

프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석

Stability Analysis and Reliability Evaluation of the Pretensioned Soil Nailing System

김 홍 택*¹ 강 인 규*²

Kim, Hong-Taek Kang, In-Kyu

박 사 원*³ 고 용 일*⁴

Park, Sa-Won Koh, Yong-Il

권 영 호*⁵

Kwon, Young-Ho

Abstract

Application of the soil nailing method is continuously extended in maintaining stable excavations and slopes. Occasionally, however, ground anchor support system may not be used because of space limitations in urban excavation sites nearby the existing structures. In this case, soil nailing system with relatively short length of nails could be efficiently adopted as an alternative method. The general soil nailing support system, however, may result in excessive deformations particularly in an excavation zone of the existing weak subsoils. Pretensioning the soil nails then, could play important roles in reducing deformations mainly in an upper part of the nailed-soil excavation system as well as improving local stability.

In the present study, the analytical procedure and design technique are proposed to evaluate maximum pretension force and stability of the pretensioned soil nailing system. Also proposed are techniques to determine the required thickness of a shotcrete facing and to estimate probability of a failure against the punching shear.

The predicted results are compared with the limited measurements obtained from the excavation site constructed by using the pretensioned soil nails. Based on the proposed procedure and technique, effects of the radius of a influence circle and dilatancy angle on the thickness of a shotcrete facing, bonded length and safety factors are analyzed. In addition, effects of the reduction of deformations expected by pretensioning of the soil nails are examined in detail throughout an illustrative example and FLAC^{2D} program analysis.

*1 정회원. 홍익대학교 토목공학과 교수

*2 정회원. (주)브니엘컨설팅트 책임연구원

*3 홍익대학교 대학원 토목공학과

*4 정회원. 초당대학교 토목공학과 전임강사

*5 정회원. (주)한라건설 기술연구소

요 지

쏘일네일링 공법은 지하굴착 및 사면보강에 그 적용성이 점차 확대되고 있으나, 도심지 특히 상부에 연약한 토사층이 존재하는 경우, 또한 시공여건등에 따라 네일의 설치깊이가 제한되는 경우에는, 벽체변위 및 지표침하를 최소화시킬 수 있는 방안이 필요시 된다. 이와 같은 경우에, 변위 및 침하를 최소화시키는 주목적과 더불어 전체적인 안정성 증대도 동시에 도모할 수 있는 프리텐션 쏘일네일링 굴착벽체 시스템이 효율적이며, 이에 대한 시공도 국내의 경우에 극히 제한적으로 이루어진 바 있다. 그러나 본 프리텐션 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 대한 체계적인 해석절차 및 설계기법은 아직까지 정립된 바 없는 실정이며, 또한 프리텐션을 가하지 않는 일반 쏘일네일링공법의 경우에도, 전단 및 휨모멘트에 대한 안정성 확보를 위해 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량의 산정 등에 대해서 명확한 해석절차가 제시되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는, 쏘일네일링 굴착공법에 대해 해석 및 설계 측면에서의 미흡한 점을 보완함과 동시에, 향후 적용 가능성이 클 것으로 판단되는 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 초점을 두어 학문적 기초에 입각한 설계 및 시공을 유도하기 위해, 관련 해석절차 및 설계기법을 체계화하여 제시하였다.

제시된 내용은, 1) 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 굴착단계별 최대긴장력 결정 및 안정해석기법, 2) 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량과 첫단 네일의 한계설치깊이 등을 결정하기 위한 해석절차, 또한 3) 전면벽체의 관입전단파괴 가능성에 대한 신뢰도 분석기법 등이다. 예측결과를 실제의 시공사례와 비교·분석하여, 본 연구 제시 절차 및 기법의 적합성을 확인하고자 하였다. 또한 제시기법을 이용해 프리텐션 네일링 시스템의 효율성 분석과, 이외에도 다이레이턴시 각 및 영향원 반경 등 주요인자에 대한 영향 및 FLAC^{2D} 프로그램을 이용해 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 발생변위 억제효과 등을 분석하였다.

Keywords : Pretensioned nailing system, Shotcrete facing design, Modified bearing plate, Reliability analysis

1. 서 론

쏘일네일링(soil nailing) 공법은 지하굴착 및 사면보강에 그 적용성이 점차 확대되고 있으나, 도심지 특히 상부에 연약한 토사층이 존재하는 경우, 인접하여 기존 주요 구조물이 존재하는 경우, 또한 인접부지 대지경계선의 준수등 시공여건에 따라 네일의 설치깊이가 제한되는 경우에는, 벽체변위 및 지표침하를 최소화시킬 수 있는 방안이 필요시 된다. 쏘일네일링 공법은 일반적으로, 프리텐션(pretension, 또는 이하 긴장력)을 가하지 않고 천공, 철근 삽입, 시멘트 그라우팅 및 슛크리트 전면벽체 타설 등의 순으로 단계별 굴착·시공이 진행된다. 그러나 앞서 언급한 여러 경우에, 변위 및 침하의 발생을

가능한 최소화시키는 주목적과 더불어 안정성 증대도 동시에 도모할 수 있는 프리텐션 쏘일네일링 굴착벽체 시스템이 효율적이며, 이에 대한 시공도 국내의 경우에 극히 제한적으로 이루어진 바 있다. 그러나, 아직까지 본 프리텐션 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 대한 체계적인 해석절차 및 설계기법은 정립된 바 없는 실정이다.

또한 현재까지의 쏘일네일링 공법 설계는 일반적으로, 최소안전율로 정의되는 활동에 대한 보강토체의 전체적인 안정성 평가 및 전면벽체의 최대발생변위 예측 등 2가지 측면에서의 검토로 한정하여 왔으나, 굴착심도가 점차 깊어지고 또한 기존건물 및 지중매설물이 인접하여 존재하는 도심지 굴착공사에 쏘일네일링 공법

의 적용성이 보다 확대되는 현시점에 있어, 슛크리트 전면벽체의 안정성 검토등 위험 가능성을 더욱 사전에 따져 보기 위한 해석 및 설계 차원의 노력이 지속적으로 요구되는 실정이다.

쏘일네일링 전면벽체의 전단은, 미소토체요소 내부에서 유발되는 전단력에 의한 일면전단 파괴와 네일 내부에서 유발되는 인장력의 전달에 의해 지압판이 전면벽체 내부로 관입하여 발생하게 되는 관입전단파괴(punching shear failure)의 2가지 종류가 있다. 이중 쏘일네일링 슛크리트 전면벽체와 같이 너비와 폭에 비해 두께가 얇은 경우에는 관입전단파괴에 특히 취약하며, 더우기 네일에 프리텐션이 가해지는 경우에 관입전단파괴에 대한 안정성 확보는 전면벽체의 소요두께 산정에 중요한 요소이다. 그러나 프리텐션을 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법의 경우에도, 전단 및 휨모멘트에 대한 안정성 확보를 위해 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량 등의 산정에 대해서 명확한 해석 및 설계지침이 제시되어 있지 않은 실정이다. 이외에도 인접하여 지중매설물등이 존재하는 경우에, 첫단 네일이 부득이 일정깊이 아래쪽에 설치되어야 하는 경우를 실제 현장에서 종종 접하게 되나, 이런 경우 안정성 확보에 필요한 한계설치깊이에 대해서도 현재까지 특별한 지침이 없이 설계 및 시공이 진행되어온 실정이다.

아울러 원지반 흙의 비등방성, 채취시료의 교란 정도 및 측정상의 오차 등 설계에 적용되는 각종 변수가 지니고 있는 불확실성(uncertainty) 등으로 인해, 파괴확률에 근거한 신뢰도 분석의 필요성이 대두되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 쏘일네일링 굴착공법에 대해 해석 및 설계 측면에서의 미흡한 점을 보완함과 동시에, 향후 적용 가능성이 클 것으로 판단되는 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 초점을 두어 학문적 기초에 입각한 설계 및 시공을 유도하기 위해, 관련 해석절차 및 설계기법을 체계화하여 제시하였다.

제시된 내용은, 1) 프리텐션 쏘일네일링 시스

템의 굴착단계별 최대긴장력 결정 및 안정해석 기법, 2) 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량과 최상단 첫단 네일의 한계설치깊이 등을 결정하기 위한 해석절차, 3) 수정 지압판의 제안, 또한 4) 전면벽체의 관입전단 파괴 가능성에 대한 신뢰도 분석기법 등이다. 침투수압 및 다층지반 조건을 고려하였으며, 우선 예측결과를 제한적이긴 하나 실제의 시공사례와 비교·분석하여, 본 연구 제시 절차 및 기법의 적합성을 확인하고자 하였다. 또한 제시기법을 이용해 프리텐션 네일링 시스템의 효용성 분석과, 이외에도 다이레이팅시 각 및 영향원반경 등 주요인자에 대한 영향 및 FLAC^{3D} 프로그램을 이용해 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 발생변위 억제효과 등을 분석하였다.

2. 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정 해석기법 제시

2.1 전단응력 평가 및 최대긴장력 결정

철근 및 시멘트 그라우트체로 구성되는 쏘일 네일 보강재(이하 네일)에 긴장력을 가하는 경우에 예상되는 전단변형등 주변 지반흙의 거동 특성 변화에 대해서는 현재까지 체계적으로 제시된 측정자료가 없는 제한성으로 인해, 본 연구에서는 Liang & Feng(1997)이 지반앵커(ground anchor)에 대해 제시한 연구결과를 토대로, 네일에 긴장력을 전혀 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법의 경우에 주변흙과의 마찰에 의해 발휘가 예상되는 전단응력(τ_0)과, 본 연구에서 다루고자 하는 프리텐션 네일의 경우처럼 긴장력을 가한 이후에 발휘가 예상되는 전단응력(τ_{mob})을 서로 구분하여(그림 1), 그 사이의 관계를 아래의 식(1)과 같이 정의하였다.

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

여기서, ψ : 다이레이턴시 각($\tan \psi = \delta R / \delta z$)
 R_i : 프리텐션으로 인한 영향원의 반경
 R_0 : 천공반경, ν : 지반흙의 포아슨 비,
 σ_{vs} : 침투수압, σ_m : 평균수직응력
 $\tan \phi' = \tan \phi / FS_{min}$, $c' = c / FS_{min}$, FS_{min} : 최소안전율

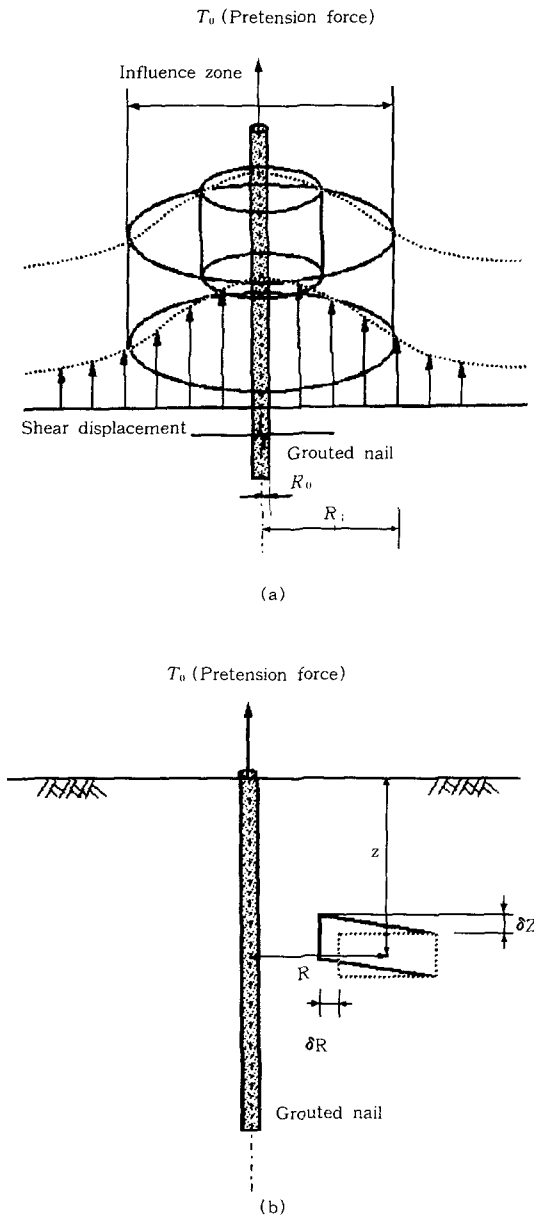


그림 1. 프리텐션 네일의 거동특성 개요

본 안정해석에서는 예상파괴면의 형상을 2개의 직선으로 가정한 다음(그림 2), 김홍택 등(1995)이 기 제시한 한계평형해석법을 토대로, 굴착단계별 활동에 대한 최소안전율(FS_{min}), 이에 해당되는 파괴면의 위치 및 네일의 유효길이 등을 우선 결정하게 된다. 만약 설정한 소요 안전율 기준(일반적으로, 건조시 $FS_{min} \geq 1.5$, 강우시 및 지하수가 존재하는 경우 $FS_{min} \geq 1.3$)을 충족하지 못하는 경우에는, 네일의 길이 및 설치간격 등 설계변수를 조정하여 반복계산이 수행된다. 위의 식(1)에 포함된 평균수직응력(σ_m)은 유효길이(l_e)의 중앙점에 작용하는 수직응력을 의미한다(김홍택, 1992).

