

## 근접 병설터널에서 필라 압축방법에 따른 필라부 강도특성 변화에 관한 연구

### A Study on the Estimation of the Behaviors by Compression Method of Rock Pillar between Close Parallel Tunnels

김 제 경<sup>1</sup> Kim, Jae-Kyoung

이 송<sup>2</sup> Lee, Song

#### Abstract

In recent years, tunnel construction is being increased in order to resolve traffic congestion around urban area, however there are a lot of difficulties due to restrictions such as interference with existing alignment, adjacent structures and cost increase of land acquisition as well as public complaints for negative environmental impacts near the expected tunnel construction site. Therefore, applications of close parallel tunnel have been increasing greatly. But close parallel tunnels cannot guarantee the stability compared with normal parallel tunnel which has enough distance between tunnels. So various methods to strengthen the pillar have been introduced recently, however there is few methods which consider the pillar behaviour in the state of compression. In this paper, the reinforcement methods which reflect the behavior of pillar were reviewed with comparison and analysis by numerical method.

#### 요 지

근래 들어 도심지 주변의 교통난 해소를 위한 터널 건설이 증가하고 있으나 기존 노선과의 선형, 주변 구조물과의 간섭, 용지 매입의 제한 및 매입비 증가 등과 같은 제한적인 요인과 터널예정 부지 주변의 민원 및 환경훼손 최소화 등과 같은 환경적인 요인으로 인해 터널 계획시 많은 어려움을 겪고 있다. 이를 해소하고자 터널간의 거리를 좁게 하는 근접병설터널의 사례가 증가하고 있으나 이러한 근접병설터널의 경우 터널간 거리를 충분히 확보하고 있는 일반적인 터널에 비해 안정성 측면에서 불리한 점이 많은데, 특히 좁은 필라부의 강도를 증가시키기 위한 다양한 방법을 적용하고 있으나 필라부의 적정한 거동특성을 반영한 필라부 보강공법은 많지 않은 실정이다. 본 논문에서는 필라부의 적정한 거동특성을 반영한 보강공법을 비교, 분석하고 이를 수치해석을 통해 검증하였다.

**Keywords :** Parallel tunnel, Stability, Rock pillar, Strength/Stress ratio, Factor of safety

1 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul, Tel: +82-031-380-6700, Fax: +82-31-380-6798, [dream3498@naver.com](mailto:dream3498@naver.com), Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

국토의 70% 이상이 산지를 형성하고 있는 지형적 특징으로 인해 도로 및 철도 등의 선형개량이나 신설시 터널의 발생은 필연적이라 할 수 있다. 최근 들어서는 도심지 지역에서의 교통난 해소를 위해 다수의 터널이 계획되고 있으나 용지매입의 제한과 인근 거주민들의 민원, 자연환경 훼손 최소화 요구 등이 있어 터널 간 이격거리(Pillar Width)가 종래와 달리 상당히 근접된 형태로 계획되고 있다.

터널 간 이격거리가 좁은 경우에는 터널사이에 발생하는 필라부의 구조적 안정성 확보가 중요한데 국외의 경우 굴착대상 지반조건에 따라 중앙벽체 설치, 원지반 암반 활용, 선형터널 라이닝 두께 증진 등의 방안을 적용(Kamimura, 2002)하고 있는 반면, 국내의 경우 필라부 보강방법 및 설계, 시공사례가 다소 부족한 실정이나 최근 들어 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다(Kim et al., 2003; Jang, 2006; Sin et al., 2010; Kim et al., 2013).

필라 보강방법에는 그라우팅(Grouting) 등을 통해 지반강도를 높이거나 록볼트 또는 강연선을 이용하여 필라부를 가압(Pre-stressing)하여 필라부의 파괴강도를 높이는 방법이 있으나 터널 예정위치의 대부분이 암반층에 계획되는 경우가 많은 관계로 상기에서 언급한 필라부 보강방법 중 전자보다는 후자의 방법을 주로 사용하고 있다.

필라부 가압방법의 경우 록볼트를 이용한 전면접착 방식이나 PC 강연선을 이용한 자유장 형식을 주로 이용하고 있으나 이들의 거동특성을 적절히 반영한 사용에는 그리 많지 않으며 다소 혼용되어 사용하고 있는 것 또한 사실이다.

본 연구에서는 필라부 보강방법 및 안정성 평가방법에 대해 개괄하고 필라 보강방법 중 록볼트를 이용한 전면접착방식과 PC 강연선을 이용한 자유장 방식에 대해 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 필라부 보강방법

필라부 보강방법은 크게 그라우팅 공법 등을 통해 지반강도정수를 증가시키거나 록볼트 또는 강연선으로 필라부를 가압하여 필라부의 파괴강도를 높이는 방법이 있다.

