리 사용되고 있으며, 통상 지반네일 보강재를 프리스트레싱없이 촘촘하게 삽입하는 것이다. 이 공

*Corresponding author: lee9367@kangwon.ac.kr

법의 원리는 인장응력, 전단응력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 보강재를 사용하여 원지반의 전단강도 증진 및 변위를 억제함으로써 굴착공사 도중 및 완료 후 지반과 피에 대한 안정성을 향상시키는 것이라고 할 수 있다.

국내에는 1993년 가시철 흙막이 벽체에 처음으로 적용된 이후, 현재 시공과정의 간편성, 경제성 등의 장점으로 인해 많은 현장에서 흙막이 가시철 또는 비탈면 보강공법으로 널리 적용되고 있다. 이와 같은 추세와 더불어 최근 앵커형태의 네일, 스파이럴파이프 네일링 시스템, 압력분사 그라우팅 소일네일 및 바이트 머신을 이용한 소일네일링 공법 등 다양한 공법들이 개발되어 있으며, 다양한 연구가 수행되어 있다(김준석 등, 2001; 김홍택 등, 2002; 박시삼 등, 2003; 김종수 등, 2001; 임종철 등, 2000).

국외의 경우 1986년 프랑스에서 “CLOUTERRE” 사업을 시작으로 소일네일링 공법에 대한 이론 및 설계개념 등이 정립되었으며, 사질토 지반에서 실물크기의 네일보강에 대한 현장계측을 수행하여 네일의 거동을 파악하였다. Shen 등은 네일링 보강에 따른 지반의 거동 분석을 통해 벽체상단에서 큰 수평변위를 보이며, 심도가 내려갈수록 작은 변위를 보이는 것을 관찰하였다. Stocker 등은 네일에 변형율계를 부착하여 굴착진행에 따른 네일의 축력거동과 10여년에 걸쳐 네일에 작용하는 축력분포를 분석하여 장기적인 소일네일링의 거동을 분석하였으며, Cheng 등은 변형율계와 경사계의 계측분석 등을 통하여 원호형의 파괴형태를 발표한 바 있다.

기존 소일네일링 공법 및 위에 개발된 다양한 네일링 공법들은 천공홀에 네일을 삽입하고 그 주위를 일반적인 그라우팅 및 압력 그라우팅 처리하여 고정시키는 것으로, 즉 단순히 천공홀에 네일 구조체가 끼워진 것에 불과하며 시공의 난이성, 네일의 변형 가능성 등이 동반될 수 있는 문제점이 있다. 또한 공법에 따라 차이가 있겠지만 매우 연약하여 급히 보강을 필요로 하는 비탈면, 절리, 층리 및 단층 등의 불연속면들이 매우 발달한 불량한 암반, 발파의 영향 등으로 심하게 이완된 암반 등 지반의 조건이 변화할 때는 네일과 공벽면과의 마찰 저항감소, 지하수 침투로 인한 토층 및 암반층의 연약화 등에 따라 그 보강기능이 상실되어 안정성을 확보하지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

따라서 이와 같은 문제점을 보완할 수 있는 선단 확장식 소일네일링 공법을 토체 및 네일링 구조체의 역학적 개념을 도입하여 개발하였다. 그 개발원리는 특수비트를 사용하여 천공홀보다 큰 직경의 비트로 공저

30 cm 정도를 확장하고, 천공홀에 지지 고정되는 천공 직경보다 큰 썬기형 몸체를 접어서 공저에 삽입한 다음, 썬기형 몸체를 펼쳐 공벽에 밀착되도록 한 후 그 주위를 그라우팅하고 지반에 정착시키는 선단 확장식 네일링 공법이다.

본 연구는 기존의 일반적인 소일네일링과 선단 확장식 소일네일링 공법을 실내모형실험을 통하여 인발시험, 토체에 삽입된 네일링의 벽체 및 네일의 변형거동을 비교분석함으로써 개발된 네일링 공법의 적용성을 입증하는데 그 목적이 있다.

선단 확장식 소일네일링의 특징

일반적인 소일네일링 공법은 지반굴착, 비탈면 및 터널보강 등을 위한 원위치 지반보강공법으로서 인장력, 전단력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 보강재($\phi 25\sim 32$ mm 이형철근)를 일정한 간격으로 프리스트레싱없이 지반에 삽입한 후에 슛크리트와 와이어메쉬 등으로 전면벽체를 설치하여 원지반의 전체적인 지반강도를 증진시키고 굴착중 및 완료 후에 예상되는 지반의 이완을 억제하는 공법이다. 즉 비교적 많은 수의 네일이 복합적으로 엮여져서 원지반을 옹벽과 같은 안정한 블록으로 보강하게 되며, 이를 통해 보강된 원지반 자체가 주된 지보로 작용하게 된다.

