

벽체가 수직인 쏘일네일링 구조물의 네일 경사각 영향

한상수¹ · 백용² · 권오일² · 김영남³ · 채영수⁴ · 이강일^{5*}

¹(주)동아지질 설계지원팀, ²한국건설기술연구원 지하구조물연구소,
³(주)동명기술공단종합건축사사무소 토질부, ⁴수원대학교 토목공학과,
⁵대진대학교 건설시스템공학과

The Effect of Nail Inclination of Soil Nailing Structure of Vertically Faced Wall

Sang-Su Han¹, Yong Baek², O-Il Kwon², Young-Nam Kim³, Young-Su Chae⁴, and Kang-Il Lee^{5*}

¹Dong-A Geological Engineering Co. Ltd.

²Underground Structure Research Division, Korea Institute of Construction Technology

³Dongmyeong Engineering Co. Ltd.

⁴Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

⁵Dept. of Civil Engineering, Daejin University.

쏘일네일링은 최근 들어 그 적용성이 확대되고 있으나 아직까지 공인된 설계방법이 없다. 또한 쏘일네일링은 설계변수가 많고 설계변수 상호간의 민감도에 대한 연구가 되지 않은 상황에서 명확한 근거 없이 사용되고 있다. 특히, 본 연구의 주요 과제인 네일의 설치각도에 대한 민감성은 다루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 이론적 계산식을 바탕으로 파괴면에 대한 네일의 각도와 벽체의 높이, 단위중량, 점착력, 내부 마찰각, 네일에 작용하는 인장력 등을 고려하여 안전율을 분석하였다. 그 결과, 배면지반이 수평이고 수직벽체인 경우 네일의 설치 각도는 하향보다 상향이 모두 안전율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 쏘일네일링, 네일경사각, 안전율

For the soil nailing, recently, its application is expanded, but there is no officially approved method to design it yet. Furthermore, there are a great number of design valuables in soil nailing, it is also used without clear data under the situation that uncompleted detailed research on the sensibility between design variables. Especially, there has no deal with the installation angle of the nail - the major contents in this study. Therefore, this study based on the theoretical estimation analyzed safety rate about the angle of the nail, unit weight, adhesive force, internal friction angle and tensile force worked on nail in the case of the rear of pond side is both horizontal and perpendicular. As a result, it could be verified that the safety rate increased on every cases in the situation of the nail installation angle was in upward direction than in downward direction.

Key words : soil nailing, nail inclination, safety factor

서 론

지반보강공법 중 가장 많이 사용되고 있는 공법의 일종인 쏘일네일링은 불안정한 사면을 네일을 이용하여 콘크리트 벽체에 삽입하여 일체화시킴으로써 지반 거동을 억제하는 공법이다. 1972년 프랑스에서 처음 시공된 이

래로, 최근 들어 그 적용성이 더욱 확대되고 있으나 아직까지 공인된 설계방법도 없으며 서로 다른 가정을 가지므로 설계접근 방식도 다르다(천병식 등, 2004).

현재 국내에서 사용되어지는 쏘일네일은 모두 하향식의 시공만이 이루어지고 있으며 쏘일네일의 설계시 일반적으로 지반강도 정수, 사면의 기울기, 그라우트와 원

*Corresponding author: kilce@daejin.ac.kr

지반의 마찰력 등만을 주로 고려하고 있으며, 본 연구의 주요 내용인 네일의 설치각도에 대한 민감성은 다루어지지 않고 있다. 이러한 설계변수 상호간의 민감도에 대한 연구가 되지 않은 상황에서 대부분의 경우 설치간격이나 네일의 설치각도는 고정시키고 네일의 길이만을 변화시키거나 서로 다른 직경의 네일을 명확한 근거 없이 사용하고 있다. 따라서 네일의 강성 및 설치각도를 포함한 여러 가지 설계변수에 대한 영향이 규명되어야 한다. 특히, 네일의 경사각의 경우 제안자들에 따라 서로 다른 제안을 하고 있다. Shen(1978)등에 의하면 최적의 네일 경사각은 하향 15°~25°사이이며, Juran(1990)등은 네일의 경사각이 하향 0°에서 30°까지 증가함에 따라 벽체의 수평변위 또한 증가함을 증명하였으며, 이러한 사실에 근거하여 FHWA(1996)에서는 네일의 경사각은 가능한 수평이 되어야 한다고 제안하고 있다.

