

수치해석에 의한 저토피 다층지반에서 근접 병설터널 필라의 안정성 분석

The Stability Analysis of Near Parallel Tunnels Pillar at Multi-layered Soil with Shallow Depth by Numerical Analysis

임형민¹⁾ · 손광록[†]

Hyungmin Lim · Kwangrok Son

Received: October 15th, 2013; Revised: November 5th, 2013; Accepted: November 20th, 2013

ABSTRACT : In Korea, in general, separation distance between existing parallel tunnels was set at two to five times as distant as the diameter of the tunnels according to ground conditions. Recently, however, actual applicability of closely spaced parallel tunnels whose distance between tunnel centers was shorter than the diameter has increased due to environmental damages resulting from massive cutting, restriction in purchase of required land, and maintenance of linear continuity. In particular, when the pillar width of tunnel decreases, the safety of pillars affects behaviors of the tunnel and therefore the need for diverse relevant studies has emerged. However, research so far has been largely confined to analysis of behavior characteristics of pillars, or parameters affecting design, and actually applicable and quantitative data have not been presented. Accordingly, in order to present a stability evaluation method which may maximally reflect construction conditions of spots, this study reflected topographical and stratigraphic characteristics of the portal part with the highest closeness between the tunnels, simulated multi-layer conditions with rock mass and complete weathering, and assessed the degree of effect the stability of pillars had on the entire tunnels through numerical analysis according to changes in pillar width by ground strength. This study also presented composite analysis result on ground surface settlement rates, interference volume rates, and average strength to stress and a formula, which may be applicable to actual work, to evaluate safety rates of closely spaced parallel tunnel pillars and minimum pillar width by ground strength based on failure criteria by Hoek-Brown (1980).

Keywords : Parallel tunnels, Pillar width, Interference volume ratio, Strength/stress ratio, Influence area

요 지 : 기존 국내 병설터널의 이격거리는 지반조건에 따라 터널직경(D)의 2~5D 정도를 확보하는 것이 일반화되어 왔으나, 최근 들어 대규모 절취에 따른 환경훼손 및 용지매입의 제약, 선형의 연속성 유지 등의 문제를 수반하게 되면서 터널 중심간격이 1D 이하인 근접 병설터널의 현장 적용성이 확대되고 있다. 특히, 터널 필라폭이 감소할 경우 필라(Pillar)의 안전성이 터널의 거동에 영향을 미치게 되므로, 이에 대한 다양한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 현재까지의 연구는 주로 필라의 거동특성이나 설계 영향 인자들에 대한 분석에 국한되었으며, 실무에 적용 가능하고 정량적인 데이터는 제시하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 현장 시공조건을 최대한 반영할 수 있는 안정성 평가기법 및 설계 지표를 제시하기 위해 현장조건으로 터널 간 근접도가 가장 높은 갱구부 구간의 지형 및 지층특성을 반영하고, 암반 및 완전풍화 상태의 다층지반조건 상태를 모사하였으며, 지반 강도별 필라폭 변화에 따른 수치 해석적 분석을 통해 필라의 안전성이 터널 전체 안정성에 미치는 영향 정도를 평가하였다. 또한, 지표침하비 및 간섭체적비, 평균강도/응력비 등에 대한 종합적 분석 결과와 Hoek & Brown(1980) 파괴기준을 토대로 실무에 적용이 가능한 근접 병설터널 필라의 안전을 평가식과 지반 강도별 최소 필라폭을 제시하였다.

주요어 : 병설터널, 필라폭, 간섭체적비, 강도/응력비, 영향권

1. 서 론

근래 산업사회의 발달은 인구증가와 대도시로의 인구 집중에 따른 과밀현상을 해결하기 위하여 행정도시 개발, 지역 활성화 지원 등 다양한 인구 분산정책이 운영되고 있으며, 이로 인해 산업기반시설 확충의 필요성으로 도로, 철도, 지하철, 고속전철, 대심도 터널 등의 사회적 기반시설에 많

은 터널이 적용되고 있다. 그러나 용지매입의 제한이나 주변지장물의 저축 문제 등과 같은 민원의 심각화 및 산악지역에서의 대규모 절취에 따른 환경훼손 등 사회적 문제가 대두되면서, 이러한 문제를 해결하고 경제적 지하공간의 활용을 극대화하기 위해 터널형식은 일반 병렬터널에서 대단면화 또는 2-Arch, 근접 병설터널 등 다양한 형식으로 설계 및 시공되고 있다.

1) Kyungpook National University, Department of Construction and Disaster prevention Engineering

† NANO-GEOtechnical E&C, R&D Institute (Corresponding Author : 01094119713@nate.com)

근접 병설터널은 일반적으로 터널 중심간격을 굴착 폭 (D)의 2~5D까지 적용하던 것에서 1.0D 이하로 적용하는 터널로써 기존 2-Arch 및 대단면 터널보다 경제적이고, 일반 병렬터널보다 환경적 측면에서 우수하며, 민원 및 선형의 연속성을 유지하기가 용이한 터널이다. 그러나 터널 간격이 줄어들면서 발생하는 필라(Pillar)의 발생이 터널 전체의 안정성에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 다양한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 또한, 터널의 근접도가 가장 큰 곳은 갱구부 구간으로서 갱구부의 지형 및 지질 특성, 인접 시설물 등 복합적인 지반 거동에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

국내에서는 터널 이격거리에 따른 응력비 및 간섭영향을 분석하여 터널 안정성을 평가한 연구(Im et al., 1994; Kim, 1997)와 보강공법 및 안전을 평가기법을 제안한 연구(Yoo et al., 1997; Jang, 2006) 등이 있다.

국외 연구사례로는 평행하게 배치된 원형터널의 간격 및 크기에 따른 변형을 지침으로 제시한 연구(Peck, 1969)와 필라 상재하중과 터널의 영향범위를 모형시험을 통해 확인한 사례(Adachi et al., 1993)가 있으며, 얇은 병설터널에서 터널의 깊이와 중앙 필라부의 간격이 파괴 메카니즘에 미치는 영향을 분석한 연구가 있다(Sterpi & Cividini, 2004).

