

2-Arch 터널과 병렬 터널 접속부에서의 텐션볼트를 사용한 필라 보강 방법에 대한 수치해석

박연준*, 최재진

A Numerical Study on the Reinforcement Method of a Pillar Using Tension Bolts at the Connecting Part between 2-Arch Tunnels and Parallel Tunnels

Park Yeon-Jun*, Choi Jae-Jin

Abstract Two-arch tunnels require minimal spacing between the 2 tunnels and thus occupy small amount of land compared to parallel tunnels. But it is rather expensive. The parallel tunnel is not as expensive, but it requires more land than 2-arch tunnels. This may cause a problem when there is a land shortage. The new design is to connect these two types of tunnels by another pair of parallel tunnels where the separation distance is gradually increasing. The applicability of this new design to the cases where rock condition is not even fair has to be verified since the width of the pillar between the connecting tunnels can be quite narrow. Therefore both two and three dimensional numerical analyses were conducted and pillar stability was examined for rock classes IV and V in two different ways. Results showed that this new design is still effective for poor rock conditions if central pillar is properly reinforced by tension bolts as long as overburden is less than five times of the tunnel diameter.

Key words 2-arch tunnel, Parallel tunnel, Pillar 2-arch varying section tunnel, Tension bolt

초 록 2-아치 터널은 터널의 간격이 매우 좁아서 병렬 터널에 비해 점유 면적이 작으나 경제적이지 못하다. 병렬 터널은 경제적이긴 하지만 2-아치 터널보다 점유 면적이 커서 용지의 매입이 어려운 경우에는 문제가 될 수 있다. 새로운 설계는 이 두 터널을 터널의 간격이 점차 증가하는 제3의 병렬터널로 연결시키는 것이다. 접속 터널의 필라는 폭이 매우 좁을 수 있기 때문에 이 새로운 설계를 불량한 암반에 적용하려면 검증이 필요하다. 이에 4등급 및 5등급 암반에 대해 2차원 및 3차원 수치해석을 이용하여 2가지 방법으로 안정성 검토를 수행하였다. 검토 결과, 중앙 필라가 텐션 볼트로 적절히 보강된다면 터널 심도가 직경의 5배 이하인 경우에는 적용이 가능하였다.

핵심어 2-아치 터널, 병렬 터널, 2-arch 변단면 터널, 필라, 텐션 볼트

1. 서 론

최근 도시의 고밀도화와 산업기반시설 확충의 필요성으로 인해 도로, 지하철, 고속철도 등 교통시설에 필요

한 많은 터널이 시공되고 있다. 도로 터널의 경우 단선 병렬 터널로 건설하는 것이 일반적이는데, 안정성 확보를 위해 인접한 두 개의 터널 사이에 일정한 간격이 필요하다. 이로 인해 터널과 연결되는 도로 또한 동일한 간격으로 분리되어야 하기 때문에 도로가 점유하는 면적이 넓어지게 된다. 그러나 도심의 경우 용지의 매입이 용이하지 않으며, 최근 자연환경보존에 대한 사회적 요구에 따라 병렬 터널의 사이의 간격을 최소화할 필요가 있다.

2-Arch 터널은 이러한 요구에 부응하여 2개의 터널을 인접 시공하고 그 사이를 콘크리트 기둥으로 지지하

Received: Oct. 16, 2015

Revised: Oct. 28, 2015

Accepted: Oct. 28, 2015

***Corresponding Author:** Yeon-Jun Park

Tel) +82312202580, Fax) +82312202522

E-Mail) yjpark@suwon.ac.kr

Civil engineering, San 2-2 Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea

는 방식으로 설계된다. 하지만, 2-Arch 터널은 시공공정이 복잡하고 공사비도 고가이다. 따라서 터널의 입구부 및 출구부는 2-Arch 터널로, 그 이외의 구간에서는 병렬 터널로 설계하면 환경성, 시공성, 경제성 측면에서 매우 유리하다.

이러한 터널의 경우, 2-Arch 터널과 병렬 터널의 접속부에서 터널의 간격이 점차 넓어지게 되는 구간이 필연적으로 나타나게 되는데 이 구간을 '2-Arch 변단면 터널'이라 한다(최재진 외, 2012). 이 구간에서는 두 터널 사이에 존재하는 암반 필라의 폭이 일반적인 병렬터널의 경우보다 좁기 때문에 중앙 필라의 안정성 확보가 매우 중요하다(강재기 외, 2014).

필라의 안정성 확보를 위해서는 그라우팅에 의한 보강방법과 텐션볼트를 사용하는 방법이 있는데, 그라우팅 보강방법의 경우 그 효과를 정량적으로 평가하기 어려워 설계 및 해석에 적용하기 어렵다. 텐션볼트에 의한 보강 방법은 암반 필라의 좌·우측에 하중을 가함으로써 필라의 안정성 향상을 도모하는 방법이므로 보강 효과를 정량적으로 평가할 수 있다(최재진 외, 2012; 김원범 외, 2014). 본 연구에서는 텐션볼트를 이용하여 접속구간의 중앙 암반 필라를 보다 효과적으로 보강할 수 있는 방안들을 고안하고, 그 효과를 수치해석적으로 검증하여 효과적인 보강 방법을 찾아내고자 하였다.

암반의 상태가 양호한 경우에는 중앙 필라의 안정성에 큰 문제가 없으며, 보강 효과도 그리 크지 않으므로 본 연구에서는 불량한 지반인 4, 5등급 암반을 대상으로 암반 필라 안정성 검토를 수행하였다. 중앙 필라부의 안정성 증대를 위한 텐션볼트의 보강효과 검증을 통해 보다 효과적인 텐션볼트 보강방안을 제시하기 위하여 필라의 폭이 변하는 2-Arch 변단면 터널 구간에 대해 필라 보강여부, 텐션볼트 설치방법, 토피고, 암반등급 등을 변화시키면서 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하여 암반 필라의 안정성을 검토하였다. 안정성 검토는 무보강의 경우와 텐션볼트 보강의 경우로 구분하여 암반 필라 내부의 응력을 확인하고, 보강의 경우도 텐션볼트의 시공 순서 및 방법에 따라 3가지 Case로 구분하여 암반 필라 보강 Case별 보강효과를 비교하였다.

보강 효과에 따른 터널의 안전을 산정방법으로는 보강 효과의 고려가 가능한 방법으로 황정순 등(2005)과 백승철 등(2009)이 제안한 응력비를 이용한 방법, 그리고 Hoek & Brown(1980)이 제안한 강도/응력비를 이용한 방법을 적용하였다.

연구 대상 터널로는 가장 많이 사용되는 굴착폭 11.5m의 2차로 도로 터널을 가정하였고, 굴착 및 지보패턴은 한국도로공사의 표준지보패턴을 적용하였다. 4, 5등

급 암반임을 고려하여 토피고는 1D, 2D 및 5D로 가정하였으며, 필라 폭은 2-Arch 터널 접속부에서 0.25D로 시작하여 점차 두꺼워져 병렬 터널 접속부에서는 0.5D로 확장되도록 하였다.

2. 텐션 볼트를 이용한 암반 필라의 보강 방법

텐션볼트를 이용하여 암반 필라를 보강하는 기존의 방법은 두 개의 터널이 모두 굴착된 후에 미리 설치된 파이프형의 볼트에 강선을 삽입하여 인장력을 가하도록 되어있다. 이 방법은 공정도 다소 복잡하고 후행터널의 굴착 시 이미 설치된 볼트의 단부, 즉 후행 터널측 두부를 손상시킬 위험이 있으며, 후행 터널이 굴착되는 동안에는 볼트에 인장력이 가해지지 않은 상태이므로 필라의 폭이 매우 작은 경우에는 위험을 초래할 수도 있다.

본 연구에서는 기존의 방법이 가진 단점들을 보완할 수 있는 두 가지 설치 방법을 추가로 제안하고, 수치해석적인 검증을 통하여 세 가지 방법 중 가장 효과적인 방법을 찾고자 한다. 해석 조건은 텐션볼트를 설치하지 않는 무보강의 경우와 텐션볼트를 설치한 보강의 경우로 구분하여 적용하였으며, 보강의 경우 텐션볼트 설치 방법에 따라 3개의 보강 Case로 구분하여 텐션볼트 보강방법에 따른 보강효과를 비교하였다.

2.1 후 인장법(Case 1)

보강 Case 1은 일반적으로 사용되는 텐션볼트 보강방법으로 Fig. 1과 같은 일련의 과정으로 굴착 및 보강이 이루어진다. 우선 좌측터널을 굴착한 후 숏크리트를 타설하고 록볼트를 설치한다. 이후 굴착된 좌측터널에서 텐션볼트 설치를 위한 파이프형 볼트를 우측터널의 예상 굴착 벽면까지 설치하고 그라우팅하여 볼트를 고정시킨다. 다음으로 우측터널을 굴착 및 보강하고, 미리 설치된 볼트 내에 강선을 삽입한 후 강성 인발하여 체결한다.

이 방법의 경우 우측터널의 발파 굴착 시 발파로 인하여 텐션볼트 체결부의 손상이 발생할 수 있으며, 우측 터널 굴착 이전에는 긴장력이 가해지지 않기 때문에 텐션 볼트의 보강 효과를 충분히 활용할 수 없다는 단점이 있다.