따라서 본 연구는 배면지반이 수평이고 벽체가 수직인 사면을 대상으로 네일의 설치각도를 하향으로만 국한하지 않고 상향인 경우까지 확대하여 이론식 및 수치해석을 통해 안전율을 계산하였다. 안전율에 영향을 미치는 매개변수는 파괴면에 대한 네일의 각도와 벽체의 높이, 단위중량, 점착력, 내부 마찰각 및 네일에 작용하는 인장력 등을 고려하였으며 네일의 설치각도는 상향 20°에서 하향 20°까지 5° 간격으로 변화 시키면서 네일의 경사각에 대한 영향을 분석하여 최적의 네일의 경사각을 얻고자 하였다.

기초이론

현재까지 국내에 보강재에 대한 상향식 설치각도에 대한 문헌과 배수를 고려한 설계 자료는 없는 실정이며 더욱이 국외의 경우도 이론적인 문헌 발표 사례만이 있을 뿐이다(Erol Gler 등, 2004). 이 연구에서는 쏘일네일 보강재에 대한 상향식 설치각도의 영향에 대하여 유한요소해석과 한계평형해석 프로그램인 Talren97을 이용하여 비교 분석하였으며, 실제 현장 계측을 통해 검증을 한 것으로 나타났다.

사면의 파괴를 유도하는 주요인으로는 토체의 자중과 상재하중이라 할 수 있다. 그와 반면에 파괴를 저지하려는 힘은 흙의 전단강도이다. 그러므로 네일을 설치하는 것은 흙의 전단강도를 증대시키는 것이며 네일에 작용하는 힘은 Fig. 1에 나타나 있듯이 크게 수직방향(=F_{normal}·tanφ)과 접선방향(F_{tangential})으로 나눌 수 있다.

Jewell(1980)은 Fig. 2와 같이 최적의 네일의 설치각

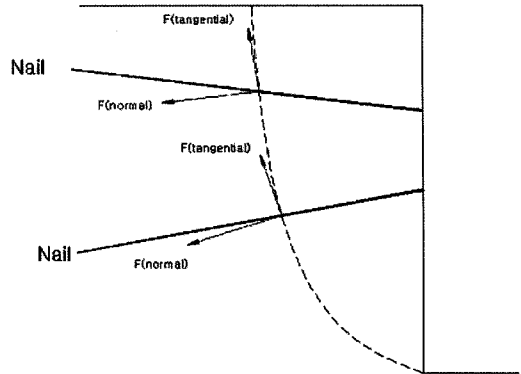


Fig. 1. Sectional diagram of downward nail.

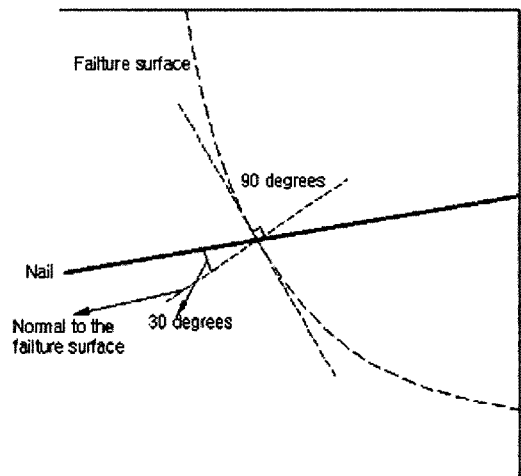


Fig. 2. Sectional diagram of upward nail(Jewell, 1980).

도는 임계 파괴면과 접선사이의 약 30°라고 제시한 바 있다. Shafice(1986)는 Fig. 3과 같이 유한요소해석을 통해 벽체가 연직이고 네일의 경사가 하향일 경우 전단과 휨의 유발 인발력은 감소한다는 것을 보여주었다. 요컨대, 네일 보강은 네일 경사의 함수이다.

결과적으로, 네일의 적용은 슬라이딩에 대한 흙의 저항을 증가시키는 것이다. 즉, F_{normal}·tanφ과 F_{tangential}의 합이 극대화되어 진다는 것을 말한다. Fig. 4(a)에 나타난 쏘일네일 벽체는 최대안전율을 제공하기 위해 최적의 β 각도를 계산하게 되는데 이때 기하학적인 면과 계산의 간소화를 위해 파괴면은 직선으로 가정한다.

$$Factor\ of\ Safety = \frac{resisting\ forces}{driving\ forces} \tag{1}$$

$$F_s = \frac{cL + (W\cos\theta + T\sin\beta)\tan\phi}{W\sin\theta - T\cos\beta} \tag{2}$$

