

## 지반네일보강토체 전면부에서 노출된 지반네일의 연직 방향 연결에 의한 보강효과

### Reinforced Effects of Soil-nailed Structures by a Vertical Coupling of a Exposed Nail at a Front

김 준 석<sup>1\*</sup> Kim, Joon-Seok

#### ABSTRACT

The soil nailing method have been developed on the basis of experimental works as well as theoretical backgrounds. As for the experimental research works, most of the data have been measured during the application of load in service. However, not only the soil-nailed structure behavior in service but also the failure behavior of the structure are the major concerns to evaluate and even establish a design method of soil-nailed walls. In this paper for the apprehension of behavior in the soil-nailed structure which the front of nail is connected, a relatively large-scale experiment was carried out to figure out the failure behavior of soil-nailed wall. A number of data have been acquired and analysis.

#### 요 지

지반네일 보강방법은 이론적 뒷받침과 함께 경험적인 작업을 기초로 발전되어 왔다. 경험적인 연구 작업에서 대부분의 자료가 실질적으로 사용되는 하중 조건에서 계측 되어 왔다. 그러나, 지반네일 보강토체에 대한 사용 하중 내에서의 거동 뿐 아니라 구조물의 파괴 거동도 설계방법의 확립과 계산에 중요한 대상이 된다. 본 논문에서는 굴착전면부에 노출된 보강재를 서로 연결했을 때 거동에 미치는 보강토체의 거동을 이해하기 위하여 비교적 큰 규모의 실험을 실시하여 분석하였다.

**Keywords** : Soil nailing, Soil-nailed structures, Soil-nailed wall, Large scale experiment, Reinforced earth wall

#### 1. 서 론

절토사면에 대한 경사면 안정화 방법 중에 하나인 지반네일 보강공법(soil nailing method)은 성토사면의 보강토공법과 함께 최근 중요한 사면보강공법으로 적용되고 있다. 지반네일 보강공법은 붕괴의 위험성이 큰 자연사면이나 굴착에 의한 인공사면의 안정성을 향상시키기 위하여 인장응력, 전단응력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 지반네일 보강재를 프리스트레싱 없이 촘촘한 간격으로 삽입함으로써 원지반의 전체적인 전단강도의 증대 및 발생변위를 억제하여 굴착공사 도중 및 완료 후 사면파괴에 대한 안정성을 향상시키는 지반 보강공법이다(Thompson et al.,

1990; Michell, 1992). 임시 또는 영구목적의 토류 구조물에 대한 지반네일공법의 성공적인 적용과 함께 해석 및 설계에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 극한상태에서의 힘평형조건을 이용한 Bang et al.(1992)의 설계방법, 보강재의 휨, 전단, 인장응력 및 인발저항력을 종합적으로 고려한 Schlosser et al.(1992)의 설계방법, 실험적 결과를 바탕으로 제안된 Stocker et al.(1990)의 설계방법, 변형기하학적 개념을 도입한 Juran et al.(1990, 1992)의 설계방법 등 다양한 제안이 있으나, 네일보강재 설치 후에 굴착전면부(face)의 보강이 전체거동에 미치는 영향에 대한 연구와 적용은 비교적 미미한 실정이다. 즉, 지반네일 보강공법의 적용에 있어서 절토부 전면부분의 보강에 따른 효과에 대

<sup>1\*</sup> 정회원, 청운대학교 철도행정토목학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungwoon Univ., E-mail: jskim@chungwoon.ac.kr)

한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 실물 규모의 효과를 얻을 수 있는 비교적 큰 규모의 실험용 전면부 지반네일 연직방향 연결 토체를 제작한 후 상재하중을 가하여 파괴시키면서 토체의 수평 및 수직변위를 계측하였으며, 계측된 자료는 전면부를 보강하지 않은 동일한 조건의 실험결과(김준석 등, 1997)와 비교하였다. 비교를 통하여 전면부 보강 지반네일 토체의 거동을 분석하였다.

