

도시 NATM 터널의 변형율 연화모델을 이용한 지반거동예측

The Prediction for Ground Movement of Urban NATM Tunnels using the Strain-softening Model

김영수¹, 정우섭^{*2}, 이성윤³, 석태룡⁴

Kim, Young Su · Jeong, Woo Seob · Lee, Sung Yun · Seok-Tae Ryong

Abstract

In case of an urban tunnel, the displacement of ground base controls the tunnel design because it is built on shallow and unconsolidated ground many times. There are more insufficiency to describe the ground movement which coincides in the measured result of the situ because the design of an urban tunnel is dependent on the method of numerical analysis used to the existing elastic and elasto-plastic models. We studied about the prediction for the ground movement of a shallow tunnel in unconsolidated ground, mechanism of collapse, and settlement. Also this paper shows comparison with the existing elastic and elasto-plastic model using the unlinear analysis of the strain-softening model. We can model the real ground movement as the increasement of ground surface inclination or occurrence of shear band by using strain-softening model for the result of ground movement of an urban NATM tunnel.

Keywords: NATM, numerical modeling, elasto-plastic model, strain-softening model

요지

도심지 터널은 미고결성 저토피고 지반에 건설되는 경우가 많기 때문에 지반변위가 터널 설계를 지배하며 설계는 기존의 탄성 및 탄소성 모델을 활용한 수치해석적인 방법에 크게 의존하고 있기 때문에 현장의 계측결과에 부합하는 지반 거동을 묘사하기에는 부족한 점이 많다. 미고결성 저토피고 지반에 대한 터널 굴착시 지반 거동, 붕괴 메카니즘 및 침하량 예측에 관해 연구하였고 변형율 연화를 고려한 비선형 해석을 실시하여 기존의 탄성 및 탄소성 모델과 비교하였다. 도시 NATM 터널의 지반거동을 파악한 결과 미고결성 저토피고 지반의 경우 변형율 연화 모델을 적용하는 것이 지표면 침하 기울기가 급해지거나 전단대가 발생하는 등 실제의 지반 거동을 현실적으로 모델링 할 수 있었다.

주요어: NATM, 수치해석, 탄소성 모델, 변형율 연화모델

¹ 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 공학박사

^{*2} 경북대학교 토목공학과 박사과정 공학석사 (jws2713@hanmail.net)

³ 구미시 공무원 공학석사

⁴ 구미시 공무원 공학석사

1. 서론

도심지 터널은 미고결성 저토피고 지반에 건설되는 경우가 많기 때문에 일반 산악터널이나 대심도 암반층에 건설되는 지하공동과는 달리 지반변위가 터널설계를 지배하는 주요 인자로 대두되며 지중 및 지상에 존재하는 각종 인접 구조물의 안정성 확보가 중요하다 (Moreno, A. and Schmitter, A. A. 1981; 한국지반공학회, 1998). 하지만 국내의 도심지 터널 시공사례를 보면 터널굴착시의 계측값과 수치해석을 통한 설계치간의 상당한 차이가 있는 것을 확인할 수 있다(허노영, 1998). 이는 여러 가지 지반 변형모델에 대한 검토나 입력자료에 대한 충분한 고려 없이 터널설계가 이루어지고 있기 때문이며 그에 관한 설계연구도 시공조건을 충분히 고려하지 못하기 때문이다. 현재 미고결성 저토피고 지반에서의 터널 실시설계는 기존의 탄성 및 탄소성 모델을 활용한 수치해석적인 방법에 크게 의존하고 있기 때문에 현장의 계측결과에 부합하는 지반 거동을 묘사하기에는 부족한 점이 많다(한국지반공학회, 2000).

이러한 관점에서 본 연구는 미고결성 저토피고 지반에서의 터널굴착에 대한 안정성을 확보하기 위한 기술 개발을 위하여 터널굴착시 지반거동과 관련된 다양한 수치해석적 연구를 수행하고 합리적인 지반거동 평가를 실시하였다. 따라서 미고결성 저토피고 지반에 대한 터널 굴착시 지반거동, 붕괴메카니즘 및 침하량 예측에 관해 연구하였고 변형율 연화를 고려한 비선형 해석을 실시하여 기존의 탄성 및 탄소성 모델과 비교하였다. 따라서 일본 동북 신칸센의 ○○터널구간 중 615K 750m지점에 대하여 해석모델을 작성하고 구성모델 및 지반 물성치에 따른 파라메타 연구를 실시하여 도시 NATM 터널의 지반거동을 파악하였다. 변형율 연화모델의 경우 연화의 정도에 따라 총 6등급으로 나누어 파라메타 연구를 실시하였고 모델별 변형계수, 측압계수, 마찰각 등 물성치에 따른 변형 거동 특성을 연구하였다. 본 논문에서 수행된 수치해석에는 탄성범위를 넘는 지반의 비선형 거동을 비교적 쉽게 정확하게 모델링 할 수 있는 2차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC 2D 4.0이 사용되었다(Flac 2D 2003).

