

경부고속철도 14-3공구 도심지 터널의 보조 보강공법 설계적용사례



이성기
(주)태조엔지니어링 사장



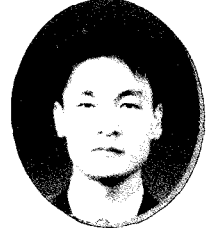
안경철
(주)태조엔지니어링 전무



김명훈
(주)태조엔지니어링 차장



윤용준
(주)태조엔지니어링 과장
(geojuni@naver.com)



이중관
(주)태조엔지니어링 대리

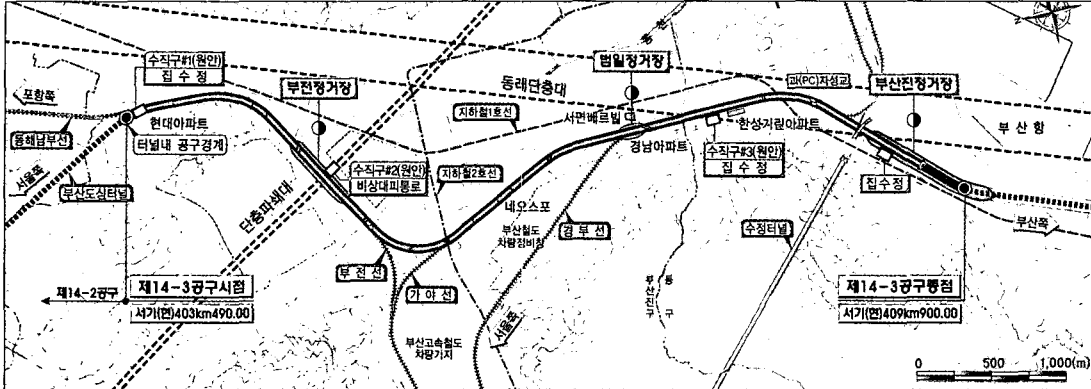
1. 서론

경부고속철도 14-3공구는 도심지를 하부로 통과하는 터널구간으로서, 2010년도 완공을 목표로 하는 총연장 130.4km에 달하는 경부고속철도 2단계 건설사업(대구~경주~부산)의 마지막 공구이다. 공사시점을 기준으로 14-2공구까지는 산악터널이며, 14-3공구는 도심형 터널로 계획되어 있다. 과업구간의 특성상 시공성 및 안정성을 확보해야 할 뿐만 아니라 노선주변 주거지역이 밀집한 관계로 친환경적인 터널굴착이 요구되며, 기본적인 터널굴착방법은 NATM, TBM 선진도강 및 확공, 그리고 기계굴착을 전제로 하여 지반조건 변화에 따른 굴착공법 및 보강공법을 적용하였다.

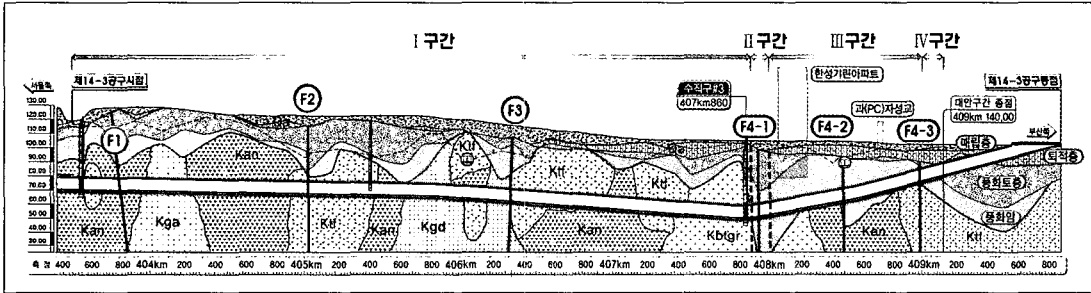
2. 현황분석

2.1 주변현황

경부고속철도 14-3공구 부산도심터널은 부산광역시 진구 및 동구 일원에 위치하고 있으며, 총연장이 5.65km이고, 현재 운행 중인 동해남부선, 가야선, 경부선 등의 선로 직하부를 통과하고 있다. 시점 기준 1.5km 인근의 부전역 직하부와 범일정거장을 근접하여 통과하고, 시점기준 3.5km 지점에서 부산지하철 2호선(본선터널과 이격거리 12.7m)과 교차하고 있다. 또한 전체구간에 아파트 및 대규모 주상복합형 집합건물과 자성대 교량 등 지상구조물이 위치하며, 후반부에는 동래단층대와 교차하는 구간이



평면도



지질 종단면도

그림 1. 평면도 및 지질 종단면도

존재한다.