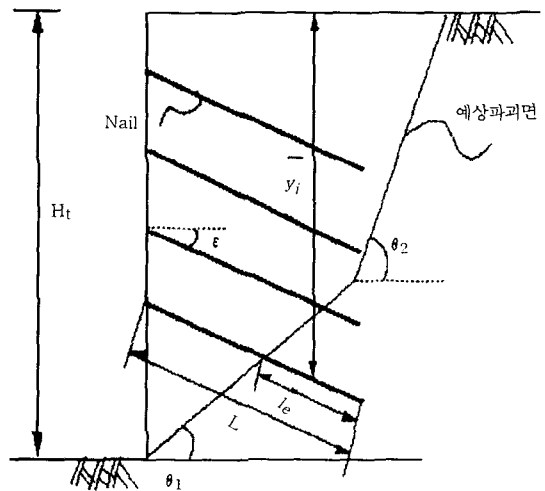


그림 2. 예상파괴면 형상 및 네일의 유효길이(l_e) 정의

전술한 과정을 통해 네일에 긴장력을 가하지 않은 경우의 전단응력(τ_0)이 결정되며, 계속해서 이를 이용해 네일에 긴장력을 가하는 경우 발휘가 예상되는 전단응력(τ_{mob})을 식(1)로부터 평가하여 해당 네일의 최대긴장력(T_{max} , 식(2))을 산출하게 된다. 이와 같이 산출된 최대 긴장력을 철근의 항복인장강도(T_{yield} , 식(3))와 서로 비교하여, 이 중 작은 값을 최대긴장력(T_0 ,

식(4)으로 결정한다.

$$T_{max} = \frac{\pi \cdot d_{hole} \cdot l_c \cdot \tau_{mob}}{s_h} \quad (2)$$

$$T_{yield} = \frac{A_{rebar} \cdot \sigma_y}{s_h} \quad (3)$$

$$T_0 = \min. (T_{max}, T_{yield}) \quad (4)$$

여기서, d_{hole} : 천공직경, s_h : 네일의 수평방향 설치간격
 A_{rebar} : 철근의 단면적,
 σ_y : 철근의 항복인장응력

전술한 과정에서, 강우시 및 지하수가 존재하는 경우 예상파괴면에 작용하는 침투수압(σ_{wr} , 식(1) 참조)은 Laplace 방정식 및 경계조건 등을 토대로 유도·제시된 참고문헌(김홍택등, 1995)의 방식을 이용해 결정된다.

식(4)로 부터 결정되는 긴장력(T_0)은 시공 가능한 최대값을 의미하나, 안전측에서 이보다 작은 값을 적용하여 시공이 이루어지는 경우까지, 요구되는 부착장(l_{bonded} , 그림 3)을 결정하는 절차를 제시하면 다음과 같다.

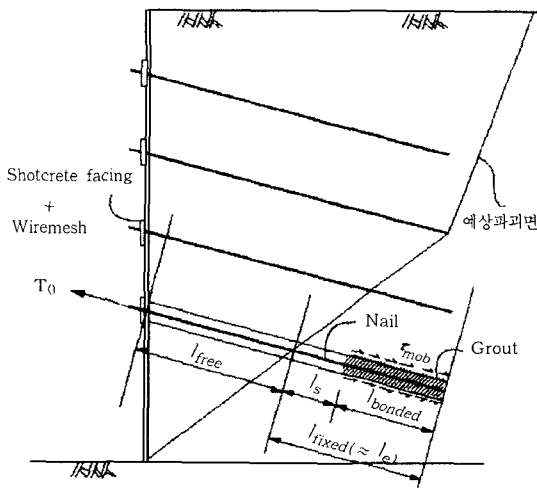


그림 3. 프리텐션 네일의 정착장 및 부착장

2.2 부착장 결정

네일에 프리텐션을 적용하기 위해서는, 굴착 단계별로 천공, 철근삽입 및 부착장에 대한 시멘트 그라우트를 우선 실시하고, 앞의 1)에서 결정된 긴장력(T_0)을 가한 다음, 나머지 공내부를 그라우트 충전시켜야 한다. 이를 위해서는 지반앵커의 경우와 유사하게, 정착장(l_{fixed})과 자유장(l_{free})을 구분할 필요가 있다(그림 3 참조). 따라서 긴장력을 가하는 시공단계에서, 가해지는 긴장력과 부착장에서 발휘가 예상되는 전단응력(τ_{mob})의 합은 서로 평형관계에 있으며, 이 관계를 정의하면 식(5)와 같다.

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

그러나 부착장을 따라 발휘되는 전단응력이, 철근-시멘트 그라우트체의 극한부착응력(τ_u)을 초과할 경우에는, 철근이 그라우트체에서 인발될 우려가 있으므로 이에 대한 추가 검토가 요구된다(식(6)).

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

여기서 D35 이하의 철근에 대한 극한부착응력은 일반적으로 $\tau_u = 6.4 \sqrt{\sigma_{ck}} / d_{rebar}$ 로 평가되며, σ_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도를, d_{rebar} 는 철근 직경을 각각 의미한다.

2.3 총주면마찰력 결정

네일에 긴장력을 가하는 경우, 결국 정착장(그림 3 참조)에서 발휘가 예상되는 총주면마찰력($(T_{max})_{mob}$)의 평가식은 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

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

식(7)에 의해 평가되는 총주면마찰력은, 긴장력을 전혀 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법 경우의 총주면마찰력 보다는 큰 값이며, 따라서

긴장력을 네일에 가하는 경우 전체적인 안정성 증대효과가 예상되며, 또한 인접구조물등으로 인해 네일의 설치깊이가 제한되는 경우, 긴장력을 가함으로써 안정성 확보에 필요한 네일의 소요깊이를 줄일 수 있는 장점도 예상된다.

2.4 주변흙의 전단강도 증대효과 평가

네일에 긴장력을 가하는 경우, 수평방향으로 비교적 촘촘히 설치되는 네일 사이의 상호작용 또한 네일과 주변 흙사이의 상호작용적 거동특성 등으로 인해, 부착장 부분의 시멘트 그라우트 충전 및 긴장력을 가하는 시공과정을 통해, 주변흙의 조밀화 현상(즉, 주변흙의 전단강도 증대효과)이 부분적으로 예상되며, 이는 주변흙의 전단변형 거동특성을 나타내는 영향원의 중첩효과와 서로 밀접한 연관이 있을 것으로 사료된다. 그러나 이에 대한 체계적인 측정자료 또한 없어, 본 연구에서는 Hanna & Ghaly (1994)가 지반앵커 경우에 대한 현장실험을 통해 제시한 경험식을 적용하여, 주변흙의 부분적인 전단강도 증대효과를 근사적으로 평가하여 이를 전체적인 안정성 평가에 반영하였으며, 이에 대한 관계식을 정리하면 식(8)과 같다(그림 4).

$$\phi_{sp} = \phi + \Delta\phi, \quad \Delta\phi = \frac{c_d}{s_h/d_{hole}} \cdot \frac{\phi^4}{10^6} \quad (8)$$

여기서, ϕ : 원지반 흙의 내부마찰각
 $\Delta\phi$: 흙의 내부마찰각 증가분
 c_d : 중첩되는 영향원의 수

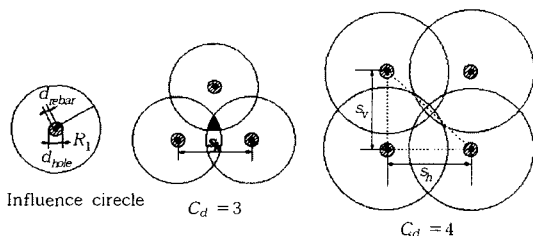


그림 4. 영향원의 중첩효과

Hanna & Ghaly가 제시한 연구결과(그림 4 참조)를 토대로, 위의 식(8)에 포함된 중첩되는 영향원의 수(C_d)를 결정하는 기준을 정리하면 아래와 같다.

- (1) $R_l \leq \frac{s_h}{2} \quad c_d = 0$
- (2) $\frac{s_h}{2} < R_l < (\sqrt{s_h^2 + s_v^2})/2$ 인 경우, $c_d = 2$
- (3) $R_l \geq (\sqrt{s_h^2 + s_v^2})/2 \quad c_d = 4$

위의 조건 및 식(8)을 이용해 평가되는 주변흙의 부분적인 전단강도 증대효과는, 식(7)에 포함된 긴장력을 가한 이후에 발휘가 예상되는 전단응력(τ_{mob})의 평가과정에 반영된다.

계속해서, 일반 쏘일네일링 공법 또는 프리텐션 쏘일네일링 시스템 모두에 적용 가능한, 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량의 산정절차와 최상단 첫단 네일의 한계설치깊이를 평가하기 위한 해석기법의 제시가 이루어 졌으며, 이를 정리하면 다음의 3장과 같다.

3. 전면벽체의 해석절차 제시

3.1 개요

쏘일네일링 연직굴착 전면벽체(슛크리트, 와이어매쉬, 네일, 지압판 및 너트 등으로 구성되는 복합구조체)는 구조해석상 2가지 형태로 구분됨이 원칙이다. 즉 최상단 및 최하단 전면벽체의 경우는 캔틸레바 플레이트 형태에 해당되며, 또한 중앙부분 벽체를 포함하는 이외의 부분은 4개의 기둥(네일, 지압판 및 너트 등의 연결구조체)으로 지지되는 사각형 플레이트 형태에 해당된다.

해석절차의 정립을 위해 본 연구에서는, 우선 사각형 플레이트 형태에 대해, 연직 및 수평 방향으로 서로 인접하여 설치되는 네일 사이 미소토체요소(소)에 작용하는 전단 및 휨모멘트의 최대치, 또한 중앙점에 대한 최대수평변위량 등을

산정하기 위한 이론식들을 판이론(plate theory)을 토대로 유도하였다. 계속해서 전단(일면전단 파괴 및 관입전단파괴) 및 휨모멘트에 대한 전면벽체의 안정성 여부를 LRFD(Load and Resistance Factor Design, ACI, 1996) 강도한계상태(strength limit state)에 대해 검토하는 과정이 수행되었으며, 이를 통해 안정성 확보에 필요시 되는 와이어매쉬량이 결정된다(하중증가계수의 범위는 1.3~2.0). 또한 계속해서 중앙점에 대해 산정된 최대수평변위량이 일정기준을 초과하게 되는 경우에, 이를 해결하기 위한 두 가지 접근 방식에 대해 타당성을 검토하였다. 첫째로는 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격, 슛크리트 벽체의 두께 및 와이어매쉬량 등을 일부 조정하여 판이론의 적용조건을 충족시키는 방식이며, 둘째로는 대변형(large deformation)을 근거로 한 멤브레인 이론(membrane theory)을 적용시켜 유발이 예상되는 멤브레인 힘(force)을 고려한 추가 와이어매쉬량을 평가·산정하는 방식이다(Ugural, 1981). 이외에도, 캔티레바 플레이트 형태에 해당되는 최상단 첫단 네일의 한계설치깊이를 결정하기 위한 해석절차의 제시가 이루어졌다.

