

Spile-Reinforced 터널의 3차원 한계평형 안정해석법의 제시

Three-dimensional limit equilibrium stability analysis of spile-reinforced tunnel

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 심영종²⁾, Young-Jong Sim, 이완재³⁾, Wan-Jae Lee

¹⁾ 홍익대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

²⁾ 홍익대학교 공과대학 토목공학과 대학원, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

³⁾ (주)LG건설 기술연구소 부장, Senior Researcher, Const. Tech. Inst., LG Construction Co. LTD.

SYNOPSIS : This paper presents a method of three dimensional limit-equilibrium stability analysis of the spiling reinforcement system in soft ground tunneling. Shapes of the potential failure wedges for the shallow tunnel is assumed based on the results of three dimensional finite element analyses.

To examine the application of the proposed method of 3D stability analysis in practice, spile-reinforced tunnel face stability is evaluated and the predicted safety factors are compared with those by two dimensional limit-equilibrium analyses.

Key words : spiling reinforcement system, 3차원적 한계평형 안정해석, 3D FEM Analysis

1. 서론

Spiling reinforcement system은 매화의 터널굴진작업 이전에 막장면 주위를 따라 방사방향 및 굴진방향으로 先지반보강을 목적으로 천공을 실시하고, nail을 설치한 후 시멘트 그라우팅을 시행하여, 원지반 자체의 전단강도 증대를 통한 무지보 자립시간의 향상과 터널 주변지반의 발생변위 억제 및 지속적인 아칭작용 등을 유도하여 터널자체의 장기적인 안정화 및 지표면 침하억제 등을 도모하는 공법이다. 이와같은 선보강개념의 spiling reinforcement system은 미국 등지에서 주로 약한 암반터널의 장기적인 안정화를 위해 사용되어져 왔으나, 최근의 연구에서는 연약한 토사지반 터널공사로 까지 그 적용성이 점차 확대되고 있다.

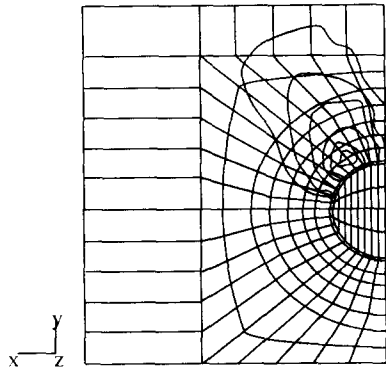
본 연구의 주된 목적은, spiling reinforcement system을 적용한 토사터널에 대한 3차원 안정해석체계의 정립이다. 이를 위해 일차적으로, 파괴면의 형상이 지표면까지 확장되는 얇은 spile-reinforced 터널의 경우에 한해, 터널굴착에 따른 막장주변의 3차원적 파괴거동등을 3D FEM 해석을 통해 분석하여 종·횡방향 파괴면등 예상 파괴흐뭇기의 형상을 가정한 다음, 한계평형이론에 근거한 3차원 안정해석체계를 정립하여 터널 막장면에 대한 전체 예상안전을 평가방법을 제시하였고, 이 결과를 기존의 2차원적 해석 결과등과 서로 비교·분석하였다.

2. 3D FEM 해석

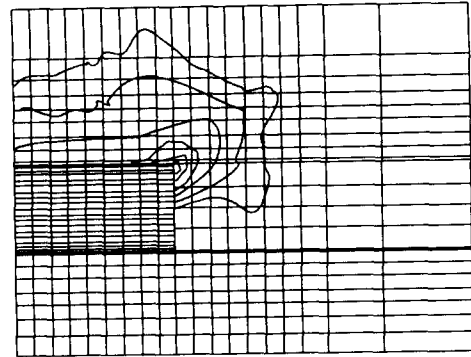
터널굴착에 따른 막장주변의 3차원 예상 파괴흐뭇기의 형상을 가정하기 위해 얇은 spile-reinforced 터널의 경우에 대해 3D FEM 해석을 수행하였으며, 이에 사용된 지반강도정수, 터널 및 spile(nail+시멘트 그라우팅 부분)의 제원은 표 1과 같다. 지반 및 shotcrete는 연속체 요소로, spile은 마찰저항만을 고려한 truss 요소로 모델링하였으며, FEM 해석결과는 그림 1과 같다.

