

Mohr-Coulomb 파괴접근도 방법을 이용한 비대칭 분기부 암반필러의 안정성 평가

An Assessment of Rock Pillar Stability in Tunnel Asymmetric Diverging Area using the Mohr-Coulomb Failure Theory

이철규¹, 이강일^{2*}, 강제기³
Choul-Kyu Lee¹, Kang-Il Lee^{2*}, Jae-Gi Kang³

¹Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Republic of Korea

³Member, Ph.D, Deputy General Manager, Hong-ik Engineering & Consultants Co. Ltd, 15F, Anyang Construction Tower, 187 Simin-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 14049, Republic of Korea

ABSTRACT

This study assessed the behavior of rock pillar in tunnel asymmetric diverging area by using a three dimensional numerical analysis. The stability of pillar is very important for the ensure the stability of the tunnel asymmetric diverging area. Based on parameters affecting the behavior of rock pillar, this study evaluated different safety factors according to pillar width, depth and rock conditions. It turned out that as the rock 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 tunnel asymmetric diverging area was suggested.

요 지

본 연구에서는 터널을 대상으로 비대칭 분기부 암반 필러의 거동을 3차원 수치해석 방법으로 검토하였다. 터널 비대칭 분기부의 경우 필러부의 안정성을 확보하는 것이 본 터널의 안정성을 좌우하는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 암반 필러의 거동에 영향을 미치는 매개변수로 암반 필러의 이격거리, 토피고, 암반등급 변화에 따른 안전율을 평가하였다. 터널 비대칭 분기부 암반 필러의 이격거리가 증가할수록 토피고와 암반등급에 따른 안전율 변화 곡선은 비선형 거동을 보였으며, 터널 비대칭 분기부에서 암반 필러의 거동 특성을 최소 안전율을 기준으로 안전율 도표로서 제안하였다.

Keywords : Tunnel asymmetric diverging area, Rock pillar, Numerical analysis, Safety factor chart

1. 서 론

최근 들어 터널계획시 용지매입 제한과 민원문제의 대두 및 자연환경훼손의 최소화를 요구하는 사회적 경향을 고려하여 병설터널간 이격거리가 상당히 근접된 형태로 터널이 계획되는 사례가 증가하고 있다. 특히 도심지 지역에서의 터널건설이 활발

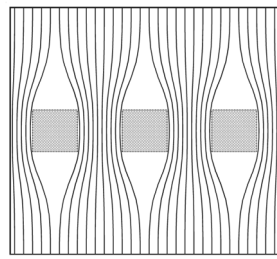
해짐에 따라 보다 복잡하고 다양한 요인들이 반영된 건설계획 및 시공이 이루어지도록 요구되고 있는 실정이다. 포화상태에 다다르고 있는 대도시의 천층 및 중층 지하공간 이외에 도심도의 지하공간을 활용함으로써 사업비의 상당 부분을 차지하는 용지보상비를 최소화하겠다는 개념이다. 대표적으로 기존 노선과의 선형화, 주변 구조물과의 간섭에 따른 보호 및 용지매입의 제한 등과 같은 제한적인 요인과 터널 주변의 민원 및 자연환경 훼손의 최소화 등과 같은 환경적인 요인을 들 수 있으며, 이에 대한 해결책으로 터널과 터널사이의 이격거리가 상당히 근접된 병설

Received 5 Oct. 2016, Revised 12 Nov. 2016, Accepted 25 Nov. 2016

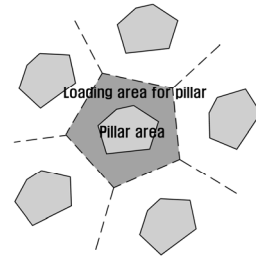
*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. -I. Lee)

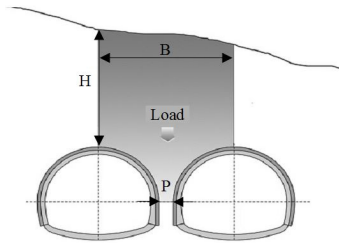


(a) Flow lines with 3 piers



(b) Average vertical stress with irregular pillar

Fig. 1. Concept of tributary theory (Hoek and Brown, 1980)



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

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

D : Tunnel width(m), H : Overburden(m)

B : Width of redistributed stress(m)

P : Pillar width(m), P_r : Redistributed stress

Fig. 2. Stresses at pillar of near parallel tunnels (Matsuda et al., 1997)

터널의 설계사례가 증가하고 있다. 그러나 현재까지의 국내 연구사례들은 병설터널의 거동이나 설계 영향인자 등에 대한 평가로서 실제 시공상황을 제한적으로 고려할 수밖에 없는 축소 모형실험(Jang et al., 2006)이나 2차원 수치해석(Im et al., 1994) 또는 일부 영향인자들만 고려한 3차원 수치해석 연구(Kim et al., 2007b)에 국한되어 실무에 적용 가능하고 정량적인 평가가 가능한 총체적인 기초 연구는 미흡한 상태이다.