2.2 지반현황

과업구간은 북동~남북방향의 산계를 따라 기반암인 안산암과 안산암질 응회암, 반려암, 화강암 및 화강섬록암이 분포하며, 노선주변으로 충적층 및 해안매립지가 넓게 분포한다. 동래단층대는 노선주변을 따라 NNE방향의 주향이동성 단층으로 파쇄대를 형성하고 있으며, 노선 후반부는 토사 혹은 풍화토로 높은 함수비의 연약지반이 분포한다. 이러한 지층분포를 바탕으로 전체구간을 I(연·경암), II(단층

core 및 파쇄대), III(풍화암 및 극풍화암), IV(토사층)의 4개 구간으로 분류하여 보조 보강공법 설계시 활용하였다.

2.3 주요 설계현황

부산도심터널의 주요구조물로는 본선터널, 수직구, 횡갱 등이 있으며, 본선터널은 NATM, TBM+NATM 확공, 기계굴착 구간으로 나누어지고, 수직구는 고속철도 방재설계기준과 공기단축을 위해 3개소로 계획하였다. 또한 횡갱 단면은 TBM 장비 진출입과 원활한 집수 및 배수, 비상시 환기 및

| 경부고속철도 14-3공구 도심지 터널의 보조 보강공법 설계적용사례 |

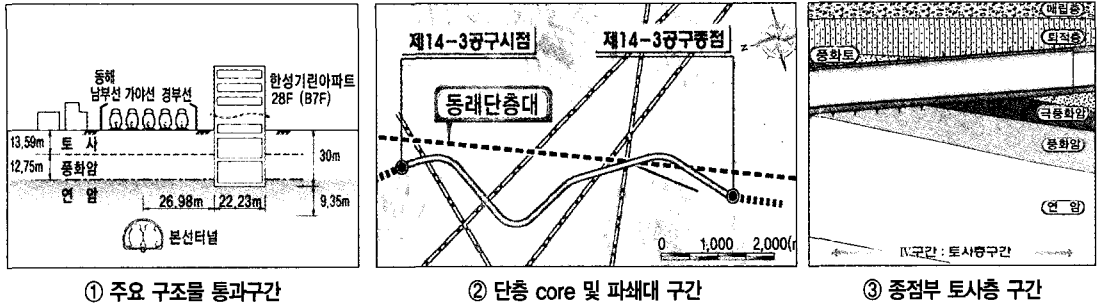


그림 2. 주요 현황

공사용 장비의 교행이 가능하도록 폭 19.25m의 대 단면으로 설계하였다. 또한 복잡한 주변현황 및 지반조건을 터널 설계에 적극 반영하기 위하여, 지상 및 지중 구조물의 유무, 단층대의 존재, 지반의 종류 등을 고려하여 중벽분할, 링컷분할, 측벽도강 등의 굴착공법과 대구경 AGF, 막장면 FRP 보강, 상족, 상족볼트, 상족파일 등의 다양한 보조공법을 계획하였다. 또한 시험그라우팅을 실시하여 대상 지반에 적합한 그라우트재를 선정하는 등 근접시공에 따른 인접구조물 및 기존 철도 안정성을 확보하고 주변 지반조건에 따른 굴착공법과 상황에 맞는 대처방안을 선정하여 문제점을 최소화하는 해결방안을 제시하였다.

3. 터널구간 보강공법 설계 및 적용

3.1 설계 개요

터널굴착에 의한 기존 철도노반 및 주변건물의 손상을 최소화하기 위하여 다음과 같은 순서로 설계를 수행하였다. 먼저 굴착단계별 침하영향을 고려하여 관리기준치를 설정 및 보완하고, 수리·역학적 상호

해석 및 설계를 수행한 후, 실험실시험 및 리스크 분석과 다양한 수치해석을 통해 적정성을 검증하고, 검증 결과에 따라 설계 내용을 수정 및 보완하는 것으로 계획하였다.

3.2 국내외 근접시공에 따른 터널굴착 사례분석

일본에서 현재 운행중인 철도 직하부에 신규노선을 건설하는 도큐토요코선과 미나토-미라이21선 연결공사(총연장 2km) 현장을 방문하여 지반조건, 설계현황, 보조공법 적용사례 등의 자료수집과 영국, 오스트리아 등의 해외기술자문 결과를 비교·검토 하였으며, 가이선 건설공사 시 기존 경부선 하부를 터널로 통과한 주령 2터널 관련자료와 국내 전문가 의견을 고려하여 설계에 반영하였다.

