

3D 수치해석을 이용한 퇴적암 터널의 암반 등급별 전변위 산정

임성빈¹ · 윤현석¹ · 서용석^{1*} · 박시현²

¹충북대학교 지구환경과학과

²한국시설안전기술공단 지하시설실

Estimation of Total Displacements by RMR Grades using 3-Dimensional Numerical Analysis

Sung-bin Yim¹ Hyun-Seok Yun¹ Yong-Seok Seo^{1*}, and Si-Hyun Park²

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Underground Facility Dept.

터널이 굴착되면 응력이 재분배 되는 과정동안 변위가 발생한다. 터널의 변위는 굴착 전 선행변위, 굴착 후 미측정 변위, 계측변위로 구분할 수 있다. 일반적으로 굴착 전 선행변위와 굴착 후 미측정 변위의 현장 측정은 어렵기 때문에 터널 굴착에 따른 전변위의 크기와 변화 양상을 산정하기 위한 연구가 많이 수행되어왔다. 본 연구에서는 퇴적암을 기반으로 하는 터널의 지반등급별 전변위를 산정하고 이들의 특성을 파악하기 위하여 역해석 기법을 사용하였다. 계측변위와 3차원 수치해석에 의해 계산된 변위의 오차를 최소한으로 줄여 지반등급별 물성치를 추정하였으며, 굴착에 따른 전변위 분포 양상을 산정하였다. 최종적으로 logistic 모형을 따르는 지반등급별 굴착에 따른 변위의 비선형 회귀식을 산정하였다.

주요어 : 계측변위, 3차원 수치해석, 역해석, 비선형회귀식, Logistic 모형

Tunnel displacement happens during the process of stress redistribution by tunnelling. Tunnel displacement can be divided into 3 types such as displacements occurring before excavation, non-measured displacements after excavation and measured displacements after excavation. Because measurements of displacements occurring before excavation and non-measured displacement after excavation are difficult and time-consuming in the field, many researchers have studied on total displacement and its characteristics with excavation using numerical analysis. In this study, we used a 3-D back analysis to estimate total displacement by rock mass grades in tunnel constructed in sedimentary rock. We reduced error between measured displacements and calculated displacements from a 3-D numerical analysis, and then estimated suitable rock mass properties by RMR classes. Ultimately, Logistic nonlinear regressions of total displacement with tunnelling were estimated by least square estimation.

Key words : measured displacement, 3-dimensional numerical analysis, back analysis, nonlinear regression, Logistic model

서 론

일반적으로 안정상태의 지반은 굴착이 이루어짐에 따라 막장을 기준으로 종방향과 횡방향의 아칭현상이 발생하며, 지반의 손실 하중을 3차원적으로 분산시킴으로써 변위가 발생하게 된다. 굴착의 영향은 막장이 굴착되기 이전부터 작용하여 막장 전방 변위를 발생시킨다. 지

반은 굴착이 이루어지는 무지보의 막장면에서 가장 불안정한 상태를 이루게 되고, 지보재가 설치됨에 따라 점차 안정화 되어간다. 터널 굴착이 지반거동에 미치는 영향은 계측지점이 막장에서 멀어짐에 따라 감소하며, 이와 같은 이유로 터널 변위는 점차 수렴한다.

터널 시공현장에서 행해지는 A계측은 막장이 굴착된 후 환기 및 버력 처리에 필요한 일정한 시간과 막장에

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

서의 거리를 두고 측정을 시작하게 된다. 따라서 굴착 전 지반에서 발생하는 변위의 양과 막장 형성 후 측정 개시까지 발생하는 변위의 양을 정량적으로 파악하기 어렵다. Parnet and Guenot(1982)은 터널 굴착에 의해 발생하는 변위를 굴착 전 변위(U_a), 굴착 후 미측정 변위(C_a) 그리고 계측가능 변위(C_m)로 구분하여 변위곡선을 제안하고 있다(Fig. 1). 실제로 여러 연구결과들에 의하면 굴착 전 이미 상당량의 선행변위가 발생하게 되며, 정량적인 선행변위의 양을 측정함으로써 굴착에 따른 지반의 전 변위를 산정할 수 있다. 하지만 선행변위 계측은 많은 시간과 비용이 소모되므로 일반적인 지반에서 측정할 사례는 드물다.