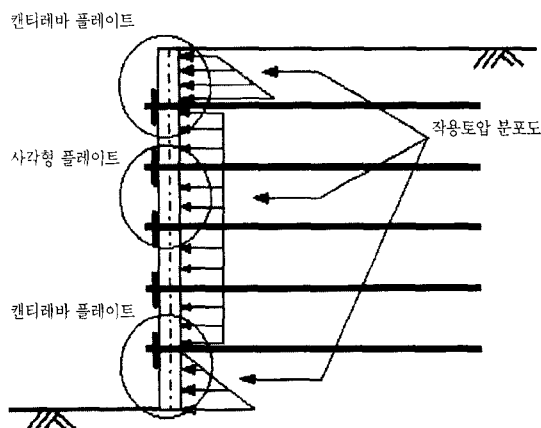


그림 5. 작용토압 분포도

3.2 작용토압

일반 쏘일네일링 연직굴착 전면벽체에 작용이 예상되는 깊이별 토압분포의 개요도는 그림 5와 같다.

그림 5에 명시된 분포토압의 산정에 적용되는 주요한 가정사항은, 연직 및 수평 방향으로 서로 인접한 네일 사이에 존재하는 미소토체요소 자중에 의해서만 유발되는 토압이 고려 대상이며, 그 위쪽에 존재하는 토체자중등상재하중에 의한 추가적인 유발토압은 쏘일아칭현상에 의해 주위의 인접지반으로 전이되는 것으로 간주하여 고려하지 않았다. 최상단 및 최하단 부분을 제외한 그 이외 전면벽체의 경우에는 Rankine 이론에 의해 산정된 미소토체요소 깊이별 주동토압의 평균값이 등분포 형태로 일정하게 작용하는 것으로 가정하였으며, 또한 최상단 및 최하단 전면벽체의 경우에는 선형변화 형태의 Rankine 주동토압이 그대로 작용하는 것으로 가정하였다(TRB, 1987). 만약 가설벽체가 아닌 영구벽체의 경우에는 주동토압이 아닌 정지토압상태로 분포토압을 가정하게 되며, 본 연구에서 초점을 두고 있는 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 경우에는, 그림 5에 도시된 작용토압 이외에 추가적으로 해당네일에 가해지는 긴장력(T_0), 식 (5) 참조)의 수평방향 성분을 합한 값이 해당 네일 전면벽체에 작용하는 토압합력(Q_0)으로 간주된다.

위에서 기술된 가정사항 및 방식에 의해 전면벽체에 예상되는 부분별 토압을 산정한 다음, 이를 토대로 LRFD절차에 따라 쏘일네일링 전면벽체의 부분별 해석 및 설계가 수행된다. 일반적인 구조물 설계에 있어 LRFD 방법을 따를 경우, 강도한계상태와 사용한계상태(service limit state)에 대한 안정성 검토가 모두 수행되어야 함이 원칙이다. 여기서 강도한계상태란 구조물이 외력에 의한 전단이나 휨모멘트 등에 전체적인 파괴를 일으키지 않고 안정을 유지할 수 있는 한계상태를 의미하며, 사용한계상태란 비

록 구조물의 전체적인 파괴는 발생하지 않더라도 즉, 강도한계상태 이내에 해당되긴 하나, 과도한 처짐이나 균열 등으로 인하여 사용상의 문제를 초래할 수 있는 상태를 의미한다(조효남, 1995). 그러나, 쏘일네일링 공법에 있어 실험 및 측정자료 등 충분한 근거자료의 부족으로 인하여 사용한계상태에 대한 명확한 정의 및 지침을 체계적으로 제시하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는, 전단 및 휨모멘트에 대한 검토는 강도한계상태를 토대로 하였으며, 사용한계상태에 대한 검토는 수평방향으로의 최대처짐(최대수평변위)에 대한 검토로 구분하였다.

3.3 전면벽체 미소토체요소에 대한 수평변위, 전단 및 휨모멘트의 평가

중앙부분 쏘일네일링 전면벽체의 미소토체요소에서 유발되는 전단력 및 휨모멘트를 결정하기 위한 일반식은, 사각형 형태 미소토체요소의 각 꼭지점이 4개의 기둥(네일, 지압판 및 너트 등의 연결구조체)에 의해 지지되는 판(그림 6)으로 가정한 다음 소변형(small deformation)을 토대로 한 판이론에 의해 유도되며, 유도된 식에 작용토폴을 대입하여 유발이 예상되는 전단력 및 휨모멘트를 최종 결정하게 된다.

일반적으로, 판요소에 해당되는 슛크리트 및 와이어매쉬로 구성되는 쏘일네일링 전면벽체 구조체는 각 축방향으로의 와이어매쉬량에 따

라 직교이방성 또는 등방성의 여부를 구분짓게 되나, 본 연구에서는 해석상의 간편성과 또한 와이어매쉬는 일반적으로 각 방향으로 동일한 양이 등간격으로 배치되므로 등방성으로 가정하였다. 또한, 먼저 쏘일네일의 연직 및 수평 방향 설치간격($s_v = a$ 및 $s_h = b$, 그림 6 참조)내에서 구성되는 미소토체요소의 판에 대한 처짐관계식을 Fourier 급수를 이용하여 표현한 다음 적절한 경계조건들을 토대로 미지의 계수값들을 결정하여 처짐관계식을 유도하고, 이 처짐관계식의 미분값을 전단력과 휨모멘트의 지배 미분방정식에 대입함으로써, 전단력과 휨모멘트를 최종 결정하기 위한 일반식을 유도하였다. 상세한 유도과정은 지면 관계상 생략하였으며, 여기서 수평방향으로 처짐(수평변위, w)을 결정하기 위한 일반식을 최종 정리하면 다음과 같다.

$$w = \frac{Q_o b^4}{384D} \left(1 - \frac{4y^2}{b^2}\right)^2 + A_o \quad (9)$$

$$+ \sum_{2,4} \left\{ B_m \frac{m\pi}{a} y \cdot \sinh \frac{m\pi}{a} y + C_m \cdot \cosh \frac{m\pi}{a} y \right\} \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x$$

여기서

$$A_o = -\frac{Q_o b a^3}{2\pi^3 D} \sum_{2,4} (-1)^{m/2} \frac{1}{m^3} \left\{ \alpha_m - \frac{\alpha_m + \tanh \alpha_m}{\tanh^2 \alpha_m} \right\}$$

$$B_m = \frac{Q_o b a^3}{2m^3 \pi^3 D} (-1)^{m/2} \frac{\alpha_m + \tanh \alpha_m}{\tanh^2 \alpha_m \sinh \alpha_m}$$

$$\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a}, \quad D = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\nu^2)}$$

또한 위의 식(9)에 정리된 수평방향으로의 처짐 w 에 대한 일반식의 편미분을 통해 전단력 V 및 휨모멘트 M 의 지배 미분방정식들이 결정되며, 이를 토대로 최종 유도되는 전단력 및 휨모멘트 결정을 위한 일반식들을 각각 정리하면 다음과 같다.

$$M_x = -\frac{Q_o \cdot b^2}{24} \nu \left(\frac{12}{b^2} y^2 - 1 \right)$$

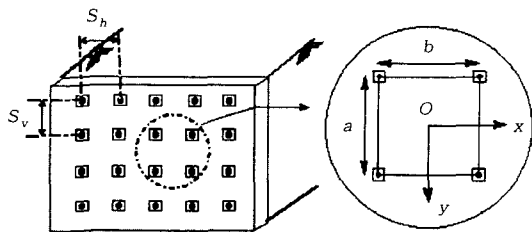


그림 6. 중앙부분 쏘일네일링 전면벽체 상세도

$$+ \sum_{2.4}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 [C_m(1-\nu)\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) + \quad (10)$$

$$B_m\left\{\frac{m\pi}{a}y(1-\nu)\sinh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) - 2\nu\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right)\right\}]\cos\frac{m\pi}{a}x$$

$$M_y = -\frac{Q_0 \cdot b^2}{24} \left(\frac{12}{b^2}y^2 - 1\right) - \sum_{2.4}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 [C_m(1-\nu)\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) + \quad (11)$$

$$B_m\left\{\frac{m\pi}{a}y(1-\nu)\sinh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) + 2\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right)\right\}]\cos\frac{m\pi}{a}x$$

$$V_x = -D \sum_{2.4}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^3 [C_m(\nu-1)\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) \quad (12)$$

$$+ B_m\left\{\frac{m\pi}{a}y(1-\nu)\sinh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) - 2(2-\nu)\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right)\right\}]\sin\frac{m\pi}{a}x$$

$$V_y = -Q_0 y - D \sum_{2.4}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^3 [C_m(\nu-1)\sinh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) \quad (13)$$

$$+ B_m\{(1+\nu)\sinh\left(\frac{m\pi}{a}y\right) + (\nu-1)\frac{m\pi}{a}y\cosh\left(\frac{m\pi}{a}y\right)\}]\cos\frac{m\pi}{a}x$$

위의 식(10) ~ (13)에 정리·표현된 전단력 및 휨모멘트의 평가식에 해당네일 미소토체요소
에 대한 작용토압합력(Q_0)과 네일의 연직 및
수평 방향 설치간격 등을 대입하면, 결과적으로
쏘일네일링 전면벽체 내부에서 유발되는 전단
력 및 휨모멘트가 결정된다.

3.4 전단강도의 결정

쏘일네일링 전면벽체의 전단은 미소토체요소
내부에서 유발되는 전단력에 의한 일면전단파
괴와 네일 내부에서 유발되는 인장력 전달에
의해 지압판이 전면벽체 내부로 관입하여 발생
하게 되는 관입전단파괴의 2가지 종류가 있다.
이중 쏘일네일링 전면벽체와 같이 너비와 폭에
비해 두께가 얇은 경우에는 관입전단파괴에 특
히 취약하며, 더우기 네일에 프리텐션이 가해지
는 경우에, 관입전단파괴에 대한 안정성 확보는
전면벽체의 소요두께 산정에 중요한 요소이다.

이중 전면벽체의 관입전단파괴 형태는 모서
리가 없는 원뿔형태와 거의 유사하며, 그림 7에
는 최근에 미국 연방도로국(Federal Highway
Administration)에서 수행된 지압판등 연결구조
체에 대한 실내실험을 통해 관찰된 관입전단
파괴면의 형태가 개략적으로 도시되어 있다
(FHWA, 1996). 그림 7에 도시된 실험결과적 모
델에 기초하여, 전면벽체의 관입에 대한 전단강
도(V_{PS})는, 관입에 대해 저항할 수 있는 유효영
역에 작용하는 전단응력을 고려하여 결정된다.
그 영역은 관입콘의 유효지름(D_c)과 유효깊이
(h_c)에 의해 정의되며, 정리된 전단강도의 결정
식은 아래의 식(14)와 같다(FHWA,1996). 식
(14)에서 콘의 유효지름은 전면판의 끝부분에서
시작하여 판의 토체면을 향해 45°의 각도로 확
장하는 균열면에 의해 정의되며, ϕ_p 는 강도감
소계수를 의미한다. 따라서, 전면판의 중앙에서
콘의 유효지름은 $D'_c = b_{PL} + h_c$ 로 정의되며, 지
압판등의 연결부에서 콘의 유효높이는 전면판
의 전체두께(T)와 동일하다. 이와 같은 파괴형
태는, 기하학적으로 미국 연방도로국 실내실험
결과와 거의 일치한다.

$$V_{PS} = \phi_p 1.1 \sqrt{\sigma_{ck}} (\pi) (D'_c) (h_c) \quad (14)$$

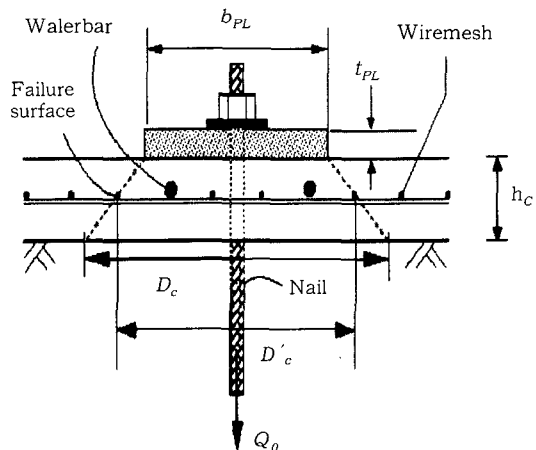


그림 7. 연결구조체에 대한 관입전단파괴 개요

미소토체요소 내부에서 유발되는 전단력에 의한 일면전단파괴의 경우는, 위험단면을 네일, 지압판 및 너트 등의 연결구조체에서 $T/2$ 만큼 떨어진 지점으로 보고, 그 위치에서 발생하는 최대전단력과 전면벽체의 전단강도를 서로 비교하여 안정성 여부를 판정하게 된다. 일면전단 파괴에 대한 전면벽체의 전단강도 결정식은 아래의 식(15)와 같다(건설교통부, 1996).

$$V_{SF} = \phi_p 0.53 \sqrt{\sigma_{ck}} s_h T \quad (15)$$

결국 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격, 작용토압, 슛크리트 및 와이어매쉬의 물성치 또한 지압판 제원 등을 토대로 한 전단강도에 대한 안정검토를 통해, 사각형 플레이트 형태의 중앙부에서 요구되는 슛크리트 전면벽체의 최소두께가 결정된다.

