

암반층에서 실드 TBM 터널 세그먼트의 작용하중 산정방법에 관한 연구

A Study on Earth Pressure Calculating Method about Shield TBM Tunnel Segments in the Rock

천 병 식¹⁾ · 기 정 서²⁾ · 강 태 희³⁾ · 곽 윤 형⁴⁾ · 변 요 셉[†]

Byungsik Chun · Jungsu Ki · Taehee Kang · Yunehyeong Kwag · Yoseph Byun

Received: December 30th, 2013; Revised: January 20th, 2014; Accepted: April 1st, 2014

ABSTRACT : This study analyzed the differences in the analysis techniques through a comparative analysis of the various segment's modeling techniques of Shield TBM method and proposed reasonable modeling techniques. Also, this study suggested reasonable estimating methods of load to be applicable in the field through the load analysis and three-dimensional finite element analysis by estimating model of rock mass relaxation load. Estimating method of relaxation area by rock mass rating makes no odds of output in subgrade with high rock mass rating, but so the difference of output is large, that is judged to set conservative design off. In estimating result of rock mass relaxation area by three-dimensional analysis relaxation area of subgrade with low-grade soil was predicted to be positioned at medium-range of many methods, in case of designing segment in subgrade with low-grade soil it needs to actively review estimation of relaxation area through three-dimensional analysis reflecting mechanical tunnel excavation.

Keywords : Shield TBM method, Segment, Relaxation area, Three-dimensional analysis

요 지 : 본 연구에서는 실드 TBM 공법의 다양한 세그먼트 모델링 기법에 따른 비교·해석을 통하여 해석기법에 따른 차이를 분석하고 이에 따른 합리적인 모델링 기법을 제안하였다. 또한 암반 이완하중 산정모델에 따른 하중 분석 및 3차원 유한요소해석을 통하여 실제 현장에서 적용 가능한 합리적인 하중산정 방법을 제시하였다. 암반분류에 의한 이완영역의 산정방법은 암반등급이 높은 지반에서는 결과의 차이가 크지 않으나 지반등급이 낮은 지반에서는 그 차이가 매우 크게 나타났으며, 3차원 해석에 의한 이완영역 산정결과 지반등급이 낮은 지반의 이완영역은 각 방법의 중간 정도 범위에 위치할 것으로 예측되었으며 지반등급이 낮은 지반의 세그먼트 계획 시에는 기계식 터널 굴착 특성을 반영한 3차원 해석을 통한 이완영역의 산정을 적극 검토할 필요가 있다.

주요어 : 실드 TBM 공법, 세그먼트, 이완영역, 3차원 해석

1. 서 론

터널식 전력구 건설을 위한 기계식 터널공법 중에서 사용빈도가 가장 높은 Shield TBM 공법은 터널 굴착과 동시에 세그먼트를 설치하여 세그먼트가 지보와 영구 구조물의 역할을 동시에 수행하도록 하는 공법이다. 이 경우 세그먼트 안정성 확보가 터널 안정성과 직결되는 중요한 사항으로 세그먼트에 대한 정확한 구조적 안정성 평가가 요구된다. 세그먼트의 안정성 평가는 터널 굴착 시 세그먼트에 작용하는 하중(토압, 수압 등)을 산정하고 세그먼트를 모델링하여 해석을 수행하는 형태로 이루어지는데 세그먼트와 관련된 모델링 및 해석기법에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지

않아 실제 공사 현장 적용 시에 다양한 문제가 발생하고 있다. 또한 세그먼트의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되는 토압(이완하중)의 경우, 일반적으로 이완하중을 고려하고 있으나 암반구간을 통과하는 세그먼트의 하중에 대한 평가방법이 정립되지 않고 있으며 관련 연구도 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 Shield TBM 세그먼트의 합리적 모델링 기법을 제시하고 암반구간을 통과하는 세그먼트에 작용하는 하중을 규명하기 위한 것으로 다양한 세그먼트 모델링 기법 분석, 이완하중 산정모델 검토 및 결과 분석, 3차원 유한요소 해석을 통한 터널 변형양상 파악 및 합리적인 이완하중 산정모델을 제시하고자 한다. 각 항목별 연구의 내용 및 방법은 다음에 제시된 바와 같다.

1) Construction Industry Research Institute

2) Korea Infrastructure Safety Corporation

3) Korea Electric Power Corporation

4) Department of Civil Engineering, Kyonggi University

† Korea Infrastructure Safety Corporation (Corresponding Author : josep0103@nate.com)

2. 이론적 배경

2.1 세그먼트 작용하중 개요

Shield TBM 터널 세그먼트에 작용하는 하중은 크게 토압, 수압, 상재하중, 자중, 내부하중, 지진하중, 지반반력, 특수하중 등의 8가지로 구분할 수 있다. Shield TBM의 작용하중에서 비교적 규모가 큰 하중은 토압과 수압으로 볼 수 있다(Fig. 1). 이 중에서 수압의 경우 작용방향이 구조체의 도심축(원의 중심)을 향하여 작용하므로 원형 형상의 세그먼트를 고려할 때 대부분이 축력의 형태로 전환되므로 하중의 크기에 비하여 세그먼트의 안정성에 미치는 영향은 비교적 작다고 할 수 있다. 따라서 세그먼트 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 하중은 토압으로 평가할 수 있으므로 이를 산정하는 방법에 대한 충분한 검토가 필요하다. 특히 Shield TBM 터널이 주로 통과하는 암반층의 경우 토압의 형태가 이완하중으로 작용하게 되며 이는 터널 굴착 후 이완범위(소성 영역)에 따라 달라진다. 따라서 세그먼트 안정성을 좌우하는 이완하중의 정확한 산정이 해석의 신뢰성을 판단하는 가장 중요한 요소가 된다고 할 수 있다.

