

프리텐션 쏘일네일링 공법의 안정해석에 관한 연구 A Study on Stability Analysis of Pretensioned Soil Nailing System

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang, 고용일³⁾, Yong-II Koh, 박사원⁴⁾, Sa-Won Park

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

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

³⁾ (주)한라건설 기술연구소 차장, Deputy General Manager, R & D Center, Halla Eng., Corp.

⁴⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원 박사과정, Graduate student, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

SYNOPSIS : This paper presents the fundamentals of analytical approach based on limit equilibrium method and numerical analysis necessary to analyze the pretensioned soil nailing system. Pretensioned soil nailing system may be used to improve the local stability, to reduce the deformation of facing and ground surface. To examine the application of the proposed method, the overall stability and local stability are evaluated. And then, analyses have been performed with the aim of pointing out the effects of various parameters on the behaviors of the pretensioned soil nailing system. In addition, facing thickness resist on pretension force was estimated using the proposed method.

Key words : pretensioned soil nailing system, local stability, pretension force

1. 서론

쏘일네일링 공법(Soil Nailing System)은 지하굴착 및 사면보강 등에 적용성이 확대되고 있으나, 도심지 특히 연약한 상부 토사층 지하굴착의 경우 벽체변위 및 지표침하 등의 문제에 대해 신중한 대처가 필요시 된다. 또한 지중매설물이 인접하여 존재하거나 대지경계선의 준수 등 시공조건에 따라서 설치 네일의 길이가 제한되는 경우, 이와 같은 벽체변위 및 지표침하를 억제시킬 수 있는 대책공법이 요구된다.

일반적으로 쏘일네일링 공법은 프리텐션(pretension)을 가하지 않고 천공, 보강재 삽입, 그라우팅, 슛크리트 전면벽체 설치의 순으로 단계별 굴착·시공이 이루어진다. 그러나, 네일이 연약한 상부토사구간에 시공된 경우에는 전면벽체의 구속효과에 따른 부분적인 변위억제 및 안정성증대 등을 위하여 지반앵커 공법(Ground Anchor System)과 유사한 프리텐션 방식의 도입이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 프리텐션을 적용한 쏘일네일링 공법을 소개하고 이에 대한 적절한 안정해석법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 제시하는 프리텐션 쏘일네일링 공법은 특히 벽체변위가 비교적 크게 예상되는 연약한 상부 토사층 구간에 설치되는 일부 네일에 프리텐션을 가함으로써, 단계별 시공과정에 따라 누적되는 벽

체변위 및 지표침하를 최소화시키고, 또한 변위발생 시간을 지연시키는 효과가 예상된다.

본 연구에서는, 프리텐션 쏘일네일링 벽체의 안정성을 각 시공단계별 보강토체의 전체안정성, 프리텐션을 가한 각 네일의 국부적인 안정성 및 전면 숏크리트 벽체의 안정성 등으로 구분하여 종합적인 평가를 하였으며, 이에 관련된 설계에 참고할 수 있도록, 전면벽체의 두께, 부착길이, 다이레이턴시 각 (dilatancy angle), 영향원의 반경 등 주요인자에 대한 분석을 아울러 수행하였다. 또한 벽체변위에 대한 정량적인 분석을 위해, 수치모형실험을 통해 프리텐션 쏘일네일링 벽체의 거동 및 변위억제효과 등을 규명하였으며 설계기법의 체계화를 위한 기초적인 연구를 수행하였다.

2. 프리텐션 네일의 해석절차

2.1 긴장력(T_0)의 결정

일반적으로 각 네일의 실질적인 저항력은 유효길이(그림 1 참조) 부분에서 발휘되는 축방향 마찰저항을 토대로 결정된다. 따라서, 네일에 긴장력이 추가적으로 가해지는 경우에는 이에 충분히 버틸 수 있는 저항력의 확보가 필수적이다.