선행변위를 파악할 수 있는 방법에는 모형실험을 통한 방법, 수치해석을 이용한 방법, 실제 계측을 통한 방법 등이 있다. 실제 계측을 위해서는 흔히 수평경사계 또는 파이프 변형률계 등을 사용한다(서용석 등, 2006). 하지만 이를 위해서는 많은 시간과 비용이 소모되므로 일반적인 지반에서의 측정 사례는 드물다. 현장 계측을 통한 선행변위 측정은 대부분 Umbrella Arch의 보강효과를 분석하기 위한 연구의 일환으로 수행되어 왔다(Pelizza et al., 1994; Harazaki et al., 1998; Shirakawa et al., 1999). 국내에서도 배규진 등(1997), 서용석 등(2002)에 의해 산발적인 연구가 수행된 바 있다. 하지만 계측기기 가격이 비싸며, 시험 방법 등의 이유로 현장에서 사용하기에는 다소 힘들다. 이런 이유로 국내에서는 수치해석을 통한 선행변위 및 전변위 산정에 관한 연구가 더 많은 편이다. 이들 연구의 대부분은 토포가 낮거나 단층대 등 연약대 구간을 대상으로 하였으며, 선행보강에 대한 평가가 주된 목적이다.

수치해석 기법의 발달에 따라 연구자들은 이들을 터널 계측 자료의 안정성을 확인하기 위한 수단으로 이용

할 뿐만 아니라, 계측값을 이용하여 지반의 물성 및 초기 지압 등을 역산하려는 연구가 많이 수행되어 왔다. 이러한 연구는 초기에 Gioda and Majer(1980), Cividini et al.(1981), Hisatake and Ito(1985), Sakurai and Takeuchi(1983) 등에 의해 주도되었다. 국내에서는 이정인 등(1992), 김문겸 등(1995), 허종석 등(1996), 민덕기 등(1996), 이연규와 이정인(1997), 김정환 등(2001)에 의해 수치해석에 의한 변위와 계측변위가 최소의 오차로 일치하도록 하는 역해석에 관한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 현장 변위 계측치를 이용한 역해석을 통해 일반적인 지반에서의 전변위를 산정하였다. 퇴적암을 기반으로 하는 OO 터널의 계측결과를 RMR 평가에 의한 암반등급에 따라 분류하여, 각 등급 별 대표적인 계측변위를 산정하였다. 그리고 역해석을 통해 지반의 역학적 성질을 역산하였다. 역산을 통해 구한 지반 물성치를 입력하여 터널의 전 변위 그래프를 도출하였으며, 최종적으로 굴착에 따른 터널 변위의 비선형 회귀식을 제시하였다.

OO 터널의 계측변위 특성

본 연구의 대상으로 선정된 OO 터널은 퇴적암을 기반으로 하며, 저각의 층리가 발달한 셰일 및 사암이 우세하다. OO 터널의 계측지점은 총 199개소이며, 이 중 일반적인 지반에 해당하지 않는, 즉 단층대나 연약대 등의 분포로 인해 보조공법이 포함되는 VI등급 보강 패딩이 적용된 16개소를 제외하면 183개 지점이다. RMR 평가에 의한 지반 등급 별 계측지점의 개수는 Table 1에 나타내었다.

계측편이 설치된 후 측정된 변위는 굴착의 영향으로 발생하는 전체 변위 중 Fig. 1의 C_m 부분에 해당된다. 일반적으로 A 계측에 의해 측정되지 못한 변위는 측정 변위보다 더 큰 경우가 많다. 측정된 계측변위는 IV 등급의 15개 지점에서의 막장 거리에 따른 천단침하를 도시한 Fig. 2와 같이 지반 등급별로 구분하여 정리하였다. 등급별 계측변위에 대해 최종 변위의 상한, 하한 그리고 평균 변위를 산정하였으며, 이 결과는 Table 1에 요약하였다. OO 터널에서 측정된 전체 지반의 평균 최종 침하량은 약 4.3 mm이다. 일반적으로 지반이 불량할수록 변위가 클 것으로 예상되지만 등급에 따른 천단침하의 상관성은 보이지 않으며, 오히려 V 등급 지반의 평균 천단침하량이 가장 낮은 값을 보인다. 이는 평가된 등급

