학술논문

한국터널공학회논문집 2007년 12월
제9권 제4호, pp. 331-341

근접굴착 시 벽체에 선행하중 재하에 따른 터널의 거동

김 일[1], 이상덕[2*]

Behavior of tunnel under the influence of pre-loading on braced wall during the adjacent ground excavation

Il Kim, Sang-Duk Lee

Abstract Pre-loads could be imposed on the braced wall to prevent the horizontal displacements during the ground excavation adjacent to the existing tunnel. For this purpose, new pre-loading system through which large pre-loads could be applied to the braced wall was used in the model tests. Large scale model tests were performed in the real scale test pit which was 2.0 m in width and 6.0 m in hight and 4.0 m in length. Test ground was constructed by sand. Model tunnel in 1.2 m diameter was constructed before test ground excavation. Test ground was excavated adjacent to existing tunnel and was braced. To investigate the effect of pre-loading, tests without pre-load were also performed. During the ground excavation were the behavior of braced wall, test tunnel, and ground measured. Model tests were also numerically analysed and their results were compared to that of the real scale tests. As a result, it was found that the stability of the existing tunnel was greatly enhanced when the horizontal displacements of braced wall was reduced by applying pre-load larger than the design load.

Keywords: Ground excavation, braced wall, pre-loading, large scale model test, tunnel stability

요 지 기존터널에 근접 굴착 할 때 발생하는 흙막이벽체의 수평변위를 억제시키기 위해 버팀대에 선행하중을 가했다. 이러한 목적으로 흙막이벽체에 큰 선행하중을 가할 수 있는 새로운 선행하중 시스템을 모형시험에 적용하였다. 대형 시험은 폭 2.0 m, 높이 6.0 m, 길이 4.0 m인 모형 토조에서 수행하였고 시험지반은 모래로 조성하였다. 직경 1.2 m인 모형 터널은 시험지반 굴착 전에 설치하고 지반을 조성한 후에 모형터널에 근접해서 흙막이벽체를 설치하고 시험지반을 굴착하면서 모형 터널과 흙막이벽체 및 지반의 거동을 측정하였다. 이때에 선행하중 재하효과를 확인하기 위하여 선행하중을 가하지 않는 시험은 물론 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 억제하는 시험을 실시하였고 수치해석을 실시하여 대형 시험결과와 비교하였다. 그 결과 선행하중을 설계축력 이상으로 적용시켜 흙막이벽체의 수평변위를 감소시켰을 때 벽체 배면에 있는 기존 터널의 안정성이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

주요어: 지반 굴착, 흙막이벽체, 선행하중, 대형 시험, 터널 안정성

1. 서 론

터파기 공사에서 굴착 중에 발생하는 흙막이 벽체의 수평변위는 벽체 배면 지반을 이완(이상덕, 2003)시켜서 흙막이벽체 배면 구조물의 안정성을 저하시키므로 구조물 보호를 위해 벽체의 수평변위가 발생되지 않도록 억제시키는 것은 매우 중요하다. 흙막이벽체의 수평변위를 최소화시키는 여러 가지 공법 중에서 버팀대 선행하중 공법은 오래전부터 현장에 적용되어 왔으며 선행하중의 적용범위에 대해서도 다년간 연구되어 왔다.

O'Rourke et al(1976)는 지반 침하에 대한 연구에서 버팀대 선행하중을 설계축력의 50%를 가할 때 흙막이 벽체 배면의 지반 거동을 억제시킬 수는 있으나 과도한 축력을 적용 할 경우에는 버팀대가 좌굴에 대해 위험해질 수 있다고 하였고, 1981년에 발표한 연구에서는 버팀대에 선행하중을 가하면 강재 연결 부분이 밀착되어 버팀대 유효강성이 증가한다고 하였다.

Mana와 Clough(1981)는 점토 지반에서 버팀대를 설치하면서 지반을 굴착할 때에 적절한 선행하중의 범위를 결정하기 위해서 설계축력의 50%와 100%에 해당하는 선행하중을 버팀대에 가하는 경우에 대해 수치해석을 실시하였다. 그 결과 선행하중을 가하면 흙막이벽체의 수평변위는 감소시킬 수 있으나 지나치게 큰 선행하

[1]아주대학교 대학원 건설교통공학과 박사과정
[2]아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부 교수
*교신저자: 이상덕 (lsangduk@ajou.ac.kr)

중을 가하면 흙막이벽체와 버팀대가 연결된 위치에서 흙막이벽체에 국부적인 변형이 발생되어 주변 구조물에 손상을 줄 수 있으므로 선행하중을 크게 가하는 것은 위험하며 오히려 역효과를 나타낼 수 있다고 하였다.

Palmer와 Kenny(1972)는 버팀대의 초기강성은 이상강성의 2%~4%이고, 강재 연결부가 느슨할 때에 선행하중을 가하면 밀착되어 이상강성과 같아진다고 하였다.

일본토질공학회(1975)는 버팀대에 선행하중을 가하지 않을 경우에는 강재 연결부의 느슨한 부분 때문에 버팀대의 변형량은 설계 값보다 약 20 mm정도 추가 변형이 생긴다고 하였다.

Canadian Geotechnical Society(1997)는 굴착에 의한 벽체 변위를 억제시키기 위해서는 선행하중을 설계축력의 100%까지 적용해야 한다고 언급하고 있다.

지금까지 연구된 내용은 지표침하와 버팀대 유효강성에 관한 것이 대부분이며, 선행하중 적용에 따라 흙막이벽체의 배면 구조물의 안정에 대한 연구는 미흡하다. 특히 벽체 배면에 터널이 있는 경우에 대한 연구는 찾아보기 어렵다. 또한 흙막이벽체 배면에 있는 구조물의 안정을 유지하기 위해 가하는 버팀대 선행하중의 크기에 대해서도 정론이 없다.