2.2 선 인장법(Case 2)

보강 Case 2는 우측 터널 굴착 시 발파로 인해 텐션볼트 체결부에 손상이 발생할 수 있는 단점도 보완하고, 우측 터널 굴착 이전에 인장을 가함으로써 보강 효과를

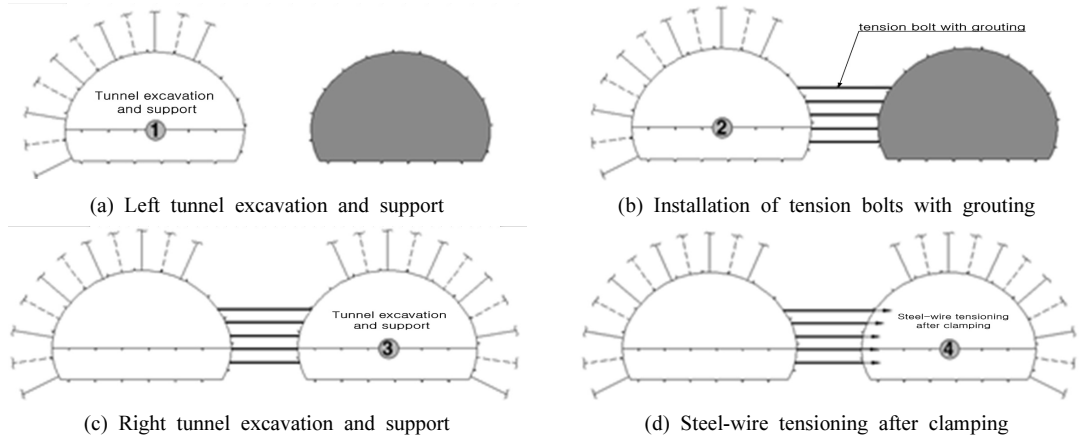


Fig. 1. Installation process of tension bolt for Case 1

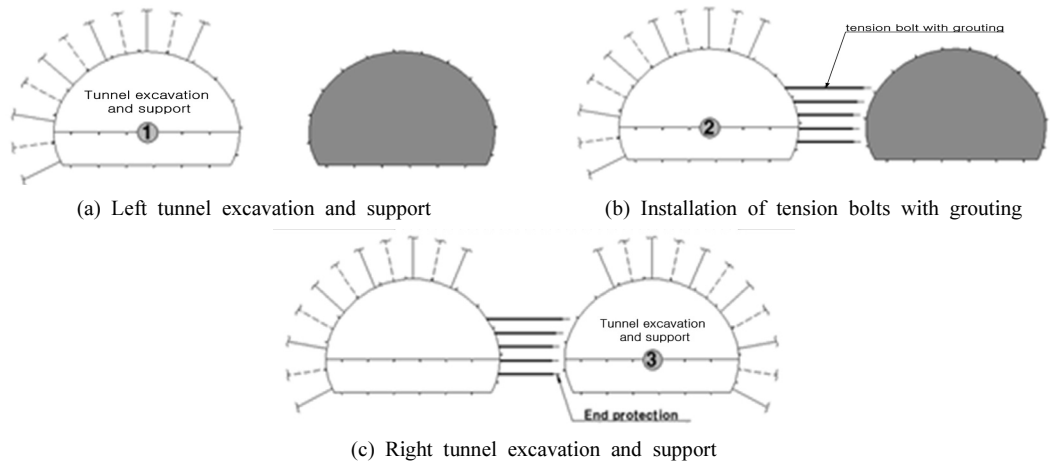


Fig. 2. Installation process of tension bolt for Case 2

극대화하기 위해 Fig. 2에 도시한 바와 같이 좌측터널 굴착 후 텐션볼트를 설치하고 강성 인발하여 체결하는 방법이다. 이 때 텐션볼트의 단부를 우측터널 예상 굴착 벽면으로부터 일정한 거리를 유지시켜 우측 터널 굴착 시 볼트의 단부가 손상되지 않도록 한다.

2.3 절충법(Case 3)

보강 Case 3의 절충법은 선 인장법과 후 인장법을 절충한 형태로 Fig. 3에 도시한 과정에 따라 이루어진다. 좌측터널을 굴착하고 지보재를 설치한 후 보강 Case 2와 동일한 방법으로 우측터널 예상 굴착 벽면에 일정한 거리를 유지시켜 계획된 텐션볼트 수량의 절반만을 선 인장법으로 설치하고, 나머지 수량은 우측터널 굴착 후에 후 인장법으로 설치하는 것이다. 이 방법은 보강 Case

2와 같이 우측터널 발파 굴착 시 단부 보호의 장점을 지니고 있으며, 단부 고정만 가능한 선 인장 텐션볼트 사이에 필라를 관통하여 일반적으로 사용되고 있는 후 인장 텐션볼트를 설치해 줌으로써 보강 Case 2보다 향상된 보강효과를 나타낼 수도 있을 것으로 판단하였다.

3. 암반 필라의 안정성 평가 방법

3.1 응력비를 이용한 방법

암반 필라의 안전율은 암반강도와 터널굴착에 의해 필라에 작용하는 응력의 비로서 결정된다. 황정순 등 (2005)은 터널 폭이 D이고 토피고가 H인 병렬터널에서 필라 유발응력의 정규화 및 유발응력 평가식을 식 (1) 및 식 (2)와 같이 제안하였다. 병렬터널 굴착 시 변화되

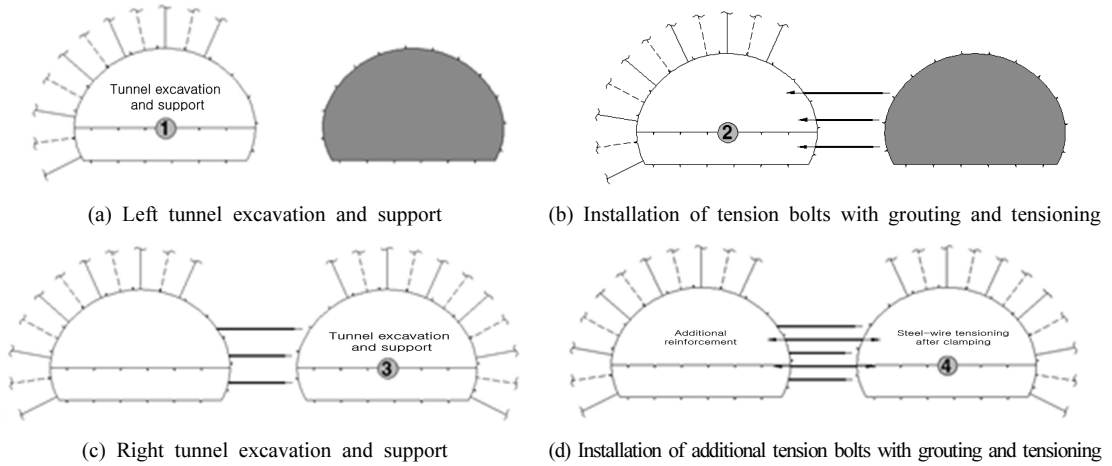


Fig. 3. Installation process of tension bolt for Case 3

는 필라의 작용응력은 식 (1) 및 식 (2)의 응력비를 토대로 식 (3) 및 식 (4)에 의해 산정된다. 식(3)에 표현된 최대주응력의 작용방향은 이론적으로 대칭구조물의 정중앙부에서는 터널 굴착 완료 후 연직방향이 된다. 측압계수가 큰 지역 등 특수한 경우를 제외하고는 병렬터널 굴착 시 연직응력의 증가와 수평응력의 감소에 의해 통상적으로 연직응력이 수평응력보다 크므로 최대주응력을 연직방향으로 가정하였다.

$$SR_{yp} = \frac{\sigma_{y,vm}}{[\gamma(H + \frac{D}{2})]} \quad (1)$$

$$SR_{xp} = \frac{\sigma_{x,vm}}{[K_0 \gamma(H + \frac{D}{2})]} \quad (2)$$

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

$$\sigma_{3p} = SR_{xp} K_0 \gamma(H + \frac{D}{2}) \quad (4)$$

여기서, SR_{yp} : 연직응력비
 SR_{xp} : 수평응력비
 $\sigma_{y,vm}$: 수치해석에 의해 구한 연직응력
 $\sigma_{x,vm}$: 수치해석에 의해 구한 수평응력
 K_0 : 측압계수이며,
 σ_{1p} : 필라에 작용하는 최대주응력
 σ_{3p} : 필라에 작용하는 최소주응력이다.

결국 병렬터널 굴착에 의해 유발되는 지중응력 변화를 고려한 필라의 안전율은 필라에 유발되는 최대주응력(σ_{1p})과 식 (5)에 의해 산정되는 Hoek & Brown(1980) 파괴포락선상의 최대주응력의 비로서 식(6)에 의해 결정될 수 있다.

$$S_p = \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s)^a \quad (5)$$

$$Fs = \frac{S_p}{\sigma_{1p}} \quad (6)$$

여기서, S_p : 필라의 강도
 σ_{ci} : 무결암의 일축압축강도
 m_b : 암반의 재료특성에 따라 결정되는 상수
 s, a : 암반의 특성을 반영하는 상수이다.

암반 필라의 안정성 확보가 어려운 경우에는 안정성 확보를 위해 필라에 보강공법을 적용하는 것이 일반적이다. 현재까지 제안된 암반 필라의 보강방법 중 실무 적용이 용이한 공법으로는 텐션볼트 및 그라우팅 공법 등이 있으나, 그라우팅 공법의 경우 그라우팅 효과를 정량적으로 평가하기가 어렵다. 따라서 정량화가 상대적으로 용이한 텐션볼트를 이용하여 암반 필라의 보강 효과를 평가하는 기법이 제시되었다(최재진 외, 2012). Fig. 4 (a)와 같이 암반 필라의 보강을 위해 텐션볼트를 적용한 경우, 필라 측면에는 텐션볼트의 설치에 의해 추가적인 구속압이 작용한다. 따라서 Fig. 4 (b)에 도시

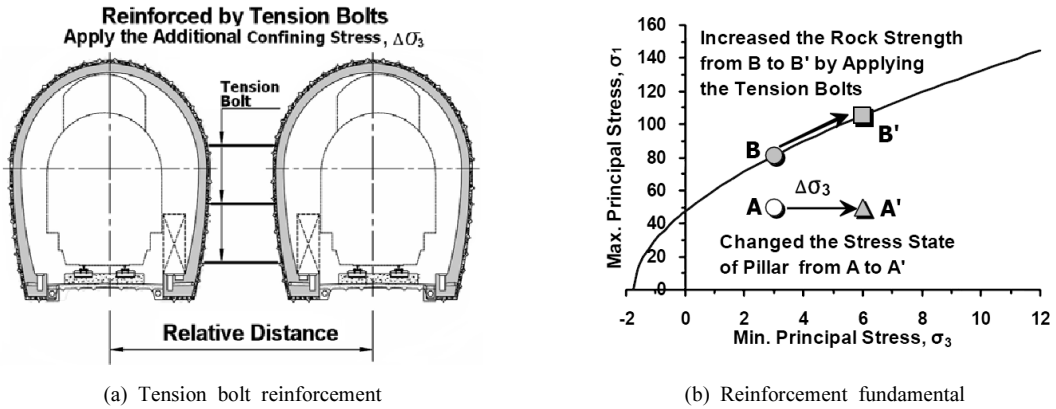


Fig. 4. Summary and fundamental of reinforcement by tension bolt(Baek et al, 2009)

된 바와 같이 텐션볼트의 설치에 의해 유발되는 추가적인 구속압($\Delta\sigma_3$)으로 말미암아 필라의 수평응력이 변화되고(A→A') 이에 따라 필라의 강도도 증가되어(B→B') 필라의 안정성이 향상되게 된다.