3.5 휨강도의 결정

쏘일네일링 전면벽체는 슛크리트와 그 중앙에 위치하는 와이어매쉬로 구성되며, 또한 슛크리트와 와이어매쉬는 일체로서 거동하고, 슛크리트는 압축에, 와이어매쉬는 인장에 저항한다는 가정사항은 철근콘크리트의 경우와 동일하다.

서로 인접한 4개의 네일, 지압판 및 너트 등의 연결구조체 두부를 꼭지점으로 하는 사각형 미소토체요소에 작용하는 최대모멘트는 중앙점에서 발생하는 정(+) 모멘트와 네일 연결구조체 두부에서 발생하는 부(-) 모멘트로 분할되며, 설계상의 최대모멘트는 이 두가지 모멘트의 합으로서 표현된다. 이와 같은 설계상의 최대모멘트에 저항하는 전면벽체의 휨강도는 슛크리트와 와이어매쉬의 합성단면으로 구성된 탄성체로 가정하여, 선형탄성이론에 의해 콘크리트의 극한변형율과 관련하여 정의된 극한모멘트 공식이 사용된다. 전면벽체의 휨강도는 벽체의 두께 및 보강비의 증가에 비례하고, 또한 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격의 증가에 의해

서는 감소하게 된다. 설계에 적용되는 휨강도 평가식은 아래의 식(16)과 같다(건설교통부, 1996).

$$M_u = \phi_p \cdot \sigma_y \cdot A_{wm} \left(d - \frac{A_{wm} \sigma_y}{1.7 \sigma_{ck} \cdot s_h} \right) \quad (16)$$

여기서, d 는 중립축까지의 거리를, A_{wm} 은 와이어매쉬의 총단면적을 각각 의미한다.

3.6 해석절차

먼저 일면전단파괴 및 관입전단파괴 등 전단강도에 대한 안정검토 절차를 통해 요구되는 전면벽체의 최소두께가 산정된 후, 쏘일네일의 연직 및 수평 방향 설치간격, 작용토압, 슛크리트 및 와이어매쉬의 물성치 또한 지압판 제원 등을 토대로, 휨강도 조건이 충족되는 소요 와이어매쉬량이 결정된다. 계속해서, 식(9)를 이용해 미소토체요소 중앙점에 대한 최대수평변위를 산정하는 절차가 수행되며, 최대수평변위량이 철근콘크리트 시방서(건설교통부, 1996)에 제시된 사용상태의 한계치 기준($s_h/180$)을 초과하는지 여부를 판정하게 된다.

3.7 멤브레인 이론의 적용 타당성 검토

만약 3.6에서 기술된 판이론에 의한 최대수평변위량이 한계치 기준을 초과하는 경우에는, 이를 해결하기 위해서 2가지 방식의 접근이 가능하다. 첫째로는 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격, 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량을 일부 조정하여 판이론의 적용조건을 충족시키는 방식이며, 둘째로는 대변형을 근거로 한 멤브레인 이론을 적용시켜 유발이 예상되는 멤브레인 힘(force)을 고려한 추가 와이어매쉬량을 평가 산정하는 방식이다. 여기서, 멤브레인 이론의 경우에 한해 그 적용 타당성을 분석하여 보면 다음과 같다.

우선 앞서 언급된, 철근콘크리트 시방서에 명기된 한계치 기준은 쏘일네일링 전면벽체와 유

사한 형태에 해당되는 flat slab 경우의 최대처짐에 대한 제한규정, 즉 최대처짐이 $s_h/180$ (여기서 s_h = 네일의 수평방향 설치간격) 이하이어야 한다는 제한규정이며, 이 한계치 기준을 멤브레인 이론에 의해 멤브레인 힘이 유발되기 시작하는 한계에 관한 실험결과(Ugural, 1981), 즉 최대처짐 δ_{max} 값이 $t/3 \sim t/5$ (t 는 전면벽체의 두께) 정도의 범위라는 실험결과와 서로 비교하여 보면 그 값이 대략적으로 거의 일치함을 알 수 있다.

따라서 쏘일네일링 전면벽체의 경우, 만약 중앙점에서의 최대수평변위량이 앞서 언급한 한계치 기준($s_h/180$)을 초과할 정도로 커서 멤브레인 힘이 유발되는 경우 이에 의한 추가 인장력이 발생하게 되어, 결과적으로 안정성확보를 위해서는 와이어매쉬량을 역시 추가적으로 늘려 주어야 하는 상황이 예상된다. 그러나, 실제로 멤브레인 이론의 적용이 가능할 정도로 과도한 수평변위가 발생하는 경우, 슛크리트 재료 자체의 특성상 그 표면에 심각한 균열 및 파손 등 사용상 많은 문제점이 예상된다. 만약 이와 같은 슛크리트의 사용상 변형한계를 무시하고, 멤브레인 이론을 적용하여 인장력 유발에 따라 요구되는 와이어매쉬의 총단면적 및 개수를 예를 들어 평가하여 보면, 표 1에 명시된 바와 같이 비교적 과도한 와이어매쉬량이 요구됨을 알 수 있다. 표 1의 분석에 적용된 관련재료의 물성치를 정리하면, 슛크리트의 경우 설계기준강도는 $180kg/cm^2$, 탄성계수는 $2.01 \times 10^5 kg/cm^2$, 포아슨비는 0.18 등이고, 와이어매쉬($\phi = 4mm$)의 경우 극한인장강도는 $2800kg/cm^2$, 탄성계수는 $2.04 \times 10^6 kg/cm^2$ 등이며, 또한 정사각형 지압판의 b_{PL} (그림 7 참조)은 15cm이고, LRFD 방식 하중증가계수는 1.3을 적용하였다.

이상의 결과를 종합할 때, 근본적으로 슛크리트 전면벽체에 대한 안정성 검토는 사용한계상태를 근거로 함이 타당하며, 따라서 과도한 변형에 의해 실제 발생할 수 있는 전면벽체의 균열 및 파손 등 문제점을 감안하여 멤브레인 이론의 적용은 본 연구에서 배제하였다.

표 1. 철근콘크리트 시방서 처짐규정에 따른 요구 전면벽체 두께 및 와이어매쉬량

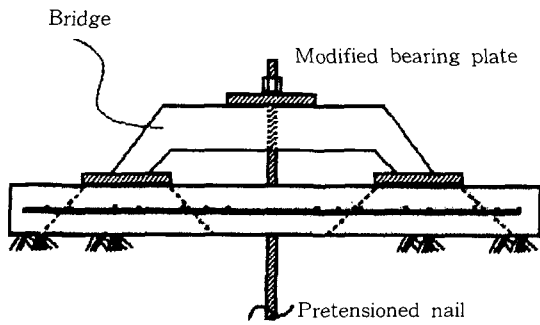
네일의 설치간격 ($s_h = s_v$)	작용 토압	최대 처짐	요구전면벽체두께	요구와이어매쉬단면적 (개수)/m	요구전면벽체두께/최대처짐
1.5m	0.4t/m ² /m	0.83cm	2.6cm	3.43cm ² (19EA)	0.31
2.0m	0.533t/m ² /m	1.1cm	3.8cm	5.58cm ² (31EA)	0.29

3.8 첫단 네일의 한계설치깊이 평가

구조적으로 캔티레바 플레이트 형태에 해당되는 첫단 네일의 경우(그림 5 참조), 최상단으로부터 연직방향으로의 설치깊이 한계치는, 사각형 플레이트 형태에 해당되는 중앙부 전면벽체에 대한 해석결과를 토대로 결정 가능하다. 즉 한계설치깊이는 전단강도 및 휨강도에 대한 안정검토에 의해 결정된 중앙부 전면벽체의 최소 소요두께와 요구되는 와이어매쉬량을 가지고 안정을 유지할 수 있는 첫단 네일의 최대연직높이로 정의되며, 이와 같은 첫단 네일 전면벽체 구조체의 경우 전단력 및 휨모멘트의 평가는 캔티레바의 경우와 동일하며, 또한 전단강도 및 휨강도 관계식은 앞에서 제시된 식(14) ~ (16)과 동일하다.

3.9 수정지압판 제안

앞의 3.3에서 기술한 바와 같이, 전단 및 휨모멘트에 대한 안정성 확보에 필요한 슛크리트 전면벽체의 소요두께등이 산정되게 된다. 그러나 일반 쏘일네일링 굴착공법의 경우와는 달리, 프리텐션이 네일에 가해지는 경우에는 작용토압의 증가로 인해 특히 관입전단파괴에 대한 안정성 확보가 주요 관건이며, 따라서 요구되는 전면벽체의 두께는 상대적으로 두꺼워질 것으로 예상되고, 이 경우에 시공성과 경제적인 측면을 동시에 고려해야 하는 문제점이 발생한다. 따라서, 전면판을 슛크리트로 시공을 하되 프리텐션이 적용되는 구간에 한해서는 지압판의 구조를 수정하여 슛크리트의 두께를 가능한 최소



(a) 평면도

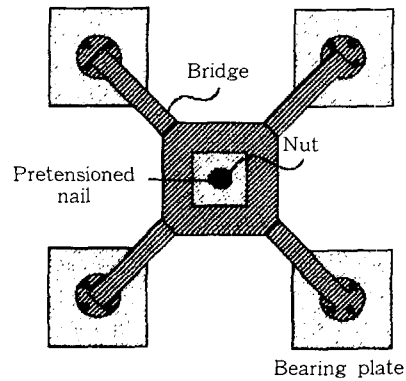


그림 8. 수정지압판의 형태

화하는 대책방안이 필요시 된다. 본 연구에서는 고려해 볼 수 있는 가능한 안으로 그림 8과 같은 수정지압판 형태를 제시하고자 하며, 그림 8의 수정지압판은 당초 한 개의 지압판에 작용하던 긴장력을 브리지(bridge)를 사용하여 4개의 지압판으로 분산시키는 효과를 얻을 수 있어, 이에 따른 관입저항능력의 증대와 요구되는 전면벽체의 두께 감소를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 4개 지압판 사이의 간격은 지압판 상호간의 간섭효과를 배제시키기 위해 전면벽체 두께의 두 배 이상이 되도록 한다.

4. 신뢰도 분석

1장 서론에서도 기술한 바와 같이, 설계에 적용되는 각종 변수 값들의 불확실성과, 특히 본 연구에서 초점을 두고 있는 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 경우에, 체계적인 실험자료 및 계측자료의 획득이 여의치 않은 실정 등을 감안하여, 이에 대한 간접적인 보완책으로서, 신뢰도 분석기법의 도입이 이루어졌다. 본 연구에서는 관련 구조체의 파괴확률(probability of failure)을 평가할 수 있는 신뢰도 분석기법을, 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 경우 특히 문제시 되는 쏘크리트 전면벽체의 관입전단파괴 발생 가능성에 초점을 맞춰 제한적으로 적용하였다. 본 신뢰도 분석기법은 Smith(1986)와 Kitaura & Ikemoto(1988)의 내용을 토대로 수립

되었으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

일반적으로 구조체에는 저항력(R)과 활동력(S)이 존재하게 되며 두 힘의 평형관계에 따라 구조체의 안정성이 결정된다. 이러한 두 힘의 물리량은 상수가 아닌 변수의 형태이며, 일정한 조건 및 범위 내에서 그 값의 변화가 다양하게 나타난다. 즉, 저항력과 활동력은 불확실한 변수들(random variables)로 구성되어 있으며, 확률밀도함수(probability density function) 형태로 분포한다. 구조체의 파괴는 저항력 보다 활동력이 클 경우 발생이 예상되므로, g -함수($Z = R - S = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \leq 0$)를 한계상태함수(limit state function)라 정의한다.