표 1. 유한요소해석시 적용된 지반강도정수, 터널 및 pile의 제원

점착력 c (t/m ²)	내부마찰각 ϕ (°)	터널직경 D (m)	터널깊이 H (m)	pile길이 (l) m	pile 삽입각도	pile간격(m)	
						S	SR
1.8	30	6.0	12.0	6.0	30°	1.3	0.5



(a) 횡단면 전단변형률도



(b) 종단면 전단변형률도

그림 1. 3D FEM 해석결과

3. 3차원 한계평형 안정해석법

3D FEM 해석을 통해 얻어진 최대전단변형률 발생지점을 토대로, 보강된 토체(Element 3)와 보강되지 않은 토체(Element 1, 2 및 4)를 구분하여, 예상 파괴흄쇄기의 형상과 작용하는 힘들을 그림 2와 같이 가정하였다. 횡방향 예상 파괴면의 형상은 pile이 터널주위를 그리는 궤적과 α_1 의 각도를 갖는 직선과의 교차점(A_1)을 통과하는 2개의 직선형태($\alpha_1 \leq \alpha_2 < 90^\circ$)로 가정하였고, 종방향 예상 파괴면의 형상은 굴진방향으로는 pile길이의 수평방향 성분만큼 파괴면이 진행되어 A_2 지점에서 α_4 의 각도($\alpha_3 \leq \alpha_4 < 90^\circ$)로 지표면까지 확장되는 것으로 가정하였다.

보강된 토체인 Element(3)의 경우 z평면에서 x방향으로의 움직임은 없다고 가정하여 x방향의 전단력을 무시하였으며, 이외의 각 평면에 작용하는 전단력의 방향은 작용평면의 밀면 또는 예상 파괴면과 평행하다고 가정하였다.

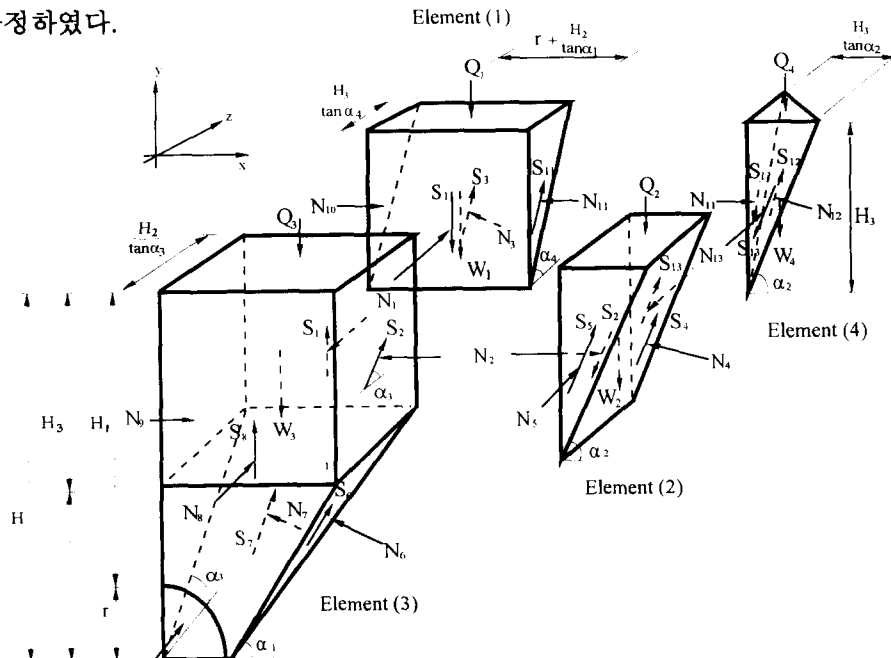


그림 2. 3차원 파괴흄쇄기에 작용하는 힘들

3.1 Element(3)의 정적평형조건

그림 2에 표시된 Element(3)에 작용하는 힘들을 정리하면 다음과 같다.

