

암반 필라를 포함한 비대칭 근접 병설터널의 안정성 평가에 관한 연구

김도식¹, 김영근^{2*}

A study on the stability analysis for asymmetry parallel tunnel with rock pillar

Do-Sik Kim, Young-Geun Kim

Abstract Recently, because of the restriction of land for construction and interference of adjacent structure, parallel tunnels with small clearance have been planned and constructed in many sites. In this case, the stability of pillar at center part is very important factor to satisfy the stability of tunnel structure under the construction. In this paper, numerical analyses for the asymmetry parallel tunnels with a narrow width of pillar have been carried out to search for the optimum reinforcement measure for rock pillar and verify the stability of tunnel. Rock pillar between each single tunnel is supposed to be under heavy load by rock mass. The analysis of stress state at rock pillar at various cases for construction conditions is required to investigate the structural behaviour of tunnels and stability of the pillar. Strength-stress ratio is calculated based on the failure theory of rock and the safety factor of tunnel is computed with strength reduction technique. Through these numerical results, reasonable reinforcement measures for rock pillar at parallel tunnel were established and recommended.

Keywords: Parallel tunnel, rock pillar, stability, strength-stress ratio, safety factor

요 지 최근 용지매입의 제한, 주변 구조물과의 간섭 등으로 두 터널의 이격거리가 매우 작은 근접 병설터널의 시공이 증가하고 있다. 이러한 경우 터널의 안정성 뿐만 아니라 중앙 필라부의 안정성 확보를 위한 보강공법의 선정은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 본 연구에서는 상하행선의 터널단면이 다른 비대칭 형태이면서, 두 터널간의 이격거리가 매우 근접한 병설터널에 대한 안정성 평가 및 필라부 보강방안에 대하여 상세한 해석적 검토를 수행하였다. 또한 근접 병설터널의 안정성을 확보할 수 있도록 암반 필라의 안정성 검토와 보강공법 등 근접 병설터널의 사례연구를 토대로 보강공법의 적정성과 합리적인 대안을 제시하였다. 특히, 굴착순서, 이격거리, 굴착방법에 따른 터널 거동 파악을 위하여 암반 필라의 응력상태 및 터널변위를 분석하여 암반파괴이론에 근거한 안정성 평가를 수행하였다. 또한 암반 필라부 보강공법의 적정성 검토 및 향후 근접병설 터널에서의 암반 필라 안정성 확보를 위한 개선방안을 제안하였다.

주요어: 근접 병설터널, 암반 필라, 안정성, 강도응력비, 안전율

1. 서 론

최근 민간투자사업의 활성화 등으로 인하여 터널건설이 증가하고 있으나, 기존 노선과의 선형, 주변 구조물과의 간섭, 용지매입의 제한 등과 같은 제한적인 요인과 터널 주변의 민원 및 자연환경훼손 최소화 등과 같은 환경적인 요인 등으로 인하여 터널 계획시 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한 병설터널의 경우 두 터널간의 이격거리를 충분히 확보하여 터널구조물의 안정성 확보를 우선으로 계획하였지만, 최근에는 대단면 터널

로는 시공이 불가능한 지역이나 환경훼손을 최소화할 수 있는 구간에서 두 터널간의 이격거리(pillar width)가 상당히 근접된 병설터널로 계획되어지는 사례가 증가하고 있다.

이러한 근접 병설 터널의 경우 이격거리를 충분히 확보하고 있는 터널의 경우보다 안정성 측면에서 불리한 점이 많으므로 설계시 터널 안정성 확보를 위한 보강대책에 대한 검토가 충분히 수행되어야 한다. 그러나 국내의 경우 근접 병설터널에 대한 안정성 평가방법, 중앙 필라부 보강방법에 설계 및 시공사례가 부족한 실정이지만, 최근 대단면 근접병설 터널에 대한 해석적 검토가 다양하게 수행되고 있으며, 이러한 결과를 바탕으로 근접 병설터널에 대한 보강설계가 이루어지고 있다(김도형 등, 2003). 또한 일본의 경우 지반특성에 따라 다양한 형태의 근접병설터널에 상세검토가 수행되어 많은 설계

¹정회원, 삼보기술단(주) 지반공학부 과장

²중신회원, 삼성건설(주) 토목ENG팀 부장

*교신저자: 김영근(babokyg@hanmail.net)

및 시공경험을 축적하고 있다(Kobayashi, 1994).

본 연구에서는 상하행선의 터널단면이 다른 비대칭 형태이면서, 두 터널간의 이격거리가 매우 근접한 병설 터널에 대한 안정성 평가 및 필라부 보강방안에 대하여 상세한 해석적 검토를 수행하고자 하였다. 또한 근접 병설터널의 안정성을 확보할 수 있도록 암반 필라(rock pillar)의 안정성 검토와 보강공법 등 근접 병설터널의 사례연구를 토대로 보강공법의 적정성과 합리적인 대안을 제시하고자 한다.

근접 병설터널인 경우, 암반 필라의 구조적 안정성 확보가 중요하므로 기존의 설계 및 시공사례에 대한 조사를 수행하여 문제점 및 대책, 보조공법등에 대한 참고자료로 활용하여, 다양한 시공조건에 따른 근접 병설터널의 역학적 거동 특성을 분석하였다. 특히, 굴착순서, 굴착방법, 이격거리, 보강방법에 따른 터널 거동특성을 파악하기 위하여 각각의 조건에 대한 암반 필라의 응력상태 및 터널변위를 분석하여 암반파괴이론에 근거한 안정성 평가를 수행하였다. 이러한 해석결과를 바탕으로, 비대칭 근접 병설터널의 안정성 확보를 위한 암반 필라의 안정성 평가방법 및 보강대책에 대한 최적방안을 검

토하고 그 개선방안을 제안하였다.

2. 터널 현황 및 지반특성

2.1 터널 현황

연구대상인 터널은 상·하행 노선이 각각 2차로, 3차로로 구성되어 있으며, 종점부 이후에 타구조물과의 접속 계획으로 인하여 최소 터널이격거리가 약 3.9 m로써 이격거리를 충분하게 확보하지 못한 비대칭 근접병설터널이 계획되었다.

그림 1은 터널의 평면현황을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이격거리 현황을 살펴보면, 터널 전구간에 대하여 3.9~10.4 m(0.27~0.72 D)로 이격되어 있으며, 그 중 3.9~6.6 m(0.27~0.48 D)구간 약 70 m에 대해서는 록볼트 체결을 통하여 암반 필라가 보강되도록 설계되어 있다. 일반적인 도로 터널의 경우 병설터널간의 상호영향을 최소화하기 위하여 이격거리를 1.5 D 이상으로 적용하는 것을 고려할 때 터널 전구간의 이격거리가 비교적 충분히 확보되지 못한 것을 알 수 있다.

그림 2는 연구대상 터널의 단면이 나타나 있다. 그림

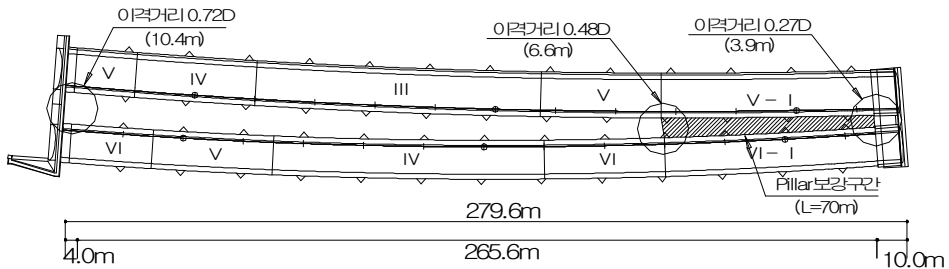


그림 1. 비대칭 근접 병설터널의 현황

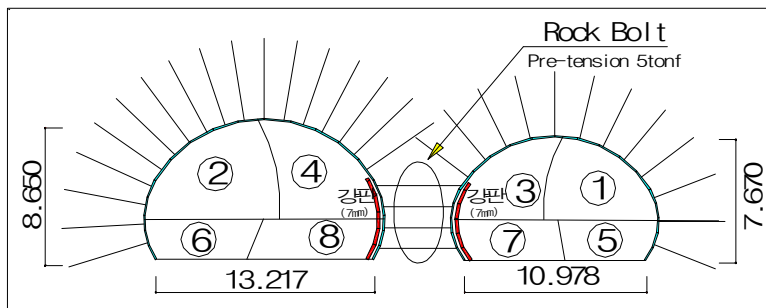


그림 2. 비대칭 병설터널의 단면

에서 보는 바와 같이 본 터널은 상하행 병설터널로서 상행선의 터널단면과 하행선의 터널단면의 크기가 다른 비대칭형의 병설터널로 계획되어 있다. 따라서 본 터널은 터널 자체의 안정성 뿐만 아니라 병설터널 중앙부 암반 필라의 안정성 확보가 요구되므로, 이에 대한 보다 정밀한 안정성 검토 및 보강대책이 수립하여야 한다.

