

기존 병설터널의 확폭에 따른 터널 거동 및 필라 안정성 분석

이명한¹ · 김범주^{2*} · 장연수³ · 윤지남⁴ · 박헌곤⁵

¹비회원, ㈜단우기술단 지반공학부, 기사

²정회원, 동국대학교 건설환경공학과, 부교수

³정회원, 동국대학교 건설환경공학과, 교수

⁴비회원, 포스코건설 토목환경사업본부 설계그룹, 차장

⁵비회원, 한국도로공사 도로교통연구원, 연구개발실, 연구원

Behavior and pillar stability of enlarged existing parallel tunnels

Myeong-Han Lee¹, Bumjoo Kim^{2*}, Yeon-Soo Jang³, Ji-Nam Yun⁴, Hyun-Gon Park⁵

¹Danwoo E&C, Geotechnical Department, Engineer

²Dongguk University, Department of Civil and Environmental Engineering, Associate Professor

³Dongguk University, Department of Civil and Environmental Engineering, Professor

⁴Posco E&C, Civil and Environmental Division, Design Group, Deputy General Manager

⁵Korea Expressway Corporation, Expressway & Transportation Research Institute, Researcher

ABSTRACT: Traffic congestion in existing tunnels has increased due to increased traffic volume and enlarged vehicles. Enlarging existing tunnels has advantages over constructing new tunnels by reducing land purchasing costs as well as minimizing natural environment destruction. In fact, many overseas projects for enlarging existing tunnels have been reported. Thus, it appears that the demand on enlarging existing tunnels continues to rise in Korea in near future. Nonetheless, the studies related to the enlarged tunnels have been relatively rare since there have been few tunnel enlargement projects in Korea. In the present study, the tunnel behavior and the stability of rock pillar when enlarging existing parallel tunnels were investigated by performing FE analysis and using existing theory and empirical relationships. Four different enlarging cases, depending on the enlargement types and directions, were examined in the study. According to the results, for the tunnels with the same pillar width after enlarged, the uni-laterally enlarged tunnel indicated 5 to 20% higher crown settlement compared to the bi-laterally enlarged tunnel, and for the tunnel with the narrowest pillar, the highest shotcrete stress was observed. Also, the strength/stress ratio for rock pillar was more than 1.0 for all four enlargement cases, and the Matsuda's method was found to give higher strength/stress ratio by about 50% compared to the Peck's method.

Keywords: Tunnel enlargement, Parallel tunnels, Pillar stability, Crown settlement, Strength/stress ratio

초 록: 최근 교통량의 증가와 차량의 대형화로 인해 기존 터널에서 상습적인 정체가 발생하는 경우가 증가하고 있다. 이러한 문제 해결의 일환으로 기존 터널을 확폭하는 경우는 신설 터널을 건설하는 경우와 비교하여 용지매입 비용의 절감과 자연환경의 훼손을 최소화 시킬 수 있다는 장점이 있다. 실제로 일본과 유럽 등 해외에서는 기존 터널을 확폭 시공하는 사례가 많이 보고되고 있다. 이러한 흐름에서 국내에서도 향후 기존터널의 확폭 시공에 대한 수요는 꾸준히 증가할 것으로 예상되나, 현재까지는 기존 터널의 확폭에 관한 실적과 경험이 많지 않아 이에 관한 기반 연구가 필요한 상황이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석과 기존의 이론, 경험식 등을 이용하여 기존 병설터널을 확폭하는 경우 확폭방식과 그에 따른 필라폭 변화가 터널의 거동과 필라 안정성에 미치는 영향을 평가하였다. 조사 결과, 필라폭은 동일하나 편측과 양측으로 확대하는 경우의 차이에 따라 편측 확대 터널의 천단침하량은 양측 확대 터널에 비해 약 5~20%의 큰 값을 보이는 한편, 최소 필라폭을 갖게되는 편측 확대 터널에서 슛크리트 응력이 최대를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 강도/응력비의 경우 조사된 네 종류의 확폭 패턴에 대하여 모두 1.0 이상을 나타내었고 Matsuda의 방법이 Peck의 방법에 비해 약 50% 정도 강도/응력비를 크게 산정하게 됨을 확인하였다.