그러나 Kang et al.(2015)은 최근 일반적으로 터널의 본선 구간에서 지상으로의 분기부는 바깥쪽, 안쪽, 상호의 3가지 형식(Table 1)으로 나타나는데 바깥쪽 또는 안쪽으로의 분기는 비대칭 형식의 분기(편측 분기)이므로 해석 경우에 대하여 정량화하기가 쉽지 않아 대칭적인 분기 형식을 나타낼 수 있는 상호의 분기방법(양측 분기, D-3a, D-3b)을 이용하여 안정성을 평가한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 비대칭적인 경우 편측으로 분기(D1, D2) 할 경우에 대하여도 암반필러부의 안정성 평가가 중요하다고 판단하여 이격거리가 매우 근접한 병설터널의 도로, 터널 본선부를 대상으로 암반 필러의 안정성 평가에 대한 연구를 수행하였다.

2. 암반 필러의 안정성 평가 방법

암반 필러의 안정성을 평가하기 위한 방법으로는 Peck (1969) 방법과 경험식에 의한 개략검토인 지류론(Tributary theory) 방법, Matsuda et al.(1997) 방법, Mohr-Coulomb 파

괴기준에 의한 파괴접근도 방법, Mohr-Coulomb의 강도/응력비에 의한 안전율 방법 등이 있다.

Peck(1969)은 평행하게 배치된 근접터널에 있어서 터널간격 및 크기에 따른 터널의 변형을 지침으로 제시하였다. 지류론(Tributary theory)은 Fig. 1과 같이 병렬터널 사이의 필러에서 응력전달은 교각사이의 물의 흐름과 매우 유사한 관계가 있다. 이것은 서로 인접한 공동 사이의 필러에 대한 응력선 분기 및 연직응력의 집중도 등을 취급하는 이론이다. 평균 필러응력은 각각의 필러가 지지하고 있는 암반의 중량을 각 필러의 단면적으로 나눈 값이다(Hoek and Brown, 1980). Matsuda et al. (1997)은 토피고(H)가 1D 이하인 얇은 근접 터널의 경우 Fig. 2와 같이 암반 필러부의 응력상태를 일축압축강도와 필러부에 작용하는 응력의 비로 안정성을 검토할 수 있다고 하였다.

Mohr-Coulomb 파괴기준은 일반적으로 암반의 파괴 이론으로 적용되고 있으며 전단응력과 전단강도 비교에 의하여 지반의 전단파괴 가능성을 판단할 수 있다. 즉, Mohr 응력원이 파괴포락선에 접하면 지반이 항복하여 전단파괴가 발생하는 것으로 간주한다. 따라서, Mohr-Coulomb의 파괴 접근도 방법은 암반의 응력원이 파괴포락선에 어느 정도 접근하였는가에 따라 파괴 및 파괴 가능성을 판단할 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 파괴접근도(R)로 표현할 수 있다.

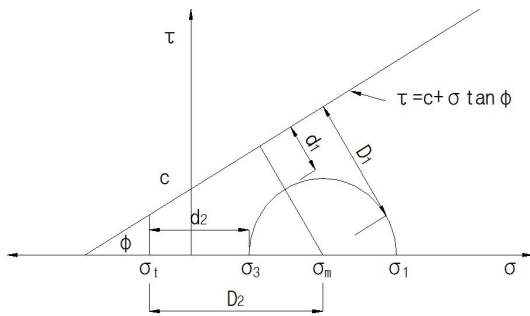
$$R = \min\left[\frac{d_1}{D_1}, \frac{d_2}{D_2}\right] \quad (1)$$

여기서, D_1 과 D_2 는 유효응력과 압축과 인장영역 파괴포락선까지의 거리를 나타내는 응력접근도이고 d_1 과 d_2 는 그 때 응력원에서 포락선까지의 거리를 나타내는 파괴여유도이다(Fig. 3).

