

실드터널 시공단계를 고려한 2차원 탄·점소성 유한요소해석

Two-Dimensional Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis

Considering Shield Tunneling Construction Stages

진 치섭*

노 경배**

한 상중***

Jin, Chi-Sub

No, Kyung-Bae

Han, Sang-Joong

ABSTRACT

The use of shield is increasing day by day, because it's method is advantageous tunneling method to soft and collapsible ground. In case of analyzing shield tunnel by FEM, short term behavior of ground by initial heaving and tail void closure and long terms of it because of consolidation by changes of pore pressures in clay must be considered. In this paper, the shield tunneling construction stages was analyzed from 2 dimensional elasto - viscoplastic finite element program used Mohr - Coulomb yield criterion but not considered the changes of pore pressures. The object of investigation was N - 2 Tunnel. Since the good results of analysis compared to the measured behavior of ground for heaving, tail void closure and liner installation, this results can be applied to design and construction of shield tunneling for the subways, sewage lines etc.

1. 서 론

최근 점차로 많은 관심의 대상이 되고 있는 지하공간 활용문제와 관련하여 각종 터널공법과 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다. 실드공법은 이들 여러 공법 중에서도 연약지반 및 붕괴성 지반에 유리하게 적용될 수 있으며, 환경 보존적인 측면에서도 우수한 터널공법으로 날로 그 사용이 증대될 전망이다. 국내에서는 1987년도에 처음으로 부산 광복동 전력구 공사에 적용된 바 있으며, 그후 여러 업체에서 실드기를 도입하여 시공 중에 있다. 실드공법을 안전하고도 효과적으로 적용하기 위해서는 대상지반에 대한 철저한 지질조사 뿐만 아니라 입지조건 및 지장물 등의 조사단계를 거쳐 계획이 이루어져야 하며, 시공당시 철저한 공정관리가 이루어져야 한다. 이러한 공정관리를 위해서는 실드가 적용된 주변지반의 거동특성 및 응력변화 등을 예측할 수 있어야 한다.

실드터널 시공은 막장면의 굴착, 막장면 평형, 토사이송, 실드기계의 전진, 라이닝 조립, 그리고 배면의 뒷채움재 주입과 같은 단계의 조합으로 이루어지며, 실드기계는 전면토사를 굴착하는 회전굴착부와 먼저 조립된 라이닝을 이용하여 책으로 실드기를 추진하는 중간몸체, 그리고 라이닝 세그먼트를 조립할 수 있는 공간의 테일부로 구성되어 있다. 유한요소법으로 실드터널을 해석하는 과정에서는 다음의 특징들을 고려하여야 한다.

* 부산대학교 토목공학과 교수

** 백정수 구조연구소 부소장

*** 부산대학교 토목공학과 박사과정

- 1) 실드추진력 및 막장압력에 의한 초기 응기효과 고려
- 2) 라이닝 설치와 테일보이드 폐합후의 라이닝으로의 응력이동 고려
- 3) 점성토지반에서의 압밀로 인한 과잉간극수압의 생성과 소멸에 대한 고려

따라서 본 연구에서는 실드터널 시공단계에 따른 지반의 거동을 근사화할 수 있는 탄·점소성 프로그램을 개발하고 주변지반의 거동해석을 하여 실드터널 시공시 주변구조물에 미치는 영향을 파악할 수 있는 자료를 제시하는데 그 목적이 있으며, 간극수압의 변화에 따른 해석은 제외하였다.

본 연구에서 제시한 탄·점소성 유한요소 프로그램에서는 Mohr - Coulomb 항복기준과 결합 유동법칙으로 가정하여 2차원 평면문제에 적용할 수 있도록 하였으며, 유한요소는 8절점 등매개 변수 요소를 사용하고 가우스 2점 적분법을 이용하였다. 개발한 프로그램을 검증하기 위하여 토압식 실드공법으로 시공한 터널을 시공단계별로 현장계측치와 비교 검토하였다.