본 연구에서 신뢰도 분석을 수행하고자 하는, 프리텐션 쏘일네일링 시스템 쏘크리트 전면벽체의 관입전단파괴에 대해, 관입을 유발시키려는 힘(S)과 이에 대해 전면벽체가 저항할 수 있는 힘(R)을 토대로, g -함수를 구하는 절차를 정리하면 아래의 식(17)과 같다.

$$Z = R - S = V_{ps} - Q_0 = g(\sigma_{ck}, \phi, \gamma, T_0) \quad (17)$$

파괴확률(P_f)은 $P[Z \leq 0] = P[g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \leq 0]$ 로 정의되며, 신뢰도(R_0)는 식(18)과 같이 정의된다. 신뢰도는 구조물의 종류에 따라 다소 차이가 있으나 일반적으로 95% 이상을 허용설계기준(Smith, 1986)으로 규정하고 있다.

$$R_0 = 1 - P_f \quad (18)$$

또한 파괴확률의 평가과정에서 신뢰도 지수 (reliability index, β , 식(19))가 사용되는데, 이는 Z 의 평균(μ_z)과 표준편차(σ_z)의 비(ratio)로서 정의되며, 이를 토대로 파괴확률의 평가식을 표현하면 식(20)과 같다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (19)$$

$$P_f = P_f^{FORM} = \Phi(-\beta) \quad (20)$$

식(20)에 포함된 Φ 는 누적정규분포함수 (cumulative normal distribution function)를 의미하며, 신뢰도 지수가 FORM(First Order Reliability Method, 그림 9)에 의거해 결정되면, Φ -도표를 이용하여 파괴확률이 최종 평가된다 (Smith, 1986).

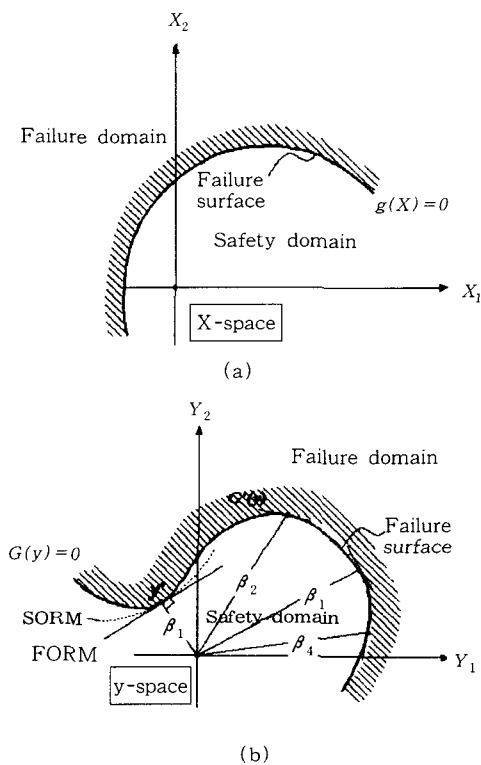


그림 9. 함수변환에 따른 신뢰도 지수 결정 개요

그림 9에는 X-공간(original space)에서 y-공간 (standard normal space, $y_i = (X_i - \mu_i) / \sigma_i$)으로의 함수변환($g(X) \Rightarrow G(y)$)이 도시되어 있으며, 신뢰도 지수 및 design point (y^*) 등이 정의되어 있다. 여기서, y^* 는 파괴면을 따라 파괴확률이 최대가 되는 지점을 의미하며, y^* 에서의 접선으로부터 원점까지의 최단거리가 신뢰도 지수가 된다. 앞에서 정리된 관입전단파괴에 대한 신뢰도 분석기법과 앞의 2장 및 3장을 통해 제시된 내용을 종합하여, 본 연구 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 전체적인 해석절차 및 설계기법 등을 흐름도를 통해 정리하면 그림 10과 같다.

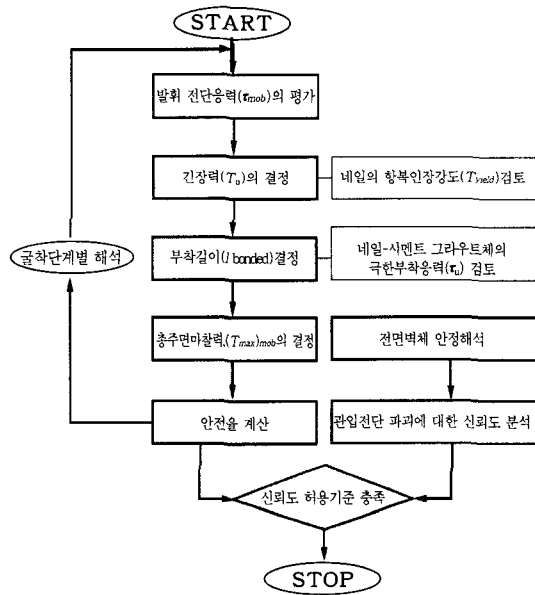


그림 10. 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 해석절차 및 설계기법 흐름도

5. 영향원 반경 및 다이레이턴시 각의 영향 분석

본 장에서는, 본 연구 2장 및 3장을 통해 제시된 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 해석기법

을 이용하여, 입력자료에 해당되는 영향원 반경 (R_i , 식(1) 참조) 및 다이레이턴시 각(θ) 등의 변화가, 요구되는 전면벽체의 두께 및 부착장, 안전율 등에 미치는 영향을 분석하였다. 본 분석을 위해 채택한 대표단면의 예 및 원지반의 토질정수는 그림 11 및 표 2에 각각 명시되어 있고, 또한 슛크리트 및 와이어매쉬의 물성치, 지압판 제원 등은 표 1의 분석에 적용된 값들과 동일하다. 본 분석에서, 지하수의 영향은 침투수압 형태로 고려하였으며, Liang & Feng(1997)이 분석에 적용한 R_i/R_0 값의 범위를 참고로 하여, R_i 값의 범위는 0.5 ~ 2.0m로 하였으며(천공반경 $R_0=5\text{cm}$ 인 경우), 또한 θ 값은 Vermeer & Borst(1984)가 제시한 자료를 참고로 하여 $5^\circ \sim 15^\circ$ 의 범위로 하였다. 이외에 모든 네일의 길이는 동일하게 9m로, 네일의 수평 및 연직 방향 설치간격은 동일하게 1.0m로 ($s_h=s_v=1.0\text{m}$), 철근직경은 25mm로, 또한 지표면 상재하중은 1.0t/m^2 등으로 각각 가정하여 분석에 적용하였다.

그림 11의 예에서, 프리텐션을 가한 네일은 1단~5단까지 이며, 프리텐션을 가한 네일에 한

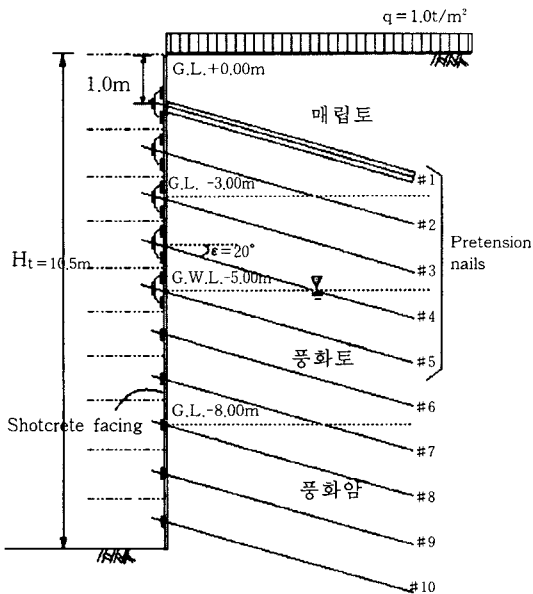


그림 11. 분석에 적용된 대표단면 예

표 2. 분석에 적용된 토질정수등 관련변수 제원

	$\gamma(\text{t/m}^3)$	$\phi(^{\circ})$	$C(\text{t/m}^2)$	ν	* 간극률 (n)	* 투수계수 (cm/sec)
매립토	1.80	25	0.1	0.33	0.40	10^{-3}
풍화토	1.90	28	0.5	0.30	0.35	10^{-4}
풍화암	2.00	33	3.0	0.27	0.30	10^{-5}

* :참고문헌 9

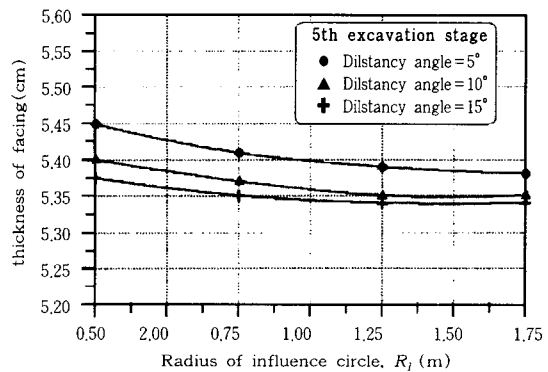


그림 12. 영향원 반경(R_i) 변화에 따른 슛크리트 전면벽체의 소요두께

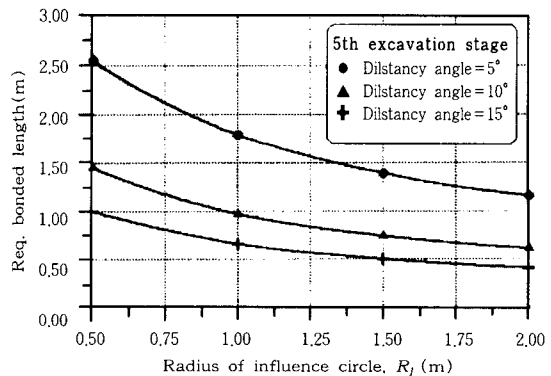


그림 13. 영향원 반경(R_i) 변화에 따른 소요부착장

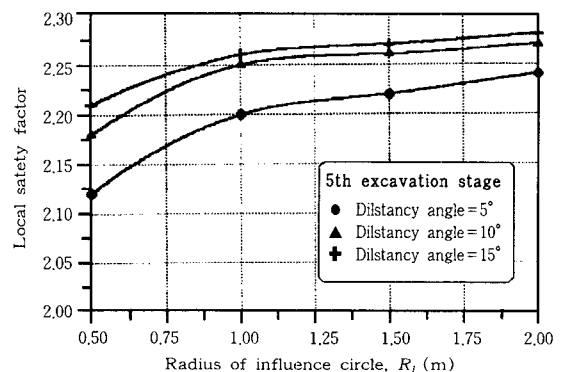


그림 14. 영향원 반경(R_i) 변화에 따른 소요부착장 5단네일 설치완료 시점의 안전율

해서는 앞의 3장에서 제안한 수정지압판(그림 8 참조)을 적용하였다. 본 분석은 5단 네일에 관련된 해석결과를 토대로 이루어 졌으며, 그 결과는 그림 12, 13 및 14 등에 각각 도시되어 있다.

그림 12 및 13의 결과를 살펴보면, 영향원 반경(R_i)이 커짐에 따라 또한 다이레이턴시 각(Ψ)이 커짐에 따라, 요구되는 전면벽체의 두께 및 부착장은 점차 작아지는 현상을 나타내고 있으며, 다이레이턴시 각이 5° 에서 10° 로 커질 경우의 감소율이 10° 에서 15° 로 커질 경우의 감소율 보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 또한 5단 네일까지 설치 완료된 단계에서의 안전율 분석 결과는 그림 14에 도시되어 있고, 이를 살펴보면 영향원 반경이 커짐에 따라 또한 다이레이턴시 각이 커짐에 따라 안전율은 점차로 커지는 현상을 나타내고 있다.

영향원 반경이 커지는 경우 식(8)에 정의된 중첩되는 영향원의 수(C_d)가 증가하게 되며, 따라서 주변흙의 부분적인 내부마찰각 증대효과가 더욱 크게 예상되고, 이로 인해 결국 식(1)에 표현된 긴장력을 가한 이후에 발휘가 예상되는 전단응력(τ_{max})값도 일부 커지게 된다. 본 경우($s_n = s_v = 1.0m$), 식(8) 하단에 정리된 기준에 의거 중첩되는 영향원 수(C_d)의 증가가 더 이상 예상되지 않는 R_i 값의 한계치를 평가하면 0.71m 정도이다. 또한 다이레이턴시 각의 증가는 지반 강도가 강화됨을 의미하며 (Vermeer & Borst, 1984), 결과적으로, 그림 12 및 13에 분석된 결과와 같이, R_i 값 및 Ψ 값이 커짐에 요구되는 전면벽체의 두께 및 부착장은 점차 작아지게 된다.