한편, 본 연구에서 개발한 선단 확장식 소일네일링 공법의 특징은 Fig. 1과 같이 특수 제작된 탑드릴 비트를 사용하여 100 mm로 소정의 지점까지 천공한 후 기기조작을 통해 비트가 140 mm까지 확장하게 되며, 확장된 비트로 공저부분을 넓히게 된다. 다음 Fig. 2와 같이 선

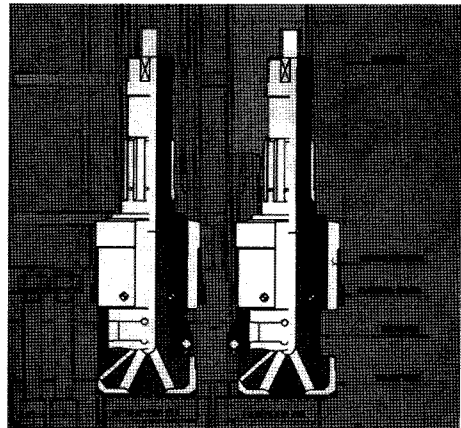


Fig. 1. Top drill bit for end-expanding of hole bottom.

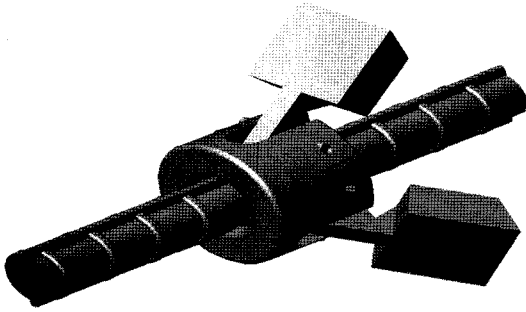


Fig. 2. Wedge-type steel body.

단부에 150 mm까지 펼쳐질 수 있는 썬기형 몸체를 삽입하고 그 주변을 그라우팅하기 때문에 일반적인 소일네일링 효과외에 지반의 수동저항을 증가시킨 공법이라고 할 수 있다. 이때 썬기형 몸체는 크게 세부분으로 나누어진다. 썬기모양을 갖는 Collar를 지탱하는 원통형 몸체, 공벽외부 흙속에 삽입되어 수동저항 역할을 하는 Collar, 썬기형 몸체와 Collar를 연결하는 고리 및 스프링으로 구성되어 있다.

한편, 일반적인 소일 네일링의 인발저항력(T_i)의 결정은 식 (1)과 같으며, T_i 는 지반과 네일의 접촉면에 관한 정의하고 할 수 있으며(Bang etc, 1990), 현장 인발시험을 통해 구하는 것을 원칙으로 한다.

$$T_i = \min \left\{ \frac{\pi \cdot d \cdot l_e \cdot (q_s + \gamma \cdot H_s \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{S_h}, \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_y \right\} \quad (1)$$

여기서, d 는 네일의 직경(m), l_e 는 파괴면을 지나서 네일의 유효길이(m), q_s 는 네일과 흙의 단위주면마찰력($tf \cdot m^2$), γ 는 흙의 단위중량(tf/m^3), H_s 는 지표 상부에서 파괴면을 가로지르는 네일위치까지의 높이(m), α 는 네일의 설치각($^\circ$), ϕ 는 흙의 내부마찰각($^\circ$), S_h 는 네일의 횡방향 설치간격(m), 그리고 σ_y 는 철근의 항복인장강도를 나타낸다.

선단 확장식 네일링 공법의 경우 인발저항력은 지반과 네일의 접촉면에 따른 저항력(T_i)외에 식 (2)와 같이 선단부의 확장에 따른 지반의 저항능력이 증가된 것으로 생각할 수 있다.

$$T_p = K_p \gamma z \left(\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \right) \cdot k_e \quad (2)$$

여기서, K_p 는 수동토압계수, γ 는 지반의 단위중량($tonf/m^3$), z 는 네일의 설치심도(m), d 는 천공홀의 직경(m), D 는 확장된 선단부의 직경(m), 그리고 k_e 는 지반의

특성에 따른 저항계수를 나타낸다.

그리고 네일에 작용하는 휨강성에 의한 네일 하부면에서 발휘할 수 있는 수동저항력은 선단 확장식의 경우 확장된 썬기형 몸체와 그라우팅 구근에 의해 강성이 다른 부분에 비하여 커지기 때문에 비탈면이나 흙막이 토체의 파괴면이 일반적인 소일네일링에 비하여 네일 선단부쪽으로 이동할 것으로 예상된다.

위 내용에서 살펴본 바와 같이 썬기형 몸체의 선단 정착으로 지반저항이 증가되므로 굴착시 유발되는 수평변위 및 침하량이 상당부분 억제되어 소일네일링 시스템의 전체 안정성을 증대시키는 역할을 할 것으로 생각된다.

실내모형실험

시료

모형지반은 통일분류법상 CL에 해당하는 흙을 사용하였으며, 동일하고 균일한 흙 입자를 만들기 위해 완전 건조 후 4 mm의 체가름을 실시하였다. 사용된 흙에 대한 물성값을 알기 위하여 입도, 직접전단, 액성 및 소성한계 시험 등이 수행되었으며, 이를 나타내면 각각 Table 1 및 Fig. 3과 같다.