선행하중 적용에 기준이 되는 버팀대의 설계축력은 토압에 의해 결정된다. 굴착심도, 사용재료, 벽체의 배면 지반 등이 같은 조건일지라도 굴착 시 발생하는 벽체 변형에 따라 토압의 분포도가 달라지고(이상덕, 1998, 1999), 버팀대에 선행하중을 가한 경우가 가하지 않은 경우보다 토압이 커진다(백승훈, 2002). 그러므로 설계축력의 기준은 항상 일정하다고 할 수 없다. 실제로 굴착 시 버팀대에 설계 축력의 100%를 선행하중으로 적용시켰을 경우 흙막이벽체의 수평변위는 어느 정도 감소시킬 수 있었다. 그러나 발생된 수평변위를 충분히 감소시키지 못할 경우는 벽체 배면에 있는 구조물을 보호할 수 있을 만큼의 효과를 기대하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기존 터널에 근접 굴착 시 터널의 안정성을 확보하기 위해 벽체변위가 거의 발생되지 않도록 버팀대에 선행하중을 가하는 경우에 흙막이벽체와 터널, 배면의 지표침하의 거동을 분석하였다. 이를 위하여 실제 시공 과정을 재현한 대형 시험을 실시하였고, 대형 시험과 동일한 조건으로 수치해석을 수행하여 결과를 비교하고 선행하중의 재하모델을 검증하였다.

2. 대형 시험

2.1 개요

본 연구에서는 설계 축력이상의 큰 선행하중을 가할 수 있도록 선행하중 재하 시스템을 개발하여 굴착 시 발생한 흙막이벽체의 수평변위를 최대한 억제시킴으로써 벽체 배면에 있는 구조물의 안정성을 확보하기 위해 축소율 1/10의 대형 시험을 실시하여 검증하였다. 대형 시험은 기존의 지하철 복선터널에서 0.5D(6.0 m) 이격되어 지하연속벽을 설치하고 8단의 버팀대를 단계별로 설치하면서 굴착을 완료하는 경우에 대해서 2차원 경계조건으로 실시하였다. 대형 시험은 폭 2.0 m, 길이 4.0 m, 높이 6.0 m인 모형 토조에서 모래로 지반을 조성하여 실시하였으며, 시험에 사용한 토조의 개략도 및 전경은 그림 1 및 사진 1과 같다.

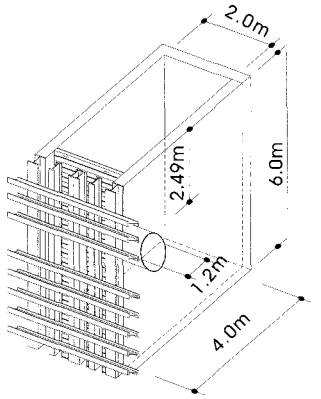


그림 1. 모형 토조 개략도

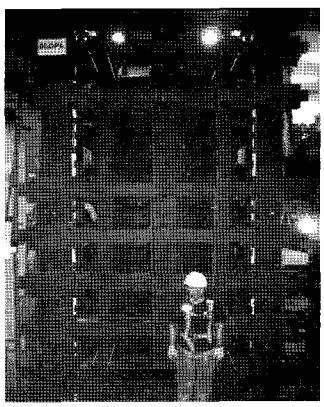


사진 1. 모형 토조 전경

2.2 시험 지반

본 대형 시험의 지반은 모래로 균질하고 등방성인 시험 지반을 조성하여 실시하였으며, 상대밀도를 일정하게 유지하기 위해 토조 바닥에서부터 습윤 상태의 모래를 한번에 30 cm씩 포설하고 진동기로 다짐하여 조성하였다. 조성된 지반의 토질정수는 코어커터(DIN 4021)를 이용하여 불교란 시료를 채취하여 시험하였다. 시험 지반의 물리적, 역학적 특성은 다음과 같다.

2.2.1 물리적 특성

대형 시험에 사용된 모래 지반의 물리적 성질은 습윤 상태의 모래로 다짐하였고, 지반이 조성된 상태에서 시료를 채취하여 입도분포시험, 비중시험, 현장 단위중량 시험 및 함수량시험을 실시하여 확인하였다. 시험지반을 통일 분류법에 의해 분류하면 미세립자가 적으며 입도 분포가 균등하고 불량한 모래(SP)로 나타났으며, 시험결과는 그림 2와 표 1과 같다.

2.2.2 역학적 특성

시험 지반의 역학적 성질은 조성된 시험 지반의 함수비와 상대밀도가 같도록 공시체를 만들어서 변형률 제어방식(strain control)으로 직접전단시험을 실시하였다.

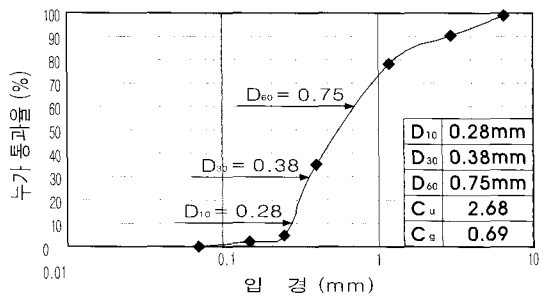


그림 2. 시험지반의 입도분포곡선

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%
함 수 비 (ω)	6.8%
비 중 (Gs)	2.63

그 결과 내부마찰각(ϕ)은 38°, 겉보기 점착력(C)은 6.0 kN/m^{2}로 나타났으며, 지반의 탄성계수는 대형 시험 시 삼축시험결과 구해진 기존의 값을 사용했다. 탄성계수(E)는 20,000 kN/m^2~30,000 kN/m^{2}의 범위였고, 모형 토조에서 시험 지반 조성 시 평판재하시험을 실시하여 확인했다.

2.3 대형 시험 장치

2.3.1 모형 토조

본 대형 시험에서 사용된 모형 토조의 크기는 폭 2.0 m, 길이 4.0 m, 높이 6.0 m이며, 모형 토조 양쪽의 측벽은 지반조성 모래와 콘크리트 벽체 사이에 마찰이 작용하지 않도록 특수 처리하였다. 모형 토조 전면에 모형 흙막이벽체를 설치하고, 그 앞에 I-형강을 격자로 설치하였다. 반력강재 3개를 세로로 설치하여 중앙 반력강재에는 유압잭을 버팀대 위치에 설치하고 양쪽 반력 강재에는 스크류잭을 설치하였다.

