

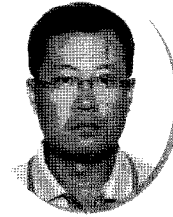
# 지보굴착에 따르는 인접건물의 손상위험도 평가사례: 시공단계



**이 선 재**  
삼성물산건설부문  
UAE Al Salam Tunnel Project 설계팀장  
(sj007.lee@samsung.com)



**송 태 원**  
삼성물산건설부문 싱가포르  
MRT C156 Project 설계팀장



**이 윤 상**  
삼성물산건설부문  
해외토목팀 부장

## 1. 서론

흙막이 지보 굴착에 의해 발생하는 지반침하 및 수평변위는 주변구조물에 변형을 발생시키고, 이와 같은 변형이 크게 되면 구조물에 심각한 손상이 가해질 수 있다. Skempton and Macdonald(1956), Polshin and Tokar(1957), Bjerrum (1963), Burland and Wroth (1974)에 의해 지반침하가 구조물에 미치는 영향이 연구되기 시작하였고, Boscardin and Cording (1989)과 Burland (1995) 등은 지반의 침하에 지반 수평변위를 고려한 구조물 손상평가기법을 제안하였다.

본 논문에서는 싱가포르에서의 지하고속도로 건설을 위한 흙막이 굴착공사시(Kallang Paya Lebar Expressway Contract 423) 얻은 주변 건물의 계측데이터로부터 손상위험도 평가변수들을 계산하였고, 이를 설계 및 해석 단계에서 예측된 손상위험도 평가변수(이선재 등, 2005)와 비교 분석하였다. 설계시 예측된 손상위험도는 구조물이 존재하지 않은 것으로 가정하여 유추한 Greenfield

조건에서 얻은 것으로, 실제로 계측된 데이터와의 비교를 통하여 지반-구조물 상호작용에 대해 검토하였다.

## 2. 대상현장 소개(Block122)

본 현장은 싱가포르내에서 점차적으로 심해지고 있는 교통체증을 효과적으로 해소하고자 싱가포르 동부의 남북을 연결하는 왕복 6차선의 지하고속도로 건설을 위한 Kallang Paya Lebar Expressway 공사의 일부구간(2.96km)인 423공구로서, 논문에 소개하고자하는 손상위험도 평가대상인 건물(Block122)은 굴착면으로부터 5~7m정도의 이격거리에 굴착면과 평행하게 위치한 높이 12층의 아파트건물로서 1977년에 완공되었다. 지반조건, 설계 및 시공조건 등은 이선재 등(2005)에 의해 소개된 바 있으므로 여기서는 생략기로 한다.

### 3. 굴착에 의한 주변건물 손상위험도 예측

#### 3.1 지반변위 예측 방법

흙막이 굴착에 의한 지표침하 예측기법은 Caspe (1966), Peck(1969), O'Rourke(1975), Clough and O'Rourke(1990), 그리고 Bowles (1988) 등에 의해 제안되었으나 건물의 손상에 중요한 영향을 주는 수평변위 예측방법을 제시하지 못하였다. 터널굴착시 발생하는 지표침하 및 수평변위예측 방법은 Peck (1969), Attewell and Woodman (1982)에 의해 제안되었으며 지표 침하 및 수평변위가 각각 Gauss 정규분포곡선과 정규분포누적곡선의 형태를 보이는 것으로 제시되었다.

기존에 제시된 굴착주변 지반변위 예측기법을 적용 및 혼용하여 식 (1)과 식 (2)에 나타난 지반변위 예측곡선식을 설계단계에서 굴착주변 지반변위 예측에 사용하였다 (Mott Macdonald Co. Ltd., 1993; 이선재 등, 2005).

$$s(x) = s_{max} \cdot \exp\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2x}{W}\right]^2\right) \quad (1)$$

$$h(x) = \beta\left(1 + \frac{2x}{W}\right) \cdot s(x) \quad (2)$$

여기서,  $s(x)$ =흙막이 벽체로부터  $x$ 이격거리에서의 수직침하량,  $s_{max}$ =흙막이 위치에서의 최대 침하량,  $h(x)$ = 흙막이 벽체로부터  $x$ 이격거리에서의 수평변위,  $W$ =침하폭 (trough width),  $\beta$ =흙막이 위치에서 수직침하에 대한 수평변위의 비이다. 식 (1)과 식 (2)에 대한 설명은 이선재 등 (2005)에 의해 상세히 설명된 바 있다.