$$N_1 = \frac{1}{2} K_a \gamma H_3^2 \left(r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right), \quad S_1 = \beta_1 N_1, \quad (0.0 \leq \beta \leq \tan \phi') \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot H_3^2 \cdot \frac{H_2}{\tan \alpha_3}, \quad S_2 = \beta_2 N_2, \quad (0.0 \leq \beta \leq \tan \phi') \quad (2)$$

$$N_8 = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \left(r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) - \frac{1}{6} \frac{H_2^2}{\tan \alpha_1} (2K_a \gamma H_2 + 3K_a \gamma H_3) - \frac{1}{4} \pi r^2 K_a \gamma H + \frac{1}{8} \pi r^3 K_a \gamma \quad (3)$$

$$S_8 = N_8 \tan \phi' + c' \left\{ H_3 \left(r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) + \left(2r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) \frac{H_2}{2} - \frac{\pi r^2}{4} \right\} \quad (4)$$

여기서, γ : 흙의 단위중량, K_a : 토압계수, c' , ϕ' : 평형상태를 유지하는데 필요한 흙의 전단강도정수

위의 식(1) 및 (2)에서 β_1 및 β_2 는 수직력과 전단력 사이의 비(ratio)로, 각각 보장되지 않은 토체 (Element 1, 2 및 4)에 대한 정적평형조건과 Mohr-Coulomb 파괴규준 등을 토대로 계산되며, 지면상의 제약으로 여타 모든 힘들에 대한 상세한 계산식은 생략하였다.

또한 좌우 대칭면에 작용하는 수직력 N_9 은 전단이 발생하지 않는 정지토압상태를 가정하여 계산되며, 구체식은 다음과 같다.

$$N_9 = \frac{1}{2} K_0 \gamma \frac{H_2 H_3^2}{\tan \alpha_3} + \frac{1}{2} K_0 \gamma \frac{H_2^2 H_3}{\tan \alpha_3} + \frac{1}{6} K_0 \gamma \frac{H_2^3}{\tan \alpha_3} \quad (5)$$

보장된 토체인 Element(3)에 작용하는 힘들에 대해 평형방정식을 정리하면,

$$\begin{aligned} N_6 \cos \alpha_1 + S_6 \sin \alpha_1 \sin \alpha_3 + N_7 \cos \alpha_3 + S_7 \sin \alpha_3 &= Q_3 + W_3 + S_8 - S_1 - S_2 \sin \alpha_3 \\ N_6 \sin \alpha_1 - S_6 \cos \alpha_1 \sin \alpha_3 &= N_9 - N_2 \\ S_6 \sin \alpha_1 \cos \alpha_3 - N_7 \sin \alpha_3 + S_7 \cos \alpha_3 &= N_1 - N_8 - P - S_2 \cos \alpha_3 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, W_3 및 Q_3 은 Element(3)의 자중과 지표면에 작용하는 상재하중이며, P 는 터널 내부에 작용하는 압축공기압의 합력이다.

그림 2에서 점 O에 대한 모멘트 평형조건을 추가하면 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_6 \cdot h_{N6} - S_6 \sin \alpha_1 \cdot h_{S6} + N_7 \cdot h_{N7} = P \cdot h_p + Q_3 \cdot h_{Q3} + W_3 \cdot h_{W3} + N_8 \cdot h_{N8} + S_2 \cdot h_{S2} - S_1 \cdot h_{S1} - N_1 \cdot h_{N1} \quad (7)$$

여기서, $h_p, h_{Q3}, h_{N8}, h_{W3}, h_{S2}, h_{N1}, h_{N6}, h_{S6}, h_{N7}, h_{Pw1}, h_{Pw6}, h_{Pw7}, h_{Pw8}$ 은 각 작용점으로부터 O점까지의 모멘트 거리이다.

따라서, 위의 식(6)와 (7)을 연립하여 풀면 결과적으로 작용력 N_6, S_6, N_7, S_7 을 계산할 수 있다.