ㄷ-형강의 flange가 맞물리도록 용접해서 2장을 1set로 총 8장을 제작하여 모형 흙막이벽체(철판) 전면에 설치하고 스크류잭으로 ㄷ-형강을 고정하였으며, 굴착은 스크류잭을 푸는 방식으로 모사하였다. 지반은 총 8단계로 단계별 굴착하였고, 버팀대 선행하중은 굴착 시 발생한 흙막이벽체의 수평변위가 "0"(Zero)을 유지하도록 유압잭을 사용하여 굴착 단계별로 가하였다.

2.3.2 모형 터널 및 모형 흙막이벽체

본 연구에서는 지반과 라이닝을 강성비(α)로 나타내는 Duddeck과 Erdmann(1985)의 방법으로 모형 터널 라이닝의 두께를 결정하였다.

실제 연구대상 터널 및 모형 터널의 강성비는 각각의 지반 강성과 터널 라이닝의 제원에 따라서 아래 식 2.1과 2.2로 표현된다.

실제 연구대상 터널 강성비

$$\alpha = \frac{E_k \cdot R^3}{E_b \cdot I_b} \tag{2.1}$$

모형 터널 강성비

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

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)

모형 터널 라이닝의 두께는 연구대상의 실제 터널과 모형 터널의 상대강성을 동일하게 하는 방법(Soliman 등, 1993)으로 식 2.3과 2.4로 두께를 산정한다.

$$\alpha = \frac{E_k \cdot R^3}{E_b \cdot I_b} = \frac{E_{km} \cdot R_m^3}{E_{bm} \cdot I_{bm}} = \frac{E_{km} \cdot R_m{}^3}{E_{bm} \cdot \frac{bt_m{}^3}{12}} \quad (2.3)$$

$$t_m = \left\{ \frac{12 \times E_{km} \cdot R_m^3}{\alpha \cdot E_{bm}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

실제 연구대상 터널의 직경(D)은 12.0 m(R=6.0 m)이며, 연구대상 지반은 탄성계수(Ek)가 400,000~500,000 kN/m^{2}인 연약한 암에 해당하는 지반를 기준으로 하였고, 시험 지반의 탄성계수(Ekm)는 20,000~30,000 kN/m^{2}을 기준으로 하였다. 모형 터널은 원형으로 가정하고 모형 터널의 직경은 길이에 대한 축소율 1/10을 적용하여 대단면 복선 터널의 직경 12.0 m를 D=1.2 m로 결정하였다.

대형 시험에 사용된 모형 터널 라이닝은 두께가 30 cm인 콘크리트 라이닝을 기준으로 t=6 mm인 철판으로, 모형 흙막이벽체는 상사율을 적용하여 두께 80 cm인 지하연속벽을 t=16 mm인 철판으로 제작하였다.

2.3.3 대형 시험의 축소율 산정

Hobbs(1966)는 축소율을 산정하는데 있어서 물체에 작용하는 중력가속도는 항상 일정하다는 가정 하에 중력가속도의 축소율을 1.0으로 하고 시간의 축소율을 산정하였으며, 축소율을 산정하기 위해 먼저 길이에 대한 축소율을 정한 후 시간, 밀도, 질량, 응력 등의 축소율를 차례로 산정하였다. 그리고 상사법칙에는 질량, 시간, 가속도 기준의 상사법칙(양형식, 2007; 심현진 외, 2007)이 있으며, 본 연구에서는 축소율이 1/10인 대형 시험을 실시하였다. 연구 대상의 터널 라이닝과 흙막이벽체의 재질은 콘크리트로 단위중량(γ)은 25 kN/m^{3}이고, 대형 시험에서 사용된 모형 터널 라이닝과 흙막이벽체의 재질은 철판으로 단위중량(γ)을 78 kN/m^{3}으로 가정하였으며 축소율 산정결과는 아래 표 2와 같다.

2.3.4 계 측

대형 시험에서는 굴착 시 발생하는 모형 흙막이벽체의 수평변위와 부재력(모멘트, 전단력), 벽체 배면의 지표침하, 모형 터널 라이닝의 내공변위와 부재력(모멘트, 전단력,축력)을 측정하고, 버팀대에 선행하중을 가했을 때 흙막이벽체와 배면에 있는 터널과 벽체 배면 지반의 거동을 측정하기 위해 사용된 계측기의 설치위치와 수량은 그림 3 및 표 3과 같다. 계측은 시험이 계속되는 동안 30분 간격으로 자동 계측하였다.

표 2. 대형 시험 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^{-1}T^{-2}]	1/31.24
중력가속도	[LT^{-2}]	1.0

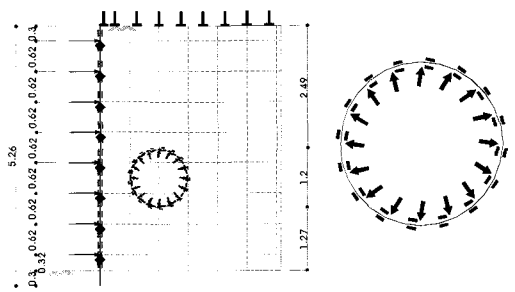


그림 3. 계측기 설치 단면도

표 3. 계측기 설치 수량

설치위치	계측기 종류	측정 용도	개소	범례
흙막이 벽 체	Strain gauge	벽체 부재력	40	▮
	LVDT	벽체 변위	8	◆
	지표 침하계	배면 지표 침하	9	⊥
터 널	Strain gauge	터널의 부재력	32	▮
	LVDT	터널의 내공변위	16	⬇

2.3.5 대형 시험 순서

본 대형 시험의 순서는 다음과 같다.

