

## 화강암 풍화대 저토피 터널의 붕락 및 보강사례



이준우  
남광토건  
과장

### 1. 서론

서울지하철 3호선 건설과정에서 NATM 공법의 설계 개념이 처음 도입된 이후, 지하철 뿐만 아니라 도로, 철도 등의 대부분 터널에 NATM이 적용되어 왔다. 이는 타 공법에 비하여 시공비가 경제적이며, 예상치 못한 현장 상황에 대처하기에 효과적이기 때문이다. 본 기사는 NATM 공법으로 설계된 고속도로 터널의 건설과정에서 발생된 붕락에 대한 현황 및 원인과 이에 대한 대책방안을 기술하고자 한다.

### 2. 현황 및 개요

호남서남권의 산업 물동량 증가와 무안국제공항의 수요 증대에 대처하기 위해 광주권과 최단거리로 연결하는 「무안~광주간 고속도로」는 전라남도 무안군을 기점으로, 광주광역시 광산구를 종점으로 하여 동서를 연결하는

총 연장 41.6km의 고속도로로써, 2002년에 착공하여 2008년 5월28일에 개통되었다(그림 1).

본 기사와 관련 있는 구간은 「고속국도 제12호선 무안~광주간 건설공사 제1공구」 현장으로써 무안공항을 기점으로 하여 광주방향으로 관통하는 보평터널로써 연장 937m의 2차로 쌍굴로 이루어져 있다.

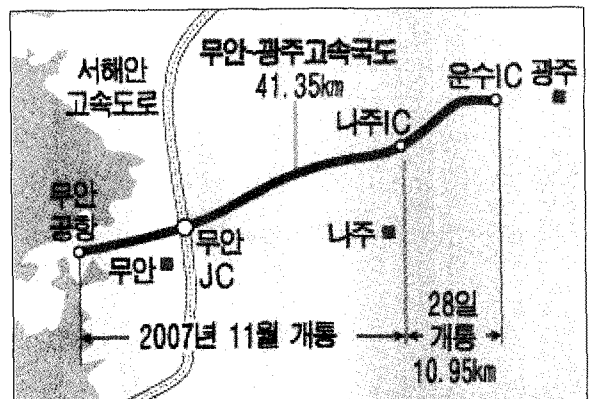


그림 1. 무안~광주 고속도로 노선도

### 3. 지형 및 지질특성

#### 3.1 지형

본 지역은 행정구역상 전라북도 망운군 무안면 피서리에서 함평군 함평읍 수호리까지 약 10.3km 지역이다. 산계는 종점부쪽에 흙방산(257m), 보평산(225m)등의 200m 내외의 산들이 분포하며 시 중간부는 30~40m내외의 저지대를 이루며 서해안과 접해있다. 산계의 방향성은 지질의 분포를 반영하여 북동방향이 우세하며 이외에 남북방향의 산계도 소규모 분포하고 있다.

인근의 수계는 소규모로 산재하여 분포하고 있으며 이들은 인근의 소규모 저수지에 모여 서해안으로 유입된다.

#### 3.2 지질

본 대상구간의 전반적인 기반암은 중생대 쥐라기의 화성암류이며 이외 종점부인 함평JCT이후에 시대미상의 변성퇴적암류인 옥천계의 지층과 관입암들이 분포하며 이를 제4기의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 쥐라기의 화강암류는 부분적으로 변형을 받아 엽리구조가 발달

하고 있으며, 시대미상의 옥천계 지층은 석영 편암류들과 석회암, 염기성 맥암이 혼재되어 있는 양상을 보인다. 4기의 충적층은 미고결의 퇴적층으로 자갈 및 모래, 실트 등으로 구성되어 있으며 층후는 비교적 협소하다.

