

## Spiling Reinforcement System의 3차원 거동해석에 관한 연구

### Study on Three Dimensional Stability Analysis of Spiling Reinforcement System

김홍택<sup>1)</sup>, Hong-Taek Kim

이완재<sup>2)</sup>, Wan-Jai Lee

심영종<sup>3)</sup>, Young-Jong Sim

<sup>1)</sup>홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

<sup>2)</sup>대림산업(주) 기술연구소, Institute of Technology, DaeLim Industries.

<sup>3)</sup>홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate student, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

개요(SYNOPSIS) : 본 연구에서는 *Modified Spiling Reinforcement System*을 적용한 토사터널에 대해 한계평형법에 의한 3차원적 안정해석체계를 정립하기 위한 일차적인 단계로서, 터널굴착에 따른 막장주변의 3차원적 파괴거동등에 대해 FLAC 프로그램해석을 통한 분석이 우선 수행되었다. 또한 FLAC 프로그램해석등 분석결과를 토대로 횡방향 예상파괴면의 형상을 가정한 다음 아칭효과(arching effects)를 고려한 토압이론에 근거하여, *Modified Spiling Reinforcement System*이 적용되는 경우 얕은터널과 깊은터널을 정량적으로 구분할 수 있는 이론식을 제시하였다. 아울러 얕은터널과 깊은터널의 구분을 위한 본 연구의 제시 이론식에 대한 적합성을 확인하기 위해, 깊이비 및 강도정수 등 설계상의 변수를 변화시켜 *Modified Spiling Reinforcement System*이 적용된 터널의 3차원 유한요소해석을 실시하고, 그 결과를 서로 비교·분석하였다.

#### 1. 서론

터널굴착시 무지보 자립시간(Stand-up Time)이 충분히 확보되지않을 경우, 터널자체는 물론 인접구조물의 안정이 문제시 될 수 있다. 더욱이 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 굴착 이전에 선보강(prereinforcement) 할 수 있는 공법이 더욱 유용할 것이며, *spiling reinforcement system*이라 불리는 터널공법이 이와같은 목적을 위해 제시된 바 있다.

*spiling reinforcement system*의 주된 구조적 요소는 터널주변의 원지반, 저항력을 발휘하는 pile(nail + grouting), 슛크리트 및 와이어매쉬등으로서 기본적인 매카니즘은 soil nailing 공법과 유사하다. *spiling reinforcement system*은 매화의 굴착작업 이전에 막장면 주위를 따라 방사(radial)방향 및 터널 굴진방향으로 선지반 보강목적의, 천공, pile 설치 및 시멘트 그라우팅등을 시행하여, 원지반자체의 전단강도 증대를 통한 무지보 자립시간의 향상, 또한 터널주변지반의 발생 변위 억제 및 지속적인 아칭작용등을 유도하여 터널자체의 장기적인 안정화 및 지표면 침하억제를 도모하는 공법이다. *spiling reinforcement system*에 일반적으로 사용되는 nail의 직경은 2.5~3.8 cm, 길이는 4.6~6.1 m 정도이다. 또한 매화의 터널 굴착거리에 해당되는 pile의 설치간격은 0.6~1.5 m 정도이고, 터널 굴진방향에서 30° 정도 경사지게 설치된다. *spiling reinforcement system*은 약한 압반의 터널굴착에 주로 적용되어 왔으나, 지반조건등의 변화에 따라서는 강성이 비교적 큰 pile(jet-grouted nail, 직경이 큰 nail 또는 perforated steel pipe + pressure grouting)의 적용도 필요시 될 것으로 판단된다. 따라서 다층지반조건 및 침투수압의 영향, 휨모멘트 및 전단력 등의 영향을 고려한 *Modified Spiling Reinforcement System*의 2차원 안정해석법이 필자등에 의해 기 제시된 바 있다.