2. 지반거동 모델

연구에 사용된 지반거동 모델에는 탄성모델, Mohr-

Coulomb 모델, 변형율 연화모델 (strain softening model)이 있다. 탄성모델과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 일반적으로 터널의 설계 및 해석에서 가장 많이 사용되고 있는 모델이며 변형율 연화모델은 미고결성 사질 토 지반 특유의 미끄럼 거동을 전단 변형율량에 대한 전단 강성의 저하로 평가하고 지반강도가 파괴후에 순차적으로 저하해서 잔류치에 이른다는 개념을 도입하고 있다 (Karshenas, 1979). 이 비선형 모델에 의해서 통상의 탄성 및 탄소성 모델로는 표현이 곤란한 지반의 미끄럼 거동 및 파괴상태가 재현되고, 도시 NATM 터널에 있어서 시공시 관리지표가 되는 지표면 침하와 침하구배의 적절한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

변형율 연화모델은 비관련 전단 흐름 법칙 (non-associated flow rule)과 관련 인장 흐름 법칙 (associated flow rule)이 적용되는 Mohr-Coulomb 모델에 기초를 두고 있다. 모델간의 차이점은 Mohr-Coulomb 모델은 해석중 점착력 (c), 마찰각 (ϕ), 다이레턴시 (ψ), 인장강도 (σ^t)가 일정하게 유지되나 변형율 연화모델에서는 그림 1과 같이 소성 항복이 발생한 이후 이 값들이 경화하거나 연화한다는 점이다. 따라서 사용자가 그림 2와 같이 점착력, 마찰각, 다이레턴시를 소성 전단 변형율 증분에 따른 경화 파라메타의 선형적 함수로 정의하고 인장강도는 소성 인장 변형율에 따른 경화 파라메타의 항목으로 거동을 묘사한다. 그 값은 각 시간 단계에서 경화 파라메타의 증분에 의한 전체 소성 전단 및 인장변형율에 의해 측정되어지고 사용자가 정의한 함

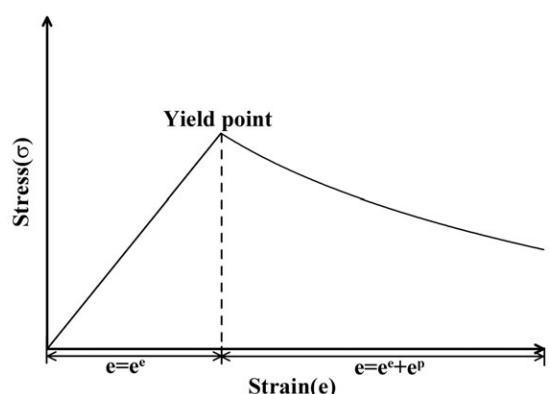


그림 1. 응력 - 변형율 곡선

수에 의해 모델의 입력값으로 확정되어 진다. 단, 항복 함수, 소성흐름법칙, 응력보정은 Mohr-Coulomb 모델과 동일하다.

소성 전단 변형율은 전단 경화 파라메타 e^{ps} 에 의해 얻어지며 충분 형태로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\Delta e^{ps} = \left[\frac{1}{2} (\Delta e_1^{ps} - \Delta e_m^{ps})^2 + \frac{1}{2} (\Delta e_m^{ps})^2 + \frac{1}{2} (e_3^{ps} - e_m^{ps})^2 \right] \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta e_m^{ps} = \frac{1}{3} (\Delta e_1^{ps} + \Delta e_3^{ps}), \\ \Delta e_j^{ps} \quad (j=1, 3); \text{ 소성 전단응력 증분}$$

지반을 구성하는 재료의 경화 혹은 연화는 항복을 한 후 점차적으로 발생하며 토립자간의 미끌림 혹은 미세한 균열의 결과로 보다 비탄성적인 거동을 보이게 된다. 또한 이러한 현상은 전단대의 발생이나 강도의 저하를 가져오게 된다(Adachi, Oka, Zhang, 1998). 본 논문에서 입력되어지는 연화 파라메타는 위에서 설명한 것과 같이 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용하여 소성 변형율의 함수로써 접착력, 마찰각을 감소시키고 팽창각, 인장강도에 대한 변형을 연화는 본 연구에서 생략하였다.

