

## 도심지 터널굴착에 따른 인접 구조물과 지반거동의 상호영향에 대한 매개변수 연구

### A Parametric Study on the Interaction between Ground Movements and Adjacent Structures in Urban Tunnelling

강봉재<sup>1)</sup>, Bong-Jae Kang, 황의석<sup>2)</sup>, Ye-Suk Hwang, 이봉렬<sup>3)</sup>, Bong-Yul Lee, 김학문<sup>4)</sup>, Hak-Moon Kim

<sup>1)</sup> 현대산업개발 토목팀, Hyundai Development Company Engineering & Construction

<sup>2)</sup> Dankook Univ. 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook Univ.

<sup>3)</sup> C.G. E & C 기술연구소 소장, General Manager, R&D Center, C.G. E & C Co., Ltd.

<sup>4)</sup> Dankook Univ. 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook Univ.

**SYNOPSIS** : Current design practice for the prediction of tunnelling-induced ground movements depends on empirical methods, which are based on many assumptions and simplification of the modeling. Some discrepancies between the predictions and the measurements of ground movements regarding adjacent structures are inevitable.

In order to investigate tunnel-induced ground movements affect on the settlement of existing structures as well as existing structures affect tunnel-induced ground movement, 2-D elasto-plastic finite element analysis are performed. The following influencing factors such as load of the structures, the width of structures, its bending and axial stiffness, its position relative to the tunnel are considered in the numerical analysis.

**Key words** : adjacent structures, urban tunnelling, design practice, 2-D elasto-plastic finite element analysis, volume loss, equivalent stiffness

## 1. 서론

도심지에서 터널굴착시 인접구조물의 안정성의 확보는 터널의 설계·시공시 매우 중요하나, 지반침하에 의한 지중구조물 및 인접구조물의 피해사례는 지하구조물의 건설수요와 더불어 계속 늘고있는 실정이다. 터널굴착에 따른 지반거동의 예측시 현장조건의 다양성에 비하여 해석모형들은 매우 단순화되어 있고 많은 가정사항을 내포하고 있으며, 기존의 해석방법들은 터널굴착에 의한 침하예측치로 인접구조물의 손상을 평가하기 때문에 현장 실측치와는 상이하하여 인접구조물의 손상평가지 보수적인 결과를 제시하게 된다. 최근 Potts와 Addenbrooke(1998), 김창용(1998)등은 지반의 강성과 구조물의 길이에 따른 구조물의 휨강성과 축강성을 조합하여 인접구조물의 특성을 고려한 터널 굴착에 따른 지표침하에 대하여 연구하였다. 그러나, 실제 터널 굴착에 따른 상부 구조물 및 지반 거동은 인접구조물의 강성과 건물의 층수에 따른 하중 적용시 상이한 결과를 나타내게 된다.

따라서 본 연구에서는 인접구조물이 터널 굴착에 따른 지표침하에 미치는 영향을 규명하기 위해서 2차원 탄소성 유한요소 모델을 사용하여 매개변수 연구를 수행하였고, 구조물의 등가강성만 적용했을 경우와 구조물의 강성과 하중을 모두 적용하였을 경우의 영향을 비교 분석하여 도심지 터널 굴착시 실제 상부 구조물 및 지반거동을 규명하는데 목적이 있다.

## 2. 기존의 연구동향

### 2.1 구조물에 의한 침하거동

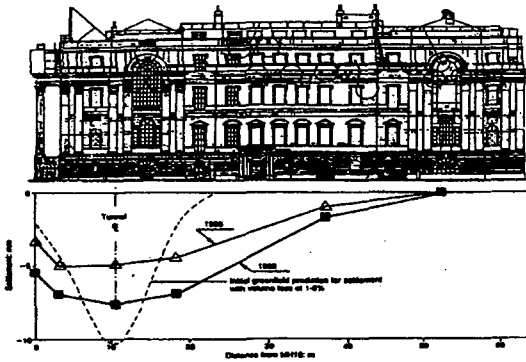


그림 1. 설계 예측치와 침하 측정치

그림 1은 런던의 역사적인 건물인 Mansion House 서쪽 벽체를 통과하는 터널 굴착에 대한 설계 예측치와 침하 측정치를 나타내고 있다. 터널 중심부에서 침하 영향 거리는 설계 예측치와 침하 측정치 사이에 약 2배 이상 차이가 나며, 최대 침하량은 1989년의 침하 측정치와 비교하여 25 % 감소하였다. 이는 실제로 작용하는 건물의 강성이나 하중이 미치는 영향을 나타내고 있다.

