

3차원 수치해석을 이용한 연약대 방향에 따른 터널 거동 특성 평가

임성빈¹ · 정해근¹ · 서용석^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과

Assessment of Tunnel Displacement with Weak Zone Orientation using 3-D Numerical Analysis

Sung-Bin Yim¹, Hae-Geun Jeong¹, and Yong-Seok Seo^{1*}

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

터널 굴착 중 지반에 존재하는 연약대의 방향 특성에 따른 거동 및 응력 분포 특성을 3차원 수치해석을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 수치모델에서 연약대의 방향은 RMR의 취약 불연속면에 대한 보정인자를 기준으로 설정되었으며, 위치는 각 방향 조건에 대하여 연약대가 천단부 상부 1D, 천단부, 막장 중앙부를 지나는 경우로 설정되었다. 지반정수는 현장 계측변위를 기반으로 하는 역해석을 통해 산정하였다. 최종적으로 터널 천단부에서 발생하는 변위의 크기를 기반으로 연약대 방향 및 위치 조건에 따른 영향도를 평가하여 5등급으로 분류하였다.

주요어 : 연약대, 3차원 수치해석, 역해석, RMR 분류법

A 3-D numerical analysis was carried out to observe potential effects of orientation of inherent weak zones to tunnel behaviors and stress distributions during tunnel excavation. Weak zones used for the analysis were placed at the upper 1D part from crown, on the crown and on the center of face, using orientations derived from the 6th RMR parameter for assessment of joint orientation effect on tunnel. Mechanical properties of rock mass were derived through a in-situ displacement measurement-based back analysis. Finally, a classification chart for crown settlement with five ranks based on orientation and location of weak zones is suggested.

Key words : weak zone, 3-D numerical analysis, back analysis, RMR system

서 론

터널의 효율적이고 안전한 설계 및 시공을 위해 지반의 역학적 특성과 지질 구조를 파악하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 설계 단계에서 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사 등의 예비조사를 수행한다. 하지만 길고 긴 터널의 기하학적 특성상 굴착 전 획득한 정보만으로는 노선을 따른 복잡한 지질변화 특성을 정확히 예측하기는 어렵다. 특히 다양한 생성환경에 따라 서로 다른 지질조건을 갖추고 있는 지반은 쉽게 예측할 수 없는 가변성과 불확실성을 항상 내포하고 있으며, 따라서 예상하지 못한 붕괴사고가 빈번하게 발생한다. 일본터널기

술협회(1990)에 의해 수행된 "일본 터널공사 중 지반붕괴사례 실태조사"에 의하면 128건의 조사대상 사례 중 84%가 터널공사의 최전방부인 막장에서 발생하고 있으며, 그 붕괴원인별로는 용수 및 단층파쇄대 등과 같은 지질적 요인에 의한 붕괴가 막장 부근 사고의 89%를 차지한다. 또한 Seidenfub(2006)에 의하면 터널 붕괴의 주요 원인은 연약대 및 지하수의 영향이 거의 50%에 달한다. 국내의 경우 한국건설기술연구원(2005)에서 수행한 터널에서의 붕괴/붕락 원인에 대한 민감도 분석 결과, 붕괴/붕락의 주요 원인이 단층대, 파쇄대 등과 같은 연약대임이 확인되었다.

터널이 굴착되면 응력의 재배치가 일어나는데 이러한

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

Table 1. Overburden depths and support types for 3-D numerical models.

Support type	Overburden depth(m)	Supports			
		Excavated length(m)	Shotcrete thickness(cm)	Rock bolt	
				Length (m)	Spacing (m)
III	30	2.0	12	4.0	1.5

Width : 14.4m, Height : 9.2m, Upper half height : 7.0m

응력의 재배치 현상은 터널의 안정성 확보에 매우 중요하게 작용한다. 일반적으로 지하 암반은 많은 불연속면을 포함하므로 응력의 재배치 과정은 매우 복잡하다. 만약 막장 전방에 단층대 등의 연약대가 존재하게 되면 응력 전이가 충분히 이루어지지 않아 막장과 연약대 사이에 응력 집중이 발생하게 되며 극단적으로는 붕괴나 봉락이 초래될 수 있다(Goricki et al., 2004). 따라서 연약대 분포 지반에서의 굴착에 따른 터널의 거동 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히 최근 터널 굴착에 따른 변위를 활용한 한계변형률 개념의 막장 안정성 평가 기법에 대한 연구가 수행되고 있으며(박시현과 신용석, 2007), 이러한 변위 개념의 평가에 있어서는 막장 주변의 변위 특성 평가가 선행되어야 한다. 이러한 이유로 최근 막장 전방 연약대에 의한 지반의 3차원적 거동 특성을 평가하기 위한 다양한 수치해석적 연구가 활발히 수행되고 있다(이인모 등, 2001; 김기선 등, 2003; 박연준 등, 2004; 김광염, 2007).

