

도로터널 분기부 암반 필라의 안정성 평가

강재기, 양형식*, 장선종

Stability Analysis of Rock Pillar in the Diverging Area of Road Tunnel

Jae-Gi Kang, Hyung-Sik Yang*, Sun-Jong Jang

Abstract In this study, the behavior of rock pillar in the diverging area of road tunnel was assessed by using a three dimensional numerical analysis. Based on parameters affecting the behavior of rock pillar, different safety factors according to pillar width, depth and rock conditions were evaluated. It turned out that as the pillar width increases, the change curve of safety factors in accordance with depth and rock conditions shows more of the nonlinear behavior. By the assessment of the minimum safety factor, a safety factor chart on the behavior of rock pillar in the diverging area of road tunnel was suggested.

Key words Tunnel diverging area, Rock pillar, Safety factor chart

초 록 본 연구에서는 도로터널 분기부 암반 필라의 거동을 3차원 수치해석 방법으로 검토하였다. 암반 필라의 거동에 영향을 미치는 매개변수로 암반 필라의 이격거리, 토피고, 암반등급 변화에 따른 안전율을 평가하였다. 필라의 이격거리가 증가할수록 토피고와 암반등급에 따른 안전율 변화 곡선은 비선형 거동을 보였으며, 도로터널 분기부에서 암반 필라의 거동 특성을 최소 안전율을 기준으로 안전율 도표로서 제안하였다.

핵심어 터널 분기부, 암반 필라, 안전율 도표

1. 서 론

최근 국토교통부에서 검토하고 있는 대심도 지하도로 망 구축사업인 서울시의 U-Smartway 사업이 발표되면서, 도심지의 대심도 지하공간을 활용한 대규모 터널 건설에 대한 관심이 증대되고 있다. 포화상태에 다다른 대도시의 천층 및 중층 지하공간 이외에 대심도의 지하공간을 활용함으로써 사업비의 상당 부분을 차지하는 용지보상비를 최소화하겠다는 개념이다.

도심지 상층 자정체 해소를 위한 지하도로 노선 계획 시 교통량 분산을 위하여 유출(분류, diverging) 및 유

입(합류, merging)부를 터널 내에 설치하여 인터체인지(IC) 역할을 담당하게 하고 있다. 해외에서는 선진국을 중심으로 대도시의 교통체증을 해소함과 동시에 지상 녹지공간을 확보하기 위해 다양한 도심지 지하도로의 건설을 활발히 진행하고 있다. 대표적인 사례로 미국 보스턴의 Big Dig 프로젝트, 프랑스 파리의 A86, 스페인 마드리드의 M30 등을 들 수 있다(장수호 등, 2009).

터널 내 분기부의 지반 및 터널 상호간의 거동은 단선터널과는 상이하며, 병설터널의 안정성과 직접적인 관련이 있는 터널 중심간격(C.T.C)이 무엇보다 중요한 검토요건인 만큼 필라(pillar)의 안정성 검토에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 터널 내 분기부의 설계 시 필라의 폭은 분류 및 합류되는 각도와 상관성을 가지며, 이에 따라 도로의 선형, 공사비, 주행성, 시공성 등에 커다란 영향을 미치고 있다.

본 연구에서는 도로터널 분기부를 대상으로 암반 필라의 거동에 대한 연구를 수행하였다.

Received: Aug. 11, 2014

Revised: Oct. 8, 2014

Accepted: Oct. 8, 2014

***Corresponding Author:** Hyung-Sik Yang

(Tel) +82625301724, (Fax) +82625301729

(E-Mail) hsyang@jnu.ac.kr

Energy & Mineral Resources Engineering, Chonnam National University, Yongbong-ro 77, Gwangju 500-757, Korea

2. 암반 필라의 안정성 평가 방법

2.1 병설터널 필라부의 응력

두 개의 터널을 근접하여 굴착하면 상호간섭 효과로 인하여 필라부에 응력이 집중하게 된다. Fig. 1에서는 터널 폭(W_o), 필라 폭(W_p)에 따라 필라에 작용하는 응력의 집중양상을 나타낸 것이다. 터널이 근접하여 필라 폭이 좁아질수록 필라에 작용하는 평균연직응력 σ_p 가 증가하고 집선응력과 연직응력의 비 σ_b/σ_p 가 감소하게 된다(Hoek and Brown, 1980)

