

모래를 사용한 지반네일 구조물의 실험적 연구

An Experimental Study of Soil-nailed Structures in Sands

김 준 석*¹
Kim, Joon-Seok
이 상 덕*²
Lee, Sang-Duk
이 승 래*³
Lee, Seung-Rae

Abstract

The soil nailing method has 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 is major concern to evaluate and even establish a design method of soil-nailed walls. In this study, a relatively large-scale experiment was carried out to figure out the failure behavior of soil-nailed wall. A number of data such as displacement of soil-nailed walls, soil pressure in soil-nailed walls, axial strain and axial force of nail etc. 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 연구에서는 소일네일 보강토체의 파괴 거동을 이해하기 위하여 비교적 큰 규모의 실험을 실시하여 토체의 변위, 네일의 축변형률, 네일의 축하중, 토체내부의 토압 등에 관한 자료를 얻었으며 이러한 자료들을 분석하였다.

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

*¹ 정희원, 충남산업대학교 토목환경공학과 전임강사

*² 정희원, 아주대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*³ 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

1. 서론

급경사면의 안정화 방법은 여러가지 방법에서 시도되어 왔다. 특히, 성토사면에 대한 안정 및 보강방법은 시공, 설계기술, 건설재료의 발달과 더불어 급속히 발전하였으나 절토사면에 대해서는 절토하기 전의 원지반의 상태에 대한 정확한 이해가 사실상 어렵고 시공상의 어려움으로 비교적 서서히 발전되어 왔다.

절토사면에 대한 급경사면 안정화 방법중 하나인 지반네일 보강공법(soil nailing method)은 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.

임시 또는 영구목적의 토류 구조물에 대한 지반네일(soil nail)공법의 성공적인 적용과 함께 해석 및 설계에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 극한상태에서의 힘평형조건을 이용한 Shen과 Bang(1992)의 설계방법, 보강재의 휨, 전단, 인장응력 및 인발저항력을 종합적으로 고려한 Schlosser(1992)의 설계방법, 실험적 결과를 바탕으로 제안된 Stocker(1990)의 설계방법, 변형기하학적 개념을 도입한 Juran(1990)의 설계방법등 다양한 제안이 있으나, 개발된 해석 및 설계방법의 검증과 토체의 파괴거동에 관한 연구는 실제 적용된 구조물에 대한 계측 자료에 대부분 의존하고 있으며 실험적 연구를 통한 파괴 거동에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 실물 규모의 효과를 얻을 수 있는 비교적 큰 규모의 실험용 토체를 제작한 후 상재하중을 가하여 파괴시키면서 토체의 수평 및 수직변위, 지반네일에 발생된 축인장변형률, 벽체와 지반네일 사이의 축하중, 벽체 부근의 토압변화 등을 계측하여 지반네일

로 보강된 지반토체의 파괴 거동을 분석하였다.

2. 실험방법, 장치 및 재료

2.1 실험방법

본 연구에서 실험용 토체는 총4개 층으로 하고, 각각의 층마다 4개의 지반네일을 설치하여 총 16개(4×4)의 네일을 갖는 보강토체를 제작하였다. 지반네일의 수평, 수직 간격은 50cm로 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.

실험용 토체가 완성된 후 피라미드 형태의 재하장치(그림 3)를 이용하여 토체가 파괴될 때 까지 상재하중을 가하면서 토체의 거동을 계측하였다.

2.2 실험장치

2.2.1 토조

지반공학에서 모형실험에 사용되는 토조에는 일반적으로 원심모형기(centrifuge), 가압토조(calibration chamber), 소형토조, 대형토조 등이 있으며, 이 밖에 크기와 형상, 기능에 따라 더욱 세분화 될 수 있다. 각각의 토조는 나름대로의 특징을 갖고 있기 때문에 실험 목적에 따라 선택된다. 본 연구에서는 대형토조(높이 3M×폭 6M×길이 6M)를 3등분하여 높이 3M, 폭 2M, 길이 6M의 토조로 개조하여 이용하였다. 실험에 사용된 토조는 자연 지반