이를 해석에 적용하기 위해서는 텐션볼트에 의한 구속효과를 나타낼 수 있는 식을 필요로 한다. 텐션볼트 설치 시 연직 및 수평 설치간격을 고려하여 필라의 최대주응력을 구하는 식을 백승철 등(2009)이 식 (7)과 같이 제안하였다. 이때 안전율은 무보강 암반 필라의 안전율 평가기법과 동일하게 식 (6)로 평가되며, 텐션볼트에 의한 구속응력은 식 (8)로 계산된다.

$$S_p = \sigma_1 = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) + (n \sigma_{ci}) \left[\left(m_b \frac{(\sigma_3 + \Delta\sigma_3)}{(n \sigma_{ci})} + s \right)^a \right] \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_3 = \frac{q_{tb}}{S_h S_v} \quad (8)$$

- 여기서, $\Delta\sigma_3$: 텐션볼트에 의해 증가되는 응력
- q_{tb} : 텐션볼트에 가해지는 긴장력
- S_h : 연직설치간격
- S_v : 수평설치간격
- n : 그라우팅에 의한 필라의 압축강도 증가 계수이다.

3.2 강도/응력비를 이용한 방법

입의의 점에서의 주응력이 (σ_1, σ_3)일 때 이점에서의 파괴는 식 (9)의 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 계산되는 파괴 시 축방향 응력, 즉 암반강도 σ_{1f} 와 σ_1 을 비

교함으로써 판단할 수 있다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad (9)$$

여기서, 암반의 일축압축강도 σ_{cm} 과 최소주응력 σ_3 에 대한 선의 기울기 k 는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \quad k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (10)$$

- 여기서, c : 실제 암반의 점착력
- ϕ : 실제 암반의 내부마찰각이다.

Fig. 5는 암반 필라의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이다. 강도/응력비(strength/stress ratio)는 주어진 응력상태에서의 안전율을 의미하며, 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{강도/응력비} = \frac{\sigma_3 - \sigma_{1f}}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (11)$$

진행성 파괴(progressive failure)나 응력 전이과정(stress transfer progress)을 고려하여 평균 강도/응력비가 1.0 이하가 되면 필라 전체가 불안해지는 것으로 판단할 수 있다(Hoek and Brown, 1980).

4. 수치해석모델링과 해석 Case

2차원 해석의 경우 유한차분법(FDM)을 기반으로 한 FLAC^{2D}를 사용하였고, 3차원 해석은 유한요소법(FEM)

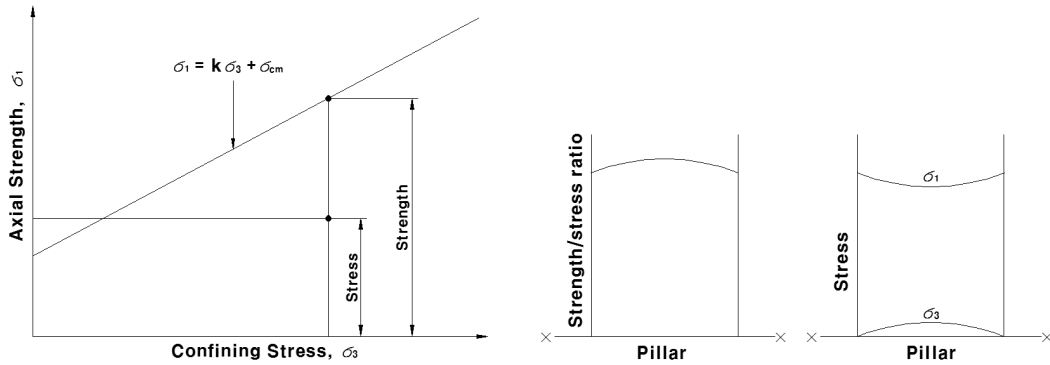


Fig. 5. Strength/stress ratio curve (Hoek & Brown, 1980)

Table 1. Additional rock mass parameters used to determine the factor of safety

Type	γ (kN/m ³)	σ'_{ci} (MPa)	m_b	m_i	GSI	D_a	s	a
IV	23	40	0.201	20	30	0.15	2.67×10^{-4}	0.522
V	21	25	0.098	20	10	0.15	2.89×10^{-5}	0.585

을 기반으로 한 MIDAS/GTS를 사용하였다. 일반적으로 4등급 이하의 암반에서는 다수의 절리군이 존재하거나 풍화되었을 가능성도 있으며, 천부의 터널 입구부일 경우에는 과거에 측압계수가 컸더라도 자유면인 지표 방향으로 변형되면서 측압이 해소될 가능성이 많으므로 측압계수(K_0)는 1.0을 적용하였다.

변단면 터널 구간의 암반 필라를 보강하지 않은 경우와 텐션볼트로 보강한 경우로 구분하고, 보강을 한 경우는 다시 텐션볼트 보강방법에 따른 보강효과를 규명하기 위해 3개의 보강 Case로 구분하여 해석을 수행하고 안전율을 구하였다.

4.1 지반 특성

응력비를 이용한 방법의 경우 안전율을 산정하기 위해 지질강도지수(GSI) 및 무결암강도(σ'_{ci}) 등의 추가적인 지반 물성치가 필요하다. 본 연구에서는 암반 필라의 안전율을 산정하기 위해 여러 문헌들을 통계적으로 분석하여 Table 1과 같은 지반 특성을 추가로 적용하였다.

Table 1에서 m_b 는 암반의 종류에 따른 재료 상수로 m_i 값에 따라 달라지며, s 및 a 는 암반의 특성을 반영한 상수이다. 암석 종류에 따른 m_i 값은 화성암과 변성암의 경우 9~33의 값을 가지게 된다. 본 연구에서는 m_i 값을 중간값에 가까운 20으로 가정하여 4등급 및 5등급 암반에 동일하게 적용하였다. 굴착지반상태에 따른 계수인 D_a 값은 암반 조건이 4등급 및 5등급의 불량

한 암반에 해당되므로 발파에 의한 굴착 시 조절발파를 수행하여도 지반의 교란이 발생한다는 가정 하에 0.15의 값을 적용하였다.

4.2 수치 모델링과 해석 Case

해석 대상으로는 가장 많이 건설되는 2차로 도로 터널인 직경 11.5 m의 마제형 터널을 선택하였다. 변단면 구간은 터널 입구부에 가까이 있음을 감안하여 터널의 심도는 최대 터널 폭의 5배까지로 하였으며, 해석 지반이 4등급 및 5등급의 불량한 지반조건임을 고려하여 터널 굴착방법을 상하 반단면 분할굴착으로 하였고, 지보패턴은 한국도로공사 도로설계요령(2009)에 제시된 표준지보패턴을 적용하였다.

텐션볼트는 모든 Case에 동일하게 한 단면에 5개를 설치하였으며, 수직 설치간격을 1 m로 하였다. 또한 수평 설치간격은 암반등급에 따른 1회 굴진장과 동일하게 4등급 암반에서는 1.5 m, 5등급 암반에서는 1.2 m로 적용하였다. 지반조건이 4등급 및 5등급의 암반이어서 상하 반단면을 분할 굴착하므로 터널 상부 굴착 시 3개, 터널 하부 반단면 굴착 후 2개의 텐션볼트를 설치하였다. 텐션볼트에는 각각 150 kN의 긴장력을 가하였다.