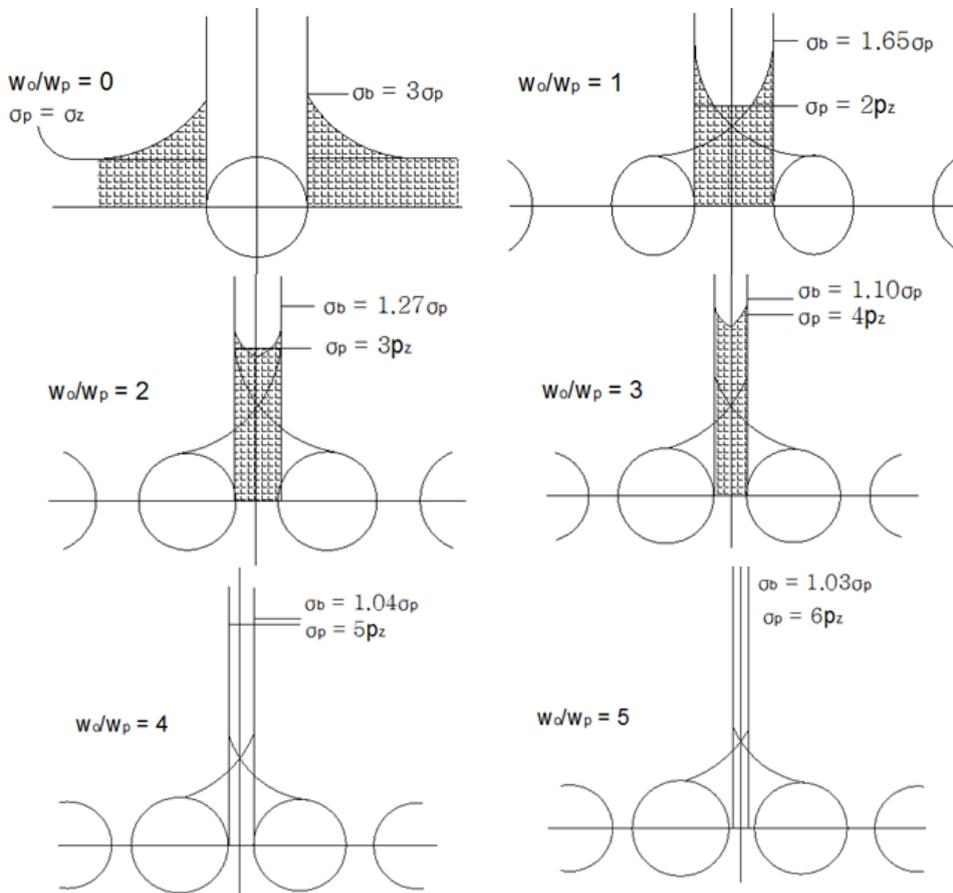
2.2 암반 필라의 안정성 평가

필라의 안정성을 평가하기 위한 방법으로는 Peck(1969) 방법과 경험식에 의한 개략검토인 지류론(tributary theory)과 Matsuda(1997) 방법, Mohr-Coulomb 파괴기준에 의

한 파괴접근도, 강도/응력비에 의한 안전율 등이 있다.

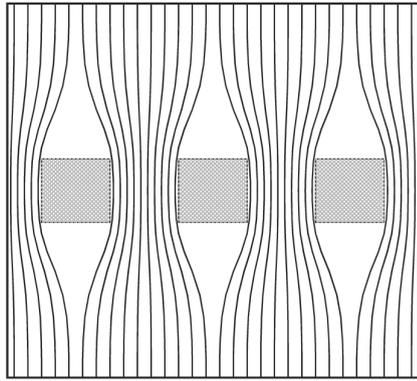
Peck(1969)은 평행하게 배치된 근접터널에 있어서 터널간격 및 크기에 따른 터널의 변형을 지침으로 제시하였다.

지류론(tributary theory)은 Fig. 2와 같이 병설터널 사이의 필라에서 응력전달은 교각사이의 물의 흐름과 매우 유사한 관계가 있다. 이것은 서로 인접한 공동 사이의 필라에 대한 응력선 분기 및 연직응력의 집중도 등을 취급하는 이론이다. 평균 필라응력은 각각의 필라가 지지하고 있는 암반의 중량을 각 필라의 단면적으로 나눈 값이다(Hoek and Brown, 1980). Matsuda(1997) 등은 토피고(H)가 1D 이하인 얇은 근접 터널의 경우 Fig. 3과 같이 암반 필라부의 응력상태를 일축압축강도와 필라부에 작용하는 응력의 비로 안정성을 검토할 수 있다고 하였다.

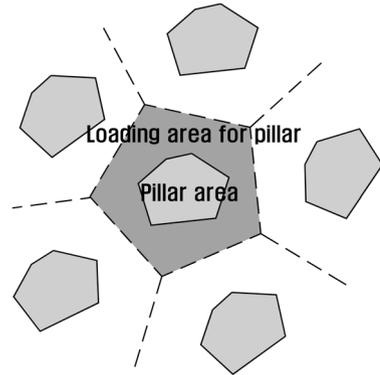


W_o : tunnel width(m), W_p : pillar width(m), σ_b : vertical stress at wall, σ_p : average vertical stress

Fig. 1. Stress distribution at pillar between circular parallel tunnels



(a) flow lines with 3 piers



(b) average vertical stress with irregular pillar

Fig. 2. Concept of tributary theory

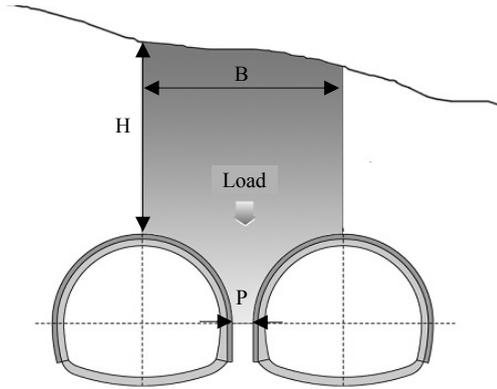


Fig. 3. Stresses at pillar of near parallel tunnels

$$H > D, \quad P_r = \gamma \times D \times \frac{B}{P}$$

$$H < D, \quad P_r = \gamma \times H \times \frac{B}{P}$$

D : tunnel width(m)

H : overburden(m)

B : width of redistributed stress(m)

P : pillar width(m)

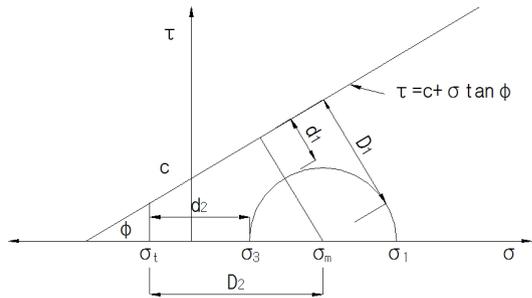
P_r : redistributed stress

파괴 접근도(R)는 응력원이 파괴포락선에 어느 정도 접근하였는가에 따라 파괴 및 파괴 가능성을 판단할 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \min\left[\frac{d_1}{D_1}, \frac{d_2}{D_2}\right] \quad (1)$$

여기서 D_1 과 D_2 는 유효응력과 압축과 인장영역 파괴 포락선까지의 거리를 나타내는 응력접근도이고 d_1 과 d_2 는 그 때 응력원에서 포락선까지의 거리를 나타내는 파괴여유도이다(Fig. 4).

