

터널 시공에 따른 지반 및 인접건물의 거동평가

The behavior of adjacent structures in tunnelling induced ground movements

김학문*¹, 전성곤²

Kim, Hak-Moon · Jeon, Seong-Kon

Abstract

This research work presents 3-D behavior of adjacent structures due to tunnelling induced ground movements by means of field measuring data and nonlinear FEM tunnel analysis. The results of the analytical methods from Mohr-Coulomb model are compared with the site measurement data obtained during the twin tunnel construction. It was found that the location and stiffness of the structure influence greatly the shape and pattern of settlement trough. The settlement trough for Greenfield condition was different from the trough for existing adjacent structures. Therefore the load and stiffness of adjacent structures should be taken into account for the stability analysis of the structures.

Keywords: 3-D behavior, ground movement, field measuring data, 3D FEM analysis

요 지

본 연구는 도심지터널 시공시 막장진행에 따라 다양하게 예측된 현장의 예측치 분석을 통하여 막장 진행에 따른 터널 주변지반의 거동 및 인접구조물의 3차원 거동을 상호 규명하였으며, 일반적으로 터널설계시 적용되는 Mohr-Coulomb 모델 및 막장관찰 자료를 바탕으로 한 Hoek-Brown 현장압반모델을 적용한 3차원 유한요소해석을 실시하여 각각의 결과를 비교 검토하여 이들 지반 및 구조물 거동을 규명하였다. 막장 진행에 따른 침하양상은 greenfield 상태에서의 거동과는 차이를 보이고 있으며 구조물의 위치와 강성 그리고 하중에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어: 3-D behavior, ground movement, FEM analysis, Mohr-Coulomb model, field measuring data

1. 서론

고도의 산업발달과 인구집중 현상으로 인한 도시의 비대화는 주택난, 교통난 및 공해 등의 문제를 유발시키고 있다.

이러한 문제들을 해결하기 위하여 지하공동 구조물이 나 지하철 등 지하교통 구조물들을 위한 터널 공사는 기하 급수적으로 늘어나고 있으며, 이에 따라 경제적이고 현실에 맞는 설계 및 시공방법들이 다양하게 연구되고 있다.

일반적으로 터널설계 및 시공중 터널의 안정해석은 토

*1 단국대학교 토목환경공학과 교수 (khm1028@dankook.ac.kr)

2 여주대학 토목과 교수

질의 일반화된 파괴 기준인 Mohr-Coulomb 모델과 시공 중 막장에서 관찰된 암석 및 암반 종류, 불연속면의 형태, 실험자료 및 암반의 등급을 평가하는 RMR 값을 근거로 하는 Hoek-Brown의 모델을 이용하여 터널의 설계 및 터널 안정해석을 수행하고 있다.

최근 도심지에서의 터널공사는 인접구조물과 근접하게 시공이 이루어지므로 설계시 터널 자체의 안정성뿐만 아니라 주변지반 및 주변구조물에 대한 3차원 거동 평가가 정확히 이루어져야 하나, 현재까지 이에 대한 연구 및 자료들은 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 지반 및 구조물의 거동이 막장 진행에 따라 다양하게 계측된 현장의 계측치 분석을 통하여 터널 굴착시 막장 진행에 따른 터널 주변지반의 거동 및 인접구조물의 3차원 거동을 상호 규명하고, 일반적으로 터널설계시 적용되는 Mohr-Coulomb 모델을 통한 결과와 현장 막장관찰 자료를 바탕으로 한 Hoek-Brown 현장암반모델을 적용한 경우 이들 지반 및 구조물 거동을 규명하고자 하였다.

2. 연구대상 현상현황

2.1 건물현황

서울시 서초구에 위치한 예술의전당내 오페라극장은 건축면적이 13,500m², 연면적은 43,500m²으로 지하1층 지상 6층의 철근콘크리트 라멘 구조형식이며, 하부의 기초형식은 독립기초와 말뚝기초로 이루어져 1988년 준공되었다.

오페라극장의 우면산터널 통과부 평면 및 단면은 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

2.2 지반현황

예술의 전당부의 시추조사결과 지층은 지표로부터 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 층서를 나타내며, 오페라극장내 지층의 단면은 그림 3과 같다.

