

특정 사례 터널 해석결과 및 평가

이승래*, 오세봉**, 백규호**

ABSTRACT

The GEOKST program was used to solve the tunnel example problem. The package can solve such geotechnical problem as excavation, embankment, foundations, etc., in which the soil can be modeled by various elastoplastic geomaterial models. The main objective was to consider the effects of excavation depth to the face of the tunnel on the stability of the ground and support system. Depended on the strength of the ground materials, the limit excavation depth without any support system could be established by analyzing three-dimensional excavation problem. In this given example problem, the strengths of the ground materials were enough for the stability of the tunnel without any support system up to fairly deep excavation and the maximum tunnel section displacement was stabilized as the excavation proceed. The asymptotic value was approximately the same as that of the plane strain analysis. Thus, assuming the plain strain condition and simulating the actual excavation procedure, the maximum tunnel section displacement was calculated after final step. The maximum calculated displacement occurred at the top section of the tunnel geometry and was about 8mm.

1. 개요

본 해석에서는 여러 지반공학 관련 문제의 거동 해석에 이용될 수 있는 프로그램 GEOKST를 이용하여 주어진 터널 예제문제를 해석하였다. 본 프로그램이 해석단계에

* 한국과학기술원 토목공학과 조교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

서 갖는 특징은 전체 평형방정식을 기준으로 Newton의 반복해석방법을 이용하여 해를 구하며, 지반 및 지보재의 거동을 나타내고자 할 때 사용될 수 있는 모델은 Von-Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hyperbolic(Nonlinear Elastic), Cam-Clay 및 Cap모델 등으로 매우 다양하고, 탄소성 모델에 적용되는 flow rule에 따라 나타내는 강성도 매트릭스가 symmetric인 경우와 non-symmetric인 경우의 어느 경우에도 해를 구할 수 있다는 것등이다.

지반을 모델하고자 할 때는 특히 소성거동을 잘 표현할 수 있는 모델이 사용되어야 하는데 이와 같은 모델은 일반적으로 응력-변형을 관계가 rate 형태로 표현되는 경우가 많다. 이 때 주어진 외력에 대응하는 요소내의 응력을 구하기 위하여 수치해석적 응력 적분 방법을 수행하여야 한다. 본 프로그램에서는 더욱 효율적으로 각 요소내의 응력을 구할 수 있는 함축적인(implicit) 수치해석 응력적분 방법과 그에 대응하는 강성도 매트릭스(consistent tangent matrix)를 각 모델의 경우에 적용하였으며, 이에 대한 자세한 내용은 관련된 참고문헌[1,2]등에서 보고되었다. 따라서, 일반적으로 광범위한 지반을 대상으로 하는 지반공학 관련문제 해석시 이러한 효율적인 방법은 그 해석결과 도출시 상당한 경제적 효율성을 지니고 있다. 이와 같은 방법에 의한 해석결과의 개선된 정확도 또한 여러 문헌[3,4,5]에 발표되어 있다.

2. 프로그램 GEOKST의 특성

주어진 터널 예제문제를 해석하는 과정에서 본 프로그램이 가지고 있는 특성을 살펴 보면 다음과 같다.

2.1 입력 및 출력과정

유한요소법과 같은 수치해석 방법을 이용하여 문제를 해결하고자 할 때 많은 시간이 소요되는 과정이 입력자료 준비과정이다. 특히 입력단계에서 가장 많은 노력을 요구하는 것이 해석에 필요한 대상물의 입력좌표 및 요소절점번호의 입력 등이다. 본 프로그램은 이러한 입력단계를 간편화 하기 위하여 generation 기법을 이용하고 있다. 이러한 기법은 1차원이나 2차원 또는 3차원적으로 행해질 수 있다. 단, 이 기법을 적용하기 위해서는 대상 지반을 요소 세분화하는 과정에서 효율적인 작업이 요구된다.

모든 입력단계가 끝나면 입력자료의 검색이 필요하게 된다. 입력자료의 검색은 여러

가지 방법으로 실행될 수 있지만, 본 프로그램에서는 각 요소들에 대한 강성도 매트릭스의 determinant을 검색함으로써 관련된 요소절점번호 및 절점좌표들의 이상유무를 개략적으로 확인할 수 있으며 주어진 절점좌표값으로부터 형성된 대상지반을 도면화함으로써 검토할 수 있다. 해석결과는 각 점에서의 변위 값을 기준으로 적절한 scale을 이용하여 변형된 대상지반을 도면화할 수 있으며 각 요소내의 응력 및 변형을 등을 도출할 수 있다.

