

수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링 공법의 기초연구

A Basic Study on Upward Soil Nailing Combined Horizontal Drainage

김 흥 택¹⁾ · 이 중 재²⁾ · 정 중 민³⁾ · 최 근 혁⁴⁾ · 이 인[†]

Kim, Hongtaek · Lee, Jungjae · Chung, Jongmin · Choi, Geunhyeok · Lee, In

ABSTRACT : In the early 1990s, soil nailing was first introduced as method of reinforcement for the slope stability and ground excavation, and as its application was increased the improved soil nailing was also developed. Most recently used for grout soil nailing greatly improve the methods and techniques for self-improvement techniques are classified as soil nailing. As the representative for the grout pressure method to improve the joint method pressure grouting and improved method for the self-drilled soil nailing, removable soil nailing, upward soil nailing combined with horizontal drainage system. This paper is to compare upward soil nailing combined with horizontal drainage system with downward direction of the soil nailing. In order to study the limit equilibrium slope stability analysis and comparison with factor of safage, excavation for the vertical displacement for comparison with continuous analysis. According to this study, safage factor is decreased considerably using limit equilibrium analysis and makes no odds for the horizontal displacement when soil nail was installed upward.

Keywords : Upward Soil nailing, Slope Stability, Horizontal Displacement, Safety Factor

요 지 : 1990년대 초 쏘일네일링 공법이 국내에 처음 도입된 이후 쏘일네일링 공법은 사면안정 및 지반굴착의 보강공법으로 널리 쓰이고 있으며, 쏘일네일링 공법의 적용이 확대됨에 따라 초기의 쏘일네일링 공법에 대한 여러 가지 개선된 쏘일네일링 공법도 발달하였다. 최근에 많이 쓰이는 쏘일네일 공법들은 크게 그라우트에 대한 개선 공법과 쏘일네일 자체에 대한 개선 공법으로 분류된다. 그라우트에 대한 개선공법으로는 대표적으로 가압그라우팅 공법을 들 수 있으며, 쏘일네일 자체에 대한 개선공법으로는 자천공 쏘일네일 공법, 제거식 쏘일네일 공법 등과 더불어 본 연구의 대상이 되는 수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링 공법이 있다. 본 논문에서는 수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일 공법에 대한 연구로 일반적인 쏘일네일 공법과의 비교 연구를 수행하였다. 연구 순서로는 먼저 사면안정에 대하여 한계평형 해석을 이용한 안전율 비교를 하였고, 다음으로 연직 굴착에 대하여 연속체 해석을 통한 변위에 대한 비교를 하였다. 연구결과 쏘일네일을 상향으로 설치할 경우 한계평형 해석에서의 안전율은 상당량이 감소하였고, 수평변위에 대한 연구결과에서는 큰 차이가 없었다.

주요어 : 상향식 쏘일네일링, 사면안정, 수평변위, 안전율

1. 서 론

사면안정이나 연직굴착의 보강공법인 쏘일네일 공법은 1990년대 국내 도입 후 사용빈도와 범위가 증가하여 현재는 일반적인 지반보강공법으로 널리 쓰이고 있다. 쏘일네일은 쏘일네일, 그라우트체, 전면벽으로 구성되며 시공순서는 굴착, 천공, 쏘일네일 설치, 그라우트 형성, 전면벽 설치, 굴착의 반복이며 사이클당 1m정도를 굴착해가는 top-down 공법이다. 쏘일네일은 주로 굴착면에 연직방향 또는 선단보다 두부가 높은 하향으로 설치되는데 이는 지반의 활동에 대한 쏘일네일의 저항을 증가시키며, 그라우트의 형성이 용이한 장점에서 비롯된다. 반대로 쏘일네일을 선단이 두부보다 높

은 상향으로 설치하였을 경우에는 중력의 영향으로 인하여 추가적인 장비 없이는 쏘일네일의 거치와 그라우트의 형성에 어려움이 따른다. 그러나 최근 제시된 수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링 공법은 상향으로 설치되는 쏘일네일에 수평배수공을 더하여 일반적인 쏘일네일링 공법에서 수평배수공을 설치하기 위한 공정이 생략되며 압력식 그라우팅을 적용하여 상향으로 설치될 때의 문제점인 그라우트체 형성의 어려움도 개선하였다. 본 연구에서는 상향식 쏘일네일로 제시된 수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링 공법에 대하여 일반적인 쏘일네일링 공법과 비교하여 안전율 및 수평변위에 대한 연구를 수행하였다.

1) 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수

2) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정

3) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정

4) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정

† 정희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : leein10@hotmail.com)

2. 이론적 배경

그림 1은 한계평형 해석에서의 쏘일네일의 보강원리를 나타낸 모식도이다. 가상파괴면의 자중이 작용력으로 작용하며 지반의 전단강도와 쏘일네일링의 인발저항력이 저항력으로 작용한다.

