

저토피 불량지반 터널지보패턴 보강설계 및 시공사례



김 세 환
삼성물산(주)
기반기술팀 과장
(sh.13.kim@samsung.com)



장 석 부
삼성물산(주)
기반기술팀 부장
(seok.chang@samsung.com)



박 영 술
삼성물산(주)
원주-강릉 0공구 차장
(sulid@samsung.com)



강 인 철
삼성물산(주)
원주-강릉 0공구
현장소장, 부장



신 영 완
㈜하경엔지니어링
사장
(ywshin@hakyoug.net)

1. 서론

터널의 굴착방법으로 이용되는 NATM의 개념은 터널 주위 지반의 변위를 적절히 허용하여 지반 자체의 지보능력을 최대한 발휘하고 슛크리트와 록볼트로 최적의 시간에 보강하여 터널의 안정성을 확보하는 것이 기본원리이다. 그러나 이론과 달리 현장에서는 적정 시간에 지보재를 설치하지 못하거나 보강량이 부족하여 변위를 제어하지 못할 경우가 있다. 이러한 이유로 NATM에서는 굴착시 변위계측이 중요하며, 계측 모니터링 결과 지속적인 변위가 발생 할 경우 지보량을 늘려주어야 한다.

원주~강릉 철도건설 0공구 중 00터널은 104m의 짧은 터널로 풍화가 심한 풍화토, 풍화암이 혼재된 구간을 통과하는 터널이다. 그림 1은 00터널 지보패

턴 적용현황이다. 기 굴착구간인 터널 종점부에서 과다변위가 발생하여 원인을 조사하고 보강방안을 수립하였다. 과다변위에 대한 원인과 보강방안을 수립하기 위해서 시공중 막장관찰 자료, 경사 및 수평시추, 현장시험과 실내실험 자료를 이용하여 원인을 분석하였다. 또한, 시공중 계측자료를 이용하여 역해석을 통해 지반물성을 재산정하였다. 00터널은 당초 설계시 대부분 Ⅲ~Ⅳ등급 암반으로 평가되었으나, 시공중 확인된 지반조건은 매우 불량하여 PD-6-1A 및 PD-6B로 시공되었다. 특히 서원기(현) 104km490~104km478.6구간은 지반조건이 다소 양호한 것으로 평가되어 현장 변경패턴인 PD-6B로 시공하였으나, 천단침하가 크게 발생하여 하반은 PD-6-1A로 변경하여 시공하였다.

