

## **프리텐션 효과에 따른 쏘일네일링 벽체의 거동특성에 관한 실험적 고찰**

### **An Experimental Study on Behavior Characteristics of the Soil Nailed Wall with Effects of the Pretension Force**

김홍택<sup>1)</sup>, Hong-Taek Kim, 최영근<sup>2)</sup>, Young-Geun Choi, 박시삼<sup>3)</sup>, Si-Sam Park,  
김범석<sup>4)</sup>, Berm-Seuk Kim,

<sup>1)</sup> 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.

<sup>2)</sup> (주)동평이엔씨 대표이사, President, Dong-Pyung Eng. & Construction, Co., Ltd.

<sup>3)</sup> 홍익대학교 토목공학과 박사수료, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.

<sup>4)</sup> 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.

**SYNOPSIS** : In this study, a newly modified soil nailing technology named as the pretension soil nailing system, is developed to reduce both facing displacements and ground surface settlements in top-down excavation process as well as to increase the global stability. Up to now, the pretension soil nailing system has been investigated mainly focusing on an establishment of the design procedure. In the present study, laboratory model tests are carried out to investigate the failure mechanism and behavior characteristics of the pretension soil-nailed wall. Various results of model tests are also analyzed to provide a fundamental basis for the efficient design.

**Key words** : Pretension soil nailing system, Laboratory model tests, Pretension effect

## **1. 서론**

쏘일네일링 공법은 주로 지하굴착 및 사면보강 등에 보편적으로 사용되고 있는 공법으로 근래에 들어서는 영구사면보강 등에 그 적용성이 점차 확대되고 있으나, 도심지 지하굴착 공사에 있어서는 인접구조물에 대한 영향을 최소화하기 위해, 굴착으로 인한 지반의 변형을 최소화하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 지중매설물이 인접하여 존재하거나 대지경계선 등의 준수 등 시공조건에 따라서 설치네일의 길이가 제한되는 경우 및 연약한 지반조건으로 구성된 사면을 보강할 경우 등과 같은 벽체변위 및 지표침하 억제와 안정성 증대 등을 위하여 지반앵커공법(ground anchor system)과 유사한 프리텐션 방식의 도입이 필요한 실정이다. 지반앵커공법과 유사한 프리텐션(pretension) 방식의 쏘일네일링 공법을 도입하게 될 경우, 프리텐션 하중에 의해 네일 두부에 부착된 지압판 등은 전면벽체에 수동토압을 유발시키게 되므로, 일반 쏘일네일링 벽체에서 발생하는 주동토압을 어느 정도 경감시킬 수 있을 것으로 기대되며, 아울러 단계별 굴착시 발생하는 변위를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 단계별 굴착시 유발되는 벽체변위 및 침하량 등을 억제하기 위한 노력의 일환으로, 프리텐션 쏘일네일링 시스템을 개발하였다. 최근까지 국내에서는 김홍택 등(1999, 2002)은 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 대해, 학문적 기초에 입각한 이론적 접근이 이루어져왔으며, 본 연구에서는 실내모형실험을 토대로 프리텐션 쏘일네일링 벽체의 거동특성 및 발휘되는 토압 등을 정량적으로 분석하여 프리텐션 효과에 따른 쏘일네일링 벽체의 파괴유형을 규명하였다. 아울러, 프리텐션 효과가 쏘일네일링 벽체 안정성에 미치는 영향을 검토하여, 향후 예상되는 프리텐션 효과에 따른 수평토압 감소 및 주면마찰력 증가 등의 지반-네일 상호작용을 고려한 해석기법개발에 필요한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 프리텐션 쏘일네일링 시스템

### 2.1 프리텐션 도입에 따른 영향

일반적인 쏘일네일링 구조체의 파괴거동특성은 그림 1과 같으며, 프리텐션 효과에 따른 쏘일네일링 구조체의 파괴거동특성과 프리텐션의 구속효과 등은 그림 2와 같이 예상할 수 있다. 그림 2(a)를 살펴보면, 프리텐션 하중을 가해주는 초기단계에는 쉬스판에 의한 자유장 영향으로 인해 쉬스판 내에서 미끄러짐 현상이 예상되나, 프리텐션 하중을 가해준 후 쉬스판 내에도 시멘트 그라우트로 충전하기 때문에 시공완료 후에는 미끄러짐에 의한 마찰저항력 손실은 없을 것으로 판단된다. 동일한 네일제원 및 하중 조건이라면 그림 1 및 2에서 보는 바와 같이, 프리텐션 하중이 증가함에 따라 쏘일네일링 보강토체의 가상파괴영역은 프리텐션의 구속효과로 인하여 점진적으로 작아지며, 네일에 발휘되는 마찰력은 점진적으로 증가할 것으로 예상된다.