6. 실제 현장시공사례와의 비교

프리텐션 쏘일네일링 시스템의 경우, 국·내외적으로 다양한 실험자료 및 계측자료 등의 획득이 현실적으로 여의치 않은 실정이며, 따라서 본 연구에서는 제시된 해석절차 및 설계기법의 적용 타당성을 확인하기 위해, 제한적이긴 하나 실제 현장시공사례와의 비교·분석을 시도하였다. 그러나 실제 프리텐션 쏘일네일링 시

스템이 적용된 본 현장(그림 15)도 이미 시공이 완료된 상태이고 또한 체계적인 이론적 지침등을 토대로 설계 및 시공이 이루어지지 못한 관계로, 현지점에서 활용 가능한 측정자료는 상당히 제한적이다. 결국 측정자료의 부족함 및 부정확성 등으로 인해 개략적인 비교·분석이 수행되었으며, 지하수는 존재하지 않고 상부 매립토층 및 하부 풍화토층으로 구성된 본 현장 원지반의 토질정수등 관련변수의 제원은 표 3과 같이 추정하였다. 표 3의 자료중, 본 연구 제시 기법 식(1)에 포함된, 다이레이턴시 각(Ψ)은 해당흙에 대한 정압전단실험 등(황정규, 1992)을 통해 결정됨이 원칙이나, 현실적인 어려움으로 인해 본 비교에서는 Ψ 값을, Vermeer & Borst (1984)가 제시한 범위를 토대로 한 분석 결과중(그림 12~14 참조) 안전측에 해당되는 5° 로 가정하였다. 또한 영향원 반경(R_i)도 Liang & Feng(1997)이 제시한 R_i/R_0 값의 범위를 토대로 한 분석결과중(그림 12~14 참조) 안전측에 해당되는 0.5m로 가정하였다(즉 영향원의 중첩은 발생되지 않는 것으로($C_d = 0$) 간주하여, 따라서 주변흙의 부분적인 내부마찰각 증대효과가 없는 경우로 가정하였다).

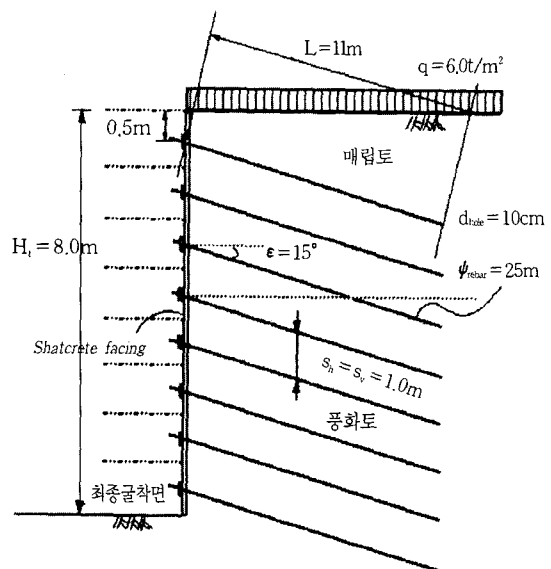


그림 15. 실제의 현장시공사례(상가신축 굴착공사) 단면

표 3. 비교·분석에 적용된 토질정수등 관련변수 제원

	$\gamma(t/m^3)$	$\phi(^{\circ})$	$C(t/m^2)$	ν
매립토	1.70	25	0.0	0.33
풍화토	1.80	30	1.0	0.30

총 굴착깊이가 8.0m인 실제현장은 1단 ~ 8단까지의 네일 모두에 긴장력(1단 ~ 4단 네일까지는 5ton 정도, 5단 ~ 8단까지는 10ton 정도로 추정됨)을 굴착단계별로 가하여 이미 시공이 완료된 상태이며, 쏘일네일링 벽체 최상단부 부근에 콘크리트 버럭 및 3.0m 높이의 기존 옹벽이 위치해 있는 점을 감안하여, 6.0t/m²의 상재하중을 본 분석에 적용하였다. 이외에 본 현장에 적용된 네일의 길이 및 설치각도, 네일의 수평 및 연직 방향 설치간격, 천공직경 및 철근직경 등은 그림 15에 명시되어 있으며, 또한 슛크리트 및 와이어매쉬의 물성치, 지압판 제원 등은 표 1의 분석에 적용된 값들과 동일한 것으로 가정하였다.

본 분석에서는 앞의 2장 및 3장에 제시된 해석기법등을 이용해, 각단 네일에 대해 최대긴장력(식(4) 참조) 및 요구되는 전면벽체 최소두께등을 우선 산정하여, 이 값들을 실제현장 시공시에 가한 긴장력과 타설된 전면벽체의 두께와 서로 비교하였으며, 이를 통해 본 연구 제시기법의 적용 타당성을 부분적으로 확인하였다(표 4). 실제현장과의 비교이므로, 일반지압판을 적

용하여 전면벽체 소요두께를 예측하였다.

표 4의 비교결과를 살펴보면, 실제현장 시공시 각단 네일에 가한 긴장력은 모두, 본 연구 제시기법에 의해 평가된 시공 가능한 최대긴장력 보다는 작은 값에 해당되며, 또한 이와 같은 최대긴장력이 가해지는 경우에 요구되는 전면벽체 최소두께 보다도 더 크게(1단 네일~4단 네일) 전면벽체 타설이 이루어진 전반적으로 안전측 시공사례의 경우로 판단된다. 또한 5단 ~ 8단 네일까지의 경우에도, 본 연구 2장 제시기법에 의해 예측된 시공 가능한 최대긴장력 보다는 17.7~39.0% 정도 작은 10 ton 정도의 긴장력이 실제시공시 가해진 상태이므로, 15.0cm 두께의 벽체타설 정도로도 구조적인 안정성은 충분하였을 것으로 판단된다. 참고적으로 표 4에 명시된 최대긴장력을 각단 네일에 대해 모두 가하는 경우, 본 연구 2장 안정해석기법에 의거해 당현장(그림15 참조) 쏘일네일링 굴착벽체의 전체 최소안전율을 평가하여 보면 2.11 정도이다.

7. 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 효용성 분석

본 장의 분석에서, 다이레이턴시 각(θ)은 5°로, 또한 영향원 반경(R)도 안전측에 해당되는 0.5m로 각각 가정하였고, 또한 슛크리트 및 와이어매쉬의 물성치, 지압판 제원 등은 표 1의

표 4. 시공사례와의 비교 분석결과 요약

	긴장력(ton)		스�크리트 전면벽체 두께 (cm)			긴장력(ton)		스�크리트 전면벽체 두께 (cm)	
	본 연구 최대긴장력	실제 시공사례	본 연구 요구두께	실제 시공사례		본 연구 최대긴장력	실제 시공사례	본 연구 요구두께	실제 시공사례
# 1 nail	5.78	5.0	11.98	15	# 5 nail	12.15	10.0	15.39	15
# 2 nail	7.76	5.0	12.92	15	# 6 nail	13.52	10.0	16.16	15
# 3 nail	9.32	5.0	13.78	15	# 7 nail	15.02	10.0	16.90	15
# 4 nail	10.75	5.0	14.60	15	# 8 nail	16.39	10.0	17.85	15

분석에 적용된 값들과 동일하다. 다음에 분석된 7.1 및 7.2의 경우 관련재료 제원은, 앞의 5장 1단 ~ 5단 네일까지만 프리텐션을 가하는 그림 11의 대표단면 예에 적용된 값들과 동일하다.

7.1 안전율 및 요구되는 슛크리트 전면벽체 두께 분석

각 시공단계별로 예상되는 최소안전율, 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 부착장, 최대긴장력 등을 그림 11의 대표단면 예에 대해, 본 연구 제시기법을 이용해, 평가한 구체결과는 표 5에 정리되어 있다. 프리텐션을 전혀 가하지 않은 경우도 비교상의 목적으로 표 5에 명시하였다.

표 5의 결과를 분석하면, 1단~5단 네일까지만 프리텐션을 가하는 경우 최종굴착단계에서의 최소안전율은 1.44 정도로 평가되며, 이는 프리텐션을 전혀 가하지 않는 경우의 최소안전율 1.39 정도에 비해 그 증가율이 3.6% 정도 이하에 머무는 비교적 증대효과가 작은 경향을 보이고 있으나, 각 굴착단계에서의 국부적인 안전율 증대효과 범위는 이 보다는 훨씬 큰 27.1~36.4% 정도이다.

한편, 프리텐션이 가해진 1단~5단 네일의 경우에 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께는, 프리텐션을 전혀 가하지 않은 일반 슛일네일링

공법 전면벽체 두께에 비해 1.2~2.6배 정도 더 크게 요구되는 결과를 나타내나, 앞의 3장에서 제안한 수정지압판(그림 8 참조)을 1단~5단 네일에 한해 적용하여 보면, 일반 슛일네일링 공법에서 요구되는 전면벽체 두께와 거의 동일하거나, 부분적으로는 오히려 요구두께를 더욱 낮은 수준까지 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이외에도, 계속 분석이 이루어질 변위의 발생시간 지연 및 변위의 크기 감소 등의 효과가 분명히 예상되는 경우 프리텐션 슛일네일링 시스템의 효용성은 더욱 클 것으로 기대된다.

7.2 벽체변위의 발생시간 지연 및 크기 감소효과

프리텐션 슛일네일링 시스템을 적용하는 주된 목적에 해당되는, 변위의 발생시간 지연 및 변위의 크기 감소 등의 효과를 분석하기 위해, FLAC^{3D} 프로그램을 이용하여 단계별 굴착에 따른 프리텐션 네일구조체의 거동예측이 수행되었다. 본 연구 제시기법을 토대로 평가된 슛크리트 전면벽체의 소요두께, 최대긴장력등(표 5 참조)을 적용하여 FLAC^{3D} 프로그램을 이용한 굴착단계별 변위(전면벽체의 최대수평변위 및 최상부 인접지반의 최대지표침하) 예측이 이루어졌으며, 그 결과는 표 6에 요약 정리되어 있다. 본 FLAC^{3D} 프로그램 해석에서, 지하수의 영

표 5. 안전율 및 전면벽체의 소요두께 분석결과

공법종류 굴착단계	프리텐션 슛일네일링 공법			일반 슛일네일링 공법	
	국부안전율	요구되는 전면벽체의 두께(cm)	요구되는 부착길이(m)/ 최대긴장력(ton)	국부안전율	요구되는 전면벽체의 두께(cm)
1단계 굴착	2.71	3.78(7.93)	1.09 / 4.23	2.02	6.70
2단계 굴착	2.71	3.67(8.43)	1.01 / 5.33	2.08	4.91
3단계 굴착	2.61	4.19(9.80)	0.98 / 6.51	1.96	4.88
4단계 굴착	2.55	4.70(11.08)	0.97 / 7.78	1.87	4.85
5단계 굴착	2.25	5.37(12.53)	0.97 / 9.08	1.77	4.83
6단계 굴착	2.12	4.91	-	1.68	4.80
7단계 굴착	2.01	4.88	-	1.61	4.78
8단계 굴착	1.88	4.85	-	1.53	4.76
9단계 굴착	1.64	4.83	-	1.45	4.74
최종 굴착	1.44	4.81	-	1.39	4.71

(): 일반지압판 사용

향은 침투수압 형태로 다루어 졌으며(표 2의 간극률 및 투수계수 참조) 또한 케이블 요소로 처리되는 네일의 입력자료로 본 연구 제시기법을 토대로 평가된 최대긴장력을 적용하는 방식에 의해 프리텐션 효과가 고려되었으며, 이외에도 비교상의 목적으로, 프리텐션을 전혀 가하지 않은 일반 쏘일네일링 공법의 경우도 표 5의 자료등을 토대로 FLAC^{2D} 프로그램 변위해석을 아울러 수행하여 그 결과를 아래 표 6에 명시하였다.