2.2 이완하중 산정이론

Kommerell(1912)은 터널 굴착 시 원지반이 하부에서 지지할 수 없게 되면 원지반이 이완되는 것으로 고려하여 원지반의 침하량을 e 라 하면 원지반의 침하량(e)을 메우는데 충분한 높이 h 만큼 지반이 이완되는 것으로 보고 그 결과 생긴 변형률을 δ 라 하여 Eq. (1)로 이완범위를 산정하였으며, Table 1은 지층별 이완계수의 범위를 보여준다.

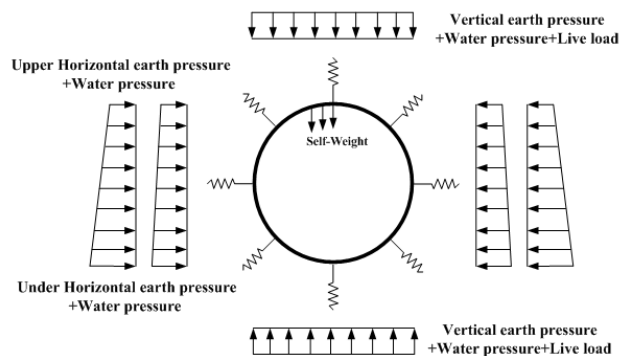


Fig. 1. The schematic diagram of earth pressure on segments

Table 1. The Range of the Relaxation modulus (δ)

Soil layer	Loose sand	Medium clay	Soft rock	Hard rock
Relaxation modulus (δ)	1~3 %	3~5 %	8~12 %	10~15 %

$$h = 100 \times \frac{e}{\delta} \quad (1)$$

여기서 δ 는 원지반의 이완계수(%)를 의미한다.

Protodyakonov(1963)는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 지반의 이완범위가 원지반의 강도정수와 터널의 크기에 의해 결정되며 이완영역의 형태가 포물선의 형태가 되는 것으로 가정하여 Eq. (2)에 의해 이완범위를 산정하도록 제안하였다.

$$h = \frac{b}{2 \tan \phi} \quad (2)$$

여기서 b 는 터널 폭이고, ϕ 는 내부마찰각을 나타낸다.

Terzaghi(1946)는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 터널이 굴착되면 굴착면의 상부에 하부로 이동하는 활동면이 형성되고 이 활동면을 따라 상향의 저항력이 발생한다고 고려하였다. 따라서 활동면의 저항력으로 지지할 수 없는 부분을 이완

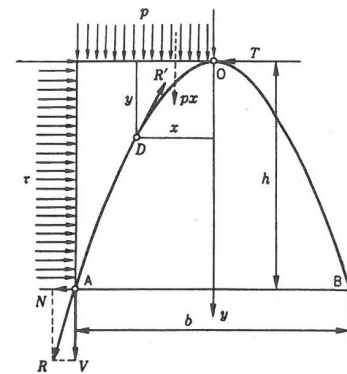


Fig. 2. The relaxed zone by Protodyakonov (1963)

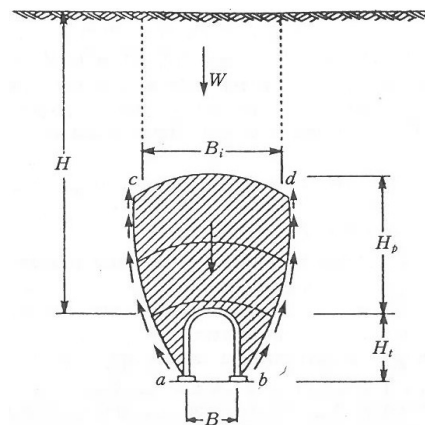


Fig. 3. The relaxed zone by Terzaghi (1946)

범위로 보고 이를 하중으로 정의하였다. 또한 실험을 통하여 터널의 폭(B)에 상당한 높이에 걸쳐서 측압계수가 점차 증가하며 일정높이($2.5B$) 이상에서는 하부의 변위가 응력 상태에 영향을 미치지 않음을 확인하여 Eq. (3)을 제안하였다.

$$P_v = \gamma B \frac{(1 - \exp(-2H_2K_h \tan\phi / B))}{2K_h \tan\phi} + \gamma H_1 \exp\frac{-2H_2K_h \tan\phi}{B}$$

$$h = \frac{b}{2 \tan\phi} \quad (3)$$

여기서 H_1 는 터널상부에서 이완영역까지의 높이이고, H_2 는 이완영역에서 지표면까지의 높이이다.

