복층터널 분기 기하구조에 따른 안정성 검토에 관한 연구

박우정[1] · 장남주[2*] · 김기환[3] · 최창림[4]

[1]비회원, 삼보기술단 지반사업부 주임
[2]비회원, 삼보기술단 지반사업부 차장
[3]정회원, 삼보기술단 지반사업부 부장
[4]정회원, 삼보기술단 지반사업부 상무

A study on the stability analysis for double deck tunnel branch geometry

Woo-Jeong Park[1] · Namju Jang[2*] · Kihwan Kim[3] · Chang-rim Choi[4]

[1]Engineer, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.
[2]Deputy General Manager, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.
[3]General Manager, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.
[4]Managing Director, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.

***Corresponding Author :** Namju Jang, 8112677@naver.com

Abstract

The tunnel can be planned to connect to underground roadway and surface road. The large tunnel and branch section are made when the ramp tunnel access to the main tunnel. In the branch section, stress concentration can be assigned and it can be very important for the stability of the tunnel. This study assessed the behavior of rock pillar in double deck tunnel diverging area by using a two dimensional numerical analysis. This study evaluated different safety factors according to pillar width and the ramp tunnel position in branch. By the assessment of the strength-stress ratio, tunnel pillar width is suggested in order to secure the safety factor 1.5.

Keywords: Double deck tunnel, Rock pillar, Strength-stress ratio, Diverging area, Stability

초 록

도심지 터널에서 지하도로는 지상도로와의 연결을 위한 램프터널을 계획하게 되고 본선터널과 램프터널이 접속되는 구간에서 대단면 터널과 분기구간이 생성된다. 본선터널과 램프터널이 접속하는 근접구간에서 응력집중으로 터널의 안정성에 심각한 문제를 초래할 수 있다. 따라서 필라부의 안정성을 확보하는 것은 터널의 안정성을 좌우하는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 복층터널을 대상으로 본선터널, 분기부 대단면 터널 단면을 계획하고, 분기부 암반 필라의 거동을 2차원 수치해석 방법으로 검토하였다. 양호한 지반조건인 암반 III등급에서 램프터널이 본선터널에 접속하는 방법

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(2)393-404(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.393

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received January 31, 2018
Revised February 23, 2018
Accepted February 27, 2018

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

을 달리하여 필라폭에 따른 지반 안정성을 평가하였으며, 안전율 1.5 이상을 확보할 수 있는 터널 필라폭을 제안하였다.

주요어: 복층터널, 암반 필라, 강도응력비, 분기부, 안정성

1. 서 론

최근 서울시는 도심지내 지상 교통량의 분산효과를 위해 지하도로 건설을 계획, 시공하고 있다. 지하도로 계획 시 과도한 용지매입 비용과 민원문제, 자연환경 훼손을 최소화하려는 노력으로 병설터널을 복층터널로 계획하는 연구가 진행되고 있다. 복층터널은 상, 하행 병설터널을 하나의 터널로 계획할 수 있어 공간 효율성을 극대화 할 수 있다. 복층터널의 경우, 국내 설계 및 시공 사례는 없으나 최근 활발한 연구가 진행되고 있다. Nam et al. (2017)은 복층터널에서 분기되는 터널 굴착 시, 지하 공동구에 미치는 영향을 수치해석을 통해 분석하였으며, You et al. (2017)은 쉴드 복층터널에서 분기되는 터널 형상 및 보강방법에 대해 연구하였다. Lee and Moon (2016)은 쉴드 복층터널에서 라이닝 세그먼트 해석방법에 대해 검토하고, 중간슬래브에서 작용하는 하중이 세그먼트 라이닝에 미치는 영향을 검토하여 합리적이고 경제적인 복층터널 구조물 설계의 방향을 제시하였다.

