

KGS FALL '94 National Conference  
28, 29 October, 1994/Seoul/Korea

건물 하부 통과를 위한 터널설계 시공사례  
A Case Study on Design and Construction of Subway Tunnels  
Underneath Existing Buildings

김홍석, Hong-Suk Kim<sup>\*1</sup> 조성태, Sung-Tae Cho<sup>\*2</sup> 임성철, Sung-Chull Lim<sup>\*3</sup> 장옥성, Ock-Sung Chang<sup>\*4</sup>  
이인모, In-Mo Lee<sup>\*5</sup> 이명재, Myung-Jae Lee<sup>\*6</sup> 조성노, Sung-No Cho<sup>\*7</sup>

- \*1 : 서울특별시 지하철 건설본부 과장 Assistant Director, Seoul Metropolitan Government.
- \*2 : (주)대우 부장 Director, Daewoo Co., Ltd., Seoul.
- \*3 : (주)금호 엔지니어링 전무 Manager, Kumho Engineering Co., Ltd., Seoul.
- \*4 : (주)금호 엔지니어링 이사 Director, Kumho Engineering Co., Ltd., Seoul.
- \*5 : 고려대학교 토목환경공학과 부교수 Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Univ., Seoul.
- \*6 : 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Korea Univ., Seoul.
- \*7 : 고려대학교 토목환경공학과 석사과정 Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Korea Univ., Seoul.

SYNOPSIS : This paper concerns a case study on the design concept, analysis, construction methodology of a subway tunnel excavated in the soft ground beneath an existing building where the distance between the bottom of the building and the crown of the tunnel is separated by about 3 meters only. The silot tunnels are excavated in advance, and side reinforced-concrete walls are installed. Then, main tunnels are excavated with ring cut method. The steel ribs are installed and supported by the side walls made in advance. Between the steel ribs and the side walls, the screw jack is installed to apply prestressing so that settlement can be controlled at minimum. Various in-situ measurements are made and compared with computed values obtained by numerical methods. By choosing this underpinning method with very careful construction control, tunnelling projects could be finished successfully without having any damage to the building located very closely to the tunnel crown.

1. 서론

서울 지하철 A공구의 터널은 5층건물(지하2층) 직하부를 복선으로 통과하도록 계획되어 있으며, 건물의 지하실 바닥에서 터널 천정까지의 최소 이격거리는 2.4m이고, 터널 막장의 지반조건은 파쇄가 심한 풍화암층이다. 따라서 기 설계된 터널 표준패턴대로 시공할 경우에는 과도한 지반침하가 발생할 것으로 예상되고 결국에는 지상건물의 안전까지도 위협할 것으로 추정되어, 지반침하를 최소화 하면서 지상건물의 안전을 최대한 보장할 수 있는 대책공법의 적용이 검토되었다. 본 현장에서와 같이 터널 크라운 상부의 암피복 두께가 작고 과도한 상부하중이 작용할 경우에는 터널 주변 지반의 아칭효과를 기대할 수 없기 때문에 NATM의 기본개념을 적용하기가 어려우므로, Underpinning 개념을 도입한 공법이 강구되었다. 따라서 본 현장에서는 Silot Tunnel을 먼저 굴착하고 축벽콘크리트를 천 후에 이를 Steel Rib의 받침대로 사용하는 일종의 재래식 터널공법으로 설계 및 시공되었다. 본 사례연구에서는 이 공법의 기본개념을 서술하고, 해석방법 및 결과, 시공상황 및 계속결과의 비교검토를 통하여 건물하부 근접통과를 위한 합리적인 터널설계 및 시공방안을 제시하였다.

2. 공사개요 및 지반조건

2.1 개요

그림.1에 나타난 바와같이 서울 지하철 A공구 터널 곡선부(곡선반경 R=300m)구간은 터널 상부에 기존 건축 구조물이 위치하고 있으며, 터널 크라운으로부터 3~7m정도 이격되어 있다. 터널단면은 복선으로 지하 20.4~23.4m 심도에 터널 인버트가 계획되어 있고, 최소 이격거리가 2.4m인 B빌딩은 지상 5층, 지하 2층의 전면기초형식으로 된 콘크리트 골조구조물이다.