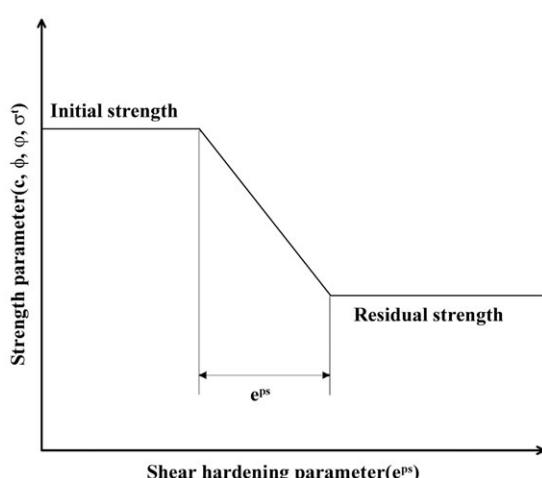


그림 2. 변형율 연화 과정

3. 수치해석에 의한 파라메타 연구

3.1 연구 대상 현장

본 논문의 연구 대상 현장은 일본의 ○○ 터널로 해석 지점의 지형 및 지질은 미고결성 사암지역으로 연구의 목적이 되는 연약한 지반에 굴착되는 터널의 주변 지반 거동을 명확하게 파악할 수 있다. 더욱이 사질 지반의 특성이 크게 발현되어 사질토 특유의 전단대(shear band)가 발현하기 때문에 이 전단 파괴면을 따라 슬라이딩이 발생하여 지반이 이완하거나 터널의 침하가 발생할 가능성이 있는 지점이다. 또한 굴착 깊이가 평균 12~13m로 저토파고에 굴착되는 도시 NATM 터널의 특징을 잘 반영한 지점으로 본 연구 목적에 적합한 단면이다. 계측항목은 그림 3과 같이 터널의 천단침하, 내공변위 및 지표면 침하를 포함한 터널 직상부로부터 0m지점, 6m지점, 12m지점의 지반변위이다. 또한 전단대의 발현을 확인하기 위하여 터널 직상부 지점에서 좌우측으로 각각 45°의 경사를 주어 대각선 방향으로 계측기를 설치하여 지반 거동을 측정하였다(Hansmire, Cording, 1985).

3.2 해석 단면의 모델링

터널의 천단에서 지표까지는 13m로 대략 1D (터널의 직경, D=12m)의 저토파고에 해당하며 지표면은 대체로 평坦한 지형을 보이므로 그림 4처럼 수평으로 모델링하였다. 지반 구성은 본 터널의 지반조사보고서를 참조하

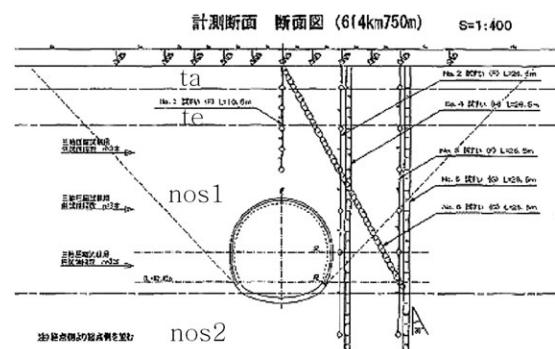


그림 3. 계측 단면도

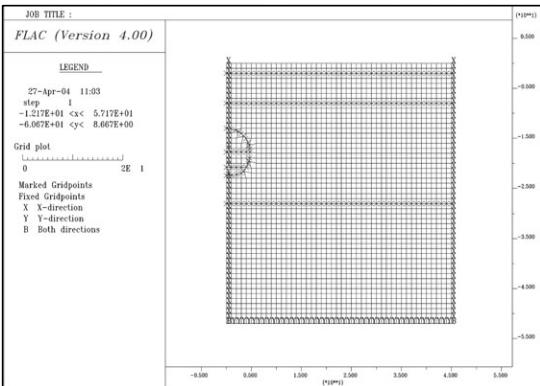


그림 4. 모델링 단면

여 4개의 지층으로 구분하였으며 그림 4와 같이 해석단면의 대칭성을 고려하고 입력자료가 동일하다는 가정하에 반단면만을 모델링하였으며 결과는 전단면으로 나타내었다. 또한 연구의 목적이 미고결성 저토피고에 시공되는 도시 NATM 터널의 지반거동을 사실적으로 규명하기 위하여 지반 구성 모델간, 지반 물성치간의 변화가 터널 및 지반 거동에 어떻게 영향을 미치는지를 검토하는 것이므로 지반 및 지보부재에 대해서는 간략화해서 모델화를 행하기로 한다. 경계조건은 사전에 예민성 연구를 통하여 굴착 후에도 지반의 응력 및 변위 등의 결과가 일정하게 유지되는 3D로 설정하였고 해석과정은 시공순서에 따라 초기응력상태 (SETP 0), 상반굴착 (SETP 1), 상반지보 설치 (SETP 2), 하반굴착 (SETP 3), 하반지보 설치 (SETP 4), 인버트 굴착 (SETP 5), 인버트 설치 (SETP 6)의 총 7단계로 모델링하였으며 지반반응곡선의 연구를 통하여 하중 분담율은 각 단계에서 40% - 60%로 적용하였다(FLAC 2D, 2003).