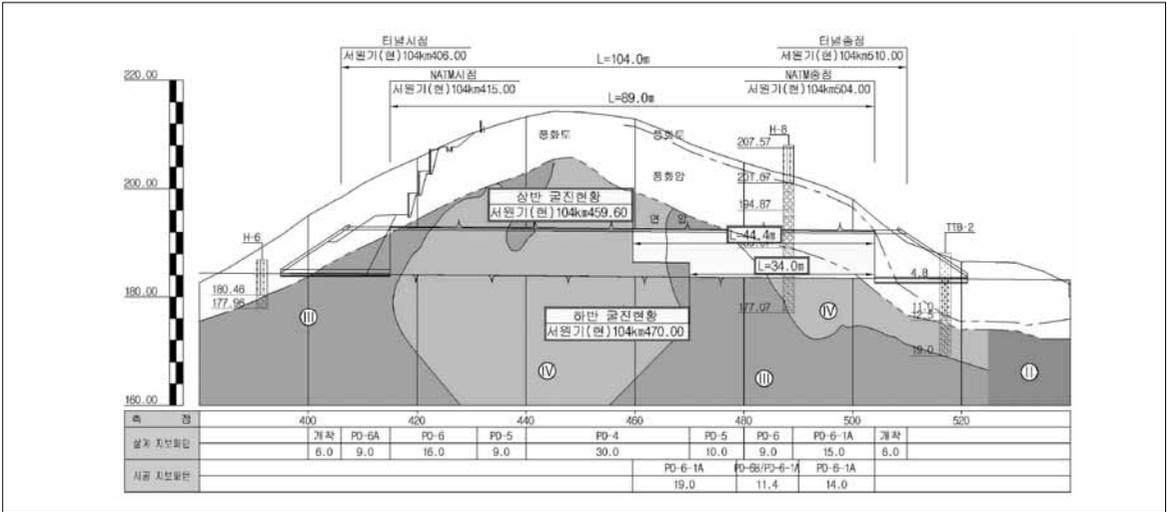


그림 1. 원주~강릉 O공구 00터널 기 굴착구간 구간별 지보패턴 적용현황

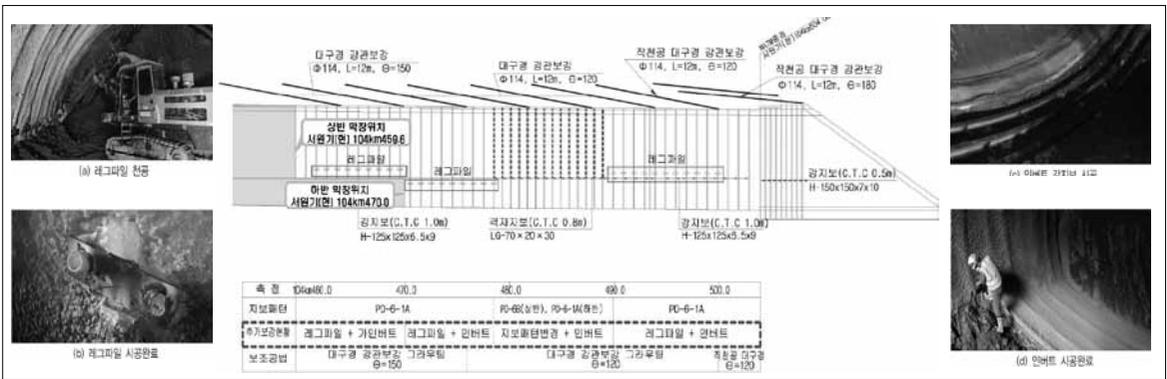


그림 2. 기굴착구간 추가보강 현황

2. 변위 발생 현황

00터널은 종점에서 시점방향으로 굴착공사가 착수되어, 상반은 44.4m, 하반은 34.0m 구간이 굴착된 상태이며, 굴착공사 중 서원기(현)104km468.0부터 104km497.0까지 29m구간에서 3차 계측관리기준(25mm)을 초과하는 과대 천단침하가 발생하여 막장을 폐합하고 굴착공사가 중지된 상태이며, 시공중 변위발생을 억제하기 위해서 측벽부 레그파일(소구경 강관), 가인버트 및 영구인버트(강지보 포함) 등의 추가

보강을 수행하였다. 그림 2는 기굴착구간 추가보강 현황이다.

특히, 격자지보가 시공되고 레그파일이 미설치된 구간(서원기(현)104km480~104km487, L=7.0m)에서 최대 천단변위(127.9~150.6mm)가 발생하였다. 계측기 위치별 변위발생 현황은 그림 3과 같다.

2.1 주요구간 경시변화 분석

서원기(현) 104km495구간은 PD-6-1A 적용구

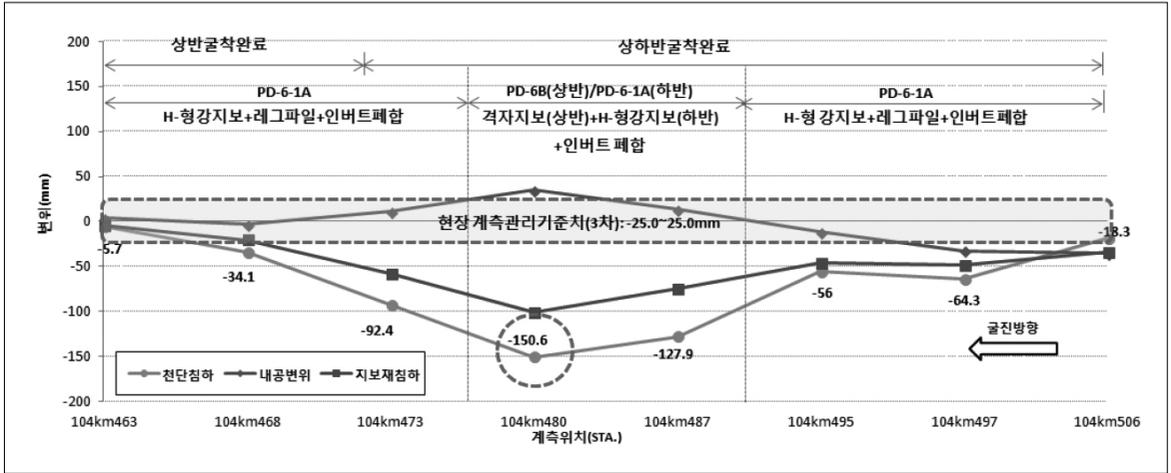


그림 3. 계측기 위치별 변위 발생현황

간으로 천단침하 56.0mm, 지보재 침하 46.2mm로 수렴된 상태이며 굴착초기 변위속도 4.2m/day로 매우 급격한 천단침하 발생경향을 보였으며, 상단 막장이격거리 약 32m(2.5D) 이내에서는 터널굴진에 따른 천단침하가 증가하다가 막장이격거리 32.0m 이상 이격시에는 천단침하가 수렴하는 경향을 보여 굴착영향 범위는 32.0m(2.5D)로 판단된다. 서원기(현) 104km480구간은 PD-6B(격자지보(상반)) 적용구간으로 천단침하 150.6mm 지보재 침하 100.8mm로 수렴된 상태이다. 상반막장이격거리는 20.4m(1.7D) 이격되어 천단침하가 수렴상태로 보이나 굴착영향 범위 이내로 굴착 재개시 추가발생 가능성이 있을 것으로 예상된다. 표 1은 막장이격거리 1.7D~2.5D구간 경시

변화 분석결과이다.