2.2 요소형태 및 적용모델

지반 및 지보재에 적용할 수 있는 요소형태로는 일반적인 continuum요소들을 사용할 수 있으며 그외 contact요소 등이 사용될 수 있다. continuum요소망의 형태는 2차원 평면가정 해석시 사용되는 4절점, 8절점, 9절점 및 3차원 해석시 사용될 수 있는 Brick형 요소등으로 구성될 수 있다.

그리고 각 요소들의 재료성질을 나타내기 위한 모델들은 앞서 기술한 바와 같이 여러 탄소성 모델들이 사용될 수 있다. 따라서, 여러층으로 이루어진 지반의 경우 각 층의 재료성질에 적합한 탄소성 모델이 선택되어 사용됨으로써 보다 적절한 지반모델이 이루어질 수 있다.

2.3 굴착단계 simulation

터널, 굴착 및 성토와 같은 문제를 해석하고자 할 때에는 대상지반의 기하학적 형태가 변화하므로 이를 고려하기 위한 작업이 필요하다. 본 프로그램에서는 성토 및 굴착 공사 단계와 관련하여 소멸되는 요소들과 생성되는 요소들을 구분하여 각 요소들의 강성도 및 외부하중(자중포함)을 조절함으로써 터널, 굴착 및 성토와 관련되어 공사단계에 따라 소멸 또는 생성되는 요소들을 시뮬레이션할 수 있다.

또한 본 해석에서는 막장까지의 거리에 의한 영향을 고려하기 위하여 유사한 터널 단면과 지반조건을 대상으로 3차원 해석을 수행하였다. 그리고 3차원 해석시 굴착 진행 과정에 따라 터널단면 부분의 변위형태를 도시함으로써 막장까지의 거리에 의한 영향을 해석하였다. 각각의 해석결과 지반내 각 절점에서의 변위와 각 요소내의 응력, 변형을 및 최대, 최소 주응력 등을 도출하여 변형된 지반 및 지보재의 형태를 도면화할 수 있다.

3. 예제 해석결과

3.1 막장까지의 거리에 의한 영향

그림.1은 막장까지의 거리에 의한 지반변형의 영향을 고려하기 위하여 사용된 3차원 해석모델을 보여주고 있다. 본 해석에서는 실제 터널단면 및 지반조건과 유사한 형태로 시뮬레이션하여 터널단면이 지보재없이 2m 깊이씩 굴착되는 과정을 묘사하였다. 그림.2는 각 굴착 깊이별로 나타나는 터널단면 부분의 최대 변위값의 변화를 나타내고 있다.

이 그림에 의하면 본 터널 예제의 경우에는 최대 변위가 터널 상단부에서 발생하고 굴착이 진행됨에 따라 변위는 증가하지만, 그 증가율은 감소하여 약 20m 깊이까지 굴착할 때에 갖는 최대 수직변위 값이 약 5.12mm로 평면변형을 가정시에 나타난 수직변위값 5.34mm에 접근하고 있다. 따라서 본 예제의 경우에는 지반의 강도가 상당히 큰 편이며 평면 변형을 가정의 경우에도 비교적 적은 변위값을 나타내므로 지보재 없이도 많은 깊이의 굴착이 가능하게 된다.

그러나, 상대적으로 지반의 강도가 약한 경우에는 어느 정도의 굴착이 진행되면 지반의 변위가 급격히 증가하는 경우가 예상되므로 지반의 강도에 따라 이러한 막장까지 거리의 영향을 고려하여야 한다. 즉 이러한 해석을 통하여 지보재 없이 가능한 굴착깊이를 예측하고, 이에 준하여 공사단계를 조절하는 것이 필요하게 된다. 또한 본 예제의 경우에는 지반 자체의 creep 변형을 고려하지 않았으나, 지반재료 자체가 많은 양의 creep 변형특성을 포함하는 경우에는 시간에 따른 creep 변형 영향을 고려한 터널 굴착 단면의 안정해석이 함께 병행되어야 할 것이다.

