

# 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 현장인발시험 및 안정성 평가

## Field Pullout Tests and Stability Evaluation of the Pretension Soil Nailing System

김흥택\* · 최영근\*\* · 박시삼\*\*\* · 김범석\*\*\*\*

Kim, Hong-Taek · Choi, Young-Geun · Park, Si-Sam · Kim, Berm-Suk

### Abstract

In the present study, a newly modified soil nailing technology named as the PSN(Pretension Soil Nailing) system is proposed. Effects of various factors related to the design of the pretension soil nailing system, such as the length of a sheathing pipe and the fixed cone, are examined throughout a series of the displacement-controlled field pull-out tests. 9 displacement-controlled field pull-out tests are performed in the present study and the pretension forces are also evaluated based on the measurements. In addition, both short-term and long-term characteristics of pull-out deformations of the newly proposed PSN system are analyzed and compared with those of the general soil nailing system by carrying out the stress-controlled field pull-out tests. A numerical approach is further made to determine a postulated failure surface as well as a minimum safety factors of the proposed PSN system using the shear strength reduction technique and the FLAC<sup>2D</sup> program. Global minimum safety factors and local safety factors at various excavation stages computed in case of the PSN system are analyzed throughout comparisons with the results expected in case of the general soil nailing system. An efficiency of the PSN system is also dealt with by analyzing the wall-facing deformations and the adjacent ground surface settlements.

**Keywords** : Pretension soil nailing system, Field pull-out tests, Pretension force, Shear strength reduction technique

### 요 지

본 연구에서는 프리텐션을 적용한 쏘일네일링 공법을 제시하고, 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 대한 변위제어방식 현장인발 시험을 총 9회 실시하여 프리텐션 쏘일네일링 구조체의 관련 설계변수인 쉬스관 길이 및 고정콘 유·무 등에 대한 영향에 대해 분석하였으며, 아울러 프리텐션 하중의 평가도 다루어 졌다. 또한 응력제어방식 현장인발시험을 총 3회 실시하여, 일반 쏘일네일 및 프리텐션 쏘일네일의 장·단기적인 인발-변형 특성 등을 비교·분석하였다. 계속해서, 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정성 평가를 위해, 예상파괴면 및 최소안전율을 결정하기 위해 사면안정해석 등에 주로 적용되고 있는 전단강도감소기법을 이용한 수치해석적 접근방법의 제시 및 분석 등이 이루어졌다.

**주요어** : 프리텐션 쏘일네일링 구조체, 현장인발시험, 프리텐션 하중, 전단강도감소기법

\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원 · (주)동평이엔씨 대표이사

\*\*\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정

## 1. 서론

쏘일네일링 공법은 1993년경 국내에서 가시설 흙막이 벽체에 처음으로 적용된 이후, 주로 지하굴착 및 사면보강 등에 보편적으로 사용되고 있는 공법이다. 근래에 들어서는 영구사면보강 등에 그 적용성이 점차 확대되고 있으며, 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, 벽체변위 및 지표침하 억제와 안정성 증대 등을 위하여 지반앵커공법(ground anchor system)과 유사한 프리텐션(pretension) 방식의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 프리텐션을 적용한 쏘일네일링 공법을 제시하고(그림 1), 또한 프리텐션 쏘일네일링 구조체의 인발 거동특성 등을 확인하기 위해서 변위제어방식 현장인발시험을 총 9회 실시하여, 프리텐션 쏘일네일링 구조체의 관련 설계변수인 쉬스관(sheathing pipe) 길이 및 고정콘 유·무 등에 대한 영향을 분석하였으며, 또한 프리텐션 하중의 평가도 다루어 졌다. 이외에도, 응력제어방식 현장인발시험을 총 3회 실시하여 프리텐션 쏘일네일 및 일반 쏘일네일의 장·단기적인 인발-변형 특성에 대해서 비교·분석하였다. 계속해서 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정성 평가를 위해, 예상파괴면 및 최소안전율을 결정하기 위해 사면안정해석 등에 주로 적용되고 있는 전단강도감소기법(Shear Strength Reduction Technique)을 이용한 수치해석적 접근방법의 제시 및 분석 등이 이루어졌다.

또한 본 연구에서는 FLAC<sup>2D</sup>(ver 3.3) 프로그램을 사용하여 프리텐션 쏘일네일링 굴착벽체의 대표단면에 대한 parametric study를 수행하였으며, 프리텐션 효과에 의한 안정성 증가 정도를 정량적으로 분석하기 위해 한계평형해석법을 기초로 한 Visual Nail 프로그램의 해석결과와 비교하였다.

## 2. 프리텐션 쏘일네일링 시스템

### 2.1 개요

일반적으로 쏘일네일링 공법에 대한 안정성 평가시, 사

면안정해석 기법을 기초로 하여 활동면은 원호 및 직선 등으로 가정한 후, 활동에 저항하는 보강재의 주저항력은 보강재의 주면마찰력과 항복인장강도 중 작은 값을 적용하여 평가하며, 휨모멘트와 전단저항력은 그 값이 상대적으로 매우 작기 때문에 고려하지 않고 있는 실정이다. 이와 같이 일반적인 쏘일네일링 공법의 구조상, 주저항력에 해당하는 주면마찰력은 굴착벽체의 변위가 유발됨으로서 발휘되는 메카니즘을 지니고 있으나, 프리텐션 쏘일네일링 공법은 시공중 전면벽체 또는 전면판에 프리텐션 하중을 미리 가해줌으로써, 이로 인해 쏘일네일링 공법의 주저항력이라고 할 수 있는 주면마찰력을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 프리텐션 하중을 가해줄 경우, 네일 두부에 부착된 지압판 등은 전면벽체에 수동토압을 유발시키게 되므로, 일반 쏘일네일링 벽체에서 발생하는 주동토압을 경감시킬 수 있으므로, 단계별 굴착시 발생하는 변위를 어느 정도 억제할 수 있을 것으로 판단된다(그림 2 및 3).

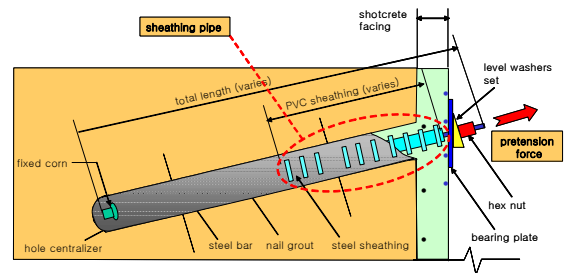
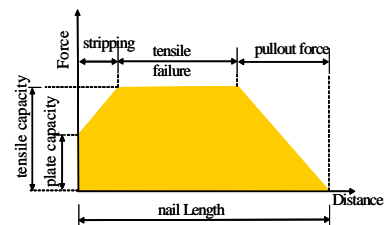
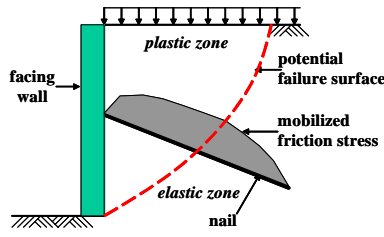