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

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

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



D_1 : Stress distance to failure envelope, d_1 : Failure margin

Fig. 3. Concept of failure proximity by Mohr-Coulomb failure criteria

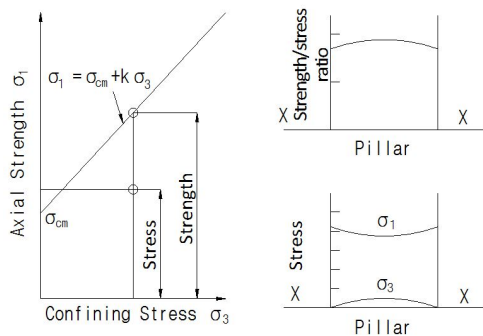


Fig. 4. Strength/stress ratio at pillar

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

Mohr-Coulomb의 강도/응력비에 의한 안전율 방법은 구속압력(σ_3)에 따라 소성파괴가 시작되고, Mohr-Coulomb 파괴 기준을 따른다고 가정하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

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

Fig. 4는 암반 필러의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 진행성 파괴나 응력 전이과정을 고려하여 필러 중앙 단면에서의 평균 강도/응력비가 1.0 이하가 되면 필러 전체가 불안해지는 것으로 판단한다(Hoek and Brown, 1980).

3. 수치해석 방법 및 조건

3.1 해석방법

일반적으로 터널의 본선 구간에서 지상으로의 분기부는 바깥쪽, 안쪽, 상호의 3가지 형식으로 나타난다(Table 1). 본 논문에서는 비대칭 형식의 분기(편측 분기, $D1, D2$)를 이용하여 안정성을 평가하였다.

근접병렬 터널 분기부의 분기각도는 국내·외 설계사례를 검토한 결과 대부분 $10^\circ \sim 20^\circ$ 내외이다. 따라서 본 연구에서는 터널 분기부의 설계속도(40km/h, 50km/h, 60km/h)에 따른 정지시거(40m, 55m, 70m)의 영향을 고려하여 터널 분기부의 분기각도는 15° 를 적용하였으며, 터널 분기부에서 2차로터널과 1차로터널로의 분기로 적용하였다.

2차로 병렬터널에서 2차로터널과 1차로터널로의 분기시 필러의 이격거리에 따른 영향을 알아보기 위해서 터널 간 이격거리가 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.5D 일 때에 대하여 해석을 수행하였

Table 1. Combination of basic traffic lines (Major traffic line : ↑, Minor traffic line : ↗)

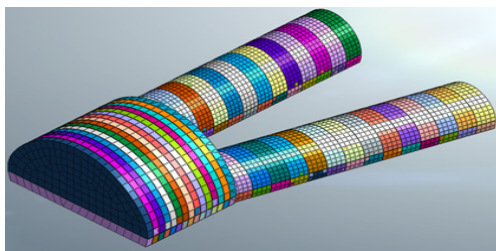
	Right ramp	Left ramp	Combination of connection end	
Diverging	D-1 	D-2 	D-3a 	D-3b
Merging	M-1 	M-2 	M-3a 	M-3b

Table 2. Input data for physical characteristics of rock mass

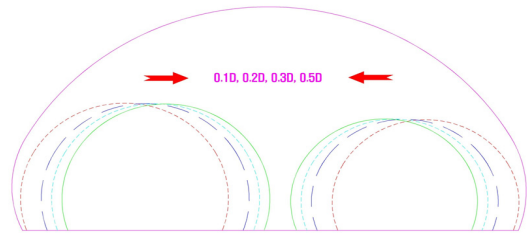
Class	Input	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)	RMR
Class I		27.0	4,000	45	25,000	0.21	81 이상
Class II		26.0	2,000	42	15,000	0.22	80 ~ 61
Class III		25.0	1,000	38	7,000	0.25	60 ~ 41
Class IV		24.0	500	34	2,000	0.29	40 ~ 21
Class V		21.0	150	31	500	0.30	20 이하

Table 3. 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



(a) Plan view



(b) Front view

Fig. 5. Sections of tunnel branch and pillars at different distances

다. 또한 도심지 도심도 터널의 경우 40m 이하의 심도를 기준으로 도로선형이 계획되는 것에 착안하여 토피코가 1.0D, 3.0D, 5.0D 일 때에 대하여 해석을 수행하였다.