암반이 최고로 안정한 상태는 파괴접근도 R 이 1.0으로 정수압 상태일 때이고, 파괴접근도 R 이 0이면 완전 파쇄암을 나타낸다. 또한, 식 (2)와 같은 안전율(FS) 개념으로도 표현할 수 있으며, 안전율이 1.0 이하이면 암반이 파괴되기 쉬운 불안정한 상태로 간주한다.



D_1 : stress distance to failure envelope, d_1 : failure margin

Fig. 4. Concept of failure proximity by Mohr-Coulomb failure criteria

$$FS = \frac{D_1}{r} = \frac{D_1}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} = \frac{\left(\frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \sin \phi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}$$

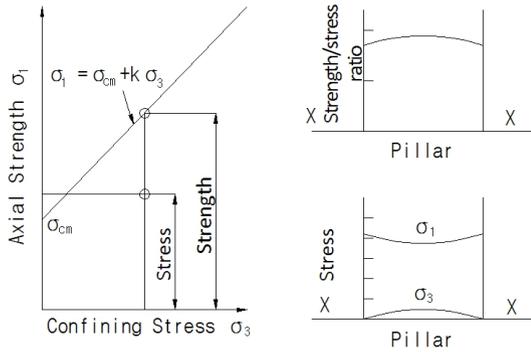


Fig. 5. Strength/stress ratio at pillar

$$= \frac{\left(\frac{2c}{\tan\phi} + \sigma_1 + \sigma_3 \right)}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin\phi \quad (2)$$

여기서 r 은 Mohr 응력원의 반경, c 는 암반의 점착력, ϕ 는 내부마찰각이다.

강도/응력비에 의한 안전율은 구속압력(σ_3)에 따라 소성파괴가 시작되고, Mohr-Coulomb 파괴기준을 따른다고 가정하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{cm} + k\sigma_3 \\ \sigma_{cm} &= \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \\ k &= \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 σ_1 은 파괴 시의 축방향 응력, σ_3 은 구속응력, σ_{cm} 은 일축압축강도, k 는 주응력선의 기울기이다.

Fig. 5는 암반 필라의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 진행성 파괴나 응력 전이과정을 고려하여 필라 중앙 단면에서의 평균 강도/응력비가 1.0 이하가 되면 필라 전체가 불안해지는 것으로 판단한다(Hoek and Brown, 1980).

3. 수치해석을 통한 암반 필라의 거동 평가

3.1 개요

터널 내 분기부에서 분기되는 병설터널간 이격거리의 선형, 설계속도, 정지시거 등을 고려하여 분기부 각도 변화에 따라 그 거리가 결정되는데, 대부분의 경우 0.5D 이내에서 암반 필라가 형성된다. 따라서, 본 검토에서는

터널 내 분기부에서 분기되는 병설터널간의 암반 필라 이격거리 변화에 따른 필라부의 발생응력 변화경향에 대한 검토를 수행하고자 한다.

수치해석은 암반 필라를 활용한 근접 병설터널을 포함한 터널 분기부 확폭터널로 하였다. 근접 병설터널의 경우 병설터널 분기부에서 최소 이격거리를 갖게 되고 대단면 확폭터널의 경우 터널 상부 토피고, 지반조건 등으로 인한 국부적인 응력집중 등 다양한 불안정 요소들이 상존하는 구간이다(Popit et al., 2008a, 2008b). 이러한 이유로 터널 분기부에 위치하는 대단면 확폭터널의 경우 다양한 불안정요소를 고려하여 시공방법을 계획하게 되고 별도의 지보패턴과 보강공법을 적용하기 때문에 거동 특성을 일률적으로 기준화 할 수 없다. 그러므로 터널 분기부 확폭터널은 암반 필라의 이격거리가 최대 폭을 가지는 단면으로 고정하고, 터널 분기부 확폭터널에서 발생하는 암반 필라를 대상으로 매개변수 해석을 수행하여 그에 따른 거동특성을 평가하였다.

터널의 굴착방법은 터널 분기부 근접 병설터널의 굴진에 따른 간섭효과와 지반거동을 분석하기 위하여 시공순서에 준하여 해석단계를 터널 분기부 확폭터널 시공단계, 근접 병설터널 지보재 설치로 구분하고 선행터널 굴착완료 후 후행터널을 굴착하는 것으로 굴착순서를 정하여 검토를 수행하였다.

수치해석에 적용한 주요 매개변수로는 암반 필라의 이격거리, 토피고, 암반조건을 적용하여 안전율 평가를 통해 거동 특성을 검토하였다.

3.2 해석방법 및 조건

3.2.1 해석방법

일반적으로 터널의 본선 구간에서 지상으로의 분기부는 바깥쪽, 안쪽, 상호의 3가지 형식으로 나타난다. 바깥쪽 또는 안쪽으로의 분기는 비대칭 형식의 분기(편측 분기)이므로 해석 Case에 대한 정량화가 쉽지 않아 본 논문에서는 대칭적인 분기 형식을 나타낼 수 있는 상호의 분기 방법(양측 분기)을 이용하여 안정성을 평가하였다.

