

Soil Nailing 공법의 터널공사에의 적용 Application of Soil Nailing Method to Tunnel Construction

김홍택¹⁾, HONG-TAEK KIM
권영호²⁾, YOUNG-HO KWON

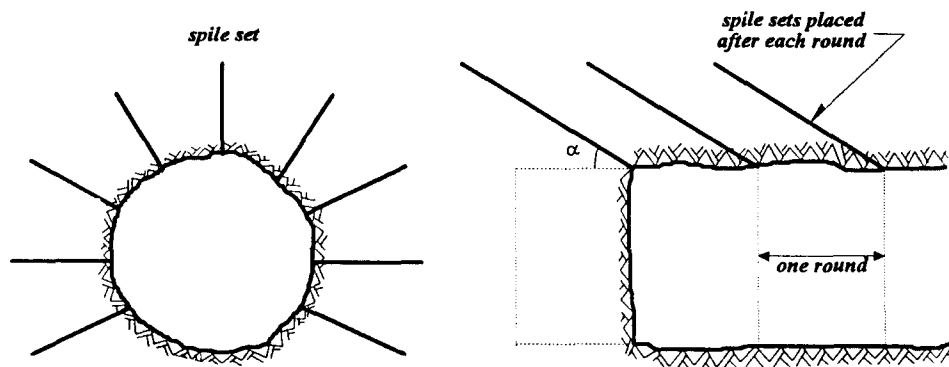
¹⁾홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hong-Ik University

²⁾홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hong-Ik University

SYNOPSIS : Spiling reinforcement system has been effectively used in tunneling to stabilize a weak rock mass by reducing deformations. Spiling generally involves placing in predrilled holes fully grouted untensioned steel members such as 2.5 to 3.8cm diameter rebars ahead of the tunnel excavation. However various ground conditions may exist, and therefore stiffer reinforcing elements such as jet-grouted nails, large diameter nails or perforated steel pipe with subsequent pressure grout could potentially be used. This study presents limit stability analysis formulation of the modified spiling reinforcement system, considering multi-layered ground conditions and effects of seepage pressures and bending stiffness. For design purposes several analyses are further carried out based on the developed procedure.

1. 서론

터널굴착시 무지보 자립시간(stand-up time)이 충분히 확보되지않을 경우, 터널자체는 물론 인접구조물의 안정이 문제시 될 수 있다. 더우기 터널의 설치심도가 그다지 깊지 않고, 인근에 건물들이 밀집한 도심지의 경우라면 더욱 문제시 될 수 있다. 그러므로 이러한 상황에서는 터널 굴착직후에 주변지반을 보강하는 개념의 공법 보다는, 터널 굴착이전에 선보강(pre-reinforcement) 할 수 있는 공법이 더욱 유용할 것이며, *spiling reinforcement system*(그림1) 이라 불리우는 터널공법이 이와같은 목적을 위해 제시된 바 있다^{3,4)}.



<그림 1. spiling reinforcement system 개요>

*spiling reinforcement system*의 주된 구조적 요소는 터널주변의 원지반, 저항력을 발휘하는 *spile*(nail + grouting), 슛크리트 및 와이어매쉬등으로서 기본적인 메카니즘은 soil nailing 공법과 유사하다. *spiling reinforcement system*은 매회의 굴착작업 이전에 막장면 주위를 따라 방사(radial)방향 및 터널굴진방향으로 선지반보강 목적의, 천공, *spile* 설치 및 시멘트 그라우팅등을 시행하여, 원지반자체의 전단강도 증대를 통한 무지보 자립시간의 향상, 또한 터널주변지반의 발생변위 억제 및 지속적인 아칭작용등을 유도하여 터널자체의 장기적인 안정화 및 지표면 침하억제를 도모하는 공법이다. *Spiling Reinforcement System*에 일반적으로 사용되는 *nail*의 직경은 2.5 ~ 3.8cm, 길이는 4.6 ~ 6.1m 정도이다. 또한 매회의 터널굴착거리에 해당되는 *spile*의 설치간격은 0.6 ~ 1.5m 정도이고, 터널굴진방향에서 30° 정도 경사지게 설치된다. *spiling reinforcement system*은 약한 암반의 터널굴착에 주로 적용되어 왔으나⁴⁾, 지반조건등의 변화에 따라서는 강성이 비교적 큰 *spile*(jet-grouted nail, 직경이 큰 *nail* 또는 perforated steel pipe + pressure grouting)의 적용도 필요시 될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 다층지반조건 및 침투수압의 영향, 휨모멘트 및 전단력등의 영향을 고려한 *modified spiling reinforcement system*의 안정해석

범을 제시하였으며, 설계에 참고가 될 몇가지 분석을 아울러 수행하였다.

