

자동 터널라이닝 공법에 대한 해석기법
A Method of Tunnel Analysis for
Automatic Concrete Lining Construction Method

정한중*, 강석화**, 장성욱***, 이승우***

Abstract

A method of tunnel analysis for a new type of tunnel construction method (ACLCM, Automatic Concrete Lining Construction Method) is presented here. ACLCM is an unique tunnel construction method which provides concrete lining at the end of shield machine by extruding concrete into the space between the excavated ground surface and the inner form (Automatic Concrete Lining Machine). Since behaviors of tunnel and the surrounding soils are greatly influenced by the construction method, existing tunnel design methods may not be applicable to the design of ACLCM tunnel. In this study, a method of ACLCM tunnel analysis is suggested to provide the prediction of behavior of ACLCM tunnel and surrounding soils as well as to check up the safety during the construction and after the completion of ACLCM tunnel

1. 개요

국내의 터널공사에는 NATM 공법이 많이 활용되어 왔으나, 발파시의 진동 및 소음, 지반침하에 의한 주변구조물의 파손, 작업장내의 분진 및 사고위험성의 산재등의 문제점등이 야기되고 있다. 최근에 와서는 TBM, Shield기등의 기계화 굴착장비가 국내에 도입되어 이용되고 있으나 TBM 굴착시에도 지보 공법은 여전히 NATM의 방식을 따르고 있어 기계화 굴착의 장점을 충분히 살리지 못하고 있으며, Shield공법의 경우는 Shield기 후방에서 P.C. Segment를 조립하여 라이닝을 설치하고 있지만, P.C Segment 자체가 고가이기 때문에 경제성의 확보가

*(주)대우건설기술연구소 선임연구원(토목연구실장)

** (주)대우건설기술연구소 선임연구원(공학박사)

*** (주)대우건설기술연구소 연구원

어렵고 P.C. Segment Lining과 주변지반의 빈 공간인 Tail Void를 채우는 작업이 필요하다.

자동 터널라이닝 공법은 기계화 굴착과 병행하여 굴착기 후방에서 무한궤도 트랙형 거푸집장비(일명 Automatic Concrete Lining Machine, ACLM)가 자동적으로 전진하면서 콘크리트를 가압 타설하여 지반에 밀착시켜가면서 라이닝을 구축하는 공법으로서 (「그림 1」 참조), 굴착과정 동안은 Shield기 자체가 지반의 이완을 억제하고 라이닝 성형중에는 콘크리트 타설압을 지반방향으로 가압함으로써 시공중의 터널의 안전성을 확보하도록 되어 있다. 이때에 콘크리트 타설시의 가압효과는 시공중 터널의 안전성을 확보하는 역할 외에도 지반변위를 억제시키고, 콘크리트의 강도 발현을 촉진시킬 뿐만 아니라 콘크리트 경화후 라이닝에 발생하는 단면력의 양상이 축력이 지배적이 되도록 하여 무근 콘크리트 라이닝만으로도 지보재의 역할을 수행할 수 있도록 한다. 또한 P.C Segment 공법과는 달리 라이닝용 콘크리트를 현장 타설하여 구축하기 때문에 경제성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 Shield기의 전진에 따른 Tail Void가 발생하지 않기 때문에 불량한 지반에서도 침하를 극히 작게 억제할 수가 있으므로 지상의 토지이용 상태에 구애받지 않고 터널 시공이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

터널의 거동은 지반조건, 터널의 모양 및 크기등 외에도 시공방법에 따라 달라지므로 이러한 특성들을 고려한 해석법의 구축이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지보형식, 설치시기 및 방법면에서 기존의 터널공법과 전혀 다른 자동 터널라이닝 공법으로 건설하는 터널의 해석 및 설계를 위한 새로운 해석기법을 제시하고자 한다.

2. 시공단계별 모델링

터널 해석에는 주로 2차원 해석이 주종을 이루고 있다. 그러나 굴진 및 지보방법에 따른 터널과 주변 지반의 3차원적 거동을 2차원 해석을 통해 합리적으로 모델링하기 위해서는 합리적인 시공공정의 구분이 필요하다. 본 연구에서는 자동 터널라이닝 공법의 시공공정상 터널의 역학적 거동이 변하는 시점 및 이에 따른 지반 및 라이닝의 안전성등을 고려해서 시공 단계를 「그림 2」와 같이 ① 초기응력상태, ② 굴착단계, ③ 콘크리트 타설압 가압 단계, ④ 콘크리트 양생단계, ⑤ 거푸집 탈형단계, ⑥ 라이닝 완성단계 등 6단계로 구분하여 해석을 시도하였다.