서원기(현) 104km473구간은 PD-6-1A 적용구간으로 천단침하 92.4mm, 지보재 침하 57.5mm로 수렴된 상태이며, 상반 막장이격거리 13.4m(약1.1D) 이격되어 천단침하가 수렴상태로 판단된다. 서원기(현) 104km468구간은 PD-6-1A 적용구간으로 천단침하 34.1mm 지보재 침하 20.4mm로 수렴된 상태이며, 상반굴착에 따른 변위속도 2.9mm/day로 급격한 천단침하 발생 경향을 나타냈다. 표 2는 막장이격거리 0.7D~1.1D구간 경시변화 분석결과이다.

상반 막장이격거리는 8.4m(0.7D) 이격되어 천단침하가 수렴상태로 보이나 굴착 재개시 추가 변위발생 가능성이 있을 것으로 예상된다. 추가보강으로 적용

표 1. 막장이격거리 1.7D~2.5D구간 경시변화 분석

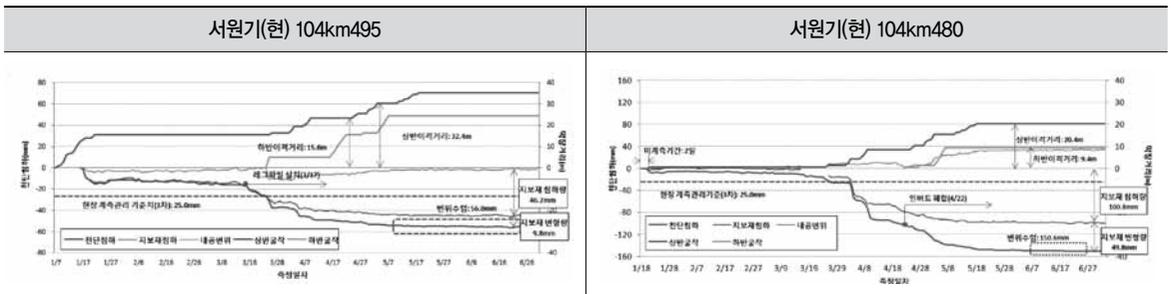
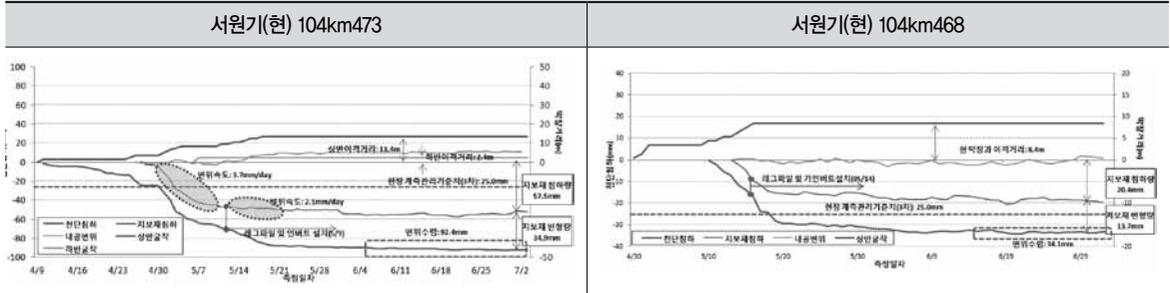


표 2. 막장이격거리 0.7D~1.1D구간 경시변화 분석



된 레그파일 및 인버트 설치 후 천단침하와 변위속도 및 지보재 침하가 감소하는 것으로 나타나 레그파일 및 인버트가 변위를 일정수준 제어하고 있는 것으로 분석되었다.

2.2 변위발생 경향 분석

변위발생 경향을 분석한 결과 천단침하에 비해 내공 변위 발생은 매우 작은 것으로 분석되었다. 이는 전반적으로 불량한 지반조건 대비 지보재의 기초부 지지력이 부족하여 지보재 침하가 크게 발생하고 그 값이 천단침하에 누적되어 나타난 결과로 판단되며 이는 전형적인 토사지반 터널거동과 유사한 경향을 보인다. 구간별 천단침하 및 측벽침하 발생경향은 표 3과 같다.

2.3 터널 내공검측 결과

내공검측결과 서원기(현)104km475~498(L=23.0m) 구간에서 내공이 부족한 것으로 확인되었으며, 이는 계측자료 분석 결과와 동일하게 주로 과대 천단침하 발생구간에서 내공이 부족한 것으로 나타났다. 터널 내공은 변위가 크게 발생한 천장부에서 주로 부족한 것으로 확인되었다. 내공 부족량은 대부분 50mm 미만의 값을 보이나 국부적으로 위치에서 50mm를 초과하여 최대 64mm의 내공부족이 확인되었다. 위치별 내공검측 결과의 전개도는 표 4와 같다.

