

# 병설터널 보강 필라의 안정성 평가방법에 관한 연구

## A Study on the Stability Estimation Procedure for Reinforced Pillar of Twin Tunnel

백 승 철<sup>1)</sup> · 장 부 식<sup>2)</sup> · 이 태 규<sup>3)</sup> · 이 성 민<sup>4)</sup> · 황 정 순<sup>†</sup>

Baek, Seungcheol · Jang, Busik · Lee, Taegyul · Lee, Sungmin · Hwang, Jungsoon

**ABSTRACT** : Recently, twin-tunnel is often designed in the aspects of disaster prevention and economical 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 were conducted with varying ground strength, width of pillar and depth of earth cover and a series of regression analyses were 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 through 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 were conducted to be considered the reinforcement type and various design parameters. Finally, the efficiency of the suggested method based on the Hoek-Brown Failure Criterion is verified through the results of parametric studies.

**Keywords** : Twin tunnel, Pillar, Reinforcement, Hoek-Brown Failure Criterion

**요 지** : 근래에 들어 터널계획시 방재 및 환경훼손 측면을 고려하여 상, 하행터널이 나란히 배열되는 병설터널의 형태로 계획되는 사례가 증가하고 있으나, 이에 대한 연구성과는 상대적으로 미미한 실정이다. 병설터널 사이에 위치하는 필라부는 연직응력의 증가와 수평응력의 감소에 의해 병설터널 주변암반의 불안정성이 증가하며, 이와 같은 불안정성은 필라폭이 감소할수록 더욱 증가하게 된다. 본 연구에서는 병설터널의 굴진에 따른 필라부의 간섭효과와 응력변화거동의 분석을 위한 다양한 조건들에 대해 수치해석을 시행하였으며, 수치해석 결과에 대한 회귀분석을 통해 필라의 유발응력평가를 제안하였다. 또한, 제안식과 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하여 필라부의 정량적인 안전율 산정기법을 제안하였고, 제안된 기법의 적용성 확대를 위해 보강공법이 적용된 경우를 고려할 수 있는 해석기법을 아울러 제시하였다. 마지막으로 다양한 변수 분석을 통해 Hoek-Brown 파괴기준을 기초로 제안된 본 기법의 효율성을 입증하였다.

**주요어** : 병설터널, 필라, 보강, Hoek-Brown 파괴기준

## 1. 서 론

근래에 들어 터널방재 및 환경훼손 측면을 고려하여 상·하행 터널이 나란히 배열되는 병설터널의 형태로 계획되는 사례가 증가하는 추세이나, 이에 대한 연구성과는 상대적으로 미미한 실정이다. 병설터널에 관련된 국내 연구로서 임수빈 등(1994)은 필라의 두께가 1.0D(D : 터널지경) 이하인 경우 응력집중이 현저하게 증가한다고 하였으며, 김학문(1997)은 터널간 이격거리가 2D에서 1D로 감소할 때 간섭체적비가 급격히 증가하므로 2D를 최소 이격거리로 제시한 바 있다. 또한 백영식 등(1993)은 천단침하 및 상호간섭 효과가 이격거리의 증가에 따라 감소하여 2D 부근에서 수렴한다고 하였으며, 김중우 등(2004)은 모형실험을 통해 병설

터널 사이의 이격거리가 작을수록 낮은 압력수준에서도 필라에 균열이 발생하고 내공변형량 또한 증가한다고 하였다. 이상과 같이 병설터널은 응력집중으로 인한 필라의 진행성 파괴 위험이 큰 만큼 터널간의 이격거리를 고려한 필라의 유발응력 검토 및 필라 강도를 고려한 안정성 평가는 설계 단계에서 매우 중요한 고려사항들 중 하나이다. 병설터널 설계시 우선적으로 고려해야 하는 사항은 굴착에 의한 편차응력 증가로 유발되는 주변 암반의 파괴나 변형 발생여부이다. 굴착 이전의 자연지반은 응력의 평형상태를 유지하고 있으나, 병설터널의 시공에 의해 터널 사이에 위치하는 필라부에는 연직응력의 집중과 수평응력의 해방으로 편차응력이 점차 증가하게 된다. 이와 같이 병설터널 굴착에 의한 필라의 편차응력 증가는 필라를 구성하는 암반의 불안정성

1) 정희원, 안동대학교 토목공학과 교수

2) 비희원, 평원엔지니어링 부사장

3) 비희원, 두산건설주식회사 토목설계팀 팀장

4) 정희원, 영동대학교 토목환경공학과 부교수

† 정희원, 두산건설주식회사 토목설계팀 차장(E-mail : jshwang1@doosan.com)

을 증가시키며, 이와 같은 불안정성은 필라폭이 감소할수록 더욱 증가하게 된다. 따라서 병설터널의 거동평가에 있어 필라폭은 중요한 요소이다. 이러한 측면을 고려하여 본 연구에서는 터널주변 암반의 강도정수, 터널직경, 토피고 및 필라폭 등의 변화를 고려하며 정량적으로 무보강 필라의 안전율을 산정할 수 있는 해석기법을 제안하였으며, 무보강 필라에 대해 제안된 해석기법의 적용성 확대를 위해 보강공법이 적용된 경우도 고려할 수 있는 기법을 제시하였다.

## 2. 기존의 필라 안정성 평가기법 검토

### 2.1 병설터널 시공에 따른 필라의 응력변화

병설터널 굴착에 따른 필라의 응력변화와 이에 의해 유발되는 불안정성은 Hoek-Brown 파괴기준을 적용한 그림 1에 의해 설명이 가능하다. 그림 1의 A점은 굴착이전의 초기응력 상태이며, B점은 병설터널 시공 후의 필라 응력상태이다.

병설터널 굴착에 의해 필라에는 연직응력의 경우 응력집중이, 수평응력의 경우 응력해방이 유발되므로 필라응력은 점차 Hoek-Brown의 파괴포락선에 근접하며(A→B) 암반의 불안정성이 증가하게 된다. 이때, 안전율은 필라에 발생하는 최대주응력을 작용응력으로 가정하고, 필라의 최소주응력에 해당하는 파괴포락선상의 최대주응력값(그림 1의 C점)을 암반강도로 가정하여 작용응력과 암반강도의 비로서 실용적으로 결정할 수 있다.

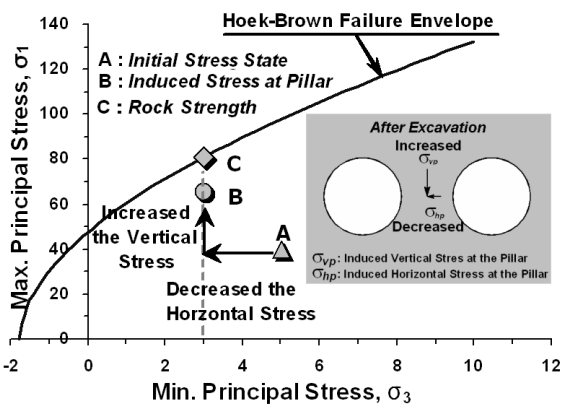


그림 1. 필라의 응력변화와 불안정성(Hoek 등, 1980)

