

스파이럴 파이프 네일링 시스템의 안정해석 및 적용성에 관한 연구

A Study on Application and Stability Analysis of Spiral Pipe Nailing System

박시삼* · 박성철** · 정성필*** · 김홍택****

Park, Si-Sam · Park, Sung-Chul · Jung, Sung-Pill · Kim, Hong-Taek

Abstract

In this study, a newly modified soil nailing technology named as the SPN (Spiral Pipe Nailing) system, is developed to self drilling method can apply to ground which is hard to keep shape of bore hole. And limit equilibrium analysis with simplified trial wedge method while length ratio and bond ratio being altered was performed to evaluate slope stability considered of tensile strength and bending stiffness. Also, using FLAC^{2D} program, superiority of the SPN system was compared to the GSN (General Soil Nailing) system about an example section. And effects of various factors related to the design of the SPN system, such as the type of drilling method and the bit, are examined throughout a series of the displacement-controlled field pull-out tests. As a result, the SPN system is better than the GSN system in slope stability because of having larger bending stiffness, tensile strength and unit skin friction. And results of simplified trial wedge method are similar to results of TALREN 97 program, commercial limit equilibrium analysis computer software, about an example section. Consequently, it will find out of that the SPN system reduce displacements and settlements in down excavation process as well as to increase the global stability.

Keywords : Spiral pipe nailing system, Simplified trial wedge method, Bending stiffness

요 지

본 연구에서는 네일 삽입을 위한 천공작업 후, 공벽유지가 어려운 사질토 지반에 비교적 유리하게 적용할 수 있는 자천공방식의 스파이럴 파이프 네일링(SPN, Spiral Pipe Nailing) 시스템을 소개하고, 네일의 인장력 및 강성을 고려하여 안정성 평가를 하기 위해 길이비(R_L) 및 정착비(R_B)를 다양하게 변화시켜가면서 간편시행썰기법을 이용하여 한계평형해석을 수행하였다. 또한 FDM 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D} Ver. 3.30 프로그램을 사용하여, SPN 시스템 및 일반 쏘일네일링(GSN, General Soil Nailing) 시스템을 비교·평가하였다. 아울러 천공방법과 비트장착 등 SPN 시스템의 설계와 관련된 여러 인자에 대한 효과를 평가하기 위해, 6회의 변위제어방식 현장인발시험을 수행하였으며, 이를 토대로 SPN 시스템의 단기 인발거동특성을 평가해 보았다. 그 결과 SPN 시스템의 경우, GSN 시스템에 비해 강성, 인장강도 및 단위주면마찰력이 크게 발휘되므로, 전 체안정성 측면에서 GSN 시스템에 비해 우수한 것으로 나타났다. 또한 강성을 고려한 간편시행썰기법의 안정해석 결과를 살펴 보면, 상용 한계평형해석 프로그램인 TALREN 97 프로그램의 안정해석 결과와 유사한 것으로 나타났다. 아울러 FLAC^{2D} Ver. 3.30 프로그램 수치해석 결과를 살펴보면, SPN 시스템에서 유발되는 횡방향 변위의 경우, GSN 시스템에 비해, 10% 정도 감소 하는 것으로 나타났다.

주요어 : 스파이럴 파이프 네일링 시스템, 간편 시행썰기법, 휨강성, 길이비, 정착비

*정회원, LG건설(주) 기술본부 토목 Engrg. 대리

**정회원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정

***정회원, (주)오륙개발 대표이사

****정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

1. 서론

쏘일네일링 시스템은 90년대 초반 국내에 도입된 이래 사면보강 및 지반굴착분야 등에 그 적용성이 더욱 확대되고 있는 공법이며, 이에 대한 이론적 연구 및 실무적 응용 기술 등은 국내에서도 지속적으로 진보되고 있는 추세이다. 그러나 국내의 사면안정 및 지하굴착공사에 적용되고 있는 쏘일네일링 시스템(GSN, General Soil Nailing System)을 천공 후 공벽유지가 비교적 어려운 사질토 지반 등에 적용할 경우, 케이싱 삽입·인발 등의 공정이 필요하며, 공벽형성의 어려움 등으로 인하여 밀실한 그라우트 체 구근 형성이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 경우 그라우트-흙 사이에서 충분한 주면마찰력을 발휘하지 못하여 쏘일네일링 보강토체의 안정성에 좋지 않은 결과를 초래할 수 있을 것으로 판단된다.