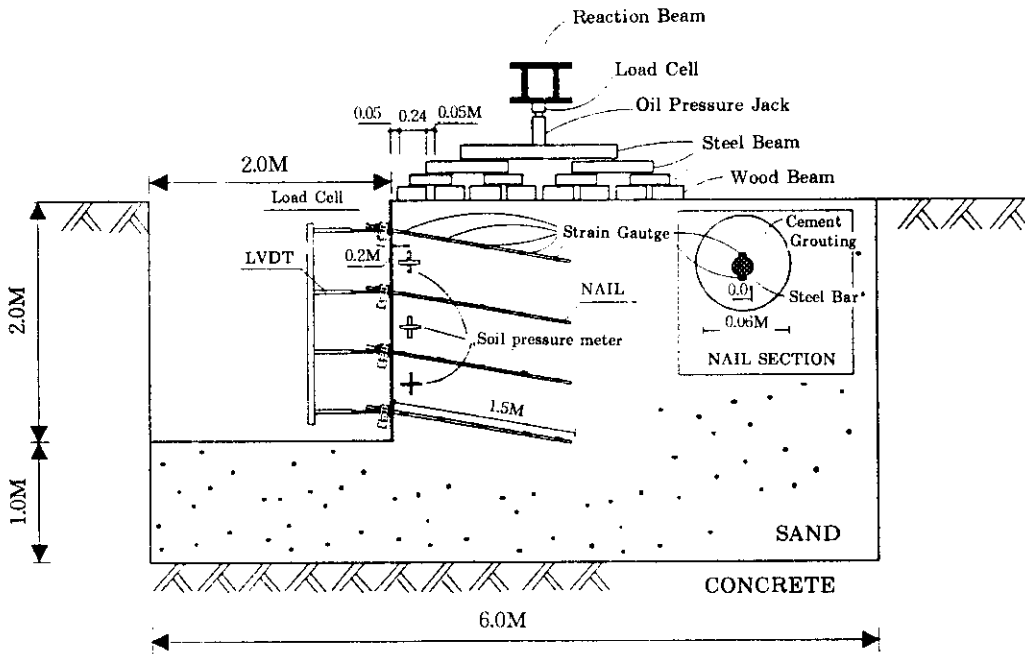


그림 1. 실험용 토체의 개요도

을 굴착하여 만들었으며 200ton 까지 재하할 수 있는 반력장치가 설치되어 있다.

2.2.2 토조의 경계조건

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(Parkin Lunne,1982).

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

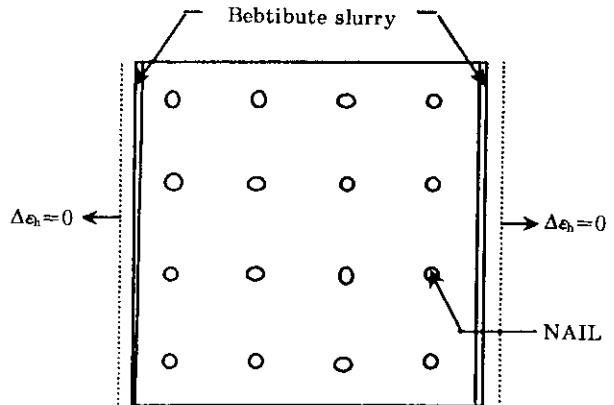


그림 2. 토조의 경계조건

2.2.3 하중 재하장치

실험토체가 완성된 후에 토체의 상부에 균등한 상재하중을 가하기 위하여 그림 3과 같은

구조의 피라미드 형태의 재하장치를 설치하였다. 재하장치의 최하단은 하중의 균등한 분포를 위하여 상대적으로 연성인 침목을 이용하였고 나머지 부분은 강재를 이용하였다. 재하장치의 최상단에 오일잭(200ton 급 사용)을 설치하여 하중을 가하면, 하중은 하단으로 전달되면서 등분되어 최하단에 균등하게 전달된다. 오일잭의 하중은 검력계를 설치하여 조절하였다.