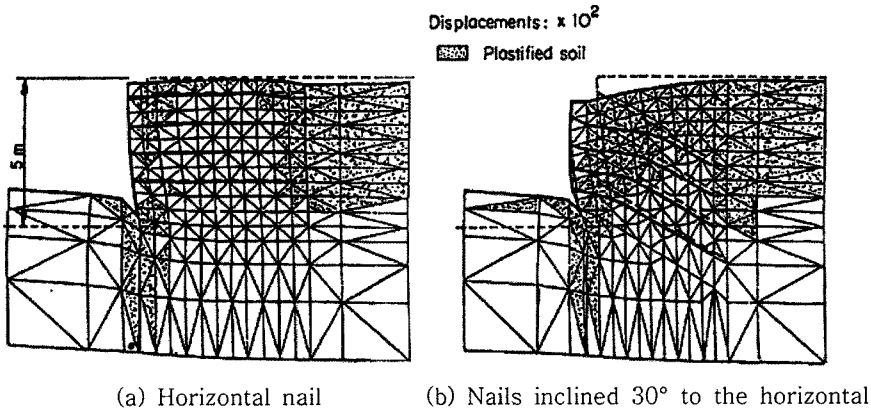


Fig. 3. Analysis on the influence of nail inclination by finite element method (Shaffie, 1986).

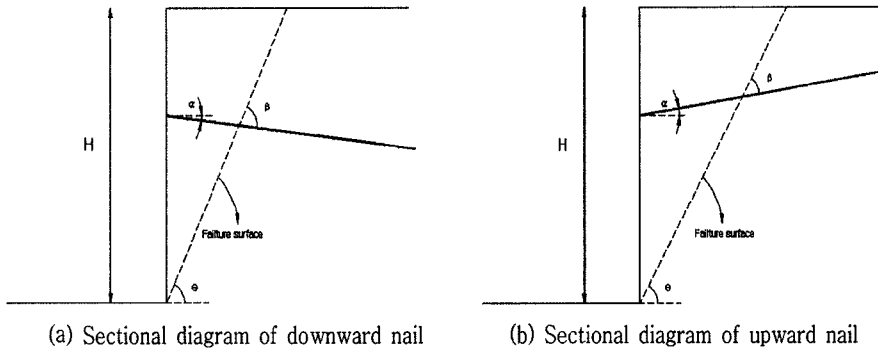


Fig. 4. Sectional diagrams of nail.

$$F_s = \frac{c \cdot \frac{H}{\sin\theta} + \frac{H^2}{2 \cdot \tan\theta} \cdot \gamma \cdot \cos\theta \cdot \tan\phi + T \cdot \sin\beta \cdot \tan\phi}{\frac{H^2}{2 \cdot \tan\theta} \cdot \gamma \cdot \sin\theta - T \cos\beta} \quad (3)$$

여기서, L = 파괴면의 길이

W = 파괴면 내의 토체의 자중

c = 흙의 점착력

ϕ = 흙의 내부 마찰각

T = 네일에 작용하는 인장력

β = 파괴면에 대한 네일의 각도

H = 벽체의 높이

γ = 흙의 단위중량

먼저, β 각의 관계에 대한 안전율을 전개한다. 그 후 전형적인 흙의 물성치와 점착력(c), 내부마찰각(ϕ), 인장력(T)을 $d(F_s)/d\beta$ 의 방정식에 대입한다. 가장 큰 안전율을 얻기 위해서는 식 (3)에 파괴면에 대한 네일의 각도 (β)에 대하여 편미분을 취한 후 최적의 β 각도를 구하기 위해서 $d(F_s)/d\beta=0$ 으로 취하면 식 (4)과 같이 된다.

$$\frac{d(F_s)}{d\beta} = \frac{\frac{T \cdot H^2 \cdot \tan\phi \cdot \gamma_{soil}}{2 \cdot \tan\theta} (\cos\beta \cdot \sin\theta - \sin\beta \cdot \cos\theta)}{\frac{H^2 \cdot \gamma}{2 \cdot \tan\theta} \cdot \sin\theta - T \cos\beta} - \frac{\frac{T \cdot \sin\beta \cdot c \cdot H}{\sin\theta} - T^2 \cdot \tan\phi}{\frac{H^2 \cdot \gamma}{2 \cdot \tan\theta} \cdot \sin\theta - T \cos\beta} \quad (4)$$

매개변수변화에 따른 네일의 경사각의 영향 분석

벽체가 수직이고 배면지반이 수평인 해석모델(Fig. 4)에 대한 네일의 경사각의 영향을 분석하기 위하여 쏘일 네일의 안전율에 영향을 미치는 여러 변수들 중 벽체의 높이, 흙의 점착력, 흙의 내부마찰각, 흙의 단위중량 및 네일의 인장력을 Table 1과 같이 선택하였으며 이들 값들의 변화에 따른 네일의 경사각은 상향 20°부터 하향

Table 1. Sectional diagrams of parameters.

| Wall height (H, m) | Cohesion (c, kN/m ²) | Internal friction angle (φ, °) | Unit weight (γ _b , kN/m ³) | Nail tensile force (T, kN) |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------|
| 5 | 5 | 20 | 17 | 20 |
| 10 | 10 | 30 | 18 | 40 |
| 15 | 15 | 40 | 19 | 60 |

20°까지 5° 간격으로 변화시키면서 최적의 네일 경사각을 계산하였다.