2.3 세그먼트 모델링 기법

Shield TBM 터널의 세그먼트는 프리캐스트 부재인 세그먼트를 연결볼트 등으로 체결하여 구축하기 때문에, 세그먼트 하나로 동일한 강성을 가진 링에 비하여 변형하기 쉬운 특성이 있다. 이는 세그먼트 이음 부분의 휨 강성이 세그먼트 자체의 휨 강성에 비하여 작기 때문이다. 일반적인 경우 시공 현장에서는 세그먼트 이음부의 영향으로 증가하는 세그먼트 변형을 저감시키기 위해서 세그먼트를 지그재그 형태로 조립하여 이음부의 침점효과를 기대하게 되므로 세그먼트 연결부의 모델링 방법이 세그먼트에 발생하는 단면력을 산정하는데 매우 중요한 문제가 된다. 현재 세그먼트의 모델링에 사용되고 있거나 제안되고 있는 단면력의 산정방법은 대체로 다음과 같이 분류할 수 있다.

- ① 세그먼트를 동일한 휨 강성을 갖는 링으로 고려하는 방법(관용법, 수정관용법)
- ② 세그먼트를 여러 개의 Hinge를 갖는 링으로 고려하는 방법(다한지계링법)
- ③ 세그먼트를 회전 스프링을 가진 링으로 고려하는 방

법(회전스프링법)

- ④ 세그먼트의 반경 방향 이음부를 회전스프링으로, 링 이음부를 전단스프링으로 고려한 2개의 링을 고려하는 방법(2링 빔-스프링법)

2.4 세그먼트 인접지반 모델링 기법

지중에 설치되는 세그먼트는 뒷채움 주입에 의해 배면 공극의 충전이 완료되면 주변 지반에 의해 구속을 받게 된다. 이러한 세그먼트와 지반과의 상호작용을 고려하는 방법에 따라 변위-하중 모델과 전주면 스프링 모델로 구분된다(Fig. 4). 변위-하중 모델은 가정된 지반변위에 따라 이에 상응하는 지반하중을 선형적으로 고려하는 방법으로 연직방향 지반반력은 연직하중과 평형을 이루는 분포하중으로 고려하고, 수평 방향 지반반력은 삼각형으로 가정된 변위량에 지반반력계수를 곱한 값으로 산정하는 방법이다. 전주면 스프링 모델은 구조체인 세그먼트와 하중에 의한 지반의 상호작용을 비선형적으로 고려하는 방법으로 지반반력은 세그먼트와 지반 스프링의 비선형 거동에 따라 산정된 값을 사용한다(이인모, 2004).

변위-하중 모델은 계산과정의 편의성으로 인하여 자주 사용되어 왔으나 하중 변동에 따른 지반과 세그먼트의 상호작용을 고려할 수 없으므로 사용이 제한된다. 국제터널협회에서 제시한 각 국가별 주변 지반 모델링 방법은 일부 국가를 제외한 대부분의 국가에서 전주면 스프링 모델을 적용하고 있다.

3. 세그먼트 모델링 기법 분석

3.1 세그먼트 모델링 기법 검토

세그먼트 모델링 기법에 따른 단면력 변화를 확인하기

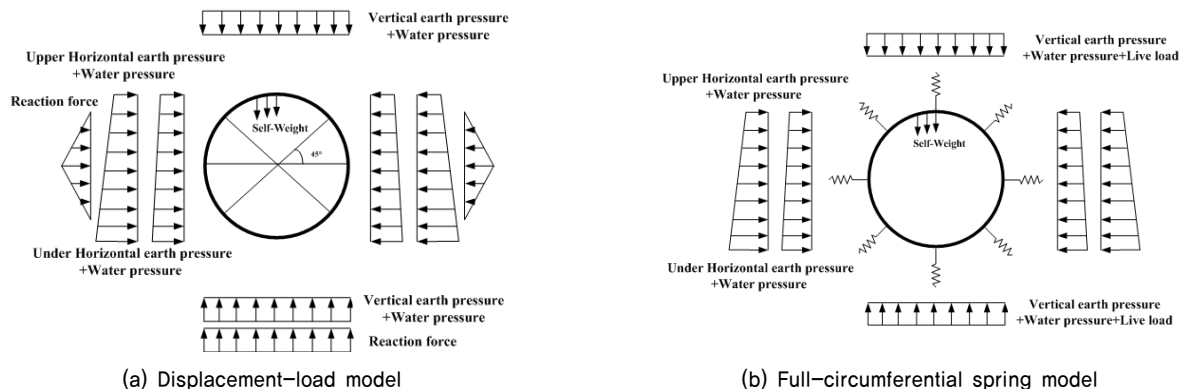


Fig. 4. Modeling method of adjacent ground

위하여 전장에서 설명한 5가지 세그먼트 해석기법을 적용한 비교·해석을 실시하였다. 세그먼트 해석은 관용법, 수정관용법, 다힌지계링법, 회전스프링법, 2링 빔-스프링 모델 등 5가지 방법을 적용한 동일 하중조건에 해석을 수행하였다. 해석은 서울 강남지역에서 실시한 지반조사의 성과를 토대로 실시하였으며 해석에 반영한 하중조건은 지반등급 II, V등급의 지반으로 해석에 반영된 물성치는 Table 2에 제시된 바와 같다(KEPCO, 2008).