2.2 지반특성

본 구간에 대한 지질 및 지반조사결과 대규모의 단층대에 의한 직접적인 영향은 없으며, 기반암은 안산암질 화산복합체와 이를 관입한 산성 및 중성 암맥으로 구성되어 있고 주로 응회질 퇴적암이 분포하고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 응회질 퇴적암은 녹회색, 암회색 등 다양한 색상을 띠고 세립질 사암과 이암의 호층으로 구

성되어 있으며, 부분적으로 혼펠스화 되어 매우 치밀한 조직을 나타내었다.

또한 시추결과로부터, 본 터널구간의 암반상태는 TCR = 39~100%, RQD = 0~87%, 탄성파속도 = 1,800~4,767 m/sec로써 RMR에 의한 암반분류시 III등급으로 분류된다. 응회질 퇴적암은 녹회색, 암회색 등 다양한 색상을 띠고 세립질 사암과 이암의 호층으로 구성되어 있으며, 부분적으로 혼펠스화 되어 매우 치밀한 조직을 나타낸다.

3. 근접 병설터널에 대한 기존사례 검토

본 연구에서는 근접 병설터널에 대한 사례가 많지 않아, 주로 일본의 터널 설계 및 시공사례를 검토하였다. 표 1은 일본 이토즈 터널의 적용표준단면 및 특징을 나타



그림 3. 본 구간의 지질특성 (응회질퇴적암)

표 1. 근접병설터널의 형태 (Kamimura, 2002).

<p style="text-align: center;">Type A</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 중앙필라는 상부지반의 집중하중을 받게 되는 중앙 Pilot 터널 굴착후 설치 • 중앙필라는 양쪽터널의 안정화에 기여 • 중앙필라부 보호를 위한 방수공법등의 조치 필요
<p style="text-align: center;">Type B</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Type A에서 중앙부 필라가 생략된 형태 • 중앙터널과 필라의 생략으로 공기와 공사비 상당히 감소 • 중앙부 협소공간에서의 작업 불필요로 작업효율 증대 • 지반강도가 불충분할 경우 양쪽터널 사이의 별도 지반보강 필요
<p style="text-align: center;">Type C</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 중앙부 라이닝의 두께를 증가시킴으로써 양쪽터널 사이의 지반은 콘크리트로 대체 • 양쪽터널 사이의 지반강도가 낮은 경우 Type B에 비해 경제성 우수 • 후행터널 굴착전에 선행터널 콘크리트 라이닝 선시공 필요

낸 것이며, 굴착대상 지반조건에 따라 중앙벽체 설치, 원지반 암반 활용, 선형터널 라이닝 두께 증진 등의 방안을 적용하여 터널의 안정성을 확보하고 있다(Kamimura, 2002).

또한 동경에 위치한 연장 389 m의 오야마다이리터널은 도시지역을 통과하는 2차로 도로터널의 특성상 터널 통과구간 직상부의 지장물의 영향으로 인하여 근접병설 터널로 계획되었다. 터널사이의 지반에 대한 안정대책으로는 숏크리트 두께의 증가와 PC록볼트를 이용한 보강을 수행하였다(그림 4). 터널 변위, 강지보재의 응력 및 숏크리트의 응력을 측정된 결과 초기굴착이 실시된 좌측터널상반의 숏크리트 응력이 높게 나타나는 것을 관측할 수 있다(Kobayashi, 1994).

기존 터널 설계 및 시공사례조사에서 알 수 있는 바와 같이 근접병설터널의 계획에 있어서 중요한 것은 지반상태의 정확한 파악, 터널안정성의 확보를 위한 적절한 지보패턴 및 보조공법의 적용과 적절한 시공계획의 수립이라고 할 수 있다. 특히, 중앙부 암반 필라부의 구조

적 역할을 해석적으로 규명하여 지보기능을 검토할 필요성이 있는 것으로 판단된다. 또한 암반 필라의 보강설계에 있어서는 예상되는 암반 파괴기준 및 지반이완에 대한 필라의 안정성 평가와 더불어 중앙 암반 필라의 손상에 대한 보강대책이 필요하다고 검토되었다.

4. 비대칭 근접 병설터널의 안정성 검토

4.1 해석 조건 및 방법

본 연구에서는 터널의 굴착과정 또는 순서가 터널변형에 상당한 영향을 미치므로 비대칭 근접병설 터널에 대한 수치해석을 통하여 상호 거동특성 및 암반 필라의 안정성을 검토하였다. 이를 위해서 근접병설 터널간 이격거리, 굴착 순서, 굴착방법, 프리스트레스(pre-stress)의 크기에 따른 터널의 거동을 분석하여 근접 병설터널의 상호 간섭효과 및 필라 거동에 대한 검토를 수행하였다. 표 2는 본 연구에서 수행한 해석 Case를 나타낸다.

각각의 검토항목에 따라 비대칭 병설터널의 상황에

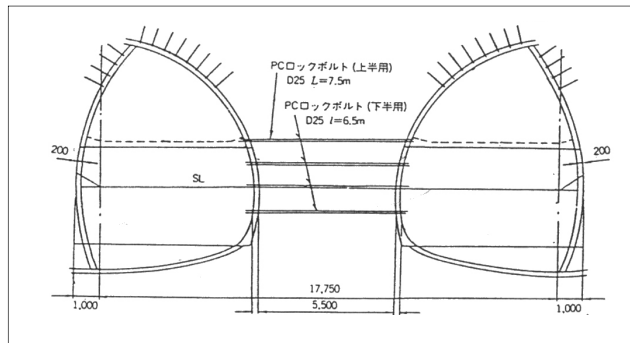


그림 4. 필라부의 보강공법 (Kobayashi, 1994).

표 2. 안정성 평가를 위한 해석 Case

구분	해석 조건	측압계수	해석수
굴착순서에 따른 안정성 검토	<ul style="list-style-type: none"> Case 1 : 대단면 선굴착 Case 2 : 소단면 선굴착 	0.5, 1.0, 1.5	6
이격거리에 따른 안정성 검토	<ul style="list-style-type: none"> 병설터널간 이격거리별 해석 강도감소법 적용 (이격거리 : 0.25 D, 0.5 D, 0.75 D, 1.0 D, 1.5 D, 2.0 D) 	0.5, 1.0, 1.5	36
프리스트레스에 따른 안정성 검토	<ul style="list-style-type: none"> 록볼트를 이용한 경우 PC 강선을 이용한 경우 (인장력 : 0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0 tonf) 	0.5, 1.0, 1.5	48
굴착방법에 따른 안정성 검토	<ul style="list-style-type: none"> 중벽 및 상하반 단면 굴착순서별 해석 필라부 록볼트 인장력 5 tonf 적용 (case 1, case 2, case 3, case 4) 	0.5, 1.0, 1.5	24

잘 부합될 수 있는 범위에서 해석조건을 설정하였고, 축압계수에 대한 경우까지 포함하여 여러 가지 경우에 대한 해석을 수행하여 해석결과를 분석하였다.

본 연구에서 수행한 수치모델링의 경우, 먼저 중앙 암반 필라부의 거동이 가장 중요한 관심대상이므로 해석 조건에 따라 암반 필라의 거동이 잘 나타날 수 있도록 지보재의 설치를 생략하였다. 또한 터널해석을 위한 수치해석 범위의 설정은 가능한 한 터널굴착으로 인한 지반의 영향이 미치지 않도록 해석범위 결정시 측면은 터널 굴착폭의 3배 이상, 하부경계는 터널주변으로부터 터널의 높이의 2배 이상 되는 지점에 설치하였고, 천단부위의 지반은 터널 높이의 3배 이상을 확보하였다. 해석 프로그램은 유한차분 해석코드인 FLAC 2D를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄·소성해석을 수행하였으며, 축압계수는 0.5, 1.0 1.5 세 가지 경우를 적용하였다.

