

## 도심지 지하철 터널의 지반보강공법 시공사례 연구

### A Case Study on the Reinforcement Method of Subway Tunnel

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 여유현<sup>2)</sup>, Yoo-Hyeon Yeoh, 최현석<sup>2)</sup>, Hyun-Seok Choi

<sup>1)</sup>한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ., Ph.D.

<sup>2)</sup>한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

**SYNOPSIS :** The NATM(New Austrian Tunnelling Method) has been used for tunnelling since 1980's. But Collapses of tunnel under construction take place frequently, especially at urban areas because of adjacent buildings, underground conduits and traffic loads.

This paper is a case study on the reinforcement method of subway tunnel at urban areas.

In this study, ground inspection, geological investigation, laboratory test and numerical analysis by means of FDM program were carried out. The tunnel excavation was stopped because of over excessive brake of tunnel crown and shotcrete was installed to prevent deformation of adjacent ground as the temporary method.

From the result of field survey and geological investigation, it is found that the soft weathered soil was distributed to the ground of tunnel invert unlike original investigation.

The results of the analysis and the study show that the SGR(Space Grouting Rocket) method and Umbrella method can be applied for the stability of tunnel excavation and in addition the reinforcement of concrete lining is required for long-term stability of tunnel.

**Key words :** NATM, over excessive brake, SGR method, Umbrella method

## 1. 서론

국내에서는 80년대초 NATM공법이 처음 도입된 이래 현재 대부분의 터널공사에는 보편적으로 NATM공법이 적용되고 있으나 많은 터널 시공경험에도 불구하고 잦은 붕락사고가 발생하고 있다. 특히 도심지의 시가 밀집지역에서의 터널공사는 주변의 고층건물, 차량 또는 지하매설물 등에 인접해서 이루어지므로 뜻하지 않은 안전사고가 발생하여 사회문제화 되고 있는 실정이다.(박광준 등, 1993)

본 연구는 ○○시 도심지 한복판에 건설중인 ○-○공구의 터널 안전사고우려가 있는 STA. 0K100~0K310(210m) 구간의 터널 안정성확보를 위해 현장여건 및 지층상태 등을 고려하여 본 현장에 가장 적합한 지반보강공법을 검토하였고 수치해석을 통해 그 효과를 확인코자 하였고, 또한 공사 완료후 지하철 운용시의 터널구조물의 장기적인 안정성 확보를 위한 보강방안을 제시하였다.

## 2. 현장현황 및 지층현황

### 2.1 현장현황

본 현장은 ○○시 ○-○공구 구간중 복선터널 구역인 STA. 0K100~0K310 구간으로서 터널 직상부에 왕복 4차선 도로가 위치하고 있고 터널 축 양쪽으로 일반가옥(한옥집) 및 조립식 건물, 콘크리트 건물(빌딩)이 약 10m 이격되어 밀집되어 있다.

현장답사결과, 시공 막장면에 나타난 지층상태는 설계시 기존 지반조사결과와는 달리 풍화토층이 STA. 0K110지점의 개구상단에서 출현하여 0K116 지점에서는 S.L 부분까지 거의 전단면에 걸쳐 심층적으로 발달하고 있고 용수가 심한상태로 조사되었다. 또한 설계시 터널보강공법인 우레탄 보강에 의한 터널굴착 시공중 터널크라운부에 여굴이 발생하여 현재 약 20m 굴진한 상태에서 공사가 중단된 상태이다. 또한 STA. 0K288 지점에서는 우레탄 주입을

위한 천공작업도중 막장 상부가 수압에 못이겨 붕괴, 매몰사고가 있었다.(천병식, 1997)

본 현장은 터널천단부의 여굴로 인한 토사의 유실로 터널상부지층의 침하가 예상되고 인접지반의 지중응력의 해방에 따른 계속되는 진행성 파괴를 방지하기 위하여, 상기 현장답사결과를 토대로 현재 터널막장을 임시대책으로 Shotcrete로 폐합(T=10cm)하여 터널주변지반의 변형을 억제하고 있는 상태이며 수발공을 설치한 후 공사가 중단된 상태에서 본 터널보강공법 연구를 실시하였다.