확폭터널 분기부의 근접 병설터널은 국내외 설계사례를 검토한 결과 대부분 10°~20° 내외이다. 또한 터널 분기부의 설계속도(40 km/h, 50 km/h, 60 km/h)에 따른 정지시거(40 m, 55 m, 70 m)의 영향을 고려하여 2개의 1차로 터널의 분기각도를 15°로 적용하였다.

2차로 병설터널에서 1차로 근접 병설터널로 분기될 때에는 필라의 이격거리에 따른 2차로 터널의 확폭과 공사비의 문제로 최소한의 필라 이격거리가 적용된다. 본 검토에서는 2차로 병설터널에서 1차로와 1차로의

Table 1. Input data for physical characteristics of rock mass

Class	Input	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Modulus (MPa)	Poisson's ratio
Class I		27.0	4,000	45	25,000	0.21
Class II		26.0	2,000	42	15,000	0.22
Class III		25.0	1,000	38	7,000	0.25
Class IV		24.0	500	34	2,000	0.29
Class V		21.0	150	31	500	0.30

Table 2. Boundary conditions for numerical analysis

Boundary	Displacement condition		Support
sides	x direction ⇔ fixed	z direction ⇔ free	roller
bottom	x direction ⇔ free	z direction ⇔ fixed	roller
bottom corners	x direction ⇔ fixed	z direction ⇔ fixed	hinge

분기시 필라의 이격거리에 따른 영향을 보기 위해 터널 간 이격거리가 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.5D 일 때에 대해 해석을 수행하였다. 또한 도심지 대심도 터널의 경우 40 m 이하의 심도를 기준으로 도로선형이 계획되는 것에 착안하여 토피코가 2.0D, 3.0D, 4.0D 일 때에 대해 해석을 수행하였다.

도로터널 분기부 암반 필라의 거동특성 평가에 있어 지반물성이 터널주변의 거동에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 본 검토에서는 합리적인 터널해석을 위해서 기존의 도로터널 20개 이상의 과업에 적용된 강도특성과 대심도 도심지 터널에 적용된 강도특성을 비교하여 수치해석의 입력자료로 적용하였다(Table 1).

3.2.2 해석조건

터널설계를 위해서는 시공시 과다변위의 발생 여부 혹은 지보재에 과다한 응력이 작용하는지에 대한 여부 등 터널의 안정성을 검토하기 위한 수단이 필요하다. 본 검토는 수치해석 방법을 사용하는 상용 프로그램 MIDAS-GTS를 적용시켜 대상지역을 유한요소로써 모델링하고 지반의 해석 모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다.

터널 상호간의 영향에 대해서는 지반이 완전탄성체일 경우에는 중심간 간격이 굴착 폭(D)의 2배, 지반이 연약지층인 경우 5배 이상으로 하면 거의 상호간에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되어 있으며, 통상적으로 터널 중심 간격을 2.5D로 적용하여 설계하는 것이 일반적이다.

터널해석에서는 해석코자 하는 터널구조물을 중심으로 제한된 해석영역을 설정한다. 일반적으로 설정되는

해석영역은 터널구조물 굴착에 따라 재분배 되는 응력에 영향을 미치지 않는 범위까지 설정하여야 한다. 따라서 굴착코자 하는 터널구조물의 폭이나 높이의 3~5 배 이상의 거리까지 해석영역을 설정해 주어야 한다. 본 검토에서는 수치해석 모델 범위를 상부는 지표면(토피코 2D, 3D, 5D), 좌우경계는 4D, 하부영역은 3D로 설정하였다. 수치해석에 적용한 경계 조건은 다음 Table 2와 같다.

기존의 연구사례를 분석한 결과 김도식 등(2007)은 암반 필라의 거동이 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 지보재의 설치를 생략하였으며, 김양은 등(2007), 한국터널공학회(2002, 2004) 등 여러 연구자들이 병설터널 필라부의 텐션볼트 보강에 대하여 연구를 수행하였다. 초근접 터널의 포털에 대해서도 유사한 연구가 이루어진 바 있으나(김원범 외, 2012) 분기부 보다는 구조가 단순하고 따라서 변수도 적다. 본 검토에서는 터널 분기부 확폭터널에 대한 종방향 아칭효과가 분기부 근접 병설터널의 암반 필라 거동에 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 지보재로 슛크리트 보강효과만을 적용하였다.

각 step별 세부 시공 순서는 터널 분기부 확폭터널 시공단계 ⇨ 좌측(선행)터널 굴착단계 ⇨ 좌측(선행)터널 연성 슛크리트 타설단계 ⇨ 좌측(선행)터널 강성 슛크리트 타설단계 ⇨ 우측(후행)터널 굴착단계 ⇨ 우측(후행)터널 연성 슛크리트 타설단계 ⇨ 우측(후행)터널 강성 슛크리트 타설 순으로 시공되도록 해석을 수행하였다.

터널내 분기부에서 본선 확폭 2차로터널에서 근접 병설 1차로터널로 분기할 때, 암반 필라의 이격거리에 따른 터널 분기부 확폭터널 단면은 Fig. 6과 같다.