### 2.1 그라우팅 공법

절리가 발달된 암반이나 토사층의 경우 그라우팅 가압에 의한 방법을 주로 사용한다. 그러나 암반에 대한 그라우팅 공법은 양호한 암반의 경우에는 암반의 좁은 절리틈새에 효과적으로 주입하는데 어려움이 있으며 적절하지 않은 주입압의 경우 오히려 암반의 이완파쇄 등의 악영향을 초래할 수 있다.

Fig. 1은 그라우팅을 통해 지반강도정수(점착력)가 증가되는 응력상태를 보여준다.

### 2.2 가압 공법

필라부의 파괴강도를 높이는 방법으로 2축 응력상태의 필라부에 긴장력(Pre-stress)을 작용시켜 3축 응력상태로 변환시키는 것으로서, 긴장력을 작용시키는 재료로는 PC강연선, 록볼트 등을 주로 사용하고 있다.

Fig. 2는 가압공법에 의해 변화되는 응력상태를 보여준다.

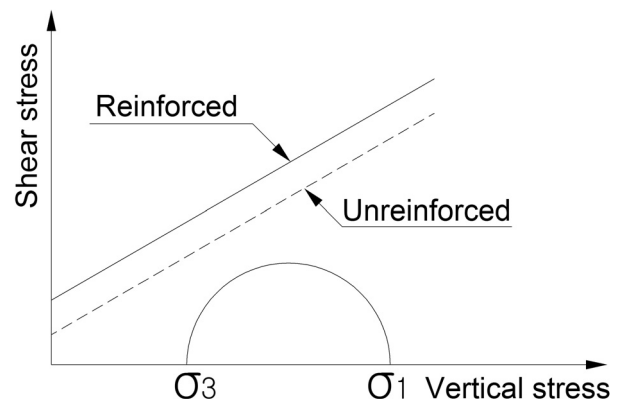


Fig. 1. Strength parameter changes by grouting

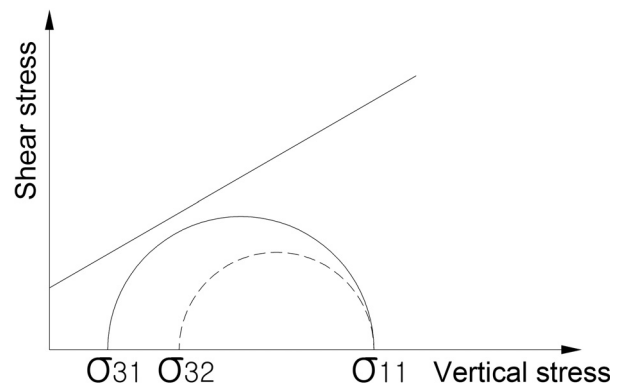


Fig. 2. Stress changes by compression method

### 3. 안정성 평가방법

근접 병설터널의 필라부 안정성 평가방법으로는 Peck (1969) 방법, Matsuda(1997) 방법 등의 경험에 의한 개략적인 검토법과 수치해석을 이용한 해석적 방법이 있다.

#### 3.1 경험적 평가법

##### ① Peck 방법

Peck은 병설터널 굴착시 필라부에 발생하는 평균응력( $S_p$ )과 일축압축강도( $\sigma_p$ )의 비교를 통해 안정성을 평가하였다.

$$S_p = \gamma \times H \times \left(1 + \frac{D}{P}\right)$$

$$\sigma_p = \frac{2 \times c \times \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$FS = \frac{\sigma_p}{S_p}$$

여기서,  $\gamma$  : 단위중량

H : 지표면으로부터 터널깊이

D : 터널폭

P : 필라의 폭

c : 점착력

$\phi$  : 내부마찰각

FS : 필라의 안전율

$S_p$  : 필라부에 작용하는 평균응력

$\sigma_p$  : 암반의 일축압축강도

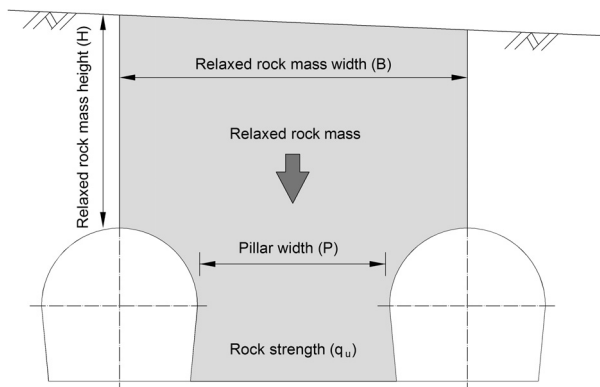


Fig. 3. Definitions of average pillar stresses

##### ② Matsuda 방법

상재하중이 1D(D=터널의 폭) 보다 작은 경우에는 전하중이 중앙 필라부에 작용하는 것으로 제안하였으며, 이러한 경우 계획된 중앙 필라부 구조체의 강도가 예상되어지는 응력보다 크면 충분한 안정성을 확보할 수 있다.