### 2.2 건물의 등가강성을 고려한 침하 예측

#### 2.2.1 강성비

Potts와 Addenbrooke(1996, 1997)은 건물을 하나의 보(beam)로 가정하고, 보의 특성 중 탄성계수, 단면적 및 단면 2차 모멘트 등에 건물의 특성을 고려할 수 있도록 다음 식 (1), (2)에서와 같은 상대 휨강성(relative bending stiffness,  $\rho^*$ )과 상대 축강성(relative axial stiffness,  $a^*$ )등의 두 매개변수를 도입하였다.

$$\rho^* = \frac{(EI)_{\text{struct}}}{E_s H^4} \quad (1)$$

$$a^* = \frac{(EA)_{\text{struct}}}{E_s H} \quad (2)$$

여기서, H : 건물폭의 1 / 2  
 $(EI)_{\text{struct}}$  : 건물의 등가 휨강성  
 $(EA)_{\text{struct}}$  : 건물의 등가 축강성  
 $E_s$  : 지반의 탄성계수

건물의 축강성(axial stiffness)은 건물의 바닥 슬래브를 기준으로 하여 건물 높이 전체에 걸쳐 작용하는 것으로 하였고, 건물의 휨강성(bending stiffness)은 평행축 이론(parallel axis theorem)을 이용하여 건물의 중심축에 작용하는 것으로 하였고, 이에 관련된 식은 (3), (4)와 같다.

$$(EA)_{\text{struct}} = (n+1) \cdot (E_c A)_{\text{slab}} \quad (3)$$

$$(EI)_{\text{struct}} = E_c \sum_{i=1}^{n+1} (I_{\text{slab}} + A_{\text{slab}} \cdot h^2) \quad (4)$$

여기서, n : 건물의 층수  
 $E_c$  : 건물 구성 콘크리트의 탄성계수( $t/m^2$ )  
 $A_{\text{slab}}$  : 단위 길이당 건물의 바닥 슬래브 단면적( $m^2/m$ )  
 $I_{\text{slab}}$  : 단위 길이당 건물의 바닥 슬래브 단면 2차 모멘트( $m^4/m$ )  
h : 건물 중심축과 각층 슬래브와의 수직거리(m)

수치해석상에서 필요한 건물의 특성치로써 보(beam)의 등가 탄성계수( $E_{eq}$ ), 등가 단면적( $A_{eq}$ ), 등가 단면 2차모멘트( $I_{eq}$ ) 등은 다음의 식 (5) ~ (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{12(EI)_{struct}}{(EA)_{struct}}} \quad (5)$$

$$A_{eq} = d_{eq} \quad (6)$$

$$I_{eq} = \frac{d_{eq}^3}{12} \quad (7)$$

$$E_{eq} = \frac{(E_c A)_{struct}}{d_{eq}} \quad (8)$$

여기서,  $d_{eq}$  : 건물의 등가 높이 (m)

### 3. 해석조건 및 방법

본 연구는 터널 굴착에 따른 상부 구조물 및 지반거동을 규명하기 위하여 구조물의 길이, 구조물에 적용된 등가강성 및 하중, 그리고 구조물의 위치 등이 고려된 매개변수 변환연구를 수행하였다.

#### 3.1 가정된 지반의 특성

상부 구조물의 거동을 평가하기 위하여 표 1에 보인바와 같이 국내에서 가장 넓게 분포되어 있는 풍화토의 일반적인 물성치를 가정하였으며, 지하수는 고려하지 않았다.

표 1. 지반 물성치

$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$K_o$	$E$ (t/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$\phi$ (°)	$C$ (t/m <sup>2</sup> )
1.9	0.5	6,000	0.33	30	3

#### 3.2 터널 모델링

그림 2에 보인바와 같이 좌·우측 경계부는 수평변위를, 하부 경계부는 수직변위를 구속하였다. 터널 중심으로부터 측면으로 약 4D, 인버트(Invert)부에서 하부 경계로는 4D이상으로 설정하였다. 그리고 터널 단면은 수정 마제형으로 가정하였으며, 굴착 단계는 총 8 단계로 설정하였다.