그러나 현재까지 국내·외에서 진행되어온 연구사례들은 병설터널의 거동이나 설계 영향 인자 등에 대한 평가로써 실제 시공 조건을 제한적으로 고려할 수밖에 없는 축소모형 실험이나 일부 영향 인자들만 고려한 2차원 또는 3차원 수치해석 연구에 국한되어 실제적으로 실무에 적용 가능한 정량적 데이터를 제공하는 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 근접터널 시공으로 인한 터널 근접도가 가장 높은 갱구부 구간에서 필연적으로 형성되는 필라에 대한 안정성 평가는 연구사례가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 상대적으로 지반조건이 양호한 본

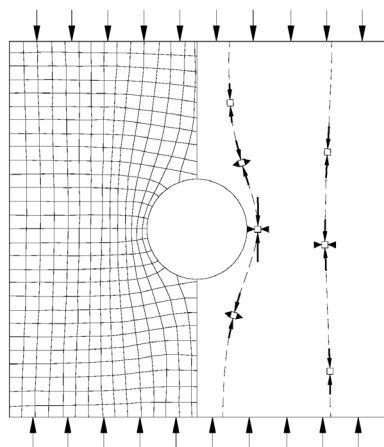


Fig. 1. Principal stress of circular hole

선구간보다는 근접도가 높은 갱구부 구간에 대하여 수치 해석적 방법으로 지반조건 및 필라폭(Pillar width) 변화에 따른 필라의 안정성을 평가하고, 터널 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 단일공동의 응력-변형 상태

지하의 암반에 공동을 굴착하면 그때까지 암반 내에 존재하던 응력이 교란되어 공동의 매우 가까운 암반에는 새로운 응력 상태가 발생한다. 이 새로운 응력장을 설명하는 방법의 하나로 주응력선(Principal stress trajectory)을 이용하는 방법이 있다. 이 방법에서 주응력선이란 응력을 받는 탄성체 내부에 주응력 작용 방향을 이어서 그린 가상의 선으로 나타낼 수 있으며, 이는 물의 흐름을 유선으로 표현하는 방법과 유사하다.

Fig. 1은 단일 원공이 있는 탄성판에 일축 응력을 주었을 경우에 원공(circular hole) 주변에 발생하는 최대 및 최소 주응력선을 나타낸 것이며, 공동 외경의 대략 3배의 크기를 갖는 영역 외측에서는 유선이 장애물의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 이 현상은 일반적인 응력장에 대해서도 마찬가지이다. 결국, 공동 중심에서 반경의 대략 3배 이상 떨어진 암반 내의 점에는 공동의 영향을 거의 확인할 수가 없을 것이다(Hoek & Brown, 1980).

2.2 병설터널의 응력-변형 상태

병설터널의 굴착에 의한 주변응력 분포 형태는 원활한 유체 흐름 속에 3개의 교각을 설치했을 경우와 매우 유사하다.

즉, 다수의 평행한 터널 사이의 필라(Pillar)에서 발생하는 응력전달은 이 유선의 흐름과 매우 유사한 거동을 하며, 이 유사성을 논한 것으로는 인접한 터널 사이의 필라에 대한 응력선 분기 및 연직응력의 집중도 등을 다룬 이론으로 지류론(Tributary theory)이 있다.

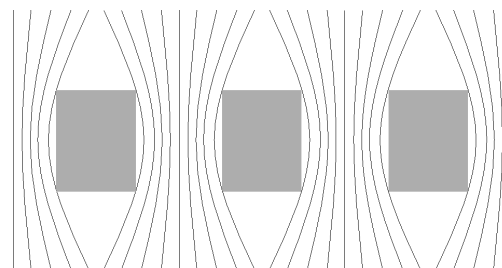


Fig. 2. Flow line shape in fluid flow

2개의 인접 터널 사이의 필라 형상은 터널의 형상과 간격에 의하여 결정되며, 필라 내부의 응력분포는 이 필라 형상의 영향을 가장 크게 받는다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 원형터널 필라에 대한 평균 필라응력 산정 식은 Eq. (1)과 같다.

$$\sigma_p = (1 + W_0/W_p) p_z \quad (1)$$

여기서, σ_p 는 평균 필라 응력, W_0 는 공동의 직경, W_p 는 필라폭, p_z 는 상재하중이다.

Fig. 4는 W_0/W_p 의 변화에 따른 필라부에서의 응력변화를 나타낸 것으로 필라의 폭이 좁아짐에 따라 평균 필라 응력 (σ_p)이 증가하며, 터널이 서로 접근함에 따라 경계에 대한 응력집중도 (σ_b/σ_p)의 최대치는 감소한다. 또한, $W_0/W_p = 5$ 인 경우처럼 필라폭이 매우 좁고 긴 경우 필라 중앙부의 응력 상태는 1축 응력 상태 즉, $\sigma_1 = \sigma_p$ 및 $\sigma_3 = 0$ 의 상태와 거의 같아진다.

2.3 Hoek & Brown 파괴기준

Hoek & Brown(1980)은 지반 내 응력 형태 및 암반의 거동을 규명하기 위하여 기존 여러 이론(Griffith, 1921; Griffith,

1924; McClintock & Walsh, 1962)을 바탕으로 많은 시행착오 끝에 암석 파괴에 따른 주응력 사이의 실험적 관계를 Eq. (2)와 같이 제안하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (2)$$

여기서, σ_1 은 파괴 시의 최대주응력, σ_3 는 공시체에 부여한 최소주응력, σ_c 는 무결함 공시체 암석의 일축압축강도, m 과 s 는 암석의 성질과 응력 σ_1 및 σ_3 을 가하기 전에 암석이 받고 있던 파괴의 정도에 의존하는 정수이다.

Hoek & Brown(1980)은 경험적 파괴기준의 적용성 검토 및 지하굴착 공동 주변의 암반 파괴 거동을 해석하기 위해 여러 가지 종류의 암석에 대하여 시행된 기존의 삼축시험결과들을 분석하였으며, 서로 다른 종류의 암석 및 같은 종류의 암석으로부터 다른 시료의 삼축시험결과를 비교하기 위하여 모든 시험 데이터는 파괴 시의 주응력을 각각 시료의 일축압축강도로 나누어 무차원의 형식으로 바꾸어서 사용했다. 따라서 Eq. (2)에 무결함 암석에 대한 $s=1$ 을 적용하면 무결함 암반 강도는 Eq. (3)로 구할 수 있다.

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{m \sigma_{3n} + 1} \quad (3)$$

여기서, σ_{1n} 및 σ_{3n} 은 무차원화한 주응력으로써 각각 σ_1/σ_c 및 σ_3/σ_c 이다.