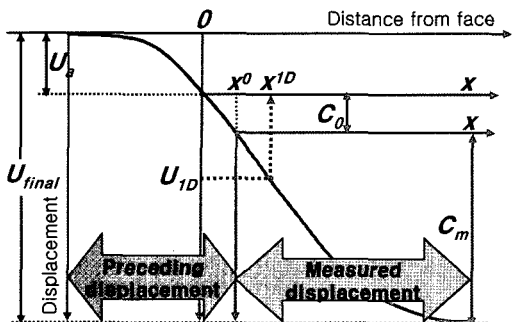
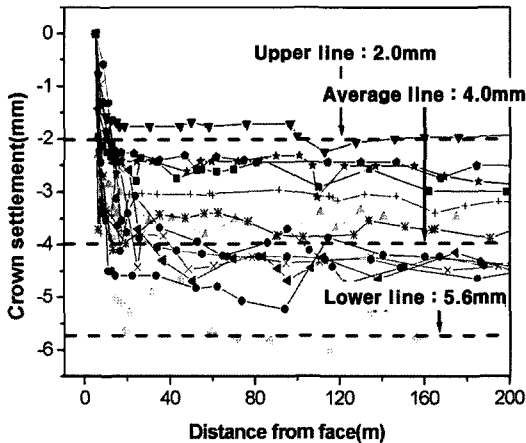


Fig. 1. Crown settlements due to excavation of tunnel.

Table 1. Converged crown settlements of each rock type.

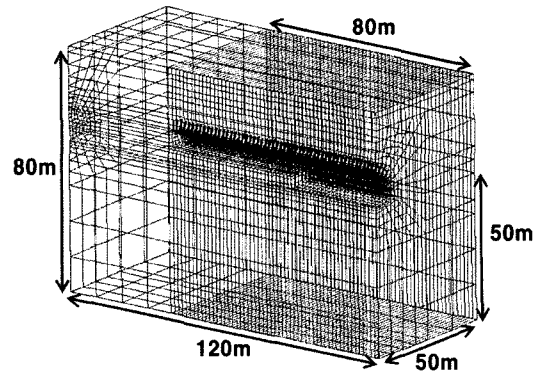
Rock type	I	II	III	IV	V
Upper line (mm)	-2.7	-2.5	-1.6	-2.1	-2.1
Average line (mm)	-4.7	-4.2	-4.6	-4.0	-3.4
Lower line (mm)	-6.9	-7.6	-7.6	-5.7	-7.0
Number of Monitoring points	8	37	100	15	23

**Fig. 2.** Measured crown settlements of IV-type rock mass.

에 따라 적용된 지보체에 의한 보강 효과로 볼 수 있다.

3차원 수치해석

터널의 굴착에 따른 전변위 분포 곡선을 산정하기 위하여 본 연구에서는 3차원 수치해석을 통한 역해석 기법을 사용하였다. 터널 시공 시 변위나 응력 등을 계측한 경우, 역해석을 통해 일반적인 응력 해석 방법과는 반대의 순서로 변위나 응력을 입력치로 하여 암반의 탄성계수, 초기 응력 등을 구할 수 있다. 일반적인 역해석 방법으로는 직접법(direct method)과 역순법(inverse method) 등이 있다. 역순법은 일반적인 응력 해석 방법의 역으로, 응력 해석의 지배 방정식을 역순으로 하는 새로운 프로그래밍과 과정을 필요로 한다. 본 연구에서는 직접법을 사용하였다. 직접법은 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 최소화 될 때까지 수치해석과정의 반복연산을 통하여 자동으로 역해석 대상인 미지 매개변수를 수정하는 방법이다(민덕기 등, 1996). 본 연구에서는 지반 등급별 최소, 최대, 평균 최종 천단변위와 수치해석 결과 중 Fig. 1에서 C_m 에 해당되는 변위가 오차범위 내로 근접할 때 까지 반복적으로 해석을 수행하였다.