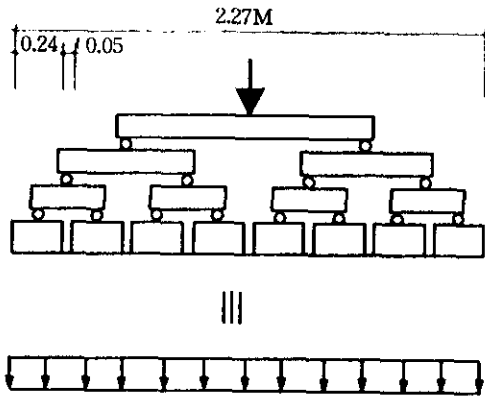


그림 3. 하중 재하 장치 개념도

2.3 계측장치

보강토체의 거동을 계측하기 위하여 변형률 측정계, 검력계, 토압계, 변위 측정계 등을 설치하였으며 각각의 초기치 설정 시점은 변위, 네일의 축하중, 네일의 축인장 변형률은 보강토체 제작 완료 후 재하시험 실시 직전이 초기치이며, 토압은 굴착 이전에 설치가 가능하였기 때문에 보강토체를 제작하기 위한 굴착 직전을 초기치로 하였다.

2.3.1 변형률 측정계

네일의 변형상태를 계측하기 위하여 각층에서 1개의 네일을 선택하여 길이 방향으로 5개 지점에 대하여 상부와 하부에 변형률 측정계(strain gauge)를 설치하였다(그림 1).

2.3.2 검력계

피라미드 형태의 재하장치 최상부에서 집중하중을 가하는 오일잭 위에 용량 200ton의 검력계(load cell)를 설치하여 가해진 상재집중하중을 계측하였다. 또한, 지반네일에 작용된 축하중을 측정하기 위하여 지반네일과 전면판 사이 연결지점에 검력계를 설치하였다(그림 1).

2.3.3 토압계

토체 내부의 토압변화를 계측하기 위하여 전면판 부근의 3개 지점에 대하여 수평과 수직 1쌍씩 총 6개의 토압계(soil pressure meter)를 매설하였다(그림 1).

2.3.4 변위 측정계

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, 1.64m에 각각 1개씩 3개를 설치하였다.

2.4 실험재료

2.4.1 토체

실험용 토체를 조성하기 위한 재료로서 남양만에서 채취한 바다모래를 사용하였다. 토체의 제작 방법은 굴삭기를 사용하여 토조 외부에 쌓아둔 모래를 떨어뜨리지 않고 살머시 내려놓는 방법으로 30cm를 쌓아 올린 후에 갈퀴로

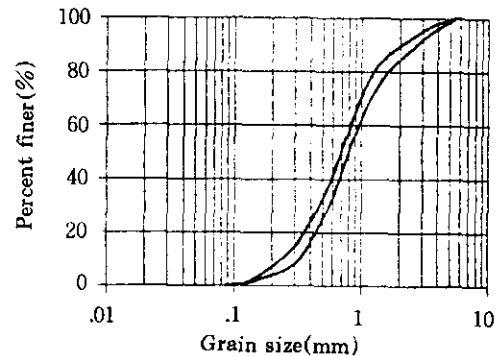


그림 4. 실험용 모래의 입도분포 곡선

교란시켜 낙하에너지의 영향을 없앤 다음 진동 다짐기로 5회씩 다짐하였다.

모래시료의 강도정수는 실험토체의 평균 건조 단위중량인 $\gamma_d=1.51\text{g/cm}^3$ 를 기준으로 직접전단 시험을 실시한 결과 최대강도 기준으로 $\phi_b=39.4^\circ$, 잔류강도 기준으로 $\phi_r=34.7^\circ$, 점착력 $c=0$ 를 얻었다. 모래 시료의 입도분포는 그림 4 와 같으며, 함수비는 시험전 6.0%, 시험후 5.1% 이었다.