지층상태를 보면, 매립토층은 지표면을 형성하는 층으로 주로 실트질모래 및 모래질 호박돌로 구성되어 2.2~2.5m 두께로 분포하며, N치는 30~50으로 조밀내지 매

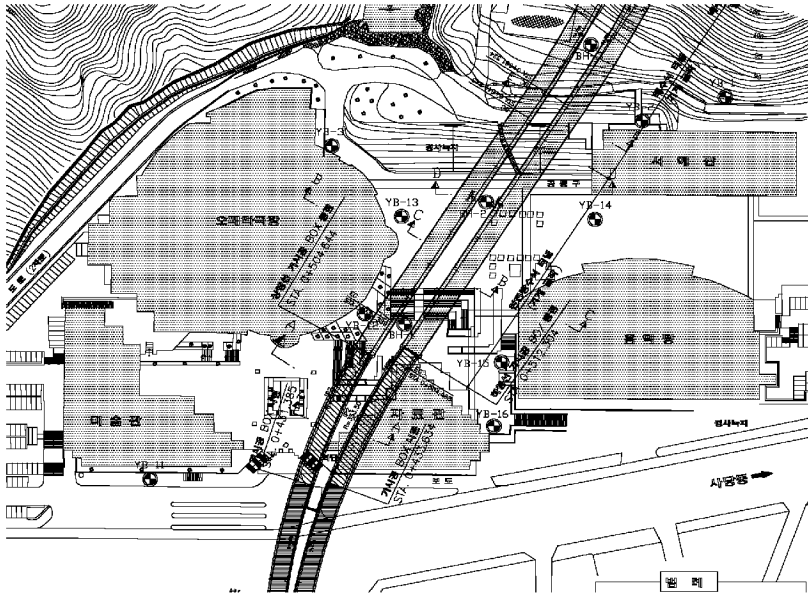


그림 1. 우면산터널 통과부 평면

| 표시 | 계측항목 | 수량 | 비고 |
|----|-----------------|------|------------|
| ● | 온도계 | 19ea | 자동 또는 수동측정 |
| ① | 경사계 | 19ea | 자동 또는 수동측정 |
| ⊕ | 측량점 | 25ea | 수동측정 |
| + | 측량 Target | 24ea | 수동측정 |
| AD | 정, 동적 자동계측기 | 5set | 자동측정 |
| ★ | 진동계 (3축) | 6set | 자동측정 |
| ⊙ | 지하 수위변위계, 지층경사계 | 각1ea | 수동 |
| Ω | 균열측정계 | 15ea | 자동 |
| ⊙ | 소음측정계 | 2set | 수동 |
| ⊕ | 진동 소음측정계 | 1set | 진동 (3축) |
| ● | 지표침하계 | 8ea | 수동측정 |

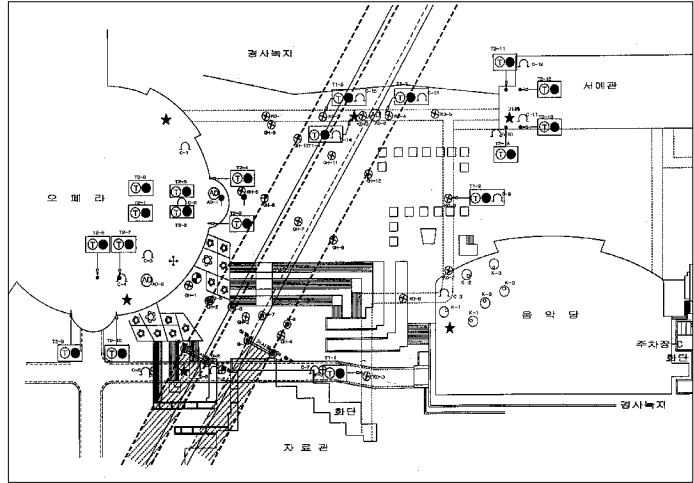


그림 4. 현장 계측기설치 평면도

계, 진동 소음측정계가 설치되었으며, 그림 4는 계측기가 설치된 위치를 나타낸다.

3. 수치해석의 개요

본 연구는 다층토 지반에서 터널 굴착에 따른 지반거동 및 인접구조물의 거동을 규명하기 위하여 3차원 유한요소해석기법을 적용하였으며, 터널상부 토피가 약 15m로 토사와 풍화암층으로 나뉘어져 있고, 굴착공사 중 풍화대에 대한 강판단단 그라우팅, 지반보강 그라우팅과 같은 지반보강공법 등을 고려하여 수치해석 모델링하였다. 인접구조물부는 구조물 근입깊이 만큼을 제거하였으며 대상구조물 기초부는 독립기초 및 말뚝기초 2가지 Type으로 되어 있고, 각각의 기초 위치에 실제 작용하중을 적용하였다.