본 연구에서는 3차원 수치해석을 통해 연약대의 방향 특성에 따른 굴착에 의한 막장 부근의 변위 및 응력 분포 특성을 평가하였다. 현실적인 지반정수의 산정을 위해 계측변위를 기반으로 역해석을 수행하였으며, 연약대의 방향 특성은 Bieniawski(1989)에 의한 터널에서의 취약 불연속면 방향 특성의 경험적 평가 기준인 RMR 방향성 보정인자를 근거로 설정하였다. 이를 바탕으로 경험에 근거한 불연속 해석 관점에서의 방향성에 따른 보정 인자를 연속체 해석을 통한 변위 관점에서의 재평가를 수행하였다.

지반정수 산정

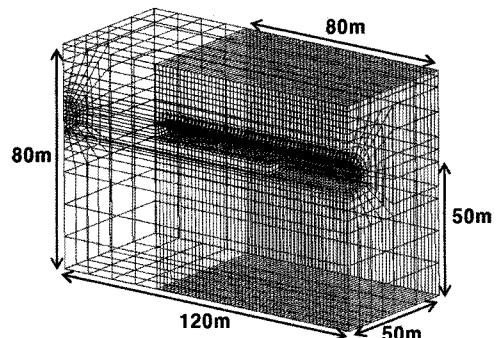
본 연구는 다양한 연약대 분포 조건에 따른 굴착 중 막장 주변의 변위 및 응력 분포 특성을 평가함이 목적이다. 이를 위해 퇴적암 III등급 지반 조건을 기본 모델로 설정하였으며, 서로 다른 연약대 조건을 가정하였다. III등급 지반의 물성을 산정하기 위하여 계측변위를 활용한 역해석을 수행하였다. 실제 터널 시공 현장을 선정하여 터널 형상, 굴착 방법, 굴진장, 보강 패턴 등을 재현한 3차원 해석모델을 작성하였으며, 현장계측결과와 수

치해석 결과가 오차범위 내로 근접할 때 까지 반복적으로 해석을 수행하였다.

해석모델 작성

해석모델 작성을 위해 선정된 대상 터널은 OO 고속도로의 병설 3차로 터널로 상·하행 각각 1,598 m, 1,508 m의 연장을 가진다. 대상 터널의 기반암은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군의 퇴적암류가 주를 이루며 일부 관입암 및 화강암류로 구성된다. 터널의 단면과 폭은 각각 14.4 m, 9.2 m이며, 상반의 높이는 7 m이다. Table 1과 같이 III등급 지반의 1회 굴진장은 2.0 m, 슛크리트 두께는 12 cm이며, 4.0 m 길이의 록볼트를 1.5 m 간격으로 타설하였다. 본 연구에서는 상기 조건을 반영한 3차원 수치해석 모델을 작성하였다.

Fig. 1은 지반정수의 역산을 위해 작성한 3차원 유한요소망이다. 총 절점수는 23,134개, 지반을 구성하는 4절점 solid 요소는 20,554개, 록볼트의 모델링을 위한 truss 요소는 2,408개 그리고 슛크리트를 모델링한 flame 요소는 602개이다. 굴착에 의한 경계조건의 영향을 고려하여 측면 및 하부경계는 터널 직경의 5배 이상으로 하였다. 경계조건은 상부 지표면은 자유경계조건, 측면과 하부 경계는 각각의 면에 수직 방향의 변위를 구속하는 경계조건을 적용하였다. 상·하반 분할굴착을 가정한 해석모델의 굴착 및 보강 과정은 총 85단계로 구성된다.