3. 지반조건 재평가

시공중 막장관찰 자료, 경사 및 수평시추(5공), 현장 시험과 실내실험 결과분석에 의하면 기굴착 구간 지반조건은 대부분 풍화가 심한 풍화토, 풍화암 및 점토

표 3. 터널변위 발생 경향

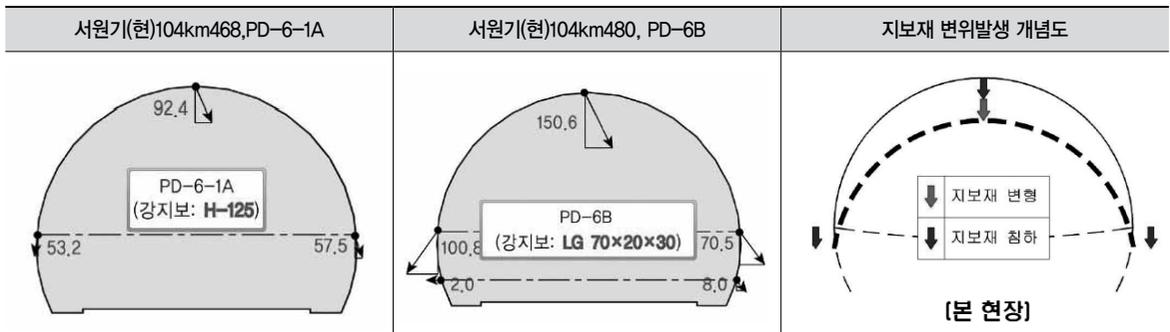
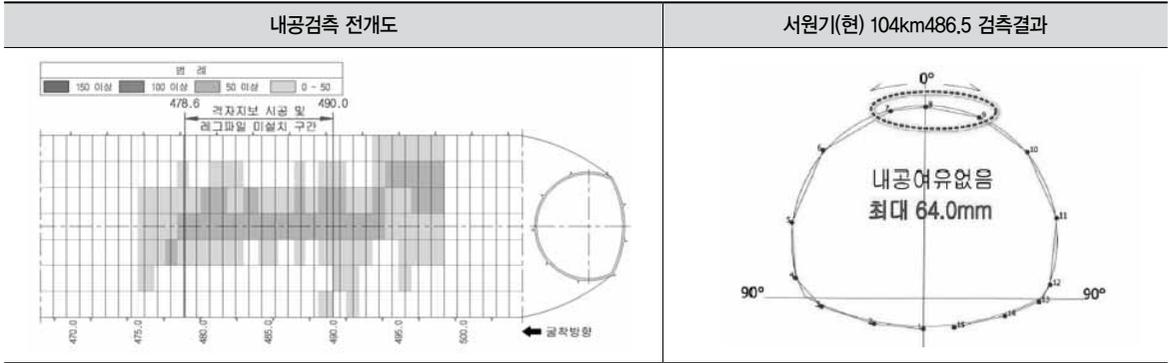


표 4. 내공 검측 결과



를 포함하고 있는 단층대가 출현하였다. 암반은 파쇄 대 및 잔절리가 다수 발달하여 RMR 20이하의 불량한 지반조건으로 평가되었다. 특히, 최대 천단침하가 발생한 서원기(현) 104km480 부근은 점토가 충전된 고각의 절리가 발달하는 것으로 분석되었다. 일부 연암이 분포하는 것으로 확인되었으나, 파쇄가 심하고 전반적으로 불량한 상태임을 고려할 때 차별풍화로 인해 국부적으로 남아있는 연암층 통과에 따른 결과일 가능성이 크다. 그림 4는 막장 관찰자료 분석결과이다. 실내시험 결과 일라이트, 녹니석 등 점토광물 함량비가 약 15%를 차지하고 있어, 녹니석과 같은 점토광물이

엽리면을 충전하고 있을 경우 터널굴착으로 인한 지하수 유출에 따른 유실로 엽리면 또는 절리면의 전단강도가 저하될 수 있으므로 굴착 작업시 주의가 필요하다.

표 5는 지반조건 재평가 결과이며, 당초 실시설계시 예측된 지반조건 보다 매우 불량한 것으로 평가됨에 따라 OO터널 중점부 과대 천단침하 발생은 불량한 지반조건에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 불량한 지반조건에서 발생 가능한 Squeezing이나 지반정수 재산정을 통한 시공 지보패턴 적정성 검토 등의 과대 천단침하 발생 원인에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

