

도심지 구조물 하부에서의 터널공사 사례 - 지하철 906공구



황 의 석
대림산업(주)
기술연구소 대리
(hwanges@daelim.co.kr)



송 치 용
대림산업(주)
기술연구소 차장



이 증 성
대림산업(주)
기술연구소 부장



강 석 기
대림산업(주)
9호선 906공구 현장소장

1. 개요

서울 지하철 9호선 노선은 서울 강남의 동서간을 연결하면서 기존 지하철 노선 및 국철에서 환승할 수 있도록 계획되어 서울 외곽 및 시내 중심으로의 접근성을 향상시키고 도심의 교통난을 외곽으로 분산하는 등 서울시의 교통난 해소에 크게 기여할 것으로 기대된다. 이러한 9호선 지하철 노선 중 본 현장인 906공구는 강서소방서에서 서울도시가스 사옥까지의 구간으로 연장은 1820m이고 2개의 정거장과 6개의 환기구가 있다.

본 현장은 완만한 지형특성으로 터널 구간의 표고는 $EL+108.70 \sim EL+120.90m$ 로 대체로 평탄한 지형이다. 또한 한강 하류지역으로서, 북안으로는 불광천, 남안으로는 안양천이 합류한다. 본 지역의 지질은 선클램브리아기의 변성암

류(경기 편마암 복합체), 중생대의 화성암류, 그리고 이들 기반암을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있으며 특히 터널의 상부는 매립층과 충적층으로 구성되어 있다.

지표에서 터널까지의 심도는 약 20m 내외로 충적층과 풍화암층을 통과하고 있다. 따라서 터널 심도의 지반은 강도가 약하고 한강하류지역으로 많은 지하수의 유입이 우려되어 터널의 구조적인 안정성을 확보하는 것이 중요시 되는 현장이다. 터널의 단면 폭은 약 11m 내외이고 터널심도는 터널 폭의 약 2배 이내로 터널천단과 지표면에서 연직하향의 변위가 크게 발생할 것으로 예상되었다. 이와 같은 터널의 변형특성을 고려하고 변위를 줄이고 터널의 안정을 확보하기 위하여 터널 막장 전방의 터널 아치부를 강관다단그라우팅으로 굴착 전에 미리 보강하는 시공방법을 적용하였다.

터널 공사는 상가 및 아파트 건물등이 밀집되어 있는 도심

지에서 수행되므로 터널 굴착 중 발생하는 지반 및 구조물 거동 평가를 위해 시공 중 계측은 매우 중요한 시안이었다.

그리고 터널 막장 전방의 아치구간 천단부에는 자천공 강관 그라우팅공법($\phi 114\text{mm}$, $L=15\text{m}$, 종간격: 4m, 횡간격: 0.4m)을 사전에 보강하였으며 이에 대한 시공효과를 굴착 전에 확인하기 위하여 막장 전방에서 터널의 변형을 계측할 수 있는 방안이 필요하였다. 특히, 본 터널 공사는 도심지의 아파트 및 기존 구조물 기초에서 터널 상단까지의 토피고가 약 1.0D(10m) 되는 구간(대동아파트)이 있어 터널 굴착 공사시 매우 신중해야 했으며, 이와 같은 지상건물의 안정성을 유지하면서 굴착해야 하는 어려운 상황이었다. 따라서 터널 막장이 지상 구조물에 접근하기 전부터 터널과 지상건물의 안정을 지속적으로 평가하고 예측하며 대책을 수립하여 시공에 신속하게 적용하는 것이 매우 중요하였다.

그러므로 본 고에서는 도심지 상가 및 아파트 건물 직하부 지반에서 터널 공사가 이루어 지는 특수한 상황에서 수행된 터널 시공 공법 및 구조물 계측 사례를 소개하고자 한다.

그림 1은 지하철 906공구 현장전경이며, 그림 2는 당 현장의 평면도를 나타낸 것이다.