표 1. 기존의 필라 안정성 평가기법 개요

구 분	작용응력( $S_p$ )	필라의 강도( $\sigma_p$ )	안전율	비 고
Matsuda방법	if $H > D$ , $\gamma \cdot D \cdot B/P$ if $H < D$ , $\gamma \cdot H \cdot B/P$	$q_u$	$F_S = \sigma_p / S_p$	$\gamma$ : 단위중량 $H$ : 토피고 $D$ : 터널폭 $B$ : 이완허중폭 $P$ : 필라폭
지류론	$(A_t / A_p) \cdot \gamma \cdot H$	$q_u$		$A_t$ : 유효부담면적 $A_p$ : 필라의 단면적 $q_u$ : 암반의 일축강도 $F_S$ : 안전율

## 2.2 기존의 필라 안정성 평가방법

현재까지 필라의 안정성 평가를 위해 제안된 기법들을 제시하면 표 1과 같다. 표 1에 기술된 바와 같이 필라의 안정성 평가를 위한 기법들로는 Matsuda(1998)의 방법 및 경험식에 의한 개략검토인 지류론(tributary theory) 등이 이미 제안된 바 있으나, 제안된 기법들로는 병설터널의 다양한 지반조건 및 시공조건 등을 합리적으로 반영하기에는 한계가 있다. 실제 현재까지도 병설터널의 터널간 이격거리는 대부분 정역학적 조건에 의해 제안된 최소 이격거리를 별도의 검토 없이 적용하여 설계가 수행되는 것이 일반적인 실정이다. 따라서 보다 합리적이며 정량적인 필라의 안정성 평가방법의 제시가 긴요한 것으로 판단된다.

## 3. 필라 유발응력 평가방법의 제안

### 3.1 개요

본 연구에서는 범용 유한요소 해석프로그램인 *Pentagon<sup>2D</sup>*를 이용하여 병설터널의 굴진에 따른 필라부의 간섭효과와 응력변화 거동의 분석을 위한 다양한 조건들에 대해 수치해석을 시행하였으며, 그 결과를 초기응력에 대한 비(응력비)로서 정규화한 후 exponential 함수를 모함수로 하는 회귀분석을 통해 필라의 굴착에 따른 유발응력평가식을 제안하였다. 또한 제안식과 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하여 필라부의 정량적인 안전율 산정기법을 제안하였다.

### 3.2 필라의 시공을 고려한 수치해석

본 연구에서는 병설터널의 시공형태에 따른 필라의 유발응력 변화경향의 파악을 위해, 범용 유한요소 해석프로그램인 *Pentagon<sup>2D</sup>*를 이용한 수치해석을 수행하였다. 병설터널 굴착에 따른 필라의 간섭효과와 응력변화 거동의 파악을 위해 다양한 조건하에서 분석을 시행하였으며, 이를 토대로 필라의 유발응력 평가식을 제안하였다.

터널굴착시의 기하학적 조건에 따른 필라 유발응력 변화를 평가하기 위해 그림 2에 도시된 격자망 형상을 토대로 필라폭(P)은 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0D로, 토피고(H)는 지표

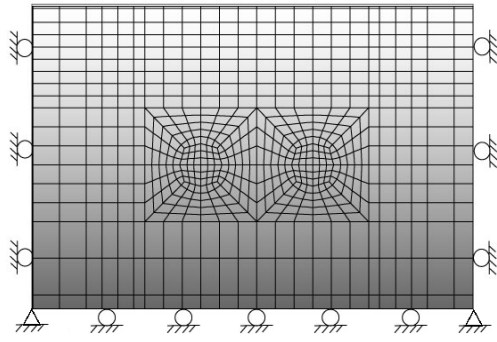


그림 2. 모델링 및 경계조건

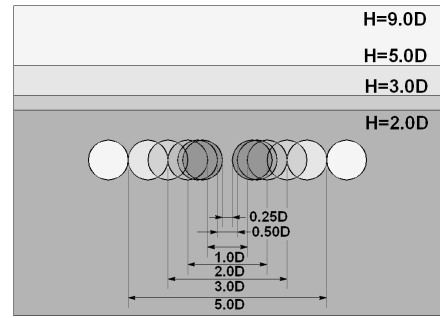


그림 3. 기하학적 해석조건

표 2. 지반 및 지보재의 강도특성

구 분	경 압	보 통 압	연 압	풍 화 압	완전풍화	Soft S/C	Hard S/C	단 위
단위중량, $\gamma$	26.1	24.8	22.9	20.5	18.8	24.0	24.0	$\text{kN/m}^3$
점착력, $c$	3,191	1,588	658	150	18.5	-	-	kPa
전단저항각, $\phi$	42.7	38.0	33.3	29.9	29.5	-	-	°
변형계수, $E$	10,241.0	4,789.0	1,510.0	357.0	32.8	5,000.0	15,000.0	MPa
포이슨비, $\nu$	0.22	0.25	0.29	0.32	0.35	0.20	0.20	-

표 3. 하중분배율

구 분	경 압	보 통 압	연 압	풍 화 압	완전풍화	단 위
굴 착 시	62	58	52	45	34	%
연성숏크리트	20	23	27	33	42	%
강성숏크리트	18	19	21	22	24	%
일괄진장가정	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	m

에서 터널천단까지의 깊이를 2.0, 3.0, 5.0, 9.0D로 변화시켜 가며 분석을 시행하였으며, 경계면의 간섭을 고려하여 좌우 측면부는 2.5D, 하부로는 3.0D 이상을 확보하였다. 또한, 다양한 지반조건의 변화를 반영하기 위하여 전산해석에 적용되는 터널해석용 강도정수는 터널 주변지반을 경압, 보통압, 연압, 풍화암 및 완전풍화 조건으로 구분하여 20개 이상의 설계 사례 분석의 시행을 통해 암반 종류에 따른 강도정수를 표 2와 같이 결정하여 수치해석에 적용하였다. 이외에 하중분배율은 표 3과 같이 장석부 등(1998)이 제안한 산정식에 의해, 측압계수( $k_o$ )는 경압, 보통압, 연암, 풍화암( $k_o = \nu / (1 - \nu)$ )과 완전풍화( $k_o = 1 - \sin\phi$ )를 구분하여 산정한 후 해석에 적용하였다. 이중 측압계수의 경우 지질구조상의 응력등 여러 요소가 복합되어 작용되므로 단순화하여 적용하기에는 논리에 비약이 있으나 본 연구는 수치해석을 통한 병설터널 필라의 안전율을 산정하는 절차에 초점을 맞추어 측압계수의 적용을 단순화하여 적용하였으나, 실무적용시에는 현장 지질조건이나 문헌자료 및 수압시험 등 각종 자료들을 토대로 결정하여 적용하는 것이 타당하다고 판단된다. 그 외 해석에 적용된 기하학적 조건은 그림 3과 같으며 적용된 지반 강도정수는 표 2와 같다.

