

# 암반 등급 경계가 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

김겸연<sup>1</sup> · 정찬목<sup>2</sup> · 이용준<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 한국철도시설공단 호남본부 부장

<sup>2</sup>비회원, 우송대학교 철도토목시스템공학과 교수

<sup>3</sup>정회원, 단우기술단 지반공학부 상무

## A numerical study of the influence of rock mass classes boundary on tunnel stability

Gyeomyeon Kim<sup>1</sup> · Chanmook Jung<sup>2</sup> · Yongjun Lee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>General Manager, Honam Headquarters, Korea Rail Network Authority

<sup>2</sup>Professor, School of Railroad Civil System Engineering, Woosong University

<sup>3</sup>General Manager, Dept. of Geotechnical Engineering, DANWOO E&C

\*Corresponding Author : Yongjun Lee, [geoeng9@gmail.com](mailto:geoeng9@gmail.com)

### Abstract

When the tunnel is designed, the ground is classified into several grades and the corresponding support system is applied according to the support pattern table. However, a simple pattern application based on rock grade does not take into account the longitudinal stress transitions occurring at rock grade boundaries. In this study, three-dimensional numerical analysis was performed to estimate the stress change in the longitudinal rock grade change of NATM tunnel, and the influence zone of load transfer was investigated using the influence line and trend line. As a result, the downward change of rock grade in the direction of tunnel excavation occurs in the range of 0.35~0.7D from low-strength rock to high-strength rock around the grade change boundary. It is necessary to apply a downward pattern of about 1.0D to the safety direction in consideration of the influence range of 0.35D to 0.7D.

**Keywords:** Rock mass grade, rock mass classes boundary, influence line, trend line, longitudinal stress transition

### 초 록

터널 설계 시 조사를 통하여 지반을 여러 개의 등급으로 분류한 후 지보패턴표에 따라 해당 지보시스템을 적용하게 된다. 그러나 암반 등급을 기준으로 한 단순한 패턴 적용 방식은 암반 등급 경계부에서 발생하는 종방향 응력 전이를 고려하지 못한다. 본 연구는 NATM 터널의 종방향 암반 등급 변화부에서 응력 변화를 추정하기 위한 3차원 수치해석을 실시하였으며 Influence Line (영향선) 및 Trend Line (경향선)을 이용하여 하중

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
21(6)825-835(2019)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.825>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 10, 2019

Revised October 8, 2019

Accepted October 19, 2019



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

전이 영향권을 파악하고자 하였다. 연구 결과 터널 굴착방향으로 암반 등급이 하향 변화하면 등급변화 경계를 중심으로 강성이 약한 암반에서 강성이 큰 암반 방향으로 0.35~0.7D 범위에서 응력 전이가 발생하며 이를 고려하여 암반 등급의 종방향 하향 변화부에서는 연구결과의 0.35~0.7D 영향권을 감안하여 안전측으로 1.0D 정도의 하향패턴을 추가 적용하는 것이 필요하다.

**주요어:** 암반 등급, 등급 변화 경계, 영향선, 경향선, 응력 전이

## 1. 서론

일반적으로 NATM 공법의 터널 설계에서는 과업 구간에 대한 시추조사, 물리탐사, 현장시험, 실내시험 등의 지반조사를 통하여 획득한 암반 특성을 반영하여 Q-system 혹은 RMR 분류에 따라 여러 개의 암반 등급으로 분류한 후, 터널의 용도와 특성, 주변 현황을 고려하여 지보패턴을 설계하는 방식으로 지보 시스템을 선정한다. 이러한 설계 과정에서 터널 종방향으로 양호한 암반에서 상대적으로 불량한 암반 방향으로 굴착하는 경우에는, 굴착 시 발생하는 굴진 방향 응력 전이로 인하여 먼저 굴착된 양호한 암반으로 불량한 암반굴착으로 발생하는 응력이 추가 작용하여 암반 등급 경계부(패턴 변화부) 시공 시에는 주의가 필요하다. 설계에서는 이를 고려하여 경계부에서 안전측으로 패턴을 적용하고 있으나 이에 대한 구체적인 기준이나 연구사례는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 3차원 해석을 통하여 양호한 상태와 불량한 상태의 경계에서 불량한 방향으로 터널을 굴착할 경우에 경계에서 발생하는 변위와 재보재 응력 변화 영향을 파악하고 암반 등급의 차이에 따른 안전측 지보패턴 범위를 제시하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경 및 연구사례