3.3 기본 입력자료의 선정

터널의 안정성 해석에 있어서 가장 중요한 것은 현지 지반특성을 얼마나 해석에 잘 적용하는가에 달려있다. 터널 설계시 지반물성이 터널 주변지반의 거동에 미치는 영향은 매우 크기 때문에 보다 합리적인 터널해석을 위해서는 해석에 사용되는 설계정수 산정에 세심한 주의가 요구된다. 본 논문에서는 기본 해석의 경우를 선정하기

표 1. 지반의 기본입력자료

구분		단위 중량 (kN/m ³)	탄성 계수 (MPa)	포아 순비	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (°)
ta	화산 잔적토	14	10	0.286	30	0
		18	10	0.286	45	0
nos1	사질토	20	160	0.286	30	35
		20	200	0.286	50	35

표 2. 지보재의 입력자료

구분	Shotcrete	Invert
탄성계수 (kPa)	5,000,000	5,000,000
포아순비 (□)	0.2	0.2
면적 (m ²)	0.2	0.2
단면2차모멘트	0.00067	0.00067

위하여 국내의 기존 터널해석에 사용된 입력자료 및 대상 터널의 실내시험과 설계보고서를 바탕으로 표 1과 같이 기본 입력자료를 결정하였다. 측압계수의 경우 0.4, 0.7 및 1.0에 대해 해석을 실시하였다. 지층은 그림 3, 4에서 보듯이 지표로부터 화산잔적토 (ta, te)와 사질토 (nos1, nos2)순으로 구성되어 있으며 터널이 굴착되는 지층은 nos1 구간이 된다. 지보패턴에 대해서는 속크리트 만을 모델링하고 나머지 락볼트에 대해서는 생략한다. 이는 터널 굴착지역이 미고결 토사지역이므로 락볼트가 충분한 인장력을 부담하지 못하기 때문이라고 판단하였고 굴착에 따른 지반변위만의 거동을 살펴보기 위하여 기타의 지보에 대해서는 생략하였다. 이러한 이유로 현재 일본이나 외국에서 시공되고 있는 얇은 NATM 터널의 경우에 락볼트를 시공하지 않는 경우가 많다. 속크리트는 빔 요소로 모델링하였으며 입력자료는 표 2와 같다. 또한 인버트 굴착후 인버트를 폐합하여 설치하게 되는데 이때 인버트 부분의 물성치도 속크리트와 동일하게 적용하였다.

3.4 설계 파라메타의 선정 및 입력

연구된 설계 파라메타는 공통 파라메타 → 탄성 파라메

타→탄소성 파라메타→연화 파라메타의 흐름으로 해석을 실시하였다. 이때 공통 파라메타는 K_0 , 탄성 파라메타는 E , 탄소성 파라메타는 ϕ , ψ 를 고려하였으며 변형율 연화의 경우 c , ϕ 의 경우에 대해 연화율 $\Delta\sigma$ 와 전단 변형율 증분항으로 표시되어지는 $\Delta\gamma$ (식 (1)에서의 e^{ps} 와 동일)에 대해 고려하였다.

해석 결과에 크게 영향을 미치는 K_0 의 경우 현장에서 실험의 정확성이나 비용의 문제로 실제의 값을 구하기가 어렵다. 따라서 모든 해석을 경우별로 0.4, 0.7, 1.0의 3가지 경우를 적용하였다. 탄성 변형에 관한 입력자료인 변형계수 (E)의 경우는 각 지층별로 기본 조건 ($E=10, 10, 160, 200MPa$)에서 □0.5, □, □.5 배를 곱한 값을 적용하였다. 또한 탄소성 변형에 관한 입력자료인 마찰각은 실내실험 자료를 통하여 비교적 정확하게 실제 지반의 값을 예측할 수 있으며 참고자료를 통하여 매우 느슨한 지반의 경우 25°, 느슨한 경우 35°, 조밀한 경우 45°를 적용하였다. 이렇게 점착력은 파라메타 연구를 하지 않고 마찰각만을 연구한 이유는 대상 터널의 주변 지반이 앞에서도 언급하였듯이 사질지반의 특성이 현저하므로 점착력은 생략하고 사질토의 특성을 좌우하는 마찰각에 의해서만 검토하였다. 또한 다이레턴시는 어떤 지반이 전단 파괴가 일어날 때 발생하는 체적의 변화를 나타내며 Vermeer and de Borst (1984)가 제시한 추천값에 따라 매우 느슨한 지반 5°, 느슨한 지반 10°, 조밀한 지반 15°를 입력하였다(Vermeer, Borst, 1984).

변형율 연화모델의 설계 파라메타로는 초기강도인 점착력 (c_i), 마찰각 (ϕ_i)에 대한 잔류강도인 점착력 (c_r), 마찰각 (ϕ_r)의 연화율 ($\Delta\sigma$)에 대해서 60%, 40%에 대해 검토하였으며 연화 속도와 관련하여 잔류강도에 도달하기까지의 전단 변형율 증분관련항 ($\Delta\gamma$)에 대해서 0.04, 0.02, 0.01의 3가지 경우에 대하여 그림 5와 같이 검토하였다.

지금까지 설명한 파라메타 연구의 해석 경우를 정리하면 해석시 고려된 설계 파라메타 수는 5개이며 총 해석 경우의 수는 탄성모델 9개, 탄소성 모델 27개, 다이레턴시를 고려한 탄소성 모델 27개, 변형율 연화모델의 경우 각 경우별로 27개씩 6개의 연화등급에 따라 162개이다. 따라서 구성 모델 및 지반 물성치에 따라 총 225개의 경우에 대해 수치해석을 실시하고 이에 따른 지반 및 터널의 변형 거동, 파괴 모드 등을 확인하였다.

