

근접한 흙막이벽체에 가하는 선행하중의 영향을 받는 상재하중 재하 터널의 안정

김 일(삼본엔지니어링 공학박사)
이 상 덕(아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부 교수)

Stability of A Surcharged Tunnel un- der the Effect of Pre-Loading on the Adjacent Braced Wall

Kim, IL/Lee, Sang Duk

Abstract

When the ground is excavated adjacent to the existing tunnel, which is loaded by the surcharge on the ground surface, the tunnel stability would be very sensitive to the deformation of the ground induced by the horizontal displacement of braced wall. The stability of the existing surcharged tunnel could be controlled by pre-loading on the braced wall.

In this paper, it was investigated, if it would be possible to keep the existing surcharged tunnel stable by preventing the horizontal displacement of a braced wall by imposing the pre-loading during the ground excavation.

For this purpose, large scale model tests were performed in a scale 1/10 at the test pit which was 2.0m in width and 6.0m in height and 4.0m in length. Isotropic test ground was constructed homogeneously by wet sand. Model tunnel was constructed in the test ground. Surcharge was loaded on the ground surface above the tunnel. During the tests, the behavior of model tunnel and model braced wall was measured.

Numerical analyses were also performed in the same condition as the tests. And their results were compared to that of the model tests. Consequently, the effect of a surcharge could be compensated by imposing the pre-loading on the braced wall. The existing tunnel and the braced wall could be kept stable by preventing the horizontal displacement of the braced wall through pre-loading, although the tunnel is surcharged.

[Keywords : pre-loading, braced wall, large scale tunnel model test, surcharged tunnel]

1. 서론

근접굴착 공사 중에 흙막이벽체에 수평변위가 일어나면 벽체의 배면지반이 이완되어 배면지반 내에 있는 구조물의 안정성이 영향을 받는다(이상덕 2003). 특히 근접한 배면지반에 있는 터널의 직상부에 상재하중이 작용하고 있는 상태에서 지반을 근접굴착 할 경우에는 상재하중에 의한 수평토압에 의해 흙막이벽체의 수평변위가 크게 발생되어 기존 터널의 안정성이 큰 영향을 받는다(이상덕 1998).

O'Rourke(1976)는 버팀대의 선행하중을 설계축력의 50%를 가하고 지반침하를 연구하였으며, Mana와 Clough (1981)도 점토지반에서 지반을 굴착할 때에 설계축력의 50%와 100%를 버팀대 선행하중으로 가하는 경우에 대해 수치해석을 실시하여 최적선행하중의 범위를 결정하였다. 그 결과 버팀대에 선행하중을 가하면 흙막이벽체의 수평변위는 감소시킬 수 있으나

선행하중이 지나치게 크면 버팀대와 흙막이벽체의 연결부에서 국부변형이 발생되어 위험하다고 하였다.

Palmer와 Kenny(1972)는 선행하중을 가하면 느슨했던 강재 연결부가 밀착되어 초기강성이 이상강성과 같아진다고 하였고, O'Rourke(1981)와 일본토질공학회(1975)는 버팀대에 선행하중을 가하면 느슨한 강재 연결부가 밀착되기 때문에 유효강성이 증가하여 버팀대의 추가 변형이 생기지 않는다고 하였다.

Canadian Geotechnical Society(1997)는 굴착 시 설계축력의 100%를 버팀대 선행하중으로 가해야 흙막이벽체의 수평변위를 억제시킬 수 있다고 하였다.

지금까지 지표침하와 버팀대 유효강성에 대해서는 많이 연구되었으나 선행하중 적용에 따른 흙막이벽체와 배면 구조물의 안정에 대한 연구는 미흡하다. 따라서 근접굴착 시 흙막이벽체와 기존터널의 안정성을 확보하기 위하여 벽체의 수평변위를 억제시키는 것이 상당히 중요하다. 그러나 배면지반에 상재하중이 작용하는 경우에는 벽체의 수평변위를 억제하기가 쉽지 않다.

특히 흙막이벽체 배면지반 내에 터널이 존재하고 그 직상부에 상재하중이 작용하는 경우에는 선행하중의 효과와 크기를 정하기가 쉽지 않아서, 벽체 배면에 터널만 있는 경우와 터널 직상부에 상재하중이 작용하는 경우에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

선행하중의 크기에 기준이 되는 설계축력은 배면토압으로부터 결정하는데, 배면토압은 흙막이벽체의 수평변위에 따라 분포도(이상덕, 1998, 1999)가 달라지므로 정하기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 기존터널에 근접하여 지반을 굴착하는 경우에 굴착단계별로 버팀대에 선행하중을 가하여 수평변위를 억제시켰을 때 흙막이벽체와 기존터널의 거동을 분석하여 구조물의 안정성을 증가시키는 버팀대 선행하중의 효과에 대해 연구하였다.

