

터널붕괴지반의 보강공법 및 효과에 대한 사례연구 A Case Study on the Ground Reinforcement Method and Effect of the Failed Tunnel

조현¹⁾, Hyun Cho, 임재승²⁾, Jae-Seung Lim, 정윤영³⁾, Yoon-Young Chung, 최상열⁴⁾, Sang-Yeul Choi

- 1)쌍용건설(주) 토목기술부 차장, 공학박사, Ph.D., Deputy General Manager, Civil Eng. Tech. Dept., SsangYong E. & C.
- 2)쌍용건설(주) 토목기술부 과장, 토질 및 기초 기술사, P.E., Senior Manager, Civil Eng. Tech. Dept., SsangYong E.& C.
- 3)쌍용건설(주) 토목기술부 이사, 토질 및 기초 기술사, P.E., Managing Director, Civil Busi. & Cons. Div., SsangYong E.& C.
- 4)쌍용건설(주) 부사장, Vice President, SsangYong E. & C.

SYNOPSIS : The maintenance for the stability of tunnel, especially on downtown area, careful check must be considered during construction stage and after. Moreover we have to achieve the stability of tunnel by ground improvement and reinforcement when ground condition is bad or tunnel failures under the various ground conditions.

In this paper, it is presented the case of tunnel failure and the state of restoration by ground reinforcements at seoul subway ○-○ construction site.

For the purpose of ground reinforcement, first, curtain wall was established by chemical grouting. Secondly, cement milk grouting was carried by upper part of tunnel crown. Also Borehole loading test and tunnel monitoring were carried by in failure site for the long term stability of tunnel.

KEYWORDS : Tunnel Failure, Chemical Grouting, Cement Milk Grouting, Pressure Meter Test, SPT, Tunnel Monitoring

1.서론

최근 지하공간 이용의 증가 추세 및 수도권의 인구 밀집 경향 등에 의하여 지하철의 건설 증대는 필수 불가결하다. 특히 도심지에서 시행되고 있는 지하철터널의 시공에는 사람뿐만 아니라 인접구조물에 대한 안정성이 확보되어야 하는 과제를 안고 있다. 따라서 터널 설계 단계에서부터 시공시의 굴착방법 및 지보공의 선정등과 시공후의 장기안정성에 이르기까지 모든 분야에서 안정성을 고려하여야 한다. 그러나 예측하지 못한 다양한 지층조건의 변화 등에 다른 터널 붕괴시에는 재굴착을 위하여 보강효과의 극대화를 고려한 최적의 지반보강에 의해 시공 안정성을 확보하여야 한다.

본 보고서에서는 당사가 건설 중인 서울지하철 ○-○공구 현장에서 발생한 터널 붕괴 사고를 중심으로 시공 및 사고·복구현황, 시험 및 계측 등에 의한 지반보강 효과의 검증에 따른 안전한 시공성 확보를 위한 사례 연구를 수행하였다.

당 현장의 지반은 화강암을 기반암으로 이루어져 있으며, 사고 지역의 터널 상부는 풍화암층으로 상반 중벽분할(Central Diaphragm)공법이 적용되었다. 지보패턴은 근접 Logging Data 기준시 Type PD-3에 해당되나, 수직구 및 횡갱이 근접하여 있으므로 보다 보수적인 Type PD-2A로 적용·시공되고 있었다. 또한 붕괴사고 이전의 계측결과에 의하면 선진도갱 막장면 후방에서의 변위속도가 일정한 안정화 상태로 판단되었으나, 예측하지 못한 파쇄대의 존재로 이완하중의 증가 및 과도한 지하수 유동 등으로 인한 거시적인 붕괴가 발생된 것으로 예상되었다.

사고지역에 대하여 재굴착을 위한 지반보강은 먼저 Curtain Wall의 목적으로 Chemical Grouting을 실시하였고, 터널 상부에 Cement Milk Grouting을 시행하였다. 또한 공내재하시험 및 계측으로 지반보강 효과를 확인하였고, 시공 안정성 확보를 도모하였다.