2. 안정해석법

본 연구 해석법은 토질정수가 서로 다른 $l+m+n$ 개의 토층으로 구성된 지반을 대상으로 하였다. 또한 근사적이긴 하나 A-Aish¹⁾가 균질한 지반의 터널에 대해 유한요소해석을 통해 제시한 최대전단변형을 발생지점을 토대로, 보강된 토체(element 2, 각도 α_1)와 보강되지 않은 토체(element 1, 각도 α_2)를 구분하여 예상파괴면 각도를 가정하였으며, 범위는 $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 90^\circ$ 이다.

2.1 힘의 평형조건

예상 파괴흙체기에 작용하는 모든 힘들(그림2)의 평형조건에 의해,

$$N_3 = (W_1 + Q_1 + S_1) \cos \alpha_2 + (N_1 + P_{w1}) \sin \alpha_2 - P_{w3} \quad (1)$$

$$S_3 = (W_1 + Q_1 + S_1) \sin \alpha_2 - (N_1 + P_{w1}) \cos \alpha_2$$

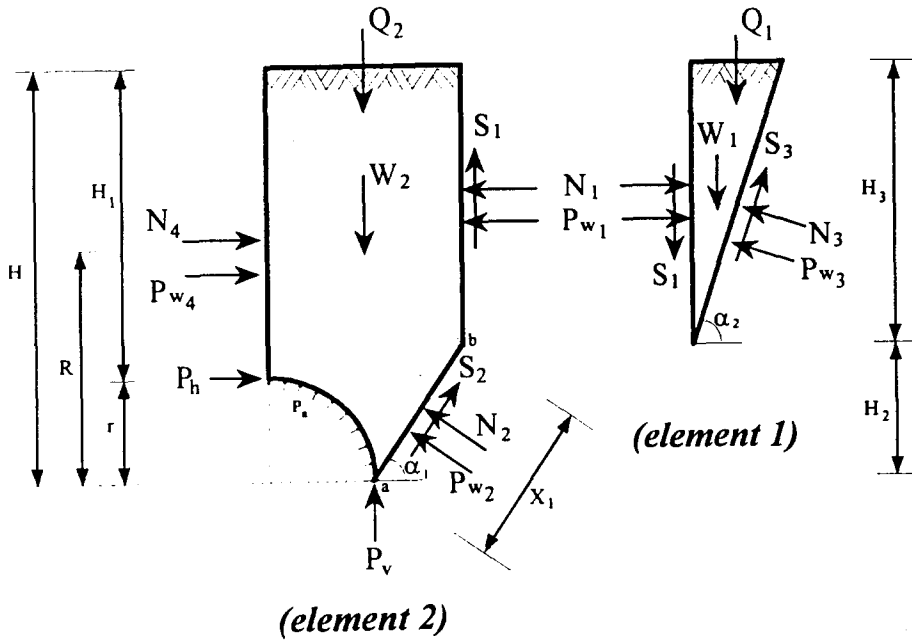
식(1)에서 P_{wi} 는 각각의 침투수압합력을 의미하며, element 1의 자중 W_1 은,

$$W_1 = \sum_{i=1}^l \gamma_i \cdot h_i \left[H_3 \cdot \cot \alpha_2 - \sum_{j=1}^{i-1} h_j \cdot \cot \alpha_2 - \frac{h_i \cdot \cot \alpha_2}{2} \right] \quad (2)$$