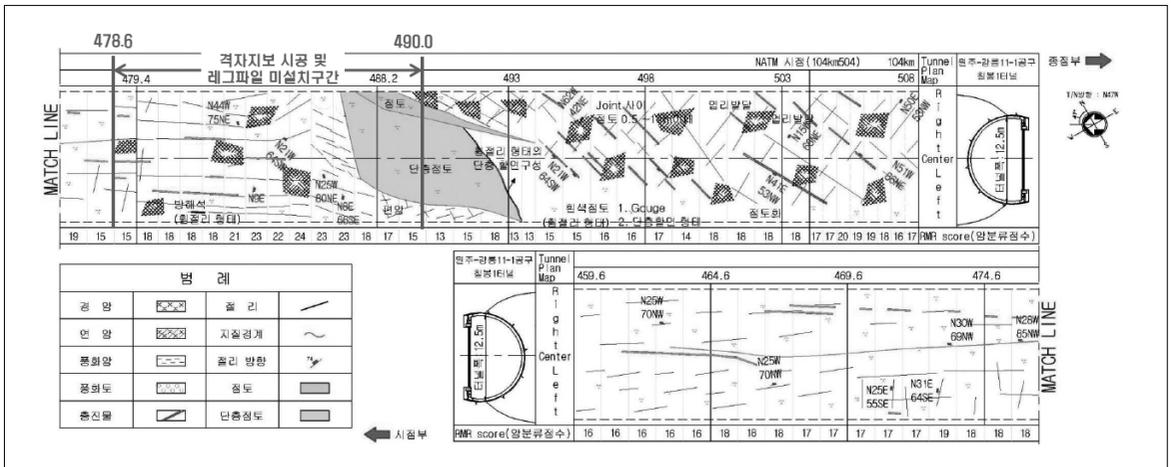
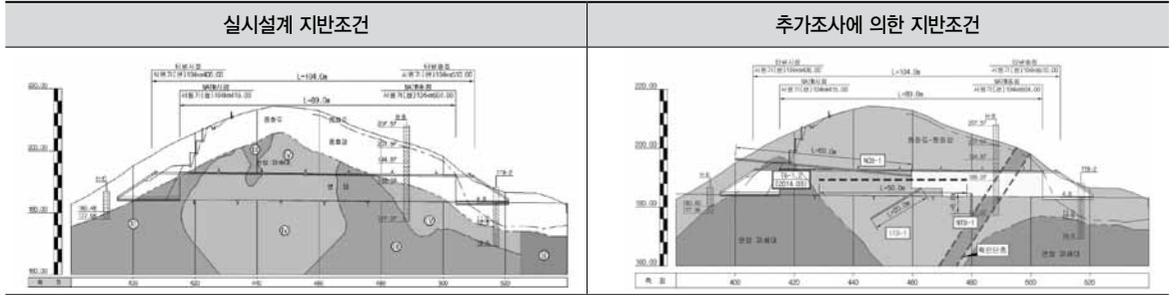


그림 4. 막장 관찰자료 분석결과(지질 평면도)

표 5. 지반조건 재평가 결과



4. 과대 천단침하 발생원인 분석

막장관찰자료 분석 및 추가 지반조사를 통한 지반 조건 재평가 결과 OO터널 종점부 굴착 공사중 발생한 과대 천단침하의 지질학적 원인은 풍화토, 풍화암, 점토가 충전된 고각의 절리가 발달한 암반 및 단층파쇄대 분포등의 불량한 지반조건으로 분석되었다. 이에 따라 불량한 지반조건에서 발생 가능한 Squeezing 검토와 지보재 기초부 지지력 검토 및 역해석을 통한 지반정수 재평가를 통한 과대 천단침하 발생원인 분석을 수행하였다.

4.1 Squeezing 발생가능성 검토

Squeezing은 터널굴착으로 유도되는 응력이 주변 암반의 강도를 초과할 경우 내공변위가 크게 발생하여

터널붕괴 및 지보재의 파괴가 유발되는 현상으로 본 검토구간과 같이 풍화토, 풍화암 등 연약한 지반에서 터널굴착시 발생할 수 있다. Squeezing 발생가능성은 경험적인 방법과 강도-응력비에 의한 검토를 통해 평가하였으며, 표 6은 Squeezing 검토결과이며, 과대 천단침하 발생구간에서 Squeezing 발생가능성은 없는 것으로 판단된다.

4.2 역해석을 이용한 과대 천단침하 발생원인 분석

일반적으로 지반조사 결과로 산정된 지반정수를 이용하여 터널거동을 예측하는 방법은 터널굴착에 의한 지반 이완 및 이에 따른 강도저하와 변형 특성치 변화를 고려하지 못한다. 따라서, 시공중 계속결과의 지속적인 피드백(Feedback)을 통하여 설계 검토모델에 대

표 6. Squeezing 발생가능성 검토

경험식에 의한 검토	강도-응력비에 의한 검토
<ul style="list-style-type: none"> Singh et al, 1992 $H = 350 \times Q^{1/3}$ (H : 한계 토피고) $H = 21.5m < 126.3m$ (토피고) 	<ul style="list-style-type: none"> ISRM $\sigma_{\theta} = 2 \times \sigma_v$ $q_{c_{mass}} = 0.5 \exp(0.06 \times RMR) (MPa)$ $\sigma_{\theta} / q_{c_{mass}} = 0.23 < 1.0$
<ul style="list-style-type: none"> Goel et al, 1995 $H = 275 \times N^{0.33} \times B^{-0.1}$ (H : 한계 토피고) $H = 21.5m < 45.1m$ (토피고) 	
→ No Squeezing	→ No Squeezing
	<ul style="list-style-type: none"> Goel et al, 1995 $q_{c_{mass}} = 0.5 \exp(0.06 \times RMR) (MPa)$ $q_{c_{mass}} / \gamma H = 8.83 > 1.0$

한 보완이 필요하며 주로 역해석 방법이 이용되고 있다. 본 검토에서는 지반요소 중 터널거동 및 지보재 응력변화 특성에 가장 큰 영향을 미치는 지반변형계수 (E)를 매개변수로 결정하여 역해석을 수행하였다. 현장에서 모니터링 된 천단침하를 고려하여 지반변형계수를 재산정한 결과, 원지반 물성의 52~78% 적용시 예측치와 유사한 천단침하가 발생하는 것으로 예측되었다. 표 7, 8은 지반정수 재평가 결과이다.