2.4 필라의 안정성 평가방법

수치해석을 통한 정밀 검토방법으로는 외부에서 발생하는 하중을 지지하는 지보재로서의 역할을 평가하는 지표침하비 검토와 시공조건에 따른 지표침하 체적 분석을 통해 터널 간의 간섭체적비를 검토하는 방법, 그리고 필라에 작용하는 최대 및 최소주응력과 필라 강도와의 관계를 나타내

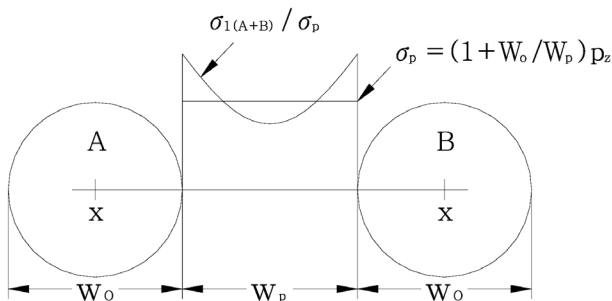


Fig. 3. Max. principal stress determined by average pillar stress and stress concentration of tunnel

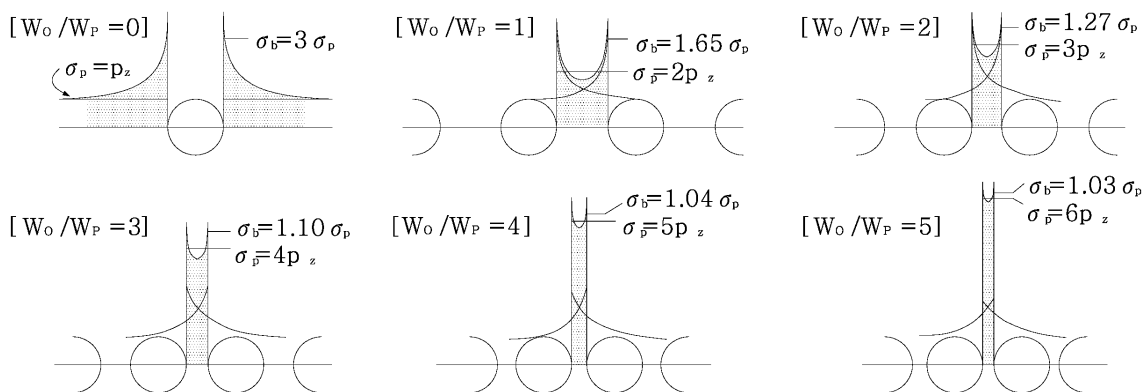


Fig. 4. Stress change of circular tunnel pillar (Obert & Duvall, 1967)

는 강도/응력비를 검토하는 방법 등이 있다. Table 1, Table 2는 병설터널의 국내외 터널 이격거리 적용 사례를 나타낸 것이다.

2.4.1 지표침하비(Surface settlement ratio)

터널 굴착으로 인해 원지반은 응력이완이 발생하며, 변위 발생에 따른 지표면의 침하를 유발하게 된다. 즉, 지표침하량은 터널 내부 변위량과 동일 개념으로 볼 수 있으며, 필라부의 지표침하량이 주변 터널 지표침하량보다 작을 경우 굴착으로 인한 이완하중 및 상재토압에 대한 주 지보역할은 터널이 부담하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 터널 주변 지반조건 및 필라의 최소두께를 변화시켜가며, 수치해석을 수행하고, 필라 상부 지표침하량(D_p)에 대한 터널 상부 지표면 침하량(D_s)의 비를 나타낸 지표침하비 분석을 통하여 필라가 터널 전체 안정성에 미치는 영향을 평가하였다.

Table 1. Tunnel distance length (domestic & foreign)

Division	Ground condition	Distance
Domestic	Normal	2.0~3.0D
	Perfect elastic body	2.0D
	Soft ground	5.0D
Foreign	Granular Sandstones	1.5D
	Cohesive Gravel stratum	1.82D
	Clay	6.0D

Table 2. Construction case of domestic parallel tunnel

Tunnel	Diameter (D)	Distance	Rock condition
Guksabong	10.95 m	0.69D	Soft & Hard rock
Beobgy	12.11 m	0.61D	Hardrock
Jungjukdo	13.22 m	0.30D	Hardrock
Hongjimun	14.5 m	0.34D	Hardrock
Sanbok	10.2 m	0.44D	Hardrock
Jahamun	11.46 m	0.57D	Hardrock
Suckjung	7.45 m	0.27D	Hardrock

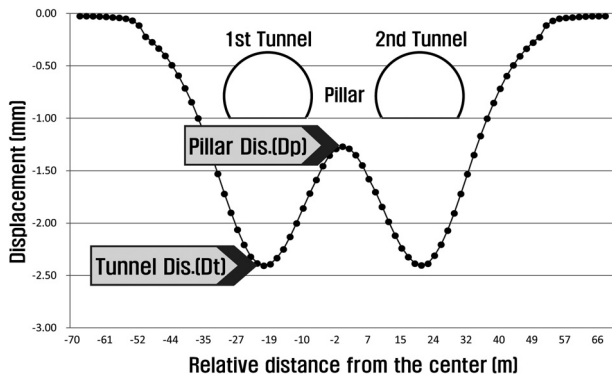


Fig. 5. Volume of interference

2.4.2 간섭체적비(Interference volume ratio)

지반의 초기 응력은 터널 굴착에 따른 이완영역의 확대로 응력 재분배가 발생하게 되며, 어느 일정 시간 후에는 안정화에 이른다. 그러나 인접하여 2차 터널 굴착이 진행된다면 기존 응력 상태에 변화가 발생하며, 2차 터널로 인해 증가한 지반의 변형은 더 큰 응력집중을 유발하게 된다. 즉, 병설터널 굴착에서 필라부는 1차 및 2차 터널의 응력 교차영역으로서 안정성은 터널 간 거리가 좁을수록 지반의 강도가 약할수록 낮아지게 되며, 터널 간 상호 간섭영향은 커질 것이다.

Fig. 6에서와같이 간섭체적비는 2차 터널을 단일터널로 가상 시 발생하는 지표면 침하의 체적(V_{s2})과 병설터널에서 1차 터널 굴착 후 2차 터널의 굴착으로 인하여 추가적으로 발생하는 지표침하의 증가체적(dV_s)의 비(V_{s2}/dV_s)를 나타낸 것이다. 이는 병설터널에서 2차 터널 굴착으로 발생하는 이완영역의 확대로 인한 응력집중이 1차 터널의 안정성에 미치는 영향 정도를 의미하는 것이며, Eq. (4)로 나타낼 수 있다.

$$V_i = \frac{V_{s2}}{dV_s} \quad (4)$$

여기서, V_i 는 간섭체적비, V_{s2} 는 2차 터널을 단일터널로 가상 시 발생하는 침하체적, dV_s 는 병설터널에서 1차 터널 굴착 후 2차 터널 굴착에 의하여 증가하는 침하체적이다.

2.4.3 강도/응력비(Strength/Stress ratio)

병설터널 굴착에 따른 필라의 응력변화로 인해 발생하는 불안정성은 Hoek & Brown(1980) 파괴포락선에 의해 Fig. 7과 같이 설명될 수 있다.

A점은 굴착 이전의 초기 응력 상태이며, B점은 터널 굴착 시공 후의 필라 응력 상태이다.