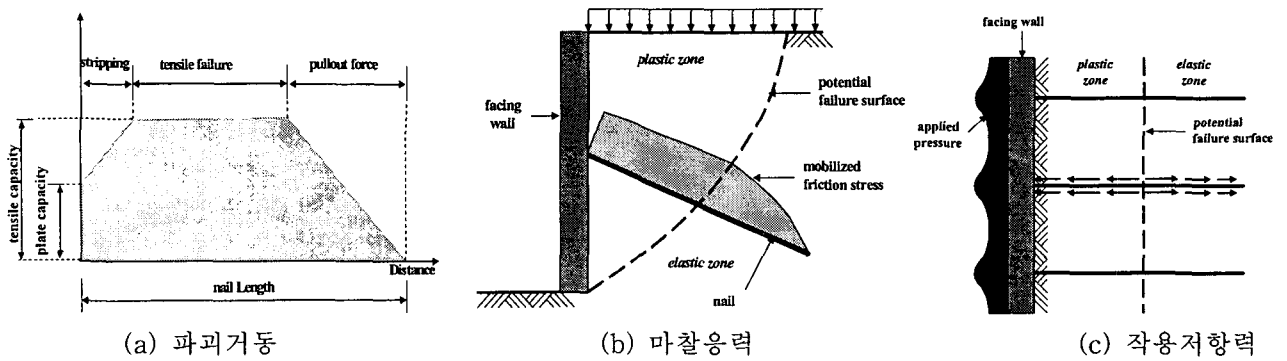


그림 1. 일반쏘일네일링 구조체의 예상 파괴거동

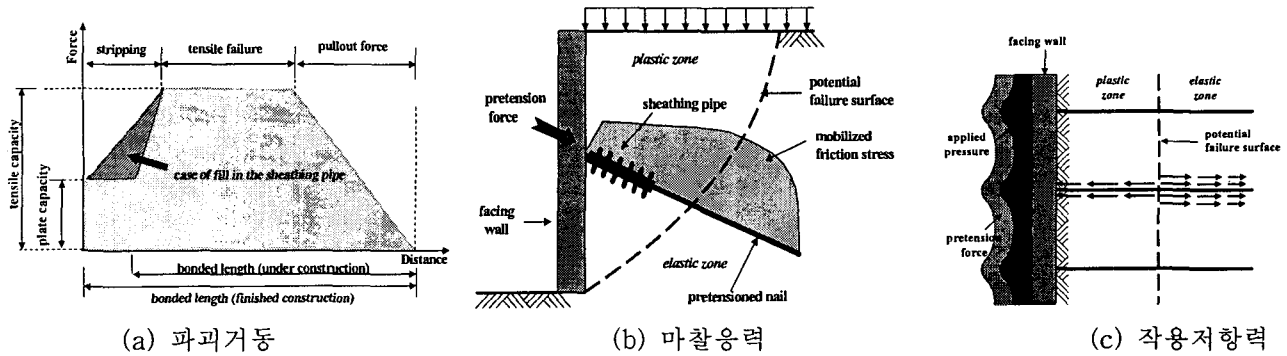


그림 2. 프리텐션 쏘일네일링 구조체의 예상 파괴거동

### 2.2 프리텐션 하중

프리텐션 하중은 인발시험을 통해 쏘일네일과 흙 사이에서 유발되는 주면마찰력의 상호관계를 통하여 평가할 수 있다. 쏘일네일과 흙 사이 주면마찰력 발휘는 Frank and Zhao(1982)가 제안한 비선형 거동법칙(bilinear law)에 근거하여 인발-변형 관계를 탄성한계 및 소성한계로 분리하여 규명하였다. Frank and Zhao가 제안한 비선형 거동법칙은 하중-변위관계에서 최대주면마찰력( $q_{smax}$ )의 1/2 지점에서, 초기 기울기( $k_{\beta}$ ) 직선과 초기기울기( $k_{\beta}$ )의 1/5 직선이 교차하며, 초기기울기( $k_{\beta}$ )의 직선 범위 내에서는 탄성 거동을 한다고 밝힌 바 있다. 따라서, 실내인발시험을 통해 얻어진 인발력( $T$ )을 식(1)에 적용하여 주면마찰력( $q_s$ )으로 산정한 후, 주면마찰력-변형 관계곡선을 얻을 수 있다.

