

근접 굴착시 흙막이벽 버팀대 선행하중 재하에 따른 터널의 거동

Behavior of Tunnel Due to Adjacent Ground Excavation with Pre-loading on Braced Wall

김 일¹ Kim, Il
이 상 덕² Lee, Sang-Duk

Abstract

A New pre-loading system, through which a large pre-load could be charged was developed and applied to the braced wall in order to stabilize the adjacent tunnel. A pre-load larger than the designated axial force of bracing was imposed to prevent the horizontal displacement of the braced wall during the ground excavation. For this purpose, real scale model tests (1/10) were conducted, without and with pre-load on braced wall. And numerical analyses were performed for both the cases without and with pre-load, which were half (50%) and full (100%) respectively, and larger scale of the design axial force of bracing. FEM program called PLAXIS was used for numerical analysis. As a result, it was found that the stability of the existing tunnel adjacent to the braced wall could be greatly enhanced when the horizontal displacement of braced wall was reduced by applying a pre-load, which was larger than the designated axial force of bracing.

요 지

큰 선행하중을 가할 수 있는 새로운 선행하중 시스템을 개발하였으며, 이를 적용하여 근접굴착 시 기존 터널의 안정성을 확보하는 방안을 연구하였다. 흙막이 벽체의 수평변위가 거의 생기지 않도록 설계축력 이상의 선행하중을 가하였다. 이를 위해 선행하중을 가하지 않는 경우와 선행하중을 가하는 경우에 대해 축소율 1/10인 실험 시험을 실시하였다. 수치해석은 선행하중을 가하지 않는 경우와, 선행하중을 설계축력의 50%와 100%를 가하는 경우, 흙막이 벽체 변위를 거의 발생시키지 않는 크기의 선행하중을 가하는 경우에 대해 유한요소법(FEM) 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 수행하였다. 그 결과 선행하중을 설계축력 이상으로 적용시켜 흙막이 벽체변위를 억제시켰을 때 벽체 배면 지반에 있는 터널의 안정성이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

Keywords : Braced wall, Design axial force on bracing, Ground excavation, Large scale model test, Pre-loading

1. 서 론

근접굴착 시 발생하는 흙막이 벽체 변위를 억제하여 배면지반의 변형을 최소화 시켜서 주변 구조물의 안정성을 확보할 목적으로 버팀대에 선행하중을 가하는 방법은 오래 전부터 연구되어 현장에 적용되어 왔다. O' Rourke(1976)

등은 지반 침하에 대한 연구에서 버팀대 선행하중을 설계축력의 50%를 가할 때 흙막이 벽체 배면의 지반거동을 억제시킬 수는 있으나 지나치게 큰 축력을 적용할 경우에는 버팀대가 위험해질 수 있다고 하였으며, 1981년에 발표한 연구(O' Rourke, 1981)에서는 버팀대에 선행하중을 가하면 강재연결 부분이 밀착되어 버팀대 유

1 정회원, 아주대학교 대학원 건설교통공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Environmental Construction and Transportation Engrg., Ajou Univ.)
2 정회원, 아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Environmental, Construction and Transportation Engrg., Ajou Univ., Isangduk@ajou.ac.kr, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

효 강성이 증가한다고 하였다. Mana와 Clough(1981)는 점토 지반에서 버팀대를 설치하면서 지반을 굴착할 때, 설계축력의 50%와 100%에 해당하는 선행하중을 가하는 경우에 대해 수치해석을 실시하여 그 결과를 분석하였다. 그들은 선행하중을 가하면 벽체의 수평변위를 감소시킬 수는 있으나 지나치게 큰 선행하중을 가하면 버팀대 위치에서 흙막이 벽체에 국부적인 변형이 발생되어 주변 구조물에 손상을 줄 수 있어서 선행하중의 크기를 무한정 크게 가하는 것은 위험하며 오히려 역효과를 나타낼 수 있다고 하였다. Palmer와 Kenny(1972)는 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때 버팀대의 초기 강성은 이상 강성의 2%~4%이고, 강재 연결부가 느슨한 경우에는 굴착 시 증가하는 수평력에 의해 밀착되면 이상 강성과 같아진다고 하였다. 일본 토질공학회(1975)는 버팀대에 선행하중을 가하지 않을 경우에는 강재연결부의 느슨한 부분 때문에 버팀대에서는 설계값보다 약 20mm정도 추가 변형량이 생긴다고 하였다. Canadian Geotechnical Society(1997)는 굴착에 의한 벽체변위를 억제시키기 위해서는 선행하중을 설계하중의 100%까지 적용해야 된다고 언급하고 있다. 이들이 연구한 선행하중재하 공법은 지표침하 방지와 버팀대 유효강성에 관한 것이며, 흙막이 벽체 배면에 있는 구조물의 안전율을 확보하기 위해 구체적으로 연구된 내용은 거의 없는 실정이다. 국내에서는 터널에 근접하여 굴착 공사를 시행할 경우에 대해 실험과 수치해석을 통해 벽체변위와 터널거동의 관계에 대한 연구는 한국터널공학회(2006)에서 발표된 경우가 있으나 선행하중에 따른 배면터널의 거동에 대한 연구는 발표된 예를 찾기가 어렵다. 지금까지 흙막이 벽체의 버팀대에 가하는 선행하

중은 설계축력을 기준으로 하였다. 그런데 설계축력은 토압분포에 의해 결정되며 같은 조건일지라도 시공방법과 경계조건 및 흙막이 벽체의 변형형태에 따라 토압분포도가 달라지며(이상덕, 1998, 1999) 버팀대에 선행하중을 가하면 그렇지 않은 경우 보다 토압이 커진다(백승훈, 2002). 그러므로 버팀대에 가하는 선행하중에 대한 적용기준을 마련하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 기존터널에 인접한 터파기 공사에서 흙막이 벽체의 변위를 억제하여 기존터널을 보호 할 목적으로 버팀대에 가하는 선행하중의 크기에 따른 기존 터널의 거동을 분석하여 선행하중 재하모형을 제시하였다. 이를 검증하기 위하여 실 대형 시험을 실시하고 수치해석을 수행하였다.

2. 실 대형 시험

2.1 개요

선행 하중을 가하여 흙막이 벽체의 변위를 최대한 억제시켜서 벽체 배면에 있는 구조물의 안정성을 확보할 수 있도록 설계 축력 이상의 큰 선행하중을 가할 수 있는 지지시스템을 개발하고 이를 검증하기 위하여 선행하중이 없는 경우와 있는 경우에 대해 실 대형시험을 실시하였다. 실 대형시험은 기존의 지하철 복선터널에서 0.5D(6.0m) 이격되어 지반을 굴착하기 위하여 지하 연속벽을 설치하고 8단의 버팀대를 설치하면서 단계별로 굴착하는 경우에 대해서 폭 2.0m, 길이 4.0m, 높이 6.0m인 대형 토조에서 모래로 지반을 조성하고 1/10 축소율로 실시하였다. 실험을 실시한 대형 토조의 개략도 및 전경은 그림 1과 같다.