(1) 선행하중을 가하지 않은 경우

① 1단 굴착을 위해 ㄷ-형강에 고정된 스크류잭을 푼다.
② 흙막이벽체의 수평변위가 발생된 상태에서 배면지반이 안정된 것을 계측기로 확인한 후, 다시 스크류잭을 ㄷ-형강에 고정시키고 배면 지반을 안정시킨다(사진 2).
③ 2단 굴착부터 8단 굴착 완료까지 1단 굴착 방법과 동일하게 반복하여 굴착을 완료시킨다.

(2) 선행하중을 가한 경우

① 1단 굴착을 위해 ㄷ-형강에 고정된 스크류잭을 푼다.
② 흙막이벽체의 수평변위가 발생된 상태에서 배면지반이 안정된 것을 계측기로 확인한 후, 2단 굴착 전에 유압잭으로 벽체 수평변위가 다시 "0"(Zero)이 될 때까지 가압한다(사진 3).
③ 2단 굴착부터 8단 굴착 완료까지 반복하여 굴착을 완료 시킨다.

이 때 시험이 계속되는 동안 모든 계측기에 대하여 30분 간격으로 자동 계측하였다.

3. 수치해석

3.1 해석프로그램 및 해석조건

본 연구는 흙막이벽체의 두께가 80 cm인 지하연속벽 배면에 토피 2.0D, 직경 (D) 12.0 m의 복선터널이 벽체에서 0.5D(6.0 m) 이격된 경우에 버팀대 8단을 설치하여 굴착을 완료하는 현장을 대상으로 대형 시험을 실시하였다. 이에 대해 범용 유한요소 해석 프로그램(F.E.M)인 PLAXIS Ver. 8.2를 이용하여 1/10 축소율로, 구조물을 2차원으로 모델링하여 흙막이벽체의 수평변위와 부재력(모멘트, 전단력), 터널 라이닝의 내공변위와 부재력

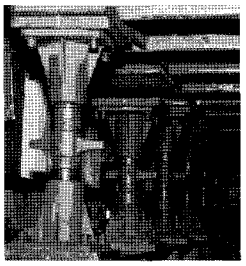


사진 2. 스크류잭

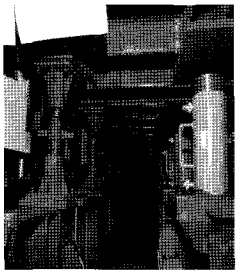


사진 3. 유압잭

(모멘트, 전단력, 축력), 흙막이벽체 배면의 지표침하를 수치해석하였다.

흙막이벽체와 터널 라이닝은 Plate 요소로, 버팀대는 Fixed Anchor 요소로 하여 탄성(Elastic)모델로, 지반구성모델은 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델 두 가지를 사용하였으며, 유한요소망은 15절점 삼각형 요소를 사용하였다.

본 해석에서의 흙막이 구조물은 좌우대칭으로 생각하여 반 단면 2차원으로 수치해석을 수행하였으며, 모형 흙막이벽체와 모형 터널 라이닝이 지반과 접촉된 경계면에는 Interface를 두었다.

3.2 해석방법 및 입력 물성치

수치해석에 사용된 유한요소 해석망 및 경계조건은 다음 그림 4와 같다.

경계조건은 좌, 우의 경계에서는 상·하로 이동되는 Roller 조건으로 하였고, 하부의 경계부는 모든 방향으로 고정시켰다. 나머지 절점에 대해서는 X, Y 방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속을 갖도록 하였다.

지반은 탄소성 구성식을 갖는 2차원 평면 변형률요소를 사용하였으며, 수치해석 시 입력된 지반 및 재료의 물성치는 다음 표 4~6과 같다.

3.3 수치해석결과

3.3.1 흙막이벽체

수치해석결과 최종 굴착단계에서 최대 수평변위는 적용모델에 따라 약간의 차이를 보였다. 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때 최대 수평변위(δ_{max})는 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델 모두 대폭 감소하였다(그림 5, 6 참조).

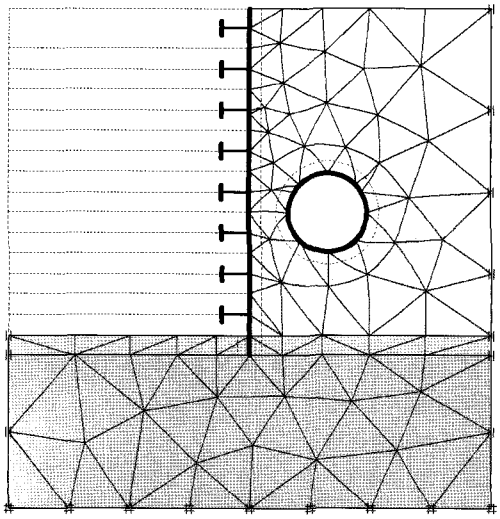


그림 4. 유한요소 해석망 및 경계조건

표 4. 수치해석에 입력된 지반 물성치

구 분	탄성계수 E (kN/m^2)	포와송비 ν	단위중량 γ (kN/m^3)	내부마찰각 ϕ (deg.)	점착력 C (kN/m^2)
시험지반	20,000	0.25	16.39	38	6.0

표 5. 수치해석에 입력된 재료 물성치

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

표 6. 수치해석에 입력된 재료 물성치

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

흙막이벽체의 부재력은 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델 모두 증가하였다(그림 7~10 참조).