근접 병설터널 굴착 시 필라의 응력거동은 연직방향의 응력집중과 수평 방향의 응력해방 단계를 거쳐 Hoek & Brown의 파괴포락선에 근접하게(A→B) 되며, 이때 최소주응력

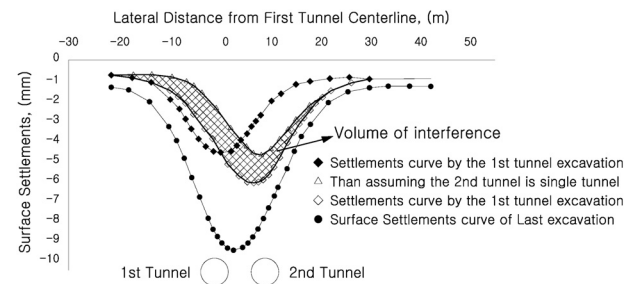


Fig. 6. Volume of interference

에 대응하는 암반강도(C점)와 작용 응력인 최대주응력의 관계에 따른 강도/응력비 산정을 통해 필라의 안전율을 산정할 수 있다.

Fig. 8은 필라 중앙단면에서의 주응력 σ_1 및 σ_3 의 분포와 강도/응력비의 분포를 보여주고 있다.

어느 한 점에서의 강도/응력비가 필라 전체의 안전율과는 다를 수 있다. 그러나 높은 응력을 받고 있는 필라에서는 필라 측벽 중앙부에서 파괴가 시작되어, 파괴된 재료에 그때까지 작용하고 있던 하중이 필라의 중심부를 형성하고 있는 암반으로 전이된다면, 필라 중심부의 강도/응력비가 1.00 이하로 불안정해질 수 있고 결국 필라 전체의 붕괴로 이어질 수 있다.

이러한 진행성 파괴나 응력의 전이과정을 고려하면 필라 중앙단면에서의 평균강도/응력비가 1.00 이하로 될 경우 파괴가 필라 전체로 전이하여 불안정해지며 최종에는 붕괴될

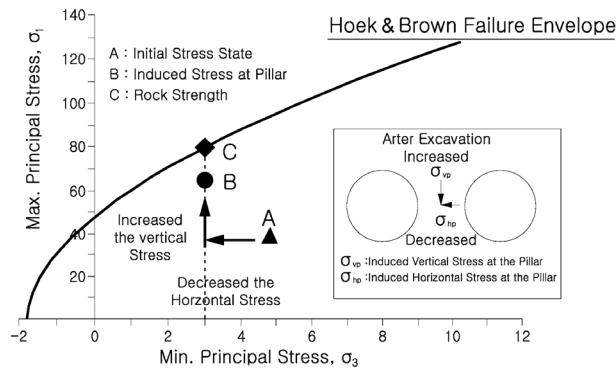


Fig. 7. Instability by stress change of pillar

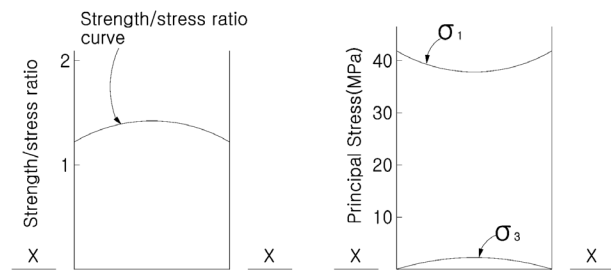


Fig. 8. Principal stress and strength/stress ratio

Table 3. Parameters applied to analyze the average strength/stress ratio

Division	Hard Rock	Moderate Rock	Soft Rock	Weathered Rock	Crushed Weathered	
RMR*	61 ~ 80	41 ~ 60	21 ~ 40	0 ~ 20	-	
σ_c (Bieniawski, 1979)	Range (MPa)	50 ~ 100	25 ~ 50	10 ~ 25	2 ~ 10	1 ~ 2
	Average (MPa)	75	37.5	17.5	6.0	1.5
Hoek-Brown constant	m	8.500	1.700	0.340	0.090	0.017
	s	0.1	0.004	0.0001	0.00001	0
Pillar width	0.2D, 0.4D, 0.6D, 0.8D, 1.0D, 1.5D					

* RMR : Rock Mass Rating

수가 있다(Hoek & Brown, 1980).

따라서 필라 중앙단면에서의 평균 강도/응력비를 산정하기 위하여 지반조건별 암반강도 및 발생 응력을 산정하고, 필라폭 변화에 따른 필라의 안전율 변화 경향을 분석하였다. 분석 시 활용한 암석의 일축압축강도는 Bieniawski(1976)에 의해 제안된 값을 사용하고, Hoek & Brown(1980)의 파괴기준을 이용하여 필라의 파괴강도를 산정하였다. 지반의 재료학적 특성에 따라 결정되는 m 과 s 는 세립의 결정질 화성암에 대해 제안된 값을 적용하였으며, Table 3과 Eq. (5)는 분석에 적용된 대꽃값과 Hoek & Brown(1980)에 의해 제안된 파괴강도 산정식이다.

$$\sigma_{1s} = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (5)$$

여기서, σ_1 은 파괴 시의 최대주응력, σ_3 는 공시체에 부여한 최소주응력, σ_c 는 무결함 공시체 암석의 일축압축강도, m 과 s 는 암석의 성질과 응력 σ_1 및 σ_3 을 가하기 전에 암석이 받고 있던 파괴의 정도에 의존하는 정수이다.

3. 수치해석 방법

기존터널에 근접하여 새로운 터널을 시공하거나 동시에 굴착이 되는 경우 두 터널 간의 이격거리가 가까울수록 영향범위의 중첩성에 의한 응력집중은 터널 안전성에 큰 영향을 미칠 것이다. 따라서 병설터널 필라부의 안전도 평가는 터널 전체의 붕괴 여부를 판단할 수 있는 가장 중요한 요소 중 하나이며, 필라폭 결정은 지반조건, 이격거리, 단면의 형상 및 크기, 시공방법 등을 다각도로 고려해야 하는 매우 복잡한 문제이다.

특히, 터널 갱구부 구간은 토피가 얇고 지형 및 지질조건이 불리하여, 여러 가지 불안정 요소들로 인한 복잡한 거동을 하는 구간이며, 지보패턴 및 보강공법 또한 다양하다. 이

린 모든 영향요소를 고려할 수는 없지만, 국내에 시행되고 있는 근접 병설터널 거의 대부분은 갱구부 구간에서 최소 이격 거리를 갖게 되므로 실제 설계 및 시공에 유용한 자료를 제공하기 위해서 지형 조건을 갱구부로 설정하고, 범용 유한요소 해석프로그램인 VisualFEA를 이용한 2차원 해석을 통하여 터널 이격거리에 따른 필라의 거동특성을 분석하였다.

3.1 수치해석 모델

실제 터널구조물은 종방향 선형구조물로서 평면변형(Plain strain) 조건을 만족한다는 점과 다양한 해석조건들의 적용 편의성을 위해 2차원 해석을 실시하였으며, 매개변수로서 터널 간 이격거리를 터널직경의 0.2D, 0.4D, 0.6D, 0.8D, 1.0D, 1.5D 등 6가지 경우로 하고, 주변 지반 및 기초지반은 경암(XHR), 보통암(MR), 연암(SR), 풍화암(WR), 완전풍화(CW) 조건 등 총 5가지에 대하여 조건별로 구분 검토하였다. 상부 지표면까지의 토피고는 터널 설계 시 가장 많이 사용되는 지보등급 산정 시의 영향거리인 터널 폭의 1.0D까지를 토사층으로 모델링 하였다.