이론식과 Talren97의 수치해석을 통한 경사각의 영향

네일의 경사와 안전율의 관계를 상기 이론식과 수치 해석기법인 Talren97을 이용하여 먼저 계산하였다. 계산에 사용된 기본 매개변수는 네일의 수평간격=1 m, γ_r=19 kN/m³, θ=45+φ/2, c=5 kN/m², T=20 kN, φ=30°, H=10 m로 가정하였다.

Table 2는 이론식 및 Talren97을 이용한 안전율을 계산한 결과이며 Fig. 5는 Table 1의 결과를 이론식과 Talren97의 결과를 함께 비교하여 나타낸 것이다. 이론식에 의한 결과는 안전율에 미세한 변화를 확인할 수 있었으며 배면지반이 수평이고 수직벽체인 경우에 대한 최적의 네일설치 각도는 상향 10°일 경우 최대안전율을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Talren97에 의한 계산결과는 상향으로 갈수록 안전율이 더 크게 발휘되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 이론식과 Talren97에 따른 네일의 안전율 분석결과 약간의 차이를 보이는 이유는 이론식의 경우는 계산의 간편화를 위해 파괴면을 직선으로 가정하였기 때문이다. 하지만 두 경우 모두 상당히 안전한 것으로 계산되었다.

이 결과를 바탕으로 수직벽체인 경우 가상 파괴면의

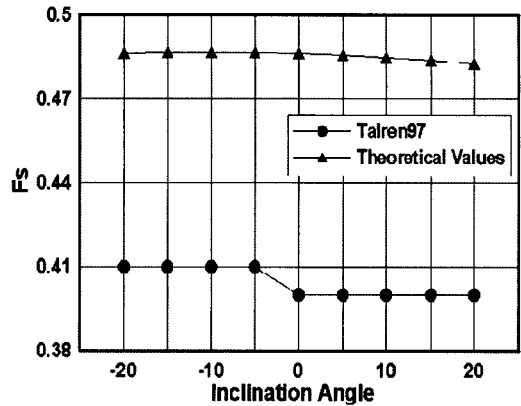


Fig. 5. Nail safety factor obtained with theoretical values and talren97.

교차 각도를 최적화시킨다면 전체적인 사면의 안정성을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

높이에 따른 경사각의 영향

본 경우는 벽체의 높이에 따른 경사각의 안전율 변화를 검토한 것으로서 기본 매개변수로 하고 단지 벽체의 높이(H)와 네일의 경사각(β)만을 변화시켜 안전율을 구했다. 그 결과 벽체의 높이가 5 m인 경우는 상향 20°, 10 m인 경우는 상향 10°, 15 m인 경우는 상향 5°

Table 2. Nail safety factor obtained with theoretical values and talren97.

| c | φ | T | β | α | Fs(1) | Fs(2) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|---|------------------|------------------|
| Cohesion (kN/m ²) | Internal friction angle (°) | Nail tension (kN) | Optimum nail inclination angle (°) | Angle of nail with respect to Horizontal (*)(°) (α=β-θ) | Factor of safety | Factor of safety |
| 5 | 30 | 20 | 40 | -20 | 0.486188 | 0.41 |
| 5 | 30 | 20 | 45 | -15 | 0.486556 | 0.41 |
| 5 | 30 | 20 | 50 | -10 | 0.486924 | 0.41 |
| 5 | 30 | 20 | 55 | -5 | 0.486544 | 0.41 |
| 5 | 30 | 20 | 60 | 0 | 0.486169 | 0.40 |
| 5 | 30 | 20 | 65 | 5 | 0.485553 | 0.40 |
| 5 | 30 | 20 | 70 | 10 | 0.484704 | 0.40 |
| 5 | 30 | 20 | 75 | 15 | 0.483632 | 0.40 |
| 5 | 30 | 20 | 80 | 20 | 0.482348 | 0.40 |