본 현장의 터널굴착공법 및 굴착패턴을 요약 정리하면 다음과 같다.

◆ 터널굴착방법 : NATM, 터널보강공법 : 우레탄공법, 터널굴착 Pattern : PDW-1

표 1. 터널 굴착패턴 및 지보패턴

Rock Mass Class	Excavation	Rock Bolt (SD35,D25)	Shotcrete	Wire Mesh	강지보 규격 및 간격	비 고
Residual Soil (풍화토)	S.L 상부반단면 : Ring Cut	L=5m 0.8m spacing crown and wall	50	φ5×100×100	H100×100 0.8m	① 반단면 굴착 ② Ring Cut ③ 기계굴착 ④ System Rock Bolt (S.L 상부 및 측벽) ⑤ 보조공법 : Fore Poling 또는 우레탄공법
	0.8m 굴진장 하부반단면 : Bench Cut		100			
			100			

## 2.2 지층현황

본 조사대상 지역은 구 ○○천 하상으로서 검토대상 터널위치가 계곡부에 해당하여 터널 시공시 기 지반조사결과와는 달리 풍화토층이 STA. 0K110지점의 갱구상단에서 출현하여 0K116 지점에서는 S.L 부분까지 거의 전단면에 걸쳐 심층적으로 발달하고 있고 용수가 심한상태로 조사되었다.

따라서 터널 주변지반의 토층 및 지층 특성을 정확히 파악하기 위하여 추가로 시추조사를 시행하였으며(NX 5 공), 시추조사결과 본 조사지역의 지층구성은 상부로부터 매립층, 충적층, 풍화대층(풍화토층, 풍화암층), 연암층 및 경암층 순으로 성층되고 기 지반조사와는 달리 풍화토층이 구간에 따라서는 터널 인버트부까지 분포하는 등 풍화토층이 깊게 분포하고 있는 것으로 조사되었다.

## 3. 터널안정성 검토

### 3.1 개요

본 터널 안정성 검토에서는 검토대상구간중(STA. 0K100~0K310)중 터널부의 3개지점(STA. 0K127, STA. 0K181, STA. 0K288)의 터널굴착에 따른 주변지반의 변형 및 터널단면의 안정검토를 수행하였으나 본 논문에서는 지면관계상 지층조건 등을 고려할 때 가장 취약한 단면인 STA 0K181 지점에 대한 해석결과만을 논하기로 한다.

터널의 설계 및 시공을 합리적으로 수행하기 위해서는 터널의 역학적 안정성을 평가하여야 한다. 이를 위해서는 터널 주위 지반에 대한 응력해석을 통한 응력분포 및 이완영역의 발달 범위 등을 결정하여야 하며 Rock Bolt와 Shotcrete 등 지보재의 보강효과 및 보조공법의 적정성에 대해서도 평가되어야 하므로 Rock Bolt 및 Shotcrete 지보와 주변지반의 시간 의존성을 고려한 응력해석이 요구된다. 이를 위해 본 해석에서는 터널 단면에 대한 전산 수치해석을 통해 굴착 단계별 안정성 해석을 시행함으로써 터널 주변의 응력분포, 소성영역의 발달범위, 터널 주변의 변위, 지표면침하, Rock Bolt 및 Shotcrete 지보공효과 등을 검토하고 터널의 안정검토를 수행하였다.

### 3.2 해석단면의 모델링 및 해석방법

본 해석에서는 대상지반을 연속체모델체로 가정하여 해석을 수행하였으며 또한 터널 상부 및 주변지반이 대부분 토사층으로 구성되어 있어 해석모델은 Mohr-Coulomb Model을 이용하여 해석을 수행하였다.