여기서, l = element 1을 구성하는 토층의 갯수

γ_i = i 번째 토층의 단위중량

h_i = i 번째 토층의 두께



<그림 2. 예상파괴흙체기>

또한 Q_1 은 element 1에 작용하는 상재하중이며, element 1 및 2사이의 경계면에 작용하는 수직력 N_1 및 전단력 S_1 은,

$$N_1 = \sum_{i=1}^l h_i \cdot \left(\frac{1}{2} K_{a1} \gamma_i h_i + \sum_{j=1}^{i-1} K_{a1} \gamma_j h_j \right) - P_{w1} \quad (3)$$

$$S_1 = \beta \cdot N_1$$

여기서, K_a = 각 토층에서의 주동토압계수

경계면에 작용하는 수직력과 전단력 사이의 관계를 정의하는 식(3)의 β 값은, element 1에서 예상되는 저항력과 활동력을 토대로 결정되며 계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$\beta = \frac{\{(W_1 + Q_1) \sin^2 \alpha_2 - (P_{W1} + N_1) \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 - c_{av}' H_1 + P_{W2} \tan \phi_{av}' \sin \alpha_2 - [(W_1 + Q_1) \cos \alpha_2 + (N_1 + P_{W1}) \sin \alpha_2] \cdot \tan \phi_{av}' \sin \alpha_2\}}{(N_1 \sin \alpha_2 (\cos \alpha_2 \tan \phi_{av}' - \sin \alpha_2))} \quad (4)$$

식(4)에 포함된 평균점착력 c_{av} 및 평균마찰계수 $\tan \phi_{av}$ 는 Woods등⁶⁾이 제안한 방식을 토대로 결정 가능하며, 계산식은 다음과 같다.

$$c_{av}' = \frac{c_{av}}{FS_c} = \left(\frac{1}{FS_c} \right) \left(\frac{1}{H} \right) \sum_{i=1}^{i+m+n} c_i h_i \quad (5)$$

$$\tan \phi_{av}' = \frac{\tan \phi_{av}}{FS_d} = \left(\frac{1}{FS_d} \right) \frac{\sum_{i=1}^{i+m+n} h_i \cdot \sigma_{wi} \cdot \tan \phi_i}{\sum_{i=1}^{i+m+n} h_i \cdot \sigma_{wi}} \quad (6)$$

여기서, c_i = i 번째 토층의 점착력

ϕ_i = i 번째 토층의 전단저항각

σ_{wi} = i 번째 토층에 작용하는 연직응력

만약 터널내부에 압축공기압 p_a 가 추가될 경우에는,

$$P_o = P_k = p_a \cdot r \quad (7)$$

또한 element 2의 예상파괴면에 작용하는 수직력 및 전단력도 힘의 평형조건에 의해 유도되며 이를 정리하면,

$$\begin{aligned} N_2 &= (Q_2 + W_2 - S_1 - P_o) \cos \alpha_1 - (N_1 + P_{W1} - N_4 - P_{W4} - P_k) \sin \alpha_2 - P_{W2} \\ S_2 &= (Q_2 + W_2 - S_1 - P_o) \sin \alpha_1 + (N_1 + P_{W1} - N_4 - P_{W4} - P_k) \cos \alpha_1 \end{aligned} \quad (8)$$

좌우대칭 해석상의 경계면에 작용하는 수직력은 전단이 발생되지 않는 정지토압상태(K_o condition)로 가정되며, 계산식은 다음과 같다.

$$N_4 = \sum_{i=1}^{i+m} h_i \cdot \left(\frac{1}{2} K_{oi} \gamma_i h_i + \sum_{j=1}^{(i-1)} K_{oj} \gamma_j h_j \right) - P_{W4} \quad (9)$$

식(8)에 포함된 element 2의 자중 W_2 는, 예상파괴표면을 기하학적 형상에 따라 직사각형, 사다리꼴 및 곡선부분등의 3지역으로 구분지어 각각 계산하는 방식에 의해 결정된다. 즉,

$$W_2 = W_a + W_b + W_c \quad (10)$$

$$\text{여기서, } W_a = \sum_{i=1}^i \gamma_i \cdot h_i \cdot (r + x_1 \cos \alpha_1)$$

$$W_b = \sum_{i=1}^m \left[\gamma_i h_i \left(r + x_1 \cos \alpha_1 - \sum_{j=1}^{(i-1)} h_j \cot \alpha_1 - \frac{h_i^2 \cot \alpha_1}{2} \right) \right]$$

$$W_c = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \left[h_i \cdot \left(r + \cot \alpha_1 \sum_{j=1}^i h_j \right) - A_i - \frac{h_i^2 \cot \alpha_1}{2} \right]$$

