

연약대를 통과하는 터널의 시공중 변위거동 - 수치해석 연구

유충식^{1*} · 박정규²

¹정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

²정회원, (주)포스코건설, 기술연구소 과장

Deformation behavior of tunnels crossing weak zone during excavation - numerical investigation

Chungsik Yoo^{1*}, Jung-Gyu Park²

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan Univ.

²Manager, R&D Center, POSCO E&C, Co., Ltd

ABSTRACT: This paper concerns the deformation behavior of tunnels crossing weak zone during excavation. A three dimensional finite element model was adopted in order to conduct a parametric study on the orientation of weak zone in terms of strike and dip angle relative to the tunnel longitudinal axis. The results of the analyses were then analyzed so that the tunnel displacements in terms of the ratios between the crown settlement and springline displacement can be related to the orientation of the weak zone. The results indicate that the displacement ratios between the tunnel crown and springline tend to quantitatively change when a weak zone exists near or ahead of the tunnel suggesting that the displacement ratios can be effectively used to predict the weak zone during tunnelling. Practical implications of the findings are discussed.

Keywords: Drill and blast tunnel, Finite element analysis, Tunnel instrumentation, weak zone, Deflection curve, Trend line

초 록: 본 연구에서는 연약대를 관통하는 터널의 변위거동에 관한 연구내용을 다루었다. 이를 위해 발파굴착 공법이 적용되는 터널을 대상으로 다양한 파쇄대 조건을 도출하고 이에 대한 3차원 해석을 수행하여 파쇄대의 주향 및 경사와 터널 변위 거동과의 관계에 대한 매개변수 연구를 실시하였다. 해석결과를 토대로 파쇄대의 공간적 분포 특성에 따른 터널의 파쇄대 관통 전후의 변위 거동을 고찰하였으며 이를 토대로 현재 실무에서 적용되고 있는 3차원 계측결과와 활용방안을 모색하였다. 3차원 해석 결과를 분석한 결과 터널 천단 및 내공변위의 각 성분비는 터널 주변 파쇄대의 터널과의 상대적 위치 및 방향성에 따라 달라지는 것으로 관찰되어 천단 및 내공변위 등 전통적인 터널 안정성 지표와 아울러 터널의 안정성 검토는 물론 주변 파쇄대 존재여부를 판정하는 지표로 활용할 수 있는 것으로 검토되었다.

주요어: 발파 굴착 터널, 유한요소해석, 터널 계측, 연약대, 처짐곡선, 경향선

1. 서론

최근의 GTX 사업 및 U-smart way 사업 등 대규모 사회기간시설 건설의 필요성이 논의되고 있으며 이와 아울러 대륙간 교통터널의 건설이 본격적으로 논의되고 있다. 이러한 교통터널들은 장대화 및 대심도화

되고 있는 추세이며 천층 터널 보다 불리한 조건에서 시공되는 경우가 많다. 아울러 대심도 장대 터널은 접근이 용이하지 않은 지역에 시공되는 경우가 많아 제한적인 지반정보를 토대로 설계되므로 지질 및 수리지질, 그리고 지반공학적 특성에 대한 정보 부족으로 시공 리스크가 매우 높다고 할 수 있다. 즉, 터널 심도가 깊어질수록 지반조건에 대한 불확실성이 높아지고 전방에 존재하는 불리한 상황에 대한 인지도가 떨어지므로 이를 극복하기 위해서는 사전 지반조사에 많은 노력을 투입하여야 하며 아울러 시공 중 갱내

*Corresponding author: Chungsik Yoo
E-mail: csyoo@skku.edu

Received July 3, 2014; Revised July 14, 2014;

Accepted July 18, 2014

선진 시추를 통한 전방 탐사가 매우 중요한 역할을 하기도 한다.

제한적인 지반정보로 터널을 설계하여야 하는 설계 조건의 특성상 터널이 계획된 종단 및 평면 선형상에 존재하는 연약대를 100% 반영하여 설계하는 것은 매우 어려우며 따라서 터널 시공중에는 예상치 못한 연약대대의 출현으로 지보패턴을 상향 조정하여야 하는 경우는 물론 지반 붕괴를 경험하기도 한다 (Ribeiro e Sousa, 2004). 특히 연약대대는 역학적으로 취약하고 높은 이방성의 특성을 보일 수 있음과 아울러 높은 수압하에 존재할 가능성이 있어 굴진시 굴진면이 불안정할 가능성이 높으므로 이러한 연약대대의 사전 예측 및 대처방안 수립이 매우 중요하다고 하겠다. 한편, 특히 도심도 장대 터널은 심도가 얇은 천층 터널에 비해 환기 및 방재 등의 시공 외적인 특수 고려사항 이외에도 조사지역이 방대하기 때문에 설계 단계에서 충분한 지반정보를 얻기가 어려우며 터널이 다양한 지반조건에 위치하고 각종 단층 등의 지질구

조대와 조우할 가능성이 매우 높다(ITA, 2010; Yoo et al., 2013; Kun and Onargans, 2013).

터널 굴착시 터널의 안정성 및 지보패턴 적정성을 검토하는 측면에서 터널 변위 계측은 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 지난 십수년간 터널의 시공중 계측 기술은 괄목할 만하게 발전해 왔다. 특히 유럽 지역, 특히 오스트리아에서 개발되어 적용되기 시작한 광파 측정을 이용한 절대변위계측 기술은 측정된 변위 계측자료를 터널의 거동을 이해하는데 더 적극적으로 활용될 수 있도록 하였으며(ITA WG2, 2012) 기존의 상대변위 계측을 상당부분 대체하는 효과를 가져왔다. 국제터널협회(International Tunnelling and Underground Space Association)에서는 광파기 측량을 이용한 3차원 절대변위 계측의 장점을 정리한 바 있다(ITA-CET, 2009).

이러한 3차원 계측 기술의 발전에 힘입어 시공중 계측결과를 이용하여 터널 시공중 주변 파쇄대를 예측하고자 하는 시도가 있어 왔다. Fig. 1에서와 같이

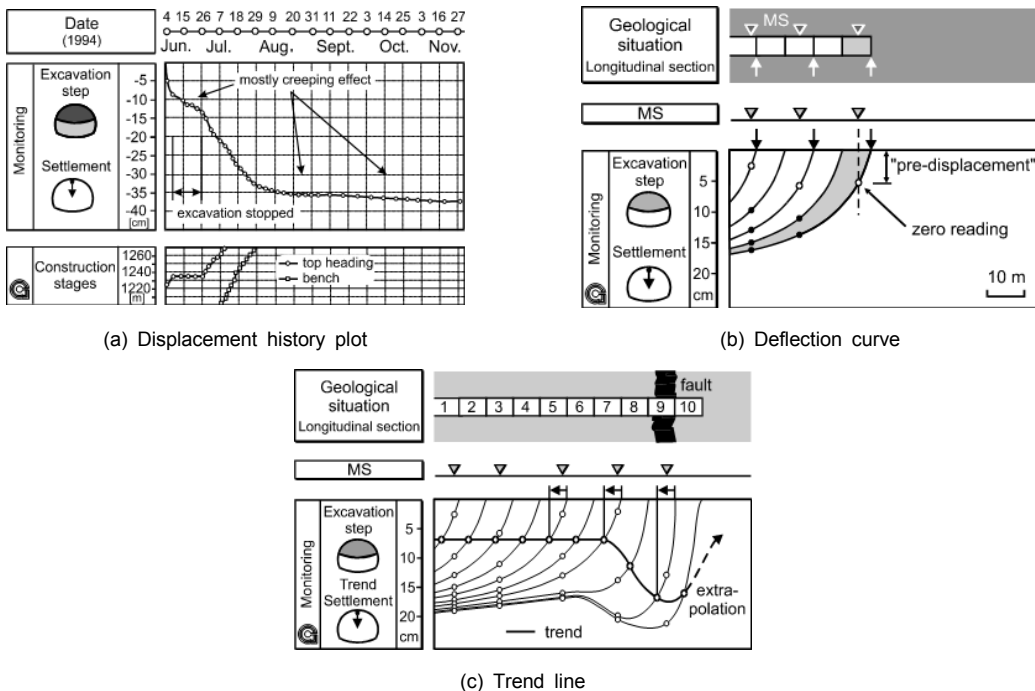


Fig. 1. Illustration of displacement history plot, deflection curve, trend line [after Steindorfer (1998)]