Fig. 6 (a)는 2차원 해석에 사용된 횡단면 모델을 도시한 것이다. 필라 폭은 2-Arch 터널로부터 병렬 터널로 변화하는 구간임을 고려하여 0.25D, 0.3D, 0.35D 및 0.4D로 적용하였다. Fig. 6 (b)는 2차원 해석에 사용된

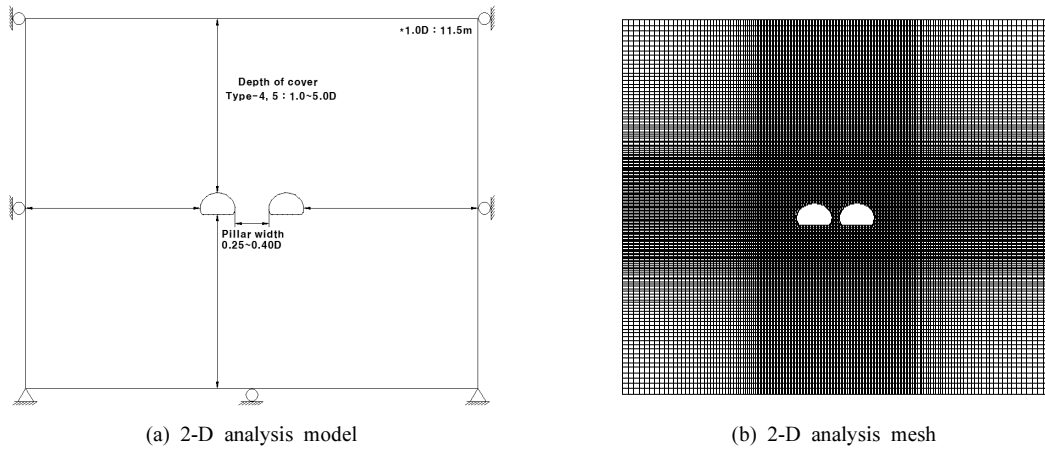


Fig. 6. Model and meshes for 2-D analysis

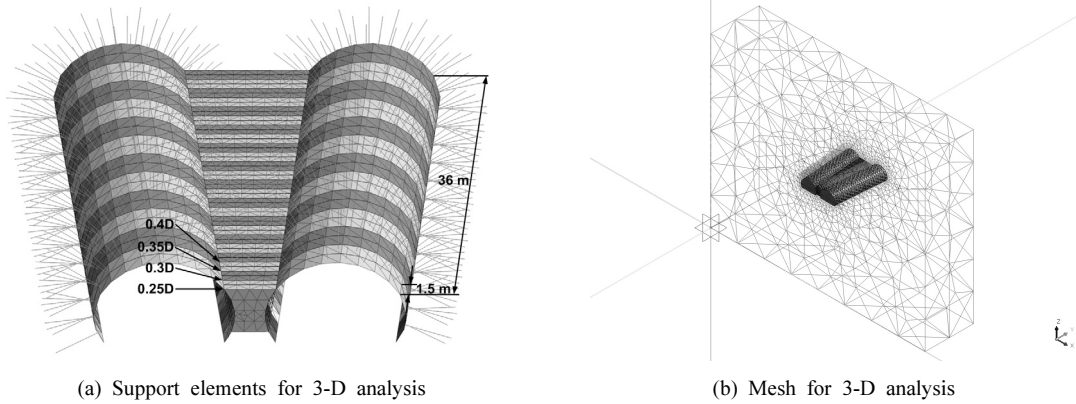


Fig. 7. Modeling of supports and meshes for 3-D analysis

터널 간 최소 필라 폭 0.25D, 최대 토피고 5D의 경우에 대한 요소망이다. 필라 폭이 최소인 0.25D(2.875 m)의 경우에도 해석의 정확도를 기하기 위하여 암반 필라의 최소 횡방향 요소 수를 6개로 모델링하였다.

2차원 해석 시에는 굴진면의 영향을 고려하기 위해 각 단계마다 하중분배율을 적용하게 된다. 하중분담율은 경험식, 수치해석적 방법, 유사지반 및 시공조건 하의 계층자료를 이용하여 산정한다. 실제 대상 지반에 대한 설계 및 시공 시에는 위의 방법으로 하중분담율을 산정하여 수치해석에 적용하여야 하나, 본 연구는 여러 경우를 비교검토 하기 위한 것으로 과거 암반등급 4, 5에 많이 적용했던 굴착 후 40%, 숏크리트 타설 직후 30%, 숏크리트가 충분히 양생된 시점에서 30%의 하중분담율을 적용하였다. 적용 하중분배율은 암반등급 4, 5에 동일하게 상반 굴착 후 40%, 연성 숏크리트 및 록볼

트(텐션볼트) 설치 후 30%, 경성 숏크리트 단계에서 30%로 적용하였으며, 터널 하반의 굴착 시에도 이와 동일한 하중분배율을 적용하였다.

2차원 해석은 FLAC^{2D}를 이용하였으며, 3차원 해석은 MIDAS/GTS를 사용하여 본 해석을 실시하였다. 3차원 수치해석에 사용된 해석단면은 2차원 수치해석과 동일한 해석단면으로 적용하였으며, 전반적인 해석과정 또한 동일하다. 해석단면은 총 굴진장 36 m로 암반등급 4등급의 경우 1회 굴진장 1.5 m를 적용하였으며, 암반등급 5등급의 경우에는 1회 굴진장 1.2 m를 적용하였다. Fig. 7 (a)는 4등급 암반에 적용한 3차원 모델의 지보 설치 형상이며, Fig. 7 (b)는 토피고 5D일 때의 요소망 형상이다. 2차원 수치해석과 비교하기 위해 필라 폭 0.25D~0.4D 구간 중 2차원 해석 시와 동일한 두께의 필라부 단면상에서의 응력을 이용하여 안전율을 구하였다.

Table 2. Material properties for analysis (Choi et al., 2012)

Type	Elastic Modulus (GPa)	Cohesion (kPa)	Internal Friction Angle (°)	Poisson's Ratio (ν)	Unit Weight (kN/m ³)
IV	2	210	35	0.26	23
V	1.4	50	32	0.30	21

Table 3. Support pattern for analysis (Korea Expressway Corporation, 2009)

Rock Type	Support Patten	Excavation method	Shotcrete thickness (mm)	Rock bolt		
				Length (m)	Spacing (m)	
					Longitudinal	Transverse
IV	Type-4	bench cut	120	4.0	1.5	1.5
V	Type-5	bench cut	160	4.0	1.2	1.5

Table 4. Input parameters of shotcrete for numerical analyses (Korea Expressway Corporation, 2009)

Type		Elastic Modulus (GPa)	Shotcrete thickness (mm)	Unit Weight (kN/m ³)	Poisson's Ratio (ν)
Rock	Shotcrete				
IV	Soft	5	120	23	0.2
	Hard	15			
V	Soft	5	160	23	0.2
	Hard	15			

Table 5. Input parameters of rockbolt and grout for numerical analysis

Type	Longitudinal spacing (m)	Elastic Modulus (GPa)	Yield Load (kN)	Diameter (mm)	Grout Shear Stiffness (MN/m/m)	Grout Bond Strength(kPa)
IV	1.5	210	171	25	9,943.3	596
V	1.2					

4.3 지반 및 지보재 물성

해석 지반의 암반물성은 터널주변의 암반 거동에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 수치해석의 정확도를 높이기 위해서는 암반특성의 정확한 고려가 중요하다. 본 연구에 적용한 지반물성은 암반분류에 따른 물성과 국내의 터널 설계 적용사례 등을 종합적으로 고려하여 산정한 박연준과 유일형(2012)의 지반물성을 적용하였다. 다만, 4등급 암반의 경우 천부의 터널 갱구부임을 고려하여 박연준과 유일형(2012)의 지반물성보다는 변형계수의 값이 작은 최재진 등(2012)이 제시한 지반물성을 사용하였다(Table 2). 국내에서 일반적으로 적용하는 2차로 도로터널에 대한 한국도로공사 표준지보패턴을 통해 굴착 방법 및 지보 설계를 Table 3과 같이 적용하였다.

-shotcrete는 콘크리트의 양생에 따른 물성의 변화를

고려하여 연성 shotcrete와 경성 shotcrete로 구분하였다. Table 4는 2차원 및 3차원 해석에 사용된 shotcrete 물성이며, shotcrete의 두께는 한국도로공사(2009)에서 제시한 바와 동일하게 적용하였다. Table. 5는 2차원 및 3차원 해석에 적용된 록볼트의 물성이다. 암반 필라 보강에 사용되는 텐션볼트는 직경 29 mm이며 종방향 설치간격 및 탄성계수는 록볼트와 동일하게 적용하였다.

5. 안정성 해석 결과 및 분석

5.1 2차원 해석에 의한 암반 필라의 응력상태 분석

5.1.1 암반 필라를 텐션 볼트로 보강하지 않은 경우

텐션 볼트로 보강되지 않은 경우, 터널의 심도가 5D 일 때 필라 내부에서의 수직응력 및 수평응력은 Fig. 8과 같다. 여기서 x축은 필라 중심으로부터의 거리이며,

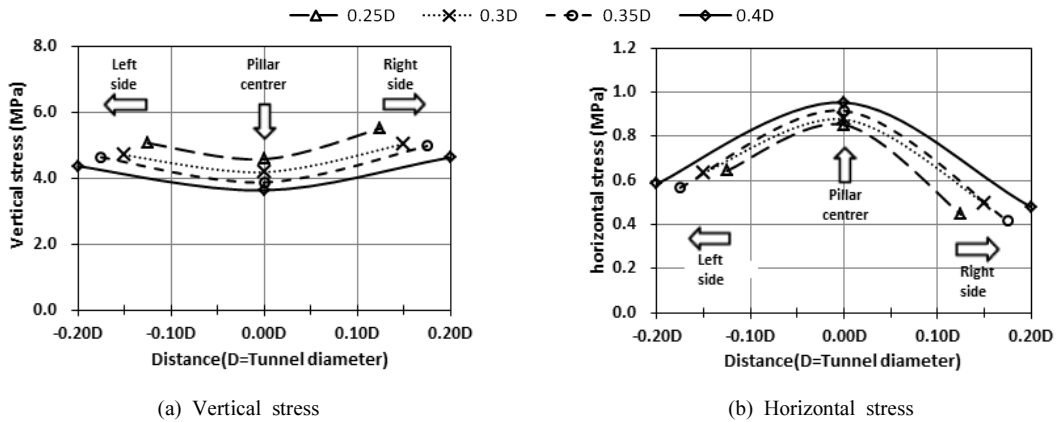


Fig. 8. Pillar stress by 2-D analysis: Rock Type IV; Depth=5D; No tension bolts

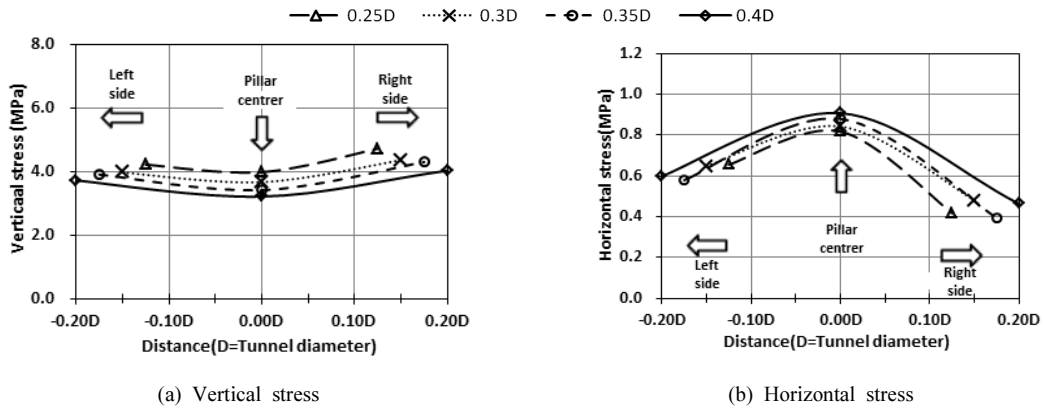


Fig. 9. Pillar stress by 2-D analysis: Rock Type V; Depth=5D; No tension bolts

도시된 4개의 그래프는 필라 폭이 각각 0.25D, 0.3D, 0.35D 및 0.4D일 때의 응력을 나타낸다.