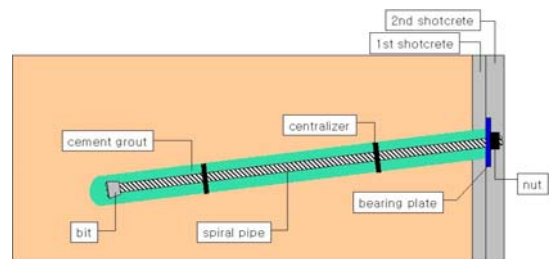
따라서 본 연구에서는 천공과 동시에 그라우팅을 실시할 수 있는 자천공 방식의 스파이럴 파이프 네일링(SPN, Spiral Pipe Nailing) 시스템을 개발하였으며, SPN 시스템의 인발거동특성을 평가하기 위해, 변위제어방식 현장 인발시험을 6회 시행하였다. 또한 SPN 시스템에 적용되는 보강재의 경우, 이형철근(D29)에 비해 강성이 크기 때문에 그라우트-흙 사이의 주면마찰력만을 고려하여 안정성 검토를 하는 일반 쏘일네일링 시스템과는 다르게 네일의 강성을 고려하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 옹벽에 작용하는 최대토압을 산정하는 방법인 시행췌기법을 적용하여, 강성을 고려한 쏘일네일링 벽체의 내적 안정성을 검토할 수 있는 간편 시행췌기법을 제시하였으며, 이에 대한 적용성을 평가하기 위해 상용프로그램인 TALREN 97의 안정해석 결과와 비교, 검토하였다.

2. SPN 시스템의 기본원리

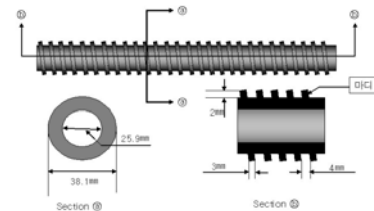
2.1 SPN 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 SPN 시스템은 일반 쏘일네일링 시스템과 기본적인 메커니즘은 동일하다 할 수 있으나, 시공 단계에 있어서 케이싱 삽입, 인발 공정이 줄어들어 공기단축 효과가 예상되며, SPN 시스템의 보강재로 사용되는 스파이럴 파이프(Spiral Pipe)의 경우 일반 쏘일네일링 시

스템의 보강재로 사용되는 이형철근(D29)에 비해 강성계수(EI)가 2.5배 정도 크다. 따라서 네일의 인발과괴시 SPN 시스템의 경우가 GSN 시스템에 비해 전단파괴면에서 유발되는 전단저항효과에 의한 지반의 수동저항응력을 감소시킬 수 있을 것으로 예상되며, 그라우팅 주입시 일정한 압력의 가압그라우팅 방식을 채택하여 일정한 주입압(5~10kg/cm²)으로 그라우팅하며 천공을 실시하므로 그라우트-흙 간의 주면마찰력도 우수할 뿐만 아니라 수압파쇄 현상도 방지할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서 개발한 SPN 시스템은 스파이럴 파이프 네일, 비트 및 간격재 등으로 구성되어 있으며, 개략적인 SPN 시스템의 단면은 그림 1과 같다.



(a) 대표단면



(b) 스파이럴 파이프 네일



(c) 토사용 비트(bit)

그림 1. SPN(Spiral Pipe Nailing) 시스템

3. SPN 시스템의 시공방법

본 SPN 시스템의 시공방법은 top-down방식으로서 그림 2의 순서와 같이 나타낼 수 있다. SPN 시스템은 스파이럴 파이프 네일(이하 SP 네일로 표기) 선단에 비트를 장

착함으로써, 천공, 네일체 삽입 및 그라우트 주입 작업이 동시에 이루어지므로 GSN 시스템에 비해 공기, 공비절감에 유리할 것으로 판단된다. SPN 시스템이 개발될 경우 예상되는 장점을 요약, 정리하면 표 1과 같다.

4. 현장인발시험을 통한 인발거동특성

본 연구에서는 SPN 시스템의 인발거동특성을 평가하기 위한 변위제어방식 현장인발시험이 시행되었다. 본 실험은 경기도 이천시 ○○부지조성공사 현장의 절토사면에서 실시되었으며, SP 네일 및 일반 쏘일네일(이하 GS 네일로 표기)의 인발거동특성을 보다 객관적으로 비교, 검토하기 위해 동일한 지층조건(풍화암)에서 현장인발시험을 실시하였다. SP 네일 및 GS 네일의 현장인발시험 방법 및 제원은 표 2와 같으며, 인발시험은 각각의 경우에 대하여 2회씩 시행하였다. 네일 인발시 하중전이효과를 살펴보기 위해, 네일 1m 간격마다 변형률계(strain gauge)를 상하면에 1개씩 네일 본당 각각 10개를 부착하였다. 본 연구에서 시행한 변위제어방식 현장인발시험의 인발속도는, 'Clouterre 연구보고서(1991)'에 소개된 변위제어방식의 현장인발시험 방법을 참고하여, 1mm/min(허용오차 ±10% 이내) 정도로 하였다. 또한 인발시험은 인발력이 최대치를 지나 감소하는 경향을 나타내거나 일정한 값에 수렴할 경우 종료하였다. 잔류하중이 나타나지 않는 경우에는 1mm변위에 대하여 1%이하의 하중증가가 있을 때 시험을 종료하였다. 네일 인발시 변형을 등은 자료수집기(UCAM-20PC)를 사용하였으며, 두부의 변위 측정을 위해 다이얼게이지(dial gauge)를 설치하였으며, 현장인발시험 결과는 그림 3 및 4와 같다.