지하도로는 지상도로와의 연결을 위한 램프터널을 필요로 하며, 본선터널과 램프터널의 합류구간에서 대단면 터널이 계획되고 본선터널과 램프터널이 분기되는 구간이 발생한다. 분기구간의 경우 본선터널과 램프터널 사이의 근접구간에 대한 안정성 검토가 중요한데 두 터널 사이의 암반을 필라(pillar)라고 하며, 필라에 대한 안정성을 평가하는 방법에 대한 연구가 이루어져 왔다. 필라의 안정성을 평가하는 방법에는 Mohr-Coulomb의 파괴 접근도 방법, 강도응력비를 이용하는 방법(Hoek and Brown, 1980), 필라부 암반에 작용하는 하중으로 인한 응력과 일축압축강도비를 이용하는 방법(Peck, 1969; Matsuda et al., 1997) 등이 있다. 기존 국내 연구사례들을 살펴보면 필라 보강을 고려한 근접병설터널의 축소모형실험(Jang et al., 2006)을 수행하였으며, 병설터널이 갱구부에서 근접하는 경우에 대해 지반 강도별 필라폭 변화에 따른 수치해석을 통해 필라 안정성이 터널 전체 안정성에 미치는 영향을 평가하였다(Lim and Son, 2014). 상하행선 터널단면이 다른 비대칭 병설터널의 근접구간에 대한 필라부 안정성 평가와 보강의 적절성에 대한 연구(Kim et al., 2004)가 진행되어 근접 병설터널의 안정성 확보방법에 대한 연구가 진행되었다. 국내 지하도로의 경우에는 국내 최초로 시도되는 대심도 터널인 ○○터널의 분기구간 필라 안정성을 확보할 수 있는 굴착방법과 지보재의 안정성 평가에 대한 연구(Kim et al., 2011)가 수행되어 도심지 지하도로에 대한 연구가 시작되고 있다.

본 연구에서는 복층터널에서 본선터널과 램프터널이 합류하는 경우, 분기부에서의 터널 안정성 평가가 중요하다고 판단하였다. 이를 위해, 복층터널 본선터널 단면과 복층터널이 분기되는 구간의 대단면 터널을 계획하고, 복층터널이 분기되는 구간에서 필라폭 안정성에 대한 연구를 2차원 수치해석 검토를 통해 수행하였다.

2. 필라폭 안정에 대한 평가기준

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.

$$\mathrm{R} = \min\left[\frac{d_1}{D_1}, \frac{d_2}{D_2}\right] \tag{1}$$

여기서, D_1과 D_2는 유효응력과 압축과 인장영역 파괴포락선까지의 거리를 나타내는 응력접근도이고 d_1과 d_2는 그 때 응력원에서 포락선까지의 거리를 나타내는 파괴여유도이다(Fig. 1).

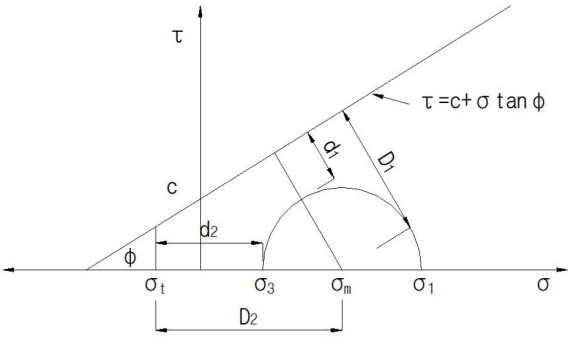


Fig. 1. Concept of failure proximity by Mohr-Coulomb failure criteria

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

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

여기서, r은 Mohr응력원의 반경, c는 암반의 점착력, ϕ는 내부마찰각이다.

Mohr-Coulomb의 강도/응력비에 의한 안전율 방법은 구속압력(σ_3)에 따라 소성파괴가 시작되고, Mohr-Coulomb 파괴기준을 따른다고 가정하면 식 (3)~(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \tag{3}$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c\cos\phi}{1-\sin\phi} \tag{4}$$

$$\mathrm{k} = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \tag{5}$$

여기서, σ_1은 파괴시의 축방향응력, σ_3은 구속응력, σ_{cm}은 일축압축강도, k는 주응력선의 기울기이다.

Fig. 2는 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).

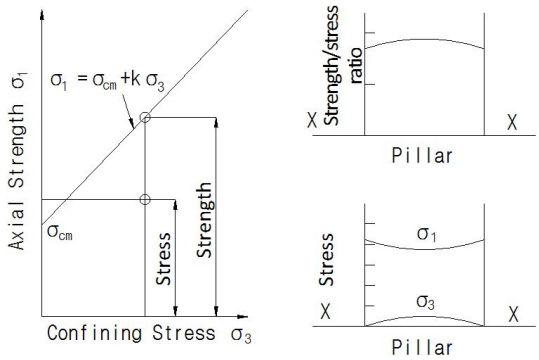


Fig. 2. Strength/stress ratio at pillar

Peck (1969)은 두 터널에 있어서 필라의 평균응력(S_p)은 다음 식 (6)과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$S_p = \gamma \cdot H \cdot \left(1 + \frac{D}{P}\right) \tag{6}$$