#### 3.2 건물 손상위험도 예측

설계단계에서는 그림 2에 나타난 과정을 거쳐 건물의 손상위험도를 평가하였다. 1차 평가에서는 건물의 손상위험도가 Moderate수준으로 나타나 2차 평가를 실시하게 되었다. 2차 평가에서는 앞에서 설명한 방법을 활용하여 굴착에 의한 주변지반 변위를 예측하였고, 이를 토대로 Greenfield 조건에서의 건물 손상위험도를 예측하였다. 손상위험도 예측은 Boscardin and Cording (1989)과 Burland(1995)에 의해 제시된 방법을 혼용하여 뒤뜸각 (angular distortion,  $\theta$ )과 수평변형률(horizontal strain,  $\epsilon_h$ )을 활용하여 실시하였다. 그림 3은 손상위험도 평가를 실시한 단면의 현황을 보여주고 있는데, 그림 3의 단면에 대하여 식 (1)과 식 (2)로부터 예측된 지반변위곡선으로부터

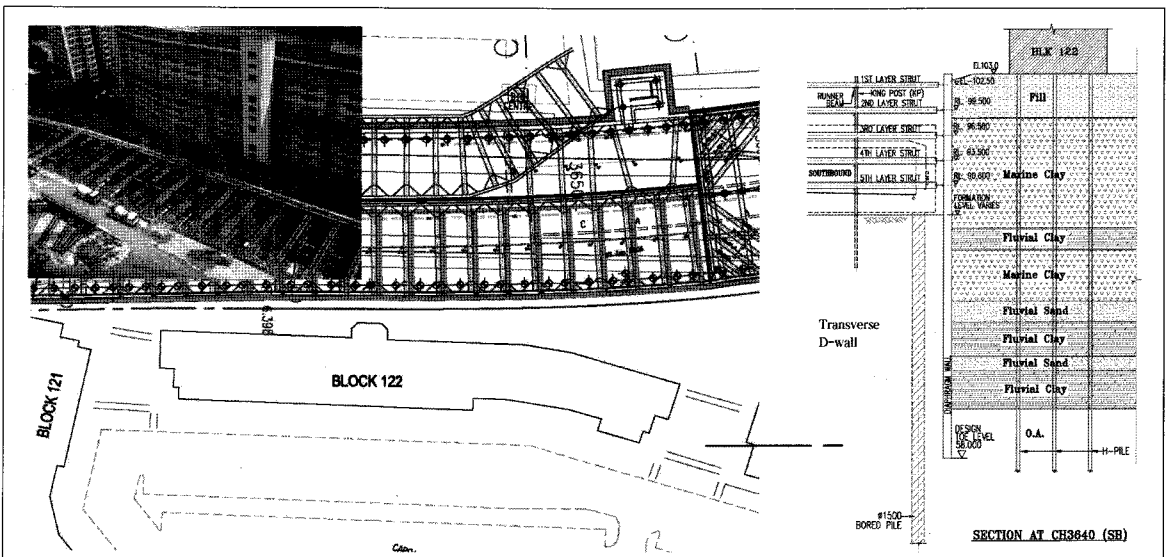


그림 1. 대상현장 평면도 및 단면도

지보굴착에 따르는 인접건물의 손상위험도 평가사례: 시공단계

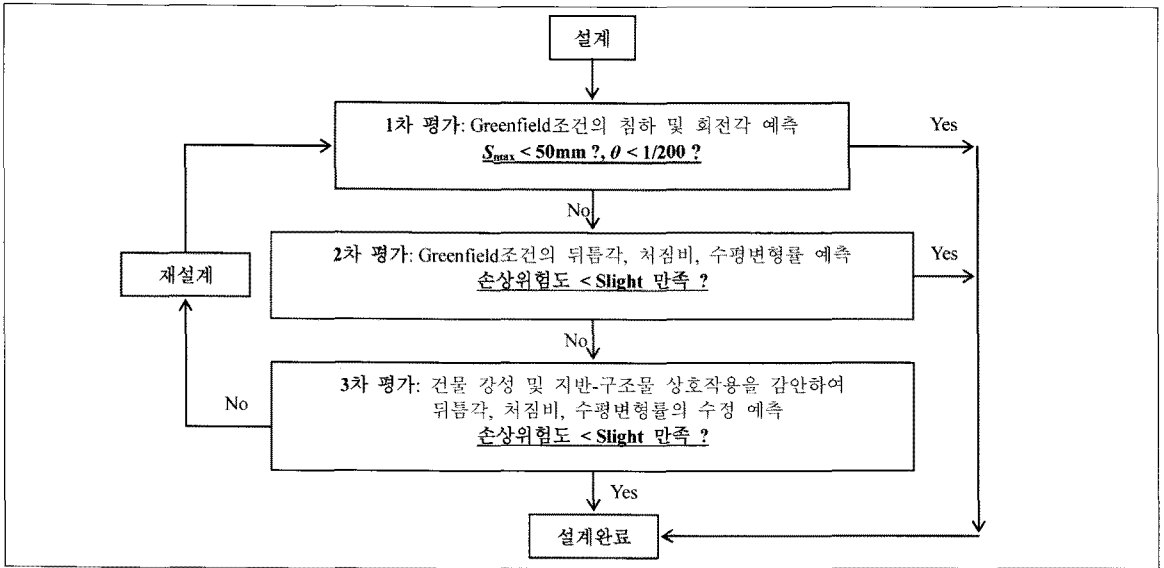


그림 2 굴착에 의한 인접 건물 손상위험도 평가 흐름도(after Franzius, 2003; Son and Cording, 2005)