실험장치 및 방법

현장조건에 부합되는 모델링을 실내시험을 통해 이상화하는 것이 가장 중요한 요소라고 할 수 있지만, 본 실내모형실험에서는 일반적인 소일네일링 공법과 비교를 통해 선단 확장식 네일링의 보강효과를 입증하는데

Table 1. Physical properties of soil sample

Unit weight (kN/m^3)	15.0
Liquid limit (%)	31.5
Plasticity index (%)	19.1
Cohesion (kPa)	2.3
Int'l friction angle ($^\circ$)	27.0

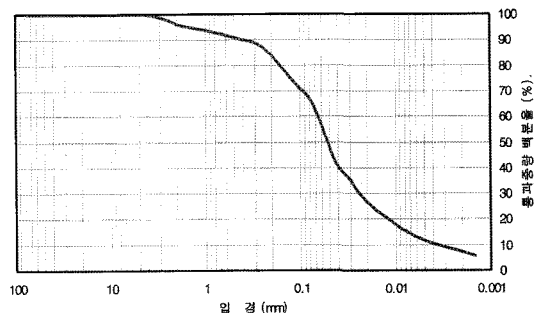


Fig. 3. Grain size distribution curve of soil.

초점을 두었기 때문에 현장조건과는 상관성을 고려하지 않았다. 다만, 실제 썰기형 몸체를 1/5배로 특수하게 축소제작하고 천공홀의 직경 역시 100 mm를 5배 축소하여 20 mm가 되도록 형성하였다.

실험에 사용된 토조의 모식도는 Fig. 4와 같이 길이 1,300 mm, 폭 1,000 mm, 높이 1,100 mm이고 Table 2는 모형실험의 개요를 나타낸 것이다. 이 연구에서는 스틱크리트 벽체가 설치되는 소일네일링 구조체를 형성하기 위해 2 mm 두께의 아크릴판을 사용하였다. 연성벽체의 성격을 모사하기 위해 1,000 mm×150 mm의 규격을 갖는 아크릴판을 4조각으로 나누고 모형지반을 단계굴착시마다 하나씩 부착하고 네일링을 설치하였다. 실험에 사용된 네일의 설치개수는 20개이고 종방향 간격은 150 mm, 횡방향 간격은 160 mm이다. 이때 네일의 설치각은 수평에서 하향으로 10° 기울어지게 설치하였다. 이것은 네일이 삽입된 천공홀의 그라우팅 작업시 시멘트 밀크의 흘러내림을 방지하기 위한 목적이다.

실험모형은 총 4단의 네일로 구성되며, 각단 중앙부에 500 kgf 용량의 하중계가 네일두부로 결속되면서 네일축력을 측정할 수 있도록 고안되었다. 또한 네일-네일 간 벽체변위를 측정할 수 있도록 심도별로 다이얼게이지가 4개소에 부착되었다. 이때 벽체로부터 상재하중은 1,000 mm×700 mm의 공기 가압판을 이용하였으며, 하

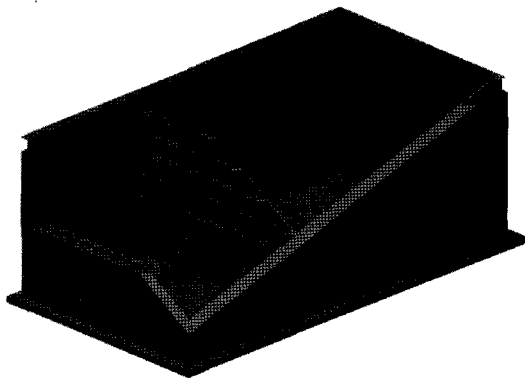


Fig. 4. Schematic drawing of soil test box in model test

중속도는 1 tf/min이다.

한편, 선단 확장형 네일의 효과를 입증하기 위해 일반적인 소일네일링과 동일한 조건으로 모형실험을 수행하였으며 그 개요도는 Fig. 5과 같고, Table 3은 실험순서를 나타낸 것이다.

일반적인 소일네일링은 네일만 삽입하나 선단 확장식 네일링은 썰기형 몸체를 직경 4 mm의 스테인레스 강봉 선단에 부착하여 삽입한 다음 외부에서 수동으로 Collar를 펼쳐지게 하였다. 이때 삽입되는 네일의 길이는 55 cm이며, 네일의 변형거동을 알기 위해 Fig. 6과 같은 네일 배열에서 중앙부 옆에 변형율게이지를 벽체로부터 3.0 cm, 10.5 cm, 18.0 cm, 25.5 cm, 40.5 cm, 48.0 cm의 등간격으로 7개소 설치하였다. 또한 네일이 삽입된 후 시멘트 밀크로 그라우팅을 실시한다. 이때 시멘트 밀크는 물 : 시멘트 = 1 : 1 비율이고 빠른 양생을 위해 조강용 혼화제를 2% 사용하였다.