절대변위를 이용한 변위이력곡선(displacement history plot) 및 처짐곡선(deflection line), 경향선(trend line) 및 영향선(influence line), 그리고 변위벡터(displacement vector) 분석은 일반화 되었다(Schubert et al., 2002). 특히 오스트리아 Graz 대학 연구그룹인 Schubert and Budil (1995), Steindorfer and Schubert (1997), Steindorfer (1998)는 수치해석 및 현장계측자료 분석을 통해 변위 벡터 방향성 분석을 통해 터널 굴진면 전방 지반상태를 예측할 수 있음을 보인 바 있다. 한편, 이후 Jeon et al. (2005)는 Graz 대학 연구그룹의 연구내용을 확장하여 다양한 시공조건에 대한 3차원 탄소성 유한요소해석 모델링을 수행하고 그 결과로부터 변위벡터 방향성 분석을 통한 터널 전방 지반조건을 예측하는 연구결과를 제시한 바 있다. 국내에서도 Lee et al. (1998)을 필두로 하여 Kim et al. (2003), Park et al. (2004), Kim (2007) 등이 터널 굴진면 전방의 지반 변화 예측을 위한 연구를 수행한 바 있다.

위에 제시한 기존의 연구들은 절대변위 계측결과를 이용한 터널 전방 지반조건을 예측할 수 있는 기법을 제시하였다는 데는 큰 의미가 있다고 할 수는 있겠으나 대부분 탄성해석에 기반을 두고 있으며 비교적 단순한 연약대 조건을 대상으로 하였다. 이와 아울러 터널굴착 후 설치되는 지보재를 모델링에서 생략하거나 터널 내압으로 대체하는 등 터널 시공상황을 단순화 시킨 결과를 근거로 하였기 때문에 제한적이다. 이에 본 연구에서는 대심도 발파굴착 터널에 대한 3차원 수치해석결과를 토대로 연약대의 공간적 분포 특성에 따른 터널 변위 특성을 고찰하고 터널 주변 및 전방에 위치하는 연약대의 공간적 분포와 터널 내 변위비와의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해 터널 시공과정을 상세히 모사하는 3차원 유한요소해석 모델을 구축하였으며 이를 이용하여 연약대의 공간적 분포 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 분석하여 연약대의 공간적 분포와 터널내 변위비와의 상관관계를 수립하였다.

2. 3차원 유한요소해석

2.1 해석대상 터널 및 시공조건

본 연구에서는 직경(D) 10 m, 높이(H) 8 m의 터널이 10D (C=100 m)의 토피고로 시공되는 경우를 대상으로 하였으며(Fig. 2, Fig. 3) 1차 지보재로는 두께 200 mm의 슛크리트 라이닝이 타설되는 것으로 가정하였다. 일반적으로 본 연구에서 다루는 시공조건에서는 일정길이의 록볼트가 설치되는 것이 보통이나 해석의 편의상 록볼트는 해석모델링에서 제외하였으며 아울러 연약대 통과구간에서도 상호 직접적인 비교를 위해 연약대 통과 여부에 관계없이 동일한 지보패턴을 적용되는 것으로 가정하였다. 한편, 터널은 균질한 지반을 통과하다 폭 6 m의 연약대($W_f = 6.0$ m)와 조우하는 조건을 고려하였다.

본 연구에서는 풍화암내지 연암 정도의 암반에 터널이 시공되는 것으로 가정하였다. 물론 터널 심도별

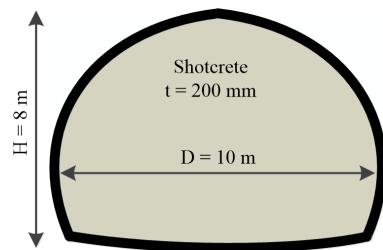


Fig. 2. Tunnel cross section

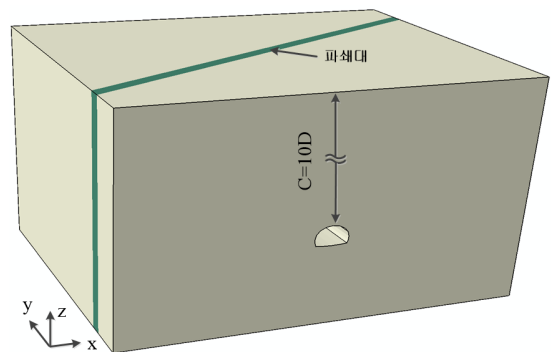


Fig. 3. Schematic view of tunneling condition

지반/암반의 응력-변형률-강도 특성이 달라 질 수는 있겠으나 연약대 조건별 정량적인 상대적 비교를 위해 터널 심도에 관계없이 동일 지반조건에서 터널이 시공되는 것으로 가정하였다. 연약대 또한 다양한 지반정수를 가질 수 있으나 본 연구에서는 기존 문헌조사(Yoo et al., 2013)를 통해 확인된 지반정수를 적용하였다. Table 1는 본 연구에서 고려한 지반 및 연약대에 대한 지반정수를 나열하고 있다.

2.2 연약대 조건

연약대의 공간적 분포 특성이 터널의 변위거동에 미치는 영향을 분석하고 관련 DB 구축을 위해 터널 굴진 방향 대비 다양한 공간적 분포 특성을 갖는 연약대를 고려하였다. 즉, 연약대 조건은 Series A와 Series B로 대별되는데 Series A는 연약대의 주향이 터널 굴진축과 직교하는 조건이며 Series B는 연약대 주향이 터널 굴진축과 90° 보다 작게 형성되어 있는 경우를

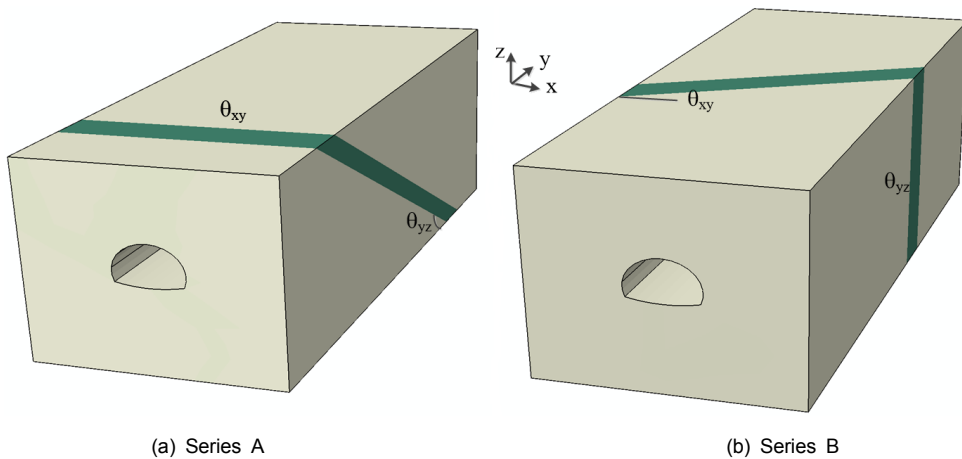


Fig. 4. Schematic view of fault orientation

Table 1. Mechanical properties of ground and weak zone

	Elastic modulus E (MPa)	Poisson's ratio ν	cohesion c (kPa)	Int. friction angle ϕ (deg.)
ground	500	0.2	100	35
weak zone	100	0.2	50	30