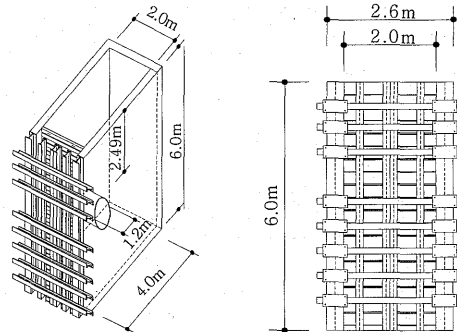
특히 기존터널의 직상부에 상재하중이 작용하는 경우에 터널의 안정성을 확보하기 위해서 굴착단계별로 버팀대에 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 억제시켰을 때 흙막이벽체와 기존터널의 거동을 분석하여 구조물의 안정성을 증가시키는 버팀대 선행하중의 효과에 대해 연구하였다. 이를 위하여 실제 시공 과정을 재현한 대형모형시험을 실시하고, 동일한 조건으로 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교분석하였다.

2. 대형모형시험

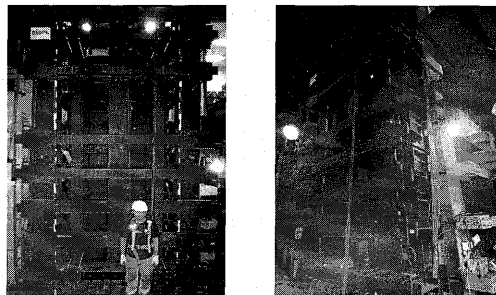
2.1 개요

굴착 시 굴착단계별로 버팀대에 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 억제시킴으로써 기존터널의 안정성이 증가하는 것을 확인하기 위해서 축소율 1/10의 대형모형시험을 실시하였다. 대형모형시험은 기존의 지하철 대단면 터널을 기준으로 하였고 기존터널로부터 1.0D(12.0m) 이격하여 흙막이벽체(지하연속벽)를 설치한 후에 8단의 버팀대를 설치하면서 굴

착을 완료하는 경우를 적용하였다. 기존터널의 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우와 상재하중이 작용하는 경우를 비교하였다. 대형모형시험을 수행했던 토조의 개략도와 전경은 그림 1, 2와 같다.



<그림 1> 모형토조의 개략도와 정면도



<그림 2> 대형토조의 정면과 측면

2.2 시험 지반

대형모형시험의 지반을 균질하게 하기 위하여 습윤상태의 모래를 토조 바닥으로부터 한번에 30cm씩 포설하고 진동기로 다짐하여 조성하였다. 조성된 지반의 토질정수는 코어커터(DIN 4021)를 이용하여 비교란 시료를 채취하여 구하였으며 시험 지반의 물리적 및 역학적 특성은 다음과 같다.

2.2.1 물리적 특성

모형시험 지반의 물리적 및 역학적 특성은 지반조성 중에 시료를 채취하여 확인하였다. 공학적 분류법으로 분류한 결과 SP이었고 시험결과는 표1, 표2와 같다.

<표 1> 시험지반의 물리적 특성

최대건조단위중량 (γ_{dmax})	16.86 kN/m ³
최소건조단위중량 (γ_{dmin})	13.82 kN/m ³
자연상태에서의 건조단위중량 (γ_d)	15.39 kN/m ³
상대밀도 (D_r)	56 %
비 중 (G_s)	2.63
함 수 비 (ω)	6.8 %

<표 2> 시험지반의 역학적 특성

내부마찰각 (ϕ)	38°
겉보기점착력 (C)	6.0 kN/m ²
탄성계수 (E)	20,000~30,000 kN/m ²

2.3 대형모형시험 장치

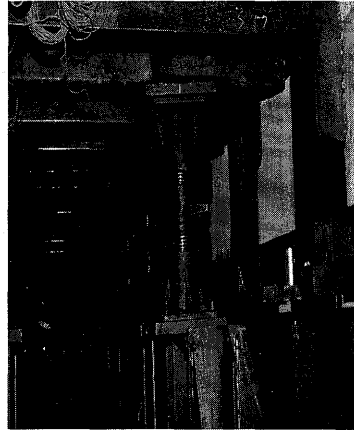
2.3.1 대형모형시험 종류

대형모형시험은 터널 직상부 상재하중과 선행하중 재하여부에 따라 다음의 네 가지 경우에 대해 실험하였다.

