한국철도학회논문집
제12권 제1호 2009년 ▌pp. 31-38

# 수치해석에 의한 암반특성의 변화가 터널에 미치는 영향

# Effect of the Rock Characteristics Condition on the Behavior of Tunnel by Numerical Analysis

권순섭† · 박태순* · 이종선** · 이준우**
Soon-Sup Kwon · Tae-Soon Park · Jong-Sun Lee · Jun-Woo Lee

**Abstract** The selection of the support system is an important design parameter in design and construction of the tunnel using the new Australian tunnel method. It is a common practice to select the support based on the rock mass grade, in which the rock mass is classified into five rock groups. The method is applicable if the characteristics of the rock mass are uniform in the direction of tunnel excavation. However, such case is seldom encountered in practice and not applicable when the properties vary along the longitudinal direction. This study performs comprehensive three dimensional finite difference analyses to investigate the ground deformation pattern for cases in which the rock mass properties change in the direction of the tunnel axis. The numerically calculated displacements at the tunnel crown show that the displacement is highly dependent on the stiffness contrast of the rock masses. The results strongly indicate the need to select the support type 0.5~1.0D before the rock mass boundary. The paper proposes a new guideline for selecting the support type based the results of the analyses.

***Keywords*** : support system, rock mass grade, longitudinal direction, rock mass boundary

**요 지** 국내에서 터널 설계시 암반의 물리적, 역학적 특성에 따라서 5~6개의 암반등급으로 분류한 후 터널의 용도 및 특성을 고려하여 지보시스템을 결정하게 된다. 그러나 이와 같은 방법은 암반의 특성이 균일하다는 가정을 하고 있으며 암반특성이 종방향으로 변화될 경우 이에 대한 지보시스템의 결정이 달라져야 한다. 본 연구는 3차원 수치해석 프로그램(FLAC3D)을 이용하여 NATM 터널시공시 암반특성의 종방향 변화가 암반분류 및 지보시스템 결정에 미치는 영향을 파악하고자 총 14Case를 현장의 시공순서를 고려한 해석을 수행하였다. 암반특성의 종방향 변화시 전·후방 암반의 강성차이가 작은 경우에는 암반경계를 기준으로 0.5D내외, 강성차이가 큰 경우에는 1.0D 내외의 범위에서 유리한 암반등급의 거동과는 다르므로 암반특성에 따라서 암반경계층을 기준으로 0.5D~1.0D구간을 안전측(보수적)으로 평가하여 설계에 반영하거나, 지보패턴을 하향조정하는 것이 시공성, 작업효율성, 공사기간 등의 측면에서 효과적일 것으로 판단된다.

**주 요 어** : 암반등급, 지보시스템, 종방향, 암반경계

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

국내에 NATM공법이 도입된 시기는 서울지하철 2호선 건설과 그 시기를 같이 한다. 한국은 국토의 65%가 산악지형으로 되어 있어 철도, 고속도로, 간선도로 등을 건설하기 위해서는 터널이 필수적이기 때문에, 전세계적으로 터널 및 지하공간 공사를 가장 많이 수행하는 나라임에 틀림없다. 따라서 터널의 안정적인 설계 및 시공을 위해서는 설계단계에서 다양한 조건을 고려한 암반분류와 안정적인 지보패턴의 결정이 필수적이다.

Terzaghi[1]는 암반하중 산정방법을 제시하였고, 그 이후 Deere 등[2], Wickham 등[3], Bieniawski[4] 및 Barton 등[5, 6]이 암반분류 방법을 제시하였으며, Karloy[7], Rose 등[8]은 암반하중을 산정하는 여러방법을 비교하여 분류방법에 따른 암반하중을 예측하고자 하였다.

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원, 박사과정
E-mail : 20064885@namkwang.co.kr
TEL : (02)3011-0135 FAX : (02)3011-0469
* 정회원, 서울산업대학교, 토목공학과, 교수
** 남광토건(주), 토목사업본부, 기술영업팀

국내의 터널 설계시 해당과업 구간에 대한 사전조사, 현지조사, 실내시험, 현장시험 등을 통하여 산출된 암반의 물리적, 역학적 특성을 Q-system, RMR 분류기준에 근거하여 5~6개의 암반등급으로 분류한 후, 관련된 기관에서 터널의 용도 및 특성을 고려하여 제시한 표준지보패턴을 각각의 암반등급에 적용하여 지보재 시스템을 결정하는 것이 일반적이다. 그러나, 이러한 암반의 특성만을 근거로 암반분류와 지보패턴을 획일적으로 결정하게 되면 다음과 같은 문제점이 발생될 수 있다.

