

휨저항을 고려한 쏘일네일보강사면의 해석에 관한 연구

Study of the Soilnail-Slope Design Method Considering Bending Resistance of Soilnail

주용선* · 김낙경** · 김성규*** · 박종식****

Joo, Yong-Sun · Kim, Nak-Kyung · Kim, Sung-Kyu · Park, Jong-Sik

Abstract

Soil nailing is used as a method of slope stabilization and excavation support. The design method of soil nail are based on experience or assumption of interaction between soil and reinforcement. Most design methods simply considers the tension of reinforcement for analysis of slope stabilization. Soil nails interact with soils under combined loading of shear and tension. Jewell & Pedley suggested a design equation of shear force with bending stiffness and discussed that the magnitude of the maximum shear force is small in comparison with the maximum axial force. However, they have used a very conservative limiting bearing stress on nails. This paper discusses that the shear strength of soil nails should not be disregarded with proper bearing stresses on nails. The modified FHWA design method was proposed by considering shear forces on nails with bending stiffness.

Keywords : Slope stability, soilnail, design of slope, bending stiffness

요 지

기존 쏘일네일사면 설계법들은 보강재, 주변지반 또는 이들의 상호작용에 대하여 각기 다른 가정들을 적용하고 있다. 다수의 방법에서는 단순히 쏘일네일의 인장력만을 고려하여 이를 외력으로 적용하여 안정해석을 하고 있다. 하지만 쏘일네일사면은 사면을 구성하는 지반에 비하여 상대적으로 큰 휨저항성을 가지므로 쏘일네일의 휨강성을 고려한 안정해석법이 보다 현실적이고 공학적인 설계이다. 본 논문에서는 쏘일네일사면 설계시 쏘일네일의 휨저항성을 고려하며 이때 지반의 극한수평 지지력에 따른 변화를 확인하고 이를 이용하여 수정된 FHWA 쏘일네일사면 설계법을 제안한다.

핵심용어 : 사면안정, 쏘일네일사면, 한계평형법, 휨저항, 사면안정설계법

1. 서 론

사면안정법 중 시공이 용이하고 경제적인 방법인 쏘일네일 사면안정법의 해석·설계는 일반적으로 한계평형법을 이용한 방법이 보편적이다. 이러한 해석·설계법으로는 Davis법 (Shen et al., 1981), German법 (Stoker et al., 1979), French법 (Schlosser, 1982) 등이 있고 근래 들어 한계평형이론에 운동학적 이론을 추가함으로써 각 쏘일네일의 국부적인 안전율을 바탕으로 사면의 안정성을 판정하는 Kinetic법과 FHWA(Federal Highway Administration, 1996)에서 제안한 설계법 등이 적용되고 있다. 상기 각 해석 및 설계법은 보강재와 주변지반 상호작용에 대하여 각기 다른 가정들을 적용하고 있다. 대부분 단순히 쏘일네일의 인장력만을 고려하여 이를 외력으로 적용하여 안정해석을 하고 있다. 그러나 쏘일네일 보강사면은 사면을 구성하는 지반에 비해서 상대

적으로 큰 휨저항성을 가지므로 쏘일네일의 휨강성을 고려한 안정해석법을 적용함으로써 보다 경제적이고 역학적인 설계가 가능하다.

Jewell & Pedley(1990)는 쏘일네일의 휨강성을 고려하여 사면활동 시 쏘일네일에서 발휘되는 전단력에 대한 연구에서 쏘일네일의 휨강성과 지반의 극한수평지지력의 관계를 통하여 발휘 전단력 산정법을 제안하였다. Jewell (1992)은 쏘일네일에 작용하는 축력에 비해, 전단력은 영향은 작으며 무시할 수 있다고 하였다. Jewell이 고려한 극한수평지지력은 국내 지반 조건과 상이하므로 그가 고려한 극한수평지지력과 다른 산정식을 통한 극한수평지지력을 적용하여 국내 지반에 적용할 수 있도록 하였다. 이에 본 논문에서는 여러 극한수평지지력의 산정법이 쏘일네일의 휨저항성을 고려한 쏘일네일 사면의 안전율에 미치는 영향을 확인하고 쏘일네일의 휨저항성을 고려한 간편 해석·설계

*성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 · 공학석사 (E-mail : domabaem00@hanmail.net)

**정희원 · 교신저자 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : nkkim@skku.edu)

***성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 · 공학석사 (E-mail : marine708@hanmail.net)

****(주)한화건설 기술연구소 주임연구원 · 공학박사 (E-mail : pjs91@hanwha.co.kr)

법인 수정 FHWA법을 제안하고 이를 간단한 사례로써 확인하였다.

2. 쏘일네일의 사면활동 시 휨저항

쏘일네일로 보강된 사면에서 쏘일네일과 지반의 상호작용은 복잡한 역학적 관계를 가진다. 쏘일네일은 사면의 활동으로 발생하는 파괴 시 지반과의 마찰력뿐만 아니라 쏘일네일의 휨강성에 의한 저항이 존재한다. 대부분의 쏘일네일보강 사면 해석·설계 시 쏘일네일의 휨저항성이 미미할 것으로 가정하여 지반과의 마찰에 의한 인장력만을 외력으로 적용해 왔다. 쏘일네일의 휨저항성에 대한 연구로는 Schlosser (1983)는 쏘일네일로 보강된 사면의 파괴 시 쏘일네일에 최초로 쏘일네일의 휨저항에 대한 영향을 제안하였으며, Mitchell & Villet(1987)과 Elias & Juran(1988)은 휨강성을 고려한 쏘일네일 설계법을 소개하였다. 또한 Jewell and Pedley(1992)는 쏘일네일의 휨저항성을 적용하여 쏘일네일 사면안정해석 시 그 영향이 미미하다고 하였다. 이는 지반의 극한수평지지력의 산정시 Hansen(1961)의 제안식을 적용하였으며 이때의 극한수평지지력은 보수적인 값이므로 극한수평지지력이 상대적으로 클 경우엔 휨저항성이 커질 것이다.