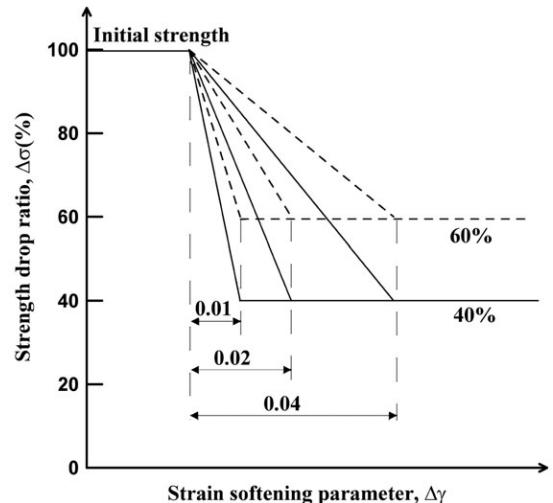


그림 5. 적용된 연화 파라메타

4. 수치해석 결과

4.1 지반의 변위

수치해석 결과 탄성, 탄소성, 변형율 연화모델 순으로 변위가 크게 발생하였고 변형율 연화모델의 경우 연화율이 큰 경우가 역시 변위도 크게 발생하였다. 지반 구성 모델이 같을 때를 비교해 보면 지반의 물성치가 약할수록 변위가 크게 발생하였다. 하지만 같은 모델에서 지반 물성치의 변화에 따른 지반의 거동은 상반 굴착 (step 1) 이후부터 그 값이 달라진다. 하지만 지반 물성치는 같고 구성 모델이 다른 경우에 상반 굴착시에는 모델에 관계없이 거의 유사한 값을 보여주나 하반 굴착 (step 3) 이후로 그 값이 모델에 따라 달라진다. 이것은 상반굴착시는 지반이 아직 탄성거동만을 하므로 모델에 따른 차이가 거의 없으나 하반 굴착이후로 서서히 소성영역이 발생하여 지반 모델에 따른 차이가 발생하는 것이다. 지중 수평변위의 경우 터널 중심부로 6m지점의 깊이별 지중 수평변위를 나타내었다. 그림 6에서 수평 변위 역시 터널의 굴착되는 깊이에서 가장 큰 변위가 발생하였고 연화율이 큰 경우가 수평변위가 크게 발생하였다. 지층의 경계부인 8m 지점에서 꺾이는 현상이 나타났다. 그림 7의 경우 측압계수에 따른 지중수평변위를 나타내고 있으며 측압계수가 0.4인 경우에 변위의 부호가 변하는 거

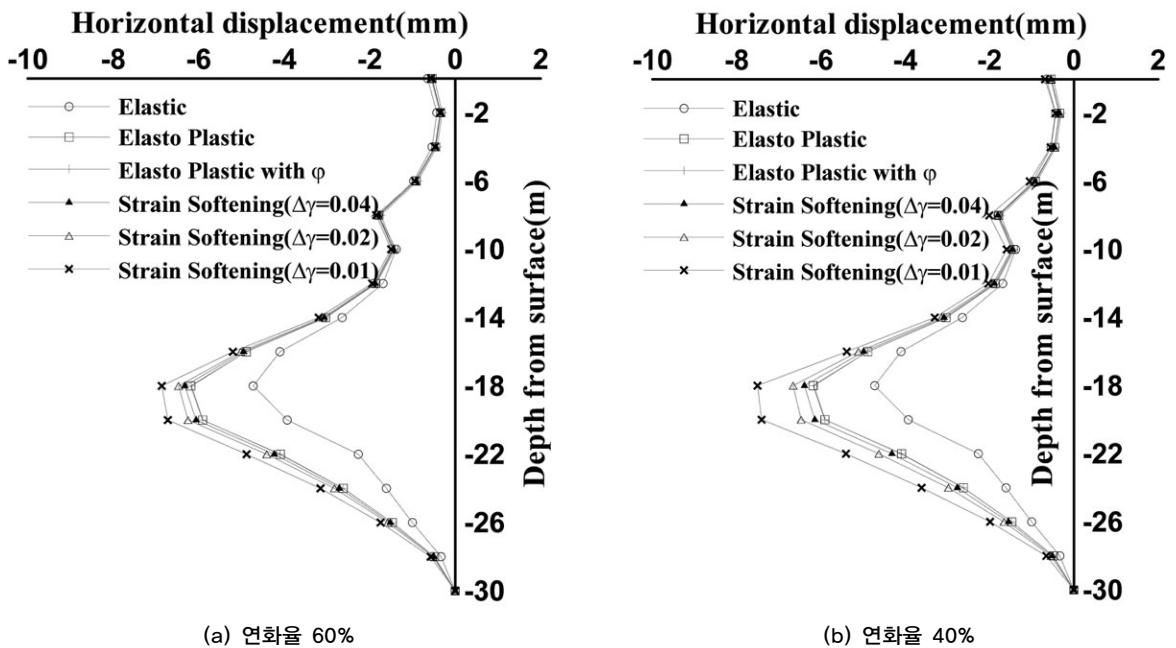


그림 6. 모델별 지중 수평변위 (6m 지점)