국내 산악터널의 경우 Fig. 1과 같이 암반특성이 종방향(터널굴착 방향)으로 변하는 경우가 종종 발생되는데(산악터널에서 갱구부에 터널중심으로 혹은 터널중심에서 갱구부로 굴진되면서 암반등급이 변화되는 경우), 이러한 경우에도 인접해 있는 불리한 암반 굴착시 발생되는 아칭효과(응력전이)로 인하여 유리한 암반에 존재하는 터널의 변위 및 지보재에 응력이 추가적으로 발생될 수 있는 여지가 있어서 암반경계부 시공시 안전사고의 위험을 항상 내포하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 암반특성(암반경계)이 종방향으로 변화하는 경우 암반분류에 미치는 영향을 수치해석적으로 파악하고자 한다.

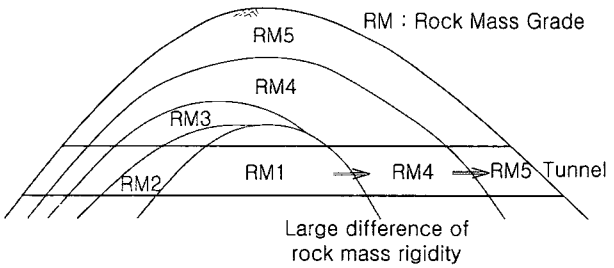



**Fig. 1.** Longitudinal change of rock condition

## 2. 해석 조건 및 고찰

### 2.1 지반 물성치

지반 물성치는 수치해석 결과에 가장 큰 영향을 미치는 영향인자로써 물성치 결정에 신중을 기하고자 주암종이 안산암이면서 국내에서 턴키방식으로 설계된 6건을 선정하였다[9-14].

안산암은 화성암의 일종으로 산악터널이 많은 경상도 지역에 많이 분포되어 있는 암종으로써, 물리적 역학적 특성을 분석하기 위하여 다양한 시험(사전조사, 현장조사, 실내시험, 현장시험, 물리탐사 등)에 의해서 얻어진 결과를 적용하였으며, 6건의 설계 프로젝트에서 평가된 암반등급별 물성치의 최대치 및 최소치를 제외한 평균값을 보수적으로 적용하였다(Table 1).

**Table 1.** Properties having been applied to numerical analysis

| 암반등급 | 단위중량 ($t/m^3$) | 변형계수 (MPa) | 프와송비 | 점착력 (kPa) | 내부 마찰각(°) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.70 | 1.95E4 | 0.20 | 6.7E3 | 47 |
| 2 | 2.60 | 9.70E3 | 0.22 | 3.8E3 | 44 |
| 3 | 2.50 | 5.40E3 | 0.25 | 1.7E3 | 40 |
| 4 | 2.30 | 1.40E3 | 0.28 | 5.0E2 | 34 |
| 5 | 2.00 | 3.30E2 | 0.30 | 1.4E2 | 30 |

### 2.2 단면 및 지보패턴

터널단면은 경부고속철도 2단계 구간중 제13-3공구의 원효터널에 적용된 것으로 굴착단면적 89.815$m^2$, 폭 11.126m, 높이 8.420m로써 유효직경(D)이 약 10m인 단면을 적용하였으며(Fig. 2), 지보패턴은 국내터널에서 가장 많이 적용되는 표준지보패턴을 선정하였다(Table 2).

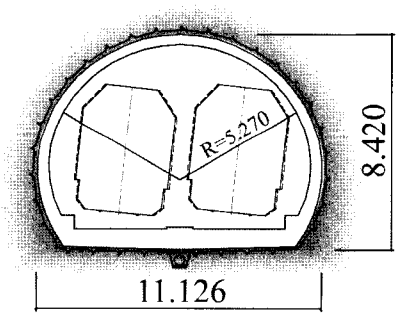



**Fig. 2.** Typical section of tunnel

NATM의 경우 숏크리트 및 록볼트가 영구지보재 개념으로 적용되고 라이닝의 경우 안전율을 증대시켜주는 부수적인 지보재로 정의하고 있으며[15], 시공중에는 숏크리트 및 록볼트만으로 지지하여야 하므로 라이닝에 대한 영향을 배제하여 모델링 하였으며, 지보패턴 1에서는 현장상황에 따라 록볼트 설치 유무가 결정되는 랜덤(Random) 타입으로써 수치해석시에는 배제하였으며, Fore-Polling의 경우도 필요시에만 적용되므로 고려하지 않았다.

또한, 굴착직후에 설치된 숏크리트는 양생기간을 거쳐서 서서히 강성상태로 굳어지면서 지반과 일체화가 되는 것을 반영하고자 연성 숏크리트(초기 설치~양생기간 7일) 및 강성 숏크리트(7일 이후) 2가지로 분류하여 단계별 해석에 반영하였다[16].