**Fig. 1.** A mesh diagram for 3-dimensional analysis.

지반정수 산정을 위한 역산

수치해석을 위해 사용된 지반정수 중 단위중량, 점착력 및 내부마찰각은 Table 2와 같이 국내 터널 설계에 사용된 암종별, 지반 등급별 대표값(한국건설기술연구원, 2006)을 참고하여 결정하였으며, 체적탄성계수와 전단탄성계수는 역산을 통해 산정하였다.

Parnet and Guenot(1982)에 의하면 굴착에 의해 발생하는 변위는 Fig. 2와 같은 형태를 보이며, 굴착 전 변위(U_a), 굴착 후 미측정 변위(C_0), 예측가능 변위(C_m)로 구분된다. 본 연구에서는 3차원 수치해석을 통해 굴착에 따른 변위 곡선을 결정하였다. 이 중 예측가능 변위에 해당하는 변위의 크기가 대상 터널의 III등급 지반 구간 총 100개소에서 측정된 예측변위(Fig. 3)의 평균과 오차범위 내로 근접할 때 까지 반복적으로 해석을 수행하여 탄성계수를 결정하였다. 국내 터널 건설 현장에서의 일반적인 막장에서 최초 예측지점까지의 이격거리가 5~6m임을 감안하여(정형식, 1998), 본 연구에서는 수치

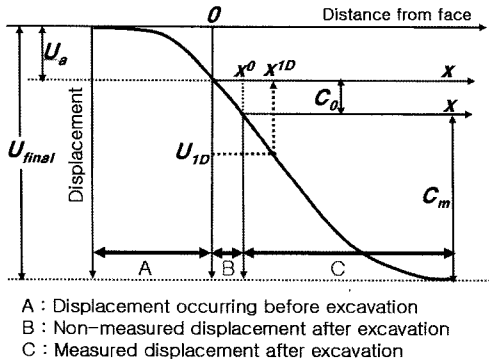


Fig. 2. Displacements due to excavation of tunnel.

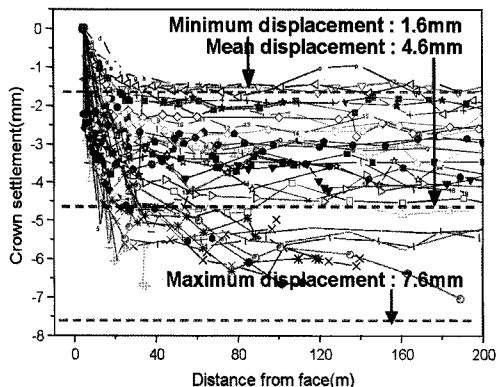


Fig. 3. Measured crown settlements in type-III rock mass.

Table 2. Physical and mechanical properties of the rock mass for 3-D numerical analysis.

Bulk-modulus (MPa)	Shear-modulus (MPa)	Unit weight (kg/m ³)	Cohesion (tf/m ²)	Friction angle (°)
176.52	111.03	2,440	2.45	37.7

해석에 의한 변위곡선 중 막장면 5m 이후부터의 발생 변위를 예측변위로 평가하였다. 역산을 통해 결정된 퇴적암 III등급 조건을 가정한 지반의 체적탄성계수와 전단탄성계수는 Table 2와 같이 각각 176.52 MPa, 111.03 MPa 이다.

3차원 수치해석

연약대 조건 설정

연약대 방향 특성에 따른 굴착 중 발생 변위 및 응력을 평가하기 위하여 3차원 수치해석 모델을 작성하였다. III등급 무보강 상태의 지반을 기본 모델로 하였으며, 해석모델 및 지반정수 조건은 각각 Table 1 및 2와 같다. 기본 모델에 각각 서로 다른 방향을 가지는 연약대를 적용하였으며, 방향 특성은 Table 3과 같이 Bieniawski(1989)에 의한 터널에서의 취약 불연속면 방향 특성의 경험적 평가 기준인 RMR 방향성 보정인자를 근거로 설정하였다. 주향과 무관한 불연속면 조건은 수평의 연약대를 가정하였다. 연약대 폭은 2m로 하였으며, 각 방향 조건별로 연약대가 막장 중앙부를 지나는 경우, 천단부를 지나는 경우, 천단부 상부 1D 지점을 지나는 경우를 가정하여 총 21개의 연약대 분포 지반 해석 모델을 작성하였다. 각 해석모델에서의 연약대 방향 및 위치는 Fig. 4와 같으며, (a), (b), (c)는 각 모델의 측면도이며, (d), (e), (f)는 정면도이다. (g)는 각 모델의 연약대 방향 특성을 스테레오넷상에 투영하여 나타난 것이다.