2.4.2 지반네일

지반네일은 보강철근과 철근주변을 감싸고 있는 시멘트 그라우팅으로 구성되어 있다(그림 5). 지반네일의 제작은 현장타설(in-situ)로 제작되었다. 지반네일을 제작하기 위한 천공장치는 그림6과 같이 핸드오거와 지지대로 구성되었다. 천공방법은 핸드오거를 지지대에 장착하여 굴착지점에 설치 한 후, 지지대의 각도를 조절하여 고정된 다음 핸드오거를 천천히 회전시키며 인력으로 굴착하였다. 천공 후에 스페이서가 부착된 보강철근을 삽입한 다음 시멘트 몰탈로 중력을 이용하여 그라우팅 하였다.

본 실험연구에서는 보강철근을 직경 10mm의 이형철근을 사용하였고, 전면부와의 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.

표 1. 실험용 지반네일의 제원

직경	탄성계수(E)	인장강도	용접부분강도
10mm이형철근	$2.02 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$	$5.86 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$	$2.67 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$

3. 계측결과 및 분석

피라미드 형태의 재하장치 상부에 유압잭을 이용하여 집중하중을 10ton씩 증가시키면서

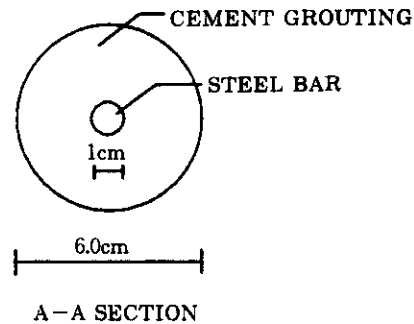
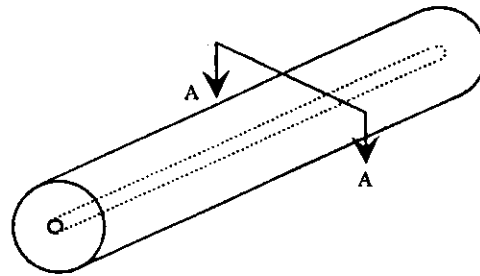


그림 5. 지반네일의 구성도

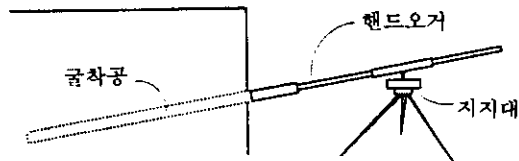


그림 6. 천공장치의 구성도

가해진 집중하중은 재하장치에 의하여 분산되어 보강토체의 상부면에 2.2t/m^2 의 상재하중으로 균등하게 분포된다. 집중하중을 10ton씩 증가시키면서 토체전면의 수평변위, 토체상부

면의 수직변위, 토체 내부의 토압, 네일의 축하중 및 축변형률을 측정하여 네일의 균열 등을 분석하였다.

3.1 보강토체의 변형

상재하중의 증가에 따르는 보강토체 전면의 수평변위량을 그림 7, 그림 8에 표시하고, 상부면의 수직 변위량을 그림 9에 표시하였다. 그림 7에서 하중이 60ton에서 70ton으로 증가할 때 변위가 크게 증가한 후에 계속해서 큰 변위