여기서, γ는 단위중량(kN/m^3), H는 지표면으로부터 터널까지의 깊이(m), D는 터널폭(m), P는 필라폭(m)이다. 또한 필라의 일축압축강도는 다음 식 (7)과 같이 할 수 있다.

$$\sigma_p = 2 \cdot C \cdot \cos\phi / (1 - \sin\phi) \tag{7}$$

여기서, c는 점착력(kN/m^2), ϕ는 내부마찰각이다. 따라서 필라의 초기항복(initial yield)에 대한 안전율(Fs)은 다음 식 (8)과 같다.

$$F_s = \frac{\sigma_p}{S_p} \tag{8}$$

Fig. 3은 P/D (필라폭/터널폭)와 $\gamma \cdot H$(상재응력)의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 Pillar 강도비로부터 터널 사이의 간격에 대한 근접터널의 안전성을 우선적으로 판단할 수 있다. Pillar 강도에 적절한 터널간격은 Pillar가 초기에 항복된다 하더라도 필연적으로 Pillar 응력(S_p)은 Pillar 강도(σ_p) 이내가 되도록 설계되어야 한다. 만약 터널 사이의 지반의 강도가 상기 언급한 기준에 만족시키지 못하고 안정성이 낮은 경우에 있어서 터널의 지지 시스템은 경험적인 설계기준에 의한 보강대책의 제시보다는 실질적인 현장상태를 충분히 관찰 분석하여 이에 따른 보강대책을 수립함이 원칙이라 할 수 있다. 일반적으로 Pillar의 강도를 증가시키는 방법으로, Pillar부분을 양쪽

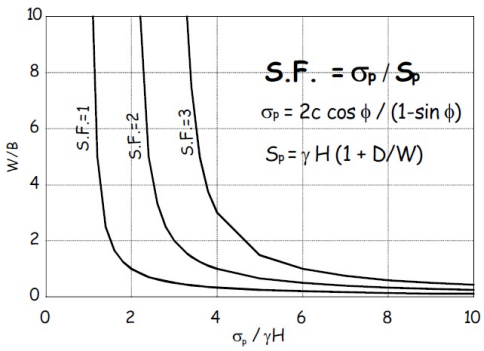


Fig. 3. Relationship curve between W/B and strength ratio according to S.F.

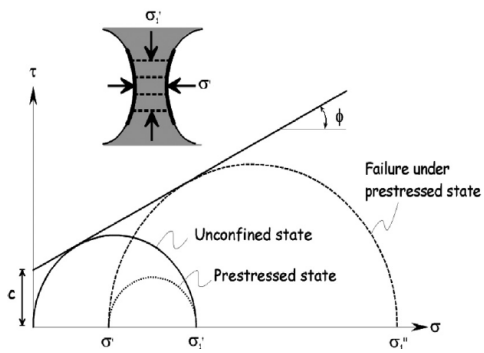


Fig. 4. Stress at tunnel pillar in pre-stressed state

에서 견고하게 고정시켜 프리스트레스를 가하여 강도를 증가시키는 방법이 일반적이라고 할 수 있다. 이는 앵커가 큰 역할을 하며, 이와 같이 보강되는 과정을 이론적으로 접근해보면 Fig. 4와 같다. 그림에서 보여주는 것과 같이 Pillar의 강도는 일축압축상태에서 삼축 압축상태로 전환됨에 따라 Pillar강도는 Pillar응력을 충분히 지지할 수 있도록 보강되는 것이다.

Matsuda et al. (1997)은 상재하중이 1D (D = 터널의 폭)보다 작은 경우, Fig. 5에 음영으로 표시된 영역의 하중이 중앙 필라부 영역의 지반에 작용하는 것으로 제안하였다. 이러한 경우 계획된 중앙 필라부 구조체의 강도가 예상되는 응력보다 크면 충분한 안정성을 확보할 수 있다. 중앙벽체에 작용하는 작용응력과 암반 필라의 안전율은 아래 식 (9)~(11)에 의해 구할 수 있다.

$$P_r = \gamma \cdot D \cdot B \text{ (토피(H)가 터널폭(D)보다 큰 경우)} \tag{9}$$

$$P_r = \gamma \cdot D \cdot B \text{ (토피(H)가 터널폭(D)보다 작은 경우)} \tag{10}$$

$$F_s = \frac{q_u}{P_r} \tag{11}$$

여기서, γ는 단위중량(kN/m^3), H는 토피고(m), D는 터널폭(m), P는 필라폭(m), q_u는 암반의 일축압축강도이다.