터널을 굴착하면 막장면을 중심으로 터널 진행방향과 횡방향으로 굴착전 초기 응력이 전이되고, 남은 응력은 터널 주변으로 재분배된다. 재분배되는 응력은 막장면을 중심으로 선굴착 부분과 미굴착 부분 모두에 영향을 미치게 되는데 이러한 터널 진행방향으로의 응력 재분배를 종방향 아칭효과(Longitudinal Arching)라 하며 터널의 굴진면 주변에서 지반이 3차원적으로 거동하여 횡방향 뿐만 아니라 종방향으로도 하중 전이가 발생(Gnilsen, 1989)한다고 알려져 있다.

Lee et al. (1997)는 터널 막장 전방에 연약대가 존재할 경우 아칭효과에 의해서 터널 막장 바로 앞에는 응력과 천단부 수직변위가 증가하며, 이러한 아칭효과로 인한 터널 막장면의 축방향 변위를 분석하여 막장 전반의 연약대 존재 여부를 예측하였다.

Ham and Lee (2018)는 모형시험을 통해 전방 연약대의 두께 및 막장 이격거리에 따른 종방향 아칭효과 영향권을 분석하였으며 연약대 두께와 상관없이 막장과 이격거리가 0.25D부터는 지표침하가 급격하게 증가하고 연약대와 이격거리 1.0D 영역부터 종방향 아칭에 영향을 받는다고 분석하였다.

본 연구에서는 연약대와 만나면서 지반강성의 큰 차이를 보이는 경우 외에 일반적인 터널 설계에서 적용하고 있는 암반 등급 변화와 각 암반 등급에 맞는 지보패턴을 적용할 경우로 확장하여 종방향 아칭 영향권을 해석적으로 분석하고, 이를 고려한 암반 강성차가 발생하는 암반 등급 변화부에 대한 안전측 지보패턴 적용 범위를 제시하고자 하였다.

### 3. 해석조건

#### 3.1 암반 등급별 지반정수 선정

연구에 사용된 지반정수는 국내 대표 암종인 편마암으로, 호남지역에서 시행한 5건의 철도사업의 지반정수를 분석하여 사용하였다(Table 1) (Korea Rail Network Authority, 2003a, 2003b, 2010a, 2010b, 2010c).

**Table 1.** Proposed properties having been applied to numerical analysis

Rock mass classes	Unit density (kN/m <sup>3</sup> )	Deformation coeff. (MPa)	Poisson's ratio	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
1 (except)	26.49	1.95e4	0.20	6.7e3	47
2	25.51	9.70e4	0.22	3.8e3	44
3	24.53	5.40e3	0.25	1.7e3	40
4	22.56	1.40e3	0.28	5.0e2	34
5	19.62	3.30e2	0.30	1.4e2	30

#### 3.2 해석단면 및 표준지보패턴 선정

터널 형태는 철도설계기준에서 제시하고 있는 직선 구간의 복선터널 단면을 사용하였다. 굴착단면적은 약 83.44 m<sup>2</sup>이며 유효직경(D)이 약 10 m이다(Fig. 1). 암반 등급별 지보패턴은 국내 철도터널에서 일반적으로 사용되고 있는 5개 타입의 표준지보패턴을 암반 등급에 따라 적용하였다(Table 2).