그림 1. 프리텐션 쏘일네일링 공법 대표단면

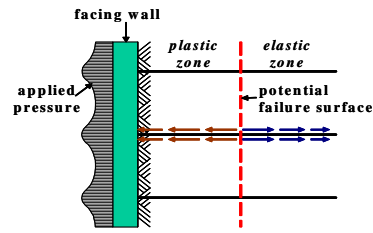
김홍택 등(1999)은 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 대해, 학문적 기초에 입각한 설계 및 시공을 유도하고자 관련 해석절차 및 설계기법을 체계화하여 제시한 바 있다.



a) 파괴거동

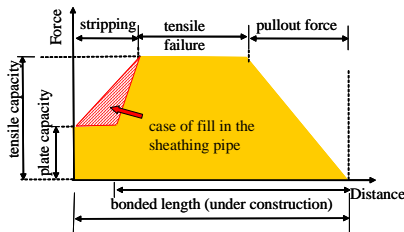


b) 마찰응력

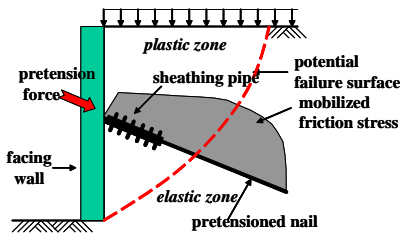


c) 작용저항력

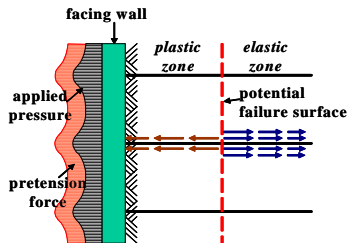
그림 2. 일반쏘일네일링 구조체의 예상 파괴거동



a) 파괴거동



b) 마찰응력



c) 작용저항력

그림 3. 프리텐션 쏘일네일링 구조체의 예상 파괴거동

## 2.2 프리텐션 하중 도입에 따른 영향

일반적인 쏘일네일링 구조체의 파괴거동 특성은 그림 2와 같으며, 프리텐션 쏘일네일링 공법에 있어서 프리텐션 효과에 따른 쏘일네일링 구조체의 파괴거동특성과 프리텐션의 구속효과는 그림 3과 같이 예상할 수 있다.

그림 3(a)를 살펴보면, 프리텐션 하중을 가해주는 초기 단계에는 쉬스판에 의한 자유장 영향으로 인해 쉬스판 내에서 미끄러짐 현상이 예상되나, 프리텐션 하중을 가해준 후 쉬스판 내에는 그라우트로 충전되기 때문에 시공완료 후에는 미끄러짐에 의한 마찰저항력 손실은 없을 것으로 판단된다. 그림 2 및 3에서 보는 바와 같이 동일한 네일제원 및 하중조건이라면, 프리텐션 하중이 증가함에 따라 쏘일네일링 보강토체의 예상파괴영역은 프리텐션의 구속효과로 인하여 점진적으로 작아지며, 네일에 발휘되는 마찰력은 점진적으로 증가할 것으로 예상된다.

## 2.3 프리텐션 하중의 결정

변위제어방식 현장인발시험을 수행함으로써 쏘일네일의 최대인발력 ( $T_{max}$ )을 평가할 수 있으며, 인발-변형 관계로부터, 인발시 쏘일네일과 흙사이에서 유발되는 주면마찰력 등의 상호관계를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 쏘일네일과 흙사이 주면마찰력 발휘는 Frank and Zhao(1982)가 제안한 두 개의 선형법칙(bilinear law)에 근거하여 인발-변형 관계를 탄성한계 및 소성한계로 분리하여 규명하였다. Frank and Zhao(1982)가 제안한 두 개의 선형법칙(bilinear law)에 따르면, 초기기울기( $k_{\beta}$ )의 직선과 초기기울기( $k_{\beta}$ )의 1/5 직선이 최대주면마찰력( $q_{smax}$ )의 1/2 지점에서 교차하며(그림 4), 초기기울기( $k_{\beta}$ )의 직선의 범위내에서는 탄성거동을 한다고 밝힌 바 있다. 따라서, 변위제어방식 현장인발시험을 통해 얻어진 인발력( $T$ )을 식(1)에 적용하여 주면마찰력( $q_s$ )으로 산정한 후, 그림 4와 같은 주면마찰력-변형 관계곡선을 얻을 수 있다.

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

여기서,  $T$  : 쏘일네일의 인발력,

$p$  : 쏘일네일의 주면장( $= \pi D$ ),

$L_s$  : 쏘일네일의 길이

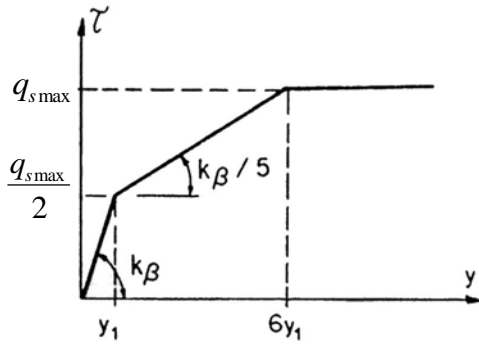


그림 4. 주면마찰력 발휘에 관한 법칙

따라서, 본 연구에서는 Frank and Zhao(1982)가 제안한 탄성한도 범위에 해당하는 흙과 쏘일네일간의 상대변위( $y_1$ )에 해당하는 범위까지 발휘된 주면마찰력을 인발하중으로 환산하여, 적용가능한 프리텐션 하중으로 결정하였다.

### 3. 현장인발시험

#### 3.1 개요

최적의 프리텐션 쏘일네일 단면을 결정하기 위해 프리텐션 쏘일네일의 제원에 변화를 주면서 다양한 현장인발시험을 수행하였으며, 현장인발시험이 수행된 위치 등 현장개요는 그림 5와 같다.

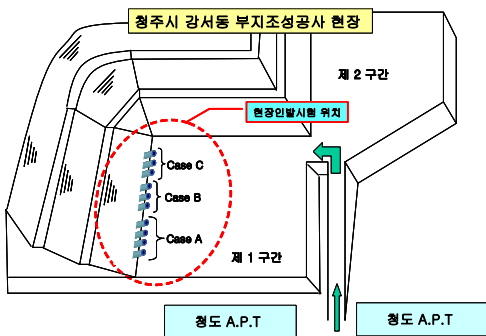


그림 5. 현장인발시험 위치도

표 1. 현장토질특성치

구분	물성치
통일 분류법	SM
현장 함수비	22.4 (%)
액성 한계 (LL)	33.9 (%)
소성 한계 (PL)	24.1 (%)
현장습윤단위중량	1.85 (t/m <sup>2</sup> )
점착력	0.17 (t/m <sup>2</sup> )
내부 마찰각	32.3°