본 연구에서는 *Modified Spiling Reinforcement System*을 적용한 토사터널에 대해 한계평형법에 의한 3차원적 안정해석체계를 정립하기 위한 일차적인 단계로서, 터널굴착에 따른 막장주변의 3차원적 파괴거동등에 대해 FLAC 프로그램해석을 통한 분석이 우선 수행되었다. 또한 FLAC 프로그램해석등 분석결과를 토대로 횡방향 예상파괴면의 형상을 가정한 다

음 아칭효과(arching effects)를 고려한 토압이론에 근거하여, *Modified Spiling Reinforcement System*이 적용되는 경우 얇은터널과 깊은터널을 정량적으로 구분할 수 있는 이론식을 제시하였다. 아울러 얇은터널과 깊은터널의 구분을 위한 본 연구의 제시 이론식에 대한 적합성을 확인하기 위해, 깊이비 및 강도정수 등 설계상의 변수를 변화시켜 *Modified Spiling Reinforcement System*이 적용된 터널의 3차원 유한요소해석을 실시하고, 그 결과를 서로 비교·분석하였다.

## 2. 얇은터널과 깊은터널의 판별

### 2.1 기본내용

일반적으로 터널굴착시 간접영역이 발생하여 지표까지 전단파괴면이 확장되는 경우를 얇은터널로 정의하고, 전단파괴면이 지중에서 폐합하여 간접영역이 지표까지 확장되지 않는 경우를 깊은터널로 정의한다.

그림 1은 깊은 모래지반에서 Trap Door의 강하에 따른 지반의 전단파괴 범위와 그때 발생하는 연직응력의 크기를 터널에 적용한 것으로서, 굴착에 따른 전단파괴면이 지표까지 확장되지 않고 터널상부  $H_2$ 의 높이에서 폐합되고 있다. 또한  $H_1$ 의 위치를 중심으로 그 하부는 전단파괴면을 중심으로 상대침하가 발생하며 하부쪽으로 갈수록 그 변위벡터는 증가하게 된다. 따라서 깊이  $H_1$  부터  $H_2$ (터널 천단부)까지는 전단저항이 점차적으로 증가하게 된다.

따라서 깊이  $H_1$ 은 등침하면이 되어 터널굴착과는 무관하게 자연퇴적시의 응력상태(geostatic stress)를 유지하게 되며, 등침하면이 발생하는 깊이  $H_1$  아래쪽에서는 전단저항등으로 인한 아칭효과가 유발되어 터널에 작용하는 연직응력은 감소하게 된다(그림 1의 곡선 bc). 결과적으로 터널이 깊은터널의 조건을 갖추기 위해서는 최소한  $H_1$ 의 토피두께를 확보해야 하고 즉 깊이  $H_1$  이하( $z_{max} < H_1$ )에 설치되면 깊은터널에 해당되며, 이와는 달리 터널이 깊이  $H_1$  이내( $z_{max} > H_1$ )에 설치되면 얇은터널에 해당된다. 따라서 터널은 아칭효과가 유발되는 시점인  $H_1$  위치에 있을 때 최대연직응력을 받게되고, 최대연직응력이 발생하는 지점이 결정되면 그점이 바로 얇은터널과 깊은터널의 구분점이 된다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 *Modified Spiling Reinforcement System*이 적용된 터널의 횡방향 및 종방향에 대해 2차원 FLAC 프로 그래프 해석을 각각 실시하였으며, 최대전단변형률의 발생지점을 연결한 해석결과등을 토대로 *Modified Spiling Reinforcement System*이 적용되는 경우 얇은터널과 깊은터널의 판별을 위한 횡방향 예상파괴면의 형상을 2개의 적선형태(그림 2)로 가정하였다. 판별을 위한 이론식의 유도등 구체적인 내용은 다음과 같다.