역해석을 통해 재산정된 지반정수를 수치해석에 반

영하여 역해석 위치별 시공 지보패턴에 대한 적정성 검토를 수행하였으며, 과대 천단침하 발생에 따른 추가 보강현황 및 터널 굴착상태를 해석에 반영하였다. 시공지보패턴 적정성 검토 결과, 터널 상하반 굴착이 모두 완료된 구간은 강지보 응력이 모두 허용치를 초과(항복응력 이내)하는 것으로 검토되었고 특히, 격자 지보가 적용된 구간의 지보재 응력이 매우 높은 것으로 검토되었다. 이는 지반조건에 비해 기시공 지보패턴의 지보재 강성이 부족한 것에 기인한 것으로 판단

표 7. 지반정수 재평가 결과 요약

구 분	지보패턴	강지보	당초 변형계수	재산정 변형계수
서원기(현) 104km468	PD-6-1A	H-125	50MPa (풍화토)	39MPa(▼22%)
서원기(현) 104km473				60MPa(▲20%)
서원기(현) 104km480	PD-6B	LG-70		26MPa(▼48%)

표 8. 지반정수 재평가 결과

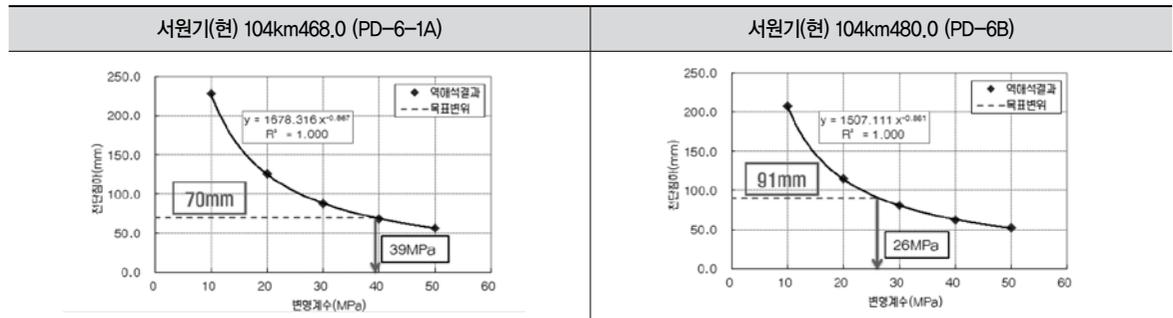


표 9. 시공 지보패턴 적정성 검토결과

구 분		서원기(현) 104km468	서원기(현) 104km473	서원기(현) 104km480
지보패턴	상반	PD-6-1A	PD-6-1A	PD-6B(격자지보)
	하반			PD-6-1A
숏크리트 응력(MPa)		허용응력 이내 (2.8 < 8.4)	허용응력 이내 (3.2 < 8.4)	허용응력 이내 (3.5 < 8.4)
강지보 응력(MPa)		허용응력 이내 (203 < 210)	허용응력 초과 (224 < 210)	허용응력 초과 (277 < 210)

되며, 표 9는 시공 지보패턴 적정성 검토결과이다.

4.3 과대 천단침하 발생원인 종합 분석결과

OO터널 종점부 과대 천단침하 발생원인은 크게 불량한 지반조건, 지보재 기초부 지지력 부족 및 지보재 강성 부족으로 요약할 수 있다. 표 10은 본 현장의 과대변위 발생 미케니즘을 도식화한 것이다. 막장관찰 자료 분석 및 추가 지보조사를 통한 지반조건 재평가 결과 기굴착 구간 지반은 대부분 풍화토, 풍화암이 혼재하고 풍화도는 풍화가 심한 상태이며, 일부 점토 형태로 나타났다. 최대 천단침하가 발생한 구간의 경우 점토가 충전된 고각의 절리가 만히 발달한 것으로 분석되었다. 시공 중 계측자료 분석결과 지보재 변형에 비해 큰 지보재 침하량이 발생한 것으로 분석되었는데 이는 불량한 지반조건에 따른 지보재 기초부 지지력 부족으로 지보재 침하가 크게 발생한 것으로 판단된다. 계측결과를 이용한 역해석을 통해 지반정수 재평가 결과 당초 실시설계시 평가된 지반정수 보다 낮은 범위로 산정되었으며 재평가된 지반정수를 적용한 시공지보패턴 적정성 검토결과 지보재 응력이 허용치를 초과하는 것으로 검토되었다. 이는 불량 지반조건에 비해 지보재 강성이 부족하여 발생한 결과로 판단된다.