- (1) 기존 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우
 - ① 굴착 시 버팀대 선행하중을 가하지 않은 경우
 - ② 굴착 시 버팀대 선행하중을 가하는 경우
- (2) 기존 터널 직상부에 상재하중이 작용하는 경우
 - ① 굴착 시 버팀대 선행하중을 가하지 않은 경우
 - ② 굴착 시 버팀대 선행하중을 가하는 경우



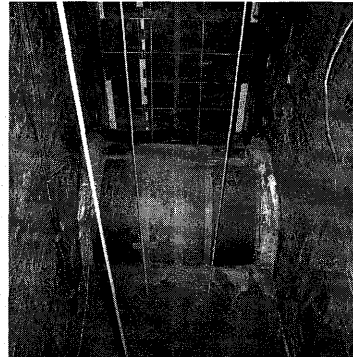
<그림 3> 벽체 특수처리



<그림 4> 스쿠류 잭 설치



<그림 5> 시험지반 조성



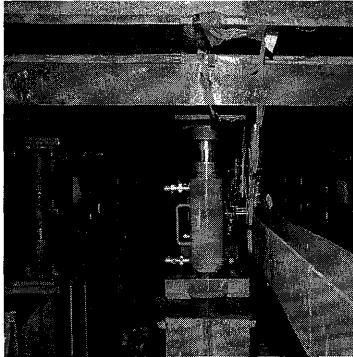
<그림 6> 모형터널 설치

2.3.2 대형모형시험 방법

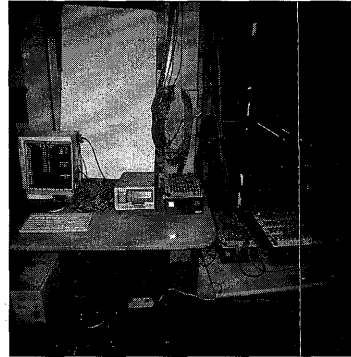
단계별로 지반을 굴착한 후에 흙막이벽체의 수평변위가 발생되고 배면지반이 안정되면 버팀대를 설치하기를 반복하여 총 8단계로 지반굴착을 완료하였다.(그림 4)

버팀대에 선행하중을 가하는 경우에는 지반굴착 후에 흙막이벽체의 수평변위가 발생되고 배면지반이 안정된 후에 유압잭으로 가압하여 흙막이벽체의 수평변위가 "0"(Zero)이 되도록 하였으며 같은 방법으로 8단까지 굴착하였다.(그림 7)

시험이 진행되는 동안 30분 간격으로 자동계측 하였다.(그림 8)



<그림 7> 유압잭



<그림 8> 계측 터미널실

2.3.3 모형 터널 및 모형 흙막이벽체

모형 터널라이닝의 두께는 Duddeck과 Erdmann (1985)의 방법으로 지반과 라이닝의 강성비(α)를 이용하여 결정하였다(식 2.1, 2.2).

실제 연구대상 터널의 강성비

$$\alpha = \frac{E_k \cdot R^3}{E_b \cdot I_b} \quad (2.1)$$

모형 터널의 강성비

$$\alpha = \frac{E_{km} \cdot R_m^3}{E_{bm} \cdot I_{bm}} \quad (2.2)$$

여기서,

E_k (E_{km}) : 실제(모형) 지반의 탄성계수
(kN/m^2)

R (R_m) : 실제(모형) 터널 반경(m)

E_b (E_{bm}) : 실제(모형) 라이닝 탄성계수
(kN/m^2)

I_b (I_{bm}) : 실제(모형) 라이닝의 단위길이당
단면2차모멘트 (m^4/m)

t (t_m) : 실제(모형) 터널 라이닝 두께(m)

b : 실제 터널 라이닝의 폭(m)

$$t_m = \left\{ \frac{12 \times E_{km} \cdot R_m^3}{\alpha \cdot E_{bm}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

모형 터널 라이닝의 두께는 연구대상의 실제 터널과 모형 터널의 상대강성을 동일하게 하

는 Soliman(1993)의 방법으로 식 2.3으로 산정하였고, 모형 흙막이벽체의 두께는 상사율을 적용하여 식 2.4로 산정하였다. 축소율은 1/10을 적용하였으며 결과는 표3, 표4와 같다.