$$q_s = \frac{T}{pL_s} \quad (1)$$

여기서,  $T$  : 쏘일네일의 인발력,  $p$  : 쏘일네일의 주변장(=  $\pi D$ ),  $L_s$  : 쏘일네일의 길이

따라서, 본 연구에서는 Frank and Zhao가 제안한 탄성한도 범위에 해당하는 흙과 쏘일네일간의 상대 변위,  $y_1$ 에 해당하는 범위까지 발휘된 주변마찰력을 인발하중으로 환산하여 탄성범위 내에서 적용 가능한 프리텐션 하중으로 결정하였으며, 소성한도 범위에 해당하는 최대변위( $6y_1$ )에서 발휘된 주변마찰력을 인발하중으로 환산하여 소성범위 내에서 적용 가능한 프리텐션 하중으로 결정하였다.

### 3. 실내모형실험

#### 3.1 실내모형실험 장치개요

현장 쏘일네일링 구조체를 실내규모의 실험으로 모사하기 위하여 사용된 모형토조(길이×폭×높이 = 1300×600×600mm)는 그림 3과 같으며, 실험모형 개요를 정리하면 표 1과 같다.

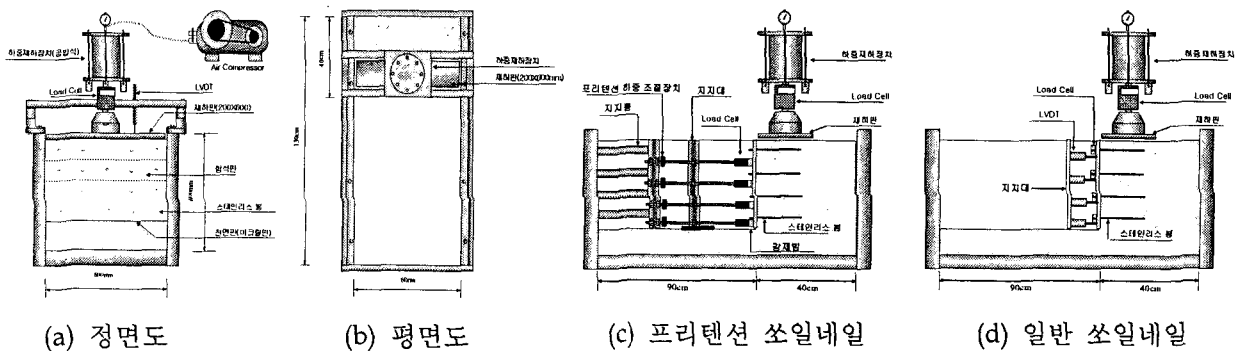


그림 3. 실내모형실험 장치개요

표 1. 실내모형 개요

모 델	설 치 개 요
지 반	주문진표준사 : 화강풍화토, 1:1.5 혼합후, 3회 층다짐
네 일	L=20cm, 30cm의 스테인리스강봉( $\phi = 3\text{mm}$ )
전면 벽체	네일 설치지점이 천공된 두께 6mm의 아크릴판
숫크리트 전면판	두께 0.2mm의 얇은 합석판(굴착단계별 분할)
토압 측정장치( $T_i$ )	네일(강봉)-전면벽체-하중계 연결 측정, 깊이별 4개소
벽체변위, 지표침하 측정	선형변위센서(LVDT) 설치, 전면벽체:4개소, 재하판:1개소
상재 하중	공압식 하중재하장치에 하중계 부착(용량 5.0ton)
기 타	재하판 : 600mm×200mm, 600mm×300mm, $T_i$ : 네일두부의 인장력

강성벽체가 설치되는 프리텐션 쏘일네일링 시스템을 모사하기 위하여, 합석판과 아크릴판이 각각 사용되었으며, 아크릴판은 프리텐션 하중을 가해 주기 위해 비교적 강성벽체에 해당하는 두께 6mm로 사용하였다. 실험모형은 총 4단의 네일로 구성되며, 각단 중앙부에 하중계가 네일두부로 결속되면서 직접적으로 네일두부 인장력을 측정할 수 있도록 고안되었다. 계속해서, 프리텐션 하중을 가해 주기 위해서 폭 580mm의 강재빔을 제작하였으며, 프리텐션 하중을 균등하게 작용시켜주기 위해 총 4개로 구성하여 4개