국내에서 적용되고 있는 NATM공법의 경우 Shotcrete 및 Rockbolt가 영구적인 지보재로 계획되고 라이닝은 안전율을 추가하는 보조 지보재로 정의하고 있으며(ITA, 1986), 공사 중에는 Shotcrete 및 Rockbolt 만으로 지지해야 하기 때문에 Lining은 해석에서 제외하였다. 또한 Random Rockbolt로 계획된 Type-1의 경우는 예비검토에서 Rockbolt 유무에 따라 천단부 변위비교 분석에 영향을 주는 것으로 나타나 검토에서 제외하였다. 또한 굴착 후에 시공되는 Shotcrete는 일정 기간의 양생을 거쳐서 Hard Shotcrete로 변화하면서 지반응력을 분담하는 점을 고려하여 Soft Shotcrete와 Hard Shotcrete로 분리하여 반영하였다(Yoo and Park, 2003).

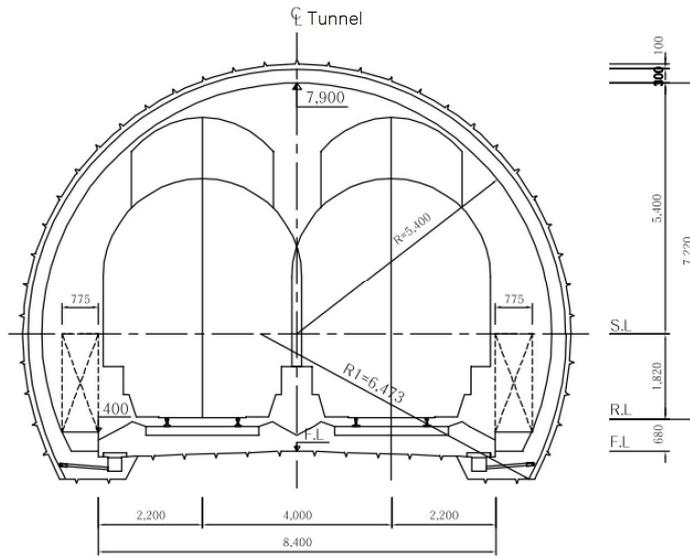


Fig. 1. Typical section of tunnel

Table 2. Support system for numerical analysis

Support type		Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5
Rock mass classes		1 (except)	2	3	4	5
RMR		More than 81	80~61	60~41	40~21	20 or below
Excavation method		Full-face	Full-face	Full-face	Partial-face	Partial-face
Advance length (m)	Upper half	3.5	3.5	2.0	1.5	1.2
	Lower half				3.0	1.2
Bench length (m)		-	-	-	20	20
Shotcrete thickness (mm)		50	50	80	120	160
System rock bolt (m)	Length	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0
	Long spacing	Random	3.5	2.0	1.5	1.2
	Width spacing	Random	2.0	1.5	1.5	1.5
Lining thickness (cm)		30	30	30	30	30
Ground improvement		-	-	-	In need	In need

### 3.3 수치해석 영역 선정

수치해석 영역은 측면으로 터널 유효직경(D)의 4.5D, 상부로는 4.0D, 하부로는 3.0D까지로 설정하여 터널 설계기준(KTA, 1999)의 해석을 위한 모델링 영역 설정과 동등 이상으로 확보하였다. 3차원 수치해석에서 종방향 해석 영역에 대한 기준은 별도로 없으나 경암에서 연암으로 굴진될 때의 천단부 종방향 변위값(L)과 연직방향 변

위값(C) 분석결과로 영향권 추정 시 -3.0D에서 2.0D정도로 볼 수 있어(Bang and Han, 2006) 막장면 전후로 최대 3.5D까지 설정하여 종방향 아칭작용에 영향을 배제하였다(Fig. 2).

암반 등급의 경계는 연직으로 형성되어 있으며 해석에서 지보패턴 변화부와 동일한 지점에 설정되도록 하였다.