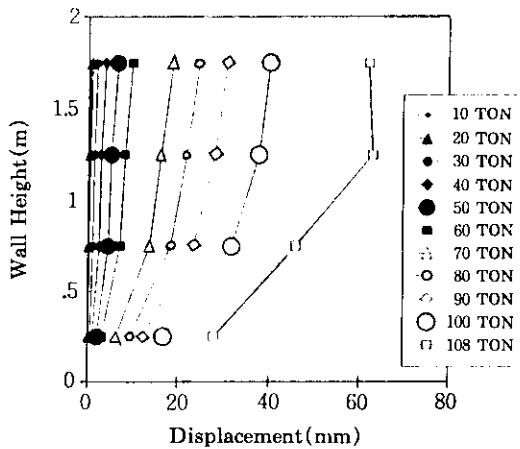


그림 7. 보강토체 전면의 수평변위

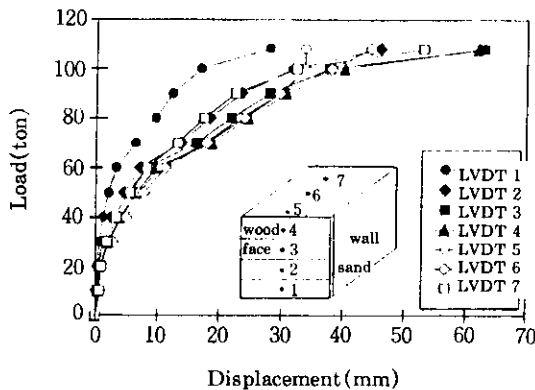


그림 8. 보강토체의 변위

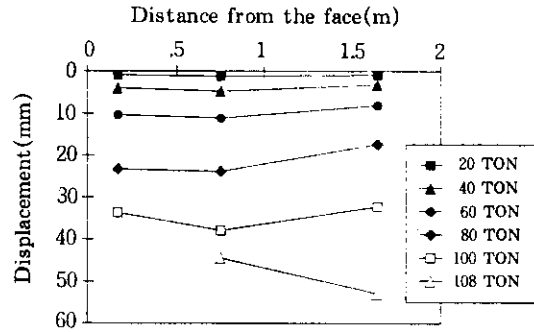


그림 9. 보강토체 윗면의 수직변위

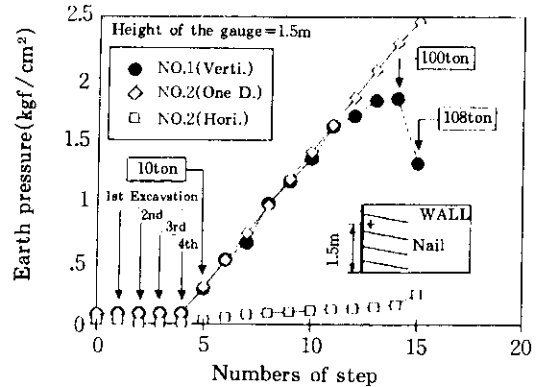
가 발생하다가 100ton을 넘기면서 급격히 증가하였다. 이것은 그림 8의 하중-변위 곡선에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, 그림 8에서 벽체 최하단의 수평변위(LVDT 1)를 제외한 나머지 하중-변위 곡선은 매우 유사한 거동을 보이고 있다.

벽체 전면부의 높이에 따른 수평변위는 상재하중 증가에 따라 거의 직선으로 변화하다가 60ton 이후부터 포물선 또는 대수나선형의 형태를 보였다.

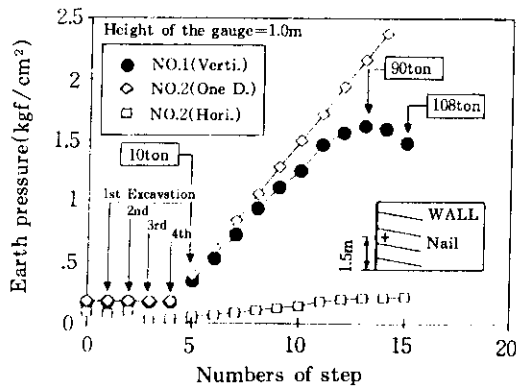
3.2 보강토체 내부의 토압

지반네일 보강토체의 시공과정과 하중재하 동안 토체의 내부벽면 부근에 작용하는 토압을 계측하여 각각의 위치에 따라 그림 10과 같이 표시하였다. 수평토압은 굴착깊이가 토압계의 매설깊이를 통과할 때 거의 0의 값으로 급격히 감소하였다가 상재하중을 가함에 따라 완만한 상승을 나타내었다. 수직토압은 굴착에 따른 영향이 거의 없으며 상재하중 재하에 따른 토압의 증가는 1차원 하중 조건과 거의 유사한 증가를 보였다. 이것은 피라미드 형태의 재하장치가 비교적 균등하게 토압을 전달했음을 보여주는 것으로 판단된다. 상재하중 증가에 따른 수직 토압의 증가는 상재 집중하중 90ton에서 100ton을 고비로 감소하였다. 수직토압이 감소한 것은 토체가 아래방향으로 이동하면서

