

## 병설터널 굴착시 필라부의 보강을 고려한 안정성 평가기법 Stability Estimation Method for Pillar Considering the Reinforcement Method during Twin-Tunnel Excavation

장부식<sup>1)</sup>, Bu-Sik Jang, 황정순<sup>2)</sup>, Jung-Soon Hwang, 류준원<sup>3)</sup>, June-Won Ryu, 이웅기<sup>4)</sup>, Eung-Ki Lee, 김홍택<sup>5)</sup>, Hong-Taek Kim

- 1) (주)도화종합기술공사 철도터널부 전무, Director, Railway Tunnel Dept., Dowha Consult. Eng. Co., Ltd.
- 2) 두산산업개발(주) 토목터널팀 과장, Section Manger, T/K Project Term, Doosan Ind. Dev. Co., Ltd.
- 3) 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hong-Ik University
- 4) (주)한국철도기술공사 지반공학팀 이사, Director, Geotechnical Dept., Korea Railroad Technical Co., Ltd.
- 5) 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hong-Ik University.

**SYNOPSIS** : Recently, twin-tunnel is often designed considering the aspects of disaster prevention and economic reasons. However, the design cases and the studies are relatively insufficient. By the twin-tunnel excavation, deviate stresses of pillar between tunnels are increased and the increased stresses induce the instability of the twin-tunnel. In this study, numerical analyses about the twin-tunnel behaviour are conducted while varying ground strength, width of pillar and depth of earth cover and a series of regression analyses are carried out by using the results of numerical analyses for the twin-tunnel. Based on the numerical analyses, an estimation method of derived stresses is suggested though the regression analyses. Also, based on the results of regression analyses, an quantitative estimation method considering the reinforcement effects is also suggested. Then various parametric studies are conducted to be considered the reinforcement type and various design parameters. Finally, the efficiency of the suggested method is verified through the results of parametric studies.

**Key words** : Pillar, Heok-Brown's failure criterion, Tension bolt, Grouting

### 1. 서 론

근래에 들어 터널의 방재 측면과 경제성 측면들을 고려하여 병설터널로 계획되는 경우가 점차적으로 증가하는 추세이나 이에 대한 설계사례나 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 병설터널의 시공에 의해 터널 사이에 위치하는 필라부는 점차적으로 편차응력이 증가하게 되고 이에 따라 터널 구조물의 안정성을 저하시키는 주요인이 되지만 필라의 거동에 대한 현재까지의 연구들은 주로 수치해석과 실내모형실험을 통한 병설터널의 거동평가 및 지표침하 경향에 국한되어 있어 필라의 정량적 평가를 위한 적용성 측면에 한계가 있다. 본 연구에서는 병설터널의 굴착을 대상으로 지반강도, 필라폭 및 토피고를 다양하게 변화시켜가며 수행된 수치해석결과에 대한 회귀분석을 시행하였으며, 회귀분석을 통해 필라의 유발응력 평가식과 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하여 필라의 보강을 고려한 정량적 평가기법을 제안하였다. 또한, 제안된 기법을 이용하여 필라 주변의 암반강도 및 보강공법의 적용에 따른 변수분석을 시행하여 각 설계변수 및 보강형태 변화에 따른 영향정도를 평가하였다. 본 연구를 통해, 제안된 안정성 평가

기법은 병설터널 적용시 예비설계단계에서 필라의 안정성 검토 및 보강공법의 적용여부, 터널간의 한계 이격거리 결정 등에 폭넓은 적용이 가능하며, 실무 적용이 용이한 효율적인 기법이라 사료된다.

## 2. 필라의 개요

### 2.1 필라의 정의 및 분류

필라란 지하공동의 중첩시 중앙부에 설치되는 기둥형식의 연직기둥이나 지하저장시설물의 공동 또는 광산의 공동이 복잡화됨에 따라 불가피하게 발생하는 공동과 공동간에 굴착하지 않고 남겨 놓은 암석기둥이다. 목적에 따라 간단히 분류하면 채굴작업장 및 채굴적을 보호 유지하는 지보필라, 채광시설물 및 채굴적 상부 지표의 구조물과 환경을 보호하는 안전필라, 물, 가스 등의 유동방지 또는 지하심부의 암반 발파시 발파영향의 완화를 위해 설치하는 제어필라, 광구의 경계나 채굴구역사회의 경계필라가 있다.