소 위치에서 프리텐션 하중을 가해주도록 하였다(그림 3(c) 참조). 또한 네일-네일간의 벽체변위를 측정할 수 있도록 깊이별로 선형변위센서(LVDT; Linear Variable Differential Transformer)가 4개소에 부착되었다. 모형지반은 굴착직후에도 일정시간 동안 무지보 자립시간이 확보될 수 있도록 주문진표준사와 화강풍화도를 1:1.5로 혼합하여 3회에 걸친 층다짐에 의해 조성되었다. 이때 깊이별 2개소(20, 40cm)에 각각 다짐도 측정을 위한 시료채취관을 중앙부에서 각 1개소씩, 총 2개소에 설치하여, 최종적으로 토조 내의 모형지반의 다짐도를 평균 83.5% 정도의 일정한 수준으로 유지되도록 하였으며, 모형지반의 지반강도정수는 표 2와 같다.

표 2. 모형지반의 지반강도정수

구분	단위중량	내부마찰각	점착력	액성한계	소성한계
특성치	1.68t/m <sup>3</sup>	34°	0.8t/m <sup>2</sup>	28.8%	17.6%

### 3.2 실내모형실험의 제원 및 방법

프리텐션 하중을 결정하기 위해서 모형지반에서 네일의 인발시험을 수행하였다. 인발시험은 네일길이 200mm와 300mm에 대해 변위제어방식으로 수행되었으며, 인발속도는 1mm/min로 하였다. 표 3의 인발시험 결과를 살펴보면, 네일길이가 200mm인 경우 최대인발력은 1.86kg으로, 300mm인 경우는 2.54kg으로 나타났다. 따라서, Frank and Zhao가 제안한 탄성 및 소성한도 범위 내에서 적용 가능한 프리텐션 하중은 표 3과 같이 결정되었으며, 프리텐션 하중을 모사하기 위해 하중계를 부착한 강재빔을 전면벽체에 부착하였다. 실내모형실험시 프리텐션 하중은 소성한계 범위 이내인 0, 20, 30 및 40kg 등으로 하였으며, 실내모형실험 제원 및 조건을 요약하면 표 4와 같다.

표 3. 모형네일의 제원 및 실내인발실험 결과

네일길이 (mm)	네일직경 (mm)	최대인발력 (kg)	프리텐션 하중(kg)	
			탄성범위	소성범위
200	3	1.86	23.4	37.2
300	3	2.54	32.5	50.8

표 4. 실내모형실험 제원 및 조건

Case	프리텐션 하중(kg)	네일길이	네일설치개수	재하판	네일설치각도
1	0	200 mm	20개	600mm × 200mm	0°
2	20				
3	30				
4	40				
5	0	300 mm	20개	600mm × 300mm	0°
6	20				
7	30				
8	40				

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 프리텐션 하중에 따른 파괴상재압 및 침하량

프리텐션 하중변화에 따른 쏘일네일링 시스템의 전체안전성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 수행된 실험을 토대로 분석이 수행되었다. 프리텐션 하중변화에 따른 파괴상재압의 변화를 정리하면 그림 4와 같다. 프리텐션 하중이 증가할수록 파괴상재압은 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 일반

쏘일네일링 시스템의 파괴상재압(네일길이 200mm인 경우  $q_{gf} = 1.9t/m^2$ , 네일길이 300mm인 경우  $q_{gf} = 7.8t/m^2$ )을 기준으로 각 case의 침하량을 도시하면 그림 5와 같으며, 프리텐션 하중이 증가할수록 침하량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