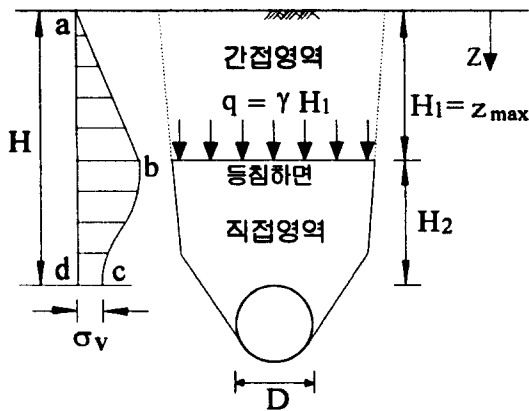


그림 1. 전단파괴영역 및 연직응력분포

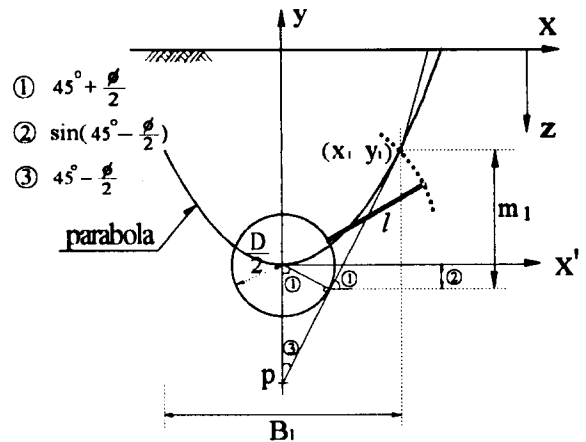


그림 2. 횡방향 예상파괴면

## 2.2 판별 이론식의 제시

앞에서 기술된 대로 횡방향 예상파괴면은 그림 2와 같이 splice이 터널주위를 그리는 케적(식 2.1)과  $\alpha_1$ 의 각도를 갖는 직선(식 2.2)과의 교차점  $Q(x_1, y_1)$ 를 통과하는 2개의 직선형태로 가정하였다. 여기서  $\alpha_1$ 은 터널측벽에서 주동토압에 의한 활동파괴면을 가정하여 즉  $45^\circ + \phi/2$ 의 각도로 원형터널과 접선을 이루는 것으로 가정하였다.

$$y = \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)x - \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} = kx - p \quad (2.1)$$

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{D}{2} + l\right)^2 = a^2 \quad (2.2)$$

여기서,  $\phi$  : 지반 전단지향각

D : 터널직경

l :  $L \cdot \sin \theta$  (L = splice 길이,  $\theta$  = splice 설치각도)

식 (2.1) 및 (2.2)로 부터 교차점  $Q(x_1, y_1)$ 의 좌표를 구하면

$$x_1 = \frac{kp + \sqrt{(kp)^2 + (a^2 - p^2)(1 + k^2)}}{1 + k^2} \quad (2.3)$$

$$y_1 = kx_1 - p \quad (2.4)$$

교차점 Q의 위치에서 예상 파괴흙재기의 폭  $B_1$ 과  $m_1$  등의 크기를 결정하면 다음과 같다.

$$B_1 = 2x_1 = 2\left(\frac{kp + \sqrt{(kp)^2 + (a^2 - p^2)(1 + k^2)}}{1 + k^2}\right) \quad (2.5)$$

$$m_1 = y_1 + \frac{D}{2} \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = kx_1 - p + \frac{D}{2} \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$\text{여기서, } k = \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right), \quad p = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}, \quad a = \left(\frac{D}{2} + l\right)$$

전단파괴면에 둘러싸인 두께 dz의 미소 흙요소에 대한 평형조건을 고려하면

$$B \gamma dz = B(\sigma_v + d\sigma_v) - B\sigma_v + 2 \tau dz \quad (2.7)$$

또한  $\tau = c + \sigma_h \cdot \tan \phi = c + \sigma_v \cdot k_h \tan \phi \cdot dz$  이므로

$$B \gamma dz = B(\sigma_v + d\sigma_v) - B\sigma_v + 2 c dz + 2 \sigma_v \cdot k_h \tan \phi dz \quad (2.8)$$