쏘일네일로 보강된 사면의 활동 파괴 시 쏘일네일의 휨저항 거동은 그림 1과 같이 파괴면을 중심으로 파괴면 안쪽과 바깥쪽으로 대칭되어 휨이 발생한다. 이때 쏘일네일에서는 극한수평지지력을 하중으로 하는 휨모멘트가 발생하게 되고 전단력이 쏘일네일의 수직성분으로의 작용하게 된다.

활동 파괴 사면내의 쏘일네일에는 인장력과 휨저항을 나타내는 전단력이 발휘된다. Jewell & Pedley(1990)는 인장과 휨을 받는 부재 내에서 순수 휨모멘트와 순수 인장력과 관계를 제시하였다. 이때 부재는 원형 단면의 Bar형태의 부재로서 그 관계식은 식 (1)과 같고 그림 2와 같은 그래프의 관계를 나타낸다.

$$\frac{M_{p\max}}{M_p} + \frac{T}{T_p} = 1 \quad (1)$$

쏘일네일에 발생하는 최대전단력과 최대모멘트의 관계는 쏘일네일에 작용하는 수평하중의 크기(극한수평지지력) 및 분포와 관련이 있다. Jewell & Pedley(1990)는 그림 3에서와 같이 쏘일네일에 작용하는 수평하중분포를 쏘일네일의 휨거동과 관련하여 탄성과 소성시의 분포에 따른 휨모멘트를 단순화하여 가정하고, 쏘일네일에 수평하중이 작용하는 소성거동에 대한 쏘일네일의 최대전단력(T_c)과 인장력(T)의 관계식

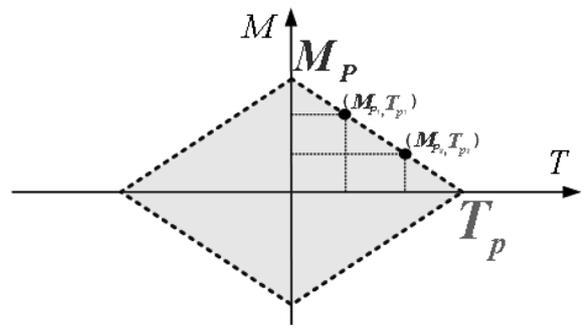


그림 2. 원형단면 보강재의 휨모멘트와 축력 관계

을 그림 2의 휨모멘트와 축력의 한계관계식을 바탕으로 식 (2)와 같이 유도하였다.

$$T_c = \frac{0.85}{\sqrt{\frac{4\sigma_y D}{3\sigma_b D_g} \left(1 - \frac{T}{T_p}\right)}} \left(1 - \frac{T}{T_p}\right) \quad (2)$$

σ_y =쏘일네일 항복응력, σ_b =극한수평지지력($\sigma_b=p_u/D_g$), D =Bar지름, D_g =그라우트지름

쏘일네일의 소성거동 시 파괴면 밖에 위치한 쏘일네일의 길이는 ($L \geq l_b + l_s/2$)를 만족시켜야 하며, ($l_s = (\pi/2)\sqrt{4EI/K_s D}$, $l_b = 2.215\sqrt{4EI/K_s D}$)이다.

사면의 활동으로 인하여 쏘일네일의 극한수평지지력(σ_b)은 쏘일네일의 강도나 종류, 길이 등과 지반 조건에 의하여 결정될 수 있다. 극한수평지지력에 대한 연구결과는 다음과 같다.

Hansen(1961)은 수평재하 말뚝이 작용하는 모래지반에서의 단위길이 당 극한수평지지력을 다음과 같이 제안하였다.

$$p_u = K_q \gamma z B \quad (3)$$

여기서, K_q =Hansen 토압계수, γ =흙의 단위중량, z =지표면으로부터 깊이, B =쏘일네일지름

Reese, Cox & Koop(1974)은 깊이에 따른 극한수평저항의 변화를 실제와 근접하게 나타내기 위해 지표면 근처에서는 쉐기파괴로 고려하였고, 충분히 깊은 곳에서는 평면변형 파괴로 고려하였다. 깊이에 따른 극한수평저항값은 식 (4)와 식 (5)의 값 중 작은 값을 따른다.