쏘일네일이 보강된 사면의 안전율은 간단하게 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$F \cdot S = \frac{\text{저항력} + \text{보강력}}{\text{작용력}} \quad (1)$$

쏘일네일은 앵커와 다르게 설치시 네일자체에 Prestress를 가하지 않기 때문에 지반의 변형이 발생하는 시점부터 보강효과를 발휘하게 된다. 이러한 이유로 쏘일네일은 수동보강재로 분류되며 식 (1)은 수동보강재에 대한 식이다. 반면에 주동보강재에 대한 식은 식 (2)로 표현된다.

$$F \cdot S = \frac{\text{저항력}}{\text{작용력} - \text{보강력}} \quad (2)$$

식 (1)에서 보강력은 쏘일네일의 저항력이며 실질적인 저항력은 파괴면 바깥쪽에 위치하는 네일의 유효길이와 쏘일

네일의 항복강도 중 작은 값으로 결정된다(김홍택, 1998).

$$\text{쏘일네일의 저항력}(P) = \min(TR, Q_s l_e \pi D) \quad (3)$$

여기서, TR : 쏘일네일의 항복강도(kN/m^2), Q_s : 지반-그라우트의 마찰력(kN), l_e : 쏘일네일의 유효길이(가상파괴면 바깥쪽 쏘일네일의 길이, m), D : 천공경(m)

식 (2)에서 알 수 있듯이 쏘일네일의 저항력은 가상파괴면 바깥쪽 쏘일네일의 길이만큼 발휘되는 네일의 마찰저항력과 쏘일네일 자체의 항복강도 중 작은 값이 된다. Guler, E. and Bozhurt, C. F.(2004)의 연구에 따르면 한계평형 해석에서 쏘일네일은 상향으로 설치하였을 경우 약 20%의 안전율이 증가된다고 알려져 있으며, 해당 연구에 사용된 안전율 식은 식 (4)로 기술되어 있다.

$$F \cdot S = \frac{c \frac{H}{\sin\theta} + \frac{H^2}{2 \tan\theta} \gamma \cos\theta \tan\phi + T \sin\beta \tan\phi}{\frac{H^2}{2 \tan\theta} \gamma \sin\theta - T \cos\beta} \quad (4)$$

여기서, H : 벽체높이, c : 지반의 점착력
 ϕ : 지반의 내부마찰각

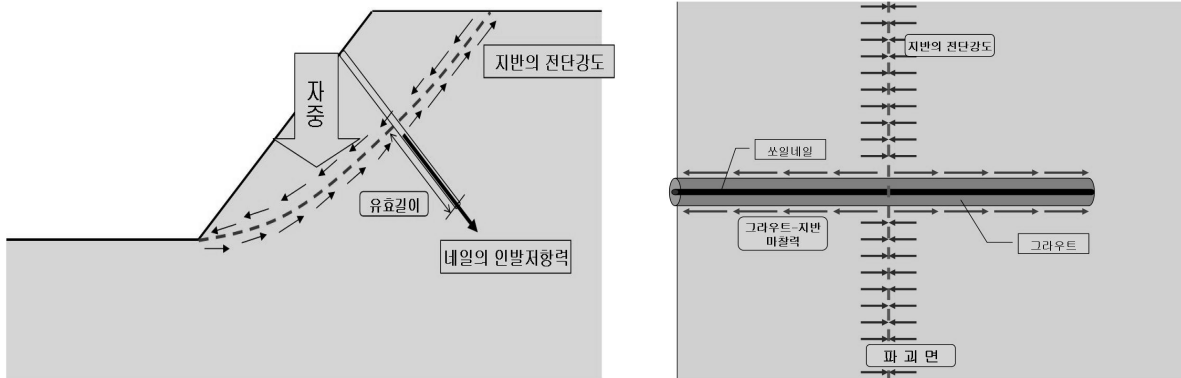


그림 1. 한계평형 해석에서의 쏘일네일의 보강원리



(a) 상향으로 설치된 주동보강재

(b) 하향으로 설치된 주동보강재

그림 2. 설치각에 따른 주동보강재의 저항

β : 파괴면과 쓰일네일이 이루는 각

T : 쓰일네일의 항복강도

식 (4)는 식 (2)와 같은 주동보강재에 적용되는 식이며 이때, 쓰일네일을 상향으로 설치하였을 경우 안전율이 증가한다. 그 이유는 그림 2와 같이 상향으로 설치되었을 경우 주동보강재의 보강력이 사면의 활동에 더 효율적으로 작용하기 때문이다.

하지만, 그림 2에서 알 수 있듯이 쓰일네일의 유효길이(그림 1 참조)는 쓰일네일을 상향식으로 설치하였을 경우에 하향으로 설치하였을 경우 보다 짧아짐을 알 수 있다. 쓰일네일의 설치각도에 따른 사면안전율의 변화에 대하여 3절에서 분석하였다.