주요어: 터널 확폭, 병설터널, 필라 안정성, 천단침하, 강도/응력비

*Corresponding author: Bumjoo Kim

E-mail: bkim1@dongguk.edu

Received September 15, 2013; Revised September 23, 2013;

Accepted September 29, 2013

Copyright ©2013, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

국내에서 터널건설이 본격적으로 시작된 지 40여 년이 지난 현재, 당시 시공된 터널 단면으로는 기하급수적으로 늘어난 교통량과 대형화된 차량들을 원활히 소통시키는데 어려움을 겪고 있다. 또한, 기존터널의 노후로 인한 균열, 누수, 박리 현상 등으로 터널 내 안전사고에 대한 위험성도 커지고 있다. 이에 대한 대책으로 신설터널을 건설하거나 기존도로를 확충하는 등의 많은 투자가 이루어지고 있지만, 도심지 내에서는 부지매입, 환경훼손, 터널 보수공사에 따른 우회노선 선정 상의 어려움을 겪고 있어 신설터널 건설에 많은 제약이 존재한다. 이러한 문제들로 인해 해외 특히, 일본에서는 이미 40여 차례 이상 기존 터널에 확폭 공사를 진행할 수밖에 없는 현상이 나타났으며, 이를 성공적으로 수행한 사례들이 보고되고 있다(서경원 등, 2008)(백기현 등, 2007). 기존 터널의 확폭에 대한 수요는 점차 노후터널의 비중이 높아지게 될 우리나라에서도 급격히 증가하게 될 것으로 예상되며, 그러한 방법으로서 터널을 확폭하는 방법에 대하여 국내에서도 관심이 증대되고 있다.

국내의 시공기술이 신설터널의 건설에 대해서 이미 세계적인 수준에 이르렀다 할지라도 기존 터널의 확폭 시공 분야에 있어서는 경험의 부재로 인해 많은 기술의 발전이 요구되는 상황이며, 확폭이 필요한 터널의 수요가 급속히 증가하게 될 것임을 고려해 볼 때, 국내 실정에 맞는 관련 연구가 매우 시급한 실정이라 할 수 있다. 이에 변요셉 등(2010)은 수치해석의 요소크기의 민감도 분석을 통해 암반 등급별 및 필라 폭에 대한 필라의 거동을 검토하였고, 최해준 등(2011)은 시공 중인 2차로 도로터널의 3차로 확장 설계 내용을 이용하여 터널 확장시 선형계획, 터널 확장방안 등을 제시하였다.

본 연구는 점차 증가될 것으로 예상되는 노후화된 기존 터널의 확폭에 대하여, 기존 병설터널의 단면을 모두 확대 시공하는 경우에 대하여 터널의 거동과

안정성의 중요한 지표가 되는 암반 필라의 안정성을 터널 확대 방법에 따라 분석하였다.

2. 필라 안정성 평가

터널설계기준(2007)에 의하면 ‘터널을 2개 이상 병렬로 설치할 경우에는 인접터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 충분히 이격시켜야 한다’ 라고 명시되어 있으며, 도로공사 설계실무자료집(2001)에는 ‘터널 이격거리 설정시 $PW=1.5D$ (PW : 필라폭, D : 터널폭)를 기준으로 터널갱구부의 지반물성치에 의한 수치해석 등의 검토를 시행하여, 갱구부 지형조건과 터널의 구조적 안정성 및 경제성(용지비, 이격거리축소에 따른 갱구부 보강공사비등) 검토 결과에 따라 적정 이격거리가 되도록 증, 감하여 적용한다’ 라고 명시하여 필라의 상태에 따라 병설터널간 적정 이격거리를 산정하도록 하였다(정용진 등, 2007). 동일한 심도의 병설터널에서 터널간 이격거리가 터널직경의 1배 이상일 경우, 그 영향은 10% 미만으로 알려져 있으나(정용진 등, 2007) 병설터널의 적정 이격거리를 산정하기 위해서는 현장여건을 고려한 세부적인 검토가 필요하다고 볼 수 있다. Table 1은 병설터널 이격거리에 관한 설계기준을 요약하여 나타낸 것이다.

필라의 안정성 평가를 위한 경험적 방법으로는 Peck (1969)의 방법, Matsuda (1998)이 있으며, 수치해석을 통한 정밀 검토 방법은 필라부에 작용하는 주응력을 이용하여 암반 파괴규준에 근거한 강도-응

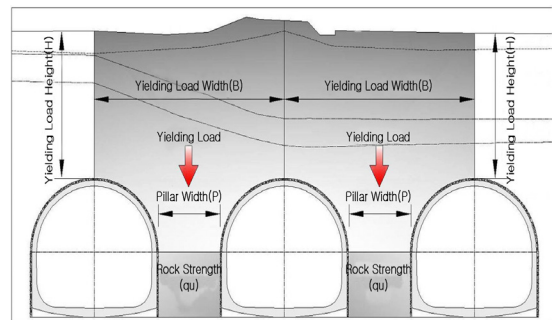


Fig. 1. Yielding load acting on the central pillar (Kang, 2008)

Table 1. Parallel Tunnels separation distance design criteria (Kim et al. 2003)