- i) 초기응력상태: 굴착에 의해 지반이 교란되기 이전의 상태로서 지반의 초기응력의 크기나 작용방향은 굴착거동에 매우 중요한 영향을 미친다. 초기응력상태를 계속한다는 것은 기술적으로 어렵고, 계속비용도 많이 들기 때문에 수치 해석상에는 자중해석이나 간이계산을 통하여 초기응력을 계산하는 것이 일반적이다.
- ii) 굴착단계: Shield기에 의한 굴착시 터널의 거동은 지반조건 및 굴착단면의 크기, 모양외에도 Shield 틸새의 폐합속도의 영향을 받는다. Shield 틸새는 굴착된 단면과 Shield기 Plate사이의 띠 모양의 빈 공간으로, 그 크기는 2~3cm 이내로 알려져 있다. Shield 틸새의 폐합속도는 굴착면 주변지반의 변위구속 뿐만 아니라 응력재분배에도 커다란 영향을 미친다. 따라서 Shield 틸새의 폐합속도는 굴착시의 지반거동뿐만 아니라 향후 라이닝에 작용하는 외부압의 크기에도 영향을 미치는 중요한 인자가

된다. 이 단계는 굴착진행에 따라 Shield 틈새가 폐합되는 현상을 모델링한 것이다. 그러나 Shield 틈새의 폐합속도를 정량적으로 예측하기는 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 Shield 틈새가 폐합되지 않는 경우와 굴착과 동시에 Shield 틈새가 폐합되는 경우에 대한 검토를 통하여 굴착시 터널과 지반의 거동범위를 예측할 수 있도록 하였다.

- iii) 콘크리트 타설압 가압 단계(C-C): 이 단계는 거푸집과 굴착면사이에 굳지 않은 콘크리트를 타설하는 상태를 모델링한 것으로 굴착면과 Shield면과의 접촉이 없어짐에 따라 Shield면에 작용하던 지반압이 지반에 전달되어 발생하려는 지반변위를 역방향으로 가해지는 타설압으로 억제하게 되는 현상을 모델링하고 있다.
- iv) 콘크리트 양생단계(D-D): 이 단계는 타설압의 크기가 콘크리트의 가압위치에서 떨어져 감에 따라 작아지고, 점차로 콘크리트가 경화되어 ACLM장비에 의해 지지되고 있는 상태를 모델링한 것이다.
- v) 거푸집 탈형단계(E-E): 거푸집 탈형단계는 라이닝을 지지하던 거푸집(ACLM)이 탈형될 때의 터널 거동을 모델링한 단계로서 D-D 단계에서 내공 절점들의 구속을 풀어주고, 이때 라이닝 및 지반의 응력상태가 평형에 도달하도록 모델링하였다.
- vi) 라이닝 완성단계: 이 단계는 탈형이후의 터널의 안전성을 평가하기 위한 해석단계로서 시간경과에 따른 콘크리트 강도 증진, 크리이프 및 막장진행에 따른 추가적인 지반이완등을 고려하여, 이에 해당하는 응력을 해방시킴으로서 라이닝 완성후의 거동을 모델링한 것이다.

3. 시공단계별 응력해방률의 산정

터널 단면에 작용하는 하중은 3차원 구속효과, 크리이프효과등으로 굴착이 진행됨에 따라, 또 시간이 경과함에 따라 점진적으로 증가한다. 본 연구에서는 변위특성곡선을 이용하여 구한 응력해방률을 적용함으로써 굴착진행에 따른 각 시공단계별 해석단면에 작용하는 하중을 구하였다. 변위특성 곡선이란 무지보 상태의 굴착시 막장거리 및 경과시간에 따라 발생한 변위를 최종변위에 대해 정규화시킨 곡선으로 다음 식과 같이 정의할 수 있다⁽¹⁾ (「그림 3」 참조).

$$\begin{aligned}
 f(x, t) &= U(x, t)/U(x\infty, t\infty) \\
 &= [(U_a(x) + U_t(t))/U(x\infty, t\infty)] \\
 &= f(x) + f(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,

$f(x, t)$: 총 변위에 대한 막장거리(x), 경과시간(t)에서의 변위의 비율
 $U(x, t)$: 무지보 상태에서의 막장거리(x), 경과시간(t)에서의 변위
 $U_d(x)$: 무지보 상태에서 막장거리(x)의 영향에 의한 변위
 $U_i(t)$: 무지보 상태에서 경과시간(t)의 영향에 의한 변위
 $U(x^\infty, t^\infty)$: 무지보 상태에서의 최종적으로 발생하는 총 변위
 $f(x)$: 총 변위(U)와막장거리(x)의 영향에 의한 변위의 비율
 $f(t)$: 총 변위(U)와경과시간(t)의 영향에 의한 변위의 비율

식(1)에 있어서 응력해방률과 지반변위가 선형관계라고 가정할 경우 $f(x, t)$ 는 임의의 막장거리 및 굴착후 경과시간에서의 응력해방률인 $a(x, t)$ 와 같게 된다. 또한 Shield면에 의해 지지되던 지반압이 지보재에 전달되는 것을 모델링하기 위하여 지반이나 터널 구조체가 아닌 Shield면에 의해 지반 변위가 구속될 경우는 응력해방을 진행시키지 않고 그 구간에서의 $f(x, t)$ 의 증가분에 대한 응력해방률 $a(x, t)$ 의 증가분이 Shield기가 전진하여 지반과의 접촉이 없어지는 단면에서 해방되도록 하였다.