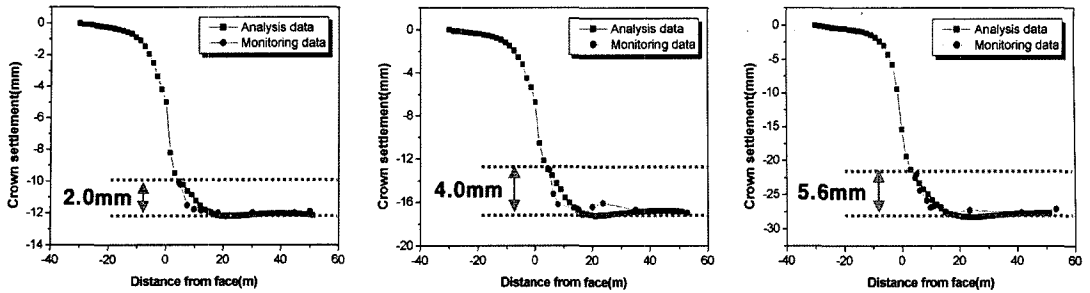
**Fig. 3.** A mesh for 3-dimensional analysis.

해석모델

지반 물성치의 역산을 위해 각 지반 등급 별 5개의 해석 모델을 작성하였으며, 지반 구조해석용 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON 3D를 사용하였다. 해석 모델은 터널의 형상, 굴착방법, 1회 굴진장, 보강 패턴 등을 실제 시공된 내용을 근거로 작성하였다. 터널 심도는 김학준 등(2006)에 의해 제시된 국내 지반의 심도별 RMR 분포 특성에 근거하여 각 등급별 평균 심도를 적용하였다. Fig. 3은 IV 등급 지반의 해석 모델이다. IV 등급 지반의 해석 모델의 총 요소수와 절점수는 각각 20,554개, 23,134개이며 하나의 요소는 4개의 절점으로 구성된다. 상하반 분할 굴착을 가정하여 총 80m를 굴착하였다. 역해석을 위한 요소망의 구성에 있어서 절점은 계측점의 위치와 일치하도록 하였다. 80m의 굴착거리 중 해석 대상 절점은 30m 지점으로 선정하여 선행 변위 30m, 굴착 후 발생하는 변위 50m를 확인할 수 있게 하였다.

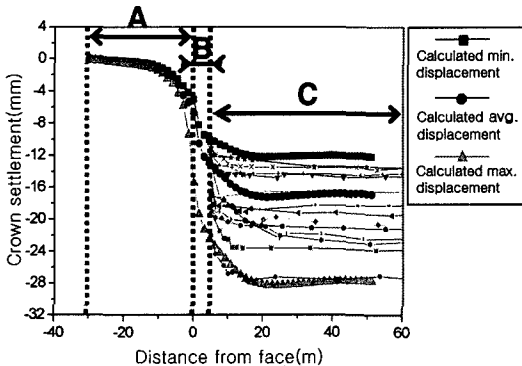
역해석을 통한 전변위 곡선 산정

IV 등급 지반의 계측된 천단침하와 수치해석에 의한 천단침하를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 최소 침하량, 최대 침하량, 평균 침하량에 대한 수치해석 결과와 계측 결과를 막장으로부터의 거리에 따라 함께 도시하였다.



(a) Minimum displacement (b) Average displacement (c) Maximum displacement

Fig. 4. The comparison of measured and calculated crown settlements for IV-type model.



A: Displacement occurring before excavation
 B: Non-measured displacement after excavation
 C: Measured displacement after excavation

Fig. 5. The range of displacements for IV-type rock mass.

Fig. 5는 IV 등급 지반에 대한 수치해석에 의해 최종적으로 산출된 전 변위 곡선과 실제 계측된 천단침하량을 함께 도시한 것이며, 그림에서 A, B, C는 각각 굴착 전 선행변위, 굴착 후 미계측 변위, 계측변위 구간에 해당된다. 실제 계측된 변위의 분포는 대부분 수치해석에 의해 계산된 변위 곡선의 범위 내에 포함된다.