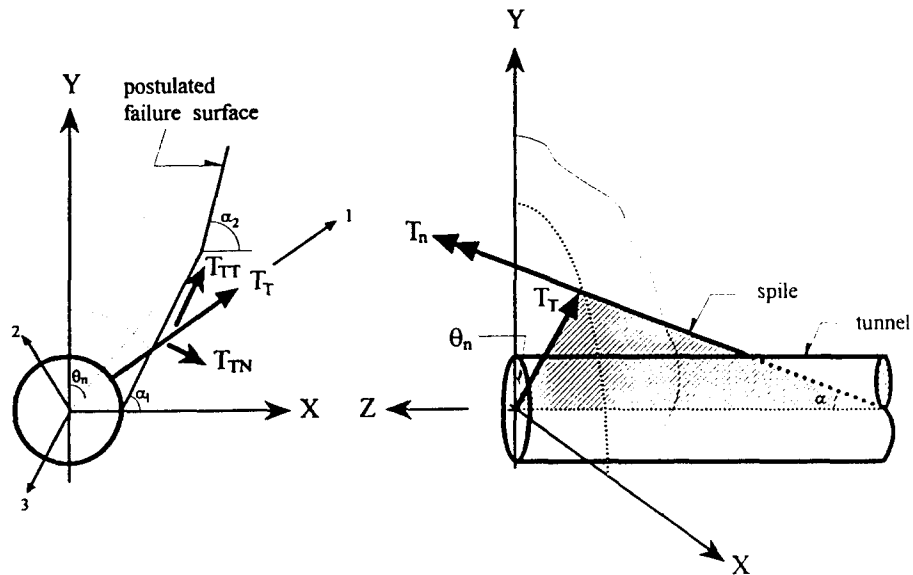
$$A_i = \int_{\sum_{j=1}^{i-1} h_j}^{\sum_{j=1}^i h_j} \sqrt{r^2 - z^2} dz$$

결국 예상파괴면에 작용하는 전체활동력은,

$$S_D = S_2 + S_3 \\ = (Q_2 + W_2 - S_1 - P_o) \sin \alpha_1 + (N_1 + P_{W1} - N_4 - P_{W4} - P_R) \cos \alpha_1 + (W_1 + Q_1 + S_1) \cdot \sin \alpha_2 - (N_1 + P_{W1}) \cos \alpha_2 \quad (11)$$

또한 S_D 에 대응하는 전체저항력은, element 1 및 2 각각의 예상파괴면을 따라 발휘되는 저항력의 합이므로,

$$S_R = S_{R1} + S_{R2} \\ = c_{av}' L + N_3 \tan \phi_{av}' + N_2' \tan \phi_{av}' + \sum_{N=1}^M T_{TT} \quad (12)$$



<그림 3. pile에 관련된 힘들>

여기서, $S_{R1} = c_{av}' x_2 + N_3 \tan \phi_{av}'$

$$S_{R2} = c_{av}' x_1 + N_2' \tan \phi_{av}' + \sum_{N=1}^M T_{TT}$$

$$N_2' = N_2 + \sum_{N=1}^M T_{TN}$$

$$\sum T_{TN} = \sum T_T \cdot \sin(\alpha_1 + \theta_n - 90^\circ)$$

$$\sum T_{TT} = \sum T_T \cos(\alpha_1 + \theta_n - 90^\circ)$$

$$T_T = T_N \sin \alpha$$

$$L = x_1 + \frac{H_3}{\sin \alpha_2} = x_1 + x_2$$

$M =$ 예상파괴면을 통과하는 pile의 갯수

2.2 pile의 축방향 인장력 T_n

각 pile의 축방향을 따라 발휘되는 인장력 T_n 의 크기는 예상파괴면 바깥쪽에 위치한 pile의 길이(유효길이 l_n , 그림4)를 따라 발휘되는 마찰용력등을 토대로 결정되며, nail의 인장항복용력(tensile yield stress) f_t 보다는 작아야 한다. 여기서 T_n 의 계산식을 정리하면 다음과