그림 3에 나타난 비트 설치여부에 따른 최대인발력을 살펴보면, SP 네일에 비트를 설치했을 경우가 비트를 설치하지 않았을 경우에 비해 5% 정도 증가하는 것으로 평가되었다. 아울러 비트가 설치되지 않은 SP 네일의 최대인발력을 기준으로 네일인발시 유발된 변위량을 살펴보면, 비트가 설치된 경우가 비트가 설치되지 않았을 경우에 비해 10% 정도 감소하는 것으로 평가되었다.

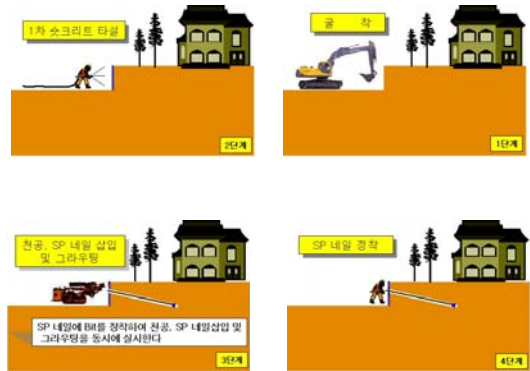


그림 2. SPN 시스템의 시공순서

표 1. SPN 시스템의 장점

시 공 성	경 제 성
1) 1차 슛크리트 타설 후 SP 네일 선단에 비트를 설치하여 자천공하는 방식이며, 천공과 동시에 그라우팅을 실시할 수 있으므로 시공속도가 빠르다.	1) SPN 시스템은 일반 쏘일네일링 시스템에 비해 네일 구조체는 다소 고가라고 할 수 있으나, 공기단축 네일 설치밀도 변경 등으로 인해 경제성 확보가 가능하다.
2) 사질토 지반 등의 공벽유지가 어려운 지반의 경우, 시멘트 그라우트와 주변지반이 교반되어 그라우트체 구근형성이 우수하다.	2) 천공 후 공벽유지가 가능한 지반의 경우에는 오거보링 방식으로 적용 가능하므로, 1회용 비트에 대한 비용을 절감할 수 있다.
3) 스파이럴 파이프 내부로 그라우트를 할 수 있으므로 그라우트 주입호스가 별도로 필요 없다.	

표 2. 현장인발시험 제원

구 분	비트 설치 여부	시험 방법	네일 길이 (m)	천공경 (mm)	대상 지반
Case 1	일반쏘일네일링	무	5	105	풍화암
Case 2	SPN 시스템	유			
Case 3	SPN 시스템	무			

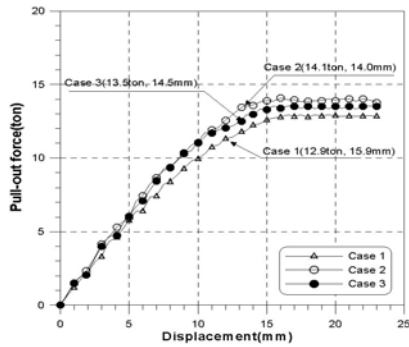


그림 3. 인발거동특성

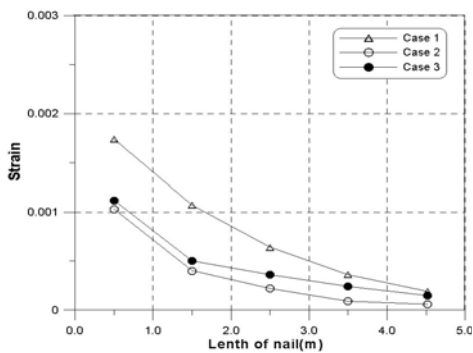


그림 4. 변형률-네일길이 관계도

또한 SP 네일 및 GS 네일의 인발거동특성을 비교, 분석해보면, 최대인발력의 경우 SP 네일의 경우가 GS 네일의 경우에 비해 7.0% 정도 증가하는 것으로 평가되었으며, 네일인발시 변위량의 경우 SP 네일의 경우가 GS 네일의 경우에 비해 18% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 그림 4에 나타난 네일 인발시 측정된 변형률 분포를 살