한편, 네일의 인발저항을 측정하기 위하여 두가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 네일 두부의 하중계 및 인장기 등의 자중에 의해 네일의 처짐이 일부 발생하는 것을 방지하기 위해 모형지반을 완성한 후 상부에서 수직으로 네일링을 설치하고 인발시험을 실시하였다. 두 번째 방법은 지반심도에 따른 인발저항력을 알아보기 위해 Fig. 5과 같이 모형지반을 완성한 후 좌측에서 두 번째 열과 네 번째 열에 대하여 일반 소일네일링과 선단 확장식 소일네일링 실험을 수행하였으며, 그 전경을 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서 인발력은 수동유압 펌프를 이용하였으며, 다이얼게이지를 통해 일정한 변위

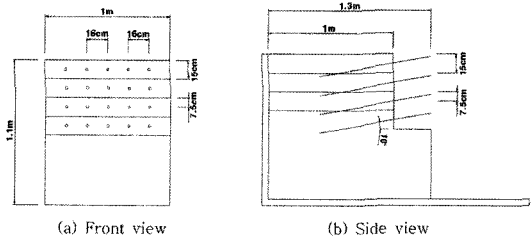


Fig. 5. Configuration of model test.

Table 2. Summary of model test.

Soil type	CL, compaction every 10 m
Nail type	Stainless bar of 55 cm length & 4mm diameter
Material of front wall	Acrylic plate of 2 mm thick
Measurement of nail axial force	Load cell having 500 kgf capacity
Measurement of wall displacement	Dial gage
Loading apparatus	Air pressure having 20 tonf capacity
Loading plate	1,000 mm×700 mm

Table 3. Experimental procedure of model test.

Experimental order	Contents
1	통일분류법상 CL을 사용하고, 시험전 흙의 기본적인 물성실험 실시
2	토조 바닥면부터 10cm씩 소형 진동다짐기를 이용하여 층다짐을 실시
3	모형지반의 조성 후 상단에서부터 15cm 깊이로 1단계 굴착
4	연성벽체 형성을 위해 슛크리트 대응으로 두께 2mm의 아크릴판을 부착
5	수직 및 수평이동이 가능한 특수 제작 천공기를 이용하여 네일이 설치될 지점까지 직경 20mm로 천공
6	천공홀의 청소
7	변형을 게이지가 부착된 네일의 삽입
8	시멘트 밀크 그라우팅
9	최종 굴착면까지 (4)-(8)의 과정을 반복
10	각종 게이지 및 상재하중 재하장치 설치
11	파괴 발생시까지 하중을 점진적으로 재하

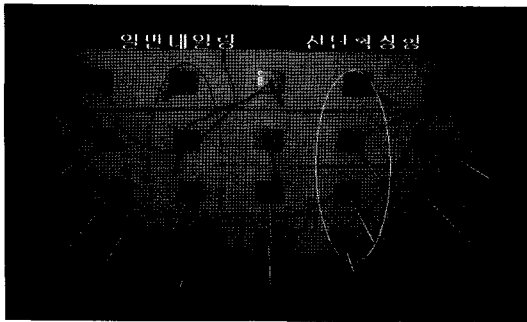


Fig. 6. View of nail arrangement for pull-out test.

값에 따라 하중계에서 인발력을 측정하였다. 이때 인발력은 0.1 tf/min을 적용하였다.

실험결과 분석 및 토의

인발시험

소일네일의 인발시험으로부터 최대인발력(T_{max})을 산정할 수 있으며, 인발-변형 관계로부터 식 (3)와 같이 소일네일과 흙 사이에서 유발되는 주면마찰력 등의 상호관계를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 소일네일과 흙 사이 주면마찰력의 관계는 두개의 선형법칙에 근거하여 탄성 및 소성한계로 분리하여 규명하였다. 두개의 선형과 관련하여 초기기울기의 직선과 초기기울기(k_p)의 1/5 직선이 최대주면마찰력($q_{s,max}$)의 1, 2 지점에서 교차하며 (Fig. 7), 초기기울기의 직선범위내에서는 탄성거동을 보인다고 밝힌 바 있다(박시삼, 2003).

$$q_s = \frac{T}{\rho L_s} \quad (3)$$

여기서, T 는 네일의 인발력(kgf), ρ 는 네일의 주변장($=\pi D$, cm), L_s 는 네일의 길이(m), 그리고 q_s 는 주면마

찰력(kgf/cm²)을 나타낸다.

일반 소일네일링과 선단 확장식 소일네일링의 모형인 발실험 결과를 Fig. 7과 같이 두 개의 선형법칙을 적용하여 도기한 결과 탄성한계변위(y_1 및 y_1')의 5배에 해당하는 소성한계변위($6y_1$, $6y_1'$)에서 최대주면마찰력이 발휘되는 것으로 나타났으나, 실험에 의한 곡선은 제안한 방법에 비해 소성영역에서 작은 변위를 보이며 그 경향은 유사한 형태를 보이고 있고, 인발거동특성이 소성영역에서 보다 양호한 것으로 평가되었다. 선단 확장식 네일의 경우 탄성한계범위내에서 발휘되는 주면마찰력($q_s/2$)은 0.17 kgf/cm²이며, 인발하중으로 환산하면 64 kgf가 된다. 일반 소일네일의 경우는 0.13 kgf/cm²이고 인발하중으로 환산하면 49 kgf가 되므로, 선단 확장식 네일이 일반 네일에 비해 30% 정도 주면마찰력이 증가하는 효과를 확인할 수 있었다. 두 가지 인발저항값을 변위와 비교하였을 때 선단 확장식 네일이 일반 네일에 비해 기울기가 크게 나타났는데, 이것은 선단에서 흙이 확장됨에 따라 그만큼 지반의 저항이 가미된 것으로 생각되며, 인발저항력 역시 증가하는 원인이라고 할 수 있다.