### 2.2 기존의 필라의 안정성 평가방법

필라의 안정성 평가를 위한 방법으로는 Peck의 방법, Matsuda(1998)의 방법 및 해석법이 간단하여 현장에서 쉽게 이용할 수 있는 지류론(tributary theory)등이 제안된 바 있으나(표 1), 다양한 지반 및 시공 조건 등을 합리적으로 고려하기에는 한계가 있는 실정이다. 현재까지도 병설터널간의 이격거리는 대부분 정역학적 조건에 의해 제안된 최소 이격거리를 별도의 검토 없이 적용하여 결정되는 것이 일반적인 설계 경향이므로, 합리적이며 정량적인 필라의 안정성 평가방법 제시가 필요하다고 판단된다.

표 1. 기존의 필라 안정성 평가방법

구 분	작용응력( $S_p$ )	필라의 강도( $\sigma_p$ )	안전율	비 고
Peck 방법	$\gamma \cdot H \cdot (1+D/P)$	$2 \cdot c \cdot \cos\phi / (1-\sin\phi)$	$F_s = \sigma_p / S_p$	$\gamma$ : 단위중량 H : 토피고 D : 터널폭 B : 이완하중폭 P : 필라폭 $A_t$ : 유효부담면적 c : 점착력 $A_p$ : 필라의 단면적 $q_u$ : 암반의 일축강도 $F_s$ : 안전율 $\phi$ : 내부마찰각
Matsuda 방법	if $H > D, \gamma \cdot D \cdot B/P$	$q_u$		
	if $H < D, \gamma \cdot H \cdot B/P$			
지 류 론	$(A_t/A_p) \cdot \gamma \cdot H$	$q_u$		

## 3. 수치해석 결과를 이용한 필라 보강공법의 안정성 평가방법

### 3.1 수치해석 결과를 이용한 필라 보강공법 개요

본 연구에서는 병설터널 굴착으로 인한 상호간섭 효과로 발생하는 변위와 응력의 경향성을 분석하기 위하여 유한요소 프로그램인 Pentagon2D를 이용하여 재료학적 조건인 지반물성 및 축압계수와 기하학적 형상 요소인 토피고와 터널간 이격거리를 다양하게 변화시켜가며 분석을 시행하였다. 분석시 터널의 굴착방법은 전단면 굴착으로 하였으며, 터널형상을 원형으로 제한하여 터널 이격거리를 반영한 필라폭(P)은 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0D로, 토피고(H)는 지표에서 터널천단까지의 깊이를 2.0, 3.0, 5.0, 9.0D로 변화시켜가며 분석을 시행하였다. 또한 강도정수 설정을 위해 20개 이상의 설계사례를 분석하여 결정하였으며, 하중분배율은 장석부 등(1998)이 제안한 산정식에 의해, 축압계수( $k_0$ )는 경암, 보통암,

연암, 풍화암( $k_0 = \nu/(1-\nu)$ )과 완전풍화( $k_0 = 1 - \sin\phi$ )를 구분하여 수치해석에 적용하였다. 또한, 본 연구에서는 필라 보강공법 중 현장에서 가장 유용하게 쓰이고 있는 Tension bolt 보강공법과 grouting 보강공법의 적용을 고려할 수 있도록, 무보강의 경우에 대해 수행된 수치해석 결과로서 도출된 필라의 안정성 평가기법을 토대로 보강공법의 적용을 고려한 해석기법을 제시하였다.

### 3.2 필라 유발응력의 정규화 및 평가식 제안

수치해석결과는 그림 1에 도시된 바와 같이 터널 중심과 동일한 높이 즉, 필라의 폭이 최소가 되는 부분의 중심과 터널 굴착부와 접하는 좌우측 단부를 기준으로 분석하였으며, 분석위치에 대해 토피고, 필라폭 등의 변화에 따른 유발응력 변화를 대상으로 정리하였다.