3.1.1 기하학적 형상요소

본 연구에서 병설터널 시공에 따른 필라의 거동특성 평가

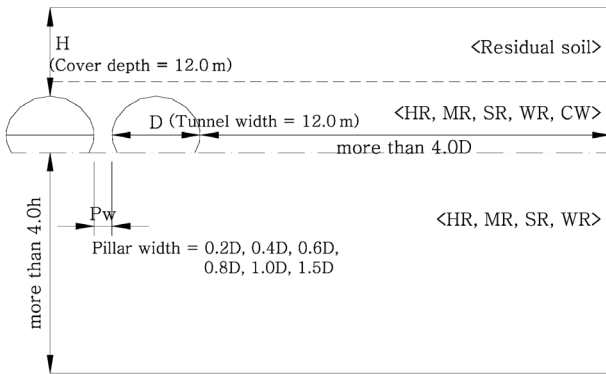


Fig. 9. Geometric shape condition

를 위한 해석 단면으로는 현장조건을 최대한 반영하기 위하여 설계 및 시공에 일반적으로 널리 사용되고 있는 표준단면도 (R=5.725 m, 터널의 폭 D=11.86 m(≒12.0 m), 높이 h=7.99 m(≒8.0 m))를 적용하였고, 해석영역은 Fig. 9에서와같이 좌우 방향으로 4.0D 이상, 하부로 4.0h 이상을 설정하였다.

3.1.2 지반 재료학적 요소

터널 갱구부 구간에 대한 필라부 강도특성 평가를 위해 적용된 지반조건으로 터널 상부지층은 갱구부 특성상 토사 및 풍화대가 주로 분포하게 되므로 완전풍화에 의해 토립자화된 풍화토층을 적용하였고, 터널 본선구간은 경암, 보통암, 연암, 풍화암 및 완전풍화의 총 5등급으로 분류하였다. 또한, 지지층의 영향을 최소화하고 필라부의 거동을 중점적으로 분석하기 위하여 터널 하부 기반암층은 본선부 보다 견고한 층을 설정하였다.

Table 4의 지반 강도정수는 국내 현장여건에 부합하고, 합리적인 해석결과 도출을 위해서 기존 설계 및 시공사례 중 비교적 신뢰도가 높은 총 34개 과업에 적용된 강도정수 값들을 산술 평균하여 적용하였다.

3.2 해석방법

3.2.1 해석단면 및 경계조건

일반적으로 터널 좌·우측 방향의 해석영역은 암반의 초

Table 4. Applied material properties to analysis

Div.	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus (MPa)	Poison's ratio (ν)
XHR	27	2,000	50	1.8×10 ⁴	0.20
HR	26	1,600	45	9.0×10 ³	0.22
MR	25	900	40	5.5×10 ³	0.25
SR	23	300	35	1.8×10 ³	0.28
WR	21	60	32	2.0×10 ²	0.30
CW	18	15	28	5.0×10 ¹	0.33

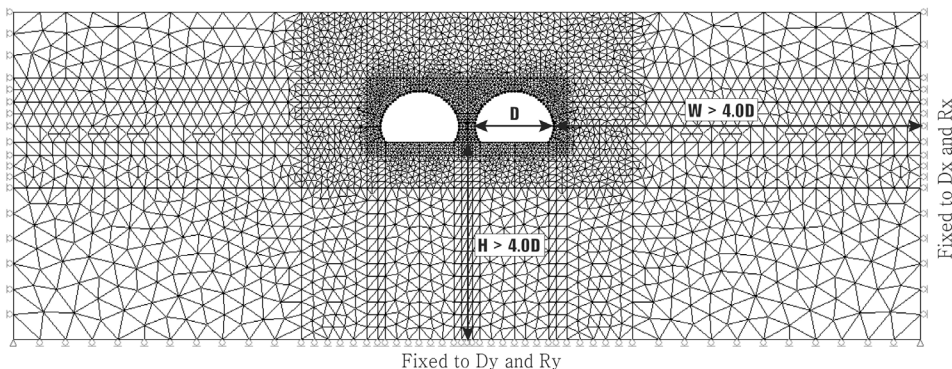


Fig. 10. Analysis range and Boundary conditions (in case 0.2D)

기응력 상태 및 터널 단면의 형상과 크기, 지반조건 등의 영향을 받으므로 굴착에 의한 영향이 최소가 될 수 있도록 충분한 영역을 설정하였다.

따라서 병설터널 필라부 거동특성 분석을 위한 해석영역은 문헌 및 기존 자료를 바탕으로 측방 4.0D, 하부 4.0h 이상 적용하고, 상부 토피고(H : depth of earth cover)는 터널 지보패턴 선정 시 적용하는 영향범위를 고려하여 1.0D까지 모델링 하였다.

해석격자망의 경계조건은 좌·우 측벽은 x방향 변위 및 회전 고정으로 하고, y방향 변위는 허용하였다. 하부는 y방향 변위와 회전에 대하여 고정으로 하고, x방향 변위는 허용하였다. 또한, 하부 양단 모서리는 x, y방향 변위 및 회전에 대하여 고정으로 설정하였다.

터널 해석 시 요소의 크기는 해석결과에 영향을 미치게 되며, 지반이 불량한 경우 안정성은 더 작게 평가되는 것이 일반적이다. 따라서 Fig. 11에서와 같이 해석오차범위를 줄이고, 보다 정밀한 분석을 위해 필라 및 터널 주변부의 요소 크기는 0.5 m 이하, 그 이상 영역은 1.0 m~4.0 m 크기로 설정하였다.

3.2.2 굴착방법 및 시공과정 모형화

해석에 적용된 굴착방법은 상하반 분할 굴착공법을 적용하고, 1차(좌측) 터널 굴착 완료 후 2차(우측) 터널 굴착 순으로 진행하였다. 각 터널별 해석단계는 굴착 → 연성 슛크리트 → 강성 슛크리트 타설 순으로 단순화하였다.

Table 5. Load distribution Factors in analysis (%)

Div.	Excavation	Soft shotcrete	Hard shotcrete	RMR
XHR	70	15	15	81~100
HR	60	20	20	60~80
MR	60	20	20	40~60
SR	50	25	25	20~40
WR	40	30	30	0~20
CW	30	40	30	-

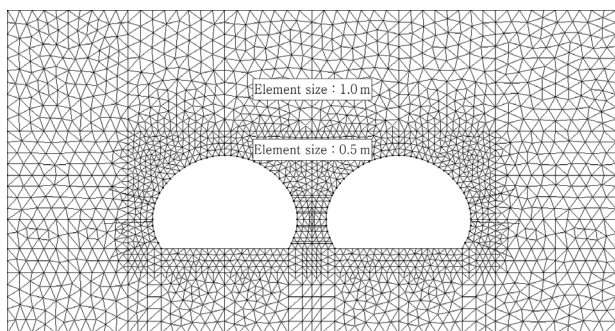


Fig. 11. Elements size (in case 0.2D)

Table 5는 해석에 적용된 하중분배율을 나타낸 것이며, 3차원 터널의 굴착 단계별 시공과정을 2차원으로 적절히 묘사하기 위하여 굴착에 의해 발생하는 응력 분배 정도를 제안한 식(Jang & Moon, 1998)에 의해 산정한 결과이다.