- 토피(H)가 터널폭(D)보다 큰 경우(H>D)

$$S_p = \frac{\gamma \times D \times B}{P}$$

- 토피(H)가 터널폭(D)보다 작은 경우(H<D)

$$S_p = \frac{\gamma \times H \times B}{P}$$

- 안전율

$$FS = \frac{q_u}{S_p}$$

여기서,  $S_p$  : 필라부에 작용하는 평균응력

$\gamma$  : 단위중량

H : 지표면으로부터 터널깊이

D : 터널폭

P : 필라의 폭

B : 이완하중 폭

$q_u$  : 필라부 암반강도

FS : 필라의 안전율

#### 3.2 수치해석을 통한 해석적 방법

수치해석을 통한 해석적 방법은 필라부에 작용하는 주응력을 이용하여 암반파괴 기준에 근거한 강도/응력비, 파괴접근도 등을 산정하여 필라의 최소두께에 따른 해당 암반조건에서의 안정성을 검토한다.

##### ① 강도/응력비(Strength/Stress ratio)

다양한 크기의 구속압력( $\sigma_3$ )에 대해 소성파괴의 시작은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 규정된다고 가정하면 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad (1)$$

암반의 일축압축강도( $\sigma_{cm}$ )와  $\sigma_3$ 에 대한  $\sigma_1$ 의 기울기(k)는 각각 식 (2), (3)과 같다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cdot \cos \varnothing}{1 - \sin \varnothing} \quad (2)$$

$$k = \frac{1 + \sin \varnothing}{1 - \sin \varnothing} \quad (3)$$

또한, 강도/응력비(Strength/Stress ratio)는 식 (4)와 같다.

$$\text{강도/응력비} = \frac{\sigma_{1s}}{\sigma_1} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_1$  : 파괴시 축응력

$\sigma_3$  : 구속 응력

$c$  : 점착력

$\varnothing$  : 암반(Rock Mass)의 마찰각

$\sigma_{1s}$  : 주어진  $\sigma_3$ 에서의 필라의 강도(Strength)

강도/응력비는 파괴시 필라 부분의 주응력에 대한 암반의 강도를 표현한 것으로, 진행성 파괴(Progressive failure)나 응력 전이과정(stress transfer progress)을 고려하여 필라 중앙 단면에서의 평균 강도/응력비(average strength / stress ratio)가 1.0 이하로 되면 필라 전체가 불안정하게 되는 것이며, 필라의 지속적인 안정을 위한 안전율은 1.5 이상을 사용하여야 한다(Hoek and Brown, 1980).

#### 4. 근접병설터널의 안정성 검토

##### 4.1 해석조건 및 방법

본 연구는 근접 병설터널의 필라부 보강공법에서 암

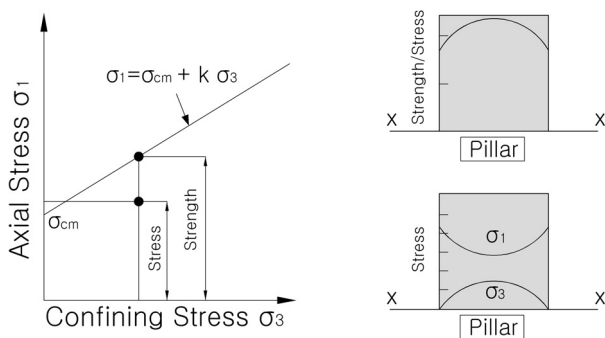


Fig. 4. Strength-stress ratio and distribution chart of stress

반층에 주로 적용하는 가압(Pre-stressing)공법 중 록볼트(SD 35, D25)를 이용한 전면접착 상태에서의 인장방식과 PC강연선을 이용한 자유장 상태의 인장방식 적용시 필라부의 거동특성을 평가하고자 하였다.

해석시 사용한 지반 물성치는 일반적인 값을 적용하고자 국내 도로 및 철도터널 설계시 적용된 사례를 참고하여 아래의 Table 1과 같이 적용 하였다.