수치해석 결과 분석

Fig. 5는 굴착의 영향으로 발생한 각 모델별 막장 거리에 따른 천단부 변위를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 연약대가 분포하지 않는 무보강 상태 지반의 굴착에 따른 천단침하 그래프이다. 전변위의 크기는 26.9mm이며 이 중 선행변위는 14.0 mm로 전체 변위의 52.4%에 해당된다. 수평 연약대의 경우인 model I에서는 Fig. 5(b)와 같이 연약대가 터널의 천단부 상부 1D(model I-1), 천단부(model I-2), 굴착면 중앙부(model I-3)를 지나는 경우 각각 46 mm, 66 mm, 51 mm의 천단침하가 발생한다.

Table 3. Assessment of joint orientation effect on tunnel(Bieniawski, 1989).

Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Irrespective of strike
Drive with dip		Drive against dip		Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 0°-20°
Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 0°-20°
Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Fair	Very unfavourable	Fair

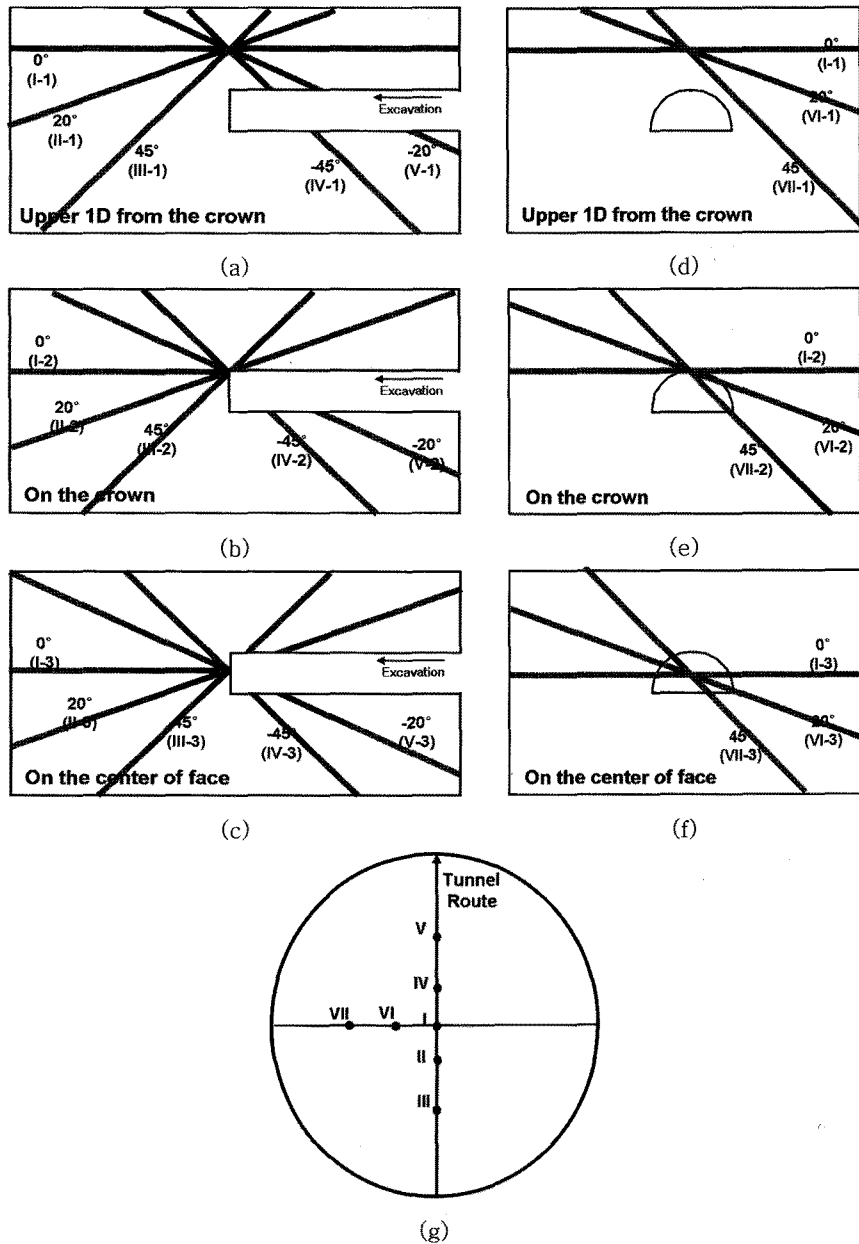


Fig. 4. Orientations and locations of the weak zone on 3D numerical models. (a), (b) and (c) are lateral views, (d), (e) and (f) are front views, and (g) is stereographic projection showing poles of weak zone.