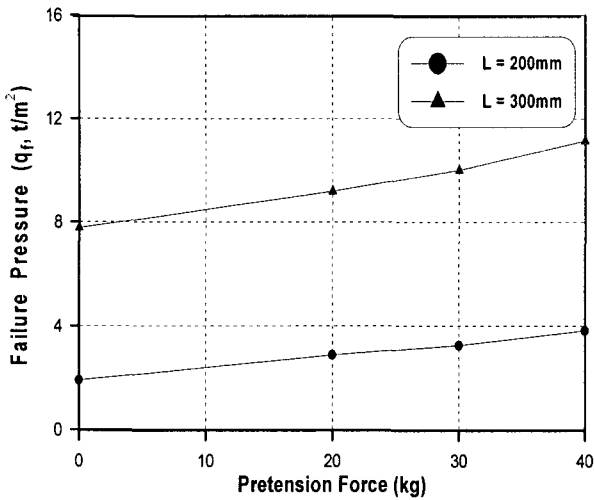


그림 4. 프리텐션 하중과 파괴상재압의 관계

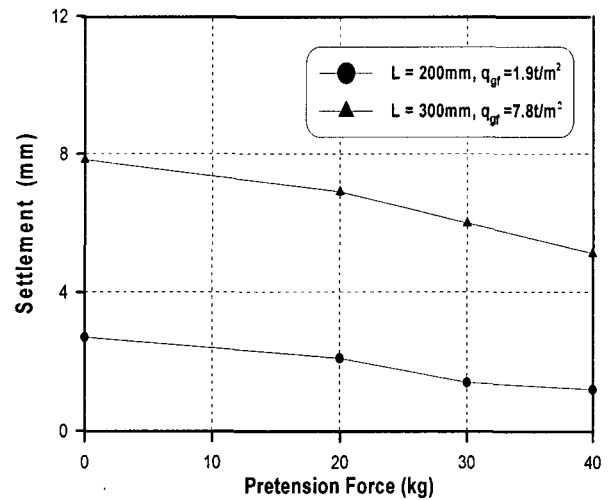
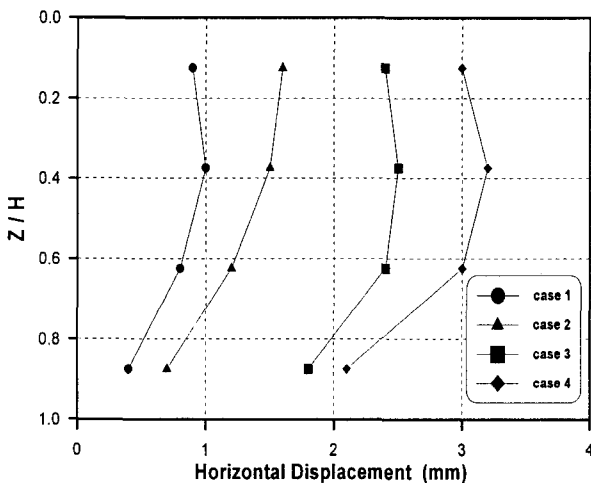


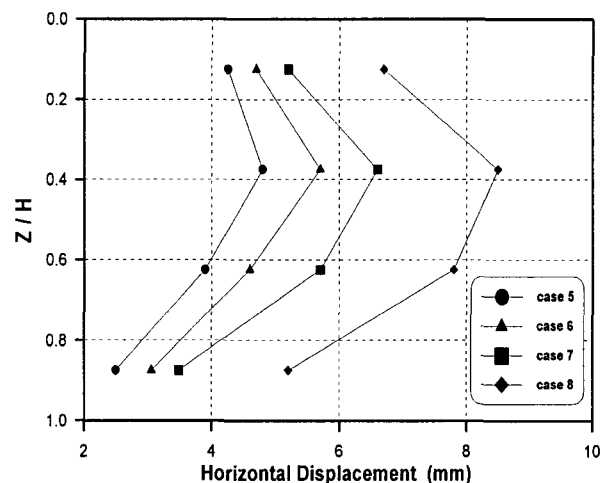
그림 5. 프리텐션 하중과 침하량의 관계

#### 4.2 프리텐션 하중에 따른 수평변위

프리텐션 하중변화에 따른 전면벽체의 거동특성을 알아보기 위해 파괴상재압( $q_f$ ) 상태에서 각 case 별(표 4 참조) 수평변위 양상을 도시하여 정리하면 그림 6과 같다. 상재압이 가해질 경우 수평변위 곡선에서  $0.25 q_f$ 의 상재압이 작용할 때  $Z/H$ (변위측정위치( $Z$ )와 전면벽체 굴착깊이( $H$ )의 비)가 0.125인 지점에서 수평변위가 가장 크게 유발되는 형태를 나타내고 있으며,  $0.75 q_f$  상재압에 도달했을 때에는  $Z/H$ 비가 0.375인 지점에서 수평변위가 증가하는 모습을 나타내었다. 또한, 파괴시에는  $Z/H$ 비가 0.375 및 0.625인 지점에서 수평변위가 증가하여 전면판에 배가 나온 형태가 되는 것을 알 수 있다.