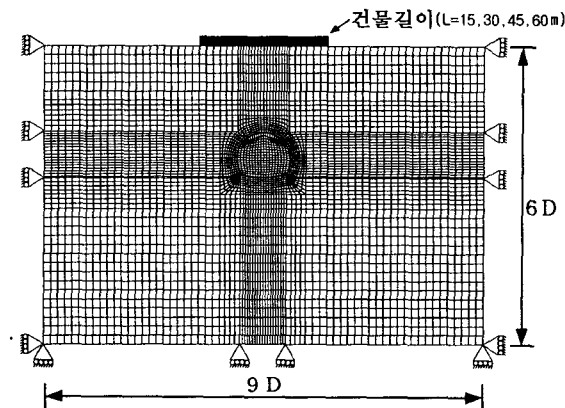


그림 2. 터널 해석을 위한 2차원 유한 요소망 및 경계조건(D=14.25m)

### 3.3 상부 구조물의 강성

상부 구조물은 탄성계수 (E)가  $2.0 \times 10^6$  (t/m<sup>2</sup>)인 빔으로 모델링하였으며, 슬래브의 두께는 150mm, 슬래브 간격은 3.4m로 모델링하였다. 건물은 1층, 3층, 5층, 7층, 9층에 대하여 등가강성 개념을 이용하여 표 2와 같이 건물의 층에 대한 등가강성으로 환산하여 적용하였다.

표 2. 건물 층수에 따른 등가강성의 계산

건물층수 (n)	EA (t)	I (m <sup>4</sup> )	EI (t · m <sup>2</sup> )	축강성 (a*)	휨강성 (ρ*)	D eq (m)	E eq (t/m <sup>2</sup> )
1	600,000	0.87	1.74E6	3.33	3.57E-4	5.89	101,852
3	1,200,000	8.67	1.73E7	6.67	3.57E-3	13.17	91,123
5	1,800,000	30.35	6.07E7	10	1.25E-2	20.12	89,484
7	2,400,000	72.83	1.46E8	13.33	3.00E-2	26.99	88,931
9	3,000,000	143.06	2.86E8	16.67	5.89E-2	33.83	88,679

## 4. 해석결과 및 분석

건물의 강성과 하중을 적용한 경우 터널 굴착시 기존 인접구조물의 침하에 대한 영향을 규명하기 위하여 2차원 유한요소해석을 실시하여 매개변수 연구를 수행하였고, 기존연구와 비교분석 · 고찰하였다.

### 4.1 건물의 강성과 하중 적용시의 지표침하 트라프

그림 3에 보인바와 같이 건물의 등가강성만 적용하여 유한 요소해석을 수행한 결과 지표침하 트라프는 건물의 등가강성이 증가할수록 지표침하가 감소하는 거동을 나타내었으며, 건물의 강성을 고려하지 않은 지반의 해석결과(Greenfield)와 비교하여 9층에서 최대 45 %의 침하 감소효과가 발생하였고, 지표침하 트라프가 완만하게 되는 경향을 나타내었다.

그림 4에서 보인바와 같이 건물의 강성과 하중을 적용한 경우의 지표침하 트라프는 건물의 등가강성만 적용한 지표침하 트라프와 상이한 형태를 나타내며, 건물의 중심부와 단부에서의 침하량은 증가하게 되고, 건물 등가강성만 적용한 경우보다 9층에서 지표침하가 최대 34% 증가됨을 알 수 있었다.

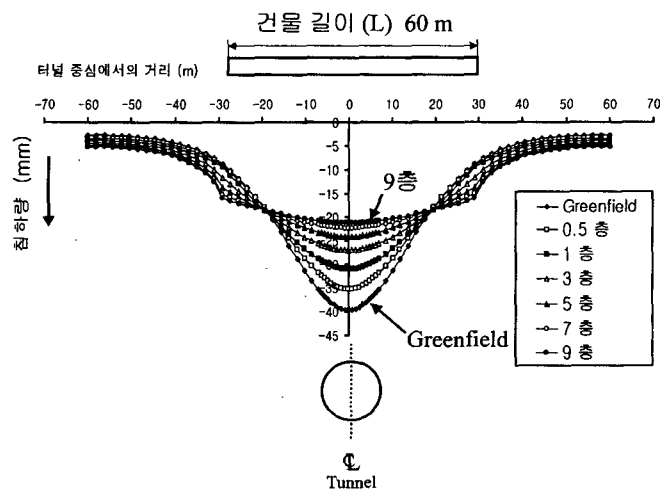


그림 3. 건물의 등가강성 적용시 건물 층수별 지표침하( $E_s=6000$  t/m<sup>2</sup>)