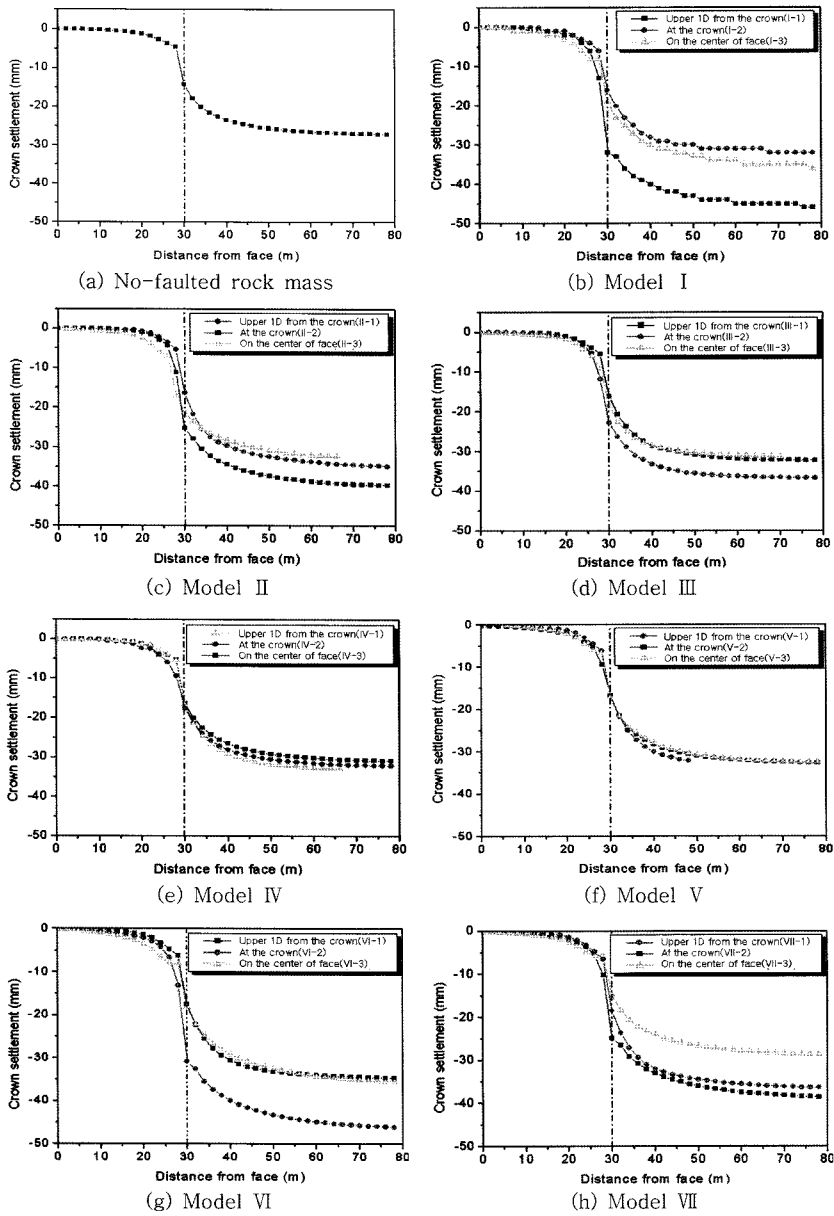


Fig. 5. Crown settlements calculated by 3D numerical analysis.

경사를 가지는 연약대의 경우, 전체적으로 터널 축과 평행한 주향의 연약대 모델(model VI, VII)이 터널 축과 수직인 주향의 연약대 모델(model II, III, IV, V)보다 변위의 크기가 크다. 터널 축과 수직인 주향의 연약대 모델 중에서는 내림경사 방향(model II, III)이 오름경사 방향(model IV, V)보다 더 큰 천단침하가 발생한다. 동일한 경사방향의 모델별로 비교해보면, 45° 경사의

연약대 모델(model III, IV)보다 20° 경사의 연약대 모델(model II, V)에서 천단침하량이 다소 크다. 하지만 터널 축과 수직인 주향의 연약대 중 오름경사 방향 모델(model IV, V)에서는 경사에 의한 변위 차이가 크지 않다.