그림 2와 그림 3은 경암에 설치되는 병설터널의 토피고에 따른 이격거리별 연직응력 변화경향이다. 분석결과 토피고의 증가와 필라폭의 감소에 따라 연직응력의 크기는 증가하는 것을 확인하였으며, 일반적으로 경암의 경우 필라폭이 1.0D 이상인 경우 필라폭의 두께변화에 따른 응력변화량이 크게 감소함을 확인하였다.

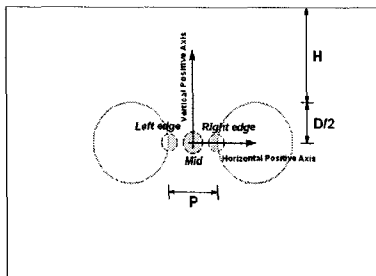


그림 1. 필라응력 분석위치

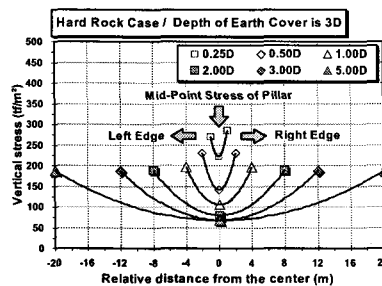


그림 2. 연직응력변화(경암)

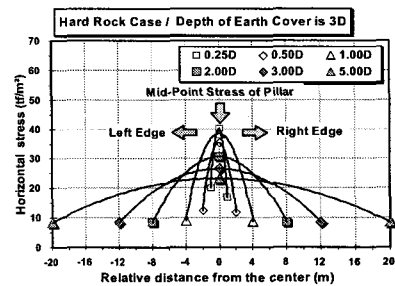


그림 3. 수평응력변화(경암)

병설터널 시공에 따른 필라부 유발응력 평가식 도출을 위해 수치해석 결과로부터 구한 응력값을 초기 응력으로 나누어 정규화 하였으며, 정규화된 응력비를 토대로 회귀분석을 시행하여 지반강도와 필라폭 및 토피고 등을 종합적으로 고려할 수 있는 필라의 유발응력 평가식을 제시하였다. 표 2에는 정규화된 응력 값들 중 풍화암에 대한 결과를 대표적으로 기술하였다.

표 2. 풍화암층의 필라 유발응력 정규화 결과

토피고	H=2D case		H=3D case		H=5D case		H=9D case		연직응력 정규화		수평응력 정규화		
	연직	수평	연직	수평	연직	수평	연직	수평	평균값	표준편차	평균값	표준편차	
필라폭	0.25D	2.53	1.57	2.52	1.70	2.39	1.47	2.26	1.70	2.42	0.126	1.61	0.109
	0.50D	2.03	1.19	2.04	1.14	1.93	1.27	1.68	1.24	1.92	0.169	1.21	0.055
	1.00D	1.75	1.19	1.77	1.19	1.60	1.29	1.48	1.28	1.65	0.134	1.24	0.054
	2.00D	1.63	1.11	1.60	1.05	1.46	1.20	1.34	1.17	1.50	0.135	1.13	0.063
	3.00D	1.56	1.09	1.58	1.01	1.44	1.16	1.35	1.12	1.48	0.109	1.09	0.065
	5.00D	1.54	1.06	1.52	0.99	1.43	1.13	1.28	1.09	1.44	0.119	1.07	0.057

표 2에 기술된 바와 동일하게 각 암종별로 유발응력의 정규화를 시행하였으며, 정규화 된 결과들의 평균값을 토대로 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석은 exponential함수를 모함수로 하여 non-linear fitting을 시행하였으며, 연암 이상의 경우 오차율 5%, 풍화암 이하의 경우 오차율 10%를 만족하는 함수를 응력비( $SR_{yp}$  및  $SR_{xp}$ ) 산정식으로 결정하였다.

$$SR_{ip} = a_i + b_i \cdot \exp[-c_i \cdot (p/d)] \quad (1)$$

여기서  $SR_{ip}$ 는 응력비,  $i = x$  or  $y$ 를 의미하며,  $a_i, b_i, c_i$ 는 회귀분석을 통해 구한 암반종류 상수이다. 표 3은 회귀분석으로 구한 상수값이며, 표 3에 제시된 바와 같이 수평응력비 회귀식의 경우 연암층 이상의 조건에서는 암종별로 분석 자료들의 편차가 다소 존재하나 상호 유사한 경향을 보이므로 동일한 평균값(상수값)을 적용하는 것으로 결정하였다. 결과적으로 병설터널 굴착시, 암반의 종류, 필라폭 및 토 피고 등을 고려한 응력비는 식 1과 표 3을 사용하여 결정할 수 있다.