좌측 터널이 굴착, 보강된 후에 우측 터널이 굴착, 보강되므로, 수직응력은 우측부가 좌측부보다 다소 크게 나타났으며, 중앙부에서 가장 작은 값을 보였다. 필라 폭이 감소함에 따라 응력은 점차 증가함을 알 수 있다. 응력의 감소폭은 필라 폭이 0.25D에서 0.3D로 증가하는 경우에 가장 크게 나타났다. 텐션볼트로 보강되지는 않지만 록볼트와 숏크리트로 보강되므로, 필라의 좌우 측벽에서의 수평응력 값은 0이 아님을 보여주고 있다. 또한 굴착 및 보강이 단계적으로 수행되므로 수평응력 분포도 좌우 대칭이 아님을 알 수 있다.

5등급 암반에 대한 해석 결과도 이와 유사하나(Fig. 9), 4등급 암반에 비해 수직 및 수평 응력이 다소 작음을 알 수 있다. 이는 5등급 암반의 경우 더 많은 지보재가

시공되기 때문인 것으로 판단된다.

5.1.2 암반 필라를 텐션볼트로 보강한 경우

암반 필라를 텐션볼트로 보강한 경우는 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13에 도시한 바와 같이 보강방법에 따라 필라 내부에서의 응력분포가 다소 다르게 나타났으며 암반 등급에 따른 차이는 그리 크지 않았다. 텐션볼트 보강이 없는 경우와 비교하면 수직응력은 약간 감소하였으며, 수평응력은 상대적으로 많이 증가하였음을 알 수 있다.

후 인장을 하는 Case 1의 경우에는 필라 좌·우측에서의 수평응력 차이가 크지 않으나, 선 인장의 경우와 절충법을 적용한 경우인 Case 2 및 Case 3에서는 우측 터널 굴착 이전에 인장력을 가하기 때문에 필라 우측에서의 수평응력이 훨씬 큼을 알 수 있다(Fig.11 및 Fig.13).

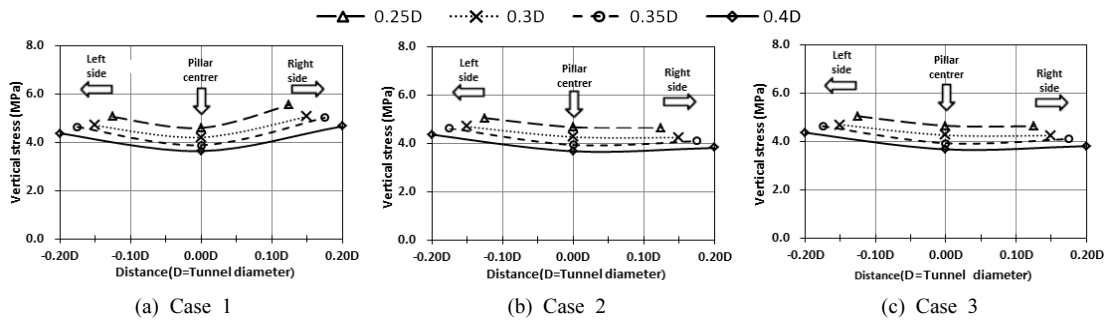


Fig. 10. Vertical stress of pillar by 2-D analysis: Rock Type IV; Depth=5D; Tension bolts installed

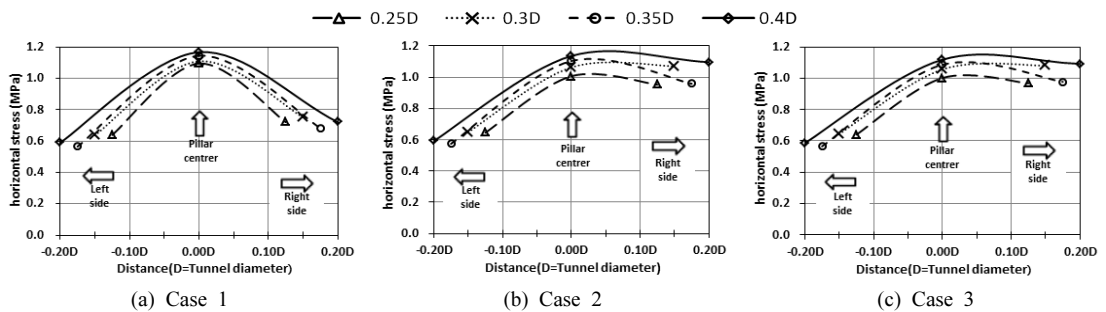


Fig. 11. Horizontal stress of pillar by 2-D analysis: Rock Type IV; Depth=5D; Tension bolts installed

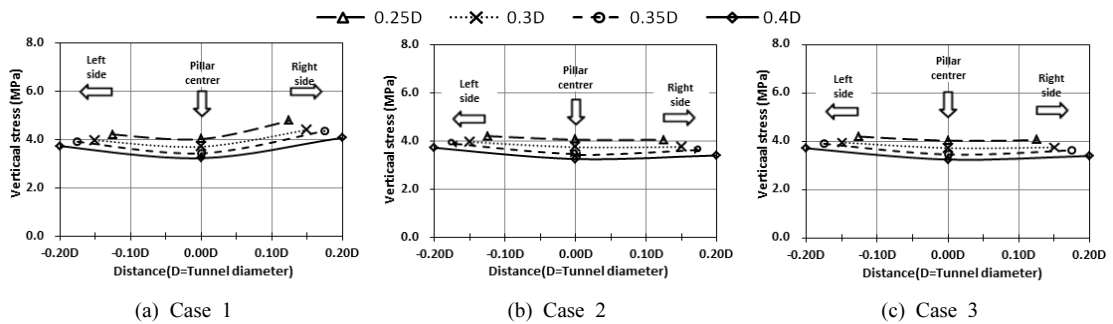


Fig. 12. Vertical stress of pillar by 2-D analysis: Rock Type V; Depth=5D; Tension bolts installed

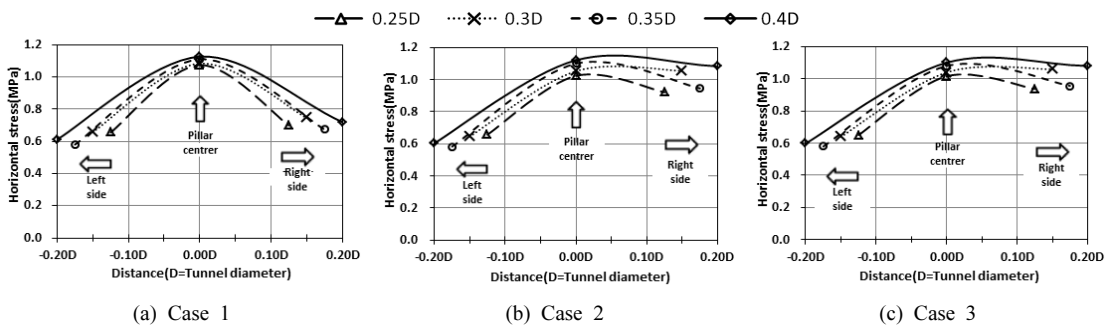


Fig. 13. Horizontal stress of pillar by 2-D analysis: Rock Type V; Depth=5D; Tension bolts installed