3.2 전체안정성의 평가

3.1절의 기술내용을 토대로 예상파괴면에 작용하는 전체활동력을 결정하면,

$$S_D = S_3 + S_4 + S_6 + S_7 + S_8 + S_{12} \quad (8)$$

여기서, 힘 S_3 , S_4 및 S_{12} 는 각각 Element(1), (2) 및 (4)의 정적평형조건에 의해 구할 수 있다.

또한 S_D 에 대응하는 전체저항력은 Element(1), Element(2), Element(3) 및 Element(4)의 예상파괴면에 발휘되는 저항력의 합이므로 결국,

$$\begin{aligned} S_F = & (N_3 + N_4 + N_6' + N_7 + N_8 + N_{12}) \cdot \tan \phi' \\ & + c' \cdot \left\{ \frac{H_3}{\sin \alpha_4} \left(r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) + \frac{H_2}{\tan \alpha_3} \frac{H_3}{\sin \alpha_2} + \frac{H_2}{2 \tan \alpha_3} \frac{H_2}{\sin \alpha_1} + \frac{H_2}{2 \sin \alpha_3} \left(2r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) \right. \\ & \left. + \frac{H_3^2}{2 \tan \alpha_2 \tan \alpha_4 \cos \alpha_5} + H_3 \left(r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) + \left(2r + \frac{H_2}{\tan \alpha_1} \right) \frac{H_2}{2} - \frac{\pi r^2}{4} \right\} + \sum T_{TT} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $N_6' = N_6 + \sum T_{TN}$, $T_{TN} = T_T \sin(\alpha_1 + \theta_n - 90^\circ)$, $T_{TT} = T_T \cos(\alpha_1 + \theta_n - 90^\circ)$

$T_T = T_n \sin \theta$, θ_n : pile이 y축과 이루는 각도, θ : pile의 설치각도

이며, N_3 , N_4 및 N_{12} 는 각각 Element(1), (2) 및 (4)의 정적평형조건에 의해 구할 수 있다.

한계평형이론에 근거하여 제시된 본 연구 spiling reinforcement system의 3차원적 전체안정성은 식 (8)과 (9)를 토대로, 즉 예상파괴면을 따라서의 전체활동력과 발휘되는 저항력의 평형조건을 토대로 결정된다. 즉,

$$S_D = S_F \quad (10)$$

한편, 각 pile의 축방향을 따라 발휘되는 인장력(T_n)의 크기는 예상파괴면 바깥쪽에 위치한 pile의 유효길이를 따라 pile과 주변지반 사이에서 발휘되는 마찰저항을 토대로 결정되며, 여기서 최대마찰저항은 nail의 항복인장응력보다 작아야 한다. 여기서 T_n 의 계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$T_n = \pi d_{spile} l_n (\sigma_m \tan \phi' + c') \leq A_{nail} f_y \quad (11)$$

여기서, d_{spile} : pile직경, s : pile 설치간격(터널굴진방향), A_{nail} : nail의 단면적

l_n : n번째 pile의 유효길이, f_y : pile의 항복응력, σ_m : pile에 작용하는 평균수직응력

4. 분석 및 고찰

4.1 2차원적 안전율과 3차원 안전율과의 비교

본 연구 Spiling reinforcement system의 3차원적 한계평형이론에 근거하여 예측된 막장면에 대한 안전율과 Yasser(1982)이 제시한 2차원적 안전율을 같은 조건에서 서로 비교하였으며, 이에 적용된 지반강도정수, 터널 및 pile제원 등은 아래의 표 2와 같다.

표 2. 적용된 지반강도정수, 터널 및 pile의 제원

단위중량 γ (t/m^3)	점착력 c (t/m^2)	내부마찰각 ϕ ($^\circ$)	터널직경 D (m)	터널깊이 H (m)		pile길이 (l) m	pile 삽입각도	pile간격 s (m)
1.9	1.95	33	6.1	9.14	12.2	0.75D	30 $^\circ$	0.3~1.6

그림 3 및 4에 명시된 막장면에 대한 안전을 예측결과를 살펴볼 때, 터널깊이가 9.14m일 경우에는 3차원적 예상안전율이 2차원적 안전을 보다 11 ~ 20% 정도 높게 평가되는 경향을 보이고 있으나, 터널 깊이가 12.2m로 깊어질 경우에는 2차원적 안전율이 3차원적 안전을 보다 11 ~ 22% 정도 오히려 높게 평가됨을 알 수 있다. 따라서 한정적인 분석결과이긴 하나 막장면에 대한 안정성은 터널깊이가 깊을수록 더욱 신중히 검토되어야 함을 알 수 있다.