표 3. 응력비 평가를 위해 적용되는 상수  $a_i, b_i, c_i$ 의 값

암반의 구분		연직응력비 상수			수평응력비 상수 (단, $P \leq 2D$ )		
종류	분류	$a_y$	$b_y$	$c_y$	$a_x$	$b_x$	$c_x$
경 암	RMR II	1.785	3.183	2.684	0.928	0.490	1.344
보 통 암	RMR III	1.794	3.301	2.942			
연 암	RMR IV	1.680	2.570	2.654			
풍 화 암	RMR V	1.478	1.782	2.684	1.099	0.518	1.424
완전풍화	-	1.297	0.823	1.935	1.298	0.545	1.503

### 3.3 유발응력 평가식을 이용한 필라의 보강공법 적용시 안정성 평가

Hoek-Brown의 파괴기준은 1980년에 처음 발표된 이후 계속 수정되어 온 기준으로 가장 실제적인 모델이며 수많은 실험을 집대성하여 제시된 경험을 바탕으로 암석(intact rock)뿐만 아니라 암반(rock mass)에도 적용할수 있는 유일한 기준이며 이 기준은 주응력을 중심으로 한 것이다. 이에 수치해석을 통한 유발응력 평가식을 Hoek-Brown의 파괴기준에 의해 적용하였다. 기본적인 Hoek-Brown 공식의 형태는 식 2와 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_c + s)^a \quad (2)$$

여기서,  $m_b$ 는 원지반 상태 및 암석의 종류를 고려한 Hoek-Brown 정수이며,  $s$ 와  $a$ 는 원지반 상태에 의존하는 상수이다. 병설터널 필라의 중앙부근은 근사적으로 대칭상태를 이루므로 연직방향과 수평방향을 주응력 방향이라 가정할 수 있다. 따라서 식 2를 토대로 식 3 및 식 4에 의해 산정가능하다.

$$\sigma_{1p} = SR_{yp} \cdot \gamma \cdot (H + D/2) \quad (3)$$

$$\sigma_{3p} = SR_{xp} \cdot k_0 \cdot \gamma \cdot (H + D/2) \quad (4)$$

(단,  $P \geq 2D$ 인 경우  $SR_{xp}$ 의 산정시 적용되는  $P=2D$ )

여기서,  $\sigma_{1p}$  및  $\sigma_{3p}$ 는 필라의 중앙부에 유발되는 최대 및 최소주응력이다. 또한  $\gamma$ 는 대상암반의 단위중량,  $k_0$ 는 측압계수, H는 토피고, D는 터널의 직경이다. 필라의 암반강도는 필라의 유발응력과 식 2에 표현된 Hoek-Brown의 파괴기준을 적용하여 산정된다. 병설터널의 굴착에 따른 응력변화와 이에 의해 유발되는 암반의 불안정성은 그림 4에 의해 설명이 가능하다. 그림 4에 도시된 A점은 굴착이전의 초기응력 상태이며, B점은 병설터널의 시공 후의 필라 응력상태이다. 그림에 도시된 바와 같이 지반 굴착에 의해 유발되는 암반응력이 초기상태보다 파괴포락선에 근접하는 것을 확인할 수 있으며 이러한 응력변화는 필라의 불안정을 유발하게 된다.