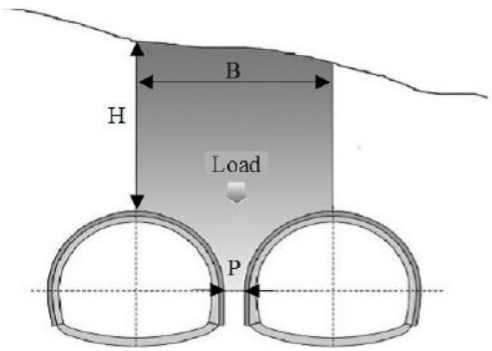


Fig. 5. Stresses at pillar of near parallel tunnel (Matsuda et al., 1997)

3. 복층터널 단면 계획

복층터널 단면을 계획하기 위해서는 단면 구성 요소들에 대해 결정해야 한다. 도심지 소형차의 운행량이 매우 많은 것을 고려하여 소형차에 대한 터널을 계획하고, 이에 따라 차로폭은 3.25 m로 한다. 소형차 고속도로로 가정하여 좌측 길어깨는 0.75 m, 우측 길어깨는 2.0 m로 적용한다. 시설한계와 라이닝 여유폭은 50 mm로 적용하고,

검사원 통로는 폭 750 mm를 확보하는 것으로 한다. 터널 시설한계와 풍도슬래브 사이의 최소 높이는 600 mm로 하여 LCS표지판을 설치할 수 있는 공간을 확보한다. 단면구성요소들을 고려하여 계획된 단면은 Fig. 6과 같다.

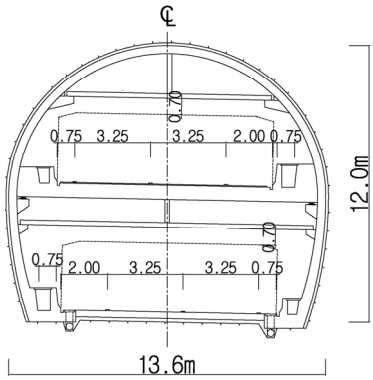
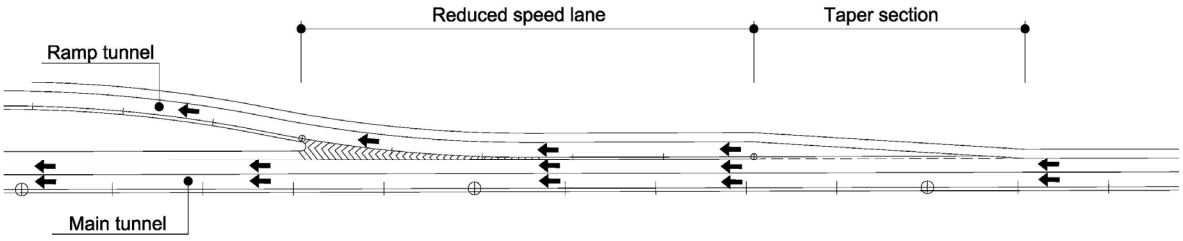


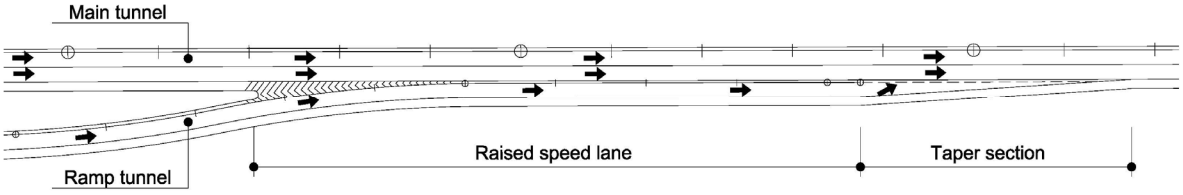
Fig. 6. Double deck tunnel (main tunnel)

4. 복층터널 분기부 안정성 검토

대심도에 복층터널을 도로용으로 건설하려면 본선터널에서 나뉘는 분기터널을 필수적으로 설계해야 한다. 그 이유는 기존의 고속도로에서 빠져나와 국도나 지방도로 이어지는 IC (나들목), 고속도로에서 다른 고속도로로 이어지는 JC (분기점)과 같은 원리이다. 대심도 복층터널 역시 도심지에 건설이 된다면 본선터널에서 도심지의 각 지역으로 갈라져 나오는 분기터널의 건설이 필수적이다(Nam et al., 2017). Fig. 7은 본선터널과 램프터널이 서로



(a) Reduced speed section



(b) Raised speed section

Fig. 7. Road alignment plan in branch section

합류 또는 분기하는 경우에 대한 도로 선형계획이다. 본선터널과 램프터널의 설계속도가 다르기 때문에 가감속 구간을 필요로 하게 된다.