**Table 2.** Support pattern

| 구분 | | 지보패턴 1 | 지보패턴 2 | 지보패턴 3 | 지보패턴 4 | 지보패턴 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 굴착 방식 | | 전단면 | 전단면 | 전단면 | 상·하 분할 | 상·하 분할 |
| 굴진장 | 상반 | 3.5m | 3.5m | 2.0m | 1.5m | 1.2m |
| | 하반 | | | | 3.0m | 1.2m |
| 벤치장 | | - | - | - | 20m | 20m |
| 숏크리트 두께 | | 5cm | 5cm | 8cm | 12cm | 16cm |
| 록볼트 | 길이 | 3.0m | 3.0m | 4.0m | 4.0m | 4.0m |
| | 종방향 간격 | Random | 3.5m | 2.0m | 1.5m | 1.2m |
| | 횡방향 간격 | Random | 2.0m | 1.5m | 1.5m | 1.5m |

## 2.3 해석영역에 대한 고찰

해석영역에 대한 범위는 터널설계기준[17]에서 다음과 같이 제안하였다. 해석모델은 단계별 굴착의 영향이 포함되도록 하되 터널 측면은 경계요소, 무한요소 등의 탄성경계조건을 부여하는 경우를 제외하고는 터널굴착폭의 3배 이상, 하부는 터널높이의 2배 이상, 상부는 지표까지를 모델화 시키는 것을 표준으로 한다. 단, 상부토피가 매우 큰 경우에는 상부지반조건의 영향이 포함될 수 있는 별도의 모델을 적용할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 측면의 해석범위는 터널유효 직경(D)의 4.5D, 상부로는 지표면까지, 하부로는 3D까지를 모델링하였다.

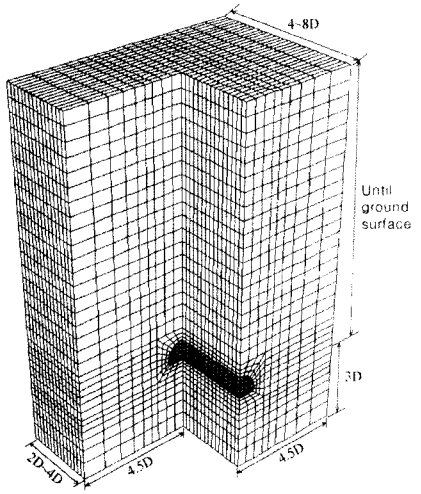



**Fig. 3.** Range of Analyses scope

그러나, 3차원 해석시 종방향에 대한 해석영역의 제안이 없어서 정확도와 신뢰성을 확보하기 위하여 천단침하를 측정하고자 하는 지점을 기준으로 전·후방으로 2D, 3D, 4D까지 확장하여 예비해석을 실시하였다(Fig. 3).

해석결과에 의하면 3가지 조건에서의 터널 천단부의 침하형상은 유사한 형태를 보이면서 어떠한 값에 수렴되면서 안정화 되고 있음을 볼 수 있었으며, 3D 이상에서는 천단부 침하형상 및 안정화에 큰 영향을 미치지 않아서, 전·후방으로 3D까지(전체적으로는 6D)를 종방향에 대한 해석영역으로 선정하였다.

## 2.4 해석순서에 대한 고찰

해석순서는 암반등급에 해당되는 지보패턴을 선정하여 실제 시공과정과 유사하게 굴착 다음단계에서 연성숏크리트 및 록볼트 설치하고, 7일(단계)간의 양생과정 후 강성숏크리트로 변화하도록 하였으며(Table 3), 인버트 부분을 제외하고 지보재를 설치하였다.

**Table 3.** Hardness according to the changing of shotcrete

| 구 분 | 변형계수(MPa) | 비 고 |
|---|---|---|
| 연성 숏크리트 | 5.0E3 | 연성숏크리트 설치 후 7단계 경과 후 강성으로 변형계수 변화 |
| 강성 숏크리트 | 1.50E4 | |

## 2.5 측압계수에 관한 고찰

Hoek and Brown[18]에 의해 현지암반응력(in-situ stress)의 중요성을 언급한 이후, Timoshenko[19]가 암반공학 또는 지반공학에 현지암반응력이 사용된 배경을 설명하였고, Goodman[20]는 지형학적 또는 구조지질학적 영향을 받는 조건에서는 인근지역에서라도 상당히 차이가 나는 것으로 보고하였다.

또한, 수압파쇄에 의해 측정된 초기응력 값을 설계에 적용함에 있어서 반드시 구조지질학적 조사결과와 결부시켜 분석하는 것이 세계적이 추세이므로[21], 수압파쇄시험, AE(Acoustic Emission), DRA(Deformation Rate Analysis)

시험 등에 의해 실시된 결과를 상호 분석하여 다음과 같이 산정하였다(Table 4).

### 2.6 기타 사항

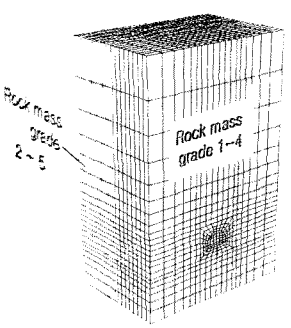
본 연구에 적용된 FLAC3D(Itasca, 2002)의 Mohr-Coulomb 파괴기준은 전단파괴와 인장파괴 기능을 같이 사용하고 있으며, 초기응력에 대한 해석을 수행한 후, 변위를 모두 초기화하였으며, Shotcrete는 Shell요소, Rockbolt는 Cable요소를 적용하여 모델링 하였고, Unblance force는 0.1%로 설정하여 정확성을 높였다.