3. 쓰일네일의 설치각에 따른 유효길이의 감소

쓰일네일의 저항력은 쓰일네일의 항복강도와 쓰일네일과 지반사이의 마찰력에서 기인한다. 한계평형 해석에서 쓰일네일과 지반의 마찰력은 파괴면 바깥쪽의 쓰일네일의 길에와 비례하며 이를 유효길이라 한다. 쓰일네일의 설치각이 변할수록 쓰일네일의 유효길이가 변하므로 본절에서는 설치각과 유효길이의 줄음량과의 관계를 토대로 줄어드는 쓰일네일의 설치각과 그에 따른 마찰저항력의 차이에 관하여 서술하였다. 분석을 위한 토체파괴형태는 직선파괴로 가정하였다. 같은 위치에 대하여 쓰일네일의 설치각의 변화에 따른 유효길이의 감소량에 대하여 분석하였다. 그림 3은 분석이 적용된 변수이다.

해석을 위하여 원점(점 O)을 쓰일네일의 두부로 가정하고 쓰일네일의 직선식과 파괴면의 직선식을 구하여 두 직선의 교점(점 A)을 이용하여 유효길이의 줄음량(l')을 판단하였다. 파괴면의 직선식은 식 (5)로, 쓰일네일의 직선식은 식 (6)으로 각각 표시된다. 이를 이용하여 구한 교점의 좌표는 식 (7)이며, 이 교점의 원점으로 부터의 길이를 이용하여 유효길이의 줄음량(l')을 식 (8)에 나타내었다.

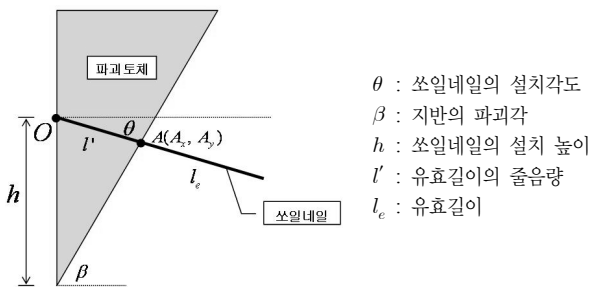


그림 3. 쓰일네일의 인발력 저하량 유도를 위한 변수

$$y = \tan\beta \cdot x - h \quad (5)$$

$$y = \tan\theta \cdot x \quad (6)$$

$$A = \left(\frac{h}{\tan\beta - \tan\theta}, \frac{\tan\theta h}{\tan\beta - \tan\theta} \right) \quad (7)$$

$$l' = h \cdot \frac{\cos\beta}{\sin(\beta - \theta)} \quad (8)$$

지반을 마찰이 없는 사질토 지반이라 가정하고, 흙의 상태를 Rankine의 주동상태라 가정하면 흙의 파괴각(β)은 $45 + \phi/2$ 이다. 이를 식 (8)에 대입하면 식 (9)와 같이 내부마찰각에 대한 식이 유도된다.

$$l' = h \cdot \frac{\cos(45 + \frac{\phi}{2})}{\sin(45 + \frac{\phi}{2} - \theta)} \quad (9)$$

식 (9)에 본 연구의 주 비교 대상인 쓰일네일링 설치각도 상향 5° 와 하향 15° 를 대입하여 각각의 유효길이 줄음량을 l'_5, l'_{-15} 라 하면 그 차이는 상향 5° 쓰일네일과 하향 15° 쓰일네일의 유효길이의 줄음량의 차이이다. 그림 4는 $l'_5 - l'_{-15}$ 와 h 의 계수를 지반의 내부마찰각에 따라 도시하여 선형보간한 그림이다.

그림 4의 결과로 얻어진 보간식을 이용하여 구한 상향 5° 쓰일네일과 하향 15° 쓰일네일의 유효길이의 줄음량의 차이는 식 (10)과 같다.

$$l'_5 - l'_{-15} = (-0.01\phi + 0.43) \cdot h \quad (10)$$

식 (9)와 식 (3)을 이용하면 상향 5° 쓰일네일과 하향 15° 쓰일네일의 설치 위치별 인발력 저하는 식 (11)로 나타난다.

$$\Delta P = Q_s \pi D (-0.01\phi + 0.43) h \quad (11)$$

또한 쓰일네일의 인발시 지반과 그라우트 경계의 거동은

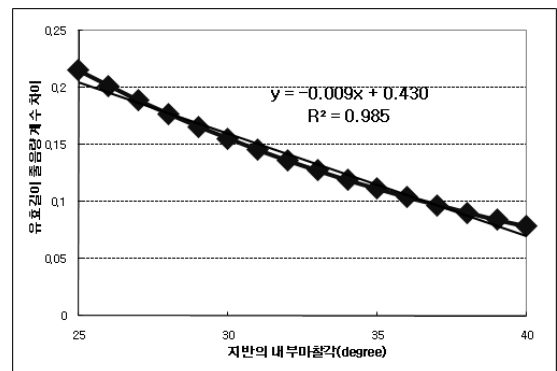


그림 4. 설치각 하향 15° 와 상향 5° 에서의 유효길이 줄음량 계수(변수 : 굴착깊이)