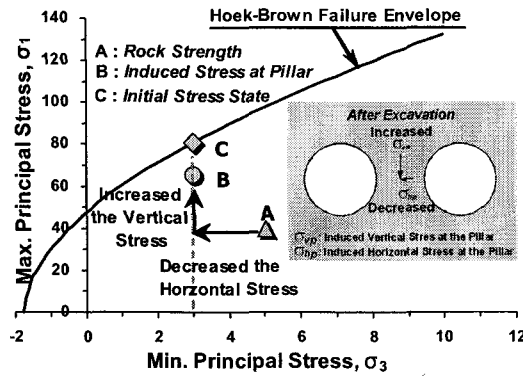
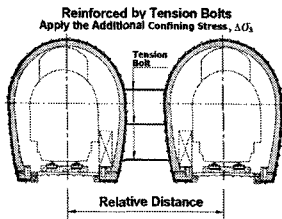


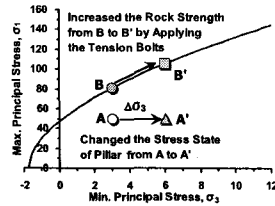
그림 4. 필라의 응력변화의 불안정성

필라의 암반강도는 C점으로 표현되며, B점과 C점의 최소주응력은 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 병렬터널의 시공에 따른 응력변화를 고려한 암반강도는 굴착에 의해 필라의 중앙부에 유발되는 최소주응력,  $\sigma_{3p}$ 에 부합하는 최대주응력값으로 결정되며, 식 2에 정의된 필라의 강도는 식 5에 의해 산정된다.

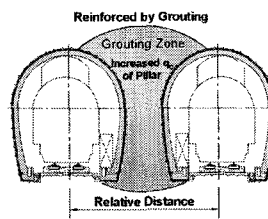
$$S_p = \sigma_1 = \sigma_{3p} + \sigma_c(m_b \cdot \sigma_{3p}/\sigma_c + s)^a \quad (5)$$



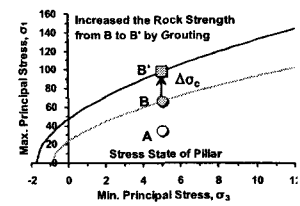
(a) Tension Bolt 보강



(b) 보강원리



(a) Grouting 보강



(b) 보강원리

그림 5. Tension Bolt에 의한 보강 개요 및 원리

그림 6. Grouting에 의한 보강 개요 및 원리

현재까지 제안된 필라의 보강공법중 실무 적용이 용이한 공법으로는 tension Bolt와 grouting공법이 있으며, 각 공법의 개요와 보강원리는 그림 5 및 그림 6과 같다. 그림 5 (a)와 같이 필라를 보강하기 위해 tension bolt를 적용한 경우, 필라에서는 tension bolt의 설치에 의해 추가적인 구속압( $\Delta\sigma_3$ )이 작용하게 된다. 따라서 그림 5 (b)와 같이 tension bolt의 설치에 의해 추가적인 구속압( $\Delta\sigma_3$ )이 발생하게 되고 필라의 강도(B→B')와 유발응력(A→A')을 증가시켜 필라의 안전율을 향상 시킨다. 그림 6 (a)는 필라에 grouting을 실시하여 보강된 예로서 필라의 일축압축강도가 상승하여 전체적인 Hoek-Brown의 파괴포락선 크기가 증가하였고 필라의 안전율을 증가의 요인이 된다. 이와 같이 보강공법이 적용된 필라의 안전율을 산정은 식 6을 토대로 식 7에 의해 산정할 수 있다.

$$\Delta\sigma_3 = q_{tb}/(S_h \cdot S_v) \quad (6)$$

$$F_s = (\sigma_{3p} + \Delta\sigma_3) + (n \cdot \sigma_c)[m_b(\sigma_{3p} + \Delta\sigma_3)/(n \cdot \sigma_c) + s]^a/\sigma_{1p} \quad (7)$$

여기서,  $q_{tb}$ 는 tension bolt의 강도,  $S_h$ 는 tension bolt의 연직 설치간격,  $S_v$ 는 tension bolt의 수평 설치간격이다. 또한, n은 grouting에 의한 필라의 일축압축강도 증가 정도를 나타내는 정수로서 일반적으로 연암의 경우에는 모암강도의 약 2배, 풍화암은 4배, 그 이하는 40배까지 증가한다고 보고된바 있다 (배규진 등, 1997; 최성웅 등, 1997). 본 연구에서 제안한 보강공법을 실무에 적용하는 경우 tension

bolt는 연암이상의 암반조건에, 풍화암 이하의 암반조건에는 Tension bolt+Grouting 병행공법 또는 Grouting 보강공법이 보다 효과적인 방안이라고 판단된다.