Division	Contents	Note
Tunnel design criteria ('07 Construction and transportation ministry, KTA)	• Parallel tunnels should be separated enough such that blasting, vibration and ground behavior by the tunnel construction do not adversely affect adjacent tunnel by considering tunnel size, ground characteristics, blasting/vibration effect, land compensation, hindrance and civil complaint	
Standard manual for tunneling ('09 Ministry of land, transport and maritime affairs, KTA)	• Original ground can be considered to behave perfectly elastic : 2D • Original ground is a soft ground(e.g. clay) : 5D	Center to Center
Road design guideline ('02 Korea expressway corporation)	• Original ground can be considered to behave perfectly elastic : 2D • Original ground is a soft ground(e.g. clay) : 5D • General : 2~3D	
Tunnel design manual ('95 Korea expressway corporation)	• Center to center distance - Two lane tunnel : 30m - Three lane tunnel : 40m	
Tunnel design manual ('01 Korea expressway corporation)	• Separation distance shall be either increased or decreased from PW=1.5D according to the results of the investigation of ground condition, tunnel structural stability and economical aspect by performing numerical analysis using geotechnical properties for tunnel portal area and other investigations	Pillar Width

Table 2. Safety factor calculation formula based on experience

	Applied stress (S_p)	Strength of pillar (σ_p)	Safety factor
Peck's method (1969)	$\gamma \cdot H \cdot (1 + D/P)$	$2 \cdot C \cdot \cos\phi / (1 - \sin\phi)$	$F_s = \sigma_p / S_p$
Matsuda's method (1998)	(if H>D) $\gamma \cdot D \cdot B/P$ (if H<D) $\gamma \cdot H \cdot B/P$	q_u	

γ : Density, H : Depth, D : Tunnel Width, B : Yielding Load Width
P : Pillar Width, C : Cohesion, q_u : Uniaxial Strength of Rock, F_s : Safety Factor, ϕ : Friction Angle

력비를 이용한 방법이 있다. Fig 1은 중앙 필라에 작용하는 이완하중 개념도를 표현한 것이며, 이를 바탕으로 Table 2에 각 경험식의 안전율 식에 대해 정리하였다.

2.1 Peck (1969) 방법

Peck 방법은 병설터널 굴착시 필라부에 발생하는 평균응력과 일축압축 강도의 비교를 통해 안정성을 평가하는 근사적인 기법으로 필라의 평균응력(S_p)과 필라의 일축압축강도(σ_p)를 추정하여 안전율을 산정하는 기법을 제안하였다.

두 터널에 있어서 필라의 평균응력(S_p)은 다음 식 (1)과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$S_p = \gamma \cdot H \cdot (1 + D/P) \quad (1)$$

여기서, γ : 단위중량(kN/m³)
H : 지표면으로부터의 터널 깊이(m)
D : 터널폭(m)
P : 필라폭(m)

또한, 필라의 압축강도(σ_p)는 다음 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$\sigma_p = 2 \cdot C \cdot \cos\phi (1 - \sin\phi) \quad (2)$$

여기서, C : 점착력(kN/m²)
 ϕ : 내부마찰각

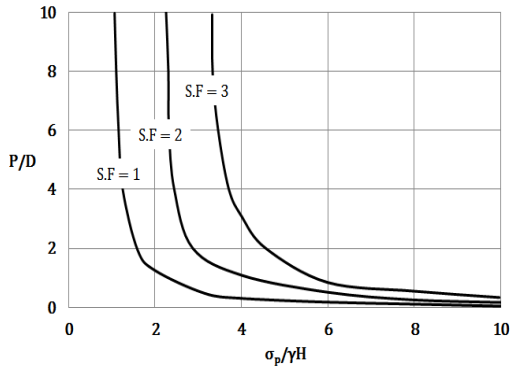


Fig. 2. The relation curve according to safety(F_s) P/D and $\sigma_p/\gamma \cdot H$

따라서 필라의 초기항복에 대한 안전율(F_s)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{\sigma_p}{S_p} \quad (3)$$

다음 Fig 2는 P/D (필라폭/터널폭)와 상재응력($\gamma \cdot H$)에 의하여 필라 강도(σ_p)를 정규화 시킨 값과의 관계를 안전율로 나타낸 것이다.

2.2 Matsuda (1998) 방법

Matsuda는 상재하중이 1D (D =터널의 폭)보다 작은 경우, Fig 1에 음영으로 표시된 영역의 전하중이 중앙 필라부 영역의 지반에 작용하는 것으로 제안하였다. 이러한 경우 계획된 중앙 필라부 구조체의 강도가 예상되어지는 응력보다 크면 충분한 안정성을 확보할 수 있다. 다소 보수적이지만, 현재 실무에서도 Matsuda 방법을 이용한 필라 안정성 검토가 수행되고 있다.

중앙벽체에 작용하는 작용응력($S_p = P_r/P$)과 암반 필라의 안전율은 아래식 (4)~(6)에 의해 구해진다.