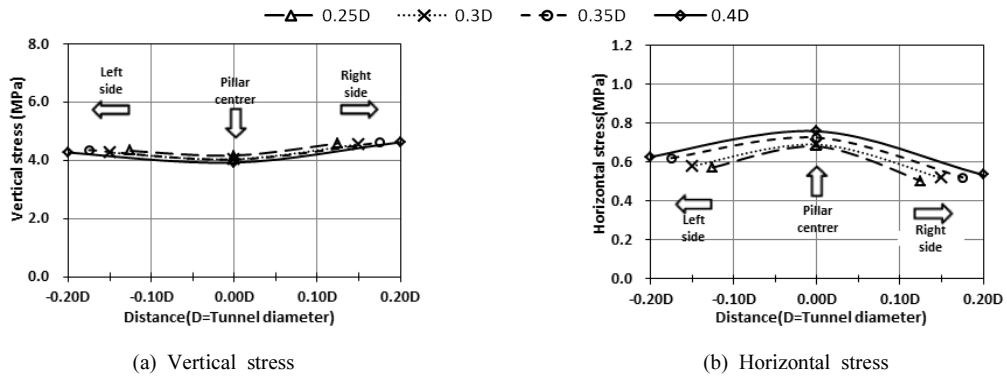


Fig. 14. Pillar stress by 3-D analysis: Rock Type IV; Depth=5D; No tension bolts

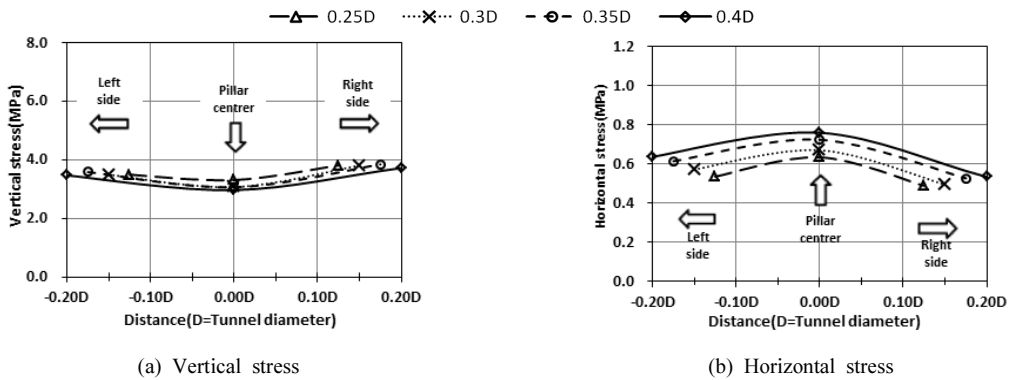


Fig. 15. Pillar stress by 3-D analysis: Rock Type V; Depth=5D; No tension bolts

5.2 3차원 해석에 의한 암반 필라의 응력상태 분석결과

5.2.1 암반 필라를 텐션 볼트로 보강하지 않은 경우

3차원 수치해석의 경우, 필라의 두께가 연속적으로 변화하므로 2차원 해석과의 비교를 위해 필라의 두께가 0.25D, 0.3D, 0.35D 및 0.4D인 지점을 선택하여 해당 위치에서의 필라 내부 응력 값을 사용하였다. 필라 내부에서의 위치별 응력 분포는 Fig. 14 및 15와 같다. Fig. 14는 3차원 해석다면 중 가장 불리한 조건인 토피고 5D, 4등급 암반에 대한 결과이며, Fig. 15는 동일 조건의 5등급 암반에 대한 결과이다.

2차원 해석 결과와 비교해보면 수평 및 수직 응력 모두 다소 작은 값을 보인다. 또한 필라의 폭 변화에 따른 응력의 크기 변화가 작음을 알 수 있다.

5.2.2 암반 필라를 텐션 볼트로 보강한 경우

암반 등급별로 토피고 5D인 경우에 대해 텐션볼트로 보강한 경우에 대한 3차원 해석 결과를 수평 및 수직응

력으로 구분하여 도시하면 Fig. 16, 17, 18 및 19와 같다. 2차원 해석과 비교하면 수직응력 및 수평응력의 값이 다소 작음을 알 수 있으며, 필라 폭 변화에 따른 차이도 매우 작다. 보강 방법에 따른 차이를 살펴보면 2차원 해석 결과와 경향이 동일하게 Case 2와 3에서는 필라 우측에서의 수평응력이 크게 나타났으나, 그 차이는 2차원 해석에 비해 현저하게 작게 나타났다. 이 차이는 2차원 해석과 3차원 해석의 차이에 기인한 것으로 보이며, 특히 하중분배계수에서 최초 굴착 시 본 해석에서 적용한 40%가 다소 작기 때문인 것으로 판단되었다.

5.3 암반 필라의 안전율과 보강 효과

Table 6은 텐션볼트로 보강되지 않은 경우에 대한 암반 필라의 안전율을 나타낸 것이다. 필라의 안전율 산정방법은 전기한 바와 같이 응력비를 이용하는 방법과 강도/응력비를 사용하는 방법을 사용하여 각각 산정하였다.

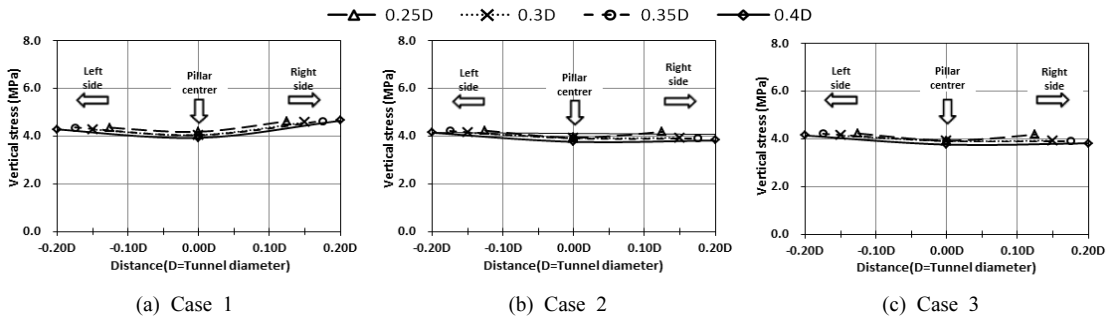


Fig. 16. Vertical stress of pillar by 3-D analysis: Rock Type IV; Depth=5D; Tension bolts installed

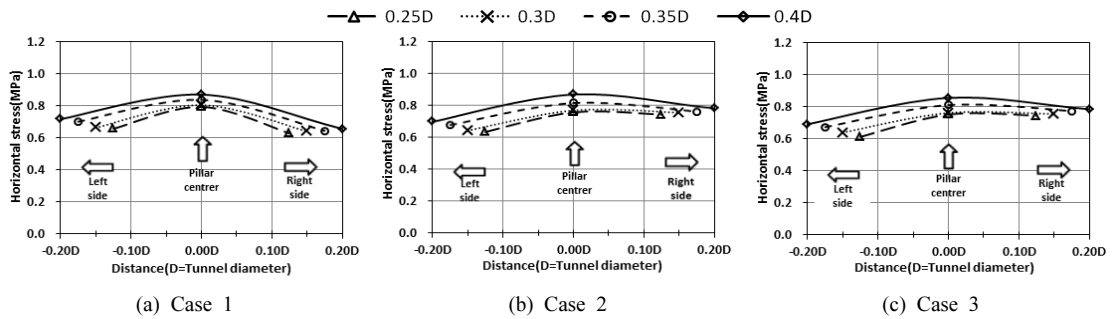


Fig. 17. Horizontal stress of pillar by 3-D analysis: Rock Type IV; Depth=5D; Tension bolts installed

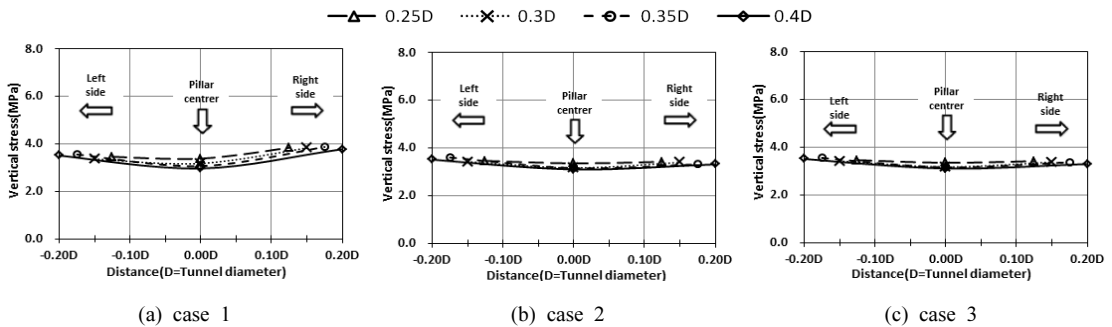


Fig. 18. Vertical stress of pillar by 3-D analysis: Rock Type V; Depth=5D; Tension bolts installed

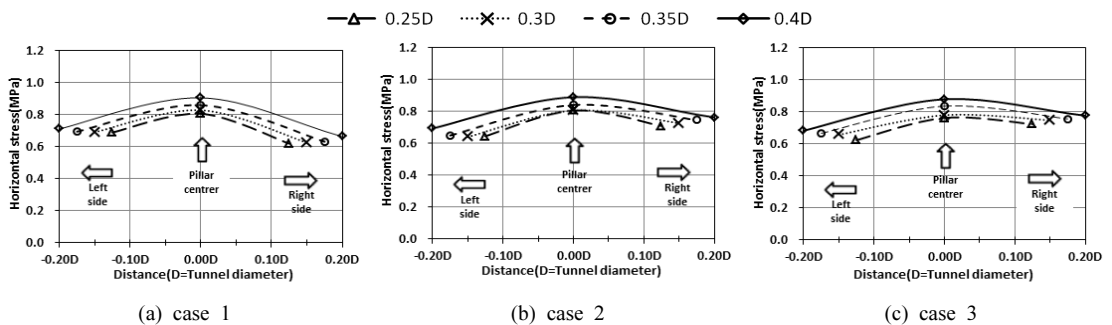


Fig. 19. Horizontal stress of pillar by 3-D analysis: Rock Type V; Depth=5D; Tension bolts installed

Table 6. Safety factors obtained by 2-D & 3-D analyses: No tension bolts

Rock Type	Depth	Pillar Width	Stress Ratio		Strength/Stress Ratio	
			2D	3D	2D	3D
IV	1D	0.25D	1.08	1.12	1.20	1.26
		0.30D	1.20	1.17	1.35	1.32
		0.35D	1.24	1.18	1.41	1.33
		0.40D	1.35	1.23	1.57	1.40
	2D	0.25D	0.78	0.88	0.83	0.94
		0.30D	0.87	0.91	0.94	0.99
		0.35D	0.89	0.93	0.97	1.00
		0.40D	0.98	0.96	1.09	1.04
	5D	0.25D	0.58	0.61	0.64	0.66
		0.30D	0.65	0.63	0.72	0.69
		0.35D	0.66	0.64	0.74	0.71
		0.40D	0.73	0.67	0.85	0.74
V	1D	0.25D	0.50	0.52	0.64	0.67
		0.3D	0.55	0.56	0.71	0.72
		0.35D	0.56	0.57	0.73	0.75
		0.4D	0.61	0.61	0.82	0.82
	2D	0.25D	0.41	0.46	0.53	0.59
		0.3D	0.42	0.48	0.61	0.63
		0.35D	0.46	0.50	0.62	0.66
		0.4D	0.51	0.54	0.70	0.73
	5D	0.25D	0.35	0.37	0.48	0.51
		0.3D	0.38	0.39	0.55	0.55
		0.35D	0.39	0.42	0.56	0.60
		0.4D	0.43	0.44	0.64	0.65

전체적인 안전율의 변화는 필라 폭이 증가할수록 안전율이 증가하는 양상을 보이며, 토피고가 증가할수록 안전율이 감소하는 경향을 보였다. 산정방법에 따른 차이를 살펴보면 강도/응력비를 이용한 방법이 응력비를 이용한 방법보다 큰 값을 보였다. 또한 필라 폭의 증가에 따른 안전율의 상승 폭이 2차원 해석에서 더 컸으며, 터널 심도 증가에 따른 안전율의 감소 비율은 해석 차원과는 무관하였다.