$$p_u = \gamma z [B(K_p - K_a) + zK_p \tan \phi \tan \beta] \quad (4)$$

$$p_u = \gamma B z (K_p^3 - 2K_o K_p^2 \tan \phi + \tan \phi - K_a) \quad (5)$$

여기서, K_a =주동토압계수, K_p =수동토압계수, K_o =정지토압계수, $\beta=45^\circ + \phi/2$

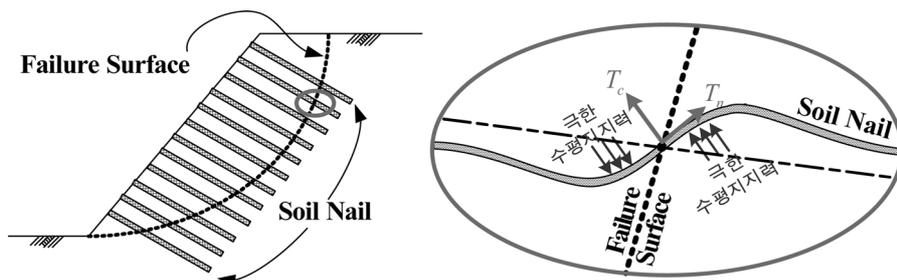


그림 1. 쏘일네일사면의 활동파괴 시 지반 내의 쏘일네일 휨거동

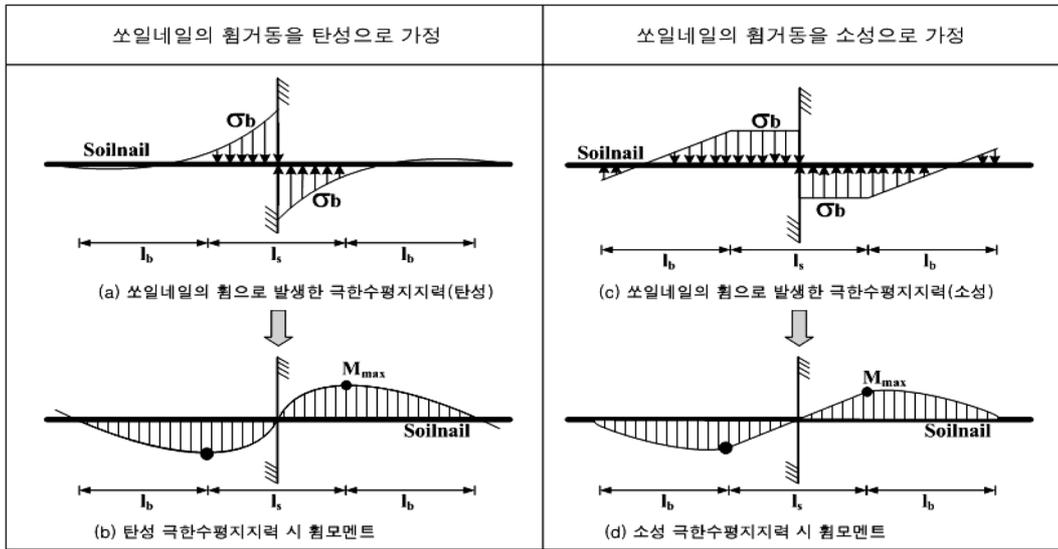


그림 3. 사면활동 시 쏘일네일의 휨거동과 작용힘(Jewell & Pedley(1990))

O'Neill & Murchison(1984)은 모래지반에 대한 수평저항과 변위에 관한 식을 제시하였다. 소구경 말뚝에 대한 실험을 근거로 수평변위 y 가 충분히 클 경우에 근사 값 산정식을 제안하였다.

$$p = \eta A p_u \tanh \left[\left(\frac{kz}{A \eta p_u} \right) y \right] \quad (6)$$

여기서, p_u =극한수평저항, η =형상계수, $A=3-0.8z/D \geq 0.9$, k =지반반력계수

Jewell & Pedley(1990)는 흙과 쏘일네일사이에서 부착에 의해 발생하는 극한수평저항 식을 제안하였다(식 (7)).

$$p_u = B \sigma_v \frac{(1+K_o)}{2} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \exp \left[\left(\frac{\pi}{2} + \phi' \right) \tan \phi' \right] \quad (7)$$

Wang-Resse(1974)는 모래지반에 근입된 말뚝의 극한수평저항 산정식을 식 (8)과 같이 제시하였다.

$$p_u = \gamma z \left[\frac{K_o \sigma_v \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (B + z \tan \beta \tan \alpha) + K_o d \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) \right] \quad (8)$$

여기서, α =단단한 모래 경우 ϕ' , 느슨한 모래 경우 $\phi'/3 \sim \phi'/2$

사면의 활동에 의하여 쏘일네일에서 발생하는 휨모멘트를 일으키는 극한수평저항은 지반의 조건과 지반과 이루고 있는 휨부재에 따라서 그 산정법이 다르다. 각각의 제안된 극한수평저항 산정식의 상대적 크기를 알아보기 위해 극한수평저항(σ_b)을 무차원화하여 내부마찰각과의 관계를 알아보았다(그림 4). Jewell(1990)이 제안한 보강재의 휨거동 시 적용했던 극한수평저항은 다른 제안 산정식과 비교했을 경우 최고 약 30배의 차이가 있었다. 이에 FHWA(1996)에서 적용한 Wang-Resse가 제안한 극한수평저항 산정식을 이용하여 쏘일네일의 휨저항성을 고려했을 때 쏘일네일보강사면의 안정성에 미치는 영향에 대하여 비교·분석하였다.

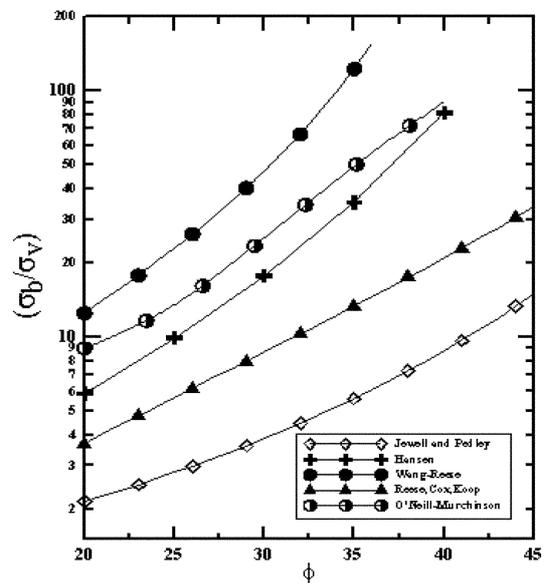


그림 4. 각 극한수평저항의 비교

3. 쏘일네일보강사면 해석법

쏘일네일보강사면의 해석법은 과거 여러 연구와 업적이 수행되었다. 대표적인 쏘일네일보강사면 해석법은 Davis법(Shen et al., 1981), German법(Stoker et al., 1979), FHWA법(Federal Highway Administration, 1996), French법(Schlosser, 1982) 등이 있다. 각 해석법은 쏘일네일과 지반의 상호작용에 대한 가정을 각기 다르게 적용하여 제안되었다. Davis법과 German법은 쏘일네일이 단순한 인장재로서 작용하고, 사면활동 시 인장력만을 고려하여 사면 안정 해석에 적용하였다. 반면에 French법은 사면의 활동과괴시 쏘일네일의 휨저항성을 고려했지만 쏘일네일의 인장력 및 전단력 산정 시 복잡한 파괴규준을 따라야 한다.