Table 2. Cases considered in the parametric study

Series	Cases	θ_{xy} (deg)	θ_{yz} (deg)	θ_{xz} (deg)	K_o	Remarks
A	SA-1	0	30	90	1.0	Cases with negative θ_{yz} angles ⇒ against dip cases
	SA-2		45			
	SA-3		90			
	SA-4		-30			
	SA-5		-45			
B	SB-1	30	90			
	SB-2	60				

포함한다. Fig. 4에서는 Series A와 Series B를 보여주고 있으며 Table 2에서는 해석에서 고려한 조건을 나열하고 있다.

2.3 유한요소해석 모델링

해석에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus ver. 6.12 (Abaqus 2011)를 사용하였다. Abaqus는 지반공학분야에 있어 다양한 흙에 대한 구성모델을 제공하고 효율적인 소성 응력-변형률 거동 모사 알고리즘을 제공하며 해석대상 도메인에 대한 요소의 제거 및 추가가 자유롭게 수행될 수 있어 굴착 및 지보재 설치과정이 반복되는 터널 분야에 매우 효율적으로 사용될 수 있다는 장점이 있다. 본 절에서는 유한요소해석 모델링에 대한 상세내용을 기술하였다.

Fig. 5에서는 사용된 유한요소망을 보여주고 있는데 이 그림에서 보이는 바와 같이 좌우측 경계면은 터널중심으로부터 5D의 위치에, 그리고 하부 경계면은 터널 인버트로부터 3D되는 지점에 설치하였으며 굴진방향으로는 굴진 시점으로부터 8D 위치에 경계면을 설치하여 해석 모델을 설정하였다. 이러한 인위적으로 설치되는 경계면의 위치는 좌·우측 및 시·종점 경계의 영향을 최소화 할 수 있도록 예민도 검토를 통해 결정하였다. 이때 변위 경계조건으로서 수직 경

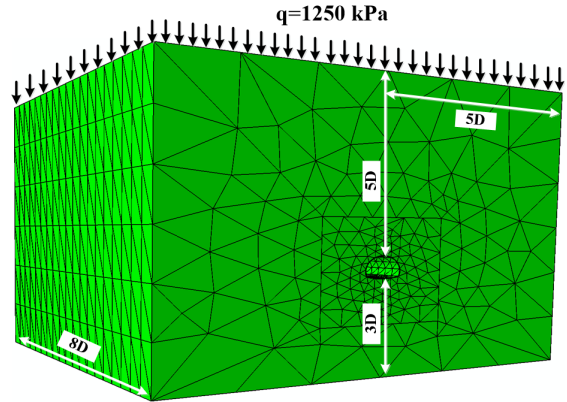


Fig. 5. 3D model (C/D=10)

계면의 경우 해당 면의 연직방향의 변위를 구속하였으며 바닥부 경계면은 힌지를 설치하였다. 한편, 해석 도메인의 크기를 줄이기 위해 터널 상부 5D이내 지반만 해석모델에 반영하고 상부 5D는 지반의 단위중량 ($\gamma=25 \text{ kN/m}^3$)을 고려하여 등가의 상재하중($q=1,250 \text{ kPa}$)으로 처리하여 해석을 수행하였다.

한편, 지반 및 지보재의 모델링에 있어 지반은 4절점 4면체 요소를 사용하여 모델링 하였으며 슛크리트는 가감적분 4절점 쉘요소를 사용하여 모델링하였다 (Fig. 5). 한편, 재료모델링에 있어 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Davis (1968)가 제안한 비관련흐름 법칙을 따르는 탄소성 재료로 가정하였으며 슛크리트는

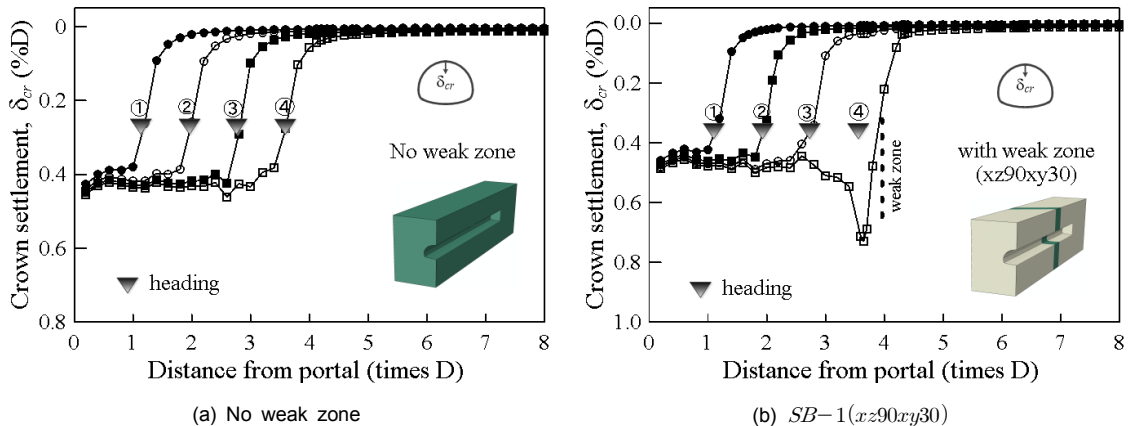


Fig. 6. Deflection curves; no weak zone vs. with weak zone

탄성재료로 모델링하였다. 이때 지반 및 연약대의 팽창각은 $\psi = 20^\circ$ 로 가정하였다. 한편, 숏크리트의 탄성재료 정수로는 포아송비 0.2와 함께 10 GPa의 탄성계수를 적용하였다.

한편, 3차원 해석에서는 “굴착 \Rightarrow 지보재 타설”로 이어지는 터널 시공과정을 Abaqus에서 제공하는 요소의 제거 및 추가 기능을 활용하여 상세히 모델링하였다. 해석에서는 편의상 전단면 굴착이 이루어지는 것으로 가정하였으며 [1회 굴진장 2 m 무지보 굴착 \Rightarrow 이전 굴착 단면 구간 숏크리트 타설]의 과정을 반복하여 총 60 m의 터널굴진을 모사하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 인접 연약대 통과 시 터널 변위 거동 특성

3.1.1 처짐곡선

임의 계측지점에 대한 변위 처짐곡선은 터널 축을 따라 설치된 계측지점의 변위값을 연결하여 도시할 수 있다[Fig. 1(b)]. 처짐곡선은 다음 사항을 확인하는데 활용될 수 있다 i) 터널 종방향 변형 거동; ii) 터널 굴착 암반/지반의 강성도; 그리고 iii) 계측기 설치 이전의 선행변위. Steindorfer (1998)는 인접한 두 처짐곡선 사이의 면적이 증가하면 터널 전방에 연약대 혹은 연약대가 존재함을 단순화된 시공조건에 대한

3차원 경계요소 해석 결과를 이용하여 보인바 있다.