펴보면, 비트가 장착된 SP 네일의 경우가 비트가 설치되지 않은 SP 네일의 경우에 비해 다소 작게 평가되는 것으로 나타났다. 또한 비트가 장착된 SP 네일의 변형률분포 및 GS 네일의 변형률 분포 살펴보면, GS 네일의 경우에 비해 비트를 장착한 SP 네일의 경우 측정된 변형률은 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

5. 강성을 고려한 간편 시행쇄기법

본 연구에서는 SPN 시스템의 안정해석을 수행하기 위하여 중력식 옹벽에 작용하는 최대토압을 산정할 때 사용하는 시행쇄기법(trial wedge method)을 한계평형해석에 적용하였다. 쏘일네일링 해석을 위한 간편 시행쇄기법의 기본 가정은 다음과 같다.

- ① 쏘일네일링 보강토체의 파괴면은 원호가 아닌 직선형으로 가정하며, block으로 거동한다.
- ② 쏘일네일링 보강토체의 주된 저항력은 네일의 주면마찰력 또는 네일의 인장강도이다.
- ③ 네일에서 발휘되는 전단저항은 네일을 횡하중을 받는 말뚝으로 가정하여 계산한다.
- ④ 쏘일네일 보강토체의 전체 네일의 저항력은 네일의 균 효과를 무시하고 각 네일의 총 합력으로 산정한다.
- ⑤ 쏘일네일 보강토체의 힘의 평형에 관한 계산은 가상과 파괴면에 평행한 방향으로 계산된다.

본 안정해석에서는 예상과파괴면을 직선으로 가정하였으며(그림 5), 시행쇄기법을 도입한 한계평형해석기법을 토대로 안정성을 검토하는 기본식을 제시하면 식 (1)과 같다.

$$F.S = \min_{\theta=\beta}^{\theta=\beta} \left(\frac{-cH}{\sin\theta} + (W+Q) \cdot \cos\theta \cdot \tan\phi + \sum_{i=1}^n (T_i \cdot \cos(\theta+\alpha) + T_i \cdot \sin(\theta+\alpha) \cdot \tan\phi + S_i)}{(W+Q) \cdot \sin\theta} \right) \quad (1)$$

여기서, c : 흙의 점착력(t/m^2)
 ϕ : 흙의 내부마찰각($^\circ$)
 θ : 활동면과 저면이 이루는 각($^\circ$)
 W : 토체의 무게(ton)
 Q : 전면벽체의 무게(ton)

H : 사면의 높이(m)
 T_i : 네일의 극한 인발저항력(ton)
 S_i : 네일 하부면에서 발휘할 수 있는 흙의 수동저항력(ton)
 β : 사면의 경사각($^\circ$)
 α : 네일의 삽입각($^\circ$)

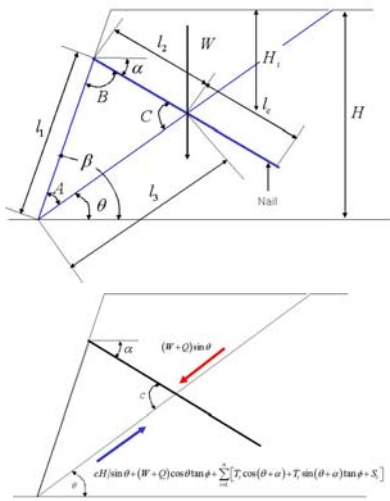


그림 5. 시행짜기법을 도입한 한계평형해석기법

여기서 간편 시행짜기법의 주된 저항인 네일의 인발저항력(T_i)의 결정은 다음 식 (2)와 같다.

$$T_i = \min \left(\frac{\pi \cdot d \cdot l_e \cdot (q_s + \gamma \cdot H_i \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi')}{S_h}, \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_y \right) \quad (2)$$

여기서, d : 네일의 직경(m)

l_e : 파괴면을 지나는 네일의 길이, 유효길이(m)

ϕ' : 네일과 흙의 마찰각($^\circ$)

q_s : 네일과 흙의 단위 주면마찰력(t/m^2)

γ : 흙의 단위중량(t/m^3)

σ_y : 철근의 항복인장강도(t/m^2)

S_h : 네일의 횡방향 설치간격(m)

네일의 강성을 고려하기 위하여 네일을 횡하중을 받는 말뚝과 유사하다는 개념으로 S_i 를 결정할 수 있으며, 보강재에서 발휘되는 전단력 및 휨모멘트는 보강재의 탄성 휨모멘트 방정식으로부터 흙을 일련의 탄소성 스프링으로 가정하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(schlosser, 1983).