3.2 세그먼트 모델링 기법별 해석결과 분석

해석결과 관용법이 가장 큰 단면력을 나타내었으며 다힌지계링법이 가장 작은 단면력을 보였고 단면력의 차이는 약 15 % (59.95 kN·m/52.15 kN·m)로 나타나 비교적 큰 차이를 보였다. 수정관용법, 회전스프링법, 2링 빔-스프링 모델의 결과는 관용법과 다힌지계링법의 중간 정도의 결과를 보였으나 다힌지계링법에 근접한 결과를 보여 세그먼트 이음부를 고려하는 경우의 해석결과는 비교적 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

Table 3의 해석결과에서 세그먼트 이음부 고려 여부에 따라 단면력의 차이가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있어 세그먼트 해석의 신뢰성 향상을 위해서는 세그먼트 모델링

시 이음부에 따른 강성저하가 반드시 고려되어야 함을 확인할 수 있다. 또한 2링 빔-스프링 모델링을 제외한 상기 4가지의 세그먼트 모델링 방법이 갖고 있는 여러 가지 문제점을 고려할 때 이에 대한 개선이 필요함을 확인할 수 있다.

세그먼트 해석방법에 따른 위치별 모멘트 및 축력 발생 경향을 분석하면 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 이음부 고려방법에 따른 단면력의 감소가 발생하며, 특히 단면력 발생 양상의 변화가 발생한다. 이음부 강성변화를 별도로 고려하지 않는 관용법과 수정관용법에 의한 세그먼트 모델링의 경우 세그먼트의 강성이 일정하기 때문에 작용하중이 가장 큰 천단부에서 최대모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 반면에 2링 빔-스프링 모델의 경우 천단부에 설치되는 Key 세그먼트에 의한 이음부 집중으로 천단부의 단면력은 오히려 감소하고 측벽부에서 최대단면력이 나타남을 확인할 수 있었다.

이음부를 고려하는 방법이 2링 빔-스프링 모델과 유사한 회전스프링법의 경우 발생하는 최대단면력의 분포는 2링 빔-스프링 모델과 유사한 결과를 나타내었다. 다힌지계링법의 경우 이음부를 힌지로 고려함에 따라 힌지 위치에서 단면력의 급격한 변화가 발생하는 분포양상을 나타내었다. 이상의 검토결과에서 나타난 바와 같이 관용법, 수정관용법, 다힌지계링법의 경우 최대단면력이 발생하는 위치가 실제

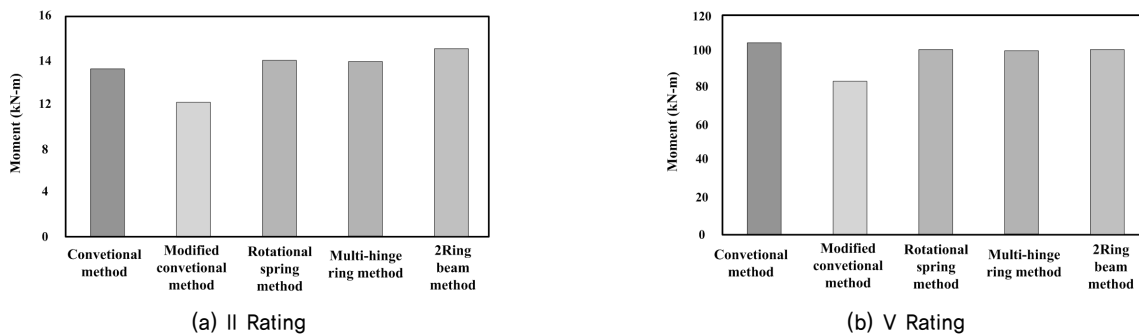


Fig. 5. Moment results by modeling methods

Table 2. The material using segment modeling

Rock grade	Hole	RMR	Q	Jn	Jr	Modulus of elasticity (MPa)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Density (kN/m ³)
II	B-12	74	1.823	4.0	2.0	74	1.823	40.0	2.0
V	B-10	18	0.006	20.0	1.0	18	0.006	20.0	1.0

Table 3. Analasys results by modeling methods

Rock mass rating	Grade II		Grade V	
	Moment (kN·m)	Axial force (kN)	Moment (kN·m)	Axial force (kN)
Conventional method	15.41	545.05	104.95	1,346.99
Modified conventional method	12.33	436.04	83.96	1,077.59
Rotational spring method	16.09	564.27	100.6	1,497.2
Multi-hinge ring method	16.06	564.39	100.52	1,498.41
2Ring beam method	17.16	509.02	100.95	1,330.27