본 연구에서는 프리텐션 쏘일네일링 공법에 필요한 긴장력 결정시, 유발될 수 있는 인발 및 항복과괴 등을 검토하여 내적 안정성(internal stability)을 확보한 후 긴장력을 산정하였다. 즉, 시공단계별로 발생 가능한 파괴면을 선정하여 네일의 유효길이를 산출한 후, 계속해서 프리텐션이 가해지지 않은 경우에 대해서 예상되는 주면마찰력(T_n) 및 네일의 항복강도(T_{yield}) 등을 검토하여 최소값을 긴장력으로 결정하였다. 이를 요약·정리하면 식 (1) ~ 식 (3)과 같다.

$$T_n = \frac{\pi \cdot d_{hole} \cdot l_e \cdot (\sigma_m \cdot \tan \phi' + c')}{S_h}, \quad T_{yield} = \frac{A_{nail} \cdot \sigma_y}{S_h} \quad (1)$$

$$T_0 = \min. (T_n, T_{yield}) \quad (2)$$

여기서, d_{hole} : 천공직경

l_e : 유효길이

σ_m : 평균수직응력

S_h : 수평설치간격

ϕ' : $\tan \phi / FS_\phi$

c' : c / FS_c

A_{nail} : 네일의 단면적

σ_y : 네일의 항복응력

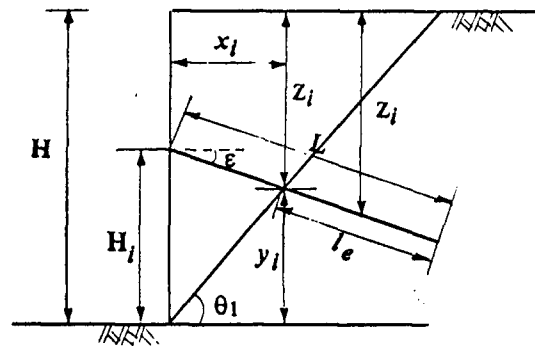


그림 1. 네일의 유효길이

또한, 각 시공단계별로 유효길이에 작용하는 평균수직응력은 그림 1과 같은 기하학적 조건에 의해 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\sigma_m = \frac{\gamma \cdot \bar{z}_i \cdot \cos^2 \varepsilon - K_0 \cdot \gamma \cdot \bar{z}_i \cdot \sin^2 \varepsilon}{\cos 2\varepsilon + \sin 2\varepsilon \cdot \tan \phi'} \quad (3)$$

2.2 프리텐션에 의해 발휘되는 전단강도

그림 2는 네일에 프리텐션을 가한 경우, 예상되는 전단변형 및 영향원(influence circle)에 대한 모식도이다. 네일에 긴장력을 가하지 않은 경우 예상되는 전단응력(τ_0)과 긴장력을 가한 이후에 발휘되는 전단응력(τ_{mob})과의 관계는 다음과 같다(Liang & Feng, 1997).