보평터널구간의 지표지질 조사결과에 따르면 지표상에 노출된 노두는 심한풍화~완전풍화의 풍화등급을 가지고 있으며, 터널입구 부근은 화강풍화암으로 구성되어 있으며, 화성암류에 특징적으로 나타나는 수직적인 주상절리와 수평적인 판상절리의 발달이 양호하다. 차별적인 풍화작용을 보이고 있으며, 풍화잔류토(RS)~심한풍화(HW)까지의 풍화등급을 보여주고 있다.

터널종점 부근은 일부 소규모로 보통풍화의 화강암이 노출되어 있으나 대개 완전풍화(CW)~풍화잔류토(RS)의 화강풍화암이 우세하다. 풍화암은 조직과 절리 등의 구조를 그대로 가지고 있으며 상대밀도가 조밀~매우 조밀함을 보여주고 있는 것으로 나타났다. 따라서 터널굴착시 입구부와 출구부의 경우 토사 및 풍화암이 우세하며 부분적으로 보통풍화의 풍화강도를 가지는 화강암반이 출현할 것으로 판단된다. 상기와 같은 지형 및 지질을 반영하여 적용된 보평터널의 지보패턴은 그림 2와 같다.

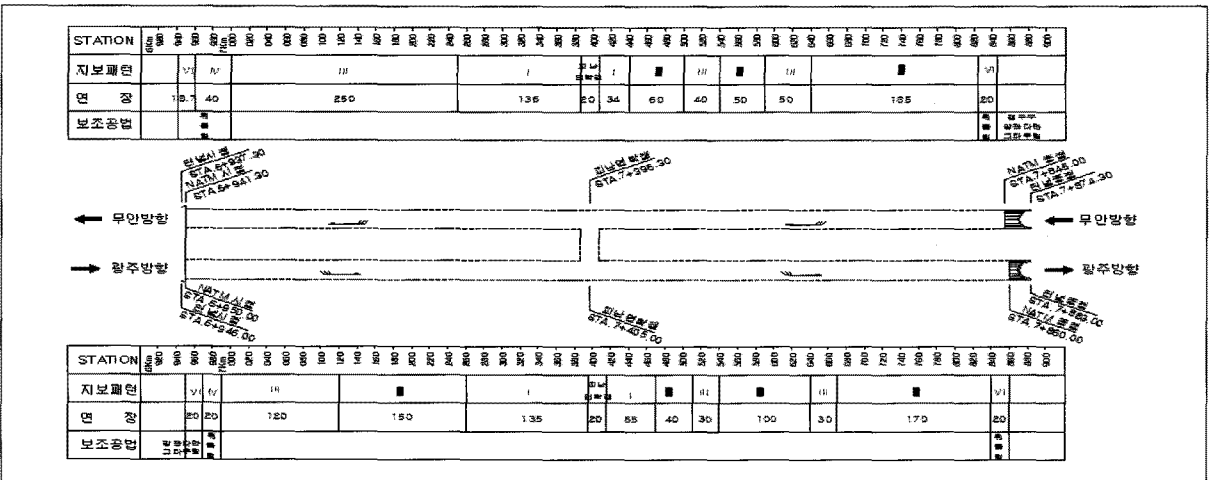


그림 2. 보평터널의 지보패턴 적용도

표 1. 보평터널 봉락구간 관련일시 및 현황

일시	현황	비고
'04.2.27 (금)	보평터널 STA.7+777(광주방향), STA.7+762(무안방향) 굴착중(L=83m)	
	STA.7+777(광주방향)굴착중 풍화암층 노출로 숏크리트 및 ROCK BOLT로 1차보강	
'04.2.28 (토)	강지보 추가보강(1 TYPE → 5 TYPE 변경)	
'04.2.29 (일)	작업중지 후 감지천공 실시 (광주방향)	
'04.3.2 (화)	터널보강에 대한 기술자문 요청	
'04.3.3 (수)	07:20	막장면 정리중 광주방향 STA.7+777 지점 전정부에서 풍화토(약 250m <sup>3</sup> )가 봉락한 상태임.
	10:20	노두부 봉락(토피고 H=18.5m)