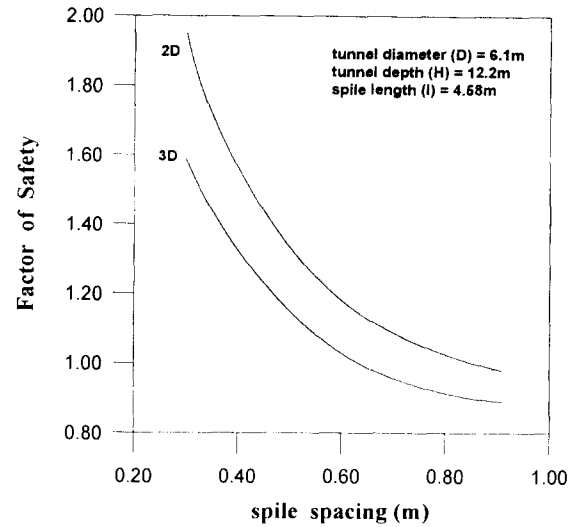
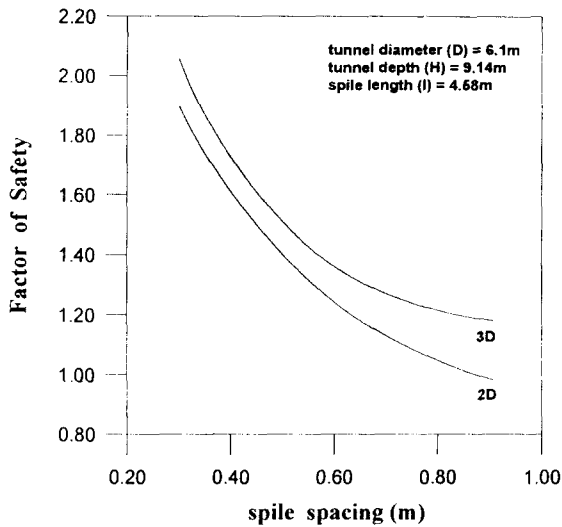


그림 3. 2차원 안전율과 3차원 안전율과의 비교(a) 그림 4. 2차원 안전율과 3차원 안전율과의 비교(b)

4.2 설계변수에 따른 영향

Spile reinforcement system을 적용하였을 경우 각 설계변수(터널깊이, pile 길이 및 pile 설치간격 등)에 따른 영향을 검토하였으며 이에 적용된 지반조건, 터널 및 pile의 제원 등은 아래의 표 3과 같다.

표 3. 적용된 지반조건, 터널 및 pile의 제원

단위 중량 γ (t/m^3)	내부 마찰각 ϕ ($^\circ$)	점착력 c (t/m^2)	터널 직경 D (m)	터널깊이 H (m)	nail 직경 (cm)	pile 직경 (cm)	pile길이 l (m)	pile설치 각도 θ ($^\circ$)	nail항복 인장강도 (t/m^2)	pile설치간격(m)	
										굴진방향	방사방향
1.8	30	1.5	6	D~3D	2.5	10	0.8D~1.3D	30	35000	0.6~1.6	0.5

Spile 길이에 대한 영향을 검토한 결과, 그림 5와 같이 굴진방향 pile 설치간격이 작고 pile 길이가 길수록 안전율은 더 높아지는 경향을 보이고 있다. 또한 굴진방향 pile 설치간격을 고정시키고 깊이비에 따른 pile 길이의 영향을 검토한 결과, 그림 6과 같이 깊이비가 증가할수록 안전율은 59 ~ 67% 정도로 감소하여 굴진방향 pile 설치간격이 커짐에 따른 감소비율(15 ~ 24% 정도) 보다 더욱 큰 감소율로 저하하는 경향을 보이고 있어, 결과적으로 터널깊이의 영향이 상당히 큼을 알 수 있다.