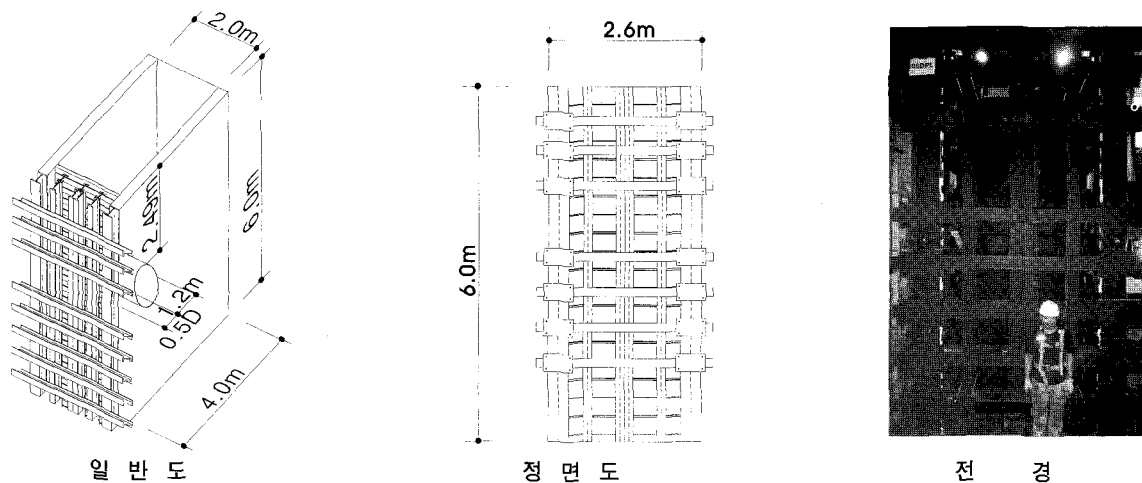
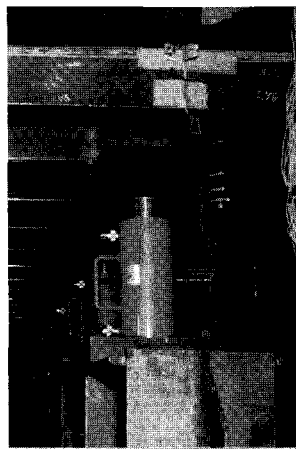


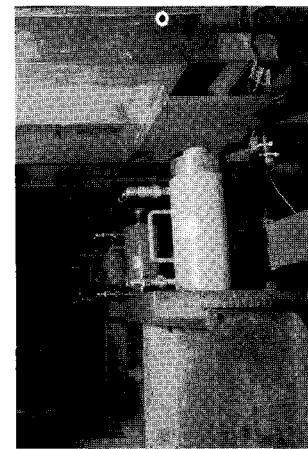
그림 1. 모형토조 개략도 및 전경



유압잭 설치준비



유압잭 설치



가 압

그림 2. 선행하중 장치(벽체상단에서 내려다본 모습)

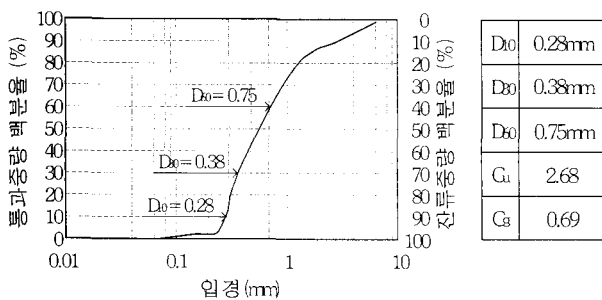


그림 3. 시험지반의 입도분포곡선

표 1. 시험지반의 물리적 특성

최대 건조단위중량 (γ_{dmax})	16.86 kN/m ³
최소 건조단위중량 (γ_{dmin})	13.82 kN/m ³
자연상태에서의 건조단위중량 (γ_d)	15.39 kN/m ³
상대 밀도 (D_r)	56%
함수비 (ω)	6.8%
비중 (G_s)	2.63

단계별 굴착에서 버팀대 선행하중은 유압잭을 사용하여 단계별로 가압하였으며 실 대형시험에서 사용한 선행하중 장치는 그림 2와 같다.

2.2 시험 지반

대형 시험은 모래를 사용하여 모형지반을 조성하여 실시하였다. 균질하고 등방성이며 상대밀도가 일정한 지반을 조성하기 위해 토조의 바닥에서부터 습윤 상태의 모래를 한번에 30cm씩 포설하고 진동기로 다짐하였다. 조성된 지반의 상대밀도는 DIN 4021 코어커터를 이용하여 시료를 채취해서 확인하였으며, 조성된 지반의 물리적 및 역학적 특성은 다음과 같다.

2.2.1 물리적 특성

실 대형 시험에 사용된 모래 지반의 물리적 성질은 입도분포시험, 비중시험, 현장 단위중량시험 및 함수량 시험을 실시하여 확인하였으며, 시험 결과는 그림 3 및 표 1과 같고 통일 분류법에 의해 분류하면 세립자가 적고 입도 분포가 불량한 모래(SP)이다.

2.2.2 역학적 특성

실 대형 시험에서 사용한 지반의 강도정수는 조성 지반의 함수비와 상대밀도가 같도록 공시체를 만들어서 변형을 제어방식(strain control)으로 직접전단시험과 평판재하시험을 실시하여 구하였다. 시험결과 전단강도정수는 내부마찰각(ϕ)은 38°이고 겉보기점착력(c)은 6.0 kN/m²로 나타났다.

2.3 실 대형 시험 장치

2.3.1 모형 토조

본 실 대형 시험에서 사용된 대형 모형 토조는 크기가 폭 2.0m, 길이 4.0m, 높이 6.0m이며, 양쪽의 측벽은 지반과 벽체 사이에 마찰이 작용하지 않도록 콘크리트 벽면에 벤토나이트를 도포하고 그 위에 비닐을 씌어 처리하였다. 지반은 총 8단계로 굴착하였고, 흙막이 벽체를 설치한 후에 스쿠류잭을 부착한 버팀대로 지지하였다. 선행하중은 굴착단계별로 흙막이 벽체의 변위가 “0” (Zero)을 유지하도록 유압잭을 사용하여 재하하였다.