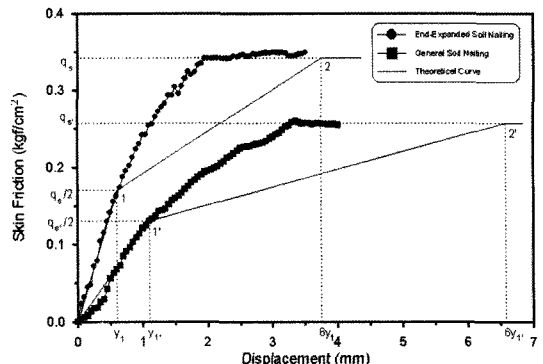


Fig. 7. Curves of skin friction vs. displacement.

한편, 인발시험시 네일에 작용하는 인발하중의 분포를 알기 위해 벽면으로부터 네일에 3.0 cm, 10.5 cm, 18.0 cm, 25.5 cm, 33.0 cm, 40.5 cm, 48.0 cm에 변형율계를 부착하고 측정된 값을 인발력에 따라 나타내면 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. 일반 및 선단 확장식 네일 모두 인발하중 증가에 따른 변형율 값은 소일 네일 두부에서 최대이고 선단으로 갈수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 네일이 그라우트체와 완전히 부착되어 있기 때문에 인발시 보강 네일체 주면에 발생하는 마찰력 증가에 의해 네일 두부에서 가장 크게 인발하중을 받는 것으로 여겨진다.

일반 소일네일의 경우 인발하중에 따라 변형율값은 다소 불룩한 형태로 거의 직선적으로 감소하나, 선단 확장식 네일은 약간 오목한 형태로 감소하였다. 또한 동일한 인발하중에서 보면, 소일네일 두부에서는 일반 네일의 변형율 값이 선단 확장식 네일에 비해 크게 나타났으나, 선단으로 갈수록 일반 네일에 비해 선단 확장식 네일의 변형율값이 크게 측정되었다. 즉 변형율 게이지가 부착된 위치의 길이로 볼 때 일반 네일링은 다소 급

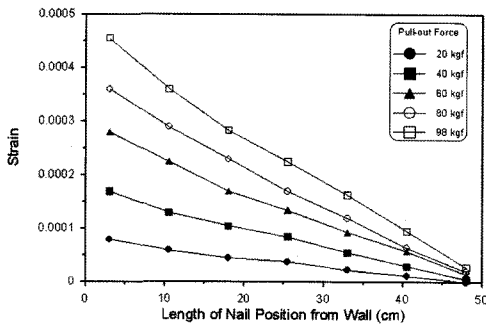


Fig. 8. Variation of strain at each position of nail in general soil nailing.

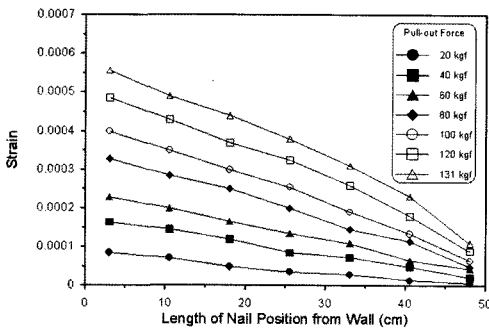


Fig. 9. Variation of strain at each position of nail in end-expanded soil nailing.

한 경사를 보이는 반면, 선단 확장식 네일링은 완만한 경사를 이루고 있다. 이것은 선단 확장식 네일링이 선단부의 저항으로 일반 네일링에 비해 네일에 작용하는 하중 분산도가 큰 것으로 생각할 수 있다. 이 실험결과로부터 확장식 네일이 일반 네일에 비해 네일 전 연장에 걸쳐 인발하중을 효과적으로 부담하는 것을 확인하였다.

한편 심도에 따른 네일의 인발저항력을 확인하기 위하여 토체의 각 층에서 1개의 네일에 대하여 인발시험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 이때 인발저항력은 탄성한계내에서 발휘되는 주면마찰력으로 구하였다.

위 그림에서 일반 소일네일링의 주면마찰력의 평균값은 52.25 kgf이고 선단 확장식은 67 kgf이므로 28% 정도 큰 값을 나타낸다. 일반 소일네일링에 의한 인발저항력은 심도에 따라 약간 증가되는 경향을 보이고 있으나 그 변화는 미소하였다. 이것은 네일링 설치를 위해 천공작업시 천공비트에 의해 천공홀이 이루어져 심도에 따른 지반의 연직 및 수평토폰의 저항을 받지 못하고 시멘트 그라우팅면과 공벽과의 마찰력에만 기인하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 선단 확장식은 심도에 따라 인발저항력이 일반 소일네일에 비해 보다 증가된 형태를 보이고 있는데, 이것 역시 일반 소일네일과 마찬가지로 천공작업시 천공홀 주변의 이완이 발생하나 네일 선단부가 확장됨에 따라 일정수준까지는 확장된 부위만큼 지반파괴시 토압이 일부 저항력으로 작용하기 때문인 것으로 추정된다.