$$EI \frac{dy^4}{dz^4} + K_s \cdot d \cdot y = 0 \quad (3)$$

여기서, E 는 네일의 탄성계수, I 는 네일의 단면2차모멘트, K_s 는 지반반력계수, y 는 네일의 측면변위, z 는 네일의 축방향 좌표, d 는 네일의 직경을 나타낸다. 식 (3)을 살펴보면 y 는 네일의 I 값에 반비례 관계에 있는 것을 알 수 있다. 식 (3)의 방정식의 해를 구하기 위해 l_0 (전이길이: transfer length)의 개념을 도입하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$l_0 = 4 \sqrt{\frac{4EI}{K_s \cdot d}} \quad (4)$$

따라서, 네일 측면에 수직으로 작용하는 힘 P_i (식 (5))에 의해 유발되는 최대 모멘트(M_{imax})는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(schlosser, 1983).

$$P_i = \left(\frac{(W+Q) \sin \theta - \left(\frac{cH}{\sin \theta} + (W+Q) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi \right)}{n_v} \right) \quad (5)$$

$\cdot S_h \cdot \sin C \cdot w$

여기서, n_v : 쏘일네일의 종방향 설치개수(EA)

C : 네일과 파괴면이 이루는 각

w : 토체의 횡방향 폭(m)

$l_e \geq 2l_0$ 일 경우, 네일측면에 작용하는 흙의 수동저항력 및 저항력은 다음 식 (8) 및 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} M_{imax} &= 0.32 \cdot P_i \cdot l_0 = 0.32 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot d \cdot l_0 \cdot \sigma_b \right) \cdot l_0 \\ &= 0.16 \cdot \sigma_b \cdot d \cdot l_0^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$M_{imax} \leq M_{max}^e = \sigma_y \cdot \frac{I}{d/2} = \sigma_y \cdot \frac{\pi \cdot d^4/64}{d/2} = \sigma_y \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (7)$$

$$\sigma_b = \frac{M_{imax}}{0.16 \cdot d \cdot l_0^2} \leq Pl \quad (8)$$

$$\therefore P_i \geq S_i = \frac{\sigma_b \cdot d \cdot l_0}{2} \quad (9)$$

여기서 M_{max}^e 은 네일의 탄성최대모멘트($t \cdot m$), Pl 은

한계압력(t/m^2)이며, 흙의 수동저항응력(σ_b)이 한계압력을 초과하게 되면, 소성화 되는 것으로 가정하여, $\sigma_b = Pl$ 의 관계가 성립된다. 따라서 네일의 변위에 저항하는 수동저항력 S_i 는 다음 식 (10)과 같이 정의 할 수 있다.

$$S_i = \min\left(\frac{a \cdot \tau_s}{S_h}, \frac{\sigma_b \cdot d \cdot l_0}{2}\right) \quad (10)$$

여기서, a : 네일의 단면적
 τ_s : 네일의 전단강도

만약 $l_e < 2l_0$ 경우에는, 네일이 강체로 거동하여, P_i 는 S_i 로 전이되어 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{1}{4} \cdot E_s \cdot l_e \cdot y_s \\ &= \frac{1}{4} \cdot E_s \cdot l_e \cdot \left(\frac{\sigma_b \cdot d}{E_s}\right) \\ &= \frac{1}{4} \cdot l_e \cdot d \cdot \sigma_b \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, y_s 는 지반의 수직변위, E_s 는 지반의 탄성계수를 나타내며, 따라서 힘 P_i (식 (11))에 의해 유발되는 최대 모멘트(M_{imax}), 네일측면에 작용하는 흙의 수동저항응력(σ_b) 및 저항력(S_i)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{imax} &= \frac{4}{27} \cdot P_i \cdot l_e \\ &= \frac{E_s}{27} \cdot l_e^2 \cdot y_s \\ &= \frac{l_e^2}{27} \cdot \sigma_b \cdot d \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_i \geq S_i = \frac{\sigma_b \cdot d \cdot l_e}{4}, \quad (\sigma_b \leq Pl) \quad (13)$$

$$S_i = \min\left(\frac{a \cdot \tau_s}{S_h}, \frac{\sigma_b \cdot d \cdot l_e}{4}\right) \quad (14)$$

6. SPN 시스템의 안정성 검토

6.1 한계평형해석 및 설계변수에 따른 안정성검토

본 연구에서 제안한 간편 시행쇄기법의 경우, 기본적으로 French method와 유사하며 해석개념으로는 German method(파괴면 형상이 Bilinear이다)와는 약간 다른 직선형의 한계 힘평형방식이라고 할 수 있다. 다시 말해서, 가상활동면을 직선으로 가정하여 계산을 간편화함으로써 변수분석을 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다.