3.3.2 터 널

터널 라이닝의 내공변위는 버팀대에 선행하중을 가하면 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 굴착 시 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때, 터널 라이닝의 최대 내공변위는

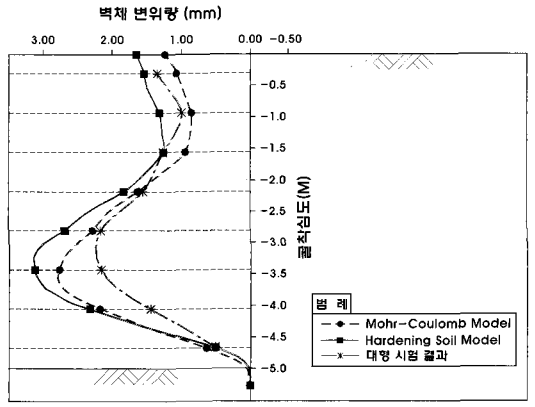


그림 5. 흙막이벽체 변위 (선행하중을 가하지 않았을 때)

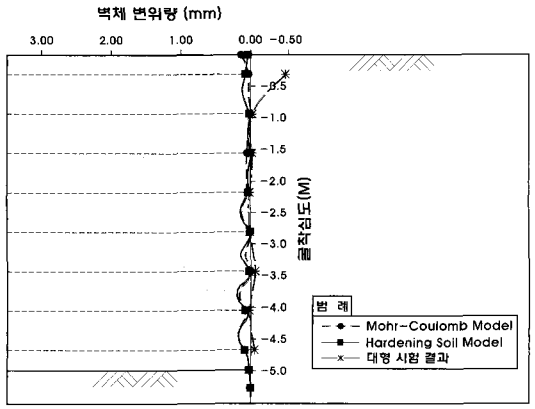


그림 6. 흙막이벽체 변위 (선행하중을 가했을 때)

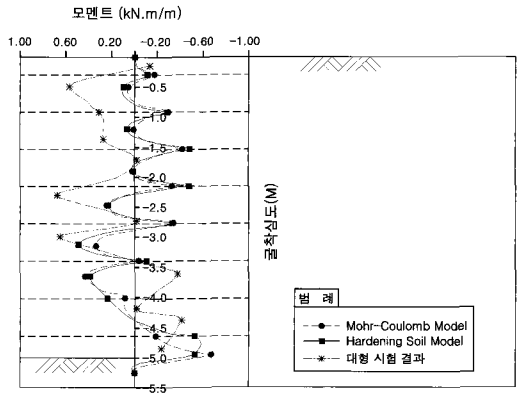


그림 7. 흙막이벽체 모멘트도 (선행하중을 가하지 않았을 때)

Mohr -Coulomb 모델과 Hardening Soil모델 모두 대폭 감소하였다(그림 11, 12 참조). 또한 터널 라이닝 부재력

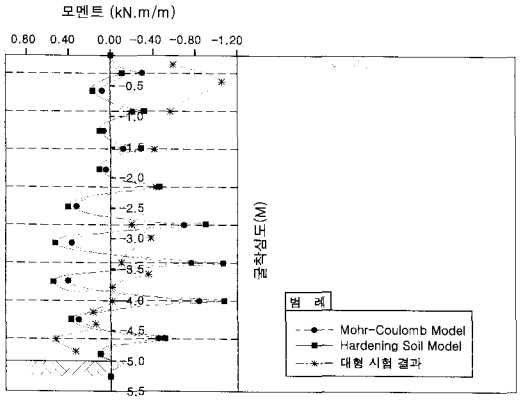


그림 8. 흙막이벽체 모멘트도 (선행하중을 가했을 때)

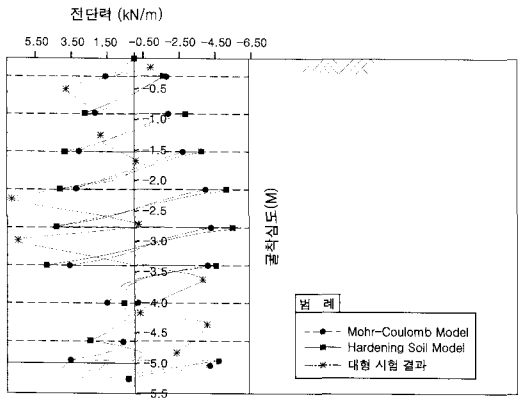


그림 9. 흙막이벽체 전단력도 (선행하중을 가하지 않았을 때)

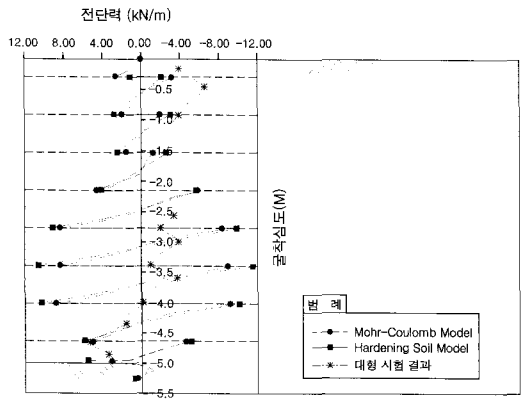


그림 10. 흙막이벽체 전단력도 (선행하중을 가했을 때)

(최대 휨모멘트, 최대 전단력)은 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델의 경우 모두 감소하였으나, 최대

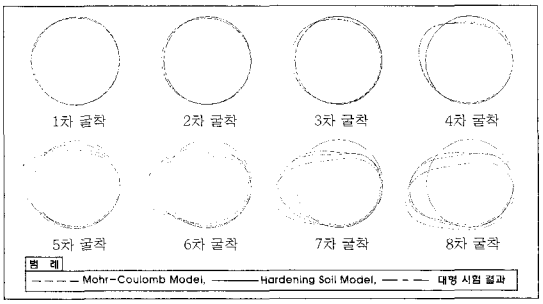


그림 11. 터널 라이닝 내공변위 (선행하중을 가하지 않았을 때)

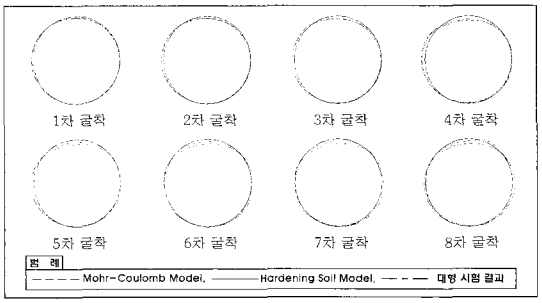


그림 12. 터널 라이닝 내공변위 (선행하중을 가했을 때)

축력은 증가하는 것으로 나타났다(그림 13, 14 참조).