3.2 평면변형을 가정에 의한 해석

앞서 얻어진 막장까지의 거리에 의한 영향을 고려한 결과로부터 본 예제터널문제는 평면 변형을 문제로 가정하여 해석하여도 무방하다고 할 수 있다. 따라서 그림.3과 같은 평면 변형을 유한요소망을 이용하였으며, 실제 진행된 굴착 공사단계에 따라 문제를 해석하였다. 그림.3에 보여진 유한요소망은 3차원 해석시보다 훨씬 조밀한 요소망이 이용되었으며 각 지보재 요소 또한 포함되어 있다. 실제 공사단계를 고려하여 본 해석에서 이용한 굴착 simulation 단계는 다음과 같다.

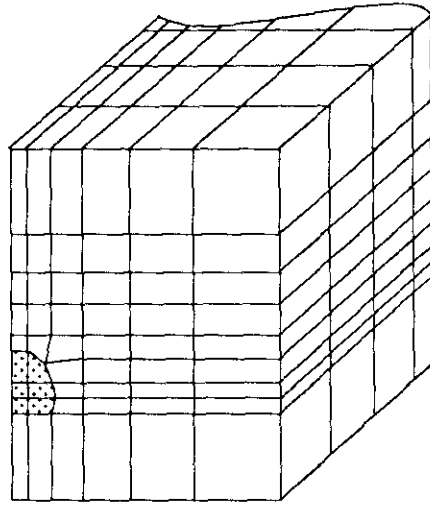


그림 1 3차원 해석 요소망

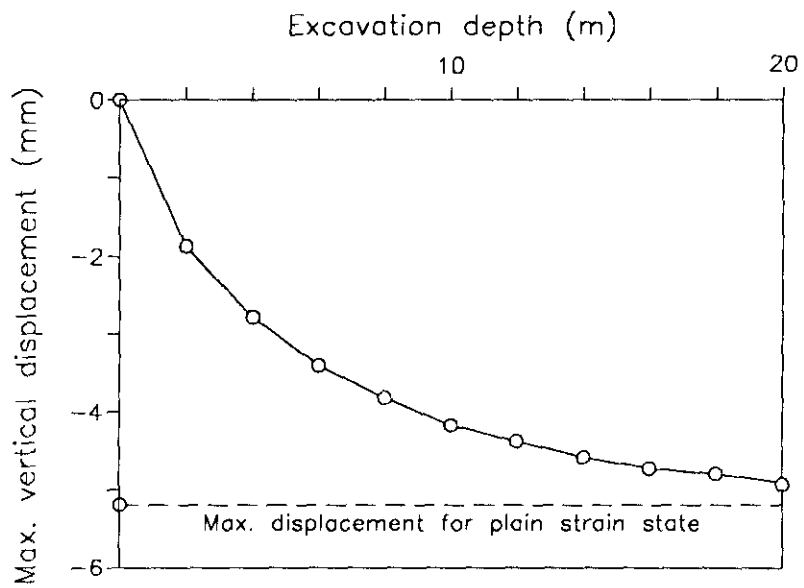


그림 2 굴착단계별 최대 수직변위

- 1 단계 : 자중에 의한 초기응력 산정
- 2 단계 : 터널 상단부 굴착
- 3 단계 : shotcrete 및 rockbolt 타입
- 4 단계 : 하단부 굴착
- 5 단계 : shotcrete 및 rockbolt 타입
- 6 단계 : 인버트 굴착
- 7 단계 : 콘크리트 라이닝

위의 굴착 simulation 단계시 실제로 작용된 자중의 영향은 2단계까지는 자중의 50%가 작용한다고 가정하였고, 각 단계마다 10%씩 증가시키며 해석하였다. 이와 같은 공사단계별 자중의 작용은 대상지반의 강도에 따라 그 작용 정도가 다르다고 예상되며 본 해석에서는 3차원 해석결과와 지반강도 등을 고려하여 정할 수 있었다. 각 굴착단계를 해석한 결과, 단계별 터널단면 부근의 최대 변위값이 표.1과 같이 발생하였다. 그리고 최종굴착후 최대 변위값은 터널단면의 상단부에서 약 7.88mm가 발생하였으며 그림 4와 같은 터널단면의 변위형태가 예측되었다.