Fig. 6에서는 연약대가 존재하지 않는 경우와 연약대가 존재하는 SB-1에 대한 터널굴착단계에서의 터널 천단부 처짐곡선을 보여주고 있다. 여기서의 처짐곡선은 일정한 굴진면간 거리에 대한 곡선으로서 Fig. 6(a)에서 보이는 바와 같이 연약대가 존재하지 않는 경우, 즉 균질한 지반에 시공되는 조건의 경우에는 인접한 두 처짐곡선 사이의 면적이 일정하게 유지되며 최대 40 mm 정도의 최대변위를 보이고 있음을 알 수 있다(곡선 ①~④). 한편, 연약대가 존재하는 SB-1의 경우 터널 굴진면과 연약대 중심부와의 거리 DF가 0.3D이상의 경우(즉 곡선 ①~③), 연약대가 존재하지 않는 경우와 동일한 처짐곡선을 보이거나 터널 굴진면이 연약대와 근접하면서, i.e., $DF \leq 0.3D$, 곡선 ④와 같이 천단침하량이 증가하여 처짐곡선에서 변위가 증가하여 곡선 ①~②간의 면적보다 ③~④간의 곡선의 크게 증가하는 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 계측결과를 이용한 처짐곡선 작도를 통해 전방 연약대 존재여부를 예측할 수 있음을 의미한다.

3.1.2 변위비

일반적으로 균질한 지반에 시공되는 터널의 경우 터널 천단 침하는 측벽부 수평변위보다 큰 값을 보이며 따라서 천단변위 대비 측벽부 수평변위비는 굴착

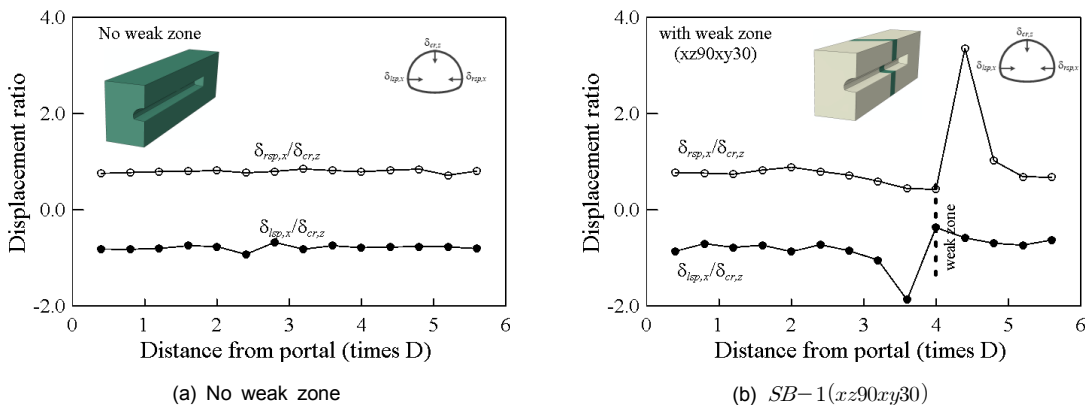


Fig. 7. Displacement ratio curves; no weak zone vs. with weak zone

단면 외부에 형성되어 있는 연약대를 예측하는데 사용될 수 있다[Steindorfer (1998)]. 즉, SB-1 조건과 같이 연약대의 주향이 터널 굴진축과 90° 보다 작은 각도를 유지하며 만날 경우 측벽부와 연약대 사이의 지반에 굴착하중이 전이되어 측벽부 수평변위 증가로 인해 천단 및 측벽부 변위비에 변화가 발생하게 된다.

Fig. 7은 측벽/천단 변위비를 연약대가 존재하지 않는 경우와 SB-1에 대해 비교하고 있다. 여기서의 변위비는 좌우측벽부 수평변위와 천단부 수평변위의 비($\delta_{lsp,x}/\delta_{cr,z}$ 및 $\delta_{rsp,x}/\delta_{cr,z}$ 로 표현하였다. 먼저 연약대가 존재하지 않는 경우에 대해 보여주고 있는 Fig. 7(a)의 경우 보이는 바와 같이 좌측벽부($\delta_{lsp,x}/\delta_{cr,z}$) 및 우측벽부($\delta_{rsp,x}/\delta_{cr,z}$) 변위비가 0.8 정도의 값을 보이며 전 굴착단계에서 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 반면 연약대가 존재하는 SB-1의 경우에 대한 Fig. 7(b)를 관찰하면 연약대와 먼저 조우하게 되는 좌측벽 변위비 $\delta_{lsp,x}/\delta_{cr,z}$ 가 연약대 조우 0.5D 이전에 두 배 이상 증가하여 약 $\delta_{lsp,x}/\delta_{cr,z} = 2.0$ 의 값을 보인 후 통과시 급격히 감소한 후 통과 후에는 통과

전의 값을 보이는 것으로 나타났다. 한편 우측벽부 변위역시 통과전 급격한 증가를 보여 $\delta_{rsp,x}/\delta_{cr,z} \approx 3.0$ 정도의 값을 보이는 것으로 검토되었다.

이와 같이 좌우측벽부 변위비는 연약대 통과이전에 급격하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타나 터널제측이 적절히 이루어질 경우 좌우측벽부 변위비를 분석을 통해 미리 예측하지 못한 연약대의 존재를 미리 파악할 수 있는 지표로 활용될 수 있는 것으로 분석되었다.

3.1.3 횡단면 변위 벡터

광파기 측측을 이용한 절대변위 측측이 이루어질 경우 임의 터널 단면에 대한 변위 벡터를 작성할 수 있다. 이러한 횡단면 벡터의 방향성은 주변 연약대 여부에 따라 달라 질 수 있으며[Steindorfer (1998)] 본 연구에서는 해석결과를 통해 이에 대한 검토를 수행하였다.