2.3.2 모형 터널 및 모형 흙막이벽체

실제 연구대상 터널은 직경(D)이 12.0m인 복선지하철 터널이며, 연구대상 지반은 탄성계수(E)가 400,000~500,000kN/m²인 연약한 암을 기준으로 하였고, 모형 지반의 탄성계수(Em)는 20,000~30,000kN/m²이었다. 모형터널의 제원은 Duddeck과 Erdmann(1985)의 방법을 이용하여 지반과 터널라이닝의 강성비(α)로부터 결정하였다.

실제 연구대상터널 강성비

$$\alpha = \frac{E_k \cdot R^3}{E_b \cdot I_b} \quad (1)$$

모형터널 강성비

$$\alpha = \frac{E_{km} \cdot R_m^3}{E_{bm} \cdot I_{bm}} \quad (2)$$

여기서, $E_k (E_{km})$: 실제(모형)지반의 탄성계수(kN/m²)

$R (R_m)$: 실제(모형)터널 반경(m²)

$E_b (E_{bm})$: 실제(모형)라이닝 탄성계수(kN/m²)

$I_b (I_{bm})$: 실제(모형)라이닝의 단위길이당 단면2차모멘트

$$\left(\frac{t_m^3}{12} = m^4/m\right)$$

$t (t_m)$: 실제(모형) 터널 라이닝 두께(m)

라이닝의 두께는 연구대상 터널과 모형터널의 상대 강성을 동일한 방법(Soliman 등, 1993)으로 식 3 및 식 4로 두께를 산정한다. 그 결과는 아래 표 2와 같다.

$$\alpha = \frac{E_k \cdot R^3}{E_b \cdot I_b} = \frac{E_{km} \cdot R_m^3}{E_{bm} \cdot I_{bm}} = \frac{E_{km} \cdot R_m^3}{E_{bm} \cdot \frac{bt_m^3}{12}} \quad (3)$$

$$t_m = \left\{ \frac{12 \times E_{km} \cdot R_m^3}{\alpha \cdot E_{bm}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

모형 흙막이 벽체 두께는 체적에 대한 대응비를 사용하여 구하였으며 아래 표 3과 같다.

$$t_m = \frac{T}{C} \times \left[\frac{G_m}{G_R} \times \frac{1}{C} \times \frac{E_R}{E_m} \times \frac{B_R}{B_m} \right]^{\frac{1}{3}} \times 1000 \quad (5)$$

여기서 t_m : 모형 흙막이 벽체 두께 (mm)

C : 상사율

T : 실제 벽체 두께 (mm)

G_m, G_R : 시험 벽체 및 실제 벽체 증력가속도

E_R : 실제 벽체 탄성계수 (KN/m²)

E_m : 시험 벽체 탄성계수 (KN/m²)

B_R : 실제 벽체 폭

B_m : 시험 벽체 폭

2.3.3 실 대형 시험의 축소율 산정 (심현진, 양형식 등 2007)

상사법칙에는 질량, 시간, 가속도 기준의 상사법칙이 있다. Hobbs(1966)는 물체에 작용하는 증력가속도는 항상 일정하다는 가정(증력가속도의 축소율을 1.0)하에 시간의 축소율을 산정하였다. 먼저 길이에 대한 축소율을 정한 후 시간, 밀도, 질량, 응력 등의 축소율을 차례로 정하였다. 본 연구에서는 축소율이 1/10인 실 대형 시험을 실시하였고 연구 대상의 터널 라이닝과 흙막이 벽체의 재질은 콘크리트로 단위중량(γ)는 25 kN/m³이

표 2. 연구대상 터널 및 연구대상 지반에 의한 모형 터널 라이닝 두께

연구대상 터널 및 연구대상 지반				모형 터널 및 모형 지반		
지반 탄성계수 E (kN/m ²)	터널반경 R (m)	라이닝 두께 t (cm)	상대 강성비 α	지반 탄성계수 Em (kN/m ²)	터널반경 Rm (m)	라이닝 두께 t (mm)
400,000~600,000	6.0	30	1,902~2,400	20,000~30,000	0.6	4.76~5.87 (=6)

표 3. 연구대상 흙막이벽체에 의한 모형 흙막이벽체 두께

연구대상 흙막이벽체			모형 흙막이벽체			
탄성계수 E (kN/m ²)	폭 B (m)	두께 t (m)	탄성계수 Em (kN/m ²)	폭 Bm (m)	상사율	두께 t (mm)
2.0×10 ⁷	1.0	0.8	2.0×10 ⁸	1.0	10	17.27(=16)

표 4. 실 대형시험 모델 축소율

물 성	차 원	축소율 (터널 라이닝과 흙막이벽체)
길 이	[L]	1/10
시 간	[T]	1/3.16
질 량	[M]	1/3,120
밀 도	[ML-3]	1/3.12
응 력	[ML-1T-2]	1/31.24
중력가속도	[LT-2]	1.0

표 5. 계측기 설치 및 수량

설치위치	계측기 종류	측정 용도	개소	범 레
흙막이 벽 체	Strain gauge	벽체 부재력	40	┃
	LVDT	벽체 변위	8	◆
	지표 침하계	지표 침하	9	┃
터 널	Strain gauge	터널의 부재력	32	┃
	LVDT	터널의 내공변위	16	↓

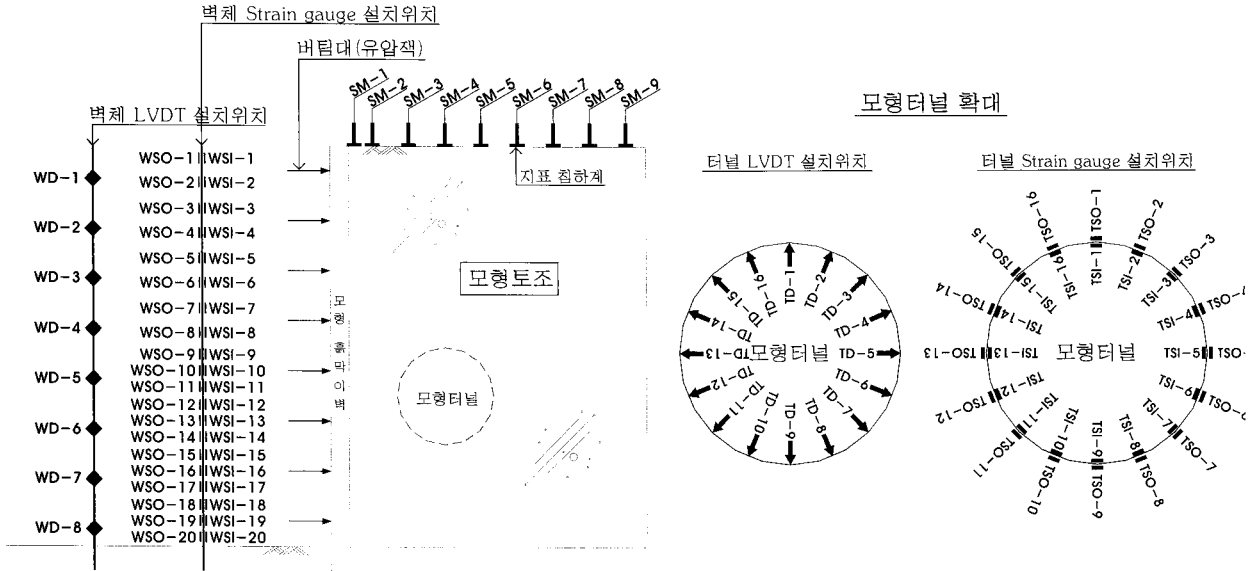


그림 4. 계측기 설치 단면도

고, 실 대형 시험에서는 터널 라이닝과 흙막이 벽체를 단위중량 78 kN/m³인 철판으로 사용하였으며 이에 따른 축소율 산정결과는 표 4와 같다.