4. 분석 및 고찰

4.1 지표침하비 분석

터널의 하중분담 정도와 독립적 거동 시점의 정도를 나타내는 지표침하비 분석 결과 지반강도가 높을수록, 필라폭

Table 6. The analysis results of Surface settlement ratio

Pillar width	CW	WR	SR	MR	HR
0.2D	0.858	0.897	0.935	0.942	0.945
0.4D	0.823	0.943	1.080	1.119	1.137
0.6D	0.890	0.975	1.284	1.362	1.405
0.8D	0.951	1.272	1.550	1.681	1.764
1.0D	0.985	1.530	1.896	2.109	2.259
1.5D	1.233	2.771	3.333	4.039	4.681

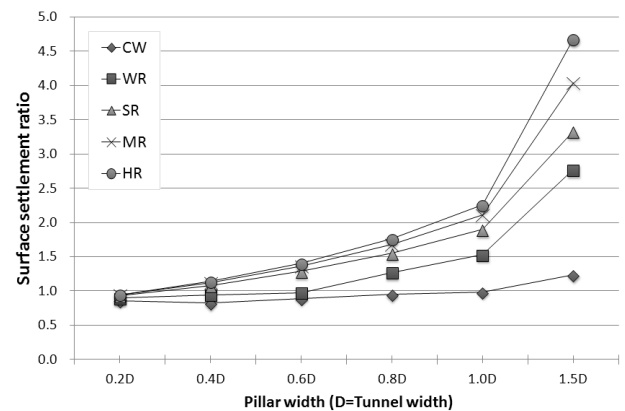


Fig. 12. Surface settlement ratio analysis under pillar width change

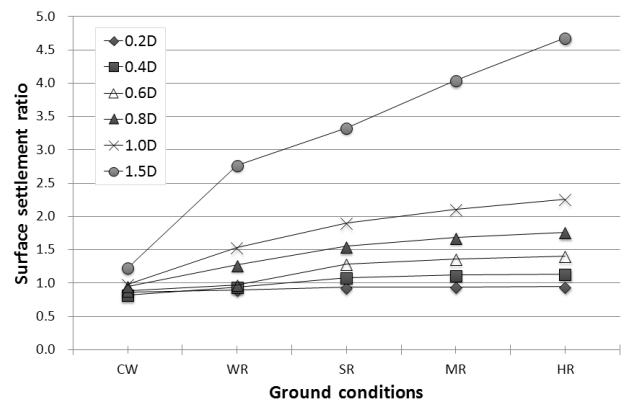


Fig. 13. Surface settlement ratio analysis under ground conditions

이 증가할수록 지표침하비는 증가하는 경향을 보이고, 터널 안정성 확보에도 유리한 것으로 나타났으며, 안전율 산정 결과는 Table 6과 같다.

또한, 지반조건 및 필라폭에 따른 지표침하비의 안전율 분포 경향은 Fig. 12, Fig. 13과 같다.

경암에서 연암 지반인 경우 필라폭 0.4D(Pw=4.8 m) 이상, 풍화암의 경우 필라폭 0.8D(Pw=9.6 m) 이상, 그리고 완전풍화 상태의 경우 1.5D 이상(Pw=18.0 m) 확보 시 침하비 1.0 이상으로 두 터널은 독립적 거동을 하는 것으로 확인되었다. 그러나 완전풍화 지반에서는 1.5D 확보 시에도 터널 침하량이 31.78 mm 이상 과도하게 발생하는 것으로 나타났으며, 터널 안정성 확보를 위해 설계 및 시공 시 갱구 위치 및 지보타입 변경, 보강공법 강화 등 안정성 확보 대책의 수립이 필요한 것으로 나타났다.

4.2 간섭체적비 분석

터널 주변 지반조건 및 필라폭 변화에 따른 터널 상호 간섭영향을 분석하기 위하여 1차 및 2차 터널을 포함하는 양방향 터널 굴착과 2차 터널만 존재하는 단일터널 굴착 시에 대하여 각각 수치해석을 실시하고, 발생한 지표면 침하 곡선의 적분을 통하여 침하체적을 계산한 후 간섭체적비를 분석하여 터널 상호 간의 간섭영향 정도를 평가하였다.

단일터널 지표면 침하체적(V_{s2})에 대한 병설터널 굴착 시 발생하는 침하 증가체적(dV_s)의 비(V_{s2}/dV_s)인 간섭체적비가 1.0 이상일 경우 터널 상호간 간섭영향이 미미하며, 안정한 것으로 판단하였고, 그 결과는 Table 7과 같다.

또한, 지반조건 및 필라폭에 따른 간섭체적비의 안전율 분포 경향은 Fig. 14, Fig. 15와 같다.

수치해석에 의한 지반조건별 간섭체적비 분석 결과 간섭체적비가 1.0 이하로 터널 상호간 간섭영향이 발생하는 필라폭은 보통암 및 경암의 경우 0.4D 이상, 연암일 경우 0.6D 이상, 풍화암일 경우 0.8D 이상으로 나타났으며, 완전풍화 상태일 경우는 1.5D 확보 시에도 상호 간섭영향이 발생하며, 터널 안정성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 7. The analysis results of Interference volume ratio

Pillar width	CW	WR	SR	MR	HR
0.2D	0.757	0.873	0.910	0.943	0.962
0.4D	0.832	0.944	0.994	1.016	1.029
0.6D	0.893	0.975	1.010	1.045	1.061
0.8D	0.941	1.005	1.019	1.054	1.070
1.0D	0.970	1.011	1.021	1.043	1.055
1.5D	0.997	1.007	1.012	1.018	1.025

간섭체적비의 수치 해석적 검토를 통해 근접 병설터널 계획 시 최소 필라폭 결정에 대한 간접적인 검토방법으로 회귀분석식을 Eq. (6)과 같이 제안하였다.