Table 2는 저각의 층리면이 발달한 퇴적암을 기반으로 하는 OO 터널의 변위 특성에 대한 수치해석 결과를 요약한 것이다. 최대 변위, 최소 변위, 평균 변위는 지반 등급에 따라 뚜렷하지는 않지만, 지반 등급이 좋을수록 최종 천단침하량은 커진다. 하지만 최종 침하량은 서로 다른 보강 패턴이 적용되었고, 각 지반 등급별 해석 모델에서의 터널 심도를 달리 하였기 때문에 직접적인 비교는 무의미하다. 즉 Table 2의 결과는 더 양호한 상태의 지반일수록 깊은 심도에 해당되며, 더 불량한 상태의 지반일수록 많은 보강재가 적용되었음을 감안하여야 한

다. 평균 변위량의 굴착 전 선행변위를 살펴보면, 전체 변위량을 100%로 두었을 때, I, II, III, IV, V 등급 각각 62.7%, 56.0%, 58.3%, 55.1%, 48.5%이다. 굴착 후 미계측 변위는 반대로 I등급 지반에 18.0%로 가장 낮으며 굴착 전 선행변위와는 반대의 경향을 보인다. 이는 막장 굴착이 완료된 후부터 지보재가 설치될 때까지의 가장 불안정한 기간 동안, 지반의 상태가 불량할수록 무지보 상태에서 많은 변위가 발생하였음을 의미한다. 계측변위는 상대적으로 지반 등급별로 큰 편차를 보이지 않는다. 이는 설치된 지보에 의해 변위가 일정 수준으로 억제되었기 때문이다.

비선형 회귀식 선정

비선형 회귀모형

본 연구에서는 막장 거리에 따른 변위 곡선을 표현하고 시간의 흐름에 따라 얻어지는 누적 자료를 설명하기 위하여 비선형 성장곡선모형(Growth curve model)을 채택하였다. 대표적인 비선형 성장곡선 모형으로는 Logistic 모형, Gompertz 모형, Probit 모형 등이 있는데, 이 중 S자형의 형태를 갖는 Logistic 모형이 굴착에 따른 변위의 변화를 잘 나타내는 것으로 나타났다.

Logistic 모형은 일반적으로 다음과 같은 형태를 가진다.

$$Y_i = \frac{K}{1 + \exp(\alpha - \beta t)} + \epsilon_i \quad (1)$$

여기서, Y_i = 누적관측값
 α, β = 모수
 K = 극한값
 ϵ_i = 오차

Table 2. Calculated displacements using 3D numerical analysis during excavation.

Rock type	Parameter	Minimum displacement		Maximum displacement		Average displacement	
		Crown settlement (mm)	Displacement ratio (%)	Crown settlement (mm)	Displacement ratio (%)	Crown settlement (mm)	Displacement ratio (%)
I	Total displacement	-13.9	100	-35.3	100	-24.4	100
	Displacement before excavation	-8.6	61.9	-22.1	62.6	-15.3	62.7
	Non-measured displacement after excavation	-2.6	18.7	-6.3	17.8	-4.4	18.0
	Measured displacement after excavation	-2.7	19.4	-6.9	19.6	-4.7	19.3
II	Total displacement	-12.0	100	-37.8	100	-20.0	100
	Displacement before excavation	-6.6	55.0	-21.9	57.9	-11.2	56.0
	Non-measured displacement after excavation	-2.9	24.2	-8.3	22.0	-4.6	23.0
	Measured displacement after excavation	-2.5	20.8	-7.6	20.1	-4.2	21.0
III	Total displacement	-7.0	100	-38.6	100	-22.3	100
	Displacement before excavation	-3.8	54.3	-23.7	61.4	-13.0	58.3
	Non-measured displacement after excavation	-1.6	22.85	-7.3	18.9	-4.7	21.1
	Measured displacement after excavation	-1.6	22.85	-7.6	19.7	-4.6	20.6
IV	Total displacement	-9.0	100	-28.0	100	-19.6	100
	Displacement before excavation	-4.4	48.9	-16.1	57.5	-10.8	55.1
	Non-measured displacement after excavation	-2.5	27.8	-6.2	22.1	-4.8	24.5
	Measured displacement after excavation	-2.1	23.3	-5.7	20.4	-4.0	20.4
V	Total displacement	-11.5	10.0	-24.7	100	-16.5	100
	Displacement before excavation	-5.7	49.6	-9.8	39.7	-8.0	48.5
	Non-measured displacement after excavation	-3.8	33.0	-7.8	31.6	-5.1	30.9
	Measured displacement after excavation	-2.0	17.4	-7.1	28.7	-3.4	20.6

곡선의 모형은 변곡점을 중심으로 좌우대칭의 형태를 가지며, 변곡점의 시점은 $t = \ln \beta / k$, 변곡점은 $Y_f = (1/2)K$ 이다.