도로터널 비대칭 분기부 암반 필러의 거동특성 평가에 있어 지반물성이 터널주변의 거동에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 본 검토에서는 합리적인 터널해석을 위해서 기존의 국내 도로터널 20개 이상의 과업에 적용된 강도특성과 도심도 도심지 터널에 적용된 강도특성을 비교하여 수치해석의 입력 자료로 적용하였다(Table 2).

3.2 해석조건

터널해석에서는 해석코자 하는 터널구조물을 중심으로 제한된 해석영역을 설정한다. 일반적으로 설정되는 해석영역은 터널구조물 굴착에 따라 재분배 되는 응력에 영향을 미치지 않는 범위로 설정하여야 한다. 따라서 굴착코자 하는 터널구조물의 폭이나 높이의 3~5배 이상의 거리까지 해석영역을 설정해 주어야 한다. 본 검토에서는 수치해석 모델 범위를 상부는 지표면(토피코 1D, 3D, 5D), 좌우경계는 4D, 하부영역은 3D로 설정하였다. 수치해석에 적용한 경계 조건은 다음 Table 3과 같다.

기존의 연구사례를 분석한 결과 Kim and Kim(2007a)은 암

반 필러의 거동이 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 지보재의 설치를 생략하였으며, Kim et al.(2007b)은 병렬터널 필러부의 텐션볼트 보강에 대하여 연구를 수행하였다. 초근접 터널의 포털(Portal, 병렬터널 갱구)에 대해서도 유사한 연구가 이루어진 바 있으나(Kim et al., 2012), 분기부 보다는 구조가 단순하고 따라서 변수도 적다. 본 검토에서는 터널 비대칭 분기부 확폭터널에 대한 종방향 아칭효과가 비대칭 분기부 근접 병렬터널의 암반 필러 거동에 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 지보재로 슛크리트 보강효과만을 고려하였다.

본 연구에서는 암반 필러의 3차원적 거동을 평가하기 위하여 MIDAS-GTS 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 각 Step별 세부 시공 순서는 터널 비대칭 분기부 확폭터널 시공 단계 ⇒ 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.

터널 비대칭 분기부에서 본선 확폭 2차로터널에서 근접 병렬 2차로터널과 1차로터널로 분기할 때, 암반 필러의 이격거리에 따른 터널 비대칭 분기부 확폭터널 단면은 Fig. 5와 같다.

3.3 암반 필러의 안정성 평가

3.3.1 안정성 평가 방법

근접 병렬터널에서는 두 터널사이의 이격거리가 매우 가깝기 때문에 터널의 안정성 확보를 위해서는 암반 필러에 대한 평가가 매우 중요하다. 현재까지 정립된 이론 및 문헌들의 연구결과에서는 필러 전체의 평균응력을 이용하여 필러의 안전율을 평가하였다.

암반 필러의 안정성 평가기준은 필러폭이 작은 근접 병렬터널의 경우 필러부 전체가 하나의 구조체로 거동하게 되고 곡면 형태의 필러 형상으로 인해 가장 낮은 안전율 분포를 보인 최소 필러폭 구간이 불안정해지면 필러 전체가 불안정해질 수 있기 때문에 조금 더 보수적인 평가가 필요하다.

본 검토에서는 필러 전체의 평균응력을 이용하여 필러의 안전율을 산정하였으며, 암반 필러의 횡단면도상의 각 축점에서 발생하는 최대·최소 주응력을 측정후 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 파괴접근도 방법으로 안전율을 검토하였다(Fig. 3).

Fig. 6에서 보는바와 같이 암반 필러 응력 검토 위치를 Zone 1~Zone 6까지 구분하여 암반 필러 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. 또한 안전율은 최대주응력이 크게 발생하는 상대적으로 응력이 집중되는 최 외곽 축점에서 낮게 나타났으며 필러의 중심에서 축벽으로 진행할수록 낮은 경향을 보였다. 이는 Hoek and