적용지반 물성치는 기본설계자료를 참고로 하여 암반 등급 III을 적용하였고, 적용 지반물성치는 표 3과 같다.

해석결과는 천단 및 측벽 변위, 필라의 응력상태(수직 응력 및 주응력) 등을 이용하여 강도응력비, 강도감소법에 의한 안전율을 산정하였으며, 이를 바탕으로 암반 필라의 안정성을 평가하였다.

■ 강도응력비(Strength-stress ratio)

다양한 구속압력 σ_3 에 대하여 소성파괴의 시작은 다음과 같이 표현될 수 있는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 규정된다고 가정하면 아래 식(1)과 같이 표현되며,

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \tag{1}$$

암반의 일축압축강도 σ_{cm} 은 식(2)과 같이 정의된다.

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

또한, σ_3 에 대한 σ_1 의 선의 기울기 k 는 식(3)과 같다.

$$k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \tag{3}$$

여기서, σ_1 : 파괴시의 축방향 응력, σ_3 : 구속응력, c : 암반의 점착강도, ϕ : 암반의 마찰각

그림 5는 암반 필라의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 필라의 강도응력비가 필라 전체의 안전율을 표현하지는 않지만, 진행성 파괴(progressive failure)나 응력 전이과정(stress transfer progress)을 고려하여 필라 중앙 단면에서의 평균 강도응력비(average strength-stress ratio)가 1.0 이하로 되면 필라 전체가 불안해지는 것이라고 평가하였다(Hoek and Brown, 1980).

■ 강도감소기법 (Strength reduction technique)

터널해석 수행시 사면과는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다. 이러한 이유로 터널을 대상으로 한 수치해석은 정량적인 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데에만 제한적으로 사용되어 오고 있다. 따라서 본 연구에서는 터널굴착에 따른 변위 및 지보재 응력 검토와 함께 정량적인 안정성의 평가과정으로 강도감소기법을 이용하여 안전율 개념을 도입하였다(유광호 등, 2000).

또한 앞서 말한 터널굴착에 따른 암반 필라의 안정성은 주응력 평면상에서 필라의 평균응력을 검토하여 개략적인 안전율(강도응력비)을 구할 수 있으나, 터널의 크기 및 형상을 고려한 터널 주변지반 자체의 안전율을 구하기는 곤란하므로 터널 주변지반 자체 안정을 판단

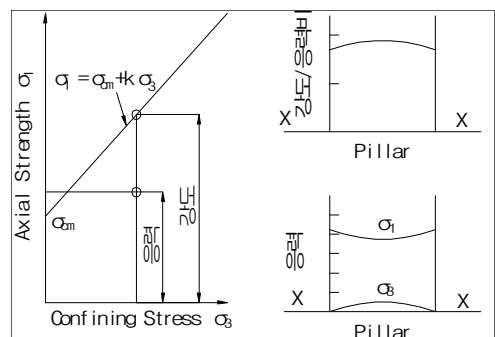


그림 5. 강도응력비 곡선

표 3. 적용 지반물성치

구분	단위중량 (tf/m ³)	점착력 (tf/m ²)	내부마찰각 (degree)	변형계수 (tf/m ²)	포아송비
암반등급 III	2.5	50.0	40.0	500,000	0.23

하기 위해 강도감소기법을 적용하였다.

진단강도 감소기법을 이용하여 안전율을 산정하기 위해서는 실제 지반의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)를 시험 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복수행한다. 이때 시험안전율과 이에 의해 감소된 지반물성치는 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며, 원래의 물성과는 관계는 식(4), 식(5)과 같다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (4)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{F^{trial}}\right) \quad (5)$$

4.2 굴착순서에 따른 안정성 평가

일반적으로 터널 굴착과정 또는 순서가 터널변형에 상당한 영향을 미치며, 특히 상하행 병행터널의 경우 선

행터널이 후행터널의 굴착으로 인하여 받는 영향이 크다고 할 수 있다. 본 터널은 상·하행선이 각각 2차로, 3차로 단면으로 구성된 비대칭 근접병설 터널이므로 수치해석을 통하여 굴착순서에 따른 선행터널 및 후행터널의 거동특성을 파악하고자 하였다.

본 연구에서는 선·후행 터널 모두 전단면 굴착으로 모델링 하여, 비대칭 병설터널의 상호거동이 잘 나타날 수 있도록 하였다. 그림 6은 굴착순서에 대한 해석Case를 나타낸 것으로 터널간 이격거리는 터널의 최소 이격거리인 3.9 m를 적용하였으며 Case 1은 대단면터널을 선굴착하는 경우이며 Case 2는 소단면 터널을 먼저 굴착하는 경우이다.

터널 굴착순서의 영향이 잘 나타날 수 있도록 변위비 및 응력비를 정의하여 결과분석에 적용하였다. 그림 7은 굴착순서에 대한 해석결과를 도시한 것이다.

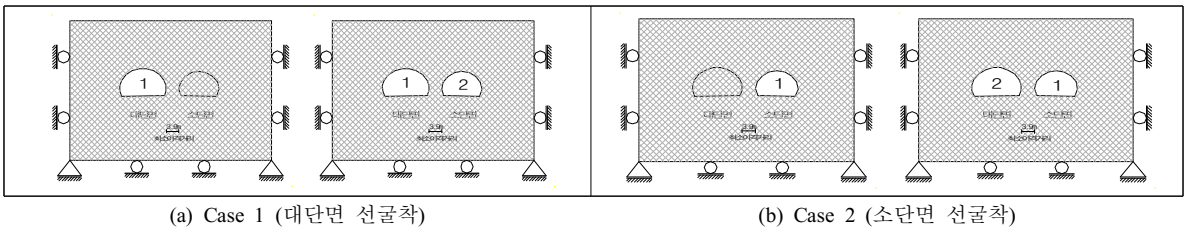


그림 6. 굴착순서에 대한 해석 Case

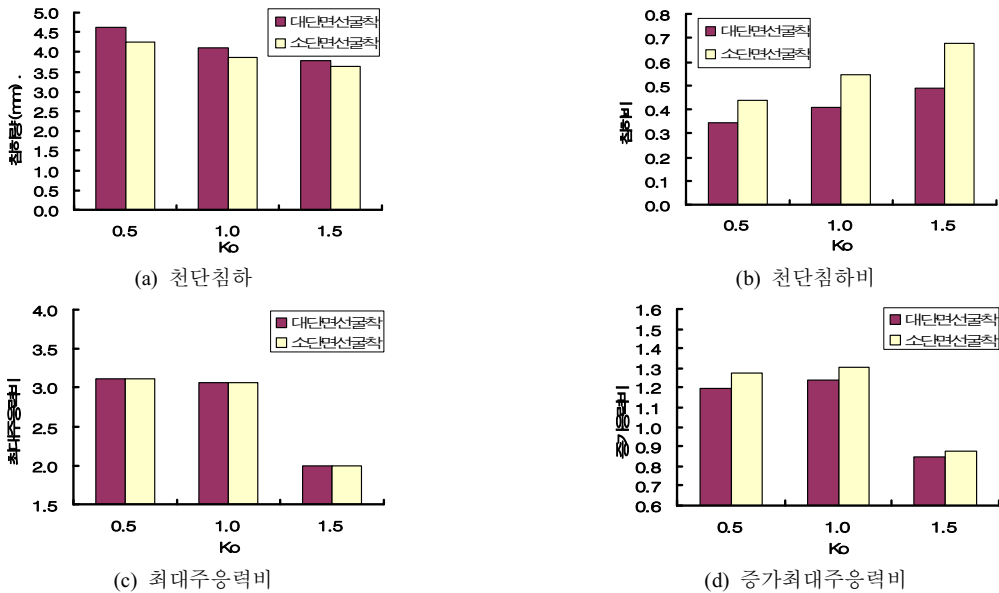


그림 7. 굴착순서에 대한 해석결과

$$\text{변위비} = \frac{\text{후행터널 굴착 후 변위}}{\text{선행터널 굴착 후 변위}} = \frac{\delta_2}{\delta_1}$$

$$\text{응력비} = \frac{\text{굴착 후 응력}}{\text{초기원지반응력}} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

그림 7에서 보는 바와 같이 천단침하는 상대적인 동일 위치에서 결과값을 축압계수에 따라 비교하였으며, 천단침하비는 각 Case별 선행터널의 천단침하를 비교한 것이다. 천단침하는 축압계수가 커질수록 줄어드는 경향을 보이지만, 침하비는 축압계수가 커질수록 커진다. 선후행 굴착순서를 고려하였을 경우는 소단면 터널을 먼저 굴착하였을 때 침하비가 더 크게 나타났다.