4. 계측치와의 비교검토

본 연구에서는 자동 터널라이닝 공법과 시공공정이 유사한 ECL 공법으로 시공된 일본의 信濃川터널을 대상으로 하여 제시된 해석법에 의해 터널의 거동을 예측한 계산치와 계측결과와의 비교를 통하여 해석기법의 검증에 시도하였다. 계측위치는 「그림 4」와 같다⁽²⁾. 信濃川터널은 외경 8.4m, 라이닝 두께 0.4m의 도수로 터널로서 주변 지반은 풍화암과 연암의 중간 정도의 물성을 갖는 암반지역이다. 지반조건상 굴착시에 Shield 틸새의 폐합여부및 속도를 예측하기가 매우 어렵기 때문에 3절에서 제시 되어 있는 바와 같이 Shield 틸새가 조기 폐합되는 경우와 폐합되지 않는 경우에 대하여 검토하여 터널거동의 범위를 예측하였다. 이를 위하여 「표 2」와 같이 두가지의 시공단계별 응력해방률을 적용하였다. 「그림 5」 및 「그림 6」은 축점(1)에서의 터널 윗쪽 1m지점에 대한 수직변위 및 축점(2)에서의 터널 옆쪽 1m지점에 대한 수평변위에서의 계측치와 해석치를 비교한 그림이다.

비교 결과, 먼저 축점(1)에 있어서는 Shield 틸새가 조기 폐합되는 경우를 가정하여 산정한 시공단계별 응력해방률(A)을 적용할 경우가 계측치와 근사한 해석결과를 보이고 있으며, 축점(2)의 경우는 오히려 Shield 틸새가 폐합되지 않는 경우에 대하여 산정한 시공단계별 응력해방률(B)을 적용 할 경우가 계측치와 가까운 해석결과가 얻어졌다. 또한 축점(3)에서의 라이닝 단면력에 대한 계측치와 해석치의 비교는 「표 2」에 요약되어 있는데 축력에 대해서는 해석치와 계측치가 매우 유사한 결과를 보이는 반면 휨 모멘트에 대해서는 해석치가 실측치보다 작은 결과가 얻어졌다. 이는 라이닝에 작용하고 있는 편압의 영향 때문으로서 편압이 작용하고 있음은 좌우 Spring부의 축력에 대한 계측치가 비대칭한 것으로 부터 추정할 수 있다. 해석상에 이러한 편압의 영향을 고려하기 위해서는 이에 대한 지질학적 정보가 필요하지만, 통상적인 지질조사를 통해서만은 국부적인 지질조건의 변화를 파악하기가 곤란하기 때문에 터널의 설계를 위해서는 공법의 특성뿐만 아니라 정밀한 지질조사를 통한 정확한 지반조건의 파악이 필요하다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 자동 터널라이닝 공법의 새로운 지보방식 및 형태에 따른 터널거동의 예측 및 안전성 검토를 위한 해석법을 구축한 것으로 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- i) 본 해석기법에서는 기존의 터널해석 방법으로는 고려할 수 없는 다음과 같은 자동 터널 라이닝 공법의 특성에 대한 고려가 가능하다.
 - 자동 터널라이닝 공법의 시공공정의 단계
 - 굴착 거동시 기계적 시공오차인 Shield 틈새가 터널거동에 미치는 영향
 - 타설압의 모델링을 통한 타설압이 지반변위 및 라이닝 안전성에 미치는 효과
- ii) 구축된 해석기법의 신뢰성을 검토하기 위하여 자동 터널라이닝 공법과 시공개념이 매우 유사한 ECL공법으로 기 건설된 터널을 대상으로 실측치와 해석치를 비교 검토한 결과 본 연구에서 구축된 해석법은 터널들의 실제 거동을 매우 근사하게 모델링하고 있다는 것이 확인되었다.

6. 참고문헌

1. Panet, M. and Guenot, A. (1982), "Analysis of Convergence behind the Face of A Tunnel." Tunneling 82, the Institution of Mining and Metallurgy, 197-204.
2. 林康雄, 吉田宏美, 笠井高志 (1991), "ECL工法による水路トンネルの施工." 土木技術, Vol.46, No.11, 87-97.