같다.

$$T_n = \frac{\pi d_{spile} l_n (\sigma_m - \sigma_{avr}) \tan \phi_{av}' + c_{av}'}{s} \leq A_{nail} f_y \quad (13)$$

여기서, d_{spile} = spile 직경
 s = spile 설치간격(터널굴진방향, 그림4)
 A_{nail} = nail 단면적
 σ_{avr} = spile에 작용하는 침투수압

또한 식(13)에 포함된 σ_m 은 spile에 작용하는 평균수직응력을 의미하며, 계산식은 아래와 같다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \quad (14)$$

식(14)에 포함된 σ_2 및 σ_3 는, x-y-z축 공간상의 응력을 spile 축방향을 1축으로 한 1-2-3축 공간상으로의 응력변환을 토대로 결정된다.

2.3 휨모멘트 및 전단력

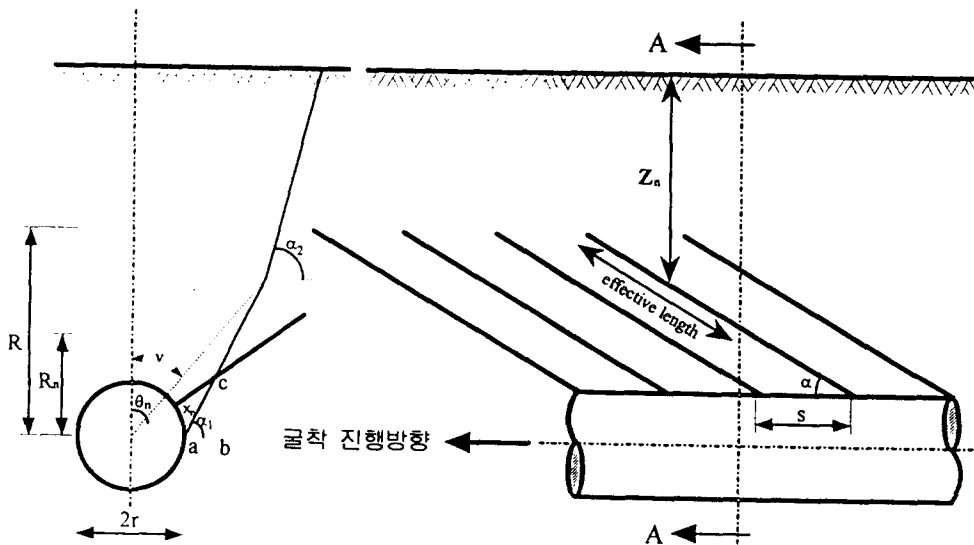
spile과 예상파괴면 교차지점 부근에서 예상되는 휨모멘트 및 전단력의 크기 결정은 참고문헌 7에 제시된 내용을 토대로 하였으며, 소성 거동의 경우에 한해 내용을 개략적으로 정리하면 다음과 같다.

대형직접전단시험을 통해, Pedley등은 nail을 따라 직각되게 발휘되는 수동토압형태의 지지응력 분포도를 제시하였으며, 지지응력의 최대값 $\sigma_b(\max)$ 의 크기는 안전측에서 local punching shear failure를 가정할 경우, Chai가 독립지지부재에 대해 제안한 다음식으로 부터 예측 가능하다.

$$\sigma_b(\max) = \frac{\sigma_m}{\cos \phi} \sigma_2 \left(\frac{1+k}{2} - \frac{1-k}{2} \sin(2\beta' + \phi) \right) \cdot \exp(2\beta' \tan \phi) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (15)$$

또한 지지응력의 최대값 $\sigma_b(\max)$, 최대전단력 $P_s(\max)$ 및 최대휨모멘트 $M(\max)$ 사이의 관계식을 정리하면,

$$\sigma_b(\max) = \frac{2 P_s(\max)}{d_{spile} l_p} = \frac{8 M(\max)}{d_{spile} l_p^2} \quad (16)$$