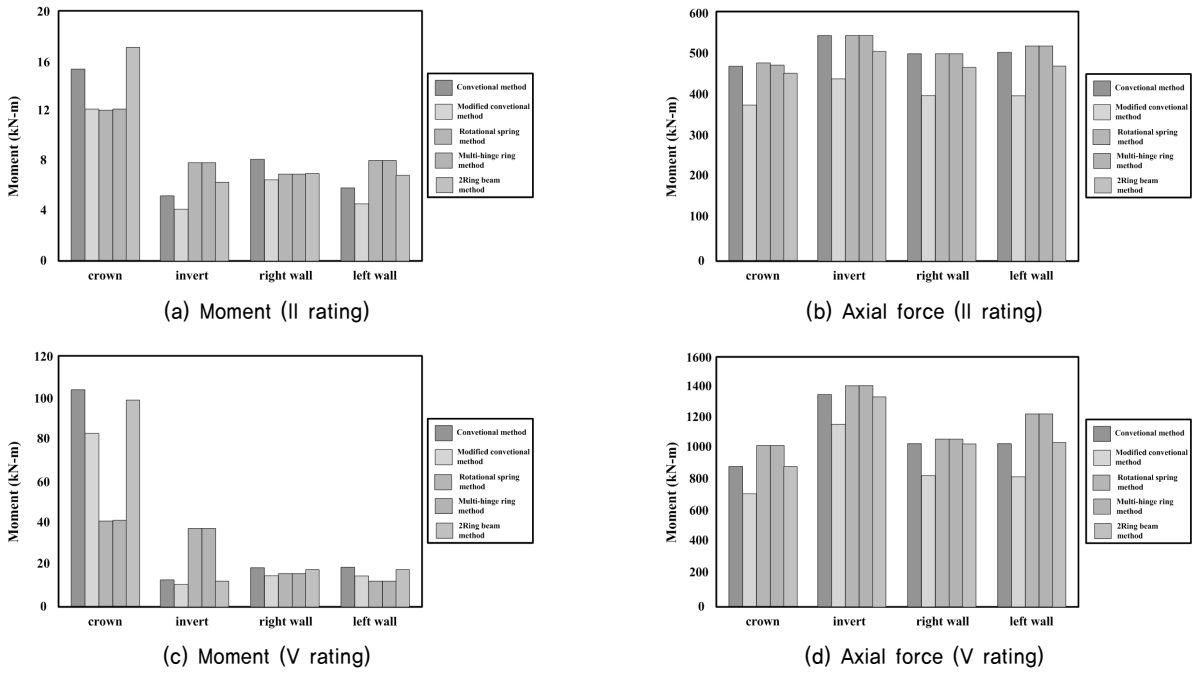


Fig. 6. Section force results by points

Table 4. Moment results by comparing two model

	Displacement-load model	Full-circumferential spring model
Moment (kN·m)	141.02	66.210
Moment diagram		

거동과 달라지는 해석이 되므로 이를 토대로 세그먼트에 발생하는 단면력을 정밀하게 예측하는 것은 곤란하다고 할 수 있다. 회전스프링법의 경우 단면방향 이음부를 고려하는 방법이 2링 빔-스프링 모델과 동일하므로 단면력 분포양상은 비교적 유사하나 종단방향 이음부 조건(침점효과)의 고려가 불가능하므로 해석의 신뢰성은 다소 저하된다고 할 수 있다. 따라서 향후의 세그먼트 해석은 실제 세그먼트의 거동에 잘 부합되는 것으로 평가할 수 있는 2링 빔-스프링 모델을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.3 인접지반 모델링 기법에 따른 검토

세그먼트 인접지반 모델링 기법과 관련하여 변위-하중 모델과 전주면 스프링 모델에 대한 동일조건의 해석을 수행한 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 세그먼트 주변지반 모델링 방법에 따른 세그먼트 단면력을 살펴보면 변위-하중 모델

의 결과가 매우 큰 값을 보이는 것을 확인할 수 있으며 최대모멘트의 발생위치는 터널의 천단부와 측벽부가 됨을 알 수 있다. 이는 변위-하중 모델이 대상 지반의 변위량을 가정하여 지반반력의 크기를 결정하며 터널 천단부와 측벽부에 실제 작용하는 반력을 고려하지 못하는 측면에서 기인한다. 또한 이러한 해석의 결과로 세그먼트를 계획할 경우 세그먼트 두께 및 철근량 증가와 같은 과다설계 우려가 높아 이에 대한 신중한 접근이 요구된다. 반면에 전주면 스프링 모델의 경우 실제 지반에서 발생하는 지반반력의 형태를 유사하게 모델링하므로 보다 신뢰성 높은 세그먼트 해석이 가능한 것으로 판단된다.

4. 이완하중 산정방법 검토

4.1 암반분류에 의한 이완하중 산정검토

암반구간 세그먼트에 작용하는 이완하중을 검토하기 위

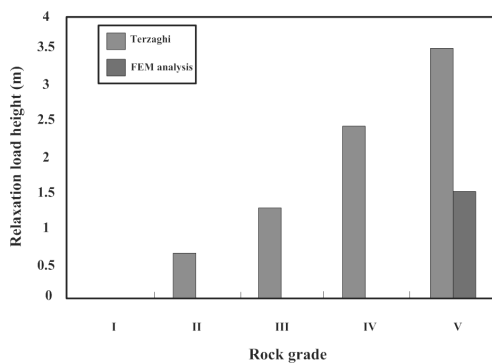
하여 본 연구에서는 암반분류에 의한 이완하중과 유한요소 해석에 의한 이완하중 산정결과를 비교·분석하여 합리적인 이완하중의 범위를 검토하였다. 이를 위하여 서울 강남지역 (KEPCO, 2008)과 경기 분당지역(KEPCO, 2007)에서 각각 시행된 전력구 공사의 시추조사 결과를 토대로 암반을 5개 등급으로 구분하고 각 암반에 대한 RMR, Q, Jn, Jr 등을 Table 5와 같이 산정하였다.