본 장에서는 대표단면에 GSN 시스템 및 SPN 시스템을 각각 적용하여, 간편 시행쇄기법 및 TALREN 97 프로그램을 이용하여 보강재의 강성을 고려한 한계평형해석을 수행하였다. 또한, 본 안정성 검토시에는 사면경사 및 쏘일네일링 보강토체의 보강정도를 결정하는 무차원 변수인 길이비(R_L , length ratio)와 정착비(R_B , bond ratio)를 변화시키면서 네일의 인장력 및 휨강성을 고려한 경우에 대한 안정성을 분석하였다. 길이비 및 정착비에 대한 정의는 식 (15)와 같다.

$$R_L = \frac{l}{H}, \quad R_B = \frac{d \cdot l}{S_h \cdot S_v} \quad (15)$$

여기서, l : 쏘일네일의 길이(m)

S_v : 쏘일네일의 연직방향 설치간격(m)

쏘일네일링 보강에 있어서 일반적으로 적용되고 있는 길이비와 정착비의 범위는 그라우트 쏘일네일링 경우, $R_L = 0.5 \sim 0.8$, $R_B = 0.3 \sim 0.6$ 정도이다. 안정해석시 적용한 대표단면, 지반강도정수 및 보강재의 특성치는 표 3 및 4와 같고 4장에서 수행한 현장인발시험을 기초로 하여 보강재의 특성치를 결정하였다.

표 3. 안정해석단면에 적용한 지반강도정수 및 대표단면
 (E와 v는 각각 지반의 탄성계수와 프와송비이다.)

구 분	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	K_s (t/m ³)	E (t/m ²)	ν	Pl (t/m ²)	w (m)
풍 화 토	1.85	0.5	30	2000	3000	0.3	50	0.3
대표단면	사면경사 : 90°, 사면높이 : 10.5m.							

표 4. 안정해석시 적용한 보강재의 특성치

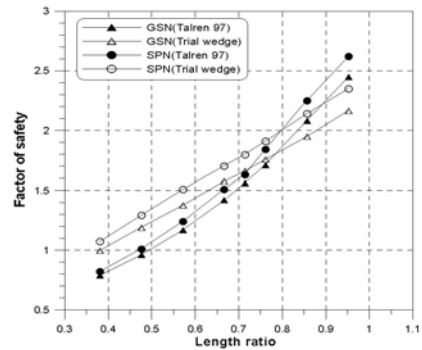
보강재	σ_y (kg/cm ²)	a (cm)	q_s (t/m ²)	ϕ' (°)	I (mm ⁴)	E (kg/mm ²)
이형철근 (D29)	4000	6.424	4.8	20	32842	20400
스파이럴 파이프	4440	6.132	5.3	25	81346	20400
비 고	네일길이 : 7.5m, 수평간격 : 1.5m, 수직간격 : 1.5m, 네일설치각도 : 15°					

6.2 길이비 및 정착비에 따른 영향

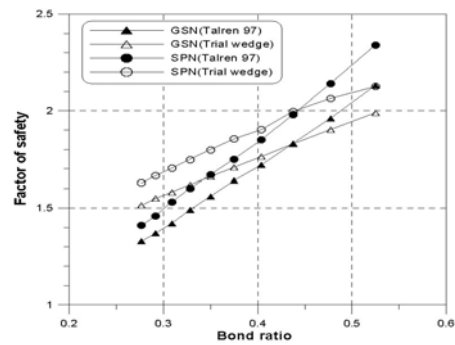
네일의 길이비에 따른 영향을 살펴보기 위해 안정해석단면에 네일의 길이를 변화시키면서 안정성을 검토한 결과(그림 6(a))를 살펴보면, SPN 시스템이 GSN 시스템에 비해 인장강도와 강성측면에서 우수하게 작용하여 SPN 시스템의 전체 안전율이 GSN 시스템의 전체안전율에 비해, TALREN 97 해석결과와 비교하여 6.5% 정도, 한편 시행착기법을 사용한 해석결과와 비교하여 8.7% 정도 크게 평가되었다.

또한 네일의 정착비에 따른 영향을 살펴보기 위해 안정해석단면에 네일의 수평간격을 변화시키면서 안정성을 분석한 결과(그림 6(b))를 살펴보면, SPN 시스템이 GSN 시스템에 비해 인장강도와 강성측면에서 우수하게 작용하여 SPN 시스템의 전체안전율이 GSN 시스템의 전체안전율에 비해, TALREN 97 해석결과와 비교하여 7.8% 정도, 한편 시행착기법을 사용한 해석결과와 비교하여 8.0% 정도 크게 평가되었다.