3.1 쏘일네일의 인장력만 고려한 해석법

3.1.1 Davis법(Shen et al., 1981)

사면의 활동과괴면을 가정하여 활동과괴블록을 보강 블록

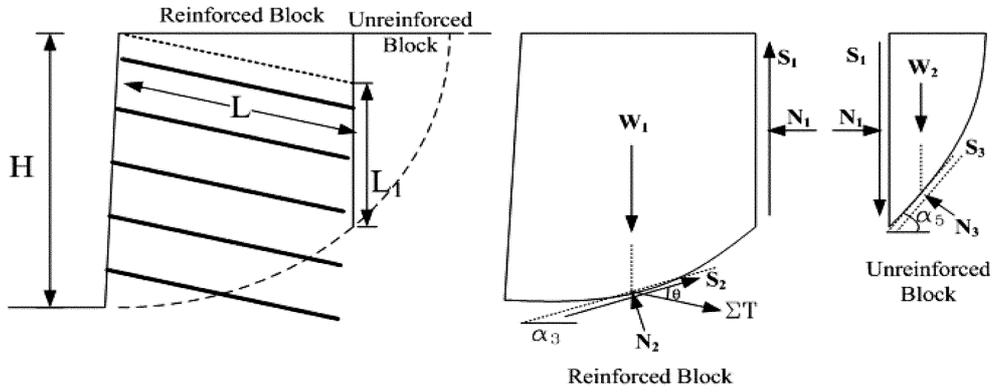


그림 5. Davis법

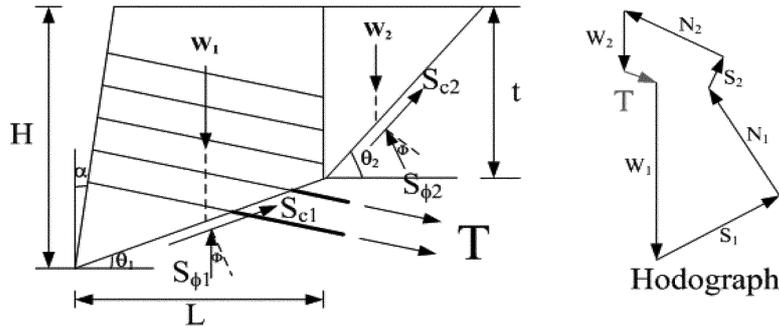


그림 6. German법

과 비보강 블록으로 나뉘고 각 블록은 활동을 일으키는 힘과 저항하는 힘의 분력으로 나누어 안정해석을 실시하며 이때 쏘일네일은 축방향의 인장력으로만 사면 활동에 저항한다(그림 5)는 가정하에 해석한다.

3.1.2 German법(Stoker et al., 1979)

사면의 활동과 파괴면의 가정시 보강블록과 비보강블록에서의 활동과 파괴각을 나누어서 가정한다. 비보강블록의 활동과 파괴각은 란킨의 주동과 파괴이론을 적용하여 $\theta_2=45+\theta/2$ 로 결정하고 θ_1 을 결정한다.

활동과 파괴면 외측까지 적용된 쏘일네일의 인장력을 합산하여 활동블록의 평형에 소요되는 인장력과 비율로써 안전율을 산정한다(그림 6).

3.1.3 FHWA법(Federal Highway Administration, 1996)

FHWA법은 파괴면에서의 한계평형 개념을 기초로 쏘일네일의 보강효과는 보강표면과 연결된 쏘일네일 머리부의 강도, 쏘일네일 강봉의 강도, 쏘일네일-그라우트-지반과의 인발저항을 고려하여 안전율 계수를 결정하여 산정한다. 또한 사면의 활동 파괴는 힘의 평형에 기초한 직선형으로 파괴면을 가정하여 활동하려는 블록A와 저항하는 블록B로 이뤄진다고 가정하였다(그림 7).

[BLOCK A]

$$\sum F_{x_A} = 0;$$

$$I \cos \beta + (T_A - T) \cos \theta + c_U L_A \cos \alpha_A / F - R_A \sin(\alpha_A - \phi) = 0$$

$$\sum F_{y_A} = 0;$$

$$W_A + (T_A - T) \sin \theta - I \sin \beta - c_U L_A \cos \alpha_A / F - R_A \sin(\alpha_A - \phi) = 0$$

[BLOCK B]

$$\sum F_{x_B} = 0;$$

$$I \cos \beta + (T_B - T) \cos \theta + c_U L_B \cos \alpha_B / F - R_B \sin(\alpha_B - \phi) = 0$$

$$\sum F_{y_B} = 0;$$

$$W_B + (T_B - T) \sin \theta - I \sin \beta - c_U L_B \cos \alpha_B / F - R_B \sin(\alpha_B - \phi) = 0$$

각각의 방정식을 연립하여 미지수를 소거하면 식 (9)와 같다.

$$[1 + \tan(\beta) \tan(\alpha_A - \phi)] \left\{ \begin{array}{l} [-W_B - (T_B + T) \sin \theta + c_U L_B \sin \alpha_B / F] \\ \tan(\alpha_B - \phi) + (T_B + T) \cos(\theta) + c_U L_B \cos(\alpha_B) / F \end{array} \right\}$$

$$= [1 + \tan(\beta) \tan(\alpha_B - \phi)] \left\{ \begin{array}{l} [W_A + (T_A - T) \sin \theta - c_U L_B \sin \alpha_A / F] \\ \tan(\alpha_A - \phi) - (T_A - T) \cos(\theta) - c_U L_A \cos(\alpha_A) / F \end{array} \right\} \quad (9)$$