3.1 지반 및 터널의 모델링

3.1.1 해석에 적용된 지반압력 물성치

현장내에서 시추조사된 보오링공인 BH-1, BH-2, TB-1, YB-12, YB-13에서 실시된 SPT, 수압파쇄시

험, 탄성파탐사, 실내실험 등에 의한 결과로부터 유추한 지반압력 물성치를 사용하여 Mohr-Coulomb모델을 통한 프로그램 해석 시 기본 입력물성치로 설정하였으며 이는 표 2와 같다. 또한 Hoek-Brown모델을 통한 프로그램 해석시 적용한 물성치는 터널막장의 암반평가 자료를 통하여 RMR 값을 정하고 이에 의해 입력물성치를 설정하였다. 그림 5는 본 현장에 시공중 관찰된 막장의 대표 종단면도이며 표 1은 본 막장의 관찰일지를 나타내고 있다. 본 현장의 암종은 편마암으로 m_i 값은 33을 채

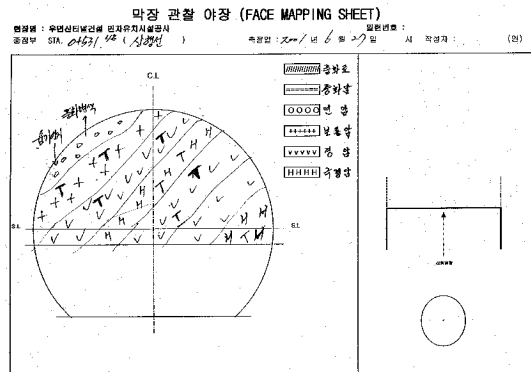


그림 5. 평가대상 터널에서 시공중 관찰된 막장 종단면도

택하였고, 암석의 일축압축강도 σ_{ci} 는 $15000t/m^2$ 으로 사용하였다.

점착력과 내부마찰각은 RMR을 기초로하여 추정하는 경험식을 사용하였다.

$$c = 0.5 \cdot RMR \text{ (KPa)} \quad (1)$$

$$\psi = 0.5 \cdot RMR + 0.5 \text{ (degree)} \quad (2)$$

암반의 변형계수는 Serafim과 Pereira에 의해 제안된 변형계수를 사용하였다.

$$E_m = 100000 \times \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{10000}} 10 \left(\frac{GSI-10}{40} \right) \quad (3)$$

$$E_m = 100000 \times 10 \left(\frac{GSI-10}{40} \right) \quad (4)$$

그러나 이 관계에서는 불량한 암석에 대한 변형계수가 너무 높은 값을 나타내므로 $\sigma_{ci} \leq 10000t/m^2$ 조건에서

역계산과 경험을 바탕으로 식 (3)을, $\sigma_{ci} > 10000t/m^2$ 조건에서는 식 (4)를 사용하였다.

또한 파괴조건인 경험적 상수 m과 s는 아래식을 적용하였다.

교란되지 않은 암반 (기계식 또는 제어발파에 의한 굴착)에 대하여

$$m = m_i \cdot \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right) \quad (5)$$

교란된 암반 (사면이나 발파에 의한 손상된 굴착)에 대하여

$$m = m_i \cdot \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right)$$

표 1. 터널 현장의 막장관찰 일지

| 분류 항목 | | 참 | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------------|---------------|-------------|--------|-------|
| 1 | 석 도 | 경 | 경 | | - | | | |
| | 점 | 15 | 12 | 7 | 4 | 0 | | |
| 2 | R.Q.D.(%) | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | |
| | 점 | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3 | | >3m | 1-3m | 0.3-1m | 50-300mm | <50mm | | |
| | 점 | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 4 | | 반경 | 반경 | 반 | | | | |
| | 점 | 25 | 20 | 12 | 6 | 0 | | |
| 5 | 지하수 | | 기 지장도 | (10-25//min) | (25-125//min) | (>125//min) | | |
| | 점 | 20 | 17 | 13 | 8 | 0 | | |
| 6 | 경사 | 경사 동 | | 경사 반 | | 에 사 히는 | | |
| | 경사각 | 45~90° | 20~45° | 45~90° | 20~45° | 45~90° | 20~45° | 0~20° |
| | 점 | 0 | -2 | -5 | -2 | 0 | -2 | -12 |
| 7 | 반 | 점 | | 100~81 | 80~61 | 60~41 | 40~21 | <20 |
| | | 후 | | 후 | | | 량 | 량 |

