

변형연화모델을 이용한 미고결 지반의 터널변형 Tunnel Deformation in Shallow Unconsolidated Ground by Using Strain-Softening Model

서인식*, 김병탁**

In-Shik Seo*, Byung-Tak Kim**

<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

1. 서 론

도심지 터널은 미고결성 저토포고 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(배규진,

1989, 김창용, 1998). 국내의 도심지 터널 시공 사례를 보면 터널굴착시의 계측값과 수치해석을 통한 예측치 간의 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

* 교신저자, 정회원, 경동정보대학 토목과 교수, 工博
E-mail : isseo@kdte.ac.kr

** GS건설 토목TK설계팀과장, 工博

* Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Engrg.,
Kyungdong College of Techno-information, Ph. D

** Manager, Civil Design-Build Team, GS Engineering
& Construction, Ph. D

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. 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. 본 논문에서 수행된 수치해석에서는 탄성범위를 넘는 지반의 비선형 거동을 비교적 쉽고 정확하게 모델링 할 수 있는 2차원 유한차분 해석프로그램인 FLAC 2D 4.0이 사용되었다(FLAC 2D 2003).

2. 지반거동 모델

연구에 사용된 지반거동 모델에는 탄성모델, Mohr-Coulomb 모델, 변형을 연화모델(strain softening model)이 있다. 탄성모델과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 일반적으로 터널의 설계 및 해석에서 가장 많이 사용되고 있는 모델이며 변형을 연화모델은 미고결성 사질토 지반 특유의 미끄럼 거동을 전단 변형율량에 대한 전단 강성의 저하로 평가하고 지반강도가 파괴후에 순차적으로 저하해서 잔류치에 이른다는 개념을 도입하고 있다(Karshenas, 1979). 비선형 모델에 의해서 통상의 탄성 및 탄소성 모델로는 표현이 곤란한 지반의 미끄럼거동 및 파괴상태가 재현되고, 도시 NATM 터널에 있어서 시공시 관리지표가 되는 지표면 침하와 침하구배의 적절한 예측이 가능할 것으로 판단된다. 변형을 연화모델은 비관련 흐름 법칙(non-associated flow rule)과 관련 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 변형을 연화모델에서는 소성 항복이 발생한 이후 이 값들이 경화하거나 연화한다는 점이다. 본 논문에서 입력되어지는 연화 파라메타는 위에서 설명한 것과 같이 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용하며 소성 변형률의 함수로써 점착력, 마찰각을 감소시키고 팽창각, 인장강도에 대한 변형을 연화는 본 연구에서 생략하였다.

3. 현장개요 및 계측

본 논문은 일본의 동북 신칸센 ○○터널(동북신칸선 터널 시공 기술위원회, 2003)로 종점측 갱구에서 시점 측으로 400m 떨어진 614K 750m에 대해서 계측한 값을 통하여 분석하였다. 이 지점은 사질토의 미고결 지반으로서 연구의 목적이 되는 연약한 지반에 굴착되는 얇은 터널의 주변 지반 거동을 명확하게 파악할 수 있다고 예상된다. 본 연구대상지역은 Fig. 1의 중방향 지질 단면도에 보이는 것처럼 모래가 퇴적하여 그 층이 기반층이 되고 그 상부에 화산재 층이 쌓여 있는 상태이다. 여기서 터널이 시공 되고 있는 층은 세립 분포율이 10%정도이며 균등계수가 5이하인 비교적 세립질의 작은 입자가 나열된 모래층에 위치하고 있는 지층이다. 굴착패턴은 크게 상부 굴착과 하부 굴착을 하는 순으로 실시하였고, 굴착시 보조공법으로는 20cm두께의 슛크리트 시공과 150H의 강제 지보공, 길이 3m의 10개 락볼트 시공, 30cm의 복공 콘크리트 시공 등이 실시되었다. Fig. 2는 락볼트와 안전 대책공을 제외한 터널 단면형상을 나타내고 있다. 계측은 공사 구간중 비교적 평탄하고 토피고가 약 13m 정도의 위치인 614K 750m 부근에서 실시되었고, 계측 위치는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 계측공 평면도 및 횡단면도에 따라 수행되었다. 본 단면에서의 계측 항목은 지표면 침하, 지중 침하, 지중 측방변위, 전단대 변위가 각각 측정되었다.