후행터널 굴착 완료 후 수직응력과 최대주응력의 크기는 초기원지반응력의 3배 정도로 나타나며 굴착 순서에 상관없이 동일하게 나타났다. 후행터널의 굴착으로 인한 응력증가분을 고려할 경우 소단면 터널을 선행굴착하는 것이 필라부의 응력증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이와 같이 터널별 굴착 순서에 따라 터널의 변위와 암반 필라의 응력을 비교해 보았을 때, 양방향 터널 모두 굴착하였을 경우에 변위 및 응력의 크기는 거의 동일하게 나타나지만, 후행터널 굴착시 선행터널에 미치는 영향은 소단면 터널을 선행굴착하는 것이 더 크게 나타나므로 본 터널의 경우 대단면 터널을 먼저 굴착하는 것이 터널 안정성에 유리할 것으로 예상된다.

4.3 이격거리에 따른 안정성 평가

본 연구에서는 응력집중이 예상되는 암반 필라부에 대한 안정성 검토를 위해 이격거리에 따른 터널의 거동을 분석하여 근접 병설터널의 상호 간섭효과에 대한 검토를 수행하여 암반 필라부의 안정성평가 및 강도감소법을 이용하여 터널전체의 안정성을 평가하였다.

터널의 이격거리는 대단면 터널폭(D)을 기준으로 0.27~0.72 D를 유지하고 있으므로 0.25 D, 0.5 D, 0.75 D, 1.0 D, 1.5 D, 2.0 D의 이격거리에 따라 암반 필라부의 안정성을 평가하였다. 소단면 터널을 선행굴착터널, 대단면 터널을 후행굴착터널로 선정하였으며, 지보재 설치를 생략하고, 전단면 굴착을 적용하였다.

그림 8은 강도응력비 산정을 위하여 암반 필라의 주응력상태를 나타낸 것이다. 암반 필라의 주응력 상태를 보면 축압계수가 증가할수록 최대주응력은 변화가 거의 없으나, 최소 주응력이 커지는 경향을 보인다. 축압계수에 상관없이 파괴기준에 근접한 점들을 볼 수 있으며, 이는 굴착터널에 바로 인접한 요소의 응력상태이다.

굴착터널에 인접한 요소에서의 응력상태는 파괴포락선에 거의 근접되어 있고, 개별적인 요소의 강도응력비 또한 1.0을 약간 상회할 뿐이다. 파괴기준에 접하거나, 또는 바깥쪽에 위치할 경우 암반의 파괴를 의미하므로 터널에 인접한 암반 필라는 상대적으로 불안정하고 국부적인 파괴가 일어날 수 있을 것으로 예상할

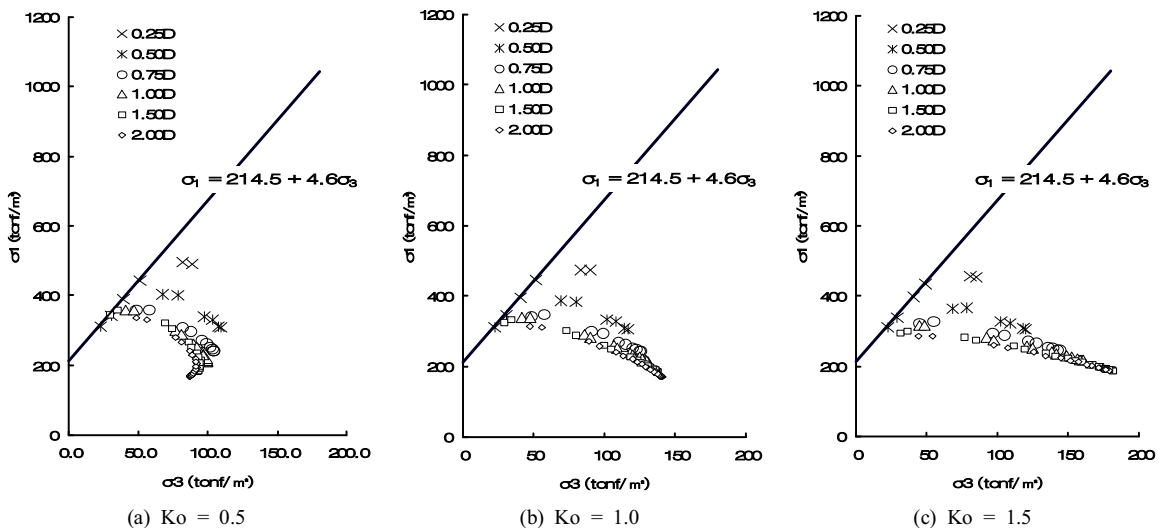


그림 8. 이격거리에 따른 암반 필라의 주응력상태

수 있다.

그림 9는 이격거리에 따라 암반 필라 중앙부의 평균 강도응력비를 산정한 결과이며, 최소이격거리 0.25 D에서 1.0이상의 강도응력비를 나타내고 있으므로 별도의 보강없이 필라의 안정성은 확보하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 응력집중에 의한 국부적인 파괴는 고려되지 않았고, 0.5 D이하의 이격거리에서 강도응력비가 낮게 나타나므로 국부적인 보강대책 이외에 별도의 암반 필라부 보강이 필요할 것으로 판단된다.

그림 10은 강도감소기법을 이용하여 이격거리에 따른 터널전체의 안전율을 나타낸 것이다. 축압계수에 따라 선형회기분석을 수행하였으며, 축압계수가 클 때 안전율이 크게 나타나며, $K_0=1.0, 1.5$ 일 때 동일한 결과가 나타났다. 이는 강도감소법 적용시 안전율 F_s 의 증가량을 0.1단위로 하였으므로 더 정밀한 안전율이 구해지지 못했기 때문이다.

강도감소법에 의한 안전율은 이격거리에 따른 증가량

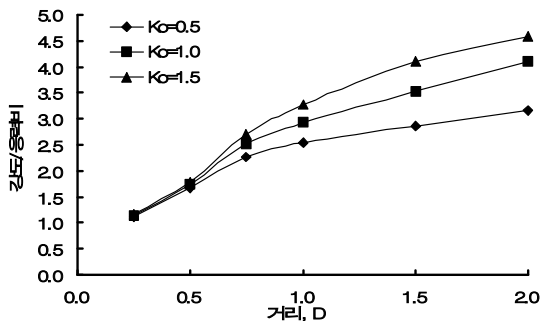


그림 9. 이격거리에 따른 강도응력비

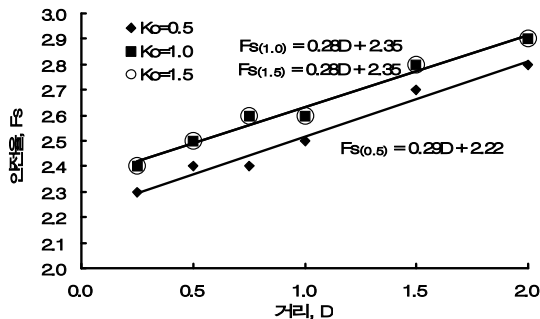


그림 10. 이격거리에 따른 안전율

이 크지 않고, 이격거리 1 D에 대하여 0.3정도의 증가를 밖에 나타내지 못한다. 이는 강도응력비에 비하여 매우 낮은 증가폭이다.

평균 강도응력비가 강도감소법에 의한 안전율과 직접 비교 될 수 있는 항목은 아니지만, 두 방법 모두 안정성을 나타내는 수치이고, 또 1.0이상을 안정성 확보 여부의 기준으로 삼고 있으므로 두 방법이 서로 유사성이 있다고 말할 수 있을 것이다. 그림 11은 강도응력비와 강도감소법에 의한 안전율을 같은 그래프상에 표시한 것이다.