### 3.3 해석결과에 의한 유발응력 분석 및 정규화

수치해석결과는 그림 4에 도시된 분석위치에 대해 지반 강도와 토피고, 필라폭 등의 변화에 따른 유발응력(induced stress) 변화를 대상으로 정리하였으며, 필라 유발응력 평가식은 정리된 분석결과들의 회귀분석을 통해 제안하였다. 분석결과 토피고의 증가와 필라폭의 감소에 따라 연직 및 수평응력의 크기가 증가하는 것을 확인하였으며, 일반적으로

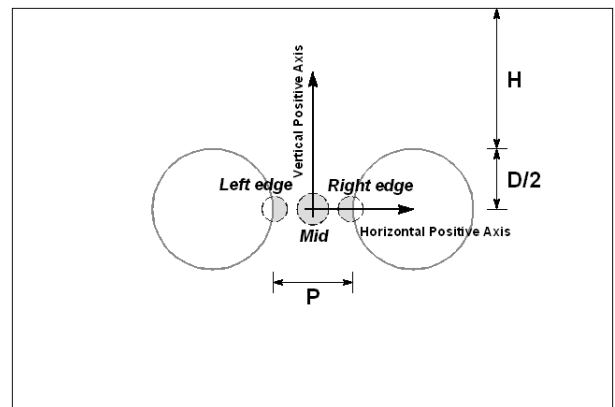
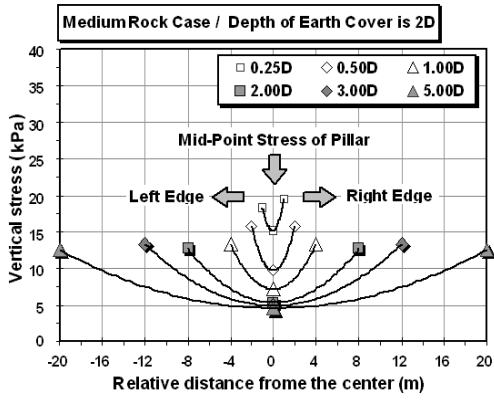
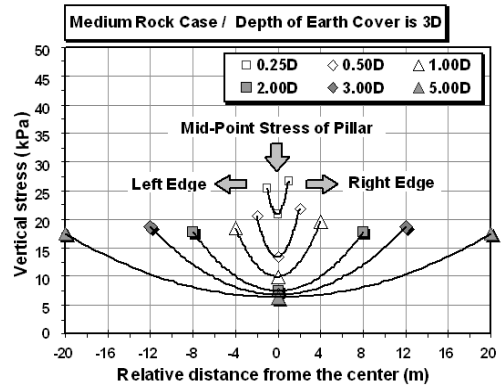


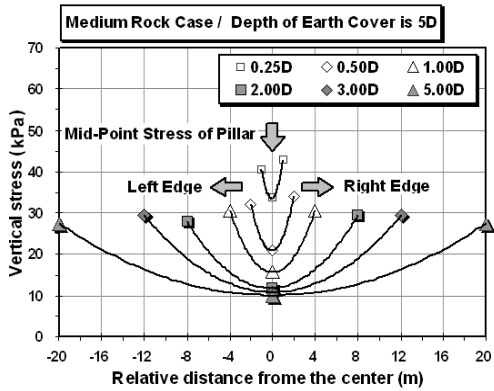
그림 4. 필라응력 분석위치



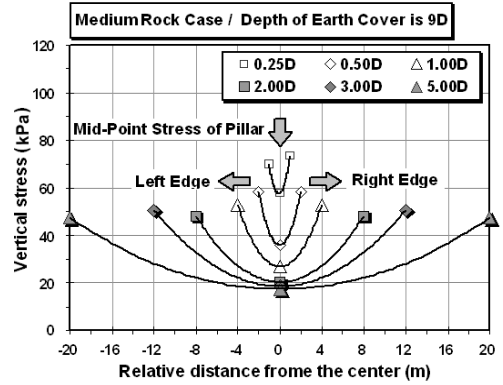
(a) H=2D case의 연직응력



(b) H=3D case의 연직응력

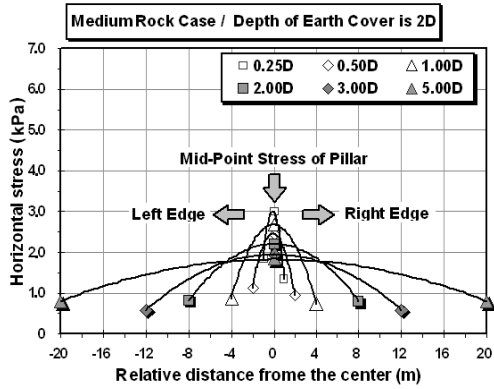


(c) H=5D case의 연직응력

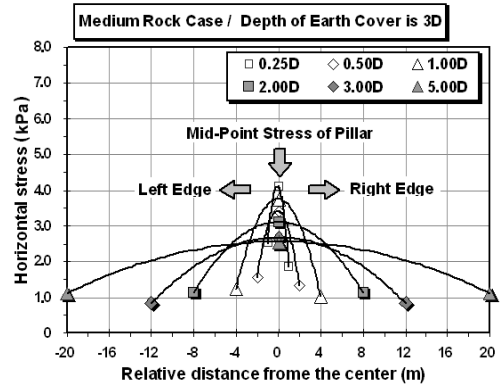


(d) H=9D case의 연직응력

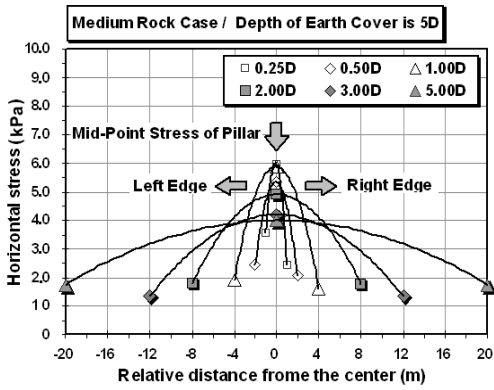
그림 5. 연직응력 변화경향 분석결과(보통암의 예)



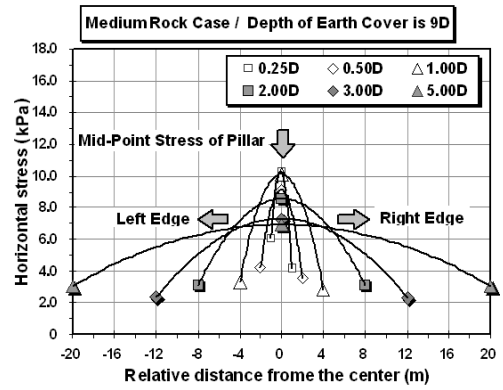
(a) H=2D case의 수평응력



(b) H=3D case의 수평응력



(c) H=5D case의 수평응력



(d) H=9D case의 수평응력

그림 6. 수평응력 변화경향 분석결과(보통암)

필라폭이 0.5D~1.0D의 범위인 경우 유발응력의 크기가 급격히 감소하고 1.0D 이상에서는 거의 일정한 값을 보이는 경향을 확인하였다. 그림 5 및 6에는, 병설터널 필라에 작용하는 연직 및 수평유발응력의 이격거리별 변화경향으로 보통암경우의 분석례를 대표적으로 도시하였다.

수치해석을 통해 분석된 필라의 연직응력 및 수평응력을 초기 연직응력 및 수평응력에 대한 비로 각각 정규화 하였으며, 정규화된 응력비를 토대로 회귀분석을 시행하여 지반강도와 필라폭 및 토피고 등을 종합적으로 고려할 수 있는 필라의 유발응력 평가식을 제시하였다. 유발응력의 정규화 과정을 식으로 표현하면 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$SR_{yp} = \sigma_{y num} / [\gamma \cdot (H + D/2)] \quad (1)$$

$$SR_{xp} = \sigma_{x num} / [k_o \cdot \gamma \cdot (H + D/2)] \quad (2)$$

여기서,  $SR_{yp}$ : 연직응력비,  $SR_{xp}$ : 수평응력비,  $\sigma_{y num}$ ,  $\sigma_{x num}$ : 수치해석에 의해 구한 연직, 수평응력 값이다.

