도로터널에서 적정한 필라폭 산정에 관한 연구

Study on Determination of Proper Pillar Width in Road Tunnel Design Stage

양 태 선[1)*] 김 제 경[2)]

Yang, Tae Seon Kim, Jae Kyoung

Abstract

As the design of the pillar width (PW) of the parallel tunnels in downtown area, in which are located in plains zone with deep alluvium compared with mountain tunnels, is directly related with pre-compensation payment and costs of the underground area, it has to be planned as to keep minimum distance while securing the stability of the parallel tunnels. Although PW of downtown road tunnel in Korea is standardized as 1.5D(D: diameter of the tunnels), PW sometimes has to be reduced within 1.5D to adjust the tunnel lines to the city plan in the cases of the inlet and outlet of the tunnels. In this paper, the design and the analyses of optimum PW of the NATM type road tunnel in the downtown area are introduced. The relationship among the tunnel line planning and underground compensation fee, and ground characteristics are evaluated. In the determination of PW distance, the numerical analyses of underground road tunnels were performed, including the use of the strength decrease method and strength/stress ratio method. In the cases of inlet and outlet part of the tunnels where the stability of the pillars is poor due to contiguous construction of the parallel tunnels, the reinforcement methods are recommended for securing the stability. Numerical verification was performed for the reinforcement proposed.

Keywords : Pillar Width, Parallel Tunnels, stability

1. 서 론

최근 서울시에서는 “맑고 매력있는 세계도시 서울”이라는 비전아래 한강 르네상스 프로젝트, 도심 재창조 프로젝트 등 도시 경쟁력을 높이기 위한 많은 사업들을 추진해 오고 있다. 특히, 도심 재창조 프로젝트의 일환으로 지상의 고가도로는 철거하고 지상도로는 지하화하여 지상도로 공간을 인간중심과 친환경 대중교통 위주로 재편해 가고 있다. 도심지 지하도로는 일반적인 산악터널과 달리 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, 지상 및 지하에 다양한 형태의 지장물이 존재하기 때문에 선형 계획에 따라 민원뿐만 아니라 보상비 및 보강공사비가 차이가 난다. 둘째, 아래로 오목한 종단으로 구성되기 때문에 자연배수가 불가능하다. 따라서 지하도로 터널에 유입되는 우수 및 오수 등을 인공적으로 지상으로 배출시킬 수 있는 배수설비와 공간이 필요하다

셋째, 대부분 평야지대에 위치하고 충적층이나 풍화대가 깊게 분포한다. 특히 터널 입·출구부는 병렬터널로 분리되는 지점인 동시에 하향굴착을 하는 관계로 터널 입·출구부 위치 및 구조물 형식에 따라 공사비에 미치는 영향이 매우 크다. 또한 병렬터널의 이격거리는 지하 보상비와 직결되기 때문에 터널의 안정을 확보하면서 동시에 최소의 필라폭(PW)으로 계획하는 것이 필요하다.

근접 병렬 터널은 이격거리를 충분히 확보하고 있으면서 설계 및 시공 경험도 많은 일반적인 산악터널보다 안정성 측면에서 불리한 점이 많으므로 터널 안정성 확보를 위한 추가의 다양한 검토가 있어야 한다(김도식등, 2007).

국내 산악터널의 경우 일부 근접병렬 터널에 대한 설계 및 시공사례가 있으나 투아치(Two-Arch)형식이거나 터널 입출구부 극히 일부구간에만 적용한 경우로서 도심지이며 터널 전 연장에 걸쳐 근접 병렬 터널로 시공한 사례는 극히 드물다.(터널공학회, 2004)

본 연구에서는 선형계획 단계에서부터 터널의 안정성을

1) 정회원, 김포대학 건설정보과 부교수, 교신저자

2) 정회원, 경동기술공사 지반공학부 상무

* corresponding author : sj98@kimpo.ac.kr 031-999-4662

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

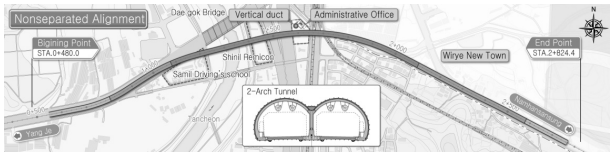


Fig. 1 Line plan(Basic Planning)

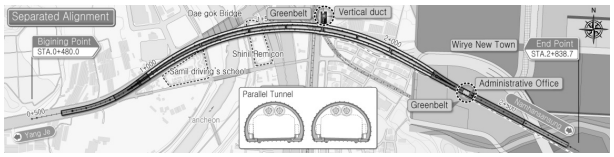


Fig. 2 Line plan(Basic Design)

확보하면서 동시에 공사비도 최소화 한 도심지 근접 병렬터널의 설계사례를 통해 근접 병렬터널의 안정성 측면에서 가장 중요한 부분인 필라폭(Pillar Width, PW) 결정방법에 대해 수치 해석적 검토를 수행 하였다. 또한 필라폭이 부족한 터널 입.출구부는 안정성 확보를 위한 보강 방법을 제시하고 수치해석을 통해 안정성을 검증하였다.