(a) 네일길이(L) = 200mm

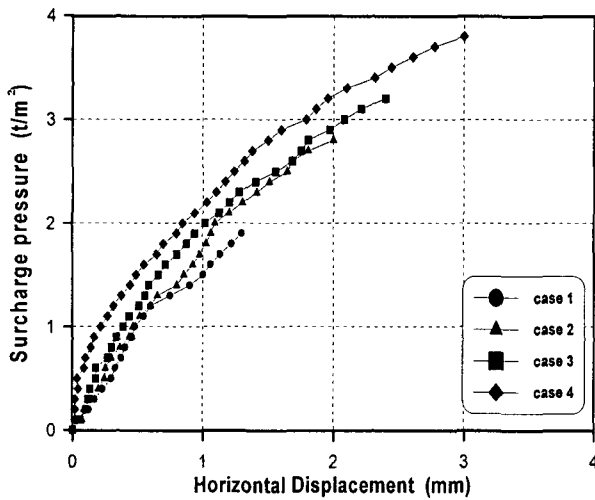


(b) 네일길이(L) = 300mm

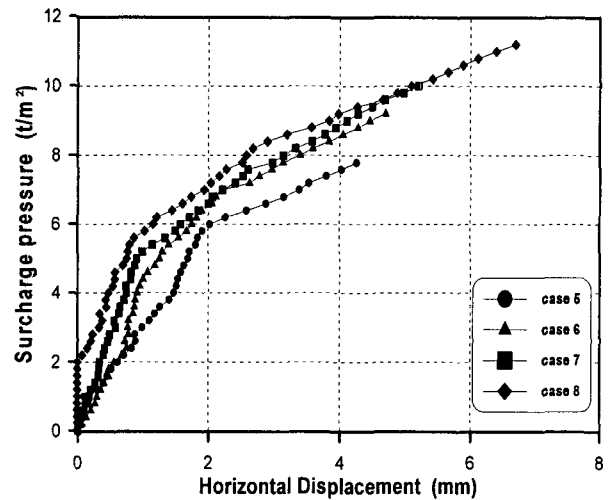
그림 6. 파괴상재압이 작용할 때의 수평변위

최대수평변위가 발생한  $Z/H$ 비가 0.375인 지점에서의 상재압 및 최대수평변위의 관계를 정리하여 case 별로 도시하면 그림 7과 같다. 네일길이가 200mm인 그림 7(a)의 경우, 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴

상재압( $1.9t/m^2$ )을 기준으로 발생한 수평변위를 분석해보면, case 1의 경우 1.3mm, case 4의 경우 0.8mm로 프리텐션 하중(40kg)을 가했을 경우 수평변위가 38% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 계속해서, 네일길이가 300mm인 그림 7(b)의 경우, 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴상재압( $7.8t/m^2$ )을 기준으로 발생한 수평변위를 분석해보면, case 5의 경우 4.2mm, case 8의 경우 2.5mm로 프리텐션 하중(40kg)을 가했을 경우 수평변위가 40% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 프리텐션 하중을 20~40kg으로 증가시킬 경우 상재압 증가에 의해 유발되는 수평변위는 38~40% 정도 감소하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다.



(a) 네일길이(L) = 200mm



(b) 네일길이(L) = 300mm

그림 7. 프리텐션 하중변화에 따른 상재압 및 최대수평변위의 관계

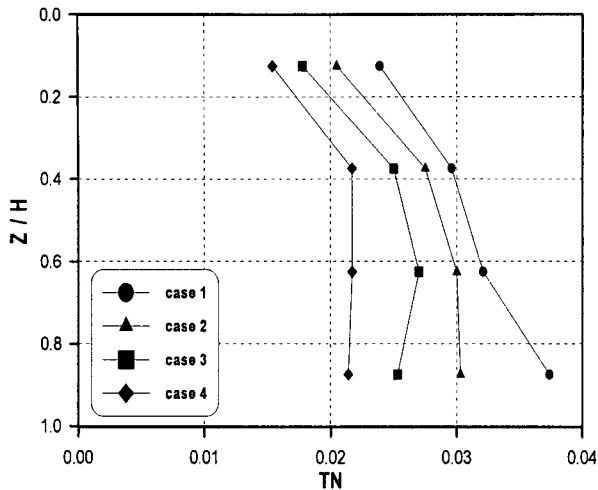
### 4.3 벽체에 작용하는 수평토압

프리텐션 하중을 가한 벽체에서 유발되는 수평하중은 하중계를 사용하여 벽체에서 유발되는 하중을 측정하는 방법과 네일두부에서의 인장력을 측정하는 방법으로 측정하였다. 하중계를 부착한 경우는 강제빔을 전면벽체에 부착한 상태에서 실험을 수행하였다. 강제빔의 지지로 파괴양상이 나타나지 않아, 강제빔을 설치하지 않은 상태에서의 파괴상재압을 기준으로 시험을 종료하였으며, 총수평하중으로 계산하여 결과를 정리하였다. 네일두부에서 인장력을 측정한 경우는, Schlosser 등(1991)이 제안했던 무차원 토압계수  $K$ 의 식을, 본 실험에 맞도록 일부 수정하여 아래의 식 (2)와 같이 무차원상수  $TN$ 을 사용하여 정리하였다.