2.3.4 계 측

실 대형 시험에서는 흙막이 벽체의 부재력(40개소), 수평변위(8개소), 지표변위(9개소), 터널 라이닝의 부재력(32개소), 내공변위(16개소)를 측정하였으며, 사용된 계측기 설치위치와 수량은 그림 4 및 표 5와 같다. 지반 굴착이 계속되는 동안에 굴착 단계별로 초기치를 설정하고 30분 간격으로 계측을 실시하였다.

2.3.5 시험 방법

실 대형 시험은 우선 지반굴착 후에 버팀대를 설치하고 선행하중을 가하지 않고 다음 단계를 굴착하기를 반복하여 8단까지 굴착을 완료하는 일반적인 경우에 대해 실시하였고, 선행하중을 가하는 경우는 지반을 굴착하고 유압잭으로 선행하중을 가하여 벽체변위를 "0" (Zero)으로 하는 과정을 단계별로 반복하여 8단까지 굴

착을 완료하는 경우에 대해 실시하였다. 모든 시험단계에서 배면지반이 안정되도록 기다렸으며 30분 간격으로 계측하여 데이터를 자동으로 저장하였다.

3. 수치해석

3.1 해석프로그램 및 해석조건

본 연구에서 실시한 실 대형시험의 축소율을 역으로 적용하여 환산하면 굴착심도 52.6m, 두께 80cm인 지하 연속 벽에 버팀대 8단이 설치되는 흙막이 구조물이고 배면에 토피 21.9m 밑에 직경 D=12.0m의 복선터널이 벽체에서 0.5D(6.0m) 이격된 경우가 된다. 이에 대해 범용 유한요소법(FEM) 프로그램인 PLAXIS Ver. 8.2를 이용하여 2차원으로 모델링하여 계산하였다. 흙막이 벽체와 터널 라이닝은 plate요소로 하고 버팀대는 anchor요소로 하여 탄성모델을 적용하였다. 지반의 구성방식으로 Mohr-Coulomb모델을 적용하였고, 유한요소망은 15절점 삼각형요소로 구성하였다. 흙막이 벽체와 지반

그리고 터널 라이닝과 지반의 경계면에는 interface를 두었다.

3.2 해석방법 및 입력 물성치

수치해석에 적용된 유한요소 해석망과 경계조건은 그림 5와 같다. 좌, 우의 경계에서는 상·하 그리고 하부의 경계에서는 좌·우로만 이동할 수 있도록 각 요소마다 roller 조건으로 하였고, 하부 좌·우측 끝 절점은 힌지로 하였다. 나머지 절점에 대해서는 X, Y 방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속되도록 하였다. 지반의 구성방정식으로 Mohr-Coulomb식을 적용하였고, 2차원 평면변형율을 적용하였다. 지반 및 재료의 입력 물성치는 다음 표 6~8과 같다.

3.3 설계축력 및 선행하중 크기 결정

3.3.1 설계축력

Case 0의 설계축력 값은 수치해석상에서 굴착 시 버

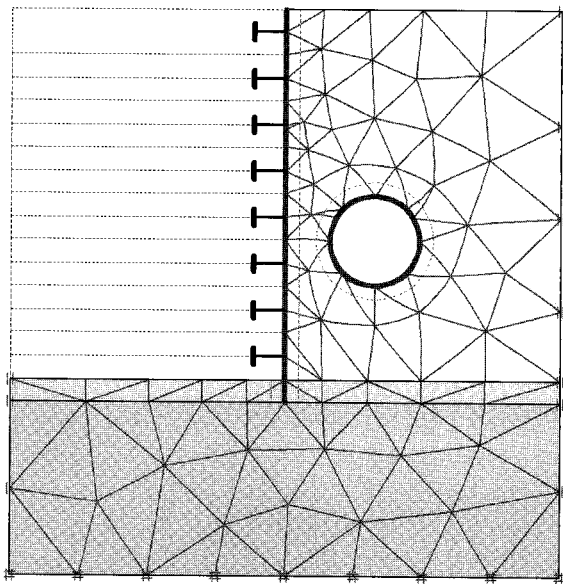


그림 5. 유한요소 해석망 및 경계조건

팀대에 선행하중을 가하지 않은 상태에서 굴착완료 후에 버팀대에 작용하는 축력값을 설계축력으로 정하였으며 Case I과 Case II는 수치해석 시 단계별 굴착할 때 버팀대 선행하중을 50%, 100% 적용하였다.

3.3.2 선행하중

Case III의 설계축력 이상의 선행하중은 수치해석과 실 대형시험에서 각각 다르게 결정되었다. 수치해석에서는 시행착오법을 이용하여 굴착 시 발생된 흙막이벽체의 수평변위를 버팀대에 선행하중을 가하는 방법을 계속 반복하여 흙막이벽체의 수평변위가 거의 발생되지 않았을 때 즉, 거의 0(영)에 근접했을 때의 버팀대축력 값을 선행하중으로 결정하였고, 실 대형시험에서는 굴착 시 수평변위가 발생된 벽체를 유압잭을 이용하여 배면 측으로 밀어넣어 흙막이 벽체에 설치한 변위계(LVDT)가 0(Zero)이 되도록 하였으며 이때의 버팀대축력 값을 선행하중으로 결정하였다. 수치해석과 실 대형 시험에 사용한 하중조건은 표 9와 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)	해석모델
배면 토사	20,000	0.25	16.39	38	6.0	M-C모델

표 7. 수치해석에 입력된 재료 물성치

구 분	축강성 EA (kN/m)	휨강성 EI (kNm ² /m)	두께 d (m)	포와송비 ν	해석모델
흙막이 벽체	3,293,000	70.0	0.016	0.3	Elastic모델
터널 라이닝	1,929,000	5.788	0.006	0.3	Elastic모델

표 8. 수치해석에 입력된 재료 물성치

구 분	축강성 EA(kN)	설치폭 L(m)	해석모델
버 팀 대	450,700	1.34	Elastic모델

표 9. 버팀대 하중 조건

경 우	내 용
Case 0	선행하중을 가하지 않는 경우
Case I	설계축력의 50 % 에 해당되는 선행하중을 굴착단계별로 가하는 경우
Case II	설계축력의 100 % 에 해당되는 선행하중을 굴착단계별로 가하는 경우
Case III	설계축력 이상의 선행하중을 굴착단계별로 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 거의 "0" (영)으로 하는 경우

3.3 수치해석 결과

실제 현장이나 실내 및 실 대형 시험에서 버팀대 선행하중을 설계축력이상으로 크게 가하여 흙막이 벽체 변위 및 부재력, 터널 라이닝의 내공변위 및 부재력을 측정할 자료가 없으므로, 실 대형 시험한 경우에 대해 수치해석 하여 본 연구의 해석모델을 검증하였으며, 수치해석결과는 4장에서 실 대형 시험치와 비교하였다.