$$V_i' = a \ln(\alpha) + b \quad (6)$$

여기서, V_i' 는 필라폭에 따른 간섭체적비, a, b 는 암반의 재

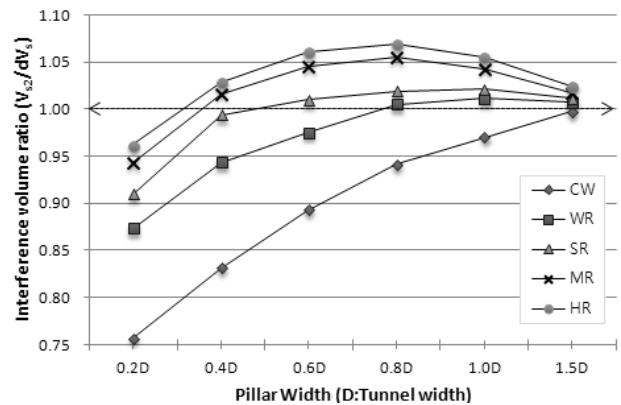


Fig. 14. Interference volume ratio analysis under pillar width change

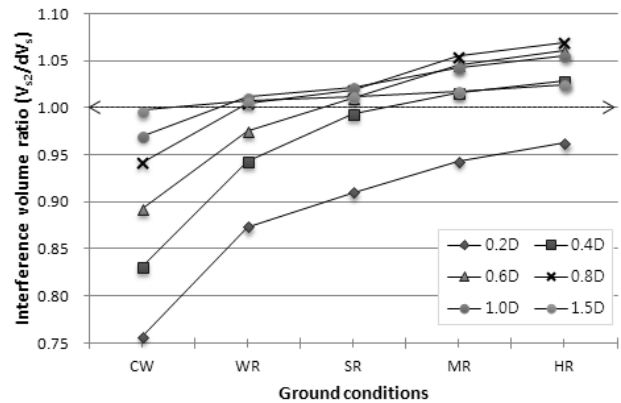


Fig. 15. Interference volume ratio analysis under ground conditions

Table 8. Constant α under applied pillar width

Pillar width	0.2D	0.3D	0.4D	0.5D	0.6D	0.7D	0.8D
α	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Pillar width	0.9D	1.0D	1.1D	1.2D	1.3D	1.4D	1.5D
α	4.5	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0

Table 9. Constant a, b under ground conditions

Div.	CW	WR	SR	MR	HR
RMR	0~5	0~20	21~40	41~60	61~80
a	0.1367	0.0790	0.0572	0.0483	0.0437
b	0.7485	0.8826	0.9315	0.9668	0.9857
R^2	0.9937	0.9568	0.8006	0.6185	0.5405

로적 성질을 나타내는 상수, α 는 필라폭 두께에 따른 변수를 나타낸다.

Table 8은 적용 필라폭에 대한 변수 α 의 값을 나타낸 것이며, Table 9는 지반조건에 따라 구분 적용되는 상수값을 나타내고 있다. 제안된 평가식은 양적 변화를 나타내는 간섭체적비 결과를 토대로 한 것이며, 상호간섭 영향 유무를 판단하는 결과를 제공하는 식으로, 초기설계 단계에서 최소 필라폭 예측 시 유용하게 이용될 수 있다.

4.3 평균 강도/응력비 분석

본 연구에서는 진행성 파괴나 응력의 전이과정을 고려하

Table 10. The analysis results of average strength /stress ratio

Pillar width	CW	WR	SR	MR	HR
0.2D	0.520	0.570	0.750	1.930	9.220
0.4D	0.510	0.790	1.370	4.160	23.120
0.6D	0.550	0.960	2.010	6.510	37.560
0.8D	0.600	1.130	2.520	8.580	50.780
1.0D	0.640	1.270	2.940	10.290	62.380
1.5D	0.730	1.540	3.790	13.970	88.800

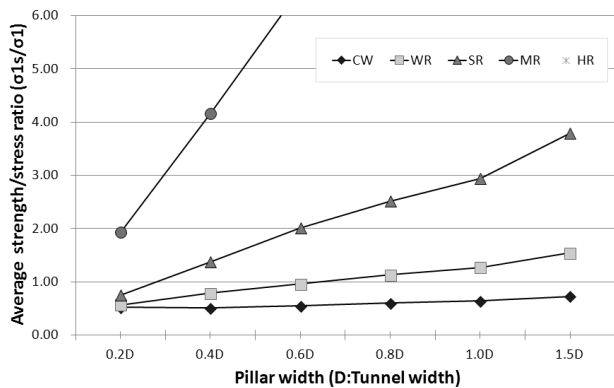


Fig. 16. Average strength/stress ratio analysis under pillar width change

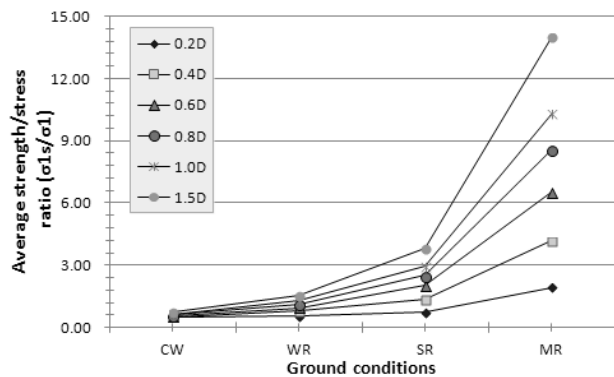


Fig. 17. Average strength/stress ratio analysis under ground conditions

여 Hoek & Brown(1980)이 제안한 일반적인 안전율(F.S=1.0) 개념으로서 필라 중앙 단면에서의 평균강도/응력비를 산정하여 터널 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 안전율 산정 결과는 Table 10과 같다. 또한, 지반조건 및 필라폭에 따른 평균강도/응력비 분포 경향은 Fig. 16, Fig. 17과 같다.

지반조건별 필라의 최소 두께 변화에 따른 필라 중앙단면의 평균강도/응력비를 산정하여 터널 거동 분석 및 평가를 실시한 결과 완전풍화 조건에서는 0.2D~1.5D의 모든 필라폭에서 최대 안전율 0.730 이하로 불안정한 것으로 확인되었으며, 암반조건에서 터널 안정성 유지가 가능한 필라의 최소 두께는 풍화암의 경우 0.8D(Pw=9.6 m) 이상, 연암의 경우 0.4D(Pw=4.8 m) 이상 확보되어야 하며, 보통암 및 경암 지반에서는 필라폭 0.2D(Pw=2.4 m) 이상일 경우 필라는 안전한 것으로 나타났다. 여기서, 경암 필라의 안전율은 최소 9.220 이상으로 충분한 안전율을 확보가 가능하므로 분석에서 제외하였다.

4.4 분석에 대한 고찰

지반조건 및 필라폭 변화에 따른 수치해석을 실시하고, 필라가 터널 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 지표침하비 및 간섭체적비, 평균강도/응력비를 분석하였으며, 안전율 F.S=1.0을 기준으로 지반조건에 따른 적정 필라폭에 대해 고찰하였다. Fig. 18은 분석 항목별 안전율 분포 경향을 나타낸 것이다.