5. 과대 천단침하 발생 및 미굴착구간 보강대책 검토

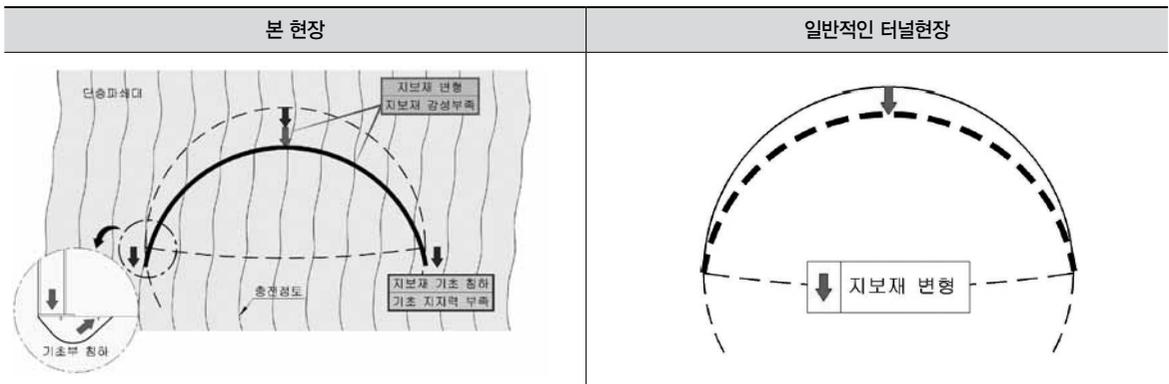
5.1 기굴착 구간 보강대책

OO터널 종점부는 과대 천단침하구간에 대한 내공 검측 결과 주로 천단부에서 내공여유가 거의 없는 것으로 분석되어 강지보 추가보강이나 슛크리트 추가타설 등의 추가보강이 어려운 조건으로 기굴착 구간에 대한 보강대책으로 콘크리트 라이닝 조기타설을 계획하였다. 특히 OO터널 종점부와 같이 불량한 지반조건에 따른 과대 천단침하의 발생으로 터널 안정성이 저하된 경우 콘크리트 라이닝 조기타설을 통해 터널 안정성 확보가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 과대 천단변위로 내공단면이 부족하여 콘크리트 라이닝 두께를 400mm에서 350mm로 축소하고 불량한 지반조건을 고려하여 인버트를 적용하여 폐합단면으로 계획하였으며, 시공순서는 그림 5와 같다.

5.2 미굴착 구간 보강대책

기굴착 구간의 과대 천단침하 발생원인은 불량한 지반조건과 부족한 지보재 강성 및 기초부 지지력 부족에 따른 지보재 침하가 그 원인인 것으로 분석됨에 따