본 현장은 터널 직상부에 왕복 4차선 도로가 위치하고 있고 도로와 인접하여 한옥집 및 조립식건물, 슬레트 건물, 콘크리트 건물 등이 위치하고 있어, 지표면상에 교통하중(DB 24 하중 : 1.3 t/m<sup>2</sup>) 및 건물하중(층당 1.2 t/m<sup>2</sup>)을 고

려하였다. 한편 해석영역은 좌우측 경계는 터널직경의 3배, 상부로는 지표면까지, 하부로는 터널직경의 1.5배까지 설정하여 해석을 수행하였고 해석영역에 대한 경계조건은 좌우측 및 하부를 모두 Roller로 좌, 우측은 수평(X)변위를 하부는 연직(Y)변위를 구속하였으며 하부의 양 모서리는 Hinge로 수평 및 연직변위를 구속하였다. 본 해석에 사용된 Element Type은 지반에 대해서는 2차원 평면요소(Plane Element)를 사용하였으며 Shotcrete는 Beam 요소, Rock Bolt는 Cable 요소를 이용하였다.

또한 하중분담율은 지반조건 및 지표면 하중 작용상태와 Shotcrete 경화시간 등을 고려하여 초기 굴착단계(굴착 직후)에서 40%, 1차 Shotcrete 타설시 20%, 2차 Shotcrete 타설시 20%, 3차 Shotcrete와 Rock Bolt 설치시 나머지 20%를 적용하여 해석을 수행하였고 상, 하 2분할 분할 굴착으로 굴착단계를 고려하였다.

### 3.3 프로그램 적용물성치

본 해석에서 적용한 지반물성치 및 지보재 물성치는 다음 표와 같다.

표 2. 대상지반의 물성치(STA. 0K181)

구 분	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	내부 마찰각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )	프와송비 $\nu$
매립층	1,800	28	0.0	3,300	0.35
층적층	1,800	30	0.0	3,300	0.35
풍화토	1,900	32	1.5	4,500	0.30
풍화암	2,000	35	3.0	5,500	0.25
연 암	2,200	38	10.0	40,000	0.22

표 3. Shotcrete의 물성치

구 분	E (t/m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	비 고
Soft Shotcrete	$0.5 \times 10^6$	0.05	$\sigma_{ck} = 210$ kg/cm <sup>2</sup>
Hard Shotcrete	$1.5 \times 10^6$	0.20	

표 4. Rock Bolt의 물성치

Rock Bolt 설치 지반	E		K <sub>b</sub> (Pa)	S <sub>b</sub> (N/m)	A (m <sup>2</sup> )	비 고
	(t/m <sup>2</sup> )	(Pa)				
풍화토층	$2.1 \times 10^7$	$2.1 \times 10^{11}$	$0.92 \times 10^7$	$0.92 \times 10^9$	$5.0 \times 10^{-4}$	SD35 D25 L=5.0m
풍화암층			$1.23 \times 10^7$	$1.23 \times 10^9$		
연 암 층			$9.24 \times 10^7$	$2.42 \times 10^9$		

### 3.4 해석결과

#### 3.4.1 주요지점 변위

수치해석결과 본 해석단면(STA. 0K181)의 지표침하량은 약 4.6cm, 터널 천단변위 약 6.6cm로서 과다하게 평가되었다

#### 3.4.2 Rock Bolt의 축력

Rock bolt의 설계축력은 10t으로 안정성 평가 결과는 표 5. 와 같다.

표 5. 굴착단계에 따른 Rock Bolt 최대작용축력(STA. 0K181)

굴 착 단 계	Rock Bolt 최대작용축력 (ton)	안정성 평가	비 고
상 반 면 굴 착	4.07	Stable	◆ 허용축력 = 10 ton
하 반 면 굴 착	13.1	Unstable	

### 3.4.3 Shotcrete 응력

해석결과 굴착단계별 Shotcrete 작용응력은 표 6, 그림 1~그림 2와 같다.

본 공구 실시설계서에 의하면 Shotcrete의 설계강도( $\sigma_{ck}$ )는  $210 \text{ kg/cm}^2$ 이므로 허용응력  $84 \text{ kg/cm}^2(0.4 \sigma_{ck})$ 을 기준으로 하여 검토한 결과, 최대 응력은 약  $100.1 \text{ kg/cm}^2$ 으로서 불안정한 것으로 나타났다.