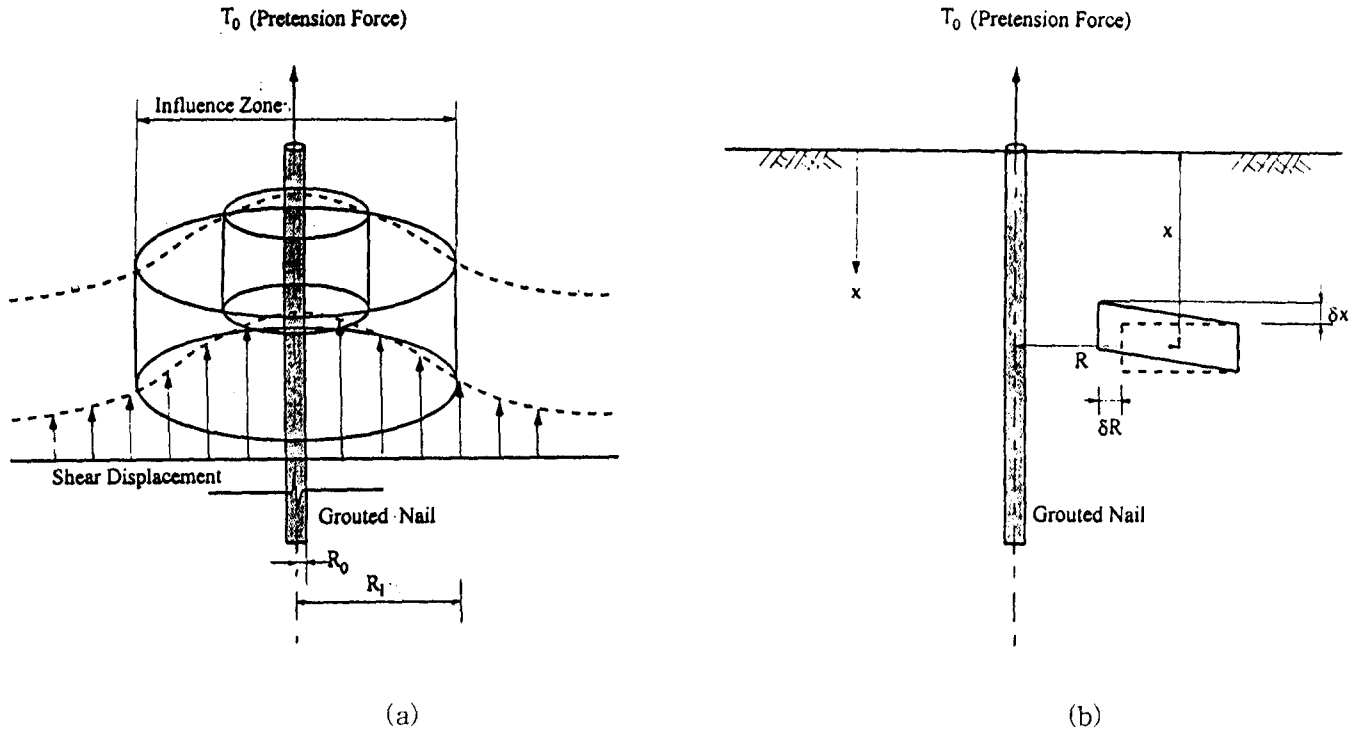


그림 2. 네일 긴장시의 지반거동 및 변형 개요

$$\begin{aligned} \tau_{mob} &= \tau_0 \cdot \left(1 + \frac{E}{G} \cdot \tan^2 \psi \right) + 2 \cdot \sigma_m \cdot \tan \psi \cdot \frac{(R_1/R_0) - 1}{\ln(R_1/R_0)} \\ &= (\sigma_m \cdot \tan \phi' + c') \cdot \{ 1 + 2(1 + \nu) \cdot \tan^2 \psi \} + 2 \cdot \sigma_m \cdot \tan \psi \cdot \frac{(R_1/R_0) - 1}{\ln(R_1/R_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, ψ : 다이레이턴시 각 ($\tan \psi = \delta R / \delta x$)

R_1 : 프리텐션으로 인한 영향원의 반경

R_0 : 천공반경

ν : 지반흙의 포아슨 비

2.3 부착길이의 결정

쏘일네일링 벽체상부의 일부 네일에 프리텐션을 적용하기 위해서는, 시공단계별로 '네일 + 정착그라우트'를 실시하여 긴장력을 가한 후 나머지 공을 충전시켜야 한다. 이를 위해 지반앵커의 설계 및 시공방식과 유사하게 정착장(l_{fixed})과 자유장(l_{free})을 구분할 필요가 있다(그림 3 참조). 따라서, 프리텐션을

적용시키는 시공단계에서, 전면에 가해지는 긴장력과 부착길이(l_{bonded})를 따라 발휘되는 전단응력(τ_{mob})의 합은 평형관계에 있으므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_0 = \pi \cdot d_{hole} \cdot \tau_{mob} \cdot l_{bonded} \quad (5)$$

그러나, 부착길이를 따라 발휘되는 전단응력이 철근-시멘트 그라우트체의 극한부착응력(τ_u)을 초과할 경우에는 네일이 그라우트체에서 인발될 우려가 있으므로 이에 대한 고려가 요구된다. 여기서, D35 이하의 철근에 대한 극한부착응력은 $\tau_u = 6.4\sqrt{\sigma_{ck}} / d_{nail}$ 로 평가된다.