아울러 SPN 시스템 보강재의 강성거동에 의한 변위감소 효과를 간접적으로 확인하기 위해, 한편 시행착기법을 이용하여 네일의 정착비에 따른 지반의 수동저항응력(그림 7)을 살펴보았다. 한편 시행착기법으로 산정한 지반의 수동저항응력을 살펴보면, SPN 시스템의 경우가 GSN 시스템의 경우에 비해 전체적으로 평균 6.8% 정도 작게 평가되었다. 따라서 SPN 시스템을 적용함으로써 파괴효능의 활동력에 의해 유발될 수 있는 수직 및 수평 변위량의 경우, GSN 시스템에 비해 상당부분 억제될 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 네일 길이비-안전율 평가



(b) 네일 정착비-안전율 평가

그림 6. 한편 시행착기법 및 TALREN 97 해석결과 비교

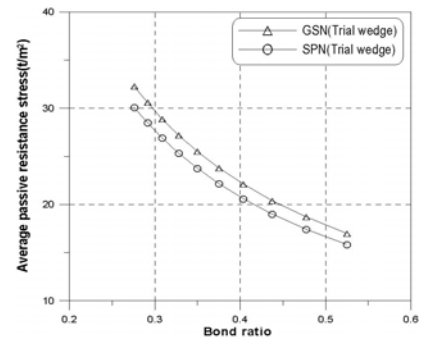


그림 7. 네일 정착비-평균 수동저항응력 평가

7. 수치해석에 의한 변위예측

본 연구에서는 SPN 시스템의 SP 네일의 강성에 따른 효과를 GSN 시스템과 비교, 검토하기 위해 FLAC^{2D} Ver. 3.30 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 네일의 강성을 고려하기 위해, 네일을 structural element 중 인장력과 마찰력만 고려하는 cable element

로 적용하는 대신, 인장력, 마찰력 및 휨강성을 모두 고려할 수 있는 pile element로, 슛크리트 전면판은 beam element로 모델링 하였으며, 지반은 Mohr - Coulomb Failure Criterion을 적용하였다. 유한차분해석시 사용된 해석격자망 및 structural element의 구성은 그림 8과 같으며, 지반강도정수 및 보강재의 특성치는 각각 표 3 및 4에 제시되어 있다.

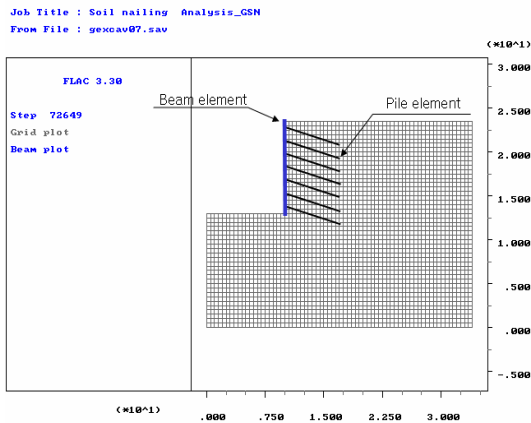


그림 8. 적용된 해석격자망 및 structural element의 구성

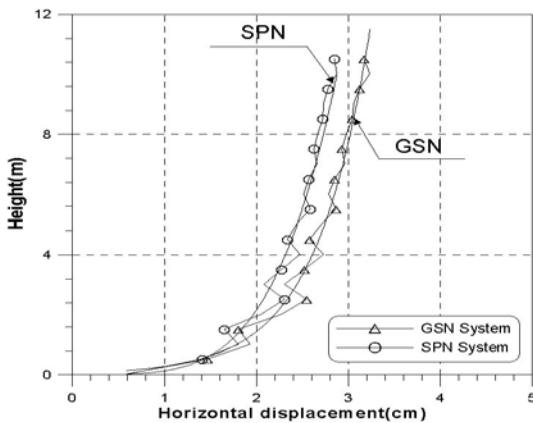


그림 9. 각 시스템에서의 벽체 횡방향 변위 비교

수치해석결과(그림 9)의 전면벽체의 횡방향 변위를 살펴보면, SPN 시스템이 GSN 시스템에 비해서 전면벽체의 횡방향 변위가 10% 정도 감소하는 것으로 평가되었다. 이는 SPN 시스템의 SP 네일의 강성계수 (EI)가 이형철근에 비해 크므로, 네일하부를 지지하고 있는 수동저항응력이 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 수동저항응력의 저감 효과로 인해 네일 변형이 작게 유발되어 변위가 감소한 것

으로 판단된다.