2개 현장에 대한 이완하중 산정방법별(수정된 Terzaghi 암반분류, RMR에 의한 방법, Q-system에 의한 방법)에 의한 이완영역의 산정결과는 Fig. 7~9에서 보는 바와 같다.

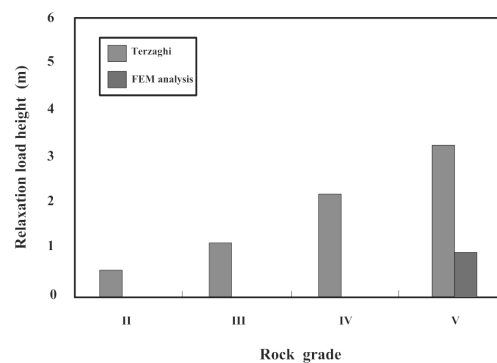
분석결과 Table 6에서 보는 바와 같이 Q-System에 의한 이완영역이 가장 크고 유한요소해석에 의한 결과가 가장 작은 결과를 나타내었다. 수정 Terzaghi 암반분류와 RMR에 의한 이완영역은 동일등급에서 유사한 결과를 보이고 있으며 Q-System에 의한 방법은 지반등급이 나쁠수록 크게 증가하는 결과를 보였는데 이는 질리를 고려하는 산정방법의 특성에서 기인한 것으로 판단된다. 유한요소해석에 의한 이완영역이 비교적 작게 나타난 것은 2차원 평면변형 조건에서 반영이 어려운 Shield TBM 터널의 지보(세그먼트)특성의 영향에서 비롯된 것으로 판단되어 3차원 해석에 의한

Table 5. The results of site investigation

Site	Rock grade	Hole	Depth (m)	RMR	Q	Jn	Jr
Seoul (Gangnam-gu)	I	B-14	46.6~50.2	80	47.318	4.0	3.0
	II	B-12	43.2~46.7	74	1.823	4.0	2.0
	III	B-2	16.4~19.9	46	2.783	9.0	2.0
	IV	B-4	26.1~29.6	29	0.059	15	1.0
	V	B-10	11.43~14.93	18	0.006	20.0	1.0
Gyeonggi-do (Bundang-gu)	II	B-2	80.4~86.4	62	7.37	3.0	3.0
	III	B-23	61.2~67.0	47	3.036	4.0	2.0
	IV	B-6	39.0~46.3	24	0.055	6.0	1.5
	V	B-10	35.6~40.0	18	0.006	20.0	1.0

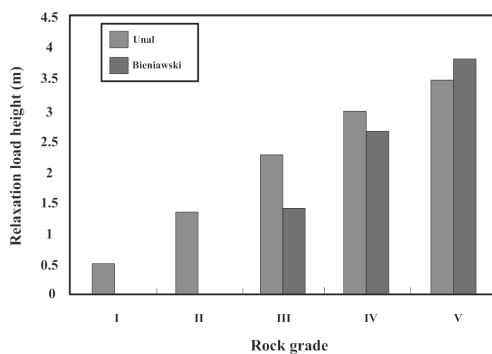


(a) Seoul (Gangnam-gu)

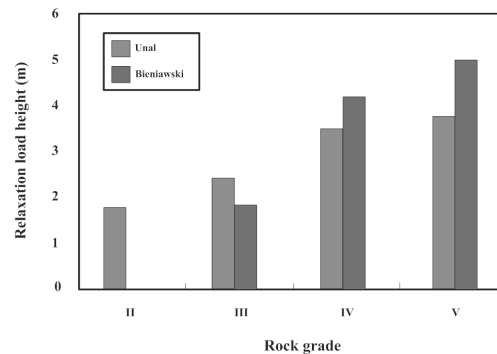


(b) Gyeonggi-do (Bundang-gu)

Fig. 7. Relaxation load height by modified Terzaghi's rock mass classification



(a) Seoul (Gangnam-gu)



(b) Gyeonggi-do (Bundang-gu)

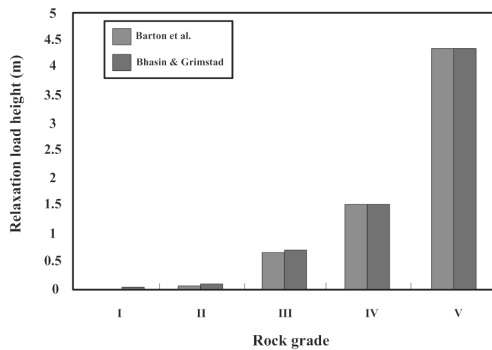
Fig. 8. Relaxation load height by RMR system

결과치 비교·검토를 실시하였다. 낮은 등급에서 크게 증가하는 Q-System에 의한 이완영역 산정결과를 제외하고 살펴보면, 터널의 이완영역은 일반적인 설계 또는 시공에서 적용하는 값과 비교 시 매우 작은 결과라 할 수 있으며 이를 반영하여 세그먼트 설계를 실시할 경우 세그먼트 단면 및 소요철근량 감소를 통한 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

