

도심지 분기터널의 안정성 평가에 관한 설계사례

김세환, 최창림, 한석희, 이계화 ((주)삼보기술단)
최연식, 석재덕 (대림산업(주))

1. 서론

최근 국내의 도심지 지하도로는 심도 50m 이상 깊은심도의 장대터널로 계획하고 있으며, 인근의 지상도로와 연결을 위한 분기구간은 양호한 암반조건을 바탕으로 대단면 터널로 계획하고 있다. 국내에서는 이러한 분기터널 시공시 대단면 터널과 근접 병설터널의 안정성 확보 및 굴착방법에 대한 시공실적 및 설계사례가 부족한 상황이다. 따라서 본고에서는 국외 설계·시공사례를 고찰하고, 국내에서 최초로 시도되는 도심도 분기터널인 OO터널의 설계사례를 중심으로 분기구간 필라(Pillar)의 암반손상을 최소화하고 선행터널의 지보재 안정성을 확보할 수 있는 굴착방법과 지보재의 안정성 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 현황 및 지반조건

OO터널은 서울시 신월동~여의도동을 연결하는 연장 7.53km의 소형차 전용도로로 진·출입부 일부를 제외한 전구간이 터널구간으로 본선부 2차로 터널과 램프부 1차로 터널로 계획하였고, 올림픽대로 진·출입로 연결을 위해 분기구간 2개소를 계획하였다. 과업지역은 대부분 흑운모편마암으로 분포하며, 본선구간은 I~III등급이 90% 이상으로 양호한 암반구간에 계획하였으며, 분기터널은 II~III등급의 양호한 암반에 위치하고 있다.

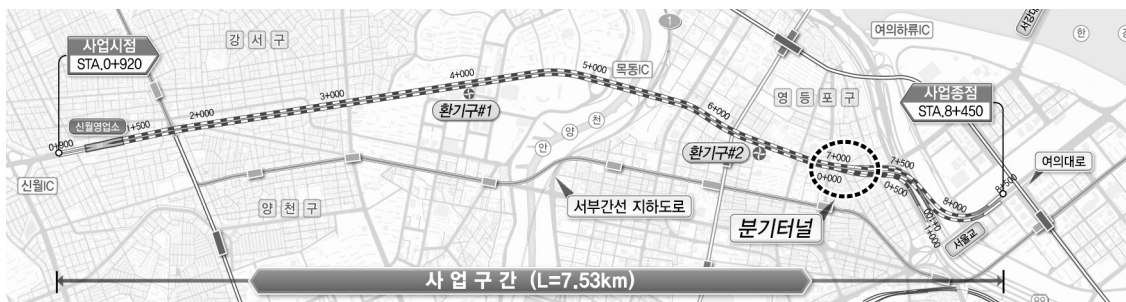


그림 2.1 터널 현황도

3. 분기구간 설계

3.1 분기부 터널 설계

분기구간은 본선 2차로터널에서 다시 2차로터널과 1차로터널로 분리되므로 분기부 안정성 확보를 위하여 적정 필라폭(PW)을 확보할 수 있는 폭까지 본선터널의 확폭이 필요하다. 또한 분기구간의 연장은 변이구간 길이, 가·감속차로, 분기시점의 최소 터널이격거리 확보 등의 기하구조를 고려하여 단면계획을 수립하여야 한다. OO터널의 분기구간은 변이구간을 고려하여 폭 15.34m의 3차로 단면과 가·감속차로 및 필라의 안정성이 확보되는 최소폭원(2m)을 반영하여 폭 25.76m의 3차로 확폭단면을 적용하였다.