2. 터널 붕괴 현황

2.1 지반조건

본 지역의 지질은 중생대 쥐라기에 해당하는 대보화강암(Daebo Granite)이 기반암으로 넓게 분포하고 있으며, 이를 신생대 제 4 기의 비고결 충적층이 부정합적으로 피복하고 있다. 본 지역의 암반은 심하게 각란되어 균열 및 파쇄대가 다수 발달하고 있으며, 이들 불연속면내에는 장석이 고령토화된 점토질 물질이 충전되어 있다. 터널 붕괴지점의 지반조사 상황을 설계 당시와 터널 붕괴 후로 분류하여 정리하면 다음<표2-1>과 같다.

표 2-1. 터널 붕괴지점 부근의 지반조사 상황

구분	조사 위치	조사 방식	비 고
I	붕괴 위치 약 25m 후방	지상 수직 보링	설계 당시
II	붕괴 위치 전방 5~7m 좌우측개소	"	터널 붕괴후
III	복구후 막장면	갱내 수평 보링	재굴착중

상기의 지반조사 결과에 의하면, I의 경우 상부로 부터 매립층, 충적층, 풍화대층, 연암층으로 구성되어 있으나, 터널 붕괴후 조사한 II의 결과에 의하면 매립층, 충적층, 풍화대층, 연암층, 파쇄대로 구성되어 인접지역과 상이하게 국부적인 파쇄대가 터널 직상부에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 재굴착중 선진 수평보링에 의한 지반조사에서도 설계 당시 파악되지 않은 파쇄대의 존재를 확인할 수 있었다. < 표 2-2 >는 심도별 지층 분포상태를 나타낸 것이다.

표 2-2. 지층분포상태

구분	I의 지반조사결과		II의 지반조사결과			
	터널후방		터널 진행 방향 좌측		터널 진행 방향 우측	
	심도 GL(-) 0.00		심도 GL(-) 0.00		심도 GL(-) 0.00	
매립	0.0 ~ 2.0	2.0	0.0 ~ 2.0	2.0	0.0 ~ 1.5	1.5
충적층	2.0 ~ 7.5	5.5	2.0 ~ 7.5	5.5	1.5 ~ 10.5	9.0
잔류토	7.5 ~ 12.5	5.0	7.5 ~ 12.5	5.0	-	-
풍화암	12.5 ~ 20.0	7.5	12.5 ~ 20.0	7.5	10.5 ~ 18.0	7.5
연암	20.0 ~ 28.7	8.7	20.0 ~ 28.7	8.7	18.0 ~ 19.5	1.5
파쇄대	28.7 ~ 32.7	4.0	28.7 ~ 32.7	4.0	19.5 ~ 38.2	18.7

2.2 설계 및 시공

지하철 노선은 도로 직하부에 위치하고 있으며, 터널의 계획고는 천단부가 GL(-)19.26m 인 Shallow Tunnel이다. 붕괴지점으로 부터 후방 약 25m 지점에 위치하는 원형 수직환기구 사이 구간의 터널 천단부는 대부분 풍화암층으로 구성되어 있으며, 부분적으로 연암층이 나타나고 있다. 따라서 Logging Data 등에 의하면 붕괴지점 부근은 지보패턴 Type PD-3에 해당되나, 수직구 및 횡갱이 근접하고 있으므로 보다 보수적인 지보패턴인 PD-2A가 적용되었다. 또한 굴착공법으로서 상반 증벽분할(Central Diaphragm)공법을 채택하였으며, 본 공법은 자립성이 나쁜 지반에서 편평 대단면의 안정 굴착을 목적으로 하며, 선진 도갱에 의해 굴착 단면적이 작아져 막장 자립성이 우수하고 도심지 터널에서 지반 침하를 완화시킬수 있고 막장면의 사전 예측 및 물빼기공의 역할도 한다.

붕괴 당시 막장의 0.8m 후방까지는 1, 2차 숏크리트와 락볼트 및 강지보공을 설치하였고, 1.6m 후방까지는 2차 숏크리트가 시공되었으며, 다수의 절리가 발달되어 있어 Forepoling 25개(L=2.5m)를 보조공법으로 시공하여 터널 종방향으로 1.7m가 Overlap이 되도록 터널 천단의 안정성을 도모하였다.