그러므로 부착길이는 식 (5)와 철근-시멘트 그라우트체의 극한부착응력을 검토하여 아래의 식 (6)과 같이 결정할 수 있다. 따라서, 프리텐션을 가함으로써 정착장에서 발휘되는 총주면마찰력, (T_{max})_{mob} 은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$l_{bonded} = \max. \left(\frac{T_0}{\pi \cdot d_{nail} \cdot \tau_u}, \frac{T_0}{\pi \cdot d_{nail} \cdot \tau_{mob}} \right) \quad (6)$$

$$(T_{max})_{mob} = \frac{\pi \cdot d_{hole}}{S_h} \cdot \{ l_{bonded} \cdot \tau_{mob} + (l_e - l_{bonded}) \cdot \tau_0 \} \quad (7)$$

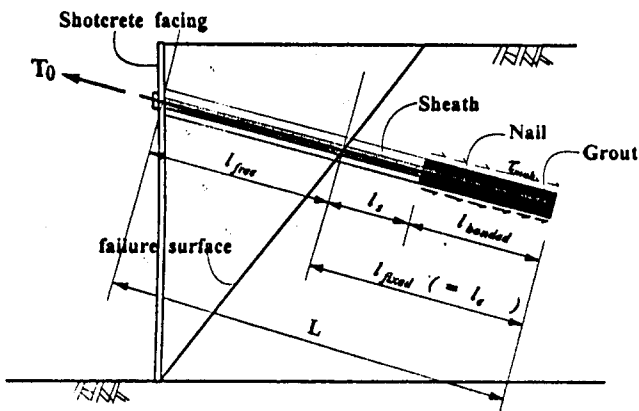


그림 3. 네일의 정착장 및 부착장

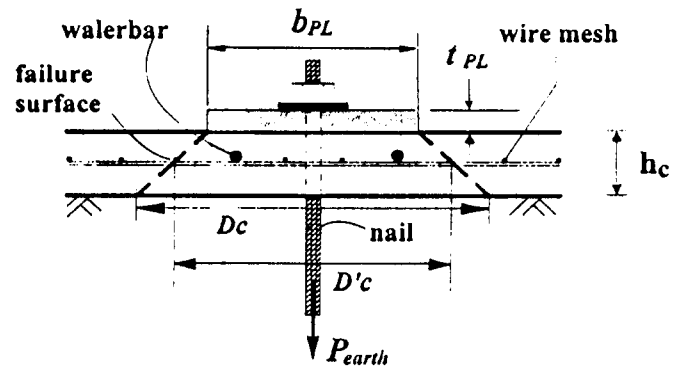


그림 4. 연결구조체에 대한 관입전단파괴 개요

3. 전면벽체의 설계

쏘일네일링 전면벽체의 전단은, 미소토체요소 내부에서 유발되는 전단력에 의한 일면전단파괴와 쏘일네일 내부에 유발되는 인장력의 전달에 의해 지압판이 전면벽체 내부로 관입하여 발생하게 되는 관입전단파괴(punching shear failure, 그림 4 참조) 등의 두가지 종류가 있다. 이중 전면벽체와 같이 너비와

폭에 비해 두께가 얇은 경우에는 관입전단파괴에 취약하며, 특히 네일에 프리텐션이 가해지는 경우, 관입에 대한 안정성 확보는 전면벽체의 두께산정에 가장 중요한 설계변수로 작용한다. 프리텐션 네일의 경우, 전면벽체의 두께 산정기법은 참고문헌 2의 연구내용을 토대로 정리되며, 본 기법 및 이를 포함한 프리텐션 네일의 전체적인 해석, 설계절차 흐름도는 지면 관계상 생략하였다.