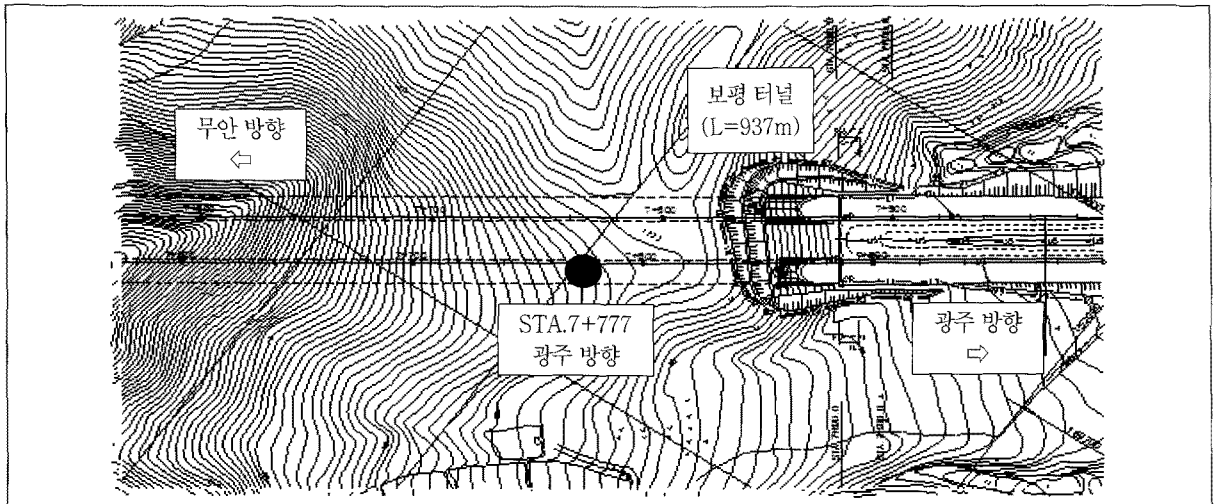


그림 3. 보평터널 봉락구간 위치도

## 4. 터널의 봉락

### 4.1 봉락일지 및 현황

고속도로 제12호선 무안~광주간 건설공사(제1공구)를 시행함에 있어 보평터널 굴착작업중 광주방향 sta 7+777 지점에서 풍화암층의 노출로 숏크리트 및 강지보공으로 보강을 하였으나, 1차적으로 막장 및 천단부 붕괴가 발생한 이후에 추가로 지표함몰에 이르는 2차붕괴가 발생하였으며, 자세한 봉락일지는 표 1과 같다. 또한, 추가적인 봉락을 방지하기 위하여 막장면 전면부를 숏크리트로 타설하였다.