2.3 붕괴현황

수직 작업구로부터 시·종점 방향으로 CD분할 굴착작업을 착수하여, 시·종점측 양방향으로 선진도갱부 22.04m, 확폭부 16m가 진행된 상태였다. 그리고 터널 붕괴는 시점 방향으로 선진도갱부를 굴착작업시, 1997.9.3 08:00 경 터널 막장 붕괴에 따른 도로 함몰이 발생하였다. 사고 발생 당일 06:30경 막장 우측 어깨부에서 공동이 관측되어 숏크리트 타설을 실시하였으나, 토괴의 추가 이탈 징후로 작업원의 철수 및 도로 통제등 신속한 조치로 인명피해와 차량손상 등의 피해를 방지할수 있었다. <그림 2-1>은 붕괴지점의 평면도 및 중·횡단면도를 나타낸 것이다.

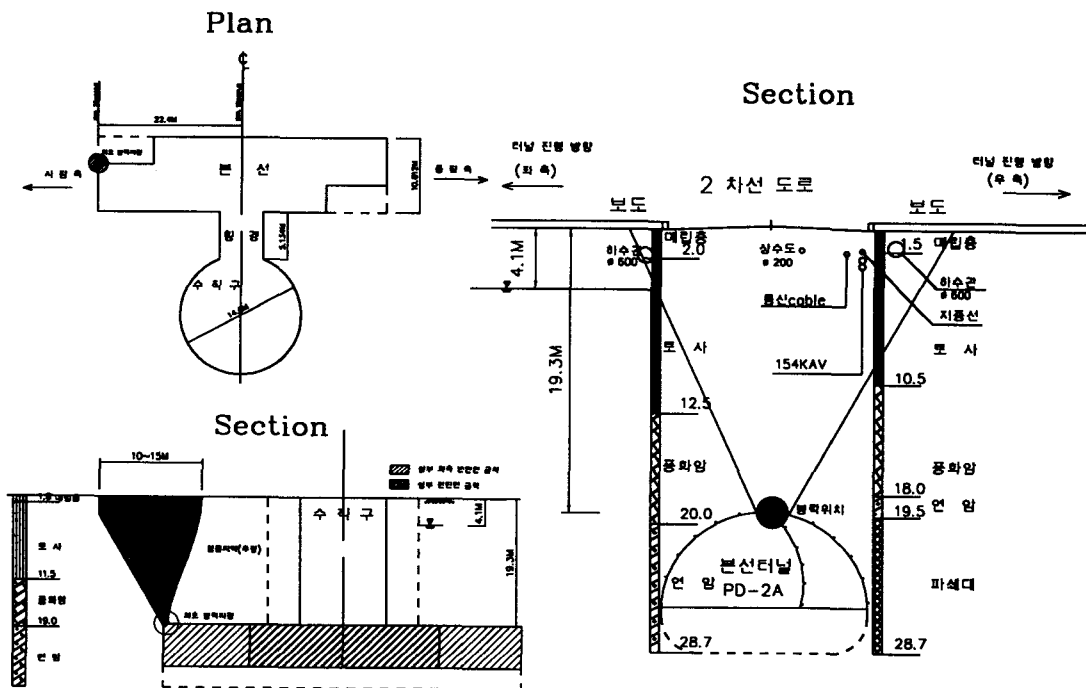


그림 2-1. 터널 붕괴지점의 평면도 및 중·횡단면도

2.4 붕괴 원인

2.4.1 일반적인 터널 붕괴 유형

터널 붕괴는 부적절한 지보형식 또는 지보재 설치시간 지연 등의 설계 및 시공불량에 기인하는 외에도 갑작스런 지하수 유입, 불균질성 및 이방성 지반과 예측하지 못한 파쇄대 발생 등의 지반특성에서도 그 원인을 찾아 볼 수 있다.

터널 붕괴 전에 나타나는 일반적인 현상은 균열, 과도한 박리 현상, 측벽부의 침하, 토사유입과 지하수 용출 등이 있다.

지반별 터널 붕괴의 일반적인 유형으로는 소성압, 편토압의 작용 및 이완영역대의 확장 등을 들 수 있다. 여기서, 풍화 변질된 결정편암, 단층파쇄대 또는 층상단층보다 축압비가 큰 지반등에서 터널 주변에 생긴 소성 영역이 확대되어 터널 지보에 하중으로 작용할 경우, 소성압에 의한 터널의 변형이 발생된다. 또한 일반적으로 사면지형에 터널이 존재하는 경우 편토압의 문제점이 야기될 수 있으나, 이방성 지반에서 축압비가 큰 경우에도 편토압의 발생으로 인한 터널의 변형 및 붕락이 발생할 수 있다. 그리고 터널 굴착 시 주변 지반의 이완이 진행되면 지반의 사하중이 증가하고, 더욱이 발파진동 등에 의한 지반 열화 및 지하수위 유출 등에 의한 절리면 전단강도의 저하 등에 의하여 터널 아치부에서의 수평 균열과 터널 천단부에서의 붕락등이 발생할 수 있다.