표.1 터널 상단부의 공사단계별 수직변위

공사 단계	변 위 (mm)
1	-
2	2.77
3	3.89
4	5.05
5	6.09
6	7.10
7	7.88

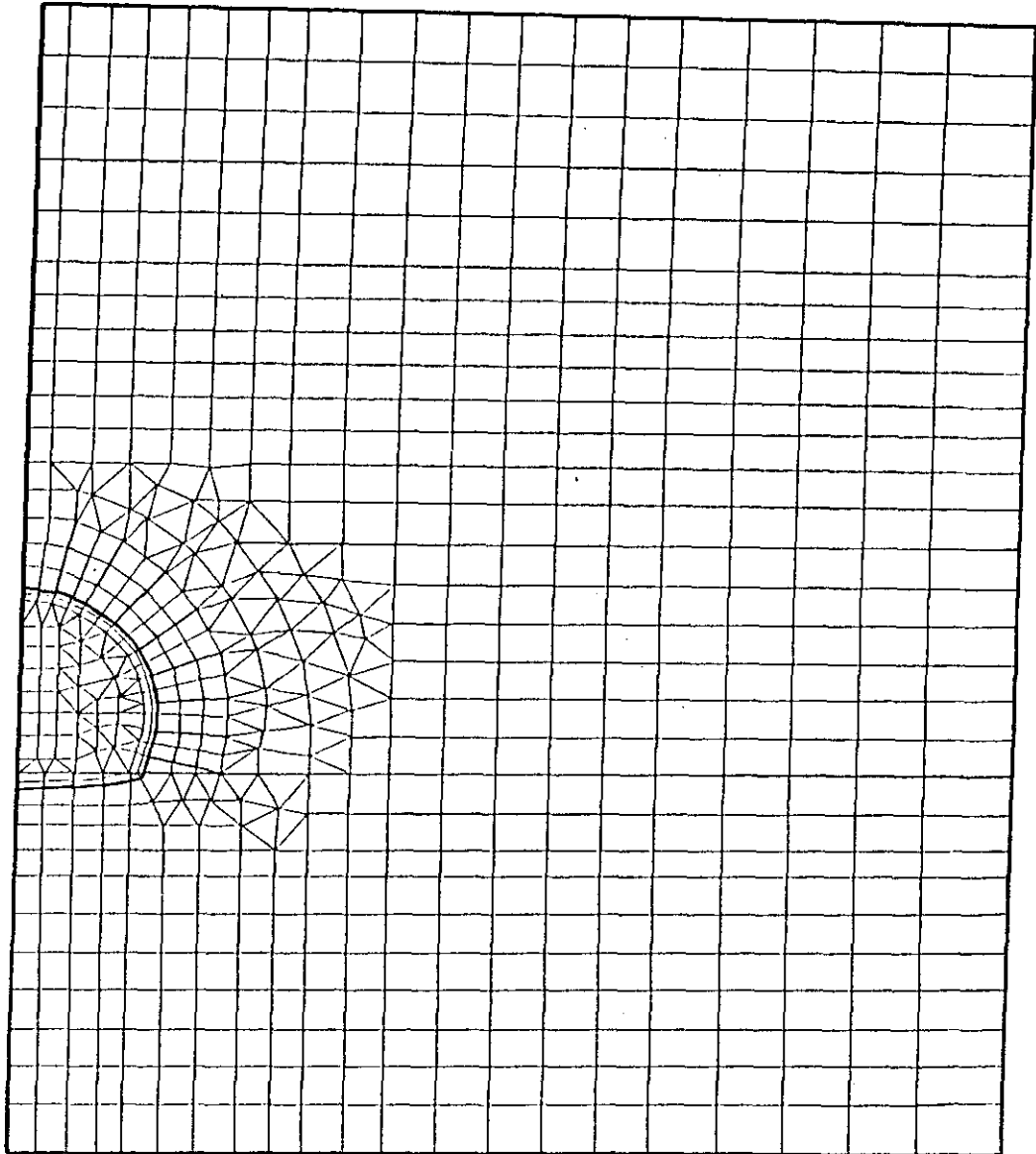


그림 3 평면변형용 해석 요소망

표.2 공사단계별 지보재들의 최대 및 최소 주응력(t/m^2)

공사단계	숏크리트	라이닝	특볼트
3	210.0/23.9	---	70.1/13.2
4	186.0/17.8	---	84.2/5.42
5	232.0/19.0	---	94.5/14.8
6	280.0/19.9	---	104.0/15.9
7	300.0/25.5	97.4/7.0	111.0/18.1