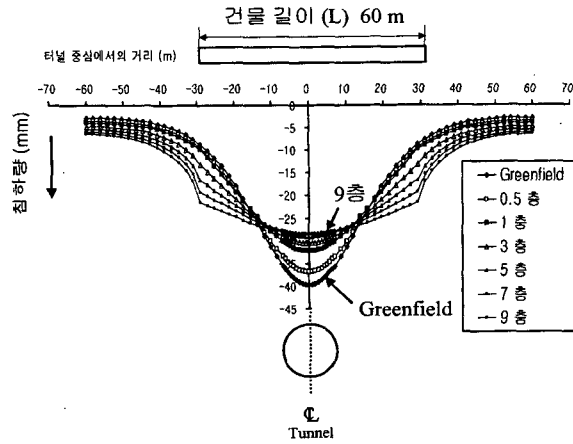


그림 4. 건물의 강성과 하중 적용시 건물 층수별 지표침하( $E_s=6000 \text{ t/m}^2$ )

#### 4.2 건물 기초의 중심, 단부에서의 침하량 및 부등 침하량의 변화

그림 5에 보인바와 같이 건물 층수가 증가함에 따라 건물 중심부의 최대 침하량은 감소하고 단부의 침하량은 증가하여 부등 침하량이 감소하였고 균등 침하되는 결과를 나타내었다.

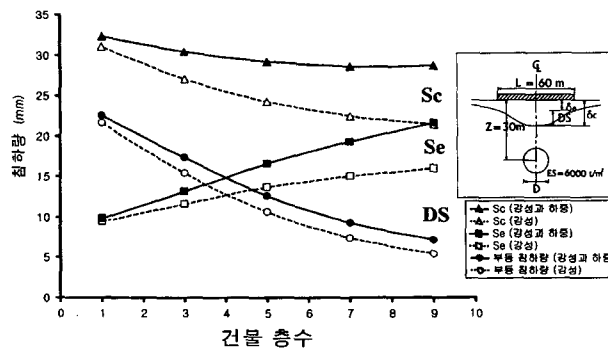


그림 5. 건물 층수별 건물 기초의 중심( $Sc$ ), 단부에서의 침하량( $Se$ ) 및 부등 침하량( $DS$ )의 변화

#### 4.3 건물 길이에 따른 수평변위 트라프

그림 6에 나타난 바와 같이 건물 길이가 증가함에 따라 지반의 수평변위가 감소하는 경향이 커짐을 알 수 있다. 특히, 건물 폭이 60m에서 최대 수평변위는 Greenfield에 비하여 최대 85% 감소하였다.

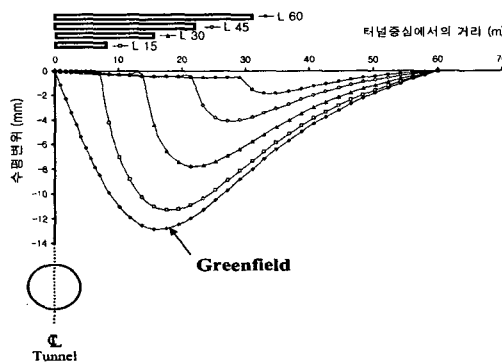


그림 6. 건물의 강성과 하중 적용시 수평변위 트라프

#### 4.4 건물의 상대 편심에 따른 수평변위 트라프

건물의 강성과 하중을 적용시 터널 중심에 대한 건물의 상대 편심( $E=e/L$ ,  $e$ =편심,  $L$ =건물길이)에 따른 수평변위는 그림 7에 보인 바와 같이 상대 편심에 따라서 상이한 거동을 보인다. 건물 기초가 횡방향 침하 영향범위 이내에 놓이는 경우에 기초에서의 수평변위가 Greenfield에서의 최대 수평변위에 비하여 30% 감소하였으며, 침하 영향범위 밖에 놓이는 경우에 건물의 수평변위가 매우 작게 나타났다.