식 (2.8)로 부터,

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma - \frac{2c}{B} - 2k_h \gamma z \tan \frac{\phi}{B} \quad (2.9)$$

식 (2.9)를 변수·분리하여 적분하면 연직응력  $\sigma_v$ 는

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - 2c/B)}{2k_h \tan \phi} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-2k_h z \tan \phi}{B}\right) \right] + q \cdot \exp\left(\frac{-2k_h z \tan \phi}{B}\right) \quad (2.10)$$

여기서, 불연속점(discontinuity) 문제를 해결하기 위해 예상파괴면을 포물선 형태의 연속함수로 가정하였다. 즉 교차점  $Q(x_1, y_1)$ 를 통과하고 터널중심부를 꼭지점으로 하는 포물선 함수로 예상파괴면을 표현하면

$$z = -\zeta x^2 + \left(H + \frac{D}{2}\right) \quad (2.11)$$

여기서,  $\zeta = \frac{kx_1 - p}{\left(\frac{kp + \sqrt{(kp)^2 + (\alpha^2 - p^2)(1+k^2)}}{1+k^2}\right)^2}$

$$x = \frac{B}{2} = \sqrt{\frac{H + \frac{D}{2} - z}{\zeta}}$$

또한 식 (2.9) 및 (2.11) 등을 토대로,

$$\begin{aligned} F(z) = \frac{d\sigma_v}{dz} &= \gamma - \frac{2c}{B} - 2k_h \gamma z \tan \frac{\phi}{B} \\ &= \gamma - \sqrt{\zeta} \cdot c \left(H + \frac{D}{2} - z\right)^{-\frac{1}{2}} - \sqrt{\zeta} \cdot k_h \gamma z \tan \phi \left(H + \frac{D}{2} - z\right)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

식 (2.12)에서  $\frac{d\sigma_v}{dz} = 0$  일 때 최대연직응력이 발생하고 그 때의 깊이  $z$ 는 아칭효과가 발휘되는 한계깊이  $z_{\max}(=H_1)$ 가 된다.

### 3. 분석

얕은터널과 깊은터널의 구분을 위한 본 연구 제시 이론식에 대한 적합성을 확인하기 위해, 깊이비 및 강도정수 등 설계상의 변수를 변화시켜 Modified Spiling Reinforcement System이 적용된 터널의 3차원 유한요소해석을 실시하고, 그 결과를 비교·분석하였다.

해석은 미국 Comtech Research사에 의해 개발된 3차원 유한요소 탄소성 프로그램을 사용하여 지반 및 shotcrete는 연속체 요소로 pile은 beam 요소로 모델링하였고, 적용된 지반강도정수, 터널 및 pile의 제원 등 해석입력치들은 아래의 표 1 및 2와 같다.

표 1. 적용된 지반강도정수

단위중량 $\gamma$ (t/m <sup>2</sup> )	전단저항각 $\phi$ (°)					점착력 $c$ (t/m <sup>2</sup> )
2.0	22	32	42	52	62	0.4

표 2. 터널 및 pile의 재원

터널직경 D(m)	터널 설치 깊이 H(m)					pile직경 (mm)	pile길이 (m)	pile설치 각도 (°)	pile항복 인장강도 (t/m <sup>2</sup> )	pile설치간격(m)	
	6	12	18	24	30					굴진방향	방사방향
6	6	12	18	24	30	25	8	30	35000	1.5	0.5

터널설치깊이 H와 지반 전단저항각  $\phi$ 값이 다양하게 변화하는 경우, 본 연구 이론식에 의한 얕은터널과 깊은터널의 판별결과와 3차원 유한요소해석에 의한 판별결과를 서로 비교하여 정리하면 표 3 및 그림 3과 같다. 여기서 3차원 유한요소해석의 경우, 얕은터널과 깊은터널의 판별은 지반파괴 안전율도의 파괴영역(안전율이 1.0 이하인 영역)이 지표까지 연장된 경우와 이와같은 파괴영역이 터널에 인접한 주변지반에만 형성된 경우로 구분하여, 이 기준을 아칭효과 발휘유무에 근거한 본 연구 이론식에 의한 판별결과와 서로 정량적으로 비교하였다.