Fig. 8에서는 연약대와의 거리에 따른 각 횡단면별 변위 벡터를 도시하고 있다. Fig. 8(a)와 8(b)에서 관찰

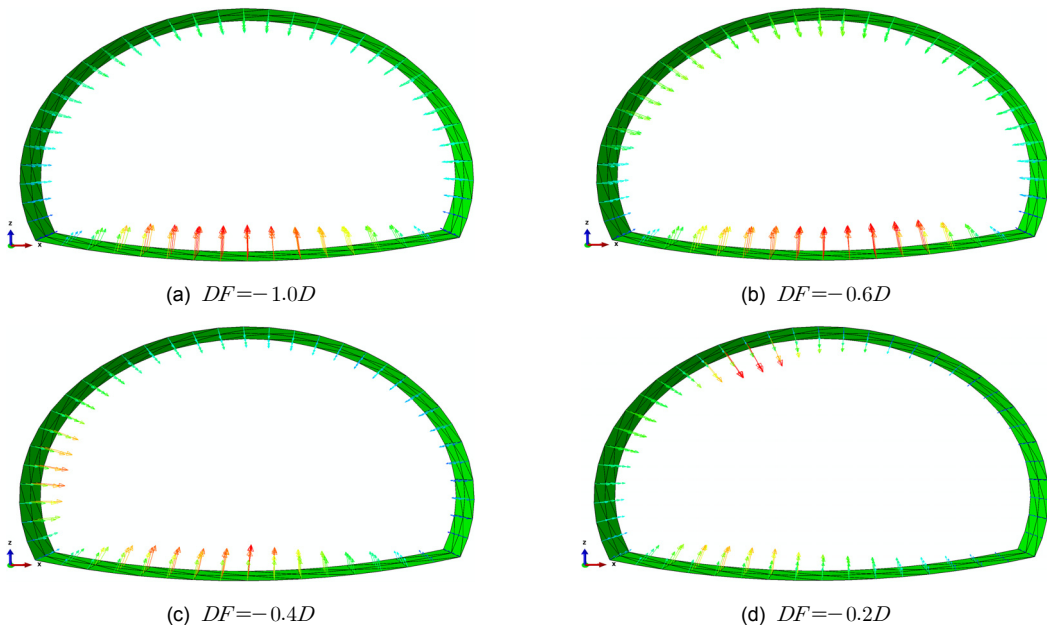


Fig. 8. Displacement vector plots in cross section

할 수 있는바와 같이 연약대와의 거리(DF)가 $0.6D$ 이상 이격되어 있는 단면에서는 변위 벡터의 형태가 균일한 형상을 보이는 것을 관찰할 수 있으나 연약대 통과 $-0.4D$ 이격된 단면에서는 좌측벽부의 변위가 우측벽부 보다 현저히 크게 발생하는 경향을 보이고 있다. 한편, 연약대 통과 직전인 $DF = -0.2D$ 단면에서는 좌측 어깨부에서의 변위가 크게 발생하는 경향을 보여주고 있다.

이와 같이 연약대 통과 이전임에 불구하고 연약대와 인접한 위치에서 변위가 크게 발생하는 이유는 연약대와 터널사이의 지반으로 굴착하중이 전이되기 때문이며 이러한 경향을 감안할 때 절대변위 측정이 이루어지는 현장에서는 횡단면 변위 벡터도를 작성하여 터널 주변 연약대 존재 여부를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 연약대의 방향성에 따른 터널 변위 거동

본 연구에서 검토한 두 가지 연약대 조건(Series A 및 Series B)에 대해 연약대의 방향성에 따른 터널 변위 거동을 검토하였다.

3.2.1 Series A

앞서 기술한 바와 같이 Series A는 연약대의 주향이 터널의 굴진축과 직교하는 조건으로서 연약대의 경사각(θ_{yz})에 따른 영향도 차이와 역경사(against dip) 혹은 순경사(with dip)에 따른 영향도 차이를 고려할 수 있다. 따라서 본 절에서는 이에 대한 검토를 수행하였다.

Fig. 9는 연약대의 경사각에 따른 처짐곡선을 굴착 단계별로 보여주고 있다. 연약대가 터널 굴진방향으

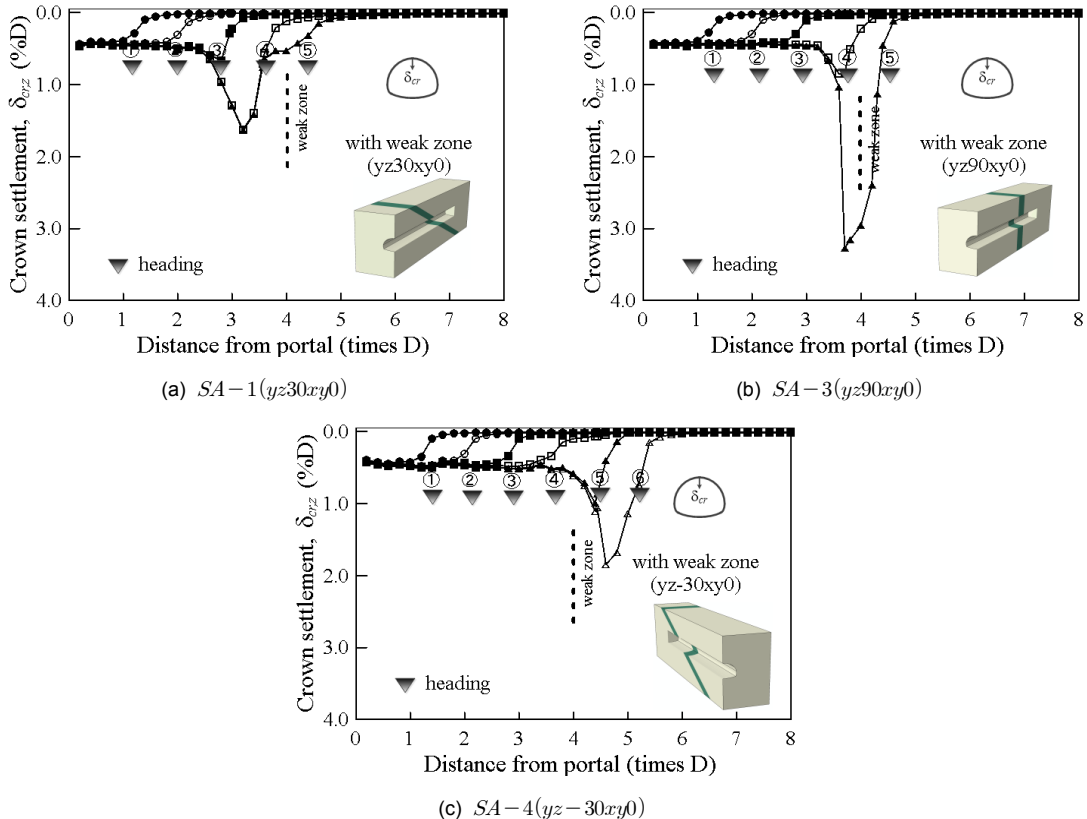


Fig. 9. Deflection curves (Series A)

로 30°의 경사각으로 형성되어 있는 SA-1에 대한 결과를 보여주는 Fig. 9(a)에서는 연약대 통과시 천단 변위가 최대 1.8%D, 즉 180 mm, 정도가 발생하는 것으로 검토되었다. 반면 동일한 주향을 가지나 경사각 수직 연약대의 경우에는[Fig. 9(b)] 거의 두 배정도 (3.3%D)로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 터널 굴진축과 직교하거나 큰 각도로 조우하는 연약대의 경우 직립하는 연약대가 경사를 가지고 형성되어 있는 연약대보다 터널의 변위거동에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 것으로서 연약대가 터널의 안정성에 미치는 영향에 대한 평가시 연약대와 터널의 상대적 위치 특성을 고려하여야 함을 나타낸다고 하겠다.

한편, Fig. 9(c)는 Fig. 9(a)에서 보여주고 있는 SA-1와 동일한 연약대이나 터널이 역경사 방향으로

굴진되는 경우(SA-4)에 대한 결과를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 역경사 방향으로 굴진되는 SA-4가 SA-1보다 0.2%D 정도 큰 최대변위를 보이고는 있어 연약대의 영향이 다소 큼을 알 수 있다. 다만 실제 굴진시에는 굴진면부 썩기 붕락 등의 가능성이 역경사 조건이 더 크다고 할 수 있어 실제 영향도는 역경사 조건이 현저할 것으로 예상할 수 있다. 또한, 역경사 조건의 경우(SA-4), SA-1나 SA-3 조건과 비교할 때 터널과 연약대의 방향성의 차이로 인해 터널이 연약대를 통과하기 이전에는 천단침하가 증가하는 경향을 보이지 않아 처짐곡선으로는 굴진면 전방 연약대 존재여부를 파악하는 것이 용이하지 않은 것으로 검토되었다.