표 6의 결과를 살펴보면, 각 시공단계별로 발생이 예상되는 최대변위량은 프리텐션의 적용 여부에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 1단~5단 네일에 한해 프리텐션을 가함으로써, 최종 굴착단계에서의 전면벽체 최대수평변위량은 5.02mm(21%) 정도 또한 최대지표침하량은 4.87mm(25%) 정도, 일반 쏘일네일링 공법에 비해, 감소하는 결과를 나타내고 있다. 특히 프리텐션이 가해진 1단~5단 네일까지의 단계별 시공과정을 통해서, 전면벽체 최대수평변위량은 0.07mm(5%)~3.73mm(36%) 정도 또한 최대지표침하량은 0.20mm(7%)~3.44mm(36%) 정도의 감소효과가 예상됨을 알 수 있다. 그림 16 및 17은 최종굴착단계에서의 깊이별 누적 수평변위량 및 지표침하량을 각각 도시한 것이며, 이를 통해 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 변위억제 효과는 최상단으로 부터 프리텐션이 가해진 1

단~5단 네일까지의 설치깊이에서 특히 두드러진 현상을 나타내고 있으며, 또한 지표침하량은 총굴착깊이 10.5m의 71.4% 정도에 해당되는 수평거리 7.5m 정도 범위까지의 인접지반에서 더욱 지배적인 경향을 보여주고 있다. 이외에도 본 예의 경우 안전측에서 총굴착깊이 10.5m의 0.2%에 해당되는 21.0mm를 허용 최대수평변위 기준으로 하는 경우, 이 기준치를 초과할 것으

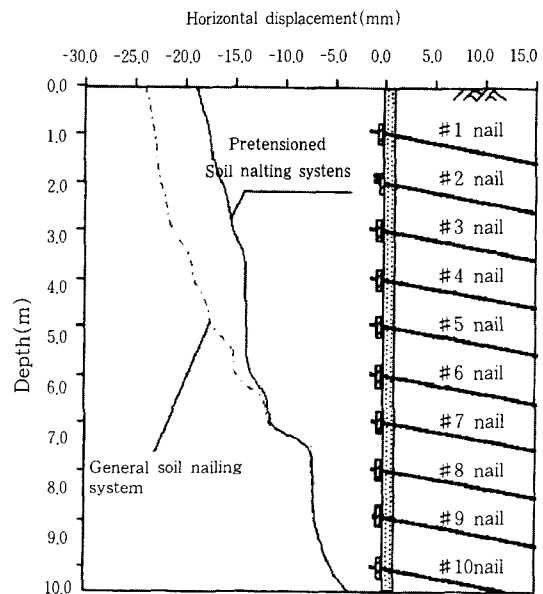


그림 16. 누적 수평변위량 비교

표 6. 굴착단계별 변위해석결과 요약

공법종류 굴착단계	프리텐션 쏘일네일링 공법		일반 쏘일네일링 공법	
	최대 수평변위량(mm)	최대 지표침하량(mm)	최대 수평변위량(mm)	최대 지표침하량(mm)
1단계 굴착	1.42	2.59	1.49	2.79
2단계 굴착	1.94	3.08	3.08	3.63
3단계 굴착	2.73	3.36	5.02	5.15
4단계 굴착	4.25	4.45	7.29	6.94
5단계 굴착	6.57	6.13	10.30	9.57
6단계 굴착	9.47	8.37	14.28	12.98
7단계 굴착	12.59	10.95	17.64	15.76
8단계 굴착	13.80	11.72	18.87	16.54
9단계 굴착	16.48	13.24	21.57	18.10
최종 굴착	19.06	14.52	24.08	19.39

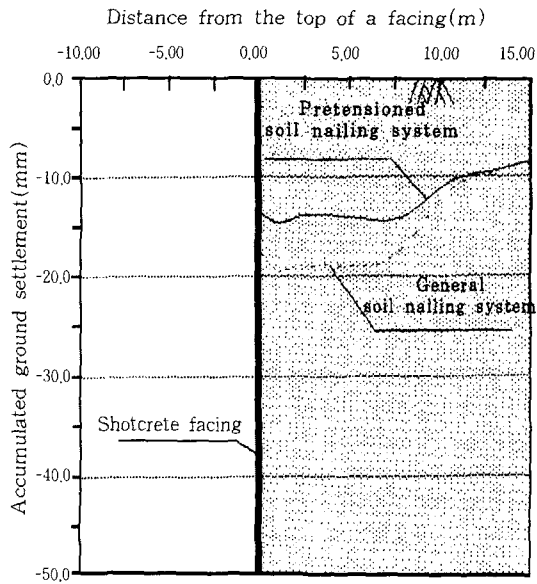


그림 17. 누적 지표침하량 비교

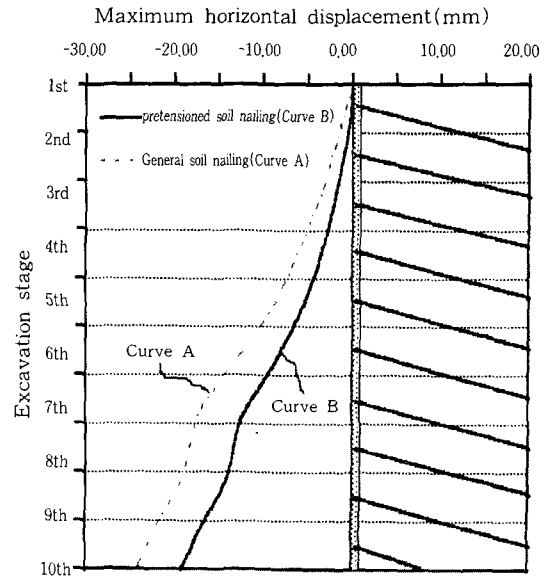


그림 18. 변위발생 지연 및 억제효과

로 예상되는 일반 쏘일네일링 공법의 문제점을, 1단 ~ 5단 네일에 한해 프리텐션을 가하고 또한 수정지압판을 적용하여 해결됨을 알 수 있다.

그림 18은 각 굴착단계별로 발생이 예상되는 최대수평변위 해석결과를, 1단~5단 네일에 한해 프리텐션을 가한 경우와 프리텐션을 전혀 가하지 않은 일반 쏘일네일링 공법의 경우 각각에 대해 도시한 결과이다. 각 굴착단계에 해당되는 굴착깊이의 0.2%를 허용 최대수평변위 기준으로 하는 경우, 한 예를 들어 6단 네일이 설치 완료된 단계의 굴착깊이는 6.5m이고, 일반 쏘일네일링 공법의 경우 이 굴착단계에서 예상되는 최대수평변위는 14.28mm로서 0.2% 기준에 해당되는 13.0mm를 이미 초과하고 있으나, 1단~5단 네일에 한해 프리텐션을 가한 경우에는 이보다 더 깊은 7.5m까지 굴착된 7단계 굴착 완료시점에서 전면벽체 최대수평변위는 12.59mm로 이전 굴착단계에 해당되는 0.2% 기준 13.0mm 보다도 작은 즉 변위발생 지연 및 억제 효과라는 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 효용성을 예상할 수 있고, 이를 통해 특히 상부 연약토사층의 과도한 변위발생을 조정할 수 있는 가능성이 기대된다.

7.3 네일 설치길이의 감소효과

그림 19에 도시된 바와 같이, 지하수는 고려하지 않고, 단일토층 조건($\phi = 30^\circ$, $c = 1.0t/m^2$ 및 $\gamma = 2.0t/m^3$)에 대해, 6.0m 동일길이의 짧은 프리텐션 네일을 적용하는 경우와, 프리텐션을 전혀 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법을 적용하는 경우(네일의 설치길이 $L = 9.0m$, $9.5m$ 및 $10.0m$ 인 3가지 경우) 각각에 대한 안전율을, 본

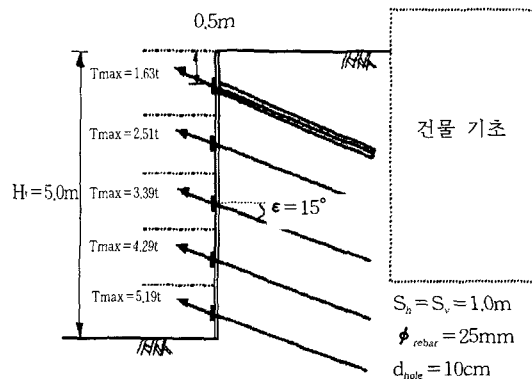


그림 19. 네일 설치길이 비교·분석을 위한 대표단면

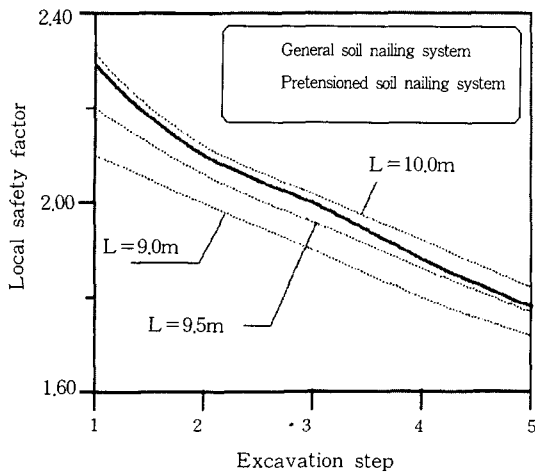


그림 20. 두 공법간의 네일 설치길이(L)에 따른 안전율 비교

연구 제시기법을 토대로 평가하여 그 결과를 비교 분석하였다. 이외에 본 분석에 적용된 네일의 설치각도, 네일의 수평 및 연직 방향 설치간격, 천공직경 및 철근직경 등은 그림 19에 명시되어 있다.

프리텐션 네일의 경우 본 연구 제시기법을 토대로 평가된 최대긴장력을 1단 ~ 5단 네일 까지 모두에 각각 적용하였으며, 앞서 언급한 2가지 경우에 각각에 대한 각 굴착단계별 안전율 평가결과를 종합적으로 도시하면 그림 20과 같다.

그림 20의 결과를 비교 분석하면, 6.0m의 짧은 길이 네일을 적용하더라도 프리텐션을 가함으로써, 프리텐션을 전혀 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법의 경우(L=9.0m 및 9.5m인 경우)보다도 각 굴착단계별 안전율이 오히려 높게 평가되는 결과가 예상됨을 알 수 있다. 제한적인 분석결과이긴 하나, 만약 도심지 굴착공사시 기존건물이 인접하여(그림 19 참조) 네일의 설치길이가 제한되는 경우등에, 적절한 지반보강대책을 병행하여 변위발생을 더욱 억제하려는 경우 네일의 설치길이를 축소 조정하여, 요구되는 안정성을 충분히 확보할 수 있는 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 효율적 적용성이 기대된다.

표 7. 신뢰도 분석에 사용된 관련 재료의 평균과 표준편차

변수	단위중량, γ (t/m^3)		내부마찰각, ϕ ($^\circ$)		최대긴장력, T_{max} (ton)		σ_{ck} (kg/cm^2)	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
지반종류								
매립토	1.80	0.20	25	3.41	# 1 nail = 4.23 # 2 nail = 5.33 # 3 nail = 6.51	0.18 0.22 0.21	210.14	25.02
풍화토	1.90	0.17	28	2.79	# 4 nail = 7.78 # 5 nail = 9.08	0.16 0.17		
distribution	lognormal		normal		lognormal		lognormal	

표 8. 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 대한 신뢰도 해석결과 요약

분류	수정지압판 적용			일반지압판 적용		
	벽체두께 (h_c)	신뢰도지수 (β)	관입전단 파괴확률(P_f)	벽체두께 (h_c)	신뢰도지수 (β)	관입전단 파괴확률(P_f)
# 1 nail	3.78cm	3.52	0.0002	7.93cm	1.53	0.0630
# 2 nail	3.67cm	2.52	0.0059	8.43cm	1.66	0.0485
# 3 nail	4.19cm	2.33	0.0099	9.80cm	1.70	0.0446
# 4 nail	4.70cm	2.07	0.0192	11.08cm	1.67	0.0475
# 5 nail	5.37cm	2.11	0.0174	12.53cm	1.77	0.0384
최종결과	· 최대 파괴확률 : 2% · 신뢰도 : 98%			· 최대 파괴확률 : 7% · 신뢰도 : 93%		

8. 신뢰도 분석

프리텐션 쏘일네일링 시스템 전면벽체의 관입전단파괴에 대한 안정성을 추가로 검토하기 위해, 관련변수 각각에 대한 평균값과 표준편차를 토대로 4장의 제시절차에 의거해 신뢰도 지수 및 파괴확률 등을 산출하였다. 분석에 사용된 관련제원은 표 7에 요약 정리되어 있으며, 최대긴장력의 평균값과 표준편차는 다이레이턴 시 각($\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$) 및 영향원 반경($R_0 = 0.5 \sim 2.0m$) 등의 변화에 따른 12가지(그림 12 ~ 14 참조)의 다양한 해석을 수행하여 그 결과를 토대로 평가하였으며, 이외의 변수들에 대한 평균값과 표준편차는 Smith(1986) 및 Kitaura & Ikemoto(1988)의 제시내용을 참고로 하여 결정하였다. 본 분석에 적용된 해석단면은 지하수가 존재하는 그림 11의 예와 동일하다.