## 2. 실험방법, 장치 및 재료

### 2.1 실험방법

본 연구에서 실험용 토체는 지반네일의 연직 보강을 4개 층으로 하고, 각각의 층마다 4개의 지반네일을 설치하여 총 16개(4×4)의 네일을 갖는 보강토체를 제작하였다. 지반네일의 수평, 수직 간격은 0.5m로 하였다.

실험용 토체가 실제 상황과 가장 유사하도록 하기 위하여 대형토조에서 모래지반을 균질하게 조성한 후 실제 시공과 동일한 순서로 지반네일 보강토체를 제작하였다. 즉 상부에서 부터 굴착-전면처리-네일설치-굴착의 순서인 Top-down 방식으로 실시하였으며 굴착된 전면부의 처리는 실제 시공에서는 슛크리트(shotcrete)를 일반적으로 사용하지만, 본 실험에서는 합판을 사용하여 매층별로 전면부에 부착하였다. 전면부 슛크리트의 기능이 전면부 표면의 부분적인 파손을 방지하기 위함이므로 시험목적상 문제는 없을 것으로 사료된다.

보강토체가 제작된 후 C형강을 이용하여 토체 전면부에 노출된 네일을 연직방향으로 연결하여 보강하였다. 그림 1은 본 논문에서 수행한 실험의 개요도로서 네일의 설치와 하중재하의 개념을 나타내고 있다. 그림 2는 실제로

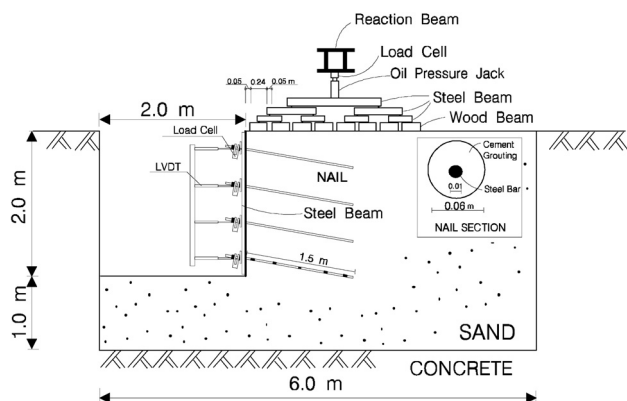


그림 1. 실험토체 단면도

실험하는 장면으로서 토체 전면부에 노출된 네일이 연직 방향으로 연결된 것을 확인할 수 있다.

실험용 토체가 완성된 후 피라미드 형태의 재하장치를 이용하여 상재하중을 가하면서 토체의 거동을 계측하였다.

### 2.2 실험장치

#### 2.2.1 토조

본 논문에서는 대형토조(높이 3m×폭 6m×길이 6m)를 3등분하여 높이 3m, 폭 2m, 길이 6m의 토조로 개조하여 이용하였다. 실험에 사용된 토조는 자연 지반을 굴착하여 만들었으며 200ton 까지 재하할 수 있는 반력장치가 설치되어 있다. 그림 3에서 토체의 전면부에 노출된 네일을 C



그림 2. 실험토체 모습

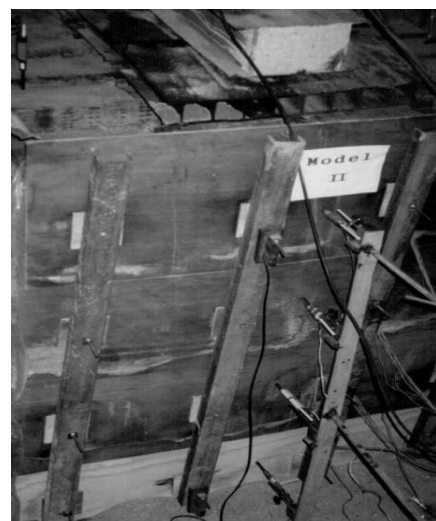


그림 3. 실험토체 전면

형강이 설치되어 있으며 토체의 중앙위치에 수평변위 측정장치가 설치되어 있다.