- 토피(H)가 터널폭(D)보다 큰 경우 :

$$P_r = \gamma \cdot D \cdot B \quad (4)$$

- 토피(H)가 터널폭(D)보다 작은 경우 :

$$P_r = \gamma \cdot H \cdot B \quad (5)$$

- Matsuda의 안전율 : $F_s = \frac{q_u}{S_p}$ (6)

여기서, γ : 단위중량(kN/m^3)

H : 토피고(m)

D : 터널폭(m)

P : 필라폭(m)

q_u : 암반강도(kN/m^2)

2.3 강도-응력비(Strength-Stress Ratio)

다양한 구속압력(σ_3)에 대하여 소성파괴의 시작은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 규명된다고 가정하면 아래 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad (7)$$

여기서, 암반의 일축압축강도 σ_{cm} 은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (8)$$

또한, σ_3 에 대한 σ_1 의 기울기 k 는 식 (9)와 같다.

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (9)$$

여기서, σ_1 : 파괴시 축방향 응력(강도)

σ_3 : 구속응력

c : 암반의 점착강도

ϕ : 암반의 내부마찰각

식 (7)을 통해서 최종적으로 강도응력비는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\text{강도응력비} = \frac{\sigma_3 - \sigma_{1f}}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (10)$$

아래 Fig 3은 암반 필라의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 필라의 강도-응력비가 Pillar 전체의 안전율을 대변하지는 않지만, 진행성 파괴(progressive failure)나 응력 전이과정(stress transfer progress)을 고려하여 Pillar 중앙 단면에서의 평균 강도-응력비(average strength-stress ratio)가 1.0이하가 되면 필라 전체가 불안해 지는 것으로 알려져 있다(Hoek and Brown, 1980).

3. 확폭에 따른 암반 필라부 안정성 분석

본 절에서는 기존 병설터널의 두 단면을 모두 확폭하게 되는 경우 병설터널의 안정성의 중요한 지표가 되는 암반 필라의 안정성을 터널 확대 방법에 따라 검토하였으며, 검토방법으로는 기존의 경험식들을 통해 안전율을 산정하는 방법과 수치해석을 통해 얻어진 암반 필라의 주응력값을 이용하여 강도-응력비를 산정하는 방법을 적용하였다.

3.1 터널 모델링

기존 병설터널의 확폭시 확폭형식과 필라폭에 따른 기하학적 요소를 매개변수로 하여 범용 지반 유한요소 해석프로그램인 Midas-GTS를 사용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 따른 탄소성 해석을 수행하였다. 해석 대상 터널로는 현재 운영중에 있는 편도 2차로의 전주-광양 고속도로 ○○터널(폭 12.91 m, 높이 8.2 m)과 편도 4차로의 서울외곽순환도로 △△터널(폭 19.14 m, 높이 10.39 m)의 단면을 적용하였다 (Table 3 참조). 해석영역의 설정은 상부는 도로 중심에서 20 m이상(토피고 30.5 m), 측면은 터널 굴착폭의 3배 이상, 하부경계는 터널 주변으로부터 터널 높이의 3배 이상을 고려하여 지반경계가 해석결과에 영향을 미치지 않도록 고려하였다.

터널 확폭은 2차로 터널에서 4차로 터널로의 확폭을 가정하였으며, 주변 암반 등급은 3등급의 물성을 적용하였다. 기존 터널 및 확폭시 터널의 굴착은 전단면 굴착을 실시하였으며, 록볼트로 인한 필라부의 보강효과를 고려하지 않기 위해 지보재는 숏크리트만 시공하는 것으로 모델링 하였다.

기존 2차선 단면의 터널을 4차선 터널로의 확폭을 하는데 있어서, Case 1은 터널 중심선을 기준으로 양측확폭을 한 경우이며, Case 2는 확폭방향을 암반 필라부 쪽으로 향한 경우이다. 또한 Case 3은 Case 2와 반대로 확폭방향을 터널 외곽쪽으로 향하였으며,

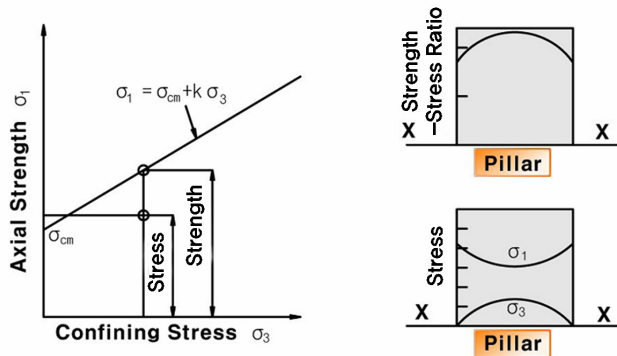


Fig. 3. Strength-Stress Ratio and distribution chart of stress (Kang, 2008)