<그림4. modified spiling reinforcement system 기하학적 체계>

여기서 결정되어야 할 미지수는 $M_{(max)}$, l_p 및 $P_{r(max)}$ 등이다. 우선 $M_{(max)}$ 의 크기는, 주변흙의 경우와 마찬가지로 소성거동을 가정할 경우 nail 단면이 저항할 수 있는 최대허용휨모멘트로 제한된다. 본 경우처럼 축방향 인장력 및 휨모멘트가 복합적으로 작용하는 경우 원형 단면 nail이 저항할 수 있는 최대허용휨모멘트 $M_{(max)}$ 는 축방향 인장력의 영향이 포함되지 않은 경우의 완전소성휨모멘트 $M_p (= \frac{d_{nail}^3}{6} f_y)$ 보다는 크기가 감소하게 되며, 따라서 이에 해당되는 관계식을 유도·정리하면 다음과 같다.

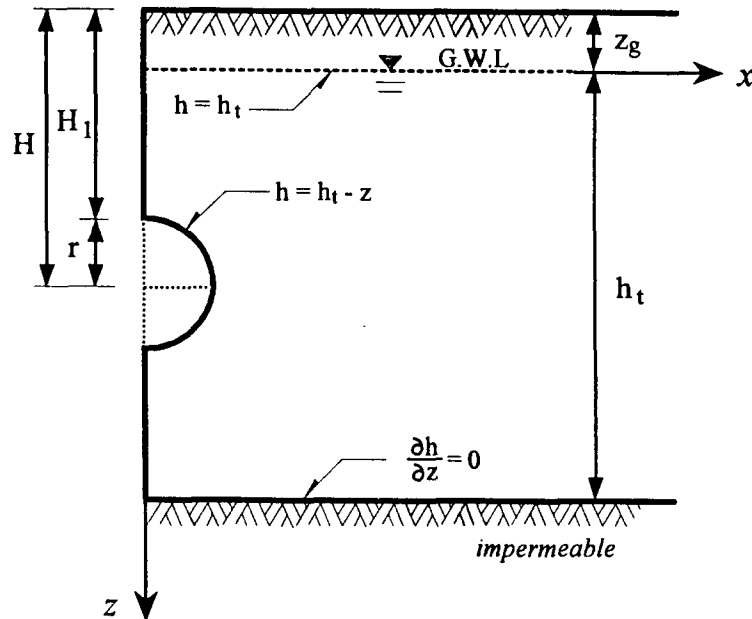
$$\frac{T_n}{P_p} = \frac{2}{\pi} \left[\left| \frac{M_{(max)}}{M_p} \right| \left\{ 1 - \left| \frac{M_{(max)}}{M_p} \right|^{\frac{2}{3}} \right\} + \sin^{-1} \left\{ 1 - \left| \frac{M_{(max)}}{M_p} \right|^{\frac{2}{3}} \right\} \right] \quad (17)$$

여기서, $P_p (= f_y \pi d_{nail}^2 / 4)$ 는 nail의 plastic axial capacity를 의미한다. 또한 식(16)에 포함된 전단영역 l_p 의 크기는, 식(17)로부터 결정되는 최대휨모멘트 $M_{(max)}$ 를 토대로 다음과 같이 결정되어 진다.

$$\frac{l_p}{d_{spile}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{f_y}{\sigma_{k(max)}} \left\{ 1 - \left(\frac{T_n}{P_p} \right)^2 \right\}} \quad (18)$$

2.4 예상파괴면 및 pile에 작용하는 침투수압

배수형 터널의 경우와 같이 지반내에서 물의 흐름이 예상되는 경우를 적절히 다루기 위해 본 연구에서는 Gray²⁾ 정상류 침투이론을 토대로 침투수압 계산식을 유도하였으며, 예상파괴면의 경우를 우선 정리하면 다음과 같다(그림5).