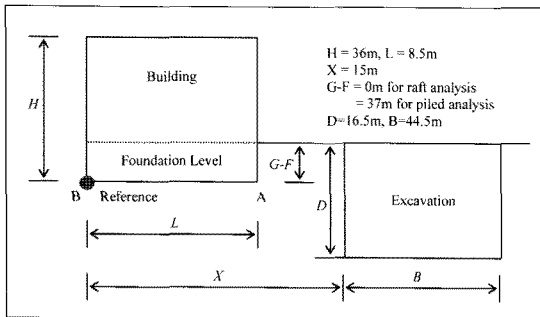


그림 3. 건물 손상위험도 평가 단면 현황

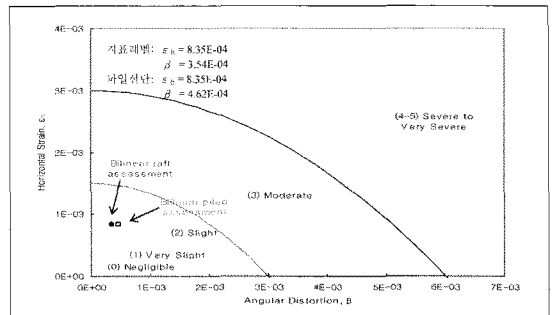


그림 4. 설계단계에서 예측된 건물의 손상위험도 평가 결과 (L/H=0.236, E/G=12.5)

터 Greenfield조건에 대한 뒤통각과 수평변형률을 계산하면 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\beta = \beta_s - \omega \quad (3)$$

여기서,  $\beta_s = -[2(1+2XA/W)S_A]/W$ 로서 A점에서 침하 곡선의 기울기,  $X_A$ =굴착면으로부터 A점까지의 거리,  $S_A$ =A점에서의 침하량,  $W$ =침하폭(trough width),  $\omega=(S_A - S_B)/L$ 로서 B점에 대한 A점의 강체회전각(rigid body tilt),  $S_B$ =B점에서의 침하량,  $L$ =건물의 굴착면 직각방향으로의 길이이다.

$$\epsilon_h = (h_A - h_B) / L \quad (4)$$

여기서,  $h_A, h_B$ =A와 B점에서의 수평변위,  $L$ =건물의 굴착면 직각방향으로의 길이이다.

Burland et al.(1977)과 Boscardin and Cording (1989)에 의해 제시된 한계변형률에 따르는 손상수준을 Negligible부터 Very severe의 6단계로 구분한 손상위험도 평가도표에 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 계산한 결과를 도시하면 그림 4와 같다(이선재 등, 2005). 그림 4의 결과에서 적용된 아파트 건물의 전단탄성계수에 대한 탄성계수 비(E/G)는 콘크리트 뼈대구조물에 대한 일반적인 값인 E/G=12.5(Boscardin and Cording, 1989)를 적용하였으