8. 결론 및 제언

본 연구를 통해 얻어낸 결과 중 중요부분을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) SP 네일 및 GS 네일의 인발거동특성을 비교 및 분석해 본 결과(그림 3 참조), SP 네일의 최대인발력이 일반 네일의 최대인발력에 비해 7.0% 정도 증가하는 것으로 평가되었으며, 네일 인발시 변위량의 경우 SP 네일의 경우가 일반 네일의 경우에 비해 18% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 네일 인발시 측정된 변형률 분포(그림 4 참조)를 살펴보면, 비트가 장착된 SP 네일의 경우가 비트가 설치되지 않은 SP 네일의 경우에 비해 다소 작게 평가되는 것으로 나타났다. 또한 비트가 장착된 SP 네일 및 GS 네일의 변형률 분포를 살펴보면, 비트를 장착한 SP 네일의 경우가 GS 네일의 경우에 비해, 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 네일의 길이비에 따른 영향을 살펴보기 위해 안정해석 단면에 네일의 길이를 변화시키면서 안정성을 검토한 결과(그림 6(a) 참조)를 살펴보면, SPN 시스템이 GSN 시스템에 비해 인장강도와 강성측면에서 우수하게 작용하여 SPN 시스템의 전체안전율이 GSN 시스템의 전체안전율에 비해, TALREN 97 해석결과의 경우 6.5% 정도, 간편 시행쇄기법을 사용한 해석결과의 경우 8.7% 정도 크게 평가되었다.
- (4) 네일의 정착비에 따른 영향을 살펴보기 위해 안정해석 단면에 네일의 수평간격을 변화시키면서 안정성을 분석한 결과(그림 6(b) 참조)를 살펴보면, SPN 시스템이 GSN 시스템에 비해 인장강도와 강성측면에서 우수하게 작용하여 SPN 시스템의 전체안전율이 GSN 시스템의 전체안전율에 비해, TALREN 97 해석결과의 경우 7.8% 정도, 간편 시행쇄기법을 사용한 해석결과의 경우 8.0% 정도 크게 평가되었다.
- (5) 간편 시행쇄기법을 이용하여 지반의 수동저항응력을 살펴본 결과(그림 7 참조), SPN 시스템의 경우가 GSN 시스템의 경우에 비해 전체적으로 수동저항응

력이 평균 6.8% 정도 작게 평가되었다. 따라서 SPN 시스템을 적용함으로써, 파괴흙썰기의 활동력에 의해 유발될 수 있는 수직 및 수평변위의 경우, GSN 시스템에 비해 상당부분 억제될 수 있을 것으로 기대된다.

- (6) 유한차분 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D} Ver. 3.30 프로그램을 이용하여 대표단면에 대한 전면벽체의 횡방향 변위를 예측한 결과(그림 9 참조), SPN 시스템이 GSN 시스템에 비해서 전면벽체의 횡방향 변위가 최대 10% 정도 감소하였으며, 전반적으로 9.6%정도 감소하는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 2004년 5월 3일)

참 고 문 헌

1. 김홍택(2000), 쏘일네일링의 원리 및 지침, 평문각.
2. 김홍택(2001), Soil Nailing 공법의 과거, 현재, 미래, 평문각.
3. 김홍택, 정성필, 박시삼, 박성철(2003), 스파이럴 파이프 네일링 시스템의 적용성에 관한 실험적 고찰, 대한토목학회 2003년 정기 학술대회 논문집, pp. 3856~3859.
4. 김홍택, 정성필, 박시삼, 박성철(2003). 스파이럴 파이프 네일링 시스템의 적용성 및 휨강성을 고려한 안정성에 관한 고찰, 한국지반환경공학회 2003 학술발표회 논문집, pp. 241~248.
5. 김홍택, 정성필, 박시삼, 박성철(2003), 간편 시행썰기법을 이용한 스파이럴 파이프 네일링 시스템의 안정해석 및 적용성에 관한 연구, 한국지반공학회 2003 봄학술발표회 논문집, pp. 651~658.
6. 사단법인 대한토목학회(1996), 건설교통부제정 도로교 표준시방서(설계/시공 및 유지관리편).
7. 전찬우(1999), 변형률 썰기모형을 이용한 지반-네일의 안정해석에 관한 연구, 석사학위 논문, 홍익대학교.
8. BLONDEAU, F., CHRISTIANSEN, M., GUILLOUX, A., and SCHLOSSER, F. (1984), TALRAN: Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée, Proc. Int. Conference. In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, 219-224. TALREN: Design method of reinforced soil structures.
9. Braja M. Das(1999), Principles of Foundation Engineering, 4th edition International Thompson Publishing Company.
10. FHWA(1998), Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls, Publication No. FHWA-SA-96_069.
11. Ilan Juran, George Baudrand, and Khalid Farrag etc.(1990), Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structures, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 1, January 1990, pp. 54-72.
13. Itasca Consulting Group Inc(2000). FLAC2D Ver. 3.30 Program manual.
14. R. A. Jewell and M. J. Pedley(1992), Analysis for Soil Reinforcement with Bending Stiffness. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No. 10, October 1992, pp. 1505-1528.
15. Schlosser, F.(1993), Recommendations Clouterre, 1991 (English Translation), Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026.
16. Thomas C. Sheanhan and Carlton L. Ho(2003), Simplified Trial Wedge Method For Soil Nailed Wall Analysis, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 2, February 2003, pp. 117-124.