<표 3> 모형터널 라이닝 두께

	모형터널라이닝	실제터널라이닝
지반 탄성계수	20,000kN/m ²	400,000kN/m ²
라이닝 탄성계수	2.0.E+08kN/m ²	2.0.E+07kN/m ²
라이닝 폭	1.0m	1.0m
두께	6.0mm	30cm
직경	1.2m	12.0m

$$t_m = \frac{T}{C} \times \left[\frac{G_m}{G_r} \times \frac{1}{C} \times \frac{E_R}{E_m} \times \frac{E_R}{B_m} \right]^{\frac{1}{3}} \times 1000 \quad (2.4)$$

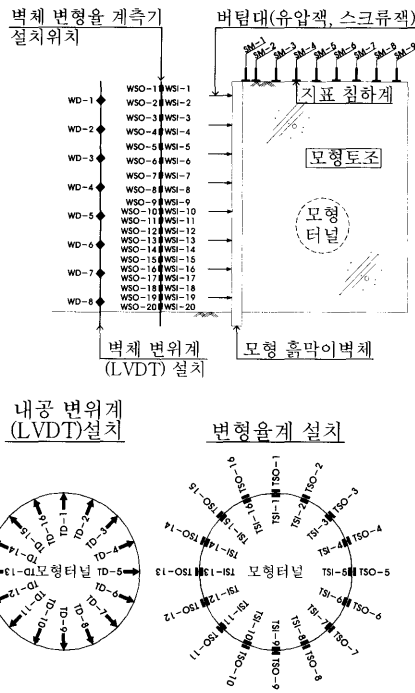
- 여기서 t_m : 모형 흙막이벽체 두께 (mm)
 C : 상사율
 T : 실제벽체 두께 (mm)
 G_m, G_R : 시험벽체 및 실제벽체의
 중력 가속도
 E_R : 실제벽체 탄성계수 (kN/m²)
 E_m : 시험벽체 탄성계수 (kN/m²)
 B_R : 실제벽체 폭, B_m : 시험벽체 폭

<표 4> 모형 흙막이벽체 두께

	모형 흙막이벽체	실제 흙막이벽체
탄성계수	2.0.E+08kN/m ²	2.0.E+07kN/m ²
벽체 폭	1.0m	1.0m
중력가속도	9.8m/sec ²	9.8m/sec ²
상사율	10.0	10.0
벽체두께	16.0mm(철판)	80cm

2.3.4 계 측

직상부에 상재하중이 작용하는 기존터널에 근접하여 지반을 굴착하면서 버팀대에 선형하중 적용여부에 따른 모형 흙막이벽체와 기존터널의 안정성을 검토하였다. 이를 위하여 흙막이 벽체의 수평변위와 모형 터널라이닝의 내공변위를 시험이 완료될 때까지 30분 간격으로 자동 계측하였으며 사용된 계측기의 설치위치와 수량은 그림 9, 표 5와 같다.



<그림 9> 계측기 설치 단면도

<표 5> 계측기 설치 수량

설치위치	계측기 종류	측정 용도	개소	범례
흙막이 벽체	변형율계	부재력 측정	40	▮
	변위계	수평변위 측정	8	◆
	지표 침하계	배면 지표 침하	9	┆
터널	변형율계	부재력 측정	32	▮
	내공변위계	내공변위 측정	16	

3. 수치해석

3.1 해석 프로그램

대형모형시험을 수행한 후에 수치해석을 실시하여 비교하였다. 대형모형시험은 직경 (D) 12.0 m, 토피 2.0D 이상인 기존 대단면 터널로부터 1.0D(12.0 m) 이격하여 흙막이벽(지하 연속벽 t=80cm)을 설치하고 굴착하는 경우를 모사하였다. 수치해석은 FEM Program인 PLAXIS Ver. 8.2를 사용하여 2차원 조건으로 수행하였다.

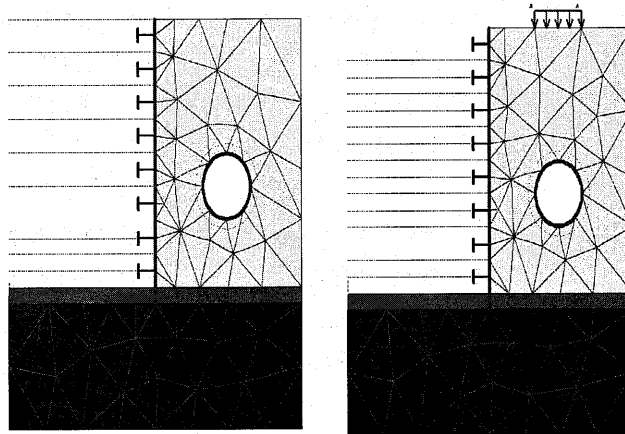
3.2 해석 조건

수치해석에서 흙막이벽체와 터널 라이닝은 2차원 Plate 요소로, 버팀대는 Fixed Anchor 요소로 하여 탄성해석 하였고, 지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였고 15절점 삼각형요소를 사용하였다.