각 모델별 해석 결과 연약대의 위치에 따른 변위의 크기 차이는 뚜렷한 편이다. 오름경사 방향 연약대 모델(model IV, V)을 제외한 나머지 경우는 모두 연약대가

Table 4. Summarized results of 3-D numerical analysis with weak zone orientation.

Model no.	Equivalent strains (u/a, %)				Maximum stress (t/m ²)
	Total displacement	Pre-displacement before excavation	Non-measured displacement after excavation	Measured displacement	
I-1	0.46	0.23 (50.0%)	0.11 (23.9%)	0.12 (26.1%)	205.77
I-2	0.66	0.46 (69.7%)	0.08 (12.1%)	0.12 (18.2%)	77.27
I-3	0.51	0.27 (52.9%)	0.10 (19.6%)	0.14 (27.5%)	201.59
II-1	0.50	0.23 (46.0%)	0.15 (30.0%)	0.12 (24.0%)	208.07
II-2	0.57	0.36 (63.2%)	0.10 (17.5%)	0.11 (19.3%)	62.17
II-3	0.46	0.30 (65.2%)	0.07 (15.2%)	0.09 (19.6%)	221.95
III-1	0.46	0.23 (50.0%)	0.12 (26.1%)	0.11 (23.9%)	223.08
III-2	0.52	0.33 (63.5%)	0.11 (21.2%)	0.08 (15.4%)	91.96
III-3	0.45	0.26 (57.8%)	0.10 (22.2%)	0.09 (20.0%)	214.94
IV-1	0.47	0.24 (51.1%)	0.13 (27.7%)	0.10 (21.3%)	213.65
IV-2	0.46	0.25 (54.3%)	0.11 (23.9%)	0.10 (21.7%)	81.80
IV-3	0.44	0.23 (52.3%)	0.11 (25.0%)	0.10 (22.7%)	216.58
V-1	0.46	0.24 (52.2%)	0.13 (28.3%)	0.09 (19.6%)	234.11
V-2	0.47	0.24 (51.1%)	0.12 (25.5%)	0.11 (23.4%)	116.29
V-3	0.46	0.24 (52.2%)	0.12 (26.1%)	0.10 (21.7%)	197.88
VI-1	0.49	0.25 (51.0%)	0.13 (26.5%)	0.11 (22.4%)	221.20
VI-2	0.66	0.44 (66.7%)	0.08 (12.1%)	0.14 (21.2%)	142.85
VI-3	0.49	0.25 (51.0%)	0.12 (24.5%)	0.12 (24.5%)	207.58
VI-1	0.52	0.26 (50.0%)	0.13 (25.0%)	0.13 (25.0%)	211.40
VI-2	0.55	0.35 (63.6%)	0.09 (16.4%)	0.11 (20.0%)	141.14
VI-3	0.41	0.21 (51.2%)	0.09 (22.0%)	0.11 (26.8%)	209.14
No-faulted	0.39	0.20 (51.3%)	0.10 (25.6%)	0.09 (23.1%)	205.98

천단부에 위치할 때 변위가 가장 크다.

각각의 해석모델별 변위 특성은 Table 4에 요약하였다. 전변위에 대한 굴착 전 선행변위, 굴착 후 미측정 변위, 계측가능 변위의 비율을 산정하였으며, 각 변위는 터널 반경으로 나눈 등가 변형률로 나타내었다.

굴착이 진행됨에 따라 변화되는 응력분포 특성을 분석하면 다음과 같다. Fig. 6은 model IV, 즉 연약대의 주향이 터널 축과 수직방향이며 45°의 내림경사를 가지는 경우의 굴착에 따른 천단부에서의 응력변화를 나타낸 것이다. 각 모델별 최대 응력의 크기는 Table 4에 요약하였다. 각 모델별로 연약대가 천단부 상부 1D를 지나는 경우와 막장 중앙부를 지나는 경우의 최대 응력은 연약대가 없는 경우와 큰 차이가 없으나, 연약대가 천단부를 지나는 경우는 응력의 크기가 작아진다. 연약대 방향 특성별로 구분하면, 연약대의 주향과 터널 축의 주향이 평행한 경우(model VI, VII)의 응력이 가장 크며, 연약대의 방향과 터널 축의 주향이 수직이면서 내림경사를 가지는 연약대 지반 조건(model II, III)에서 응력의 크기가 가장 작다.