토조를 이용한 모형실험에서 모형지반과 현장지반의 가장 큰 차이인 경계효과(boundary effect)를 최소화 해야한다. 경계효과는 실험대상에 따라 고려하는 방법이 달라지게 된다. 일반적으로 토조실험에서는 수평, 수직 응력과 변형률에 따라 4가지의 서로다른 경계조건을 설정할 수 있으며 경계조건에 따라 실험결과가 크게 달라지게 된다(Byrne, 1992).

본 실험에서는 토조의 양측면 벽체에 물로 반죽된 벤토나이트를 2cm 두께로 입히고 비닐로 덮어서 토체가 앞으로 미끄러질때 측면 마찰력의 영향이 최소화 되도록 했으며, 측면방향의 수평변위는 완전히 억제되도록 하였다(그림 4).

### 2.2.2 하중 재하장치

실험토체가 완성된 후에 토체의 상부에 균등한 상재하중을 가하기 위하여 그림 5와 같은 구조의 피라미드 형태의 재하장치를 설치하였다. 재하장치의 최하단은 하중의 균등한 분포를 위하여 연성인 침목을 이용하였고 나머지 부분은 강재를 이용하였다. 재하장치의 최상단에 오일잭

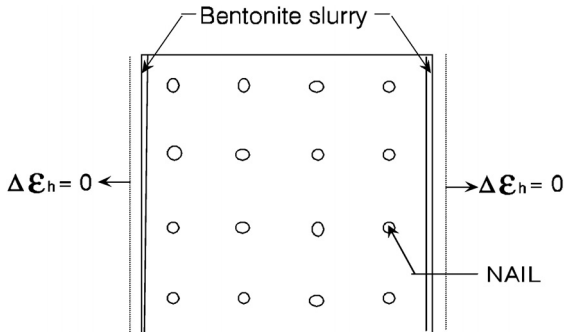


그림 4. 토조의 경계조건

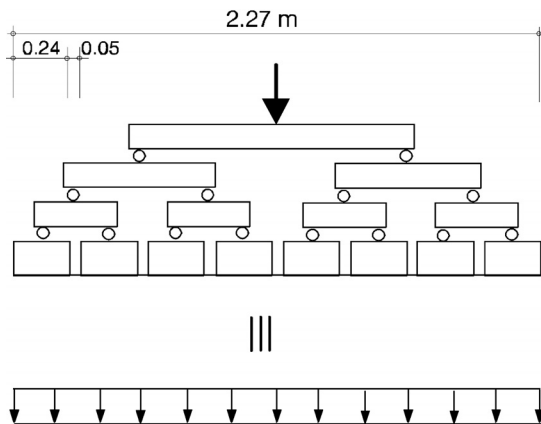


그림 5. 하중 재하장치 개념도

(200ton 급 사용)을 설치하여 하중을 가하면, 하중은 하단으로 전달되면서 등분포되어 최하단에 균등하게 전달된다. 오일잭의 하중은 검력계를 설치하여 조절하였다.

### 2.2.3 계측장치

보강토체의 거동을 계측하기 위하여 변위 측정계를 설치하였다. 지반네일 공법에서는 제작과정에서 발생하는 초기변위를 허용하기 때문에 토체 제작 완료 시점에서 이미 초기변형이 발생되지만 본 논문에서는 토체제작 이후에 설치되는 전면부 네일의 보강효과를 연구하기 위한 것이므로 수평변위측정장치의 초기치 설정 시점은 보강토체 제작 완료 후 재하시험 실시 직전을 초기치로 하였다.

보강토체 외부의 변위를 계측하기 위하여 변위 측정계(LVDT)를 보강토체 전면부에 부착된 4개의 전면판 중심(아래에서 부터 0.25m, 0.75m, 1.25m, 1.75m)에 각각 1개씩 4개와 상부면의 앞에서 부터 0.17m, 0.75m, 1.64m 에 각각 1개씩 3개를 설치하였다.