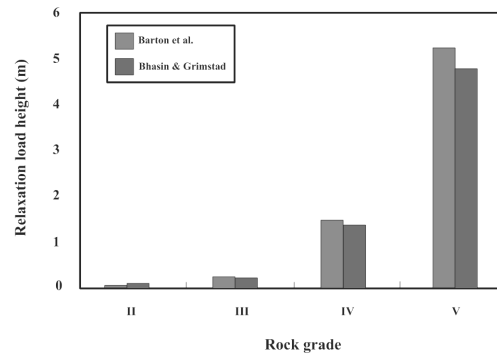
4.2 3차원 해석에 의한 이완하중 산정검토

4.2.1 3차원 해석 개요

Shield TBM 터널에 대한 3차원 유한요소해석을 실시하여 세그먼트에 작용하는 이완하중의 크기를 분석하고 이를 토대로 암반분류하중에 의한 결과와 비교·분석을 통하여 합리적인 이완영역 규모를 검토하였다. 3차원 해석은 암반 등급별로 실시하였으며 터널 굴착, 세그먼트 설치, 뒷채움 주입 등의 시공과정을 모델링 하였으며 경계면 구속의 영

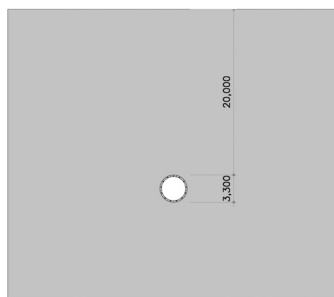


(a) Seoul (Gangnam-gu)

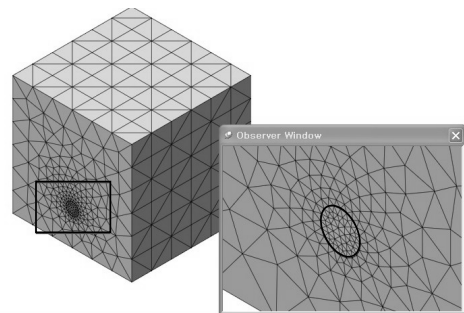


(b) Gyeonggi-do (Bundang-gu)

Fig. 9. Relaxation load height by Q-system



(a) Ground condition



(b) Typical mesh

Fig. 10. 3-Dimensional

Table 6. Relaxation load height by comparing rock grade

Site	Rock grade	Relaxation load height (m)					Analysis
		Modified Terzaghi's rock mass classification	RMR system		Q-System		
			Unal (1983)	Bieniawski (1989)	Barton et al. (1974)	Bhasin & Grimstad (1996)	
Seoul (Gangnam-gu)	I	0.00	0.55	0.00	0.11	0.34	0.05
	II	0.63	1.35	0.00	0.47	1.00	0.13
	III	1.25	2.30	1.43	7.16	7.16	0.33
	IV	2.38	3.00	2.70	15.24	15.24	0.58
	V	3.50	3.5	3.85	43.70	43.70	1.82
Gyeonggi-do (Bundang-gu)	II	0.57	1.73	0.0	0.79	1.25	0.23
	III	1.14	2.41	1.83	2.88	2.62	0.57
	IV	2.16	3.46	4.22	15.24	13.87	1.19
	V	3.19	3.73	5.00	52.41	47.69	3.27

향을 배제하기 위하여 Fig. 10에서 보는 바와 같이 충분한 크기의 터널길이를 해석에 반영하였다. 또한 2개 현장에 대하여 시행된 지반조사 결과를 토대로 지반물성치를 산정하였으며 해석에 반영된 물성치는 Table 7에 제시된 바와 같다.

4.2.2 3차원 해석결과

암반등급별로 수행된 3차원 해석의 결과는 Table 8에 제시된 바와 같다. 이완영역은 유한요소해석의 소성영역(소성률>1.0)으로 표시된다. 3차원 해석의 결과에서 나타난 지반등급별 이완영역은 서울 강남지역의 경우 0.3 m(I등급), 1.1 m(II등급), 3.5 m(III등급), 6.5 m(IV등급), 10.0 m(V등급)로 나타났다. 경기 분당지역의 경우 1.1 m(II등급), 3.5 m(III등급), 6.5 m(IV등급), 10.0 m(V등급)로 나타났으며 2개 현장의 결과 모두 지반등급이 나뉠수록 이완영역의 증가범위가 커지는 경향을 나타내었다. 이는 암반분류에 의한 이완영역 산정결과와 비교할 때 낮은 값을 보이는 수정 Terzaghi 암

반분류 및 RMR에 의한 이완영역 산정결과와 높은 값을 보이는 Q-system의 이완영역의 중간값을 보이는 결과로 실제 현장에서 적용할 때 매우 유효한 해석결과를 유도할 수 있는 합리적인 산정방법이라 할 수 있다.

4.3 암반구간 세그먼트 이완하중 적용방안 검토

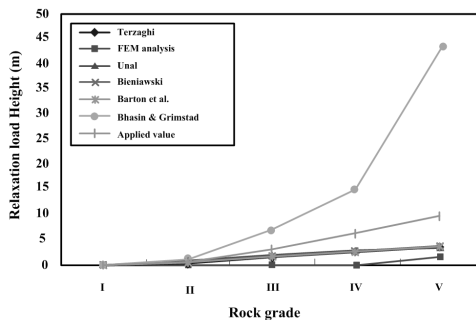
Fig. 11에서 살펴보면 암반분류에 의한 이완하중의 산정은 지반등급이 높은 지반(I~III등급)을 대상으로 하는 경우 각 산정방법별 차이가 크지 않으므로 세그먼트 해석결과에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 반면에 지반등급이 낮은 지반(IV~V등급)의 경우 이완영역 산정방법별 차이가 매우 크며 이에 따라 세그먼트 두께 및 철근량 등의 제원에 큰 영향이 발생하므로 지반등급이 낮은 지반의 경우 종래의 이완하중 산정방법과 3차원 해석에 의한 이완영역 분석을 병행하여 합리적인 이완하중 결정이 필요할 것으로 판단된다.