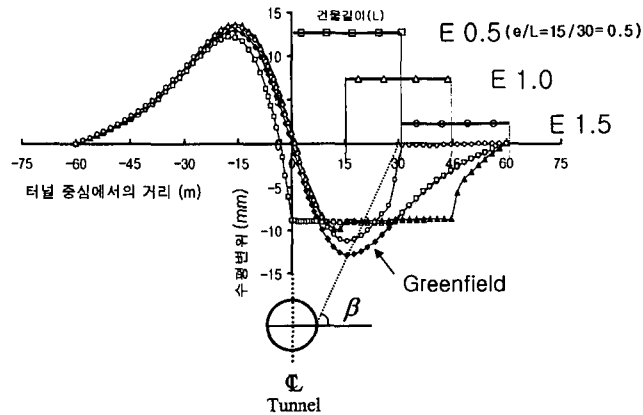


그림 7. 건물의 상대 편심(E)에 따른 수평변위 트라프

#### 4.5 기존 연구결과와의 비교분석

표 3에 보인바와 같이 각 연구의 물성치의 차이는 미비하나, 본 연구에서는 기존 연구에 비하여 하중과 지보재 설치를 고려하여 수행하였다.

표 3. 해석단면의 제원 비교

연구자	Addenbrooke, 1997	단국대, 2000
해당 제원		
$E_c$	$2.3 \times 10^6 \text{ t/m}^2$	$2 \times 10^6 \text{ t/m}^2$
$E_s$	$10.5 \times 10^3 \text{ t/m}^2$	$6 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
$E_c / E_s$	220	330
심도	20 m	30 m
터널 직경	4.146 m	14.25 m
터널 형상	원형	수정 마제형
지보재 설치 유무	무	유
건물 층수	Slab, 1층, 3층, 5층	1층, 3층, 5층, 7층, 9층
지반 조건	London Clay	풍화토
하중고려 유무	무	유

그림 8은 터널 굴착으로 인한 건물이 지반거동의 형태와 크기에 미치는 영향을 규명하기 위하여 기존의 Potts와 Addenbrooke(1996, 1997)의 연구와 본 연구의 결과를 나타내는데, 이 결과에 따르면 Greenfield의 최대 침하량과 건물의 등가강성만 적용시의 최대 침하량을 비교해 본 결과 최대 침하량이 감소하는 유사한 결과를 나타내었으나, 강성과 하중을 적용한 경우에 하중에 의한 침하량이 증가됨을 알 수 있었다.

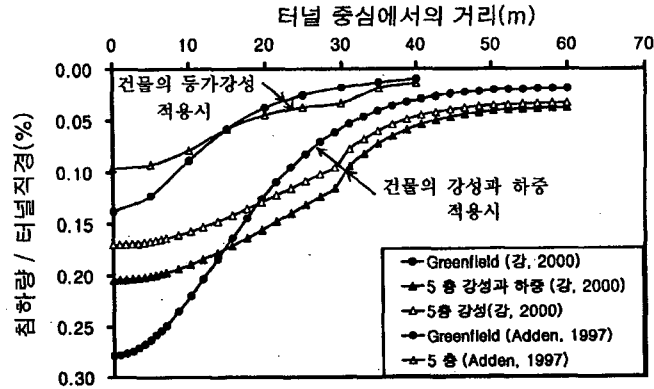


그림 8. 지표침하 트래프의 비교

그림 9에 보인바와 같이 기초 단부와 중심 침하량 및 부등 침하량에 대한 건물 등가강성을 적용한 기존의 Potts와 Addenbrooke(1996, 1997)의 연구와 건물의 강성과 하중을 적용한 본 연구를 비교해 본 결과 건물 층수가 증가함에 따라 기초 단부와 중심부 침하량 및 부등 침하량의 변화가 유사한 거동을 보임을 알 수 있었다.

기존의 연구결과에 대한 수평변위 트래프에 대한 비교 결과는 그림 10에 보인바와 같이 비슷한 거동을 보임을 알 수 있었으며 건물 강성의 영향으로 수평변위가 크게 억제되는 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.