## 2.3 실험재료

### 2.3.1 토체

실험용 토체를 조성하기 위한 재료로서 남양만에서 채취한 바다모래를 사용하였다. 토체의 제작 방법은 굴삭기를 사용하여 토조 외부에 쌓아둔 모래를 떨어뜨리지 않고 살며시 내려놓는 방법으로 30cm를 쌓아 올린 후에 갈퀴로 교란시켜 낙하에너지의 영향을 없앤 다음 진동다짐기로 5회씩 다짐하였다. 토체 조성 후 들밀도시험을 실시하였으며 평균 건조단위중량은  $\gamma_d = 1.51t/m^3$ 이었다.

모래시료의 강도정수는 실험토체의 평균건조 단위중량인  $\gamma_d = 1.51t/m^3$ 를 기준으로 직접전단 시험을 실시한 결과 최대강도 기준으로  $\phi_p = 39.4^\circ$ , 잔류강도 기준으로  $\phi_r = 34.7^\circ$ , 점착력  $C=0$  를 얻었다. 모래 시료의 입도분포는 그림 6 과 같으며, 함수비는 시험전 6.0%, 시험후 5.1%이었다.

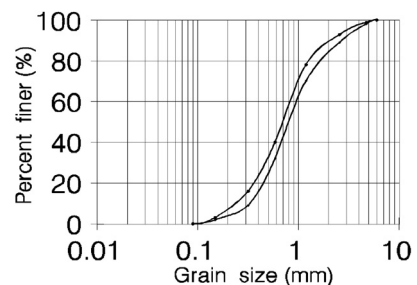


그림 6. 실험용 모래의 입도분포 곡선

### 2.3.2 지반네일

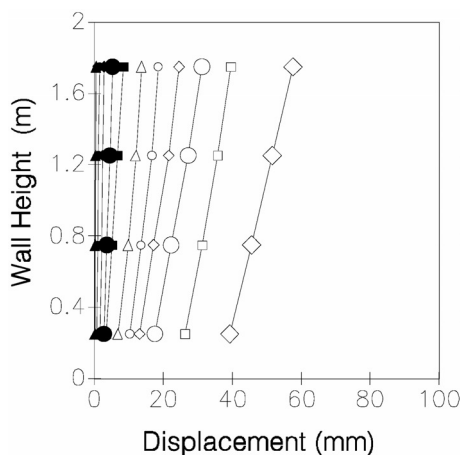
지반네일은 보강철근과 철근주변을 감싸고 있는 시멘트 그라우팅으로 구성되어 있다(그림 1). 지반네일의 제작은 현장타설(in-situ)로 제작되었다. 지반네일을 제작하기 위한 천공장치는 핸드오거와 지지대로 구성되었다. 천공 방법은 핸드오거를 지지대에 장착하여 굴착지점에 설치한 후, 지지대의 각도를 조절하여 고정된 다음 핸드오거를 천천히 회전시키며 인력으로 굴착하였다. 천공 후에 스페이서가 부착된 보강철근을 삽입한 후 중력을 이용하여 시멘트 몰탈을 이용한 그라우팅을 하였다. 천공도중과 천공 후에 모래 붓괴를 방지하기 위하여 토체의 모래가 완전히 건조되지 않도록 함수비를 유지하였다. 또한 몰탈 주입은 호스가 연결된 통안에 몰탈을 채운 후 호스를 천공된 네일 구멍 안쪽으로 삽입한 후 통을 높게 함으로서 중력에 의해 몰탈이 흘러 내릴 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 보강철근을 직경 10mm의 이형철근을 사용하였고, 전면부와 연결을 위하여 보강철근 앞부분에 직경 10mm의 볼트봉을 전기용접으로 부착하였다. 네일로 사용된 이형철근의 공학적 성질은 표 1과 같으며, 그라우팅을 실시한 후 강도발현이 목표치에 달하는데 48시간이 되도록 물/시멘트비 45%, 혼화재 1%로 사용량을 조절하였다.