비선형 회귀식의 모수 추정

비선형 회귀식의 모수를 추정하기 위하여 최소제곱추정법(Least square estimation)을 사용하였다. 최소제곱추정치는 관측된 자료와 모형으로부터의 추정치들 간의 총 제곱거리를 최소화하는 모수값을 말한다. 즉 n 개의 관

측값에 대해 식 (2)를 최소화하는 모수값을 의미한다.

$$Q = \sum (관측값_i - 모형값_i)^2, i=1,2,\dots,n \tag{2}$$

식 (2)는 비선형 회귀식의 정의에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, \theta)]^2 \tag{3}$$

Table 3. Estimated parameters of the logistic model for estimation of displacement curve.

Rock type	Displacement curve	Parameter estimates			95% confidence interval of parameter estimates			R ²
		α	β	K	α	β	K	
I	Minimum	-0.211	0.348	-33.995	(-0.422, 0.007)	(0.286, 0.410)	(-34.699, -33.291)	0.993
	Maximum	-0.197	0.350	-23.560	(-0.411, 0.016)	(0.287, 0.413)	(-24.053, -23.068)	0.993
	Average	-0.184	0.351	-13.422	(-0.400, 0.312)	(0.287, 0.416)	(-13.706, -13.138)	0.993
II	Minimum	-0.014	0.342	-36.621	(-0.164, 0.136)	(0.297, 0.387)	(-37.193, -36.049)	0.994
	Maximum	0.057	0.344	-19.403	(-0.096, 0.210)	(0.298, 0.390)	(-19.714, -19.093)	0.994
	Average	0.094	0.345	-11.571	(-0.062, 0.250)	(0.298, 0.392)	(-11.760, -11.382)	0.994
III	Minimum	-0.110	0.327	-37.434	(-0.264, 0.044)	(0.284, 0.370)	(-38.041, -36.826)	0.994
	Maximum	0.135	0.324	-6.786	(-0.022, 0.292)	(0.279, 0.368)	(-6.902, -6.670)	0.993
	Average	-0.006	0.327	-21.586	(-0.160, 0.147)	(0.284, 0.371)	(-21.940, -21.231)	0.994
IV	Minimum	0.018	0.328	-27.347	(-0.087, 0.123)	(0.298, 0.358)	(-27.655, -27.039)	0.995
	Maximum	0.093	0.334	-19.171	(-0.011, 0.198)	(0.303, 0.364)	(-19.384, -18.957)	0.995
	Average	0.285	0.327	-8.773	(0.179, 0.391)	(0.297, 0.356)	(-8.873, -8.673)	0.995
V	Minimum	0.961	0.352	-25.726	(0.776, 1.147)	(0.306, 0.397)	(-26.135, -25.317)	0.990
	Maximum	0.560	0.430	-16.920	(0.417, 0.704)	(0.380, 0.480)	(-17.130, -16.709)	0.993
	Average	0.475	0.471	-11.726	(0.346, 0.604)	(0.421, 0.604)	(-11.853, -11.600)	0.995

Logistic model
$$Y_i = \frac{K}{1 + \exp(\alpha - \beta t)} + \varepsilon_i$$

α, β : Parameter estimates
K : Limiting value

최소제곱추정은 식 (3)을 최소화하는 θ 를 구하는 과정이다. 함수 f 가 모수에 대해 선형적인 경우는 해석적으로 구할 수 있다. 그러나 비선형인 경우 정규방정식의 해를 구하기는 쉽지가 않다. 본 연구에서는 반복적인 최적화과정을 통해 Logistic 모형에서의 모수를 추정하였다. 최소제곱추정에 의한 모수를 적용한 IV 등급 지반의 최소, 최대, 평균 변위 곡선을 수치해석에 의해 계산된 변위 분포와 함께 Fig. 6에 나타내었다.