4. 분석 및 고찰

4.1 전체안전성 및 국부안정성 검토

본 연구를 통해 정리·제시된 프리텐션 쏘일네일링 공법의 안정해석을 위해 영향원의 반경, 부착길이, 다이레이턴시 각 등을 고려하여 보강영역 전체에 대해서 활동에 대한 안정성을 평가하였다. 분석은 대표단면을 설정한 후(그림 5 참조), 한계평형해석법에 근거하여 각 시공단계별로 안정성을 검토하였다. 검토에 사용된 토질정수 및 기타제원은 표 1 및 그림 5에 명시되어 있으며, 해석결과는 표 2에 정리·요약되어 있다.

표 2의 해석결과를 살펴보면, 프리텐션을 적용한 각 시공단계의 국부안전율이 상당부분 증가함을 알 수 있으며 최종굴착단에서의 전체안전율도 근소하게 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 프리텐션을 가하는 네일의 수가 증가할수록 전체안전율의 증가분은 국부안전율의 증가분에 근접하게 될 것으로 판단된다. 그러나, 프리텐션의 적용에 따른 전면벽체의 소요두께는 상대적으로 증가하게 되므로, 안전성 증대효과 및 변위억제효과와 추가로 소요되는 시공비용과의 상관성을 효율적으로 검토하는 것이 바람직하다.

표 1. 검토에 사용된 토질정수 및 기타제원

	γ (t/m ³)	ϕ	c (t/m ²)	ν
매립토	1.80	25°	0.0	0.30
풍화토	1.90	28°	0.5	0.25
풍화암	2.00	33°	3.0	0.20
기타	<ul style="list-style-type: none"> · $R_l = 1.0$ m · $R_0 = 0.05$ m · $\psi = 10.0^\circ$ · $b_{PL} = 15$ cm 			

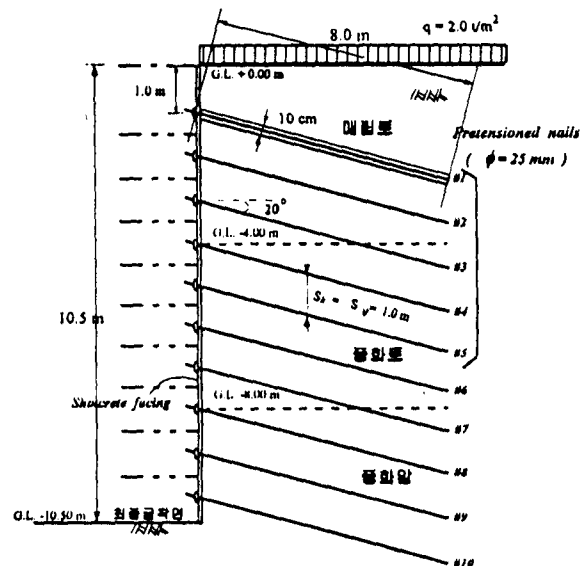


그림 5. 대표단면

표 2. 한계평형해석 결과 요약

시공방법 굴착단계	프리텐션 쏘일네일링			쏘일네일링	
	국부안전율	전면벽체의 두께(cm)	부착길이(m) / 긴장력(ton)	국부안전율	전면벽체의 두께(cm)
1 단계 시공*	2.88	6.93	0.93 / 3.31	2.51	4.90
2 단계 시공*	2.58	8.43	0.98 / 4.56	2.18	4.74
3 단계 시공*	2.41	9.80	0.97 / 5.81	1.99	4.62
4 단계 시공*	2.30	11.08	0.97 / 7.05	1.85	4.53
5 단계 시공*	2.14	12.53	1.00 / 8.58	1.75	4.45
6 단계 시공	2.02	4.63	-	1.68	4.39
7 단계 시공	1.92	4.57	-	1.61	4.34
8 단계 시공	1.81	4.51	-	1.56	4.29
9 단계 시공	1.66	4.46	-	1.51	4.25
최종 굴착	1.55	4.42	-	1.45	4.21
· 전체안전율 = 1.55 · 전면벽체의 최소요구두께 = 13.0 cm			· 전체안전율 = 1.45 · 전면벽체의 최소요구두께 = 5.0 cm		

* : 프리텐션 적용

4.2 변수영향 검토

긴장력을 가한 이후에 발휘되는 전단응력의 변화와 국부안전율과의 관계를 살펴보기 위한 목적으로, 프리텐션을 5단계 시공까지 적용시켰을 경우에 국한하여 영향원의 반경 및 다이레이턴시 각에 대한 영향을 검토하였다(그림 6 참조).