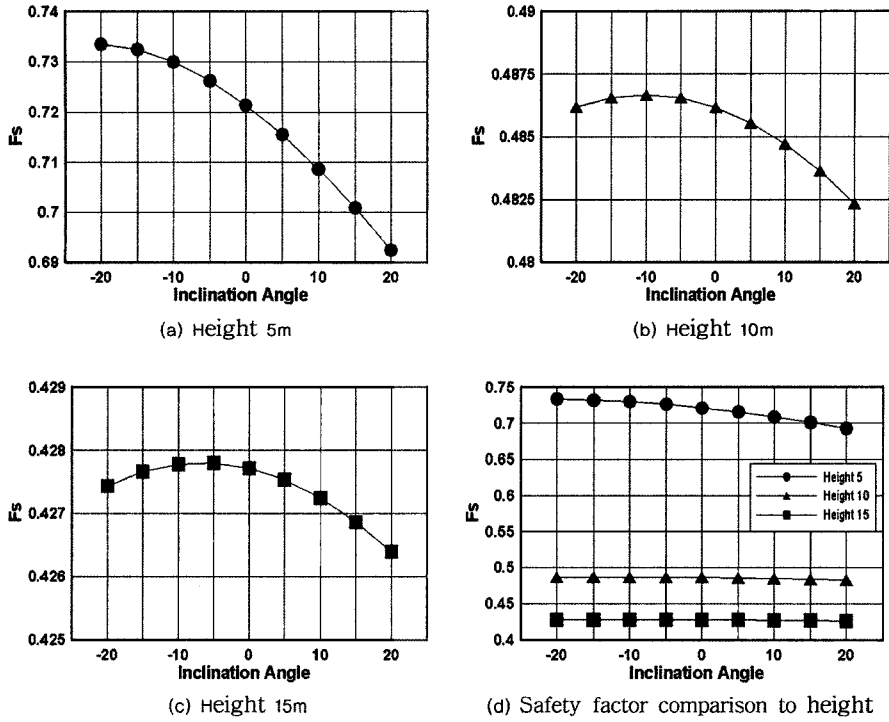


Fig. 6. Nail safety factor to height.

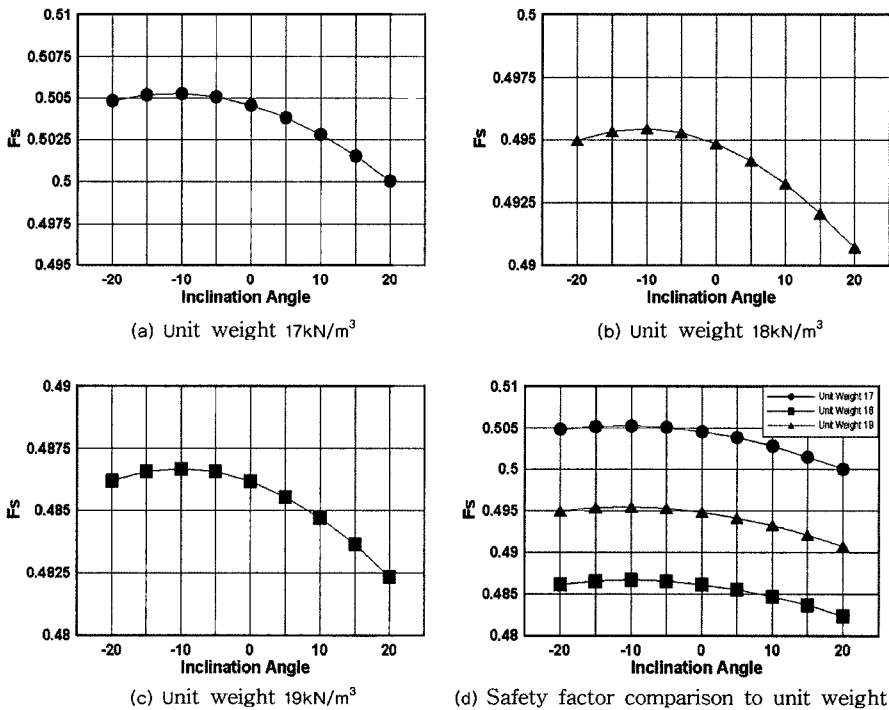


Fig. 7. Nail safety factor to unit weight.

에서 미소하나마 최적의 네일 설치각도가 계산되었다. 또한 높이에 따른 네일의 설치각도별 안전율의 계산 결과는 Fig. 6과 같다. 이 그림에 의하면 벽체의 높이가 높아질수록 안전율은 낮아지고 상, 하 네일의 경사각 차이에 따른 안전율의 값의 차이도 크게 줄어 네일의 설치각도에 따른 차이가 거의 없었다. 즉, 벽체의 높이가 높을수록 최대안전율 각도는 수평에 가깝게 근접하고 있다.