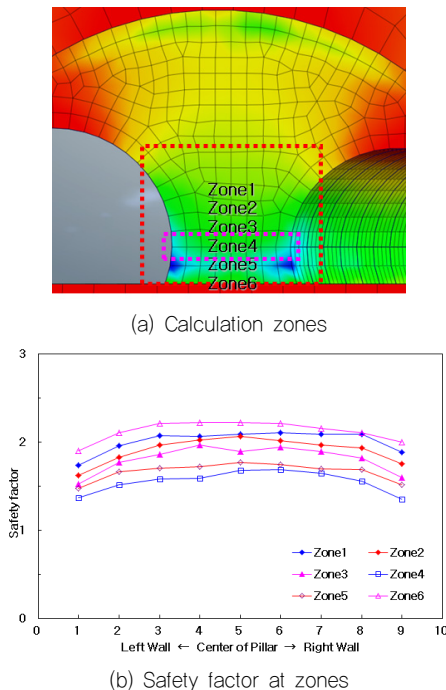


Fig. 6. Calculation zones of rock pillar of the tunnel branch and FS at the zones

Brown(1980)의 연구 결과와도 일치한다. 따라서 최소 필러폭 구간(Zone 4)에서 발생하는 주응력의 평균값을 파괴접근도 방법에 적용하여 안전율을 평가하였으며 이를 토대로 암반 필러의 거동특성을 평가하였다.

3.3.2 매개변수 변화에 따른 거동 특성

터널 비대칭 분기부 근접 병렬터널의 암반 필러 이격거리, 토 피고 및 암반조건이 변화하게 되면 암반 필러의 거동특성도 달라진다. 본 검토에서는 파괴접근도 방법에 의해 계산된 안전율을 분석하여 암반 필러의 거동특성을 분석하였다.

암반 필러의 이격거리 변화에 따른 거동을 평가하기 위하여 터널 비대칭 분기부 확폭터널 굴착 후 근접 병렬터널 굴착 시점 부에서부터 이격거리가 종방향으로 일정한 각도를 가지면서 점진적으로 증가하도록 해석모형을 구성하였으며 안전율 평가는 각 해석 case에서 최종 시공단계의 수렴된 최대·최소주응력을 적용하였다. 또한 굴착이 진행되는 단계에서 응력이 전이되는 동안 암반 필러에 과도한 응력이 집중되어 굴착이후에도 응력이 수렴하지 못하고 발산한다면 암반 필러가 터널을 지지하지 못하고 붕락한 결과라고 간주하였으며, 수렴된 최대·최소주응력으로 계산한 안전율 값이 최소안전율 1.0을 기준으로 1.0이하의 결과를 나타낼 경우 진행성 파괴의 위험이 높은 것으로 평가하였다.

Fig. 7은 암반등급별 암반 필러의 이격거리와 토피고 변화에 따른 안전율 변화 곡선이다. 안전율 변화곡선은 암반 필러의 이

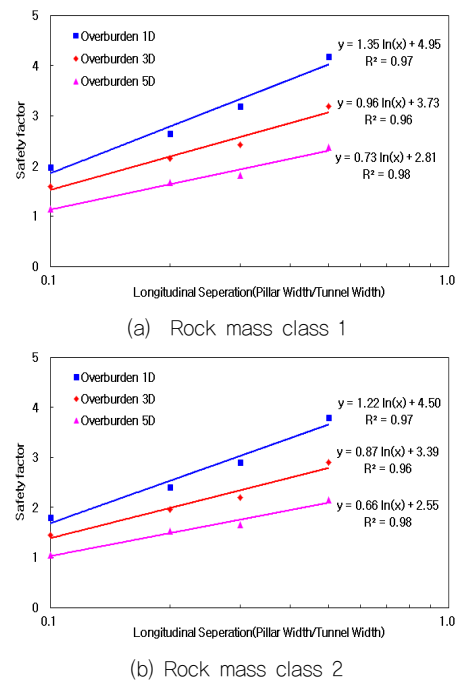
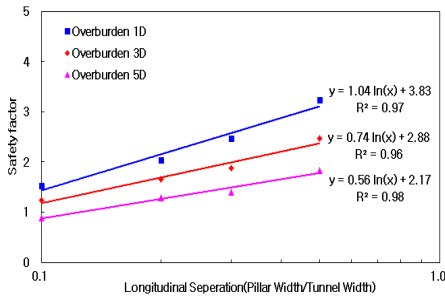
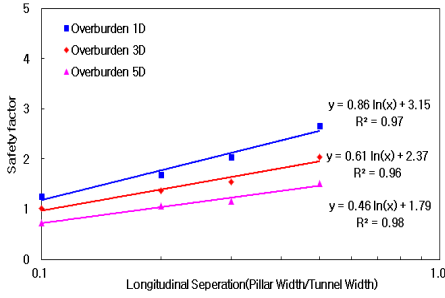