#### 3.2 시험방법 및 제원

본 연구에서는 변위제어방식 및 응력제어방식 현장인발시험을 모두 수행하였으며(표 2), 현장인발시험시 슈스관 내부의 쏘일네일 거동 및 고정콘크리트의 일체거동 등을 확인하기 위해, 변형율계(strain gauge)를 쏘일네일 상·하면에 1m 간격으로, 시험네일 1본당 총 10개씩 부착하였다. 변위제어방식 현장인발시험의 인발속도는 Clouterre 연구보고서(1991)에 소개된 변위제어방식 현장인발시험방법을 참고하여, 1mm/분(허용오차  $\pm 10\%$  이내) 정도로 하였다. 또한 인발시험은 인발력이 최대치를 지나 점차 감소하는 경향을 나타내거나, 일정한 값에 수렴할 경우 종료하였다. 응력제어방식으로는 변위제어방식으로부터 결정된 최대인발력( $T_{max}$ )보다 작고 동시에 네일의 탄성한계값( $T_C$ )의 0.6배 이내의 하중으로 결정하였으며, 각  $0.1 T_{max}$ 의 하중단계별로 변위량을 측정하였다. 응력제어방식에 의한 현장인발시험시 최초 하중단계는  $0.2 T_{max}$ 이며, 각 하중단계별로 하중을 1시간동안 일정하게 유지하였으며,  $0.7 T_{max}$ 의 하중단계에서는 하중을 3시간동안 일정하게 유지시켜 네일의 크리프 거동을 관찰하였다(김홍택 2000). 시험용 쏘일네일은 25mm 이형철근을 사용하였으며, 천공직경은 105mm, 삽입경사각도는 15°로 하였다. 슈스관은 요철이 있는 직경 60mm, 두께 5mm의 강관으로, 길이 1m 및 2m 두 종류를 제작하였다. 현장인발시험에 적용된 시험방법 및 프리텐션 쏘일네일의 제원 등은 표 2에 정리하였다.

표 2. 현장 인발시험에 적용된 시험방법 및 프리텐션 쓰일네일 제원

시험	시험 방식	대상 지층	No.	구 분	길이	쉬스관 길이	고정콘 유·무	자유장	프리텐션 하중
Case A	변위 제어 방식	화강 풍화토	1		5m	0m	유	-	-
			2	무					
			3			1m	유	1m	
			4	무					
			5			2m	유	2m	
			6	무					
Case B	응력 제어 방식	화강 풍화토	7		0m	유	-	-	
			8		1m				
			9		2m				
Case C	응력 제어 방식	화강 풍화토	10		0m	유	-	-	
			11		1m				
			12		2m				

쓰일네일 현장인발시험 장비는 압력장치(pressure pump), 변위계(dial gauge), LVDT, 하중계(load cell), 자료수집장치(data logger, ucs 25) 및 노트북컴퓨터 등으로 구성되었으며, 종합적으로 정리된 현장인발시험 개요도는 그림 6과 같다.

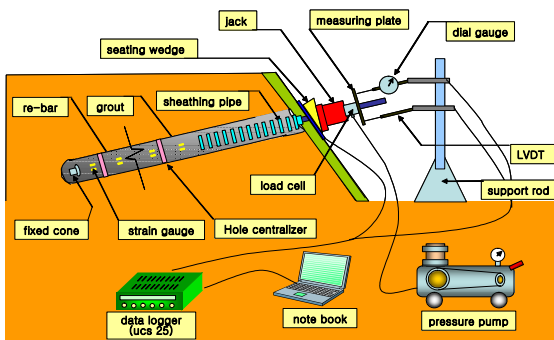
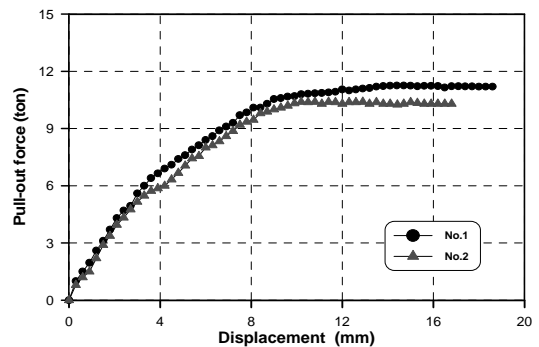


그림 6. 현장인발시험 개요도

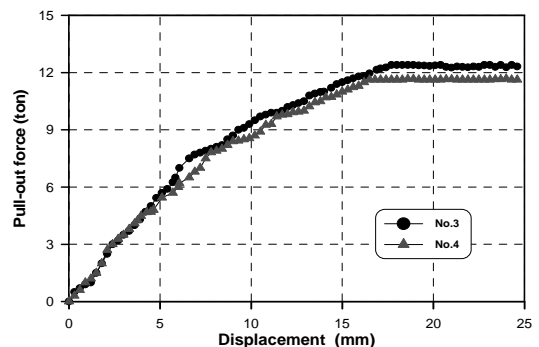
## 4. 시험결과 분석

### 4.1 고정콘 설치에 따른 영향

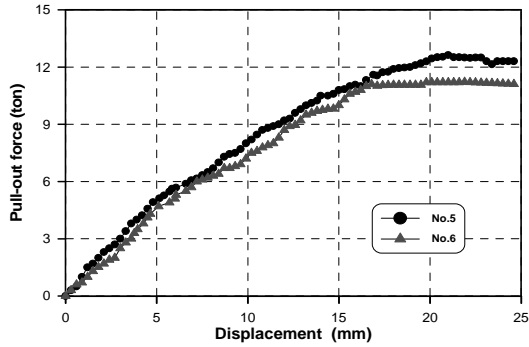
프리텐션 쓰일네일의 최적단면을 결정하기 위해 수행된 Case A(표 2 참조) 시험결과를 토대로, 고정콘 설치에 따른 영향을 알아보기 위한 고정콘 설치 유·무에 따른 시험 결과는 그림 7과 같다.



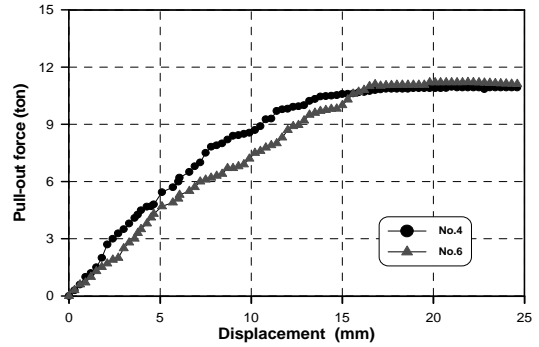
(a) 일반 쓰일네일(No.1 & No.2)



(b) 시험용 네일(No.3 & No.4, 쉬스관=1m)



(c) 시험용 네일(No.5 & No.6, 쉬스관=2m)  
그림 7. 고정콘 설치에 따른 인발거동특성

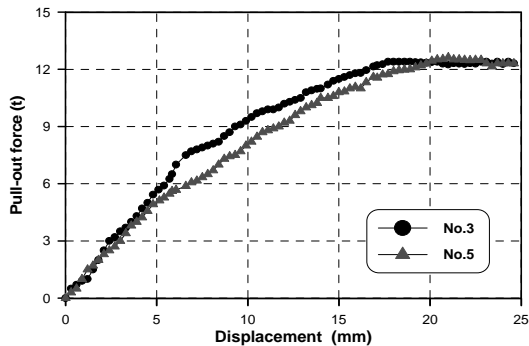


(b) 시험용 네일(No.4 & No.6, 고정콘 없음)  
그림 8. 쉬스관 길이에 따른 인발거동특성

그림 7을 살펴보면, 고정콘이 설치된 No.1, No.3 및 No.5 등의 시험용 쏘일네일은, 고정콘이 설치되지 않은 No.2, No.4 및 No.6 등에 비해 최대인발력이 13~15% 정도 증가되는 것으로 평가되었다.