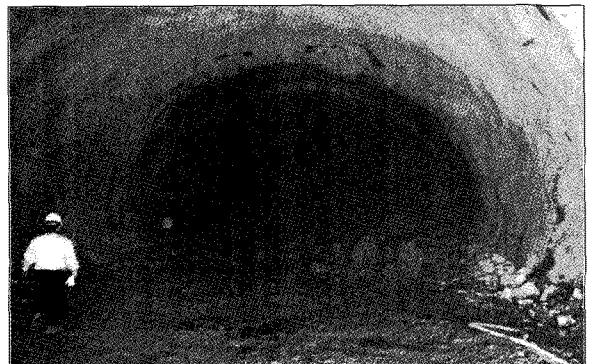


그림 4. 보평터널 출구부(STA.7+776), 터널 막장 붕괴

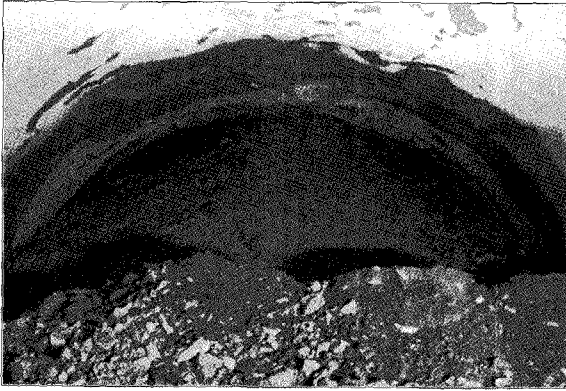


그림 5. 보평터널 출구부(STA.7+776), 터널 막장 붕괴

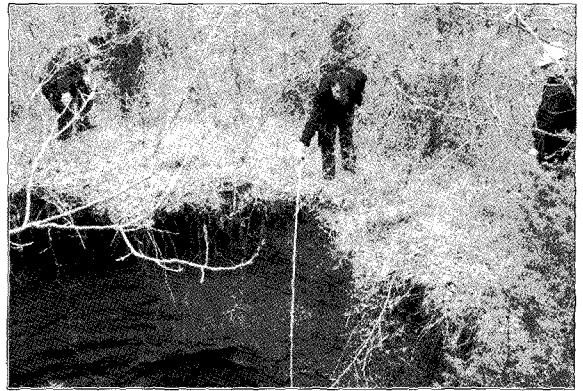


그림 6. 터널 노두부 붕괴(토피고 18.5m)



그림 7. 터널 노두부 붕괴(토피고 18.5m)

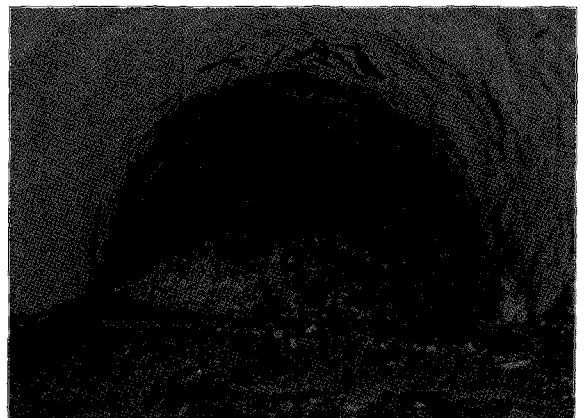


그림 8. 막장 전면부 슛크리트 폐합

#### 4.2 수평 선진보링

보평터널의 붕락에 대한 원인을 파악하기 위하여 현장에서 수평 선진보링을 약 40m 정도 실시하였으며(그림 9, 10 참조), 그 결과에 따르면 당초설계시 보다 지반상태가 불량한 것으로 나타났다. 광주방향 터널에 대한 수평 선진보링 결과(STA. 7k775 지점에서 시행)를 보면 전방 7m까지는 풍화암으로 절리가 발달되어 있으며 RQD가 5~20%으로 불량하였으며, 전방 31.8m까지는 풍화토 상

태로 코아채취가 불가하였으며, 전방 34m까지는 풍화암 지반에 RQD가 25~30%이면서 공내붕괴로 추가보링이 불가할 정도로 불량한 상태였다.

또한 무안방향의 터널의 경우(STA. 7k762 지점에서 시행)는 전방 5~8m 구간에는 절리가 발달한 풍화암으로 RQD가 5%이하이며, 전방 36m까지는 풍화암 및 풍화토가 협재된 상태로 코아채취가 불가하였으며, 전방 39m까지는 약간의 절리가 포함된 화강암으로 RQD가 30%이면서 공내붕괴로 추가보링이 불가능한 상태였다.