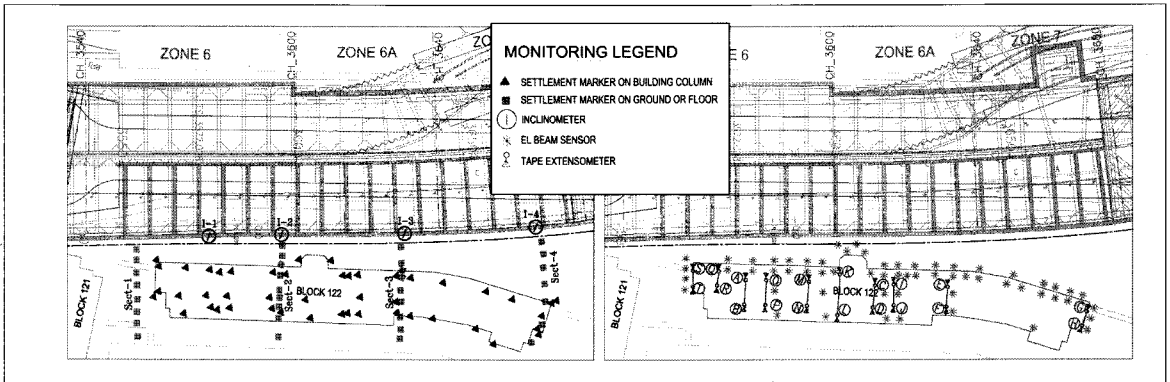


그림 5. 굴착중 건물의 거동 계측현황

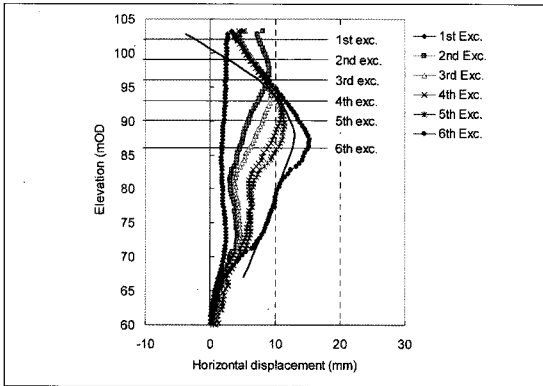


그림 6 굴착단계별 지중경사계(-1) 계측결과

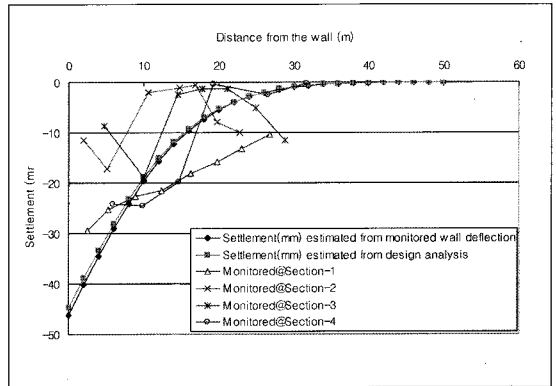


그림 7. 최종굴착단계에서 벽체변위 계측치로 추정된 배면지반 침하곡선과 침하 계측치

며, 건물의 높이에 대한 길이 비(L/H)는 L/H=0.236가 적용되었다. 평가결과로서 지표와 파일선단위치에서 손상 위험도는 모두 발주처의 허용 손상기준인 Slight수준을 만족하는 것으로 나타났고, 이에 따라서 설계단계의 손상 위험도 평가는 마무리 되었다.

## 4. 건물의 굴착 중 거동 계측

### 4.1 계측현황

굴착공사 중 나타나는 건물의 거동을 계측하기 위해 주변지반 및 건물의 침하, 흠막이 벽체변위, 건물의 수평변위를 계측하였으며 그 현황을 나타내면 그림 5와 같다.

## 4.2 계측치 분석

### 4.2.1 벽체변위

흠막이 벽체의 횡방향변위는 배면지반의 침하를 직접 유발시키므로, 굴착중 발생된 배면지반의 체적손실을 평가하기 위해 설계시 대표 해석단면에 대하여 벽체변위(D1000mm 지하연속벽)를 지중경사계를 통하여 계측하였다. 그림 6은 각 시공단계별 벽체변위 양상을 보이고 있는데, 최종 굴착시 계측된 변위는 설계단계에서 예측된 변위와 그 경향은 유사하나 변위량이 다소 크게 나타났다. 굴착초기에 하부구간(70~75mOD)에서 배부름 현상이 관찰되었으며 이는 흠막이 지하연속벽과 맞대기 연속벽 사이 경계부의 콘크리트 품질이 다소 결여되었거나, 연약한 점토가 시공과정에서 다소 협재된데서 비롯된 것으로

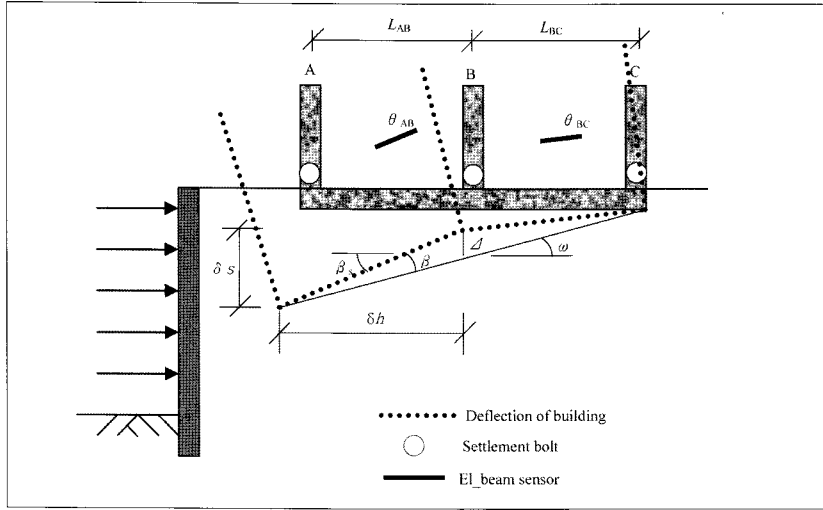


그림 8. 침하 및 EI\_beam 데이터를 이용한 손상위험도 평가변수의 계산 개념도

보인다. 또한 상부구간(95~103mOD)의 큰 변위는 1단 스트럿 설치 및 preloading 후 예기치 않게 발생된 스트럿 하중 손실에 기인하는 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 Greenfield조건의 배면지반 침하

지중경사계 계측을 통하여 얻은 벽체변위로부터 배면지반의 체적손실을 Bowles의 방법으로 계산하고 이로부터 배면지반의 변위곡선을 이선재 등(2005)에 의해 제시된 식 (1)로부터 예측하였다. 이 예측곡선을 설계단계의 예측 침하곡선 및 침하계측 데이터와 비교하였으며 그림 7은 이를 보여주고 있다. 그림 7에서 Section-1의 침하는 구조물이 없는 원지반에 대하여 계측한 것으로 Greenfield조건의 침하라고 볼수 있으며, Section-2~4는 일부위치가 건물내에서 측정되었기 때문에 원지반 침하에 대한 및 건물의 침하를 상대적으로 보여주고 있다.