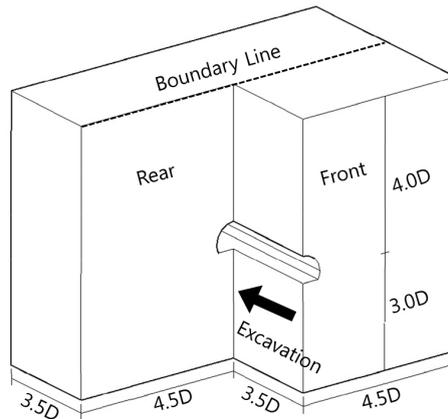


Fig. 2. Range of analyses scope

### 3.4 해석 순서

해석은 Table 2의 각 지보패턴에 따라 전단면 또는 상하 반단면 굴착을 반영하였으며 상하 반단면 굴착 조건인 4, 5번 Case는 20m의 벤치 길이를 적용하였다.

해석 순서는 조건별 수치해석 Case의 지보패턴 조합에 따라 굴착과 Shotcrete, Rockbolt 설치를 반복적으로 진행하여 시공과정을 모사하였다. 굴착은 양호한 암반 등급에서 시작하여 연직으로 형성된 암반경계를 통과 후 불량한 암반 등급 방향으로 진행되며 굴착 이후 각 단계마다 Soft Shotcrete 및 Rockbolt를 설치하고, 다음 단계 굴착 후 이전 단계의 Soft Shotcrete를 Hard Shotcrete로 특성을 변경하여 Shotcrete의 양생을 고려하였다.

본 연구에 적용된 FLAC3D (Itasca Consulting Group, 2002)의 Mohr-Coulomb 파괴기준은 전단파괴와 인장 파괴 기능을 같이 사용하고 있으며, 초기응력 수행 후 모든 절점의 변위를 초기화하였다. Shotcrete는 Shell 요소를, Rockbolt는 Cable요소를 적용하였고, Unbalance force는 0.1%로 동일하게 설정하였다. 각 단계별 굴진장의 중심에서 천단침하를 기록하여 분석에 활용하였다.

## 4. 조건별 수치해석 Case

강성이 큰 암반에서 상대적으로 강성이 약한 암반으로 터널 굴착이 진행될 경우 암반 등급 경계부에서의 응력 전이로 인한 터널의 거동 특성을 파악하기 위하여, 전체 영역을 전후방으로 나누고 전방에 강성이 큰 암반, 후방

에 강성이 상대적으로 약한 암반으로 모델링하여 9개 Case에 대한 수치해석을 수행하였으며, 해석 Case는 전방 암반 등급&후방 암반 등급으로 표기하였다(Table 3).

**Table 3.** Longitudinal change of rock condition

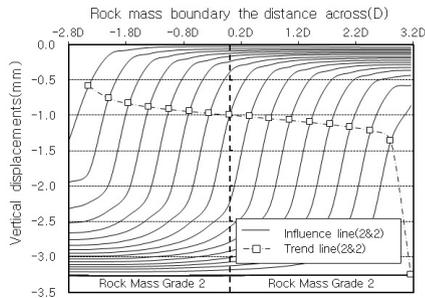
Analyses case	Front rock grade	Rear rock grade
2&2	2	2
2&3		3
2&4		4
2&5		5
3&3	3	3
3&4		4
3&5		5
4&4	4	4
4&5		5

## 5. 해석결과 및 분석

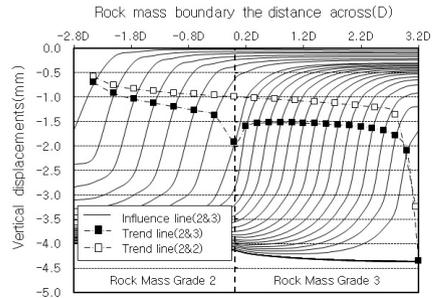
본 연구에서는 암반 등급의 종방향 변화에 의한 터널 안정성 영향 분석을 위해 터널 전방의 연약대 또는 파쇄대 등을 예측에 사용되는 영향선(Influence Line)과 경향선(Trend Line) (Schubert and Budil, 1997)을 활용하였다. 여기서, 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 천단변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선(Influence Line)이라 하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리(굴진장)만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(Trend Line)이라고 정의하였다.