단위중량에 따른 경사각의 영향

단위중량에 따른 네일의 경사각의 영향 검토에 적용된 매개변수도 기본 매개변수로 하고 단지 흙의 단위중량(γ_{soil})과 네일의 경사각(β) 만을 변화시켜 안전율을 계산한 것이다. 계산 결과는 Fig. 7과 같고 안전율을 분석한 결과 단위중량 차이에 따른 전체적인 안전율의 차이는 크지 않았다. 단지 단위중량의 변화에 관계없이 모두 상향 10°에서 최적의 네일 설치각도가 구해졌으며 네일의 설치각도가 상향인 경우는 안전율에 차이가 거의 없지만 하향으로 갈수록 각도차이에 따라 안전율이 감소하는 경향을 보였다.

점착력에 따른 경사각의 영향

본 경우에 적용된 매개변수도 상기의 값을 동일하게 적용하였으며 단지 점착력(c)과 네일의 경사각(β) 만을 변화시켜 검토한 것으로 그 계산 결과는 Fig. 8과 같다. 이 결과에 의하면 점착력이 증가하면 안전율이 크게 증가하여 점착력이 안전율에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 경사각의 영향은 점착력이 5kN/m²일 때는 상향 10°, 10, 15 kN/m²일 때는 상향 15°에서 최대 안전율이 계산되었지만 네일의 경사각에 따른 안전율의 차이는 매우 작게 나타났다.

내부마찰각에 따른 경사각의 영향

본 경우에 적용된 매개변수도 상기의 값을 동일하게 적용하였으며 단지 흙의 내부마찰각(ϕ)과 네일의 경사각(β) 만을 변화시켜 검토한 것으로 그 계산 결과는 Fig. 9와 같다. 이 계산 결과에 의하면 내부마찰각이 증가하면 안전율이 크게 증가하여 내부마찰각도 안전율 증가에 크게 기여하는 것으로 평가되었다. 그리고 네일의 경사각에 대한 영향은 내부마찰각이 20°인 경우는 상향 15°, 30° 및 40°인 경우는 상향 10°로 최대 안전율이 나타났지

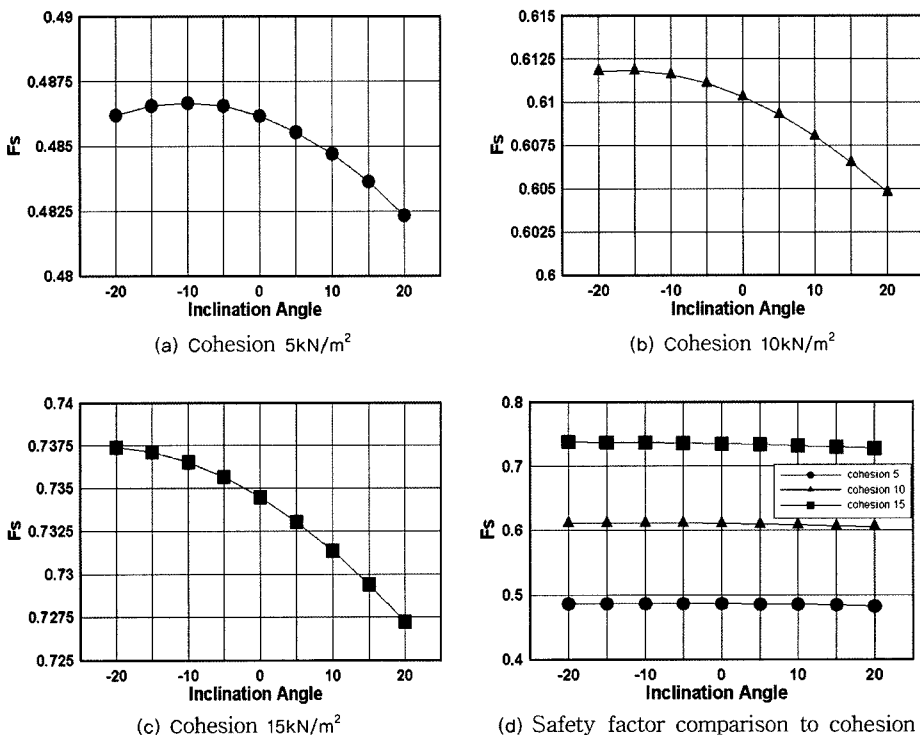


Fig. 8. Nail safety factor to cohesion.