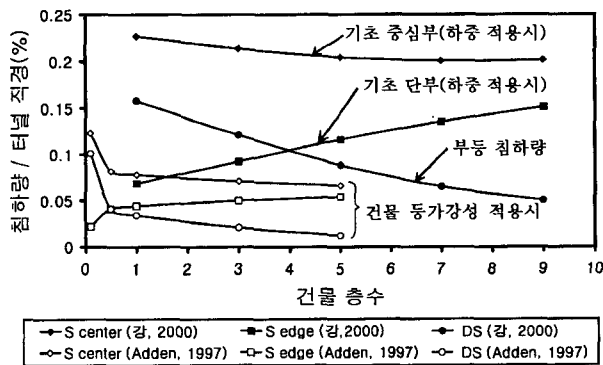


그림 9. 기초 단부, 중심부 침하량 및 부등 침하량 비교

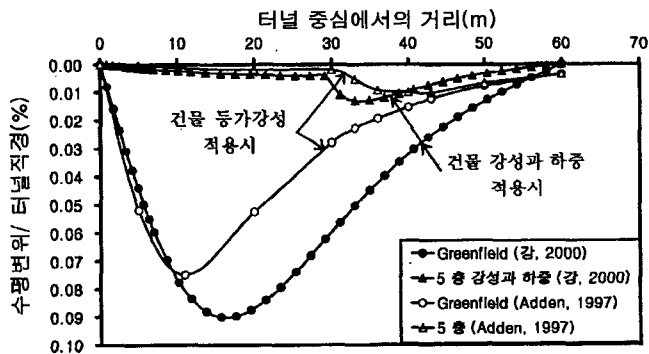


그림 10. 수평변위 트래프의 비교

## 5. 결론

본 연구는 터널굴착시 인접구조물의 변화조건이 지표침하에 미치는 영향을 규명하기 위해서 2차원 탄소성 유한요소 모델을 사용하여 매개변수 연구를 수행하였고, 구조물의 등가강성만 적용했을 경우와 구조물의 강성과 하중을 적용하였을 경우의 영향을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 건물의 강성과 하중을 적용한 경우에 최대 침하량은 건물의 등가강성만을 적용한 경우보다 증가하는 결과를 나타냈으며, 건물 강성이 증가함에 따라 기초 중심부의 침하량은 감소하는 반면, 기초 단부에서의 침하량은 증가하는 경향을 나타내고 있기 때문에 현장의 안전성 예측시에는 건물의 길이와 층수에 대한 고려가 반드시 포함되어야 한다.
- (2) 건물의 강성과 하중을 적용하였을 경우에 건물의 주변 매질물에 대한 거동을 파악하기 위하여 예측한 지반의 최대 수평변위는 건물 길이의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 건물의 상대 편심에 따른 수평변위를 분석한 결과에 의하면 건물이 침하 영향범위 안에 놓이는 경우에 수평변위는 Greenfield의 최대 수평변위에 비하여 감소하여, 건물 강성의 영향을 확인할 수 있었다. 그러나, 침하 영향범위 밖에 놓이는 경우일 때 건물의 수평변위는 매우 작게 나타났다.
- (3) 기존의 Potts와 Addenbrooke(1996, 1997)의 연구를 비교해 본 결과 지표침하 트라프, 기초의 단부, 중심부 침하량 및 부등 침하량, 수평변위 트라프는 유사한 거동을 보였으나, 여러 가지 요인 중에서 주로 터널 직경과 건물 층수에 대한 하중 고려 유무에 따라 영향 범위의 차이를 보인 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김창용(1998), "도심지 터널 굴착에 따른 지반거동특성 예측과 인접구조물 손상평가에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문.
2. 김학문(1997), "도심지 지반굴착에서 인접건물의 손상영향과 보호", 대한토목학회 논문집.
3. 유충식(1996), "터널 수치해석의 올바른 적용을 위한 Work Shop", 한국지반공학회 터널분과위원회.
4. 한국지반공학회(1997), 터널, 지반공학시리즈, 구미서관.
5. Boscardin. M. D. & Cording. E. J.(1989), "Building Response to Excavation-induced Settlement", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No 1, pp. 1~21.
6. Burland, J. B., Wroth, C. P.(1974), "Settlement of Buildings Associated Damage", *Proc. Conf. Settlement of Structures*, Pentech Press, London, England, pp. 611~654.
7. Cording, E. J., Hansmire, W. H.(1975), "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. J. B. Burland(1997), "Theme lecture : Subsidence due to tunnelling and its effects on buildings".
9. Peck, R. B.(1969), "Deep Excavations and Tunnelling in soft ground", State of the Art Report, *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico city, pp. 402~405.
10. Potts, D. M., Addenbrooke(1997), T. I., "A Structures's Influence on Tunnelling-Indeuced Ground Movements", *Proc. Int. J. Civil Engrs. Geotech. Engrg.* Vol. 125, pp. 109~125.