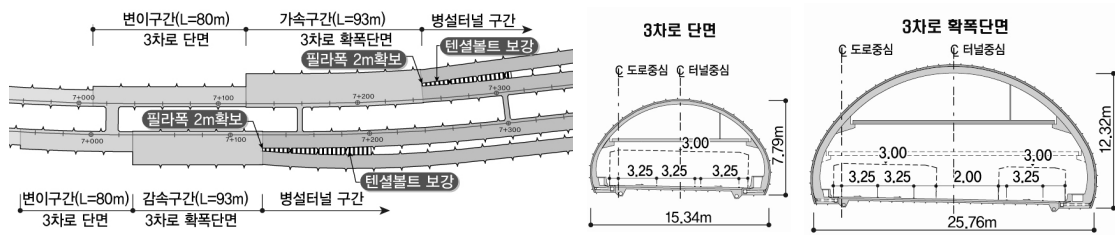


그림 3.1 분기구간 터널 계획

3.2 근접 병설터널 설계

병설터널의 이격거리를 2.0m로 근접시킬 경우 터널 상호간의 영향으로 필라에 응력이 집중되므로 안정성 확보가 중요하다. 필라부는 암반 특성상 인장 및 전단에 취약하므로 굴착과정에서 암반손상이 최소화되는 굴착방법과 보강공법이 적용되어야 한다. OO터널에서는 굴착에 따른 필라부 손상 최소화를 위한 공법으로 선행터널 외곽공에 Smooth Blasting을 적용하고, 후행터널 시공시 필라쪽 3.8m영역을 무진동 굴착 후 확공발파를 적용하였다. 필라부 보강으로는 텐션볼트를 적용하여 필라부 구속응력을 증가시켜 안정성을 향상시켰다.

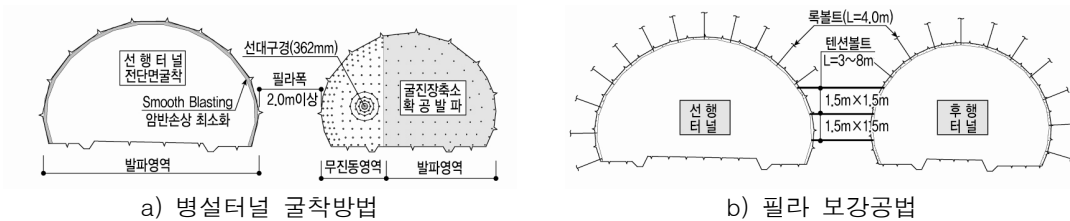


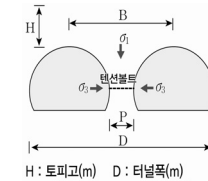
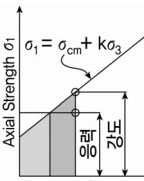
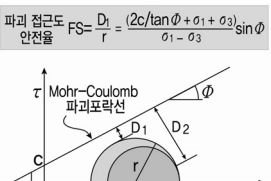
그림 3.2 분기구간 시공계획

4. 분기구간 필라부 안정성 평가

4.1 필라 안정성 평가기법

필라의 안정성을 평가하기 위한 방법으로 Peck의 방법(1969), Matsuda의 방법(1998) 등이 있으나, 지반 및 시공조건 등을 고려하기에는 한계가 있어 필라에 작용하는 주응력을 수치해석으로 구한 후 강도/응력비와 파괴 접근도를 산정하여 필라의 안정성을 평가하였다.

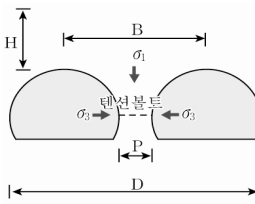
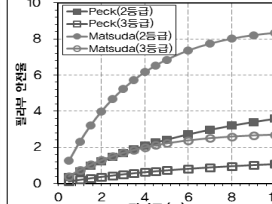
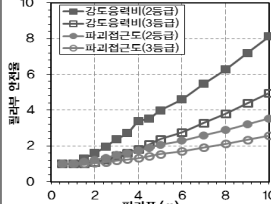
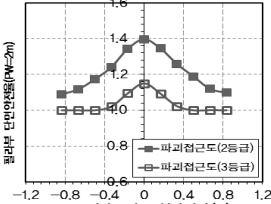
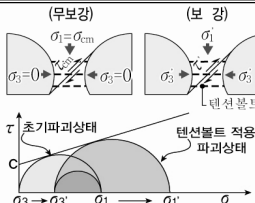
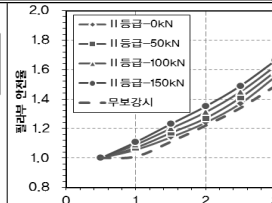
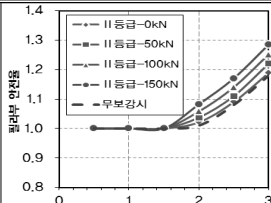
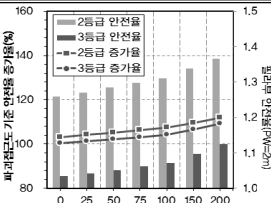
표 4.1 필라 안정성 평가기법