표 2. 지반종류별물성치 (Mohr-Coulomb해석시)

| 구분 | 특성치 | 탄성계수 (10 ³ t/m ²) | 포아손비 | 마찰각 (°) | 점착력 (t/m ²) | 측압계수 | 단위중량 (t/m ³) |
|-------|-----|---|------|------------|----------------------------|------|-----------------------------|
| 토 사 | | 2.0 | 0.3 | 30 | 1 | 0.5 | 2.0 |
| 풍 화 암 | | 10 | 0.3 | 30 | 5 | 0.5 | 2.4 |
| 연 압 | | 100 | 0.25 | 40 | 50 | 1.97 | 2.65 |
| 강암 | 시접층 | 400 | 0.2 | 45 | 100 | 1.97 | 2.75 |

표 3. 막장별 물성치 (Hoek-Brown 해석시)

| 막장별 | 특성치 | RMR | 탄성계수 (10 ⁵ t/m ²) | 포아손비 | 마찰각 (°) | 점착력 (t/m ²) | 측압계수 | 단위중량 (t/m ³) |
|-----|-----|-----|---|------|------------|----------------------------|------|-----------------------------|
| 1D | | 77 | 35.4 | 0.25 | 43.5 | 38.5 | 1.97 | 2.75 |
| 2D | | 80 | 42.2 | 0.25 | 45 | 40 | 1.97 | 2.75 |
| 3D | | 78 | 37.6 | 0.25 | 44 | 39 | 1.97 | 2.75 |
| 4D | | 68 | 21.1 | 0.25 | 39 | 34 | 1.97 | 2.75 |
| 5D | | 88 | 66.8 | 0.25 | 49 | 44 | 1.97 | 2.75 |
| 6D | | 92 | 84.1 | 0.25 | 51 | 46 | 1.97 | 2.75 |
| 7D | | 92 | 84.1 | 0.25 | 51 | 46 | 1.97 | 2.75 |

표 4. 터널굴진에 따른 횡방향 및 종방향의 해석영역 결정

| 제안치 | 침하영향거리 | 횡방향침하 영향거리 (m) | 수치해석시 횡방향 해석영역 | 수치해석시 종방향 해석영역 |
|--------------------|--------|-------------------|--|-----------------------------|
| Hansmire & Cording | | 28.84 | Hansmire의 28.84의 1.5배인 약 50m 해석영역적용 | 기초의 종방향길이인 약 112m 해석영역적용 |
| 일본성전 9공구 | | 22 | | |

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right) \quad (6)$$

이와 같은 경험식을 이용하여 막장에 따른 지반입력 물성치를 프로그램 해석 시 기본 입력물성치로 설정하였으며 이는 표 3과 같다.

3.1.2 해석영역

터널 굴착에 의한 지반 및 구조물 거동을 연구하기 위한 횡방향 침하영향거리는 Cording과 Hansmire (1976)가 제시한 침하영역해석 도표와 일본성전 9공구 (1988)의 영향범위등의 검토를 통하여 보수적으로 결정하였으며, 종방향 침하영향거리는 오페리극장의 전체 종방향길이에 걸쳐 침하를 고려하였다.

3.1.3 3차원 유한요소망 및 기초평면

대상구조물 하부기초부에 구조계산에 의한 하중을 적용시키기 위해 건물부 유한요소망은 그림 6과 같이 방사형으로 모델링하였으며, 또한 해석에 적용된 구조물의 하부기초형식의 평면도는 그림 7과 같다.