<그림 5. 침투류해석 경계조건>

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \gamma_w (h - h_t + z) \\ &= \gamma_w \left[z - \sum_{k=0}^{\infty} B_m \sin(Mz) \cdot \exp(-Mz) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{여기서, } B_m = \frac{z}{h_t} \int_{H-x_t-R}^{H-x_t+R} z \cdot \sin(Mz) \cdot \exp(-M \cdot z_c) dz$$

$$z_c = \sqrt{R^2 - (z - h - z_0)^2}$$

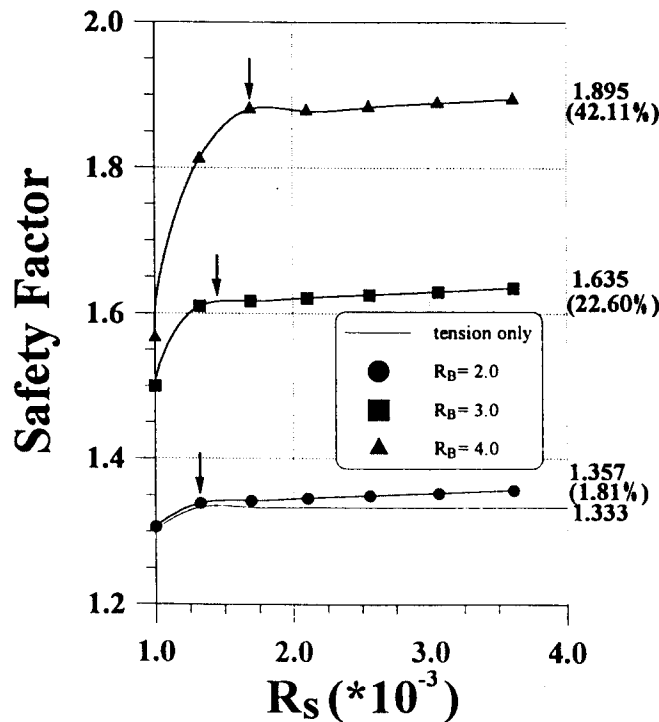
$$M = \frac{(2m+1)}{2h_i} \pi$$

또한 pile에 작용하는 침투수압은,

$$\sigma_{wr} = \frac{\text{COSEC } \alpha_n}{l_n} \int_{R_n \sin \theta_n}^{r \sin \theta_n} \sigma_w dz \quad (20)$$

2.5 전체안전성 평가

초기안전율($FS = FS_c = FS_\phi = H/L$) 및 예상파괴면의 경사각(각도 α_1 및 α_2)을 우선 가정한 다음, $\frac{S_R}{S_D} = FS_{new}$ 에 의해 계산되는 새로운 안전율과 반복적으로 비교하여 안전율 FS 값이 결정되며, 계속해서 각도 α_1 및 α_2 를 다양하게 변화시켜 최소안전율 FS_{min} 값을 최종적으로 찾게된다.