식 (1) 및 (2)에 의해 정규화된 응력 값들 중 대표적으로 보통암에 대한 결과를 표 4에 기술하였다.

표 4. 보통암의 필라 유발응력 정규화 결과

연직응력, $SR_{yp}$	H=2D case			H=3D case			H=5D case			H=9D case			평균	표준편차
	Edge	Mid	평균	Edge	Mid	평균	Edge	Mid	평균	Edge	Mid	평균		
0.25D	3.78	3.03	3.40	3.72	2.99	3.35	3.79	3.05	3.42	3.77	3.03	3.40	3.40	0.029
0.50D	3.14	1.93	2.53	3.02	1.92	2.47	2.99	1.90	2.45	3.06	1.89	2.48	2.48	0.037
1.00D	2.66	1.42	2.04	2.73	1.42	2.07	2.79	1.41	2.10	2.77	1.41	2.09	2.08	0.026
2.00D	2.54	1.06	1.80	2.54	1.07	1.81	2.61	1.07	1.84	2.53	1.07	1.80	1.81	0.020
3.00D	2.67	0.98	1.82	2.67	0.98	1.82	2.67	0.98	1.83	2.67	0.98	1.82	1.82	0.002
5.00D	2.52	0.91	1.72	2.50	0.91	1.71	2.50	0.91	1.71	2.50	0.91	1.71	1.71	0.004
수평응력, $SR_{xp}$	H=2D case			H=3D case			H=5D case			H=9D case			평균	표준편차
	Edge	Mid	평균	Edge	Mid	평균	Edge	Mid	평균	Edge	Mid	평균		
0.25D	0.96	1.82	1.39	0.94	1.78	1.36	0.83	1.65	1.24	0.82	1.63	1.23	1.30	0.084
0.50D	0.63	1.49	1.06	0.62	1.48	1.05	0.62	1.47	1.05	0.62	1.46	1.04	1.05	0.009
1.00D	0.49	1.62	1.06	0.49	1.62	1.06	0.49	1.62	1.05	0.49	1.61	1.05	1.05	0.003
2.00D	0.49	1.34	0.91	0.49	1.35	0.92	0.49	1.35	0.92	0.49	1.37	0.93	0.92	0.006
3.00D	0.36	1.18	0.77	0.36	1.16	0.76	0.37	1.16	0.76	0.37	1.17	0.77	0.77	0.004
5.00D	0.49	1.11	0.80	0.48	1.11	0.79	0.48	1.10	0.79	0.49	1.11	0.80	0.79	0.003

표 5. 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	$a_y$	$b_y$	$c_y$	$a_x$	$b_x$	$c_x$
경암	RMR II	1.785	3.183	2.684	0.928	0.490	1.344
보통암	RMR III	1.794	3.301	2.942			
연암	RMR IV	1.680	2.570	2.654			
풍화암	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

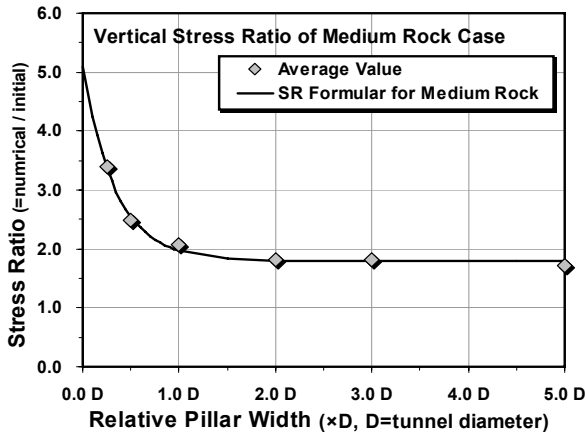
### 3.4 회귀분석을 통한 필라의 유발응력 평가식 제시

표 3에 기술된 바와 같이 암반종류별로 유발응력의 정규화를 시행하였으며, 정규화 결과의 평균값을 토대로 회귀분석을 시행하였다. 회귀분석은 식 3과 같이 exponential 함수를 모함수로 하는 non-linear fitting을 시행하였으며, 주어진 자료에 대해 연암 이상의 경우 평균제곱근오차가 5% 이내, 풍화암 이하의 경우 10% 이내를 만족하는 함수를 응력비 ( $SR_{yp}$  및  $SR_{xp}$ ) 산정식으로 결정하였다.

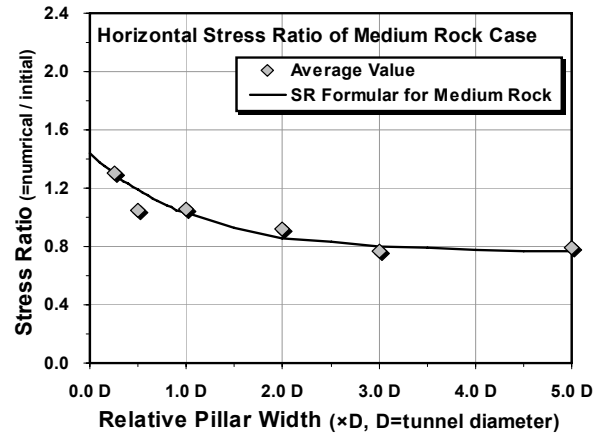
$$SR_{ip} = a_i + b_i \cdot \exp[-c_i \cdot (P/D)] \quad (3)$$

(여기서,  $i = x$  혹은  $y$ )

여기서,  $SR_{ip}$  는 응력비를 의미하며,  $a_i, b_i, c_i$  는 회귀분석을 통해 구한 암반종류에 따른 상수이다. 또한, 식 (3)에서  $i = x$  이면 수평방향을  $y$  이면 연직방향을 의미한다. 표 4는 회귀분석결과 구한 상수 값이며, 대표적으로 경암 및 풍화암의 응력비-회귀곡선 관계를 그림 7에 도시하였다. 추가적으로 표 4의 수평응력비 상수는 연암 이상의 조건에서는 암반종류에 따른 상수값들이 상호 유사하여 동일한 값을 적용하는 것으로 결정하였다. 결과적으로 병설터널 굴착시, 암반



(a) 연직응력비 변화



(b) 수평응력비 변화

그림 7. 필라 두께 변화에 따른 응력비 회귀곡선(보통암의 예)

의 종류, 필라폭 및 토피고가 고려된 응력비는 식 (3)과 표 5를 사용하여 결정할 수 있다. 표 5에 기술된 응력비상수의 경우 지반조건별로 응력비가 수렴하게 되는 필라폭 P은 조금씩 달라지나 대부분 2.0D 이후에는 응력값의 변화량이 극히 미미한 것으로 분석되었으며, 수평응력비의 경우 분석의 편의를 위해 수렴지점을 필라폭 2D 이후라고 가정하였다.

## 4. 필라 보강을 고려한 안전을 평가기법

### 4.1 Hoek-Brown 파괴기준을 이용한 필라부의 암반 강도평가

Hoek-Brown(1980)은 다양한 암석과 암반의 거동해석을 위해 다수의 불연속면을 포함하는 취성 암반에 대한 이론과 시험결과들을 바탕으로 암반의 파괴시 나타나는 암석강도, 최대주응력( $\sigma_1$ ) 및 최소주응력( $\sigma_3$ ) 간의 관계를 평가하는 파괴이론을 제안하였다. Hoek-Brown 파괴기준은 Hoek(1968)의 무결함암의 취성파괴에 대한 연구 결과와 Brown(1970)의 절리 암반 거동의 모델연구 결과들로부터 유도되었으며, 1980년 처음으로 공식이 제안된 이래 몇 차례의 수정과 보완이 이루어 졌으나, 기본적인 형태는 식 (4)와 같다. 본 연구에서는 필라의 응력변화를 반영한 암반강도 변화를 정량적으로 추정하기 위해 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_c + s)^a \quad (4)$$

여기서,  $m_b$ 는 원지반 상태 및 암석종류를 고려한 정수이고  $\sigma_c$ 는 무결암의 일축압축 강도이며,  $s$ 와  $a$ 는 원지반 상태에 따른 상수이다.