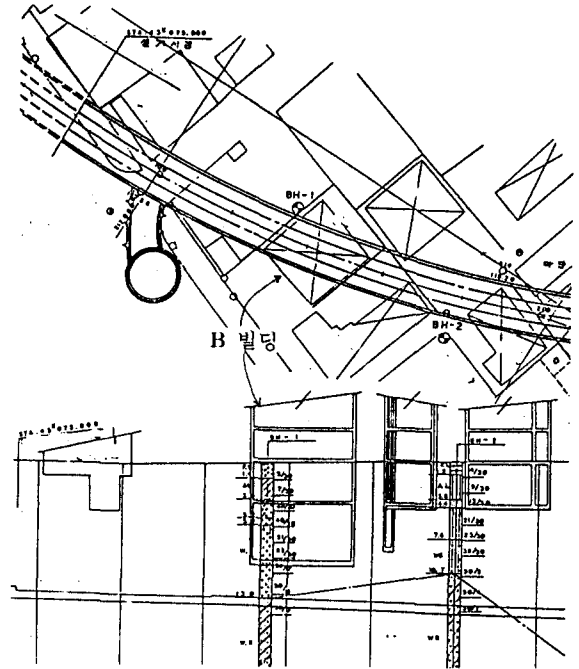


그림.1 A 공구 곡선부터널 통과구간 평면 및 종단면도

2.2 지반조건

본 현장의 대표적인 지질은 호상 편마암이며 지표로부터 토사층, 풍화토층, 풍화암층, 연암, 경암층으로 분포되어 있다. 터널

은 풍화토층과 풍화암층을 통과하도록 설계되어 있고 터널 상부 지역을 Grouting으로 보강하였으므로 터널 주변의 지반정수 안정은 풍화토층에 대한 지반보강전과 후로 나누어 산정하였다. 굴착전의 지하수위는 지표로부터 -13m에 위치하고 있다. 터널 주변의 지반정수는 그림.2에 나타내었다.

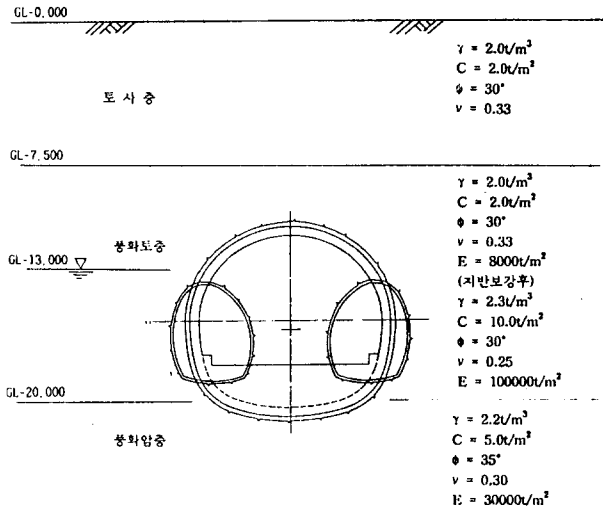


그림.2 지반정수

2.3 터널단면

본 현장에서는 그림.3과 그림.4에 보인바와 같이 Silot Tunnel로 축벽선진도강하여 지반상태를 분석토록 할 뿐 아니라, 축벽콘크리트를 타설하여 지반의 축방거동을 제어하고 Steel Rib의 받침대로 이용하였다. 본터널 시공을 위하여 Pipe Roof 공법을 선택하여 상부하중을 균일하게 전달시킬 수 있도록 하였고, Ring Cut 분할굴착으로 시공하며 Steel Rib와 축벽콘크리트 사이에 Screw Jack을 설치하여 Jack에 내압을 가하여 침하를 방지하도록 하였다. 또한 축벽콘크리트 구조물 하부에 Packer Grouting을 실시하였으며, 길이 5m D29의 이형철근을 C.T.C 1m로 3열씩 Soil Nailing으로 보강하고 2.5m의 굴진장으로 인버트를 굴착한 후에 폐합하였다.