2&3의 경우에는 경계부 전방 n-2막장(침하 -1.27 mm)에서 n-1막장(침하 -1.38 mm)으로 굴착되면서 n-2막장 까지 발생된 변화율(7.9%) 보다 다소 증가하면서 경계부(침하 -1.92 mm)에서 40.1%의 큰 변화를 볼 수 있었으며, 2&4의 경우는 100.4% (침하변화 2.24 mm → 4.49 mm)의 변화가 발생하였고, 2&5의 경우는 n-2막장에서 n-1 막장으로 굴착되면서 20.4% (침하변화 1.57 mm → 1.89 mm)가 발생되고 경계부에서는 142.3% (침하변화 1.89 mm → 4.58 m)의 큰 변화가 나타났는데, 이는 후방의 낮은 암반 등급 구간의 굴착에 의한 영향이 선 굴착된 전방으로 전이되면서 전방에서 추가적인 변형이 발생되었기 때문으로 판단된다(Fig. 3(f), 3(g), 3(h), 3(i)). 특히 동일 암반 등급 차이를 갖는 Case를 비교하면 전방의 암반 등급이 더 양호한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 변화율이 작게 발생하여 전방 암반이 양호한 경우 후방에서 발생한 영향을 일부 부담하는 것으로 판단된다.

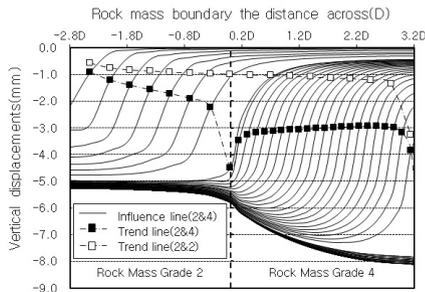
3&4의 경우에는 경계부로 근접하면서 침하 변화율이 증가하며 전방 n-1막장에서 13.8% (침하변화 2.90 mm → 3.30 mm), 경계부에서 62.1% (침하변화 3.30 mm → 5.35 mm)의 변화를 볼 수 있었으며, 3&5의 경우에는 경계부에서 103.8% (침하변화 4.00 mm → 8.15 mm)의 큰 변화가 나타났다(Fig. 4(a), 4(b), 4(c)).



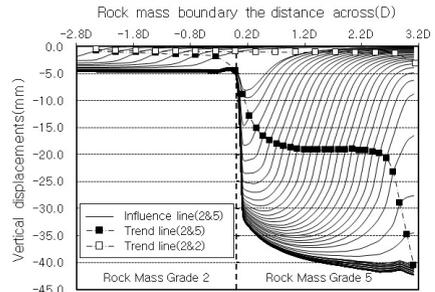
(a) Influence line and trend line in case of 2&2