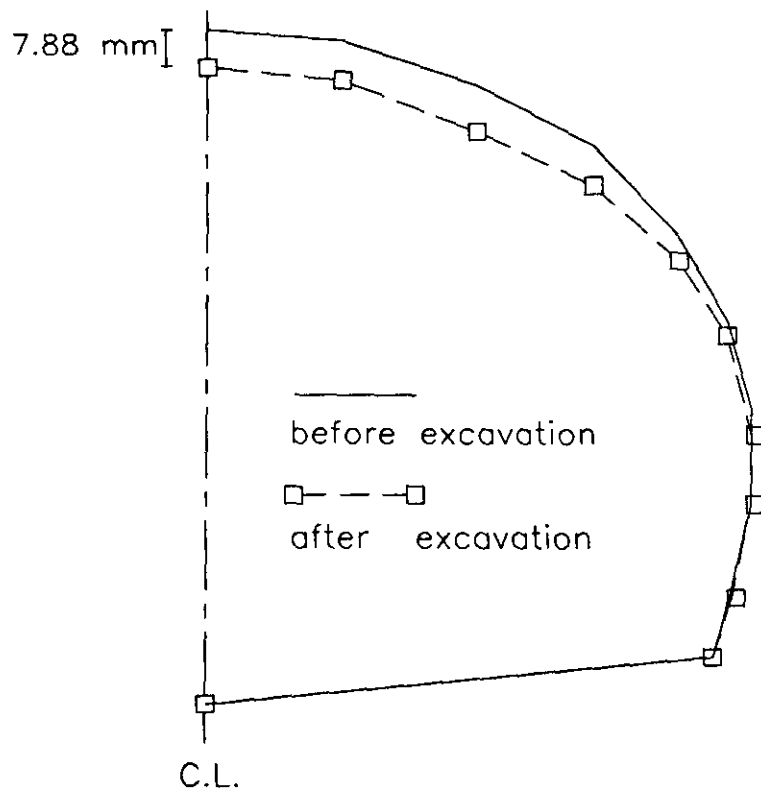


그림 4 굴착단면의 최종단계 변형형태

한편 표.2에서는 공사단계별 지보재들의 최대 및 최소 주응력의 변화를 보여주고 있다. 표.2에 의하면 shotcrete의 최대 및 최소 주응력은 각각 300.0 t/m² 과 25.5 t/m² 이고 concrete lining의 최대 및 최소주응력은 각각 97.4 t/m² 과 7.03 t/m²로 모두 터널의 측면부에서 나타나고 있다. 또한, rockbolt의 최대 및 최소주응력은 각각 111.0 t/m² 와 18.1 t/m²로 역시 터널의 측면부에서 나타나고 있다.

이와 같은 최대주응력의 값은 지보재의 허용응력범위 내에 드는 값으로 최종굴착후의 터널은 안정한 구조계를 이룰 것으로 예상된다. 변위 또한 앞서 기술한 바와 같이 1 cm이내로 일어나고 있으므로 전체 터널구조물의 안정에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 해석에서는 프로그램 GEOKST를 이용하여 예제로 주어진 터널문제를 해석하였다. 터널 굴착시 막장까지의 거리에 의한 영향을 고려하기 위하여 3차원 해석을 수행하였다. 3차원 해석시 굴착깊이에 따라 나타나는 변위값은 대상지반의 강도 및 단면형태 등과 밀접한 관련이 있다. 본 예제에서 주어진 지반강도는 비교적 강한 지반의 경우이므로 굴착이 진행되는 과정에서 발생하는 변위는 증가하지만 변위의 증가율은 감소하고 있다. 그러나 지반의 강도가 연약한 경우에는 3차원해석 결과를 기준으로 지보재 없이 진행 가능한 굴착깊이를 예측하여 공사단계를 결정하는 것이 상당히 중요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Borja, R.I., Lee, S.R. and Seed, R.B., "Numerical Simulation of Excavation in Elastoplastic Soils", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomechanics, 1989, vol.13, pp.231 - 249.
2. Borja, R.I. and Lee, S.R., "Cam-Clay Plasticity, Part I: Implicit Intergration of Elastoplastic Constitutive Equations", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1990, vol.78, pp.49 - 72.
3. Ortega, J.M. and Rheinboldt, W.C., Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables, Academic Press Inc., 1970.

4. Simo, J.C. and Taylor, R.L., "Consistent Tangent Operators for Rate-Independent Elastoplasticity", *Comp. meths. appl. Mech. Eng.*, 1985, vol.48, pp.101 - 118.
5. Lee, S.R., "Nonlinear Elastoplastic Finite Element Analysis of Braced Excavation in Clay", Ph.D. Dissertation, 1989, Stanford Univ.