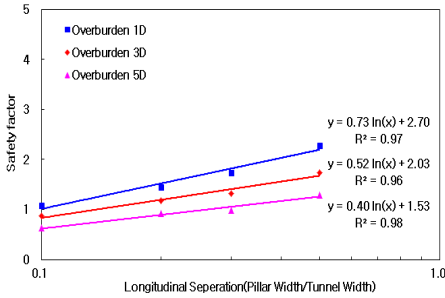
Fig. 7. Trend of FS change at rock pillar of tunnel branch



(c) Rock mass class 3



(d) Rock mass class 4



(e) Rock mass class 5

Fig. 7. Trend of FS change at rock pillar of tunnel branch (Continue)

격거리가 증가할수록 점진적으로 수렴해가는 비선형 로그 형태의 분포 경향이 나타났으며, 토피고가 증가하거나 암반등급이 불량할수록 안전율이 작아져 동일한 안전율을 확보할 수 있는 암반 필리의 최소 이격거리는 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 4에서 보는 바와 같이, 토피고 1D에서 최소 안전율 1.0

이상을 확보하기 위한 암반 필리의 최소 이격거리는 0.054D(암반등급 1), 0.057D(암반등급 2), 0.066D(암반등급 3), 0.082D(암반등급 4), 0.097D(암반등급 5)로 나타났다. 토피고 3D에서 최소 안전율 1.0 이상을 확보하기 위한 암반 필리의 최소 이격거리는 0.058D(암반등급 1), 0.064D(암반등급 2), 0.079D(암반등급 3), 0.106D(암반등급 4), 0.138D(암반등급 5)로 나타났다. 토피고 5D에서 최소 안전율 1.0 이상을 확보하기 위한 암반 필리의 최소 이격거리는 0.084D(암반등급 1), 0.096D(암반등급 2), 0.124D(암반등급 3), 0.180D(암반등급 4), 0.266D(암반등급 5)로 나타났다.

3.3.3 터널 비대칭 분기부 안전율 도표

터널 비대칭 분기부 근접 병렬터널 암반 필리의 지반거동을 합리적으로 예측하기 위하여 매개변수를 암반 필리 이격거리, 토피고, 암반등급으로 단순화하였으며, 터널 비대칭 분기부 근접 병렬터널 암반 필리의 거동을 예측할 수 있는 암반등급별 안전율 도표를 제안하였다.

터널 비대칭 분기부에서 암반 필리 이격거리, 토피고, 암반등급의 매개변수 변화에 따른 암반 필리의 안전율은 일정한 경향을 보여주었다. 안전율 도표에는 최소안전율 1.0을 기준으로 매개변수 변화에 따른 최소 이격거리를 제시하였으며, Fig. 7과 같이 수치해석을 통해 계산된 안전율을 바탕으로 비선형 회귀분석을 실시하여 최소안전율 1.0과 1.5의 안전율을 갖는 터널 비대칭 분기부 암반 필리의 최소 이격거리를 산정하였다(Table 4).

또한 매개변수 변화에 따른 터널 분기부 암반 필리의 최소 이격거리를 바탕으로 Fig. 8과 같이 하나의 안전율 도표로 정리하였다. x축은 암반등급, y축은 이격거리(필러폭/터널직경)이며, 토피고는 안전율 선도로 표기하였다. 제안된 터널 비대칭 분기부 암반 필리의 안전율 도표는 안전율 1.0과 1.5의 범위를 기준으로 1.0 이하의 구간은 암반 필리가 불안정한 거동을 보이며 진행성 파괴의 위험이 높은 구간이며, 1.0~1.5 사이는 최소안전율 이상의 거동을 보이지만 보강이 필요한 구간이며, 1.5 이상은 영

Table 4. Minimum separation for rock pillar of tunnel branch

Overburden	Safety factor	Rock mass class				
		class 1	class 2	class 3	class 4	class 5
1D	1,0	0,054	0,057	0,066	0,082	0,097
	1,5	0,078	0,086	0,106	0,147	0,193
3D	1,0	0,058	0,064	0,079	0,106	0,138
	1,5	0,098	0,114	0,155	0,240	0,361
5D	1,0	0,084	0,096	0,124	0,180	0,266
	1,5	0,166	0,204	0,302	0,532	0,928

separation: pillar width (PW) / tunnel width(D), D: tunnel width (=11,5m)