식 (1)의 Logistic 모형에서 모수 β 는 그래프의 경사를 결정한다. $|\beta|$ 가 작으면 그래프는 직선에 가깝게 일정한 경사를 가지며, $|\beta|$ 가 클수록 양쪽 끝 부분은 수평

에 가까우며 그래프의 중간부분은 급한 경사를 가진다. 따라서 $|\beta|$ 의 값이 클수록 상대적으로 굴착 시점 전 후로 급격히 변위가 발생한다는 것을 의미한다. α 는 x축 방향으로의 평행이동을 지시한다. α 가 양의 부호인 경우 음의 경우보다 그래프가 좌측에 위치한다. 이는 다른 모수가 같은 경우, α 의 부호가 양의 방향으로 클수록 굴착에 의한 선행변위가 상대적으로 일찍 발생하고 굴착 후 지반의 안정화에 따른 변위의 수렴이 빠름을 의미한다. K는 천단침하 곡선에서는 항상 음수이며, 극한값에 해당된다. 이는 굴착 전 선행변위, 굴착 후 미세측 변위, 계측 변위를 모두 포함하는 전변위의 크기에 해당된다.

Table 3은 각 암반 등급 별 최대, 최소, 평균 침하 곡선의 모수를 추정한 결과이다. 극한값 K는 Table 2의 전체 침하량과 거의 일치한다. 비선형 모형의 분자와 분모에 각각 $1/K$ 로 곱하여 분자를 일정하게 한 후 β/K 를 비교하면 기울기를 확인할 수 있다. I, II, III, IV, V등급의 β/K 는 -0.026, -0.030, -0.015, -0.037, -0.040이다. III등급을 제외하면, 지반 상태가 나빠질수록 β 가 커진다. 이것은 암질이 불량할수록 막장 굴착 시 지보가 설치되기 전까지는 급격한 변위가 발생함을 의미하며, 이 결과는 수치해석 결과와 부합한다.

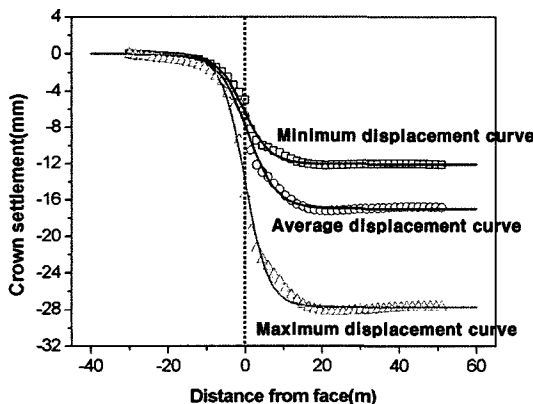


Fig. 6. Estimated displacement curves of IV-type rock mass by least square estimation.

결론

본 연구에서는 3차원 수치해석을 통해 퇴적암 터널의

지반 등급별 전변위 분포 특성을 산정하였다. 또한 산정된 전변위 분포 특성에 부합되는 비선형 회귀식을 도출하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 퇴적암을 기반으로 하는 OO 터널의 계측된 평균 최종 천단침하량은 4.3 mm이다. 암반 등급별로 침하량은 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 평가된 지반등급에 부합하는 보강재가 적용되어, 일정한 수준으로 변위가 제어되었음을 의미한다.

(2) 역해석을 통해 구해진 각 지반 등급별 물성치를 적용한 수치해석 결과, 굴착전 선행변위는 I, II, III, IV, V 등급 각각 전체변위의 62.7%, 56.0%, 58.3%, 55.1%, 48.5%이다. 굴착후 미계측 변위는 각각 18.0%, 23.0%, 21.1%, 24.5%, 30.9%이다. 이는 막장 굴착이 완료된 후부터 지보재가 설치될 때까지의 가장 불안정한 기간 동안, 지반의 상태가 불량할수록 무지보 상태에서 많은 변위가 발생하였음을 의미한다. 계측변위는 상대적으로 지반 등급별로 큰 편차를 보이지 않는다. 이는 현장 계측결과와 유사한 결과이며, 지반 등급별로 설치된 지보에 의해 변위가 일정 수준으로 억제되었기 때문이다.