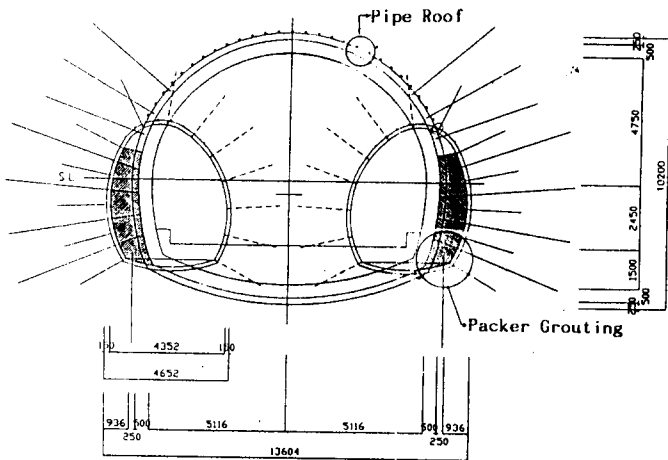


그림.3 터널 단면도

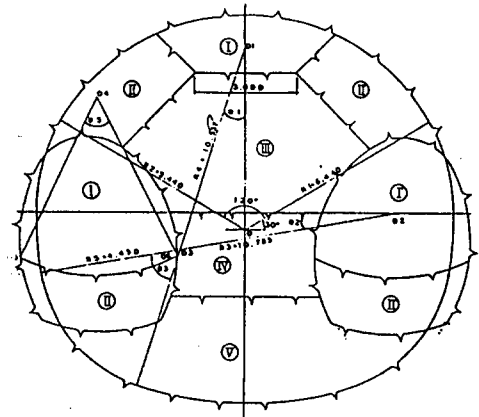


그림.4 터널 굴착 순서도

3. 터널의 안정성 검토

3.1 개요

터널단면의 전체적인 안정검토와 터널 굴착으로 인하여 발생하는 주변지반에 대한 응력 및 변위는 수치해석에 의해 검토되었다. 또한 Silot Tunnel의 축벽구조물 안정검토는 재래식 터널 개념을 근간으로 하여 산정된 하중으로부터 축벽구조물 및 기초지반의 안정을 검토하였다. 지반, 터널 및 상부 기존구조물을 합리적으로 모델링하기 위하여 그림.5에 보인바와 같은 상부구조물은 상재하중( $w=12t/m^2$ )으로 변환하여 상부구조물 바닥 이하의 지반만을 모델링 대상으로 하였다.

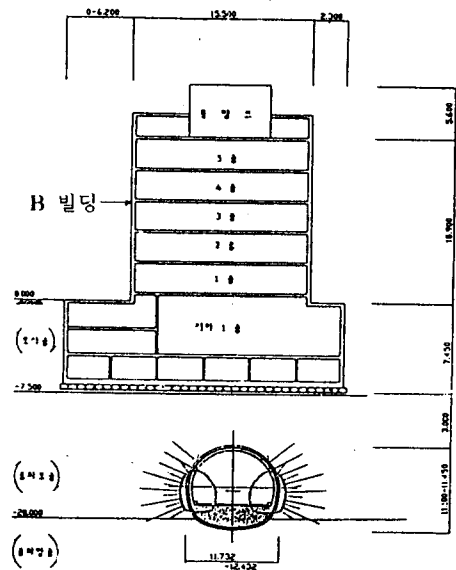


그림.5 터널 단면도

### 3.2 수치해석

수치해석은 유한차분법으로 이루어진 지반구조물 해석 Program인 'FLAC(3.22)'을 이용하였으며, 지반구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 해석과정은 표.1에 나타난 바와 같이 14단계로 초기응력 계산시에는 지반정수를 사용하고, 굴착단계에서는 하중분담과 Null 모델을 사용하여 3차원 효과를 고려하였으며 하중 단계별로 Shotcrete, Rock Bolt 및 Steel Rib등의 지보재를 설치하였다. 해석 Mesh는 그림.6에 나타난 바와 같이 지반을 3600여개의 Solid 요소로 모델링 하였고 Shotcrete와 Steel Rib는 Beam 요소로, Rock Bolt는 Cable 요소로 모델링 하였다.