2. 실드터널 시공에 관한 모델링

실드 굴진에 의한 지반변위 메커니즘은 선행침하, 막장전 응기, 테일침하, 테일보이드 폐합에 의한 침하, 후속침하로 크게 5가지로 나눌 수 있다. 침하를 유발하는 요인들로는 실드경, 토피, 지반상황 등의 현장조건, 실드공사의 시공상태 등에 따라 다르며, 또한 실드기종, 보조공법, 뒷채움재 주입, 시공관리상태 등의 시공조건도 지반변위의 요인이라 할 수 있다.

실드터널 시공에 따른 지반거동은 3차원적인 거동을 나타내지만, 2차원 평면 변형률 해석으로 3차원적 효과를 나타내기 위하여 그림 1에서와 같이 굴착전 초기단계(STEP 0), 굴착 및 응기단계(STEP 1), 테일보이드 폐합단계(STEP 2), 그리고 라이닝 설치 및 뒷채움재 주입 실시단계(STEP 3)로 구분하여 해석하며, 간극수압 변화에 따른 해석은 본 연구에서 제외하였다.

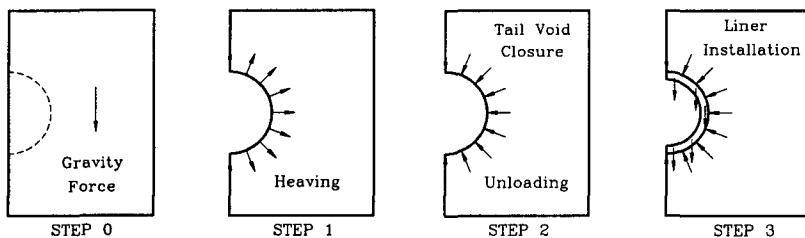


그림 1. 실드터널 해석 단계

2.1 굴착 및 응기 단계 (STEP 1)

실드가 통과함에 따른 지표면 응기는 Yamazaki가 이수식 실드에 대하여 처음으로 관찰 설명하였으며, 토압식 실드에 대해서는 Kitamura 등이 조사하였다. Hirata 와 Aritome의 조사결과에 의하면 실드 막장 앞의 초기 응기동안 거의 대부분의 토사는 실드 진행방향으로 밀리지만, 터널 천정 가까운 부분의 흙 일부는 실드 내부로 움직인다. 이러한 실드의 커다란 장점은 초기응기로 실드 막장면에서의 지반거동을 조절할 수 있다는 것이다. 응기효과는 주로 지반손실과는 반대이며, 복합적인 지반거동으로 인하여 현장에서 측정하기가 어렵지만, Kobayashi는 지표면 침하가 최소가 되기 위한 적정한 응기값은 터널체적의 0 ~ 5 % 정도가 되어야 한다고 제안하였다. 응기효과는 실드외경을 따라 분포하중을 재하하여 모사하고, 응기압력은 주변 흙이 바깥방향의 변위가 일어나도록 방사성 형태이다. 본 연구에서는 Finno가 종방향 유한요소해석 결과에 근거하여 제시한 타원형 분포하중을 택하였다.

2.2 테일보이드 폐합단계 (STEP 2)

실드기 통과후 스킨 플레이트 두께와 라이닝 조립에 필요한 여유공간으로 인하여 형성된 테일보이드의 폐합효과를 고려하기 위하여 터널 외경을 따라 제하(unloading) 압력을 가한다. Finno는 등분포압력을 가하여 천정부의 지반이 테일보이드 틈만큼 변형되었을 때 테일보이드가 폐합되었다고 생각하였다. 하지만 이 값은 현장 측정치와 비교해 볼 때 실드주변에서는 과대평가하는 것이 되므로, 본 연구에서는 그후 많은 연구를 통해서 적용된 타원형 분포 제하하중을 택하였다.