시험지반과 모형 흙막이벽체와 모형 터널 라이닝이 접촉되는 경계면에는 Interface를 두었다.

3.3 경계조건 및 물성치

좌·우의 경계는 상·하이동이 가능한 Roller 조건으로 하였고, 하부 경계는 모든 방향으로 고정시켰다. 나머지 절점은 X, Y 방향으로 이동이 가능하고 회전이 구속되며 유한요소 해석망과 경계조건은 그림 3-1과 같다.



(상재하중 없는 경우)

(상재하중 있는 경우)

<그림 10> 유한요소 해석망 및 경계조건

수치해석시 입력된 지반 및 재료의 물성치는 다음 표 6~8과 같다.

<표 6> 수치해석에 입력된 지반 물성치

구 분	탄성계수 E (kN/m ²)	포와송비 ν	단위중량 γ (kN/m ³)	내부 마찰각 φ (deg.)	점착력 C (kN/m ²)
배면 토사	20,000	0.25	16.39	38	6.0

<표 7> 수치해석에 입력된 재료 물성치

구 분	축강성 EA (kN/m)	휨강성 EI (kNm ² /m)	두께 d (m)	포와송비 ν
흙막이벽체	3,293,000	70.0	0.016	0.3
터널라이닝	1,929,000	5.788	0.006	0.3

<표 8> 수치해석에 입력된 재료 물성치

구 분	축강성 EA (kN)	설치폭 L (m)
버팀대	450,700	1.34

3.4 수치해석결과

3.4.1 흙막이벽체

수치해석결과 흙막이벽체의 최대 수평변위는 버팀대에 선행하중을 가하지 않을 때에는 터널 직상부 상재하중의 작용 여부에 따라 큰 차이를 보였다. 흙막이벽체의 최대 수평변위는 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않을 때에는 터널이 위치한 버팀대 6단 부근에서 발생하였으나 상재하중이 작용할 때에는 버팀대 1~2단 부근에서 발생하였다(그림 11 참조). 그러나 터널 직상부 상재하중이 작용하는 경우와 작용하지 않는 두 경우 모두 버팀대에 선행하중을 가하면 최대 수평변위가 대폭 감소하였다(그림 12 참조).

3.4.2 터널

터널 라이닝은 흙막이 벽체의 수평변위에 의해 터널 직상부에 상재하중 여부에 상관없이 모두 변형되었으나 버팀대에 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 억제시키면 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다(그림 6~9).

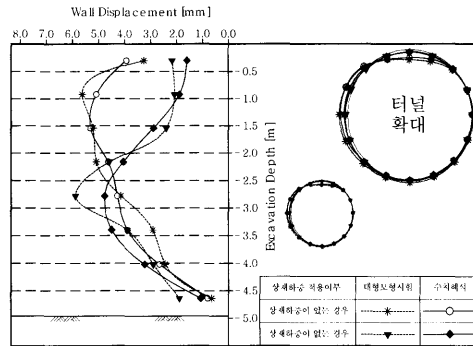
터널 라이닝의 부재응력도 선행하중을 가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다(그림 10~17).

4. 대형모형시험과 수치해석 결과의 비교

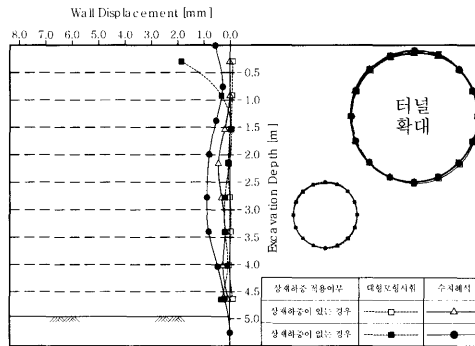
4.1 흙막이벽체의 수평변위

기존터널에 근접하여 지반을 굴착을 할 때 터널 직상부에 작용하는 상재하중과 버팀대 선행하중의 유무에 따라 다르게 변하는 터널과 흙막이 벽체의 안정성을 대형모형시험과 수치해석을 수행하여 분석한 결과를 비교하였다.

지반을 굴착하는 동안에 발생하는 흙막이벽체의 수평변위는 터널 직상부에 상재하중 여부에 상관없이 버팀대에 선행하중을 가하여 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 선행하중을 가하지 않았을 때와 가했을 때 흙막이벽체의 수평변위와 터널라이닝의 내공변위는 그림 11, 12와 같다.



<그림 11> 흙막이벽체의 수평변위
(버팀대 선행하중을 가하지 않은 경우)



<그림 12> 흙막이벽체의 수평변위
(버팀대 선행하중을 가한 경우)

흙막이벽체의 최대 수평변위는 버팀대 선행하중을 가할 때와 가하지 않았을 때에 다음과 같다.