표 3. 얕은터널(S) 과 깊은터널(D)의 판별에 대하여 본 연구 이론식에 의한 결과와 유한요소해석 결과와의 비교

전단저 항각 ( $\phi$ )	본 연구 제시 판별이론식에 의한 결과									3차원 유한요소해석 결과		
	H/D = 1			H/D = 3			H/D = 5			$\frac{H}{D} = 1$	$\frac{H}{D} = 3$	$\frac{H}{D} = 5$
	Z <sub>max</sub>	$\sigma_{vmax}$	판별	Z <sub>max</sub>	$\sigma_{vmax}$	판별	Z <sub>max</sub>	$\sigma_{vmax}$	판별			
22	-	-	S	19.71	3.32	S	30.11	3.43	S	-	S	S
32	-	-	S	17.87	2.20	D	26.37	2.25	D	S	D	D
42	-	-	S	15.09	1.55	D	21.37	1.57	D	S	D	D
52	-	-	S	11.75	1.09	D	16.04	1.11	D	S	D	D
62	4.67	0.72	D	8.20	0.75	D	10.87	10.75	D	D	D	-

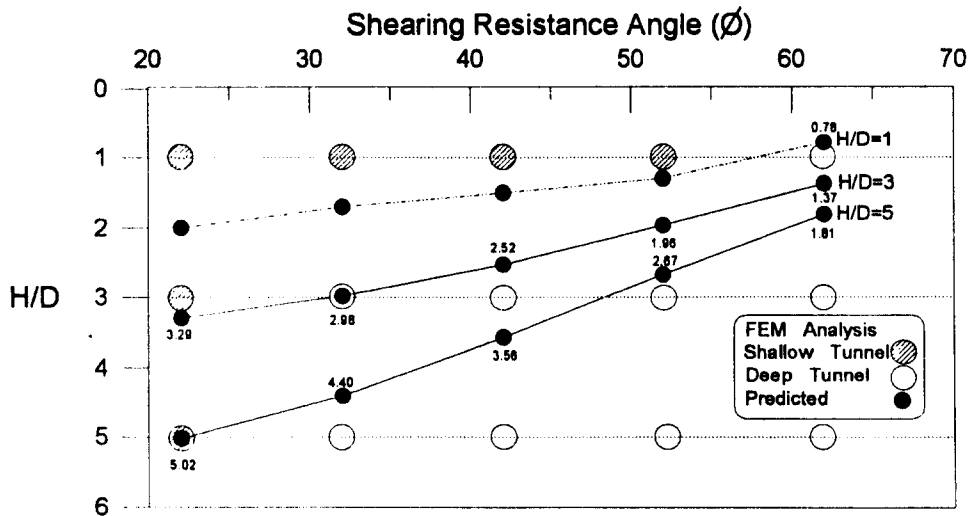


그림 3. 본 연구 이론식에 의한 결과와 유한요소해석 결과와의 비교도

### 3.1. 깊이비(H/D)의 영향

#### 3.1.1 얕은터널

표 3 및 그림 3에서 토피가 작은 경우( $H/D=1$ ), 3차원 유한요소해석을 통해 얻어진 안전율도와 변위도의 일반적인 경향을 살펴보면 지반파괴에 대한 안전율은 매우 낮고 파괴영역은 지표까지 확장되고 있으며, 변위가 크게 예상되는 contour는 거의 연직화하여 공동(터널)과 지표를 연결하는 침강구(sinkhole)와 같은 지표침하를 유발하게 된다. 이것은 깊이비가 너무 작아 터널상부에 아칭효과가 발휘되지 않고 흙무게가 그대로 연직응력으로 작용하는 얕은터널의 경우로 표 3 및 그림 3에서 비교하였듯이 2장에서 제시한 얕은터널과 깊은터널의 구분을 위한 본 연구 판별이론식에 의한 한계깊이비의 위쪽( $H < Z_{max}$ )에 있으므로 유한요소해석에 의한 예상 파괴영역과 본 연구 이론식에 의한 결과가 일치한다고 볼 수 있다.