(b) Influence line and trend line in case of 2&3

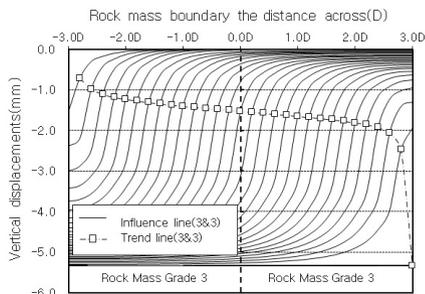


(c) Influence line and trend line in case of 2&4

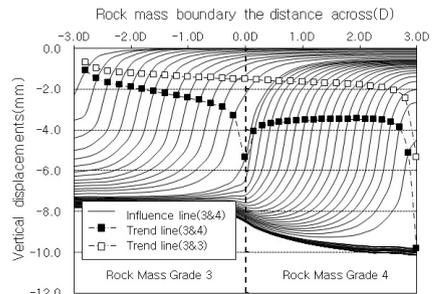


(d) Influence line and trend line in case of 2&5

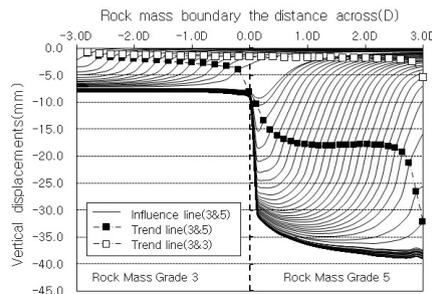
Fig. 3. Effect of longitudinal variation of the rock properties on the influence line and trend line (2&X)



(a) Influence line and trend line in case of 3&3



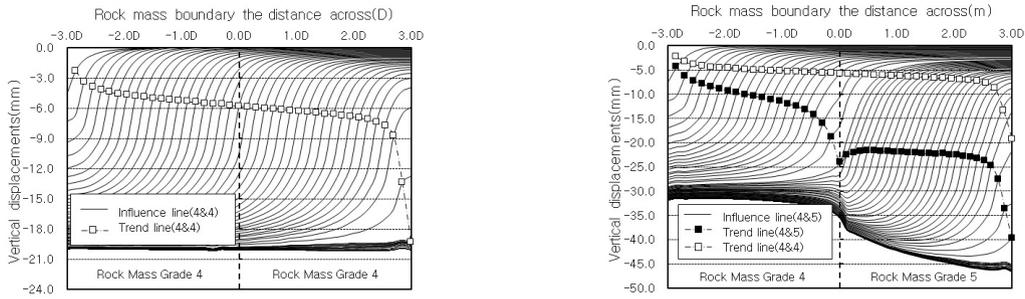
(b) Influence line and trend line in case of 3&4



(c) Influence line and trend line in case of 3&5

Fig. 4. Effect of longitudinal variation of the rock properties on the influence line and trend line (3&X)

4&5의 경우에는 경계부에 근접하면서 침하 변화율이 증가하며 n-1막장에서 12.2% (침하변화 14.22 mm → 15.96 mm), 경계부에서 50.6% (침하변화 15.96 mm → 24.03 mm)의 큰 변화를 볼 수 있었다. 이는 전방에 존재하는 암반과 후방에 존재하는 암반의 강성 차이가 다른 Case보다 작기 때문에 응력 전이의 변화율이 상대적으로 감소된 것으로 판단된다(Fig. 5(a), 5(b)).

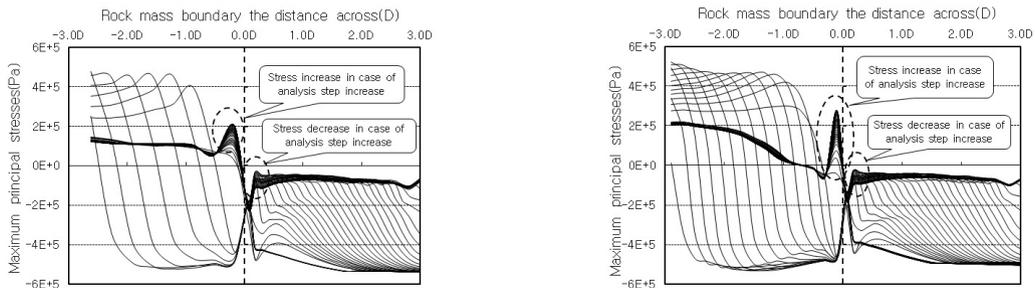


(a) Influence line and trend line in case of 4&4

(b) Influence line and trend line in case of 4&5

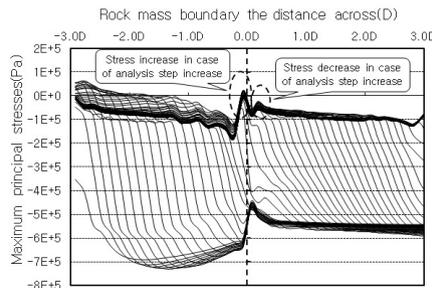
Fig. 5. Effect of longitudinal variation of the rock properties on the influence line and trend line (4&X)