강도응력비와 강도감소법의 결과를 비교하여 보았을 때 암반 필라의 안정성은 1 D이하의 근접거리에서는 이격거리가 멀어 질수록 안정성의 증가율이 높고, 그 이상에서는 증가율이 둔화된다. 그러나 터널의 전체적인 안정성 측면을 보았을 때에는 이격거리에 따른 안전율의 증가량이 상대적으로 매우 적고, 형태도 직선적 분포양상을 보이고 있다. 두 가지 분석방법의 안정성에 대한 증가율의 차이를 볼 때 이격거리에 따라 암반 필라의 안정성과 터널전체 안정성에 대한 관계를 생각해 볼 수 있다. 이상의 해석결과, 이격거리 0.75 D이하의 터널의 안전율이 필라의 강도응력비 보다 더 크게 나타나 암반 필라가 안정하지 못한 경우에도 터널주변 지반의 지보 역할로 인하여 터널의 안정성이 유지될 수 있음을 알 수 있다.

4.4 프리스트레스에 따른 안정성 평가

터널굴착에 의한 응력집중 및 변형이 발생하는 암반 필라부의 안정성을 확보하기 위하여 필라부의 지반강도 정수의 증대하거나, 응력상태를 변화시켜 암반 필라의

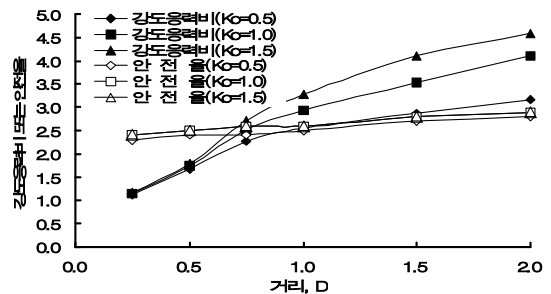


그림 11. 이격거리에 따른 강도응력비와 안전율의 비교

파괴강도를 높게 된다. 일반적으로 강봉 및 PC 강선 등을 필라부에 설치한 후 소정의 긴장력(프리스트레스)을 작용시켜 견고한 지지력을 확보하도록 하는 방법이 적용되고 있다.

그림 12(a)는 프리스트레스 도입에 따라 지반의 응력 상태가 변화하고 이를 통하여 지반의 강도가 증가하는 현상을 모아 원(Mohr circle)으로 나타낸 것이다. 지반은 파괴상태(①)에서 프리스트레스를 도입함으로써 σ_3 가 σ_3' 로 증가하여 안정한 상태(②)가 되며, σ_3' 의 구속압에서 파괴(③)에 다다르기 위한 파괴강도는 σ_1 에서 σ_1' 증가하는 것을 보여준다.

그림 12(b)는 지반강도정수 증대를 통하여 지반파괴 강도가 증가되는 응력상태를 나타낸다. 지반은 파괴상태(①)에서 지반강도정수($c \rightarrow c'$, $\phi \rightarrow \phi'$)를 증대함으로써 주응력의 변화 없이 안정한 상태(②)를 유지하며, 파괴(③)에 이르기 위한 파괴강도는 σ_1 에서 σ_1' 증가하게 된다.

지반보강 그라우팅을 암반에 적용할 경우에는 많은 어려움이 따른다. 우선, 암반의 좁은 절리틈새에 주입이 효과적으로 이루어지고 내구성이 충분한 주입재를 선정하는 것이 매우 중요하며, 주입압이 암반지반을 이완과 쉐시키는 등의 악영향도 고려되어야 한다. 지반보강 그라우팅은 현장에 적용하기 전에 시험시공을 실시하여 적정 주입재와 주입압 등을 산정하고 주입효과가 최대한 발휘될 수 있도록 하여야 한다. 지반보강을 적용하기 위한 현장의 세부적인 암반상태, 제반여건에 대한 자료가 불충분하고, 그라우팅의 효과를 제대로 반영할 수 없는 상황에서는 지반보강 그라우팅은 단지 보조공법으로 취급하는 것이 적절한 것이다.

프리스트레스는 PC강선·강봉(PC 록볼트) 등의 부재를 이용하여 도입할 수 있으며, 현장상황에 따라 조절하기가 용이하다. 프리스트레스를 이용하여 지반의 응력 상태를 변화시키는 방법이 지반강도정수를 증가시키는 방법 보다 더 안정적인 방법이므로, 본 절의 해석에서는 프리스트레스의 크기에 따른 암반 필라의 강도응력비 분석을 통하여 지반보강효과를 평가하였다.

암반 필라부에 Pre-tension을 0~30 tonf(0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0 tonf)까지 순차적으로 적용하였고, 축압계수는 0.5, 1.0, 1.5에 대하여 해석을 수행하였다. 현 기본설계에서 적용된 록볼트(SD35, D25)를 PC 부재로 이용한 경우와 PC강선(강봉)을 사용한 경우 등 두 가지 모델링을 검토하였다. 록볼트 적용시에는 필라부의 통과 지점을 전면접착형, PC강선 적용시에는 자유장으로 하여 모델링하였다.

그림 13과 그림 14는 각각 록볼트 적용시와 PC강선 적용시 중앙 필라부의 응력 상태를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 축압계수에 따른 변화가 크지 않았으며, Pre-tension에 따른 응력상태의 변화도 크지 않음을 알 수 있다.

그림 15는 Pre-tension에 따른 강도응력비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 암반 필라 중앙에서 평균 강도응력비를 산정하였을 때 프리스트레스를 도입하지 않은 경우에도 강도응력비가 1.0을 상회하여 필라의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 또한 암반 필라 통과부의 정착여부에 따라서 나타나는 강도응력비값의 차이는 거의 없었으며, 이는 필라의 폭이 비교적 좁아 전면정착시 나타나는 정착부쪽에 응력이 상대적으로 많이 발생하는 현상이 제대로 나타