**Table 4.** Ko having been applied to analyses

| 심도 | $K_o$ | 비고 |
|---|---|---|
| 0~50m | 2.1 | 56.9m의 DRA결과 적용 |
| 50~100m | 1.9 | 62.8~108.1m의 시험결과 적용<br>(수압파쇄, AE, DRA 결과) |
| 100m 이상 | 1.7 | 170.42~179.0m의 시험결과 적용 |

터널 시공중 유리한 암반에서 상대적으로 불리한 암반으로 굴착이 진행될 경우 경계부 주변의 응력집중으로 인한 거동을 파악하고자 각각의 암반등급에서 전방에 유리한 암반, 후방에 불리한 암반을 모델링하여 총 14 Case를 수치해석으로 수행하였으며, 편의상 1&2(1 : 전방의 암반등급, 2 : 후방의 암반등급)와 같이 표기하고자 한다(Table 5).

**Table 5.** Longitudinal change of rock condition

| 전방의 암반등급 | 후방의 암반등급 | |
|---|---|---|
| 1 | 1, 2, 3, 4, 5 |  |
| 2 | 2, 3, 4, 5 | |
| 3 | 3, 4, 5 | |
| 4 | 4, 5 | |

## 3. 결과 분석

터널막장 전방에 불리한 암반이 존재할 경우에 이를 예측하기 위하여 수많은 방법들이 제안되었으나, 본 연구에서는 암반특성의 종방향적 변화에 대한 결과 분석을 위하여 터널막장 전방에 파쇄대 혹은 연약대를 추정하는 방법으로써, Schubert and Budil[23]가 제안한 영향선과 경향선의 개념을 도입하여 판단할 수 있었다. 여기서, 터널의 천단 침하량을 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 변위를 하나의 선으로 연결한 것으로써, 굴착단계마다 생성되는 선을 영향선(Influence Line)이라 하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리(본 연구에서는 굴진장으로 설정함)만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(Trend Line)이라고 정의하였다

암반 1등급이 전·후방에 동일하게 존재할 경우에는 터널의 굴착이 진행되면서 경향선의 기울기가 비교적 일정하다가 암반경계부 이후에는 거의 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그러나 후방에 암반 2, 3등급이 존재하는 경우에는 후방에 암반 1등급이 존재한 것과 비교할 때, 암반강성의 차이가 있기 때문에 경계부에 근접할수록 조금씩 변화가 커지고, 경향선이 어떠한 값에 수렴되는 시간도 증가됨을 알 수 있다(Fig. 4, 5). 또한, 후방에 암반 4, 5등급이 존재하는 경우에는 전방의 암반과 강성차이가 크기 때문에 경계부에 근접시 암반 2, 3등급이 존재하는 경우에 비해서 더 큰 변화를 보이고, 경향선이 수렴되는 시간(굴착단계)도 더 증가됨을 알 수 있다(Fig. 6, 7).