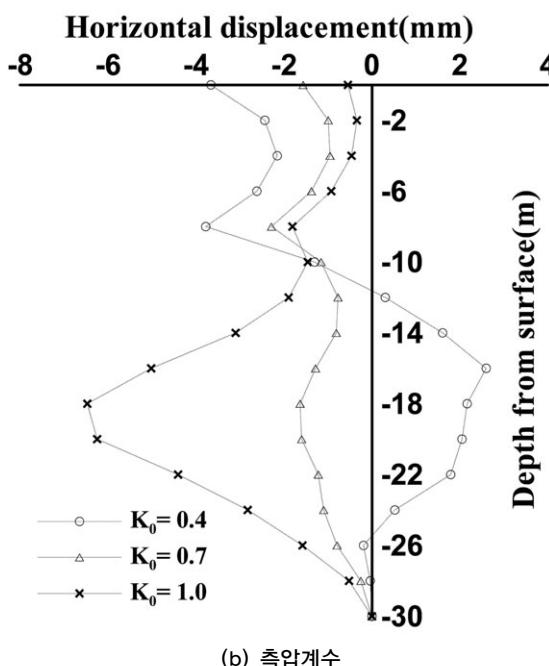


그림 7. 측압계수에 따른 지중 수평변위 (6m 지점)

동이 나타났다. 이는 측압계수가 0.4인 경우 수평응력이 수직응력에 비해 상대적으로 작아 터널주변의 지반이 공동쪽으로 변위가 발생하는 것이 아니라 오히려 팽창하여 터널 바깥쪽으로 변위가 발생하는 것을 뜻한다. 내공변위나 지반의 수평변위의 경우에도 측압계수에 따라 그 거동이 완전히 다른 양상으로 나타났으며 적절한 측압계수의 설정이 무엇보다 중요하다고 하겠다(Peck, 1981).

저토피고 터널의 경우 수치해석의 특성상 지표의 기울기만 완만하게 분포해 실제의 급속한 침하 등을 재현할 수 없는 점을 고려해 보면 변형율 연화모델의 경우 실제 발생하는 지표 침하형태를 사실적으로 재현할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 모델별 전단변형률 분포

모델별 최대 전단 변형율 분포를 나타내면 그림 8과 같다. 흙은 전단파괴에 약하므로 파괴시 전단에 의해 그 파괴모드가 결정되며 따라서 최대 전단 변형율 분포에 따라 변형 모드가 결정되어 진다. 탄성 모델의 경우는 그림 8(a)에서 보듯이 터널 굴착면 전체에 걸쳐 균등하

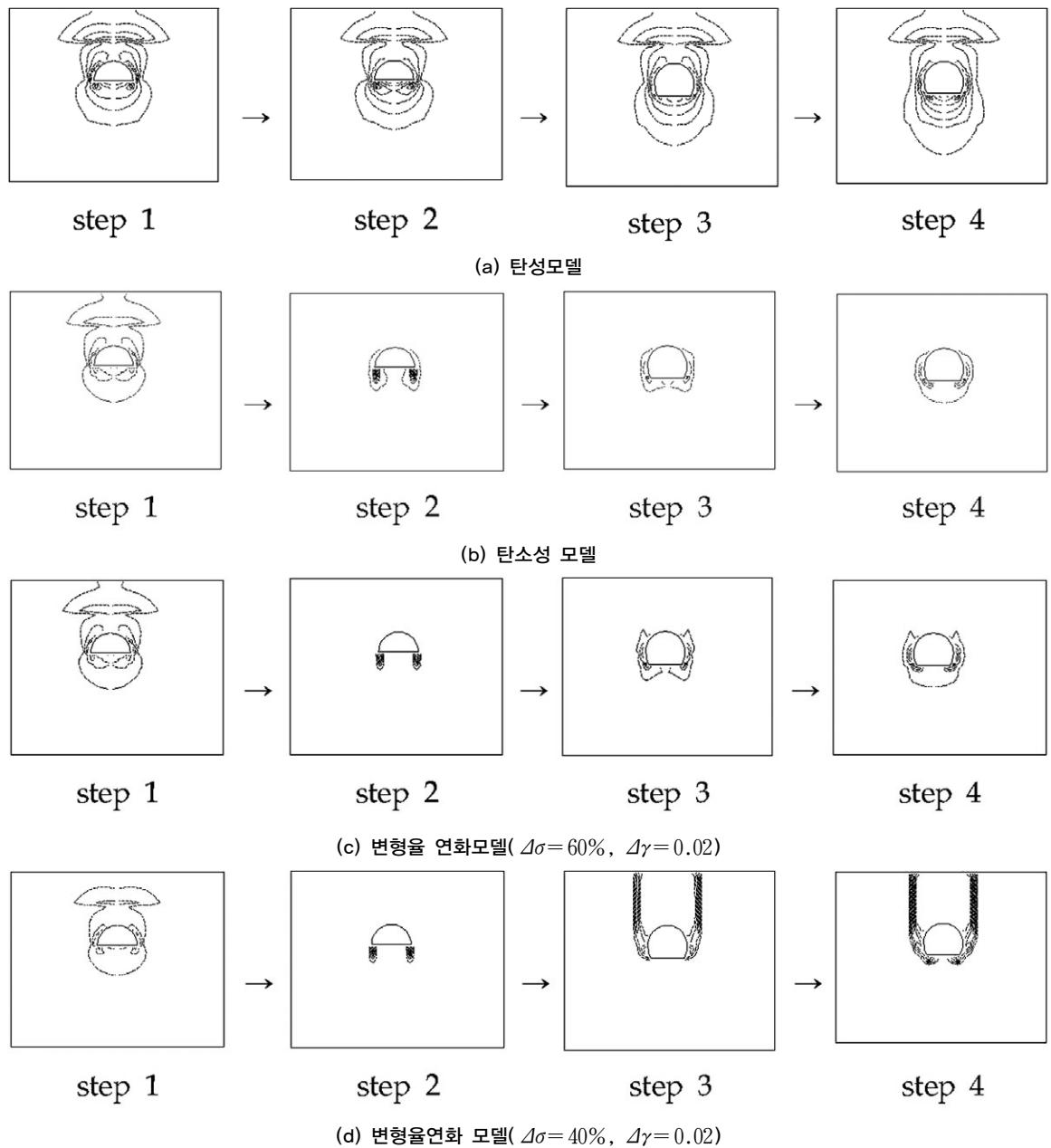


그림 8. 모델별 변형모드

고 넓게 최대 전단 변형율이 분포하게 된다. 하지만 탄소성의 경우 굴착면의 좌우 측벽면에서 최대값이 분포하게 되며 연화 모델의 경우에는 전단대가 지표면으로 서서히

발달하면서 40%, 0.02의 연화모델의 경우는 전단대가 지표까지 도달하여 그 전단대를 따라 슬라이딩이 발생하고 터널의 침하가 발생하여 결국은 파괴에 이르는 과정

을 보여주고 있다. 또한 이러한 최대 전단변형율의 분포는 상반 굴착시에는 모델에 관계없이 유사하게 분포하지만 굴착이 진행될수록 모델간의 차이가 현저하게 된다.

4.3 연화파라메타별 전단변형률 분포

그림 9는 연화 파라메타에 대한 최대 전단 변형율 분포이다. 그림에서 60%, 0.02인 경우부터 전단대의 발생이 서서히 시작하며 그것보다 연화의 크기가 큰 경우에 있어서는 전단대가 지표까지 도달함을 알 수 있고 40%, 0.01의 경우는 최대 전단 변형율이 터널 아래쪽부터 발생하여 지표까지 도달한 것을 알 수 있다. 이러한 전단대의 분포는 토피가 깊은 산악터널에서도 발생하지 않으며 얕은 터널의 경우 아침현상이 충분히 발현될 토피가 없으므로 이 작용이 바로 지표면까지 도달하여 지반이 충

분한 지보로써의 능력을 발휘할 수 없게 된다. 따라서 그 면을 따라 전단파괴가 발생하며 이 전단파괴면을 따라 터널 상부의 흙이 슬라이딩을 일으켜 지표 침하와 천단의 침하가 거의 같은 터널침하나 붕괴에 이르는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서 미고결성 저토피고 지반에 시공되는 도시 NATM 터널의 거동을 분석하고 합리적인 설계 수법을 제안하기 위하여 비선형 모델인 변형율 연화모델을 적용하여 다양한 파라메타 연구를 실시한 결과는 다음과 같다.