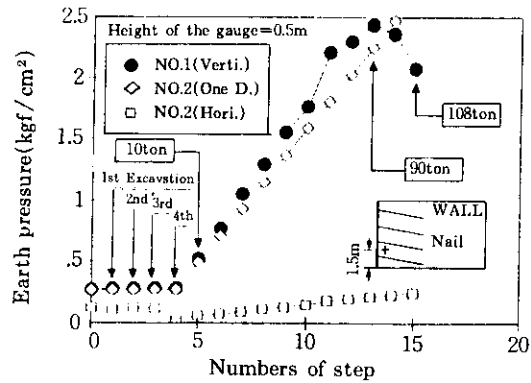
수직토압계도 함께 이동한 때문으로 판단되며, 깊이가 서로 다른 3개의 지점에서 거의 동시에 하중이 감소되었으나, 미세하게 아래쪽이 먼저 감소되는 경향을 보였다. 수직토압과 수평토압의 관계를 고찰하기 위하여 하중 단계별 토압계수를 표 2에 정리하였다. 지반네일 설치를 위한 굴착이 진행되기 전에는 약 0.5의 값을 유지함을 알 수 있으며, 굴착 이후에는 0.079~0.191(평균 0.118) 값을 보였다. 이것은 겉보기 점착력과 수평변위의 영향 때문으로 판단된다.



(a) Location of soil pressure meter (H=1.5m)



(b) Location of soil pressure meter (H=1.0m)



(c) Location of soil pressure meter (H=0.5m)

표 2. 보강토체 내부 전면부에서 토압계수의 변화

측정* 위치	굴착 직전	1단계 굴착	2단계 굴착	3단계 굴착	4단계 굴착	10ton 재하	20ton 재하	30ton 재하	40ton 재하	50ton 재하	60ton 재하	70ton 재하	80ton 재하	90ton 재하	100ton 재하	108ton 재하
1.5m	0.503	0.438	0.119	0.128	0.159	0.132	0.117	0.125	0.098	0.092	0.087	0.079	0.078	0.081	0.090	0.191
1.0m	0.524	0.444	0.550	0.176	0.183	0.144	0.129	0.120	0.115	0.114	0.117	0.124	0.127	0.131	0.134	0.150
0.5m	0.483	0.398	0.453	0.408	0.094	0.127	0.107	0.099	0.098	0.095	0.094	0.096	0.094	0.102	0.114	0.150

(* 측정위치는 보강토체의 아래쪽면을 기준으로 한 것임)

3.3 네일의 축하중

벽체 전면부에서 네일에 작용하는 네일의 축하중은 그림 10과 같이 전체적으로는 상재 집중하중이 50ton까지 증가하는 동안 거의 발생하지 않았으나 50ton을 고비로 60ton부터 선형적으로 증가하기 시작하여 90~100ton 에

서 증가율이 커짐을 알 수 있다. 부분적으로는 가장 밑에 설치된 네일이 하중재하 동안 근소한 차이로 제일 먼저 축하중이 작용되었고, 가장 위에 설치된 네일의 축하중은 나머지 네일의 축하중과는 다른 비교적 큰 값을 나타내었으나 전체적으로 유사한 거동을 보였다.

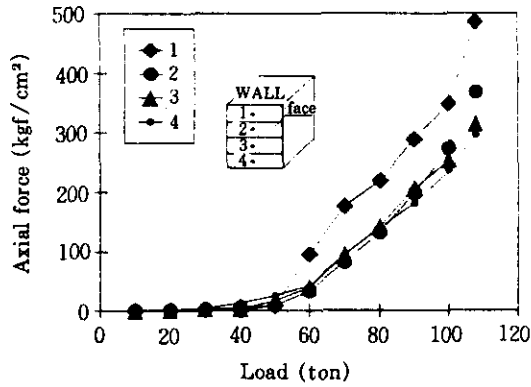


그림 11. 보강토체 전면부에서 네일의 축력증

3.4 네일의 축인장 변형률

극한 상태에서 네일에 발생하는 축인장 변형

률(axial tensile strain)을 계측하기 위하여 각각의 재하하중에 대하여 축인장변형률을 계측하였다.

그림 12에서 상재 집중하중 70ton과 108ton에 대한 축인장 변형률의 계측값에 의한 예상 파괴선과 보강토 공법의 설계방법중 하나인 복합중력식 설계방법의 가상파괴선을 비교한 결과 비교적 잘 맞는 경향을 보였다.

재하 실험 후에 네일의 손상상태를 파악하여 그림 13에 계측결과와 함께 비교하였다. 그림 13에서 계측된 예상파괴선 부근에 많은 손상이 있었으며, 특히 최하단의 경우 네일의 앞부분이 파괴되어 계측 결과의 예상파괴선과 잘 일치함이 확인되었다.

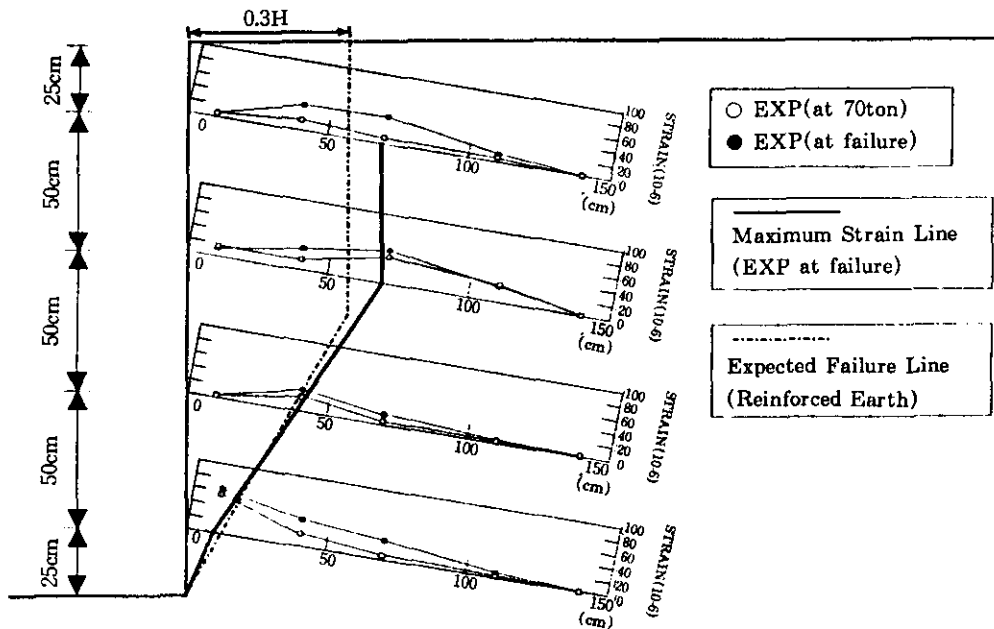


그림 12. 네일의 축인장 변형률

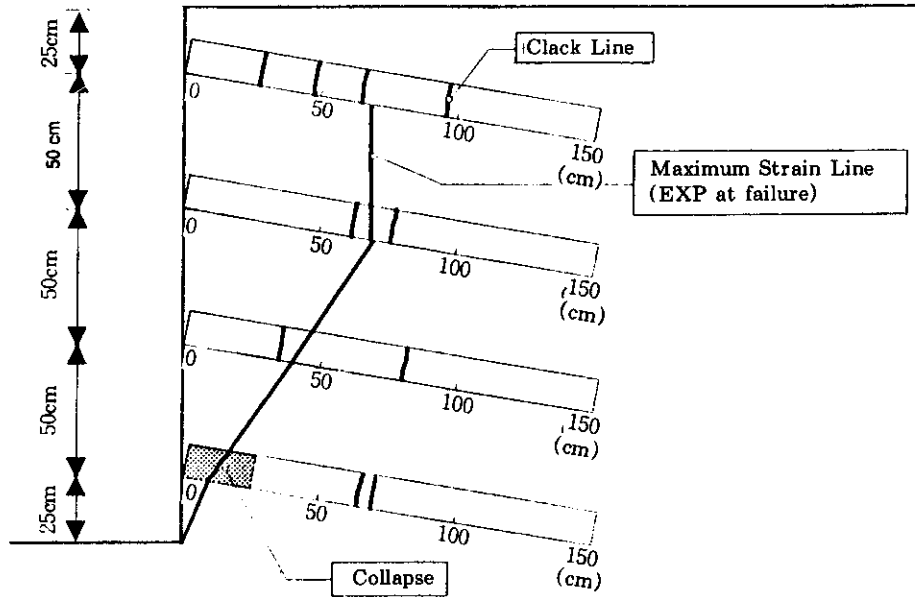


그림 13. 네일의 손상과 예상파괴선

4. 결론

지반네일로 보강된 토체의 파괴거동을 분석하기 위하여 대형토조에서 비교적 큰 규모의 실험연구를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수평 및 수직변위의 거동을 고찰한 결과 매우 점진적인 파괴거동을 보임을 알 수 있었다.

또한, 벽체 전면부의 높이에 따른 수평 변형은 상재하중 증가에 따라 거의 직선적으로 변화하다가 파괴시점에서 포물선 또는 대수나선형의 형태로 뒹을 알 수 있었다.

- (2) 토체의 수평변위와 벽체 전면에서 네일에 작용한 축하중은 집중하중 기준 60ton에서 많은 증가를 보이기 시작하지만 토압은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 즉, 토체의 파괴 시작은 토체의 수평변

위와 벽체 전면에서 네일에 작용한 축하중이 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

- (3) 토체의 수직토압은 토체가 파괴상태에 도달하자 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이것은 토체가 파괴상태에 도달하자 파괴절편이 이동하면서 수직토압이 급격히 감소한 때문으로 사료되며, 토체의 극한파괴 시점을 명확히 알 수 있는 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 수평토압이 다소 작게 측정된 것은 결보기 점착력과 수평변위의 영향 때문으로 판단된다.

또한, 매설된 깊이별로 토압의 감소 시점이 미소한 차이는 있으나 거의 동시에 감소함을 알 수 있었다.

- (4) 네일의 최대 축인장변형률을 연결한 상파괴선은 대수나선형(log-spiral)과 비교적 유사하며 보강토공법의 복합중력

식 설계방법의 가상파괴선과 매우 유사함을 알 수 있었다. 또한, 네일의 파괴상태를 점검한 결과 예측된 예상파괴선과 잘 일치함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 (주)대우 건설기술연구소의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Bang, S. & Kroetch, P. & Shen, C.K. (1992) "Analysis of soil nailing system", Proc. of the Inter. Symp. on Earth Reinforcement Practice, Japan, Vol. I : pp.457-462.
2. Byrne, R. J. (1992) "Soil nailing: A simplified kinematic analysis", Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 12, Vol. 2, pp. 751-763.
3. Elias, V. & Juran, I. (1991) "Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations", Federal Highway Administration Report FHWA.
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", Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 12, New York, pp.232-244.
6. Leshchinsky, d. (1991) "Discussion on kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures", Journal of the geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1821-1824.
7. Michell, J. K. (1992) "Reinforcement of earth slopes and embankments", NCHRP-290, Transportation Research Board
8. Schlosser, f., Unterreiner, p. & Plumelle, C. (1992) "French research program CLOUTERRE on soil nailing", Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 12, Vol. 2, pp. 739-750.
9. Stocker, M. F. & Riedinger, G. (1990) "The bearing behaviour of nailed retaining structures", Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 25, New York, pp.612-628.
10. Thompson, S. R. & Miller, I. R. (1990) "Design construction and performance of a soil nailed wall in seattle Washington", Geotechnical Special publication ASCE, No. 25, New York, pp.629-643.

(접수일자 1996. 11. 1)