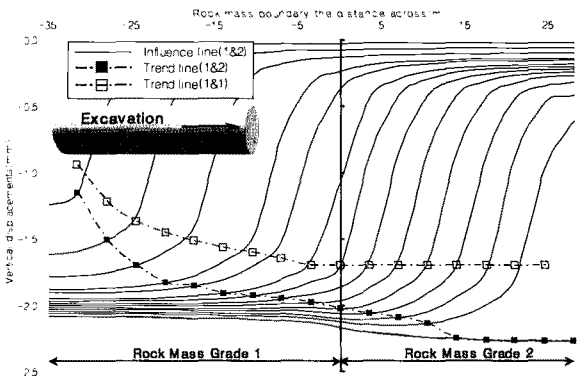



**Fig. 4.** Influence line and trend line in case of 1&2

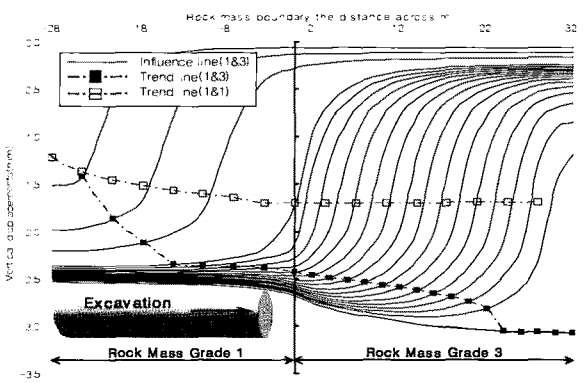



**Fig. 5.** Influence line and trend line in case of 1&3

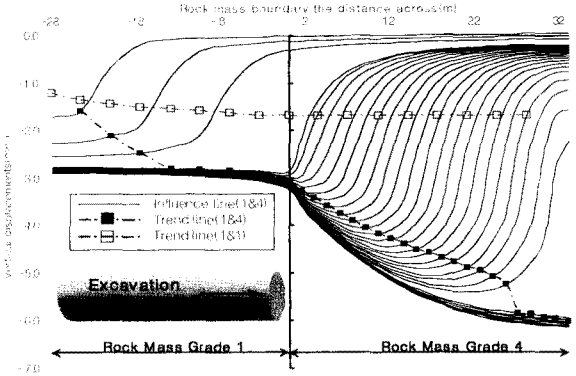



**Fig. 6.** Influence line and trend line in case of 1&4

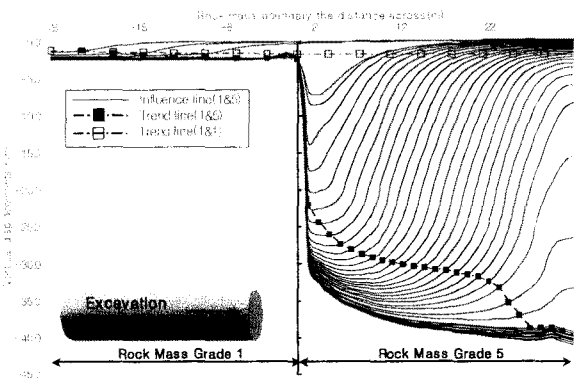



**Fig. 7.** Influence line and trend line in case of 1&5

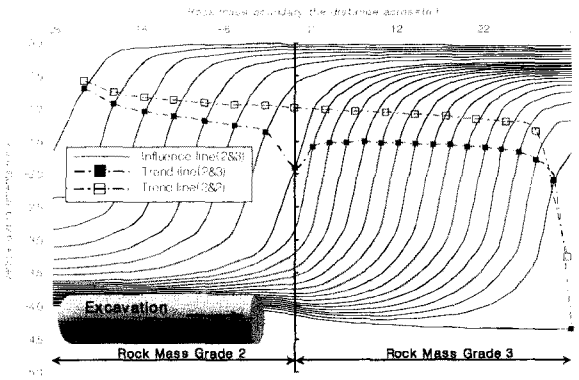



**Fig. 8.** Influence line and trend line in case of 2&3

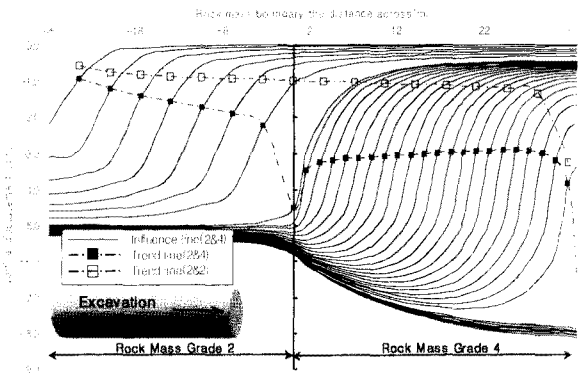



**Fig. 9.** Influence line and trend line in case of 2&4

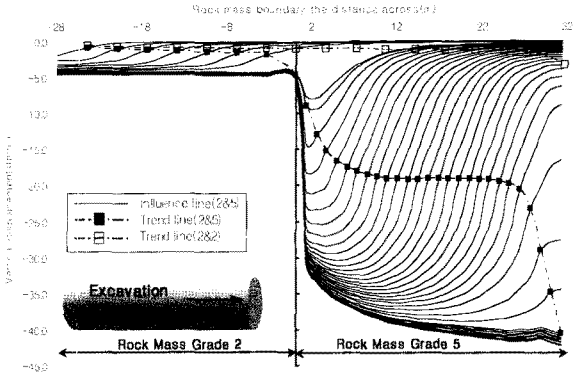



**Fig. 10.** Influence line and trend line in case of 2&5

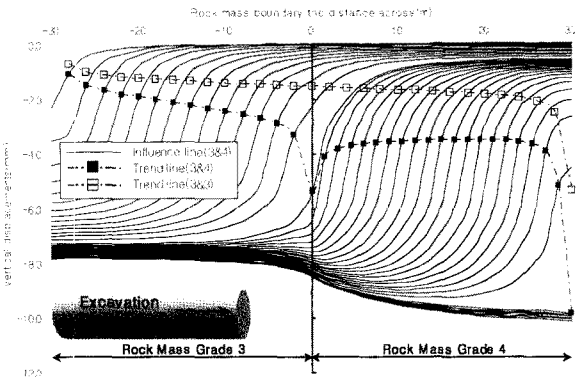



**Fig. 11.** Influence line and trend line in case of 3&4

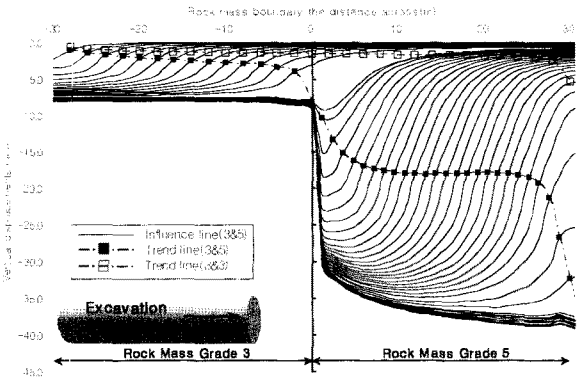



**Fig. 12.** Influence line and trend line in case of 3&5

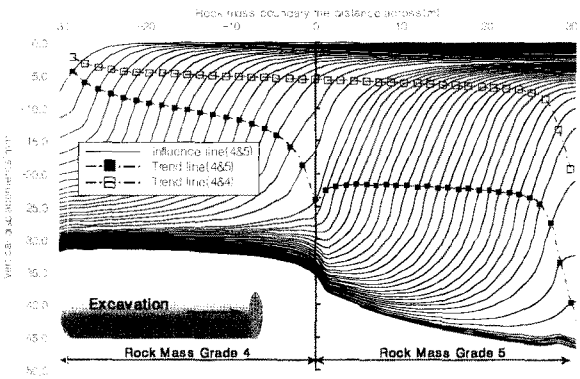