3.3.1 흙막이 벽체

지반을 굴착하는 동안에 발생하는 흙막이 벽체의 수평변위는 선행하중을 가하지 않을 때와 단계별로 선행하중을 가할 때에 다르게 나타났다. 선행하중을 가할 때에도 선행하중이 클수록 흙막이벽체의 수평변위는 감소하였다(그림 6).

3.3.2 터널

버팀대 선행하중을 가하지 않았을 경우는 터널의 내공변위는 굴착이 단계별로 진행됨에 따라 점차 증가하였으나 버팀대 선행하중이 커질수록 흙막이벽체의 수평변위와 같이 내공변위는 점점 감소되는 것으로 나타났다. 특히, Case III의 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위가 거의 발생하지 않았을 때에는 터널이 원래 형상을 유지하였다(그림 7, 그림 10).

3.3.3 흙막이 벽체와 터널의 내공변위 관계

수치해석 결과 선행하중을 가했을 때 최종 굴착단계에서 흙막이 벽체의 수평변위와 터널의 내공변위는 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 선행하중을 가하지 않았을 때에는 터널은 횡으로 늘어나고 최대 변위 부근이 약간 아래쪽으로 치지는 형상으로 변형되었고, 벽체의 수평변위는 터널이 위치하는 레벨인 6단 버팀대 위치에서 최대값을 나타냈다. 그러나 선행하중을 설계축력의 50%와 100%로 크게 가할수록 터널 내공변위가 점차 감소하였고 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 “0”(Zero)으로 하였을 때에는 터널의 형상이 원래의 모습을 유지하였다(그림 10).

3.3.4 지표침하

단계별 선행하중을 가했을 때 지표침하는 단계별 선행하중에 상관없이 같은 형상으로 발생하였으며, 최종

굴착단계에서 지표침하는 선행하중이 커질수록 감소되었다(그림 11).

4. 실 대형 시험과 수치해석과의 비교

실 대형 시험은 2가지 경우 즉, 선행하중을 가하지 않는 경우(Case 0)와 설계축력 이상의 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 “0”(Zero)으로 하는 경우(Case III)에 대해 실시하였으며 수치해석은 Case 0에서 Case III 까지 4가지 경우를 실시하였다. 따라서 Case 0과 Case III은 수치해석결과와 실 대형시험결과를 직접 비교할 수 있다.

4.1 흙막이 벽체

버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때와 단계별로 선행하중을 가했을 때에 흙막이 벽체의 수평변위는 수치해석 결과와 실 대형 시험 결과를 비교하면 그림 6과 같다.

지반을 굴착하는 동안에 발생하는 흙막이벽체의 수평변위는 수치해석과 실 대형시험결과 모두 버팀대에 선행하중을 가했을 때에 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 최종굴착단계에서 흙막이벽체의 최대수평변위(δ_{max})는 Case 0에서 수치해석결과 2.914mm, 실 대형시험결과 2.290mm로 수치해석결과가 더 크게 나타났고, 수치해석결과 Case I에서 2.326mm, Case II에서 1.818mm로 나타났으며, Case III에서는 수치해석결과 0.193mm, 실 대형시험결과 0.03mm로 실 대형시험결과가 더 감소하는 것으로 나타났다(그림 6).