2.1 주변현황

전체 1820m 연장에 대하여 인접구조물 현황, 지반조건 및 터널 시공법에 따라 크게 3구간으로 나누어 정리하였다.

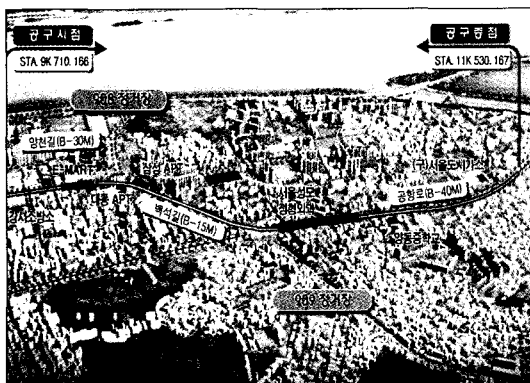


그림 1. 지하철 906공구 현장 전경

우선, 양천길 구간은 도로 폭이 약 30m 이고 준공업 지역으로써 대동아파트, 소방서, E-MART 등이 있으며, 공항로 구간은 도로 폭이 약 40m 이고 상업용 빌딩 밀집지역으로 주요 건물은 대우마이빌, 강서 예식장, 강서보건서등 2~10층 규모의 건물 등이 있다.

전체대상 구간을 표 1과 같이 양천길, 백석길, 공항로로 크게 나누어 상세한 현황 및 전경을 나타내었다.

2.2 구간별 적용공법 및 대표 지상구조물 현황

(1) 양천길 통과구간

양천길 터널공사 구간중 중점 관리대상 구조물인 대동아파트는 지하 2층 지상 19층의 철근콘크리트 구조물으로써 상세한 현황 및 본 구조물의 안정성을 최대한 확보하기 위한 터널공사 현황은 표 2 및 3에 나타내었다. 본 구간 터널공사는 대동아파트 지하주차장 바닥에서 터널 천단부까지 약 10m 정도로 매우 근접한 거리에서 공사가 이루어 지므로 터널 상부 지반의 3차원 아치효과를 기대하기 어려운 조건으로 도심지에서 민원 및 거주민의 안전에 매우 주의 해야 할 구간이었다. 또한, 지반특성이 매립층 및 충적층으로 매우 불량하였으며 이를 감안하여 대동아파트 공사시 기초지반을 Soil Cement 및 보강 콘트리트 매트 공사를 제안하여 터널 공사 이전에 지반 및 구조물 거동이 최소화 되도록 사전 조치가 이루어 졌다.