Fig. 10에서는 Series A의 해석 조건에 대한 변위비 곡선들을 보여주고 있다. 여기서의 변위비는 앞서 기

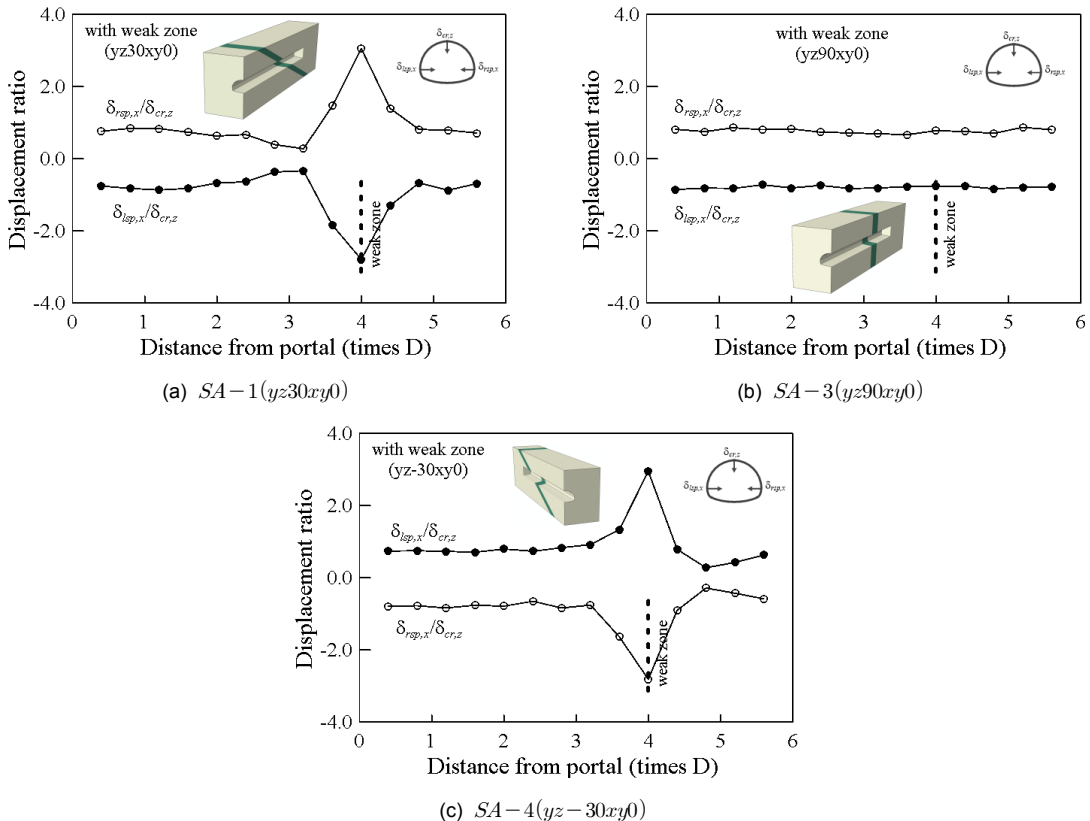


Fig. 10. Displacement ratio curves (Series A)

술한 바와 같이 좌우측벽부 수평변위와 천단부 수평 변위의 비($\delta_{lsp,x}/\delta_{cr,z}$ 및 $\delta_{rsp,x}/\delta_{cr,z}$ 로 표현하였다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 일정한 경사로 형성된 시공조건인 경우(SA-1, SA-4)에는 터널이 연약대와 조우하기 이전에는 약 $\delta_{lsp,x}/\delta_{cr,z} \approx \delta_{rsp,x}/\delta_{cr,z} \approx \pm 0.7$ 정도를 보이다 터널이 연약대를 조우하기 0.5D이전부터 변위비가 증가하여 통과시 약 3.0 정도의 최대값을 나타낸 후 통과 후 다시 이전 값으로 회귀하는 경향을 보이고 있다. 반면 연약대가 수직으로 형성되어 있는 SA-3의 경우 연약대와 조우함에도 불구하고 터널 굴진 과정 중 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 $\delta_{lsp,x}$, $\delta_{rsp,x}$ 및 $\delta_{cr,z}$ 가 연약대에 근접 및 조우하면서 거의 같은 비율로 증가하기 때문으로 확인되었으며 따라서 SA-3과 같이 연약대 주향이 터널굴진축과 거의 직각이며 수직으로

형성된 연약대와 조우하는 경우 변위비 곡선만으로는 연약대 존재여부를 확인하기 어려운 것으로 검토되어 처짐곡선 등 전반적인 변위 데이터를 활용하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 천단 및 좌우측벽부 종방향(y-방향)변위를 도시하고 있는데 Series A의 모든 조건에서 연약대 조우이전 현저히 증가하는 경향을 보이고 있어 특히 터널축과 거의 직교하는 수직 연약대의 존재여부는 종방향 변위를 이용하여 예측이 가능함을 나타내고 있다. 또한 이러한 경향은 절대변위 계측에서 터널축을 따르는 종방향 변위 계측의 중요성을 나타낸다고 하겠다.

요약하면 Series A 시공조건에서 동일한 연약대 제원이라도 순경사 방향 굴진 조건과 역경사 방향 굴진 조건을 비교할 때 측벽부는 연약대 통과 시점이

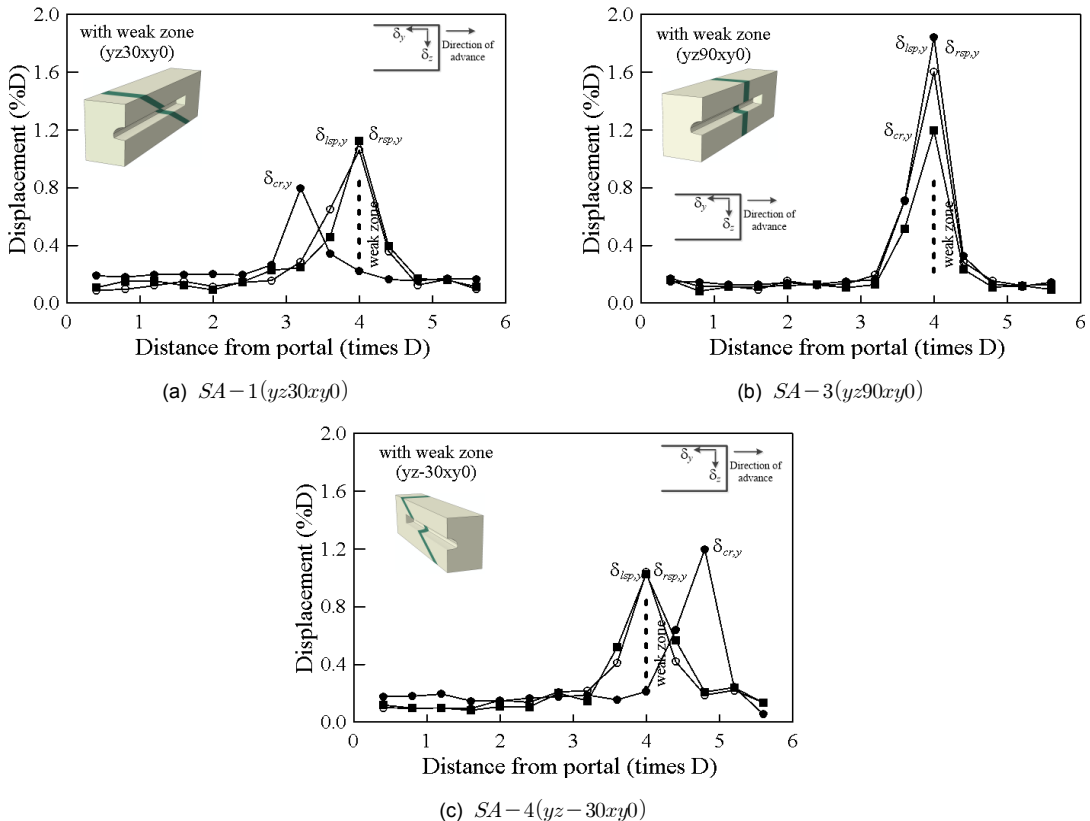


Fig. 11. Longitudinal displacement curves (Series A)

굴진방향에 관계없이 동일하므로 Fig. 10과 같이 굴진 방향에 따른 측벽부 수평변위비의 차이가 없었으나 천단침하의 경우 순경사 조건이 연약대와 조우하는 시점이 역경사 조건보다 늦기 때문에 Fig. 9에서와 같이 굴진방향에 따라 처짐곡선 양상이 다르게 발생하는 것으로 검토되었다. 따라서 천단침하를 이용한 처짐곡선으로는 동일한 제원을 갖는 연약대의 순방향 혹은 역방향 굴진에 있어서의 전방 연약대 존재 여부 파악이 어려웠으나 종방향 변위 곡선의 경우 연약대 관통이전에 증가하는 경향을 보이는 경향을 보이고 있어 3차원 계측결과 활용시 다양한 변위 성분에 대한 검토가 필요한 것으로 나타났다.