기존식에 의한 방법	강도/응력비에 의한 방법	파괴접근도에 의한 방법
 <p> - Peck에 의한방법 $Sp = \gamma \times H \times (1+D/P)$ $\sigma_p = 2 \times c \times \cos\phi(1-\sin\phi)$ - Matsuda에 의한방법 if $H > D$, $Sp = \gamma \times D \times B/P$ if $H < D$, $Sp = \gamma \times H \times B/P$ $\sigma_p = q(\text{암반의 일축강도})$ $F.S = \text{작용응력}(Sp) / \text{필라의 강도}(\sigma_p)$ </p>	 <p> Mohr-Coulomb 파괴기준 파괴시 축방향 응력 : $\sigma_{11} = \sigma_{cm} + k\sigma_3$ 암반강도 : $\sigma_{cm} = \frac{2c \times \cos\phi}{1-\sin\phi}$ 기울기 : $k = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}$ 강도응력비 = $\frac{\sigma_3 - \sigma_{11}}{\sigma_3 - \sigma_1}$ </p>	 <p> 파괴 접근도 $FS = \frac{D_1}{r} = \frac{(2c/\tan\phi + \sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi}{\sigma_1 - \sigma_3}$ Mohr-Coulomb 파괴포락선 </p>

4.2 이격거리에 따른 필라 거동평가

필라부가 위치하는 II~III등급의 암반에서 필라 안전율을 산정하고 텐션볼트의 적용성을 검토하였다. 이격거리별 필라부 안정성 평가결과, Peck 이외의 평가에서 필라폭 2m 확보시 안전율 1.0 이상으로 보강 없이 안정성이 확보되는 것으로 나타났다. 그러나, 필라부 안전율 평가결과 중심부에서 측벽으로 갈수록 안전율이 낮게 평가되어 발파시 암반손상으로 인한 필라부의 강도저하를 고려한다면 별도의 보강대책이 필요할 것으로 판단된다. 텐션볼트의 인장력은 구속응력(σ_3')으로 작용하여 암반강도를 증가시켜 필라의 안정성을 향상시킨다. 필라폭 2.0m일 경우 인발력 유·무에 따라 3~15%의 안전율 향상이 기대되어, 필라부 암반손상과 록볼트의 간섭이 예상되는 구간까지 텐션볼트를 적용하였다.

표 4.2 필라 안전을 평가 및 텐션볼트 보강효과 분석

안정성 평가 개요도	기존식에 의한 평가	수치해석에 의한 평가	필라 단면 안전율
			
텐션볼트 보강원리	II등급 보강효과 평가	III등급 보강효과 평가	PW=2.0m 보강효과
			

5. 분기구간 지보재 안정성 평가

5.1 초근접 병설터널 시공사례 고찰

초근접 병설터널은 일본 Itsutsugaoka 터널의 사례를 분석하여 근접 병설터널 설계의 기초자료로 활용하였다. 무도갱식 메가네 터널은 필라폭이 0.9~1.1m의 초근접 터널로 선행터널의 지보재 안정성 확보를 위해 후행터널의 일부영역(필라폭 1.5m)을 기계굴착 후 발파공법(0.2~0.6kg/공)을 적용하였으며, 슛크리트 허용진동속도를 23.3cm/sec로 선정하고 선행터널의 슛크리트 표면에 진동계를 설치하여 실시간으로 진동을 측정하였다. 시공시 슛크리트 크랙발생 조사를 기초로 하여 슛크리트의 허용진동 속도를 44cm/sec로 수정하였다.