2.3 라이닝 설치 및 뒷채움재 주입 단계 (STEP 3)

시공단계에서 라이닝은 실드기 내부에서 조립되어 자중과 터널 종방향으로의 실드 추진력을 받게 되지만, 터널 횡방향에 대한 지반으로부터의 하중은 실드 통과후 테일보이드에 주입된 뒷채움재가 경화하기 시작되면서부터 작용하게 된다. 따라서 해석 단계에서는 라이닝이 STEP 3에서 활성화되어 지반의 거동에 저항하는 복공역할을 하게되는 것으로 하며, 하중은 본 해석이 2차원 해석에 국한하므로 터널 종방향으로의 실드 추진력을 제외한 굴착에 의한 등가굴착력과 터널 내의 라이닝 무게와 기계무게로 한다. 이 무게는 통상 굴착토 무게의 30% 정도이다. 이 단계에서 큰 용력의 재분배가 일어나지만 라이닝의 큰 강성으로 인하여 변형은 작게 발생한다.

3. 수치예제 해석

본 연구에서 개발된 실드터널 해석용 유한요소 프로그램 STAVIS의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 실드터널 현장사례에 대한 해석을 수행하였다. 국내에서는 실드터널의 적용사례가 그다지 많지 않을 뿐더러 철저히 기록된 현장 계측자료의 수집이 용이하지 않은 관계로 부득이 1981년 미국에서 최초로 토압식 실드공법을 적용하여 샌프란시스코 동북부에서 시공한 직경 3.7m, 연장이 약 915m인 N-2터널의 현장사례를 택하였다. 현장계측은 지반의 단기적 거동뿐만 아니라 시간 의존적 거동특성을 알아보기 위해 장기적으로도 수행하였으나, 본 연구에서는 비배수 거동에 국한하였으므로 단기거동 계측결과만을 비교하였다. N-2터널 해석은 그림 2에서와 같은 유한요소망으로 터널 중심에서의 대칭선을 중심으로 반단면에 대한 해석을 수행하였으며, 해석 대상 영역은 깊이가 22m, 폭이 24m이고 계의 전체 자유도수는 1364개로서, Mohr - Coulomb 항복기준을 사용한 음성적 시간적분기법을 사용하였다. 각 지층에 대한 재료성질은 표 1에서와 같으며, Bay Mud 층의 강도정수는 깊이에 비례하는 것으로 하였다.

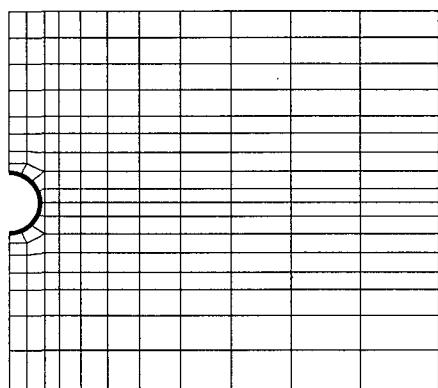


그림 2. 실드터널 유한요소망

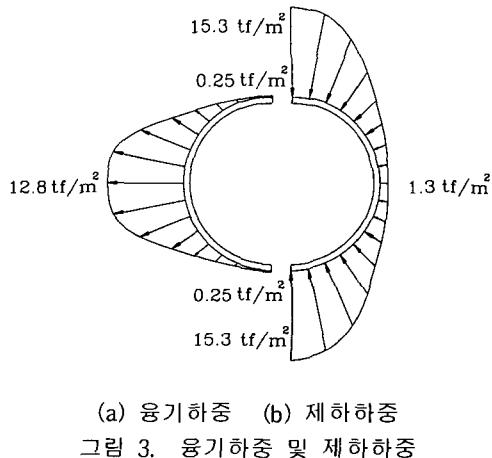
지층 토질정수		Fill	Bay Mud	Colluvium
E (tf/m ²)	1020	250 Cu	3060	
ν	0.3	0.48	0.35	
γ_t (tf/m ³)	1.76	1.76	2.0	
C (tf/m ²)	1.22	$C_n = 2.551 + 0.0643/m$	4.88	
ϕ (Deg)	30	0	20	
두께 (m)	6.0	8.0	8.0	

표 1. 적용 토질정수

3.1 응기과정

현장에서 측정된 수평변위가 일어나도록 토압식 실드 막장에서의 압력의 50% 정도에 해당되는 평균 4.972 tf/m^2 의 응기하중을 그림 3(a)에서와 같이 터널외경을 따라 타원형 분포하중으로 작용시켰다. 그림 4는 터널 중심선에서부터 2.0 m 및 5.5 m 거리에 떨어져 있는 측정선에서의 수평변위에 대한 계측치와 예측치 및 Shirasuna 의 2 차원 해석결과를 비교한 것으로서 계측치와 유사한 형태를 나타내고 있다.