경험적 평가 기준에 의한 터널에서의 불연속면 방향

에 따른 영향도를 터널 천단부에 발생하는 침하량의 크기를 기준으로 I-IV등급으로 구분하여 등가변형률과 함께 Table 5에 나타내었다. 등가변형률이 0.45 미만인 경우는 I 등급, 0.45-0.50은 II등급, 0.50-0.55는 III등급, 0.55-0.60은 IV등급, 0.60 이상은 V등급으로 설정하였다. 연약대의 방향 특성은 Bieniawski(1989)의 기준을 더 세분하여 연약대가 천단부 상부 1D, 천단부, 막장 중앙부를 지나는 경우로 구분하였다. 불연속의 기하학적 특성

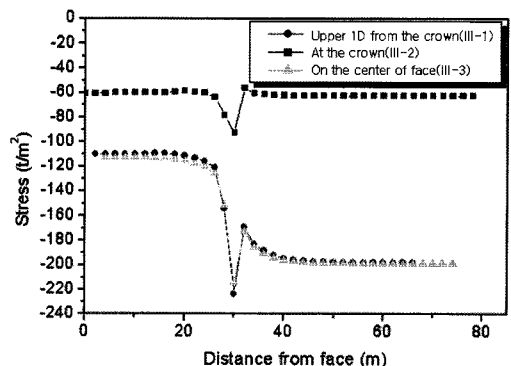


Fig. 6. Calculated stresses at crown for model III.

Table 5. Assessment of weak zone orientation effect based on crown settlement.

Weak zone orientation	Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Irrespective of strike
	Drive with dip		Drive against dip		Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	
	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°			
Upper 1D	II (0.46)	III (0.50)	II (0.47)	II (0.49)	III (0.52)	III (0.52)	II (0.46)
At the crown	III (0.52)	IV (0.57)	II (0.46)	V (0.66)	III (0.55)	IV (0.55)	V (0.66)
On the face	II (0.45)	II (0.46)	I (0.44)	II (0.46)	II (0.49)	I (0.41)	III (0.51)
Bieniawski(1989)	Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Fair	Very unfavourable	Fair

을 고려하여 운동학적 관점이 고려된 기존의 경험적 평가와는 달리 본 연구에서의 평가는 분리면 개념 보다는 단지 해당 구간의 체적에 연약대가 포함된 연속체 해석에 기반을 두고 있다. 또한 터널 축 방향의 변위는 고려하지 않았기 때문에 Table 5의 평가 기준을 안정성 평가 등에 직접 활용하기는 어려우며, 다만 사전 조사에 의해 인지된 연약대 분포 구간에 대한 대략적인 변위 예측에 활용될 수 있을 것이다.

결 론

터널 굴착 시 연약대 분포 지반의 거동 특성을 평가하기 위하여 3차원 수치해석을 통한 연약대 방향 특성에 따른 변위 및 응력 발생 특성을 평가하였다. 연약대 방향 특성은 RMR의 취약 불연속면에 대한 방향성 보정 인자를 기준으로 설정하였으며, 각각의 경우에 대한 해석모델을 작성하였다. 해석에 적용된 지반 정수는 현장 계측변위를 기반으로 하는 역해석을 통해 결정하였다. 상기 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 해석모델 작성을 위해 선정된 대상 터널은 OO 고속도로 병설 3차로 터널 중 III등급 지반 구간에 해당된다. 대상 구간에 대한 3차원 수치해석 모델을 작성하였으며, 대상 구간의 100개소 계측지점에서 측정된 평균 계측변위와 수치해석 결과가 오차범위 내로 근접할 때까지 반복적인 해석을 수행하여 지반 정수를 결정하였다.