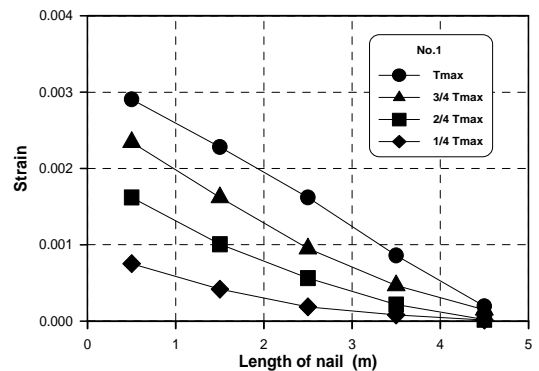
#### 4.2 쉬스관 길이에 따른 영향

Case A에서 수행한 시험결과를 토대로, 쉬스관의 길이에 따른 영향을 알아보기 위해, 쉬스관의 길이를 1m 및 2m로 변화를 주어 현장인발시험을 수행하였으며, 시험결과는 그림 8과 같다. 그림 8을 살펴보면, 쉬스관이 1m에서 2m로 증가할 경우, 최대인발력은 0.8~3.4% 정도로 비교적 감소경향이 미비한 것으로 나타났으며, 인발거동특성 곡선을 살펴보면 쉬스관 길이가 길어질수록 기울기가 완만해지는 경향을 나타냈다. 이는 쉬스관 내에 그라우트를 충전하지 않은 시험용 네일이기 때문에, 쉬스관내의 이형철근에서 탄성변형이 유발된 것으로 판단된다.

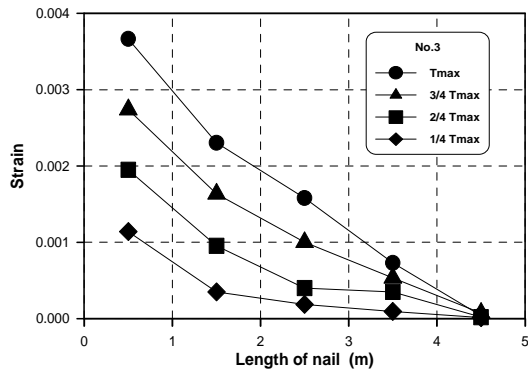


(a) 시험용 네일(No.3 & No.5, 고정콘 설치)

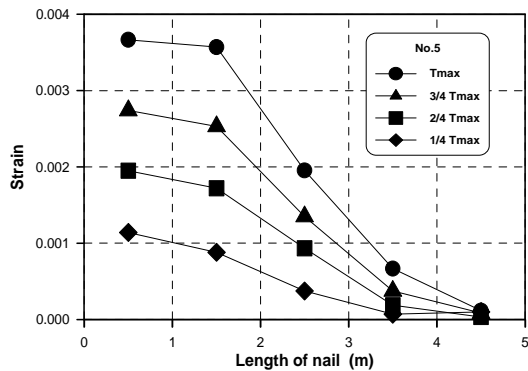
계속해서, 현장인발시험시 인발하중의 분포상태를 파악해보기 위해 설치된 변형율계의 측정값을 토대로, 변형율-네일길이 관계를 도시하면 그림 9와 같다. 그림 9에서는 변위제어방식 현장인발시험에서 평가된 최대인발력 ( $T_{max}$ )을 기준으로,  $T_{max}$ ,  $3/4 T_{max}$ ,  $2/4 T_{max}$  및  $1/4 T_{max}$ 의 인발하중이 작용할 경우에 대해, 변형율-네일길이 관계를 나타내었다. 그림 9(a)를 살펴보면, 인발하중 증가에 따른 변형율 값을 쏘일네일 두부에서 최대이고 끝단으로 갈수록 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 이형철근이 그라우트체와 완전히 부착되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 그림 9(b) 및 9(c)를 살펴보면, 그라우트체와 완전히 부착된 부분에서의 이형철근의 변형 정도는 일반 쏘일네일의 경우와 유사하게 나타났으나, 쉬스관이 설치된 부분에서의 변형율은 네일 두부에 가해진 인발하중을 대부분 유지하고 있는 것으로 나타났다.



(a) 일반 쏘일네일(No.1)



(b) 시험용 네일(No.3, 슈스관=1m)

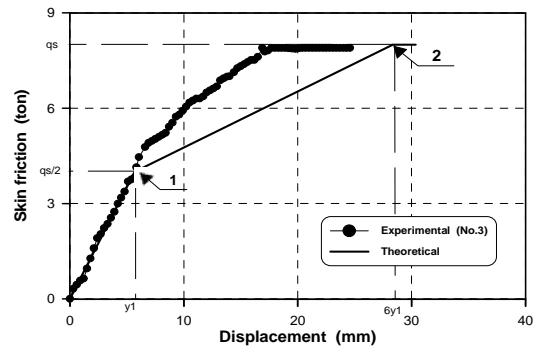


(c) 시험용 네일(No.5, 슈스관=2m)

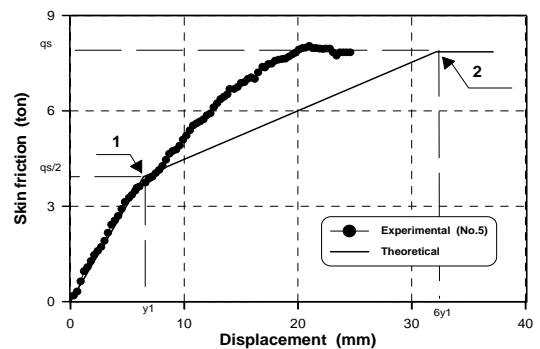
그림 9. 변형률-네일길이 관계곡선

### 4.3 프리텐션 하중의 결정

프리텐션 하중을 결정하기 위해, Case A의 프리텐션 시험용 네일 중, 비교적 최대인발력 및 인발거동특성 등이 좋게 평가된 No.3 및 No.5를 대상으로, Frank and Zhao(1982)가 제안한 두 개의 선형법칙을 적용해 보았다. 현장인발시험으로부터 평가된 인발력( $T$ )을 식(1)에 대입하여 주면마찰력( $q_s$ )을 결정하였으며, 이를 토대로 Frank and Zhao가 제안한 두 개의 선형법칙을 적용한 이론적 결과치와 시험결과를 서로 비교하면 그림 10과 같다.



(a) 시험용 네일(No.3, 슈스관=1m)



(b) 시험용 네일(No.5, 슈스관=2m)

그림 10. 주면마찰력-변위 관계곡선

그림 10을 살펴보면, 두 개의 선형법칙을 적용하여 도시한 직선의 경우, 탄성한계변위( $y_1$ )의 5배에 해당하는 소성한계변위( $6y_1$ )에서 최대주면마찰력( $q_{smax}$ )이 발휘되는 것으로 나타났으나, 시험결과곡선은 이에 비해 다소 인발거동특성이 양호하게 평가되었다. 또한, 그림 10(a)를 살펴보면, 탄성한계변위( $y_1$ ) 내에서 발휘되는 주면마찰력( $q_s$ )은  $3.93t/m^2$ 으로 평가되었으며, 이를 인발하중으로 환산하면  $6.19t$ 이 되므로, 탄성거동 범위내에서 적용가능한 프리텐션 하중은  $6.19t$  정도인 것으로 판단된다. 계속해서 그림 10(b)를 살펴보면, 탄성한계변위( $y_1$ ) 내에서 발휘되는 주면마찰력( $q_s$ )은  $3.92t/m^2$ 으로 평가되었으며, 이를 인발하중으로 환산하면  $6.15t$ 이 되므로, 탄성범위내에서 적용가능한 프리텐션 하중은  $6.15t$  정도인 것으로 판단된다.