그림 5는 변형된 형상의 유한요소망에 대한 예측치를 구한 것으로 터널중앙에서의 지표면 응기가 0.65 cm 로서 계측치 0.64 cm 와 거의 같게 구해지고 있다.



(a) 응기하중 (b) 제하하중

그림 3. 응기하중 및 제하하중

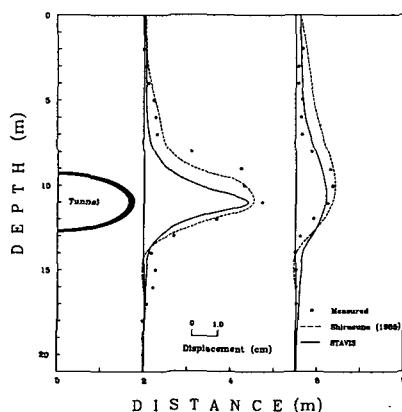


그림 4. 응기후의 수평변위

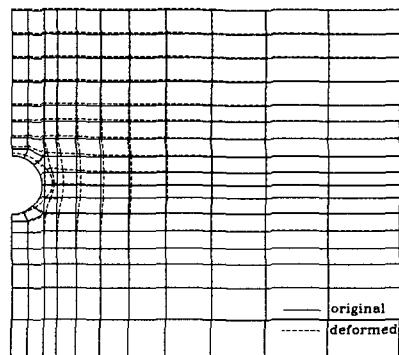


그림 5. 응기후의 예상변위 유한요소망

3.2 테일보이드 폐합

계측치와 유사한 최대 수평변위가 일어나도록 평균 6.981 tf/m^2 의 제하압력을 터널 외경에 작용 시켰을 때의 (그림 3(b) 참조) 예측치와 계측치를 비교(그림 6 참조) 하면, 2.5m 떨어진 곳에서는 다소 변형형상이 다르지만, 5.5m 떨어진 곳에서는 계측치와 유사하게 구해지고 있다. 그림 7은 변형된 요소망으로서 응기단계에서는 수직 변위가 작은데 비하여 여기에서는 천정부근에서 테일보이드 폐합으로 인하여 커다란 침하가 발생한다. 상대적으로 터널 측면에서는 초기 응기로 인한 영향이 여전히 남아있기 때문에 수평거동은 작게 발생한다.

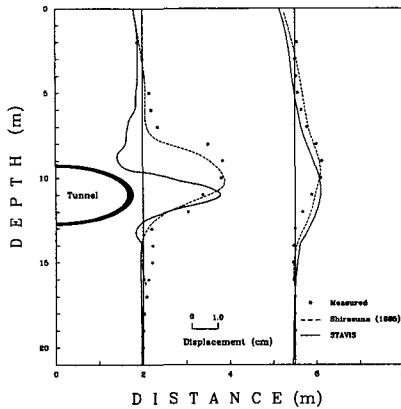


그림 6. 테일보이드 폐합후의 수평변위

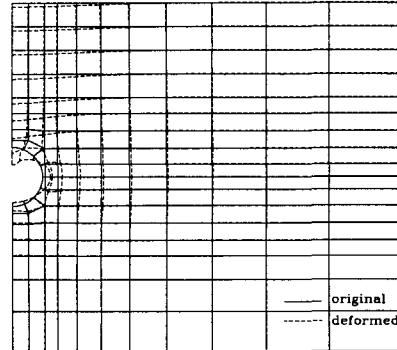


그림 7. 테일보이드 폐합후의 예상변위 유한요소망

3.3 지표면 및 지중의 지반거동

라이닝 설치후의 변형된 요소망은 그림 8과 같으며, 그림 9는 터널중심에서의 지표면 변화를 비교한 것으로 지표면 침하량이 다소 차이가 있지만 Shiresuna의 예측치와 유사한 형태를 나타내고 있다.