2.4.2 붕괴 원인

본 현장의 터널 붕괴 원인을 다음과 같이 고찰하였다.

(1) 지층 특성

사고 발생 지점은 CD굴착면의 천단부로 이 지점은 막장관찰 결과나 사고 후 2개공 시추조사 결과로부터 풍화암과 연암의 경계부에 풍화 변질된 절리의 발달이 심하고, 지하수의 유입이 용이하여 터널 안정성에 가장 취약한 지층으로 구성되어 있다.

(2) 터널 주변암반의 응력분포 및 이완영역의 비대칭 현상 발생

사고 발생 지점의 암반은 터널 진행 방향을 중심으로 좌측부는 절리 발달이 적은 연암층이고, 우측부는 파쇄가 심하게 발달되어 있다. 터널 주변암반에서 응력분포의 소성응력비 및 지반변위는 파쇄대가 발달된 우측부(CD굴착 막장면의 어깨부)에 집중적으로 나타나고 있어 응력의 비대칭 현상에 의한 편토압이 작용하고 있는 것으로 판단되었다.

(3) 터널보강 지보재의 기능감소

좌우측벽 암반의 물성차가 큰 구간에서는, 터널 굴착으로 발생한 소성영역등이 비대칭적으로 불균등 분포함에 따라, Shotcrete의 내압기능 및 Sealing 효과가 감소하고 천단부의 암괴 탈락에 의한 Shotcrete의 일부 탈락으로 Arch효과가 감소하는 등으로 원지반의 지보재 기능이 감소하였다.

(4) 지하수 과다 출수로 인한 터널 주변지반의 니질화(泥質化) 증대 및 붕괴 촉진

비대칭 이완현상으로 터널 천단부의 취약한 절리면이 확장되고 이 절리면을 통한 상부 지하수의 다량유입이 형성됨에 따라, 터널 상부 풍화도와 풍화암에 과도한 간극수압이 작용되었고 또한 불연속면의 절리면 전단강도 및 토입자나 토괴간의 전단 저항력이 감소되었다. 즉 터널 상부 이완 영역이 확대됨에 따라 사하중이 증가되었고, 지하수의 과다 유입으로 터널 상부 지반의 니질화(泥質化) 현상이 증대됨에 따라 지반의 유동성도 증대된 것으로 사료되었다.

(5) 2차적인 붕괴 현상

선진도갱 상부 우측 어깨부에서 발생한 붕락현상이 지표 부근까지 도달함에 따라 터널의 진행 방향과 동방향으로 매설된 상·하수도관이 붕락 충격으로 파손되어 다량의 유출수와 토괴들이 붕락 지점을 따라 터널 내부로 유입되었다. 이러한 현상으로 인해 하수도 흡관이 터널 중점방향 막장부와 수직구 입구까지 유실되어 있었다.

3. 터널 복구 현황

3.1 지반 보강 시공

터널 붕괴구간 및 주변 지반의 지반보강과 재시공 방안을 결정함에 있어서 다음의 사항을 중점적으로 고려하여 시행하였다.

- (1) 터널 막장의 붕괴된 암반 부위와 인근 주변을 충분히 고결시켜 지하수를 차단하고 상재하중에 대한 충분한 안정조건을 유지할 수 있도록 한다.
- (2) 터널 상부 붕괴구간과 인근 주변지반에 존재하는 대소 공극을 그라우팅으로 충전하여 향후 발생될 수 있는 지반침하를 최대한 억제 시킬 수 있도록 하고, 지반 자중에 의하여 터널 막장에 재하되는 전단 하중과 지하수 유입량을 최소한으로 한다.
- (3) 터널 재굴착 시 붕괴구간의 지반 침하로 인한 주변 건물의 피해를 방지할 수 있도록 한다.