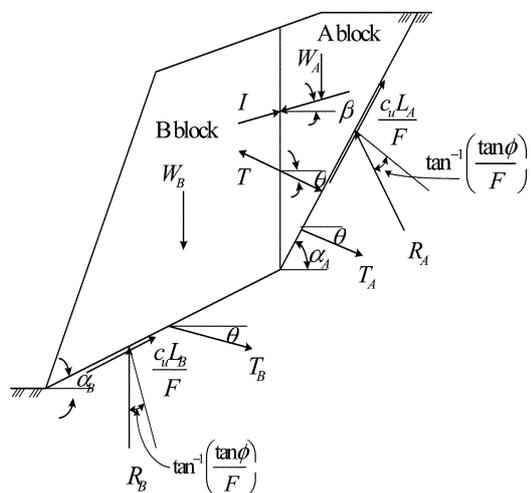


그림 7. FHWA 설계법의 Force diagram

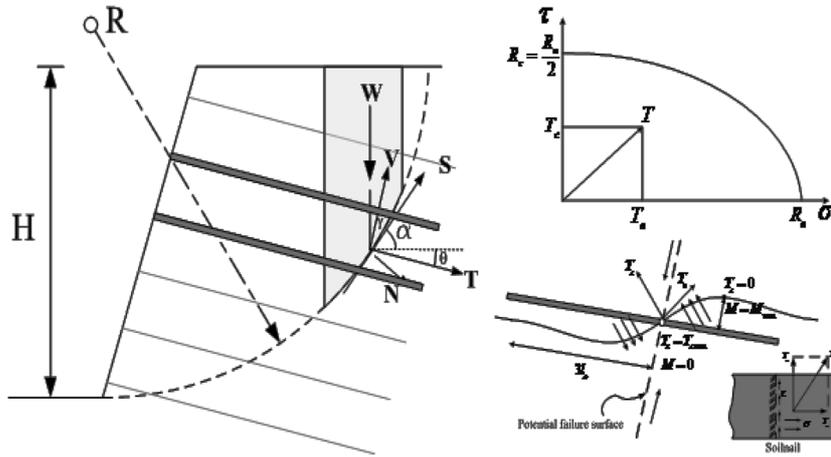


그림 8. French법

식 (9)의 F값이 안전율이다.

3.2 쏘일네일의 인장력과 전단력을 고려한 해석법

3.2.1 French법(Schlosser, 1982)

쏘일네일의 항복규준과 파괴규준에 따라 발휘 인장력과 전단력을 적용하여 해석한다(그림 8). 흙의 전단저항력, 흙-네일의 마찰규준, 흙-네일 간의 수직방향 상호작용, 네일의 강도에 의하여 파괴규준 내에서의 인장력 및 전단력을 산정한다. French법은 Schlosser가 제안한 타원형의 네일 강도 규준을 따라 전단력을 산정한다.

3.3 쏘일네일의 휨저항을 고려한 수정 FHWA법

쏘일네일로 보강된 사면의 활동 시 쏘일네일은 휨에 대하여 저항을 하며 이때 휨저항력은 최대인장력과 휨모멘트의 극한 관계에 따라서 최대인장력과 최대휨모멘트가 결정되고 이때 결정된 휨모멘트를 통하여 쏘일네일의 전단력으로써 휨저항성을 나타낼 수 있다(식 (1), 식 (2), Jewell & Pedley, 1990). 본 연구에서는 FHWA 설계법을 바탕으로 파괴면을 지나는 쏘일네일의 축방향에 수직으로 전단력이 발휘된다고 가정하였다. 각 쏘일네일의 전단력을 수평·수직방향 분력으로 평형방정식에 추가하였으며, 각각의 평형방정식을 연립하여 쏘일네일보강사면의 안전율을 스프레드 시트를 이용한 수

계산으로 산정하였다. 쏘일네일보강사면에서 발생하는 힘의 요소는 그림 9와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (10)과 같이 수평력, 수직력에 대한 힘의 평형방정식으로 나타낼 수 있다.

[BLOCK A]

$$\begin{aligned} \sum Fy_A &= 0; \\ W_A + (T_A - T) \sin \theta - I \sin \beta - c_U L_A \sin \alpha_A / F - R_A \cos(\alpha_A - \phi) \\ &+ (T_c - T_{ac}) \sin(90 - \theta) = 0 \\ \sum Fx_A &= 0; \\ I \cos \beta + (T_A - T) \cos \theta + c_U L_A \cos \alpha_A / F - R_A \cos(\alpha_A - \phi) \\ &+ (T_c - T_{ac}) \sin(90 - \theta) = 0 \end{aligned}$$

[BLOCK B]

$$\begin{aligned} \sum Fx_B &= 0; \\ I \cos \beta + (T_B - T) \cos \theta + c_U L_B \cos \alpha_B / F - R_B \sin(\alpha_B - \phi) \\ &+ (T_{bc} + T_c) \cos(90 - \theta) = 0 \\ \sum Fy_B &= 0; \\ W_B + (T_B - T) \sin \theta - I \sin \beta - c_U L_B \sin \alpha_B / F - R_B \cos(\alpha_B - \phi) \\ &- (T_{bc} + T_c) \sin(90 - \theta) = 0 \end{aligned}$$

각각의 방정식을 연립하여 미지수를 소거하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} &[1 + \tan(\beta) \tan(\alpha_A - \phi)] \\ &\left\{ \begin{aligned} &[-W_B - (T_B + T) \sin \theta + c_U L_B \sin \alpha_B / F + (T_{BC} + T_C) \sin(90 - \theta)] \\ &\tan(\alpha_B - \phi) + (T_B + T) \cos(\theta) + c_U L_B \cos(\alpha_B) / F + (T_{BC} + T_C) \sin(90 - \theta) \end{aligned} \right\} \\ &= [1 + \tan(\beta) \tan(\alpha_B - \phi)] \\ &\left\{ \begin{aligned} &[W_A + (T_A - T) \sin \theta - c_U L_A \sin \alpha_A / F + (T_C - T_{AC}) \sin(90 - \theta)] \\ &\tan(\alpha_A - \phi) - (T_A + T) \cos(\theta) - c_U L_A \cos(\alpha_A) / F + (T_C + T_{AC}) \sin(90 - \theta) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 F가 수정 FHWA 방법을 이용한 쏘일네일보강사면 안전율이다.