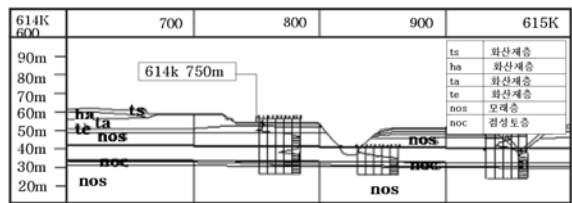


Fig 1. A geological cross section.

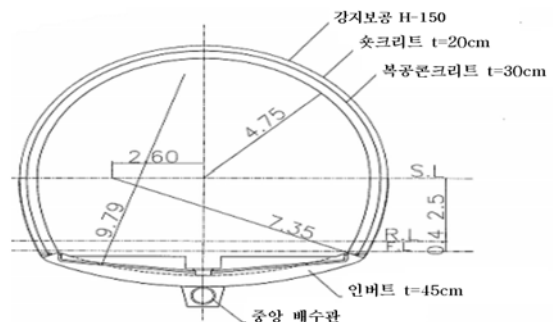


Fig. 2 Tunnel section shape.

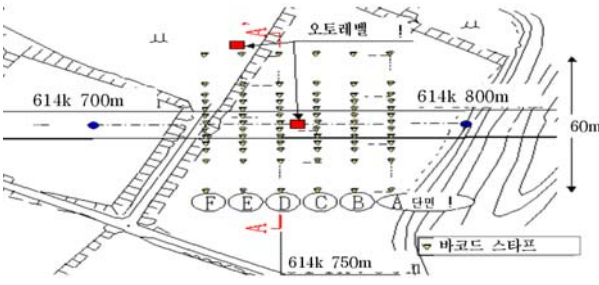


Fig. 3 A longitudinal section at measuring point.

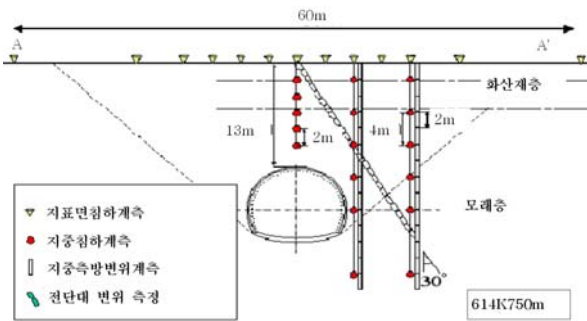


Fig. 4 A cross section at measuring point.

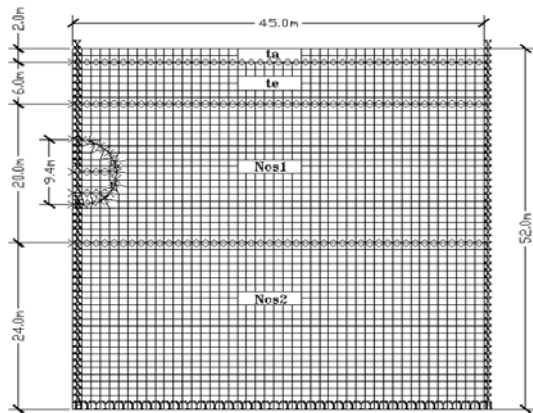


Fig. 5 An analysis section.

4. 수치해석

4.1 해석단면모델링

본 연구에서는 Fig. 5 단면에 대해서 해석모델을 적용했으며 그 해석 단면 모델링은 실제 지반 상태에 가깝게 하기 위해 터널에서의 토피층을 약 13m정도로 하고, 지표면은 평탄한 지형으로 나타내었다.