복층터널이 깊은 심도에서 지상도로와의 연결을 위하여 램프터널을 계획하여야 하는 경우, 분기부 발생으로 인해 터널 안정성에 미치는 영향을 검토하려고 한다. 이를 위해 2차로 복층터널 단면과 1차로 단층터널, 1차로 복층터널 단면을 계획하였다(Table 1, 2).

Table 1. Very large double deck tunnel in branch

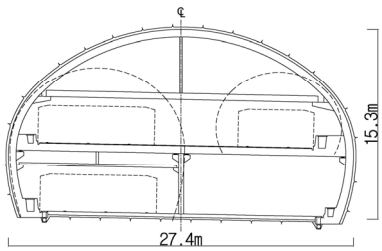
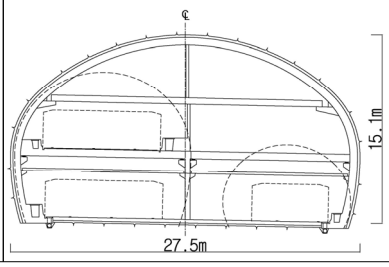
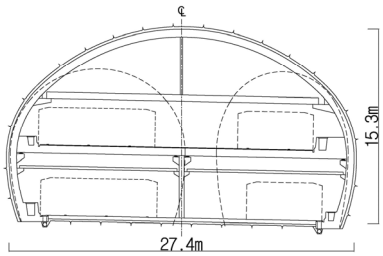
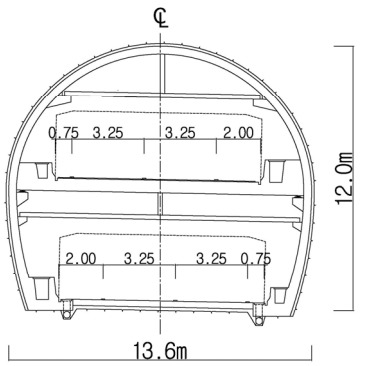
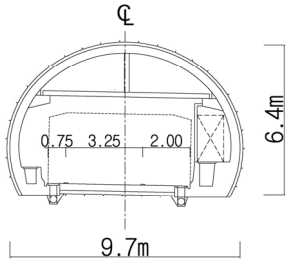
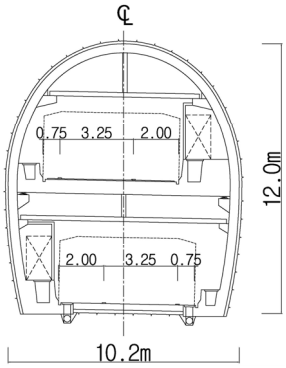
Branch in upper deck	Branch in lower deck	Branch with double deck ramp tunnel
		

Table 2. Main tunnel and ramp tunnel in branch

Main tunnel (double deck)	Ramp tunnel (single deck)	Ramp tunnel (double deck)
		

터널의 굴착과정 또는 순서가 터널 변형에 상당한 영향을 미치므로 복층터널 분기부에 대한 수치해석을 통하여 상호 거동특성 및 암반 필라의 안정성을 검토하였다. 이를 위하여 근접병설 터널간 이격거리, 굴착순서, 램프터널 형태에 따른 터널의 거동을 분석하여 근접병설터널의 상호 간섭효과 및 필라 거동에 대한 2차원 수치해석 검토를 수행하였다. 서울지역 대심도 암반을 기준으로 하기 위해 암반등급 Ⅲ을 대표 지반으로 고려하였으며 지반물성치와 지보패턴, 하중분담율은 서울지역 ○○터널 민자사업 기본설계에 적용했던 화강암 물성치와 지보패턴 설계를 적용하였으며 하중분담율은 55-10-35%를 적용하였다(Table 3, 4). 교통 과밀지역인 도심지 터널에서 기존 지장물의 영향을 피하기 위해 대심도 터널로 가정하여 토피고를 50 m로 고려하였으며, 측압계수(k)는 2.0

을 적용하였다. 터널 굴착으로 인한 영향을 받지 않도록 터널 좌우 및 하부로 터널직경의 4배 이상 확보할 수 있도록 수치해석 영역을 적용하였다.