3.3 터널안정화를 위한 보조 보강공법

3.3.1 주요 구조물 통과구간 지반보강공법 선정

과업구간은 도심터널로써 전 구간에 걸쳐 다수의 지상 및 지중 구조물과 근접하고 있으므로, 터널 굴

착시 이들 구조물의 하중으로 인한 지반의 지중응력 증가로 인해 발생하는 지반침하 및 진동·소음을 고려하여 보강공법을 선정하였다. 먼저 중벽분할 굴착으로 상부 천단침하를 억제하고, 터널 상부에 토사~파쇄대 암반까지 광범위한 지질을 대상으로 시공 가능한 대구경 AGF 공법을 적용하여 종방향 아칭효과로 하중분산을 도모하였다.

3.3.2 단층 core 및 파쇄대 구간

본 구간은 터널통과구간에서 심도가 깊어 연약암반 압출에 의한 대변형 가능성이 존재하여 조기에 침하가 발생하므로, 터널 막장, 천단, 상반의 자립이 요구되었다. 따라서 측벽분할 굴착으로 단계별 굴착을 시행하였고, 더불어 터널 상부에 squeezing방지를 위한 보강방안으로서 대구경 AGF 공법을 적용하여 하중을 분산하였으며, 막장면은 FRP보강 그라우팅으로 막장 자립을 도모하였다. 또한, 굴착 후 상부 반단면의 아칭효과 및 자립을 위한 Wingrib부의 지지력이 부족한 구간에 대해서는 상족(Elephant Foot)공법과 상족볼트(Foot Bolt)를 적용하였다.

3.3.3 종점부 토사층 구간

터널 종점부 약 140m 구간은 터널상부 0.5D 이내 에 퇴적층과 풍화토가 분포하고, 터널 직상부에 기

존 선로가 위치하여 막장 및 천단부의 안정성 및 바닥의 지내력 확보가 요구되었다. 따라서 링컷 분할 굴착으로 단계별 굴착을 시행하였고, 운행중인 선로 침하방지를 위하여 매립토층 하부에 존재하고 있는 점토층에 대해 압밀침하를 검토하여 Micro Pile을 존치시킴으로써 노반 침하를 억제하도록 지상보강 그라우팅을 계획하였다. 터널 천단부에는 Hole의 붕락방지와 낮은 투수성을 감안하여 우레탄계 그라우트재를 적용한 대구경 AGF 공법을 적용하였고, 막장면 안정을 위해 막장면 FRP 보강그라우팅을 계획하였다. 또한 하반 굴착 시 상반아치의 지반침하 방지와 지지력 확보를 위한 상족(Elephant Foot) 공법과 상족말뚝(Foot Pile) 공법을 적용하였다.

4. 적정성 검증

4.1 실대형 모형시험에 의한 보강공법 적정성 검증

터널후반부에 위치한 토사구간에 실대형모형시험을 통하여 토사층 터널굴착에 따른 굴착공법별 지표침하 및 거동특성을 분석한 결과, 지표침하는 지하철터널의 후방에서 크게 발생하는 것을 확인하였



그림 3. 적용 보강공법 개요도

Ⅰ 경부고속철도 14-3공구 도심지 터널의 보조 보강공법 설계적용사례 Ⅰ

으며, 굴착 시 지반이완으로 인하여 시공단계에 따라 하중이 증가하고, 인버트 비폐합 시 폐합 시보다 3배 이상의 하중이 작용하고, 보강공법 적용 시 이완 하중의 종횡방향 아칭효과가 증대되는 경향을 확인하였다. 그러므로 종점부 토사구간에 적용된 보강공법은 적정하다고 판단되지만, 터널의 교차시공 시 지하철터널 후방의 지상구조물의 안정성 확보에 유의하여야 할 것으로 판단된다.

4.2 리스크분석에 의한 보강공법의 적정성 검증

4.2.1 침하손상 위험도 평가 시스템

도심지 터널굴착에 따른 인접건물의 손상위험도 예측 및 평가를 목적으로 3차원 지반거동을 고려한 인접건물의 손상평가를 수행하였다. 평가방법은 GIS기반의 인접건물 손상위험도평가시스템(GIS-SERIMS)을 이용하여 건물의 크기 및 침하영향 분포에 따른 건물손상 위험도를 평가하고 위험건물 통과구간에 대한 보강범위 선정에 활용하였다.