3.2.2 Series B

Series B의 경우 연약대의 주향이 터널의 굴진축과 이루는 각이 90° 보다 작은 각도로 교우하는 조건으로서 여기서는 연약대 주향이 수평축과 이루는 각(θ_{xy}) 또는 연약대의 주향과 터널의 굴진축의 교우각($\theta_{tf} = 90^\circ - \theta_{xy}$)에 따른 터널의 변위 거동을 고찰하였다. Fig. 12에서 관찰할 수 있는 바와 같이 교우각 θ_{tf} 이 증가할수록 최대 천단침하량이 크게 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데 이는 최대값 $\delta_{cr,max}$ 과 교우각 θ_{xy} 와의 관계를 도식화한 Fig. 13에서 보다 구체적으로 관찰할 수 있다. 여기서 교우각 $\theta_{tf} = 90^\circ$ 의 조건은

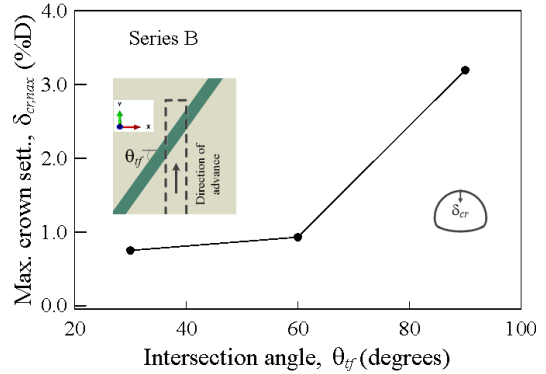


Fig. 13. Effect of intersection angle θ_{tf} on max. crown settlement

Series A에서 $\theta_{yz} = 0^\circ$ 또는 $\theta_{tf} = 90^\circ$ 으로서 SA-3 조건으로서 교우각이 증가할수록 최대 천단침하 $\delta_{cr,max}$ 가 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 이러한 경향은 연약대가 터널의 거동에 미치는 영향은 연약대와 터널 굴진축의 상대적인 위치에 따라 달라 질수 있음을 의미하며 2차원 해석시 연약대와 터널굴진축이 직교한다는 가정이 연약대의 영향을 가장 보수적으로 평가하는 것임을 알 수 있다.

한편, Fig. 14는 교우각 θ_{tf} 에 따른 변위비를 비교하고 있다. 전반적으로 변위비의 최대값은 약 3.0 정도로 θ_{tf} 에 따라 큰 차이는 없으나 θ_{tf} 에 따라 변위비가 증가하는 시점이 달라지는 경향을 나타내고 있는데 특히 교우각이 θ_{tf} 이 작아질 할수록 변위비가 증가하

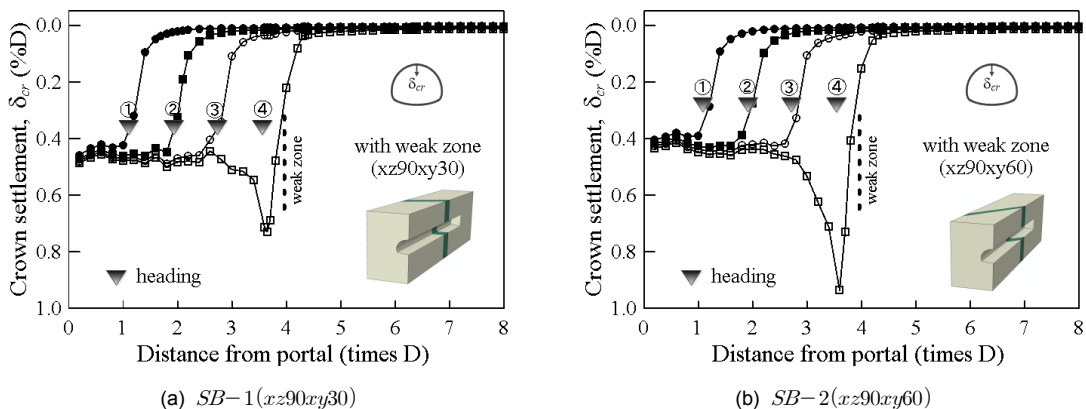


Fig. 12. Deflection curves (Series B)

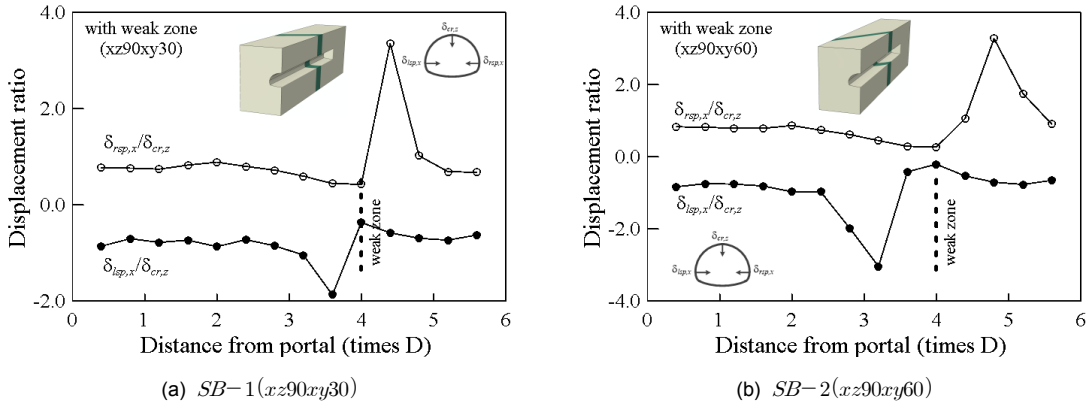


Fig. 14. Displacement ratio curves (Series B)

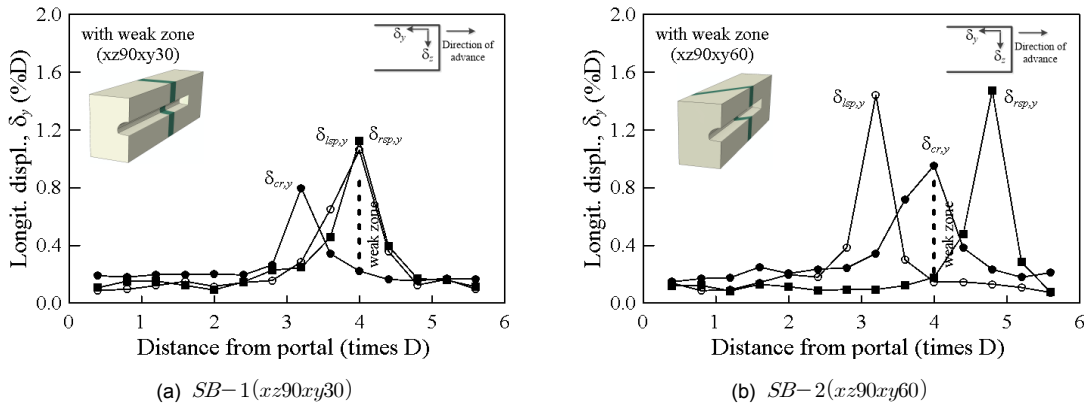


Fig. 15. Longitudinal displacement curves (Series A)

는 시점이 빠르게 나타나 계측결과 분석을 통해 연약대 존재 여부에 대한 사전 경고가 가능한 것으로 분석되었다.