2차원과 3차원 수치해석 결과를 비교하면, 3차원 수치해석에 의한 안전율이 2차원 수치해석에 의한 안전율보다 대체로 낮으며, 필라 폭이 가장 넓은 0.4D에서 가장 큰 차이를 보인다. 일반적으로는 3차원 수치해석 결과에 의한 안전율이 2차원 해석 결과를 이용한 안전율보다 크게 계산되지만, 3차원 해석에서는 필라의 폭이

일정하지 않으므로 해당 지점에서의 응력이 필라 폭이 더 넓거나 좁은 주변의 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 2차원 해석 시 본 해석에서 사용된 굴착 후 하중 분배계수가 너무 작아서 록볼트와 슛크리트에 의한 보강 효과가 과대평가 되었을 가능성도 배제할 수 없다.

Table 7은 2차원 수치해석에 의해 4, 5등급 암반 터널에서 필라를 텐션볼트로 보강한 경우에 대한 보강 Case별 안전율이다. 비교를 위해 텐션볼트로 보강하지 않은 경우의 안전율을 괄호 안에 병기하였다. 텐션볼트의 보강 효과로 인하여 전체적으로 안전율이 증가하였음을 알 수 있다. Table 7을 좀 더 보기 쉽도록 차트의 형태로 Fig. 20 및 Fig. 21에 도시하였다.

안전율 1.0을 기준으로 평가하면 4등급 암반의 경우

Table 7. Safety factors obtained by 2-D analyses: Tension bolts installed vs. (No Tension bolts)

Rock Type	Depth	Pillar Width	Stress Ratio ^{2D}	Strength/Stress Ratio ^{2D}		
			Case 1 ~ 3	Case 1	Case 2	Case 3
IV	1D	0.25D	1.66 (1.08)	1.74 (1.20)	1.76	1.80
		0.30D	1.83 (1.20)	1.97 (1.35)	2.17	2.19
		0.35D	1.90 (1.24)	2.08 (1.41)	2.24	2.25
		0.40D	2.07 (1.35)	2.31 (1.57)	2.66	2.64
	2D	0.25D	1.08 (0.78)	1.10 (0.83)	1.14	1.16
		0.30D	1.19 (0.87)	1.24 (0.94)	1.37	1.38
		0.35D	1.23 (0.89)	1.29 (0.97)	1.42	1.42
		0.40D	1.35 (0.98)	1.44 (1.09)	1.66	1.65
	5D	0.25D	0.74 (0.58)	0.79 (0.64)	0.84	0.84
		0.30D	0.82 (0.65)	0.89 (0.72)	1.00	1.00
		0.35D	0.85 (0.66)	0.92 (0.74)	1.04	1.03
		0.40D	0.93 (0.73)	1.03 (0.85)	1.20	1.19
V	1D	0.25D	0.83 (0.50)	1.14 (0.64)	1.18	1.19
		0.30D	0.91 (0.55)	1.27 (0.71)	1.40	1.41
		0.35D	0.94 (0.56)	1.33 (0.73)	1.45	1.46
		0.40D	1.01 (0.61)	1.48 (0.82)	1.76	1.74
	2D	0.25D	0.58 (0.41)	0.80 (0.53)	0.85	0.86
		0.30D	0.64 (0.42)	0.90 (0.61)	1.00	1.00
		0.35D	0.65 (0.46)	0.92 (0.62)	1.04	1.04
		0.40D	0.71 (0.51)	1.03 (0.70)	1.23	1.21
	5D	0.25D	0.43 (0.35)	0.64 (0.48)	0.70	0.70
		0.30D	0.48 (0.38)	0.72 (0.55)	0.82	0.81
		0.35D	0.49 (0.39)	0.74 (0.56)	0.85	0.84
		0.40D	0.54 (0.43)	0.83 (0.64)	0.99	0.97

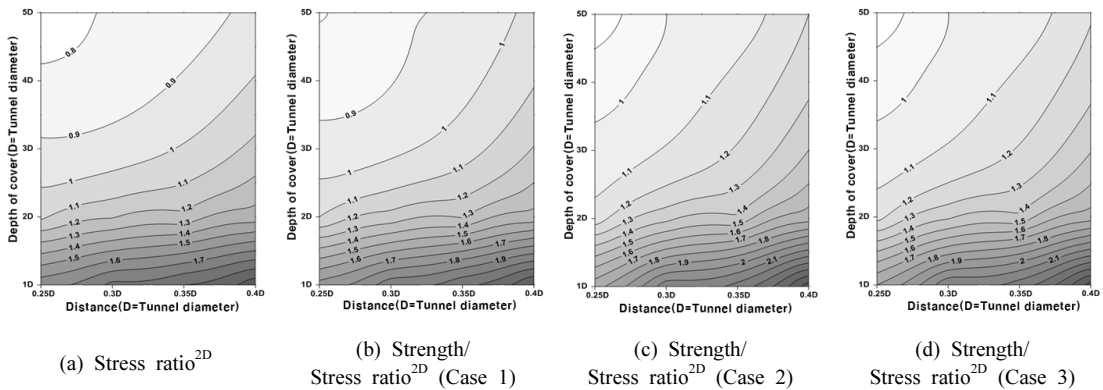


Fig. 20. Safety factor charts obtained by 2-D analyses: Rock Type IV

토피고 2D 이내의 모든 경우가 안정한 것으로 판단 할 수 있으며, 토피고 2D 이상인 경우에도 안전율 산정 방

법에 따라 다르지만 필라 폭이 0.3D 이상이면 안정함을 보인다. 5등급 암반의 경우에도 토피고가 약 1.5D 이하

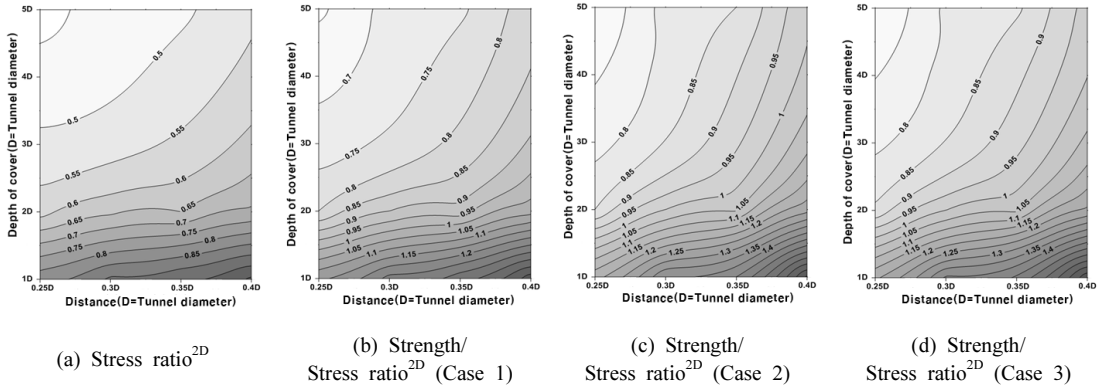


Fig. 21. Safety factor charts obtained by 2-D analyses: Rock Type V

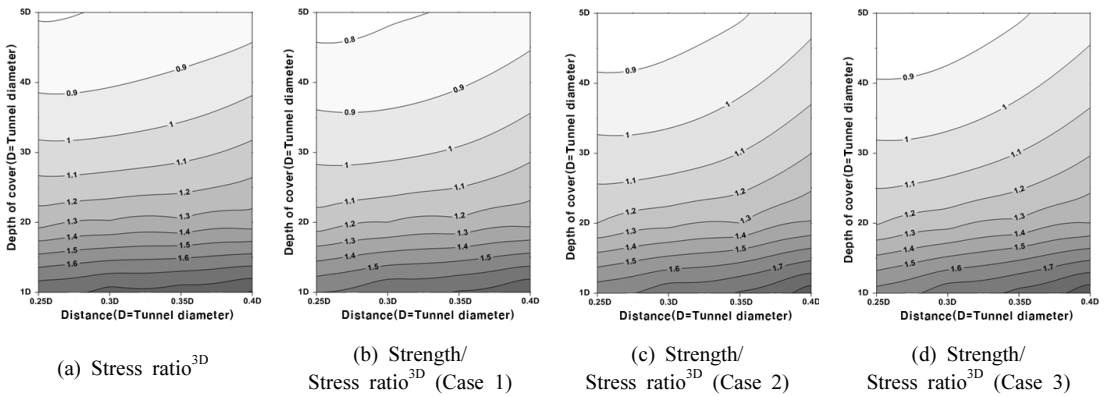


Fig. 22. Safety factor charts obtained by 3-D analyses: Rock Type IV

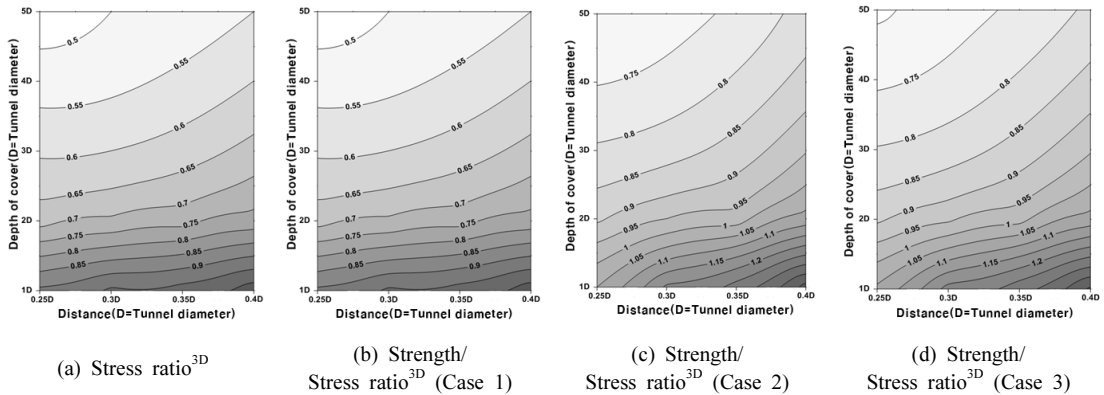


Fig. 23. Safety factor charts obtained by 3-D analyses: Rock Type V

인 경우에는 안정하다고 할 수 있으며, 필라 폭이 증가하면 그 이상의 토피고에서도 안정함을 알 수 있다. 안전율 산정방법 중 응력비를 이용한 방법으로는 보