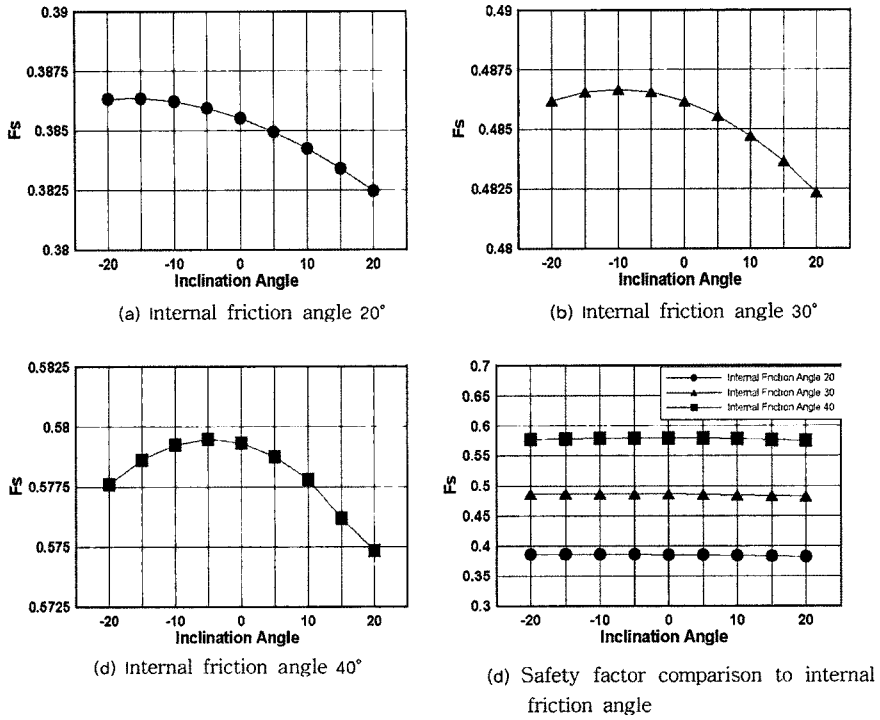


Fig. 9. Nail safety factor to internal friction angle.

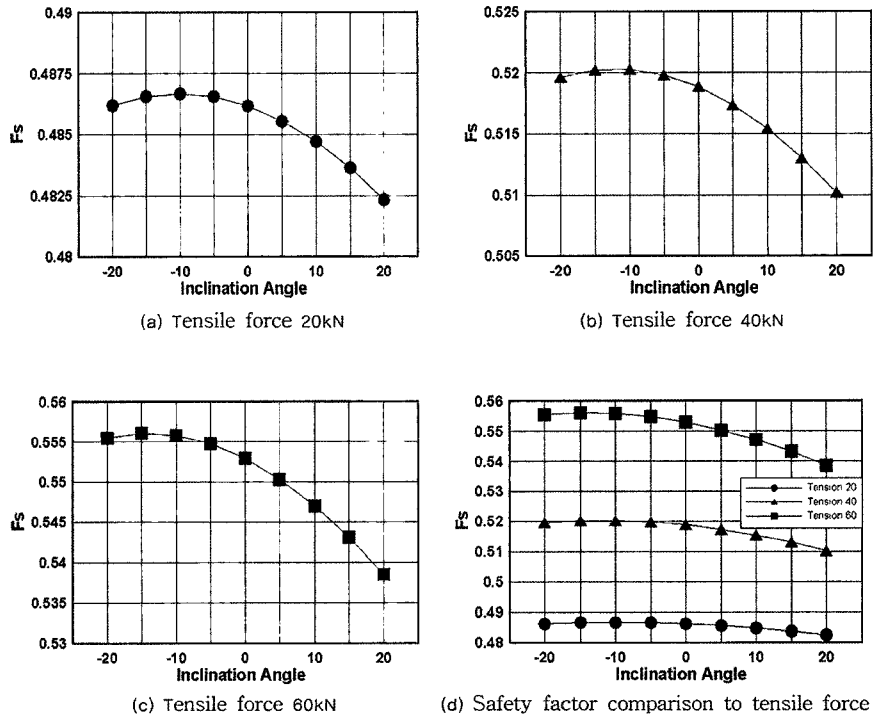


Fig. 10. Nail safety factor to tensile force.

만 점착력 항에서와 같이 동일한 내부마찰각 조건에서 네일의 경사각의 영향은 큰 차이를 보이지 않았다.

인장력에 따른 경사각의 영향

본 경우에 적용된 매개변수도 상기의 값을 동일하게 적용하였으며 단지 네일의 인장력(T)과 네일의 경사각(β)만을 변화시켜 검토한 것으로 그 계산 결과는 Fig. 10과 같다. 이 계산 결과에 의하면 네일의 인장력이 커지면 안전율이 증가하지만 점착력 및 내부마찰각에 비해 큰 안전율의 차이는 보이지 않았다. 네일의 경사각에 대한 영향은 네일의 인장력이 20 kN 및 40 kN인 경우는 상향 10°에서 60 kN인 경우는 상향 15°로에서 최대 안전율이 계산되었으며 Fig. 10(d)에서와 같이 상향인 경우는 안전율이 각도에 관계없이 비슷하지만 하향으로 갈수록 안전율의 차이가 더 크게 나타나고 있다.