「표 1」 信濃川 터널해석을 위한 시공단계별 응력해방률(단위:%)

폐합여부	시공단계	굴착	탈형	완성
Shield 틈새가 폐합되지 않는 경우 (A)		87	8	5
Shield 틈새가 굴착과 동시에 폐합되는 경우 (B)		40	55	5

「표 2」 측점(3)에서의 라이닝 단면력에 대한 계측치와 해석치의 비교

방 법	항 목	Crown부	Spring부	최대 휨모멘트 (t·m)	인장응력 (kg/cm ²)	최대 압축응력 (kg/cm ²)
		측력 (t)	측력 (t)			
계 측 치		167	좌 216 우 124 평균 170	9.95	-	79
해석치	응력해방률A	69.7	83.8	0.9	-	21
	응력해방률B	157.3	175.1	1.65	-	45

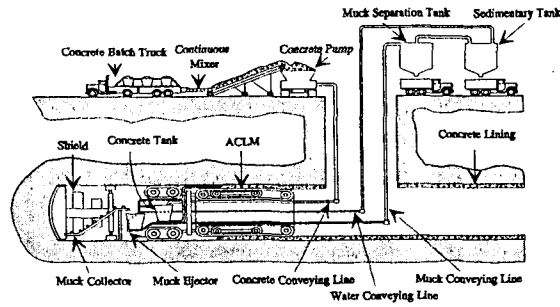


그림 1. 시공개요도

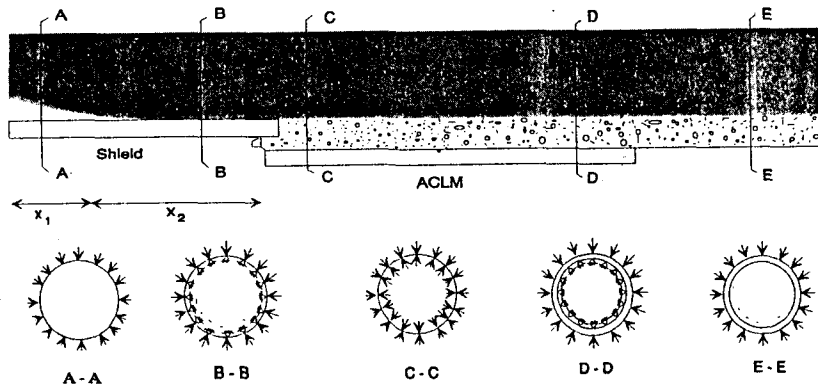


그림 2. 시공단계별 모델링

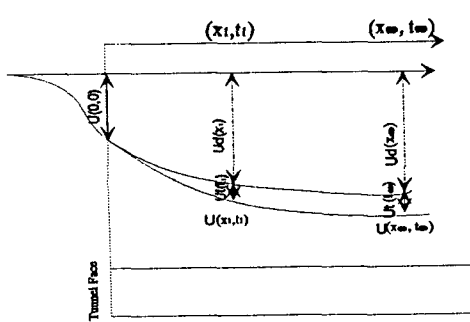


그림 3. 변위특성파선의 개념도

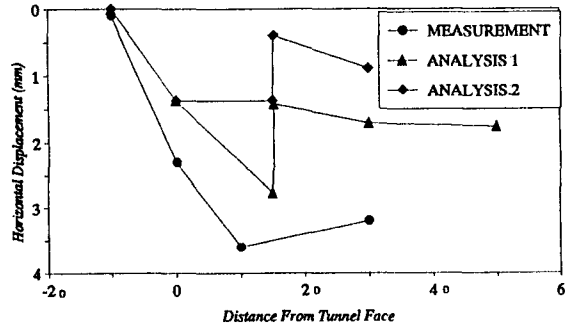


그림 5. 축점 (1)의 크라운 위쪽 1m에서의 수직변위

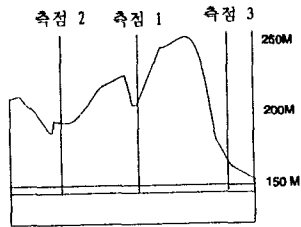


그림 4. 계측위치도

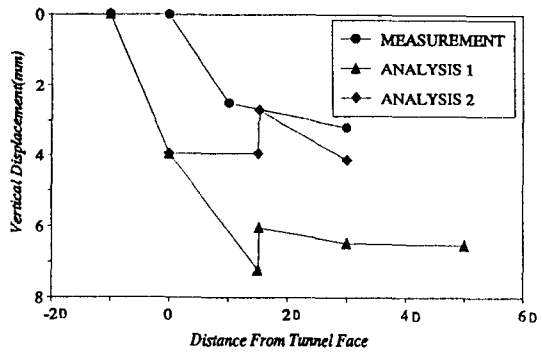


그림 6. 축점 (2)의 스프링 옆쪽 1m에서의 수평변위