**Fig. 13.** Influence line and trend line in case of 4&5

암반 2등급이 전방에 존재하고 암반 3등급이 후방에 존재할 경우에는 경계부 전방 -7m에서 -3.5m로 진행되면서 -7m까지 발생된 변화율 보다 다소 커지기 시작하면서 경계부에서 약 140% 정도의 큰 변화를 볼 수 있었으며, 암반 4 등급의 경우는 약 200% 이상의 변화가 발생하였고, 암반 5등급의 경우는 -7m에서 -3.5m로 진행되면서 약 120%가 발생되고 경계부에서는 약 240% 이상의 아주 큰 변화가 나타났는데, 이는 전 · 후방 암반의 강성차이로 경계부에서 응력전이가 전방으로 발생되면서 전방에서 추가적인 변형이 발생되었기 때문으로 판단된다(Fig. 8~10). 또한, 전 · 후방에 암반 2등급이 존재하는 경우와 비교할 때, 경향선의 기울기가 암반경계부 부근에서 커진 것을 알 수 있다.

전방에 암반 3등급이 후방에 암반 4등급이 존재할 경우에는 경계부 전방 -6m에서 -4m로 진행되면서 -6m까지 발생된 변화율 보다 다소 커지기 시작하면서 전방 -2m지점에서 약 114%, 경계부에서 약 162%의 큰 변화를 볼 수 있었으며, 후방에 암반 5등급이 존재하는 경우에는 경계부에서 약 204% 이상의 아주 큰 변화가 나타났다(Fig. 11, 12). 또한, 전 · 후방에 암반 3등급이 존재하는 경우와 비교할 때, 경향선의 기울기가 암반경계부 부근에서 상당히 커진 것을 알 수 있다.

암반 4등급이 전방에 존재하고 암반 5등급이 후방에 존재할 경우에는 경계부 전방 -6m에서 -4.5m로 진행되면서 -6m까지 발생된 변화율 보다 다소 커지기 시작하면서 전방 -3m지점에서 약 112%, 경계부에서 약 130%의 큰 변화를 볼 수 있었다. 이는 전방에 존재하는 암반과 후방에 존재하는 암반의 강성차이가 상기의 조건보다 작기 때문에 응력전이의 크기가 상대적으로 감소되었기 때문으로 판단되며(Fig. 13), 전 · 후방에 암반 4등급이 존재하는 경우와 비교할 때, 경향선의 기울기가 암반경계부 부근에서 상당히 커진 것을 알 수 있다.

또한, 지반강성의 차이 때문에 상대적으로 강성이 작은 지반에서 강성이 큰 지반으로 응력이 전이되어, 경계부에서의 변위가 증가하여 singular point 처럼 보이는 것으로 판단됩니다.

Fig. 14~Fig. 17은 상기에서 언급한 아칭효과(응력전이) 현상을 판단하기 위하여 최대주응력을 해석단계별로 측정한 것으로써 응력전이가 가장 뚜렷하게 나타난 대표적인 것을 도시하였다.