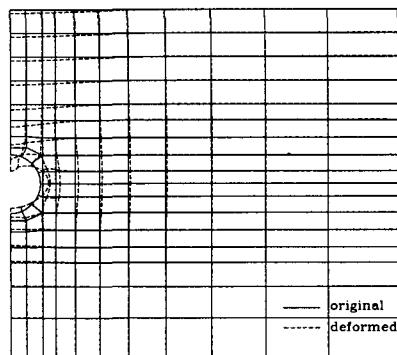


그림 8. 라이닝 설치후의 예상변위 유한요소망

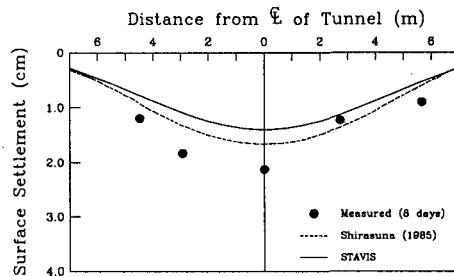


그림 9. 지표면 침하의 예측치 및 계측치

4. 결 론

본 연구에서는 Mohr - Coulomb 항복기준을 적용한 2차원 탄 · 점소성 유한요소 모델을 이용하여 시공단계를 고려한 실드터널의 거동 메카니즘을 규명할 수 있는 프로그램을 개발하였고, N - 2 터널 현장 계측치와 비교해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실드터널의 단기거동 메카니즘을 시공단계별로 구분하였으므로 막장암의 변화에 따른 응기조

절과 같은 시공관리를 할 수 있다.

- (2) 실드터널의 단기거동에 대한 해석치가 계측치와 터널에 아주 근접한 부분을 제외하고는 상당한 일치를 보이고 있으므로 지하철, 하수도, 전력구, 공동구 등을 실드터널로 설계, 시공할 경우의 기본 자료로서 활용할 수 있을 것으로 본다.
- (3) 본 연구에서는 실드터널의 단기거동에 대해서만 해석하였으므로, 압밀과 간극수압을 고려하는 장기거동에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Clough, G.W., Sweeney, B.P., Finno, R.J., "Measured Soil Response to EPB Shield Tunneling", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 2, Feb., pp. 131-149, 1983,
2. Cormeau, I., "Numerical Stability in Quasi - Static Elasto / Visco - Plasticity", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 9, pp. 109-127, 1975
3. Finno, R.J., "Response of Cohesive Soil to Advanced Shield Tunneling", Ph. D. Thesis, Stanford University, 1983
4. Finno, R.J., Clough, G.W., "Evaluation of Soil Response to EPB Shield Tunneling", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. III, No. 2, Feb., pp. 155-173, 1985
5. Hoek, E., Brown, E.T., "Underground Excavation in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980
6. Marques, J.M.M.C., Owen, D.R.J., "Strain Hardening Representation for Implicit Quasistatic Elasto-Viscoplastic Algorithms", Computers & Structures, Vol. 17, No. 2, pp. 301-304, 1983
7. Ohnishi, Y., Hishigaki, Y., Kishimoto, H., Tanaka, Y., "Analysis of Advancing Tunnel by 2 - Dimensional F.E.M.", Proceedings of the Fourth Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, May 31 - June 4, pp. 571-578, 1982
8. Owen, D.R.J., Hinton, E., "The Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice", Pineridge Press, 1980
9. Shirasuna, T., "Finite Element Analysis on Cohesive Soil Behavior Due to Advanced Shield Tunneling", Ph. D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1985
10. Yamada, K., Yoshida, T., Magata, H., Hashimoto, S., "Behavior Ground Displacement due to Shield Thrusting in Alluvial Subsoils and Its Prediction Analysis", 일본 토목학회 논문집 제 373 호 Sept., pp. 103-112, 1986