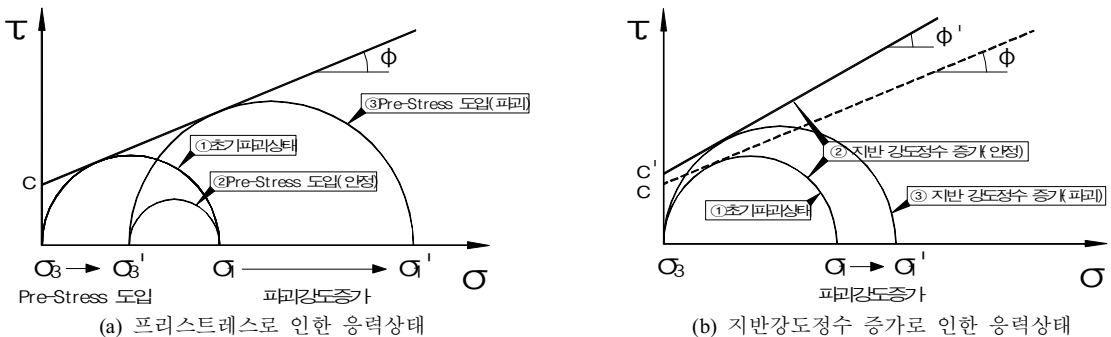


그림 12. 지반의 응력상태 변화

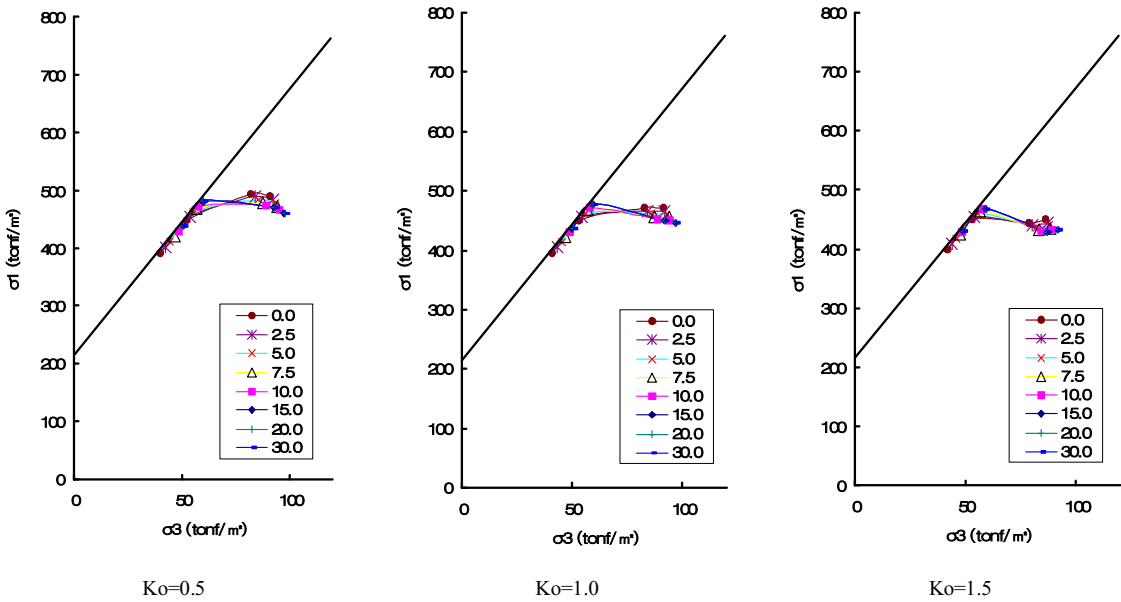


그림 13. 록볼트 적용시 Pre-tension에 따른 응력상태

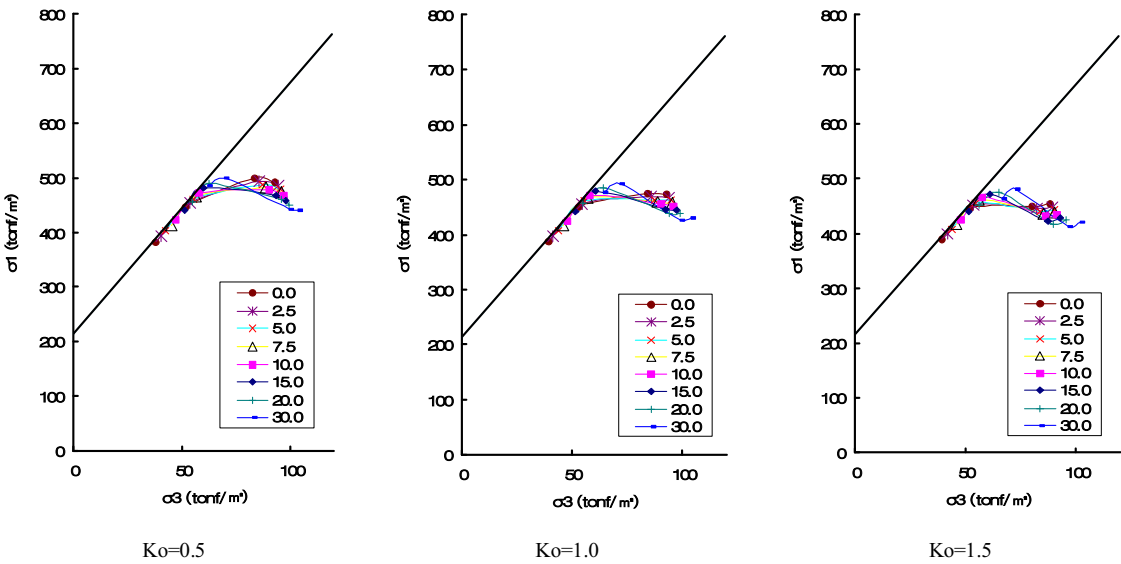
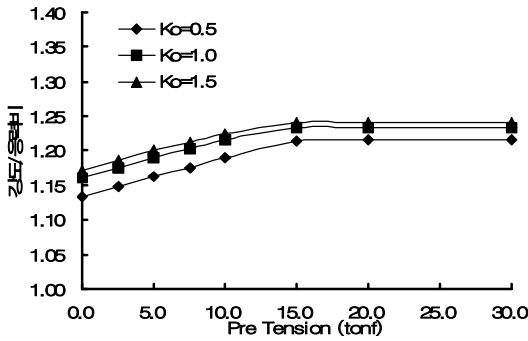


그림 14. PC강선 적용시 Pre-tension에 따른 응력상태

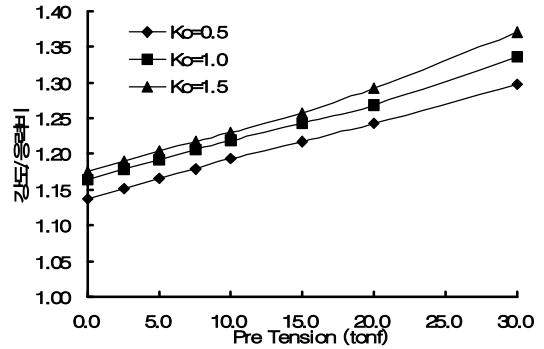
나지 않았기 때문이다.

록볼트를 적용하였을 경우 15 tonf 이상의 Pre-tension을 가하였을 때 강도응력비의 증가 없이 수렴하는 경향을 보였는데, 이는 록볼트의 재료인 SD35, D25 규격의 철근의 항복 하중이 17.2 tonf로써 이 이상의 힘은 암반

필라의 구속 영향을 주지 못하기 때문이다. 이에 반하여 PC강선을 적용한 경우에는 Pre-tension이 증가하더라도 수렴하지 않고, 강도응력비가 계속적으로 증가하는 경향을 보였다. PC강선은 도입할 수 있는 Pre-tension도 크고, 소요강도에 따라 규격이 다양하므로 록볼트를 이



(a) 록볼트 적용



(b) PC 강선 적용

그림 15. Pre-tension에 따른 강도응력비

용할 수 있는 한계를 넘을 경우 PC강선을 사용하여 암반필라의 안정성을 확보하는 방안이 바람직할 것으로 판단된다.

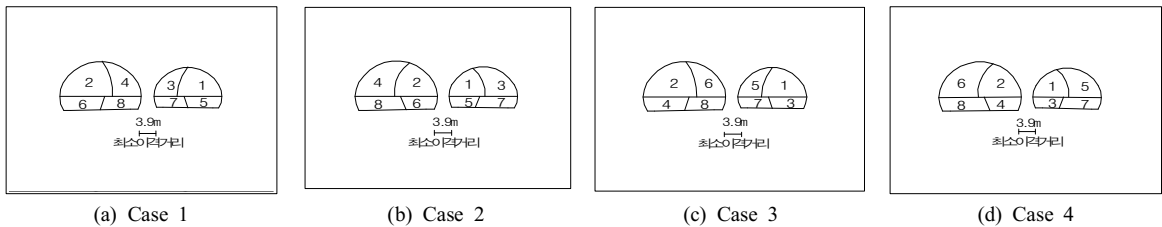
4.5 굴착방법에 따른 안정성 평가

본 터널의 경우 시점부에서 종점부로 갈수록 터널간 이격거리가 최대 10.4 m에서 최소 3.9 m로 0.3 D 이내로 감소하여 터널굴착시 필라부에 상당한 응력집중이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 터널간 이격거리가 가장 작은 종점부에서의 분할굴착을 고려한 터널 굴착방법에 따른 암반 필라부의 강도응력비를 검토하여 시공중 응력집중에 따른 필라의 안정성을 검토하였다

그림 16은 굴착방법에 대한 해석Case 로서, 해석시 터널간 이격거리는 최소이격거리 3.9 m로 모델링 하였으며, 기본설계시 굴착순서를 바탕으로 암반 필라부의 선후행굴착과 상하반 굴착순서에 따라 4가지로 해석 Case 를 구분하여 검토하였다.

그림 17은 굴착방법에 따른 강도응력비의 변화상태를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Case 4의 경우, 필라측 하반 굴착 이후 응력상태가 파괴포락선에 상당히 근접하는 것으로 나타났고, Case 1 및 Case 3과 같이 필라 반대측을 선굴착할 경우 상대적으로 필라 응력이 안전한 경로를 유지하는 것으로 검토되었다. 또한 측압계수가 커질수록 초기 굴착단계에서 상대적으로 안전한 응력상태를 유지하지만 굴착이 진행되어 최종단계로 갈수록 필라 응력은 파괴면으로 접근하여 굴착순서와 관계없이 유사한 응력상태를 가지는 것으로 나타났다. 또한 측압계수가 클 경우 초기 굴착단계에서의 강도응력비는 상당히 높은 상태를 유지하지만 굴착이 진행됨에 따라 유사한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 그리고 필라측을 선굴착(Case 2, Case 4)할 때 보다 필라 반대측을 선굴착(Case 1, Case 3)하는 것이 시공 중 필라 응력이 상대적으로 안전한 것으로 검토되었다.