4. 오페리극장 및 주변지반 거동평가

4.1 굴착에 따른 지반 및 구조물의 침하 영향

그림 8, 9, 10은 현장 계측자료를 통하여 인접구조물 사이로 터널굴착을 할 때 지반 및 인접구조물의 침하 영향을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 터널굴착 초기에

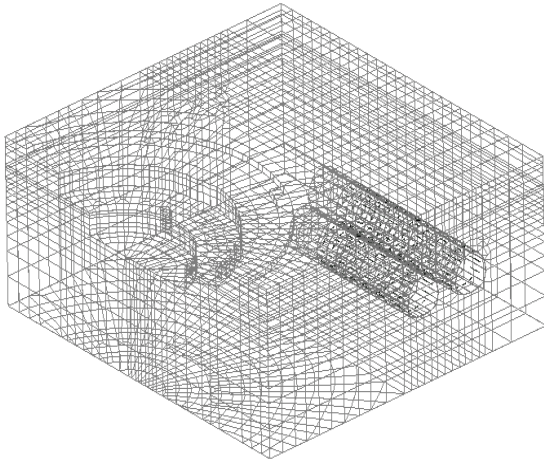


그림 6. 3차원 유한요소망

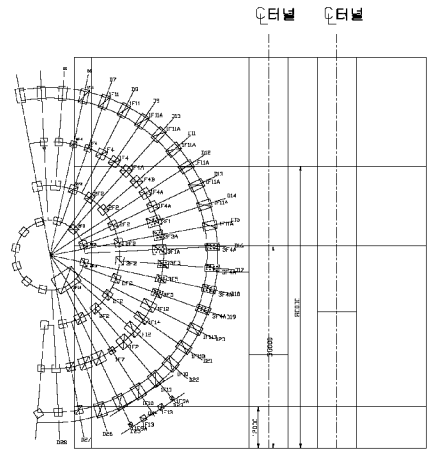


그림 7. 건물 기초의 위치평면도

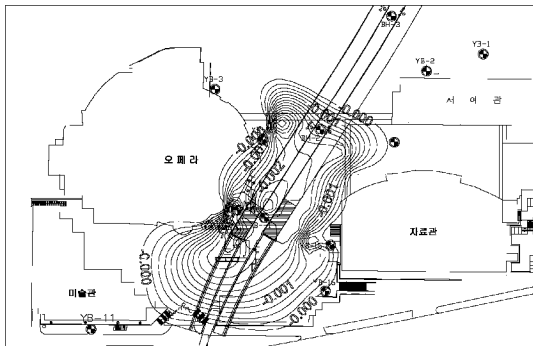


그림 8. 막장 진행에 따른 지반 및 구조물의 침하영향 변화 (막장위치 2D (D=터널직경))

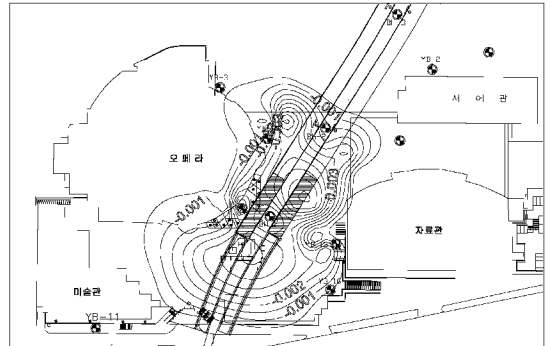


그림 9. 막장 진행에 따른 지반 및 구조물의 침하영향 변화 (막장위치 4D (D=터널직경))

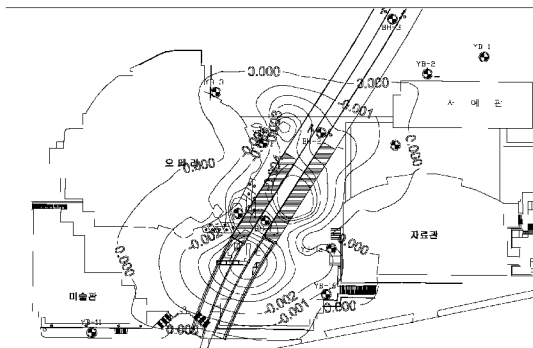


그림 10. 막장 진행에 따른 지반 및 구조물의 침하영향 변화 (막장위치 6D (D=터널직경))