#### 3.1.2 깊은터널

표 3 및 그림 3에서 토피가 큰 경우( $H/D=5$ ), 유한요소해석을 통해 얻어진 안전율과 변위도의 일반적 경향을 살펴보면 지반파괴 안전율은 크고 파괴영역은 지표까지 연장되지 않으며, 공동에서 시작한 변위 contour가 지중에서 폐합하며 지표와 직선으로 연결되지 않아 지표침하는 trough 형태를 보인다. 이러한 경우는 깊은 모래지반에서 Trap Door의 강하에 따른 지반의 전단파괴에 대한 실험결과와 같이 전단파괴면이 지표까지 발달하지 않고 지중에서 폐합하는 경우로 깊은터널로 정의된다. 따라서 표 3 및 그림 3에서와 같이 이론식에 의한 한계깊이비 아래쪽( $H > Z_{max}$ )에 있으므로 유한요소해석 결과와 본 연구 판별이론식에 의한 결과가 일치한다고 볼 수 있다.

### 3.2 전단저항각의 영향

깊이비  $H/D=1$ ,  $H/D=3$  및  $H/D=5$ 인 터널에 대하여 전단저항각( $\phi$ )을  $22^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $42^\circ$ ,  $52^\circ$  및  $62^\circ$  등으로 다양하게 변화시킨 경우 지반파괴에 대한 안전율을 분석하였다. 분석결과, 지반 전단저항각이 증가하면 안전율이 증가하여 터널의 토피가 아주 작은 경우( $H/D=1$ )라도  $\phi$ 값이  $62^\circ$  정도의 큰 값이면 깊은터널의 효과를 갖게 되고, 이와는 반대로 터널의 토피가 상당히 두꺼운 경우( $H/D=5$ )라도  $\phi$ 값이  $22^\circ$  정도의 비교적 작은 값이면 터널의 파괴양상은 얕은터널의 경우와 유사하게 된다. 따라서 전단파괴면의 발달 양상에 따른 얕은터널과 깊은터널의 구분은 깊이비는 물론 지반강도정수에도 상당히 연관되어 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 *Modified Spiling Reinforcement System*을 적용한 터널의 3차원 한계평형해석법을 정립하기 위한 사전 단계로서, 아칭효과를 고려한 얕은터널과 깊은터널을 구분하는 이론식을 제시하고 3차원 유한요소해석과 예를 통해 판별 결과를 비교·분석하였다. 3차원적 횡·종방향 파괴형상을 규명하여 해석적으로 체계화하는게 지속적인 연구과제이다.

## 5. 참고문헌

- 1) A-Aish, Y.M. (1982), Investigation of Spile Reinforcement Tunnels in Soft Grounds, M.S. Thesis, Univ. of Notre Dame, U.S.A.
- 2) Handy (1985), The arch in Soil Arching, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE vol. 3. No. 3.
- 3) Korbin, G.E. and Brekke, T.L.(1976), Model Study of Tunnel Reinforcement, ASCE, Jour. of Geotech. Eng.
- 4) Korbin, G.E. and Brekke, T.L.(1978), Field Study of Tunnel Reinforcement, ASCE, Jour. of Geotech. Eng.
- 5) 김홍택, 권영호 (1995), "Soil Nailing 공법의 터널공사에의 적용," 한국지반공학회 '95 봄 학술발표회 논문집.