암반경계부 방향으로 굴착함으로써 강성이 약한 암반에서 강성이 큰 암반(전방에 존재하는 암반)으로 응력이 전이되어 최대주응력이 커지고 있음을 알 수 있으며, 반대로 강성이 작은 암반(후방에 존재하는 암반)의 경우에는 굴착단계가 진행되면서 응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

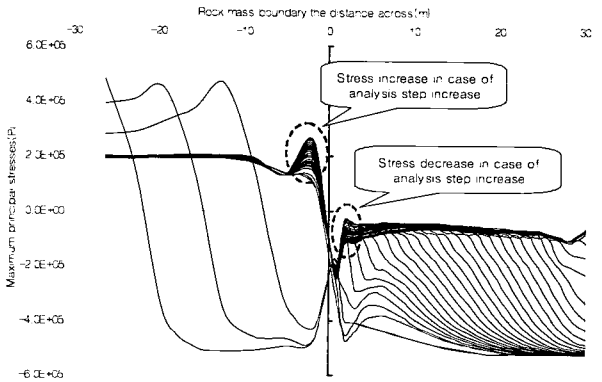



**Fig. 14.** Influence line of maximum principal stresses at crown in case of 1&5

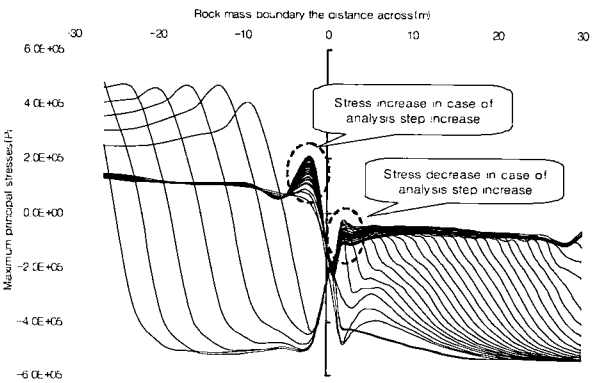



**Fig. 15.** Influence line of maximum principal stresses at crown in case of 2&5

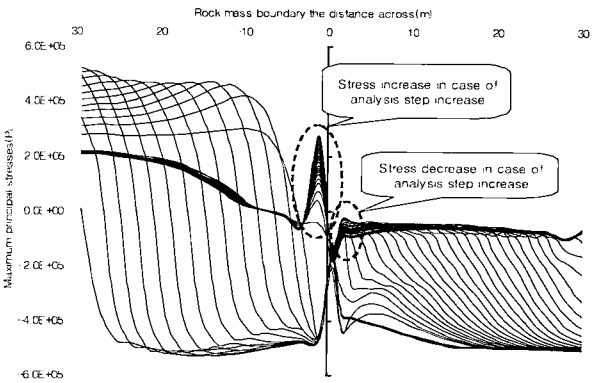



**Fig. 16.** Influence line of maximum principal stresses at crown in case of 3&5

아칭효과(응력전이)는 어느 특정한 상황에서만 볼 수 있는 것이 아니라, 상대적으로 강성의 차이가 있는 암반이 종방향으로 변화할 때 응력전이 차이의 크기가 많고 적음이 있을 뿐 항상 발생되는 것을 알 수 있었다.

또한, 암반경계부 굴착 후에는 불리한 암반 등급의 부분에서 변위벡터가 약 5배 넘게 증가하였고, 응력의 증가와 발생범위도 커졌으며, 유리한 암반등급에서는 추가적인 변위가 적게 발생되었으나, 해석단계가 증가하면서 응력전이 현상이 발생되어 변위가 증가하는 것을 Fig. 18에서 확인 할 수 있다.

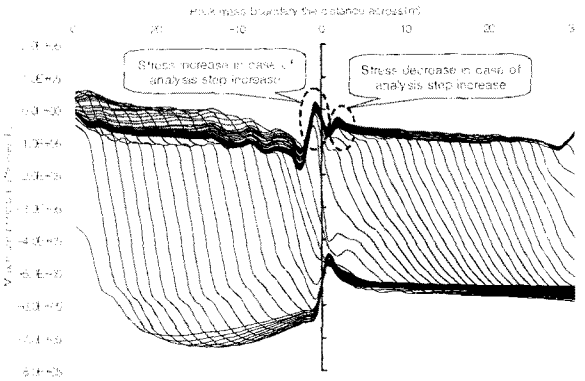
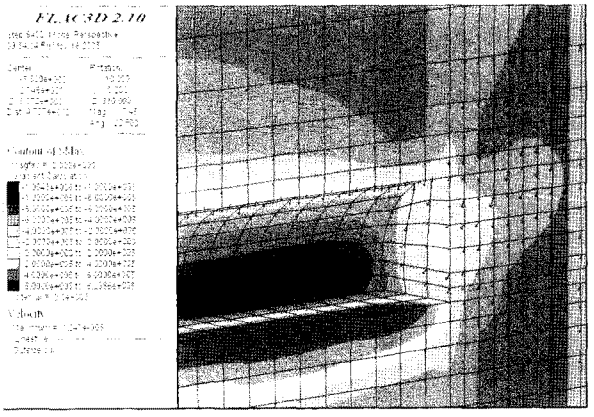
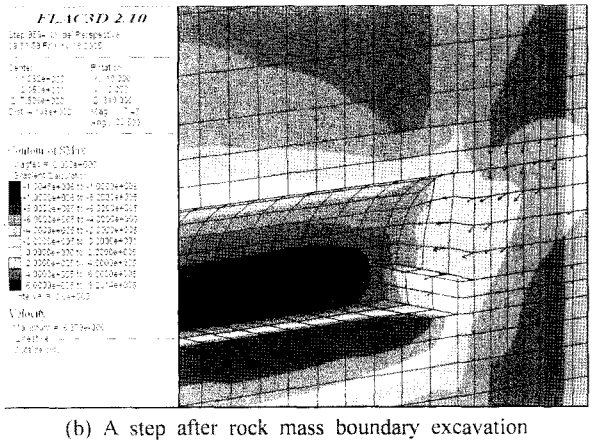