표.1 굴착 순서에 따른 하중 분담율

해석 단계	시 공 상 태	하중 분담율	
1	지반의 초기 응력을 평형 상태화	-	
2	선진 도강 상부 반단면	초기 굴착	40%
3		1차 Soft Shotcrete	30%
4		2차 Hard Shotcrete, Rock Bolt	30%
5	선진 도강 하부 반단면	초기 굴착	40%
6		1차 Soft Shotcrete	30%
7		2차 Hard Shotcrete, Rock Bolt	30%
8	본선터널 상부 반단면	초기 굴착	40%
9		1차 Soft Shotcrete	20%
10		2차 Hard Shotcrete	20%
11		3차 Hard Shotcrete	20%
12	본선터널 하부 반단면	초기 굴착	40%
13		1차 Soft Shotcrete	30%
14		2차 Hard Shotcrete	30%

### 3.2.1 응력집도

Rock Bolt의 본당 최대속력은 2.9ton으로 허용속력(11ton) 내이고, Shotcrete에 작용한 최대속력, 모멘트 및 전단력은 표.2에 나타난 바와 같으며 전단응력은  $1\text{kg/cm}^2$  미만, 휨응력은  $9\sim 13\text{kg/cm}^2$  정도로 산정되었다. Steel Rib에 걸리는 하중은 최대속력 47ton, 최대모멘트 1.3ton-m, 전단력 3.5ton으로, 최대 휨응력이  $1171\text{kg/cm}^2$ , 전단응력이  $248\text{kg/cm}^2$ 로 허용치(허용 휨응력:  $2550\text{kg/cm}^2$ , 허용 전단응력:  $1500\text{kg/cm}^2$ ) 내이므로 안전한 것으로 판단 되었다.

표.2 Shotcrete에 작용하는 하중

	속 력	모멘트	전단력	비 고
Silot Tunnel	5.16 ton	0.011 ton-m	0.045 ton	1st Shotcrete
본선터널	3.53 ton	0.01 ton-m	0.02 ton	1st Shotcrete

### 3.2.2 침하

터널 굴착으로 인한 변위는 선진도강시 천단최대변위 6.9mm(그림.7), 본선터널 굴착시 최대 천단변위는 12.2mm, 최대지표침하는 11.5mm로서(그림.8) 터널의 안정성 및 주변 구조물에 큰 영향은 없는 것으로 판단되었다.

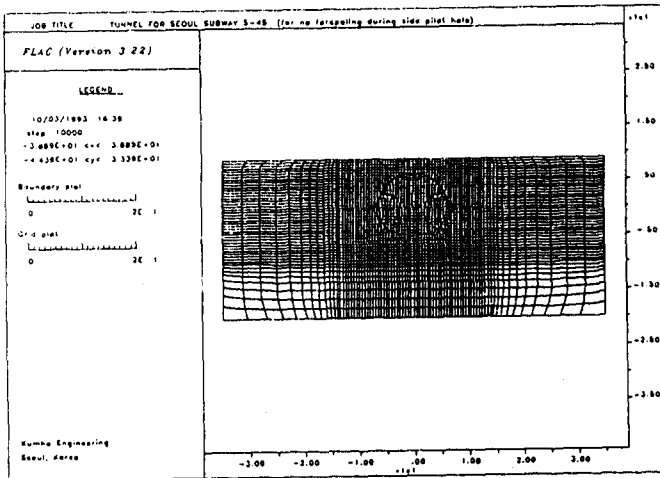


그림.6 해석 Grid

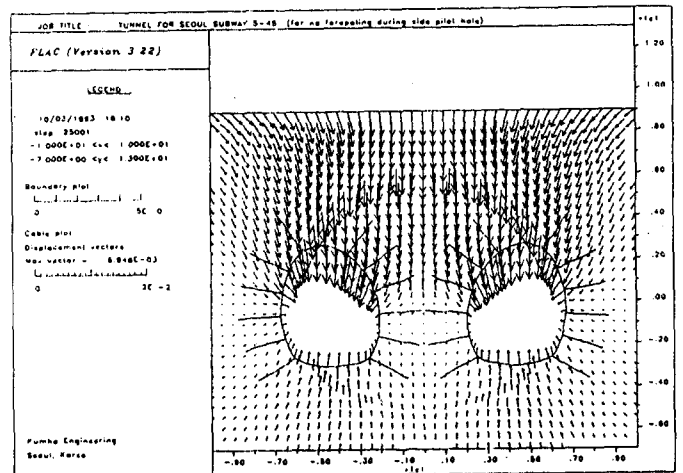


그림.7 Silot Tunnel 굴착시 지반변위

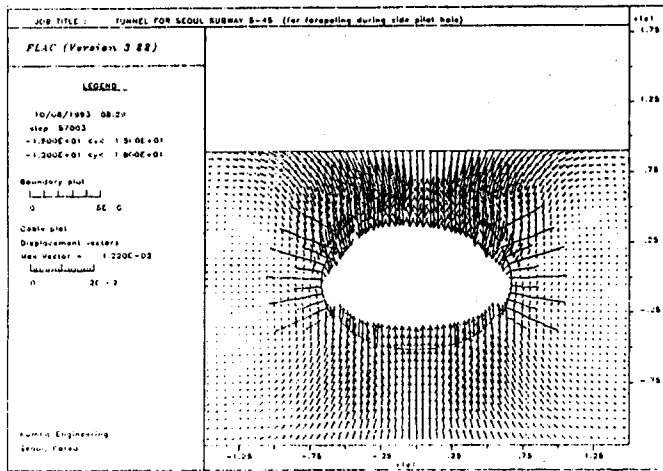


그림.8 본선 터널 굴착시 지반변위

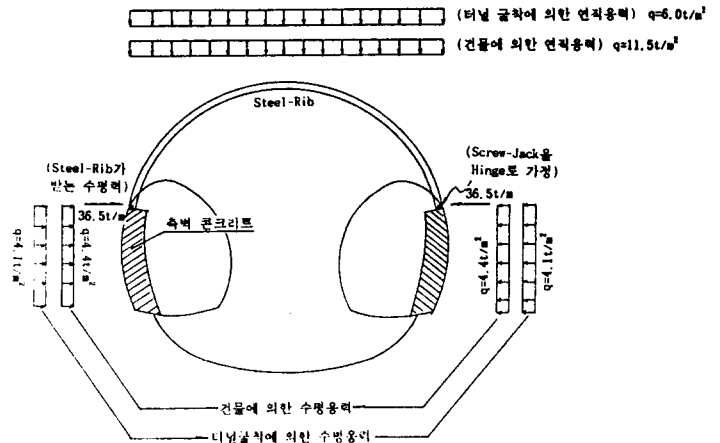


그림.9 Steel Rib와 축벽구조물에 작용하는 하중

### 3.3 축벽 구조물 설계

축벽 구조물은 재래식 터널 개념에 의한 하중에 안전하도록 설계되었다. Steel Rib와 축벽구조물 사이에 위치하는 Screw Jack는 Hinge로 가정하고, Steel Rib로 전달되는 하중은 축벽 구조물 상단에 작용하는 것으로 가정하였다. 하중은 건물에 의한 지중응력과 건물 하부의 지반이 Arching효과없이 작용하는 것으로 가정하였다. 건물에 의한 하중으로부터 지중응력 증가량을 탄성론에 근거하여 유한폭과 무한길이의 띠하중에 의한 수직 및 수평응력 증가량을 산정하였고<sup>(8)</sup> 재래식 터널 개념에 의한 건물 하부의 수직 및 수평하중은 Terzaghi<sup>(9)</sup>가 제안한 식에 의해 산정하였다.

표.3과 그림.9에 축벽구조물 및 Steel Rib에 작용하는 하중을 나타내었고, 축벽 구조물에 작용하는 최종하중은 그림.10에 나타내었다. 축벽구조물에 대한 지지력 검토 및 전도 및 활동에 대한 안정검토 결과, 하중의 수평성분 보다 Rock Bolt의 지보력이 크므로 전도 및 활동에 대해서는 안전한 것으로 판단되었다. 다만, 수직하중은 축벽하부지반의 허용지지력을 초과하므로, 지지력 보강을 위하여 Packer Grouting 및 길이 5m D29 이형철근의 C.T.C. 1m의 3열 시공에 의한 Soil Nailing으로 보강하였다.

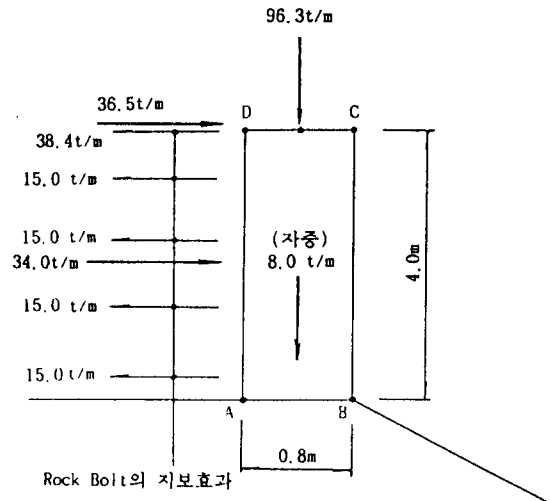


그림.10 축벽구조물의 안정검토

표.3 축벽 구조물에 작용하는 하중

		Steel Rib	축벽 구조물
건물하중	수직	11.5 ton/m <sup>2</sup> /m	-
	수평	5.5 ton/m <sup>2</sup> /m	4.4 ton/m <sup>2</sup> /m
터널굴착	수직	6.0 ton/m <sup>2</sup> /m	-
	수평	4.1 ton/m <sup>2</sup> /m	4.1 ton/m <sup>2</sup> /m

#### 4. 계측결과 비교분석

터널 시공시 계측은 그림.11에 나타난 바와같이 지표침하계, 지중 경사계(Inclinometer), 지중침하계 및 경사계(Tiltmeter) 등을 설치하여 지표침하, 지중 수평변위와 수직변위 및 건물의 기울기 등을 측정하였다. 또한 Shotcrete와 Steel Rib에는 Strain Gauge를 설치하여 응력을 측정함으로써 Shotcrete의 두께 및 시공시기의 타당성, 강 Arch 지보재로서의 효과 및 간격의 타당성을 조사하였다. Shotcrete와 Steel Rib에 작용하는 최대 힘응력은 표.4에 나타난 바와같이 Shotcrete는 측정치가 수치해석에 의한 예측치보다 50%정도 크고, Steel Rib는 측정치가 예측치보다 50%정도 작은 것으로 나타났으나 모두 허용범위 내이며 현재의 지보패턴으로 터널의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 지표 및 천단변위는 표.5와 그림.12에 나타난 바와같이 예측치와 측정치가 비슷한 양상을 보이나, 지표침하는 측정치가 예측치보다 30 - 50%정도 크고 예측치보다 침하 영향범위가 넓게 분포한다. 건물의 기울기는 측정치가 0.0006 - 0.0013 rad으로 허용 각변위 (0.002 rad) 내이므로, 건물의 부동침하는 허용치내인 것으로 판단된다. 또한, 지중수평변위는 그림.12에서 보인바와 같이 최대수평변위량이 7.8 mm이내이므로 B건물에 큰 영향은 없는 것으로 판단된다. 천단침하는 측정치가 예측치보다 작은 값이나 계측기 설치 시기가 초기변위 발생 후이므로 20mm내외인 것으로 추정되어 터널 안정성에 큰 영향은 없는 것으로 판단된다.

표.4 최대 힘응력 비교

	예측치	측정치
Shotcrete	13 kg/cm <sup>2</sup>	22 kg/cm <sup>2</sup>
Steel Rib	1170 kg/cm <sup>2</sup>	591 kg/cm <sup>2</sup>

표.5 본선 터널 굴착시 침하

	예측치	측정치
최대지표침하	11.5 mm	15.0 mm
최대천단침하	12.2 mm	11.0 mm
최대수평변위	3.7 mm	7.8 mm

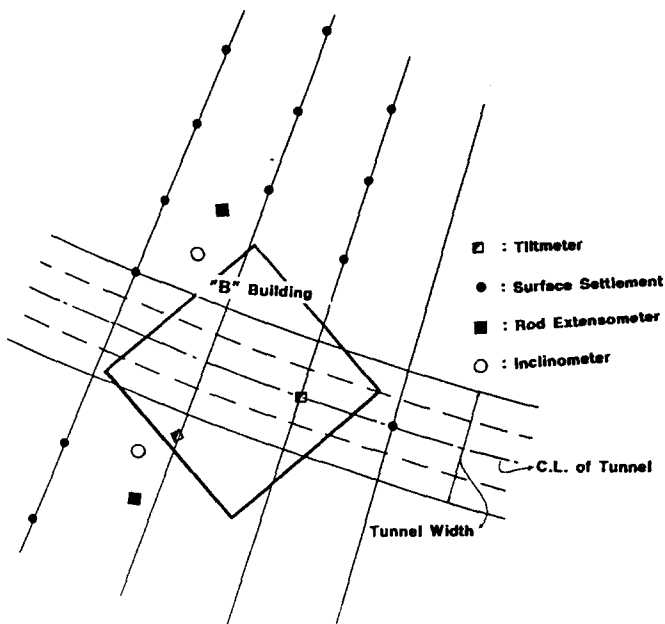


그림.11 계측기 배치도

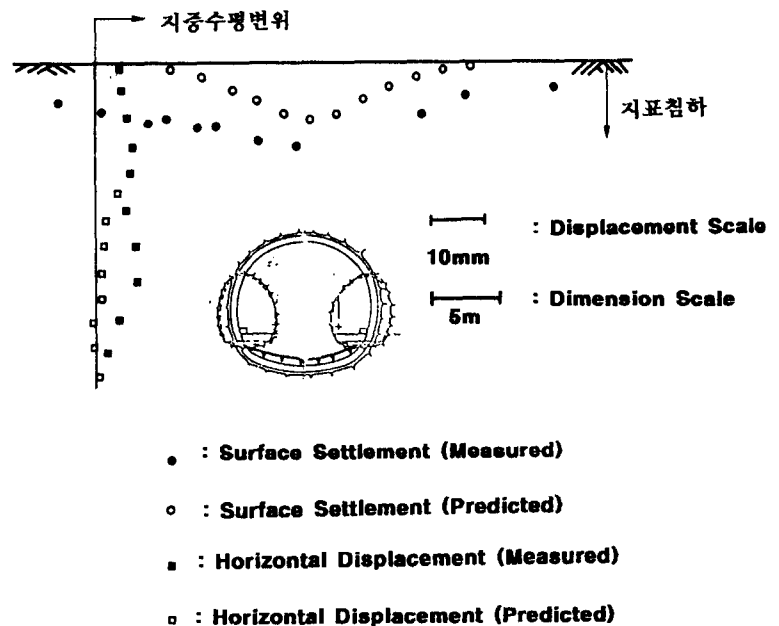


그림.12 터널주변 지반침하

## 5. 결 론

본 사례연구에서는 건물 하부를 인접하여 통과하는 풍화토 및 풍화암의 지반조건에 시공되는 터널의 설계개념, 해석방법, 시공 및 계측결과와 비교분석을 통하여 합리적인 설계 및 시공방안을 조사하였다. 건물하부를 인접하여 통과하는 터널은 Arching효과를 기대할 수 없기 때문에 Silot Tunnel을 먼저 굴착하고 축벽콘크리트를 친 후에 이를 Steel Rib의 받침대로 이용하는 Underpinning 개념을 도입한 재래식 터널공법의 적용으로 터널 및 상부구조물의 안정성을 확보할 수 있었다.

수치해석 예측치 및 계측 측정치가 모두 허용치 내이며, 지보패턴의 설계 및 시공이 안전하게 이루어진 것으로 판단된다. 지표침하 및 천단침하는 10 - 15mm 정도로 예측치와 측정치가 비슷한 양상을 보이나, 천단침하의 측정치는 설치시기 지연으로 인한 초기변위를 포함하지 않아 예측치보다 작은 값을 보이는 것으로 판단되며, 터널 및 상부구조물의 안정에 지반침하로 인한 큰 영향은 없었다. 수치해석 예측치와 계측 측정치의 차이는 계측오차 및 수치해석 Modelling시 3차원 효과 등에 기인한 것으로 판단되나 비교적 일치된 결과를 보였다.

## 6. 참고문헌

1. 고려대학교 지반연구실 (1994), "지하철 0호선 00공구의 곡선부 터널부분 축벽하부 보강에 대한 검토보고서 "
2. (주)금호엔지니어링(1994), "지하철 00공구 터널 곡선부 건물 하부 통과구간 FDM해석 보고서"
3. (주)금호엔지니어링(1994), "지하철 00공구 곡선부 터널 인버트 굴착공법 검토 의견서"
4. (주)대우(1994), "지하철 00공구 곡선부 터널하반 인버트 굴착 공법 검토서"
5. (주)대우 엔지니어링(1994), "제 2기 서울 지하철 터널 설계 및 시공감리 종합 보고서"
6. (주)대우(1994), "지하철 00공구 지하굴착공사 계측보고서(곡선부 터널)"
7. FHA(1991), "Soil Nailing Recommendations"
8. Das, B.M.(1983), "Advanced Soil Mechanics"
9. Robert V.P. & Thomas L.W.(1968), "Rock Tunnelling with Steel Supports"
10. FLAC (1992), "Manual(Ver.3.2)", Itasca Consulting Group