수치해석 모델링은 필라부의 거동특성을 보다 명확히 파악하기위해 1차 지보재(숏크리트, 록볼트, 강지보)는 생략하였고, 수치해석 범위는 가능한 한 터널굴착으로 인한 응력의 영향이 미치지 않도록 측면은 터널 굴착 폭의 3배 이상, 하부경계는 터널 바닥에서부터 터널 높이의 2배 이상, 지표면까지 높이는 천단부에서부터 50m로 설정하였다. 50m로 설정한 사유는 국내의 경우 근접 병설터널의 대부분이 터널 입,출구부 일부 구간에서 계획되고 있는 것을 반영하였다.

해석 프로그램은 유한차분 해석코드인 FLAC 2D ver. 7.0을 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 해석을 수행하였다.

검토결과는 필라 폭, 긴장력 변화에 따라 필라부에 나타나는 주응력 상태를 비교하였고, 강도/응력비에 의한 안전율로 필라부의 안정성을 평가하였다.

##### 4.2 해석 결과

근접 병설터널의 필라부 가압공법 중 전면접착 상태

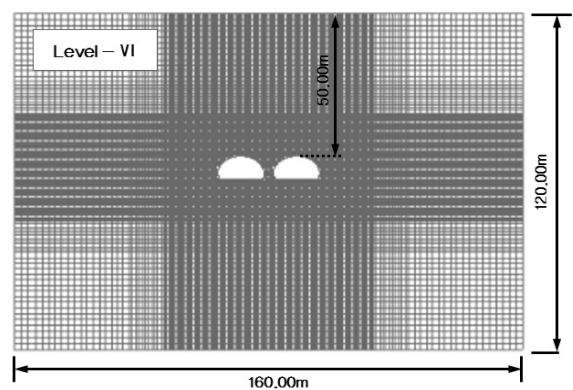


Fig. 5. Modeling - pillar width 3 m

Table 1. Soil properties

Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Deformation modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Poisson's ratio (μ)
23.0	2,000	0.80	35	0.26

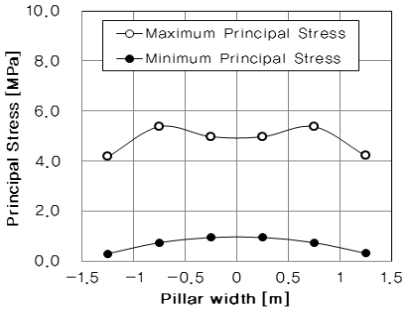


Fig. 6. Unreinforced-principal stress

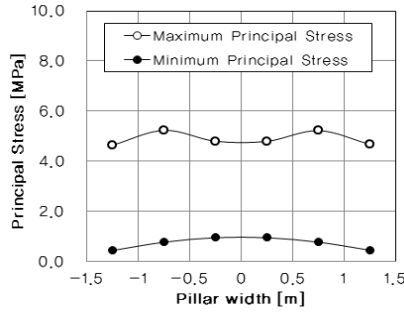


Fig. 7. Fully grouted-principal stress

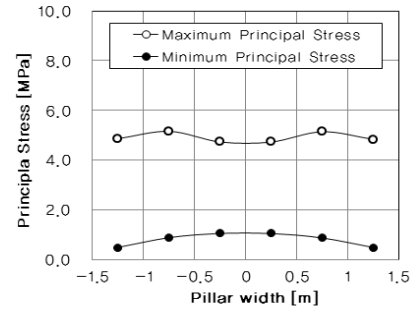


Fig. 8. Unbonded-principal stress

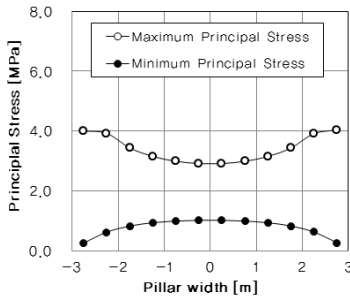


Fig. 9. Unreinforced-principal stress

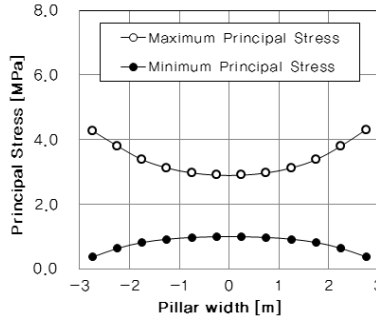


Fig. 10. Fully grouted-principal stress

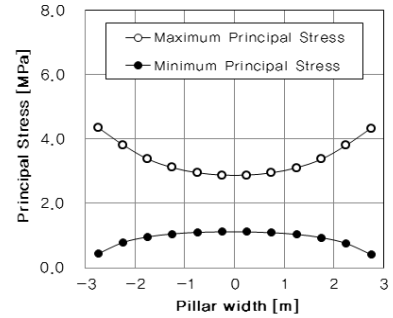


Fig. 11. Unbonded-principal stress

에 의한 볼트인장 방식과 자유장 상태에 의한 강연선 인장방식 적용시 필라부의 거동특성을 평가하고자 한바, 해석결과를 정리하면 다음과 같다.