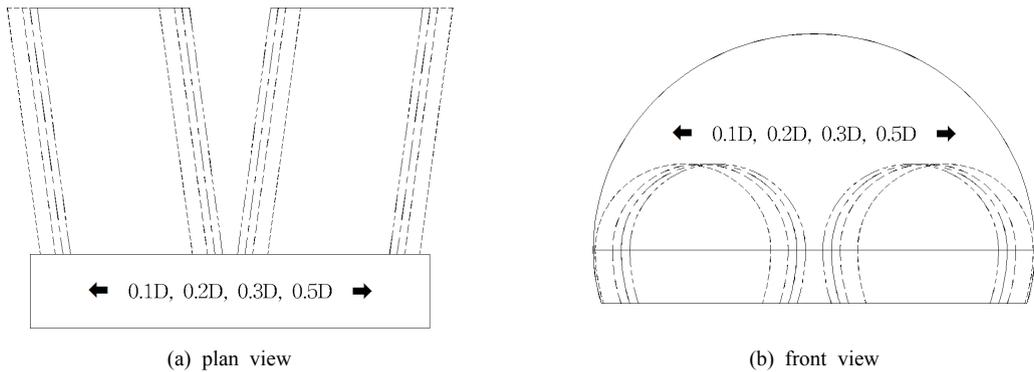


Fig. 6. Sections of tunnel branch and pillars at different distances

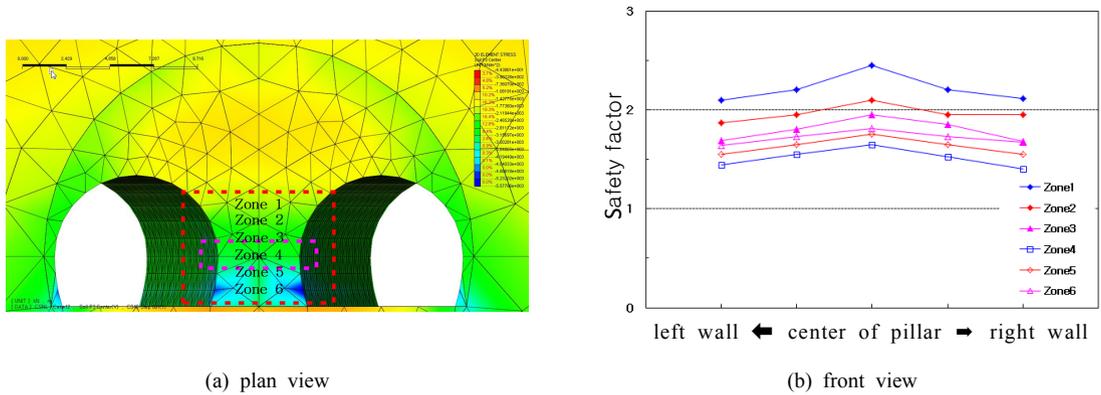


Fig. 7. Calculation zones of rock pillar of the tunnel branch and SF at the zones

3.3 암반 필라의 안정성 평가

3.3.1 안정성 평가 방법

필라폭이 작은 근접 병설터널의 경우 필라부 전체가 하나의 구조체로 거동하게 되고 곡면형태의 필라 형상으로 인해 가장 낮은 안전율 분포를 보인 최소 필라폭 구간이 불안정해지면 필라 전체가 불안정해지는 것으로 가정하였다.

본 검토에서는 필라 전체의 평균응력을 이용하여 필라의 안전율을 산정하였으며, 암반 필라의 횡단면도상의 각 축점에서 발생하는 최대·최소 주응력을 측정후 파괴접근도 방법으로 안전율을 검토하였다. 안전율은 최대주응력이 크게 발생하는 상대적으로 응력이 집중되는 최외곽 축점에서 낮게 나타났으며 필라의 중심에서 축적으로 진행할수록 낮은 경향을 보인다(Hoek and Brown, 1980).

Fig. 7에서 보느냐와 같이 암반 필라 응력 검토 위치를 Zone 1~Zone 6까지 구분하여 암반 필라 응력 검토 위치별 안전율 분포를 검토하였다. Zone 1이 가장 높은

안전율 분포를 보이고 있으며 Zone 4가 가장 낮은 안전율 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 최소 필라폭 구간(Zone 4)에서 발생하는 주응력의 평균값을 파괴접근도 방법에 적용하여 안전율을 평가하였으며 이를 토대로 암반 필라의 거동특성을 평가하였다.

3.3.2 매개변수 변화에 따른 거동 특성

터널내 분기부 확폭터널 근접 병설터널의 암반 필라 이격거리, 토피고, 암반조건이 변화하게 되면 암반 필라의 거동특성도 달라진다. 본 검토에서는 파괴접근도 방법에 의해 계산된 안전율을 분석하여 암반 필라의 거동특성을 분석하였다.

본 검토에서는 암반 필라의 이격거리 변화에 따른 종방향 및 횡방향 아칭효과를 검토하기 위해 터널내 분기부 확폭터널 굴착 후 근접 병설터널 굴착 시점부에서부터 이격거리가 종방향으로 일정한 각도를 가지면서 점진적으로 증가하도록 해석모델을 구성하였으며 안전율 평가는 각 해석 case에서 최종 시공단계의 수렴된 최

대·최소주응력을 적용하였다. 또한 굴착이 진행되는 단계에서 응력이 전이되는 동안 암반 필라에 과도한 응력이 집중되어 굴착이후에도 응력이 수렴하지 못하고 발산한다면 암반 필라가 터널을 지지하지 못하고 붕락한 결과라고 간주하였으며, 수렴된 최대·최소주응력으로 계산한 안전을 값이 최소안전율 1.0을 기준으로 1.0 이하의 결과를 나타낼 경우 진행성 파괴의 위험이 높은 것으로 평가하였다.