1. 수치해석 결과 변형율 연화모델이 기존의 탄성이나

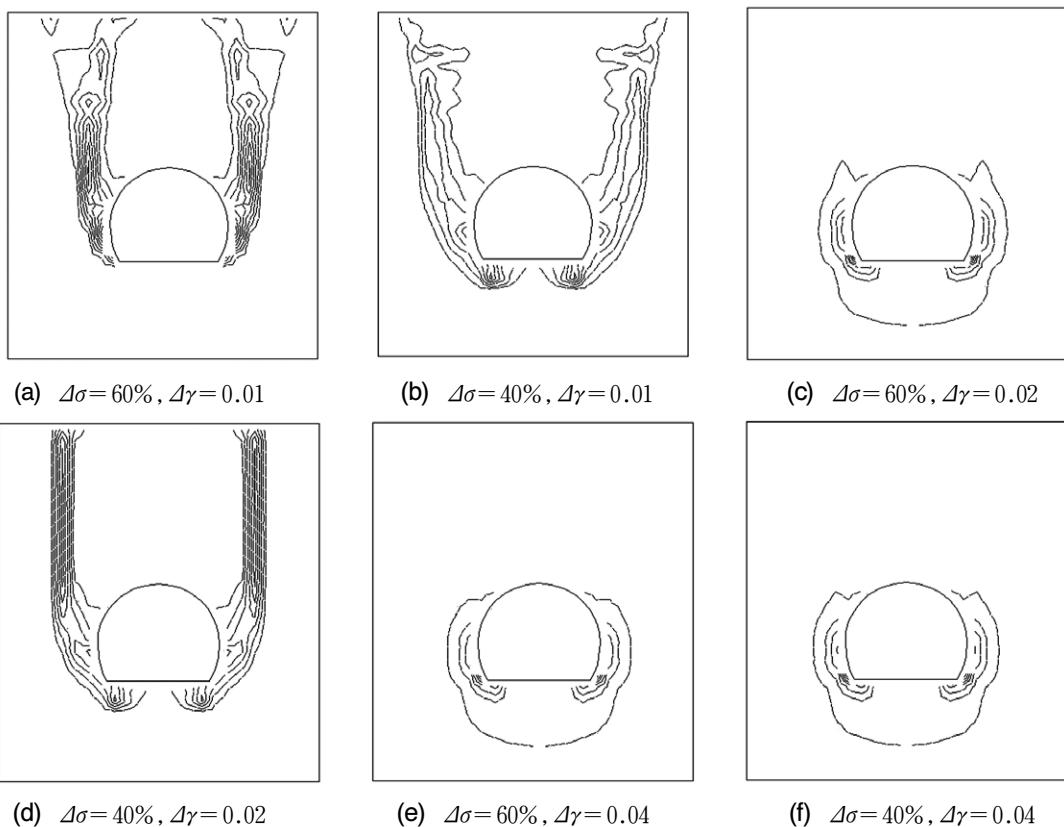


그림 9. 연화 파라메타별 변형모드

- 탄소성 모델보다 침하 및 전단대가 발생하는 실제의 미고결성저토파고 지반에 굴착되는 터널의 거동을 현실적으로 모델링 할 수 있었으며 연화 정도에 따라서도 많은 차이가 나타났다.
2. 동일한 지반 모델간에서도 변형계수, 측압계수, 마찰각 등의 지반 입력자료에 따라 터널주의 지반 거동이 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 특히 내공변위 및 수평변위의 경우 측압계수에 대한 영향이 매우 큰 것으로 나타났다.
 3. 도시 NATM 터널의 설계나 해석시 지반 거동에 대한 명확한 이해로 적절한 지반 구성 모델의 선정이 중요함을 알 수 있었으며 파괴에 이르는 일련의 과정을 보다 사실적으로 모델링하기 위해서는 변형율 연화모델의 적용이 적합한 것으로 나타났다.
 4. 최대 전단 변형율 분포에 따라 변형 모드가 결정되어지며 초기굴착시에는 모델에 관계 없이 유사하게 분포하지만 굴착이 진행될수록 모델간의 차이는 현저하게 나타나 연화모델이 전단대형성 및 슬라이딩 등의 실제 거동을 묘사할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 "IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널시공기술개발 - 2-2세세부 터널 시공중 굴착지반의 물성평가 기법 및 그 활용성에 대한연구(과제번호 : C105A1020001-05A0502-00220)" 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Moreno, A. and Schmitter, A. A. (1981), Failures of shafts and tunnels in soft soils, Soft-Ground Tunnelling, Ed. Balkewa.
2. Karshenas, M. (1979), Modelling and Finite Element Analysis of Soil Behavior, Ph.D Thesis, Univ. of Illinois, UrbanaChampaign, pp. 278.
3. Peck, R. B. (1981), Weathered rock portion of the Wilson tunnel, Honolulu, Soft- Ground Tunnelling, Ed. Balkewa.
4. Adachi, T., Oka, F. and Zhang, F. (1998), An elasto-viscoplastic constitutive model with strain softening, Soils and Foundations (JAPAN), Vol.38, No.2, pp. 27-35.
5. Vermeer, P. A. and De Borst, R. (1984). Non-Associated Plasticityfor Soils, Concrete and Rock, Heron 29.3, p. 3-64.
6. Hansmire, W. H. and Cording, E. J. (1985), Soil Tunnel Test Section: Case History Summary, Journal of Geotechnical Engineering, V. 111, No. 11 pp No. 20129.
7. FLAC 2D (2003), "User Manual", ITASCA CONSULTING INC.
8. 한국지반공학회 (1998), "터널 (지반공학시리즈7)", 구미서관.
9. 한국지반공학회 (2000), "토목기술자를 위한 암반공학 (지반공학시리즈11)", 구미서관.
10. 허노영 (1998), "퇴적암 지반 Tunnel의 비등방 탄소성 해석", 공학박사 학위논문, 경북대학교 대학원.



김영수

경북대학교 토목공학과 교수
공학박사
kimysu47@hanmail.net



정우섭

경북대학교 토목공학과 박사과정
공학석사
jws2713@hanmail.net



이성윤

구미시 공무원 공학석사
sy0712@hotmail.com



석태룡

구미시 공무원 공학석사
sok2218@yahoo.co.kr