#### 4. 제안된 기법에 의한 안전을 변화 분석

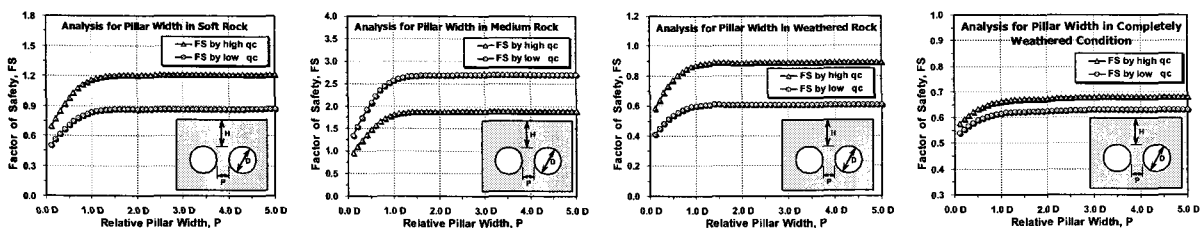
##### 4.1 필라폭 및 토피고 변화에 따른 암종별 안전을 변화 분석

본 연구에서는 제안된 기법을 이용하여 경암을 제외한 암반종류, 필라폭 및 무결암의 일축압축강도 변화에 따른 안전을 변화 경향을 분석하였다. 분석시 무결암 일축압축강도는 Bieniawski에 의해 제안된 값을 적용하였으며, 암반강도는  $a=1/2$ 로 가정한 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하였다. 암반종류와 상태에 따라 결정되는  $m_b$ 와  $s$ 는 이질암에 대해 제안한 값을 적용하였으며, 분석에 적용된 대표값은 표 4와 같다.

표 4. 변수분석에 적용된 대표값

종 류	일축강도 (Bieniawski,1979)		H-B 상수 (이질암,1980)		토피고 (H)	암반단위 중량(KPa)	필라폭 (P)	비고
	범위(MPa)	Description	$m_b$	$s$				
보 통 압	25 ~ 50	Average	1.0	0.004	7.5D (60m)	24.8	0.5D (4m)	D : 터널직경 (8m) 측압계수 0.5
연 압	10 ~ 25	Weak	0.2	0.0001	5.0D (40m)	22.9	1.0D (8m)	
풍 화 압	2 ~ 10	Very Weak	0.05	0.00001	2.5D (20m)	20.5	1.0D (8m)	
완전풍화	1 ~ 2	Extremely Weak	0.01	0	1.25D (10m)	18.8	2.0D (16m)	

대표값을 토대로 필라폭 변화와 토피고 변화에 따른 수치해석을 실시하였으며, 필라폭(P)은 0.25D ~ 0.50D까지 토피고(H)는 1.0D ~ 10.0D까지 변화를 주어 분석하였다. 분석시 무결암의 일축압축강도는 표 4에 제시된 범위중 최대값과 최소값을 적용하였다. 분석결과 그림 7에 도시된 바와 같이 필라폭의 변화에 따른 안전율은 터널간 이격거리가 1.0D 이하인 경우에는 이격거리에 대한 영향이 큰 것으로 분석되었으나, 1.0D 이상 이격거리가 확보되는 경우에는 암반강도에 의한 영향만을 받는 것으로 확인되었다.



(a) 보통암의 경우

(b) 연암의 경우

(c) 풍화암의 경우

(d) 완전풍화의 경우

그림 7. 필라폭 변화에 따른 안전율 변화

또한, 주변지반의 암반상태가 보통암 및 연암과 같이 양호한 경우에는 필라의 폭이 작더라도 일정 안전율의 확보가 가능하나, 풍화암 및 완전풍화의 경우 필라폭에 상관없이 소요안전율 확보가 어려운 것으로 분석되었다. 그러나, 상기한 보통암 및 연암과 같이 터널간 이격거리가 작더라도 소요안전율 이상이 확보되는 경우라도 터널굴착시 발생하는 발파압 및 발파진동 등에 의해 필라부 암반의 강도저하 및 소성영역의 확대 가능성 등을 면밀하게 고려하여 본 성과를 반영하여야 할 것으로 판단된다.