Table 3. The cross section and size of tunnel

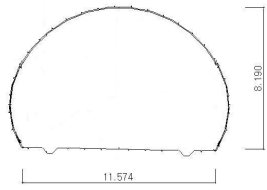
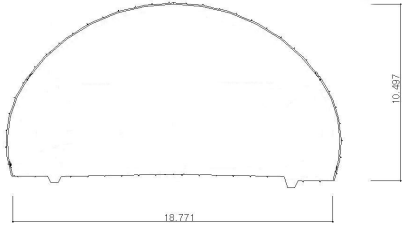
Cross section and size	
2-lane tunnel	
4-lane tunnel	

Table 4. Soil Properties

Rock mass rating	III
Unit weight, γ_t (kN/m ³)	25
Elastic Modulus (MPa)	4,400
Cohesion, C (kPa)	700
Friction angle, ϕ (°)	40
Poisson ratio (ν)	0.25
K_0	1.0

Table 5. Tunnel support properties

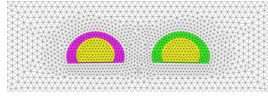
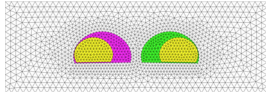
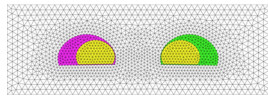
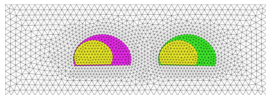
	Elastic Modulus (MPa)	Thick-ness (cm)	Unit weight (kN/m ³)	Design strength (MPa)
Soft Shotcrete	5,000	12	24	10
Hard Shotcrete	15,000	12	24	21

Table 6. Load distribution factor

Excavation	0.5
Soft Shotcrete	0.25
Hard Shotcrete	0.25

Case 4는 선·후행 터널 모두 각각 같은쪽으로 확폭을 한 경우이다(Table 7 참조).

Table 7. Analysis cases for tunnel enlargement

Case 1 (both sides enlargement)	Case 2 (one side enlargement)
	
9.58 m (0.5D)	3.68 m (0.19D)
Case 3 (one side enlargement)	Case 4 (one side enlargement)
	
15.47 m (0.81D)	9.56 m (0.5D)
Pillar width after enlargement	

4. 안정성 분석 결과

4.1 확폭후 터널거동 분석

Table 8에 확폭형식에 따른 터널 거동을 천단변위와 내공변위값, 숏크리트 응력으로 나타내었다. 각 케이스별 천단변위값을 확인 한 결과 터널 확폭 후 필라폭이 좁아질수록 천단변위값이 더욱 크게 발생하는 경향을 나타내었다. 확폭 후 필라폭이 가장 좁은 Case 2의 경우 기존 대비 필라폭의 영향이 상대적으로 적은 Case 3의 천단변위에 비해 18~32% 정도 더 크게 발생하였으며, 필라폭은 같으나 확폭형식에서 차이가 있는 Case 1과 Case 4의 경우에는 편측확폭(Case 4)을 한 경우가 좀 더 크게 발생함(5~20%)을 확인할 수 있었다.

내공변위는 천단변위와는 달리 필라폭이 가장 좁은 Case 2의 경우가 다른 Case들에 비하여 가장 적게 발생하였으며, 양측 확폭의 Case 1에서 가장 큰 내공변위가 발생함을 확인 할 수 있었다. 선행터널(좌측터널)의 경우 내공변위가 시공 5단계 이후부터는 반대로 감소하는 양상을 나타내어 후행터널(우측터널) 굴착으로 인한 지반 이완의 영향을 확인할 수 있었다. 필라폭이 같은 Case 1과 4에 대해서는 양측 확폭을

실시한 Case1 의 내공변위가 Case 4에 비해 28% 더 크게 발생하여 천단변위와 반대 경향을 나타내었다. 필라폭이 좁을수록 숏크리트 응력이 더욱 크게 발생하는 경향을 보였으며, 필라폭이 가장 좁은 Case 2의 경우 숏크리트 응력은 시공단계가 진행됨에 따라 계속 증가하였으나, 나머지 Case들의 경우는 선형터널의 지보재 설치가 완료된 단계(4단계) 이후부터 점차 수렴하는 양상을 나타내었다. 최대 응력이 발생한 경우인 Case 2의 경우 시공단계 중 최대값은 6.06 MPa

로 28일 기준 강도에 대해서는 허용치($f_{ca} = 0.4f_{ck} = 8.4$ MPa) 이내였으나, 응력값이 수렴하는 양상을 나타내지 않아 시공 이후에는 안정성이 확보되지 않을 것으로 판단된다.