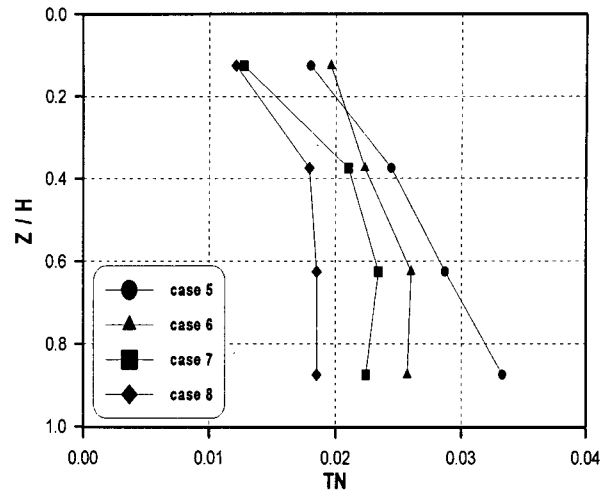
$$TN = \frac{T_i}{\sigma_v \cdot S_h \cdot S_v} = \frac{T_i}{(\gamma \cdot z + q) \cdot S_h \cdot S_v} \quad (2)$$

여기서,  $T_i$ : 각 지점에서 네일 두부의 인장력,  $\gamma$ : 지반의 총 단위중량,  $z$ : 각 네일의 설치 높이  
 $q$ : 하중단계에 따른 상재압,  $S_h$ : 네일의 수평간격,  $S_v$ : 네일의 수직간격

파괴상재압이 작용할 경우, 네일두부에서 발생한 인장력을 무차원상수  $TN$ 으로 계산하여 Z/H비로 도시하면 그림 8과 같다. 프리텐션 하중을 가하지 않은 case 1 및 5의 토압분포는 삼각형 형태로 나타났으며, 프리텐션 하중(40kg)을 가한 case 4 및 8의 토압분포는 사다리꼴 형태와 유사하게 나타났다.



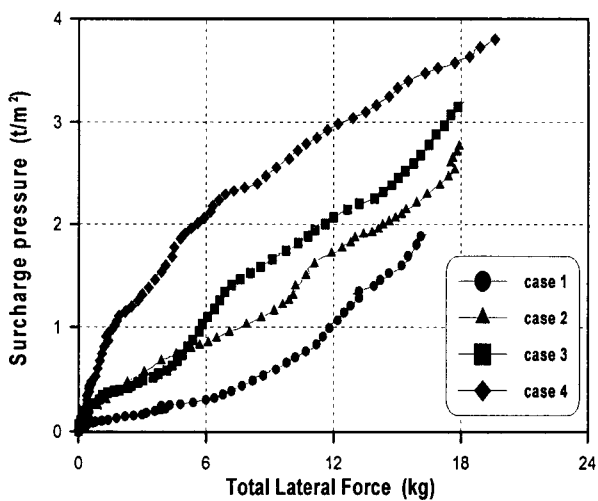
(a) 네일길이(L) = 200mm



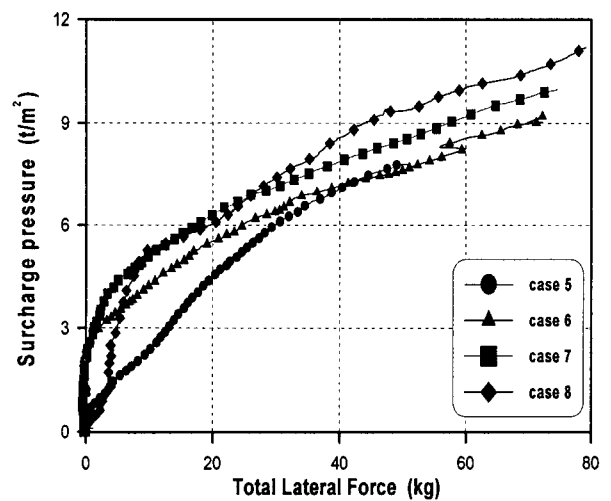
(b) 네일길이(L) = 300mm

그림 8. 프리텐션 하중변화에 따른 네일두부 인장력  $TN$

전면벽체 상부로부터 10, 20, 30 및 40cm에 설치한 하중계로부터 측정된 총수평하중 및 상재압과의 관계를 살펴보면, 상재압이 증가함에 따라 전면벽체에 유발되는 최대수평하중이 점진적으로 상부에서 하부로 점진적으로 전이되는 것을 확인할 수 있었으며, 총수평하중 및 상재압의 관계를 도시하면 그림 9와 같다.