Fig. 8은 암반등급별 필라의 이격거리와 토피고 변화에 따른 안전율 변화를 반대수지로 표시한 것이다. 안전율 추세선은 필라의 이격거리에 비례하여 증가하는 로그 형태의 분포 경향이며 이격거리가 더욱 증가하면 점진적으로 수렴하게 된다. 그리고 토피고가 증가하거나 암반등급이 불량할수록 안전율이 작아져 동일한 안전율을 확보할 수 있는 암반 필라의 최소 이격거리는 증가하였다.

토피고 2D에서 최소 안전율 1.0 이상을 확보하기 위한 암반 필라의 최소 이격거리는 0.151D(암반등급 2), 0.186D(암반등급 3), 0.226D(암반등급 4)로 나타났다. 토피고 3D에서는 0.165D(암반등급 2), 0.216D(암반등급 3), 0.276D(암반등급 4)로 나타났으며, 토피고 5D에서는 0.198D(암반등급 2), 0.267D(암반등급 3), 0.354D(암반등급 4)로 각각 나타났다.

4. 종방향 아칭 영향 평가

4.1 개요

터널 분기부 근접 병설터널 암반 필라의 지반거동을 합리적으로 예측하기 위하여 매개변수를 암반 필라 이격거리, 토피고, 암반등급으로 단순화하였으며, 터널 분기부 근접 병설터널 암반 필라의 거동을 예측할 수 있는 암반등급별 안전율 도표를 제안하였다. 또한 제안된 설계도표와 일반적인 포털부 근접 병설터널의 설계도표와의 관계를 고찰함으로써 종방향 아칭 영향을 평가하였다.

4.2 터널 분기부 안전율 도표

터널 분기부에서 암반 필라 이격거리, 토피고, 암반등급의 매개변수 변화에 따른 암반 필라의 안전율은 일정한 경향을 보여주었다. 안전율 도표에는 최소안전율 1.0을 기준으로 매개변수 변화에 따른 최소 이격거리를 제시하였으며, Fig. 8과 같이 수치해석을 통해 계산된 안전율을 바탕으로 비선형 회귀분석을 실시하여 최소안전율 1.0과 1.5의 안전율을 갖는 터널 분기부 암반 필라의 최소 이격거리를 산정하였다(Table 3).

또한 매개변수 변화에 따른 터널 분기부 암반 필라의

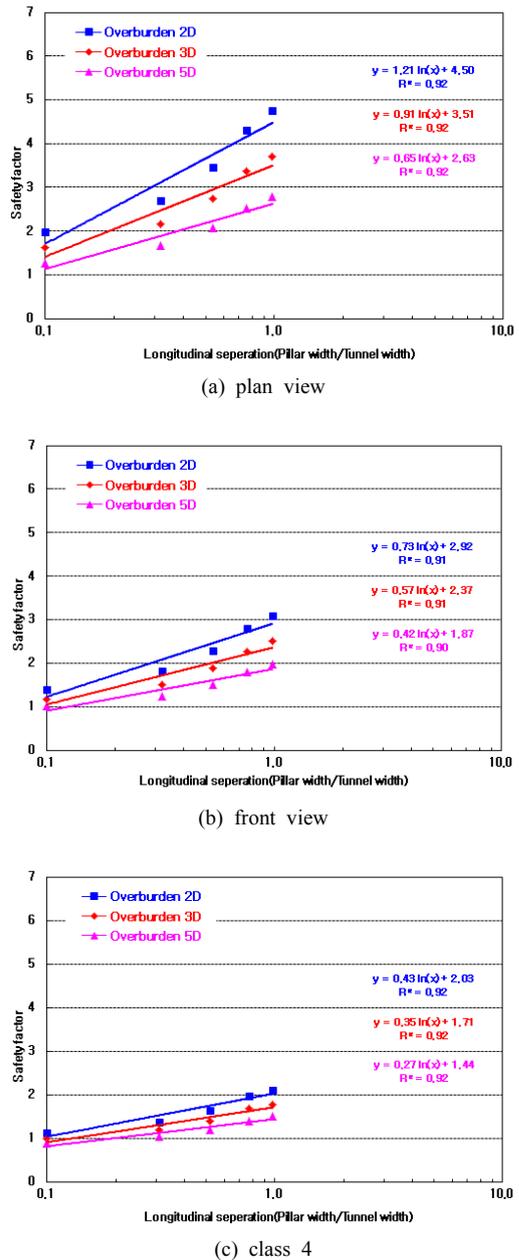


Fig. 8. Trend of SF change at rock pillar of tunnel branch

최소 이격거리를 바탕으로 Fig. 9와 같이 하나의 안전율 도표로 정리하였다. x축은 암반등급, y축은 이격거리(필라폭/터널직경)이며, 토피고는 안전율 선도로 표기하였다. 제안된 터널 분기부 암반 필라의 안전율 도표는 안전율 1.0과 1.5의 범위를 기준으로 1.0 이하의 구간은 암반 필라가 불안정한 거동을 보이며 진행성 파괴

Table 3. Minimum separation for rock pillar of tunnel branch

Overburden	Safety factor	Rock class		
		class 2	class 3	class 4
2D	1.0	0.151	0.186	0.226
	1.5	0.193	0.277	0.422
3D	1.0	0.165	0.216	0.276
	1.5	0.229	0.357	0.588
5D	1.0	0.198	0.267	0.354
	1.5	0.309	0.520	0.926

※ separation: pillar width (PW)/tunnel width (D), D: tunnel width (= 9.0 m)