상대적으로 강도가 작은 지반의 강도에 의해 결정되므로 Q_s 를 지반의 강도(본 연구에서는 점착력이 없는 사질토를 대상으로 하였다)로 치환하고 전체굴착 깊이를 H 라 하면 식 (11)은 식 (12)와 같다. 이때 쏘일네일의 직경은 일반적으로 쓰이는 H29의 제원을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sigma' \pi D(-0.01\phi + 0.43)h \\ &= 0.09\gamma \tan\phi(-0.01\phi + 0.43)(H-h)h \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 γ 는 흙의 단위중량이다. 본 연구의 대상이 되는 사질토 지반의 단위중량은 $17 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ 의 범위이며, 사질토의 내부마찰각은 $25 \sim 30^\circ$ 범위이므로 식 (12)는 사질토 지반에서 식 (13)으로 정리된다.

$$\Delta P = 0.19 \sim 0.20\gamma(H-h)h \approx 0.2\gamma(H-h)h \quad (13)$$

식 (13)은 상향 5° 쏘일네일과 하향 15° 쏘일네일의 인발력의 차이이다. 일반적으로 쏘일네일은 설치심도가 깊을수록 (h 가 작을수록) 충분한 유효길이를 가지므로 임의의 깊이 이상에 설치된 쏘일네일은 식 (13)의 인발력 차이가 보강효과에 영향을 미치지 못한다. 그러므로 식 (13)이 적용되는 쏘일네일의 한계 높이를 산출하여 그 이상의 쏘일네일에 적용을 하여야 한다. 식 (13)이 적용되는 쏘일네일의 한계 높이를 구하기 위해 쏘일네일의 인발강도가 항복강도보다 클 조건은 식 (3)과 식 (13)을 이용하여 식 (14)로 유도된다.

$$\begin{aligned} l_e \pi D Q_s &> \frac{\pi D^2}{4} \sigma_y = (l - l'_5) \pi D Q > \frac{\pi D^2}{4} \sigma_y \\ l - l'_5 &< \frac{\pi D^2}{4\pi D Q_s} \sigma_y \end{aligned} \quad (14)$$

그림 4를 선형보간하여 식 (10)을 구하는 방법으로 식 (9)를 선형보간하면 상향 5° 로 설치된 쏘일네일의 유효길이 줄임량은 식 (15)로 표시된다.

$$l'_5 = (-0.02\phi + 1.35)h \quad (15)$$

식 (14)에 식 (15)와 식 (12)에 쓰였던 Q_s , 쏘일네일의 규격(H29)을 대입하여 정리하면 식 (16)이 유도된다.

$$(kh - l)(h - H) > 47.59k + 4.54\gamma - 15.90 \quad (16)$$

여기서, $k = -0.02\phi + 1.35$

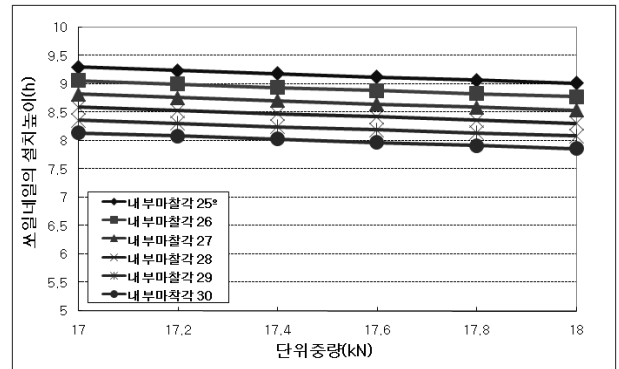
식 (16)에 선형보간을 이용하여 풀면 식 (17)이 된다.

$$h < 0.28\gamma + (17.53 - 0.097\phi) \cdot H - 0.017\phi + 0.342 \quad (17)$$

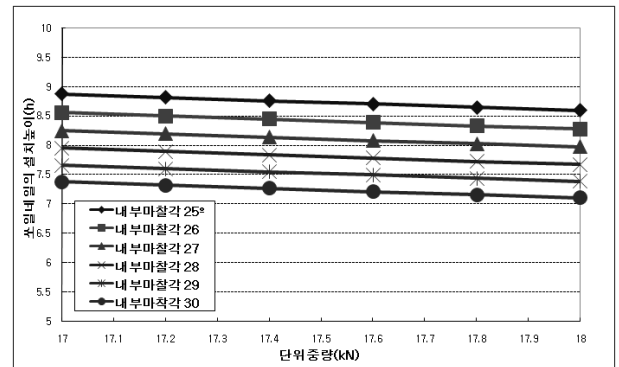
식 (17)을 만족하는 h 의 범위는 사질토에서 쏘일네일의 길이가 굴착깊이 H 와 같은 경우에 상향 5° 로 쏘일네일을 설

치한 경우와 하향 15° 로 쏘일네일을 설치한 경우의 쏘일네일의 인발력의 차이가 없는 설치높이가 된다. 식 (17)을 변수 분석한 결과 설치높이 h 를 만족하는 최소 굴착고(H)는 10m이다. 그림 5는 굴착깊이별 h 의 분포를 나타낸다.