그림 18은 프리스트레스 적용에 따른 강도응력 증가비를 나타낸 것으로 프리스트레스 적용과 관계없이 유사한 경로를 따르는 것을 볼 수 있다. 또한 굴착순서에



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

그림 16. 굴착방법에 대한 해석 Case

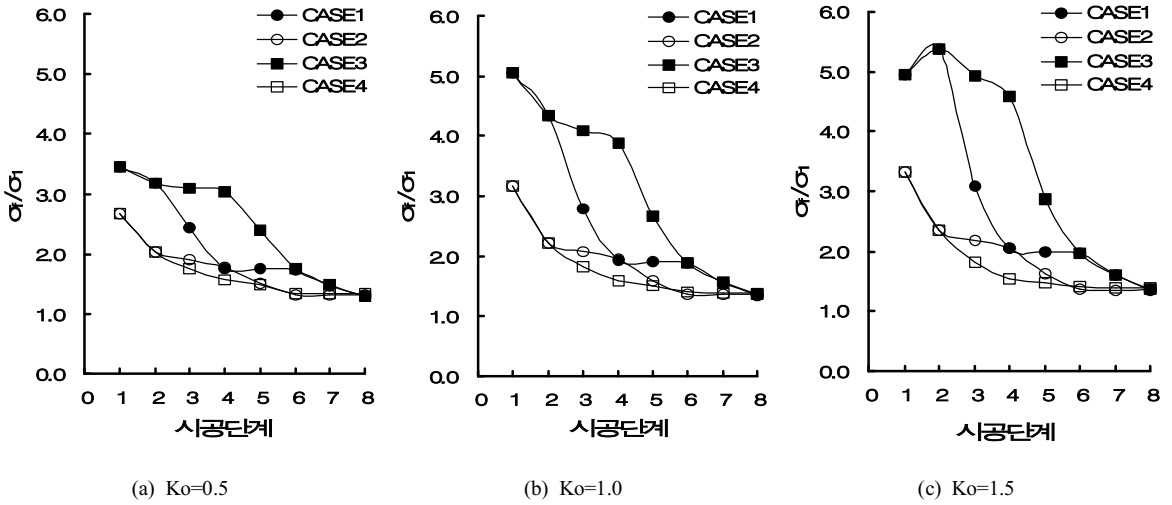


그림 17. 굴착순서에 따른 강도응력비

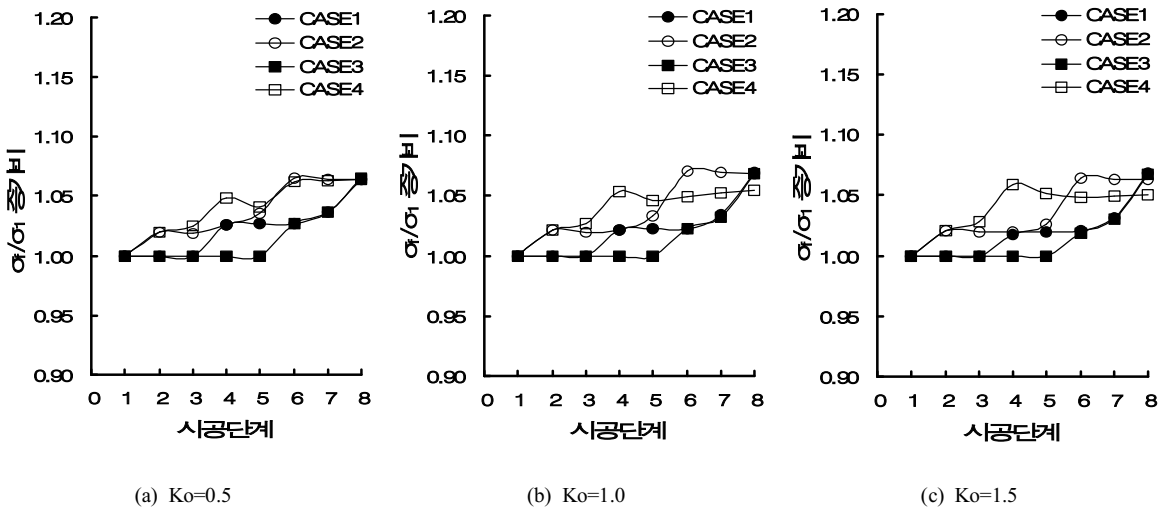


그림 18. 프리스트레스에 따른 강도응력 증가비

따라 프리스트레스 미적용과 적용후 필라의 강도응력비를 비교하면 Case 4에서 가장 큰 차이를 보이지만 그 증가량이 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 필라에 적용되는 프리스트레스가 필라에 발생하는 응력과 비교하여 매우 작아 실제 필라 응력에 큰 영향을 주지 못할 것으로 판단된다. 전반적으로 축압계수가 작을수록 필라 응력은 불안전 축으로 접근하나 최종 응력은 일정한 값으로 수렴하며 Case 3의 경우 시공중 필라 응력이 가장 안전한 상태를 유지하는 것으로 나타났다.

4.6 근접 병설터널의 안정성 평가

4.6.1 해석개요

앞서 실시한 해석결과로부터 본 근접 병설터널구간에서 형성되는 암반 필라의 안정성은 충분히 확보되는 것으로 평가되었다. 그러나 선행된 암반 필라의 안정성 검토는 해석조건 및 경우에 따라 필라의 거동이 잘 나타날 수 있도록 지보설치를 생략하였고, 또한 지표형상이 고려되지 않았으므로 터널의 실제 상황을 제대로 반영하

었다고 할 수 없다. 또한, 본 터널의 종점 갱구부는 편경사의 영향을 받으며 지보패턴 설계수준이 서로 상이하다. 그러므로 본 해석에서는 암반 필라의 안정성 검토사항을 토대로 설계시 적용된 지보설계 및 보강공법에 대한 적정성을 검토하였다.

그림 19는 해석단면 개요도를 나타낸 것으로, 해석조건은 설계자료와 동일하게 적용하여 실시하였으며, 해석단면의 위치가 터널 갱구부이므로 측압계수 0.5에 대한 해석을 추가로 실시하였다. 표 4는 본 검토에서 적용된 해석단계 및 굴착순서를 보여주고 있다.

4.6.2 해석결과

강섬유보강 숏크리트는 압축강도(f_{ck}) 200 kgf/cm^2 , 휨

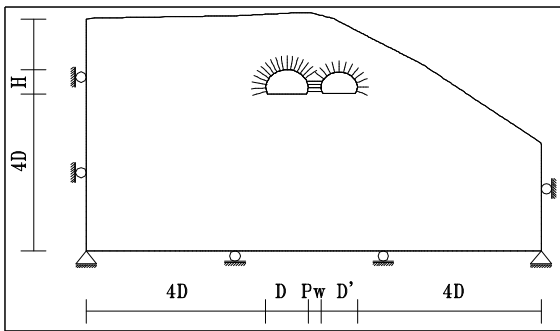


그림 19. 해석단면 개요도

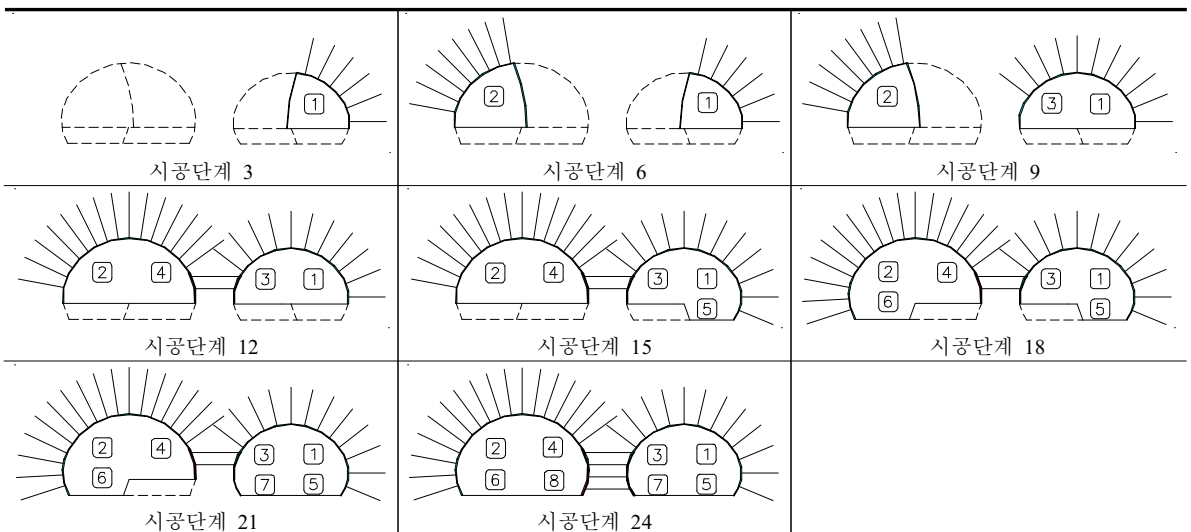
강도(f_{bk}) 45 kgf/cm^2 을 요구하며, 일반적으로 허용압축응력은 80 kgf/cm^2 ($f_{ca} = 0.4 f_{ck}$)을 만족하도록 하고 있으며 록볼트 재료로 사용하는 철근(SD35, D25)의 허용축력은 8.6 tonf이다.