#### 4.4 프리텐션 쏘일네일의 단기 인발거동특성

Case A의 시험용 네일로부터 비교적 인발거동특성이 양호하게 평가된, No.3 및 No.5과 동일한 제원으로 프리텐션 하중(6t)을 적용한 후, 쉬스관내에 그라우트를 충전한 후 충분히 그라우트가 경화된 뒤에 변위제어방식 현장인발시험을 수행하였으며, 시험결과는 그림 11과 같다(표 2 참조). 단기 인발거동특성을 평가하기 위해 수행된 변위제어방식 현장인발시험결과를 살펴보면, 최대인발력은 일반 쏘일네일(No.7)에 비해, 쉬스관이 1m 설치된 경우(No.8)에는 14% 정도, 쉬스관이 2m 설치된 경우(No.9)에는 21% 정도 각각 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 인발거동특성 역시 프리텐션 쏘일네일이 일반 쏘일네일의 경우에 비해 양호하게 평가되었다. 이를 통해 제한적이긴 하지만 프리텐션으로 인한 부분적인 변위억제 및 주면마찰력 증가 등의 효과를 간접적으로 확인할 수 있었다.

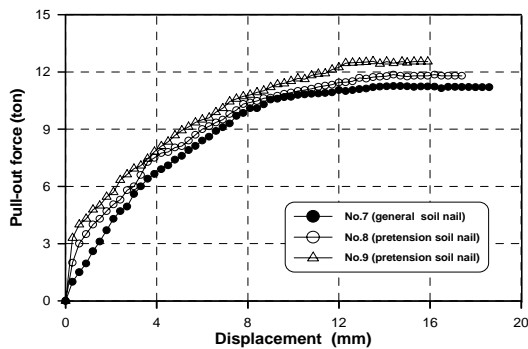


그림 11. 단기 인발거동특성

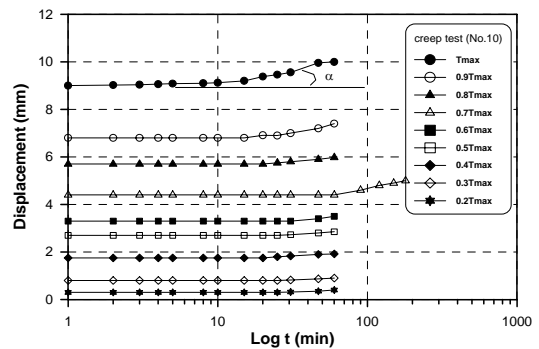
또한, Case B에 대한 변위제어방식 현장인발시험을 토대로 평가된 최대인발력 및 최대주면마찰력을 요약·정리하면 표 3과 같다.

표 3. 최대인발력 및 최대주면마찰력

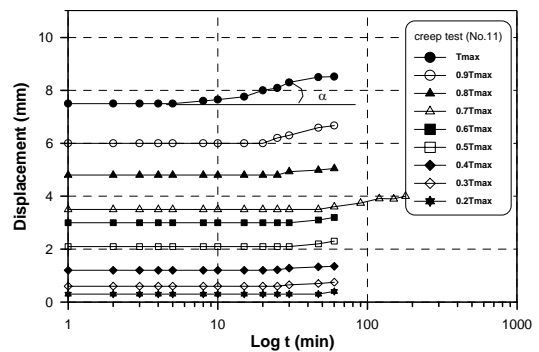
Case	No.	최대인발력 ( $T_{max}$ , t)	최대주면마찰력 ( $q_{smax}$ , t/m <sup>2</sup> )
B	7	12.2	7.77
	8	12.8	8.15
	9	13.5	8.59

#### 4.5 프리텐션 쏘일네일의 장기 인발거동특성

Case B 시험에서 평가된 최대인발력( $T_{max}$ )을 토대로, Case C 시험에서는 프리텐션 쏘일네일의 장기인발거동 특성을 규명하고자 응력제어방식 현장인발시험을 수행하였으며(표 2 참조), 그 결과는 그림 12와 같다. 그림 12는 각 하중단계( $0.2 T_{max} \sim T_{max}$ )별로 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45 및 60분 등에서 측정된 네일 두부(head)에서의 변위를 도시한 결과이며, 그림 13은 크리프 곡선의 기울기  $\alpha$ (즉, 각 하중단계별로 도시된  $\log t$ -네일의 두부변위 관계곡선의 기울기)를 인발 정도에 따라 도시한 결과이다. 특히  $0.7 T_{max}$  단계에서는, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120, 150 및 180분 등의 간격으로 네일 두부에서의 변위를 측정하였다.

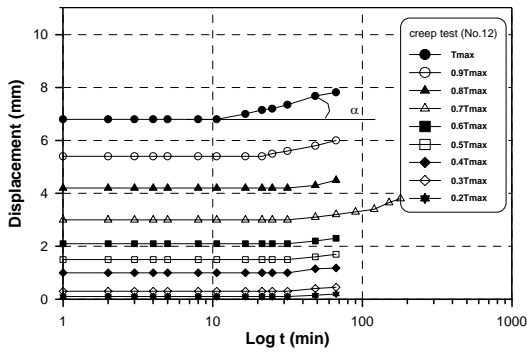


(a) 일반 쏘일네일(No.10)



(b) 프리텐션 쏘일네일(No.11, 쉬스관=1m)





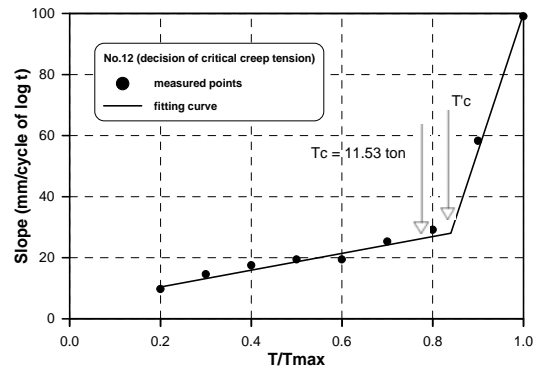
(c) 프리텐션 쏘일네일(No.12, 쉬스판=2m)

그림 12. 하중단계별 시간-변위 곡선

한계크리프인발력 ( $T_c'$ )은 한계크리프인발력 결정곡선에서 절곡점이 발생한 바로 직전의 하중단계를 한계크리프인발력 ( $T_c'$ )으로 결정하고 있으며(김홍택, 2000), 따라서 한계크리프인발력( $T_c'$ ) 및 크리프인발력( $T_c$ )의 관계를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$T_c \approx 0.9T_c' \quad (2)$$

(b) 프리텐션 쏘일네일(No.11, 쉬스판=1m)



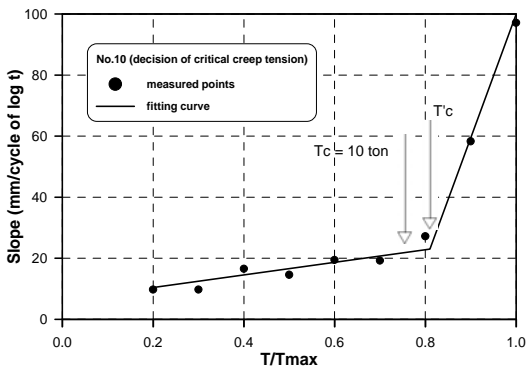
(c) 프리텐션 쏘일네일(No.12, 쉬스판=2m)