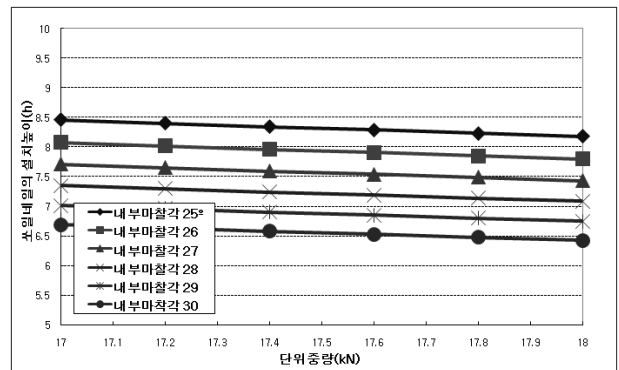
식 (16)에서 인발력 저하가 없는 쏘일네일의 설치 높이 h 는 흙의 단위중량보다 굴착깊이와 지반강도의 영향이 크다. 굴착고가 증가함에 따라 쏘일네일의 길이가 증가하고 쏘일네일이 설치된 지반의 유효응력이 증가하며 지반의 강도는 쏘일네일의 마찰저항에 비례하기 때문이다. 식 (17)을 등식으로 놓고 풀이했을 때의 h 를 한계높이 h_c 라 하면



굴착깊이 10m



굴착깊이 15m



굴착깊이 20m

그림 5. 설치각 하향 15° 와 상향 5° 의 쏘일네일의 인발력 차이가 없는 쏘일네일의 설치 높이

$h > h_c$ 인 경우에 식 (13)만큼의 인발력의 감소가 발생한다.

4. 분석 및 고찰

4.1 한계평형 해석에 의한 쏘일네일의 설치각에 따른 사면의 안전을 변화

쏘일네일의 설치각에 따른 안전율의 변화를 살펴보기 위하여 3절에 설명된 해석제원으로 쏘일네일의 설치각을 하향 15°~상향 15° 범위에서 5°간격으로 달리하여 한계평형 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사면 안정성 검토를 위한 대표 단면은 그림 6과 같이 선정하였다. 사면고는 6m이며 사면구배는 1:1.2로 적용하였다.

표 1. 해석에 적용된 지반강도정수

구 분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
풍화토	18	5	28

지반조건은 일반적으로 쏘일네일이 설치되는 풍화토 조건(C-φ Soil)으로 해석하였으며 해석시 사면의 표면파괴를 방지하기 위하여 점착력을 5.0kPa으로 설정하였다.

쏘일네일의 제원은 일반적으로 사용되는 D29이며, 천공경은 105mm이다.

3절의 해석조건으로 수행된 한계평형 해석결과를 그림 7~9에 나타내었다. 그림 7은 일반상태이며 그림 8은 상재하중이 존재할 때의 해석결과이다.

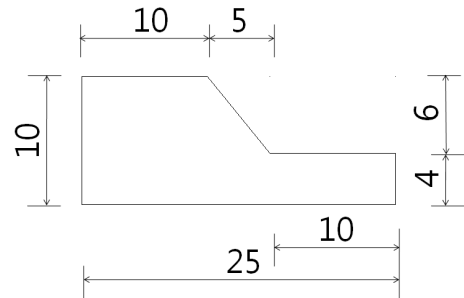
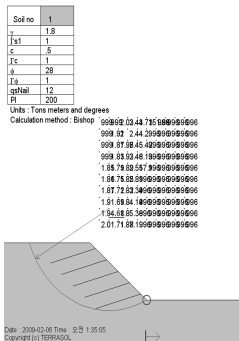


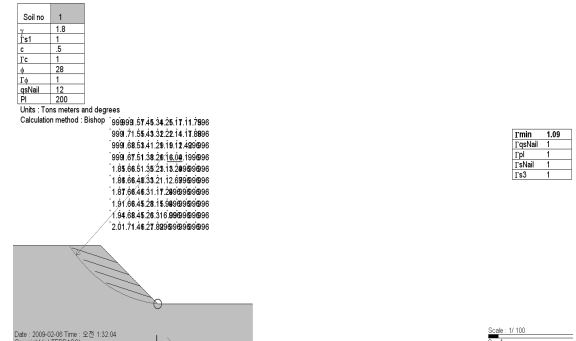
그림 6. 한계평형 해석단면(단위 : m)