보강토체의 변형

상재하중에 따른 네일 위치에 따른 보강토체 벽면의 수평변위와 벽면 수평변위와 하중과의 관계를 나타내면 각각 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다. 토체의 파괴시 상재

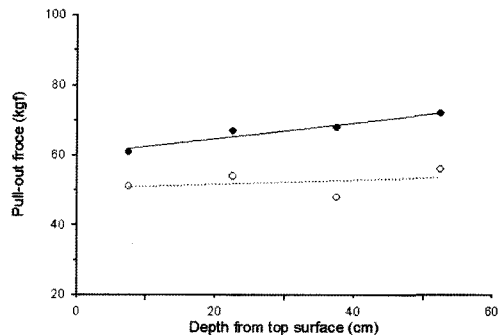


Fig. 10. Pull-out force of nail at each depth.

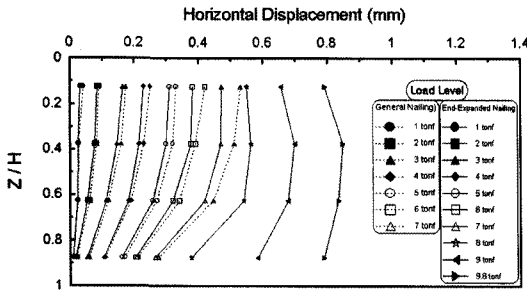


Fig. 11. Horizontal displacement of wall at nail position from top surface.

하중은 일반 소일네일의 경우 7.1 tonf이고 선단 확장식은 9.6 tonf으로 35% 정도의 증가를 보였다. 두 경우 모두 하중이 증가함에 따라 변위가 크게 발생하다가 일반 네일은 6 tonf, 선단 확장식은 8 tonf 정도 이후 그 증가폭이 크게 나타났다.

한편, 두 경우 모두 심도가 내려갈수록 변위가 작게 나타나며, 굴착면 상단 가까이에서는 보다 큰 변위값을 보이고 있다. Z/H=0.125에서는 선단 네일이 일반 네일에 비해 2.8~9.1%, Z/H=0.375는 2.5~6.3%, Z/H=0.625

는 1.0~4.4%, Z/H=0.875는 1.2~2.8%의 차이를 보이고 있다. 또한 하중이 증가할수록 심도가 낮은 곳에서는 선단 네일이 일반 네일에 비해 변위값의 변화폭이 크며, 하부로 갈수록 변위값의 변화폭이 작아진다. 7 tonf 이후에서 하중이 증가할수록 토체의 수평변위가 중간부분, 즉 Z/H=0.375와 0.625에서 다른 부분보다 증대폭이 크게 되어 배가 나온 형태로 변화되었다. 이 결과로 부터 일반 네일에 비하여 작은 변위 발생은 네일의 선단부가 확장되었기 때문에 상재하중에 의한 토압의 증가로 네일 선단부에서 지반의 저항을 보다 크게 받기 때문인 것으로 여겨진다.

축력

벽체 전면부에서 네일에 작용하는 축력을 나타내면 Fig. 13과 같다. 선단 확장식 네일은 상재하중이 7 tonf 정도까지는 축력이 비교적 작게 발생하다가 그 이후에서 급격한 증가를 보였으며, 일반 네일의 경우 5 tonf 이후에서 급격히 증가하였다. 네일 위치별 축력의 변화는 선단 확장식의 경우 최하단부에 설치된 네일을 제외하고는 거의 유사한 특징을 보이고 있으며, 일반 네일은

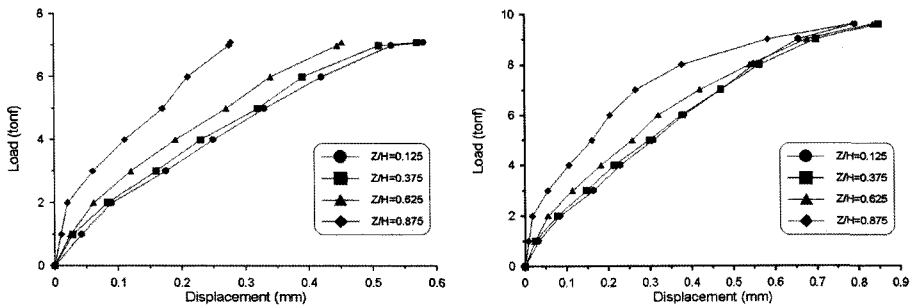


Fig. 12. Relationship between axial load and horizontal displacement of wall.