3.3.3 흙막이벽체와 터널 라이닝의 내공변위 관계

흙막이벽체의 수평변위와 터널 라이닝의 내공변위는 굴착 단계별로 버팀대 선행하중을 가했을 때 거의 원래의 상태를 유지하였다. 선행하중을 가하지 않았을 때 흙막이벽체의 수평변위와 터널의 내공변위는 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델 모두 터널이 위치하는 6단 버팀대 위치에서 가장 크게 나타났다. 이때 터널 라이닝의 내공변위 형상은 수직으로 줄고 수평으로 늘어나는 납작한 모양으로 변형되었다. 그러나 굴착 시 굴착 단계별로 버팀대 선행하중을 가하여 흙막이벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 억제시킨 경우는 터널의 형상이 원래의 모습에서 거의 변하지 않았다(그림 15, 16 참조).

3.3.4 지표침하

최대 지표침하량은 최종 굴착 단계에서 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델 모두 대폭

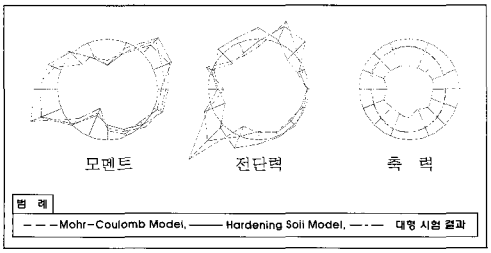


그림 13. 터널 라이닝 부재력도 (선행하중을 가하지 않았을 때)

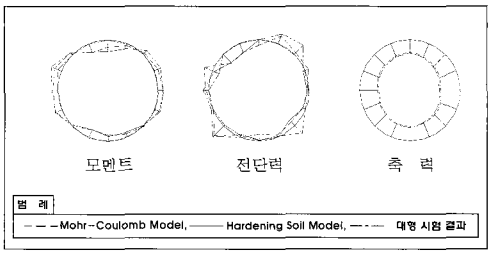


그림 14. 터널 라이닝 부재력도 (선행하중을 가했을 때)

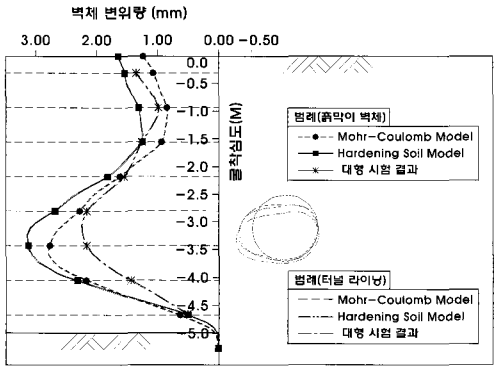


그림 15. 흙막이벽체와 터널 라이닝 내공변위 (선행하중을 가하지 않았을 때)

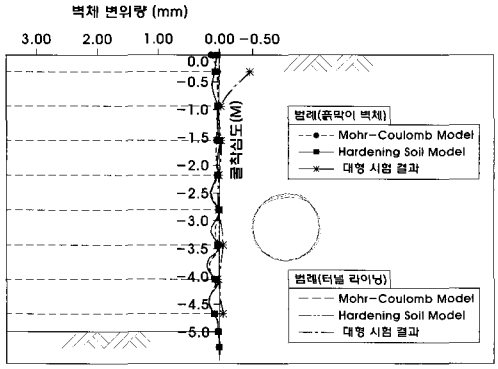


그림 16. 흙막이벽체와 터널 라이닝 내공변위 (선행하중을 가했을 때)

감소하였으며, Hardening Soil 모델은 Mohr-Coulomb 모델과 비교하여 상대적으로 그 감소량이 적었다(그림 17, 18 참조).

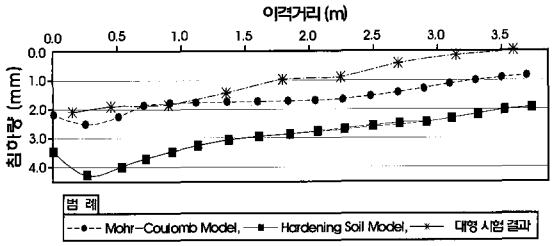


그림 17. 흙막이벽체 배면의 지표침하 (선행하중을 가하지 않았을 때)

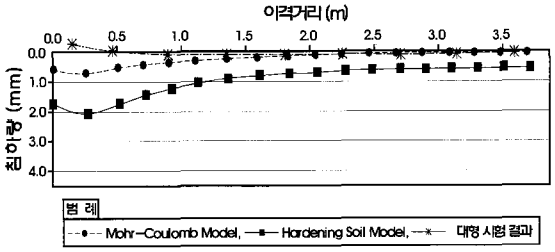


그림 18. 흙막이벽체 배면의 지표침하 (선행하중을 가했을 때)

4. 대형 시험과 수치해석 결과의 비교

4.1 흙막이벽체

굴착 단계별로 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때와 가했을 때 흙막이벽체 수평변위에 대해 대형 시험결과와 수치해석결과를 비교하였으며, 이러한 흙막이벽체의 수평변위 형상은 그림 5, 6과 같다.

지반을 굴착하는 동안에 발생되는 흙막이벽체의 수평변위는 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때, 대형 시험결과보다 수치해석결과가 다소 크게 나타났다. 최종 굴착단계에서의

① 대형 시험결과 벽체의 최대 수평변위(δ_{max})는 2.29 mm에서 0.03 mm로 99% 감소하였다.

② 수치해석결과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 2.91 mm에서 0.19 mm로 93% 감소하였다.

③ 수치해석결과 Hardening Soil 모델의 경우 3.29 mm에서 0.22 mm로 93% 감소하여 대형 시험결과가 수치해석결과보다 더 감소하는 것으로 나타났다.

또한 최종 굴착단계에서 흙막이벽체에 작용하는 부재력은 절대값으로

① 대형 시험결과 최대 휨모멘트는 0.68 kN·m/m에서 -1.06 kN·m./m로 56% 증가하였고, 최대 전단력은 6.78 kN/m에서 -6.63 kN/m로 2% 감소하였다.