① 대형모형시험결과 최대 수평변위는 터널 직상부에 상재하중이 없을 때에 2.94mm에서 0.10mm로 감소하였고 상재 하중이 작용하는 경우에는 5.62 mm에서 0.08 mm로 감소하였다.

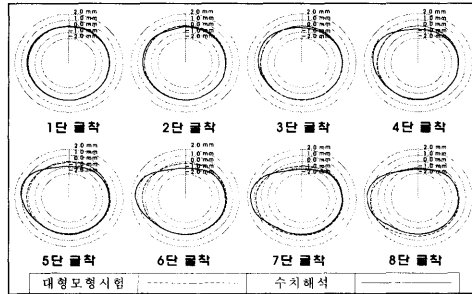
② 수치해석결과 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우에 최대 수평변위는 2.43 mm에서 0.15mm로 감소하였으며 상재하중이 작용하는 경우에는 5.52 mm에서 0.55 mm로 감소하였다.

③ 최종 굴착 단계에서 흙막이벽체의 최대 수평변위는 상재하중이 작용하고 버팀대 선행하중을 가하지 않고 굴착 할때에 크게 나타났다. 버팀대 선행하중에 의한 수평변위의 감소는 수치해석보다 대형모형시험에서 크게 측정되었다.

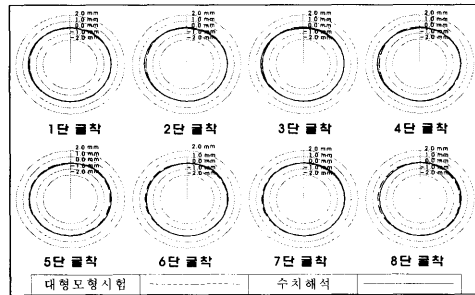
4.2 터 널

4.2.1 터널라이닝의 내공변위

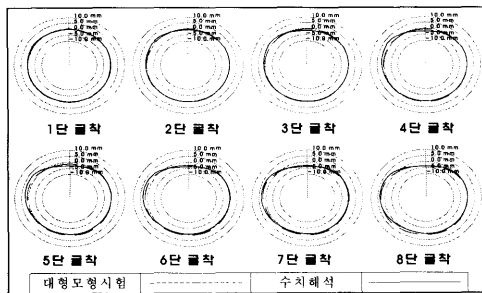
근접굴착 시 1단 굴착부터 8단 굴착 완료까지 기존터널 직상부에 상재하중과 버팀대 선행하중에 따른 터널 내공변위의 변화를 수치해석결과와 대형모형시험결과를 비교하면 그림 13~16과 같다.



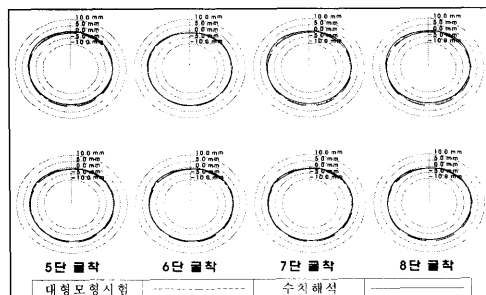
<그림 13> 터널 직상부에 상재하중이 없는 경우(버팀대 선행하중을 가하지 않은 경우)



<그림 14> 터널 직상부에 상재하중이 없는 경우(버팀대 선행하중을 가한 경우)



<그림 15> 터널 직상부에 상재하중이 있는 경우(버팀대 선행하중을 가하지 않은 경우)



<그림 16> 터널 직상부에 상재하중이 있는 경우(버팀대 선행하중을 가한 경우)

선행하중을 가하지 않고 굴착할 때에 터널 라이닝의 내공변위는 수치해석과 대형모형시험 결과 모두 흙막이벽체의 수평변위에 비례하여 증가하였다. 따라서 굴착이 진행됨에 따라 점점 커지는 경향을 보였다. 그러나 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 억제시켰을 때에는 터널라이닝의 변형이 대폭 감소되어 거의 원래의 모양을 유지하였다.

선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때 터널 라이닝의 최대 내공 변위는 다음과 같다.

① 대형모형시험결과 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우는 1.22 mm에서 0.19 mm로 감소하였으며, 상재하중이 작용하는 경우에는 4.80 mm에서 0.92 mm로 감소하였다.

② 수치해석결과 터널상부 상재하중이 작용하지 않을 때에는 1.62 mm에서 0.15 mm로 감소하였으며, 터널 직상부에 상재하중이 작용하면 4.43 mm에서 1.33 mm로 감소하였다.