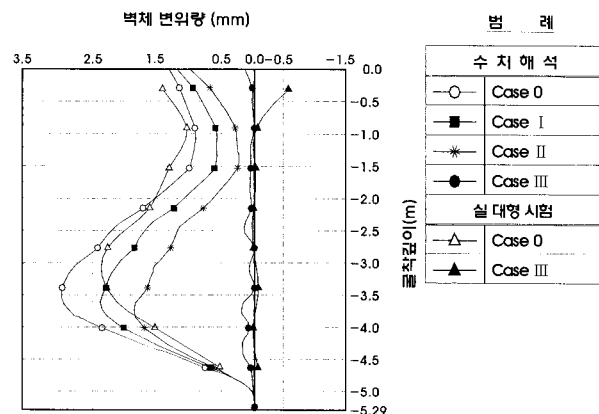


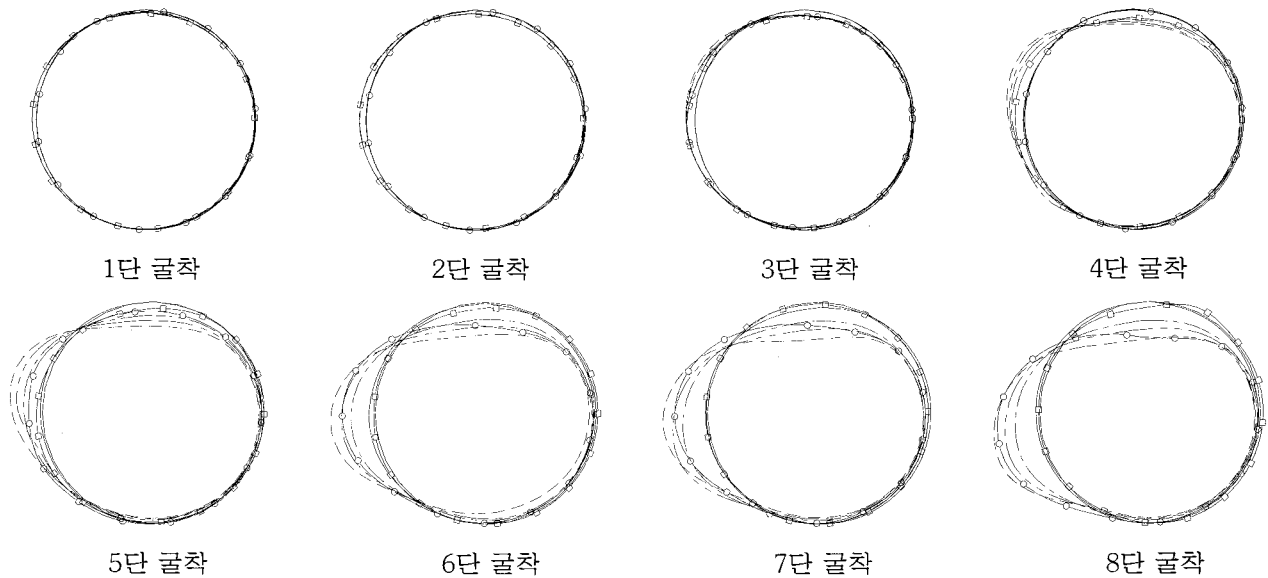
그림 6. 흙막이 벽체 변위

4.2 터널

선행하중을 가하지 않았을 때와 가했을 때 굴착단계별 터널 라이닝의 내공변위에 대한 수치해석결과와 실 대형 시험 결과를 비교하면 그림 7과 같다. 수치해석 결과와 실 대형 시험결과 모두 터널의 내공변위는 선행하중을 가하지 않았을 때에는 상하로 압축되고 좌우로 늘어났다. 그러나 굴착단계별로 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 거의 “0”(Zero)으로 했을 때에는 내공변위는 대폭 감소하였고 터널의 형상은 거의 원래의 형태 즉, 원형을 유지하였다.

최종 굴착단계에서 터널의 내공변위는 수치해석결과 Case 0에서 2.670mm, Case I에서 2.020mm, Case II에서 1.450mm, Case III에서 0.337mm로 선행하중이 커질수록 대폭 감소하였다. 실 대형시험결과는 Case 0에서 2.220mm이고 Case III에서 0.210mm로 감소하였으며 감소폭은 수치해석 결과 보다 더 크게 나타났다. 또한, 수치해석결과 선행하중을 가하면 터널라이닝의 최대 휨모멘트와 최대 전단력은 감소하고 최대 축력은 증가하였다. 즉, 선행하중이 커질수록 터널 라이닝의 최대 휨모멘트

는 Case 0에서 0.15kN·m/m, Case I에서 0.080 kN·m/m, Case II에서 -0.098kN·m/m, Case III에서 0.068kN·m/m로 감소하였고, 최대 전단력은 Case 0에서 1.160kN/m, Case I에서 1.078 kN/m, Case II에서 0.975kN/m, Case III에서 0.436 kN/m로 감소하였으며, 최대 축력은 Case 0에서 -17.436kN/m, Case I에서 -18.844 kN/m, Case II에서 -20.123 kN/m, Case III에서 -22.837 kN/m로 증가하는 것으로 나타났다. 실 대형시험 결과는 Case 0과 Case II을 비교하면 최종 굴착단계에서 라이닝에 작용하는 최대 휨모멘트는 -0.195kN·m/m에서 -0.021kN·m/m로 최대 전단력은 -0.331kN/m에서 -0.178kN/m로 감소한 반면에 최대 축력은 -34.377kN/m에서 -124.863 kN/m으로 증가하였다. 수치해석 및 실 대형 시험결과 모두 굴착단계별로 선행하중을 가하면 터널 라이닝의 휨모멘트와 전단력은 감소하지만, 축력은 증가하는 것으로 나타났다. 수치해석 및 실 대형 시험 결과 단계별 선행하중을 가하지 않았을 때와 가했을 때 최종 굴착단계에서 터널의 부재력은 그림 8 및 그림 9와 같다.



범례

수치해석		실대형시험	
-----	Case 0	○—○—○	Case 0
-----	Case I	□—□—□	Case III
-----	Case II		
-----	Case III		

그림 7. 굴착단계별 터널 라이닝 내공 변위

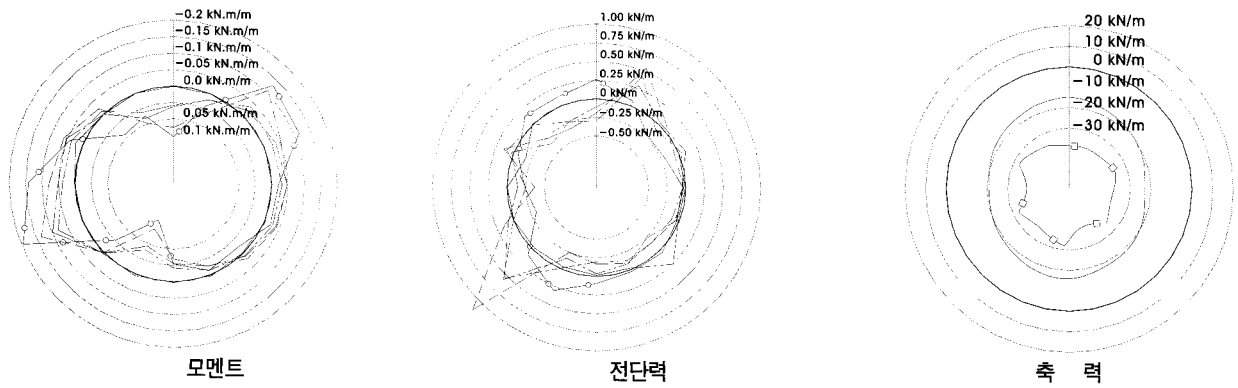


그림 8. 터널 라이닝 부재력 (선행하중을 가하지 않았을 때, 설계축력을 가했을 때)

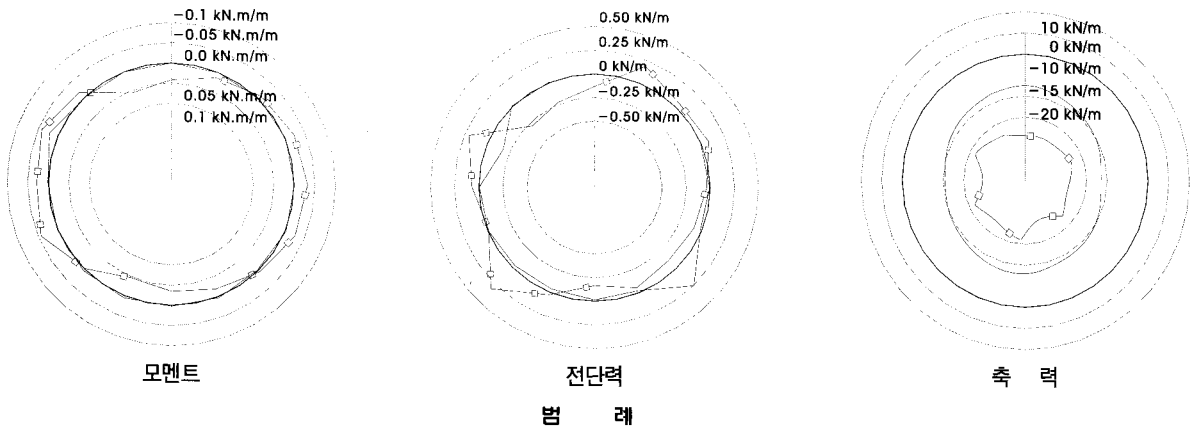


그림 9. 터널 라이닝 부재력 (벽체 수평변위가 거의 "0" (Zero)이 되도록 선행하중을 가했을 때)