지반은 앞의 현장 계측과 유사하게 터널의 기반층이 되는 2개의 모래층과 기반층 위에 퇴

적된 2개의 화산재 층으로 총 4개의 지층으로 구분하였으며, 해석단면의 대칭성을 고려하여 반 단면만을 모델링 하여 해석을 실시하였다. 일반적으로는 측벽 및 하부 경계는 터널 주변으로부터 터널 직경의 4~5배 되는 지점에 설치되어진다. 본 해석에서는 좌우 측벽 및 하부 경계를 사전 연구사례를 통하여 굴착 후에도 지반의 응력 및 변위 등의 결과가 일정하게 유지되는 3D로 설정하였고 터널 및 기하학적 형상 조건이 좌우대칭이므로 반 단면만을 모델링 하였다. 본 터널에서는 시공 순서에 따라 초기 응력상태, 상반굴착, 상반지보 설치, 하반굴착, 하반지보 설치, 인버트 굴착, 인버트 설치의 총 7단계로 모델링 하였다.

4.2 입력 물성 값

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 대상 터널의 실내 시험과 설계보고서를 통해서 Table 1과 같이 기본 입력 자료를 사용하였다.

Table 1. Input parameter of Ground

구분	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (KPa)	점착력 (KPa)	내부마찰각 (°)
ta(화산재층)	1.427	5000	30	0
te(화산재층)	1.835	5000	45	0
nos1(모래층)	2.039	80000	30	35
nos2(모래층)	2.039	100000	50	35

본 연구에서 측압계수 값은 현장에서 실험의 정확성이나 비용의 문제로 실제의 값을 구하기가 어렵기 때문에 설계시 사용하는 추정식 방법을 통해 검토를 실시하였다. 모든 해석은 모델별로 0.4, 0.7, 1.0의 3가지 경우를 적용하였고, 그 결과를 통해 현장의 지표 변위량과 비슷한 변위를 보이는 값을 측압계수로 산정하고 다른 지반변위를 검토하였다. 지보부재의 기본 물성값은 본 현장의 설계시 사용한 설계값과 동일하게 사용하였다. 여기서 숏크리트와 복공

콘크리트 합성요소는 빔 요소로 모델링 하였고, 입력값은 Table 2와 같다.

변형을 연화 모델은 FLAC에서 점착력, 마찰각, 다이레턴시, 인장강도의 4개의 강도정수에 대하여 각각 사용자가 정의하는 저감율($\Delta\sigma$)과 저감이 완료되는 시점의 소성 전단변형을 증분 관련항($\Delta\gamma$)을 설정하여 입력 할 수 있지만 본 논문에서는 다이레턴시를 제외한 c, ϕ 에 대한 경우만을 고려하였다. 연화의 정도는 Fig. 6과 같이 강도 감소율에 대해서는 초기강도인 점착력(c_i), 마찰각(ϕ_i)에 대해 저감율을 60%, 40%를 적용하여 잔류강도인 점착력(c_r), 마찰각(ϕ_r)로 변환되는 경우에 대해서 검토하였으며 연화 속도와 관련하여 잔류강도에 도달하기까지의 소성 전단 변형을 증분관련항($\Delta\gamma$)에 대해서는 0.04, 0.02, 0.01의 3가지 경우에 대해서 검토하였다. 각 해석 케이스 별로 연화 모델은 총 18개를 해석하여 연화 모델을 적용한 지반의 거동을 분석하였다.