표 6. 굴착단계별 Shotcrete 작용응력(STA. 0K181)

굴 착 단 계		Shotcrete 최대작용응력 ( $\text{kg/cm}^2$ )	안정성 평가	비 고
상반면 굴 착	1차 Shotcrete 보강후	34.1	Stable	◆ $\sigma_{ck}=210 \text{ kg/cm}^2$ ◆ 허용응력= $84 \text{ kg/cm}^2$
	2차 Shotcrete 보강후	58.0	Stable	
	3차 Shotcrete 보강후	66.7	Stable	
하반면 굴 착	1차 Shotcrete 보강후	70.1	Stable	
	2차 Shotcrete 보강후	72.6	Stable	
	3차 Shotcrete 보강후	100.1	Unstable	

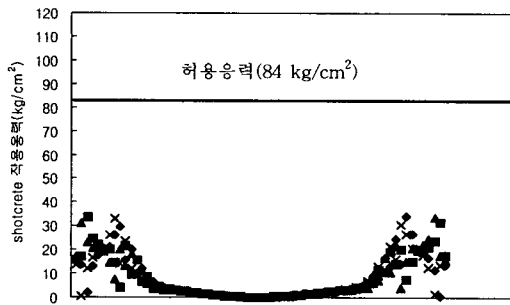


그림 1. 1차 Shotcrete 보강후(상반)

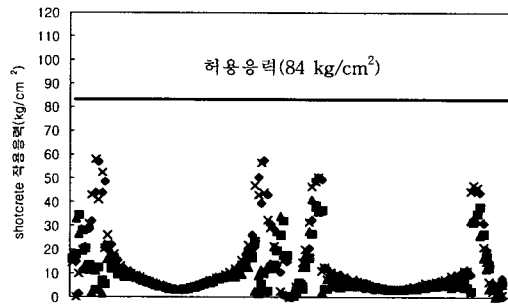


그림 2. 2차 Shotcrete 보강후(상반)

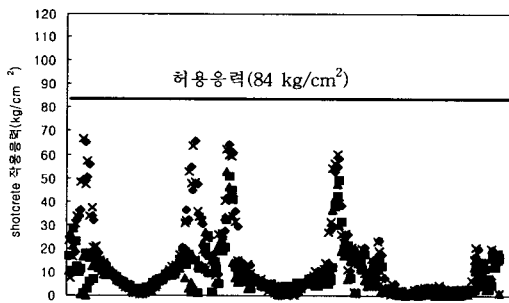


그림 3. 3차 Shotcrete 보강후(상반)

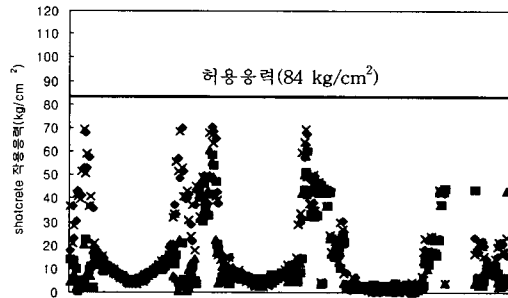


그림 4. 1차 Shotcrete 보강후(하반)

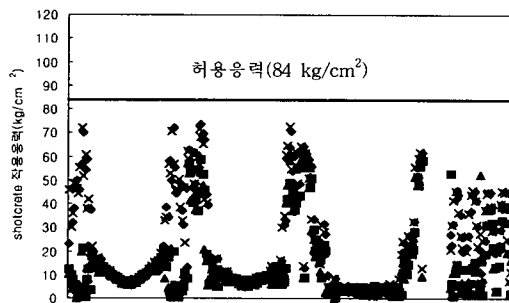


그림 5. 2차 Shotcrete 보강후(하반)

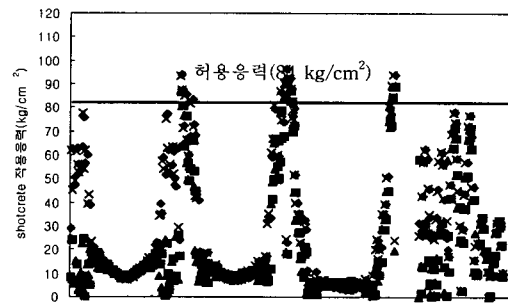


그림 6. 3차 Shotcrete 보강후(하반)