4.2.2 신뢰성 기법에 의한 지표침하 분석

지반불량구간에서 발생하는 지표의 침하발생여

부에 대해 확정론적 해석과 더불어 지반의 투수계수를 확률변수로 고려하는 신뢰성 해석을 수행하였다. 확정론적 해석에서는 허용침하량(25mm)을 만족하지만, 신뢰성 해석에서는 파괴확률이 33.13%로서 불안정한 결과를 나타내었는데, 이는 확률변수로 고려된 투수계수의 분산성이 커서 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 지반정수들 중에서 불확실성이 큰 투수계수를 수치모델링의 파라메타로 활용할 경우에는 대표값을 사용하는 확정론적 해석과 더불어 분산특성을 고려하는 신뢰성 해석을 병행하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

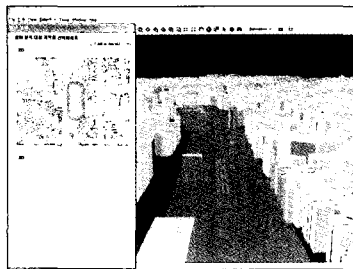
4.3 수치해석에 의한 보강공법의 적정성 검증

4.3.1 동래단층대 통과구간

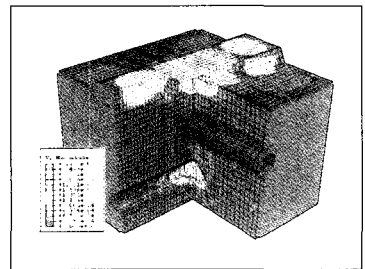
과업구간 내 동래단층대의 모양은 안산암질 응회암으로 단층점토입자를 함유하고 있으며 최대 주응력 방향은 터널 노선 방향과 유사한 NS계이다. 단층코어인 극풍화암의 변형계수가 100~150MPa, 일축 압축강도가 8~20MPa로 불량한 지반특성을 보이고 있어 연약암반 압출에 의한 대변형 가능성이 존재하여 squeezing에 대한 검토를 수행하였고, 평가



① 실대형 모형실험



② 리스크 분석



③ 수치해석

그림 4. 보조 보강공법의 적정성 검증

결과 변형율 2%, 현지암반강도비 0.3일 때 squeezing 이 발생할 가능성이 25%인 것으로 확인되었다. 그리고 지하수 유입에 의한 터널안정성 저하가 예상되므로 보강 및 차수대책이 필요할 것으로 판단되어 천공 시 자립이 가능하고 차수역할이 뛰어난 우레탄계 보조공법을 적용하였다.

4.3.2 토사구간

본 대상지역에 대하여 지하수 침투를 고려하여 3차원 수리역학적 상호해석을 수행하였으며, 터널중심 상부에서 발생한 최대 지표침하량은 14mm, 천단침하는 18mm로 평가되었으며 이는 허용최대침하량 25mm이하이므로 안전한 것으로 확인되었다.

책공법을 수립하였다. 퇴적층의 차수 상태가 불량한 경우 터널굴착 시 지하수 유출로 인하여 지반의 압밀침하 발생이 우려되므로, 지상에서 수직그라우팅을 하는 것이 가장 바람직하나, 본 과업구간은 지상에서의 작업여건이 불리하여 터널 내에서의 수평그라우팅이 불가피 하였다. 따라서 차수에 대한 대처가 요구되는 구간에서는 일본등지의 시공사례에서 검증된 바 있는 대구경 자천공 AGF 공법을 적용하여 터널주변 구조물에 대한 침하억제효과를 극대화하도록 설계에 적용하였다. 또한 일부 토사층 구간에서의 지지력 확보가 곤란한 구간에는 E. Hoek이 제안한 상족공법 및 상족말뚝을 적용하여 현장조건에 부합되는 적극적인 보조 보강공법을 계획하였다.

5. 결론

지상 및 터널 보강공법의 시공성과 안정성측면을 동시에 만족하는 최적의 터널설계가 이루어질 수 있도록 하기 위한 평가시스템을 개발하고, 시공계획을 수립함으로써 향후 대책공법 선정에 대한 검증으로 완벽한 시공이 이루어질 수 있도록 하였다. 이를 위하여 신설터널이 기존시설물을 교차하거나 근접 통과하는 기존 시공사례분석을 수행하여 체계적인 대

참고 문헌

1. SK건설(2004), 경부고속철도 제14-3공구 노반신설 기타 공사 대안설계보고서
2. 김영근(2003), 일본 철도지하화공사 현장견학을 마치고- 기존철도 직하부에서의 터널시공-, 지반공학회지
3. 윤효석(2002), "터널시공에 따른 인접 건물의 침하손상 위험도 평가", 대한토목학회 논문집