Fig 15는 터널 굴진면으로부터 4 m 후방 지점에서의 터널 천단 및 좌우측벽부에서의 종방향 변위(δ_y) 변화 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 교우각 θ_{tj} 이 작아질수록 각 지점별 좌우측벽부 종방향 변위($\delta_{lsp,y}$ 및 $\delta_{rsp,y}$)가 크게 발생하는 경향을 보여주고 있어 연약대가 터널축과 급한 각도(acute angle)로 만날 경우 종방향 변위가 더 우세하게 발생하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 연약대를 관통하는 터널의 변위거동에 관한 연구내용을 다루었다. 이를 위해 발파굴착 공법이 적용되는 터널을 대상으로 다양한 연약대 조건을 도출하고 이에 대한 3차원 해석을 수행하여 연약대의 주향 및 경사와 터널 변위 거동과의 관계에 대한 매개변수 연구를 실시하였다. 해석결과를 토대로 터널이 연약대를 관통하기 이전에 보이는 변위 거동 연약대의 공간적 분포특성을 고찰하였으며 이를 토대로 현재 실무에서 적용되고 있는 3차원 계측결과와 활용방안을 모색하였다.

1. 균질한 지반에 시공되는 조건의 터널의 경우 인접한 터널 천단 처짐곡선 사이의 면적이 일정하게 유지되나 연약대를 통과하는 터널의 경우 통과 이전부터 인접한 처짐곡선의 면적이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 기존의 연구결과와 잘 부합되는 결과로서 연약대가 현장 계측결과를 이용한 처짐곡선 작도를 통해 전방 연약대 존재여부를 예측할 수 있음을 의미한다.
2. 연약대를 통과하는 터널의 좌우측벽부 변위비는 연약대 통과이전에 급격하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타나 터널계측이 적절히 이루어질 경우 좌우측벽부 변위비를 분석을 통해 미리 예측하지 못한 연약대의 존재를 미리 파악할 수 있는 지표로 활용될 수 있는 것으로 분석되었다.
3. 터널 굴진축과 직교하거나 큰 각도로 조우하는 연약대의 경우가 작은 각도로 교우하는 조건 보다 터널의 변위거동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 연약대가 터널의 안정성에 미치는 영향에 대한 평가시 연약대와 터널의 상대적 위치 특성을 고려하여야 함을 나타낸다고 하겠다. 따라서 2차원 해석시 연약대와 터널굴진축이 직교한다는 가정이 연약대의 영향을 가장 보수적으로 평가하는 모델링이라고 할 수 있다.
4. 연약대의 주향이 터널 굴진축과 직교하는 조건에서 역경사 방향으로 굴진되는 경우에서 순경사 방향으로 굴진되는 경우보다 터널 천단변위가 더 크게 발생하는 것으로 나타나 동일한 주향의 연약대라도 역경사로 시공되는 터널의 경우에 불리한 영향을 미치는 것으로 검토되었다.
5. 터널의 천단부 및 좌우측벽부 종방향 변위는 연약대 조우이전 현저히 증가하는 경향을 보이고 있어 종방향 변위를 이용하여 연약대의 존재여부는 예측이 가능한 것으로 나타났으며 이러한 경향은 절대변위 계측에서 터널축을 따르는 종방향 변위 계측의 중요성을 나타낸다고 하겠다.

감사의 글

본 연구는 (주)포스코건설의 “대심도 장대터널 시공 리스크 분석 및 대응 시스템 개발”에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. Abaqus users manual, Version 6.12. (2011), Hibitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
2. Davis, E.H. (1968), Theories of plasticity and the failure of soil masses. Soil mechanics: Selected topics, Butterworth's London, U.K., pp. 341-380.
3. Lee, I.M., Son, Y.J., Park, K.J. (1998), “A 3-Dimensional analysis for assessing change of ground-condition ahead of the tunnel face”, Journal of Korean Civil Engineering Society, Vol. 18, No. 3-4, pp. 505-519.
4. ITA-CET (2009). Training Course Material - Tunnelling in Hot Climate Country, Monitoring of Tunnels, Riyadh.
5. ITA Working Group No.2 Report (2011), Monitoring and Control in Tunnel Construction, 23p.
6. ITA Working Group No.17 Report (2010), Long Tunnels at Great Depth, pp. 31.
7. Jeon, J.S., Martin, C.D., Chan, D.H., Kim, J.S. (2005), “Predicting ground conditions ahead of tunnel face by vector orientation analysis”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20., pp. 344-355.
8. Kim, K.S., Kim, Y.S., Yoo, K.H., Park, Y.J., Lee, D.H. (2003), “Prediction of change in ground condition ahead of tunnel face using three-dimensional convergence analysis”, Tunnel and Underground Space, Vol. 13, No. 6, pp. 476-485.
9. Kim, K.Y. (2007), “Measurement and analysis of 3-D absolute displacement for prediction of fault zone ahead of tunnel face”, Ph.D. Thesis, Seoul National University, p. 292.
10. Kim, Y.S. (2004), “The prediction of ground condition

- change ahead of the tunnel face using 3-Dimensional convergence analysis”, Masters Thesis, University of Suwon. p. 63.
11. Kun, M., Onargan, T. (2013), “Influence of the fault zone in shallow tunneling: a case study of izmir metro tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 33, No. 1, pp. 34-45.
 12. Ribeiro e Sousa, L. (2004), “Learning with accident and damage associated to underground works”, *Geotechnical Risk in Rock Tunnels*, Campos e Matos, A., Ribeiro e Sousa, L., Kleberger, J., and Lopes Pinto, P. (Editors), Taylor & Francis.
 13. Schubert, W., Budil, A. (1995), “The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation”, *Proceedings of the 8th ISRM Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1411-1444.
 14. Schubert, W., Steindorfer, A., Button, E.A. (2002), “Displacement in tunnels – an overview, FELSBAU”, Vol. 20, No. 2, pp. 7-15.
 15. Schubert, P., Vavrovsky, G.M. (1994), “Interpretation of monitoring results”, *World Tunnelling*, pp. 351-356.
 16. Steindorfer, A. (1998), “Short term prediction of rock mass behaviour in tunnelling by advanced analysis of displacement monitoring data. Ph.D thesis”, Department of Civil Engineering, Graz University of Technology, Austria.
 17. Steindorfer, A., Schubert, W. (1997), “Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediction on tunnelling”, *Proceedings of the International Symposium on Tunnels for People*, Vienna, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 65-79.
 18. Yoo, C., Cho, Y.G., Park, J.G. (2013), “Effect of Orientation of Fracture Zone on Tunnel Behavior – Numerical Investigation”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 253-270.