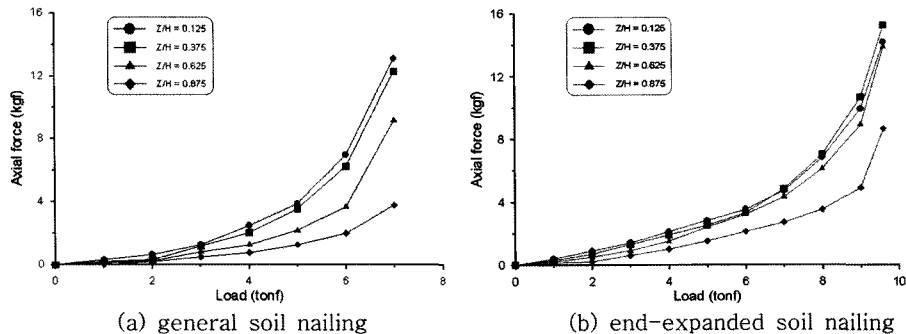


Fig. 13. Variation of axial force of nail at wall.

Z/H = 0.625와 0.875를 제외하고는 유사한 특징을 보이고 있으나, 전체적으로 유사한 축력거동을 보이고 있다. 네일 위치별 축력의 분포로 볼 때 선단 확장식이 일반 네일에 비하여 그 변화 폭이 작기 때문에 골고루 벽체에 하중이 분포하여 보다 양호한 보강이 이루어진 것으로 보인다.

축인장 변형률

일반적으로 설치된 각각의 네일에서 발휘되는 최대마찰력 Tmax를 연결한 곡선은 가상파괴면과 동일하게 간주될 수 있으며, Coulomb의 직선파괴형태와는 다소 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 상재하중에 따른 네일의 축인장 변형률을 나타내면 Fig. 14와 같다. 파괴시점으로 판단되는 일반 소일네일의 상재하중 7.1 tonf, 선단 확장식 네일의 상재하중 9.6 tonf에 대하여 축인장 변형률에 의한 가상파괴면은 직접전단시험에서 구한 최대응력 기준의 내부마찰각을 사용한 45°+φ/2선과 유사한 경향을 보이고 있으나, 두 값 모두 대수나선 형태를 보인다.

한편, 최대 축인장 변형률선은 일반 네일의 경우 45°+φ/2 선 내측에 위치하고 선단 확장식은 45°+φ/2 선 외측에 위치하고 있는 것으로 나타났다. 소일네일링 보강시 예상 파괴선은 45°+φ/2 선의 외측에 위치하는 것이 일반적으로 알려져 있으나 본 연구의 모형실험시 상재하중을 가한 범위와 관련이 있는 것으로 보이며, 보다

많은 실험적 연구가 필요한 것으로 사료된다. 선단 확장식 네일의 가상 파괴면이 일반 네일에 비해 벽체에서 먼 거리에 위치하고 있는데, 이것은 네일의 선단이 확장됨으로써 네일의 강성이 큰 쪽으로 활동면이 이동하는 것으로 추측된다. 따라서 일반 네일에 비하여 선단 확장식 네일의 가상 파괴면이 작은 경사를 갖는 것을 의미하므로 안전을 측면에서 보다 나은 결과가 예상된다.

결론

본 연구에서는 선단 확장식 소일네일링의 효과를 입증하기 위해 1/5배로 축소된 네일로 모형토조지만 조성 후 실내실험을 수행하였으며, 일반적인 소일네일링과 상호비교를 통하여 나타난 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 인발력 시험결과 탄성한계 내에서 발휘되는 주면 마찰력은 일반적인 소일네일링은 0.13 kgf/cm²이고 선단 확장식은 0.17 kgf/cm²으로 약 23% 정도 큰 값을 보였다. 또한 네일의 변형상태는 두 경우 모두 네일 선단으로 갈수록 감소하나, 선단 확장식이 일반 네일에 비하여 선단에서 큰 변형을 나타내므로, 선단에서 외부하중에 크게 저항하는 것으로 생각할 수 있다.
- 2) 일반 네일링에 비하여 선단 확장식 네일링의 벽체 수평변위가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 그 차이는 1.2~9.1% 정도이고 상재하중이 증가할수록 변위 폭은