### 3.4.4 고찰

프로그램 해석결과에 의하면 해석지점(STA. 0K181)의 지층구성이 기 지반조사와는 달리상부로부터 매립층, 충적층, 풍화대로서 풍화대의 풍화가 심한 풍화토가 터널 인버트부까지 위치하므로 토층구성상 가장 위험하여 허용치를 상당히 초과하는 것으로 분석되어 안전한 터널굴착이 되기 위해서는 위치별 지층분포, 토질 및 암의 상태, 지하수에 따른 터널굴착시 막장면의 안정성, 터널 시공후의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 연약지반의 지반보강이 이루어진 상태에서 터널시공이 이루어지도록 적절한 대책공의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

## 4. 터널지반 보강(안) 검토

본 검토대상 터널구간은 현 시공단면(설계단면)에 대한 현장답사 및 전산해석결과 주변지반의 침하 및 터널 안정, 터널상부 도로의 균열 및 침하 등이 예상된다. 이는 무엇보다 설계시 본 현장의 지층 및 토층 특성을 정확히 파악할 수 있는 지반조사가 제대로 이루어지지 않은 데에 기인한 것으로 판단된다.

특히 본 현장은 풍화토층이 기 지반조사결과와는 달리 상당히 깊게 분포하고 있어 터널굴진에 따른 급격한 지반이완이 예상되어 터널이 붕괴할 가능성이 큰 것으로 판단된다.

따라서 본 대상구간에는 터널의 굴착시 및 터널시공 완료후의 안정성을 확보하기 위해 터널의 이완 예상영역에 대한 적절한 지반보강공법의 적용이 필수적인 것으로 판단되며 본장에서 검토대상현장에 가장 적절한 터널보강공법을 선정하고자 한다.

### 4.1 터널보강공법(안) 검토

본 현장에 적용할 수 있는 적합한 보강공법(안)을 제시하면 다음과 같다.

<제 1안> 지상 : 연직 JSP공법 + 터널내부 : 강관다단 그라우팅공법 + 차수목적SGR공법

<제 2안> 지상 : 연직 보강목적 SGR공법 + 터널내부 : 강관다단 그라우팅공법

<제 3안> 지상 : 연직 Cement Milk Grouting(CMG) 공법 + 터널내부 : 강관다단 그라우팅공법

<제 4안> 시추조사결과(토성)를 토대로 구간별로 <제1안>과 <제2안>안을 선별하여 적용

<제 5안> <제 2안> + 콘크리트 라이닝 보강

이상과 같이 본 현장의 터널안정성 확보를 위해서는 터널 굴진시 막장자립 및 터널 천단부 지반보강효과, 이완하중 분산 등을 위해서는 터널내에서 강관다단 그라우팅 공법을 적용하고, 지상에서는 교통처리문제, 작업환경 등을 고려할 때 Gel-time 조절에 따른 차수 및 주입효과가 우수한 수직 그라우팅공법이 적용이 필요하다.(천병식, 1991) 특히 터널 주변지반 강도 증대 뿐만 아니라 Rock Bolt 지보효과 기대 및 차수성 확보면을 고려할 때 본 현장에서는 강관다단 그라우팅 공법과 함께 SGR공법을 적용하는 <제 2안>이 적절한 것으로 판단된다. 그러나 터널 완공후 장기적으로 지보재(Rock Bolt, Shotcrete)의 지보역할 감소와 터널지반 보강영역의 물성변화가 예상되고, 본 현장이 터널 상부의 토피가 얇고 지하철 운행 및 지상도로교통으로 인한 진동 충격등을 고려할 때, 공사 완료후 지하철 운용시의 터널구조물의 장기적인 안정성 확보를 위해서는 <제 5안>을 적용하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다.