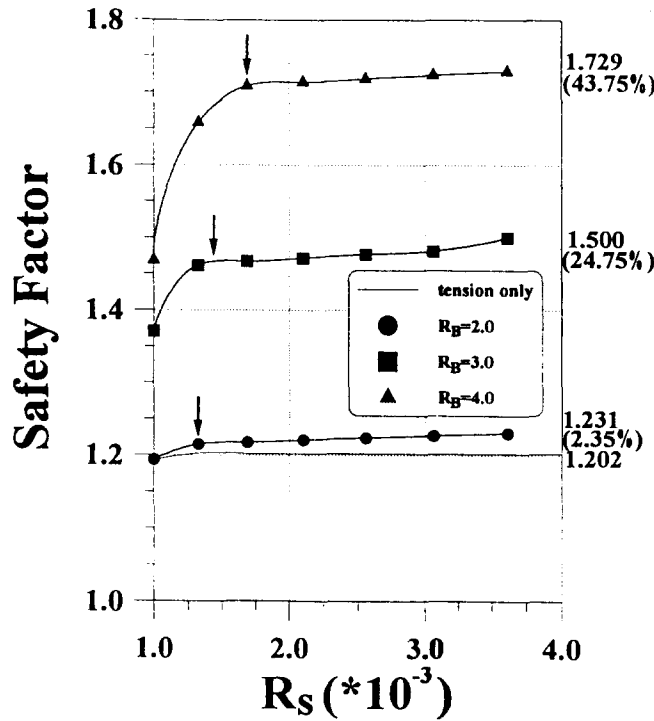


<그림 6. 건조시 보강재의 직경에 따른 영향>

3. 분석

spile과 예상파괴면의 교차지점에 발휘되는 휨모멘트 및 전단력의 크기는 pile(nail + grout) 직경 d_{pile} 과 nail의 직경에 따라 변화된다. 침투수압의 영향을 포함하지 않은 그림6의 결과들 우선 살펴보면, 정착비($R_B = \frac{d_{pile} \cdot l_n}{s \cdot s_r}$) 및 강도비($R_S = \frac{d_{nail}^2}{s \cdot s_r}$)값이 클수록 spiling reinforcement system을 적용한 보강터널의 최소안전율 FS_{min} 값은 증가하고 있으며, 인장력만을 고려한 경우($R_B=2.0$)에 비해 휨모멘트 및 전단력의 영향을 추가로 포함시킨 경우에는 R_B 값에 따라 FS_{min} 값의 증가율은 1.81%($R_B=2.0$)~ 42.11%($R_B=4.0$) 정도의 범위로 나타나고 있다. 이러한 현상은 pile 직경이 클수록 pile에 작용하는 지지용력의 최대값 $\sigma_{b(max)}$ 가 커지고 또한 nail의 직경이 클수록 nail의 항복인장

강도 f_y 가 커지는데 원인이 있다. 또한 R_B 값이 작을수록 R_S 값의 크기 변화가 FS_{min} 값에 미치는 영향은 점차 둔화됨을 알 수 있다. 아울러 R_S 값이 FS_{min} 값에 미치는 영향은 거의 일정범위로 한정되는 경향을 나타내고 있다. 즉 R_S 값이 1.32×10^{-3} 이상인 경우($R_B=2.0$ 인 경우), R_S 값이 1.45×10^{-3} 이상인 경우($R_B=3.0$ 인 경우) 또한 R_S 값이 1.70×10^{-3} 이상인 경우($R_B=4.0$ 인 경우) 각각에 대해, FS_{min} 값은 변화가 거의 없는 결과를 나타내고 있다. 계속해서 침투수압의 영향이 포함된 그림7의 결과를 살펴보면, 휨모멘트 및 전단력의 영향이 추가로 고려된 경우, 인장력만 고려한 경우에 비해 FS_{min} 값의 증가율은 2.35 ~ 43.75% 정도의 범위로, 침투수압을 무시한 그림6의 결과에 비해 휨모멘트등에 의한 영향 정도가 다소 큰 경향을 보이고 있으며, 이와같은 경향은 Schlosser⁵⁾등이 soil nailing 실험체제를 통해 밝힌 휨변형률의 증가 현상과 부분적으로 부합되고 있다.



<그림 7. 침투수 고려시 보강재의 적정에 따른 영향>

4. 결론

본 연구에서는 주로 약한 암반에 대해 효율적으로 이용되어온 선보강개념의 터널굴착공법을, 다양한 지반조건등에 대해 그 적용성을 확대하려는 시도가 이루어 졌다. 이를 위해 다층지반조건 및 침투수압의 영향, 휨모멘트 및 전단력등의 영향을 고려한 modified spiling reinforcement system의 안정해석법을 제시하였으며, 또한 설계에 참고가 될 몇가지 분석을 아울러 수행하였다.

참고문헌

- 1) A-Aish, Y.M.(1982), Investigation of Spile Reinforced Tunnels in Soft Grounds, M.S. Thesis, Univ. of Notre Dame.
- 2) Gray, H.(1958), "Contribution to the Analysis of Seepage Effects in Backfills," Geotechnique, Vol. 8, No. 4, pp. 166-170.
- 3) Korbin, G.E. and Brekke, T.L.(1976), " Model Study of Tunnel Reinforcement," ASCE, Jour. of Geotech. Eng., pp. 895-908.
- 4) Korbin, G.E. and Brekke, T.L.(1978), " Field Study of Tunnel Reinforcement," ASCE, Jour. of Geotech. Eng., pp. 1091-1108.
- 5) Schlosser et al.(1991), Soil Nailing Recommendations, French National Research Project Clouterre.
- 6) Woods, R.I. and Jewell, R.A.(1990), "A Computer Design Method for Reinforced Soil Structures," Geotextiles and Geomembranes, pp. 233-259.
- 7) 김홍택, 강인규, 이제우(1994), "Soil Nailing 공법의 안정해석 : 지반-보강재 상호작용의 영향," 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 593-596.