벽체변위에 따른 체적손실을 감안한 배면침하 예측치는 설계단계시와 시공사가 매우 유사하게 나타났으며 이는 흙막이 벽체의 수평변위로 인한 체적손실량

이 설계시 예측된 값과 매우 유사하게 발생되었음을 의미한다. 한편, greenfield조건에서의 배면침하의 최대 계측치(Section-1)는 예측치의 70% 수준으로 발생하였으나 침하폭(trough width)은 예측치보다 크게 발생되었다. 침하 계측위치에서 측정한 간극수압계가 굴착 시공중 약 1.5m의 수두감소를 보였으며, 이로 인한 유효응력 증가에 의해 발생된 압밀침하가 이러한 원인을 제공한 것으로 판단된다. 원지반 및 건물침하가 함께 계측된 단면(Section-2~4)에서도 파일기초로 지지된 건물에서는 매우 작은 크기의 침하가 발생한 것으로 계측되었다.

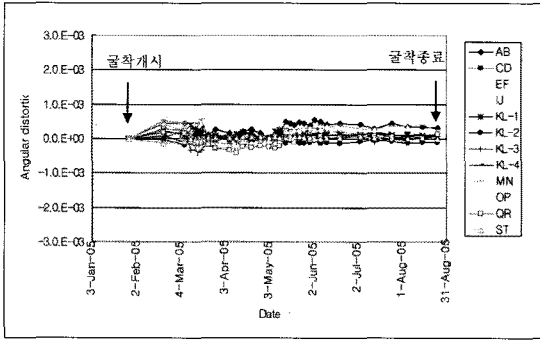
#### 4.2.3 건물에서 계측된 손상위험도 평가변수

건물에 대한 손상위험도 평가를 위해 그림 8에 제시된 개념도와 같이 아파트 건물의 기둥에 대하여 침하와 수평변위를 계측하였다. 기둥은 아파트 위치별로 3~5열로 배열되어 있었기 때문에 굴착면쪽 기둥(A), 중간 기둥(B), 바깥쪽 기둥(C)의 3열로 계측하였다. 뒤틈각(angular

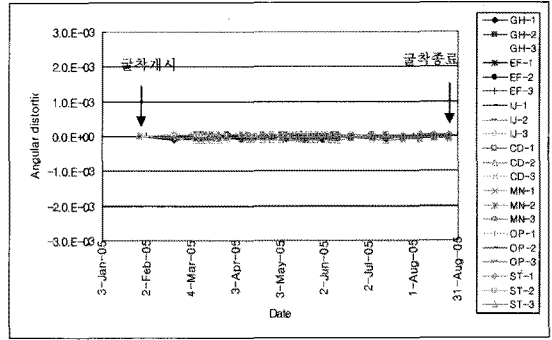
$$\beta = \beta_s - \omega = \delta_{AB} / L_{AB} - \delta_{AC} / L_{AC} \quad ; \beta > 0 \text{ for hogging, } \beta < 0 \text{ for sagging} \quad (5)$$

$$\Delta = (\tan \beta_s - \tan \omega) L_{AB} \quad ; \text{for hogging, } \beta < 0 \text{ for sagging} \quad (6)$$

$$\epsilon_b = (h_A - h_B) / L_{AB} \quad (7)$$



(a) 침하 데이터로부터의 뒤틀림각



(b) EL\_beam데이터로부터의 뒤틀림각

그림 9. 굴착기간동안의 뒤틀림각 변화 양상

distortion,  $\beta$ ) 또는 처짐비(relative deflection,  $\Delta/L$ )의 평가를 위한 침하계측은 건물의 기둥하부에서 침하핀(settlement bolt,  $\delta$ ) 계측으로 실시하였고, 수평변형을 평가를 위한 수평변위 계측은 Tape Extensometer를 이용한 기둥간 상대 수평변위( $\delta_h$ )로부터 계측하였다. 계측을 통하여 얻은 침하 및 수평변위 데이터로부터 식 (5), 식 (6) 및 식 (7)과 같이 손상위험도 평가변수를 계산할 수 있다.

또한, 그림 8에 보인바와 같이 EL\_beam (Slope Indicator Company, 2003)으로부터 계측된 각기둥에서의 회전변위를 이용하여서도 손상위험도 평가변수를 계산하였다. 각기둥간의 회전변위를 측정하게 되면 식 (8)로부터 강체회전각을 계산하고 식 (9)와 같이 뒤틀림각을 계산할 수 있다.

$$\omega = \tan^{-1} \left( \frac{L_{AB} \tan \theta_{AB} + L_{BC} \tan \theta_{BC}}{L_{AB} + L_{BC}} \right) \quad (8)$$

$$\beta_{AB} = \omega - \theta_{AB}; \quad \beta_{BC} = \omega - \theta_{BC} \quad (9)$$

계산된 결과들로부터 식 (10) 및 식 (11)에 각각 보인 연직침하로 인한 휨인장 변형률( $\epsilon_b$ )과 사인장 변형률( $\epsilon_d$ )을 계산할 수 있다 (Burland and Wroth, 1974; Boscardin and Cording, 1989). 식 (10)과 식 (11)에 수평변형률로 인한 추가적인 변형률을 각각 고려하게 되면 식 (12)와 식 (13)에 보인 침하 및 수평변위에 따르는 한계 휨인장 변형률( $\epsilon_{bmax}$ )과 한계 사인장 변형률( $\epsilon_{dmax}$ )을 계산할 수 있다.