**Fig. 17.** Influence line of maximum principal stresses at crown in case of 4&5




(a) A step before rock mass boundary excavation




(b) A step after rock mass boundary excavation

**Fig. 18.** A displacement vector about steps before excavation of a rock mass boundary (step 15) and a step following rock mass boundary excavation (step 16) and the maximum principal stress in case of 3&5

## 4. 결 론

본 연구는 NATM 터널시공시 암반특성의 종방향 변화가 암반분류 및 지보시스템 결정에 미치는 영향을 파악하고자 3차원 수치해석 프로그램(FLAC3D)을 이용하여 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

암반특성의 종방향적 변화시 전·후방 암반의 강성차이가 작은 경우에는 암반경계층을 기준으로 0.3D 내외, 강성차이가 큰 경우에는 0.7D 내외의 범위에서 유리한 암반등급(전방의 암반등급)의 거동과는 다르므로 암반특성에 따라서 암반경계층을 기준으로 0.5D~1.0D 구간을 안전측(보수적)으로 평가하여 설계에 반영하거나, 지보패턴을 하향 조정하는 것(불리한 암반등급으로 평가)이 경제성, 시공성, 작업효율성, 공사기간 등의 측면에서 효과적일 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Terzaghi, K., 1946. Rock defects and loads on Tunnel supports. Proctor, R.V., White, T.L. Editor, Rock Tunneling with steel support. commercial shearing and stamping company, Youngstown, No.1, pp. 17-99.
2. Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., Cording, E. J., 1967. Design of surface and near surface construction in rock. Fairhurst editor, Failure and breakage of rock, Proc. 8th U.S symp., Rock mech. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, pp. 237-302.
3. Wickham, G.E., Tidedemann, H.R., Skinner, E.H., 1972. Support determination based on geologic predictions. Lane, K.S., Garfield, L.A. Editor, Proc. North American rapid excavation tunneling conf., Chicago, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, pp. 43-64.
4. Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classificationof jointed rock masses. Trans of South African Inst. of Civil Engineers, Vol. 15, No. 12, pp. 335-344.
5. Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1976. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
6. Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterizationand tunnel design. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 39, No. 2, pp. 185-216.
7. Karoly, S., 1973. The art of tunneling. Akademiaikiado Budapest, pp. 209-230.
8. Rose, D., Kaboli, P., Mayes, R., 1981. Influence of geologic logs and descriptions on tunnel designs and costs. AEG Newsletter, Assoc. of Engineers Geology, Vol. 24, No. 1, pp. 24-26.
9. 부산상수도사업본부(2002년), "수정산 터널 배수지 건설공사 설계보고서", pp. 27-34.
10. 부산지방국토관리청(2002년), "양산~동면 4차로 확장 공사 설계보고서", pp. 103-106.

11. 부산지방국토관리청(2003년), "남천~청도 1(곰티재) 국도공사 설계보고서", pp. 16-27.
12. 부산지방해양수산청(2003년), "부산신항만 배후철도 4공구 건설공사", pp. 31-35.
13. 한국고속철도공단(2002년), "경부고속철도 제14-2공구 노반신설공사 설계보고서", pp. 19-28.
14. 한국고속철도공단(2003년), "경부고속철도 제13-3공구 노반신설 공사 설계보고서", pp. 24-30.
15. Austrian National Committee of ITA, 1986. The defence of NATM(Communication). Tunnel & Tunnelling.
16. 대한콘크리트협회(KCI), 1999. 콘크리트 구조설계 기준, p. 276.
17. 대한터널협회(1999년), "터널설계기준", p. 42.
18. Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground Excavation in Rock. Institute of Mining and Metallurgy, London.
19. Timoshenko, S.P., 1983. History of Strength of Materials. Dover.
20. Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics. 2nd Edition, John Wiley & Sons, p. 562.
21. Haimson, B.C., Lee, M.Y., Feknous, N., Courval, P.D., 1996. Stress measurements at the site of the SM3 Hydroelectric Scheme near Septlles. Quebec, In: J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Abstract, Vol. 33, No. 5, pp. 487-497.
22. Itasca Consulting Group, 2002. FLAC3DTheory and Background. Ver. 2.1, Minneapolis, pp. 2-21-2-35.
23. Schubert, W,. Budil, A., 1995. The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation. Fujii editor, Proceedings of 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 1411-1444.

접수일(2008년 5월 27일), 수정일(2008년 9월 23일),
게재확정일(2009년 2월 16일)