

## 고속도로 터널막장 천단부의 봉락구간에 대한 지반보강

### The Ground Reinforcement on Daylight Collapsed Block of Crown Head in the Face of the Tunnel of Highway

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 정덕교<sup>2)</sup>, Duck-Kyo Jeong, 한기식<sup>3)</sup>, Ki-Sik Han,  
정진교<sup>4)</sup>, Jin-Kou Jeong

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

<sup>2)</sup> 성하지질공업(주) 대표이사, Representation of Seongha Geologic Engineering Co., Ltd.

<sup>3)</sup> (주) 한양 부장, Construction Manager, Hanyang Construction Co., Ltd.

<sup>4)</sup> 성하지질공업(주) 기술이사, Director, Seongha Geologic Engineering Co., Ltd.

**SYNOPSIS** : Daylight collapse have been occurred by about 5.0m deep at ground surface and collapse of the crown head part of the tunnel have connected to the ground surface during first step of shotcrete work after blasting of upper half section of the tunnel driving at two-way double track tunnel face section on highway construction.

This study is for a successful illustration case for the earth improvement method through applying such strengthening methods as cement milk grouting, S.G.R grouting, steel pipe reinforced multi-step grouting etc. for the purpose of earth strengthening of loosened earth block occurred by tunnel collapse.

**Key words** : Reinforcement, daylight collapse, cement milk injection, S.G.R method steel pipe reinforced multi-step grouting.

## 1. 서론

○○○○고속도로 제○공구 건설공사 구간중 ○○○터널 구간의 터널굴착 작업중 터널 천단부의 봉락에 따른 상부지반의 연속적인 함몰현상으로 이어져 지표면이 약5.0m 깊이로 함몰되었다. 봉락에 따른 지반의 이완으로 터널단면의 주변지반에 대한 지중응력이 균형을 잃은 상태로서 봉락구간에 대한 복구 및 터널굴착 작업을 진행하기 위해서는 이완영역 범위내의 지반에 대한 지반보강이 선행되어야 한다.

본 연구는 터널의 봉락에 따른 이완영역 구간에 대한 지반보강 목적으로 시멘트 밀크그라우팅, S.G.R그라우팅, 강관보강형 다단그라우팅 등의 보강공법이 적용되어 성공리에 터널복구 및 굴착작업이 완료되었으며, 그 지반 개량공법을 검토한 시공사례이다.

## 2. 봉락현황

### 2.1 굴착 패턴 및 봉락시점

N.A.T.M공법에 의한 전단면 굴착으로 표준터널굴착 TYPEⅢ으로 시공하던 중 발파작업이 완료

된 상태에서 shotcrete 타설작업 중 붕락현상이 발생하였다.

## 2.2 붕락사고 후 조치사항

붕락상태를 확인함과 동시에 터널 막장면을 토사로 즉시 압성토 한다음 shotcrete로 폐합하여 막장면의 안정을 취하도록 조치하였다.

## 2.3 붕락 현황도

그림2와 같이 터널 천단부에서 붕락현상이 발생됨과 동시에 상부지반까지 함몰현상으로 이어져 지표면이 약5.0M 깊이로 침하되었다.

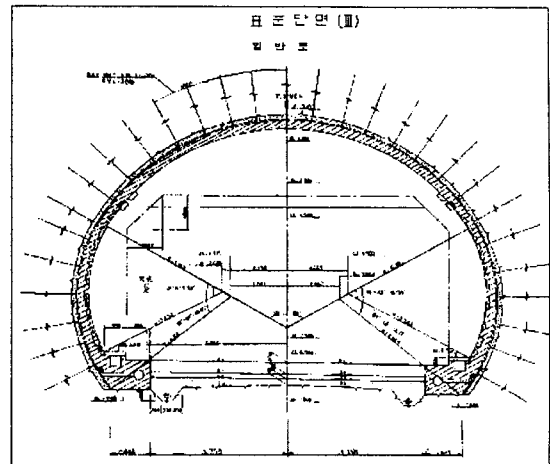


그림 1. 터널표준단면 Ⅲ

## 3. 지반조건

함몰인접 지반의 시추조사결과, 조사위치의 층서는 상부로부터 풍화토, 풍화암, 연암, 경암등의 순서로 분포하고 있다.