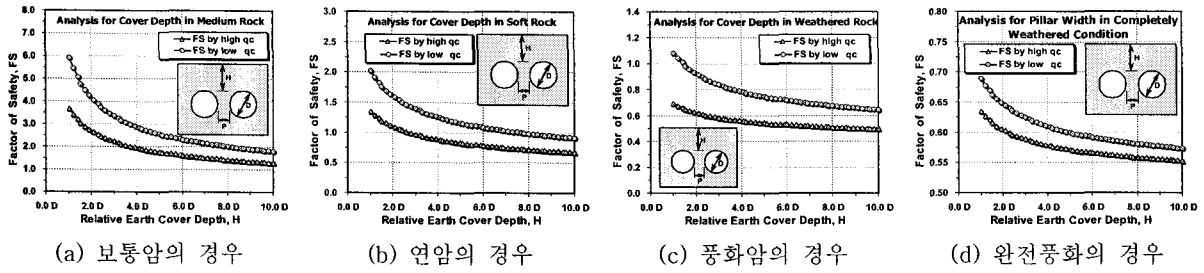


그림 8. 토피고 변화에 따른 안전율 변화

그림 8은 토피고 변화에 따른 안전율 변화경향의 분석이다. 분석결과, 도시된 바와 같이 토피고 변화에 따른 필라의 안전율은 토피고가 상대적으로 낮은 경우에는 안전율 변화가 크지만 점차 토피고의 증가에 따라 안전율 변화량이 상대적으로 감소하는 결과를 보였으며 일정한 값에 수렴해가는 경향을 보였다.

## 4.2 필라폭 및 토피고 변화에 따른 압중별 안전율 변화 분석

본 분석에서는 필라의 보강을 위해 tension bolt를 적용하는 경우(그림 9)와 필라에 grouting 보강공법을 적용한 경우(그림 10)에 대해 보강 정도에 따른 안전율 변화를 분석하였으며, 분석에 적용된 터널 설치 형상 및 암반의 물성치는 표 4와 동일하다. 다만, tension bolt 보강 분석시, 연암의 경우에는 표 4에 제시된 필라폭과는 달리 0.5D로 설정하였으며, 무결암의 일축압축강도는 모든 케이스에서 제안된 범위 중 최소값을 적용하였다. 또한 보강공법이 주로 적용되는 주변암반을 고려하여 tension bolt로 보강이 이루어진 암반을 보통암과 연암, grouting 공법에 적용되는 암반을 풍화암과 완전풍화로 제한하여 분석을 실시하였다.