4. 사례를 통한 비교 분석

본 연구에서 제안된 수정 FHWA법과 쏘일네일의 휨저항

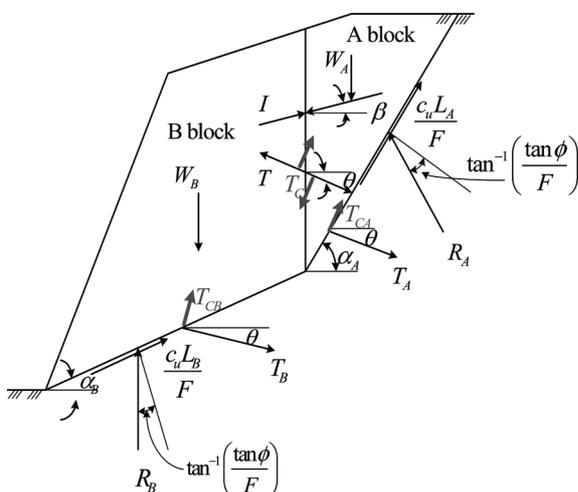


그림 9. 수정 FHWA법을 이용한 쏘일네일사면해석

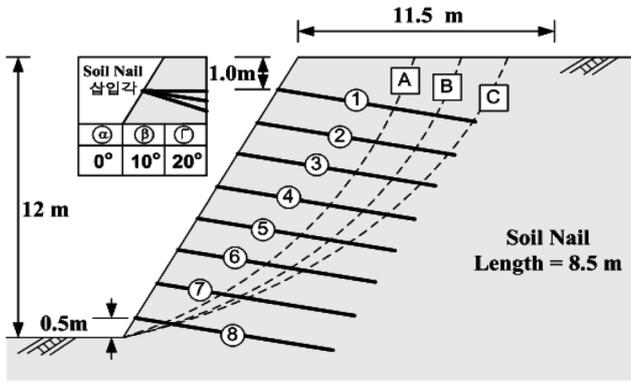


그림 10. 사례 분석 비교를 위한 사면의 대표 단면

성을 고려하지 않은 기존의 해석 결과와의 비교를 위하여 일반적인 사면 사례를 바탕으로 사면 활동 파괴에 의한 쏘일네일의 극한수평지지력의 영향 및 기타 사면의 파괴면과 지층조건 변화에 따른 사면의 안정성 영향을 다양한 조건을 통하여 비교·분석하였다. 적용된 대표단면은 그림 10과 같고 높이 12m, 경사 60°의 사면을 적용하였다. 지반은 풍화토지반으로 가정하여 습윤단위중량 20kN/m³, 내부마찰각 35°, 점착력 5.0kN/m²로 하였다. 쏘일네일의 적용 물성치는 일반적인 쏘일네일로 표 1과 같고 수평, 수직간격은 1.5m로 하였다. 파괴면에 따른 쏘일네일의 조건에 대한 변화를 확인하기 위해 [A]~[C]의 경우에 쏘일네일경사 0°, 10°, 20°를 각각 해석하였다.

본 연구에서 제안된 수정 FHWA법과 기존의 해석방법 중 쏘일네일의 인장력만을 고려한 해석 결과를 비교한 결과는 표 2와 같다. 수정 FHWA법에 적용될 쏘일네일의 보강력의 산정은 그림 4에서 제안된 극한수평지지력 산정방법 중 Jewell & Pedley(1990)과 O'Neill & Murchison(1984), 그리고 Wang-Reese의 산정법을 선정하여 순수모멘트와 최대인장력의 관계를 통하여 산정하였다. 안정해석은 그림 10의 대

표단면에서 파괴면 [A]~[C]와 쏘일네일경사 0°, 10°, 20°의 각각의 조건을 스프레드 시트를 이용하여 직접 계산하였다.

기존 FHWA법과 각 극한수평지지력 산정식을 적용한 수정 FHWA법을 이용한 해석결과 Wang-Reese 산정식을 적용한 해석시 안전율의 증가가 가장 컸다. 이는 지반의 극한수평지지력 산정값이 쏘일네일의 휨저항성을 고려한 해석시에 중요하다는 결과를 나타낸다. 또한 휨저항에 의한 전단력을 활동파괴면 밖에 있는 쏘일네일의 길이가 짧을수록 안전율에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 쏘일네일의 인장력 및 전단력의 산정시 네일의 강도 기준(그림 1)에서 알 수 있듯이 발휘 인장력이 작을수록 상대적으로 발휘 전단력은 증가하며, 활동파괴면 외측의 길이에 비례하는 발휘 인장력은 활동파괴면 외측의 길이가 짧을수록 발휘 전단력은 증가하게 된다.

본 연구에서 제안한 수정 FHWA법과 기존의 쏘일네일 사면안정 해석법과의 비교를 위하여 임의의 대표단면에서 파괴면 [B], [C]의 조건으로 각각의 해석법(그림 8, Davis법, German법, FHWA법)으로의 해석결과를 비교하였다. 이에 수정 FHWA법은 사면의 활동 파괴에 대한 쏘일네일의 휨저항을 Wang-Reese가 제안한 극한수평지지력을 통하여 산정하고 휨모멘트와 인장력의 관계에 준하여 보강력을 산정하고 힘의 평형이론식에 의해 안정성 해석에 고려하였다.