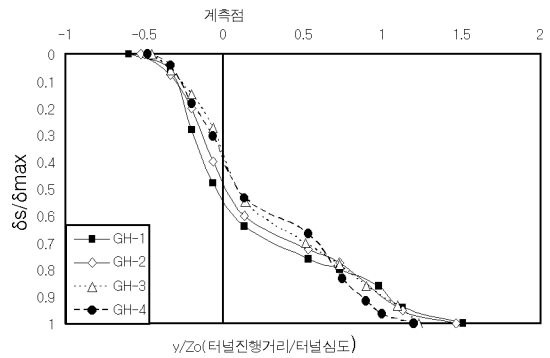


그림 11. 종방향 지표침하 영향거리

는 지반부에서와 달리 인접구조물부에서는 침하영향이 상쇄되는 현상을 보이고 있으며 이는 구조물의 강성에 의하여 이런 현상이 일어나는 것으로 판단된다. 그러나 터널막장이 인접 구조물부를 지나간 그림 10에서 보면 횡방향 침하영역 거리는 터널중심으로부터 터널심도 (Z_0)의 2.25배 범위까지 영향이 미치는 것으로 나타났으며, 이는 Hansmire & Cording이 제시한 횡방향 침하영역 해석 도표에 의해 구한 값보다 50% 더 먼 거리까지 침하영향이 미치는 것으로 나타났다. 이는 greenfield에서 산정되는 침하영역보다 인접구조물이 있을 때 구조물의 하중의 영향에 의해 침하영향거리가 예상침하영향거리보다 50% 더 먼 거리까지 영향이 미치는 것으로 사료된다. 그림 11은 터널 굴진에 따른 종방향 침하곡선을 나타내고 있다. 종방향 침하영향은 그림 5에서 보듯이 터널굴진에 따른 계측점 (y/Z_0)에서의 침하시작위치는 계측점 전방 $(0.45 \sim 0.6)Z_0$ 이며, 침하 종료위치는 $(1. \sim 1.7)Z_0$ 으로 나타나고 있다. 계측점 통과시 침하 발생 비율은 최대 침하량에 38~54% 정도로 나타나고 있으며, 건물부에 가장 근접한 GH-1 (계측점)에서 침하량의 변화가 가장 많이 일어나는 것을 알 수 있었다. 이는 인접구조물의 하중의 영향에 의해 이와 같은 현상이 일어나는 것으로 판단된다.

4.2 계측치를 통한 막장진행에 따른 지반 및 구조물의 거동

그림 12는 막장이 진행되어감에 따라 변하는 지반 및 인접구조물의 거동을 나타내고 있다.

지반의 최대 침하량은 건물과 8.7m로 인접해 지나가는 상행선 터널 상부에서 5mm 발생하였는데, 이는 greenfield에서 쌍굴터널 굴진 시 지표침하곡선은 터널사이에서 최대 침하가 발생하지만 본 현장과 같이 인접구조물이 있는 경우에는 구조물에 인접한 터널상단에서 최대침하가 발생하였다. 이는 건물부의 하중영향으로 이 지점의 침하가 더욱 많이 일어나는 것으로 판단된다. 또한 막장이 측점을 지나가는 2D (터널직경, $D=10m$) 부근에서 최대침하량의 54%가 발생하였는데 이는 Attewell의 연구결과인 터널이 측점을 통과할 때, 전체침하량의 50%정도 발생된다고 한 것과 거의 비슷한 결과를 나타

내었다. 인접구조물의 거동은 막장진행이 측점부인 2D 까지 진행되는 동안에는 지반거동만이 발생하였으며 구조물에는 영향이 없었지만 막장이 측점부를 지나 3D 만큼 진행되면서부터는 구조물의 외곽부로부터 1/12500의 각변위가 발생하여 부등침하가 발생하였으나 막장진행이 5D를 지나면서 구조물부 침하는 균등해졌으며, 지반 및 구조물의 침하량이 수렴하였다. 즉 측점부로부터 막장이 3D이상 진행하면 침하거동이 수렴함을 알 수 있었다.