풍화토는 GL-0~GL-18.0M까지 분포하여 완전~심한풍화를 받은상태로 조밀~매우조밀한 상태를 보이며 풍화암은 기반암이 완전~보통풍화를 받은 상태로서 core회수율이 저조하며 절리가 많이 발달되어 있다. 연암은 파쇄~심한파쇄상태를 보이며, TCR(%)은 85~90, RQD(%)는 70~90정도이다.

붕락에 따른 터널내로 유실된 터널상부 지반의 토사를 확인결과 풍화정도가 심하여 풍화토의 토질로 관찰 되었으며, 암체를 구성하고 있는 덩어리는 외적인 힘을 가하면 쉽게 파쇄되는 상태를 나타내었다.(성하공업, 1998)

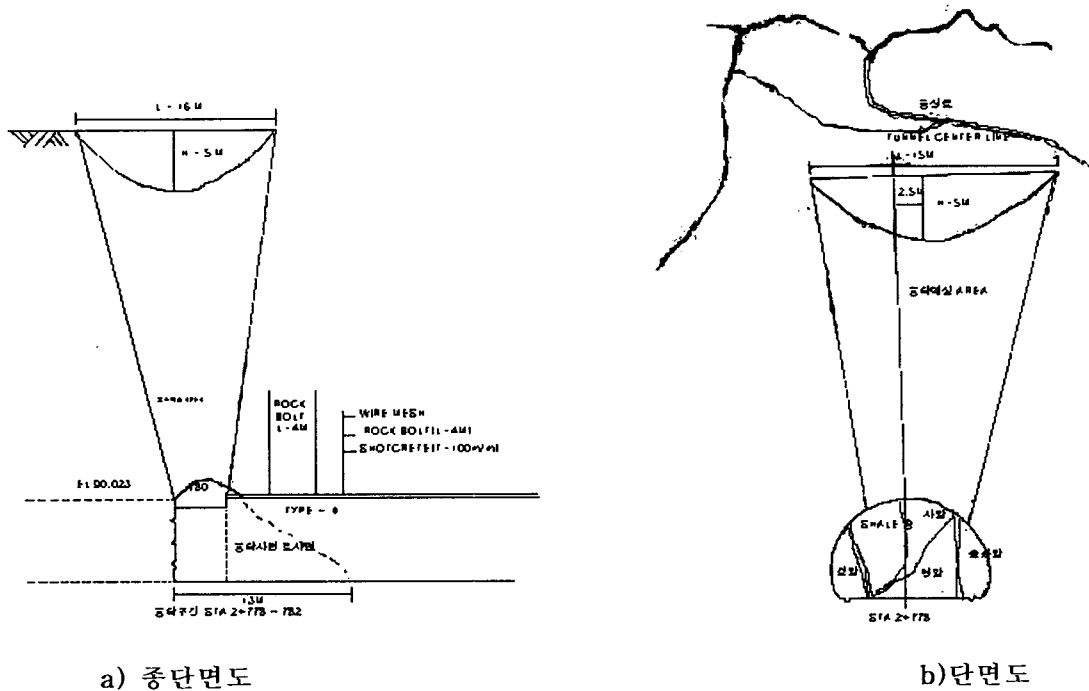


그림 2. 붕락현황도

#### 4. 봉락구간에 대한 안정성 검토

본 수치 해석에서는 2차원 explicit 유한차분해석 프로그램(FLAC)으로서 요소의 각 절점에 구성된 방정식을 미세하게 세분된 time step(이웃절점에 영향을 주지 않을 정도의 time step으로 프로그램에서 자동선택)에서 이전 time step에서 구한값을 초기값으로하여 방정식의 해를 구하는 방법으로 평형상태에 대한 criteria에 도달할 때 까지 반복계산을 수행하였다.

##### 4.1 수치해석 단면의 모델링 및 해석방법

본 해석에서는 해석범위를 축방으로는 2.5배, 상부는 지표면, 하부는 터널높이의 2배로 한정하였으며 해석단면은 봉락된 6.0M 구간으로 정하였다.

표1 표준지보형식

구분 Type	shotcrete 두께	rock bolt 간격	1회 굴착거리	굴착 방법	비 고
보강전III	10	200	200	전단면	

표2 하중재하방법

	전단면굴착	
	Type III	하중분담률
1단계	전단면굴착	40%
2단계	soft shotcrete rock bolt	70%
3단계	hard shotcrete	100%

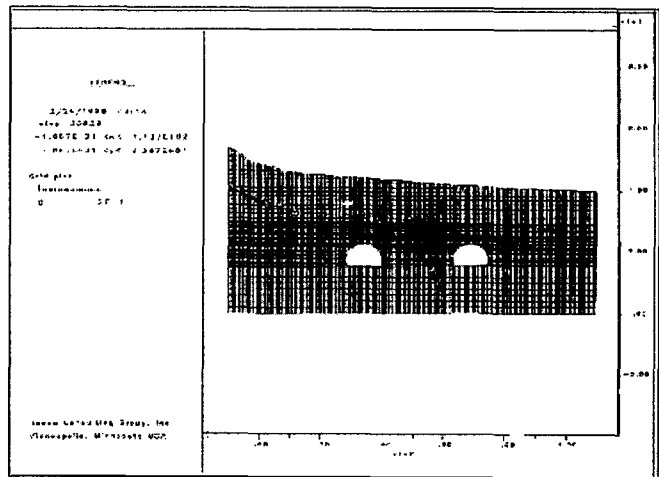


그림 3. 봉락구간의 해석단면

##### 4.2 해석적용 물성치

지반물성치는 사고전후의 지반조사결과와 지반의 절리상태, 풍화정도 등을 고려하여 산정였으며, 지보재(shotcrete, rock bolt)의 입력치 또한 도로터널에서 일반적으로 사용하는 물성치를 적용하였다.

표3 대상지반의 물성치

구분	단위중량 (t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (t/m <sup>2</sup> )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )	비고
풍화토	1.9	25	2	4e3	
풍화암	2.1	30	5	1e4	
연 암	2.3	35	15	3e4	
경 암	2.4	38	20	1e5	

표4 지보재의 물성치

구분	E (t/m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	비고
rock bolt	2.1e7	-	5.0e-4	D25mm L=4.0m
soft shotcrete	4.5e5	0.285e-4	0.07	
hard shotcrete	1.5e6	0.472e-4	0.08	

### 4.3 해석결과

#### 4.3.1 굴착에 따른 지표면 및 내공변위

해석결과 표5와 같이 굴착직후 천단상부에서의 지표면의 침하는 -1.1171cm, 내공변위가 -1.850cm로 나타났다.

#### 4.3.2 Shotcrete 응력

해석결과 표6과 같이 천단부에서 65.4t/m<sup>2</sup>, 측면부에서 77.6~113.1t/m<sup>2</sup> 정도로 나타나 NATM시공 중 shotcrete의 응력이 매우크게 작용하는 것으로 나타났다.

#### 4.3.3 Rock Bolt의 축력

Rock bolt의 설계축력은 10ton으로 비교적 안정한것으로 나타났다.(미시공시)

#### 4.3.4 해석결과

터널의 함몰 발생원인은 지층조건이 매우 복잡한(터널중방향으로 지층의 변화가 심함) 상태로서 시공단계를 고려한 수치해석을 실시한 결과 터널천단면 굴착 후 상당한 지반이완이 발생하여 과다한 응력 집중에 따른 터널붕괴의 원인으로 판단되었다.

표5 굴착직후 지표면 및 내공변위

해석단계		전단면 굴착		soft shotcrete & rock bolt	
해석시점					
보강전 III	지표면의 침하	a	-1.171	-1.488	
		b	0.856	1.107	
		c	-1.081	-1.241	
		a'	-1.850	-2.476	
		b'	0.254	0.328	
		c'	-0.362	-0.451	

(단위:cm)

표6 터널굴착에 따른 초기 shotcrete의 응력

해석단계		soft shotcrete & rock bolt	
해석시점			
보강전 III	a	65.4	unstable
	b	113.7	unstable
	c	77.6	unstable

단위(L/m<sup>2</sup>)

## 5. 지반보강

### 5.1 붕락구간 지반보강 계획

터널붕락에 따른 터널단면에 편도압의 작용으로 기존지층의 구조적인 토립자 배열이 이루어져 터널단면 주변의 작용응력이 균형을 잃은 상태로서 터널단면의 안정성을 유지하기 위한 지반보강공법이 필요하므로 단면에 작용하는 부가응력의 균형을 유지하기 위해서는 이완지층에 어떤 주입재를 지층의 공극내에 충전하여 소성영역내에 지중응력과 터널주변 부가응력의 균형을 가져와 지반의 활동을 억제함으로써 지반보강의 효과를 얻는 공법이 선행되어야 한다. 따라서, 지반보강은 지상부와 갱내보강으로 나누었으며, 먼저 지상부에서는 함몰 및 이완지층 범위내의 지반을 시멘트 밀크주입공법으로 보강한 후, 갱내에서 기존 굴착완료된 구간의 이완예상범위(L=9.0M)은 저압주입 공법으로 보강하고, 터널단면에 가해지는 상재하중·도압 등의 분산,경감 효과를 얻기 위하여 강관보강형 다단 그라우팅공법으로 보강하는 것으로 계획하였다.(千柄植, 1995)

표7 터널굴착에 따른 rock bolt의 축력

해석단계		soft shotcrete & rock bolt	
해석시점			
보강전 III	a	1.35	stable
	b	2.29	stable
	c	2.58	stable

단위(ton)

## 5.2 지상부보강범위 (시멘트밀크 주입공법)

보강범위는 터널 단면을 기준으로하여(건교부, 1996)(도로공사, 1992) 좌우측 8.0M구간과 종방향의 보강구간은 터널봉락 구간을 기준으로하여 양측 9.0M구간까지로 계획하여 지상부에서 수직천공 주입하였다.(배규진 등, 1994)

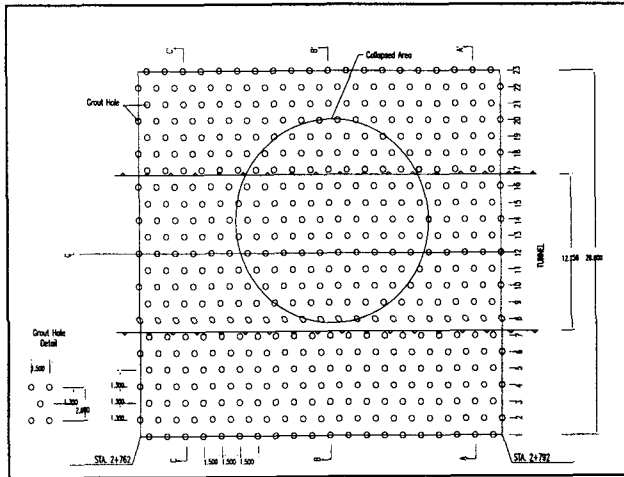


그림-4 지상부보강평면도

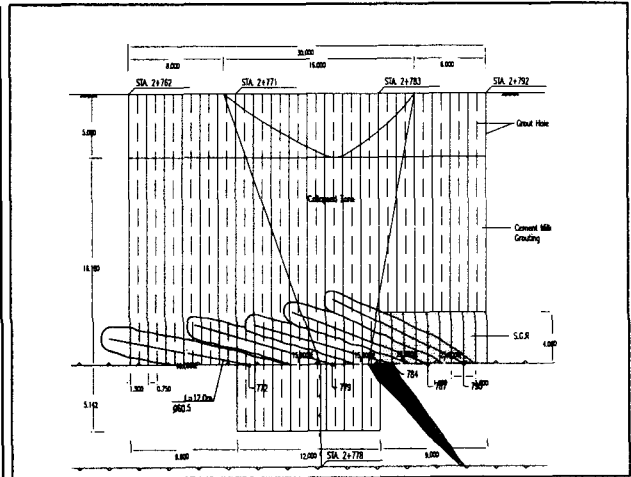


그림-5 지반보강계획 종단면도

## 5.3 경내보강

### 5.3.1 이완예상영역 (S.G.R 공법)

터널굴착 작업이 완료된 구간으로서 붕락현상에 따른 이완이 예상되는 9.0M 구간을 저압형 주입형태인 S.G.R공법으로 그림-6과 같이 상향천공 주입하였다.(韓國 S.G.R工法協會, 1984)

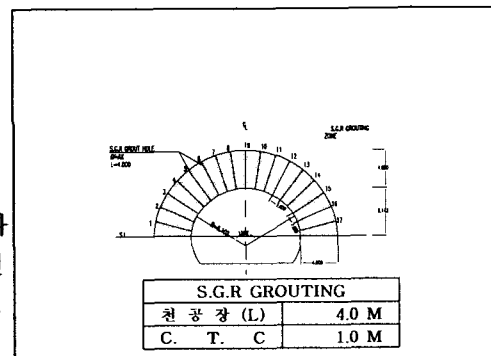


그림 6. S.G.R그라우팅 단면도

### 5.3.2 강관보강형 다단그라우팅

붕락구간에 있어서 이완된 상부지반의 하중이 집중되는 것을 방지하기 위하여 강성이있는 강관을 증첩하여 터널Arch부에 그림-7과 같이 배치하여 시공하였으며 강관의 규격은  $\phi 60.5$ m/m의 백관을 사용하여 C.T.C 400mm로 하였다.(지오택, 1994)(홍성완 등,1986)

## 6. 수치해석에 의한 보강효과 검토

본수치해석에서는 2차원 유한차분해석프로그램 (FLAC)을 이용하여 보강된 터널의 보강효과에 대하여 검토하였다.

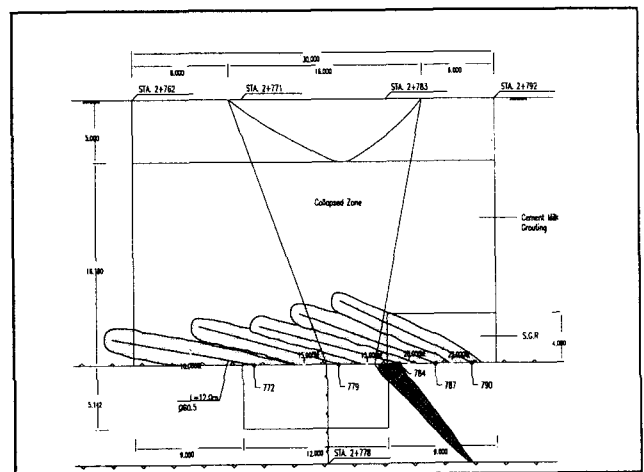


그림 7. 강관보강형 다단그라우팅 단면도

### 6.1 해석 위치의 선정

보강후의 해석 단면은 붕락구간에 대하여 사고원인 검토를 위하여 실시한 patternⅢ 해석에 추가하여 보강단면의 적용성 검토를 위하여 굴착 patternⅣ, V, VI에 대해서 실시하였다.

### 6.2 해석적용물성치

붕괴 지역에서 수치해석을 실시한 보강단면의 물성치는 일반적으로 알려진 원지반 강도증가율을 고려하여 표5와 같이 적용하였다.

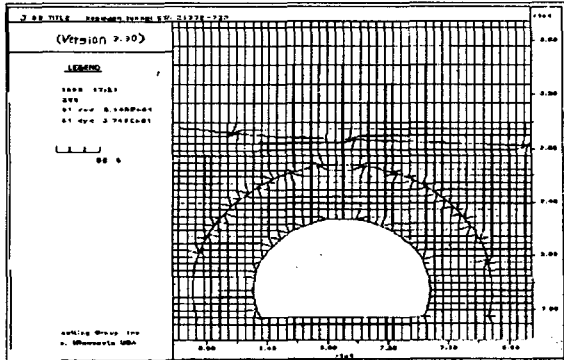


그림-8 붕락구간의 보강 후 해석단면

### 6.3 해석결과

보강된 지반에 대하여 tunnel 굴착 단계별로 TYPE IV~TYPE VI으로 변경 적용하여 수치해석을 실시하였으며 사고지반의 교란 및 연약정도, 시공조건의 추가 안전성을 고려할 경우 보강후의 터널굴착 PATTERN은 TYPE VI의 적용이 적합한 것으로 판단된다.

#### 1) 지표면과 내공변위 검토

보강후의 지표 침하는 0.805~0.328cm, 터널천단부의 침하는 1.589~0.803cm로 나타났다.

#### 2) shotcrete의 해석결과 검토

shotcrete의 초기 압축강도를 50t/m<sup>2</sup>로 평가할 경우 pattern IV의 시공은 비교적 불안정하고 pattern V 또는 VI의 시공이 필요한 것으로 판단되었다.

#### 3) rock bolt의 해석결과 검토

R/B의 축력은 설계축력 (10ton) 이내로 안정한 것으로 평가된다.

표8 보강된 대상지반의 물성치

	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )	비고
풍화도	1.9	30	3	5.5e3	
풍화암	2.1	35	7	2e4	
연암	2.3	40	15	3e4	
경암	2.4	45	20	1e5	

표9 지표면과 내공변위 해석결과

구분 \ TYPE	보강전	보강 후			
	III (굴착 직후)	IV (시공 완료시)	V (시공 완료시)	VI (시공 완료시)	
지표면의 변위(cm)	-1.171	-0.805	-0.334	-0.328	
터널천단부의 변위(cm)	-1.850	-1.589	-0.887	-0.803	

표10 Shotcrete의 해석결과

구분 \ TYPE	보강전	보강 후			
	III (굴착 직후)	IV (시공 완료시)	V (시공 완료시)	VI (시공 완료시)	
shotcrete의 응력 (t/m <sup>2</sup> )	113.7	57.9	42.7	39.5	
	unstable	unstable	unstable	stable	

표11 R/B의 해석결과

구분 \ TYPE	보강전	보강 후			
	III (굴착 직후)	IV (시공 완료시)	V (시공 완료시)	VI (시공 완료시)	
R/B의 출력 (ton)	2.58	0.52	0.952	0.888	
	stable	stable	stable	stable	

## 7. 보강효과 판정

터널 붕락구간의 지반보강 목적으로 시멘트 밀크주입, S.G.R, 강관보강형 다단 그라우팅 공법을 시행한 후 보강효과를 검토하기 위하여 현장 투수시험, S.P.T, 지표침하계측을 실시하였다.

### 7.1 현장투수시험

현장투수시험은 FALLING HEAD TEST 방법으로 붕락구간에 대해서 실시되었으며 보강전에는 대상지반의 붕락에 따른 이완된 지반으로서 투수시험이 불가능한 상태였으나 보강후의 투수계수치는  $K=9.951\sim 9.087\times 10^{-4}\text{cm/sec}$  (붕락부)  $K=2.339\sim 2.087\times 10^{-3}\text{cm/sec}$  (이완부)로 나타났다.

### 7.2 S.P.T (표준관입시험)

보강구간의 지내력을 확인하기 위하여 보강전후의 시험한 S.P.T 결과치는 아래표 12와 같다.

표12 S.P.T 결과표  
이완부

붕락부

심도	시공전	시공후	비고
GL-7.0	10/30	-	
GL-10.0	-	30/30	
GL-12.0	13/30	-	
GL-15.0	-	35/30	
GL-17.0	15/30	-	

심도	시공전	시공후	비고
GL-7.0	32/30	-	
GL-10.0	-	45/30	
GL-12.0	35/30	-	
GL-15.0	-	47/30	
GL-17.0	15/50	-	

### 7.3 터널 천단침하 계측결과

지반보강후 굴착작업과 병행하여 붕락구간에 대한 굴착 단계별로 천단침하계를 설치하였으며 각지점의 천단침하는 0.40~0.80mm 정도로 지반보강전 해석시의 허용범위내로 수렴되어 매우 안정적으로 나타났다.

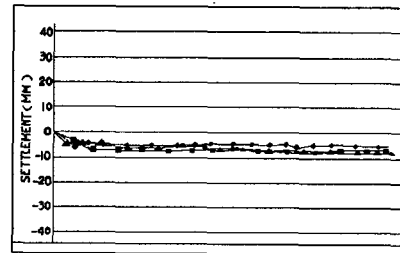


그림-9 천단침하계측 그래프

## 8. 결론

본연구는 터널지반이 취약하여 터널굴착중 붕락현상이 발생되어 지반보강 목적으로 시멘트밀크주입, S.G.R공법, 강관보강형 다단그라우팅 공법을 조합하여 적용하고 그개량 효과를 검토한 것으로서 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보강지반에 대한 안정해석결과 예상되는 각단계에 걸쳐 최대 천단침하량, 지표침하 및 내공변위는 수mm 내외로서 매우 안정적으로 나타났다.
- (2) 보강구간의 터널굴착결과 지하수유출현상은 거의 발견할 수가 없었으며 시멘트 주입재가 암반 crack 사이에 충전되어 고결된 상태가 육안 관찰되었다.
- (3) 보강지반에 대한 계측결과에 의하면 지반 및 터널의 변위거동은 수mm 내외로 매우 안정적임을 알수 있으며 상재하중이 터널단면에 고루 분산되어 지반이 안정화 되었기 때문인 것으로 사료된다. 이상과 같이 계측결과로 미루어 볼때 지반보강 효과는 매우 우수함을 알수 있으며, 터널굴착을 안정적으로 시공 할수 있었다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(1996), “콘크리트 표준시방서”, pp. 14~17
2. 김수일(1996), “상모-수안보간 도로확장 및 포장공사 터널 정밀안전 진단보고서”, 연세대학교 산업기술 연구소
3. 배규진, 구호본, 홍성완, 유영현, 이봉열, 원경식(1994), “Umbrella 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 변위연구”, 한국지반공학회 94년 가을 학술발표회 논문집
4. (주)성하공업지질(1998), “대전 남부순환고속도로 제1공구 건설공사 지반조사 보고서”
5. (주)지오택엔지니어링(1994), “강관보강형 다단그라우팅 공법의 개발”, 한국건설기술연구원, 94 연구보고서, pp. 9~14
6. 千柄植(1995), “地盤注入工法”, 圓技術, pp. 347~355
7. 천병식(1998), “대전남부순환고속도로 제 1공구 가수원터널 붕락원인 및 안전대책 연구”, 한양대학교 건설연구소
8. 韓國 S.G.R.工法協會(1984), “S.G.R공법 技術資料”
9. 한국도로공사(1992), “도로 설계요령 제4권 터널”, pp. 17~31
10. 홍성완, 배규진, 조천환, 정하익(1986), “지하굴착 보조공법의 설계와 시공에 관한 연구-주입공법과 Pipe Roof 공법을 중심으로”, 연구보고서, 건기연 86-GE-2, 한국건설기술연구원