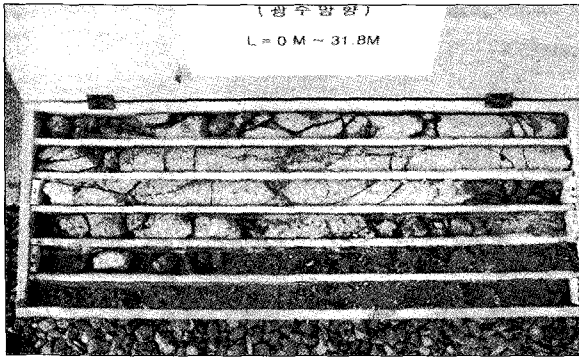


그림 9. 보평터널 광주방향 수평선진 보링시추 코아(L=0~31.8m)

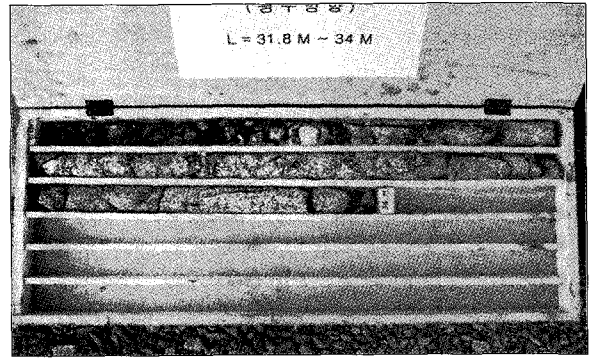


그림 10. 보평터널 광주방향 수평선진 보링시추 코아(L=31.8~34m)