식 (10)과 식 (11)에 보인 처짐비(relative deflection,  $\Delta/L$ )는 뒤틀림각과 직접적인 관계에 있는 변수로서 Boscardin and Cording (1989)과 Son and Cording (2005)이 수치 해석 및 실험을 통해 상관관계를 제시한 바 있다. 또한, 식 (10)과 식 (11)에 나와있는  $E/G$ 와  $L/H$ 는 각각 건물의 전단 탄성계수에 대한 탄성계수비와 건물의 높이에 대한 길이의 비로서 Boscardin and Cording (1989)은 조적식 건물과 철근 콘크리트 뼈대구조 건물에 대해 각각  $E/G=2.6$  과  $E/G=12.5$ 의 값을 제안한 바 있다.

$$\epsilon_b = (\Delta / L) / [0.083(L / H) + 0.5(E / G)(H / L)] \quad (10)$$

$$\epsilon_d = (\Delta / L) / [(1 / 6)(G / E)(L / H)^2 + 1] \quad (11)$$

$$\epsilon_{bmax} = \epsilon_h + \epsilon_b \quad (12)$$

$$\epsilon_{dmax} = \epsilon_h / 2 + \sqrt{(\epsilon_h / 2)^2 + \epsilon_d^2} \quad (13)$$

그림 9(a)와 그림 9(b)는 계측된 침하데이터와 EL\_beam데이터를 위에서 설명한 방법으로 계산하여 얻은 뒤틀림각의 변화양상이며, 그림 10은 수평변형을 변화양상이다. 침하데이터는 굴착개시 후 급격한 증가를 보였으나 이후 굴착종료시까지 별 변화를 보이지 않았으며, EL\_beam데이터는 굴착개시부터 종료시까지 거의 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 수평변위의 경우는 침하 데이터와 유사한 경향을 보이나 굴착종료 부근에서 급격한 수평변형을 변화하는 것으로 나타났다. 침하의 양상이 EL\_beam보다 다소 크게 나타난 것은 상대적으로 계측오차를 많이 포함하고 있는 레벨측량을 이용하여 침

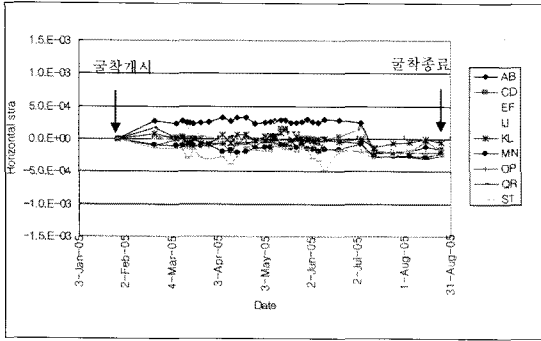


그림 10. 굴착기간동안의 수평변형률 변화 양상

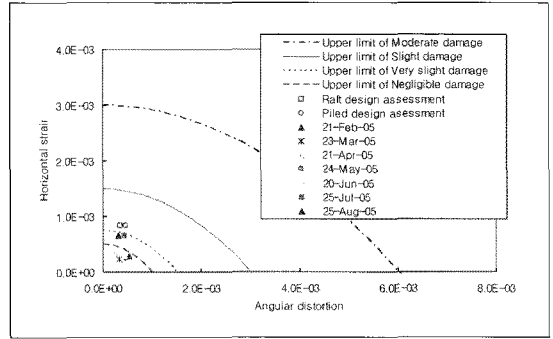


그림 11. 손상위험도 평가평형률 변화 양상

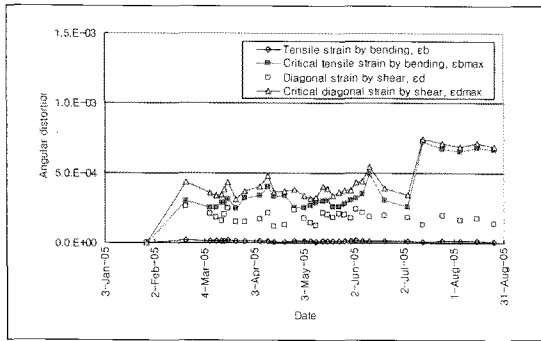


그림 12. 굴착기간동안의 한계변형률의 변화 양상

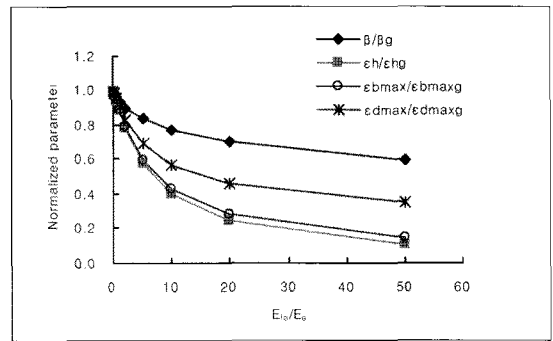


그림 13. 이격거리별 건물강성 증가에 따른 평가변수의 감소: 이격거리 x=4m (이선재 등, 2005)

하를 측정하는 것에 기인한 것으로 보이며  $E_{L\_beam}$  데이터로 판단해볼 때 건물의 움직임은 굴착기간동안 매우 미소했음을 짐작할 수 있다.