### 4.2 무보강 필라의 안전을 평가기법

무보강 필라의 안전율은 식 (4)를 통해 산정되는 암반강도와 터널굴착에 의해 필라에 유발되는 응력의 비로서 결정되며, 병설터널 굴착시 변화되는 필라 작용응력은 식 (3)의 응력비를 토대로 식 (5) 및 (6)에 의해 산정된다. 본 연구에서는 식 (5)에 표현된 최대주응력의 작용방향은 이론적으로 대칭구조물의 정중앙부는 터널굴착 완료 후 연직방향이 주응력 방향이되고 측압계수가 큰 지역 등 특수한 경우를 제외하고는 병설 터널굴착시 연직응력의 증가와 수평응력의 감소에 의해 통상적으로 연직응력이 수평응력보다 크므로 연직방향으로 가정하였다.

$$\sigma_{1p} = SR_{yp} \cdot \gamma \cdot (H + D/2) \quad (5)$$

$$\sigma_{3p} = SR_{xp} \cdot k_o \cdot \gamma \cdot (H + D/2) \quad (6)$$

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

여기서,  $\sigma_{1p}$  및  $\sigma_{3p}$ 는 필라의 최대·최소주응력이다. 그림 1의 C점에 해당하는 필라강도는 필라의 최소주응력( $\sigma_{3p}$ )에 부합하는 Hoek-Brown 파괴기준의 최대주응력( $\sigma_1$ )으로 식 (7)에 의해 산출된다. 결국 병설터널 굴착에 의해 유발되는 지중응력 변화를 고려한 필라의 안전율은 필라에 유발되는 최대주응력( $\sigma_{1p}$ )과 식 (7)에 의해 산정되는 Hoek-Brown 파괴포락선상의 최대주응력의 비로서 식 (8)에 의해 결정되며, 이는 결국 그림 1의 B점과 C점의 최대주응력의 크기비를 의미한다.

$$S_p = \sigma_1 = \sigma_{3p} + \sigma_c (m_b \sigma_{3p} / \sigma_c + s)^a \quad (7)$$

$$F_S = \frac{S_p}{\sigma_{1p}} = \frac{[\sigma_{3p} + \sigma_c (m_b \sigma_{3p} / \sigma_c + s)^a]}{[SR_{yp} \cdot \gamma \cdot (H + D/2)]} \quad (8)$$

여기서,  $m_b$ 는 원지반 상태 및 암석의 종류를 고려한 Hoek-Brown 정수이며,  $s$ 와  $a$ 는 원지반 상태에 의존하는 상수이고  $\sigma_c$ 는 무결암의 일축압축 강도이다. 본 연구에서는  $m_b = m$ ,  $a = 1/2$ 로 가정한 초기 Hoek-Brown 파괴기준을 토대로 암반의 강도를 평가하였다.

### 4.3 보강 필라의 안전을 평가기법

일반적으로 필라의 안정성 확보가 용이하지 않은 경우에는 보강공법을 적용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 제안된 필라의 안정성 평가기법의 적용성 확대를 위해 보강공법의 적용을 고려할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 현재까지 제안된 필라의 보강방법 중 실무적용이 용이한 공법으로는 tension bolt와 grouting공법이 있으며, 각 공법의 개요와 보강원리는 그림 8 및 그림 9와 같다. 그림 8(a)와 같이 필라의 보강을 위해 tension bolt를 적용한 경우, 필라에는 tension bolt의 설치에 의해 추가적인 구속압이 작용한다. 따라서 그림 8(b)에 도시된 바와 같이 tension bolt의 설치에 의해 유발되는 추가적인 구속압( $\Delta\sigma_3$ )은 필라의 강도(B→B')와 유발응력(A→A')을 변화시키며 이에 의해 필라의 안정성은 향상된다. 그림 9(a)는 필라에 grouting을 실시하여 보강한 예로서 이 경우 그림 9(b)와 같이 필라의 일축압축강도 증가에 따라 전체적인 Hoek-Brown의 파괴포락선 크기가 증가하며 결과적으로 필라의 안전을 또한 증가한다. 추가적으로 이와 같이 보강공법이 적용된 필라의 안전을 평가는 전술한 식 (8) 및 식 (9)를 토대로 식 (10)과 같이 평가가 가능하다.

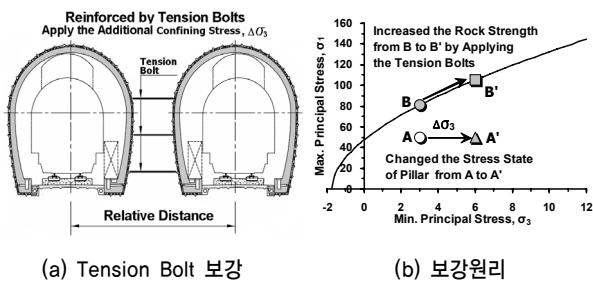


그림 8. Tension Bolt에 의한 보강 개요 및 원리

$$\Delta\sigma_3 = q_{tb} / (S_h \cdot S_v) \quad (9)$$

$$F_S = \{ (\sigma_{3p} + \Delta\sigma_3) + (n \cdot \sigma_c) [m_b(\sigma_{3p} + \Delta\sigma_3) / (n \cdot \sigma_c) + s]^a \} / \sigma_{1p} \quad (10)$$

여기서,  $q_{tb}$ 는 tension bolt의 강도,  $S_h$ 는 연직설치간격이며  $S_v$ 는 수평설치간격이다. 또한,  $n$ 은 grouting에 의한 필라의 일축압축강도 증가 정도를 나타내는 정수이며, 일반적으로 연암의 경우 약 2배, 풍화암은 4배, 그 이하는 40배 까지 증가하는 것으로 보고된 바 있다(배규진 등, 1997; 최성웅 등, 1997). 본 연구에 제안된 보강공법을 실무에 적용하는 경우 tension bolt는 연암 이상의 암반조건에, 풍화암 이하의 암반조건에서는 tension bolt + grouting병행 공법이나 grouting에 의한 보강공법이 보다 효과적인 보강방안으로 판단된다.

### 5. 제안기법을 이용한 변수분석 결과 및 고찰

본 연구에서는 제안된 기법을 이용하여 경암을 제외한 암반종류, 필라폭 및 무결암의 일축압축강도 변화에 따른 필라의 안전을 변화 경향을 분석하였다.

분석시 무결암의 일축압축강도는 Bieniawski(1979)의해 제안된 값을 적용하였으며, 암반강도는  $a = 1/2$ 로 가정한 초기 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하였다. 암반종류와 상태에 따라 결정되는  $m_b$ 와  $s$ 는 이질암에 대해 제안한 값을 적용하였으며, 분석에 적용된 대표값들을 표 6과 같다.