이상의 사항을 바탕으로, 붕괴지역 터널 주변에 급결 그라우팅을 실시하여 본 주입재가 기시공된 터널내로의 유입을 방지하기 위하여, JCM 급결 그라우팅을 실시하였으며, 또한 되매움 구간에 대하여 원지반 강도 이상을 확보하기 위하여 Cement Milk Grouting으로 고결시켰다. 최종적으로 Cement Milk Grouting의 효과 및 균질성 여부를 판단하여 부족한 경우에는 LW Grouting을 추가로 적용하였다.

지반 보강을 위한 주입은 약3개월에 걸쳐서 실시되었으며, 그라우팅 평면도 및 단면도는 다음 <그림 3-1>과 같다.

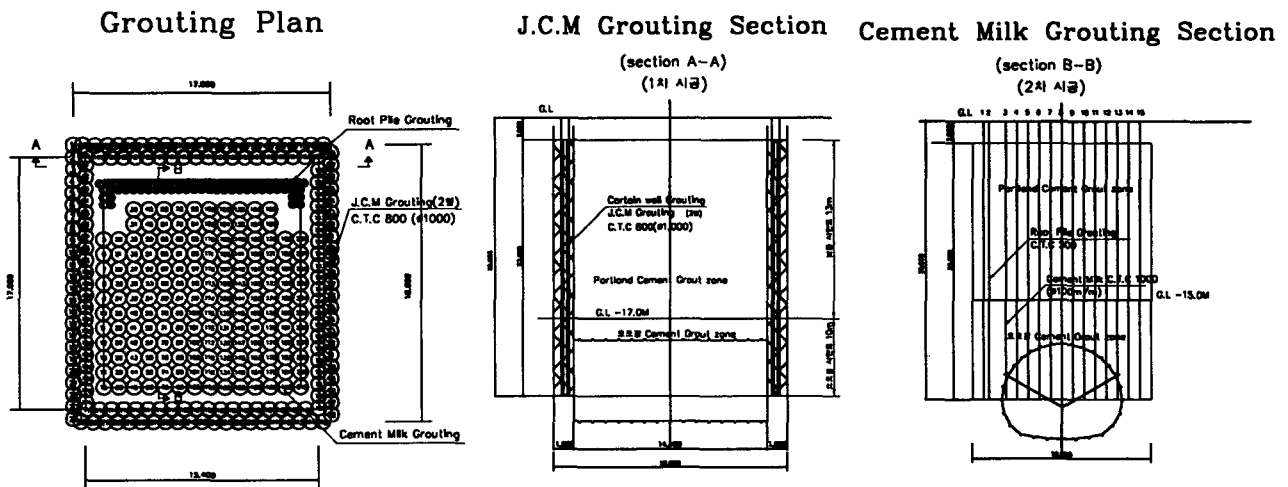


그림 3-1. 지반보강을 위한 그라우팅 평면도 및 단면도

제1단계로 실시한 JCM 급결 그라우팅은 주입간격을 C.T.C=1.0m로 하였으며 경계부의 차수성을 높이기 위해 2열로 조밀하게 주입하였다. 또한 주입재로서 A액(배합비;물유리 250 l, 물250 l)과 B액(배합비;시멘트150kg, JCM 약재 60kg, 물 420 l)을 사용하였다.

제2단계의 시멘트 밀크 그라우팅은 붕괴구간에 발생된 대소 공극을 시멘트 밀크로 충전 고결시켜 지반의 강도 증대를 확보하기 위하여 적용하였다. JCM으로 고결시킨 내부 구간을 주입간격 C.T.C=1.0m로 주입하였고, 주변 건물이 인접한 지역에서는 지반의 융기 및 할렬파괴를 방지하기 위해 C.T.C=0.5m로 하여 구조용 탄소강관을 삽입하여 실시하였다. 또한 시멘트 밀크 그라우팅의 배합은 1m³에 대해 시멘트 450kg, 물 857 l를 사용하였다.

그리고 JCM 및 Cement Milk의 주입은 설계심도에 대해 대상 토질별로 일정속도를 유지한 상태로 정량 주입하고 T-P-Q도에 의해 시공관리하였으며, 주입압력은 5~8kg/cm²로 계획하였다. 당초 계획서에 의한 JCM 주입중 주변 지반의 균열발생으로 당초의 전체 주입율 35%를 구간별 및 지반별 주입율로 변경하여 시공함으로써 터널 보강 효과의 확보와 주변 건물의 민원 예방을 도모하였다.

3.2 지반 보강 효과

3.2.1 시험 결과

주입에 의한 지반 보강 효과의 확인은 설계와 일치 여부를 조사·확인하여 붕락지점에서의 터널 굴착 시 및 장기적인 구조 안정성과 주변 인접건물 및 지반의 침하 등을 최소화하는데 있다. 즉 지반 보강공법은 지반개량 자체가 목적이 아니고 목적인 구조물에 대하여 시공중 또는 장기적으로 안정성을 확보하는데 있으므로 주입효과 확인은 매우 중요한 사항이다. 그러나 현재 주입효과를 정량적으로 파악할 수 있는 방법이 완전히 확립되어 있지 않으나, 주입 목적에 따라 적절한 방법을 선택하여 실시하는 것이 중요하다.

당 현장에서는 투수시험에 의해 차수성의 확인 및 시공효과의 균질성을 확인하고, 또한 보강 후의 지반강도 확인을 위해 표준관입시험과 Pressure Meter Test를 실시하였다. 그 시험결과를 정리하면 <표 3-1>과 같다.

표 3-1. 지반보강 전후의 시험결과

위치	심도	설계시		붕괴후	보강후		
		지층	N치		지층	N치	변형계수 (Pressure Meter시험)
붕 락 구 간	6.0m	매립층	10-12	매립토	30-40	8,000kg/cm ²	
	9.0m	충적층	30-40		50이상		
	12.0m	풍화토	50이상		50이상	9,500kg/cm ²	K=8.74
	15.0m	풍화암	-		50이상		
	18.0m	연암	-		50이상		K=7.50

이상의 결과로부터, 지반보강 후 차수성 및 지반강도의 증가를 확인할 수 있었고, 재굴착에 따른 지반 안정성을 확보하였다.

3.2.2 계측 결과

전절에서 확인된 바와 같이 지반보강 후 강도가 증대되었고 지하수의 유출 현상도 발견되지 않았으며, 재굴착과 함께 병행된 내공변위 및 천단침하 등의 계측결과가 각각 1.5~5.2mm, 1~6mm로 정도로 매우 안정적으로 나타났다. 이러한 계측결과는 <그림3-2>, <그림3-3>과 같다.

4. 결론

당사에서 시공중인 서울지하철 ○호선 ○-○공구 현장에서 발생한 터널붕괴 사고의 붕괴·복구 현황 및 이에 대한 지반보강 효과의 검토 결과를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 터널붕괴는 CD분할의 선진도갱 굴착 시 발생하였으며, 작업원의 철수 및 도로통제등 신속한 조치로 인명과 차량손상 등의 피해를 사전에 방지할 수 있었다.
- (2) 터널붕괴의 원인으로서는, 예측하지 못한 과쇄대가 CD면에서 응력집중이 발생하기 쉬운 터널 굴착 방향의 천단 어깨부측에 걸쳐서 존재하고 있었고, 이로 인한 편토압의 작용으로 1차 붕락이 발생되었다.

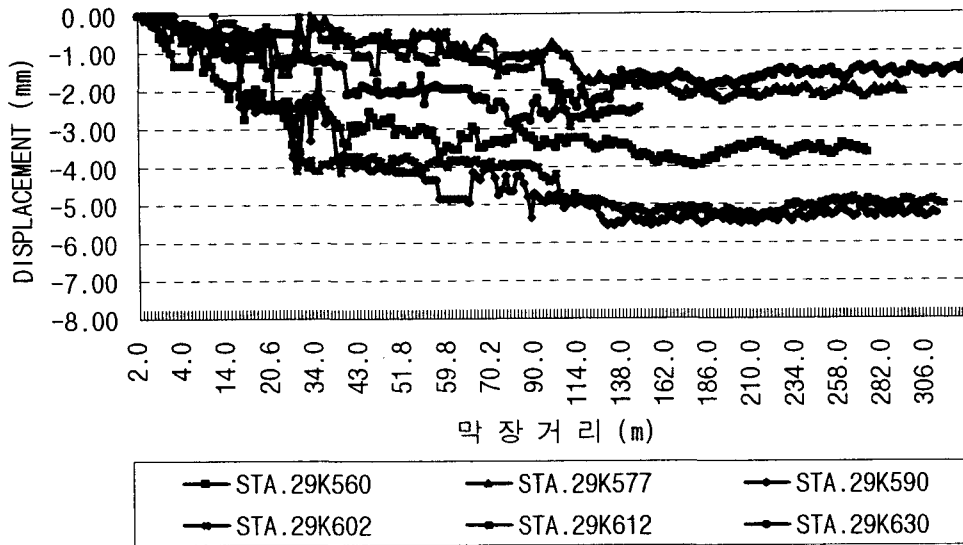


그림 3-2. 재시공중 굴착단계별 내공변위

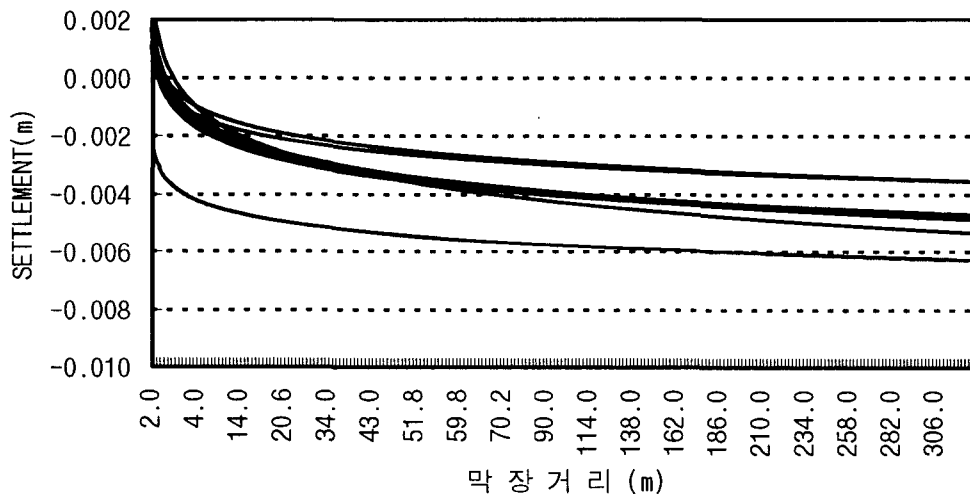


그림 3-3. 재시공중 굴착단계별 천단변위

또한 지하수의 과다 유입으로 터널 상부 지반의 니질화(泥質化) 현상이 증대되어 붕락현상이 지표부근 까지 도달함에 따라 거시적인 붕괴가 발생한 것으로 판단되었다.

(3) 터널붕괴 구간 및 주변지반에 대한 보강은 Curtain Wall의 목적으로 JCM 급결 그라우팅을 실시하였고, 2단계로 터널 상부의 되메움 구간에 대해 Cement Milk Grouting을 실시하였다.

(4) 지반보강 효과를 확인하기 위하여 현장투수시험, 표준관입시험과 Pressure Meter 시험을 실시하였으며, 그 결과 지반강도의 증대와 지하수 유출 방지를 확보할 수 있었다. 또한 재굴착 시공중의 계측결과로부터 내공변위 등이 6mm 이하로 수렴되어 재굴착에 따른 터널의 장기 안정성을 확보하였다.

이상과 같은 시험·계측 결과로부터 지반보강 효과는 매우 우수한 것으로 판단되었다.

(5) 도심지 터널과 같은 Shallow Tunnel 및 복잡한 지질구조가 예상되는 지반에서는 사전 시추조사만으로는 연속적인 지반자료를 제공할 수 없으므로 터널 시공중 보다 정밀한 막장 관찰 및 선진 시추조사 등을 병행하여 지속적으로 수행할 필요가 있다.

5.참고문헌

1. 서울특별시 지하철건설본부(1996), “5-14공구 시공감리 종합보고서”, pp.106~190.
2. 한국지반공학회(1997), “지반조사결과의 해석 및 이용”, pp.226~265.
3. 日本 土木學會(1983), “トンネルの地質調査と岩盤計測”, pp.72~113.
4. Park, N.S. et al.(1997), “Reinforcement of Railway Tunnel in Fault Zone”, Environmental & Concerns in Underground Construction, pp.267~273.