4.3 계측치와 수치해석의 거동 비교

4.3.1 계측치와 수치해석 (Mohr-Coulomb)의 거동 비교

그림 13은 터널 설계시 사용된 물성치를 적용한 Mohr-

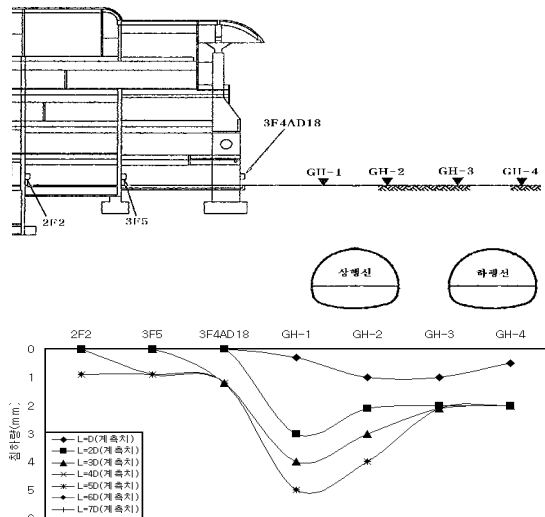


그림 12. 막장진행에 따른 지반 및 구조물의 거동

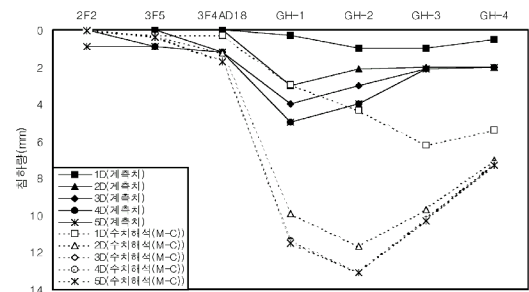


그림 13. 계측치와 수치해석에 의한 지반 및 구조물

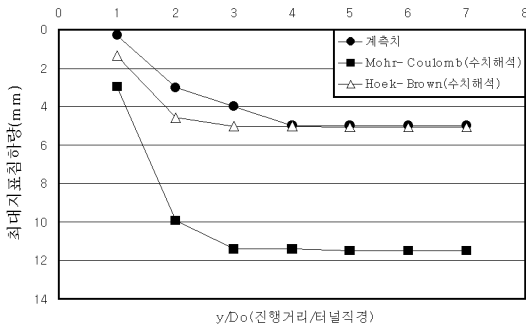


그림 14. 터널굴진에 따른 지반의 최대지표침하량

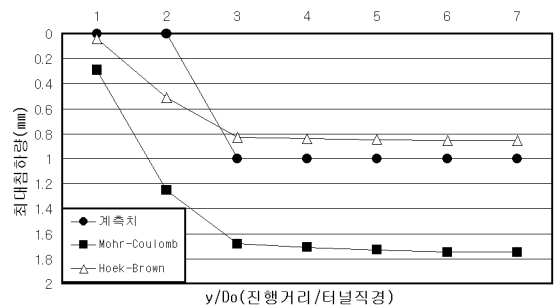


그림 15. 터널굴진에 따른 건물의 최대침하량

Coulomb모형을 이용한 3차원 수치해석 결과와 계측치를 통한 막장 진행에 따른 지반 및 구조물의 거동을 비교한 것이다.

수치해석에 의한 지반의 거동을 보면 계측치 결과와 마찬가지로 2D 부근에서 침하가 최대침하량의 51.7%가 발생하였으며, 막장이 5D, 즉 측점부로부터 3D이상 막장이 진행시 지반 및 구조물의 거동이 거의 수렴하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 정량적인 값은 지반부에서는 계측치에 비해서 Mohr-Coulomb모형을 이용한 수치해석이 최대 230% 더 크게 나타나고 있으며 건물부에서는 계측치에 비해 144% 보수적인 결과를 보이고 있다. 이는 비교적 부정확한 지질과 지반조건을 자료로 하여 산정된 지반정수를 사용하므로 너무 보수적인 값을 사용하여 이와 같은 결과가 나온 것으로 사료된다.

4.3.2 계측치와 수치해석 (Hoek-Brown)에 의한 거동 비교

그림 14는 터널 굴진에따라 터널설계 시 입력자료를 이용한 Mohr-Coulomb 모델과 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 적용에서 지반부의 최대 지표침하를 계측치와 비교 분석하였다. 먼저 Hoek-Brown 현장 암반 모델 적용에서의 최대지표침하는 계측된 지표침하보다 1~52% 차이를 나타내고 있으며, Mohr-Coulomb 모델 적용에서는 계측된 최대지표침하보다 130~230% 차이를 나타내었다. 이 결과를 보면 Mohr-Coulomb 모델 적용한 수치해석 결과 보다 Hoek-Brown 현장 암반 모델 적용하여 구한 결과가 계측치와 유사하게 나타나고 있다.