① 필라폭 변화에 따른 전면접착 및 자유장 인장방식의 거동특성

본 연구에서는 축압계수 및 보강재 인장력은 일정하게 하고 필라폭에 변화를 주면서 필라부 보강이 없는 경우와 보강 시 전면접착 및 자유장 상태에서의 필라 중간부분에서 최소 주응력의 발생경향을 살펴보고 강도/응력비를 통한 필라부 안전율을 비교하였다.

Fig. 6~8는 필라폭 3m인 경우, Fig. 9~11는 필라폭 6m인 경우의 필라 중간 부분에서 무보강, 전면접착, 자유장 시 주응력 분포를 보여준다.

필라 폭 3m(Fig. 6~8)를 보면 무보강, 전면접착, 자유장 시 필라 중심을 기준으로 최대 주응력은 필라 벽면으로 갈수록 증가하고 최소 주응력은 감소하는 경향을 보인다. 다만 최대 주응력의 경우 필라 좌,우 측면부에서 인접 지점보다 작은 값을 나타내는데 이는 필라 폭이 좁아서 터널 굴착 시 발생된 벽면부 최대 주응력보다 암반의 파괴강도가 작아 수렴과정 중 소성상태를 경험했기 때문인 것으로 판단된다.

아래 Fig. 12는 필라폭 3m, 무보강인 경우, 점착력을

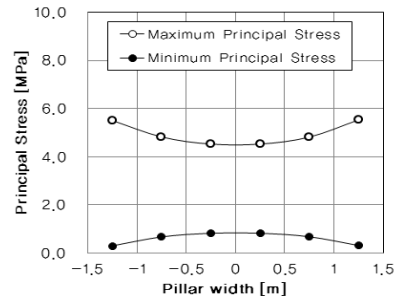


Fig. 12. Increased cohesion - principal stress (Unreinforced)

증가(4MPa)시켜 해석한 결과로서 최대 주응력 분포는 필라 좌,우 측면부에서 최대를 나타내고 필라 중앙부로 갈수록 감소하여 필라 중앙에서 최소값을 나타내고 있다.

아래 Fig. 13, 14는 점착력 증가 전, 후의 필라부 소성 분포 상태를 나타내는데 앞에서 언급한 바와 같이 점착력을 증가시켜 굴착한 경우는 필라 벽면부에 소성이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

한편, 필라의 안전율(평균 강도/응력비)을 증가 시키려면 점착력이나 파괴강도를 높여야 하는데, 파괴강도를 높이는 방법을 적용하고자 하는 경우에는 구속응력( $\sigma_3$ )을 증가시켜야 하며 아래 Fig. 15, 16에 필라폭 3m, 가압력 200KN을 적용 시 전면접착 상태와 자유장 상태에 대한 보강재에 작용하는 축력분포를 보여준다.

전면접착인 경우(Fig. 17)에는 필라 좌,우 벽면에서만 약 170kN의 축력이 작용되며 필라 중앙부로 갈수록 축력은 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반면 자유장인 경우(Fig. 18)에는 초기 작용시킨 가압력(200 kN)이 보강재 전 연장에 걸쳐 균등하게 작용되고 있는 것을 알 수 있다.

아래 Fig. 17, 18은 Fig. 15, 16에서 나타난 축력 분포

를 보다 자세히 나타낸 것으로 전면 접착시에는 초기 적용시킨 가압력이 필라부 좌,우 측벽부에만 록볼트의 항복력인 약 172kN 정도만 작용하고 필라 중심부로 갈수록 현저히 줄어드는 반면, 자유장인 경우에는 보강재 전 연장에 걸쳐 거의 일정한 축력이 분포하는 것을 알 수 있다.