해석결과는 표 3과 같이 수정 FHWA법이 인장력만을 고려한 해석법인 Davis법과 기존 FHWA법에 비해 안전율의 증가 효과를 보였다. 기존 FHWA법의 해석시에는 쏘일네일의 인장력만을 고려하여 해석을 하였으며 수정 FHWA법의 해석시에는 쏘일네일의 인장력과 휨저항성을 고려한 전단력을 산정하여 해석하였다.

그 결과 기존 FHWA법보다 10~16%의 안전율의 증가가 나타났으며 쏘일네일의 삽입각이 10°의 경우에 증가폭이 가장 컸다. Davis법의 해석결과와 비교하면 33~39%의 증가폭

표 1. soil nail parameter

지름 D(m)	항복응력 σ_y (kN/m ²)	탄성계수 E(kN/m ²)	단면2차모멘트 (mm ⁴)	순수모멘트 (M, kN·m)	순수인장강도 (Tp, kN)
0.025	200000	2100000	19200	0.52	98

표 2. 수정 FHWA 해석법을 이용한 각 조건에 따른 쏘일네일보강사면의 안전율 변화

파괴면	[A]			[B]			[C]		
	0°	10°	20°	0°	10°	20°	0°	10°	20°
극한수평지지력 삽입각									
기존 FHWA 법(휨저항 고려안함)	4.08	3.42	2.86	2.06	2.24	2.18	1.49	1.71	1.79
Jewell & Pedley 적용	4.08	3.42	2.86	2.09	2.26	2.20	1.50	1.75	1.83
O'Neill & Murchison 적용	4.08	3.42	2.86	2.14	2.30	2.22	1.52	1.81	1.88
Wang-Reese 적용	4.08	3.42	2.86	2.22	2.38	2.26	1.67	1.99	1.97
휨저항 적용시 안전율의 증가(%)	0%	0%	0%	7%	6%	4%	11%	14%	9%

표 3. 기존 쏘일네일사면 해석 결과와 수정 FHWA 법 해석결과의 비교

삽입각 파괴면	Davis 법			German 법			기존 FHWA 법			수정 FHWA 법 (Wang-Reese)		
	0°	10°	20°	0°	10°	20°	0°	10°	20°	0°	10°	20°
[B]	1.6	1.73	1.70	2.58	2.77	2.95	2.06	2.24	2.18	2.22	2.38	2.26
[C]	1.32	1.45	1.15	1.80	2.01	2.41	1.49	1.71	1.79	1.67	1.99	1.97

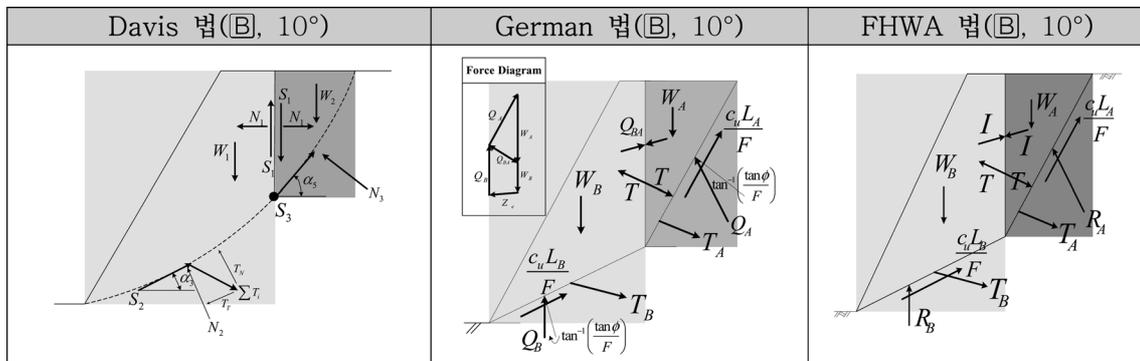


그림 11. 쏘일네일의 인장력만을 고려한 해석법 및 해석 과정

표 4. 상용 프로그램을 이용한 해석결과와 수정 FHWA법과의 비교

해석법 삽입각 과 파괴면	PCSTABL5			Slope/W			TALREN97			수정 FHWA법		
	0°	10°	20°	0°	10°	20°	0°	10°	20°	0°	10°	20°
㉠	1.451	1.448	1.445	1.650	1.635	1.571	1.610	1.660	1.720	2.220	2.380	2.260
㉡	1.544	1.543	1.541	1.598	1.799	1.850	1.860	1.880	2.090	1.670	1.990	1.970

을 나타냈다. German법은 다른 해석법과 달리 평형을 이룰 수 있는 소요의 인장력과 발휘인장력으로써 안전율을 산정하며 또한 활동과파괴면 가정시 비보강블록의 파괴경사를 결정 후 보강블록의 파괴경사를 결정하는 방법이므로 대표 단면에서의 파괴면 ㉠, ㉡와 상이한 파괴면을 가정하여 해석하였으므로 해석의 비교대상에서는 제외하였다. 해석결과 쏘일네일의 휨저항성을 고려한 수정 FHWA법이 기존의 쏘일네일의 인장력만을 고려한 해석결과 보다 안전율이 증가됨을 알 수 있다.

사면안정해석 시 사용되고 있는 상용프로그램인 Slope/W, PCSTABL5, TALREN97 프로그램을 사용하여 대표단면을 해석하고 수정 FHWA해석 결과와 비교하였다(표 4). 활동 파괴면을 주어진 조건으로 동일하게 가정하고 쏘일네일의 삽입위치와 각을 동일한 조건으로 적용하여 해석한 결과 힘의 평형조건에 의한 해석(Janbu method)법을 이용한 Slope/w와 PCSTABL5(Janbu method) 해석 결과에 비해서 수정 FHWA법 해석 결과의 안전율이 증가하였고 TALREN97의 해석 결과에 비하면 감소하는 경향이 있었다(표 4). TALREN97 해석 결과보다 수정 FHWA법 해석결과 안전율이 감소한 결과는 네일의 인발 및 전단력 산정시 French법이나 TALREN97은 Schlosser의 타원의 한계상태를 따르고 있으므로 쏘일네일의 인장력 산정시 비교적 큰 값을 산정하고 있음으로 사료된다. 이 결과에 대해서는 추후 연구 시 보다 많은 조건에 통한 연구가 요구된다.