그림 13. 한계크리프인발력 결정곡선

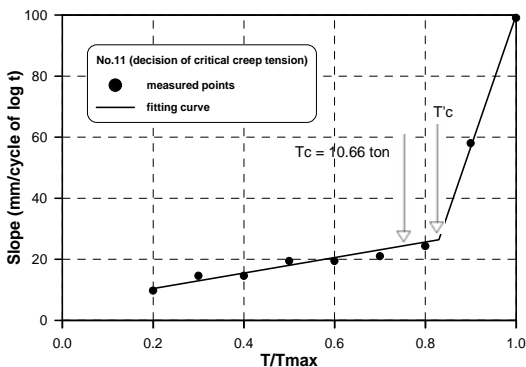
식 (2) 및 그림 13의 결과로부터 평가된 프리텐션 쏘일네일의 한계크리프인발력은 10.66~11.53t 정도이고, 프리텐션 쏘일네일의 장기거동특성을 나타내는 최대인발력과 한계크리프인발력의 비( $k$ )는 1.17~1.20 정도로서 일반 쏘일네일의  $k$  값(1.22)에 비해 작은 것으로 평가되었으며, 이를 요약·정리하면 표 4와 같다.

표 4. 한계크리프인발력

Case	No.	최대인발력 ( $T_{max}$ , ton)	한계크리프인발력 ( $T_c'$ , ton)	$k$
C	10	12.2	10.00	1.22
	11	12.8	10.66	1.20
	12	13.5	11.53	1.17



(a) 일반 쏘일네일(No.10)



따라서 프리텐션 쏘일네일의 경우, 크리프에 의한 장기간의 변형특성은 일반 쏘일네일에 비해 작은 경향임을 알 수 있으며, 프리텐션 쏘일네일링 벽체를 장시간 방치할 경우 인발저항력이 일반 쏘일네일링 벽체에 비하여 증가하므로 장기간의 공사에 있어서 유리할 것으로 판단된다(표 4 및 5).

표 5. 일반 쏘일네일의  $k$ 값(schlosser, 1983)

흙의 종류	모래	점토	이회토
$k = T_{max} / T_c'$	1.2	1.3	1.4

## 5. 안정성 평가 및 분석

### 5.1 평가기법

프리텐션 쏘일네일링에 대한 안정해석기법은 김홍택 등 (1999)에 의해 소개된바 있으나, 제시된 한계평형해석법 (Limit Equilibrium Method, LEM)을 토대로 프리텐션 하중에 의한 벽체에 작용하는 압축력 증가, 구속효과 및 주면마찰력 증가 등을 고려하기에는 아직까지 이에 대한 연구가 다소 부족한 실정이다. 따라서, 사면의 안정성 평가 방법 중 파괴시까지 지반의 전단강도를 감소시켜가면서 접근하는 방법인 전단강도감소기법(Shear Strength Reduction, SSR)을 이용하여 프리텐션 효과에 의한 벽체에 작용하는 압축력 증가 등을 고려한 쏘일네일링 지하 굴착 벽체의 안정성을 평가하였다(김홍택 등, 2002).

본 기법은 사면안정해석에 있어서 일반적으로 사용하고 있는 절편법에 비해 많은 이점이 있다. 그 중에서도 가장 중요한 것은 파괴면과 파괴메커니즘을 자동적으로 찾아 준다는 점이다(Dawson 등, 2000). 전단강도감소기법은 수치해석적인 방법을 이용하여 식(3)과 같이 지반의 전단강도를 좌우하는 지반의 내부마찰각 및 점착력에 대해 안전율을 고려하여 감소시키면서 파괴시까지 반복 계산함으로써, 파괴시 최종적으로 적용된 안전율과 예상파괴면을 평가하여 한계평형해석기법과 유사한 안정성 평가를 할 수 있는 해석기법이다.

$$\tan \phi_m = \frac{\tan \phi_o}{F_{S\phi}}, \quad c_m = \frac{c_o}{F_{S_c}} \quad (3)$$

여기서,  $\phi_o, c_o$ : 원지반의 내부마찰각 및 점착력,  
 $\phi_m, c_m$ : 안전율을 고려하여 수정된 내부마찰각 및 점착력,  
 $F_{S\phi}, F_{S_c}$ : 내부마찰각 및 점착력에 대한 안전율

### 5.2 대표단면 및 분석제원

지반공학용 유한차분법 상용프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하여 전단강도감소기법을 토대로 대표단면에 대한 안전율을 평가하였으며, 또한 한계평형해법 설계프로그램인 Visual Nail을 이용하여 일반적인 쏘일네일링 공법의 해석결과와 비교하였다. 또한 프리텐션 하중에 따른 쏘일네일링 보강벽체의 안정성을 보다 효과적으로 살펴보기 위해 쏘일네일링 보강벽체의 보강정도를 결정하는 무차원변수인 길이비( $R_L$ , length ratio)와 정착비( $R_B$ , bond ratio)를 변화시켜 분석하였다. 여기서, 길이비와 정착비에 대한 정의는 식(4)와 같다.

$$R_L = \frac{L}{H}, \quad R_B = \frac{d_{hole} \cdot L}{S_h \cdot S_v} \quad (4)$$

표 6. 분석에 사용한 제반 제원

공법	구분	$R_L$	$R_B$	$H$ (m)	$L$ (m)	$S_h$ (m)	$S_v$ (m)	$d_{hole}$ (mm)	해석방법
프리텐션 쏘일네일링 공법 (pretension force = 6t/m <sup>2</sup> )	A-1	0.4			4.0	1.40			LEM
	A-2	0.5			5.0	1.75			LEM
	A-3	0.6	0.3	10.5	6.0	2.10	1.0	105	LEM
	A-4	0.7			7.0	2.45			LEM
	B-1		0.3			2.80			LEM
	B-2		0.4			2.10			LEM
	B-3		0.5			1.68			LEM
	B-4	0.8	0.6	10.0	5.0	1.40	1.0	105	LEM
	B-5		0.7			1.20			LEM
	B-6		0.84			1.00			LEM, SSR
일반 쏘일네일링 공법	G-1	0.8	0.84	10.0	5.0	1.00	1.0	105	LEM, SSR

주) SSR : 전단강도감소기법, LEM : 한계평형해석법

여기서,  $L$  : 쏘일네일의 길이

$H$  : 사면높이

$d_{hole}$  : 천공직경

$S_h$  : 쏘일네일의 횡방향 설치간격

$S_v$  : 쏘일네일의 연직방향 설치간격

쏘일네일링 보강에 있어서 일반적으로 적용되고 있는 길이비와 정착비의 범위는 그라우트 쏘일네일링 경우,  $R_L = 0.5 \sim 0.8$ ,  $R_B = 0.3 \sim 0.7$  정도이다. 본 분석에서 사용한 제반 재료는 표 6과 같으며, 대표단면 및 격자요소망은 그림 14 및 15와 같다. 본 분석에서 상재하중은  $2t/m^2$ 의 등분포 하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