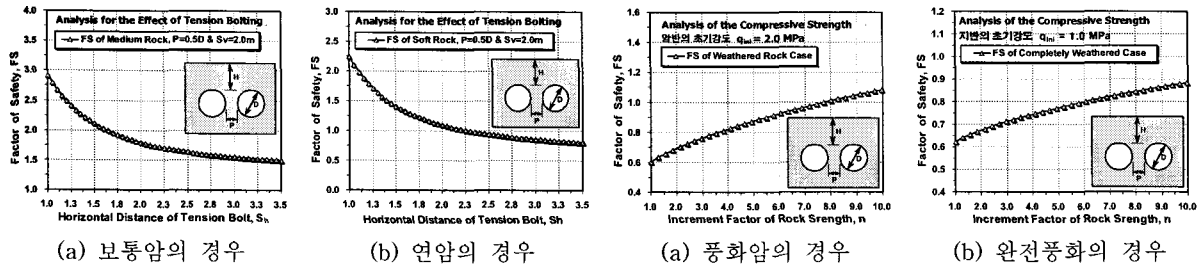


그림 9. Tension Bolt 보강시 안전율 변화

그림 10. Grouting에 의한 보강시 안전율 변화

분석결과 tension bolt 보강시 필라의 안전율은 수평설치간격이 1~3.5m로 증가함에 따라 보통암은 약 51%, 연암은 약 36%정도 감소하는 것으로 분석되었으며, tension bolt의 길이변화에 대한 안전율은 보통암의 경우가 더 크다는 것을 확인할 수 있었다. grouting 적용시 필라의 안전율은 풍화암의 경우 약 80%, 완전풍화의 경우 42%가량 안전율 증가가 확인되었다. 그러나 이는 주변암반의 일축압축강도의 가정값(풍화암 2MPa, 완전풍화 1MPa) 차이와 grouting시의 강도증가(n) 정도를 동일한 크기로 가정함에 따른 결과로서, grouting에 의한 필라보강효과가 풍화가 심한 지반일수록 크다는 측면을 고려하면 보강효과는 완전풍화의 경우가 더 크다고 판단된다. 분석결과 tension bolt 보강시 필라의 안전율은 수평설치간격이 1~3.5m로 증가함에 따라 보통암은 약 51%, 연암은 약 36%정도 감소하는 것으로 분석되었으며, tension bolt의 길이변화에 대한 안전율은 보통암의 경우가 더 크다는 것을 확인할 수 있었다. grouting 적용시 필라의 안전율은 풍화암의 경우 약 80%, 완전풍화의 경우 42%가량 안전율 증가가 확인되었다. 그러나 이는 주변암반의 일축압축강도의 가정값(풍화암 2MPa, 완전풍화 1MPa) 차이와 grouting시의 강도증가(n) 정도를 동일한 크기로 가정함에 따른 결과로서, grouting에 의한 필라보강효과가 풍화가 심한 지반일수록 크다는 측면을 고려하면 보강효과는 완전풍화의 경우가 더 크다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 병설터널 굴착을 대상으로 지반강도, 필라폭 및 토피고를 다양하게 변화시켜가며 수행된 수치해석결과에 대한 회귀분석을 시행하였으며, 회귀분석을 통해 필라의 유발응력 평가식과 Hoek-Brown 파괴기준을 적용한 정량적인 필라의 안전을 평가방법을 제시 하였다. 이를 토대로 필라의 보강공법을 고려한 평가기법을 제시하였으며, 제안된 기법을 이용하여 필라 주변의 암반강도 및 보강공법의 적용에 따른 변수분석을 시행하였다. 분석결과 Tension Bolt 보강시 필라의 안전율은 수평간격이 1~3.5m로 증가함에 따라 보통암은 51%, 연암은 약 36% 증가하였으며 Grouting 적용시 풍화암은 80%, 완전풍화의 경우 42%가량 안전을 증가가 확인되었다. Grouting 적용시 필라보강효과는 풍화가 심한 지반일수록 크다는 측면을 고려하면 보강효과는 완전풍화가 더 클 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 병설터널 시공시 필라의 보강을 고려한 정량적 설계기법 제시는 실무에 효과적인 적용 가능한 대안으로 판단되며, 추후 모형실험을 통한 수치해석과 실제거동과의 유사점을 확인할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

1. 김종우, 전석원, 서영호 (2004), "지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험연구," *한국암반공학회논문집*, 제 14권, 제1호, pp. 43~53.
2. 김학문 (1997), "쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과," *한국암반공학회논문집*, Vol. 7, pp. 136~142
3. 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완 (1997), "Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구," *한국암반공학회논문집*, 제7권, pp. 299~309.
4. 백영식, 김홍택, 임수빈 (1993), "산악지 쌍굴 수로터널 해석에 대한 고찰," *한국지반공학회 93봄 학술발표회 논문집*, pp. 21~26.
5. 이인모 (2001), "암반역학의 원리", 새론출판사.
6. 임수빈, 이성민, 이제우, 백영식 (1994), "터널 굴착시 고려해야 할 주변 암반의 매개변수와 진행성 파괴," *한국지반공학회 창립10주년기념 및 '94가을 학술발표회 논문집*, pp. 231~234.
7. 장석부, 문현구 (1998), "터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구," *한국지반공학회 논문집*, Vol. 14 No.5, pp. 5~15.
8. 최성용, 신희순 (1997), "연약지반내 굴착터널의 안정성 평가 및 최적보강설계에 관한 연구," *한국암반공학회논문집*, 제7권, pp. 191~201.
9. 황정순, 이용기, 김철준, 김승욱 (2005), "병설터널 시공에 따른 필라의 안정성 평가기법," *2005 한국농공학회 지반분과위원회 학술세미나*, pp 75~88.
10. Matsuda, T., Terada, K., Igarashi, M., Miura, K. (1998), "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground," *Tunnels and Metropolises*, Vol. 2, pp. 1193~1198.