그림 11은 굴착기간 동안 월별 최대 뒤틀림 및 수평변형률을 이선재 등(2005)에 의해 제시된 손상위험도 평가도표에 도시한 것이다. 뒤틀림의 경우 침하데이터에 불가피하게 포함될 수밖에 없는 오차가 있긴 하지만 설계예측치와 매우 유사한 크기의 값이 굴착기간 동안 뚜렷한 변화없이 계속되었다. 수평변형률의 경우는 설계예측치의 약 80%수준에 해당하는 값이 최종굴착 후 계속되었다. 이 값들은 설계기준으로 설정한 Slight Damage수준의 상한치 (Burland and Wroth, 1974; Boscardin and Cording, 1989)에 비해 뒤틀림은 20%, 수평변형률은 50%수준이며 현장에서 시행한 건물의 육안관찰을 통해서도 굴착기간 동안 균열의 발생은 확인되지 않았다.

계측단면별로 계산된 뒤틀림과 수평변형률의 최대치를 일차별로 취하고 이를 식 (10)~식 (13)에 대입하여 한계 함

인장 변형률과 한계 사인장 변형률의 변화양상을 그림 12와 같이 도시하였다. 침하에 의해서만 유발되는 휨인장 변형률( $\epsilon_b$ )은 굴착기간동안 거의 발생되지 않는 것으로 평가되었고 사인장 변형률( $\epsilon_s$ )은 평균  $\epsilon=2.5E-04$  정도의 값이 발생된 것으로 평가되었다. 한편, 침하와 수평변형률이 모두 고려된 한계 휨인장 변형률( $\epsilon_{bmax}$ )과 한계 사인장 변형률( $\epsilon_{smax}$ )은 최대 약  $\epsilon=7.5E-04$  정도로 평가되었다. 수평변형률이 고려된 한계 휨인장 변형률( $\epsilon_{bmax}$ )은 이것이 고려되지 않은 값( $\epsilon_b$ )에 비해 수십배의 큰 값을 보였으며, 한계 사인장 변형률의 경우에는 이 차이가 3배 정도 발생되는 것으로 나타났다. 이로부터 굴착에 의한 건물의 손상위험도가 침하자체보다는 수평변형률에 보다 큰 영향을 받는다는 사실(Boscardin et al., 1978; Mahar and Marino, 1981; Boscardin and Cording, 1989)을 다시 한번 확인할 수 있었고, 본 건물의 경우 휨과 사인장이 건물의 손상에 미치는 영향은 서로 유사한 것으로 평가된다. 한계 변형률의 계측치는 설계시 예측한 결과( $\epsilon_{bmax} = 8.44E-04$ ,

$\epsilon_{dmax}=8.95E-04$ ; 이선재 등, 2005)에 비해 약 85% 수준을 보이는 값이다.

#### 4.2.4 지반-구조물 상호작용의 평가

Franzius(2003)는 터널굴착에 의해 발생하는 건물의 거동평가를 위해 건물을 단순보로 모델링하여 수치해석을 실시하였는데, 이 해석에서 1층~10층 건물에 대한 환산 탄성계수는  $E_{re}=1.02\sim 1.17\times 10^8\text{kN/m}^2$ 으로 계산되어 해석에 적용되었다. 한편, 본 대상건물의 지반-구조물 상호작용 영향 평가를 위해 이선재 등(2005)에 의해 실시된 해석결과에 따르면, 그림 13과 같이 greenfield조건에 비해 건물에 발생하는 손상위험도 평가변수들은 건물강성이 증가함에 따라 감소되며, 본 해석에 사용된 지반탄성계수와 Franzius(2003)가 사용한 건물탄성계수를 비교해 볼 때 지반 탄성계수에 대한 건물 탄성계수의 비는 대략  $E_{re}/E_s\approx 30$ 정도로 판단된다. 그림 13에서  $E_{re}/E_s\approx 30$ 일 때, 건물의 뒤틀림각과 수평변형률은 각각 greenfield조건에 비해 70% 및 20% 수준으로 감소하며 한계 휨인장 변형률과 한계 사인장변형률은 각각 greenfield조건에 비해 20%와 40%수준으로 감소하는 것으로 나타난다. 뒤틀림각과 수평변형률의 예측치가 각각 설계예측치의 100% 및 80%정도를 보였고 한계 인장변형률이 약 85%수준을 보이는 것으로 미루어 본 건물의 경우 지반-구조물상호 작용으로 인한 감소효과는 크지 않았던 것으로 판단된다. 그림 7에서 이미 보인바와 같이 greenfield조건의 침하에 비해 건물의 침하가 상당히 작음에도 불구하고 건물침하로 계산한 한계 인장변형률의 크기는 greenfield조건의 그것과 크게 다르지 않을 수 있다는 사실을 주목할 필요가 있다. 오히려 설계단계에서 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않고 greenfield조건으로 예측한 한계 인장변형률이 계측 결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

### 5. 결론

- 1) 도심도 연약지반에 대한 흙막이 굴착시 인접하는 건물의 계측 데이터로부터 건물 손상위험도 평가변수

들(뒤틀림각, 수평변형률, 한계 인장변형률)을 계산하였고, 이를 설계단계에서 greenfield조건으로 예측한 값들과 비교분석하였다.