Fig. 6은 상기에서 언급한 응력 전이 현상을 판단하기 위하여 최대 주응력을 해석 단계별로 측정한 것으로써 응력 전이가 가장 뚜렷하게 나타난 대표적인 것을 도시하였다.



(a) Maximum principal stresses at crown in case of 2&5

(b) Maximum principal stresses at crown in case of 3&5



(c) Maximum principal stresses at crown in case of 4&5

Fig. 6. Rock mass characteristics longitudinal influence line of the maximum principal stress of a case to change

암반 경계부 방향으로 굴착함으로써 강성이 약한 암반에서 강성이 큰 암반으로 응력이 전이되어 최대 주응력이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 반대로 강성이 작은 암반의 경우에는 굴착단계가 진행되면서 응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 암반 등급 경계면에서 이전 굴착단계(n-1)와 경계면 굴착단계(n)의 천단변위 증가비율을 나타낸 것이다. 1단계 차이(2&3, 3&4, 4&5)에서는 40.1~62.1% 증가하며 2단계 차이(2&4, 3&5)에서는 100.4~103.8%, 3단계 차이(2&5)에서는 142.3%로 급증하여 암반 등급 차이가 증가하면 등급 경계면의 천단변위 증가율로 급증하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 등급차이에 따른 천단변위 증가는 상대적 강성 차이가 응력 전이에 비례적인 영향을 준다는 것을 보여준다.

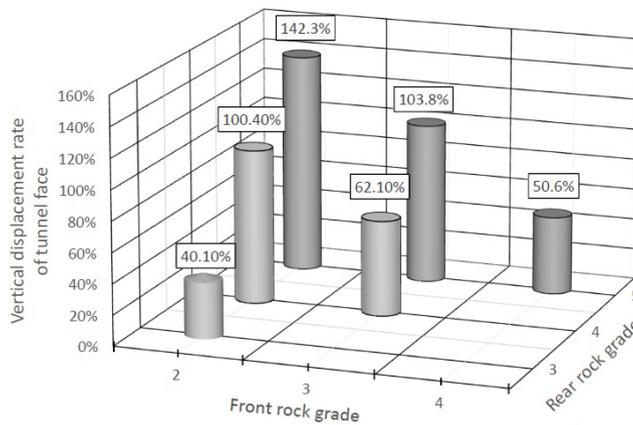


Fig. 7. Vertical displacement rate of tunnel face in rock mass condition

이러한 응력 전이는 특이한 상황에서만 볼 수 있는 것이 아니라, 상대적으로 강성의 차이가 있는 암반이 종방향으로 변화할 때 마다 응력 전이 현상이 발생되는 것을 알 수 있었다. 암반 등급 변화에 따라 등급 경계면을 기준으로 약 0.35D, 강성의 차이가 큰 경우에는 약 0.7D 정도의 범위에서 응력 전이가 발생하면서 강성이 큰 암반 등급

Table 4. Scope a stress transfer working in case of a longitudinal change of rock mass condition

Front rock grade	Rear rock grade	Vertical displacement rate of tunnel face	Scope of stress transfer (rock boundary basis)
2	3	40.1%	0.35D
	4	100.4%	0.35D
	5	142.3%	0.70~0.35D
3	4	62.1%	0.60~0.40D
	5	103.8%	0.70~0.35D
4	5	50.6%	0.45~0.30D

으로 구성된 비교군과 다른 거동을 볼 수 있다. 터널 진행 방향으로 암반 등급의 변화에 따라 유리한 암반 등급 방향으로 응력 전이가 발생하는 범위와 암반 등급 변화에 따른 변화부 막장면의 천단변위 변화비율은 Table 4에 나타내었다.