Table 3. Properties of rock mass

Rock class	Unit weight (kN/m^3)	Friction angle	Cohesion (kN/m^2)	Elastic modulus (kN/m^2)	Poisson's ratio
III	25.0	38	1.5	9,000	0.23

Table 4. Rock support pattern

Contents	Main tunnel	Ramp tunnel (single deck)	Ramp tunnel (double deck)
Excavation method	Upper and lower split	Full section	Upper and lower split
RMR	60~41	60~41	60~41
Q-system	10~1	10~1	10~1
Upper excavation length	2.0 m	2.5 m	2.5 m
Shotcrete thickness	120 mm	80 mm	80 mm
Rockbolt length	4.0 m	3.0 m	3.0 m
Longitudinal interval of rockbolt	2.0 m	2.5 m	2.5 m
Transversal interval of rockbolt	1.5 m	2.0 m	2.0 m

일반적으로 터널 굴착과정 또는 순서가 터널변형에 상당한 영향을 미치며, 특히 상하행 병행터널의 경우 선행터널이 후행터널의 굴착으로 인하여 받는 영향이 크다고 할 수 있다(Kim et al., 2004). 본 연구에서는 본선터널과 램프터널의 굴착순서에 따른 영향을 파악하기 위해 Table 5와 같은 해석조건을 고려하여 검토하였다.

Table 5. Analysis case

Analysis method	Case
Excavation order	• Ramp tunnel excavation after Main tunnel excavation • Main tunnel excavation after Ramp tunnel excavation
Pillar width between main tunnel and ramp tunnel	0.5~4 m
Ramp tunnel size and branch position	• Single ramp tunnel forked in main tunnel upper deck • Single ramp tunnel forked in main tunnel lower deck • Double deck ramp tunnel forked

분기부 대단면 터널굴착후 본선터널을 선굴착 하는 경우와 램프터널을 선굴착 하는 경우에 대해 검토하고, 램프터널이 본선터널의 상부 데크에 접속하는 경우와 하부데크에 접속하는 경우, 복층 램프터널이 접속하는 경우

에 대해서 검토하였으며 램프터널이 본선터널에 분기하는 형태는 Table 6과 같다. 터널간 이격거리는 필라부 안정성을 평가하기 위한 방법으로 Mohr-Coulomb 강도/응력비에 의한 안전율 방법을 사용하였다.