토체가 완성된 후 토체 전면부에 노출된 네일을 연직방향으로 C형강을 이용하여 연결 보강하였다(그림 2).

표 1. 실험용 지반네일의 제원

직 경	탄성계수(E)	인장강도	용접부분강도
10mm 이형철근	$2.02 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	$5.86 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	$2.67 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$



(a) 토체전면벽체 높이와 수평변형

### 3. 실험결과 및 분석

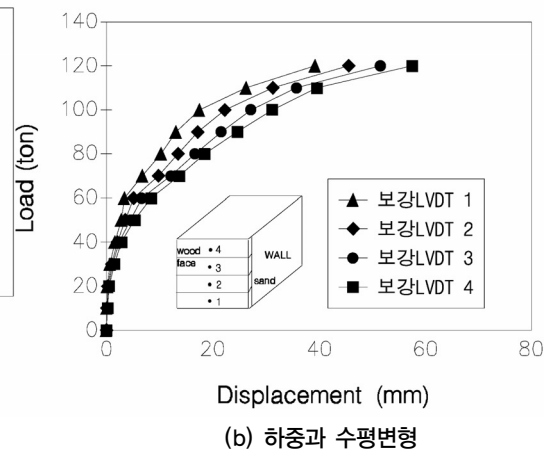
피라미드 형태의 재하장치 상부에 유압잭을 이용하여 집중하중을 10ton씩 증가시키면서 가해진 집중하중은 재하장치에 의하여 분산되어 보강토체의 상부면에  $2.2\text{t/m}^2$ 의 상재하중으로 균등하게 분포된다. 집중하중을 10ton씩 증가시키면서 토체전면의 수평변위, 토체상부면의 수직변위 등을 분석하였다.

#### 3.1 보강토체의 전면부의 수평변형

상재하중의 증가에 따르는 보강토체 전면의 수평변형량을 동일한 조건에서 실험한 전면부 네일을 연직방향으로 연결한 경우와 연결하지 않은 경우의 결과를 각각 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

동일한 조건에서 상재하중 증가에 따르는 수평변형은 전면부의 네일을 연직 방향으로 연결한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 작게 발생하며 변형의 형태도 직선적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 토체 전면부의 상부와 하부의 변형차가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 즉 네일 전면부에서 돌출된 네일을 연직방향으로 연결하여 보강한 경우 그렇지 않은 경우에 비하여 상재하중에 대한 저항 효과가 큰 것으로 나타났다. 극한 파괴하중은 보강의 경우가 110ton으로서 보강하지 않은 경우의 100ton에 비해 약 10% 정도의 증가효과가 있는 것으로 나타났다.

그림 8(b)의 무보강 LVDT1의 수평변형이 그림 7(b)의 보강 LVDT1의 수평변형에 비해 작게 발생된 것은 무보강의 경우에는 토체 상부에서 상대적으로 큰 변형이 발생하



(b) 하중과 수평변형

그림 7. 전면네일 연결 토체 전면부의 수평변형

면서 에너지를 흡수하여 최하단부의 변형이 상대적으로 작게 발생된 것으로 판단된다.

그림 9에서 20ton, 60ton, 100ton의 재하하중에 대한 각각의 보강상태와 무보강 상태에서의 전면 변형을 비교하였다. 20ton 재하시에는 큰 차이가 없었으나 60ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 8.4mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 9.8mm발생하여 16.7% 더 발생한 것으로 나타났다.

100ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 31.2mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 40.2mm발생하여 28.8% 더

발생한 것으로 나타났다. 따라서, 전면 네일의 수직연결 보강이 상재하중 증가에 대한 수평변형 억제에 도움이 되는 것으로 판단된다.