(3) 굴착에 따른 천단침하의 비선형 회귀식 산정을 위해, 비선형 성장곡선모형의 일종인 Logistic 모형을 채택하였다. 극한값 K 는 수치해석 결과에 의한 전변위의 크기와 거의 일치한다. I, II, III, IV, V등급의 β/K 는 -0.026, -0.030, -0.015, -0.037, -0.040이다. III등급을 제외하면 지반 상태가 나빠질수록 $|\beta/K|$ 가 커지며, 이는 암질이 불량할수록 막장 굴착 시 지보가 설치되기 전까지는 급격한 변위가 발생한다는 수치해석 결과를 잘 설명한다.

사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김문겸, 장정범, 박태균, 1995, 탄소성 지반내 터널굴착에 따른 역해석, 대한토목학회지, 15(2), pp.483-490.
 김정환, 배기열, 최용규, 2001, 수평경사계를 이용한 초기변위 측정과 역해석, 대한토목학회 학술발표회, pp.2014-2017.
 김학준, 이성호, 신유성, 배규진, 2006, 국내 암반분류 사례를 통한 싱글셀 터널 지보량 산정 연구, 대한지질공학회지, 16(3), pp.283-291.

민덕기, 최석옥, 박명철, 1996, 터널의 계측변위를 이용한 역해석기법에 관한 연구, 가을학술발표논문집, 한국지반공학회, pp.71-78.
 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완, 1997, Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 7(4), pp.299-309.
 서용석, 임성빈, 박시현, 안명운, 우상백, 2006, 터널 시공 중 막장 선행변위 계측기법, 대한지질공학회지, 16(3), pp.307-313.
 서용석, 홍성완, 배규진, 김광엽, 손창규, 오병화, 2002, 능동터널 막장 선행변위 계측을 위한 현장 시험, 제 57차 추계공동학술발표회, 91p.
 이연규, 이정인, 1997, 다단계 터널굴착시 계측된 증분변위를 이용한 역해석 기법의 개발, 한국지반공학회지, 13(1), pp.123-136.
 이정인, 김치환, 이연규, 1992, 현장 변위 계측치를 이용한 역해석, 대한토목학회 학술발표회, pp.372-376.
 허종석, 이정인, 조태진, 이연규, 1996, 연암에 굴착되는 터널의 계측변위를 이용한 역해석, 한국자원공학회지, 33(6), pp.438-447.
 Cividini, A., Majer, G. and Nappi, A., 1983, Parameter estimation of a static geotechnical model using a Bayes approach, International Sciences & Geomechanics Abstracts, pp.215-220.
 Gioda, G. and Majer, G., 1980, Direct search solution of an inverse problem in elastoplasticity; Identification of cohesion, friction angle and in-situ stress by pressure tunnel test, Int. J. Num. Meth. Engng., 15, pp.1823-1848.
 Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T. and Hakoishi, Y., 1998, Field observation of large tunnel supported by umbrella method; Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan, Proc. of the World Tunnel Cong., 98 on Tunnels and Metropolises, 2, pp.1009-1014.
 Hisatake, M. and Ito, T., 1985, Back analysis for tunnels by optimization method, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, pp.1301-1304.
 Panet, M. and Guenot, A., 1982, Analysis of convergence behind the face of tunnel, Tunnelling 82, IMM, Brighton, pp.197-204.
 Pelizza, S., Pelia, D. and Oreste, P. P., 1994, A new approach for ground reinforcing design in tunnelling, soil and rock reinforcements, Tunnelling and Ground Condition, Abdel Salem(ed), Balkema, pp.517-522.
 Sakurai, S. and Takeuchi, K., 1983, Back analysis of measured displacements of tunnel, Rock Mechanics and Rock Engineering, pp.173-175.
 Shirakawa, K., Aoki, T., Fujii, Y. and Nakao, T., 1999, Excavation through semicircular-shaped shell formed by umbrella method at fault zone beneath densely residential area, Proc. of the World Tunnel Cong. 99 on Challenge for the 21st Century, 1, pp. 441-447.

임성빈

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: bins123@hanmail.net

윤현석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: yhs0211@hanmail.net

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

박시현

한국시설안전기술공단 지하시설실
411-758, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-4085
Fax: 031-910-4178
E-mail: parksh@kistec.or.kr