강 Case별 차이를 반영할 수 없어 모든 Case에서 동일한 안전율이 계산된다. 그 이유는 응력비에 의한 안전율 산정식의 경우 식 내에 텐션볼트 보강효과를 고려한

Table 8. Safety factors obtained by 3-D analyses: Tension bolts installed vs. (No Tension bolts)

Rock Type	Depth	Pillar Width	Stress Ratio ^{3D}	Strength/Stress Ratio ^{3D}		
			Case 1~3	Case 1	Case 2	Case 3
IV	1D	0.25D	1.78 (1.12)	1.60 (1.26)	1.67	1.64
		0.30D	1.84 (1.17)	1.69 (1.32)	1.77	1.77
		0.35D	1.85 (1.18)	1.71 (1.33)	1.81	1.83
		0.40D	1.91 (1.23)	1.80 (1.40)	1.96	1.97
	2D	0.25D	1.26 (0.88)	1.14 (0.94)	1.20	1.19
		0.30D	1.31 (0.91)	1.20 (0.99)	1.27	1.26
		0.35D	1.32 (0.93)	1.22 (1.00)	1.30	1.32
		0.40D	1.35 (0.96)	1.27 (1.04)	1.41	1.40
	5D	0.25D	0.79 (0.61)	0.76 (0.66)	0.82	0.81
		0.30D	0.81 (0.63)	0.79 (0.69)	0.86	0.85
		0.35D	0.83 (0.64)	0.81 (0.71)	0.89	0.89
		0.40D	0.85 (0.67)	0.85 (0.74)	0.97	0.96
V	1D	0.25D	0.91 (0.52)	1.00 (0.67)	1.05	1.06
		0.30D	0.96 (0.56)	1.12 (0.72)	1.21	1.22
		0.35D	0.97 (0.57)	1.20 (0.75)	1.27	1.28
		0.40D	1.03 (0.61)	1.34 (0.82)	1.42	1.41
	2D	0.25D	0.68 (0.46)	0.83 (0.59)	0.89	0.89
		0.30D	0.71 (0.48)	0.90 (0.63)	0.95	0.94
		0.35D	0.73 (0.50)	0.92 (0.66)	0.97	0.98
		0.40D	0.77 (0.54)	1.02 (0.73)	1.07	1.07
	5D	0.25D	0.47 (0.37)	0.66 (0.51)	0.70	0.69
		0.30D	0.50 (0.39)	0.69 (0.55)	0.73	0.73
		0.35D	0.52 (0.42)	0.72 (0.60)	0.76	0.76
		0.40D	0.55 (0.44)	0.79 (0.65)	0.82	0.81

구속압($\Delta\sigma_3$)만이 추가될 뿐이며, 텐션 볼트로 보강한 경우의 해석 결과를 이용하지 않기 때문이다.

강도/응력비를 이용한 방법의 해석 결과를 살펴보면 보강 Case 2~3에서 가장 높은 안전율을 보였으며, 보강 Case 1의 경우 응력비를 이용한 방법에 의해 산정된 안전율보다는 다소 높게 나타났지만, 보강 Case 2~3에 비해서는 현저히 낮은 안전율이 산정되었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 기존에 사용되는 텐션볼트 보강방법에 비해 보강 Case 2~3의 보강방법이 더 안전하고 간편하며 효과적인 것으로 판단된다.

Table 8은 3차원 수치해석에 의해 4, 5등급 암반 터널에서 필라를 텐션볼트로 보강한 경우에 대한 보강 Case 별 안전율이며, 괄호 안에 텐션 볼트가 설치되지 않은 경우의 안전율을 병기하였다. Fig. 22 및 Fig. 23

은 이를 차트 형태로 도시한 것이다. 암반 등급 및 토피고, 그리고 필라 폭에 따른 경향은 2차원 해석에 의한 결과와 유사하지만 필라의 두께가 일정하지 않아 안전율 값이 2차원 해석에 의한 결과보다 전체적으로 낮음을 알 수 있다.

그러나 토피고에 따른 안전율의 변화를 살펴보면 4등급 암반에서 필라 폭이 0.25D인 경우에도 토피고가 약 3D 이하인 경우에는 안정함을 보여 2차원 해석의 경우보다 심도 증가에 따른 안전율의 감소는 오히려 작음을 알 수 있다. 한편 암반 등급 저하에 따른 안전율 저하 정도를 살펴보면 5등급 암반에서는 보강 방법에 따라 다르지만 1D의 토피고에서도 필라의 안정성을 장담하기 어려운 결과를 보여 암반 등급의 저하에는 2차원 해석 결과보다 민감함을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 기존 2-Arch 터널과 병렬터널을 병합한 2-Arch 변단면터널을 적용한 설계가 4등급 및 5등급 암반에서 적용이 가능한지 알아보기 위해 이들 암반을 대상으로 암반 필라의 안정성 평가를 수행하였다.

본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 암반 필라를 텐션볼트로 보강한 경우를 보강하지 않은 경우와 비교한 결과, 안전율이 1.0 이하로 불안정했던 단면들의 상당수가 안전율 1.0 이상으로 상승하였다. 텐션볼트로 보강하지 않은 경우와 비교하면 4등급 암반의 경우 평균 27.1 %, 5등급 암반의 경우 평균 32.6 % 만큼의 안전율이 증가하여 텐션볼트 설치에 따른 보강효과를 확인하였다.
2. 2차원과 3차원 수치해석 결과를 비교한 결과, 3차원 수치해석에 의한 안전율이 2차원 수치해석에 의한 안전율보다 대체로 낮게 나타났다. 이는 3차원 해석 시 필라의 폭이 지속적으로 변하므로 필라 폭이 더 넓거나 좁은 주변의 영향을 받기 때문인 것으로 판단되며, 2차원 해석 시 굴착 직후 하중 분배계수(α)가 너무 작아서 록볼트와 숏크리트에 의한 보강 효과가 실제보다 과대평가 되었기 때문이라 사료된다.
3. 텐션볼트로 보강한 경우의 보강 Case별 보강효과를 비교한 결과, 기존의 보강방법인 보강 Case 1에서 가장 낮은 안전율을 보였으며, 선 인장법인 Case 2와 절충법인 Case 3의 경우가 상대적으로 큰 안전율을 보여 기존의 텐션볼트 보강방법에 비해 효과적임을 알 수 있었다. 보강 Case 2와 Case 3의 경우 안전율 값의 크기가 유사하므로 시공 공정이 단순하고 보강패턴이 간단한 Case 2의 선 인장법이 보다 효율적인 보강방법인 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 해석대상의 지반이 하나의 균질한 단일 지층이라는 가정 하에, 2-Arch 변단면터널 구간의 암반 필라 안정성을 평가한 것으로, 2-Arch 변단면터널의 설계 시 다양한 지층으로 구성된 지반조건일 경우에는 본 연구의 결과를 참고하여 현장에 맞는 필라 폭과 텐션볼트 보강설계 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Baek, Seung-cheol, Bu-sik Jang, Tae-gyu Lee, Sung-min Lee, Jung-soon Hwang 2009, A Study on the Stability Estimation Procedure for Reinforced Pillar of Twin Tunnel, J. Korean Geo-Environmental Society, 10(7), 81-91.
2. Choi, Jae-Jin, Yeon-Jun Park, Si-Keun Kim, Jae-Hyun Park 2012, A Case Study on the Design and Construction of a 2-arch Tunnel with Varying Section, J. Korean Soc. Rock Mech.(Tunnel & Undergr. Space), 22(5), 310-320.
3. Hoek, E. I. and E. T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, IMM, London 527p.
4. Hwang, Jung-Soon, Seung-Wook Kim, Yoon-Kyung Bang, Hong-Taek Kim 2005, Stability Estimation Method and Analysis for Pillar Considering the Reinforcement Method, J. Korean Soc. Civil Engineers, 5606-5609.
5. Kang, Jae-Gi, Hyung-Sik Yang and Sun-Jong Jang 2014, Stability Analysis of Rock Pillar in the Diverging Area of Road Tunnel, J. Korean Soc. Rock Mech.(Tunnel & Undergr. Space), 24(5), 344-353.
6. Kim, Won-Beom, Hyung-Sik Yang and Tae-Wook Ha 2012, An Assessment of Rock Pillar Behavior in Very Near Parallel Tunnel, J. Korean Soc. Rock Mech.(Tunnel & Undergr. Space), 22(1), 60-68.
7. Korea highway corporation 2009, Road design manual, 343p.
8. Park Yeon-Jun, Il-Hyung Ryu 2011, A Study on the Estimation of Load Distribution Factors Considering Excavation Methods and Initial Stress Conditions, Korean Society for Rock Mechanics, 73-77.

박연준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 02-220-2580
E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수

최재진



1981년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1993년 한양대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2014년 수원대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-751-1612
E-mail: cjj2004@nate.com
현재 (주)클든엔지니어링 대표이사