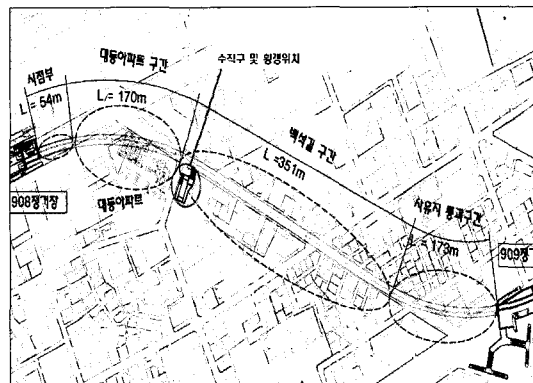


그림 2. 현장 주변현황 및 시공

도심지 구조물 하부에서의 터널공사 사례 - 지하철 906공구

표 1. 터널 노선 및 지상구간 구조물 현황



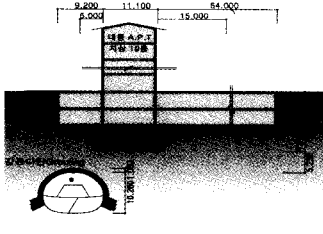
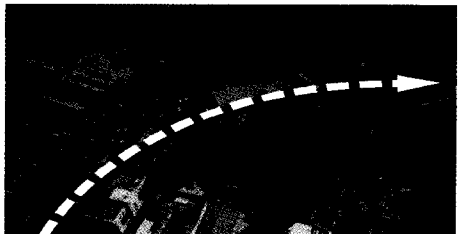
도로명	현황	현황 사진
양천길	<ul style="list-style-type: none"> 노선 : 도로중심, 양천길 사거리 일부 사유지통과 (R=300m) 도로 : 폭 30m, 지장물 다수 (상수도 ϕ2,400, ϕ1,200) 준공업 지역으로 연변에 소형공장 상가건물 위치 주요건물 : 강서소방서, E-Mart, 서울축협, 대동아파트 등 	
사유지 (공항로)	<ul style="list-style-type: none"> 노선 : 등촌삼거리 일부 사유지 통과 (R=300m), 도로 중심 도로 : 폭 40m(차도 35m, 보도 2,5m) 상업용 빌딩 밀집지역으로 2~10층 건물들이 연도변에 위치 주요건물 : 강서예식장, 강서보건소, 양동중학교, 서울도시가스 등 	

표 2. 양천길 터널 공법 및 대동아파트 현황

현 단 면 도		현 황 도	
위치	<ul style="list-style-type: none"> STA. 10K 000 ~ 10K 170 (L = 170m) 		
건물현황	<ul style="list-style-type: none"> 규모 : 지상 19층, 지하 2층 철근콘크리트 구조 기초 <ul style="list-style-type: none"> 지하주차장 : 0.8m 전면기초 APT 하부 : 1.1m의 전면기초(하부슬래브), 1.2m의 보강 MAT 기초(하부슬래브 아래), 4.5m의 Soil Cement 보강(최하부) APT와 주차장은 분리구조 		
지반조건 및 지하수위	<ul style="list-style-type: none"> 매립층(GL-1.2~2.5m), 충적층(GL-10.7m), 풍화토(GL-16.0~20.5m), 풍화암(GL-34.5~36.0m), 연암(GL-41.0~42.0m), 보통암으로 구성 지하수위 : GL-2.0~5.0m 터널천단부 : 풍화토, 터널부 : 풍화암, 터널하부 : 풍화암, 연암 		
굴착방법	<ul style="list-style-type: none"> Ring Cut : 기계굴착·굴진장 : 0.8m 		
보강방법	<ul style="list-style-type: none"> 강섬유 보강숏크리트(250mm) Steel Rib : 125×125 천정 중방향 그라우팅 : 자천공 강관 Grouting ϕ14.3, t=7, L=15.0m 중간격 : 4.0m(4열 중첩), 횡간격 : 0.4m(고분말도 시멘트) 측벽자천공그라우팅 <ul style="list-style-type: none"> 자천공강관(ϕ73), L=4.0m, 중간격 0.8m (고분말도 시멘트) 막장보강 Grouting(ϕ22) 중간격 8.0m, L=12m 선진수평 시추조사 : 15.0m마다 20m 시추조사로 지층확인 및 수발공으로 이용 		

(2) 공항로(사유지) 통과구간


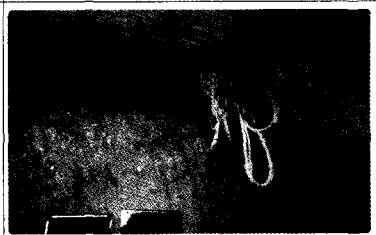
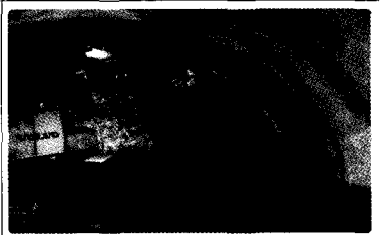


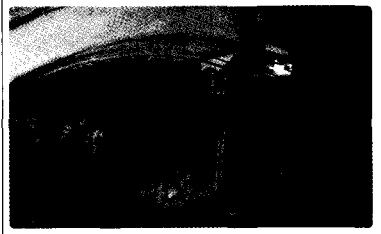

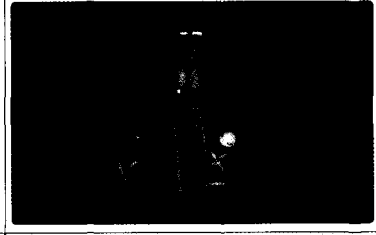


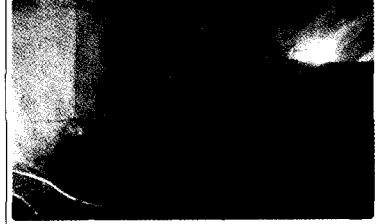

사유지 터널공사 구간중 중점 관리대상 구조물인 개인 가옥 및 건물은 대개가 지하 1층 지하 5층 이내의 구조물로서 거주민의 민원이 크게 예상되었던 구간이었다.상세한 구조물의 현황은 표 4에 나타내었으며 터널공사는 양천길(대동아파트구간)과 유사하게 적용하였다.공항로(사유지) 구간은 기본 설계시 개착공법이 제시되었으나 소규모 건물등이 밀

집되어 있어 대안 설계중 터널공법으로 변경된 구간이다.

3. 계측관리

3.1 계측기 설치현황과 계측빈도

표 3. 양천길(대동아파트 구간) 터널 시공순서

<p>① 상부기계굴착(B/H 06)</p> 	<p>② 1차숏크리트 타설(T=50mm)</p> 	<p>③ 강지보 설치(H 125mm)</p> 
<p>④ 2차숏크리트 타설(T=100mm)</p> 	<p>⑤ 3차숏크리트 타설(T=100mm)</p> 	<p>⑥ 하부기계굴착(B/H 06)</p> 
<p>⑦ 1차숏크리트 타설(T=50mm)</p> 	<p>⑧ 강지보 설치(H 125mm)</p> 	<p>⑨ 2차숏크리트 타설(T=100mm)</p> 
<p>⑩ ROCK BOLT 설치</p> 	<p>⑪ 3차 및 인버트 폐합 숏크리트타설</p> 	<p>⑫ 상 하부 굴착완료 전경</p> 

도심지 구조물 하부에서의 터널공사 사례 - 지하철 906공구

당 현장에서는 계측간격을 축소하여 계측기의 신뢰도와 정확성을 높여 중점적으로 관리하였다. 천단침하 및 내공변위계의 계측간격을 당초 10m에서 4m로 축소하였으며, 연직방향의 침하량을 관리하기 위해 지표침하계의 수량을 당초 93개소에서 123개소로 증가시켰다.

또한, 정확한 시공관리를 위해 측정빈도를 1회/일로 강화하여 측정하였고, 변위량의 과다 발생 지점에서는 2시간 간격으로 측정하여 경시변화를 주의 깊게 관찰하였다. 그리고 계측기의 설치 시에 정확한 측정을 위해 지표침하계는 터널

의 굴진 전 70m(7D) 전방에서 개시하였으며, 천단 및 내공 변위계의 경우 굴착 후 1시간 이내에 계측 편을 설치하고 슛크리트의 양생시간을 고려하여 5시간 이내에 초기치를 확보하여 실제 발생된 선행 변위량을 최대한 평가하고자 하였다.

3.2 계측방법 개선

(1) 수평 경사계 적용

막장전방의 선행변위량을 파악하여 터널굴진 시 주변지

표 4. 사유지 터널 공법 및 지상구조물 현황

검토구간	STA. 10K 520,000 ~ STA. 10K 693,707 (L = 173,707m)	
현황도		
건물	<ul style="list-style-type: none"> • 가옥 4개동 저층 (A = 1,351m²) - 영일약국(지하 1층, 지상 3층), 우현빌딩(지상 1층, 지상 5층), 신성빌딩(지하 1층, 지상 3층), 서울성모정형외과(지하 1층, 지상 3층) • 개착공법으로 사유지 통과시 사유지 수용에 따른 집단민원 발생 (다수인 민원) 	
지층	<ul style="list-style-type: none"> • 매립층(GL-1.3~5.8m), 충적층(GL-4.8~10.7m), 풍화토층(GL-26~34.5m), 풍화암층(GL-28.8~34.5m)으로 분포 	
공법	<ul style="list-style-type: none"> • 터널공법 • 굴착공법 : Ring Cut • 보조공법 : 고분말도 시멘트Grouting + 막장 보강 Grouting 	
보강방법	<ul style="list-style-type: none"> • 강섬유 보강스프리트(250mm) • Steel Rib : 125x125 • 천정 종방향 그라우팅 : 자천공 강관 Grouting ϕ114.3, t=7, L=15.0m 종간격 : 4.0m(4열 중첩), 횡간격 : 0.4m(고분말도 시멘트) • 측벽자천공그라우팅 - 자천공강관(ϕ73), L=4.0m, 종간격 0.8m (고분말도 시멘트) • 막장보강 Grouting(ϕ22) 종간격 8.0m, L=12m • 선진수평 시추조사 : 15.0m마다 20m 시추조사로 지층확인 및 수발공으로 이용 	
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 지상건물 보존으로 민원최소화 • 지상권 보상비, 이전비, 폐기물 처리비 절감에 따른 경제성 확보 • 지상건물에 미치는 영향 최소화를 위한 적극적인 지반보강 필요 • 909 정거장 경제설계와 연계하여 하여 정거장 형식 변경 필요 	

반의 지표침하 및 상부구조물의 침하량을 예측하고, 상부구조물의 사용성에 영향을 미치지 않도록 보완대책 공법의 대책방안을 수립하기 위하여 수평경사계를 도입하여 막장전방에 설치하였고, 터널의 안정성 확보 및 역해석의 자료로 활용하였다.

수평경사계의 설치는 그림 3에서와 같이 터널 중앙부 정점에서 강판다단의 보강이 완료된 이후에 천공각도와 동일한 8°의 경사로 천공하여 설치하였고, 천공 깊이는 30 m로 하여 천공한 후 3m 간격으로 센서를 설치하였다.

수평경사계의 설치는 그림 4에서와 같이 $\Phi 135$ mm의 비트로 천공한 후 ABS 케이싱을 공내에 삽입한다. 그리고 공

벽과 케이싱 사이를 그라우팅 호스를 이용하여 그라우트재를 주입한다. 그라우트재가 양생된 후 케이싱 내부에 설치된 Wire rope를 당겨서 수평경사계를 삽입한다. 수평 경사계 센서에서 측정된 계측 값은 자료 집적장치와 무선 전송시스템에 의해 실시간으로 관리자에게 자료가 전송된다.

각 수평경사계 설치위치 간 중첩길이는 2 m로 유지하였으며, 계측기간은 상반굴착 완료시까지이며, 하반 굴진의 발생 변위량은 천단침하계로 대체하였다.

(2) Laser Scanner를 활용한 중요 지상구조물 거동 평가

터널 굴착중 지반 변위가 매우 크게 나와 지상 구조물에 일부 영향이 발생된 구조물에 대한 상세 평가를 수행하여 안정성 여부등의 평가가 필요하다.이에 현장에서는 3D Laser Scanner를 활용한 구조물의 거동 및 안정성등을 평가하여 건물의 거동등의 수평여부를 판단하였다.3D Laser Scanner System은 Laser를 사용하여 정확하고 빠르게 대상물체의 3차원 공간정보를 측정할 수 있는 기법이다.1초에 약 1000 point의 인체에 무해한 레이저를 대상물에 접촉시켜 대형구조물, 건축물, 지형등의 표면형태를 x, y, z의 3차원 좌표로 계산한 디지털 정보를 컴퓨터 상에 보존하게 된

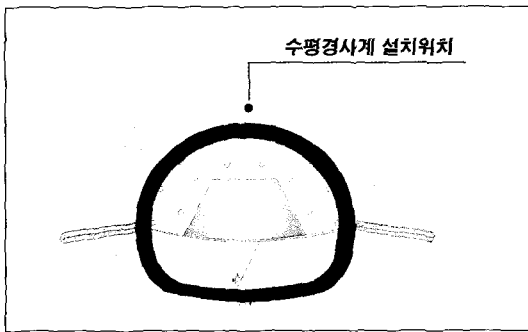


그림 3. 수평경사계의 설치 현황도

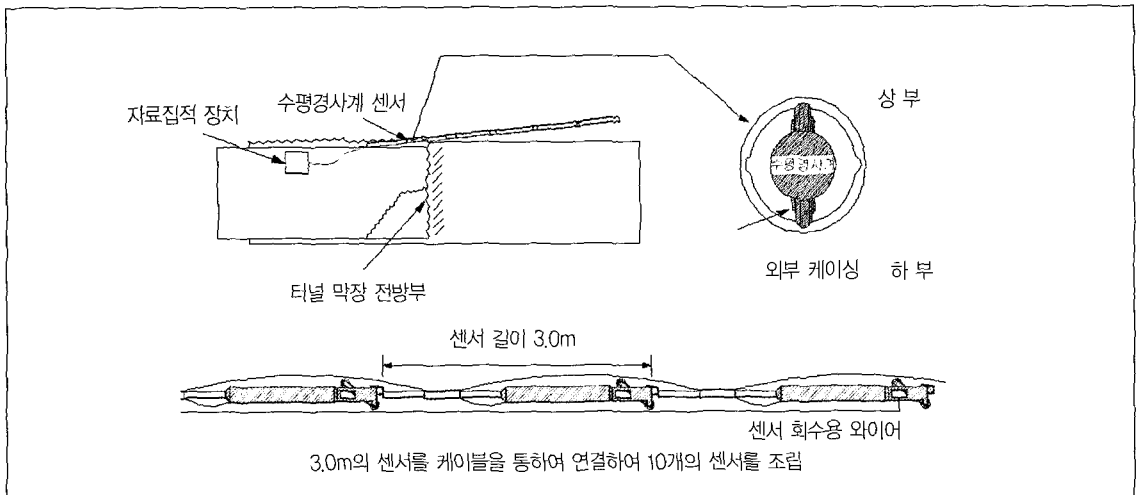


그림 4. 수평경사계의 설치방법

도심지 구조물 하부에서의 터널공사 사례 - 지하철 906공구

다. 이와같이 저장된 정보는 AutoCad와 호환되어 필요로 하는 상태를 도면화(As-built Drawing)할 뿐만 아니라 일정시

간 간격으로 측정할 결과를 비교하면 대상구조물의 거동변화를 파악할 수 있는 기법이다.

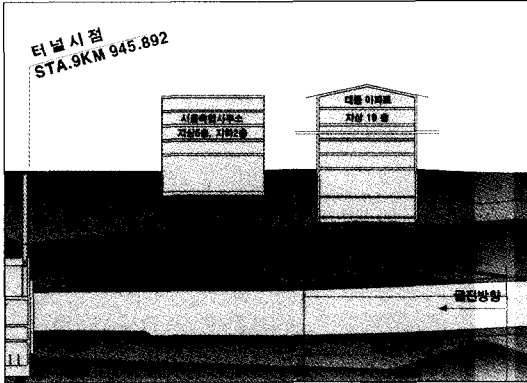


그림 5. 대동아파트 하부구간의 설치단면도

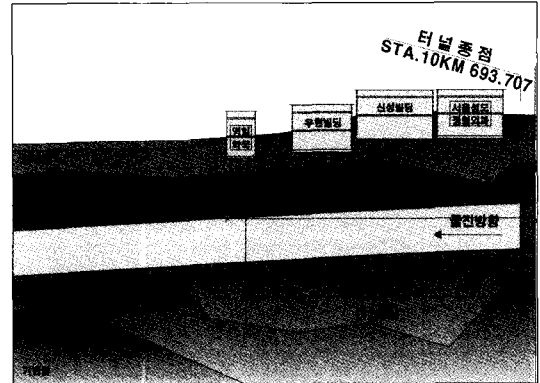


그림 6. 사유지 하부통과구간의 설치단면도



▶ 장비사양

- 장비구성 : Laser Scanner Head, AC전원, 전원공급장치
- 크기 및 무게
Scanner Head : 39?33?42cm(20.5kgf)
- 측정거리 : 1.5m~200m
- 측정밀도 : 0.25mm@50M
- 정밀도 : Point(Max ±6mm@50M)
Modeling (Max ±2mm@50M)

그림 7. 스캐너 사진 전경

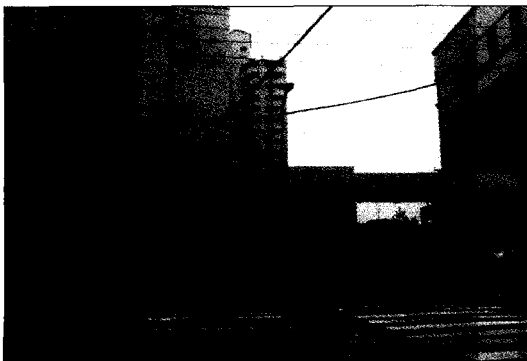


그림 8. 대상구조물 전경



그림 9. 대상구조물 스캔 이미지

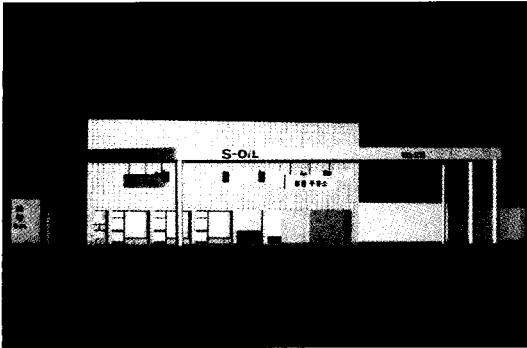


그림 10. 모델링 이미지

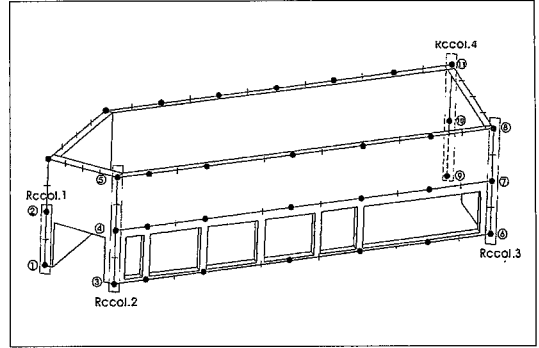


그림 11. Key Plan

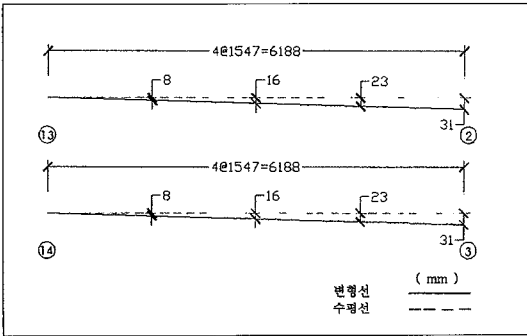
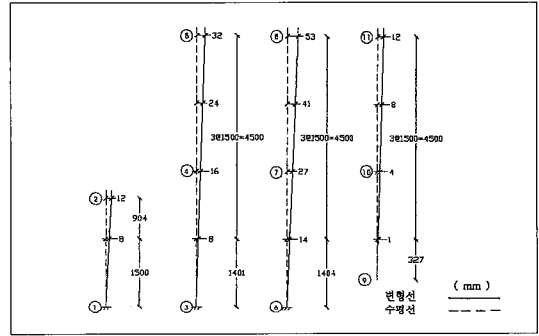


그림 12. 바닥 및 기둥의 거동 평가



4. 요약 및 제언

건물이 밀집되어 있고 연약한 토사 지반에서 진행되는 도심지 터널 공사 중 현재 당사에서 시공 중에 있는 서울지하철 9호선 906공구 현장의 터널 시공 및 구조물 계층 사례에 대하여 소개하였다.

(1) 건물이 밀집된 도심지 터널 공사에서는 터널구조물 자체의 안정성 확보가 중요하며, 이와 연계하여 터널 상부에 위치하고 있는 인접 빌딩 및 아파트 구조물의 시공 중 안정성 확보 또한 매우 중요한 사안이다. 따라서 당 현장에서 터널 막장이 지상 구조물에 접근하기 전부터 터널과 지상건물의 안정을 지속적으로 평가하고 예측하고 대책을 수립하여 시공에 신속하게 적용하는 것이 매우 중요하였다.

(2) 이를 위하여 터널 막장전방의 터널 아치부에 수평방향으로 계층기를 설치하여 막장의 진행에 따른 막장 전방 아치부의 연직방향 변위를 계속하였다. 이를 통해 막장 전방의 선행 변위량을 파악하여 터널굴진 시 주변지반의 지표침하 및 상부구조물의 침하량을 예측하고, 상부구조물의 사용성에 영향을 미치지 않도록 보완대책 공법의 대책방안을 수립하기 위하여 수평경사계를 도입하여 막장전방에 설치하였고, 터널의 안정성 확보 및 역해석의 자료로 활용하였다.

(3) 터널 굴착 중 영향을 크게 받을 수 있는 중요 구조물이나 굴착 중 지반변위가 크게 발생된 인접한 지상 구조물에 대한 상세 검토를 수행하여 안정성 여부등의 평가는 필수적으로 수행되어야 할 것이다. 당 현장에서는 이와 같은 경우의 거동 평가 사례로써 3D Laser

도심지 구조물 하부에서의 터널공사 사례 - 지하철 906공구

Scanner 를 활용한 구조물의 거동 계측 사례를 소개하였다.

연결부 시공사례”, 터널기술 학회지, Vol. 6, NO.3.

2. 노원석, 권형석, 강석기(2006), “수평경사계를 이용한 토사 터널의 막장변위 거동특성”, 한국지반공학회 학술발표 논문집
3. 서울지하철 9호선 906공구 실시설계보고서(2003)
4. 서울지하철 9호선 906공구 계측 분석보고서(2006)
5. 서울지하철 9호선 906공구 00건물 안전진단 보고서(2007)

참고 문헌

1. 강석기, 권형중(2004), “지하철 수직구 횡경과 본선터널

한국지반공학회 암반역학기술위원회 2008년 특별세미나

- ◎ 일 시 : 2008년 6월 26일(목) 10:00~18:00 ◎ 장 소 : 한국과학기술회관(강남구 역삼동)
- ◎ 주 제 : 풍화의 공학적 특성과 대책
- ◎ 주 관 : 한국지반공학회 암반역학기술위원회(위원장 : 이병주 박사)
- ◎ 내 용 :

주제 : 풍화의 공학적 특성 및 대책		
구 분	세 부 주 제	
주제강연	풍화란 무엇인가? (지질자원연구원 이병주 박사)	
주제 발표	지 질	풍화의 지질공학적 특성
	토 질	풍화토의 역학적 특성
	암 반	풍화토와 풍화암의 분류실무
		풍화암의 공학적 특성
		풍화암의 역학적 실험(풍화민감도 실험등)
	조 사 설 계 시 공	풍화대에서의 지반조사실무
		풍화대구간의 터널설계실무
		풍화대에서의 시공중 문제사례
풍화대에서의 사면붕괴 및 대책		
주제 토론	[토론 주제] 풍화대구간에서의 암반구조물의 설계 및 시공시의 문제점과 대책방안 ■ 질의응답	

- ◎ 문의 및 연락
 - 주제발표에 관심이 있으시거나 발표를 원하시는 분은 연락바랍니다.
 - 간사 : 김영근(삼성건설) H.P: 016-322-6749, e-mail: baboyg@hanmail.net