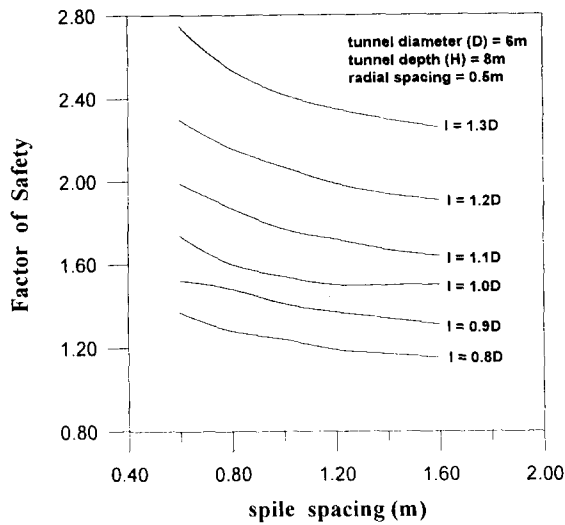


그림 5. spile길이에 따른 영향

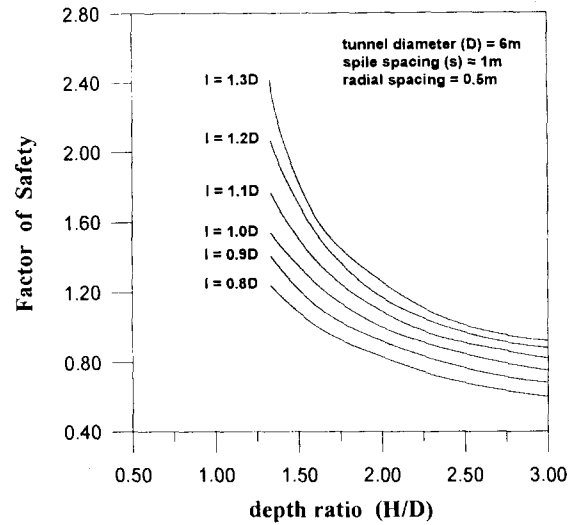


그림 6. 깊이비와 spile길이와의 관계

5. 결론

본 연구에서는 spiling reinforcement system을 적용한 얇은 토사터널의 경우에 한해, 터널굴착에 따른 막장주변의 3차원적 파괴거동등을 3D FEM 해석을 통해 분석하여 종·횡방향 파괴면등 예상 파괴흙 쪼개의 형상을 가정한 다음, 한계평형이론에 근거한 3차원 안정해석체계를 정립하여 터널 막장면에 대한 전체 예상안전을 평가방법을 제시하였고, 이 결과를 기존의 2차원적 해석결과등과 서로 비교·분석하였다.

참고문헌

1. 김홍택, 권영호(1995), "Soil Nailing공법의 터널공사에의 적용", 한국지반공학회지, 봄학술발표회 논문집.
2. 김홍택, 이완재, 심영중(1996), "Spile Reinforcement System의 3차원 거동에 관한 분석," 한국지반공학회지, 봄학술발표회 논문집.
3. Bang, S.(1984), "Spiling Reinforcement System in Tunneling," 4th Australia- New Zealand Conference on Geomechanics, Perth, Australia, pp.677~681.
4. Chen, R.H. and Chameau, J.L.(1982), "Three-Dimensional Limit Equilibrium Analysis of Slopes," Geotechnique 32, No. 1, pp.31~40.
5. Kim, H.T.(1984), "Development of Lateral Earth Pressures along a Pile Subjected to Lateral Loading in Cohesionless and Cohesive Soils," M.S. Thesis, Univ. of Notre Dame, U.S.A.
6. Yasser, M.A.(1982), "Investigation of Spile Reinforcement Tunnels in Soft Grounds," M.S. Thesis, Univ. of Notre Dame, U.S.A.