② 수치해석결과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 최대 휨모멘트는 -0.68 kN·m/m에서 -0.86 kN·m/m로 26%, 최대 전단력은 4.34 kN/m에서 -8.98 kN/m로 107% 증가하였다.

③ 수치해석결과 Hardening Soil 모델의 경우에도 최대 휨모멘트는 -0.58 kN·m/m에서 -1.07 kN·m/m로 84%, 최대 전단력은 -5.31 kN/에서 -11.40 kN/m로 115% 증가하였다.

선행하중을 가했을 때 대형 시험결과, 최대 휨모멘트는 증가하고 최대 전단력은 감소한 반면에 수치해석결과는 최대 휨모멘트와 최대 전단력 모두 증가하는 것으로 나타났다. 선행하중을 가하지 않았을 때와 가했을 때 최종 굴착단계에서 흙막이벽체의 부재력은 수치해석 및 대형 시험결과는 그림 7~10과 같다.

4.2 터 널

굴착 단계별로 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때 발생된 내공변위와 선행하중을 가했을 때 억제되는 터널 라이닝의 내공변위의 변화를 1단 굴착 시작부터 8단 굴착 완료까지 수치해석결과와 대형 시험결과를 비교하였으며 그림 11, 12와 같다.

수치해석결과와 대형 시험결과 모두 굴착 시 흙막이벽체의 수평변위에 의해 발생한 터널 라이닝의 내공변위는 굴착 단계별로 버팀대 선행하중을 가하면 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 즉 터널 라이닝의 내공변위는 선행하중을 가하지 않았을 때는 굴착이 진행되는 동안 점점 증가하였으나 굴착 단계별로 버팀대에 선행하중을 가함에 따라 원래의 모양에서 거의 변하지 않았다. 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때 터널 라이닝의 최대 변위는

① 대형 시험결과 2.22 mm에서 0.21 mm로 91% 감소하였다.

② 수치해석결과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 2.67 mm에서 0.34 mm로 87% 감소하였다.

③ 수치해석 결과 Hardening Soil 모델의 경우 3.31mm에서 0.69 mm로 79% 감소하였다.

흙막이벽체의 수평변위와 마찬가지로 터널 라이닝 내공변위도 대형 시험결과 보다 수치해석결과가 더 크게 나타났다. 또한 최종 굴착단계에서 터널 라이닝에 작용하는 부재력은 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때

① 대형 시험결과 최대 휨모멘트는 -0.20 kN·m/m에서 -0.02 kN·m/m로 90%, 최대 전단력은 -0.33 kN/m에서 -0.18 kN/m로 45% 감소하였으나, 최대 축력은 -34.38 kN/m에서 -124.86 kN/m로 크게 증가하였다.

② 수치해석결과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 최대 휨모멘트는 0.15 kN·m/m에서 0.07 kN·m/m로 53%, 최대 전단력은 1.16 kN/m에서 0.44 kN/m로 62% 감소하였으나, 최대 축력은 -17.46 kN/m에서 -22.84 kN/m로 31% 증가하였다.

③ 수치해석결과 Hardening Soil 모델의 경우 최대 휨모멘트는 0.16 kN·m/m에서 0.08 kN·m/m로 50%, 최대 전단력은 0.84 kN/m에서, 0.49 kN/m로 42% 감소하였으나, 최대 축력은 -17.95 kN/m에서 -24.55 kN/m로 37% 증가하였다.

수치해석 및 대형 시험결과 모두 터널 라이닝의 최대 모멘트와 최대 전단력은 선행하중을 가하여 완화 시킬 수 있었으나, 축력은 증가하는 것으로 나타났다. 선행하중을 가하지 않았을 때와 가했을 때 최종 굴착단계에서의 수치해석 및 대형 시험결과에 의한 터널 라이닝의 부재력은 그림 13, 14와 같다.

4.3 흙막이벽체와 터널 라이닝의 내공변위 관계

수치해석 및 대형 시험결과 모두 흙막이벽체의 수평변위와 터널 라이닝의 내공변위는 굴착 단계별로 버팀대 선행하중을 가했을 때 거의 원래의 상태를 유지하였다. 즉 굴착 시 버팀대에 선행하중을 가하지 않았을 때 흙막이벽체의 수평변위와 터널 라이닝의 내공변위는 수치해석과 대형 시험결과 모두 터널이 위치하는 6단 버팀대 위치에서 가장 크게 나타났으며, 이때 터널 라이닝의 내공변위 형상은 수직으로 줄고 수평으로 늘어나는 납작한 모양으로 변형되었다. 그러나 굴착 단계별로 버팀대에 선행하중을 가하여 발생된 흙막이벽체의 수평변위

를 거의 "0"(zero)에 가깝게 억제시킨 경우에는 터널 라이닝의 형상이 원래의 모습에서 거의 변하지 않았다. 이러한 흙막이벽체와 터널 라이닝 내공변위의 형상은 그림 15, 16과 같다.

4.4 지표침하

수치해석 및 대형 시험결과 최종 굴착단계에서 버팀대 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 가했을 때 지표침하는 대폭 감소되었다.

① 대형 시험결과 2.10 mm에서 0.12 mm로 94% 감소하였다.

② 수치해석결과 Mohr-Coulomb 모델의 경우 2.51 mm에서 0.73 mm로 71% 감소하였다.

③ 수치해석결과 Hardening Soil 모델의 경우 4.27 mm에서 2.07 mm로 52% 감소하였다.