Table 6. Branch type according to the ramp tunnel size and branch position

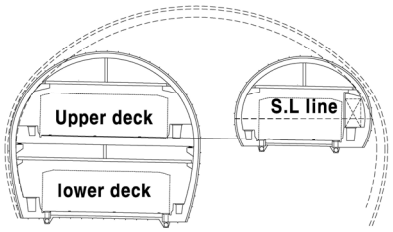
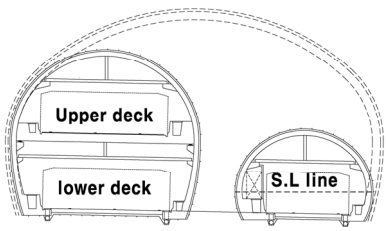
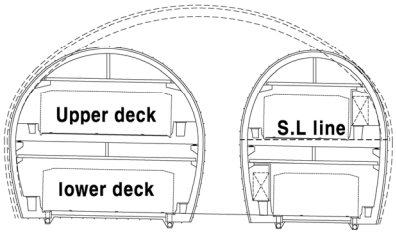
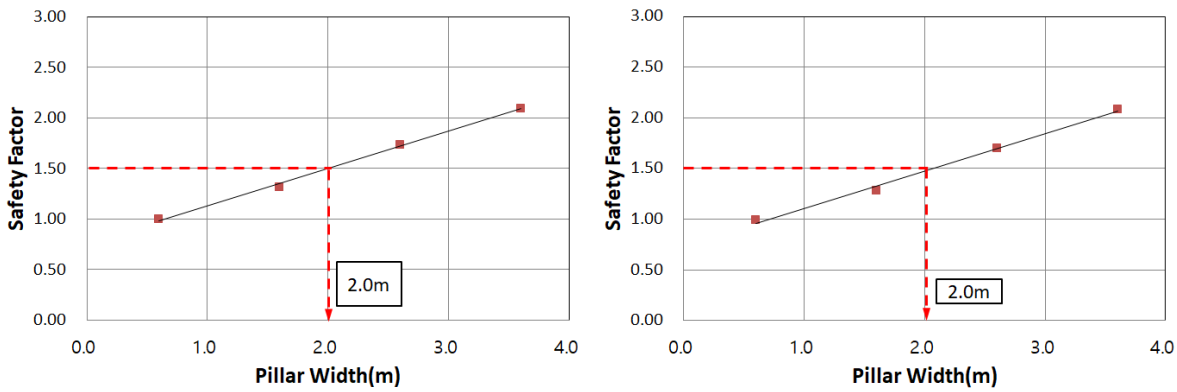
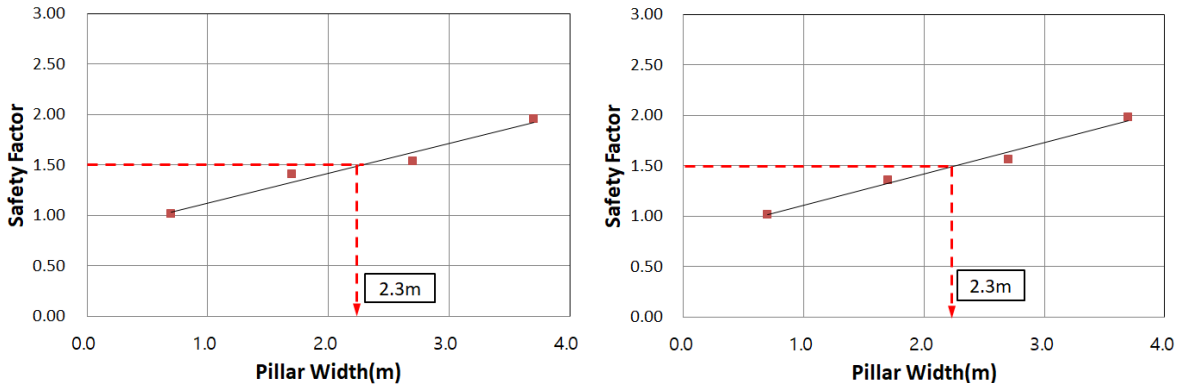
Single ramp tunnel forked in main tunnel upper deck	Single ramp tunnel forked in main tunnel lower deck	Double deck ramp tunnel
		

Fig. 8~10은 램프터널 SL라인 연장선에 위치한 지반의 안전율 결과를 나타냈다. 필라폭이 1.0 m 미만인 경우, 지반의 안전율은 1.0 이하의 값을 보여주었으며, 진행성 파괴 또는 불안정한 상태에 도달할 것으로 보인다. 필라폭 2.0 m 이상인 경우, 안전율은 램프 복층터널 접속 시 가장 안정한 것으로 나타났으며, 램프 단층터널 하부 접속 시 가장 불안정한 것으로 나타났다. 강도응력비에 안전율 개념을 도입하여 1.5 이상을 확보할 수 있는 필라폭을 선정하면 1차로 단층 램프터널이 본선 상부에 접속하는 경우 필라폭 2.0 m를 확보하여야 하며, 본선 하부에 접속하는 경우에는 필라폭 2.3 m를 확보하여야 한다. 필라폭에 대한 검토결과 단층 램프터널이 접속하는 경우 본선터널, 램프터널 굴착순서에 상관없이 동일한 결과를 보여주었다. 그러나 1차로 복층 램프터널이 본선에 접속하는 경우 본선 선굴착 시 필요한 필라폭은 1.3 m, 램프 선굴착 시 필요한 필라폭은 1.7 m로써 본선 선굴착이 더 유리한 것으로 나타났다.



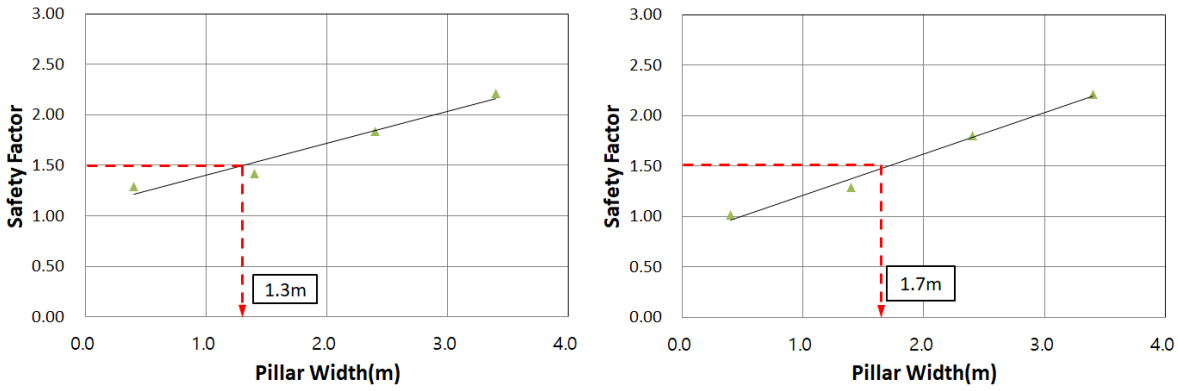
(a) Main tunnel first (b) Ramp tunnel first

Fig. 8. Single deck ramp tunnel branch in upper deck



(a) Main tunnel first (b) Ramp tunnel first

Fig. 9. Single deck ramp tunnel branch in lower deck



(a) Main tunnel first (b) Ramp tunnel first

Fig. 10. Double deck ramp tunnel

5. 결 론

복층터널 분기부 필라폭에 대한 안정성을 검토하기 위해 지반의 강도-응력비를 산정하였다. 양호한 지반조건인 암반등급 III에 대해 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 필라폭이 1.0 m 미만인 경우, 지반의 안전율은 약 1.0의 값을 보여주었으며, 진행성 파괴 또는 불안정한 상태에 도달할 것으로 보여진다.
2. 안전율 1.5 이상을 확보할 수 있는 필라폭은 1차로 단층 램프터널이 본선 상부에 접속하는 경우 필라폭 2.0 m를 확보하여야 하며, 본선 하부에 접속하는 경우에는 필라폭 2.3 m를 확보하여야 한다. 복층 램프터널이 접속하는 경우, 본선터널 선굴착 시 필라폭 1.3 m, 램프터널 선굴착 시 1.7 m를 확보하여야 한다.
3. 필라폭에 대한 검토결과 단층 램프터널이 접속하는 경우 본선터널, 램프터널 굴착순서에 상관없이 동일한 결

과를 보여주었다. 그러나 1차로 복층 램프터널이 본선에 접속하는 경우 본선 선굴착이 더 유리한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 '대심도 복층터널 설계기술 및 시공기술개발(16SCIP-B089409-03)' 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Hoek, E., Brown, E. T. (1980), Underground Excavations in Rock, Institution of Mining & Metallurgy, London, pp. 112-125.
2. Jang, B.S., Hwang, J.S., Yoon, B.S., Kim, H.T. (2006), "The behavior characteristics of tunnel pillar by small-scale model tests", Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conferences, Vol. 2006, No. 10, pp. 4282-4285.
3. Kim, D.S., Kim, Y.G., Lee, D.H., Kim, C.Y., Bae, K.J., Lee, S.H., Lee, H.S. (2004), "A study on stability and pillar reinforcement of a asymmetry parallel tunnel", Proceedings of the 4th Tunnel Technical Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2004, No. 12, pp. 181-197.
4. Kim, S.H., Choi, C.R., Han, S.H., Lee, K.H., Choi, Y.S., Suk, J.D. (2011), "Stability analysis of an divergence tunnel in urban", Proceedings of the 30th Simposium of Korean Society for Rock Mechnics, Vol. 2011, No. 9, pp. 287-291
5. Lee, H.S., Moon, H.K. (2016), "Behavior of the segment lining due to the middle slab and the lateral pressure coefficient in duplex tunnel", Tunnel and Underground Space, Vol. 26, No.3, pp. 192-200.
6. Lim, H., Son, K. (2014), "The stability analysis of near parallel tunnels pillar at multi-layered soil with shallow depth by numerical analysis", Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 15, No. 1, pp. 53-62.
7. Matsuda, T., Toyosato, E., Igarashi, M., Nashimoto, Y., Sugiyama, T. (1997), "A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method", Proceedings of the Studies on Tunnel Engineering, Vol. 7.
8. Nam, K.M., Choi, M.K., Kim, J.J., Yoo, H.K. (2017), "Stability analysis of an existing utility tunnel due to the excavation of a divergence tunnel emerging from double-deck tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 231-248.
9. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State-of-the-Art Ropert 3, pp. 225-290.
10. You, K.H., Jin, S.H., Kim, Y.J. (2017), "A stability study of deep and double-deck tunnels considering shape and reinforcing method of an enlarged section by using numerical analyses", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 1, pp. 41-56.