## 6. 결론

본 연구는 수치해석을 통하여 종방향 암반 등급 변화에 따른 천단 침하량을 예측하고, 굴착 예정인 전방의 파쇄대 예측에 활용되는 Influence Line (영향선) 및 Trend Line (경향선)을 이용하여 암반 등급 경계부에서의 응력 전이 정도를 분석하였다.

연구 결과 터널 굴착방향으로 암반 등급이 하향 변화하면 등급변화 경계를 중심으로 강성 차이에 의한 응력 전이가 발생하며 강성 차이가 클수록 응력 전이에 따른 천단변위의 증가율도 비례적으로 커지는 것을 확인하였다. 또한 터널 굴착방향으로 암반 등급이 하향 변화하면 강성이 약한 암반에서 강성이 큰 암반 방향으로 0.35~0.7D 범위에서 응력 전이가 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 응력 전이는 양호한 암반에 대한 추가적인 응력으로 작용하기 때문에 암반 등급 경계부를 중심으로 지보 시스템의 변화가 필요하나, 현장 시공중 단구간에서의 패턴 변화는 시공성 저하를 가져오기 때문에 실제 적용은 효과적이지 못하다. 따라서 암반 등급의 종방향 하향 변화부에서는 응력 전이에 따른 터널 안정성 저하를 고려한 패턴 적용이 요구되며, 연구결과의 0.35~0.7D 영향권을 감안하여 안전측으로 1.0D 정도의 하향패턴을 추가 적용하는 것이 필요하다.

## References

1. Bang, J.H., Han, I.Y. (2006), "Prediction of ground condition changes ahead of tunnel face using three-dimensional absolute displacement analysis", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 8, No. 2, pp. 101-113.
2. Gnisen, R. (1989), Numerical Methods, Developments in Geotechnical Engineering, 59A, Underground Structures Design and Instrumentation, Elsevier, New York, pp. 84-128.
3. Ham, H.S., Lee, S.D. (2018), "Experimental study on the relaxation zone depending on the width and distance of the weak zone existing ahead of tunnel face", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 5, pp. 855-867.
4. ITA (1986), Austrian National Committee of ITA, The Defence of NATM (Communication), Tunnel & Tunneling.
5. Itasca Consulting Group (2002), FLAC3D Theory and Background, Ver.2.1, Minneapolis, pp. 2-21-35.
6. Korea Rail Network Authority (2003a), Construction Design Report of Bosung-Imseongli 2ed section.
7. Korea Rail Network Authority (2003b), Construction Design Report of Bosung-Imseongli 7th section.
8. Korea Rail Network Authority (2010a), Track-based Construction Design Report of Honam High Speed Railway 3-2 section.

9. Korea Rail Network Authority (2010b), Track-based Construction Design Report of Honam High Speed Railway 4-2 section.
10. Korea Rail Network Authority (2010c), Train Base Station Construction Design Report of Honam High Speed Railway.
11. Korea Tunnel Association (KTA) (1999), Tunnel Design Criterion, pp. 42.
12. Lee, I.M., Park, K.J., Kang, K.D. (1997), "Prediction of abandoned mines ahead of the tunnel face", Proceedings of the 1997 Fall Korean Geotechnical Society Conference, Yongin, pp.161-170
13. Schubert, W., Budil, A. (1997), The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation, Fujii Editor, Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Vol. 3, Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 1411-1414.
14. Yoo, K.H., Park, Y.J. (2003), "A risk analysis for the determination of a tunnel support pattern", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 5, No. 3, pp. 241-250.