또한 본 현장은 금번 시행한 지반조사결과에 의하면 터널 노선에 따른 지층변화가 매우 심하고 불규칙하여 주입성 및 유동성이 좋고 구상화율이 크며, 대상지층이 풍화토층임을 고려할 때 침투주입이 가능한 주입재를 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 본 현장의 보강공법(SGR 공법, 강관다단 그라우팅공법) 적용시 주입재는 침투주입 및 지반강도증대를 위해 비표면적이 일반 포트랜드 시멘트에 비해 큰 마이크로 시멘트(Micro Cement:MC)를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

## 5. 터널 보강단면 안정성 검토

### 5.1 개요

해석단면에 대하여 상기에서 검토한 보강공법(<제 2안> 또는 <제 5안>)을 적용할 경우 터널 안정성 확보 여부

및 보강효과 확인을 위해 전산해석을 수행하였다.

## 5.2 프로그램 적용물성치

본 공구 실시설계서에 의하면 우레탄의 경우 보강영역의 전단강도(점착력)를 원지반토의 약 10배~15배 증가시켜 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 SGR 공법과 함께 전단강도 증대뿐만 아니라 Beam Arch효과가 있는 강판다단 그라우팅을 병행하여 적용하고 주입재료 또한 Micro Cement를 사용하므로 원지반에 비하여 보강영역의 점착력 증대는 상당하리라고 판단되어 원지반 점착력의 10배 증가하는 것으로 추정하였다. 내부마찰각 증가는 무시하였으며, Rock Bolt 설치지반까지 원지반을 보강하므로 주면마찰저항력 또한 상당히 증대할 것으로 판단되나 안전측으로  $K_b$ ,  $S_b$  입력물성치는 보강전 입력 물성치를 그대로 적용하였다. 대상지반 및 보강영역의 적용물성치를 종합하여 나타내면 표 7.과 같다.

표 7. 보강단면 적용물성치

구 분	단위중량 (kg/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )	프와송비 $\nu$
매립층	1,800	28	0.0	3,000	0.35
층적층	1,800	30	0.0	3,000	0.35
풍화토	1,900	32	1.5	4,000	0.30
풍화암	2,000	35	3.0	5,000	0.25
SGR+강판다단 보강영역	1,900	32	15.0	5,000	0.30

## 5.3 해석결과

### 5.3.1 굴착에 따른 지표면 및 주요지점 변위

해석결과에 의하면 터널 직상부 도로부 침하는 약 0.2cm~0.5cm, 터널 천단부 침하는 약 0.7cm~1.1cm으로 나타나 보강후 도로침하 및 천단부 침하, 터널 주요지점 변위 모두 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

### 5.3.2 Rock Bolt의 축력

Rock bolt의 설계축력은 10t으로 안정성 평가 결과는 다음 표와 같다.

표 8. 굴착단계에 따른 Rock Bolt 최대작용축력(STA. 0K181)

굴 착 단 계	Rock Bolt 최대작용축력 (ton)	안정성 평가	비 고
상 반 면 굴 착	4.02	Stable	◆ 허용축력 = 10 ton
하 반 면 굴 착	5.01	Stable	

### 5.3.3 Shotcrete 응력

해석결과 굴착단계별 Shotcrete 작용응력은 표 9., 그림 7.~그림 12.와 같다.

본 공구 실시설계서에 의하면 Shotcrete의 설계강도( $\sigma_{ck}$ )는 210 kg/cm<sup>2</sup>이므로 허용응력 84 kg/cm<sup>2</sup>(0.4  $\sigma_{ck}$ )을 기준으로 하여 검토한 결과, 최대 응력은 약 50.9 kg/cm<sup>2</sup>으로서 해석단면 모두 안정한 것으로 나타났다.