(a) 네일길이(L) = 200mm



(b) 네일길이(L) = 300mm

그림 9. 프리텐션 하중변화에 따른 총수평하중 및 상재압의 관계

그림 9(a)의 경우 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴상재압( $1.9t/m^2$ )을 기준으로 총수평하중을 분석해보면, case 1의 경우 16.4kg, case 4의 경우 5.4kg으로, 프리텐션 하중(40kg)을 가했을 경우 총수평하중이 67% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 계속해서, 그림 9(b)의 경우 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴상재압( $7.8t/m^2$ )을 기준으로 발생한 총수평하중을 분석해보면, case 5의 경우 50.9kg, case 8의 경우 34.7kg으로, 프리텐션 하중(40kg)을 가했을 경우 31% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 동일한 상재압 상태에서 유발되는 총수평하중은 프리텐션 하중을 20~40kg로 증가시킬 경우 일반 쏘일네일링 시스템과 비교하면 네일길이가 200mm인 경우는 16~67% 정도, 네일길이가 300mm인 경우는 23~31% 정도 감소하는 것으로 나타났다.(표 4 참조)

## 5. 결론

본 연구에서는 실내모형실험을 통하여 프리텐션 하중에 따른 쏘일네일링 벽체의 거동특성에 관한 실험적 고찰을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 프리텐션 하중이 증가할수록 파괴상재압은 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴상재압을 기준으로 침하량을 정리하면, 프리텐션 하중이 증가할수록 침하량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴상재압을 기준으로 발생한 수평변위를 분석해보면, 프리텐션 하중이 증가할수록 수평변위가 38~40% 정도 감소하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다.
- (3) 파괴상재압이 작용할 경우, 네일두부에서 발생한 인장력을 무차원상수  $TN$ 으로 계산하여 네일 위치별로 살펴보면, 프리텐션 하중을 가하지 않은 case 1 및 5의 토압분포는 삼각형 형태를 나타내고 있으며, 프리텐션 하중(40kg)을 가한 case 4 및 8의 토압분포 형태는 사다리꼴 형태와 유사하게 나타났다.(표 4 참조)
- (4) 일반 쏘일네일링 시스템의 파괴상재압을 기준으로 총수평하중을 분석해보면 동일한 상재압 상태에서 유발되는 총수평하중은 프리텐션 하중을 20~40kg으로 가할 경우 일반 쏘일네일링 시스템과 비교하여 네일길이가 200mm인 경우는 16~67% 정도, 네일길이가 300mm인 경우는 23~31% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 향후 연구과제로 프리텐션 하중에 의한 구속압 증가에 따른 주면마찰력이 증가할 것으로 예상되므로, 이에 대한 실험적 연구와 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 적용될 새로운 형식의 재활용 전면판 등에 관한 실험적 연구가 진행될 예정이다. 또한 이러한 실험적 연구결과를 토대로 본 연구에서 개발한 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 대한 안정해석기법에 대한 연구가 수행될 예정이다.

## 참고문헌

1. 김홍택(2001), "Soil Nailing 공법의 과거 현재 미래", 평문각, pp.135~165.
2. 김홍택, 강인규, 박사원, 고용일, 권영호(1999), "프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제2호, pp.105~127.
3. 김홍택, 최영근, 박시삼(2002), "진단강도감소기법을 이용한 프리텐션 쏘일네일링 공법의 안정성 평가", 한국지반환경공학회 '2002 학술발표회, pp.227~232.
4. 김홍택, 최영근, 박시삼, 김범석(2003), "프리텐션 쏘일네일링 시스템의 현장인발시험 및 안정성 평가", 한국지반환경공학회 논문집, 게재예정.
5. FHWA, Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls, Publication No. FHWA-SA-96\_069, pp.63~136.
6. Fank, R. and Zhao, S.R.(1982) Estimation through Pressuremeter Parameters of the Settlement under Load Drilled Shafts in Fine Soil. No. 119, Ref.2712 pp.17~24 et Journal of Southwestern Jiaotong University Sichmuan, No.1, 1983, pp.1~10.
7. Schlosser, F.(1991), Recommendations Clouterre / Soil Nailing Recommendations, French National Rearch Project Report, No. FHWA-SA-93\_026.