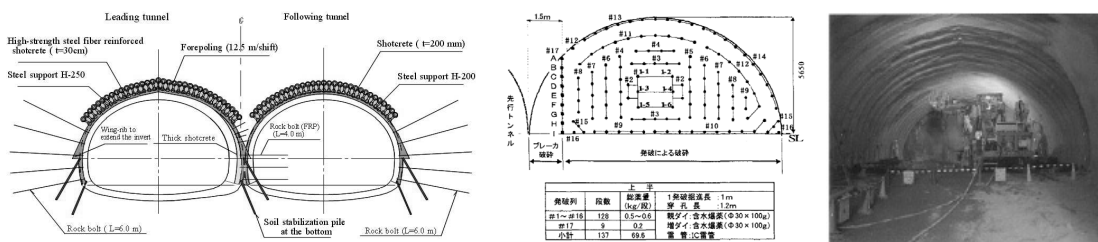
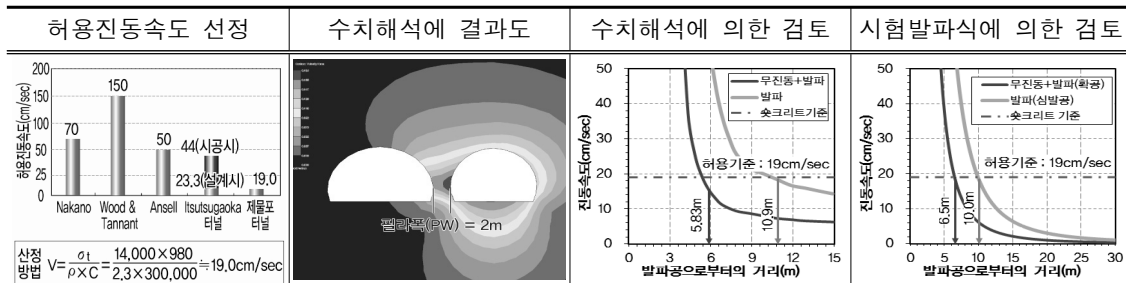


그림 5.1 Itsutsugaoka 터널 시공사례

5.2 필라부 지보재 안정성 평가

스�크리트의 안정성은 허용진동속도를 기준으로 검토하였다. 진동허용기준은 국외사례와 슛크리트의 공학적 특성을 고려하여 19cm/sec로 선정하였으며, 화공발파시 공당 1.0kg의 화약을 사용하여 시험발파식과 수치해석을 통해 안전성을 평가하였다. 해석결과 발파공법 적용시 이격거리 10m(PW=6m)이상, 무진동과 발파공법 조합시 6m(PW=2m) 이상에서 허용진동속도를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 선행터널의 필라 방향으로 무진동공법(3.8m)을 적용하고 선행터널 측벽부와 6.0m이상 이격시켜 발파공법을 적용할 경우 진동저감 및 필라부 암반손상을 최소화할 수 있어 슛크리트 및 필라 안정성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

표 5.1 발파진동의 의한 슛크리트 영향 평가



5. 결 론

본 고에서는 분기구간 터널 계획시 적정 필라폭 산정과 필라부 암반손상을 최소화하고 지보재 안정성을 확보할 수 있는 굴착방법 및 안정성 평가방법을 제시하였다.

- 1) 필라부의 안정성 평가방법으로 기존제안식과 수치해석 방법을 활용하여, 필라폭 2.0m 이상 확보시에는 필라부의 안정성이 확보되는 것으로 평가되었다. 또한, 필라부의 텐션볼트 적용시 필라부 안전율이 약 3~15% 향상되는 것으로 나타났다.
- 2) 선형터널의 지보재 안정성은 슛크리트 허용진동속도(19cm/sec)를 기준으로 평가하였다. 후행 터널에 무진동 암파쇄공법과 발파공법의 조합은 암반손상권 최소화와 진동저감효과로 필라와 슛크리트의 안정성 확보에 큰 역할을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 김도식, 김영근, 2007, 암반 필라를 포함한 비대칭 근접 병설터널의 안정성 평가에 관한 연구, 한국터널공학회 논문집, Vol.9, No4, pp. 387-401.
2. 홍의준, 장석부, 송기일, 조계춘, 2010, 발파시 터널 슛크리트의 최대입자속도와 부착상태평가 분석, 한국터널공학회 논문집, Vol.12, No3, pp. 247-255.
3. M. Kamimura 등, 2002, Discussion on the behaviours of parallel tunnel with a small clearance, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp. 898-906.