결 론

본 연구는 이론적 계산 및 수치해석(Talren97) 프로그램으로 파괴면에 대한 네일의 각도와 벽체의 높이, 단위중량, 점착력, 내부 마찰각 및 네일에 작용하는 인장력 등을 고려해 안전율을 분석하여 벽체의 최적 네일 설치각도를 연구하였다. 일반적인 네일의 설치각도는 하향 15° 정도가 보편적으로 시공되고 있지만 본 연구에서는 배면지반이 수평이고 수직벽체인 경우로 한정하여 네일의 경사각을 상향 20°에서 하향 20°까지 5° 간격으로 변화를 시키면서 네일 경사각의 영향을 분석하였으며 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 이론식과 수치해석 프로그램으로 경사각의 변화에 따른 안전율을 계산한 결과 두 조건 모두 네일을 상향으로 설치한 경우가 미소한 안전율 변화이지만 더 안전한 것으로 평가되었으며 특히 상향 10° 정도에서 최대 안전율이 계산되었다.

2) 여러 매개변수(벽체의 높이, 단위중량, 점착력, 내부마찰각 및 인장력)를 변화시켜 네일의 설치각도에 따른 안전율을 계산한 결과 네일의 설치각도는 하향보다 상향인 경우가 모두 더 안전한 것으로 계산되었으며 최적의 네일 설치각도는 매개변수에 따라서 약간씩 다르지만 상향 10°에서 15° 사이에서 나타났다.

3) 매개변수 변화에 따른 전체적인 안전율의 차이는 벽체의 높이, 점착력, 내부마찰각 및 인장력의 경우는 변수의 차이에 따라서 큰 안전율의 차이를 보였지만 흙의 단위중량은 큰 영향을 주지 않는 것으로 평가되었다.

상기의 결과 수직벽체인 경우 가상 파괴면의 교차 각도를 최적화 한다면 사면의 안정성 증대와 합리적인 설계가 이루어질 수 있을 것으로 판단되며 특히 상향식 보강기술의 현장 시공기술과 체반장비의 개선을 통한 보강 기술의 발전도 함께 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 천병식의, 2004, 유한요소해석에 의한 쏘일네일링의 네일 경사각의 영향에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 6호, pp.19-27.
- Erol Gler and Cemal F.Bozkurt, 2004, The effect of upward nail inclination to the stability of soil nail structures, Geotechnical Engineering for Transportation Projects, pp.2213-2220.
- FHWA, 1996, Manual for design and construction monitoring of soil nail walls, Federal Highway Administration Publication No. FHWA-SA-96-069R, November, pp.118-129.
- Jewell, R. A., 1980, Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soil, Ph.D. Thesis, Cambridge University.
- Juran, I., G. Baudran, K. Farrag, and V. Elias, 1990, Design of soil-nailed retaining structures, In P. C. Lambe and L. A. Hansen (Eds), Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Geotechnical Special Publication No.25, pp.644-659.
- Shen, C. K., S. Bang L. R. Herrman, and K. L. Romstad, 1978, A reinforced lateral earth support system, Symposium on Earth Reinforcement, April, ASCE, Pittsburgh, Pennsylvania, pp.764-793.
- Shafiee, S., 1986, Numerical simulation of the behaviour of soil nailing : Interaction of soil nail and behaviour of the structure, Ph. D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

2008년 8월 9일 원고접수, 2008년 9월 17일 게재승인

한상수

(주)동아지질 설계지원팀
서울시 강남구 삼성동 141 성원빌딩 16층
Tel: 02-553-3527
Fax: 02-555-1763
E-mail: sshan@dage.co.kr

백 용

한국건설기술연구원 지하구조물연구실
411-715 경기도 고양시 일산서구 대화동 시민대로 1190
Tel: 031-910-0228
Fax: 031-910-0561
E-mail: baek44@kict.re.kr

권오일

한국건설기술연구원 지하구조물연구실
411-715 경기도 고양시 일산서구 대화동 시민대로 1190
Tel: 031-910-0526
Fax: 031-910-0561
E-mail: kwonoil@kict.re.kr

김영남

(주)동명기술공단중합건축사사무소
130-823 서울시 동대문구 용두동 255-70 동명빌딩
Tel: 02-6211-7502
Fax: 02-6211-7076
E-mail: koji06@paran.com

채영수

수원대학교 토목공학과
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2
Tel: 031-220-2318
Fax: 031-220-2522
E-mail: yschae@suwon.ac.kr

이강일

대진대학교 건설시스템공학과
487-711 경기도 포천시 선단동 산 11-1번지
Tel: 031-539-2024
Fax: 031-539-2020
E-mail: kilee@daejin.ac.kr