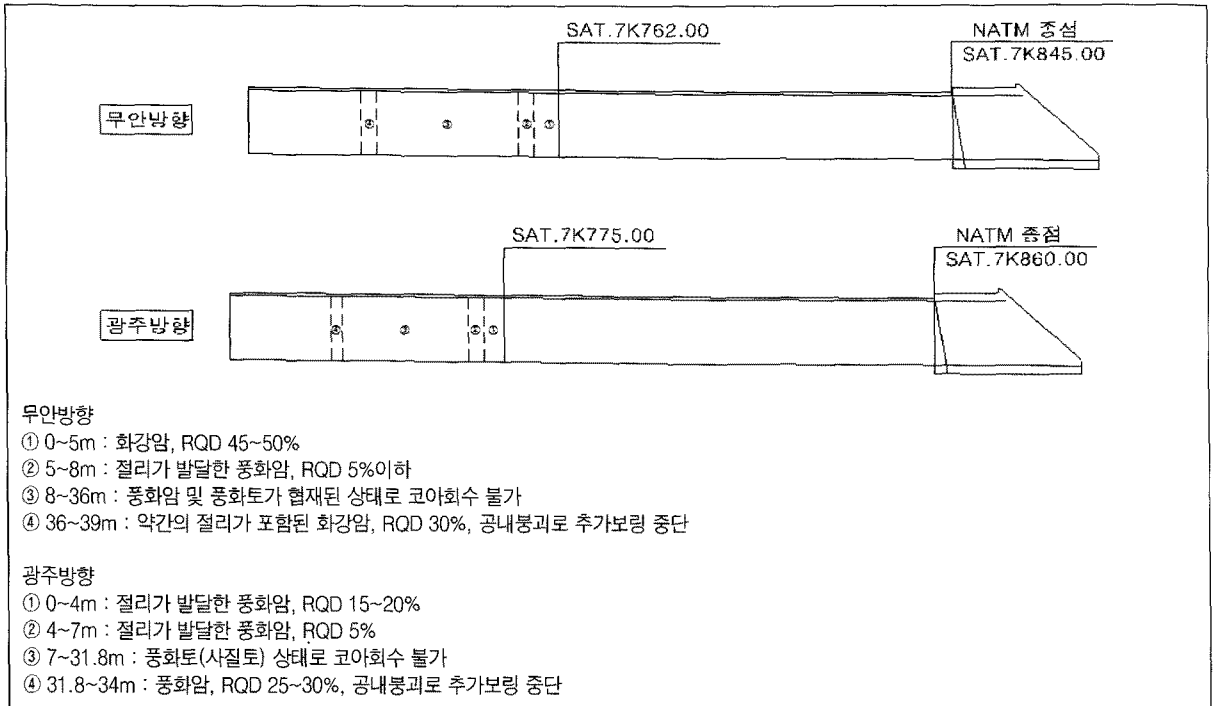


그림 11. 보평터널 수평선진 보링 결과

## 5. 터널 보강방안

### 5.1 지상에서의 보강

지표함몰 붕락부 주변의 지반과 되메우기를 실시할 구

간의 지반은 이미 큰 변형을 받았으므로 지반 자체의 강도를 거의 상실하여 이 상태에서 굴착을 진행할 경우에는 터널 상부의 지반이 지보재에 큰 사하중으로 작용하게 되므로, 붕락부의 지반이 어느 정도 자립력을 가질 수 있도록 지반 강도를 증진시키기 위한 그라우팅을 실시하도록

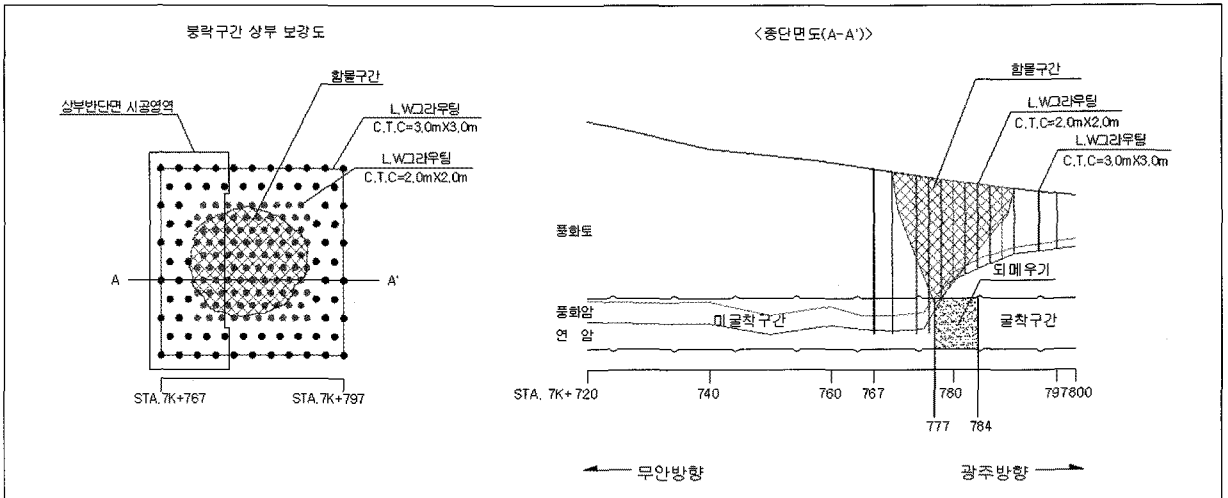


그림 12. 지상에서의 그라우팅 보강도

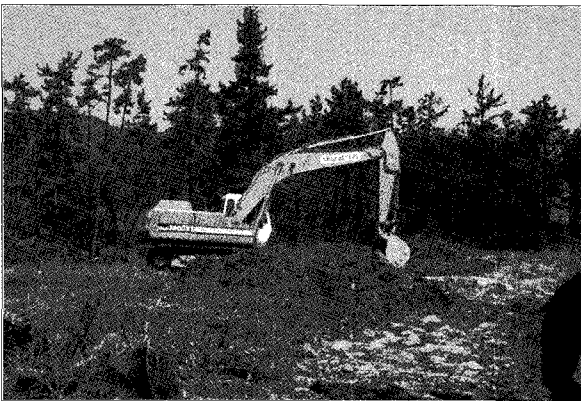


그림 13. 터널붕락구간 상부지반 복구작업

하였다.

따라서 광주방향 보평터널 상부의 지표 함몰부는 우선 그라우팅이 가능한 사질토로 되메우기를 실시한 후, 지반 보강 효과는 시멘트밀크 그라우팅 보다 다소 떨어지지만 차수효과가 양호하며, 공사비가 비교적 저렴한 LW 그라우팅을 적용하였다.

또한, 터널단면에 대한 차수 그라우팅이 효과를 발휘하기 위해서는 터널단면 외곽으로 5m 정도까지 그라우팅이

되어야 하며, 지표 함몰부 주변의 지반도 붕락시 이완되었을 가능성이 크므로 평면도상에서 종방향 및 횡방향 그라우팅 범위는 이 두 영역 외곽으로 5m 범위까지 실시하였다. 다만, 붕락 주변부보다 붕락구간에 대해서는 그라우팅공의 간격을 더 조밀하게 하여 그라우팅 효과를 높이도록 하였다.

## 5.2 터널내에서의 보강

지표에서의 그라우팅 후에 터널 내부에서의 보강을 위해 상부지반으로부터의 이완하중을 지지할 수 있는 강관다단 그라우팅을 실시하였다. 붕락부에 대한 강관다단 그라우팅의 시공각도를 일반적인 경우보다 큰 25°내외로 하여 터널 단면 주변으로의 보강영역을 넓히도록 하였다. 붕락에 의한 지반 이완하중이 아주 클 것으로 예상되어 강관의 휨내력이 큰 대구경 강관다단 그라우팅을 적용하였다.

대구경 강관다단 그라우팅 적용시점은 되메우기를 2m 정도 추가로 실시하여 광주방향 Sta. 7k+784 지점이 되도록 하였다. 현재 중단상에서의 붕락부 형상이 굴착이 이미 이루어진 구간쪽으로 치우쳐 있어 가장 큰 지지력을

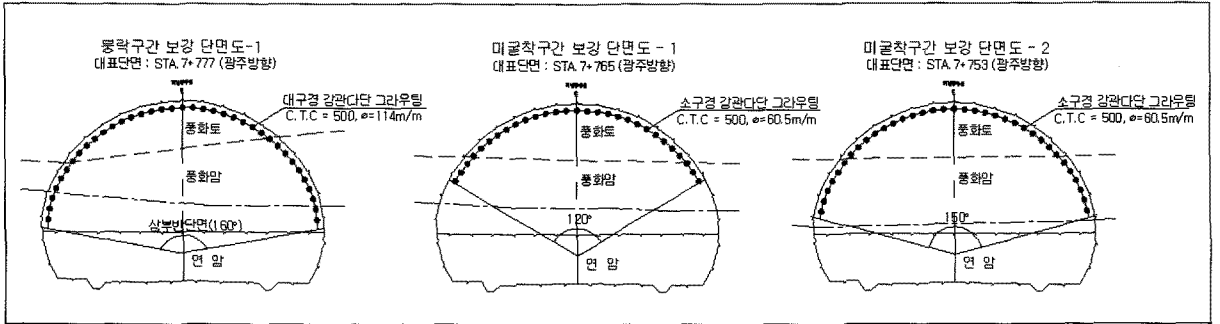


그림 14. 보평터널 광주방향 터널내 보강 단면도

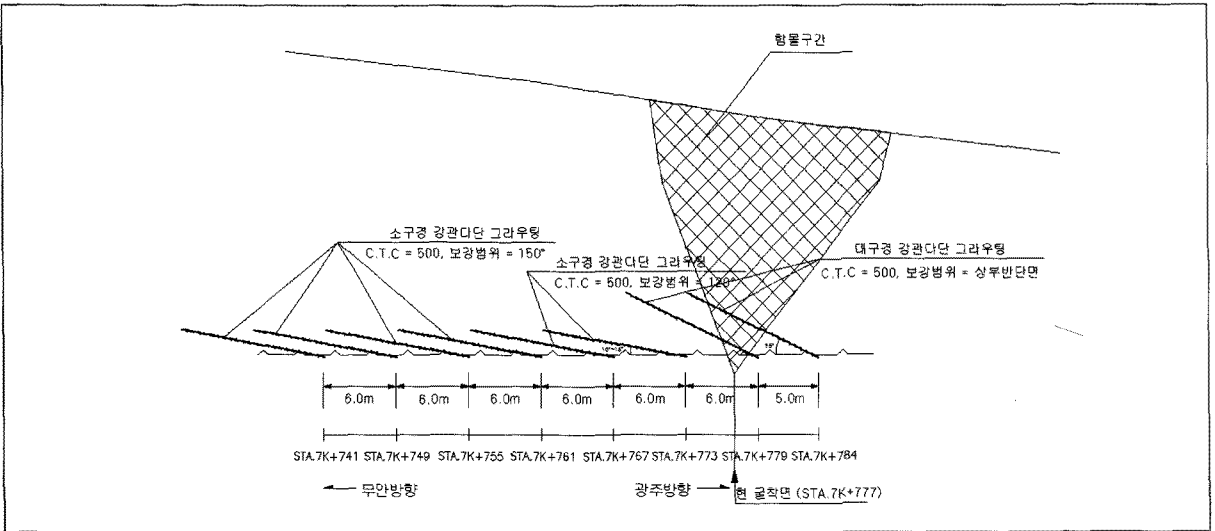


그림 15. 보평터널 광주방향 터널내 보강 종단면도

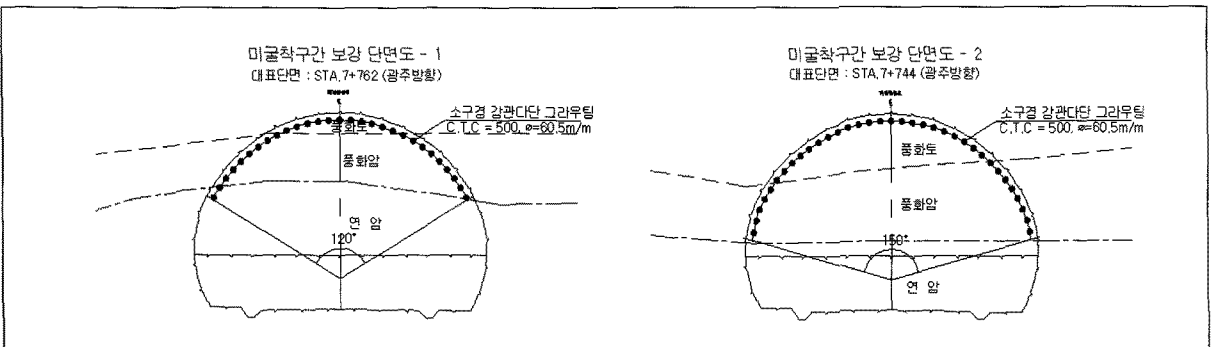


그림 16. 보평터널 무안방향 터널내 보강 단면도

필요로 하는 붕락 막장부 단면을 2단의 강관다단그라우팅으로 보강하기 위해서 이 지점에서부터 강관다단 그라우팅을 실시하였다.

## 6. 맺음말

본 기사는 「고속국도 제12호선 무안~광주간 건설공사 제1공구」의 보평터널 시공중 발생된 붕락에 대한 현황 및 붕락원인 분석과 이에 대한 보강방안을 수립한 것이다.

(1) 보평터널의 광주방향 굴착시 붕락된 근본적인 원인은

당초설계시 판단한 지반상태와 수평선진보링 결과 나타난 지반상태는 확연한 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 상황을 미루어 볼 때, 당초설계시 수행된 지반조사의 한계로 인하여 발생된 붕락이라고 볼 수 있다.

- (2) 터널붕락 사고 발생후 막장부 전면에 슛크리트로 폐합한 작업은 2차 사고를 방지하기 위한 최소한의 작업이라고 할 수 있다.
- (3) 광주방향 보평터널 상부의 지표 함몰부에 사질토로 되메우기를 실시한 후 LW 그라우팅을 시행한 바, 그 효과가 비교적 양호한 것으로 평가된다.
- (4) 터널 붕락부위를 보강하기 위해 휨내력이 소구경에서 보다 우수한 대구경 강관다단그라우팅을 적용하였다.