검토결과, 영향원의 반경이 증가할수록 전면벽체의 두께 및 부착장의 길이는 감소하는 반면, 국부안전율은 근소하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 부착장의 길이는 다이레이턴시 각에 따라 큰 폭의 증감이 보이며, 동일조건상에서 부착장의 길이가 다소 작은 것이 효율적이라는 Briaud (1998) 등의 실험적 연구결과와도 일치함을 보이고 있다.

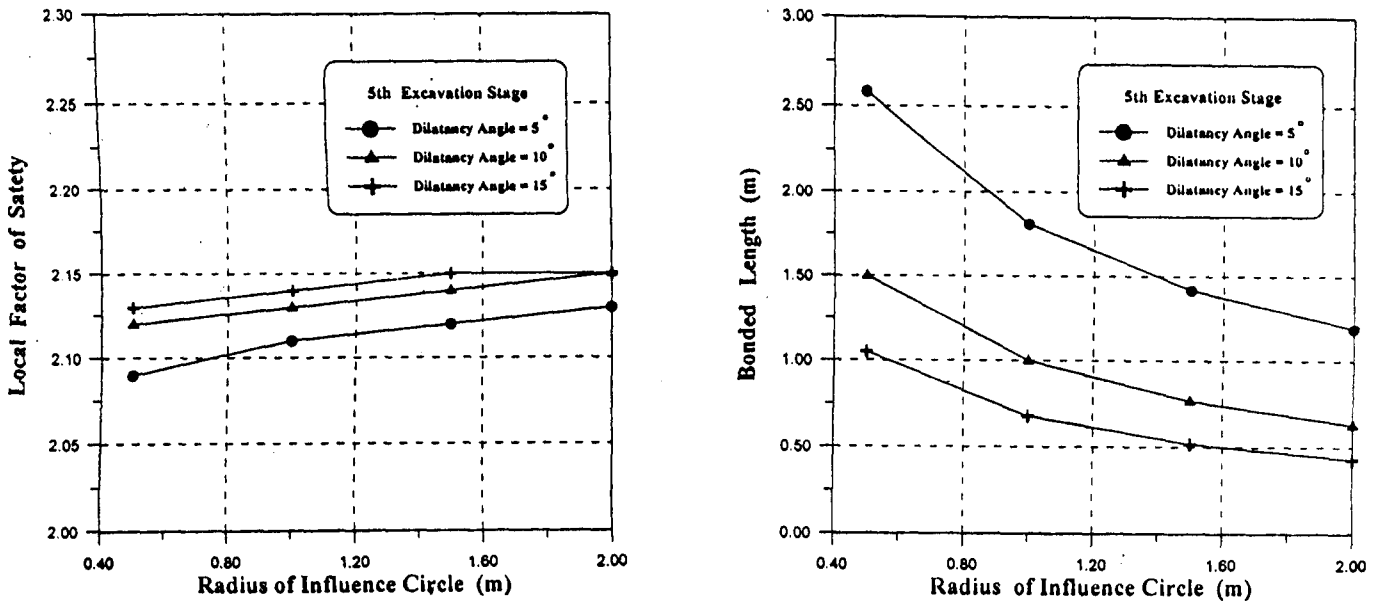


그림 6. 영향원의 반경 및 다이레이턴시 각에 따른 영향

4.3 발생변위 검토

본 연구에서 제시한 분석기법의 적용성을 확인하기 위해, 지반-구조물 관련거동 해석 프로그램인 FLAC^{2D} (ver 3.30)을 이용하여 단계별 굴착시공과정에 따른 전면벽체의 거동예측을 위한 분석이 추가적으로 수행되었다. 대표단면을 그림 5와 동일하게 하여 분석한 결과, 최종 굴착단에서 누적되는 수평변위량은 약 20%, 지표침하량은 약 24 % 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 기존의 쏘일네일링 벽체가 허용변위량을 초과할 경우, 벽체상단부의 일부 네일에 프리텐션을 가함으로써 발생변위량을 허용변위량 이내로 조정할 수 있는 대책공법으로의 활용이 기대된다.