4.2 경험식에 의한 암반 필라의 안정성 검토

경험식에 따른 암반 필라의 안정성을 검토하기 위해 Peck의 방법과 Matsuda의 방법을 이용하여 암반

Table 8. Tunnel behavior for different types of tunnel enlargement

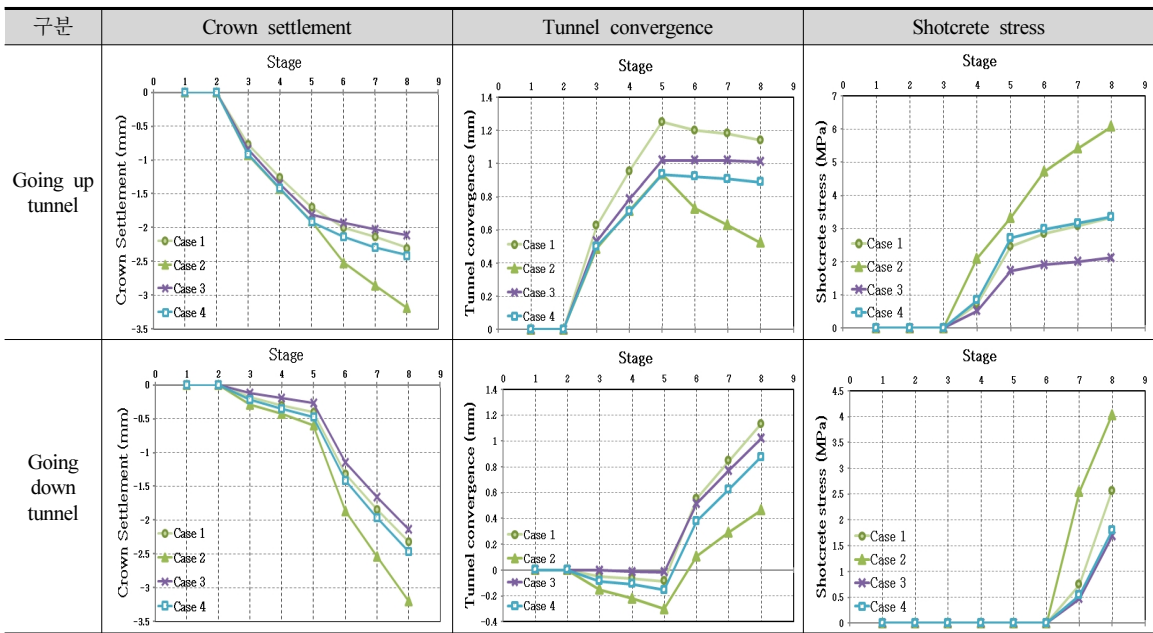


Table 9. Results of rock pillar stability using empirical formula

Division	Empirical formula	Applied stress S_p (kN/m ²)	Strength of pillar σ_p (kN/m ²)	Safety factor
Case1 (both sides expansion)	Peck	2248.4	3002.3	1.34
	Matsuda	1434.5		2.09
Case2 (one side expansion)	Peck	4650.8		0.65
	Matsuda	2967.2		1.01
Case3 (one side expansion)	Peck	1677.9		1.79
	Matsuda	1070.5		2.80
Case4 (one side expansion)	Peck	2251.6		1.33
	Matsuda	1456.0		2.06

필라의 안전율을 산정하였다. 산정식은 앞선 2.1, 2.2 절에 기술하였으며, 산정식을 바탕으로 확폭형식에 따라 분류한 4가지 경우에 대하여 경험식 안전율을 표 Table 9에 나타내었다.

안전율 산정결과 Matsuda의 방법이 Peck의 방법보다 안전율이 더 높게 계산되는 것으로 나타났으며, 필라폭의 간격이 넓은 수록 안전율이 증가하였다. 필라폭이 가장 좁은 Case 2(필라폭 0.19D)의 경우 Peck 방법에 의한 안전율이 0.65를 나타내어 불안정한 것으로 나타났으며, 나머지 Case들은 모두 1 이상의 안전율을 나타내었다(Table 10). 그러나 본 방법들에 의한 결과는 단순히 암반의 강도에 기초한 것이며, 안전율

이 과대평가 될 수 있음을 감안할 때 Case 2의 경우는 전체적으로 불안정하다 볼 수 있다.

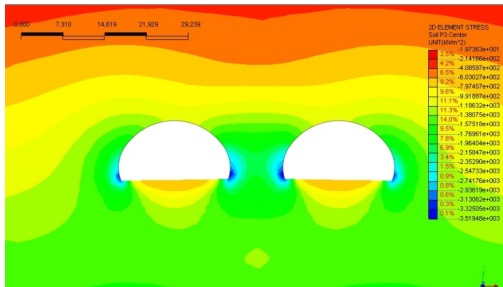
4.3 강도-응력비에 의한 암반 필라의 안정성 검토

앞서 기술한 2.3절의 강도-응력비 산정식과 수치해석 결과를 바탕으로 얻어진 선·후행 터널 간 암반 필라부 중심부의 주응력값을 이용하여 강도-응력비를 산정하였다(Table 10).