종합분석 결과 평가항목별 안전율 분포 경향은 거의 유사한 경향을 보이며, 간섭체적비의 안전율이 다소 크게 산정되었다. 이는 침하곡선의 체적산정 시 상대적으로 강도가 높은 연암 이상 지반에서 상부 토사층의 용기 발생에 따른 증가 체적의 감소로 인해 안전율이 다소 크게 평가된 것으로 판단된다.

안전율 F.S=1.0을 기준으로 터널 상호 간 간섭영향이 최소화되는 적정 필라폭 산정 결과, 보통암 이상의 경우 0.20D~

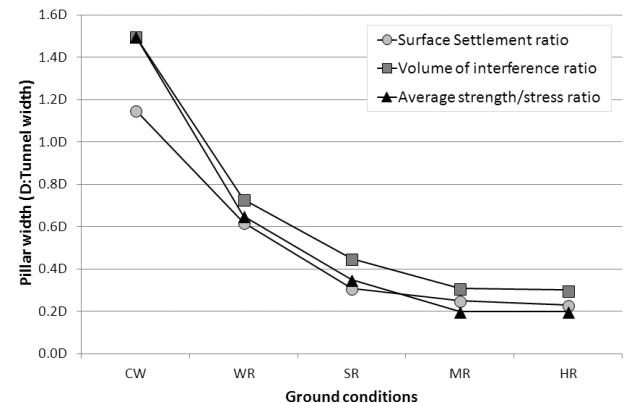


Fig. 18. Estimated results of Pillar width (F.S=1.0)

0.31D, 연암의 경우 0.31D~0.45D, 풍화암의 경우 0.62D~0.73D로 나타났다. 그러나 완전풍화 지반의 경우 1.50D 확보 시에도 불안정성을 나타내며, 지표침하비 결과에서는 1.15D 이상 시 필라에 대한 응력집중이 해소되는 것으로 확인되었으나, 과도한 변위 발생을 고려해 볼 때 터널 및 필라의 지반 강도가 연약함에 따라 터널과 필라가 전체적으로 침하하여 상대적 침하비가 크게 산정된 것으로 판단된다. 따라서 부득이하게 완전풍화 지반에 갱구가 형성될 경우, 보다 신중하고 정밀한 검토를 통한 안정화 대책을 수립하고 시공 중 계측을 통하여 그 안정성을 확인하여야 할 것으로 판단된다.

이상으로 필라의 안정성이 터널 거동에 미치는 영향 정도에 대한 종합적 분석 결과 터널 안전성 확보를 위한 지반 강도별 최소 필라폭은 터널 주변 지반이 경암 및 보통암 지반의 경우 0.3D, 연암 지반의 경우 0.45D, 풍화암 지반의 경우 0.75D 이상, 완전풍화 지반의 경우 최소 1.5D 이상으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 현장조건을 합리적으로 반영할 수 있도록 하기 위하여 기존 연구에서 고려하지 못한 갱구부 구간의 지형 특성과 다층 지반조건을 적용하고, 지반강도 및 필라폭 변화에 따른 수치해석 결과와 회귀분석 및 Hoek & Brown 파괴기준을 활용한 정량적 분석을 통해 필라의 안정성이 터널 거동에 미치는 영향을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 안전율(F.S=1.0)에 따른 평가항목별 종합분석 결과 풍화암 이상 지반에서의 안전율 분포 경향은 대체로 유사하나, 간섭체적비에서 약간 크게 산정되었다. 이는 침하곡선의 체적산정 시 상부 토사층의 용기로 인해 증가체적이 감소하였기 때문으로 판단되며, 실제 현장조건을 적절히 반영하고 있고, 안전측 값을 제공하므로 초기 검토 시 유용한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 설계 및 시공을 위한 초기 단계에서 최소 필라폭 결정 시 활용 가능한 안전율 평가식(Eq. (6))을 제안하였으며, 터널 형상 및 간격, 지반조건 상관계수를 변화시켜 현장여건에 적합한 필라폭 및 최적 단면을 간편하게 산정할 수 있다.
- (3) 지반강도별 안정성 확보가 가능한 최소 필라폭은 경암 및 보통암, 연암, 풍화암 지반에서 각각 0.3D, 0.45D, 0.75D 이상으로 확인되었으며, 완전풍화 지반의 경우에는 전체 변형에 따른 과다변위 발생이 예상되므로 최소 1.5D 이상 확보하고, 갱구 형성 시 정밀검토에 의한 보강공법

적용이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

본 논문은 갱구부 구간의 지형 및 지질 특성을 고려한 근접 터널의 필라폭 결정을 위한 기초 연구로써 향후 본 연구 결과를 바탕으로 다양한 지형 특성과 터널 시공방법, 필라 보강공법 등에 대한 추가적인 연구를 수행한다면 다양한 현장조건에서 근접 터널의 적용성이 확대될 것으로 기대된다.

References

1. Adachi, T., Kimura, M. and Osada, T. (1993), Interaction between multitunnels under construction, Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, pp. 51~60.
2. Bieniawski, Z. T. (1976), Rock mass classification in rock engineering, in exploration for rock engineering, Proc. of the Symp., (ed. Z. T. Bieniawski) 1, Cape Town, Balkema, pp. 97~106.
3. Griffith, A. A. (1921), The phenomena of rupture and flow in solids, Phil. Trans. Royal Soc., London, Series A, Vol. 221, pp. 163~198.
4. Griffith, A. A. (1924), Theory of rupture, Proc. Int. Congress Appl. Mech., Delft, pp. 55~63.
5. Hoek, E. I. and Brown, E. T. (1980), Underground excavations in rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 87~227.
6. 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, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 10, No. 3, pp. 231~234 (in Korean).
7. Jang, B. S. (2006), A study on the estimation of the behaviors of the pillar between twin tunnels, Ph D. dissertation, Hongik University, pp. 29~41 (in Korean).
8. Jang, S. B. and Moon, H. K. (1998), A study on the quantitative evaluation of the load distribution factors considering the design conditions of tunnel - especially for the ring-cut excavation method, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 14, No. 5, pp. 5~15 (in Korean).
9. Kim, H. M. (1997), Effect of interference and ground movement by twin tunnelling, Journal of the Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp. 136~142 (in Korean).
10. McClintock, F. A. and Walsh, J. B. (1962), Friction on Griffith cracks under pressure, Proc. 4th US National Congress Appl. Mech., New York, Vol. 2, pp. 1015~1021.
11. Obert, L. and Duvall, W. I. (1967), Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, New York, 650 p.
12. Peck, R. B. (1969), Deep excavations and tunnelling in soft grounding, State-of-the-Art Report, Proc. 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 225~290.
13. Sterpi, D. and Cividini, A. (2004), A physical and numerical investigation on the stability of the shallow tunnels in strain softening media, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 227~298.
14. Yoo, C. S., Lee, H. and Yoon, H. S. (1997), Three dimensional finite element analysis on twin tunnel behavior, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 13, No. 3, pp. 151~160 (in Korean).