### 3.2 보강토체의 상부면의 연직변형

상재하중의 증가에 따르는 보강토체 상부면의 연직변형은 동일한 조건에서 실험한 전면부 네일을 연직방향으로 연결한 경우와 연결하지 않은 경우의 결과를 각각 그림 10과 그림 11에 비교하였다.

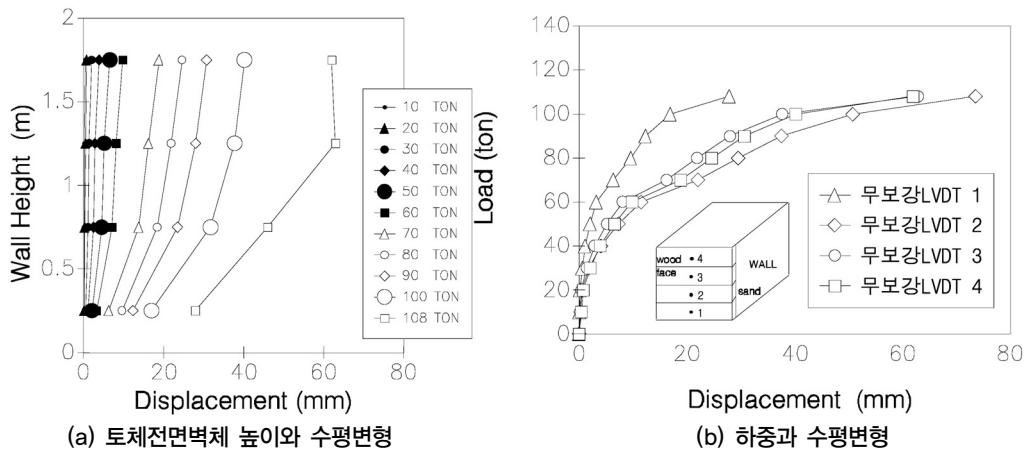


그림 8. 일반 네일 토체 전면부의 수평변형

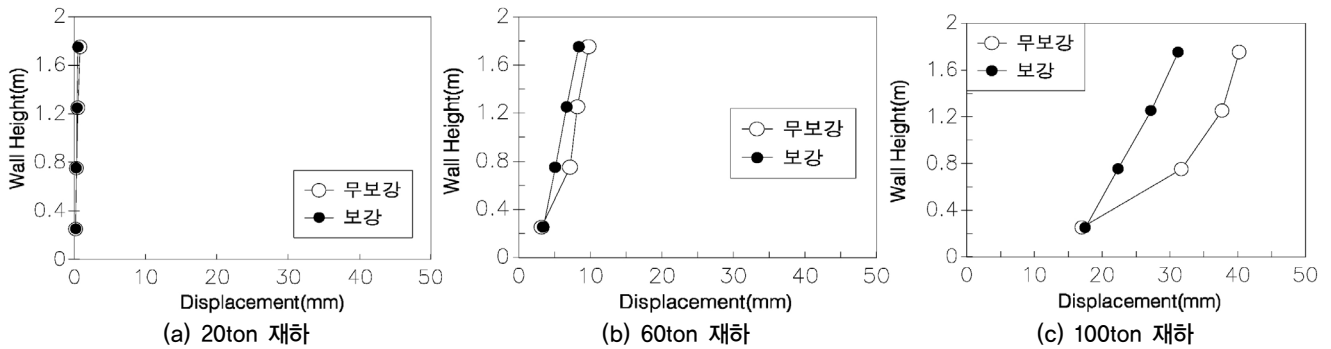


그림 9. 토체 전면부의 수평변형 비교

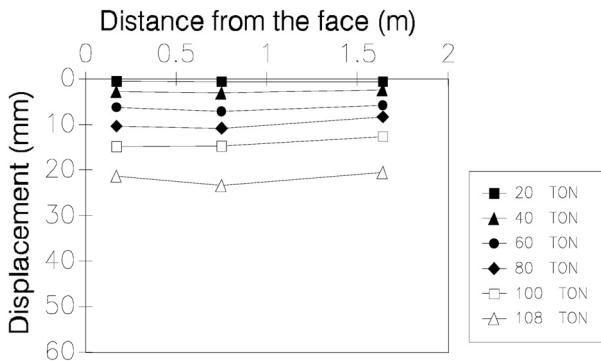


그림 10. 네일 연결 토체 상부면의 연직 변형

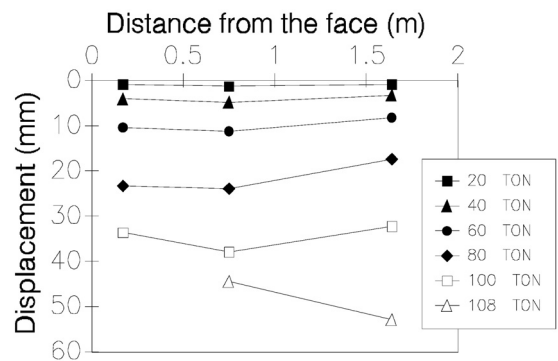


그림 11. 일반 네일 토체 상부면의 연직 변형

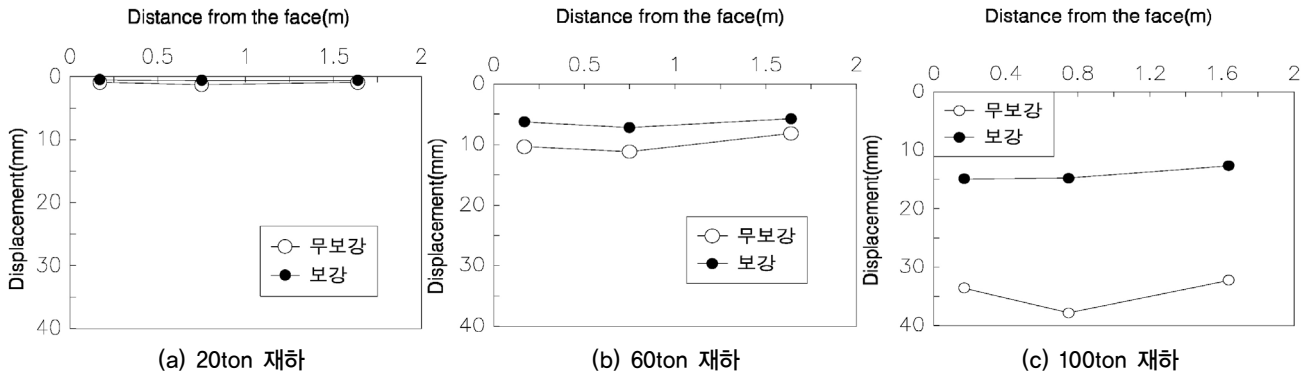


그림 12. 토체 전면부의 수평변형 비교

동일한 조건에서 상재하중 증가에 따르는 연직변형은 전면부의 네일을 연직 방향으로 연결한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 매우 작게 발생하였으므로 나타났다.

그림 12에서 20ton, 60ton, 100ton의 재하하중에 대한 각각의 보강상태와 무보강 상태에서의 상부면 연직변형을 비교하였다. 20ton 재하시에는 큰 차이가 없었으나 60ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 7.2mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 11.2mm 발생하여 55.6% 더 발생한 것으로 나타났다. 100ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 14.9mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 37.9mm 발생하여 2.5배 더 발생한 것으로 나타났다. 따라서, 전면 네일의 수직연결 보강이 상재하중 증가에 대한 토체의 연직변형 억제에 도움이 되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