상용프로그램을 이용한 해석결과는 그림 10에서와 같이, 인장력만을 고려하는 해석 결과보다 수정 FHWA 법을 이용한 해석결과가 안전율이 5~64%의 큰 폭으로 상승하였으며, TALREN97 프로그램의 해석 결과에 비하면 파괴면의 면적이 커서 파괴면 외측의 쏘일네일의 길이가 짧은 경우는 다소 안전율이 감소되는 경향을 확인하였다. 이는 쏘일네일의 보강력을 계산하는 기준의 차이로 발생한 것으로 사료된다. 결과적으로 쏘일네일의 휨저항을 고려한 해석법이 인장력만을 고려한 해석법에 비하여 안전율이 증가하는 결과를 확인할 수 있다.

5. 결 론

- 쏘일네일의 휨저항에 의한 전단력을 고려한 수정 FHWA법을 제시하였다.
- 쏘일네일의 인장력만 고려하는 FHWA 설계법과 비교했을 때, 쏘일네일의 전단력을 고려한 수정 FHWA 설계법의 안전율이 최대 14% 증가하였다.
- 파괴면을 지나는 쏘일네일의 인장력이 작을수록, 전단력을 발휘하는 쏘일네일의 개수가 많을수록 FHWA 법과 수정 FHWA 법의 안전율의 차이가 크게 발생하였다. 이는 파괴를 일으키는 힘에 저항하는 힘의 수평분력, 수직분력, 즉 보강력에 대한 쏘일네일의 전단력 비중이 커지기 때문이다.
- 쏘일네일의 삽입각이 변화로 인하여 토체 내에서 힘의 수평, 수직분력의 변화가 발생한다. 쏘일네일의 삽입각을 증가시킬 경우, 쏘일네일의 인장력에 의한 힘의 수직분력은 중력 방향으로 증가하고, 수평분력은 줄어든다. 그러나 전단력은 중력의 반대 방향의 수직력이 줄어드는 대신 수평력이 증가한다. 이와 같이 사면의 경사, 네일의 삽입각, 지반조건, 파괴면의 형상 등의 조건 변화시의 쏘일네일의 휨저항성의 영향에 대한 Parametric 연구가 추후로 추가되어야 할 것이다.
- 쏘일네일보강사면에서 쏘일네일의 휨저항성에 의한 영향은 극한수평지지력의 산정법에 따라 다르다. 또한 쏘일네일의 인장력만을 고려한 해석법에 비하여 안전율을 증가하는 경향을 보이며, 기존의 쏘일네일의 휨저항성을 고려한 French 법에 비해 수정 FHWA법은 간편하게 해석을 실시할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업 건설핵심기술연구개발사업 자유공모과제(C106A1000012-06A060001211)의 연구 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Elias, V. & Juran, I.(1988), *Manual for Practice for Soil Nailing*. Contract DTFH 61-85-C-00142, Federal Highway Admin., Washington D.C.
- Hansen, J. B. (1961). The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. *Danish Geotech. Inst. Bull.*, Vol. 12, Copenhagen, Denmark, pp. 5-9.
- Jewell, R. A., Miligan, G.W.E., Sarsby, R., and Dubois, D.D. (1984) Interaction between soil and grids. *Proc. Int. Symp. Polymer Gred Reinforcement*, Thomas Telford, London, England, pp. 18-29.
- Jewell, R.A. (1990) *Review of Theoretical Models for soil nailing, Performance of Reinforced Soil Structure*, British Geotechnical Society, Thomas Telford, pp. 265-275.
- Jewell, R.A. (1992) *Pedley, Analysis for soil reinforcement with bending stiffness, M J J Geotech Engng Div*, ASCE, Vol. 118, No. 10, pp. 1505-1528.
- Jewell, R.A. and Pedley, M.J. (1990) Soil nailing design-The role of bending stiffness. *Ground Engng.*, Vol. 22, No. 10, pp. 30-36.
- Juran, I. and Elias, V. (1991) *Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations*, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-89-193.
- Juran, I, Baudrand, G, Farrag, K. and Elias, V. (1990) *Design of Soil Nailed Retaining Structures*, Geotechnical special Publication No. 25. ASCE, pp. 644-659
- Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls (1996) Federal Highway Administration, available from Department of Transportation, NTIS No. PB97-136659, Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls. Report No. FHWA-SA-96-069R. Federal Highway Administration.
- Michalowski, R.L. (1997) Stability of uniformly reinforced slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 6, pp. 546-556.
- Murchison, J.M. and O'Neill, M.W. (1984) Evaluation of p-y relationships in cohesionless soils, *Proceedings, Symposium of Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, San Francisco, CA, pp. 174-191.
- Schlosser, F., Unterreiner, P., and Plumelle, C. (1992) *French Research Program CLOUTERRE on Soil Nailing, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE Geotechnical Publication No. 30, p. 739.
- Schlosser, F. (1983) Analogies et differences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en Terre Armee et par clouge du sol, *Annals de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, No. 418.
- Shen, C.K., Bang, S. Romstad, J.M., Kulchin, L., and Denatale, J.S. (1981) Field measurements of an earth support system. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, No. GT-12.
- Stocker, M.F., Korber, G.W., Gassler, G., and Gudehus, G. (1979), *Soil nailing, International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, 2, pp. 463-474.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. *Offshore Technology Conference*, Vol. II, Paper No. 2080, Houston, Texas, pp. 473-484.

(접수일: 2008.2.18/심사일: 2008.3.18/심사완료일: 2008.9.5)