Table 4. Minimum separation for rock pillar at portal of tunnel

Overburden	Safety factor	Rock class		
		class 2	class 3	class 4
2D	1.0	0.041	0.049	0.063
	1.5	0.075	0.106	0.166
3D	1.0	0.049	0.062	0.084
	1.5	0.113	0.174	0.292
5D	1.0	0.067	0.088	0.122
	1.5	0.238	0.399	0.715

※ separation: pillar width (PW)/tunnel width (D), D: tunnel width (= 9.0 m)

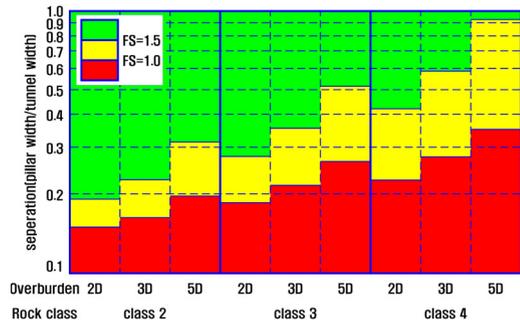


Fig. 9. Safety diagram for rock pillar at tunnel branch

의 위험이 높은 구간이며, 1.0~1.5 사이는 최소안전율 이상의 거동을 보이지만 보강이 필요한 구간이며, 1.5 이상은 영구지보로서 안정한 구간으로 판단할 수 있는 구간이다. 안전율 도표를 통해 매개변수 조건에 따른 터널 분기부 암반 필라의 안정성 확보 여부와 최소 이격거리를 확인할 수 있다.

4.3 포털부 근접 병설터널 암반 필라의 거동 평가

터널 분기부 암반 필라의 종방향 거동 특성을 평가하기 위하여 일반적인 포털부 근접 병설터널 암반 필라의 거동 특성을 검토하였다. 일반적인 포털부 근접 병설터널 암반 필라의 거동 특성을 평가하기 위하여 터널 분기부 암반 필라의 거동 해석과 동일한 조건으로 수치해

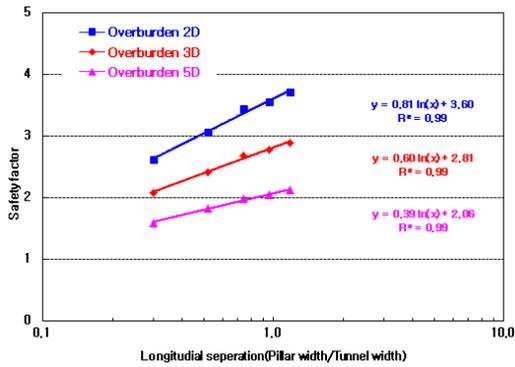
석을 수행하였다.

Fig. 10은 일반적인 포털부 근접 병설터널에서 암반 등급별 필라의 이격거리와 토피고 변화에 따른 안전율 변화 곡선이다. 안전율 변화곡선은 필라의 이격거리가 증가할수록 점진적으로 수렴해가는 로그 형태의 분포 경향이 나타났다. 그리고 토피고가 증가하거나 암반등급이 불량할수록 안전율이 작아져 동일한 안전율을 확보할 수 있는 암반 필라의 최소 이격거리는 증가하였다.

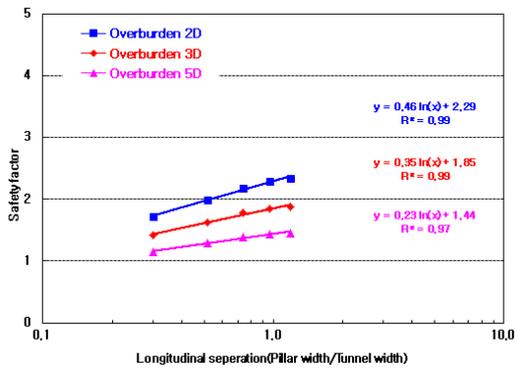
토피고 2D에서 최소 안전율 1.0 이상을 확보하기 위한 암반 필라의 최소 이격거리는 0.041D(암반등급 2), 0.049D(암반등급 3), 0.063D(암반등급 4)로 나타났다. 토피고 3D에서는 0.049D(암반등급 2), 0.062D(암반등급 3), 0.084D(암반등급 4)로 나타났으며, 토피고 5D에서는 0.067D(암반등급 2), 0.088D(암반등급 3), 0.122D(암반등급 4)로 각각 나타났다.

4.4 종방향 아칭영향 평가

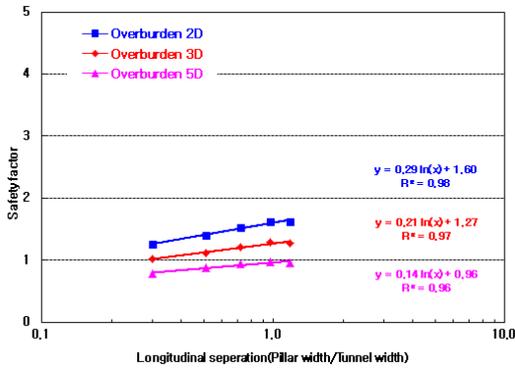
본 검토에서 제한한 터널 분기부 근접 병설터널에서 암반등급별 토피고 변화에 따른 암반 필라의 최소 이격거리를 일반적인 포털부 근접 병설터널에서 동일한 조건으로 해석을 수행하여 산정한 매개변수 변화에 따른 최소 이격거리와 비교 검토하였다. Table 3과 Table 4를 검토한 결과, 일반적인 포털부 근접 병설터널을 기준으로 터널 분기부 암반 필라의 최소 이격거리는 암반 등급별로는 증가비율이 거의 일정하게 나타났으나, 토



(a) class 2



(b) class 3



(c) class 4

Fig. 10. Trend of SF change at rock pillar of near parallel tunnel portal

피고별로 차이를 보였다. 즉, 토피고 2D에서 약 370% (안전율 1.0), 약 260%(안전율 1.5), 토피고 3D에서 약 340%(안전율 1.0), 약 200%(안전율 1.5), 토피고 5D에서 약 300%(안전율 1.0), 약 130%(안전율 1.5)가 각각 증가한 것으로 나타났다.