그림 15는 Mohr-Coulomb 모델과 Hoek-Brown 현장 암반모델의 적용에서 건물의 최대 침하를 계측치와 비교 분석하였다. 먼저 Hoek-Brown 현장 암반 모델 적용에서의 최대 침하는 계측된 침하에 14~20% 정도 차이만을 보이나 Mohr-Coulomb모델 적용에서는 계측점과 68~75% 차이를 보인다. 이와 같이 건물부에서도 지반에서와 마찬가지로 Mohr-Coulomb 모델 적용한 수치해석 결과 보다 Hoek-Brown 현장 암반모델 적용하여 구한 결과가 계측치와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 비교적 부정확한 지질 및 지반조건을 자료로 하여 설계된 Mohr-Coulomb 모델을 적용한 수치해석 결과보다 현장 막장자료를 근거로 해석한 Hoek-Brown 모델을 적용한 수치해석 결과가 현장 계측결과에 보다 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

터널 굴착에 따른 지반 및 인접구조물의 거동을 연구하고자 현장 계측자료와 3차원 수치해석을 통하여 막장 진행에 따른 거동 변화를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 터널굴착 따른 침하영향은 지반부에서와 달리 인접구조물부에서는 침하영향이 상쇄되는 현상을 보이고 있으며 이는 구조물의 강성에 의하여 이런 현상이 일어나는 것으로 판단된다. 또한 인접구조물부를 지나간 지점에서의 횡방향 침하영역은 $2.25 Z_0$ 범위를 보이

며, Hansmire & Cording이 제시한 침하영향영역보다 1.5배 더 큰 범위까지 영향을 미치고 있다. 이는 greenfield에서 산정되는 침하영향영역 보다 인접구조물이 있는 경우 구조물의 하중의 영향으로 터널굴착에 의한 침하영향 영역이 보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

2. 터널굴진에 따른 계측점 (y/Z_0) 에서의 침하시작위치 및 침하종료위치는 지반조건에 따라서 다소 달라지며, 계측점 통과시 침하 발생 비율 또한 다소 차가난다. 특히 인접구조물에 근접한 계측점에서 침하량의 변화율이 더 큰 것으로 나타나는데 이는 인접구조물의 하중의 영향에 의해 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 판단된다.
3. Greenfield에서 쌍굴터널 굴진 시 지표침하곡선과 달리 인접구조물이 있는 경우에는 구조물과 인접한 터널 상단에서 최대침하가 발생하였는데, 구조물 하중의 영향에 의해 이와 같은 현상이 나타나는 것으로 판단된다.
4. 현장 막장 자료를 근거로 하는 Hoek-Brown 모델을 통한 수치해석결과와 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 3차원 수치해석의 결과를 계측치와 비교하였을 때 Hoek-Brown 모델을 통한 수치해석결과가 실제 거동에 보다 잘 접근하는 경향을 보이고 있으며, 비교적 부정확한 지질과 지반조건을 자료로하여 산정된 지반정수를 사용하는 Mohr-Coulomb 모델을 통한 수치해석 결과가 보다 보수적인 결과가 나오는 것으로 나타났다. 따라서 설계시에는 Hoek-Brown 모델을 이용한 3차원 수치해석을 실시함으로써 지반 및 인접구조물의 3차원 거동이 보다 명확하게 규명될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 권 익 (1995), “지하공동 굴착에 의한 지반침하 거동 연구”, 한양대학교 석사학위 논문.
2. 김태훈 (1998), “정보화된 현장 관측자료를 적용한 터널 해석에 관한 연구” 단국대학교 석사학위논문.
3. 김형탁, 김학문 (1995), “3차원 터널해석의 의한 강관타 단그라우팅의 보강효과” 단국대학교 석사학위논문.
4. 배규진 (1989), “토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구”, 연세대학교 박사학위논문.
5. Attewell P. B. and Woodman, J. P. (1982), Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil. Ground Engineering, Vol 15, No. 8, pp. 13- 22.
6. Boscardin. M. D. & Cording. E. J., “Building Response to Excavation induced Settlement”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 1, pp. 1- 21.
7. Cording, E. J., Hansmire, W. H., “Displacements around soft ground tunnels- General Report”, 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, Buenos Aires, Session IV, pp. 571- 632.
8. Emerald Soft Consulting “PENTAGON- 3D USER S GUIDE”.
9. Harry M. Horn, A.M. & T.William Lambe F., “Settlement of Building on the MIT Campus”.
10. Rankin, W. J Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. Engineering Geology of Underground Movements, Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 5, pp. 79- 92.



김학문

단국대학교 토목환경공학과 교수
khm1028@dankook.ac.kr



전성곤

여주대학 토목과 교수
skjeon77@empal.com