수 치 해 석		실 대 형 시 험	
-----	Case 0	○-----○	Case 0
-----	Case I	□-----□	Case III
-----	Case II		
-----	Case III		

4.3 흙막이 벽체와 터널의 내공변위 관계

수치해석 및 실 대형 시험 결과 단계별 선행하중을 가했을 때 흙막이 벽체의 수평변위와 터널의 내공변위는 감소되는 것으로 나타났다. 즉, 선행하중을 가하지 않았을 때 흙막이 벽체의 수평변위는 터널이 위치하는 레벨인 6단 버팀대 위치에서 최대값을 나타내고 터널 라이닝은 상하로 압축되고 좌우로 늘어나고 약간 아래쪽으로 향한 형태로 변형되었다. 그러나 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 했던 Case III에서는 터널 라이닝이 거의 원래형상을 유지하였다. 이러한 흙막이 벽체변위와 터널 내공변위의 관계는 다음 그림 10과 같다.

4.4 지표침하

수치해석 및 실 대형 시험 결과 모두 단계별 선행하중을 가했을 때 최종 굴착단계에서 지표침하는 감소되었고, 벽체 수평변위가 거의 "0"(Zero)이 되도록 선행하중을 가할 때 지표침하는 거의 발생되지 않았다. 수치해석 결과 지표침하는 단계별 선행하중에 상관없이 거의 같은 형상으로 침하되었으며, Case 0에서 2.506mm, Case I에서 1.968mm, Case II에서 1.493mm, Case III에서 0.726mm로 선행하중이 커질수록 감소하였다. 실 대형시험결과 Case 0에서 2.1mm이던 것이 Case III에서 0.12mm로 감소하여 수치해석 결과보다 감소폭이 더 크게 나타났다. 배면지반의 지표침하곡선은 그림 11과 같다.

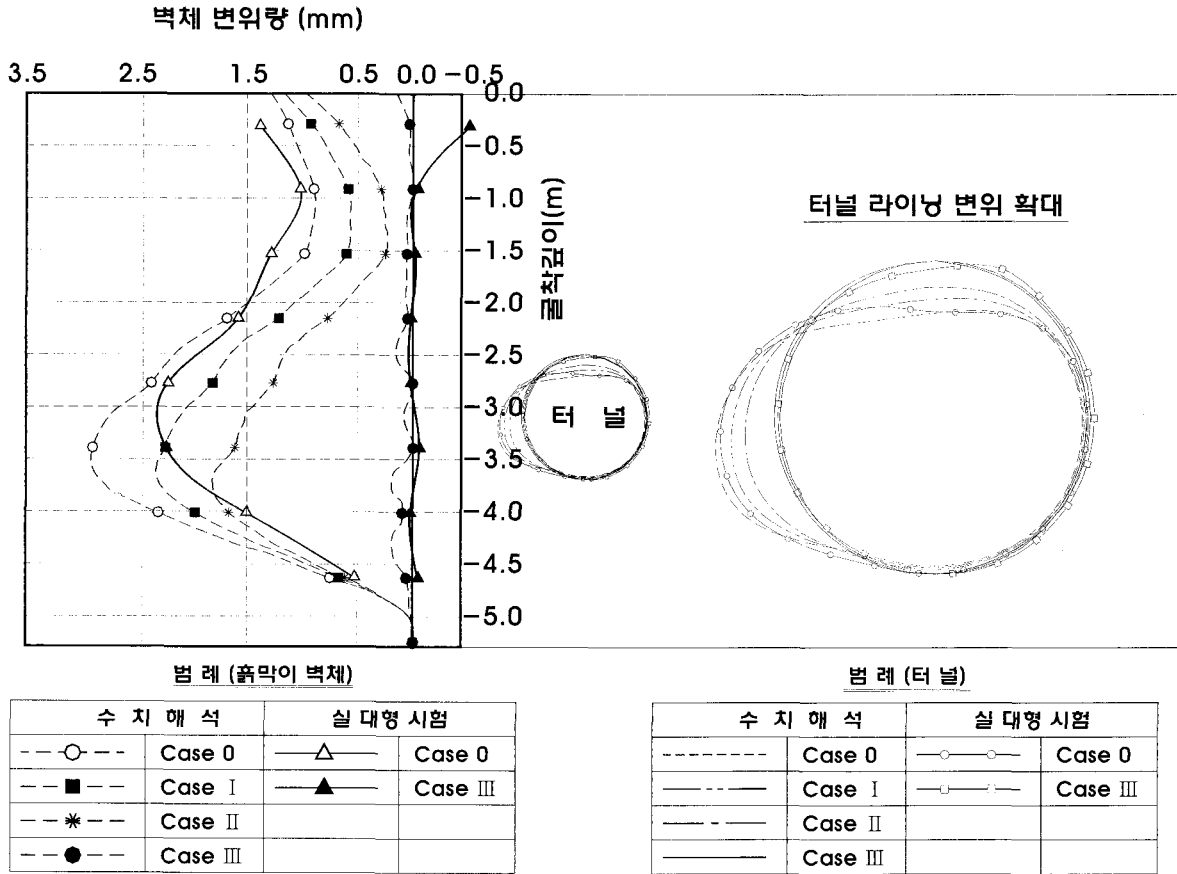


그림 10. 흙막이 벽체와 터널라이닝 내공 변위

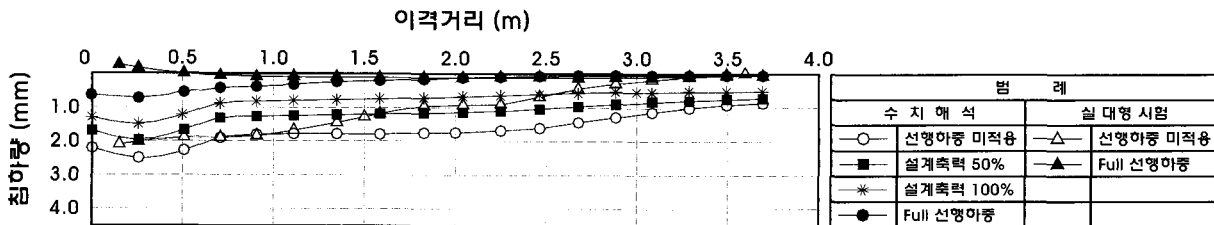


그림 11. 흙막이 배면 지표 침하

5. 결론

본 연구에서는 기존 터널에 인접한 터파기 공사에서 터널을 보호할 목적으로 가하는 선행하중의 영향을 규명하기 위하여 수치해석과 실 대형 시험을 실시하여 흙막이 벽체와 터널라이닝의 거동과 부재력을 계산하고 그 결과를 비교하고 분석하였다. 단계별 선행하중 재하 모델을 개발하여 선행하중을 가하지 않는 경우, 선행하중을 설계축력의 50%로 가하는 경우, 100%로 가하는 경우, 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 “0”(Zero)으로 하는 경우에 대해 수치해석을 수행하여 검증하였고, 실 대형 시험은 선