표 2. 해석에 적용된 쏘일네일 제원

수평간격 (m)	수직간격 (m)	네일길이 (m)	네일직경 (mm)	천공직경 (mm)	탄성계수 (MPa)
1	2	5	29	105	210000

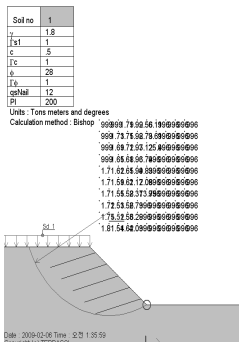


(a) 하향 15°시 안전율(Fs = 1.68)

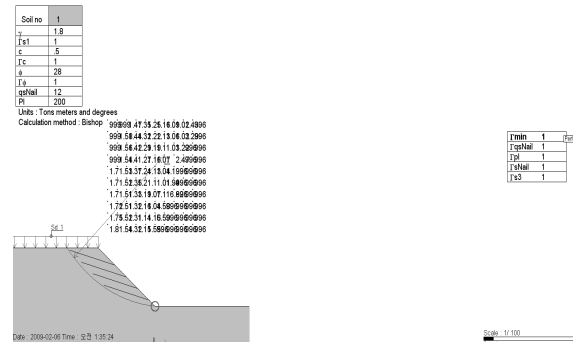


(b) 상향 15°시 안전율(Fs = 1.09)

그림 7. 쏘일네일의 설치각에 따른 사면의 안전율



(a) 하향 15°시 안전율(Fs = 1.52)



(b) 상향 15°시 안전율(Fs = 1.0)

그림 8. 쏘일네일의 설치각에 따른 사면의 안전율(상재하중 포함시)

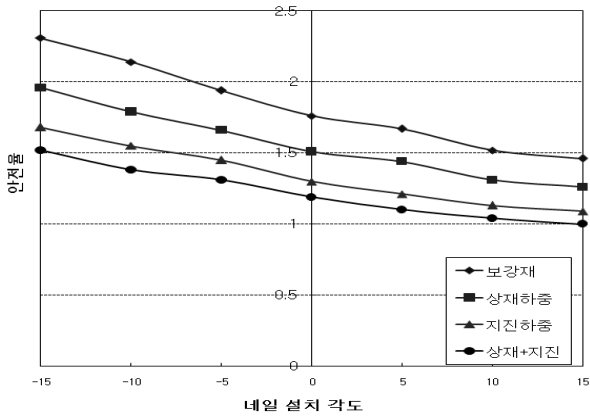


그림 9. 쏘일네일의 설치각에 따른 사면의 안전율 변화(하향 : -, 상향 : +)

해석결과 네일의 설치각도가 하향에서 상향으로 변화할수록 사면의 안전율은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급했듯 쏘일네일이 상향으로 설치된 경우 하향으로 설치된 경우에 비해 유효길이가 짧아지므로 쏘일네일의 보강력이 짧아진 유효길이 만큼 발휘되지 않기 때문으로 판단된다.

4.2 쏘일네일의 설치각에 따른 연직굴착벽체의 변위 변화

쏘일네일은 하향 20°로 설치될 경우에 수평변위가 최소가 된다는 연구결과(천병식 등, 2004)가 있다. 그러나 이는 쏘일네일의 각도가 상향일 경우를 제외하고 해석한 결과이므로 본 연구에서는 쏘일네일의 설치각을 상향 5°와 10°의 경우까지 포함하여 쏘일네일의 설치 각도별 연속체 해석을 수행하였다. 연속체 해석법에는 유한차분법이 사용되었으며 프로그램 FLAC 2D Ver. 5.0이 이용되었다. 시공단계별 해석을 수행하였으며 시공단계 모델링은 일반적인 쏘일네일 공법의 시공순서와 같이 굴착, 쏘일네일설치, 슛크리트 타설의 순으로 반복적으로 수행되었다. 본 연구에서 지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였고, 슛크리트 벽체와 쏘일네일은 탄성모델을 적용하였다. 사용된 요소는 지반은 평면

표 3. 해석에 적용된 지반강도정수

구 분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	탄성계수 (MPa)	푸와송비
풍화토	18	5	28	80	0.3

표 4. 해석에 적용된 보강재 제원

쏘일네일(H29)				슛크리트			
수평간격 (m)	수직간격 (m)	네일길이 (m)	네일직경 (mm)	천공직경 (mm)	탄성계수 (MPa)	두께 (mm)	탄성계수 (MPa)
1	1	10	29	105	210000	10	15000