표 10. 과대변위 발생 미케니즘



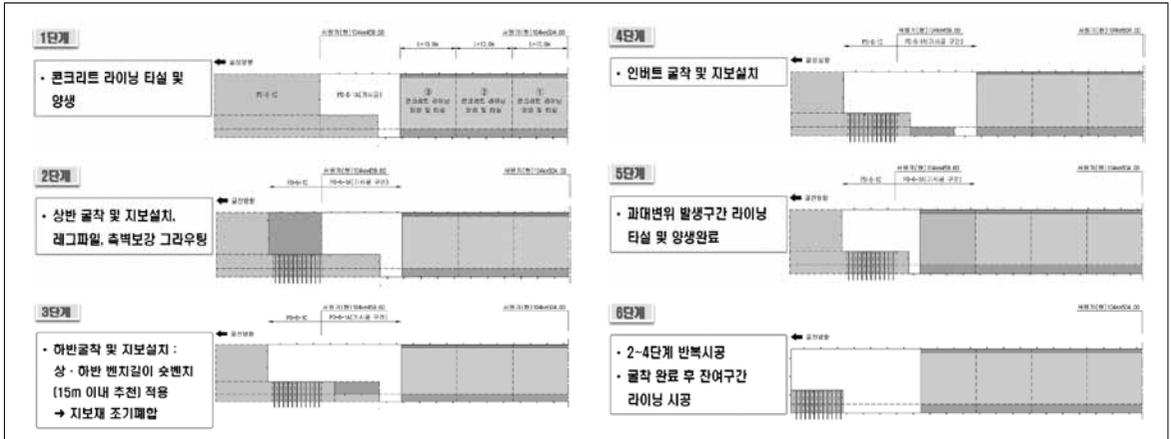


그림 5. 과대변위구간 보강대책 시공순서

표 11. 지보재 강성증대 및 기초침하 방지대책

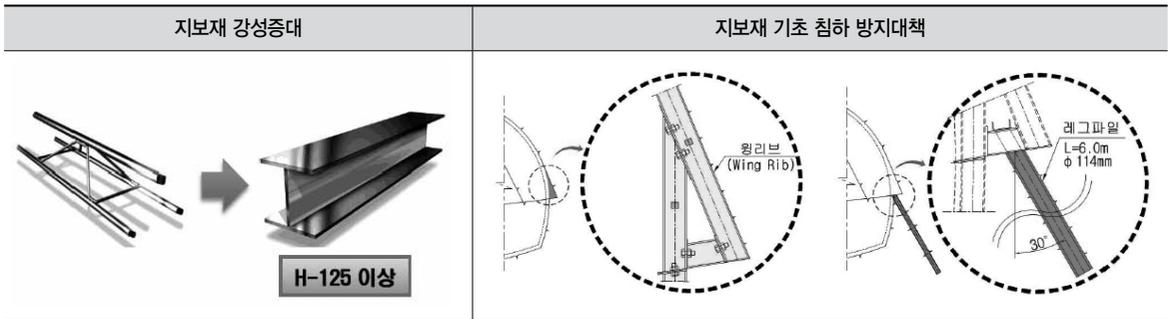
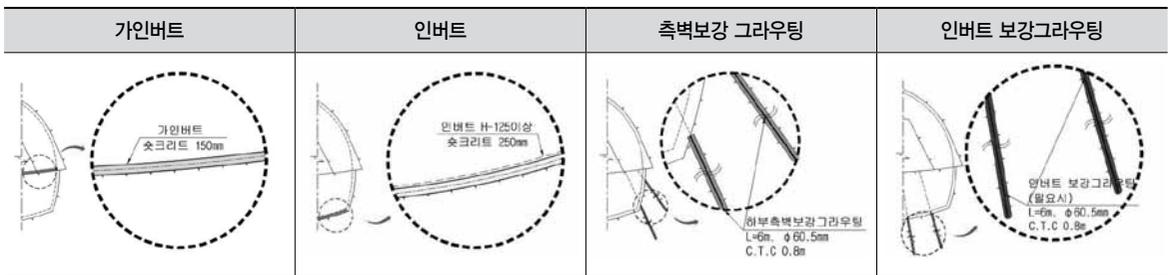


표 12. 과대변위 방지대책



라 미굴착 구간에 대한 지보패턴 선정시 지보재 강성증대 및 지보재 기초부 침하 방지 등을 위한 공법을 계획하였다. 본 현장은 격자지보가 적용된 PD-6B 구간에서 최대 천단침하가 발생한 것으로 분석되었다. 따라서 미굴착 구간에 대한 지보패턴 선정시 표 11과

같이 격자지보를 배제하고 H-형 강지보를 선정하였으며, 지보재 기초부 침하방지 대책으로 각부보강 및 레그파일공법 적용을 통해 지지력을 증대시켰다.

표 12와 같이 과대변위 방지대책으로는 터널 굴착 형상 개선 및 지보폐합 효과로 터널 변위발생을 억제

하는 공법으로 가인버트(상반) 또는 영구 인버트를 적용하였으며 측벽부 및 터널 하부 지반개량을 통해 터널 변위발생을 억제하는 측벽보강 그라우팅을 적용하였다.

6. 결론

저토포 불량지반에 시공되는 터널의 안정적인 시공을 위하여 시공중 계측자료와 추가로 실시된 지반조사 결과를 바탕으로 터널지보패턴 보강설계 및 시공사례를 소개하였다. 현재 현장상황은 재 굴착을 준비중에 있으며 시공중 상세한 막장관찰과 밀착 계측관리 통해 철저한 시공관리를 계획중이다. OO터널의 굴착공사 중 발생한 과대 천단침하 발생원인 및 대책을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지반조건 재평가 결과 터널구간은 전반적으로 풍화토, 풍화암이 혼재하고 점토가 충전된 고각의 절리가 발달한 암반 분포로 지반조건이 매우 불량하여 터널 굴착시 변위가 크게 발생한 것으로 판단된다.
- 2) 불량한 지반조건 대비 지보재 기초부 지지력이 부족하여 지보재 침하가 크게 발생하고 그 값이 천단침하에 누적되어 나타난 결과로 판단된다.

- 3) 불량한 지반조건 대비 지보재 강성이 부족하여 지보재 변형이 크게 발생한 것으로 판단된다.

보강대책은 시공현황을 고려하여 과대 침하발생구간과 미굴착 구간에 대해 별도의 보강대책을 수립하였으며 세부 내용은 다음과 같다.

- 1) 과대 천단침하 발생 구간에 대한 보강대책은 콘크리트 라이닝 조기 타설 방안을 계획하였으며 내공부쪽에 따른 콘크리트 라이닝 두께를 400mm에서 350mm로 축소 적용하였다.
- 2) 미굴착 구간은 기굴착 구간의 과대 천단침하 발생원인인 지보재 강성 및 기초부 지지력 부족을 고려한 지보패턴 계획을 계획하였다. 지보재 강성 증대를 위해 강지보 H-150을 계획하고 지보재 기초부 지지력 증대를 위해 각부보강, 레그파일, 측벽보강 그라우팅을 계획하였으며, 침하방지를 위해 가인버트 및 영구인버트를 계획하였다.

참 고 문 헌

1. 한국터널지하공간학회(2014), 원주~강릉 철도건설 제 0공구 노반시설 기타공사 OO터널 과대변위 발생원인 및 대책 연구보고서, pp. 3~112.