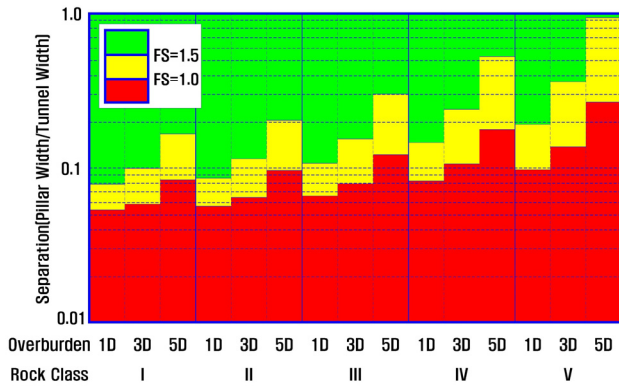


Fig. 8. Safety diagram for rock pillar at tunnel branch

구지보로서 안정한 구간으로 판단할 수 있는 구간이다. 안전율 도표를 통해 매개변수 조건에 따른 터널 비대칭 분기부 암반 필러의 안정성 확보 여부와 최소 이격거리를 확인할 수 있다.

본 검토에서 제시한 안전율 도표는 굴착방법, 터널 단면형상 등의 요소가 고려되지 않은 제한적인 조건에서의 결과로서 역학적 특성에 따른 결과에 국한되며, 굴착방법 및 암반 불연속면의 상태 등의 사항에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다. 또한, 토피고 1.0D 이내의 저토피구간에서는 아칭효과 발휘 유무에 따라 안전율이 급변할 것으로 판단되므로 별도의 연구가 필요하다.

4. 결론

터널 비대칭 분기부 근접 병설터널 암반 필러의 거동특성에 대한 해석적 검토를 수행한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 암반 필러의 이격거리, 토피고, 암반조건 등 매개변수 변화에 따른 암반 필러의 안전율 변화곡선은 암반 필러의 이격거리가 증가할수록 점진적으로 수렴해가는 비선형 로그 형태의 분포 경향이 나타났다. 그리고 토피고가 증가하거나 암반등급이 불량할수록 안전율이 작아져 동일한 안전율을 확보할 수 있는 암반 필러의 최소 이격거리는 증가하였다.
- (2) 터널 비대칭 분기부 근접 병렬터널 암반 필러의 최소 이

격거리와 안전율을 도표로서 제안하였다.

- (3) 본 연구에서 제시된 안전율 도표는 터널 비대칭 분기부 근접 병렬터널 적용시 예비설계단계에서 암반 필러의 안정성 검토 및 보강공법의 적용여부, 근접 병렬터널간의 최소 이격거리 결정 등에 폭넓은 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. Jang, B. S., Hwang, J. S., Lee, S. O., Yoon, B. S. and Kim, H. T. (2006), "The Behavior Characteristics of Tunnel Pillar by Small-Scale Model Tests", KSCE 2006 CONFERENCE, pp.4282-4285.
2. Kim, D. S. and Kim, Y. G. (2007a), "A study on the stability analysis for asymmetry parallel tunnel with rock pillar", Tunnelling Technology, Vol.9, No.4, pp.387-401.
3. Hoek, E. I. and E. T. Brown. (1980), "Underground Excavations in Rock", IMM, London.
4. Kang, J. G., Lee, C. K. and Lee, K. I. (2015), "Numerical Analysis of Rock Pillar in Tunnel Diverging Area", Journal of the Korean Geosynthetic Society, Vol.14, No.2, pp.81-88.
5. 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", Procd. Studies on Tunnel Eng. Vol.7.
6. 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, pp.225-290.
7. Im, S. B., Lee, S. M., Lee, J. W. and Paik, Y. S. (1994), "Considerable Parameters and Progressive Failure of Rock Masses due to the Tunnel Excavation", KGS FALL '94 National Conference, pp.231-234.
8. Kim, W. B., Yang, H. S. and 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.
9. Kim, Y. W., Jung, S. H., Kang, S. G. and Ahn, K. C. (2007b), "A Numerical Study on the Behavior Characteristics and Reinforcement Effects of Pillar in Twin Tunnels due to Tension Bolts Installation", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, pp.2947-2950.