- 2) 계측 결과로부터 계산한 건물의 뒤틀림각, 수평변형률 및 한계 인장변형률은 각각 설계시 greenfield조건으로 예측한 결과의 약 100%, 80% 및 85%로 나타났다.
- 3) 수평변형률을 고려하여 계산한 한계 휨인장 변형률은 이를 고려하지 않은 값에 비해 수십배의 큰 값을 보였고 한계 사인장 변형률의 경우에는 이 차이가 약 3배 가량인 것으로 나타났다. 이로부터 수평변형률이 건물의 손상위험도에 매우 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었고, 굴착주변 건물의 손상위험도 평가를 위해서는 수평변형률에 대한 고려 및 이에 대한 계측이 반드시 실시되어야 한다는 것을 알 수 있다. 또한, 본 건물의 경우에 휨과 사인장이 건물의 손상에 미치는 영향은 서로 유사함을 확인할 수 있었다.
- 4) 설계시 반영하지는 않았으나 발생될 것으로 예상하였던 지반-구조물 상호작용 효과는 예상보다 작았으며, 오히려 greenfield조건으로 예측한 결과가 계측치와 유사한 결과를 보였다. 따라서, 설계단계부터 지반-구조물 상호작용효과를 고려하여 굴착면 인접 구조물의 손상위험도를 평가하는 데에는 신중을 기해야 하며, 보다 정확한 평가를 위한 지반-구조물 상호작용에 대한 연구가 더욱 더 필요함을 느낀다.

### 6. 감사의 글

본 논문의 작성에 물심양면으로 힘써 주신 삼성건설 싱가폴 KPE C423현장 관계자 여러분께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

### 참 고 문 헌

1. 이선재, 송태원, 이윤상, 송영한, 김재권 (2005), "지보굴착에



- 따르는 인접건물의 손상위험도 평가사례: 설계단계”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 10호, 12월, pp.99~112.
2. Attewell, P.B. and Woodman, J.P. (1982), "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil", *Ground Engineering*, Vol.15 (8), pp13-22.
  3. Bjerrum, L. (1963), "Discussion Session IV", *Proc. European Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Wiesbaden, Germany, Vol.II, pp135-137.
  4. Boscardin, M.D. and Cording, E.J. (1989), "Building response to excavation-induced settlement", *Journal of Geotech. Engineering, ASCE*, Vol.115(1), pp.1-21.
  5. Boscardin, M.D., Cording, E.J. and O'Rourke, T.D. (1978), "Case studies of building behavior in response to adjacent excavation", Final Report prepared by the Univ. of Illinois at Urbana Champaign for the U.S. Dept. of Transportation, Report No. UMTA-IL-06-0043-78-2.
  6. Bowles (1988), *Foundation Design and Analysis*, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-hill, pp.658-661.
  7. Burland, J.B. (1995), "Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation", Invited Special Lecture, *1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, IS Tokyo '95*.
  8. Burland, J.B., Broms, B.B. and de Mello, V.F.B. (1977), "Behavior of foundations and structures. State-of-the-Art report", *Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Vol.II, Tokyo, Japan, pp.495-546.
  9. Burland, J.B., and Wroth, C.P. (1974), "Settlement of buildings and associated damage", *Proc. Conf. Settlement of structures*. Pentech Press, London., pp.611-654.
  10. Caspe, M.S. (1966), "Surface settlement adjacent to braced open cuts", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, Vol.92, pp.51-59.
  11. Clough, G.W. and O'Rourke, T.D. (1990), "Construction Induced Movements of Insitu Walls, Design and Performance of Earth Retaining Structures", Edited by Lambe, P.C. and Hansen, L.A., *Geotechnical Special Publication No.25, ASCE*, pp.869-884.
  12. Franzius, J.N. (2003), "Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence", Ph.D. Thesis, Dept of Civil Eng., Imperial College of Science, University of London, p.358.
  13. Mahr, J.W. and Marino, G.G. (1981), "Building response and mitigation measure for building damages in Illinois", *Proc. Workshop on Surface Subsidence Due to Underground Mining*, West Virginia Univ., pp.238-252.
  14. O'Rourke, T.D. (1975), "A Study of Two Braced Excavations in Sands and Interbedded Stiff Clays", Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
  15. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, State of the art volume, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A.C., pp.225-290.
  16. Polshin, D.E. and Tokar, R.A. (1957), "Maximum allowable non-uniform settlement of structures", *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, London, Vol.1, pp.402-405.
  17. Skempton, A.W. and Macdonald, D.H. (1956), "Allowable settlement of buildings", *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Vol.5, pp.727-768.
  18. Slope Indicator (2003), "EL Beam Sensors Standard and SC version", *Slope Indicator Co.*, p.24.
  19. Son, M.R. and Cording, E.J. (2005), "Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements", *Journal of Geotech. And Geoenv. Engineering, ASCE*, Vol.131(2), pp.162-177.