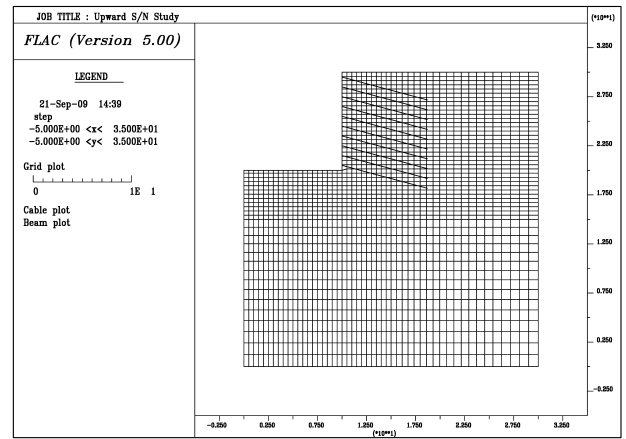


그림 10. 연속체 해석 격자요소망

요소를 사용하였으며 슛크리트 벽체는 beam요소, 쏘일네일은 cable요소를 사용하였다. 지반과 슛크리트 벽체, 쏘일네일과 슛크리트 벽체는 강결로 모델링 하였으며 쏘일네일과 지반은 마찰저항 경계를 이용하였다(경계면 요소 고려). 쏘일네일과 지반과의 경계면의 마찰저항 경계는 FLAC 프로그램에서 제공하는 sbond와 kbond를 이용하였으며 각각의 값은 각각 최대마찰저항력과 그라우트의 강성을 의미한다(Itasca, 2002). 해석에 사용된 격자 요소소망은 그림 10과 같다. 해석에 사용된 쏘일네일의 제원은 표 3~4에 나타내었다.

좌우경계 및 바닥면은 수직·수평변위를 고정하는 로울러로 설정하였다. 총 굴착 깊이는 10m, 설치되는 수직방향 네일의 개수는 10개이며, 단계별 분할굴착 해석을 수행하였다.

4.3 쏘일네일의 설치각도별 발생 변위

네일의 설치각도별 벽체변위에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지반 물성치 및 보강재는 일정하게 유지하고 네일의 설치각도만 하향 15°~상향 10°로 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