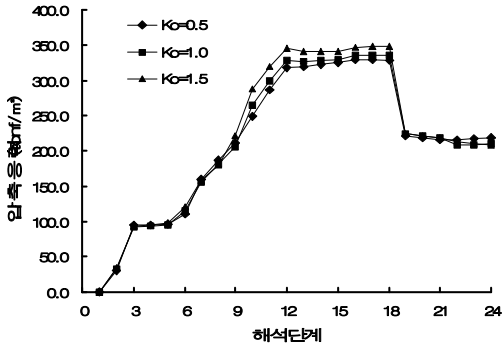
그림 20은 숏크리트와 록볼트에 작용하는 응력을 해석 단계별로 나타낸 것이다. 숏크리트의 최대 압축응력을 18단계에서 약 350 $tonf/m^2$ (35 kgf/cm^2)을 나타내고, 록볼트의 최대 축력은 약 5.5 tonf 정도로 나타나고 이는 프리스트레스를 도입하기 위하여 적용된 5.0 tonf의 축력의 영향이 대부분이므로 지보재의 안정성을 확보하는 것으로 판단된다.

그림 21은 시공단계에 따른 강도응력비 및 안전율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 암반 필라의 강도응력비는 안전율이 최종단계에서 각각 2.0, 3.7이상을 나타내, 필라 안정성을 충분히 확보하고 있는 것으로 나타났다.

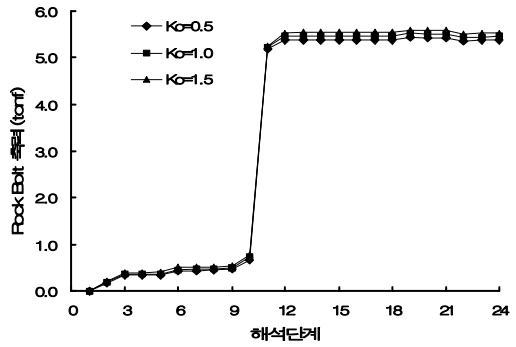
강도응력비는 상반굴착이 완료되는 12단계 이전에 하락폭이 크고 12~18단계에서는 거의 변화가 없으며 최종 굴착단계인 18~21단계(소단면터널 굴착완료), 21~24단계(대단면터널 굴착완료)에서는 소폭 감소하는 경향을 보였으며, 안전율을 산정한 결과 12단계 이후에 일정한 값을 나타내었는데, 이는 터널의 굴착폭이 굴착높이에 비해 터널 안전율에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 강도응력비와 달리 측압계수 변화에 따라 안

표 4. 해석단계 및 굴착순서



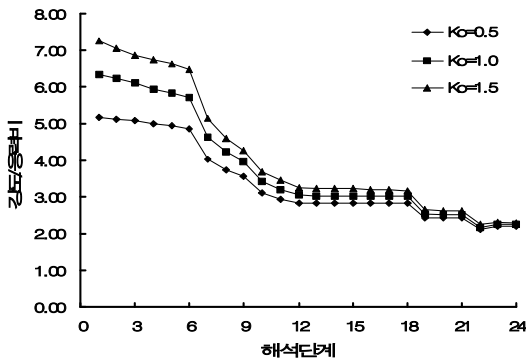


(a) 슛크리트 최대압축응력

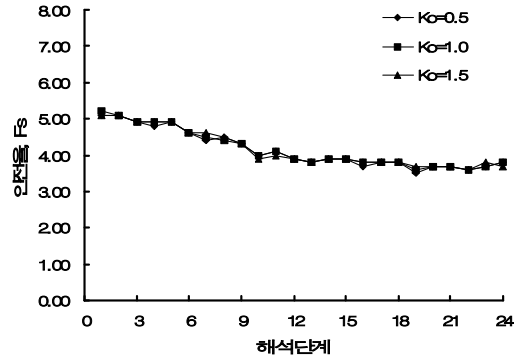


(b) 록볼트 최대축력

그림 20. 시공단계에 따른 지보재 응력의 변화



(a) 강도응력비



(b) 안전율

그림 21. 시공단계에 따른 강도응력비 및 안전율의 변화

전율 차이가 거의 발생하지 않았으며, 굴착단계에 따른 안전율이 5.1~3.7정도로 나타나 안전율 변화도 크지 않게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 두 터널의 단면크기가 다르고, 중앙 필라부의 폭이 매우 좁은 비대칭 근접병설터널에 대하여, 굴착순서, 이격거리, 보강방법 등에 따른 중앙필라부 및 터널 안정성에 대한 수치해석적 검토를 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 굴착순서 및 방법에 따른 안정성 검토결과, 후행터널 굴착시 선행터널에 미치는 영향은 소단면 터널

을 선굴착하는 것이 더 크게 나타나 대단면 터널을 먼저 굴착하는 것이 터널안정성에 보다 유리하며, 필라 외측부를 선굴착할 경우에 시공단계에서 상대적으로 안정한 것으로 나타났다.

2. 이격거리에 따른 안정성 검토결과, 암반 필라의 안정성은 1D이하의 근접거리에서는 이격거리가 멀어질수록 안정성의 증가율이 높고, 그 이상에서는 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다.
3. 필라부 보강에 따른 안정성 검토결과, 프리스트레스가 클수록 암반 필라의 안정성이 증가하였으며, 지반조건이 불량하여 필라부 프리스트레스를 증가시켜야 할 경우 록볼트 보다 PC 강선을 사용하여 긴장하는 것이 필라 안정성 확보에 효과적인 것으로 나타났다.

4. 갱구부 기반조건을 고려한 비대칭 근접병설 터널에 대한 해석결과, 적용된 굴착방법 및 지보패턴으로 암반 필라의 안정성을 확보하고 있는 것으로 검토되었다.
5. 중앙 필라부의 폭이 충분히 확보되지 못한 근접 병설터널에 대한 설계는 먼저 지반상태를 정확히 파악하여 터널 안정성 확보를 위한 적절한 지보패턴 및 보강공법의 적용과 적절한 시공계획을 수립하여야 하며, 또한 선행터널 및 주변 지장물에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 굴착 및 보강공법에 대하여 검토가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 제한된 지반조사결과 및 수치모델링을 통한 해석 결과를 근거로 이루어졌으므로 향후 시공중에 터널 계측결과를 비교분석하여 굴착에 따른 터널 거동 평가, 필라부 보강에 대한 적정성평가 등이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김도형, 박준경, 김영근, 오세준 (2003), “대단면 근접병설터널의 설계 및 안정성 평가기법에 관한 연구”, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 51-66.
2. 김도형, 박준경, 김영근, 이두화 (2003), “근접병설터널의 안정성 평가기법에 관한 연구”, 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, pp. 88-101.
3. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 2, No. 3, pp. 47-57.
4. 한국터널공학회 (2002), 서초역-방배로간 도로개설공사 중 터널안정성 검토 연구 (서리풀터널 안정성 검토연구에 관한 연구보고서).
5. Kobayashi, M. (1994), “Observational construction of a large sectional minimum interval twin road tunnel in urban alluvial loose sand soil”, Tunnelling and Ground Conditions, Abdel Salam(ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 157-164.
6. Kamimura, M. (2002), “Discussion on the behaviours of parallel tunnel with a small clearance”, Proc. of the 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp. 898-906.
7. Hoek, E., Brown E.T. (1980), “Underground excavation in rock”, Institution of Mining and Metallurgy.



김도식
삼보기술단(주)
지반공학부
과장

E-mail: dgcivil@nate.com



김영근
삼성건설(주)
토목ENG팀
부장

E-mail: babokyg@hanmail.net