대형 시험결과가 수치해석 결과보다 더 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 흙막이벽체 배면의 지표침하곡선은 그림 17, 18과 같다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 터널에 근접하여 흙막이벽체를 설치하고 지반을 굴착할 때 발생된 흙막이벽체의 수평변위를 버팀대에 설계축력 이상으로 선행하중을 가하여 억제시킴으로써 벽체 배면에 있는 터널의 안정성을 확보하는 방안을 연구하였다. 이를 위해 버팀대에 선행하중을 가하지 않을 때와 선행하중을 가할 때에 대해 대형 시험을 수행하고, 대형 시험과 같은 조건으로 수치해석을 실시하여 검증하였으며, 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 버팀대 선행하중을 설계 축력이상으로 적용시켜 굴착 시 발생된 흙막이벽체의 수평 변위를 거의 발생되지 않도록 억제시켰을 때, 흙막이벽체 배면에 있는 기존 터널의 안정성은 크게 향상되었다.
2) 수치해석결과 흙막이벽체의 수평변위를 거의 발생시키지 않는 버팀대 선행하중의 크기는 설계축력의 약 1.2~15배 이내로 나타났다.
3) 버팀대 선행하중을 가하지 않았을 때보다 가했을 때 최종 굴착단계에서 흙막이벽체의 수평변위는 최대값을 기준으로 대형 시험과 수치해석에서의 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델의 경우 모두 감소하였으며 대형 시험결과가 수치해석결과보다 더 감소되는 것으로 확인되었다. 또한 버팀대 선행하중을 가하지 않았을 때 보다 가했을 때 최종 굴착단계에서 흙막이벽체의 부재력의 최대값은 절대값을 기준으로 대형 시험결과 최대 휨모멘트는 증가하고, 최대 전단력은 감소하였다. 그러나 수치해석결과 Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델의 경우 최대 휨모멘트와 최대 전단력 모두 증가하였다.
4) 버팀대 선행하중을 가하지 않았을 때를 기준으로 선행하중을 가했을 때 터널 라이닝의 내공변위는 최대값을 기준으로 대형 시험결과와 수치해석결과 Mohr-Coulomb과 Hardening Soil 모델의 경우 모두 대폭 감소하였다. 터널 라이닝의 부재력은 대형 시험결과 최대 휨모멘트와 최대 전단력 모두 감소하였으나 반대로 최대 축력은 증가하였다.
   수치해석결과도 Mohr- Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델의 경우 모두 최대 휨모멘트와 최대 전단력 모두 감소하였으나 최대 축력은 증가하였다.
5) 수치해석 및 대형 시험결과 흙막이벽체의 수평변위와 터널 라이닝의 내공변위는 굴착 시 단계별로 버팀대 선행하중을 가하지 않았을 때 보다 가했을 때 대폭 감소하는 것으로 나타났다. 즉 선행하중을 가하지 않았을 때는 흙막이벽체의 수평변위와 터널 라이닝의 내공변위는 대형 시험과 수치해석결과 모두 터널이 위치하는 버팀대 6단 위치에서 가장 크게 발생되었으며, 이때 터널 라이닝의 형상은 수직으로 줄고 수평으로 늘어나는 납작한 모양으로 변형되었다. 그러나 굴착 단계별로 버팀대 선행하중을 가하여 굴착 시 발생된 흙막이벽체의 수평변위를 거의 "0"(Zero)으로 억제시켰을 경우에는 터널의 형상이 원래의 모습에서 거의 변하지 않았다.
6) 지표침하는 버팀대 선행하중을 가하지 않았을 때보다 가했을 때 대형 시험과 수치해석 결과, Mohr-Coulomb 모델과 Hardening Soil 모델의 경우 모두 대폭 감소하였다.
7) 대형 시험결과와 수치해석결과를 비교한 결과 Mohr-Coulomb모델이 대형 시험결과와 더 잘 부합되었으며 Hardening Soil 모델 값은 전체적으로 크게 나타났다.

이처럼 대형 시험결과와 수치해석결과로부터 기존 터널에 근접 굴착 시 단계별로 버팀대에 선행하중을 가했을 때 흙막이벽체 배면에 있는 터널의 안정성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또한 이러한 결과는 지반조건과 구조물의 해석조건 등 많은 변수에 의해 달라 질 수 있으므로 향후에도 광범위한 연구와 실측 자료 분석 및 지속적인 연구가 필요하다.

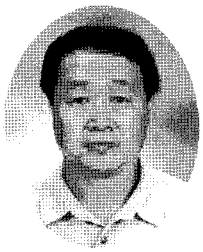
참고문헌

1. 이상덕 (1998), "토질 역학 제 2판", 도서출판 새론, pp. 353, 354.
2. 이상덕 (1999), "기초 공학", 도서출판 새론, pp 252-254.
3. 이상덕 (2003), "최신 터널 기술의 이해", 아주대 지반 공학 연구실 터널 거동의 이해, pp. 1-22.
4. 백승훈 (2002), "선행하중과 벽체 강성에 따른 흙막이 벽 및 인접 지반 거동", 공학 석사 학위 논문, 아주대학교.
5. 양현식 (2007), "축소모형실험을 위한 재료특성 연구", 건설교통 R&D 성과포럼 논문집, pp. 33-36.
6. 심현진, 이승훈, 이승복, 전석원, 최용근 (2007), "근접병설터널 설계를 위한 모형시험 및 시험발파", 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, pp. 267-278.
7. O'Rourke, T. D., Cording, E. J., & 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.
8. O'Rourke. T. D. (1981), "Ground movements caused by braced excavation", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT9, pp. 1159-1178.
9. Palmer, J. H. & Kenny, T. C. (1972), "Analytical study of braced excavation in weak clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, pp. 145-164.
10. Canadian Geotechnical Society (1997), "Foundation Engineering Mannual", 3rd Ed., pp. 416.
11. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1985), "On structural design models for tunnels in soft soil", Underground Space, Vol. 9, Pergamon Press, pp. 246-259.
12. Soliman E., Duddeck, H. and Ahrens, H. (1993), "Two- and three-dimensional analyis of closely spaced double-tube tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 13-18.
13. Hobbs, D. W. (1996), "Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 3, pp. 101-127.
14. 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.

김 일

아주대학교 대학원
건설교통공학과 박사과정

E-mail: cevan@chol.com



이 상 덕

아주대학교 공과대학
환경건설교통공학부 교수

E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr