

국도 3호선 터널건설 공사 중 붕락구간에 대한 지반보강

The Ground Reinforcement on Daylight Collapsed Block in Driving Work at the National Road No. 3 Line

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 정덕교²⁾, Duck-Kyo Jeong, 이태우³⁾, Tae-Woo Lee
정진교⁴⁾, Jin-Kou Jeong

- 1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hanyang
- 2) 성하지질공업(주) 대표이사, President of Seongha Geology Co., Ltd.
- 3) 두산건설(주) 기술이사, Construction Director, Doosan Construction & Engineering Co., Ltd.
- 4) 성하지질공업(주) 기술이사, Director, Seongha Geology Co., Ltd.

SYNOPSIS : Daylight collapse have been occurred by about 6.0m deep at ground surface which connected to the ground surface and excessive overbreak have been occurred by the space and height of 3.1~6.2m at crown head part of the tunnel during tunnelling of lower-half part after completing upper-half part on tunnelling of a phyllite mountain by NATM method at the construction work of two way-double track national road.

This study is a successful illustration case of earth improvement by confirming structural safety of the tunnel in a whole through solving the cause of the tunnel collapse and the work have completed successfully through applying such earth strengthening method as cement mortar · cement milk injection, S.G.R, steel pipe reinforced multi-step grouting etc.

1. 서론

국도 3호선의 도로 2차선을 4차선으로 확장공사 중 ○○○제1터널 구간의 상행선터널 하부 반단면 굴착 공사 중 붕락 및 함몰이 발생하여 터널상부 천단부에 높이 3.1~6.2M 공간의 여굴이 발생하고 지표로부터 6.0M가 함몰되었다.

본 연구는 대상터널의 붕괴 원인을 규명하고, 제1터널의 전체적인 구조적 안정성을 검토하여, 지반보강 대책으로 시멘트 모르타, 시멘트밀크주입, S.G.R, 강관보강형 다단그라우팅 등의 보강공법이 적용되어 성공리에 터널복구 및 굴착작업이 완료되었으며 그 지반개량공법을 검토한 시공사례이다.

2. 붕락현황

2.1 붕락개요

붕락은 2차에 걸쳐 발생하였으며 1차 붕락은 8.0M 구간으로서 붕락면을 경량기포 콘크리트로 채우고 강관보강형 다단그라우팅과 S.G.R 그라우팅 공법으로 보강한 다음 붕락구간을 재굴착하여 상부 반단면을 굴착완료 한 다음 하부 반단면을 굴착하던 중 1차 붕락구간 전방의 16.0M 구간에서 2차의 붕락이 발생하여 약 500~600M³의 붕락토량이 발생하고 2차단면 직상부의 지표가 길이 13.0M, 폭 6.0M, 깊이 5.0M로 함몰되었다.

2.2 봉락현황도

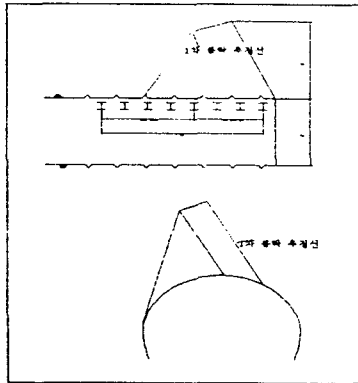


그림-1 제1차 봉락형태

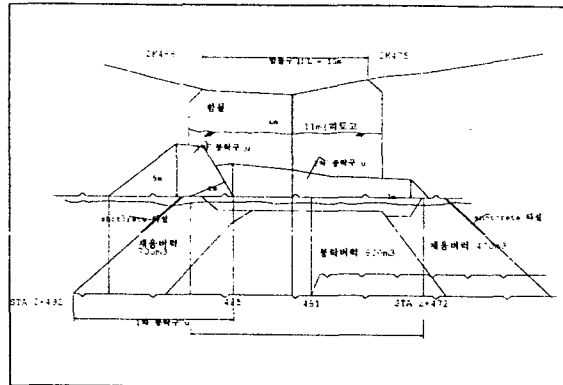


그림-2 제2차 봉락 및 함몰상태

3. 지반조건

터널은 전구간에 걸쳐 풍화성 천매암(phyllite)으로서 균열 및 파쇄가 심하여 골재 입자와 같이 잘게 부스러진 상태이며 평행한 얇은 판상으로 쪼개진 상태로 나타나 있다.

터널상부 암체가 살아있는 부분은 변성작용을 받아 암체의 연경도가 불규칙하고 굴곡을 이루고 있으며 봉락되지 않은 암체는 비교적 단단하며 이완되지 않은 암체의 암선은 터널진행 방향과 굴착면과 약 30°의 각도로 주경사를 이루어 절리면이 굴착방향과 평행을 이루고 있다.

대상단면의 막장형태는 그림-3과 같으며 대상터널의 지형도는 그림-4와 같다.

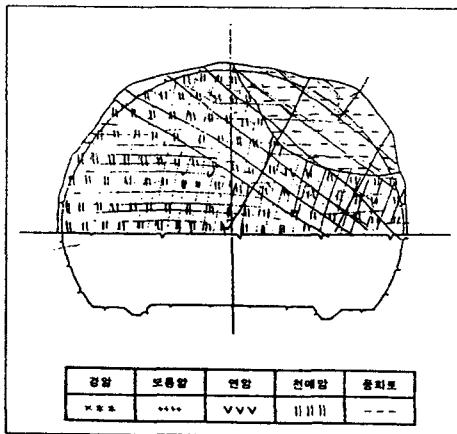


그림-3 대상단면의 막장형태

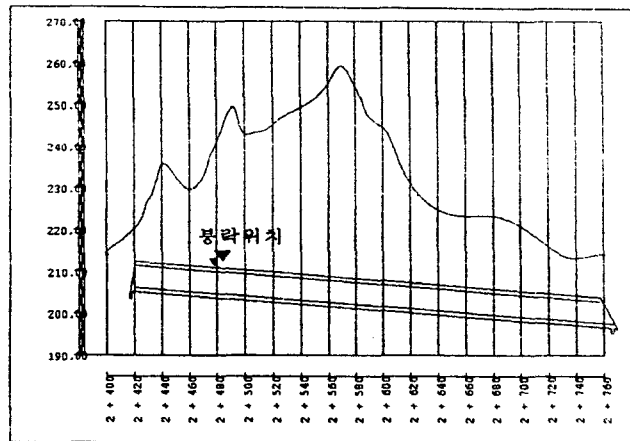


그림-4 대상터널의 지형도

4. 봉락구간의 안정성 해석

본 수치 해석에서는 암반의 구조적 거동을 수치화 할 수 있는 비선형 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 사용하여 터널의 단계적 굴착에 따른 3차원 거동을 2차원적 해석에 고려하기 위하여 본 해석에서는 요소의 급격한 변형에 의해 발생하는 불평형력을 내부압력으로 조절하는 내부압력조절법으로 해석하였다.

4.1 수치해석 단면의 모델링 및 해석방법

표-1 표준지보형식

| 구분 TYPE | shotcrete 두께(cm) | Rock Bolt 간격(cm) | 1회 굴착거리(cm) | 굴착방법 | 비고 |
|------------|---------------------|---------------------|----------------|--------|----|
| 보강전 | 20 | 120 | 120 | 2단계반단면 | |

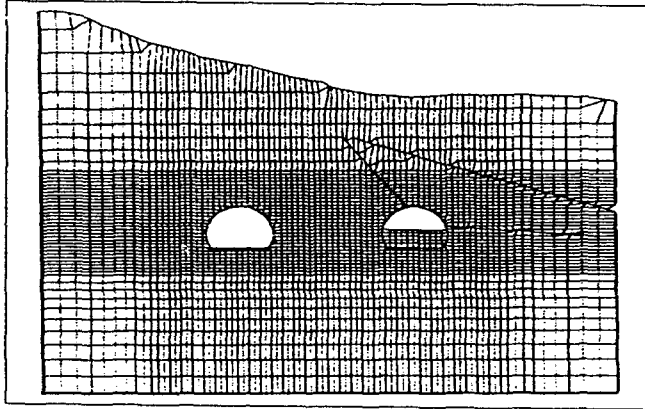


그림-5 대상단면의 요소망

표-2 굴착단계 및 하중재하 방법

| | 반단면 굴착 | | 전단면굴착 | |
|-----|--|-----------|--|-----------|
| | Type IV, V | 하중 분담률 | Type I, II, III | 하중 분담률 |
| 1단계 | ■ 상부반단면 굴착 | 40% | ■ 전단면 굴착 | 40% |
| 2단계 | ■ 1차 슛크리트 (soft shotcrete) ■ 록볼트 | 70% | ■ 1차 슛크리트 (soft shotcrete) ■ 록볼트 | 70% |
| 3단계 | ■ 2차 슛크리트 (hard shotcrete) | 100% | ■ 2차 슛크리트 (hard shotcrete) | 100% |
| 4단계 | ■ 하부반단면 굴착 | 40% | | |
| 5단계 | ■ 1차 슛크리트 (soft shotcrete) ■ 록볼트 | 70% | | |
| 6단계 | ■ 2차 슛크리트 (hard shotcrete) | 100% | | |

4.2 해석적용 물성치

본 연구 대상터널에 사용되는 지보재로서의 Shotcrete, Rock Bolt, 강지보재의 물성은 표-3과 같다. 지반의 물성은 역해석을 통하여 구하였으며 표-4와 같다.

표-3 지보재의 물성

| 지보재 물리적성질 | soft shotcrete | hard shotcrete | rock bolt | steel rib |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 탄성계수 (kpa) | 1.550×10^4 | 2.320×10^4 | 2.040×10^6 | 2.040×10^6 |
| 단면2차모멘트 (m ⁴) | 1.702×10^{-4} | 7.993×10^{-3} | - | 3.830×10^{-9} |
| 단면적 (m ²) | 0.150 | 0.200 | 5.070×10^{-4} | 1.220×10^{-3} |

표-4 지반의 물성

| 대상지반 물성 | 천매암대 | 풍화토대 |
|-------------------------|--------|--------|
| 탄성계수(kpa) | 721474 | 216442 |
| 정지토압계수 | 0.8 | 0.8 |
| 포아송비 | 0.3 | 0.3 |
| 밀도(kg/cm ³) | 2.1 | 1.9 |
| 마찰각(°) | 30 | 20 |
| 점착력(kpa) | 100 | 3 |

4.3 해석결과

본 대상터널은 붕락이 발생한 상부 반단면 굴착후 하중이 100% 이완된 상태인 3단계까지 해석을 실시하였으며, 해석결과 Rock Bolt의 최대축력은 5,325.24kpa로서 허용인장력인 15,000kpa를 넘지 않으며 Shotcrete의 경우 최대 휨응력은 9.48kpa로서 허용응력인 9,600kpa 이내이므로 안전측이나 4번, 5번, 6번, 10번, 11번, 14번 부재의 전단응력은 허용전단력인 38.73kpa를 넘어 파괴 가능성이 있는 것을 알 수 있다.

4.4 봉락원인

봉락 구간의 지층은 균열 및 파쇄가 심한 천매암 단층대에 위치하고 있으며 시점에서 볼 때 상부 우측 부분에 미세한 균열이 발달된 풍화도가 존재하여 매우 불량한 상태이다.

또한 터널굴착면과 단층대의 암선이 터널로부터 6m가량 떨어져 30°의 각도를 이루고 있어 터널 굴착시 자립도가 극히 약한 단면으로 시공한 4.0m의 Rock Bolt로는 시반균열부의 봉합작용 및 부착작용을 수행할 수 없었던 것으로 사료된다.

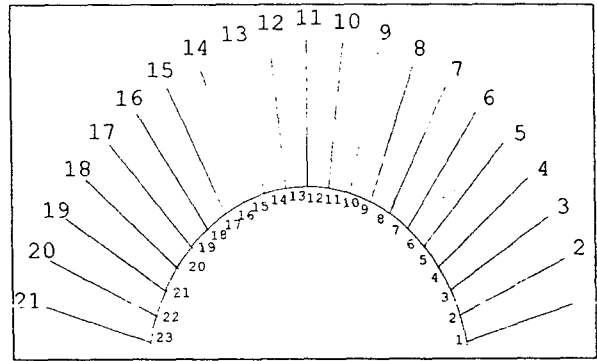


그림-6 지보재의 요소번호

5. 지반보강

5.1 봉락구간 지반보강계획

봉락구간의 지반보강은 터널봉락에 따른 기존지층의 구조적인 토립자 배열이 완료되어 터널단면 주변의 부가응력이 균형을 잃은 상태로서 부가응력의 균형을 가져와 지반의 활동을 억제함으로써 지반보강의 효과를 얻는 공법이 선행되어야 한다.

따라서, 지반보강은 지상부와 갱내보강으로 나누었으며, 먼저 지상부에서는 함몰부를 시멘트모르타르로 충전하고 봉괴구간의 주변지반은 시멘트밀크 주입공법으로 보강한후 갱내에서는 터널단면의 이완영역 범위를 S.G.R.그라우팅 공법으로 먼저 시공한다음 터널단면에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산 및 경감효과를 얻기위하여 강관보강형 다단그라우팅 공법으로 보강하는 것으로 계획하였다.

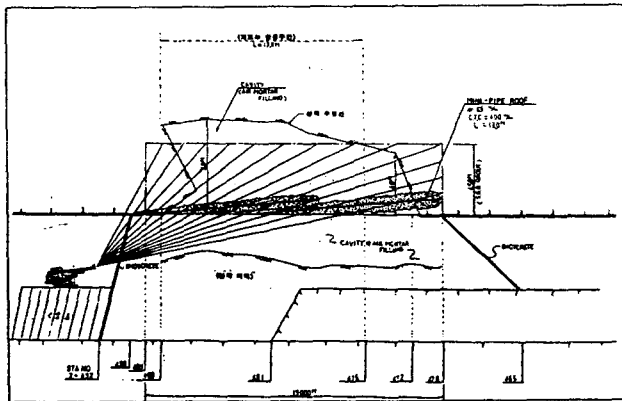


그림-7 지반보강 종단면도

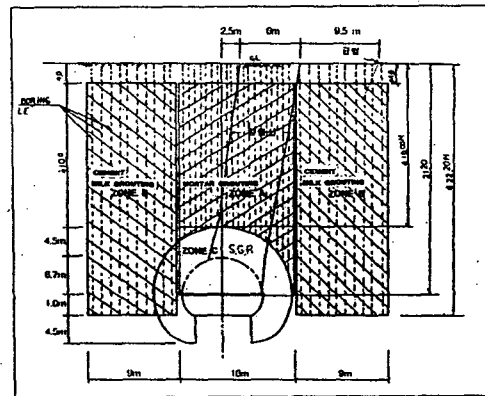


그림-8 지반보강 횡단면도

5.2 지상부 보강

지상부 보강은 3개 구간(A, B, C Zone)으로 지상부함몰 위치를 기준으로하여 구분 시공하는 것으로 계획하였다.

구간별 적용공법에 있어서 Zone A는 MORTAR GROUTING, Zone B는 시멘트밀크 주입공법으로 계획하였다. 지상부 보강도는 그림-9, 10과 같다.

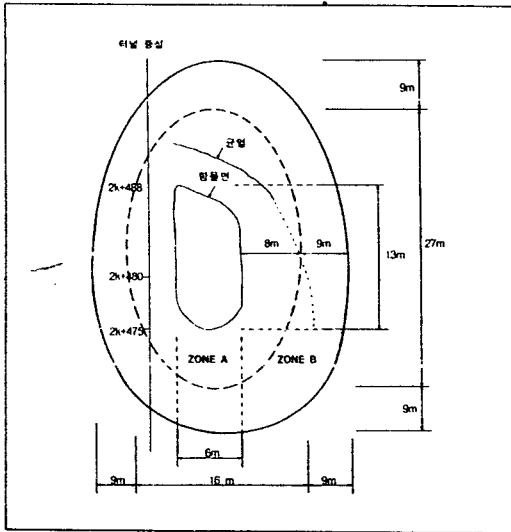


그림-9 지상부 보강범위

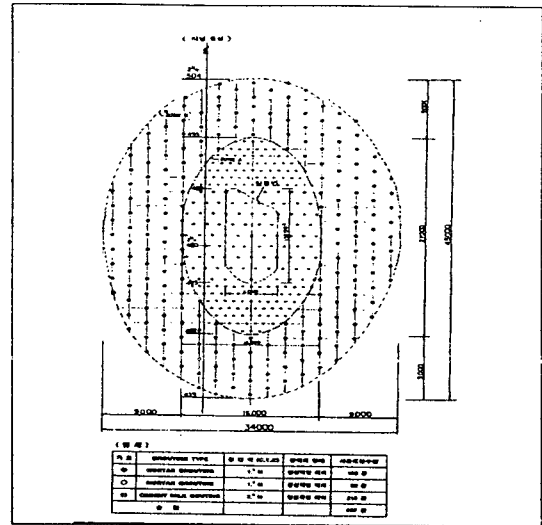


그림-10 지상부 보강그라우팅 평면도

지상부의 그라우팅 공간격은 1.0~2.0m의 정삼각형 배치를 하는 것으로 계획하였다.

5.3 갱내보강

5.3.1 S.G.R공법

갱내보강은 터널굴착이 완료된 구간과 미굴착 구간의 붕락에 따른 이완예상 범위의 보강구간으로 구분하여 보강하는 것으로 계획하였다.

- 미굴착구간의 보강은 그림-11, 12와 같이 수평선진 PRE-GROUTING TYPE으로 시공하였으며
- 터널굴착이 완료된 구간은 그림-13과 같이 경사천공 주입하였다.

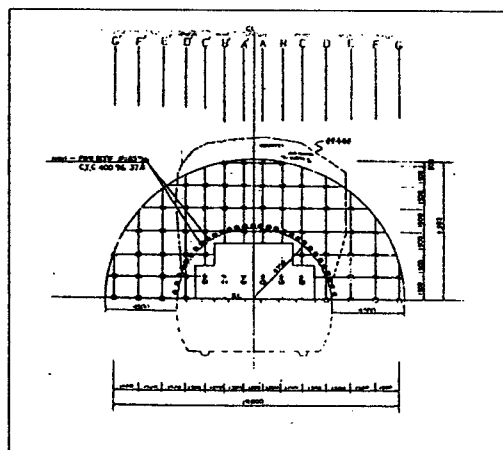


그림-11 미굴착구간의 S.G.R단면도

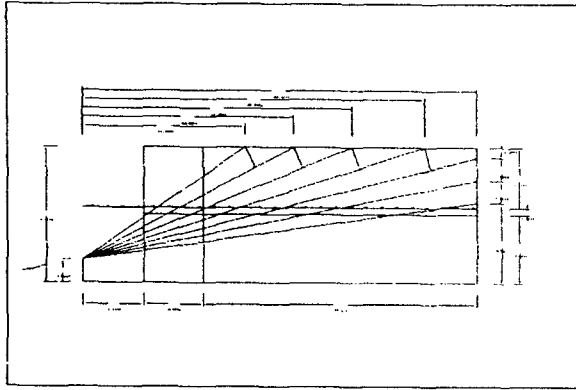


그림-12 미굴착구간의 S.G.R중단면도

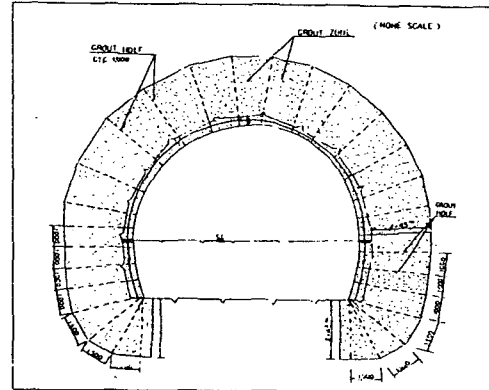


그림-13 터널굴착구간의 S.G.R단면도

5.3.2 강관보강형 다단그라우팅

붕락구간에 있어서 이완된 상부 지반의 하중이 집중되는 것을 경감 및 분산시키기 위하여 터널주변 공간격(C.T.C) 0.5m 강관규격은 $\phi 50\text{m/m}$ 의 백관을 사용하여 1SPAN의 길이를 12.0m로 시공하였다.

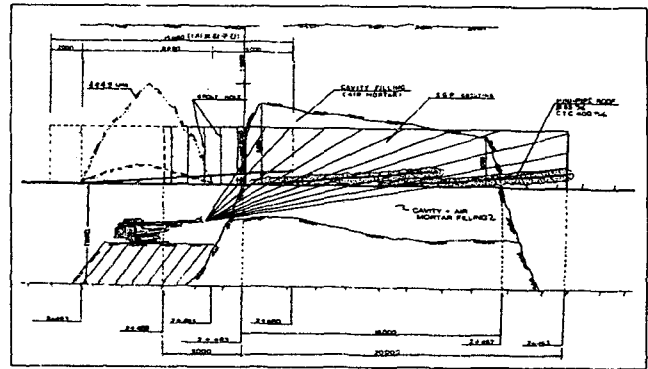


그림-14 강관보강형 다단그라우팅 단면도

6. 수치해석에 의한 보강효과 검토

본수치 해석에서는 비선형 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 사용하여 보강된 터널의 효과에 대하여 검토하였다.

6.1 해석위치의 선정

보강후의 해석단면은 붕락이 발생한 STA2+479 위치의 단면 TYPE IV에 대해서 실시하였다.

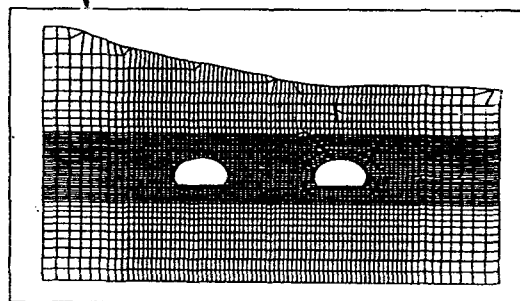


그림-15 보강단면의 요소망(TYPE IV)

6.2 해석방법

해석대상에 대해 시공단계별 거동을 해석하기 위하여 시공순서와 이에 따른 하중분담률을 고려하여

해석단계를 결정하였으며, 상부반단면과 하부반단면 각각 3단계 총 6단계의 굴착순서에 따른 암반주위의 응력변화나 변위진행의 영향을 고려하였다.

본해석에서 하중조건은 상부굴착시까지 100% 하중이 재하된 뒤 굴착부 주변의 구조체가 충분히 안정을 되찾은 후부터 다시 하부굴착에 의한 하중이 재하되는 것으로 해석하였다.

6.3 해석결과

보강을 실시한 후 상부반단면 굴착 후 하중이 100% 이완된 상태인 3단계와 하부반단면 굴착 후 하중이 100% 이완된 상태인 3단계로 총 6단계까지 해석을 실시한 결과 Rock Bolt의 최대축력은 29번 부재의 60,728.91kpa로서 허용인장력인 150,000kpa를 넘지 않으며 Shotcrete의 경우 최대 휨응력은 24번 요소의 1,441.25 kpa를 넘지 않아 안전축임을 알 수 있다.

표-5 단면의 지반물성

| 대상 지반물성 | 천매암 | | 풍화토 | | 교란층 | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 보강전 | 보강후 | 보강전 | 보강후 | 보강전 | 보강후 |
| 단성계수 | 721474 | 937916 | 216442 | 281374 | 480601 | 624651 |
| 점착력 (kpa) | 100 | 130 | 3 | 15 | 38 | 80 |
| 마찰각 (°) | 30 | 32 | 20 | 25 | 22 | 27 |
| 인장강도 (kpa) | 25 | 30 | 0.6 | 4 | 8 | 13 |
| 밀도 (ton/m ³) | 2.1 | 2.14 | 1.9 | 1.94 | 2.0 | 2.04 |

표-6 SHOTCRETE의 응력

| 부재력 요소번호 | 휨응력 (kpa) | 허용휨응력 (kpa) | 전단응력 (kpa) | 허용전단응력 (kpa) |
|-------------|--------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|
| 1 | 29.79 | 0.4 · σ _{ck} = 9600 | 0.28 | 0.25√σ _{ck} = 38.73 |
| 2 | 41.93 | | -0.30 | |
| 3 | 57.82 | | 0.13 | |
| 4 | 66.03 | | 0.61 | |
| 5 | 89.53 | | 0.15 | |
| 6 | 99.95 | | 0.09 | |
| 7 | 106.13 | | -2.33 | |
| 8 | 74.16 | | 1.15 | |
| 9 | 59.76 | | -0.02 | |
| 10 | 78.55 | | -1.71 | |
| 11 | 6.53 | | 1.91 | |
| 12 | 9.17 | | -1.63 | |
| 13 | -403.69 | | 29.35 | |
| 14 | 51.24 | | -11.50 | |
| 15 | 665.44 | | -30.26 | |
| 16 | -75.16 | | 32.70 | |
| 17 | 354.18 | | -23.08 | |
| 18 | 387.67 | | 6.24 | |
| 19 | 661.55 | | -12.09 | |
| 20 | 704.78 | | 4.62 | |
| 21 | 617.99 | | 6.52 | |
| 22 | 651.06 | | 4.83 | |
| 23 | 1246.51 | | -14.90 | |
| 24 | 1441.25 | | -5.27 | |
| 25 | 1243.75 | | 5.47 | |
| 26 | 571.64 | | 20.70 | |
| 27 | 699.42 | | -19.35 | |
| 28 | 709.74 | | -0.91 | |
| 29 | 474.93 | | 4.79 | |
| 30 | 454.94 | | -3.43 | |
| 31 | -70.72 | | 24.76 | |
| 32 | 331.62 | | -29.72 | |
| 33 | 132.54 | | 25.64 | |
| 34 | -4.07 | | 4.54 | |
| 35 | 216.98 | | -23.58 | |

표-7 Rock Bolt의 축력 및 응력

| 부재력 요소번호 | 축방향력 (kN) | 인장응력 (kpa) | 허용인장응력 (kpa) |
|-------------|--------------|---------------|---------------------------------|
| 1 | 0.24 | 482.00 | 0.5 · σ _y = 15000 |
| 2 | 0.22 | 443.09 | |
| 3 | 0.12 | 251.39 | |
| 4 | 0.07 | 135.68 | |
| 5 | 0.09 | 177.46 | |
| 6 | 0.07 | 151.43 | |
| 7 | 0.13 | 272.98 | |
| 8 | 0.15 | 310.88 | |
| 9 | 27.60 | 56226.70 | |
| 10 | 20.56 | 41884.82 | |
| 11 | 13.66 | 27828.14 | |
| 12 | 9.95 | 20278.28 | |
| 13 | 6.71 | 13661.46 | |
| 14 | 4.62 | 9405.75 | |
| 15 | 4.32 | 8804.78 | |
| 16 | 3.30 | 6730.91 | |
| 17 | 2.64 | 5370.06 | |
| 18 | 2.79 | 5687.86 | |
| 19 | 2.18 | 4434.98 | |
| 20 | 1.95 | 3962.35 | |
| 21 | 1.66 | 3377.68 | |
| 22 | 2.97 | 6046.41 | |
| 23 | 3.18 | 6478.29 | |
| 24 | 4.20 | 8548.09 | |
| 25 | 4.95 | 10084.14 | |
| 26 | 8.08 | 16458.53 | |
| 27 | 12.69 | 25852.06 | |
| 28 | 20.82 | 42414.49 | |
| 29 | 29.81 | 60728.91 | |

7. 보강효과 판정

터널 봉락구간의 지반보강 목적으로 시멘트모르타 주입, 시멘트밀크주입, S.G.R, 강관보강형 다단그라우팅 공법을 시행한 후 보강효과를 검토하기 위하여 CORE 채취방법, 현장투수시험, 천단 및 내공변위 계측을 실시하였다.

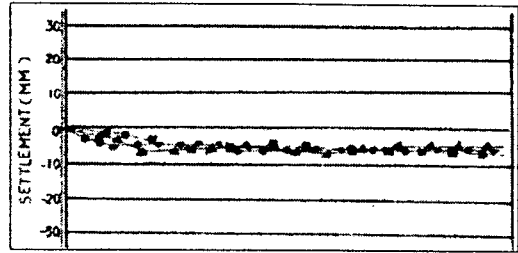


그림-16 지보재의 요소번호

7.1 CORE 채취방법

봉락 함몰부의 시멘트밀크 완료후 7일이 경과한 다음 2개소에 CORE를 채취한 결과 T.C.R(%)은 85, R.Q.D(%)는 약60%의 수치를 나타내었다.

7.2 현장투수시험

현장투수시험은 FALLING HEAD TEST 방법으로 봉락구간에 대해서 실시하였으며, 보강전에는 시험수량이 100% 누수되어 시험이 불가능한 상태였으나 보강후의 투수계수치는 $K=7.139 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 나타났다.

7.3 터널의 천단침하 계측결과

지반보강후 굴착작업과 병행하여 3개소에 대한 굴착단계별 천단침하의 최대치는 1~6mm 정도로 매우안정적으로 나타났다. 계측결과는 그림-17과 같다.

8. 결론

본연구는 풍화성 천매암(Phyllite)으로서 균열 및 파쇄가 심한지반에서 터널굴착 작업중 터널 천단부의 봉락에 따른 지표면 함몰현상이 발생되어 지반보강 목적으로 MORTA GROUTING, CEMENT MILK GROUTING, S.G.R GROUTING, 강관보강형 다단그라우팅 공법을 조합하여 시공하고 그개량 효과를 검토한 것으로서 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

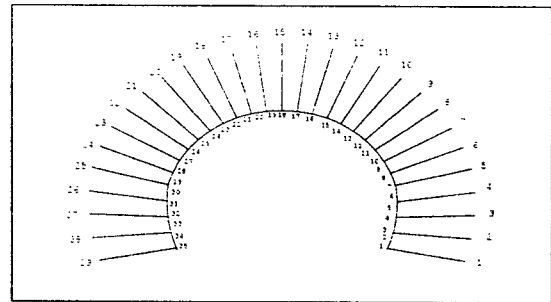


그림 - 17 천단침하 계측결과

(1) 보강지반에 대한 안정해석결과 ROCK BOLT, SHOTCRETE의 응력이 허용범위내로 안정적으로 나타났다.

(2) 보강지반에 대한 CORE 채취결과 T.C.R(%) 85%, R.Q.D(%) 60%, 현장투수계수치는 $K=7.139 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 봉락에 따른 이완지반이 안정화 된 것으로 확인되었다.

(3) 터널굴착에 따른 지하수의 유출현상도 발견되지 않았으며 굴착과 함께 병행된 천단침하 및 내공변위 계측결과에 의하면 지반 및 터널의 거동은 수mm 내외로 매우안정적임을 알수 있으며 터널단면의 부가응력이 안정화 되었기 때문인 것으로 사료된다.

이상과 같이 계측결과로 미루어 볼때 지반보강 효과는 매우우수함을 알수 있다.

9. 참고문헌

1. 千炳植(1995) “地盤注入工法” 圓技術 PP. 347~355
2. (주)지오택엔지니어링(1994) “강관보강형 다단그라우팅 공법의 개발”, 한국건설 기술연구원, 94연구 보고서 PP. 9~14
3. 한국도로공사(1992) “도로 설계요령 제4권” PP. 17~31
4. 韓國 S.G.R工法協會(1984) “S.G.R공법 技術資料”
5. 홍성완, 배규진, 조찬환, 정하익, 지하굴착 보조공법의 설계와 시공에 관한 연구-주입공법과 Pipe Roof 공법을 중심으로, 연구보고서, 건기연 86-GE-2, 한국건설기술연구원, 1986(6) 배규진, 구호본, 홍성완, 유영현, 이봉열, 원경식, “Umbrella 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 변위연구”, 한국지반공학회 94년 가을 학술발표회 논문집, 1994
6. 정형식 등, 지하철 5호선 5-14공구 터널 사고원인 및 복구대책 연구용역 보고서, 대한토목학회, 1992
7. 김상규 등, 345KV 당인리-중계펌프장간 저중 T/L 전력구 건설공사 붕락지역 사고원인 및 보강방안 연구 검토보고서, 한국지반공학회, 1993