표 9. 굴착단계별 Shotcrete 작용응력(STA. 0K181)

굴 착 단 계		Shotcrete 최대작용응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	안정성 평가	비 고
상반면 굴 착	1차 Shotcrete 보강후	16.0	Stable	◆ $\sigma_{ck}=210 \text{ kg/cm}^2$ ◆ 허용응력=84 kg/cm <sup>2</sup>
	2차 Shotcrete 보강후	30.2	Stable	
	3차 Shotcrete 보강후	45.6	Stable	
하반면 굴 착	1차 Shotcrete 보강후	44.5	Stable	
	2차 Shotcrete 보강후	47.7	Stable	
	3차 Shotcrete 보강후	50.9	Stable	

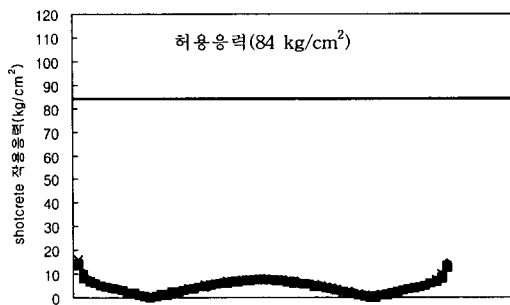


그림 7. 1차 Shotcrete 보강후(상반)

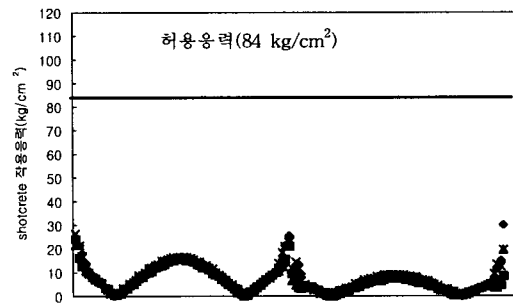


그림 8. 2차 Shotcrete 보강후(상반)

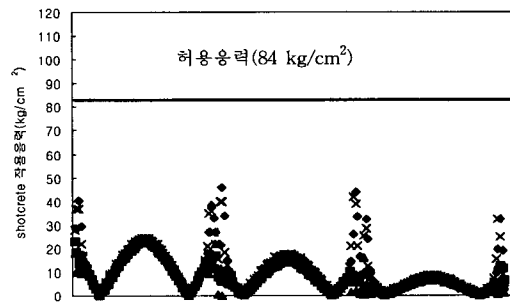


그림 9. 3차 Shotcrete 보강후(상반)

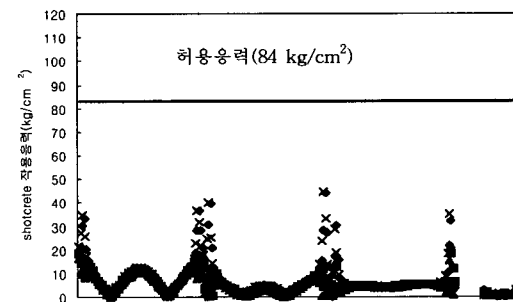


그림 10. 1차 Shotcrete 보강후(하반)

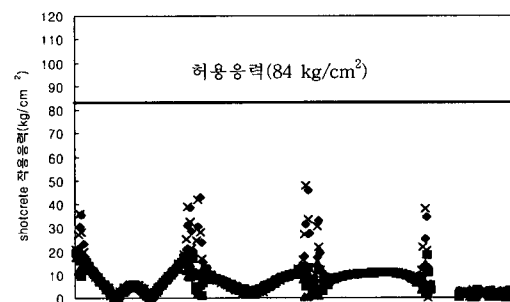


그림 11. 2차 Shotcrete 보강후(하반)

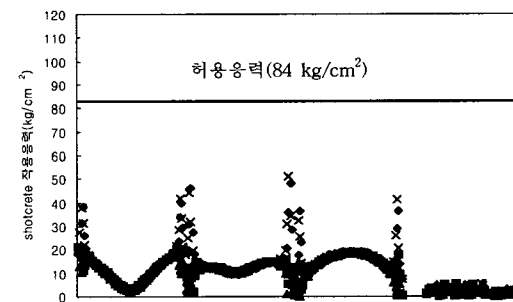


그림 12. 3차 Shotcrete 보강후(하반)

### 5.3.4 분석 및 고찰

터널굴착에 따른 터널 주요지점 변위와 지보재(Shotcrete, Rock Bolt)에 작용하는 최대응력 및 최대축력 검토결과 4.1절에서 제안한 보강안을 적용할 경우 터널 굴진에 따른 주변지반 이완억제 및 터널 지보재 안정성 확보등 전체적으로 안전한 것으로 나타났다.

## 6. 결론 및 제언

도심지 지하철 터널의 지반보강공법 시공사례 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 현장의 시공 막장면에 나타난 지층상태는 설계시 기존 지반조사결과와는 달리 풍화토층이 일부구간 터널 인버트부까지 분포하는 것으로 나타나, 터널굴진시 역굴로 인한 토사의 유실로 현재 공사가 중단된 상태에서 터널 안정성확보를 위한 보강공법 연구를 진행하였다.
- 2) 본 현장의 지층조건 현장여건을 고려할 때 가장 위험단면인 STA. 0K181 지점에 대하여 터널안정성 검토를 위해 수치해석을 수행한 결과, 터널굴착에 따른 터널 주요지점 변위와 지보재(Shotcrete, Rock Bolt)에 작용하는 최대응력 및 최대축력이 허용치를 초과하여 전체적으로 불안정한 것으로 검토되었다. 그러므로 검토대상 전구간에 대하여 안정적이고 안전한 터널굴착이 되기 위해서는 위치별 지층분포, 토질 및 암석의 상태, 지하수에 따른 터널굴착시 막장면의 안정성, 터널 시공후의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 연약지반의 지반보강이 이루어진 상태에서 터널시공이 이루어지도록 적절한 대책공의 적용이 필요한 것으로 판단되었다.
- 3) 본 연구에 의하면 본 현장의 터널안정성 확보를 위해서는 터널내에서 강관다단 그라우팅 공법을, 지상에서는 SGR공법을 적용하고 또한 본 현장이 터널 상부의 토피가 얇고 지하철 운행 및 지상도로교통으로 인한 진동 충격등을 고려할 때, 공사 완료후 지하철 운용시의 터널구조물의 장기적인 안정성 확보를 위해서는 콘크리트 라이닝을 보강하는 것이 바람직한 것으로 검토되었다.
- 4) 상기 보강안을 적용할 경우에 대한 수치해석결과, 지표침하량 및 천단침하량은 보강전 단면보다 상당히 감소하였으며 지보재 작용력 또한 허용치 이내인 것으로 나타나 보강공법 적용시 터널 안정성을 확보하는 것으로 분석되었다.
- 5) 터널 구조안정성 평가의 도구로서 적용한 수치해석은 복잡하고 다양한 지반을 제한된 파라메타에 의하여 모델링하여 실제의 지반거동을 근사적으로 Simulation하는 기법이므로 수치해석 결과가 터널의 안정성을 보장하는 것으로 과신해선 안된다. 따라서, 현장 기술자는 지반공학 및 프로그램의 기본개념에 대한 충분한 이해와 함께 수치해석결과를 공학적으로 Interpretation하는 기술적 판단이 중요하며, 해석결과를 현장 안전관리의 지표로서 이용하되 항상 시공과정에서 정확한 계측관리를 통해 Feedback에 의하여 시공관리를 철저히 하여야 한다.
- 6) 특히 현장에서의 터널 시공중 안정성을 확보할 수 있기 위해서는 예측 기준치와 실측치를 비교하여 안정상태를 확인하여야 하며 계측치가 예측치보다 위험한 상태에 도달할 가능성이 있으면 사전에 안전대책을 강구할 수 있도록 계측관리(지표면 침하, 터널천단부 및 내공변위, 지하수위, 지보재 작용력 등)를 철저히 하여야 한다.

## 참고문헌

1. 박광준, 이인근, “도심지 지하철 터널의 붕괴유형과 원인”, 지반공학과 터널기술, 한국지반공학회 1993년도 봄 학술발표회 논문집, 1993, pp 42~47.1. 천병식, “지반주입공법”, 원기술, 1995. 3.
2. 천병식, “서울 지하철 5호선 5-36공구 터널함몰 원인 및 안전대책 연구”, 한양대학교 산업과학연구소 1991. 11.
3. 천병식, “광주지하철 1-3공구 지반보강에 관한 연구”, 한양대학교 건설연구소, 1997.