아래 Fig. 19, 20은 필라폭 3,6m의 경우에 대해 무보

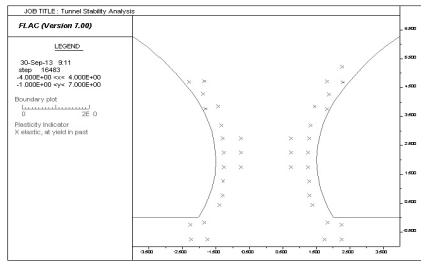


Fig. 13. Original condition - plasticity

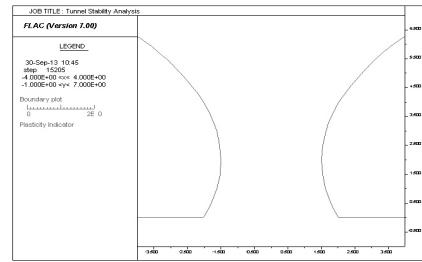


Fig. 14. Increased cohesion - plasticity

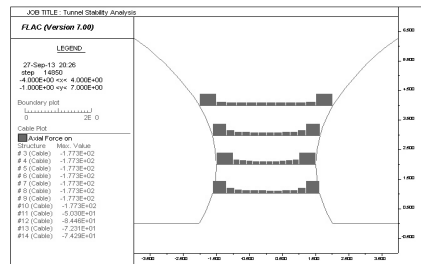


Fig. 15. Fully grouted - axial force

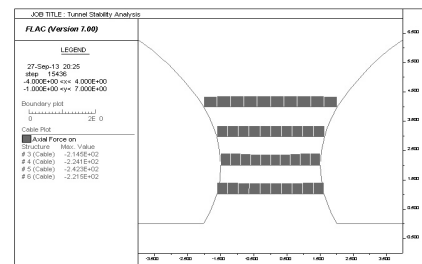


Fig. 16. Unbonded - axial force

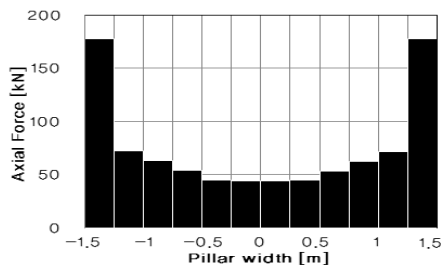


Fig. 17. Fully grouted - axial force

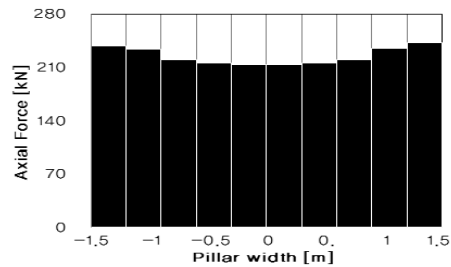


Fig. 18. Unbonded - axial force

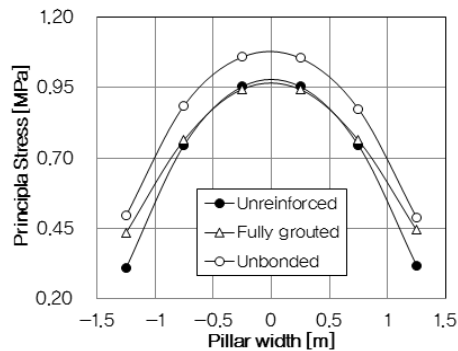


Fig. 19. Minimum principal stress (PW 3 m)

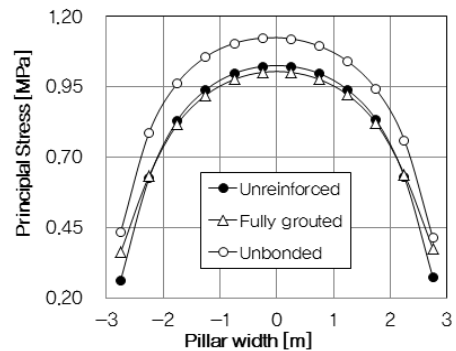


Fig. 20. Minimum principal stress (PW 6 m)

강, 전면접착, 자유장 상태에서 필라 위치별 최소 주응력의 분포를 나타낸 것으로서, 필라부 전면접착 상태에서 가압을 한 경우에는 필라 중심부는  $\sigma_3$ 의 증가가 크지 않은 것을 알 수 있으며, 반면 자유장 상태에서는 구속응력( $\sigma_3$ )의 뚜렷한 증가를 확인 할 수 있다. 따라서 필라부의 파괴강도를 높이기 위해서 구속압이 필요한 경우에는 전면접착 방식에 비해 자유장 방식이 보다 유리한 것으로 판단된다.

또한, 아래 Fig. 21, 22는 필라폭 3m, 6m에 대한 무보강, 전면접착, 자유장 시 구속압 적용에 따른 필라부 압반강도와와의 관계를 나타낸 것으로서, 무보강 및 전면접착의 경우 필라부 요소별 최소 주응력( $\sigma_3$ )이 거의 비슷한 값을 보이거나 자유장인 경우에는 이들과 비교 시 최소 주응력의 증가 양상을 확인 할 수 있다.

필라폭 3, 6m에서 구속압 작용방법에 따른 위치별

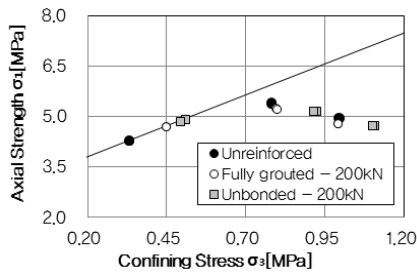


Fig. 21. Rock pillar strength (pillar 3 m)

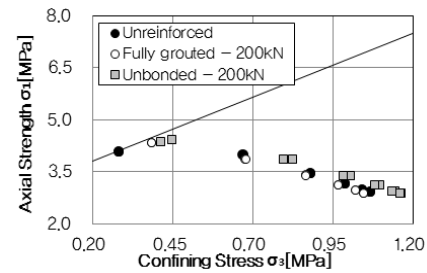


Fig. 22. Rock pillar strength (pillar 6 m)

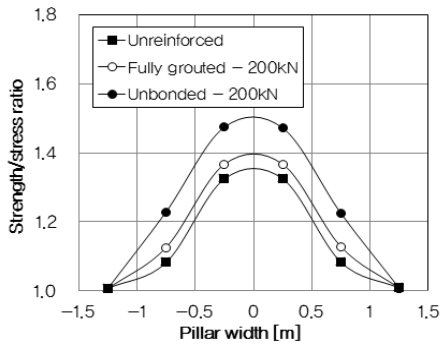


Fig. 23. Strength/stress ratio (PW 3 m)

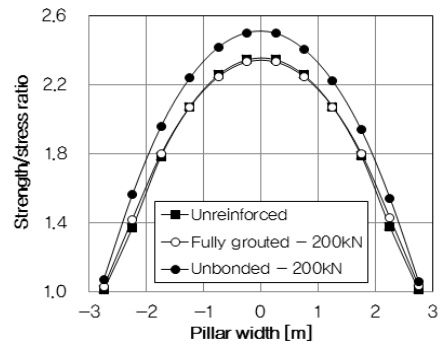


Fig. 24. Strength/stress ratio (PW 6 m)

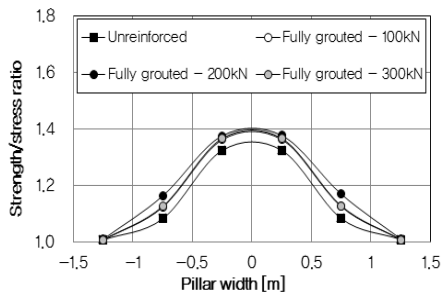


Fig. 25. Fully grouted - strength/stress ratio

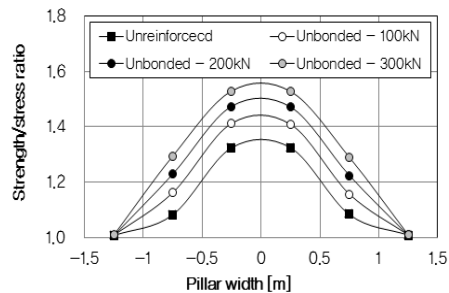


Fig. 26. Unbonded - strength/stress ratio

강도/응력비를 나타낸 것이 아래 Fig. 23, 24로서 무보강 및 전면접착 시 강도/응력비는 거의 같은 값을 보이는 반면 자유장 적용 시에는 확연한 강도/응력비의 증가 양상을 볼 수 있다.

다만 필라폭 3m의 경우에는 전면접착 상태에서도 약간의 강도/응력비 증가 양상을 볼 수 있는데, 이는 전면접착 시 나타나는 정착부 쪽의 응력집중현상이 필라폭이 좁은 관계로 다소 상쇄되는 결과로 판단된다.

② 긴장력 변화에 따른 필라부 강도/응력비 변화  
필라부 보강이 없는 경우와 필라부 보강 시 전면접착 및 자유장 상태에서 긴장력을 변화시킬 때 강도/응력비를 통한 필라부 안정성을 비교, 분석 하였다.

이를 위해 필라폭(3m)과 축압계수(0.5)는 고정시키고 긴장력을 100, 200, 300kN으로 변화시켰으며, 그 결과

를 아래 Fig. 25, 26에 나타내었다.

무보강, 전면 접착 시 강도/응력비 결과(Fig. 25)를 보면 전면 접착 시 긴장력 증가에 관계없이 무보강 시와 그 값에 있어 큰 차이가 없게 나타나는데 이는 전술한 바와 같이 전면접착 시에는 긴장력의 증가에 따른 최소 주응력( $\sigma_3$ )의 증가가 크지 않기 때문이다.

반면 무보강 및 자유장 시 강도/응력비 결과(Fig. 26)를 보면 무보강 시와 비교시 가압력 증가에 따른 강도/응력비의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 근접병설터널의 필라부 가압공법 중 전면접착 상태에 의한 볼트(SD35, D25) 인장방식과 자유장 상태에 의한 PC 강연선 인장방식 적용 시 필라부의 거동특성을 평가하였다.

- (1) 보강재를 전면접착 상태에서 가압을 한 경우에는 필라 중심부의 구속응력( $\sigma_3$ ) 증가가 크지 않으나, 자유장 상태에서는 구속응력( $\sigma_3$ )의 뚜렷한 증가를 확인 할 수 있다. 따라서 필라의 안전율(평균 강도/응력비)을 증가시키는 방법 중 암반강도를 높이는 방법을 적용하고자 하는 경우, 보강재의 정착방식은 전면접착 방식보다 구속응력( $\sigma_3$ )의 증가가 보다 명확하게 나타나는 자유장 방식이 보다 유리할 것으로 판단된다.
- (2) 필라폭이 좁은 경우에는 전면접착 시 에도 약간의 강도/응력비 증가 양상을 볼 수 있는데, 이는 전면 접착 시 나타나는 정착부 쪽의 응력집중 현상이 필라폭이 좁은 관계로 다소 상쇄되는 결과로 판단된다.
- (3) 긴장력 변화에 따른 필라부 강도/응력비는 전면접착 상태에서는 긴장력 증가에 관계없이 무보강시와 큰 차이가 없는데 이는 구속응력( $\sigma_3$ )의 증가가 미미하기 때문이며, 자유장 상태에서의 강도/응력비는 무보강 상태와 비교 시 긴장력 증가에 따른 구속응력( $\sigma_3$ ) 및 강도/응력비의 증가가 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

- (4) 따라서, 필라 폭의 결정 및 보강계획 수립 시에는 필라부 작용하중과 암반강도의 사전 비교 및 터널 굴착순서 등을 면밀히 검토한 후 적절한 보강공법을 선정 하여야 될 것으로 판단된다.

본 연구는 제한된 자료와 수치해석에 의한 결과를 근거로 이루어졌으므로 향후 시공 중 전면접착 및 자유장 상태에서의 필라부 상세계측이 필요하며, 그 결과를 바탕으로 본 연구와의 비교분석 및 보강공법에 따른 필라부의 적절한 거동특성 파악 등의 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌 (References)

1. Hoek, E., Brown E.T. (1980), "Underground excavation in rock", Institution of Mining and Metallurgy.
2. Itasca Consulting Group, Inc. (2011), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 7.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
3. Jang, B. S. (2006), "Study on the Estimation of the Behaviors of the Pillar between Twin Tunnels" Doctorate Thesis, Hongik University, Korea.
4. Kamimura, M. (2002), "Discussion on the behaviors of parallel tunnel with a small clearance", Proc. of the 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp.898-906.
5. Kim, D. H., Park, J. K., Kim, Y. G., and Lee, D. H. (2003), "A Study on the Estimation of the Design and Stability of Large Parallel Tunnels", Korea Society for Rock Mechanics Annual Spring Conference Collection of Dissertations, pp.51-66.
6. Kim, P. K. and Kim, J. W. (2013), "Scale Model Studies for Stability Estimation of Twin Tunnels with Small Clearance", Tunnel & Underground Space, Vol.23, No.2, pp.130-140.
7. Matsuda, T., Toyosato, E., Igarashi, M., Nashimoto, Y., and Sugiyama, T. (1997), "A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method", Proceedings of Studies on tunnel Engineering.
8. 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.
9. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proc. 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the-art Report, pp.225-290
10. Sin, Y. W. and Kim, Y. G. (2010), "Review of Mechanical Behaviors of Pillar in Large Parallel Tunnel", Tunnel & Underground Space, Vol.20, No.3, pp.131-144.

Received : October 10<sup>th</sup>, 2013

Revised : November 19<sup>th</sup>, 2013

Accepted : December 4<sup>th</sup>, 2013