행하중을 가하지 않는 경우와 굴착단계별로 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 “0”(Zero)으로 하는 경우에 대해 실제 시공과정을 재현하여 실시하였다. 본 연구의 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 설계축력의 100%를 버팀대 선행하중으로 가하여도 굴착 시 발생된 흙막이 벽체의 수평변위는 충분히 억제되지 않았다. 그러므로 굴착 시 발생된 흙막이 벽체의 수평변위를 “0”(Zero)에 가깝게 억제시키기 위해서는 버팀대 선행하중을 설계축력 이상으로 가해야 한다.

- (2) 흙막이 벽체의 최종굴착단계에서 최대 수평변위는 수치해석 결과 선행하중을 가하지 않을 때에 비하여 선행하중을 설계축력의 50%로 가할 때에는 약 20%, 설계축력의 100%로 가할 때에는 약 37% 감소하였다. 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 하였을 때에는 수치해석에서는 약 93%가 감소하였고 실 대형 시험에서는 약 98%가 감소하여 실 대형 시험에서 감소폭이 더 크게 나타났다.
- (3) 터널 라이닝의 최대 내공변위는 수치해석결과 선행하중을 가하지 않을 때에 비하여 단계별 선행하중을 설계축력의 50%로 가할 때에는 약 24%, 설계축력의 100%로 가할 때에는 약 45% 감소하였다. 설계축력을 초과하여 가할 때에는 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 하였을 때에는 수치해석에서는 약 87%가 감소한 반면에 실 대형 시험에서는 약 90% 감소하여 실 대형 시험에서 감소폭이 다소 크게 나타났다.
- (4) 수치해석 결과 선행하중을 가하지 않을 때에 비하여 단계별 선행하중을 설계축력의 50%로 가할 때와 설계축력의 100%로 가할 때에는 터널 라이닝의 최대 휨모멘트는 각각 약 46%와 약 34% 감소하였고, 최대 전단력은 각각 약 7%와 약 15% 감소하였으며, 최대 축력은 각각 약 8%, 약 15% 증가하였다. 설계축력을 초과한 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 하였을 때에는, 수치해석에서는 터널 라이닝의 최대 휨모멘트는 약 54%, 최대 전단력은 약 62% 감소하였고 최대 축력은 약 30% 증가하였으며, 실 대형 시험에서는 최대 휨모멘트가 약 89%, 최대 전단력은 약 46% 감소하였다. 따라서 굴착 시 버팀대 선행하중을 가하면 최대 축력은 증가하지만 최대 모멘트와 전단력의 대폭 감소하여 안전율이 크게 향상되었다.
- (5) 벽체의 최대 수평변위는 수치해석 및 실 대형 시험 결과 선행하중을 가하지 않을 때에는 터널이 위치하는 레벨의 버팀대 위치에서 나타났고, 터널이 상하로 압축되고 좌우로 늘어나며 약간 아래쪽으로 치지는 형상으로 변형되었다. 굴착단계별로 선행하중을 가하면 흙막이 벽체의 수평변위와 터널의 내공변위는 대폭 감소시킬 수 있으며 단계별로 설계축력을 초과하는 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 하였을 때에는 터널의 원

- 래 형상이 거의 유지 되는 것으로 나타났다.
- 6) 최대지표침하는 굴착단계별로 선행하중을 가하였을 때에 수치해석 결과 선행하중을 가하지 않을 때에 비하여 단계별 선행하중을 설계축력의 50%로 가할 때에는 약 21%, 설계축력의 100%로 가할 때에는 약 40% 감소하였다. 설계축력을 초과하는 단계별 선행하중을 가하여 흙막이 벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 하였을 때에는 수치해석에서는 약 71%가 감소하였고, 실 대형시험에서는 약 94% 감소하였다.

이상 수치해석과 실 대형 시험에 결과 흙막이 벽체의 변위와 인접한 터널의 안정성 및 지표침하가 단계별 선행하중을 가함에 따라 크게 향상되었으나 선행하중의 크기가 설계축력의 50% 나 100% 정도로는 충분하지 않을 수도 있음을 알 수 있었다. 지반조건과 구조물의 상태 및 위치에 따른 선행하중의 소요 크기에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 백승훈 (2002), *선행하중과 벽체 강성에 따른 흙막이 벽 및 인접 지반 거동*, 공학 석사 학위 논문, 이주대학교.
2. 심현진 외 (2007), *근접병설터널 설계를 위한 모형시험 및 시험발파*, KTA 2007 Annual Conference April 20-21 Seoul Korea, pp.267-278.
3. 양형식 외 (2007), *축소모형실험을 위한 재료특성 연구*, 건설교통 R&D 성과포럼 논문집, pp.33-36.
4. 이상덕 (1998), *토질 역학 제2판*, 도서출판 세론, pp.353, 354.
5. 이상덕 (1999), *기초 공학*, 도서출판 세론, pp.252-254.
6. 한국터널공학회 (2006), *제2회 터널 기술 강좌* 제11강 근접공사에 따른 터널 보호 방안, pp.23-24.
7. 土質工学会 (1975) *土留め 構造物の 構造物*, 土質基礎工学ライブラリー-II, pp.242-247.
8. Canadian Geotechnical Society (1997), *Foundation Engineering Manual, 3rd. ed.*, pp.416.
9. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1985), "On structural design models for tunnels in soft soil", *Underground Space*, Vol. 9, Pergamon Press, pp.246~259.
10. Hobbs, D.W (1966), "Scale model study of strata movement around mine roadways", *Apparatus, technique and some preliminary results*, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 3.
11. Mana, A.I. and Clough, G.H. (1981), "Prediction of movement for braced cuts in clay", *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.759-778.
12. 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.

13. O' Rourke. T. D. (1981), "Ground Movements Caused by Braced Excavation", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.107, NO.GT9, pp.1159-1178.
14. Palmer, J. H. and Kenny, T. C (1972), "Analytical Study of Braced Excavation in Weak Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.9, pp.145-164.
15. 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.

(접수일자 2007. 8. 28, 심사완료일 2007. 10. 16)