그림 11은 일정한 사면에 쏘일네일의 설치각도를 하향 15°, 10°, 5°, 수평 0°, 상향 5°, 10°로 변화시켜 각 경우의

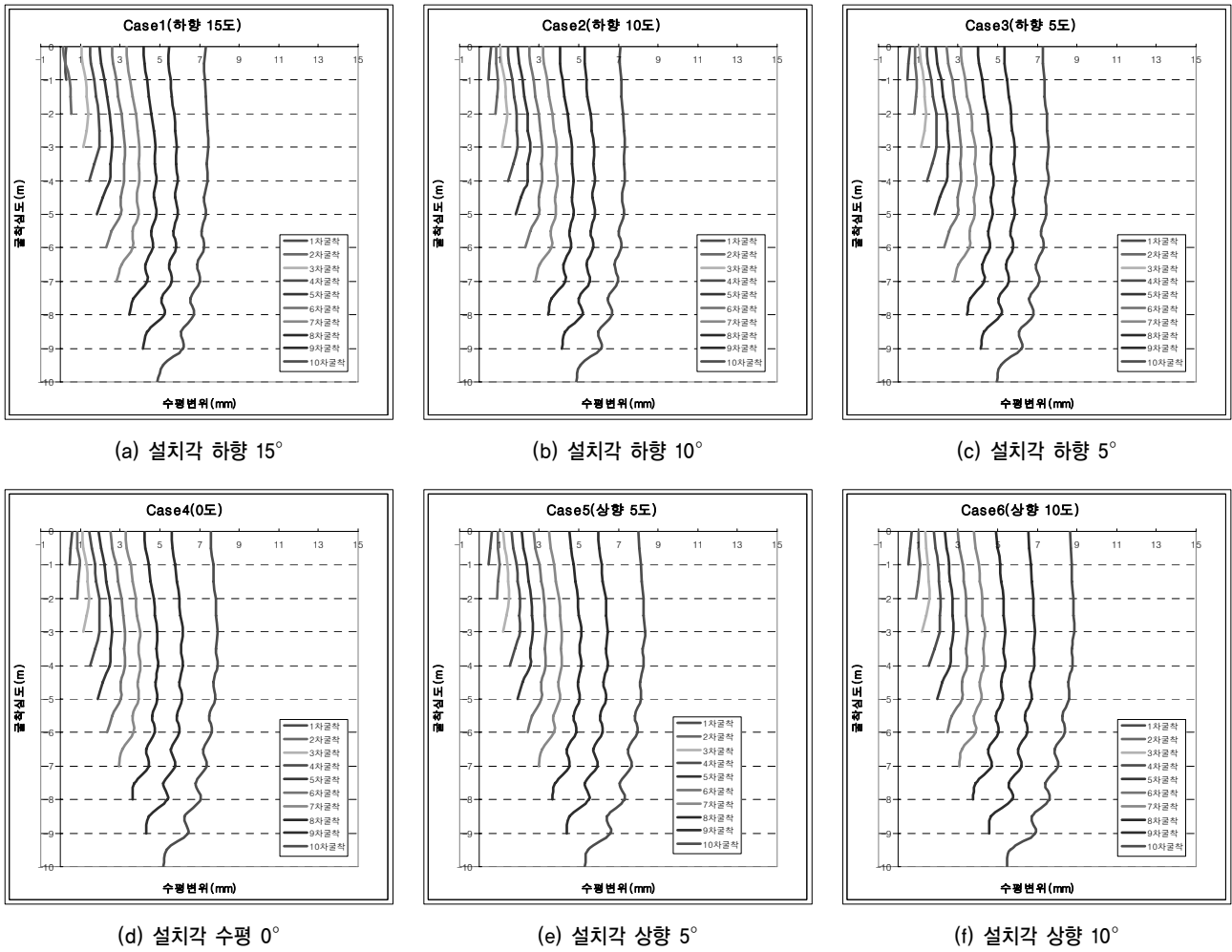


그림 11. 네일의 설치각도 변화에 따른 벽체의 수평변위

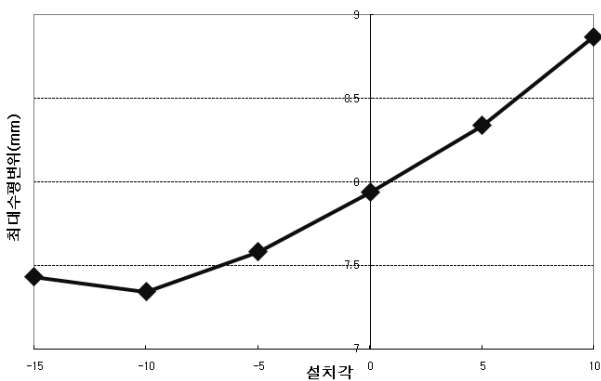


그림 12. 네일의 설치각도 변화에 따른 벽체의 수평변위(하향 : -, 상향 : +)

최초굴착단계에서 최종굴착단계까지의 수평변위 변화를 도시한 결과이며 그림 12는 각 해석에서의 최대 수평변위를 나타낸다. 그림 12의 해석 결과를 살펴보면, 네일의 설치각이 하향에서 상향으로 될수록 수평변위는 약간 증가하였지만 그 차이는 약 1mm, 전체 굴착깊이의 1/10000정도로 매우 작았다. 이는 상향식 쏘일네일의 인발저항의 방향을 고

려할 때 쏘일네일이 상향으로 설치될 경우 축력의 방향이 상향을 향하게 되므로 축력의 방향을 고려할 때 하향으로 설치하였을 경우에 비해 토체의 자중에 의한 변형에 대해 더 이점이 있다. 이러한 인발저항력의 방향적인 이점과 3절에서 살펴본 인발저항력의 크기의 불리함이 서로 상쇄되었다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링 공법의 개발이라는 목표로 일반 쏘일네일링과 수평배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링을 비교·분석하기 위하여 먼저 직선파괴를 가정한 연직사면(사질토지반)에서 하향 15°로 설치된 쏘일네일과 상향 5°로 설치된 쏘일네일의 설치 높이별 인발력의 저하량과 인발력의 저하가 발생하는 쏘일네일의 설치높이에 대하여 제안식을 각각 제시하였다. 제안식에 쓰인 변수는 지반의 강도, 굴착깊이, 지반의 단위중량 등이며, 이중 지반의 강도와 굴착깊이가 인발력의 저하량과 인발력

의 저하가 발생하는 쏘일네일의 설치높이에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 제안식의 유도에 있어서 지반의 경사가 연직이며, 지반의 강도는 내부마찰각만을 고려했다는 한계점이 있으며, 제안식 또한 인발력의 저하량과 인발력의 저하가 발생하는 쏘일네일의 설치높이에 대한 제안식이므로 전체적인 안전율에 대한 연구가 추가로 필요하다. 다음으로 원호파괴일 경우의 안전율의 차이를 알아보기 위하여 사면에 대하여 쏘일네일의 설치각도 별 한계평형 해석을 수행하였으며 그 결과 설치각도가 증가할수록 안전율이 하락하였다. 마지막으로 연직굴착시의 수평변위에 대하여 유한차분 해석을 통해 연구하였으며 그 결과 상향으로 쏘일네일을 설치할 경우 하향에 비해서 수평변위가 증가하였으나 그 차이는 굴착심도의 1/10000 정도로 매우 작았다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 홍익대학교 교내연구과제에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김홍택 (1998), *쏘일네일링의 원리 및 지침*, 평문각, pp. 47~48.
2. 천병식, 김원철, 윤창기 (2004), 유한요소해석에 의한 쏘일네일링의 네일 경사각의 영향에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 20, No. 6, pp. 19~27.
3. Guler, E. and Bozhurt, C. F. (2004), *The Effect of Upward Nail Inclination to the Stability of Soil Nailed Structures*, ASCE Publications Geotechnical Engineering for Transportation Project, GSP 126, pp. 2213~2220.
4. Itasca Consulting Group, Inc. (2002), *FLAC Version 4.0-User's Manual*, pp. 1.29~1.37.

(접수일: 2009. 9. 15 심사일: 2009. 10. 6 심사완료일: 2009. 11. 12)