일반적인 포털부 근접 병설터널과 비교하여 터널 분기부 암반 필라의 최소 이격거리는 매개변수 변화에 따라 거의 일정하게 증가함을 알 수 있다. 이는 확폭터널의 종방향 아칭 영향에 의한 것으로 판단할 수 있다. 즉, 일반적인 포털부 근접 병설터널과 비교하여 터널 분기부에 종방향 아칭 영향에 의해 암반 필라의 이격거리를 토피고에 따라 약 3배~3.7배(안전율 1.0), 약 1.3배~2.6배(안전율 1.5) 각각 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다.

본 검토에서 제시한 안전율 도표는 굴착방법, 터널 단면형상 등의 요소가 고려되지 않은 제한적인 조건에서의 결과로서 역학적 특성에 따른 결과에 국한되며, 굴착 방법 등의 사항에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 일반적인 포털부 근접 병설터널에 대한 시공 및 연구사례에 국한된 연구 대상을 확폭터널을 가지는 터널 분기부 근접 병설터널의 암반 필라로 확장하여, 암반 필라의 거동 특성에 영향을 미치는 기하학적 역학적 변수를 선정하여 3차원 수치해석방법으로 거동특성을 평가하였다. 이를 바탕으로 터널 분기부 근접 병설터널 암반 필라의 최소 이격거리와 안전율을 도표로써 제안하였다. 제안된 도표와 일반적인 포털부 근접 병설터널의 설계도표와의 관계를 고찰함으로써 종방향 아칭 영향을 분석하였다. 그 결과 터널 분기부 암반 필라의 최소 이격거리는 매개변수 변화에 따라 거의 일정하게 증가함을 알 수 있었다. 이는 종방향 아칭 영향에 의한 것으로 판단할 수 있고 이에 따라 암반 필라의 이격거리를 토피고에 따라 크게 증가시킬 수 있었다.

본 연구에서 제안한 안전율 도표는 기존의 시공 및 연구사례에서 고려하지 못한 터널 분기부 확폭터널에서의 근접 병설터널을 대상으로 암반 필라의 거동 특성을 평가하여 종방향 및 횡방향 아칭 영향을 분석할 수 있다. 이는 터널 분기부 확폭터널 근접 병설터널 적용시 예비설계단계에서 암반 필라의 안정성 검토 및 보강공법의 적용여부, 근접 병설터널간의 최소 이격거리 결정 등에 폭넓은 적용이 가능하다. 또한 암반 필라의 형상 및 보강공법을 고려한 정량적 설계기법이 정립되지 않은 현실을 고려할 때 실무에 효과적으로 적용할 수 있는 하나의 대안으로 판단된다.

Reference

1. 김양운, 정상훈, 강세구, 안경철, 2007, 병설터널 필라부의 텐션볼트 보강에 따른 동특성 및 보강효과에 관한 연구, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2947-2950.
2. 장수호, 김창용, 2009, TBM에 의한 도심지 지하도로의 건설 사례, 한국지반공학회지, 25.11, 8-19.
3. 한국터널공학회, 2002, 서초역-방배로간 도로개설공사 중 터널안정성 검토 연구(서리풀터널 안정성 검토연구), 145p.
4. 한국터널공학회, 2004, 부산-거제간 연결도로 중축도 통과 구간 근접 터널보강공법 설계 검토 연구, 107p.
5. Hoek, E. I. and E. T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, IMM, London.
6. Kim, D.S., Kim, Y.G., 2007, A study on the stability analysis for asymmetry parallel tunnel with rock pillar, Tunnelling Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 387-401.
7. Kim, W.B., Yand, H.S., Ha, T.W., 2012, An Assessment of Rock Pillar Behavior in Very Near Parallel Tunnel, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 22, No. 1, pp. 60-68.
8. Matsuda, T., E. Toyosato, M. Igarashi, Y. Nashimoto and T. Sugiyama, 1997, A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method, Procd. Studies on Tunnel Eng. Vol. 7.
9. Peck, R. B., 1969, Deep excavations and tunnelling in soft ground, Procd. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., Mexico, State-of-the-Art Report 3, 225-290.
10. Popit, A. and Rant, J., 2008a, Construction of the Sentvid tunnel, RMZ- Materials and Geoenvironment, 55.2, 259-276.
11. Popit, A. and Rant, J., 2008b, Construction of the Sentvid tunnel with the caverns in Ljubljana, Slovenia, World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety - India, 1401-1415.

강재기



2001년 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사
2003년 전남대학교 대학원 지구시스템 공학과 석사
2011년 전남대학교 대학원 지구시스템 공학과 박사

Tel: 031-440-9781
E-mail: k71001423@nate.com
현재 (주)홍익기술단 토질부 차장

양형식



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr
현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수

장선중



1997년 세명대학교 공과대학 자원공학과 학사
2003년 전남대학교 대학원 지구시스템 공학과 석사

Tel: 02-3433-3192
E-mail: leosunsm@hanmail.net
현재 (주)삼보기술단 지반사업부 부장