표 3. 수치모형해석 결과요약

시공방법 굴착단계	프리텐션 쏘일네일링		쏘일네일링	
	최대 수평변위량 (mm)	최대 지표침하량 (mm)	최대 수평변위량 (mm)	최대 지표침하량 (mm)
1 단계 시공*	0.528	2.246	1.526	2.789
2 단계 시공*	1.701	2.674	3.364	3.920
3 단계 시공*	2.998	3.554	5.265	5.281
4 단계 시공*	4.667	4.712	7.423	6.959
5 단계 시공*	7.039	6.435	10.66	9.700
6 단계 시공	10.09	8.860	14.67	13.24
7 단계 시공	13.32	11.55	18.06	16.04
8 단계 시공	14.48	12.30	19.27	16.82
9 단계 시공	17.15	13.82	21.95	18.36
최종 굴착	19.70	15.10	24.47	19.66
	· 누적 최대 수평변위량 = 19.70 mm · 누적 최대 지표침하량 = 15.10 mm		· 누적 최대 수평변위량 = 24.47 mm · 누적 최대 지표침하량 = 19.66 mm	

* : 프리텐션 적용

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 프리텐션을 적용한 각 시공단계의 국부안전율이 상당부분 증가하였으며 최종굴착단에서의 전체안전율도 근소하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 프리텐션의 적용에 따른 전면벽체의 소요두께는 상대적으로 증가하게 되므로, 국부안전성 증대효과 및 변위억제효과와 추가로 소요되는 시공비용과의 상호검토가 이루어지는 것이 바람직하다.
- (2) 영향원의 반경이 증가할수록 전면벽체의 두께 및 부착장의 길이는 감소하는 반면에 국부안전율은 근소하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 부착장의 길이는 다이레이턴시 각에 따라 큰 폭의 증·감을 나타내고 있다.
- (3) 프리텐션을 적용한 경우, 최종굴착단에서 누적되는 수평변위량 및 지표침하량 모두가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 기존의 쏘일네일링 벽체가 허용변위량을 초과할 경우, 벽체상단부의 일부 네일에 프리텐션을 적용하여 발생변위량을 허용변위량 이내로 조정할 수 있는 대책공법으로의 활용이 기대된다.

본 연구에서 제시한 프리텐션 쏘일네일링공법을 확대·적용하기 위해서 프리텐션으로 인한 인접 네일간의 상호작용 등 관련거동을 보다 정량화 할 수 있는 해석기법의 체계화가 이루어져야 하며, 아울러 실험적인 연구를 토대로 프리텐션 쏘일네일링 공법의 효율적인 설계방안을 모색하는 것이 장차의 연구과제이다.

6. 참고문헌

1. 김홍택, 강인규(1992), “보강석축의 안정해석 및 설계”, *대한토목학회 논문집*, 제 12권, 제 2호, pp.239~253.
2. 김홍택, 황정순, 김효진(1997), “쏘일네일링 전면벽체 해석기법의 체계화 및 최상단 네일의 한계설치깊이의 평가”, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp.189~196.
3. Briaud, J. L., Powers III, W. F. and Weatherby, D. E.(1998), “Should Ground Anchors Have Short Tendon Bond Length ?”, *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp.110~119.
4. FHWA, “Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls”, *Publication No. FHWA-SA-96_069*, pp.63~146.
5. Liang, Y. R. and Feng, Y. X.(1997), “Development and Application of Anchor-Soil Interface Models”, *A Short Course on Soil Nailing, Ground Anchoring, and Anchored Excavation*, The Graduate School of Industrial Technology and Environment Dongguk University.
6. Meesi, J.(1995), “Analysis of grouted soil anchors”, *Proc. of the International Symposium on Anchors In Theory and Practice*, Salzburg, Balkema, pp.77~85.