지반네일 보강공법의 적용에 있어서 절토부 전면 부분의 보강에 따른 효과를 분석하기 위하여 실물 규모의 비교적 큰 규모의 실험을 실시하였다. 제작된 실험토체 전면부에서 네일을 연직방향으로 연결한 후 상재하중을 가하여 파괴시키면서 토체의 수평 및 수직변형을 측정하였다. 측정된 자료는 전면부를 보강하지 않은 동일한 조건의 실험 결과와 비교하였으며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수평 및 수직변형의 거동을 고찰한 결과 매우 점진적인 파괴거동을 보임을 알 수 있었다. 또한, 벽체 전면부의 높이에 따른 수평변형은 상재하중 증가에 따라 거의 직선적으로 변화하는 것을 알 수 있었다. 이것은 전면부를 보강하지 않은 동일한 조건의 실험

결과에서는 파괴시점에서 포물선 또는 대수나선형의 형태로 되는 것과 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

- (2) 동일한 조건에서 상재하중 증가에 따르는 수평변형은 전면부의 네일을 연직방향으로 연결한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 작게 발생하며 변형의 형태도 직선적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 토체 전면부의 상부와 하부의 변형차가 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
- (3) 20ton, 60ton, 100ton의 재하하중에 대한 각각의 보강상태와 무보강 상태에서의 전면 변형을 비교한 결과 20ton 재하시에는 큰 차이가 없었으나 60ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 8.4mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 9.8mm 발생하여 16.7% 더 발생한 것으로 나타났으며, 100ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 31.2mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 40.2mm 발생하여 28.8% 더 발생한 것으로 나타났다. 따라서, 전면 네일의 수직연결 보강이 상재하중 증가에 대한 수평변형 억제에 도움이 되는 것으로 판단된다.
- (4) 20ton, 60ton, 100ton의 재하하중에 대한 각각의 보강상태와 무보강 상태에서의 상부면 연직변형을 비교한 결과 20ton 재하시에는 큰 차이가 없었으나 60ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 7.2mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 11.2mm 발생하여 55.6% 더 발생한 것으로 나타났으며, 100ton 재하시에는 보강상태의 변형이 최대 14.9mm인 반면 무보강 상태에서는 최대 37.9mm 발생하여 2.5배 더 발생한 것으로 나타났다. 따라서, 전면 네일의 수직연결 보강이 상재하중 증가에 대한 토체의 연직변형

억제에 도움이 되는 것으로 판단된다.

- (4) 네일전면부에서 네일을 연직방향으로 연결하여 보강한 경우에 그렇지 않은 경우에 비하여 상재하중에 대한 저항 효과가 큰 것으로 나타났다. 극한 파괴하중은 보강의 경우가 110ton으로서 보강하지 않은 경우의 100ton에 비해 약 10% 정도의 증가효과가 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 청운대학교 2010년도 학술연구조성비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김준석, 이상덕, 이승래 (1997), “모래를 사용한 지반네일 구조물의 실험적연구”, *한국지반공학회논문집*, 제13권, 제2호, pp.91-100.
2. Bang, S. & Kroetch, P. & Shen, C.K (1992), “Analysis of soil nailing system”, *Proc. of the Inter. Symp. on Earth Reinfor-*
3. Byrne, R. J (1992), “Soil nailing: A simplified kinematic analysis”, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No.12, Vol.2, pp.751-763.
4. Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K. & Elias, V (1990), “Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.1, pp.54-73.
5. Juran, I. & Elias, V (1992), “Soil nailed retaining structures : Analysis of case histories”, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No.12, New York, pp.232-244.
6. Michell, J. K (1992), *Reinforcement of earth slopes and embankments*, NCHRP-290, Transportation Research Board.
7. Schlosser, f., Unterreiner, p. & Plumelle, C (1992), “French research program CLOUTERRE on soil nailing”, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No.12 Vol.2, pp.739-750.
8. Stocker, M. F. & Riedinger, G (1990), “The bearing behaviour of nailed retaining structures”, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No.25, New York, pp.612-628.
9. Thompson, S. R. & Miller, I. R (1990), “Design construction and performance of a soil nailed wall in Seattle Washington”, *ASCE Geotechnical Special publication*, No.25, New York, pp.629-643.

(논문접수일 2010. 10. 19, 심사완료일 2010. 11. 29)