

ORIGINAL ARTICLE

근접병설터널에서 필라부 안전을 평가를 위한 강도감소법의 적용성 연구

전성권¹, 윤동호², 송재준^{2*}, 김세형³

¹(주)태영건설, ²서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부, ³한국도로공사

Application of Strength Reduction Method to Evaluation of Pillar Safety Factor in very Closely Spaced Tunnels

Sung-Kwon Jun¹, Dong-Ho Yoon², Jae-Joon Song^{2*}, and Se Hyung Kim³

¹Taeyoung Engineering & Construction

²Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

³Korea Expressway Corporation

*Corresponding author: songjj@snu.ac.kr

Received: September 26, 2019

Revised: October 24, 2019

Accepted: October 28, 2019

ABSTRACT

When evaluating pillar stability in very closely spaced tunnels, a local safety factor (strength/stress ratio) at the minimum width has been widely used. Tension bolts have been frequently applied as reinforcement for the cases where safety factors are less than 1.0 from FEM stress analysis. However, the local safety factor shows a constant value irrespective of the change in pillar width/tunnel diameter (PW/D) and the safety factor of the pillar is underestimated because the variation of deviation stress is relatively small even when the pre-stressing is applied to the tension bolt. In addition, the average safety factor proposed by Hoek and Brown(1980) was reviewed, but the pillar safety factor was relatively overestimated when the width of the pillar was increased. As an alternative, the SRM safety factor using shear strength reduction method shows the effect of changing the safety factor in the case of no reinforcement and tension bolt reinforcement as the pillar width/tunnel diameter(PW/D) changes. The failure shape is also similar to the previous limit theory result. In this study, the safety factor was evaluated without considering rock bolt and shotcrete to distinguish reinforcing effect of tension bolt.

Keywords: Closely spaced tunnel, Pillar width/tunnel diameter (PW/D), Pillar safety factor, Tension bolt, Strength reduction method(SRM)

초록

근접병설터널에서 필라의 안정성을 평가할 때, 필라 폭이 최소가 되는 지점에서의 국부안전율(강도/응력비)을 조사하는 방법이 널리 사용된다. FEM 응력해석결과를 바탕으로 국부안전율이 1.0 이하인 경우는 필라의 안정성이 확보되지 못 하는 것으로 판단하고 인장볼트 등의 보강공법을 적용하고 있다. 그러나 국부안전율은 필라폭/터널반경(PW/D)의 변화와 무관하게 일정한 값을 보이고 있으며 인장볼트의 프리스트레싱 도입 시에도 축차응력의 변화가 크지 않아 상대적으로 필라의 안전율을 과소평가 할 수 있는 것으로 분석되었다. 아울러 Hoek and Brown(1980)이 제안한 평균안전율을 검토하였으나 상대적으로 필라폭의 크기가 커질 경우 필라의 안전율을 과대평가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이에 대한 대안으로 강도 감소법을 이용한 SRM 안전율을 도입하여 필라의 안정성을 평가한 결과 필라폭/터널반경 변화에 따른 무보강 및 인장볼트 보강효과가 잘 반영됨을 알 수 있었으며 파괴형상 또한 기존 극한 이론



의 검토결과와 유사함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 인장볼트의 보강효과를 구별하기 위해 록볼트 및 슛크리트를 고려하지 않고 안전율을 평가하였다.

핵심어: 근접병설터널, 필라폭/터널반경(PW/D), 필라 안전율, 인장볼트, 강도감소법(SRM)

1. 서론

광도로터널의 경우 일반적으로 양방향을 분리하여 시공하는 병설터널 계획이 일반적이며, 이 경우 선형분리에 따라 갱구부 구간은 일반 구간보다 점용하는 용지의 폭이 상대적으로 커지게 된다. 그러나 최근 용지보상비의 증가와 일부 도심지 구간의 경우 용지 매입이 곤란한 경우가 많아 병설터널 사이의 거리를 가급적 최소화 하라는 사회적 요구가 많이 발생하고 있는 실정이다. 과거 이러한 경우에는 2-Arch 터널이 주요 대안으로 검토되었으나 중앙터널 pilot 굴착에 따른 공기 및 공사비 과대, 중앙터널 벽체부의 누수 및 장기 안정성 저하 문제로 인해 최근에는 병설터널 사이의 필라폭을 작게 하는 근접병설터널이 많이 채택되고 있다.

병설 터널 사이의 이격 거리는 터널 폭(D)과 필라 폭(PW)에 의해 통상 표현되며, 필라의 폭과 강도는 병설터널의 안정성을 평가하는 매우 중요한 지표가 된다. Yoo et al.(1997)에 따르면 필라 폭이 2D 이상일 경우 양 터널은 독립적으로 거동하며, Im et al.(1994)은 필라의 두께가 1.0D 이하인 경우 응력집중이 현저히 증가한다고 하였다. 국내 터널설계기준(Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2007)을 살펴보면 터널굴착공사로 인한 주변 지반거동 및 발파진동이 인접터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 상호 충분히 이격시켜야 한다고 되어 있다.

최근 근접병설터널의 적용사례를 살펴보면 최소 필라폭은 약 0.2D 정도의 값을 보이고 있으며 Kim(2015)은 필라 폭을 0.2D~0.4D로 적용할 경우 필라에 대한 별도의 보강공법이 필요하다고 하였다. 일반적으로 필라에 대한 보강은 그라우트 주입 등을 통해 필라의 강도를 직접 증가시키거나 필라부에 구속압을 작용시켜 안정성을 확보토록 하는 공법으로 인장볼트(tension bolt) 공법이 대표적이다. 인장볼트 공법의 경우 유난히 국내 적용 사례가 많이 있는데 최근 근접병설터널 계획의 증가와 더불어 그 활용이 증가되는 추세이다. 그러나 인장볼트의 도입사례가 많음에도 불구하고 아직까지 설계법에 대한 명확한 규정이 확립되지 않아 설계자에 따라 보강정도가 상이하며 현장에서 필라의 안정성을 평가하는 데 많은 어려움이 있다.

연약한 지반조건에서 근접병설터널 필라부 인장볼트의 안정성을 판정하는 경우 현재 국내에서 통상적으로 적용되고 있는 국부 안전율 방법의 경우 부분적인 파괴의 발생이 전체 필라 전체의 파괴를 대변하지 못 한다는 문제점을 가지고 있다. 한편 Hoek and Brown(1980)이 제안한 평균안전율의 경우 필라가 최소폭이 되는 단면에서 평균 연직응력에 대한 암반의 압축강도를 평가하는 방법으로 지중응력이 상대적으로 높은 영역에서는 그 적용성이 우수하나 상대적으로 지중응력이 낮은 저심도 구간에서는 전단변형에 의한 파괴가 우선 발생하므로 파괴면이 필라의 최소폭과 일치되지 않는 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고 직관적인 안정성 판정을 위해 강도감소법(strength reduction method)을 적용하여 보강 시 및 무보강 시 필라의 안정성을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 강도/응력비 방법에 의한 필라 안정성 평가

국내에서 암반 필라의 안정성을 평가하는 방법으로 필라에 작용하는 응력과 강도에 대한 비율을 의미하는 강도/응력비 방법이

보편적으로 사용되고 있으며 Sin and Kim(2010)은 대단면 근접병설터널에서의 필러부 거동특성을 분석하기 위해 파괴접근도에 의한 안전율 검토방법을 사용하였으며, Kim et al.(2012)은 병설터널의 최소 필라폭 구간에서 발생하는 주응력의 평균값을 이용하여 암반 필라의 평균 안전율을 검토하였다. Hoek and Brown(1980)에 따르면 필라 높이의 절반에서 강도/응력비의 평균값을 필라의 안전율로 평가할 수 있으나 국부적으로 한 지점에서 강도/응력비가 1.0보다 작은 경우이라도 이 지점에서 시작한 파괴전파가 전체 필라의 파괴로 반드시 연결되는 것은 아니라고 주장하였다.

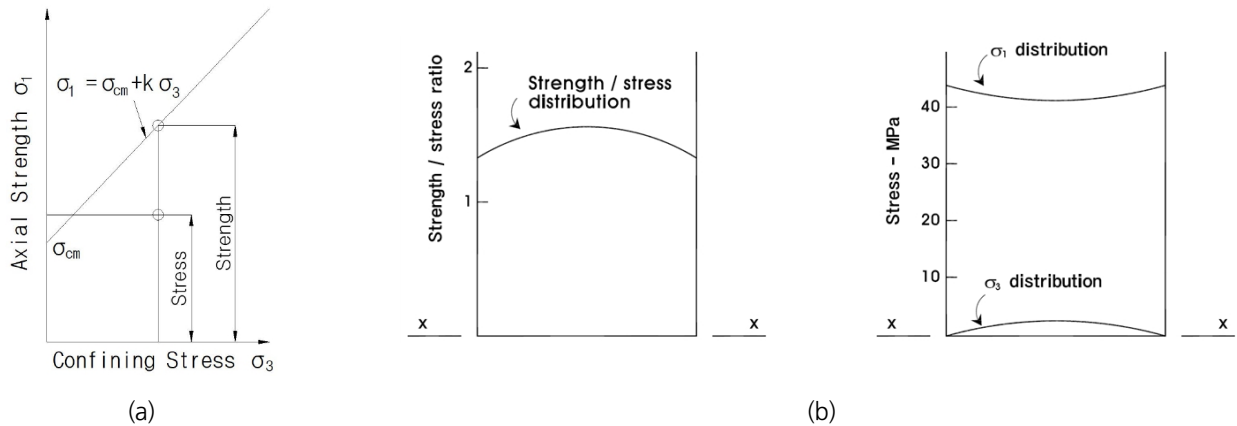


Fig. 1. Strength/stress curve ; (a) Strength and stress curve of pillar (from Kim et al., 2012), (b) strength/stress ratio and principle stress distribution of pillar (from Hoek and Brown, 1980)

Hoek and Brown(1980)의 경우 압축강도와 최대주응력을 이용하여 안전율을 판정하도록 제안하고 있으나 암반의 경우 일반적으로 전단파괴 기준이 많이 적용되고 있으므로 Mohr-Coulomb 파괴기준에 따라 전단강도 및 전단응력으로 강도/응력비를 Fig. 1과 같이 표현할 수 있으며 여기에서 강도/응력비는 암반의 일축압축강도 및 전단특성을 이용하여 식 (1)과 같이 표현 될 수 있다.

$$F.S. = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \tag{1}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3, \sigma_{cm} = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi}, k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

σ_{1f} : 파괴 시 축방향 응력, σ_3 : 구속응력, σ_{cm} : 암반의 일축강도, c : 암반의 점착력, ϕ : 암반의 내부마찰각, k : 주응력선 기울기

국내에서 암반 필라의 안정성 평가 및 보강 여부를 판정하는 일반적인 방법은 먼저 FEM 응력해석을 수행하고 필라 높이(H)의 약 절반 부근에 있는 요소들에서 강도/응력비를 계산한 후 단 한 개의 요소에서라도 강도/응력비가 1.0을 상회하지 못 할 경우 해당 필라는 안정하지 못 한 것으로 판정하는데 이는 너무 보수적으로 필라의 안정성을 평가하는 것으로 앞서 기술한 Hoek and Brown(1980)의 견해와도 일부 배치되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2는 국내 OO 고속도로 근접병설 터널구간의 필라 안정성을 검토한 사례(Korea Expressway Corporation, 2017)이며 터널 폭(D)은 16.2 m, 필라 폭(PW)은 6.2 m로 PW/D는 0.38의 값을 보이고 있다. 검토된 사례에 적용된 암반의 변형계수(Em)는

700 MPa 점착력(c)은 150 kPa이며 내부 마찰각(ϕ)은 31°를 적용하였다. 보강을 위한 인장볼트는 SWPC 7연선 15.2 mm 6공이 시공되었으며 사용된 강연선의 제원은 공칭단면적 138.70 mm², 항복하중 22,638 kg 인장하중 26,615 kg이다.

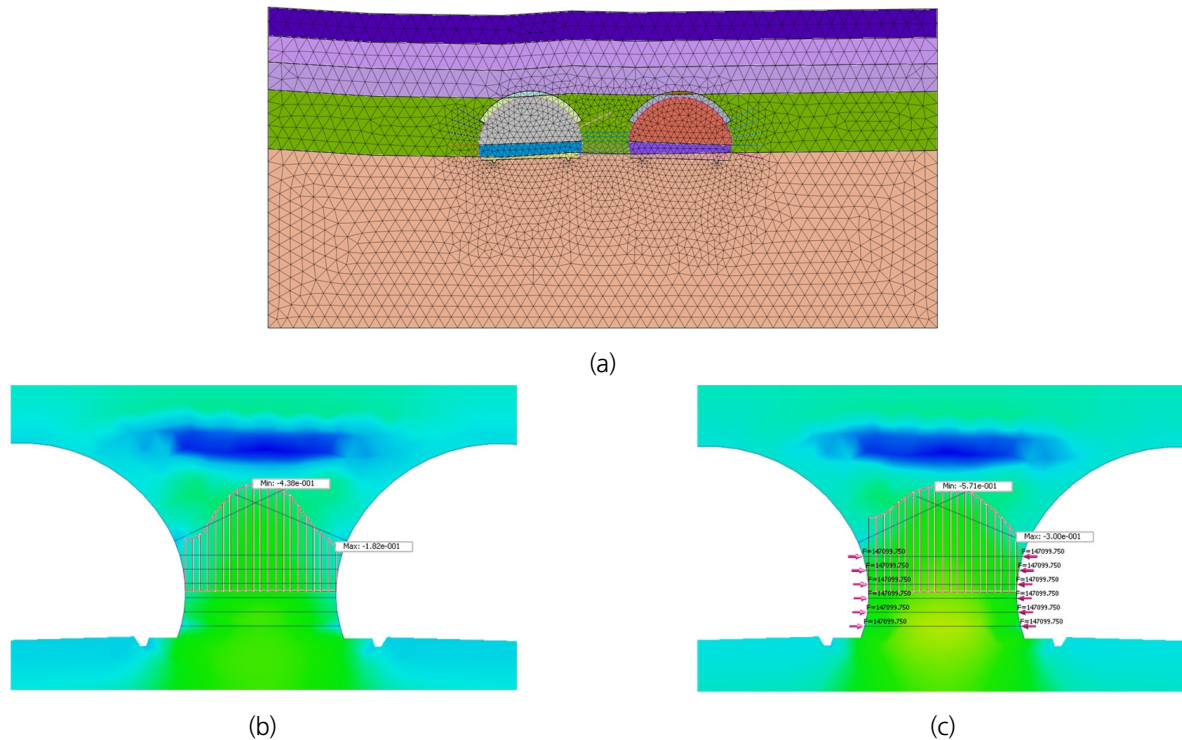


Fig. 2. The example of FEM analysis for an evaluation of the pillar stability in ○○ project (Korea Expressway Corporation, 2017) ; (a) FEM modeling, (b) principle stress on a pillar without pre-stressing, (c) principle stress on a pillar with pre-stressing

Table 1. The strength/stress ratio from a FEM analysis of a pillar (Korea Expressway Corporation, 2017)

pre-stressing (P.S.) (kN)	Left of Pillar				Center of Pillar				Right of Pillar				
	$\sigma 1$ (kPa)	$\sigma 3$ (kPa)	$\sigma 1f$ (kPa)	strength / stress ratio	$\sigma 1$ (kPa)	$\sigma 3$ (kPa)	$\sigma 1f$ (kPa)	strength / stress ratio	$\sigma 1$ (kPa)	$\sigma 3$ (kPa)	$\sigma 1f$ (kPa)	strength / stress ratio	
0.0	1,178	207	1,177	0.83	944	438	1,899	2.89	1,421	182	1,099	0.74	N.G.
147.0	1,439	403	1,789	1.34	919	571	2,314	5.01	1,489	324	1,542	1.05	O.K.

해당 사례를 살펴보면 Table 1과 같이 무보강 시 암반 필라의 평균(average) 강도/응력비(안전율)는 약 1.8 정도를 보이고 있으나 국부적으로는 필라 좌측 0.83, 중앙 2.89, 우측 0.74의 값을 보임에 따라 필라가 안정성을 확보하지 못 하는 것으로 판정하고, 추가 적으로 인장볼트 6공을 시공하여 국부(local)안전율이 최소 1.0을 상회하도록 계획하고 있다. 국부안전율을 사용하여 안정성을 평가할 때 요소의 선정 문제 및 수치오차 등을 고려할 경우 임의적으로 보강여부가 판정될 수 있다. 이는 필라의 안전율 평가에 대한 명확한 기준이 아직까지 정립되지 않은 까닭으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 필라의 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 안전율 산정이론을 이용하여 보다 발전된 평가 기준을 제시하고 이를 기존 방법과 비교하고자 한다.

3. 필라 안전을 평가방법의 상호 비교 분석

3.1 해석조건

근접병설터널은 일반적으로 터널 폭(D)과 필라 폭(PW)의 상호관계에 따라 그 거동양상이 변하게 되므로 국내 고속도로 3차로 터널의 대표적인 횡단 폭인 15 m를 기준으로 필라 폭을 변화시켜가며 국부안전율, 평균안전율 및 SRM(strength reduction method) 안전율을 상호 비교하였다. 필라 폭을 단계적으로 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.4D, 0.5D, 0.75D로 변화시켜 안전율을 계산하였다(Fig. 3). 터널 단면은 기하형상에 따른 응력집중 현상을 최소화하기 위해 원형으로 가정하였고 얇은 터널 조건을 반영하여 상부 토피고(h)는 1.0D를 적용하였으며, 좌우측 경계는 2.0D를 확보토록 하여 경계면에서 구속 효과가 발생하지 않도록 하였다. 이때 암반의 변형계수(E_m)는 700 MPa, 점착력(c)은 150 kPa, 내부 마찰각(ϕ)은 31°를 적용하였으며 측압계수(K0)는 얇은 터널 조건인 0.5를 적용하여 비교 분석토록 하였다.

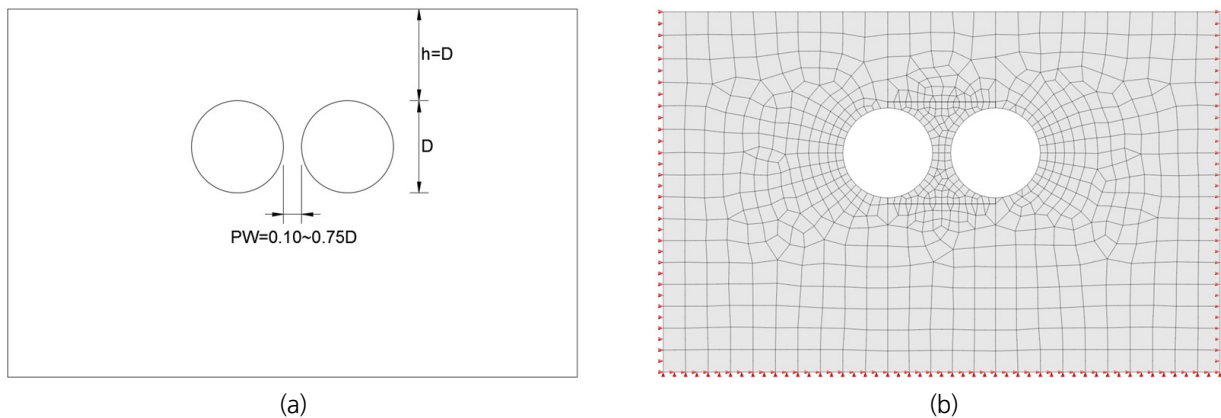


Fig. 3. Modeling condition ; (a) tunnel layout and analysis cases, (b) FEM mesh design (PW = 0.2D)

필라 폭을 변화시키면서 응력 해석을 수행한 후 필라의 폭이 가장 작아지는 굴착면 경계 요소에서 식 (1)에 표시된 강도/응력비 산정식을 이용하여 무보강 시 및 인장볼트 설치 시 국부안전율을 산정하였으며, 평균 안전율은 최소 필라폭 위의 값을 모두 산정한 후 평균하는 방식을 취하였다.

강도감소법(strength reduction method)을 이용한 안전율 산정 기법은 국내외에 다수의 적용 사례가 있다. 국내의 경우 You et al.(2000, 2005)는 연약한 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가를 위해 강도감소법을 적용하였으며, 지보재 파괴를 고려하여 터널의 안전율을 고려하는 방안을 제시하였다.

강도감소법의 특성상 계산의 정밀도가 확보된다면 극한 이론(limit theory)중 상한치 이론(upper bound theory)과 유사한 값을 보이게 되므로 실제 안전율보다 다소 큰 값을 나타낼 수 있으나 실무상 적용에는 큰 문제가 없다. 극한 이론을 이용한 안전율 해석은 정해(real solution)를 산정함에 있어 보다 정교하지만 파괴 형상에 대한 정확한 가정이 어렵고 계산상 오류 발생가능성이 높아 실무에 적용 시 주의가 필요하다. 극한 이론을 이용한 필라의 파괴 거동 분석 및 안전율 산정은 이후 연구에 추가될 예정이다.

본 연구는 인장볼트의 보강효과 판정에 대해서 기존에 적용되고 있는 안전율 평가방식을 검토하고 강도감소법에 의한 안전율 평가방식의 적용성을 비교 분석하기 위해 수행되었다. 전통적으로 안전율(F.S.)은 지반의 파괴를 방지하는 데 필요한 최소 전단강도

에 대한 지반의 전단응력 비율로 정의된다. 수치해석법을 이용하여 안전율을 계산하는 방법은 파괴가 일어날 때까지 전단강도를 단계적으로 감소시켜 수치해석이 수렴되지 않는 시점을 파괴로 판단하여 그 때의 강도감소율을 지반의 안전율로 평가하게 되며 Mohr-Coulomb 파괴기준에서의 안전율은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 아울러 탄소성해석을 위한 소성 포텐셜 함수의 결정은 관련흐름법칙(associated flow rule)을 적용하였다. Lee and Yoo(2003)에 따르면 비관련흐름법칙(non-associated flow rule)을 적용하는 경우 통상적으로 안전율이 감소하는 것으로 보고되었으나 흐름법칙의 변화에 따른 안전율 변화 분석은 본 연구에서는 제외하는 것으로 하였다.

$$c^{trial} = c/F.S.^{trial}, \phi_f^{trial} = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{F.S.^{trial}}\right) \quad (2)$$

SRM 안전율 산정을 위해 우선 원지반 지중응력을 재현한 후 터널이 굴착되는 것으로 가정하였고 무보강 및 인장볼트의 프리스트레싱 효과를 반영한 안전율을 각각 산정토록 하였다. 이 경우 숏크리트 및 록볼트 등의 지보재는 고려하지 않았는데 이는 이와 같은 지보재를 함께 고려할 경우 인장볼트만의 보강효과를 분리하여 평가하기 어렵기 때문이다. 터널의 단계별 시공에 따른 하중분담률 및 지보재 효과를 고려할 경우 안전율은 당연히 증가하게 될 것이므로 실제 보강 설계 시에는 관련된 검토가 선행되어야 할 것이다.

3.2 인장볼트 보강효과

가정된 해석 조건에서 무보강 시 및 인장볼트 프리스트레싱 보강 시(pre-stressing ; P.S. = 150 kN, 5 EA)를 각각 적용 하였을 때 Fig. 4는 필라 폭 및 터널 폭의 변화에 따른 지반의 안전율($1.0 < F.S. < 1.2$) 분포를 보여주고 있다. 범위를 한정 한 이유는 해당 범위는 실무적으로 파괴 또는 파괴에 근접한 구간으로 판정할 수 있기 때문이며 붉은색에 근접할수록 지반의 안전율이 작은 영역이다. 기존 안전율을 선정하는 것은 검토자에 따라 다소 상이할 수 있을 것이나 일반적으로 지하수를 고려하지 않는 경우 사면안정 기준과 동일한 값을 적용할 경우 필라의 안정성을 평가하는 데 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

Fig. 4(a)는 필라 무보강 시 필라 폭이 0.2D인 경우로 파괴형상이 지반까지 연결되어 있음을 알 수 있으며 Yamamoto et al.(2011)이 제안한 원형터널에서 상한치 강체(rigid) 블록 파괴 형상과 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 아울러 필라의 파괴는 일축 압축 상태에서 암반의 파괴형상을 잘 보여주고 있음을 알 수 있는데 국부적으로 암반 필라가 먼저 파괴에 다다른 이후 파괴면이 지반으로 확장되고 있음을 알 수 있다. 반면 Fig. 4(b)는 인장볼트 보강 시 안전율 분포도를 보여주고 있는데 상대적으로 상부 지반으로의 파괴 범위가 줄어들고 동시에 필라부에 응력이 고르게 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(c) 및 Fig. 4(d)는 필라폭이 0.3D인 경우 무보강 시 및 인장볼트 보강 시 지반의 안전율을 보여주고 있으며 앞선 내용과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(e) 및 Fig. 4(f)는 필라폭이 0.5D일 때 무보강 시 및 인장볼트 보강 시 안전율을 보여주고 있으며 인장볼트 보강 시 필라부에서 안전율이 1.2 이상인 영역이 상대적으로 넓게 확장되는 것을 볼 수 있다. Hoek and Brown(1980)의 연구에서는 필라폭 0.5D의 근접병설터널에서 필라 응력이 3배 수준까지 증가하는 것으로 나타났으며, Kim(2015)의 연구에서는 필라폭이 0.2~0.4D 구간인 근접병설터널의 경우 별도의 보강이 필요한 것으로 보고된 바가 있다. 이러한 기존 연구 결과는 본 연구의 검토 결과와 대부분 일치하는 것으로 판단된다.

Fig. 4(g) 및 Fig. 4(h)는 필라폭이 0.75D인 경우 무보강 시 및 인장볼트 보강 시 안전율을 표시하고 있는데 무보강 시에도 두 개

의 터널은 독립된 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 무보강 시 상대적으로 필라부에 응력이 더 크게 가해짐을 알 수 있지만 인장볼트 보강 시에도 큰 보강효과가 발휘되지는 않는 것으로 파악된다.

필라폭이 0.1D인 경우 검토된 해석조건에서는 수렴조건을 만족하지 못 하고 필라 자체의 안전성을 확보하기가 곤란한 것으로 파악되었으며 무보강 시 안전율은 0.91, 인장볼트 보강 시 1.05의 값을 보이고 있으나 필라의 자립이 불가능할 경우 인장볼트의 시공이 곤란하므로 필라폭이 0.2D 보다 작을 경우 2-Arch 터널 또는 강성 지지대 공법 등의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

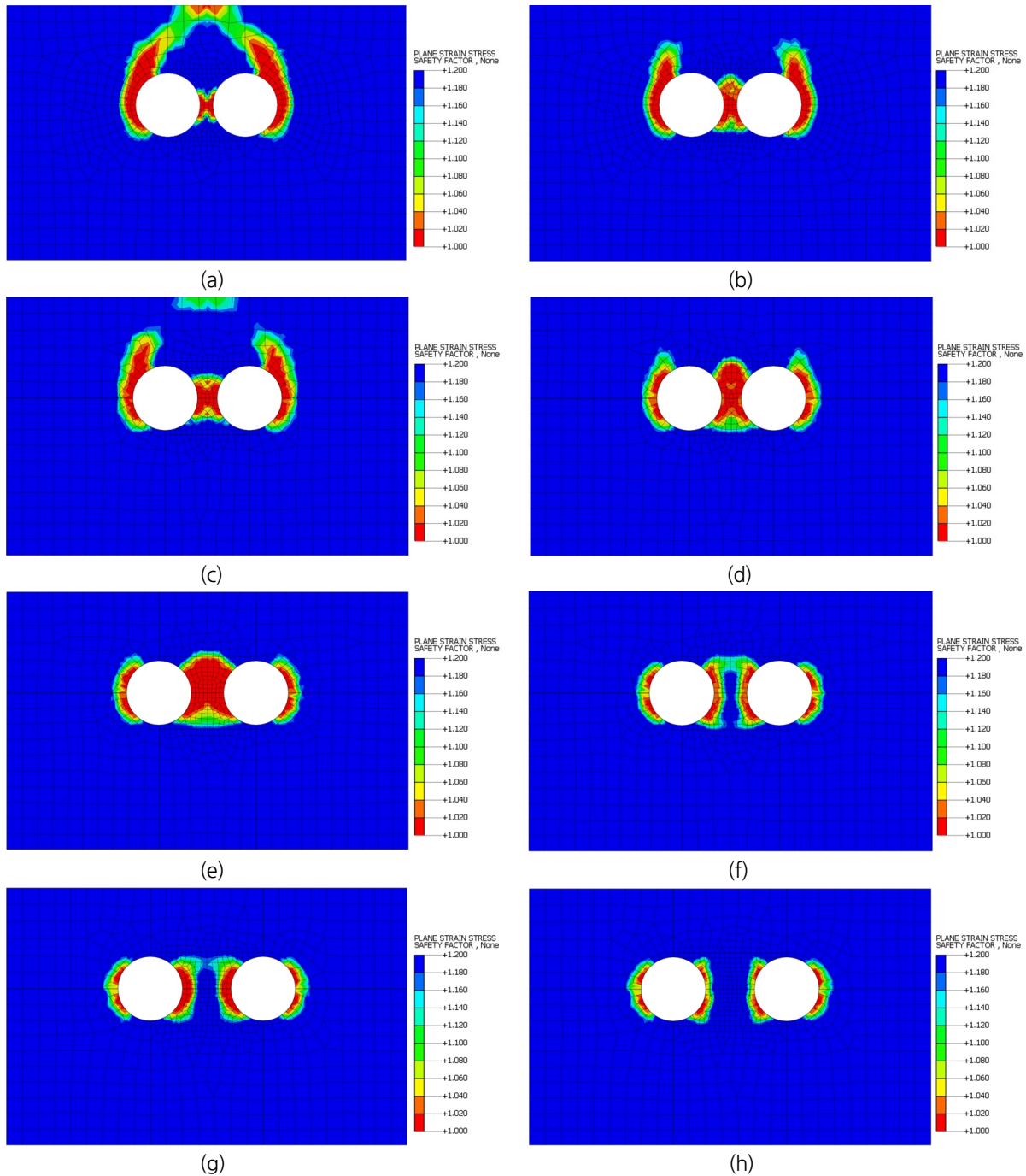


Fig. 4. Distribution of safety factor ($1.0 < F.S. < 1.2$) ; (a) PW = 0.2D, (b) PW = 0.2D (P.S. = 150 kN), (c) PW = 0.3D, (d) PW = 0.3D (P.S. = 150 kN), (e) PW = 0.5D, (f) PW = 0.5D (P.S. = 150 kN), (g) PW = 0.75D, (h) PW = 0.75D (P.S. = 150 kN)

3.3 근접병설 터널 필라 안전율 비교

필라를 인장볼트로 보강 시 프리스트레싱 효과에 따른 파괴모드의 변화가 발생하는 것을 확인하였고 앞서 기술한 바와 같이 해당 조건에서 무보강 시 필라의 국부안전율, 평균안전율 및 SRM 안전율을 Table 2에 표시하였으며 인장볼트 보강 시 계산결과는 Table 3에 표시하였고 상호 비교를 돕기 위해 Fig. 5에 각 안전율의 값을 도시하였다.

필라의 평균안전율 및 SRM 안전율은 병설터널간 이격거리가 증가할수록 증가하는 경향을 보이는 반면 국부안전율은 거의 변화를 보이지 않고 있는데 이는 무지보상상태의 경우 통상적으로 안전율이 가장 낮게 평가되는 굴착경계면에서의 국부응력은 이미 소성 상태에 진입하였기 때문으로 판단된다. 한편 인장볼트로 보강하는 경우에도 국부안전율이 상대적으로 크게 증가하지 않는 것은 프리스트레싱 도입에 따라 최소주응력(σ_3)이 증가할 경우 강도/응력비가 증가하여야 하지만 프리스트레싱이 가해질 경우 체적변형 효과에 따라 최대주응력(σ_1)의 값도 같이 증가하여 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)이 크게 변하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

앞서 밝힌 바와 같이 국내에서 인장볼트를 설계할 경우 대부분 필라의 국부안전율(강도/응력비)을 이용하여 보강여부를 판정하고 있으나 해당 인자를 통해 보강여부를 결정하는 것은 다소 민감도가 높은 결과를 초래할 가능성이 있다. 아울러 평균 안전율 또한 PW/D가 0.5를 상회할 경우 보강여부에 따라 안전율 경향이 상이한 것은 병설 터널간 상호 영향이 작아지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 상대적으로 SRM 안전율의 경우 파괴가 발생한 지점에서 강도 및 응력을 수렴이 될 때까지 계산하게 되므로 보다 합리적인 결과를 예측하는 데 도움이 되는 것으로 판단된다.

Table 2. Safety factor without pillar reinforcement

	PW=0.1D	PW=0.2D	PW=0.3D	PW=0.4D	PW=0.5D	PW=0.75D
local F.S.	Failure	1.01	1.02	1.02	1.01	1.01
average F.S.	Failure	1.06	1.07	1.26	1.27	1.28
SRM F.S.	0.91	1.07	1.09	1.14	1.19	1.30

Table 3. Safety factor with pillar reinforcement (P.S. = 150 kN, 5EA)

	PW=0.1D	PW=0.2D	PW=0.3D	PW=0.4D	PW=0.5D	PW=0.75D
local F.S.	Failure	1.03	1.05	1.04	1.06	1.10
average F.S.	Failure	1.03	1.04	1.13	1.20	1.72
SRM F.S.	1.05	1.18	1.21	1.26	1.31	1.42

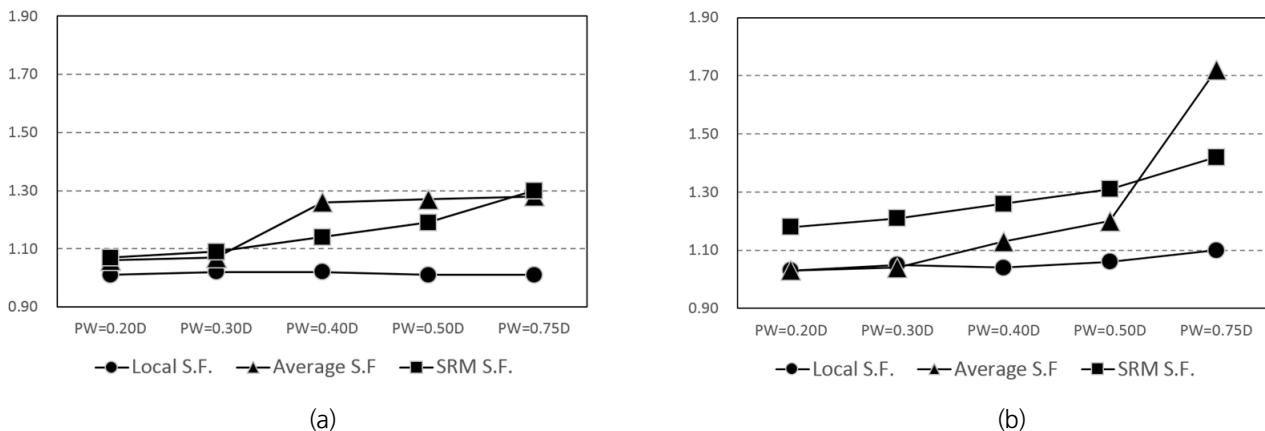


Fig. 5. Safety factor ; (a) Without Reinforcement, (b) With Reinforcement (Pre-stressing 150kN, 5EA)

4. 결론

본 논문에서는 최근 국내에서 많이 적용되고 있는 근접병설터널의 보강공법인 인장볼트 공법의 안전을 평가방법에 대해 국부(local)안전율, 평균(average)안전율 및 SRM 안전율을 매개변수 분석을 통해 각각 산정하고 실무 적용성에 대하여 논하였다. 본 논문의 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내 근접병설 터널 설계에서 필라의 안정성 평가를 위해 대부분 FEM 응력해석 결과를 바탕으로 필라 폭(PW)이 최소가 되는 부분에서 강도/응력비(안전율)를 조사하여 국부적으로 1.0 이하인 경우에는 필라의 안정성이 확보되지 못하는 것으로 보수적으로 판단하여 필라 보강을 위해 인장볼트를 적용하고 있는 경우가 많은 것으로 파악되었다.
- 2) 안전율 상호비교를 위한 매개변수 분석 결과 국부(local)안전율은 무보강 시 PW/D에 거의 무관하게 일정한 값을 보이고 있어 필라의 안정성을 판정하기에는 다소 민감도가 높은 결과를 보일 수 있는 것으로 판단된다. 아울러 인장볼트의 프리스트레싱 도입 시 축차응력(σ_1 - σ_3)의 변화가 크지 않아 상대적으로 필라의 안전율을 과소평가할 수 있는 것으로 검토되었다.
- 3) 평균(average)안전율은 상대적으로 국부안전율에 비해 병설터널간 이격 거리 및 인장볼트의 프리스트레싱 효과를 어느 정도 반영하고 있으나 필라 폭의 크기가 커질 경우 소성파괴가 발생하지 않은 부분의 안전율이 고려되면 평균 안전율 값이 급격하게 증가되는 현상을 보이고 있으며 필라의 실제 파괴면은 최소 폭 단면과 경사지게 발생하나 이를 반영하여 안전율을 평가하기 어려운 것으로 판단된다.
- 4) 강도감소법(strength reduction method)에 의한 안전율 산정은 파괴면을 고려할 필요 없이 소성영역의 확장에 따른 전체 안전율을 계산하는 방법으로 무보강 시 및 인장볼트 보강 시 프리스트레싱을 반영한 효과에 대해 양호한 상관관계를 보이는 것으로 조사되었으며 필라의 파괴를 포함한 터널 전체의 안정성을 평가할 수 있으므로 근접병설터널 필라의 안전을 평가방법으로 적용성이 우수한 것으로 사료 된다. 아울러 검토된 파괴형상 또한 기존 극한 이론(limit theory)과 유사한 형태를 띠고 있음을 알 수 있다.
- 5) 본 논문에서는 인장볼트의 효과를 구분하기 위해 록볼트 및 슛크리트 등 지보재를 고려하지 않고 안전율을 산정하였으나 실제 터널은 해당 지보재가 시공된 상태에서 안전율을 평가하는 것이 타당하므로 보강 설계 및 시공에 있어서는 관련된 검토가 선행되어야 한다.

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2017 2510102340)

REFERENCES

- Hoek, E.I. and Brown E.T., 1980, *Underground Excavation in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London. 202-203.
- 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, In *Proceedings of KGS Fall '94 National Conference*, 231-234, Seoul, Korea, Korean Geotechnical Society.
- Kim, W.B., Yang, H.S. and Ha, T.W., 2012, An Assessment of Rock Pillar Behavior in Very Near Parallel Tunnel, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 22, No. 1, 60-68.
- Kim, Y.B., 2015, *The Stability of Closely-Spaced Tunnels by Pillar Reinforcement using PC-Strands*, MS dissertation, Korea University.
- Korea Expressway Corporation, 2017, *Tunnel Analysis Report for Expressway Construction on the Section □□~△△ of Highway 29*, 58-68.
- Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2007, *Tunnel Design Standard*, 17p.
- Lee, D.Y. and Yoo, C.S., 2003, Comparative Study Between Finite Element Method and Limit Equilibrium Method on Slope Stability Analysis, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 19, No. 4, 65-74.
- Sin, Y.W. and Kim, Y.G., 2010, Review of Mechanical Behaviors of Pillar in Large Parallel Tunnel, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 20, No. 3, 131-144.
- Yamamoto, K., Lyamin, A.V., Wilson, D.W., Sloan, S.W. and Abbo, A.J., 2011, Stability of a circular tunnel in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading, *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, 504-515.
- Yoo, C.S., Lee, H. and Yoon, H.S., 1997, Three Dimensional Finite Element Analysis on Twin Tunnel Behavior, In *Proceedings of KGS Fall '97 National Conference*, 151-160, Seoul, Korea, Korean Geotechnical Society.
- You, K.H., Hong, K.Y., Park, Y.J., Lee, H.K. and Kim, J.K., 2005, A Methodology of Considering the Failure of Supports in Evaluating Tunnel Safety Factors, In *Proceedings of KTA 2005 Annual Conference*, 213-224, Seoul, Korea, Korean Tunneling and Underground Space Association.
- You, K.H., Park, Y.J. and Bae, G.J., 2000, An Assessment of Safety Factor for Tunnels Excavated in a Weak Rock Layer, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 2, No. 3, 47-57.