(2) 가정된 연약대 방향 특성은 Bieniawski(1989)에 의한 터널에서의 취약 불연속면 방향 특성의 경험적 평가 기준인 RMR 방향성 보정인자를 근거로 하였다. 각 방향별로 연약대가 천단부 상부 1D 지점, 천단부, 막장 중앙부를 지나는 경우로 세분하였으며, 연약대의 폭은 2m로 가정하였다.

(3) 수치해석 결과 산정된 각 해석 조건 별 천단침하

결과를 요약하면, 경사를 가지는 연약대 조건의 경우 터널 축과 평행한 주향의 연약대가 터널 축과 수직인 주향의 연약대보다 변위의 크기가 크며, 터널 축과 수직인 주향의 연약대 조건 중에서는 내림경사 방향이 오름경사 방향보다 더 큰 변위가 발생한다. 동일한 경사 방향별로는 저각보다 고각의 연약대를 포함하는 조건에서 천단침하가 다소 크다. 연약대 위치에 따라서는 연약대가 천단부를 지나는 경우 가장 큰 변위가 발생한다.

(4) 각 모델별 굴착에 의해 터널 천단부에 작용하는 최대 응력의 크기를 요약하면, 대체로 연약대가 천단부 상부 1D를 지나는 경우와 막장 중앙부를 지나는 경우의 최대 응력은 연약대가 없는 경우와 큰 차이가 없으나, 연약대가 천단부를 지나는 경우는 응력의 크기가 작아진다. 연약대 방향 특성별로 구분하면, 연약대의 주향과 터널 축의 주향이 평행한 경우의 응력이 가장 크며, 연약대의 방향과 터널 축의 주향이 수직이면서 내림경사를 가지는 연약대 지반 조건에서 응력의 크기가 가장 작다.

(5) 터널 천단부의 침하 크기를 기반으로 연약대 방향 조건에 따른 영향도를 I~V등급으로 구분하였다. RMR에서의 불연속적 특성을 고려한 경험적 평가와는 달리 분리성 및 운동학적 특성을 고려하지 않았기 때문에 터널의 안정성 평가에 직접적으로 활용하기는 어렵다. 하지만 사전 조사에 의해 인지된 연약대 분포 구간에 대한 대략적 변위 예측에 활용될 수 있을 것이다.

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

- 김광염, 2007, 터널 막장 전방 단층대 예측을 위한 3차원 절대변위 계측 및 분석에 관한 연구, 서울대학교 대학원 공학박사 논문.
- 김기선, 김영섭, 유광호, 박연준, 이대혁, 2003, 터널 3차원 내공변위의 해석을 통한 막장전방 지반상태변화 예측, 한국암반공학회지, 13, 476~485.
- 박시현, 신용석, 2007, 한계변형률 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한 연구, 한국지반공학회지, 23, 29~41.
- 박연준, 유광호, 송한찬, 김기선, 이대혁, 2004, 3차원 수치해석을 이용한 터널막장 전방 지반 상태의 예측, 한국암반공학회지, 14, 440~449.
- 이인모, 이주공, 이승주, 이형원, 한일영, 이대혁, 2001, 터널 내공변위의 해석을 통한 막장전방 지반조건변화 예측, 터널기술, 한국터널공학회, 4, 235~345.
- 정형식, 김성환, 이상돈, 김낙영, 1998, 통계적 방법에 의한 터널 최종변위량 예측에 관한 연구, 한국지반공학회 학술발표회 논문집, 347~356.
- 한국건설기술연구원, 2005, 터널공사 재해 최소화 및 예방기술 개발(II), 연구보고서
- 한국건설기술연구원, 2006, 한국형 싱글셀 터널공법 개발, 연구보고서
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Classification, John Wiley & Sons.
- Goricki, A., Schubert, W. and Riedmueller, G., 2004, New Developments for the Design and Construction of Tunnels in Complex Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 497~498.
- Panet, M. and Guenot, A., 1982, Analysis of Convergence behind the Face of Tunnel, Proceeding of a International Conference Tunnelling 82, Institution of Mining and Metallurgy, London, 197~204.
- Seidenfub, T., 2006, Collapses in Tunnelling, Master Thesis, Stuttgart, Germany.
- 日本トンネル技術協會, 1990, 山岳トンネルの施工法に関する調査研究報告書.

2009년 2월 25일 원고접수, 2009년 3월 23일 게재승인

임성빈

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: bins123@hanmail.net

정해근

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: ddolmani8@nate.com

서용석

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: ysseo@cby.ac.kr