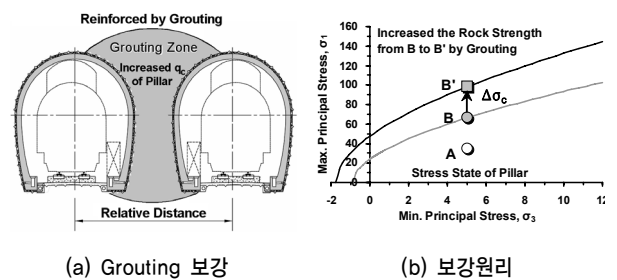


그림 9. Grouting에 의한 보강 개요 및 원리

표 6. 변수분석에 적용된 대표값

종 류	압축강도(Bieniawski, 1979)		H-B상수(Hoek 등, 1980)		토피고 (H)	단위중량 (kPa)	필라폭 (P)	비 고
	범위(MPa)	Description	$m_b$	$s$				
보 통 암	50 ~ 100	Strong	3.5	0.1	10.0D(80m)	26.0	0.5D	D : 터널직경(8.0m) $k_o$ : 0.5 $q_{tb}$ : 98.0KPa
보 통 암	25 ~ 50	Average	1.0	0.004	7.5D(60m)	24.8	0.5D	
연 암	10 ~ 25	Weak	0.2	0.0001	5.0D(40m)	22.9	1.0D	
풍 화 암	2 ~ 10	Very Weak	0.05	0.00001	2.5D(20m)	20.5	1.0D	
완전풍화	1 ~ 2	Extremely Weak	0.01	0	1.25D(10m)	18.8	2.0D	

## 5.1 필라폭 및 토피고 변화에 따른 분석

본 분석은 필라폭(0.1D~5.0D) 및 토피고(1.0D~10.0D) 변화에 따른 필라의 안전율 변화에 대한 분석이며, 분석 시 무결암의 압축강도는 표 5에 제시된 범위 중 최대값과 최소값을 적용하였다. 분석결과 경암의 경우 필라의 폭이 0.5D 이상이거나 토피고가 10D 이상인 경우 제시된 암반강도에 대해 4.0 이상의 충분한 안전율을 확보가 가능하며 완전풍화조건 경우에는 풍화암 보다는 다소 안전율이 작으나 유사한 경향을 보이는 것으로 분석되어 제외하였다.

### 5.1.1 보통암에 대한 분석결과

그림 10은 보통암에 대한 필라폭, 토피고 및 암반강도 변화에 따른 분석결과이다. Bieniawski에 의해 제안된 무결암의 일축압축강도를 토대로 보통암에 대해 분석한 결과, 암반의 강도가 주어진 범위의 하한값(25MPa)일 경우에도 필라폭이 0.5D, 토피고가 7.5D인 경우의 필라 안전율은 1.487이며(그림 10(a)), 토피고가 10.0D까지 증가하더라도 안전율 값이 1.0 이상(그림 10(b))으로 산출되었다. 따라서, 일반적으로 보통암 지반조건에서는 필라의 안정성 확보가 용이한 것으로 분석되었다. 추가적으로 필라폭이 1.0D를 초과하면서 안전율 값이 점차 수렴되는 결과를

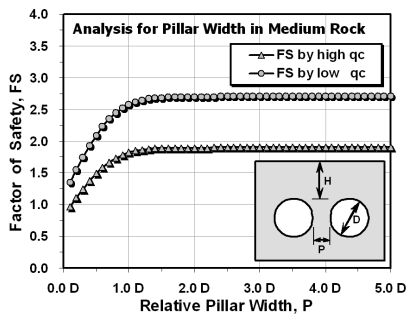
보였다.

### 5.1.2 연암에 대한 분석결과

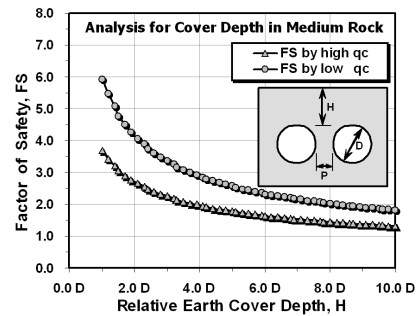
그림 11은 연암에 대한 분석결과이다. Bieniawski에 의해 제안된 무결암의 일축압축강도를 토대로 연암에 대해 분석한 결과, 암반의 강도가 주어진 범위의 하한값(10MPa)인 경우에는 필라의 안전율이 1.0에 미달하는 것으로 분석되었다(그림 11(a)). 또한 토피고가 10.0D까지 증가하는 경우에는 안전율 값이 모두 1.0 이하로 산출되었다(그림 11(b)). 따라서, 일반적으로 연암 조건에서는 필라의 안정성 확보 여부에 대한 세심한 검토가 요구되는 것으로 분석되었다.

### 5.1.3 풍화암에 대한 분석결과

그림 12는 풍화암에 대한 분석결과이다. 풍화암의 경우 제시된 암반강도에 대해 필라의 안전율이 모두 1.0에 미달하는 것으로 분석되었다(그림 12(a)). 또한, 암반의 강도가 주어진 범위의 상한값(10MPa)의 경우에 토피고가 1.4D인 경우의 안전율이 1.1가량으로서 대부분의 구간에서 산정된 안전율이 1.0에 미달하였다(그림 12(b)). 본 분석결과를 통해 풍화암 이하의 지반조건에서는 필라부의 보강을 고려하는 것이 합리적임을 확인하였다.