4.2.1 터널라이닝의 부재력

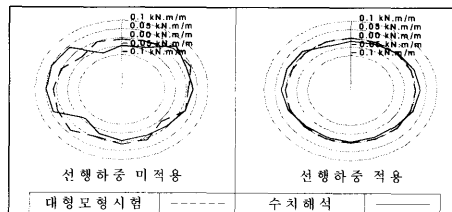
터널 라이닝의 부재력은 선행하중을 가하지 않았을 때와 비교하면 다음과 같다.

1) 최대 모멘트

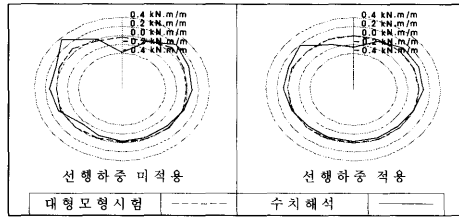
① 대형모형시험결과 터널 직상부 상재하중이 작용하지 않을 때에는 0.04 kN.m/m에서 -0.07 kN.m/m로 증가하였으며, 상재하중이 작용할 때에는 0.09 kN.m/m에서 0.02 kN.m/m로 감소하였다.

② 수치해석결과 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않을 때에는 0.07 kN.m/m에서 0.03 kN.m/m로 감소하였으며 상재하중이 작용할 때에는 0.40 kN.m/m에서 -0.28 kN.m/m로 감소하였다.

터널라이닝의 최대모멘트는 다음 그림 17, 18과 같다.



<그림 17> 터널 직상부에 상재하중이 없는 경우



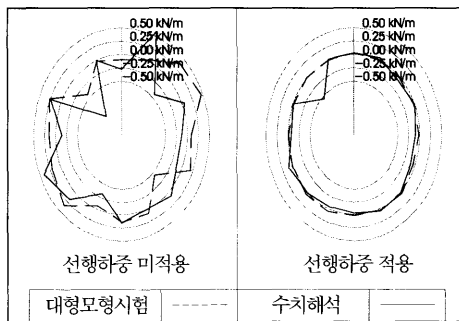
<그림 18> 터널 직상부에 상재하중이 있는 경우

2) 최대 전단력

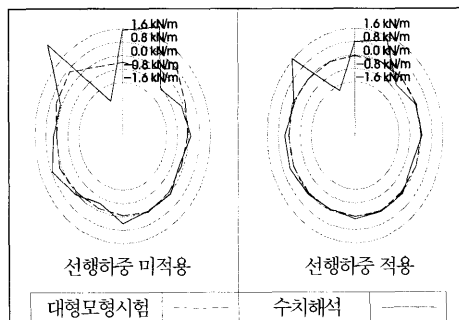
① 대형모형시험결과 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않을 때에는 0.37 kN/m에서 -0.59 kN/m로 증가하였으며 상재하중이 작용할 때에는 0.76 kN/m에서 0.12 kN/m로 감소하였다.

② 수치해석결과 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않을 때에는 -0.81 kN/m에서 -0.46 kN/m로 감소하였으며 상재하중이 작용할 때에는 2.88kN/m에서 -1.93 kN/m로 감소하였다.

터널라이닝의 최대전단력은 다음 그림 19~20과 같다.



<그림 19> 터널 직상부에 상재하중이 없는 경우



<그림 20> 터널 직상부에 상재하중이 있는 경우

4.3 흙막이벽체와 터널 라이닝의 내공변위 관계

수치해석 및 대형모형시험 결과 버팀대에 선행하중을 가하지 않고 굴착을 완료했을 때에는 흙막이벽체와 터널 라이닝의 최대변위와 그 발생 위치는 터널 직상부에 상재하중에 따라서 다르게 나타났다. 즉, 흙막이벽체의 최대 수평변위는 상재하중이 작용하지 않은 경우에는 터널이 위치한 버팀대 6단 부근에서 발생하였으나 상재하중이 작용하는 경우에는 버팀대 1~2단 부근에서 발생하였다(그림 11, 12). 그러나 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 “0”(zero)에 가깝게 억제시키면 터널의 내공변위는 미소하게 발생되었으며 터널은 원래의 모양을 거의 유지하였다. 이러한 흙막이벽체와 터널 라이닝의 내공변위는 그림 13~16과 같다.