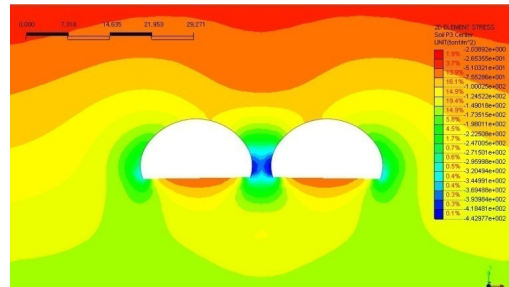
수치해석 결과 필라폭의 간격이 좁아질수록 최소주응력은 감소하고 최대주응력은 증가하는 경향을 보였

Table 10. Results of Strength-Stress Ratio

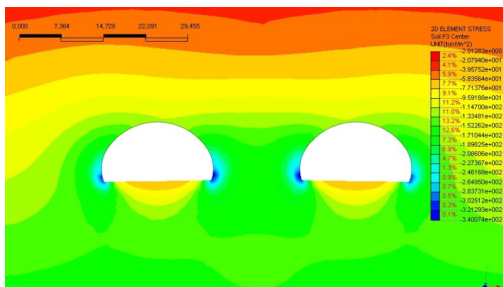
	Principal Stress (Min) σ_3 (kPa)	Principal Stress (Max) σ_1 (kPa)	Compression strength σ_{cm} (kPa)	Strength-Stress Ratio
Case 1	769.55	2020.92	3002.3	2.32
Case 2	437.58	3324.82	3002.3	1.02
Case 3	849.41	1547.63	3002.3	4.14
Case 4	763.77	2027.36	3002.3	2.30



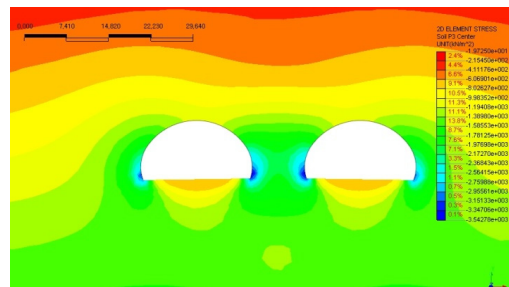
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 4. Principal stress distributions for different analysis cases

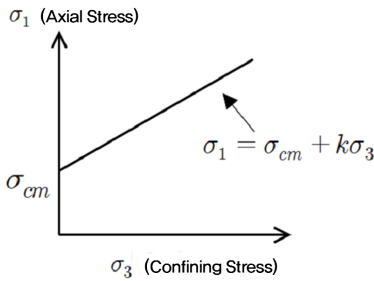


Fig 5. Mohr-Coulomb failure criterion for rock mass in terms of principal stresses

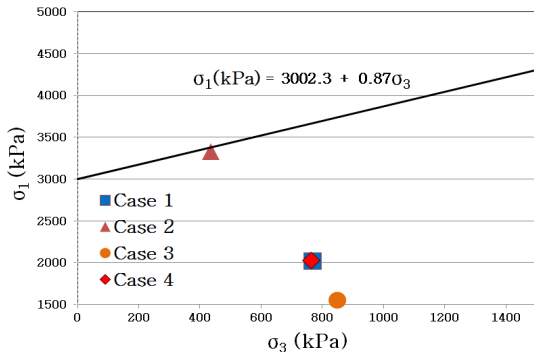


Fig 6. Principal stress for four cases

으며, 네 케이스에 대하여 모두 강도-응력비 1.0 이상의 값을 나타내었다. 필라폭이 가장 좁은 Case 2(필라폭 0.19D)의 경우 강도-응력비는 1.02로 가장 불안한 상태인 것으로 나타났으며, 확폭 후의 필라폭은 같지만 확폭형식이 다른 Case 1과 Case 4의 경우 강도-응력비의 차이는 미미한 수준으로써 필라부의 안정성에 있어서 확폭형식보다는 필라폭의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig 4는 각 Case별 최대 주응력값을 등고선(Contour)으로 나타낸 모습이며, Fig 6은 각 Case별 주응력 상태를 Mohr-Coulomb의 파괴기준선과 함께 나타낸 것으로서, Case 2의 경우 필라부 중심의 주응력 상태가 파괴기준선에 근접하여 불안정한 상태임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 터널 내 만성정체 현상 해소와 노후