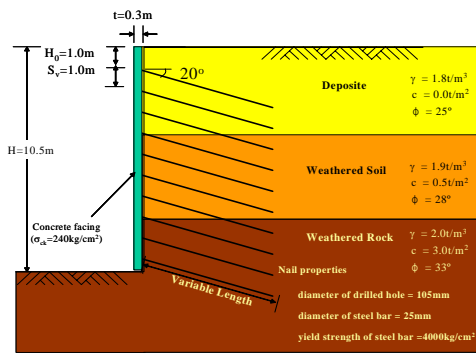


그림 14. 대표단면

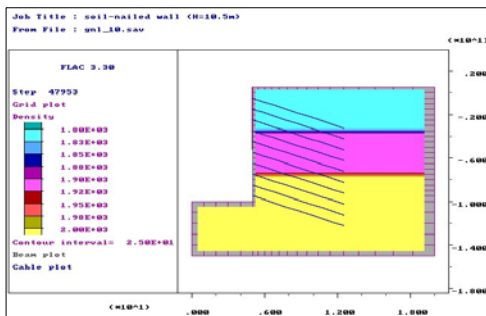
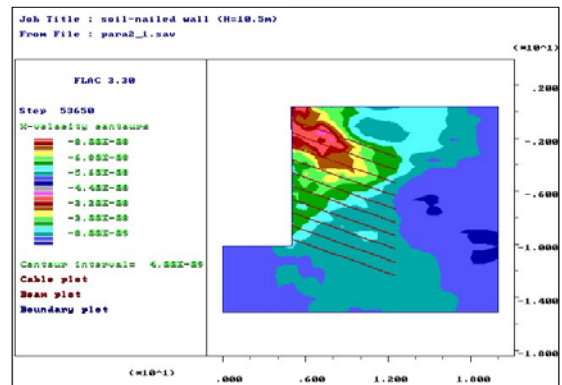


그림 15. 격자요소망

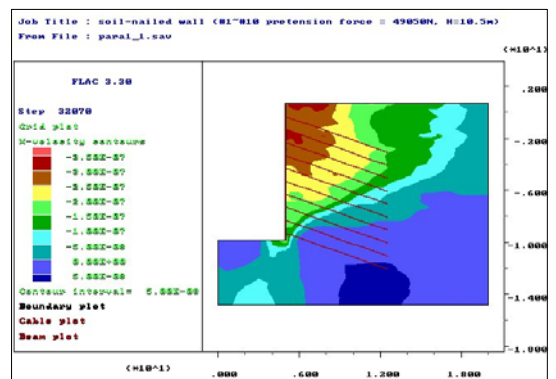
FLAC<sup>2D</sup> 프로그램을 이용한 전단강도감소기법의 적용에 있어서, 쏘일네일링 보강사면의 안전율은 Dawson 등 (2000)의 연구결과에 따라 지반의 전단강도를 식(3)에 의해 단계별로 저하시켜가면서 해석하여 1000 step 계산 후의 최대 불평형력(maximum unbalanced force)과 안전율과의 관계로부터 최대불평형력이 급격히 증가하는 시점으로 결정하였다.

### 5.3 분석 1

그림 16은 전단강도감소기법 및 FLAC<sup>2D</sup> 프로그램을 이용하여, 그림 14의 대표단면에 대해, 쏘일네일의 길이 및 횡방향 설치간격이 각각 8 m 및 1.0m인 경우에 대해 평가된, x방향 변위속도 분포를 나타낸 것이다. 이 경우에 최소안전율은 일반 쏘일네일링 벽체의 경우  $F_s=1.39$ 로, 프리텐션 쏘일네일링 벽체의 경우  $F_s=1.70$ 으로 각각 평가되었으며, 한계평형 해석결과, 일반 쏘일네일링 벽체의 경우  $F_s=1.38$ 로, 프리텐션 쏘일네일링 벽체의 경우  $F_s=1.72$ 로 각각 평가되었다. 따라서, 한계평형해석에 의한 안전율은 전단감소기법 등에 의해 평가된 안전율과 거의 유사한 것으로 나타났다.



(a) 일반쏘일네일링 구조체( $F_s=1.39$ )



(b) 프리텐션 쏘일네일링 구조체( $F_s=1.70$ )

그림 16. 예상활동파괴면(x방향 변위속도 분포)

### 5.4 분석 2

본 분석에서는 대표단면을 설정한 후(그림 14 참조),

표 7. 시공단계별 안전율 요약

구분	stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	stage 5	stage 6	stage 7	stage 8	stage 9	final stage	해석 방법
A-1	2.43	2.37	2.18	1.91	1.72	1.58	1.46	1.39	1.36	1.34	LEM
A-2	2.42	2.37	2.18	2.03	1.84	1.68	1.55	1.47	1.44	1.41	
A-3	2.43	2.37	2.18	2.03	1.91	1.78	1.63	1.55	1.50	1.46	
A-4	2.42	2.36	2.18	2.03	1.90	1.79	1.69	1.62	1.57	1.52	
B-1	2.42	2.36	2.18	2.02	1.90	1.79	1.69	1.64	1.62	1.57	
B-2	2.43	2.37	2.19	2.04	1.91	1.80	1.71	1.67	1.65	1.57	
B-3	2.43	2.38	2.20	2.05	1.93	1.82	1.73	1.70	1.68	1.63	
B-4	2.44	2.38	2.03	2.06	1.94	1.84	1.76	1.72	1.70	1.66	
B-5	2.44	2.39	2.21	2.07	1.95	1.85	1.78	1.74	1.73	1.69	
B-6	2.45	2.40	2.22	2.08	1.97	1.87	1.80	1.77	1.76	1.72	
B-6	2.44	2.40	2.21	2.07	1.97	1.88	1.80	1.76	1.75	1.70	SSR
G-1	1.50	1.51	1.45	1.41	1.38	1.36	1.35	1.36	1.37	1.38	LEM
G-1	1.52	1.53	1.45	1.42	1.39	1.38	1.37	1.36	1.38	1.39	SSR

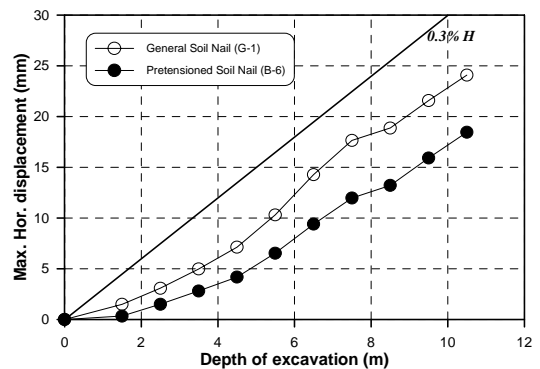
관련변수를 변화시켜가면서(표 6 참조), 한계평형해석법 및 전단강도감소기법 등에 각각 근거하여 각 시공단계별로 안정성을 검토하였다. 해석결과는 표 7에 요약·정리하였다.

표 7의 해석결과를 살펴보면, 프리텐션을 적용한 경우 각 시공단계의 국부안전율이 한계평형해석(LEM)의 경우 25~63% 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 전단강도감소기법(SSR)의 경우 22~61% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 프리텐션을 적용한 경우가 일반 쏘일네일링 공법에 비해 최종굴착단계에서의 안전율은 SSR은 22%, LEM은 25% 정도 각각 증가하는 것으로 나타났다.