5. 결론

본 연구에서는 기존터널에 근접하여 흙막이벽체를 설치하고 지반을 굴착할 때에 흙막이벽체의 수평변위가 거의 발생되지 않도록 버팀대에 선행하중을 가함에 따른 흙막이벽체와 배면에 있는 기존터널의 안정성에 대해 연구하였다. 이를 위하여 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않을 때와 작용할 때에 대해 굴착 시 버팀대에 선행하중을 가하지 않는 경우와 선행하중을 가하지 않는 경우에 대해 대형모형시험을 수행하고, 같은 조건으로 수치해석을 수행하여 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 지반굴착 시 버팀대에 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 거의 “0”(zero)으로 억제시키면 기존 터널의 안정성이 증가하였다.

2) 흙막이벽체의 최대 수평변위는 선행하중을 가하면 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우는 대형 모형시험에서는 97%로 감소하였고 수치해석에서는 94%로 감소하였다. 반면에 터널 직상부에 상재하중이 작용하는 경우에는 선행하중을 가하면 흙막이벽체의 수평변위는 대형모형시험에서는 98% 감소하였고 수치해석에서는 90%감소하여 수치해석보다 대형모형시험에서 더 감소하는 것으로 확인되었다.

3) 널 라이닝의 최대 내공변위는 버팀대 선행하중을 가하면 대형모형시험과 수치해석에서 모두 대폭 감소하였다. 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우는 선행하중을 가하면 선행하중을 가하지 않을 때보다 대형 모형시험에서는 84% 감소하였고 수치해석에서는 91% 감소하였다. 상재하중이 작용하는 경우에는 대형모형시험에서는 81% 감소하였고 수치해석에서는 70%감소하였다. 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우에는 수치해석에서 더 많이 감소되었으나 상재하중이 작용하는 경우에는 대형모형시험에서 더 감소되는 것으로 나타났다. 또한, 터널라이닝은 버팀대 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 거의 “0”(Zero)으로 억제시키면 거의 원래의 형태를 유지하였다.

4) 터널 라이닝의 최대모멘트는 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우에는 선행

하중을 가하면 선행 하중을 가하지 않을 때보다 대형모형시험에서는 75%로 증가하였고 수치 해석에서는 57% 감소하였다. 상재하중이 작용하는 경우에는 선행하중을 가하면 대형모형시험결과에서는 78% 감소하였고 수치해석에서는 30% 감소하였다.

최대 전단력은 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우에는 대형모형시험에서는 59% 증가하였고 수치해석결과에서는 43% 감소하였다. 그리고 상재하중이 작용하는 경우에는 대형모형시험에서는 84% 감소하였고 수치해석에서는 33% 감소하였다.

5) 터널의 부재력은 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우에는 선행하중에 의해 증가하는 것으로 나타났으나 모두 허용응력 범위 내에 있었다.

6) 근접 굴착 시 버팀대에 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 억제시키면 배면에 있는 기존터널의 안정성이 터널 직상부에 상재하중이 작용하지 않는 경우보다 상재하중이 작용하는 경우에 더 향상되는 것을 대형모형시험과 수치해석을 수행하여 확인하였다. 그러나 향후 지층조건과 구조물의 위치에 따른 선행하중의 효과는 실측에 의한 지속적인 연구가 필요하다.

[참고문헌]

1. 이상덕 (1998). 「토질 역학 제 2판」, 도서출판 새론, pp. 353, 354, 388~398.
2. 이상덕 (1999). 「기초공학」, 도서출판 새론, pp 252~254
3. 이상덕 (2003). 「최신 터널 기술의 이해」, 아주대 지반 공학 연구실 터널 거동의 이해, pp. 1~22.
4. O'Rourke, T. D., Cording E. J. and Boscardin, M. (1976). The Ground movements related to braced excavation and their influence on adjacent buildings, *U.S Department of Transportation*, Report no. DOT-TST 76, T-23.
5. O'Rourke. T. D. (1981). Ground Movements Caused by Braced Excavation, *Journal of Geotechnical Engineering Division*. ASCE. Vol. 107. NO .GT9, pp. 1159-1178.
6. Palmer, J. H. and Kenny, T. C. (1972). Analytical Study of Braced Excavation in Weak Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 9, pp. 145~164.
7. Canadian Geotechnical Society (1997). *Foundation Engineering Manual*, 3rd. ed., pp. 416.
8. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1985). On structural design models for tunnels in soft soil, *Underground Space*, Vol. 9, Pergamon Press, pp. 246~259.
9. Soliman E., Duddeck, H. and Ahrens, H. (1993). two- and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 8, No. 1, pp. 13~18.
10. 土質工學會 (1975). 土留め 構造物の 構造物, 土質基礎工學ライブラリー-II, pp. 242~247.

논문접수일 : 2008년 9월 9일

심사의뢰일 : 2008년 9월 16일

심사완료일 : 2008년 10월 13일