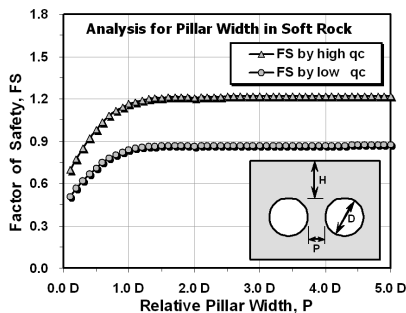


(a) 필라폭에 따른 안전율

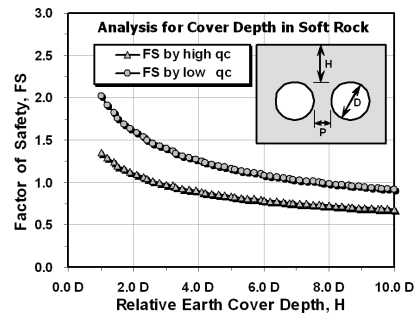


(b) 토피고 변화에 따른 안전율

그림 10. 보통암에 대한 분석결과



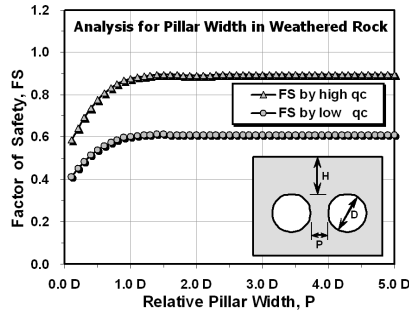
(a) 필라폭에 따른 안전율



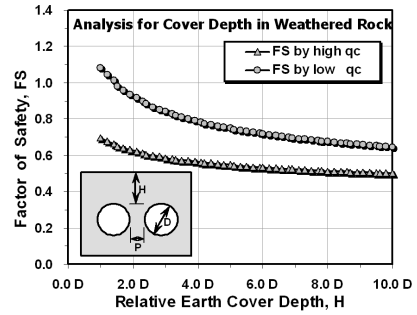
(b) 토피고 변화에 따른 안전율

그림 11. 연암에 대한 분석결과



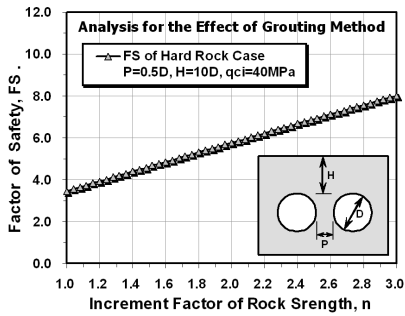


(a) 필라폭에 따른 안전율

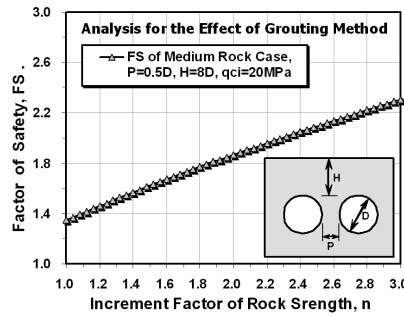


(b) 토피고 변화에 따른 안전율

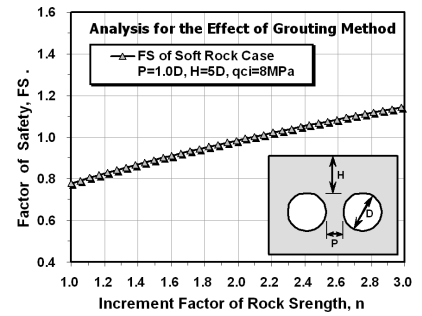
그림 12. 풍화암에 대한 분석결과



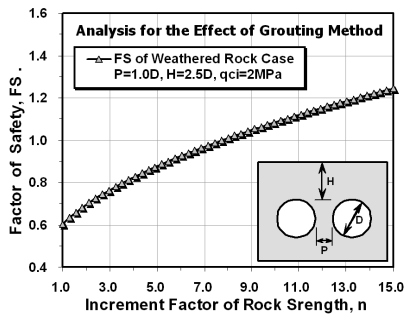
(a) 경암의 경우



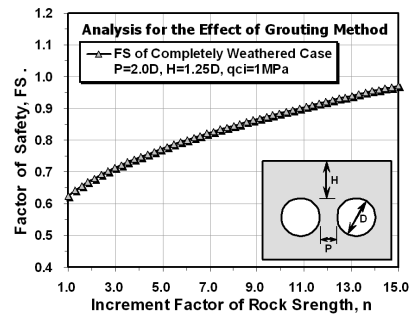
(b) 보통암의 경우



(c) 연암의 경우



(d) 풍화암의 경우



(e) 완전풍화시의 경우

그림 13. 암반 조건별 Grouting 적용에 따른 안전율 변화

## 5.2 필라 보강공법 적용시의 분석

### 5.2.1 Grouting에 의한 보강 효과 분석

그림 13은 grouting에 의해 필라부를 보강하는 경우, 보강 효과에 따른 안전율 변화 경향이다. 분석에 적용된 터널 설치형상 및 주변암반 조건은 표 5와 동일하며 그 외의 조건은 그래프에 명기하였다. 일반적으로 암반의 경우 grouting에 의한 보강효과는 미미하지만 약 2배 정도 증가(Kikuchi, K. 등, 1995)하는 것으로 알려져 있으며, 일반 토사나 풍화토층의 경우는 약 20~40배 가량 증가(최성웅 등, 1997)되는 것으로 보고된바 있다. 따라서, 본 분석에서는 grouting에 의한 주변암반의 강도 증가량이 암반조건에 따라 다른 측면을 고려하여, 경암~연암은 초기 암반 강도의 3배, 풍

화암 및 완전풍화의 경우는 15배까지 강도가 증가하는 경우를 대상으로 하여 안전율의 변화정도를 분석하였다.

Grouting 적용시 연암 이상 암반 필라의 안전율은 식 (6)에 표시된 주변지반의 일축압축강도 증가 정도를 나타내는 정수  $n$ 이 3까지 증가함에 따라 경암의 경우는 2.3배(그림 13(a)), 보통암의 경우는 1.7배(그림 13(b)) 그리고 연암의 경우는 1.6배(그림 13(c)) 가량 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 이는 초기 암반강도의 차이에 기인한 결과이며, 암반강도가 10MPa씩 증가함에 따라 경암의 경우는 평균적으로 15.6%, 보통암은 17.9% 그리고 연암은 30.3%의 안전율 증가효과가 유발되는 것으로 분석되었다. 그림 13의 (d)와 (e)는 풍화암과 완전풍화 조건에 대한 분석결과로서, 일축압축강도가 15배까지 증가함에 따라 풍화암의 경우 2.1

배, 완전풍화의 경우는 약 1.6배 정도의 안전율이 증가하는 것으로 분석되었다. 풍화암과 완전풍화 조건의 경우에는 주변 지반의 강도가 2MPa씩 증가함에 따라 풍화암은 7.6%, 완전풍화시에는 7.9%의 안전율 증가효과가 유발되는 것으로 분석되었다.

### 5.2.2 Tension Bolt에 의한 보강 효과 분석

그림 14는 tension bolt에 의해 필라부를 보강하는 경우, 설치에 따른 안전율 변화 경향이다. 분석에 적용된 터널 설치형상 및 주변암반 조건은 표 5와 동일하며 그 외의 조건은 그래프에 명기하였다.

분석시 tension bolt의 한계인장강도는 1.02kN/ea로 정의하였으며, 연직설치간격은 1.0m로 고정하고 수평설치간격을 1.0m~3.0m까지 변화시켜가며 분석을 시행하였다.

분석결과 tension bolt 설치시 수평설치간격이 3m에서 1.0m로 감소함에 따라 필라의 안전율은 약 1.4~5.4배(경암 1.4, 보통암 1.9, 연암 2.6, 풍화암 4.1 및 완전풍화시 5.4배) 가량 증가하는 것으로 분석되었다. 특히 완전풍화시의 경우, tension bolt의 설치간격이 3.0m인 경우에도 산출되는 안전율 값이 1.22로서 1.0을 상회하는 것으로 평가되었다. 이는 동일한 조건의 무보강시 안전율 0.625(그림 13(e) 참조)에 비해 약 1.95배 가량 증가한 값으로, 이를 통해 tension bolt에 의한 보강이 필라의 안정성 확보를 위한 효과적인 보강방안의 하나라는 것을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 병설터널의 굴착을 대상으로 지반강도, 필라폭 및 토피고를 다양하게 변화시켜가며 수행된 수치해석 결과에 대한 회귀분석을 시행하였으며, 이를 통해 필라의 유발응력 평가식과 Hoek-Brown 파괴기준을 적용한 정량적인 필라의 안전율 평가방법을 제안하였다. 이는 병설터널의 다양한 지반조건 및 시공조건 등을 합리적으로 반영하기에는 한계가 있는 기존의 방법들에 비해 다양한 조건들을 반영한 보다 합리적이며 정량적인 필라의 안정성 평가방법으로 판단된다. 본 연구를 통해 얻은 성과를 간단하게 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보통암에 대한 분석 결과, 암반의 강도가 주어진 범위의 하한값(25MPa)일 경우에도 필라폭이 0.5D 조건에서 토피고가 10.0D까지 증가하더라도 안전율 값이 1.0 이상으로 일반적으로 보통암 지반조건에서는 필라의 안정성 확보가 용이한 것으로 분석되었다.
- (2) 보통암에 대한 분석 결과, 암반의 강도가 주어진 범위의 하한값(10MPa)인 경우와 토피고가 10.0D까지 증가하는 경우에는 필라의 안전율이 1.0에 미달하는 것으로 분석되어 일반적으로 연암 조건에서는 필라의 안정성 확보 여부에 대한 세심한 검토가 요구되는 것으로 분석되었다.