Table 7. Material properties in FEM analysis

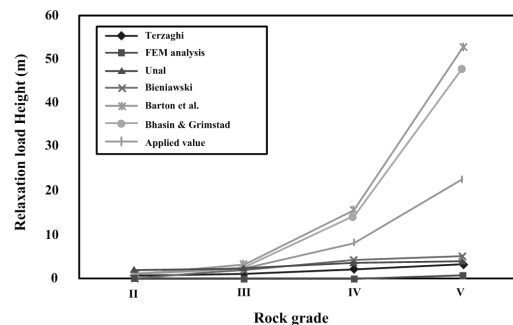
Site	Rock grade	Modulus of elasticity (MPa)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Density (kN/m ³)	Poisson ratio (ν)
Seoul (Gangnam-gu)	I	15,000	3,100	50	29	0.22
	II	8,800	1,100	47	28	0.23
	III	3,200	490	39	27	0.25
	IV	1,820	300	35	24	0.27
	V	730	50	31	23	0.3
Gyeonggi-do (Bundang-gu)	II	13,000	300	38	25	0.23
	III	6,000	100	35	24	0.25
	IV	3,000	80	33	23	0.27
	V	600	40	31	21	0.28

Table 8. Relaxation load height by 3-Dimensional

Site	Rock grade				
	I	II	III	IV	V
Seoul (Gangnam-gu)	0.3 m	1.1 m	3.5 m	6.5 m	10.0 m
Gyeonggi-do (Bundang-gu)	-	1.4 m	3.8 m	7.2 m	12.0 m



(a) Seoul (Gangnam-gu)



(b) Gyeonggi-do (Bundang-gu)

Fig. 11. Relaxation load height by rock grad

5. 결 론

Shield TBM 공법의 세그먼트 해석 시 다양한 세그먼트 모델링 기법을 제시하였고, 특히 암반구간을 통과하는 세그먼트에 작용하는 하중을 규명하기 위하여 다양한 이완하중 산정모델에 따른 하중분석과 3차원 유한요소 해석을 실시하였으며, 이를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 세그먼트의 합리적인 모델링을 위해서는 세그먼트의 이음부 및 교차조립에 의한 구속조건의 반영이 필요하며 이를 위해서는 2링 빔-스프링 모델을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (2) 세그먼트와 주변 지반의 상호작용을 모델링하는 변위-하중 모델과 전주면 스프링 모델은 단면력에 큰 차이를 보이며 실제 지반반력의 모델링에 부합하는 전주면 스프링 모델 적용이 필요하다.
- (3) 암반분류에 의한 이완영역의 산정방법은 암반등급이 높은 지반에서는 결과의 차이가 크지 않으나 지반등급이 낮은 지반에서는 그 차이가 매우 크게 나타나 보수적인 세그먼트 설계를 유발한다고 판단된다.
- (4) 3차원 해석에 의한 이완영역 산정결과 지반등급이 낮은 지반의 이완영역은 각 방법의 중간 정도 범위에 위치할 것으로 예측되며 지반등급이 낮은 지반의 세그먼트 계획 시 기계식 터널 굴착 특성을 반영한 3차원 해석을 통해 이완영역의 산정을 적극 검토할 필요가 있다.

추후 Shield TBM 현장계측, 모형실험 등을 통하여 본 연구의 해석적 방법에 의해 산정된 이완영역을 검증하고 암반 등급별 기계식 터널 이완영역 산정기법을 제시하는 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

References

1. 이인모 (2004), 터널의 지반공학적 원리, 새론출판사, pp. 371~378.
2. Barton N., R. Lien and J. Lunde (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 183~236.
3. Bhasin, R. and Grimstad, E. (1996), The use of stress-strength relationship in the assessment of tunnel stability, *Proc. Recent Advances in Tunnelling Technology*, New Delhi, India, Vol. 11, No. 1, pp. 93~98.
4. Bieniawski Z. T. (1989), *Engineering rock mass classifications*, Wiley, New York, pp. 245~260.
5. KEPCO (2007), Report of new Seongnam 345 kV installation, pp. 127~129 (in Korean).
6. KEPCO (2008), Report of Gangnam 154 kV installation, pp. 282~286 (in Korean).
7. Kommerell (1912), *Statische berechnung von tunnelmauerwerk*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, pp. 42~78.
8. Protodyakonov, N. M. (1963), Firmness coefficient for estimation of rock loads, Personal communication to Beas Design Organisation New Delhi, India, pp. 65~76.
9. Terzaghi, K. (1946), Rock defects and loads on tunnel support : in *rock tunnelling with steel supports* by proctor, R. V. and White, T. L., Commercial Shearing Co., Youngstown, Ohio, pp. 15~99.
10. Unal, E. (1983), Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs, Ph. D dissertation, Pennsylvania State University, pp. 350~360.