터널의 안정성 문제를 해결하기 위해 향후 국내에서 수요가 증가할 것으로 전망되는 기존 병설터널의 확폭시 터널 거동과 필라 안정성을 조사하였으며, 이를 위해 기존의 2차로 병설터널을 4차로 터널로 확폭하는 경우에 대하여 확폭방식(양측 및 편측)과 확폭방향(편측, 좌·우)에 따른 네 가지 case들에 대하여 유한요소해석을 통한 거동 분석과 기존의 경험식 등을 이용한 안전율과 강도/응력비 산정 결과를 비교, 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 필라폭은 동일하나 편측과 양측으로 확대하는 경우의 차이에 따라 편측 확대 터널의 천단침하는 양측 확대 터널에 비해 약 5~20%의 큰 값을 보이는 한편, 선행과 후행 터널을 모두 양측으로 확폭하는 경우 가장 큰 내공변위가 발생하고 전반적으로 후행터널(우측터널) 확폭을 시작함에 따라 선행터널(좌측터널)의 내공변위가 반대로 감소하여 지반이 이완되는 영향을 확인할 수 있었다.
2. 필라폭이 가장 적게 되는 필라방향으로 편측 확폭시 숏크리트 응력은 시공단계가 진행됨에 따라 계속적으로 증가하는 반면, 그 외의 경우들(양측 확폭과 필라 반대측으로 편측 확폭)은 모두 선행터널의 지보재 설치가 완료된 이후부터 점차 수렴하는 양상을 나타내었다.
3. 필라 안정성에 대한 기존의 경험식을 이용한 안전율과 강도/응력비 산정 결과, 전체적으로 Matsuda 방법에 의한 안전율이 Peck의 방법보다 50%정도 더 큰 것으로 나타났으며, 두 방법 모두 단순히 암반의 강도에 기초하여 산정되는 것임을 감안할 때, 확폭 후 필라폭이 가장 적게 되는 필라 방향의 편측 확폭이 안정성 측면에서 가장 불리한 방식인 것으로 나타났다.
4. 확폭후 필라폭은 같지만 양측과 편측으로 확폭형식이 다른 두 경우 강도/응력비의 차이는 미미한 수준을 보여 확폭형식 보다는 필라폭이 필라의 안정성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Kang, C.M. (2008), "Evaluation of stability and reinforcement of large parallel tunnel pillar", Kyungpook National University, Graduate School, Master Thesis (in Korean).
2. Kim, D.H., Park, J.K., Kim, Y.G., Oh, S.J., Lee, D.H. (2003), "Evaluation method of stability of parallel tunnel", Korean Society for Rock Mechanics Spring 03 National Conference, pp. 51-66 (in Korean).
3. Road Design Guideline (2002) Korea Expressway Corporation (in Korean).
4. Baek, K.H., Roh, J.R. (2007), "Case study on the widening construction of tunnel under use", Korean Society of Civil Engineers Conference, Vol. 2007, No. 10, pp. 2935-2938 (in Korean).
5. Byun, Y.S., Kim, H.G., Lee, S.S., Chun, B. S. (2010), "A study on pillar behavior of twin parallel tunnels by numerical approach", Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 8, pp. 49-55 (in Korean).
6. Seo, G.W., Baek, G.H., Roh, J.R. (2008), "Overseas case study on the widening construction of tunnel under use (I)", KTA Tunnelling Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 40-50 (in Korean).
7. Seo, G.W., Baek, G.H., Kim, Y.G. (2008), "Overseas case study on the widening construction of tunnel under use (II)", KTA Tunnelling Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 71-79 (in Korean).
8. Jung, Y.J., Song, H.C., Lee, S.H., Shin, S.H. (2007), "Evaluation of stability and reinforcement of rock pillar of parallel tunnel", Korean Society for Rock Mechanics Special Symposium (in Korean).
9. Choi, H.J., Kim, D.K. (2011), "A study on the enlargement of 2-lane road tunnel under construction", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 1, pp. 33-50 (in Korean).
10. Tunnel Design Criteria (2007), Construction and transportation ministry, KTA (in Korean).
11. Theory and Practice of Tunnel (2004), Korean Tunnelling Association, Goomi Book (in Korean).
12. Standard manual for tunneling (2009), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (in Korean).
13. Tunnel design manual (1995), Korea Expressway Corporation (in Korean).
14. Tunnel design manual (2001), Korea Expressway Corporation (in Korean).
15. Hoek, E., Brown, E.T. (1980), "Empirical strength criterion for rock masses", J. Geotech Engineering Div. ASCE 106, pp. 1013-1035.
16. Matsuda, T. (1998), "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground" Tunnels and Metropolises, Vol. 16, No. 2, pp. 1193-1198.
17. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft grounding". 7th International Conferences, Soil Mechanics and Foundation Engineering., pp. 225-290.