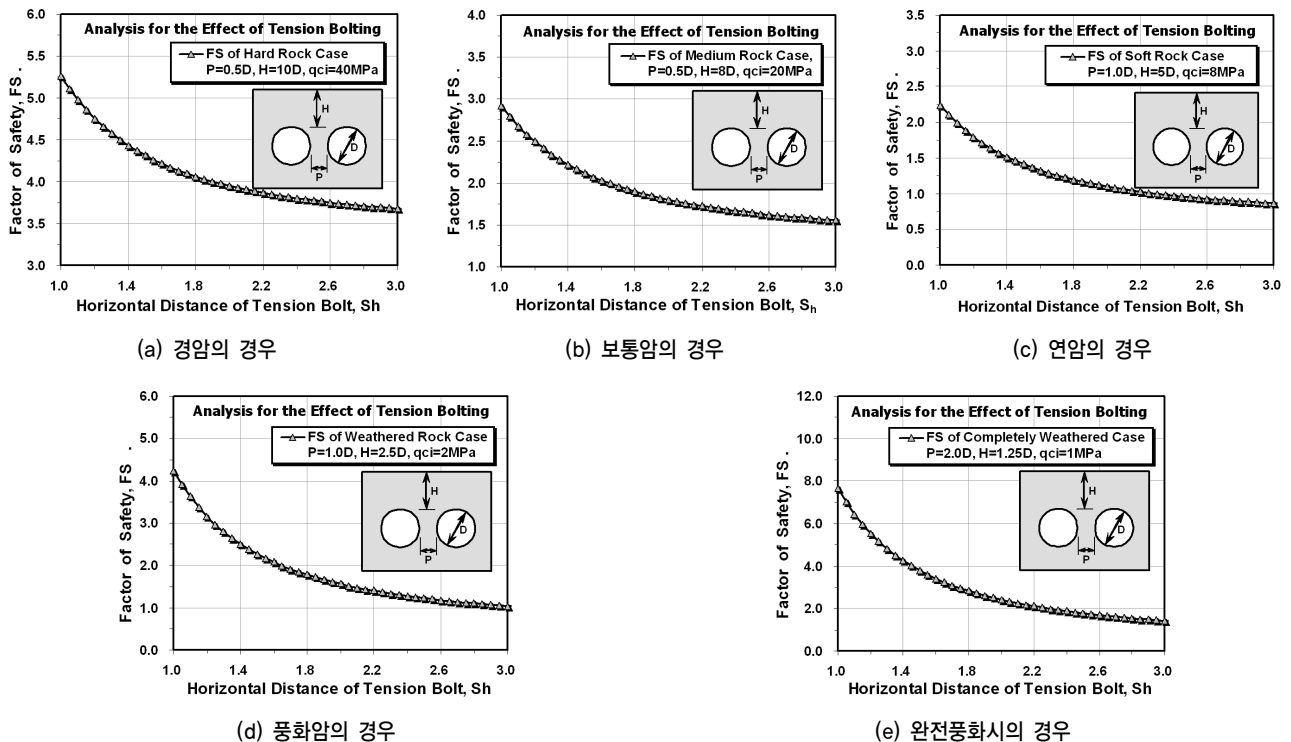


그림 14. 암반 조건별 tension bolts 적용에 따른 안전율 변화

## 참 고 문 헌

- (3) 풍화암의 경우 제시된 암반강도에 대해 필라의 안전율이 대부분 1.0에 미달하고 암반의 강도가 주어진 범위의 상한값(10MPa)인 경우에만 토피고 1.4D에서 안전율 1.1가량으로 대부분의 구간에서 산정된 안전율이 1.0에 미달하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 풍화암 이하의 지반조건에서는 필라부의 보강을 고려하는 것이 합리적임을 확인하였다.
- (4) Grouting에 의한 보강시 주변지반의 일축압축강도 증가 정도를 나타내는 정수 n이 3까지 증가함에 따라 경암은 2.3배, 보통암은 1.7배, 연암은 1.6배 가량 증가하는 것으로 분석되었으며, 풍화암과 완전풍화 조건에서는 n이 15까지 증가함에 따라 풍화암은 2.1배, 완전풍화 조건은 약 1.6배 정도의 안전율이 증가하는 것으로 분석되었다.
- (5) tension bolt에 의한 보강시 수평설치간격이 3m에서 1.0m로 감소함에 따라 필라의 안전율은 약 1.4~5.4배(경암 1.4, 보통암 1.9, 연암 2.6, 풍화암 4.1 및 완전풍화시 5.4배) 가량 증가하는 것으로 분석되었다.

마지막으로 제안된 기법은 병설터널 적용시 예비설계단계에서 필라의 안정성 검토 및 보강공법의 적용여부, 터널 간의 한계이격거리 결정 등에 폭넓은 적용이 가능하며, 필라의 형상 및 보강공법을 고려한 정량적 설계기법이 정립되지 않은 현실을 고려할 때 예비설계 단계에서 효과적인 적용이 가능한 하나의 대안으로 판단된다.

1. 김종우, 전석원, 서영호 (2004), 지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구, *한국암반공학회지*, Vol. 14, No. 1, pp. 43~53.
2. 김학문 (1997), 쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과, *한국암반공학회지*, Vol. 7, No. 2, pp. 136~142.
3. 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완 (1997), Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구, *한국암반공학회지*, Vol. 7, No. 4, pp. 299~309.
4. 백영식, 김홍택, 임수빈 (1993), 산악지 쌍굴 수로터널 해석에 대한 고찰, *한국지반공학회 '93 봄 학술발표회 논문집*, pp. 21~26.
5. 임수빈, 이성민, 이제우, 백영식 (1994), 터널 굴착시 고려해야 할 주변 암반의 매개변수와 진행성 파괴, *한국지반공학회 창립10주년기념 및 '94 가을 학술발표회 논문집*, pp. 231~234.
6. 장석부, 문현구 (1998), 터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 14, No. 5, pp. 5~15.
7. 최성용, 신희순 (1997), 연약지반내 굴착터널의 안정성 평가 및 최적보강설계에 관한 연구, *한국암반공학회지*, Vol. 7, No. 3, pp. 191~201.
8. Bienniaowski, Z. T. (1979), *Engineering Rock Mass Classification*, John Wiley & Sons, New York, 251 p.
9. Brown, E. T. (1970), Strength of Models of Rock with Intermittent Joints, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, Vol. 96, No. SM 6, pp. 1935~1949.
10. Hoek, E. (1968), *Rock Mechanics in Engineering Practice*, John & Wiley, London, 442 p.
11. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.
12. Kikuchi, K. and Mito, Y. (1995), Case Study on the Mechanical Improvement of Rock Masses by Grouting, *Proceeding of International Workshop on the Rock Foundations*, Tokyo, pp. 393~397.
13. Matsuda, T., Terada, K., Igarashi, M. and Miura, K. (1998), Ground Behavior and Settlement Control of Twin Tunnels in Soil Ground, *Tunnels and Metropolises*, Vol. 2, pp. 1193~1198.

(접수일: 2009. 7. 6 심사일: 2009. 8. 4 심사완료일: 2009. 11. 16)