Table 2. Input parameter of Supports

구분	Shotcrete	Invert	비고
탄성계수(KPa)	5000000	5000000	빔 요소 적용
포아슨비(ν)	0.2	0.2	
면적(m^2)	0.2	0.2	
단면2차모멘트(m^4)	0.0006666	0.0006666	

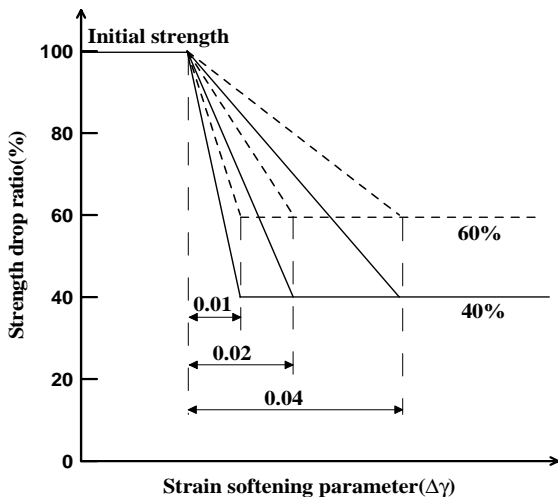


Fig. 6 Softening Parameter.

4.3 결과분석

일반적으로 심도가 얇은 터널의 경우, 굴착에 따른 지반내부 지지력의 상실이 토립자 간에 발생하는 전단변형, 소성 영역의 확대 등을 야기 시키며, 이러한 영향이 지표면까지 전달되어 지표면 침하가 발생하게 된다. 통상 굴착 현장에 관련된 지반 거동의 예측에 대해서는 앞서 연구 동향에서 볼 수 있듯이 경험적 접근, 이론적 접근, 모형실험, 현장 계측 등의 방법으로 많은 연구가 수행되어 왔으나 최근까지 이러한 연구 결과는 지반 거동을 완전하게 규명하지는 못하고 있다. 그래서 본 논문에서는 미고결 지반에 대한 지반 거동을 모델에 따라 분석하여 보다 적합한 모델을 찾아보았다. 먼저 적절한 지반의 측압계수를 가정하여 그 가정 값 중 가장 적합한 변위를 발생하는 값을 찾아보았고, 이렇게 산정된 측압계수를 적용해 지표침하 지중침하 지중 측방변위에 대하여 상·하반 굴착시의 지반거동을 모델별로 검토하여 보았다.

4.3.1 지표침하

도심지 주변에 터널과 같은 지하 구조물이 시공 될 때는 지표면 변위가 중요시 되고 있다. 그것은 지하 터널 굴착시 지표부 구조물의 안정성 판단을 지표면의 침하거동을 통해 판단하기 때문이다. 이번 절은 지표침하 거동에 대해 지반해석 모델과 측압계수(K_0)를 고려하여 현장 계측값과 비교 분석하였다.

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 하반 굴착시의 계측값과 해석값에 대한 지표침하 곡선그래프를 나타내고 있다. 위의 설명과 같이 하반 굴착시에는 모델에 따른 특성이 각각 잘 발생함을 볼 수 있다. 그리고 가정한 측압계수에 대해서 본 현장과 비슷하게 발생하는 것을 찾을 수 있었다.

가정한 측압계수에 따라 각 모델별로 변위를 보면, 연화모델은 $K_0=0.4$ 일 때 연화등급별로 모두 파괴가 발생하였고, $K_0=0.7$ 에서는 최대 22mm정도로 현장 계측값 보다 약 10mm정도의 변위 차이를 보였다.

탄성모델과 탄소성모델에서도 연화모델 보다는 다소 변위는 적게 발생하였지만 측압계수 0.4과 0.7에서는 모두 현장 계측값 보다 더 많은 변위를 보였다. 하지만 각 모델별로 $K_0=1$ 을 적용 했을 때는 모델별로 차이는 다소 있었지만 계

측값에 가장 유사한 변위를 발생하였다.

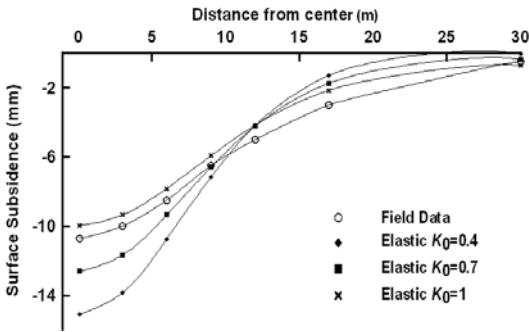


Fig. 7 Surface settlement due to Elastic model.

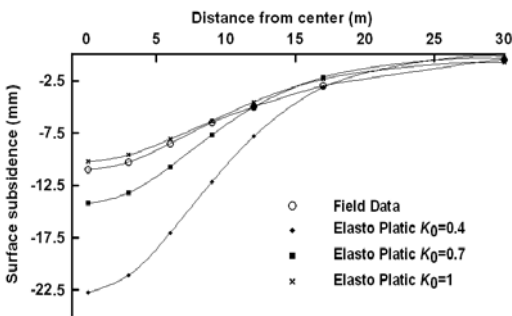
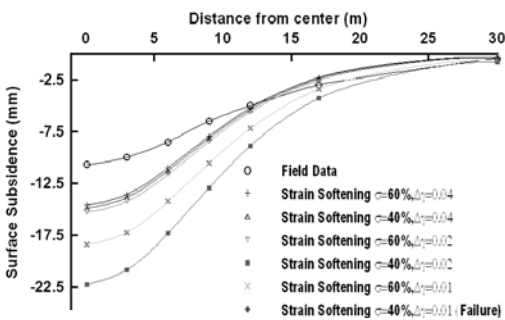
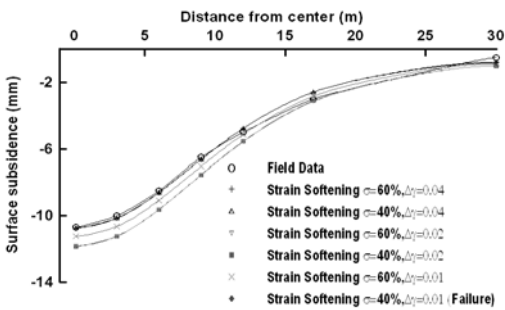


Fig. 8 Surface settlement due to Elasto-Plastic model.



(a) $K_0 = 0.7$



(b) $K_0 = 1$

Fig. 9 Surface settlement due to Softening model.

이것을 통해 현장과 가장 유사한 거동을 갖는 측압계수를 찾을 수 있었다.

하지만 연화 모델의 경우는 전단거동의 영향으로 탄성과 탄소성보다 더 큰 변위와 기울기가 나타났다. 그 중 가장 유사한 거동을 보인 것은 연화 1($\Delta\sigma=60, \Delta\gamma=0.04$), 2($\Delta\sigma=40, \Delta\gamma=0.04$) 등급에서 가장 유사한 변위를 보였다. 도시터널의 경우는 상부에 구조물이 분포하고 있으므로 지표침하의 값보다는 기울기가 중요하다. 그것은 약간 변위가 발생 하더라도 침하 기울기가 급해져 부등침하가 발생한다면 구조물에 심각한 영향을 끼칠 수 있기 때문이다.

Fig. 10은 하반 굴착시의 지표면 침하 기울기를 현장과 비교한 것이다. 여기서 탄성과 탄소성에서는 현장의 최대기울기를 재현 할 수 없음을 알 수 있었고, 연화 모델을 통해서 연화 3등급($\Delta\sigma= 60\%, \Delta\gamma = 0.02$)에서 현장의 최대 기울기와 그 발생지점도 예측 할 수 있었다. 여기서는 약 5m지점까지 계속적인 기울기의 증가를 보임을 확인 할 수 있다.

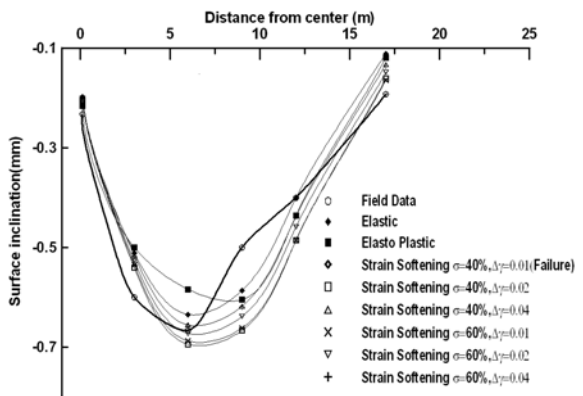


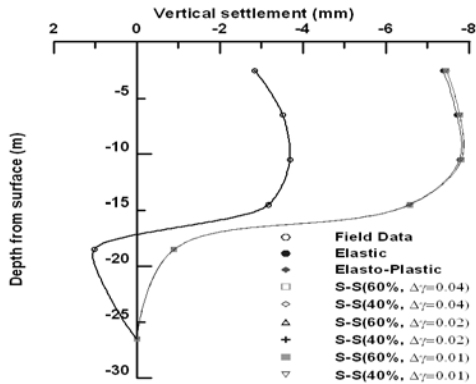
Fig. 10 Surface settlement slope by each model.

지금까지의 지표면 침하거동 분석을 통해서 본 연구지의 수치 해석상 적용될 측압계수는 1.0이 적당하다고 판단되며, 탄성, 탄소성보다도 전단대 거동을 일으키는 연화 모델이 횡방향 지표침하를 재현하는데 보다 적합하다는 것을 알 수 있었다.

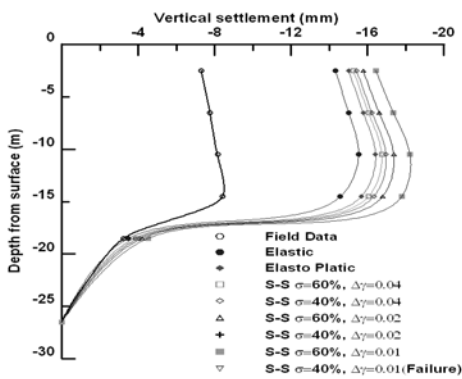
또 이것을 통해서 이와 유사한 미고결 지반에 터널 시공 중 하반 굴착 지점에 대한 횡방향 침하거동은 변형을 연화 모델을 통해서 사전 예측이 가능 할 것으로 판단된다.

4.3.2 지중침하

수치해석상의 터널 상부 지점의 지중침하를 굴착단계별로 지표침하거동과 같이 상반 굴착에서는 모델별 같은 곡선을 보였고, 하반 굴착 단계에서는 모델별 변위 차이를 보였다. Fig. 11은 6m지점에 대해서 상·하반 굴착시 축점별 거동을 나타내고 있다. 본 곡선을 통해 상반 굴착에서는 지표침하의 거동과 같이 지중침하가 모델별 차이를 보이지 않았고 현장과도 많은 변위차를 보여 본 지점의 축점별 침하거동을 예측하기는 어렵다고 판단된다. 그리고 하반 굴착시에는 Fig. 11의 (b)와 같이 깊이 약 18m 이상에서는 지중침하가 수치해석상 현장 값과 유사하게 발생하였고, 18m지점에서 지표까지는 2배 정도로 현장과 변위차를 보였다.



(a) Top excavation.



(b) Bottom excavation.

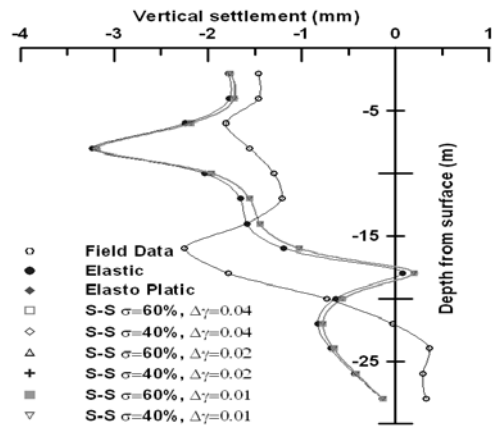
Fig. 11 Underground settlement at 6m point horizontally.

하지만 계측값과 해석값 통해 최대변위의 발생 깊이는 상·하반 굴착단계 모두 약 10에서 20m 사이의 지점에서 발생하였다. 이것을 통해

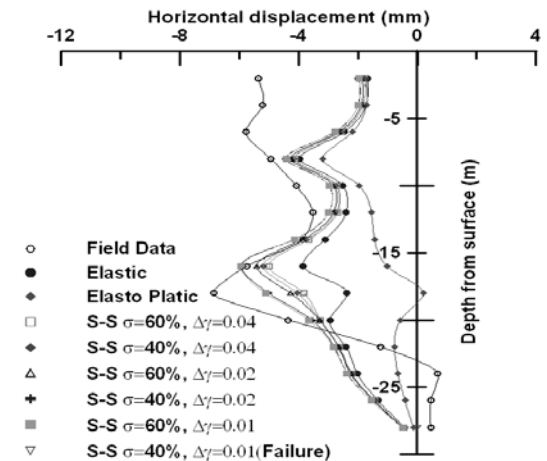
본 지점의 지반에 대해 변위의 차이는 있지만 지반 거동에 대해서는 유사하다는 것을 예측 할 수 있다. 그래서 6m지점의 변위는 모델별로 검토를 하는 것 보다 터널이 굴착되는 깊이에서 많은 변위차가 발생하므로 여기에 대한 적절한 해석방법을 모색할 필요가 있다고 판단된다.

4.3.3 지중 측방변위

본 현장의 측방변위 계측은 전단대의 위치를 파악하기 위해 계측이 실시되었다. 우선 상반 굴착시의 지반의 거동을 보면 탄성모델, 변형율 연화모델, 탄소성모델 모두에서 Fig. 12에서 (a)와 같이 완전히 동일한 곡선을 보이고 있다. 특히 터널이 시공되는 깊이 약18m 지점에서는 현장과 수치해석 간에 상반되는 거동양상을 나타내었다.



(a) Top excavation.



(b) Bottom excavation.

Fig. 12 Underground side displacement at 6m point horizontally.

하반 굴착시에는 해석 값이 상반 굴착단계에 비해 모델별로 변위의 차이를 보이고 있다.

Fig. 12에서 (b)를 보면 탄성·탄소성 모델에 대해서는 터널이 시공되는 깊이에서 계측값과 상이한 변위를 보이지만, 변형을 연화 모델에서는 동일한 방향으로 현장과 유사하게 변위가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Table 3을 통해서 보면 탄성·탄소성보다 연화 모델에서 현장과 보다 가까운 거동을 확인할 수 있다. 그래서 도심지 얇은 터널의 하반 굴착시 터널 주변의 전단대 거동을 올바르게 파악하기 위해서는 탄성·탄소성보다도 변형을 연화 모델로 분석하는 것이 보다 합당하다고 사료된다.

Table 3. Underground side displacement at 6m point horizontally (Bottom excavation)

깊이 (m)	계측값	탄성	탄소성	S-S (40/0.02)	S-S (60/0.01)
-28	0.4552	-0.421	-0.129	-0.498	-0.499
-26	0.4643	-1.324	-0.42	-1.551	-1.555
-24	0.6828	-2.03	-0.655	-2.359	-2.367
-22	-1.241	-2.413	-0.773	-2.805	-2.833
-20	-4.354	-2.94	-0.561	-3.558	-3.658
-18	-6.875	-2.369	0.2039	-5.02	-5.119
-16	-5.746	-3.847	-1.029	-5.918	-5.95
-14	-3.868	-3.107	-1.444	-4.123	-4.138
-12	-3.519	-2.4	-1.554	-2.989	-2.993
-10	-4.084	-2.525	-1.959	-2.974	-2.969
-8	-4.95	-3.964	-3.182	-4.435	-4.416
-6	-5.785	-2.456	-2.181	-2.781	-2.77
-4	-5.207	-1.727	-1.717	-1.996	-1.988
-2	-5.371	-1.688	-1.754	-1.978	-1.968

5. 결 론

본 연구는 사질토 지반으로 구성되어진 얇은 도시 NATM 터널에서의 현장 계측 값과 수치 해석결과를 비교하여 설계단계에서의 적절한 지반 해석방법을 검토 하였다. 상반 굴착단계에서는 모든 지반 해석 모델에서 지표침하, 지중침하, 지중측방변위가 현장 변위와 잘 맞지 않았고, 각 모델별로도 변위 결과가 동일하게 발생 하였다. 그래서 상반 굴착시 지반 변위는 지반 해석 모델을 이용해서는 현장의 거동을 예측하기에는 적절하지 않다고 판단된다. 그래서

이런 상반 굴착에 대한 현장 거동을 예측하기 위해서는 지반해석모델 조건 이외의 다른 지반 입력 값을 통한 연구가 더 필요하다고 사료된다. 하반 굴착단계에서는 $K_0=1$ 을 사용했을 때 지표침하 곡선이 모델별로 현장에 가깝게 거동하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 보다 정확한 지반 거동을 보기위해 나타낸 각 모델별 정규화 그래프를 통해서 전단대 거동을 고려한 변형을 연화 모델이 탄성, 탄소성 모델 보다 현장에 근접하게 발생함을 알 수 있었다. 각 계측 지점별 지중침하는 모델별로 해석한 결과 현장과 많은 변위차를 확인할 수 있었다. 그래서 지중침하의 묘사를 위해서는 가정한 측압계수 이외에 다른 지반 요소를 고려해야 한다고 판단된다. 지중측방변위는 하반 굴착단계에서 횡방향 6m지점의 측방 변위의 발생이 터널굴착 깊이인 약 18m 지점에서 변형을 연화모델에서만 현장과 동일한 거동을 나타내었다. 그래서 본 지점에 대해서는 변형을 연화모델로 해석하는 것이 더 적절하다고 판단된다. 그리고 12m 지점의 측방변위에서는 하반 굴착단계에서 현장과 수치 해석간에 변위의 차이는 있지만 각 모델별로 거동이 유사하게 발생 하였고 모델 간에도 서로 큰 변위 차이를 나타내지 않으므로 본 지점에 대해서는 모델의 선정에 관계없이 현장의 거동을 판단하기에 적절하다고 사료된다. 본 연구에서는 터널의 거동이 아닌 주변 지반 거동만을 연구하였기 때문에 터널의 안정성에 대해서는 알 수 없다. 그래서 본 현장의 터널 변위와 수치해석간의 검토가 더 필요하다. 또 지반에 존재하고 있는 지하수위에 대해서도 고려를 하지 않았기 때문에 이 부분에서도 더 연구 되어야 한다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 김창용(1998) : “도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성 예측과 인접 구조물의 손상 평가에 관한 연구”.
- 2) 배규진(1989) : “토사터널 굴착에 따른 주변 지반의 변위 예측에 관한연구”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, pp. 160.
- 3) 서영호(1993) : “연약암반에 굴착되는 N-ATM 터널의 변형 거동과 보강 설계”, 박사학위 논문, 서울 대학교 대학원.

- 4) 이성운(2004) : “도시 NATM 터널의 지반거동 예측”, 석사학위논문, 경북대학교 대학원.
 - 5) 홍성완, 배규진, 구분효, 정하익(1985) : 현장계측에 의한 터널주변지반의 변위연구, 대한토질공학회지, 제 1권, 제 2호, pp. 41~53.
 - 6) 동북신간선 터널 시공기술 위원회(2003). “침하 예측 연구 계획(제1회 위원회 자료)”.
 - 7) FLAC 2D(2003) : “User Manual”, ITASCA CONSULTING ING.
 - 8) 허노영(1998) : “퇴적암 지반 Tunnel의 비등방 탄소성 해석”, 박사학위논문, 경북대학교
 - 9) Karshenas, M.(1979) : Modelling and Finite Element Analysis of Soil Behavior, Ph.D.Thesis, Univ. of Illinois, Urban Champaign, PP. 278
-
- (2006년 10월 10일 접수, 2007년 5월 23일 채택)