2. 평면 선형 계획

기본계획의 평면선형은 건물 하부를 통과하게 되어 지하 보상비 증가요인이 발생하였고 수직구 및 관리사무소 등 추가 지상보상비가 필요한 상황이었다(Fig. 1). 기본설계에서는 Fig. 2와 같이 건물을 우회하고 지상의 관리사무소와 수직구는 녹지대에 계획하여 지상 보상비를 없앴다. 터널형식은 투아치 터널에서 근접 병렬터널로 변경하였다. 지하 보상비 측면에서는 터널 전체 폭이 좁은 투아치 터널이 유리하나 전체공사비 및 시공성, 안정성 등을 고려하면 병렬터널이 보다 유리하다. 병렬터널의 필라폭은 지하 보상비를 최소화하기 위해 일반적인 1.5D(D : 터널 최대폭,12m)보다 좁은 0.41D(5m) ~ 1.0D(12m)로 계획하였다.(대림산업, 2009)

3. 터널현황 및 지반특성

3.1 터널현황

연구대상 터널은 도심지 지하 도로로서 상하행선 각각 2차로로 구성되어 있다. Fig. 3 터널 평면 현황과 같이 터널 전구간이 필라폭 5~12m(0.41~1.0D, D:터널 최대폭(12m))로서 일반적인 도로터널의 필라폭1.5D 보다 터널 전구간이 충분한 필라폭을 확보하지 못한 것을 알 수 있

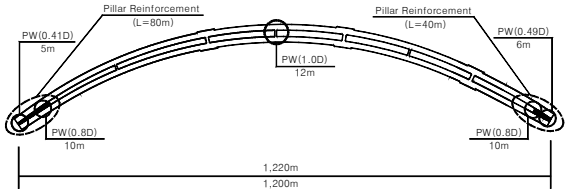
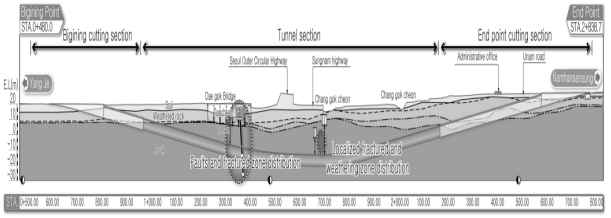


Fig. 3 Tunnel status



구분	시점부 개착구간	터널구간	종점부 개착구간
지층 현황	• 토사층 8.5~10.7m • 기반암 G.L(−) 10.8~11.9	• 토사층 1.8~11.7m • 기반암 G.L(−) 6.8~18.0	• 토사층 0.7~16.0m • 기반암 G.L(−) 6.2~22.6

Fig. 4 Geotechnical characteristics

다. 특히 시점부 80m, 종점부 40m는 암반 필라의 안정성 확보를 위해 록볼트를 체결하도록 설계하였다. 따라서, 본 터널은 터널 자체의 안정성 확보뿐만 아니라 필라부의 안정성 확보도 동시에 요구된다.

3.2 지반특성

지질 및 지반조사 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

4. 근접 병렬터널의 적정 필라폭 산정

4.1 해석조건

수치해석을 통해 근접 병렬 터널의 적정 필라폭을 검토하고, 시점부, 본선부, 종점부로 나누어 각각 근접 병렬터널간 필라폭에 따른 터널의 거동을 분석하여 상호 간섭효과 및 필라 거동에 대해 검토하였다. 또한 터널의 굴착순서가 터널 안정성에 상당한 영향을 미치므로 굴착순서에 대해서도 검토를 수행하였으며, 필라부 보강을 위해 프리스트레스의 크기에 따른 검토도 병행하였다. Table 1은 해석 Case를 요약한 것이다.

본 검토는 중앙 암반 필라부의 거동이 중요한 사항이므로 암반 필라의 거동이 잘 나타날 수 있도록 지보재의 설치는 생략하였으며, 좌, 우 터널은 순차적으로 전단면 굴

Table 1 Analysis condition

안정성		해석조건	측압계수
필라폭	시점부 종점부	• 필라폭 : (0.25,0.5,0.75,1.0)D • RMR : 시점부(IV),종점부(III)	0.5, 1.5
	본선부	• 필라폭 : (0.25,0.5,0.75,1.0,1.5)D • RMR : III, IV	0.5,1.0, 1.5
굴착순서	종점부	• 4가지 Case	0.5, 1.5
프리스트레스 적용	시점부	• 록볼트 적용 • 인장력 : 0.0, 5.0, 15.0, 20.0 kPa	0.5, 1.5

Table 2 Geotechnical properties

RMR	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비
III	25.0	1,000	39	6,800	0.25
IV	24.0	450	34	2,200	0.27

착으로 모사하였다. 또한 터널주변에 미칠 수 있는 영향을 고려하여 해석범위 결정시 좌, 우측면 및 하부경계는 터널 굴착폭의 4배이상으로 하였다. 모델의 좌, 우측 경계는 수평방향, 하부경계는 수직방향 변위를 구속하였다. 해석프로그램은 유한차분 해석코드인 FLAC 2D(ver. 3.0)를 이용하여, Mohr-Coulomb 파괴규준에 의한 탄소성 해석을 수행하였다. Fig. 5는 해석 요소망을 나타낸 것이다

적용 지반 물성치는 지반조사 분석 결과치를 적용하였으며 Table 2와 같다. 해석결과는 필라부에 발생하는 최대 및 최소 주응력을 이용하여 강도/응력비에 의한 안전율, 강도감소기법에 의한 터널의 안전율도 함께 산정하여 암반 필라의 안정성 평가시 참고자료로 활용 하였다.

4.2 안정성 평가방법

4.2.1 강도-응력비

다양한 구속압력(σ_3)에 대해 소성파괴의 시작은 다음과 같이 표현될 수 있는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 규명된다고 가정하면 아래 식(1)과 같이 표현된다.

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

암반의 일축압축강도(σ_{cm})와 σ_3에 대한 σ_1의 기울기(k)는 각각 식(2), (3)과 같다.

$$\sigma cm = 2\ c\ \cos\Phi/(1-\sin\Phi) \quad (2)$$

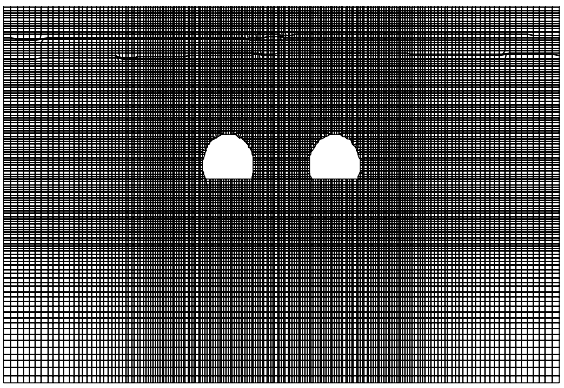


Fig. 5 Analysed meshes

$$k = (1+\sin\Phi)/(1-\sin\Phi) \quad (3)$$

또한, 강도-응력비(strength- stress ratio)는 식(4)와 같다.

$$\text{강도-응력비} = (\sigma_{1f} - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4)$$

여기서, σ_{1f} : 파괴시 축방향 응력, σ3 : 구속응력
c : 암반의 점착력, Φ : 암반의 내부마찰각

필라의 강도-응력비가 필라 전체의 안전율을 표현하지는 않지만 진행성 파괴나 응력 전이과정을 고려하여 필라 중앙 단면에서의 평균 강도-응력비가 1.0이하로 되면 필라 전체가 불안해 지는 것이라고 평가하였다.(Hoek and Brown, 1980)

따라서, 본 연구에서는 강동-응력비를 이용하여 암반 필라부의 안정성을 평가하였다.

4.2.2 강도감소기법

터널의 안정성 해석에는 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 사면에서와 같이 한계평형법에 기초한 해석법을 적용하여 안전율을 구하는 데에는 한계가 있다. 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기 보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어 왔다.

터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 강도감소기법에 기초하여 수치 해석시 터널의 안전율을 구하는 방법이 제시된 바 있으며(유광호 등, 2000), 본 연구에서는 이 방법을 적용하여 터널의 안정성을 평가하였다. 터널해석에서 강도감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력(c)과 내부마찰각(Φ)을 시험 안전율(F_{trial})로 나누어 일

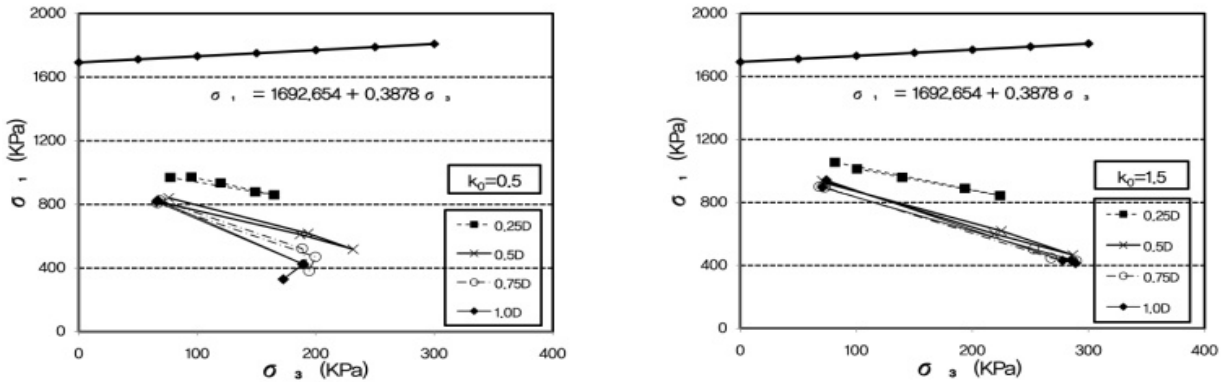


Fig. 6 Principal stress in rock pillar with various pillar width(inlet)

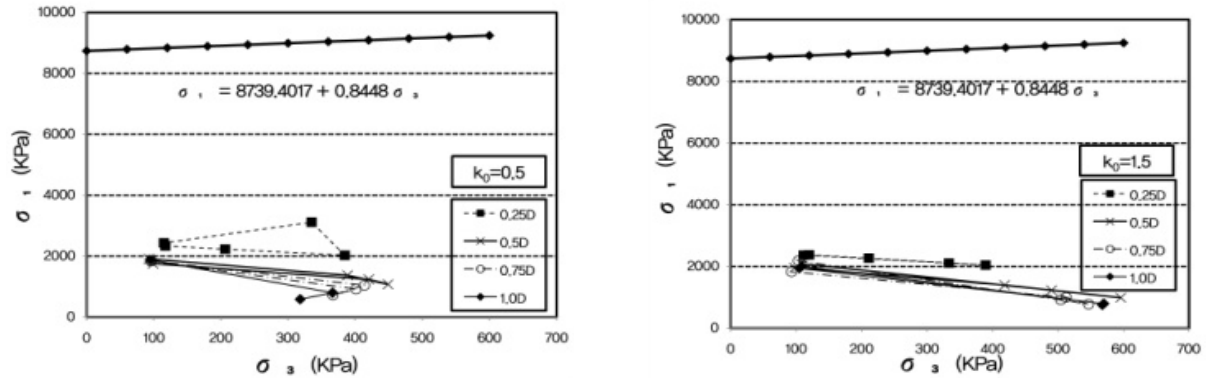


Fig. 7 Principal stress in rock pillar with various pillar width(outlet)

련의 해석을 반복 수행하여 터널의 안전율을 구한다. 이 때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치는 다음 식(5)와 식(6)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$_{ctrial} = c / F_{trial} \quad (5)$$

$$\Phi_{trial} = \tan^{-1}(\tan\Phi / F_{trial}) \quad (6)$$

본 연구는 강도감소법을 이용 터널의 안정성을 평가하였다.

4.3 해석결과

4.3.1 필라폭에 따른 안정성 평가

지반조사결과 터널 시점부는 RMR IV등급, 본선부는 RMR III, IV등급, 종점부는 RMR III등급의 암반이 분포하는 것으로 확인되어 해석시에는 이를 반영하였으며, 암반필라의 거동이 잘 나타날 수 있도록 지보재 설치는 생략하고 전단면 굴착을 적용하였다. Fig. 6는 시점부, Fig. 7은 종점부 암반필라의 주응력 상태를 나타낸 것이다.

시종점부 주응력 상태는 필라폭에 관계없이 모두 파괴기준선 아래에 위치하여 안정한 것으로 나타나는데, 이는 터널 시종점부의 토피고는 상대적으로 낮고 필라부 암반의 강도는 높기 때문이다. Fig. 8은 암반 필라 중앙부의 평균 강도/응력비를 산정한 결과이며 필라폭 0.25D에서 2.0이상의 강도/응력비를 보이므로 필라의 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 그러나, 필라폭 0.5D까지는 강도/응력비 변화가 크게 나타나므로 필라폭 결정시 고려해야 할 요소인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 강도감소기법을 이용하여 필라폭에 따른 터널 전체의 안전율을 나타낸 것이다. 측압계수 변화에 따른 영향은 거의 없으며, 다소의 편차는 있으나 강도/응력비의 경향과 유사하게 이격거리 (0.5-0.75)D까지는 안전율의 변화가 크게 나타나고 있다. 필라부 안정성 검토에 있어서 강도감소기법에 의한 안전율이 평균 강도/응력비에 의한 안전율과 비교되려면 필라부에서 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 안전율 이어야 한다

그러나, 고려되는 지점의 주변 지반 및 지형 조건, 필라부 암반강도 등에 따라 터널의 파괴양상은 다양하게 나타난다

따라서 엄밀하게 말해 강도감소법에 의한 안전율은 필

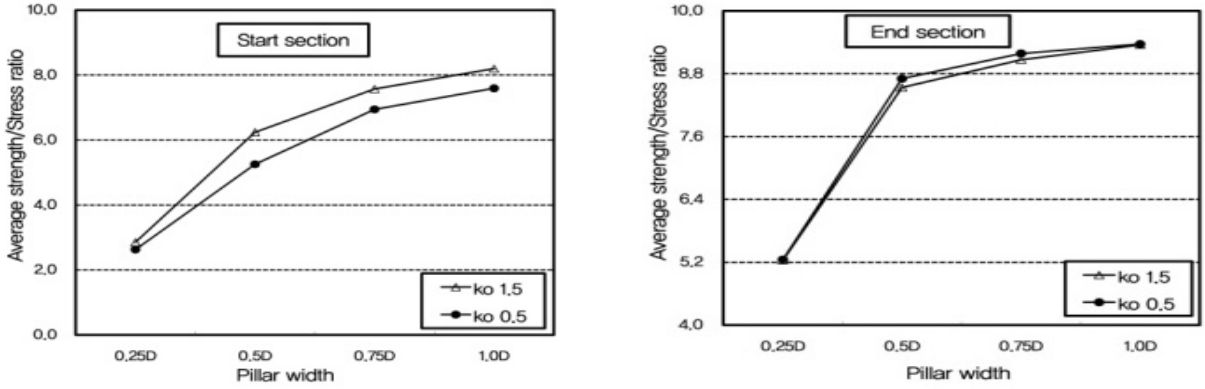


Fig. 8 Average strength/stress ratio of the rock pillar with various pillar width(tunnel part)

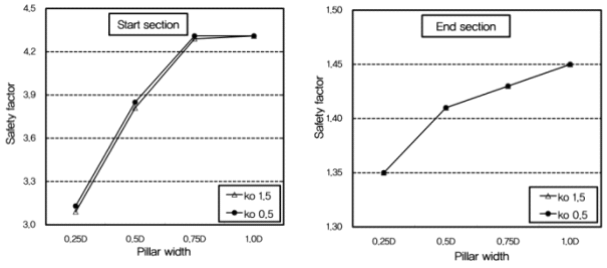


Fig. 9 Safety factor by strength decrease techniques

라부에서 파괴가 발생되기 시작하는 경우를 제외하고는 필라부에 대한 안전율 이라고 할 수 없다

다만 터널주변 임의 지점에서 이미 파괴가 발생했기 때문에 필라부는 최소한 그 이상의 안전율을 확보하고 있다는 의미로 해석되어야 한다.

Fig. 10와 11은 본선부 암반 필라의 암반등급에 따른 주응력 상태를 나타낸 것이다. 암반 III등급의 경우 주응력 상태는 필라폭에 관계없이 모두 파괴기준선 아래에 위치하여 안정한 것으로 나타나나, IV등급 암반에서는 이격거리 0.25D는 파괴 기준선을 벗어나며 0.5D에서는 파괴기준선과 근접하고 있어 터널에 인접한 암반 필라는 상대적으로 불안정하고 국부적인 파괴가 일어날 수 있을 것으로 예상 할 수 있다.

Fig. 12는 암반필라 중앙부의 평균 강도/응력비를 산정한 결과이며 최소 이격거리 0.25D에서 1.0이상의 강도/응력비를 나타내고 있다. 그러나 응력집중에 의한 국부적인 파괴는 고려되지 않았고, IV등급 암반의 경우 0.5D이하의 이격거리에서 낮은 강도/응력비를 나타내므로 국부적인 보강대책 외에도 별도의 필라보강이 필요할 것으로 판단된다. 따라서, 본선부 필라폭 결정시에는 상기의 결과를 반영하여 최소 0.5D이상의 필라폭으로 계획하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

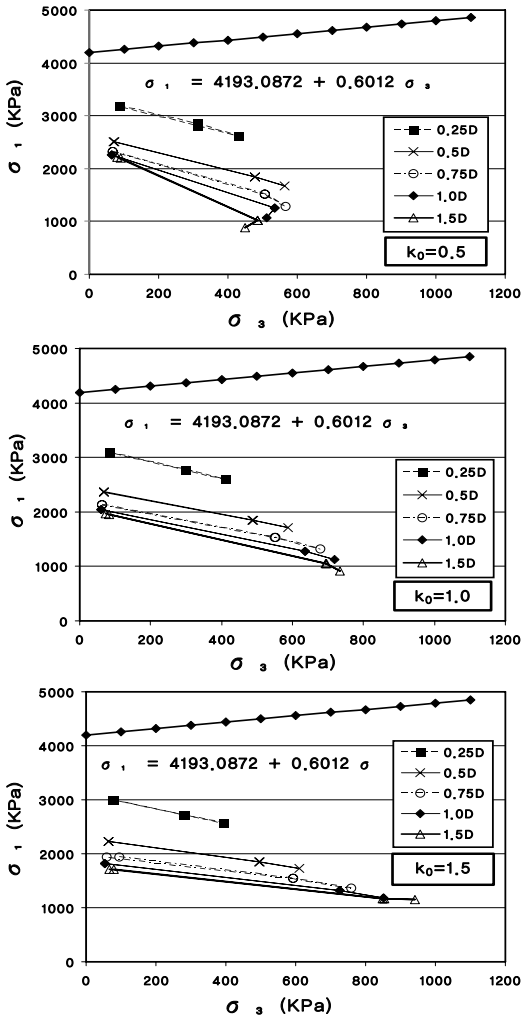


Fig. 10 Principal stress at rock pillar with various PW and rock mass ratings RMR(III)

Fig. 13에 강도감소기법을 이용하여 필라폭과 암반등급에 따른 안전율을 나타 내었다. 측압계수 k에 따른 안전율 변화는 거의 없으며 필라폭에 따른 안전율의 증가도

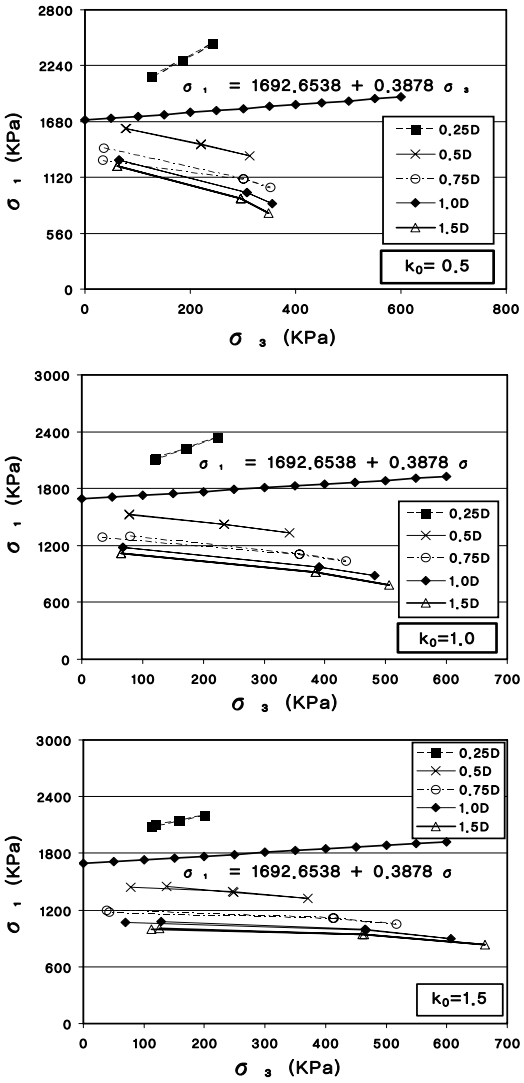


Fig. 11 Principal stress at rock pillar with various PW and rock mass ratings RMR(IV)

크지 않으나 0.5D이하에서는 상대적으로 다소 낮은 안전율을 나타낸다

4.3.2 굴착순서에 따른 안정성 평가

본 터널의 경우 시점부 80m, 종점부 40m 구간은 필라폭이 최대 10m에서 최소 5m(0.41D)로 감소하여 필라부에 상당한 응력집중이 예상된다. 또한 굴착공법에 따라 터널 전체뿐만 아니라 필라부에도 상당한 영향을 미치므로 분할굴착 공법을 적용하여 시공중 필라부의 안정성을 강도/응력비로 검토하였다.

Fig. 14는 분할굴착에 대한 해석 Case로서 해석시 필라폭은 최소 5m로 모델링 하였으며, 선후행 굴착과 상하반 굴착순서에 따라 해석 Case를 구분하였다.

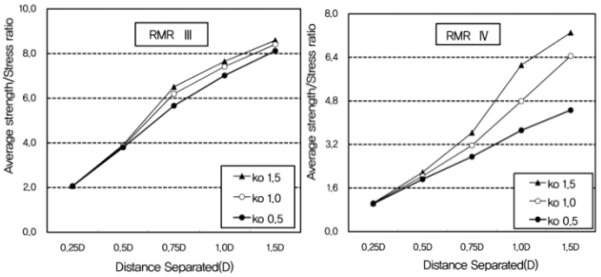


Fig. 12 Average strength/stress ratio with various PW and rock mass rating

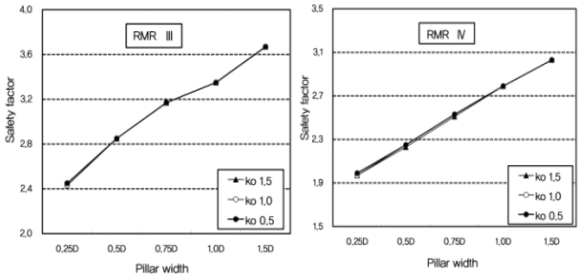


Fig. 13 Safety factor with various PW and rock mass rating

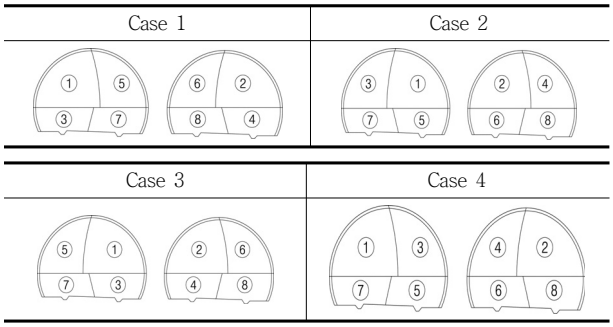


Fig. 14. Analysis cases according to Excavation Sequence

Fig. 15는 종점부 암반 필라 중앙부의 평균 강도-응력비를 시공단계별로 나타낸 것으로 단계별로 시공이 진행될수록 강도-응력비는 측압계수와 관계없이 감소하여 마지막 단계에서 최소가 되는 것을 알수 있다. 또한 Case 1, 4와 같이 필라 반대측을 선 굴착할 경우 상대적으로 필라부가 안정한 상태를 유지하는 것으로 나타나며 특히, 필라 반대측 상하반을 모두 선 굴착하는 Case 1경우가 강도-응력비 측면에서는 가장 유리한 것을 알 수 있다.

4.3.3 프리스트레스에 따른 안정성 평가

터널을 굴착하게 되면 굴착 주변의 지반은 3축상태에서 2축상태로 전환하게 되어 파괴강도가 저하되게 된다. 따라서 적절한 방법을 이용하여 2축상태를 3축의 응력상태로 전환할 수 있으면, 지반의 파괴강도도 높일 수 있다. 근접 병렬터널의 경우 좁은 암반 필라부의 안정성을 확보

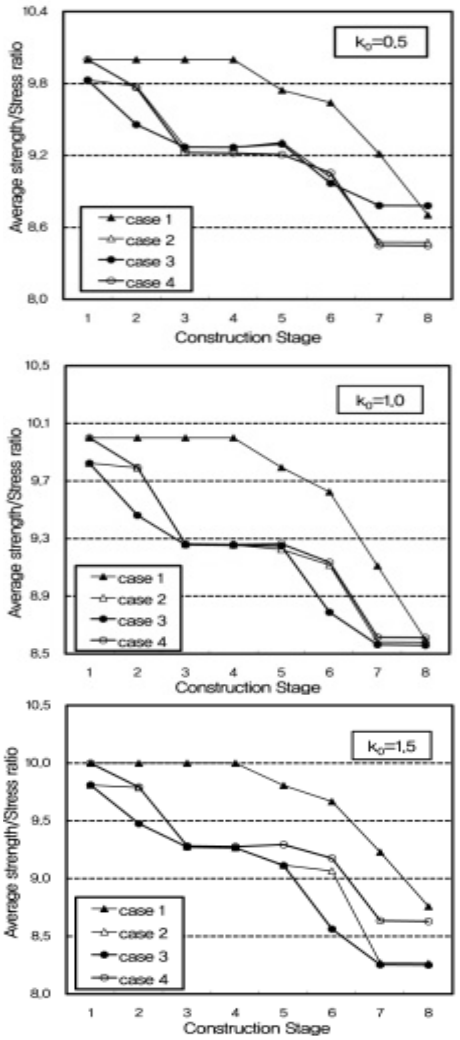


Fig. 15 Average strength/stress ratio across the centre of the pillar with the staged construction (k= 0.5, 1.0, 1.5)

하기 위해 일반적으로 강봉 및 PC강선등을 필라부에 설치한 후 프리스트레스를 작용시키는 방법이 적용되고 있다. Fig. 16에 프리스트레스 도입에 따른 응력변화 상태를 모아의 응력원으로 나타내었다.

본 해석에서는 프리스트레스의 크기에 따른 암반필라의 응력상태를 분석하여 필라부 보강효과를 확인하였다. Fig. 16에 프리스트레스에 따른 주응력 상태를 나타냈다. 프리스트레스가 증가 할수록 σ_1은 거의 변화가 없으나 σ_3은 증가하여 프리스트레스에 따른 보강효과를 확인 할 수 있다. 그러나, 프리스트레스의 유무에 관계없이 모두 파괴 기준선보다 아래에 응력상태가 위치하고 있으므로 필라부의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

설계시에 적용된 지보 설계 및 보강공법에 대하여 적정성을 검토하였다. Fig. 18은 해석지점별 숏크리트와 록볼

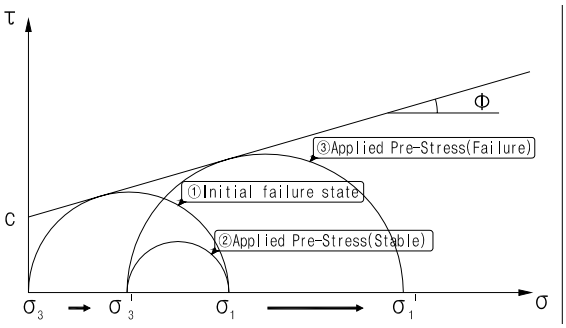


Fig. 16 Sate of stress change as the pre-stress applied

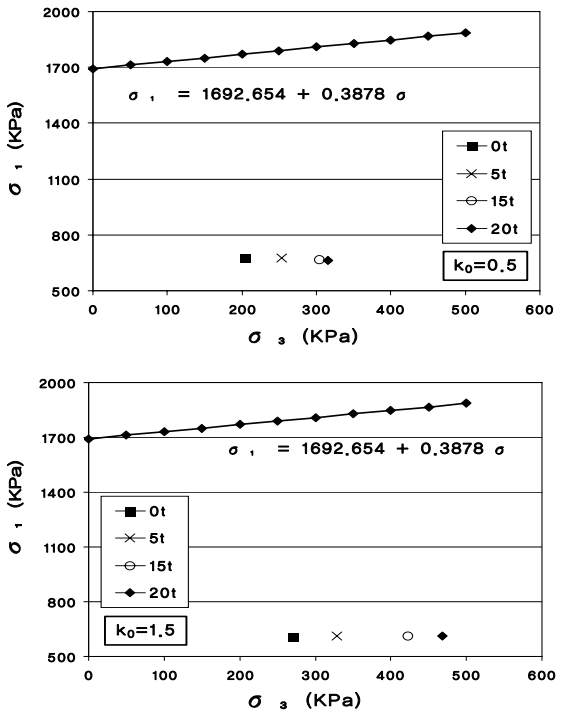


Fig. 17 Changes of principal stresses after reinforcement(inlet)

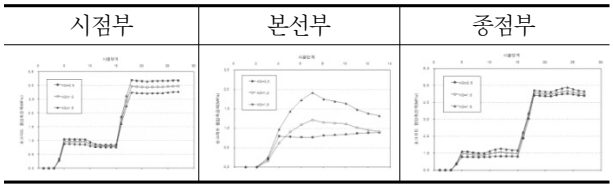


Fig. 18 Changes of principal stresses from supports

트에 발생하 응력을 해석단계별로 나타낸 것이다. 필라부 프리스트레스(50kN) 적용에 따른 보강록볼트에 발생하는 축력은 55kN으로 나타나 지보재의 안정성을 확보하였다.

5. 결 론

민원 및 보상비 최소화 방안등은 도심지 지하도로 터널

계획시 선형계획 단계부터 근접병렬 터널 설계시 적정 필라폭 결정 방법 및 보강방법, 굴착순서 등에 대해 수치해석 검토를 하였다.

1) 평면선형 계획시 최대한 사유지 통과배제 및 터널 부대시설(수직구, 관리사무소)의 녹지대 배치를 통해 보상비 부담을 없앨수 있으며 지하 보상비 최소화를 위해 근접병렬 터널로 계획할 수 있다.
2) 암반 필라폭에 따른 중앙부의 평균 강도/응력비를 산정한 결과 시점부, 중앙부, 종점부에 따라 강도/응력비 변화가 크게 나타나므로 필라폭 결정시 고려해야 할 요소이다.
3) 강도-응력비에 의한 필라부 안정성 검토결과 시종점부는 필라폭 0.25D에서도 안정성이 확보되는 것으로 나타나나 이는 대상지점의 토피고는 낮고 필라부 암반의 강도는 상대적으로 높기 때문이다. 반면 본선부는 RMR Ⅳ등급 암반에서는 필라폭 0.5D까지는 필라부 안정성이 불량한 것으로 나타나므로 필라폭은 0.5D 이상으로 계획하는 것이 바람직하다.
4) 굴착순서에 따른 안정성 검토결과 Case 1, 4와 같이 필라 반대측을 선 굴착할 경우 상대적으로 필라부가 안정한 상태를 유지하는 것으로 나타나며 특히, 필라 반대측 상하반을 모두 선 굴착하는 Case 1경우가 강도-응력비 측면에서는 가장 유리한 것으로 나타났다.
5) 필라부 프리스트레스 적용에 따른 안정성 검토결과 프리스트레스가 증가 할수록 σ_1은 거의 변화가 없으나 σ_2는 증가하여 프리스트레스에 따른 보강효과를 확인 할 수 있으며 지보설계시 적용한 결과도 안정성을 확보하였다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 김포대학의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

1. 김도식, 김영근, “암반 필라를 포함한 비대칭 근접 병설터널의 안정성 평가에 관한 연구”, 한국터널 공학회 논문집, vol. 9, No.4, 2007, pp. 387~401
2. 대림산업, 위례지구 복정사거리 입체화시설 건설공사 기본설계 보고서 및 해석보고서, 대림산업, 2009.
3. 유광호, 박연준, 배규진, “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가”, 한국터널 공학회 논문집, vol. 2, No.3, 2000, pp. 47~57.
4. 한국터널공학회, 부산~거제간 연결도로 중죽도 통과구간 근접 터널보강공법 설계검토 연구보고서, 한국터널공학회, 2004.
5. Hoek, E., Brown E.T., "Underground excavationin rock", Institution of Mining and Metallurgy, 1980.

(접수일자 : 2010년 5월 11일)
(1차수정일자 : 2010년 7월 22일)
(심사완료일자 : 2010년 7월 29일)

요 지

산악터널과 달리 도심지 지하도로는 대부분 평야지대에 위치하고 충적층이 두껍게 분포하고 있으며 특히 터널 입·출구부는 병렬터널로 분기되는 지점인 동시에 하향굴착을 하는 관계로 터널 시·종점의 위치선정에 따라 공사비에 미치는 영향이 매우 크게 된다. 또한 병렬터널의 필라폭(PW)은 지하 보상비와 직결 되기 때문에 병렬터널의 안정을 확보하면서 동시에 최소의 필라폭(PW)으로 터널을 계획하여야 한다. 국내 도로터널의 필라폭(PW)은 일반적으로 1.5D(D: 터널 최대폭)를 기준으로 하며 일부 터널의 경우 입·출구부 극히 한정된 구간에서만 1.5D(D : 터널 최대폭)이내의 필라폭을 적용한 사례가 있으나 보상비 문제가 아닌 선형계획측면에서 불가피하게 발생한 사례들이다. 본 논문은 NATM형식으로서 국내최초 도심지 지하도로 설계사례를 통해 선형 계획단계에서부터 지하 보상비 및 지반특성을 함께 고려하여 적정 필라폭을 설계한 사례를 소개하고 도심지 병렬터널의 적정 필라폭 결정방법에 대해 기술하였다. 적정 필라폭 결정은 설계 및 시공사례 분석과 수치해석을 통한 강도 감소법과 강도/응력비 방법을 이용하였으며 터널간 초근접으로 인해 필라의 안정성이 불량한 터널 입·출구부는 안정성 확보를 위한 보강방법을 제시하고 수치해석을 통해 안정성을 확인하였다.

핵심 용어 : 필라폭, 병렬터널, 안정성