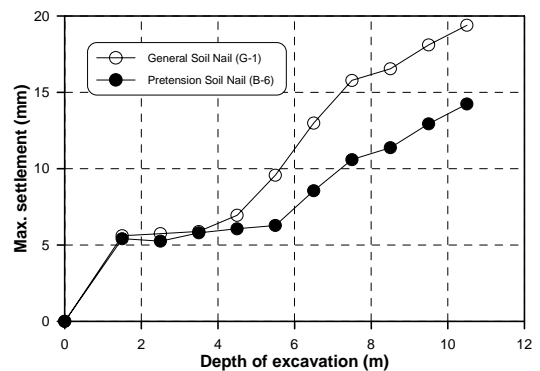
### 5.5 분석 3

본 연구에서 활용한 분석기법의 적용성을 확인하기 위해, 지반·구조물 관련거동 해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하여 단계별 굴착시공과정에 따른 정면벽체의 거동에 측을 위한 분석이 추가적으로 수행되었다. 대표단면은 그림 14와 동일하게 하고, 쏘일네일의 길이를 8m로 정하여 프리텐션 쏘일네일링(pretension force = 6 t/m<sup>2</sup>) 공법 및 일반 쏘일네일링 공법의 경우를 비교·분석한 결과는 그림 17과 같다. 그림 17을 살펴보면, 최종굴착단계에서 누적되는 수평변위량은 일반 쏘일네일링 공법에 비해 30% 정도, 지표침하량은 36% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 특히 도심지 굴착의 경우 상부 연약토층에 대해 기존의 쏘일네일링 벽체가 허용변위량을 초과할 경

우, 벽체의 네일에 프리텐션을 가함으로써 발생변위량을 허용변위량 이내로 억제할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 굴착단계별 예상발생 수평변위



(b) 굴착단계별 예상발생 침하량

그림 17. 예상발생 변위량

## 6. 결론 및 제언

본 연구에서는 현장인발시험을 통한 프리텐션 쏘일네일의 인발거동특성 등을 주로 분석하여 보았으며, 또한 전단강도감소기법 및 한계평형해석기법 등을 이용하여 프리텐션 쏘일네일링 구조체의 안정성 평가를 수행하였다. 얻어진 연구결과의 주요부분을 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 고정콘 설치 유·무에 따른 현장인발시험결과를 살펴보면, 고정콘이 설치된 No.1, No.3 및 No.5 등의 시험용 쏘일네일은, 고정콘이 설치되지 않은 No.2, No.4 및 No.6 등에 비해 최대인발력이 13~15% 정도 증가되는 것으로 평가되었다.
- (2) 쉬스관 길이에 따른 영향을 알아보기 위해 수행한 현장인발시험결과를 살펴보면, 쉬스관의 길이가 1m에서 2m로 증가할 경우, 최대인발력의 감소는 0.8~3.4% 정도로 비교적 감소경향이 작은 것으로 나타났다.
- (3) Case A(표 2 참조)의 프리텐션 시험용 네일 중, 비교적 최대인발력 및 인발거동특성 등이 양호하게 평가된 No.3 및 No.5를 대상으로, 적용가능한 프리텐션 하중을 평가해 본 결과, 탄성거동 범위내에서 적용가능한 프리텐션 하중은 6.15~6.19ton 정도로 평가되었다.
- (4) 프리텐션 쏘일네일의 단기 인발거동특성을 평가하기 위해 수행된 변위제어방식 현장인발시험결과를 살펴보면, 최대인발력은 일반 쏘일네일(No.7, 표 2 참조)에 비해, 쉬스관이 1m 설치된 의 경우(No.8)에는 14% 정도, 쉬스관이 2m 설치된 경우(No.9)에는 21% 정도 각각 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 인발거동특성 역시 프리텐션 쏘일네일이 일반 쏘일네일의 경우에 비해 양호하게 평가되었다.
- (5) 프리텐션 쏘일네일의 장기 인발거동특성을 평가하기 위해 수행된 응력제어방식 현장인발시험결과를 살펴보면, 프리텐션 쏘일네일의 한계크리프인발력은 10.66~11.53t 정도로 평가되었으며, 프리텐션 쏘일네일의 장기거동특성을 나타내는 최대인발력과 한

계크리프인발력의 비( $k$ )는 1.17~1.20 정도로서, 일반 쏘일네일의  $k$  값(1.22)에 비해 작게 평가되었다. 따라서 프리텐션 쏘일네일의 경우, 크리프에 의한 장기간의 변형특성은 일반 쏘일네일에 비해 작은 경향을 알 수 있으며, 프리텐션 쏘일네일링 벽체를 장시간 방치할 경우, 인발저항력이 일반 쏘일네일링 벽체에 비하여 증가하므로 공사기간이 길어질 경우 유리한 측면이 있는 것으로 판단된다.

- (6) FLAC<sup>2D</sup> 프로그램을 이용한 전단강도감소기법의 적용에 있어서, 쏘일네일링 구조체의 안전율은 지반의 전단강도를 단계별로 감소시켜가면서 해석한 후, 최대불평형력과 안전율과의 관계로부터 최대불평형력이 급격히 증가하는 시점으로 결정하였으며, 한계평형해석 결과와 비교한 결과 대체적으로 일치하는 것으로 나타났다.
- (7) 프리텐션 적용 유·무에 따른 안전율의 변화를 살펴본 결과, 프리텐션을 적용했을 경우 각 시공단계의 국부 안전율이 한계평형해석의 경우 25~63% 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 전단강도감소기법의 경우 22%~61% 정도 증가하는 것으로 각각 나타났다. 또한, 프리텐션을 적용한 경우가 일반 쏘일네일링 공법에 비해 최종굴착단계에서의 안전율은 22(SSR)~25(LEM) 정도로 증가하는 것으로 나타났다.
- (8) 프리텐션을 적용한 경우, 최종굴착단계에서 누적되는 수평변위량은 일반 쏘일네일링 공법에 비해 30% 정도, 지표침하량은 36% 정도 감소하는 것으로 각각 나타났다. 따라서 특히 도심지 굴착의 경우 상부에 존재하는 연약한지층에 대해 기존의 쏘일네일링 벽체가 허용변위량을 초과할 경우, 네일에 프리텐션을 가함으로써 발생변위량을 허용변위량 이내로 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

(접수일자 : 2003년 3월 13일)

## 참 고 문 헌

1. 김홍택(2000), 쏘일네일링의 원리 및 지침, 평문각, pp.201~226.
2. 김홍택, 강인규, 박사원, 고용일, 권영호(1999), 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석. 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제 15권, 제 2호, pp.105~127.
3. 김홍택, 최영근, 박시삼(2002), 전단강도감소기법을 이용한 프리텐션 쏘일네일링 공법의 안정성 평가, 한국지반환경공학회 학술 발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp.227~232.
4. Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S. and Roth, W.(2000), Geotechnical Stability Analysis by Strength Reduction, Geotechnical Special Publication No. 101, Slope Stability 2000, ASCE, Denver, Colorado, pp.99~113.
5. Frank, 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 Sichuan, No.1, 1983, pp.1~10.
6. Kim, Hong-Taek, Ryu, Jeong-Soo, Jung, Sung-Pill, Kang, In-Kyu and Park, Si-Sam(2000), Design, Construction and Performance of A Removable Soil Nailing System, Korean Geotechnical Society. Jour. of the KGS, Vol. 16, No. 3, pp.107~117.
7. Schlosser, F(1991). Recommendations for designing, calculating, contracting and controlling ground anchors, (TA 86). Ed. Eyrolles.
8. Schlosser, F(1993). Recommendations Clouterre 1991(English Translation), Federal Highway Administration, FHWA -SA-93-026.