

전면벽체 강성에 따른 쏘일네일링 벽체의 거동특성에 관한 실험적 고찰 An Experimental Study on Behavior Characteristic of the Soil Nailed Wall with Facing Stiffness

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang, 권영호³⁾, Young-Ho Kwon,
조용훈³⁾, Yong-Hoon Cho

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Hong-Ik Univ.

²⁾ (주)브니엘컨설턴트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

³⁾ 한라건설(주) 기술연구소 과장, Manager, R&D Center, Halla Engineering & Construction Corp.

⁴⁾ (주)도화종합기술공사 사원, Engineer, Dohwa Associated Engineering Services, Ltd.

SYNOPSIS : Recently, there are many attempts to expand a temporary soil nailing system into a permanent wall due to the advantage of soil nailing system, that is efficient and economic use of underground space and decreasing the total construction cost. However, the proper design approach of a permanent soil nailing system has not been proposed by now in Korea. Permanent soil nailing system which utilizes precast concrete walls for the facing of soil nailing system is already used in many countries. In general, the cast-in-place concrete facings or rigid walls were constructed in bottom-up way after construction of soil nailing walls finished preliminarily. In this paper, various laboratory model tests have been carried out to investigate the failure mode, behavior characteristics, and tensile force at nail head in each load level in respects of the variation of stiffness of the facing.

Key words : soil nailing, laboratory model tests, facing stiffness

1. 서론

쏘일네일링 공법은 국내의 경우 1993년 가시설 흙막이 벽체에 처음으로 적용된 이후 주로 건물지하 터파기 공사의 가시설공사, 도로 절토사면의 보강 및 주택인근 자연사면의 보강 등에 주로 사용하고 있으며, 기존건물의 기초보강 및 기존옹벽의 보강이나 터널 갱구부 구간의 얽은터널 및 파쇄대 구간에서의 터널보강 등에도 다양하게 적용할 수 있는 원지반 보강공법이다. 또한 쏘일네일링 공법과 관련하여 국내에서도 이에 대한 해석이론의 개발과 실내 및 현장에서의 실험적 연구가 활발히 진행된 바 있으나, 지금까지의 연구는 대체적으로 쏘일네일링 벽체를 가시설 흙막이 벽체로 적용한 경우에 대한 결과가 주를 이루고 있다.

최근 들어 국내에서는 경제적이고 효율적인 지하굴착공법으로 쏘일네일링 벽체와 지하구조물 외벽을 합벽처리하는 사례가 많아지고 있으며, 이같은 지하외벽 일체식 쏘일네일링 공법은 기존의 지보공법과 비교해 볼 때 굴착면적을 최소화하고 시공성을 개선할 수 있는 특징이 있다. 또한 지하외벽 일체식 쏘일네일링 공법은 지하외벽의 단면 축소와 지하수에 의한 양압력의 영향에도 대처할 수 있는 장점이 있으나 아직까지는 이에 대한 연구가 미흡하여 보수적인 관점에서 설계하고 있는 실정이다.

이를 위해 본 연구에서는 실내모형실험을 통해 전면벽체의 강성에 따른 쏘일네일링 보강토체의 거동 및 네일의 두부에 작용하는 인발력을 분석하여 전면벽체의 강성에 따른 쏘일네일링 벽체의 파괴유형을 규명하고 사용상태 및 한계상태에서의 변위양상 및 네일 두부에서의 인장력 분포를 분석하였다.

2. 실내모형실험

2.1 개요

실내모형실험은 쏘일네일링 공법에서의 전면판 강성의 변화가 쏘일네일링 구조체에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실시되었으며, 네일의 길이변화, 삽입각도 변화 및 하중재하 위치변화에 따른 쏘일네일링 보강토체의 거동 등에 대한 실험을 실시하였다. 실내모형실험에 사용한 토조(600mm×600mm×1300mm) 및 장치개요는 그림 1과 같으며, 실내 모형지반은 쏘일네일링 공법의 시공절차를 고려하여 단계별 굴착후 일정시간동안 자립이 가능하도록 주문진표준사와 화강풍화토를 1:1.5의 비율로 혼합하여 조성하였다.

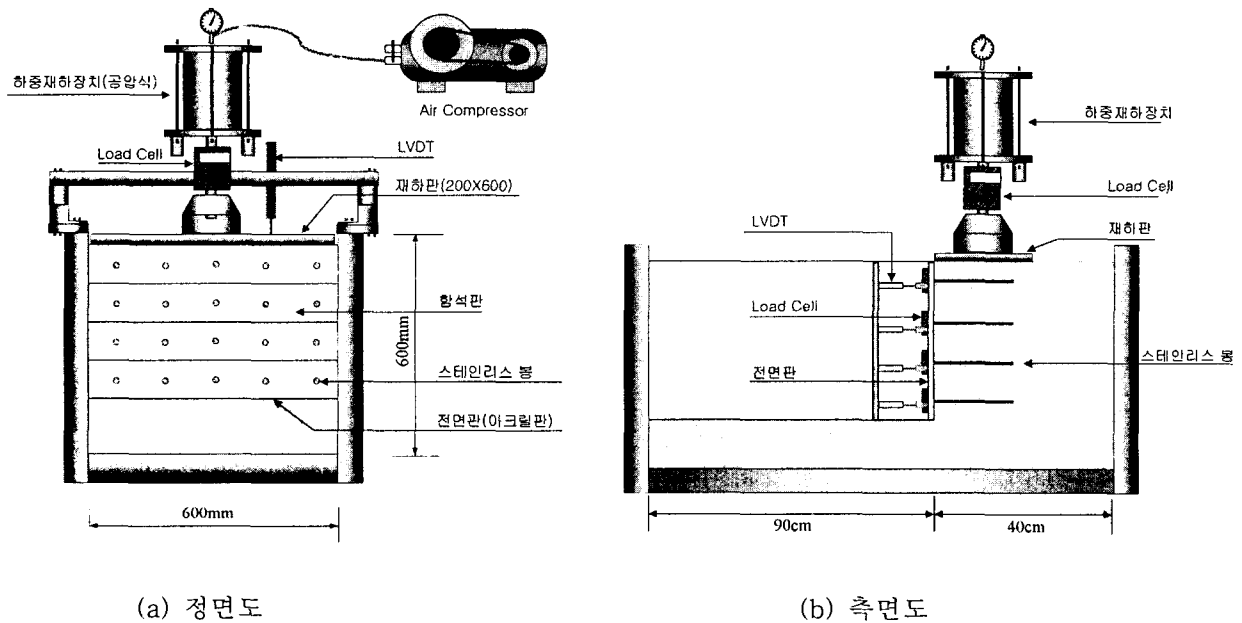


그림 1. 실내모형실험 장치개요

실내 모형지반의 입도분포곡선 및 지반특성치는 그림 2 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 슛크리트의 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(5ton 용량) 및 네일인장력 측정용 로드셀 4개(3.0kg 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.

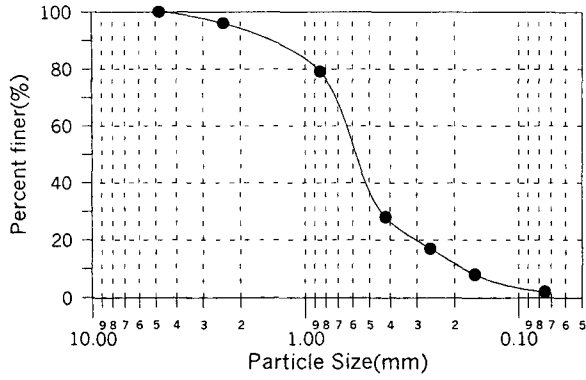


그림 2. 입도분포곡선

표 1. 모형지반의 특성치

구 분	특 성 치
단 위 중 량	1.49tf/m ³
내부마찰각	34 °
점착력	0.8tf/m ²
액성한계	28.8%
소성한계	17.6%

2.2 실험방법

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

또한 쏘일네일과 전면판이 분담하는 각각의 하중을 측정하기 위해 전면판 외부로 돌출된 쏘일네일을 고정링에 의해 연결시키고 고정링 사이에 로드셀을 설치하여 각 단의 중앙에 위치한 쏘일네일 두부에 작용하는 인발력을 직접적으로 측정하였으며, 쏘일네일링 구조체에 작용하는 하중은 하중재하장치와 강성재하판 사이에 로드셀을 설치하여 측정하였다. 침하량 및 수평변위는 쏘일네일링 구조체에 총 5개의 LVDT를 설치하여 측정하였으며, LVDT의 위치는 수직변위를 측정하기 위해 강성재하판 상단에 1개, 각단의 중앙부에 각각 설치하여 침하량 및 수평변위를 측정하였다. 또한 네일과 조성된 지반사이의 마찰특성을 알아보기 위해 네일의 직경 및 설치깊이에 따라 변위제어방식으로 인발시험을 총 4회 수행하였으며, 인발시험시 네일의 인발속도는 1mm/min으로 일정하게 유지하였다.

전면판 강성에 따른 영향을 규명하기 위하여, 총 11가지 경우에 대한 실험을 실시하였으며 각 경우에 해당하는 실험조건을 요약·정리하면 표 3과 같으며, 인발시험결과는 표 4와 같다.

표 3. 실내모형실험 요약

Case	경 사	전면판 두께	네일길이	네일직경 (mm)	네 일 설치각도(°)	전 면 판	재하판
1	연 직	무지보 굴착(무보강)					20cm×60cm (b = 0cm)
2		-	20cm	3	0	-	
3		2mm	20cm	3	0	합석판+아크릴판	
4		4mm	20cm	3	0	합석판+아크릴판	
5		6mm	20cm	3	0	합석판+아크릴판	
6	연 직	무지보 굴착(무보강)					20cm×60cm (b = 10cm)
7		합석판	30cm	3	0	합석판	
8		2mm	30cm	3	0	합석판+아크릴판	
9		4mm	30cm	3	0	합석판+아크릴판	
10		6mm	30cm	3	0	합석판+아크릴판	
11	연 직	6mm	30cm	3	10	합석판+아크릴판	20cm×60cm (b = 10cm)

표 4. 인발시험 제원 및 결과

No.	설치깊이(cm)	네일직경(mm)	네일길이(cm)	네일인발력(kgf)	단위주면마찰력, q_s (t/m ²)
1	15	3	30	0.53	0.18
2	25	3	30	0.87	0.31
3	15	5	30	1.22	0.26
4	25	5	30	2.04	0.43

실내모형실험에서 사용한 전면판 및 모형지반의 제원은 그림 3과 같으며, 실내모형실험시 사용한 네일은 Case 1 ~ Case 10의 경우, 지반과 수평하게 설치하였으며, Case 11의 경우에는 네일의 삽입각도 (θ)를 10° 로 하여 설치하였다. 또한 Case 1 ~ Case 5의 경우, 등분포하중(q)의 하중재하 위치는 굴착 배면으로부터 10cm 이격하여 재하하였으며, 네일의 길이(L)는 20cm로 하여 실험을 수행하였다. 또한 Case 6 ~ Case 11의 경우에는 등분포하중(q)은 굴착배면으로부터 이격거리(b)는 10cm 및 네일의 길이 (L)는 30cm로 하여 실내모형실험을 수행하였다.

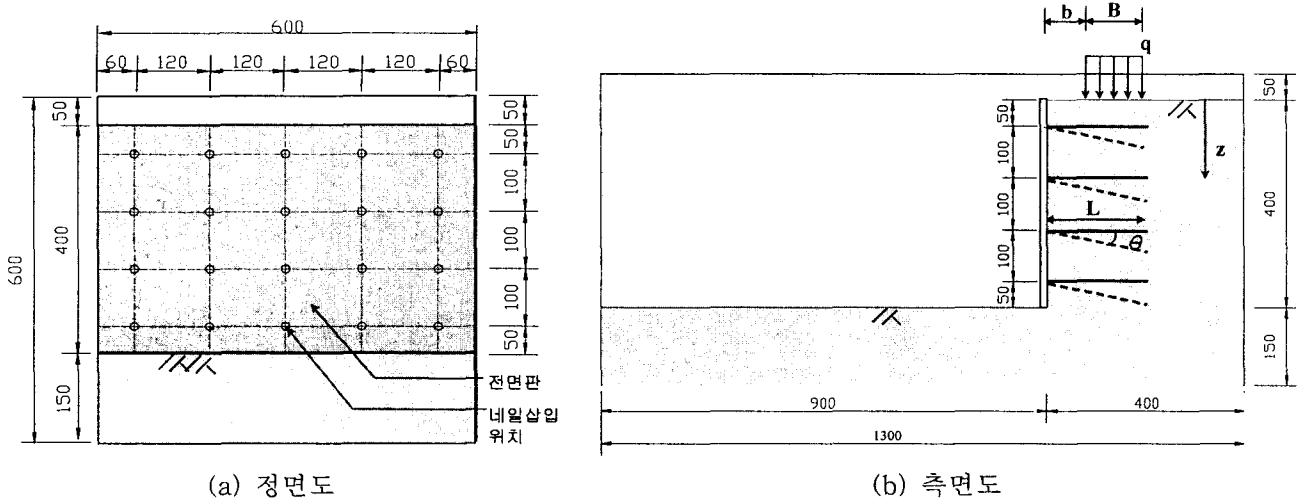


그림 3. 전면판 및 모형지반 제원

3. 실험결과 및 분석

3.1 전면판 강성증가에 따른 파괴하중

모든 실험에 있어서 각각의 파괴하중과 파괴시까지의 변위양상을 알아보기 위해 상재하중에 따른 수직변위 양상을 도시하면 그림 4와 같으며, 그림 4로부터 전면판의 강성이 증가함에 따라 파괴시의 벽체 저항성이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 전면판의 강성증가에 따른 파괴하중의 분석결과를 정리하면 표 5와 같다.

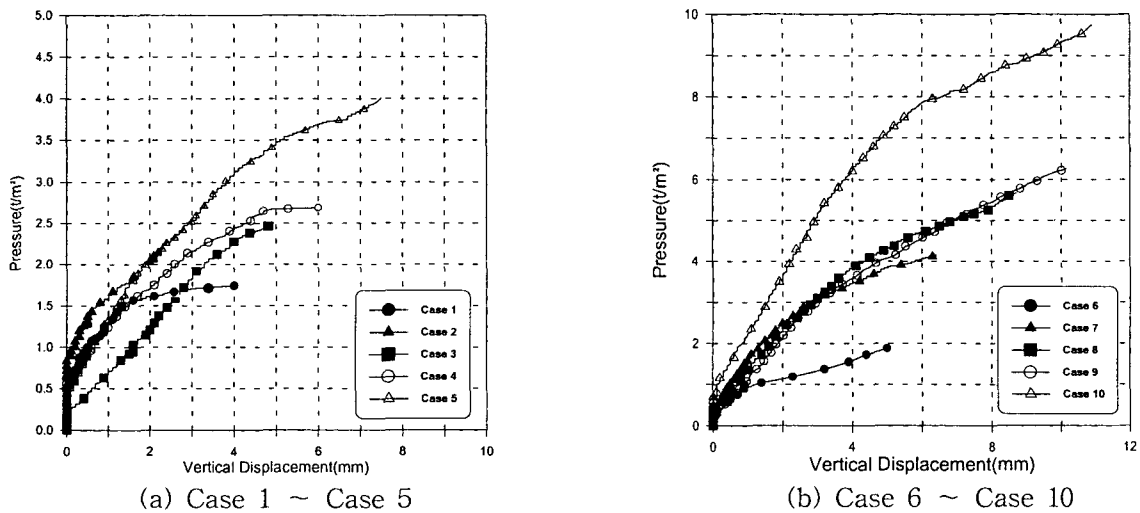


그림 4. 전면판 강성증가에 따른 상재하중-수직변위 관계

표 5. 전면판의 강성증가에 따른 파괴하중(q_f)

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$q_f(\text{tf/m}^2)$	1.13	2.05	2.48	2.70	4.00	1.93	4.17	5.68	6.36	9.75

그림 4 및 표 5의 결과를 종합적으로 살펴보면, Case 2~5 와 Case 7~10의 경우는 하중재하조건과 네일의 길이가 상이하기는 하나, 전면판의 두께가 0~6mm로 증가함에 따라 파괴하중은 각각 1.21~2.34 배로 증가하는 것으로 나타났으며, 이를 도시하면 그림 5와 같다.

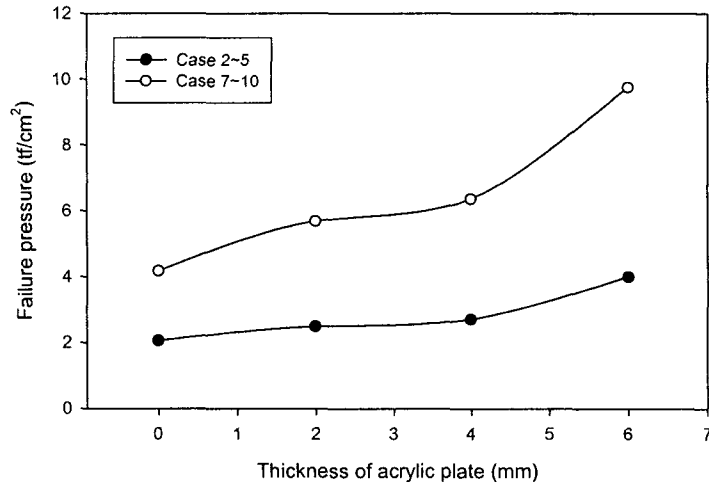


그림 5. 전면판의 강성증가에 따른 파괴하중의 증가량

3.2 전면판 강성증가에 따른 수평변위

전면판의 강성에 따른 변위양상을 살펴보기 위해 파괴하중시 및 파괴하중의 1/4, 1/2, 3/4 상태에서 각 경우별 전면판의 수평변위를 도시하면 그림 6과 같다.

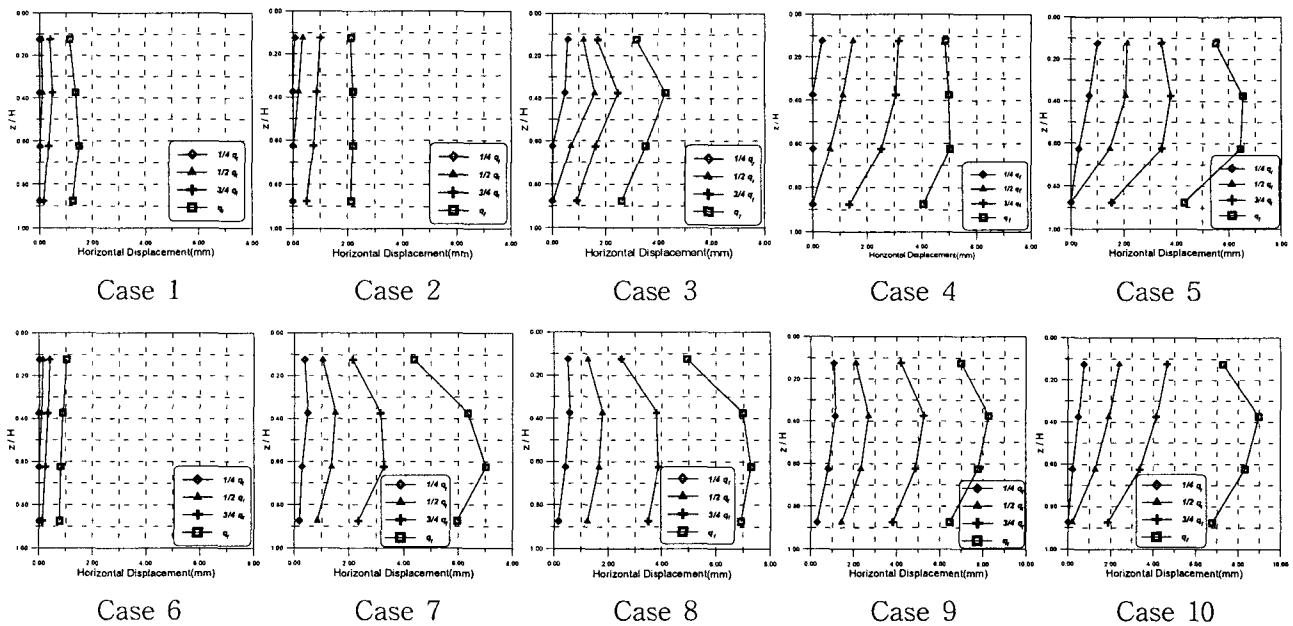


그림 6. 각 하중단계별 전면판의 수평변위

그림 6의 결과를 살펴보면, 전면판이 없는 무지보 상태인 Case 1 및 Case 6의 경우에는 각 깊이에서의 수평변위가 거의 동일하게 증가하면서 파괴에 도달하였으며, 전면판의 강성이 있는 Case 3 ~ Case 5 및 Case 8 ~ Case 10의 경우, 수평변위는 최상단으로부터 최하단까지 순차적으로 발생하였으며, 파괴시에는 벽체의 중앙부의 수평변위가 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났다. 연성전면판인 합석판이 설치되어 있는 Case 7의 경우, 강성전면판인 아크릴판이 설치되어 있는 경우에 비해 상대적으로 작은 수평변위에서 파괴에 도달함을 확인 할 수 있었다.

3.3 네일의 삽입각도에 따른 영향

네일의 삽입각도가 10° 인 Case 11과 삽입각도 외에 모든 조건이 동일한 Case 10에 대하여 네일의 삽입각도에 따른 상재하중-수직변위 관계를 도시하면 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 네일이 10° 각도로 하향으로 경사져서 설치된 경우(Case 11)가 네일을 수평으로 설치한 경우(Case 10)보다 파괴하중이 11.2% 증가한 것으로 나타났다.

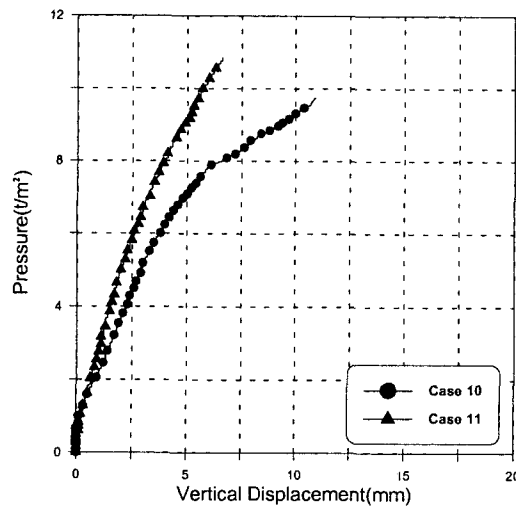


그림 7 네일의 삽입각도에 대한 하중-수직변위

3.4 강성전면판이 설치된 쏘일네일링 벽체에 작용하는 토압분포

3.4.1 무차원상수 TN

쏘일네일링 벽체에 작용하는 토압은 네일 두부에서의 인장력을 측정함으로써 간접적으로 측정할 수 있으며, 본 연구에서는 아크릴 전면판에 작용하는 토압의 분포를 규명하기 위해, 식(1)과 같은 무차원상수 TN을 사용하였다. 무차원상수 TN은 네일의 두부에 작용하는 인장력을 무차원화한 것이다.

$$TN = \frac{T_i}{\sigma_v \cdot S_H \cdot S_V} = \frac{T_i}{(\gamma \cdot z + q) \cdot S_H \cdot S_V} \quad (1)$$

여기서, T_i = 각 깊이에서 네일 두부의 인장력

γ = 지반의 총단위중량

z = 각 네일의 설치깊이

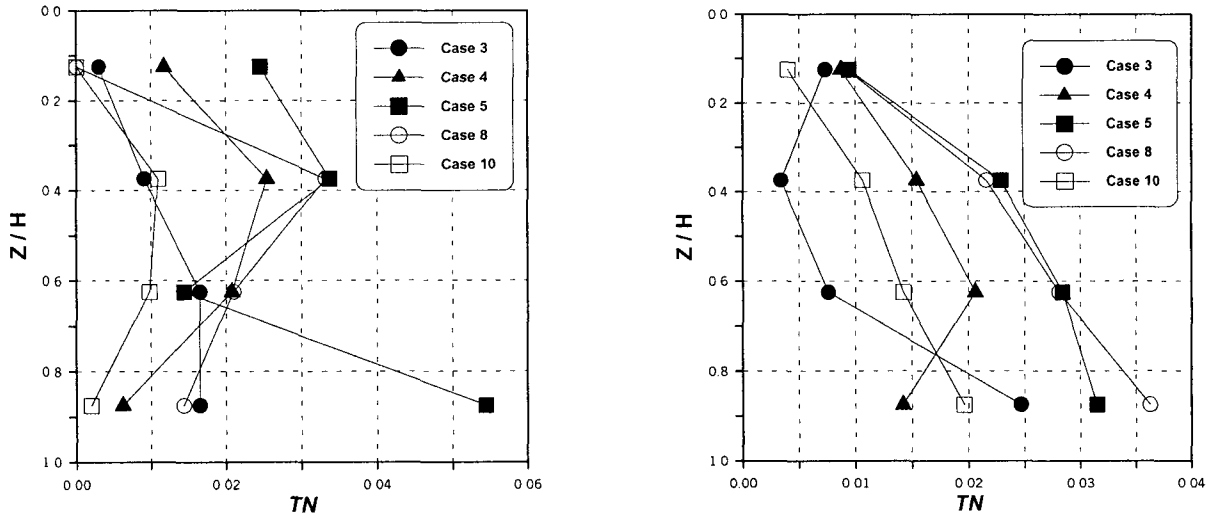
q = 하중단계에 따른 상재하중

S_H = 네일의 수평간격

S_V = 네일의 수직간격

3.4.2 강성전면판이 설치된 쏘일네일링 벽체에 작용하는 토압형태

쏘일네일링 벽체에 강성전면판이 설치된 경우에 작용하는 토압의 분포를 분석하기 위해, Case 3, 4, 5, 8 및 10의 네일 두부에서 발생한 인장력으로부터 무차원상수 TN을 계산하여 하중단계별로 이를 도시하면 그림 8과 같다.



(a) 초기하중단계($q=0.5q_r$) (b) 파괴하중단계($q=q_r$)

그림 8. 전면판 강성변화에 따른 네일 두부에서의 인장력

본 실험에 있어서 쏘일네일링 벽체의 사용한계($= \delta_{h(max)} / H = 0.4\%$)에 해당하는 하중은 파괴하중의 51.4% 정도로 그림 8에서의 초기하중단계($q=0.5q_r$)는 쏘일네일링 벽체의 사용한계 범위내로 구분할 수 있다. 그림 8의 결과를 살펴보면, 사용한계 범위내에 해당하는 초기하중단계($1/2 q_r$) 까지의 네일 두부에서의 인장력 분포(즉, 토압분포)는 기존 쏘일네일링 벽체의 사다리꼴 토압형태와 유사한 경향을 나타냈으며, Case 3의 경우를 제외한 나머지 경우에는 하중이 점차 증가하여 파괴하중에 도달함에 따라 최하단의 인장력 값이 점차 증가하여 파괴시에는 거의 삼각형 분포의 토압분포 형태를 나타내는 것을 알 수 있었다. 즉, 하중단계 초기에는 Terzaghi & Peck 등이 제시하고 여러 연구자들이 계측하여 분석한 쏘일네일링 벽체, 즉 연성벽체에 작용하는 사다리꼴 토압분포의 경향을 보이다가 하중단계가 증가하여 결국 파괴시에는 강성벽체에 작용하는 삼각형 형태의 토압분포 형태를 나타내는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 실내모형실험을 통해 쏘일네일링 벽체의 전면판 강성변화에 따른 거동특성 및 발생토압의 분포형태 등을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전면판의 강성변화에 따른 쏘일네일링 보강토체의 상재하중-수직변위 관계곡선은 일정한 경향으로 나타났으나, 전면판의 강성이 증가함에 따라 파괴시의 벽체 저항성이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 전면판의 두께가 0~6mm로 증가함에 따라 파괴하중은 각각 1.21~2.34배로 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 전면판의 강성에 따른 변위양상을 살펴보기 위해 파괴하중시 및 파괴하중의 1/4, 1/2, 3/4 상태에서 각 경우별 전면판의 수평변위를 분석한 결과 전면판이 없는 무지보 상태의 경우에는 각 깊이에서의 수평변위가 거의 동일하게 증가하면서 파괴에 도달하였으며, 전면판의 강성이 있는 경우 수평변위는

최상단으로부터 최하단까지 순차적으로 발생하였으며, 파괴시에는 벽체의 중앙부의 수평변위가 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 연성전면판인 함석판이 설치되어 있는 경우, 강성전면판인 아크릴판이 설치되어 있는 경우에 비해 상대적으로 작은 수평변위에서 파괴에 도달함을 확인 할 수 있었다.

- (3) 네일의 삽입각도에 따른 영향을 살펴보면, 네일이 10° 각도로 하향으로 경사져서 설치된 경우가 네일을 수평으로 설치한 경우보다 파괴하중이 11.2% 증가한 것으로 나타났다.
- (4) 강성전면판이 설치된 쏘일네일링 벽체에 작용하는 토압의 분포형태를 분석한 결과, 사용한계 범위내에서는 토압의 분포형태가 연성벽체에 작용하는 토압분포인 사다리꼴 형태로 작용하는 것으로 나타났으며, 하중이 점차 증가하여 파괴하중에 도달함에 따라 강성벽체에 작용하는 토압분포인 삼각형 형태로 작용하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김준석, 이상덕, 이석태, 이승래, 김두년(1994), “쏘일네일링 공법의 파괴구조에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학술발표회논문집, Vol. I, pp. 589~592.
2. 김홍택(2001), *Soil Nailing 공법의 과거, 현재, 미래*, 평문각, pp. 17~37.
3. 유남재, 김영길, 김재일(1994), “상재하중 하의 쏘일네일링 시스템의 극한지지력 및 파괴메카니즘에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회논문집, Vol. I, pp. 549~552.
4. 조용훈(2002), 쏘일네일링 공법의 전면벽체 강성변화에 따른 영향에 관한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.
5. FHWA, *Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls*, Publication No. FHWA-SA-96_069, pp. 63~136.
6. Juran, I., Elias, V.(1990), “Behavior and Working Stress Design of Soil Nailed Retaining Structure”, *Performance of Reinforced Soil Structures*, British Geotechnical Society, Thomas Telford, pp. 207~212.
7. Schlosser, F.(1991), *Recommendations Clouterre / Soil Nailing Recommendations*, French National Rearch Project Report, No. FHWA-SA-93-026.