또한 본 분석은 앞의 3장에서 제안한 수정지압판(그림 8 참조)의 적용에 따른 5단 네일까지의 관입전단 파괴확률 및 신뢰도에 초점을 두었고, 그 결과는 표 8에 요약되어 있다.

표 8의 결과를 살펴보면, 일반지압판의 경우에는 파괴확률의 최대치가 비교적 크게 평가되어 결국 일반적으로 설계에 적용되는 신뢰도 허용기준(95% 이상)에는 다소 미달하는 것으로 나타났으나, 수정지압판을 적용할 경우에는 전면벽체의 소요두께 감소와 더불어 관입전단파괴에 대한 최대파괴확률도 2%로 낮아지게 되어, 결과적으로 신뢰도가 98%로 증대되는 결과를 나타내고 있다. 만약, 이와 같은 신뢰도 분석 결과가 일반적인 허용설계기준(95% 이상)을 충족시키지 못하는 경우에는, 민감도 분석(Smith, 1986)을 통해 파괴확률에 크게 영향을 미치는 변수들을 확인하여 본 변수들에 대한 추가적인 데이터 보강등 불확실성을 가급적 최소화하는 조치가 요구된다. 본 조치에 의해서도 신뢰도 향상이 이루어지지 못할 경우에는, 근본적인 수정작업(본 연구의 경우에는 LRFD 방식에 적용되는 하중증가계수를 상향 조정하여)을 통해 즉, 슛크리트 전면벽체의 두께등을 늘려 관입전

단파괴에 대한 안정성을 더욱 확보하는 방식에 의해 신뢰도 증가가 가능하다.

9. 최상단 첫단 네일의 한계설치깊이 분석

본 분석 예는 일반지압판의 경우를 대상으로 하였고, 적용된 슛크리트 및 와이어매쉬의 물성치, 지압판 제원 등은 표 1의 분석에 적용된 값들과 동일하며, 또한 원지반 흙은 통상적인 상부 매립층의 경우를 고려하여 점착력은 무시하였고, 단위중량은 $1.80t/m^3$, 내부마찰각은 25° 로 가정하였다. 첫단 네일의 설치깊이는 최상단으로 부터 50cm로, 네일길이(L)는 10m로, 설치각도(ϵ)는 15° 로, 첫단 네일의 수평방향 설치간격과 둘째단 네일과의 연직방향 설치간격은 모두 1.0m로, 또한 지하수의 영향은 무시하고 슛크리트 전면벽체의 두께는 10cm로 우선 가정한 다음, 소요안전율 기준이 충족되는 첫단 네일의 시공가능한 최대긴장력을 산출한 바 그 결과는 4.0ton 이었다. 앞서 산출된 최대긴장력값 이하의 다양한 긴장력을 적용하여, 앞의 3장에서 제시된 전면벽체의 안정성 평가절차에 의거해, 전면벽체의 소요두께 변화에 따른 최상단 첫단 네일의 한계설치깊이를 각각 평가하여 그 결과

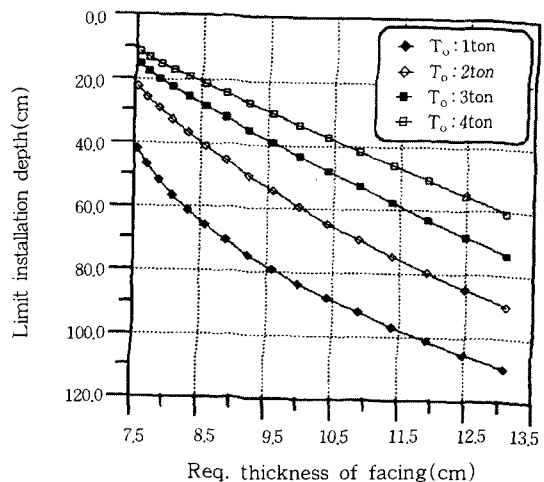


그림 21. 최상단 네일의 긴장력과 한계설치깊이와의 관계

를 도시하면 그림 21과 같다. 그림 21의 분석에서, 다이레이턴시 각(θ)은 5° 로, 또한 영향원 반경(R)은 0.5m로 각각 가정하였다.

그림 21의 결과를 살펴보면, 전면벽체의 두께를 10cm로 하고 또한 첫단 네일에 최대긴장력 4.0ton을 가하게 되는 경우, 첫단 네일의 설치깊이 한계는 33cm 정도로 제한됨을 알 수 있다. 이는 앞서 가정한 첫단 네일의 설치깊이 50cm는 안정성 확보에 문제시 됨을 의미하며, 이에 대한 해결방안으로는, (1) 전면벽체의 두께는 10cm를 그대로 유지하면서 첫단 네일의 한계설치깊이를 50cm로 늘리기 위해서 가하는 긴장력을 2.5ton으로 축소 조정하는 방안과, (2) 가하는 긴장력은 최대값인 4.0ton으로 유지하면서 대신에 전면벽체의 두께를 12cm로 증대시키는 방안 등 2종류이다. 그러나 특히 전술한 (1) 방안에 대해서는 예상 발생변위가 허용기준 이내에 해당되는지 특히 유의할 필요가 있으며, 이에 대한 검토결과를 정리하면 다음과 같다.

FLAC^{3D} 프로그램 해석결과, 2.5ton의 긴장력을 가하는 경우 예상되는 최대수평변위량은 0.94mm 정도로서, 안전측에서의 허용변위기준(굴착깊이의 0.2%)인 2.0mm 이내인 것으로 나타났다. 결국 지표면 부근의 지중매설물등으로 인해 첫단 네일의 설치깊이가 일정 심도 이상 되어야 하는 경우에는, 안정성 확보 및 경제성 등을 감안하여 긴장력-전면벽체의 소요두께-허용변위기준 사이의 관계를 종합적으로 고려하는 공학적 판단이 요구된다.

10. 요약 및 결론

본 연구에서는, 쏘일네일링 굴착공법에 대해 해석 및 설계 측면에서의 미흡한 점을 보완함과 동시에, 향후 적용 가능성이 클 것으로 판단되는 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 초점을 두어, 학문적 기초에 입각한 설계 및 시공을 유도하기 위해, 관련 해석절차 및 설계기법을 체계화하여 제시하였다. 제시된 내용은, 1) 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 굴착단계별 최대긴장력 결정 및

안정해석기법, 2) 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량과 최상단 첫단 네일의 한계설치깊이 등을 결정하기 위한 해석절차, 또한 3) 전면벽체의 관입전단파괴 가능성에 대한 신뢰도 분석기법 등이다. 예측결과를 제한적이긴 하나 실제의 시공사례와 비교·분석하여, 본 연구 제시 절차 및 기법의 적합성을 부분적으로 확인하였다. 또한 제시기법을 이용해 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 효용성 분석과, 이외에도 다이레이턴시 각 및 영향원 반경 등 주요인자에 대한 영향 및 FLAC^{3D} 프로그램을 이용해 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 발생변위 억제효과 등을 분석하였다. 본 분석을 통해 얻어진 결과 중 주요 부분을 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구 해석기법 입력자료에 해당되는, 영향원 반경이 커짐에 따라 또한 다이레이턴시 각이 커짐에 따라, 요구되는 전면벽체의 두께 및 부착장은 점차 작아지는 현상을, 그러나 안전율은 점차로 커지는 현상을 각각 확인하였으며, 이는 주변흙의 지반강도 증대에 원인이 있는 것으로 판단된다.

(2) 상단부 일부 네일에만 프리텐션을 가하는 경우 최종 굴착단계에서의 전체안전율은, 프리텐션을 전혀 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법의 전체안전율에 비해 그 증가율이 비교적 미미한 경향을 보이고 있으나, 각 굴착단계에서의 국부적인 안전율 증대효과는 이 보다는 훨씬 큰 경향을 보이고 있다. 한편 프리텐션이 가해진 네일의 경우에 요구되는 슛크리트 전면벽체의 두께는, 프리텐션을 가하지 않는 경우에 비해 일반적으로 더 크게 요구되는 결과를 나타내나, 본 연구를 통해 제안한 수정지압판을 프리텐션 네일에 한해 적용하는 경우, 일반 쏘일네일링 공법에서 요구되는 전면벽체의 두께와 거의 동일하거나, 부분적으로는 오히려 요구두께를 더욱 낮은 수준까지 감소시킬 수 있는 효과가 예상된다.

(3) 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 변위억제 효과는, 최상부로 부터 프리텐션이 가해진 최하단 네일의 설치깊이 사이에서 두드러진 경향을 확인하였으며 이를 통해, 특히 상부에 연약한

토사층이 존재하여 허용최대변위 기준치를 초과할 것으로 예상되는 일반 쏘일네일링 공법의 문제점을, 변위 발생시간 지연 및 억제 효과라는 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 효용성을 통해, 과도한 변위발생을 사전에 조정할 수 있는 가능성이 기대된다.

(4) 이격거리 제한등 시공여건상 짧은 길이의 네일을 적용하더라도 프리텐션을 가함으로써, 프리텐션을 전혀 가하지 않는 일반 쏘일네일링 공법의 경우(네일의 길이가 훨씬 긴 경우) 보다도 각 굴착단계별 안전율이 오히려 높게 평가되는 결과가 예상됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 토대로 판단할 때, 만약 기존건물이 인접하여 존재하여 네일의 설치길이가 제한되는 경우등에, 적절한 지반보강대책을 병행하여 변위발생을 더욱 억제하는 경우 네일의 설치길이를 축소 조정하여 요구되는 안정성을 충분히 확보할 수 있는 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 효율적 적용성이 적극 기대된다.

(5) 기존 일반지압판의 경우 만약 파괴확률이 비교적 크게 평가되어, 결국 일반적으로 설계에 적용되는 신뢰도 허용기준에 미달하는 경우, 제안한 수정지압판을 적용하여 전면벽체의 소요두께 감소와 더불어 관입전단파괴에 대한 파괴확률도 낮출 수 있는 가능성이 예상된다.

효용성이 예상되는 프리텐션 쏘일네일링 시스템을 더욱 실무에 확대·적용하기 위해서는, 기초연구 성격의 본 논문에서 제시된 해석절차 및 설계기법, 또한 수정지압판 등의 적합성을 실험 및 현장계측 등을 통해 지속적으로 검증하는 노력이 필요시 된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 96 연구개발사업(1996.11~1998.11)의 연구비 지원(과제번호, R&D / 96-0041)에 의한 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1996), 콘크리트 표준시방서, 대한토

목학회.
 2. 김홍택(1992), 새로운 보강석축의 안정해석에 관한 연구, 한국과학재단 결과보고서.
 3. 김홍택등(1995), "Nailed-Soil 굴착벽체의 발휘인장력 예측", 한국지반공학회지, 제11권, 제2호, pp.79~97.
 4. 조효남, 심종성(1995), 철근 콘크리트 구조설계, 구미서관.
 5. 황정규(1992), 건설기술자를 위한 지반공학의 기초이론, 구미서관.
 6. AASHTO(1996), *Standard Specifications for Highway Bridges*, American Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.
 7. ACI(1996), Note on ACI 318-95, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, PCA, Chicago.
 8. FHWA(1996), *Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls*, Publication No. FHWA-SA-96-069.
 9. Freeze, R. A. and Cherry, J. A.(1979), *Groundwater*, Prentice Hall, New Jersey.
 10. Hanna, A. and Ghaly, A.(1994), "Ultimate Pullout Resistance of Groups of Vertical Anchors", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp.673~682.
 11. Kitaura, M. and Ikemoto, T.(1988), "Reliability Analysis of Embankment in Consideration of Randomness and Uncertainties in Soil Properties and Intensity of Ground Motion", *Journal of JSCE*, No.499/III-10, pp.413~425.
 12. 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.
 13. Smith, G. N.(1986), *Probability and Statistics in Civil Engineering*, William Collins Sons & Co. Ltd, London.
 14. TRB(1987), *Reinforcement of Earth Slopes and Embankments*, National Cooperative Highway Research Program Report, Transportation Research Board, Washington, D. C.
 15. Ugral, A. C.(1981), *Stresses in Plates and Shells*, McGraw-Hill Inc., London.
 16. Vermeer, P. A. and Borst, R.(1984), "Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock", *Heron*, Vol. 29, No. 3, pp.1~64.
 (접수일자 1998. 11. 19)