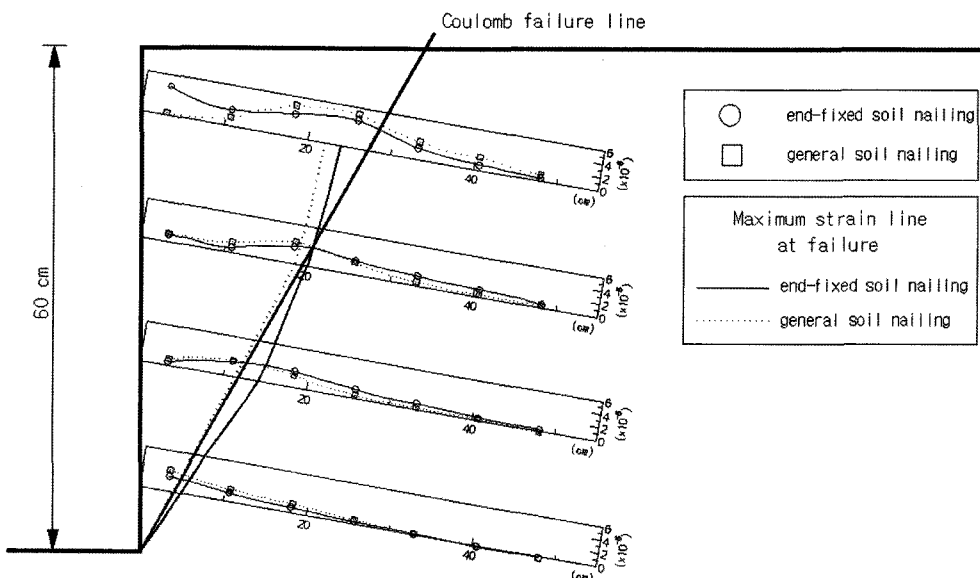


Fig. 14. Axial tensile strain at each position of nail.

점차 증가하였다.

3) 벽체 전면부에서 네일에 작용하는 축력은 선단 확장식이 상재하중의 크기가 7 tonf까지는 비교적 작게 발생하며 7 tonf 이후에서 급격한 증가를 보였으나, 일반 네일링의 경우는 5 tonf 이후에서 축력이 크게 증가하였다.

4) 네일의 축인장 변형율은 최대강도 기준의 내부마찰각을 사용한 45°+φ/2선과 유사한 경향을 보이고 있으나, 선단 확장식은 예상 파괴선이 일반 네일링에 비하여 벽체에서 먼거리에 위치하고 있으므로 안전율 측면에서 더 나은 결과가 예상된다.

이상과 같이 실내모형실험을 통하여 선단 확장식 소일네일링 공법의 경우가 일반적인 소일네일링 공법에 비해 보강효과면에서 우수한 방법임을 인발시험, 수평변위, 축력 및 축인장 변형율 등을 통하여 입증하였으나, 실내 모형실험의 한계가 있으므로 신뢰성있는 설계에 적용하기 위해서는 다양한 지반조건과 실대형 규모의 현장실험이 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 강원대학교 “2005년도 방재분야 중점특성화 연구개발” 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

김중수, 최혁, 진진규, 이송, 2001, 쏘일 네일링을 이용한 굴착토류벽의 거동 분석, 한국지반환경공학회 논문집, 제2권 제2호, pp. 23-32.
 김준석, 이상덕, 이승래, 2001, 앵카형태의 지반네일로 보강된 흙구조물의 보강효과에 관한 실험적연구, 제17

권 제2호, pp. 103-111.
 김홍택, 강인규, 권영호, 김찬동, 2002, 압력분사 그라우팅 쏘일네일의 유효경 평가와 실내모형실험, 토목공학회 논문집, 제22권 제2-C호, pp. 121-131.
 박시삼, 2003, 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 적용성 및 안정해석에 관한 연구, 홍익대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 44-45.
 박시삼, 김홍택, 정성필, 박성철, 2003, 스킵어럴 파이프 네일링 시스템의 적용성 및 휨강성을 고려한 안정성에 관한 고찰, Korean Environmental Society, Conf., pp. 241-248.
 임종철, 고희성, 박이근, 오명렬, 2000, 토사NATM 터널의 네일 보강에 의한 지반침하 억제효과에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 제16권 제2호, pp.51-59.
 Bang, S. and Yeon, H., 1990, Analysis of retaining structures with skew reinforcements, Transportation Research Record, No. 1288.
 Cheng, S. S. and Hansen, L. A., 1994, Design construction and performance of a soil nailed wall in Puerto Rico, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 42, pp. 1-16.
 Schlosser, F., Unterreiner, P. and Plumelle, C., 1992, French research pro CLOUTERRE on soil nailing, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 12, Vol. 2, pp. 739-750.
 Schlosser, F., 1993, Recommendations Clouterre/Soil Nailing Recommendations, French National Research Project Report No. FHWA-SA-93-026.
 Shen, C. K., Bang, S. and Herrmann, L. R., 1981, Ground movement analysis of an earth support system, J. of the Geotech. Engg., ASCE, Vol. 107, pp. 1609-1624.
 Stocker, M. F. and Riedinger, G., 1990, The bearing behavior of nailed retaining structures, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 25, pp. 612-628.

2007년 11월 7일 원고접수, 2007년 12월 13일 게재승인

이상은

강원대학교 에너지자원공학과
245-711, 강원도 삼척시 중앙로 1가
Tel: 033-570-6306
Fax: 033-573-6317
E-mail: lee9367@kangwon.ac.kr

장윤호

강원대학교 에너지자원공학과
245-711, 강원도 삼척시 중앙로 1가
Tel: 033-570-6313
Fax: 033-573-6317
E-mail: yhjjang@kangwon.ac.kr

문창열

강원대학교 토목공학과
245-711, 강원도 삼척시 중앙로 1가
Tel: 033-570-6507
Fax: 033-570-6505
E-mail: moonyeul@kangwon.ac.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749, 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr

박영선

하남기술산업주식회사
서울 송파구 문정동 20-14
Tel: 02-403-3801
Fax: 02-403-3804
E-mail: sso7601@hotmail.com