지반굴착시 지반/구조물 상호작용이 고려된 구조물의 거동 평가 연구
The Behavior of Adjacent Structures in Urban Excavation Considering Soil-Structure Interaction

양성우[1], Sung-Woo Yang, 김찬국[2], Chan-Kuk Kim, 황의석[3], Eui-Seok Hwang,
김주철[4], Zu-Cheol Kim, 김학문[5], Hak-Moon Kim

[1] (주)삼안 토질부 사원, Dept. of Geotechnical, Saman Corporation
[2] 단국대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Dankook Univ.
[3] 대림산업(주) 건설사업부, Construction Division, Daelim Industrial Co., Ltd.
[4] 삼성물산(주) 제2연육교 과장, Manager, Incheon Bridge Project, Civil Division Samsung Corporation
[5] 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Dankook Univ.

SYNOPSIS : In this study using the finite different programs, FLAC2D to define affection of the soil-structure interface in evaluating the behavior of adjacent structures according to excavation, and tried to compare each the results of different 46 cases which were various condition of stories, length and locations from the excavation site. In the result of the numerical analysis, the affection of the interface was affected by the building stories, locations from the excavation site and shape ratio(length/height). Therefore, in the considering soil-structure interaction in the damage assessment and the behavior of the adjacent structures when excavation, is important in more accurate evaluation of the movement of structure. Also, the interface modification factor were proposed which can consider the interface.

Key words : Soil-structure interaction, Interface, Damage assessment

1. 서 론

일반적으로 지반거동에 따른 인접구조물의 거동 예측은 구조물의 하중을 연성하중으로 작용하거나 구조물을 연속체 요소로 모델링한 수치해석적인 검토를 통하여 설계 및 시공시에 이를 반영하고 있다. 이는 인접건물과 지반 거동이 동일하게 일어나는 것으로 예측 평가되어 현장 실측치와는 차이가 발생하며 인접구조물의 손상평가시 보수적인 결과를 제시하게 되므로 보다 합리적인 구조물의 거동 손상평가를 위해서는 지반/구조물의 상호작용을 고려한 영향을 반영해야 한다.

본 연구에서는 유한차분해석 프로그램인 FLAC2D를 사용하여 지반굴착에 따른 인접구조물의 거동을 수치해석으로 평가할 시 지반/구조물 경계면(interface)의 영향을 규명하기 위하여 건물의 층수를 변화시킨 경우와 형상을 변화시킨 경우, 그리고 건물의 이격거리를 변화시킨 경우로 총 46개의 cases에 대한 결과를 상호 비교하였다. 그리고 지반/구조물 경계면에 의해 인접구조물 손상 평가인자의 변화하는 경향성을 분석하였고, 이로 인해 변화된 손상 평가인자를 보정할 수 있는 보정계수(modification factor)를 제안하였다. 또한 지반굴착에 따른 구조물의 안정성을 수치해석으로 평가할 시 지반/구조물 경계면의 적용에 대한 타당성을 검토하기 위하여 현장 구조물에 대한 수치해석을 수행한 후 이를 현장 계측자료와 비교·분석 하였다.

2. 해석조건 및 방법

2.1 해석조건

해석에 적용된 지반은 상부 구조물의 거동을 평가하기 위하여 상부지층은 지반 굴착시 지반의 변위가 크게 발생하는 토사 지반으로 국내에서 가장 넓게 분포되어 있는 풍화토를 적용하였고, 상부 구조물의 지지를 위해서 하부지층(G.L(-)4.5M이하)은 풍화암을 적용하였다. 지반의 물성치는 표 2에 보인바와 같이 대상현장의 지반조사 자료를 기초로 하여 적용하였다.

수치해석에서 사용한 요소망과 경계조건은 그림 1과 같다. 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 탄소성 모델을 사용하였으며, 좌·우측 경계부는 수평변위를 구속하였고, 하단의 경계부는 수직변위를 구속하였다. 2차원 유한 요소망은 지반 굴착에 의한 경계효과를 최소화하기 위해 흙막이 벽체로부터 굴착심도(H=18m)의 2.5H정도를 해석영역을 설정하였고, 하부 경계로는 1H이상으로 설정하였다. 벽체와 구조물 그리고 앵커는 탄성 보 요소(elastic beam element)로 모사하였고, 지반과 구조물의 사이에서 발생하는 상대변위를 모사하기 위해 지반과 구조물의 경계면에 인터페이스 요소를 삽입하였다.

2.2 경계면 요소

유한차분법(finite difference method)에서 경계면 요소는 경계물성치(interface properties)를 고려하여 평가할 수 있으며 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따른다. 비록 경계면의 수나 암반절리와 같은 복잡한 경계면의 경우에 있어서 제한은 없지만 일반적으로 유한차분법은 간단한 경계면 모델에 적합하고 좀 더 복잡한 경계면 모델에 있어서는 개별요소법(distinct element method)이 사용된다. 연직방향의 응력-변형 관계는 선형적이라 가정하고 수직강성도(normal stiffness, k_n)에 의해 지배된다. 수평방향으로의 전단은 전단강성도(shear stiffness, k_s)에 의해 지배되고, 전단저항력 F_s는 점착력(c)와 내부마찰각(ø)에 의해 제한된다(Cundall and Hart 1992).

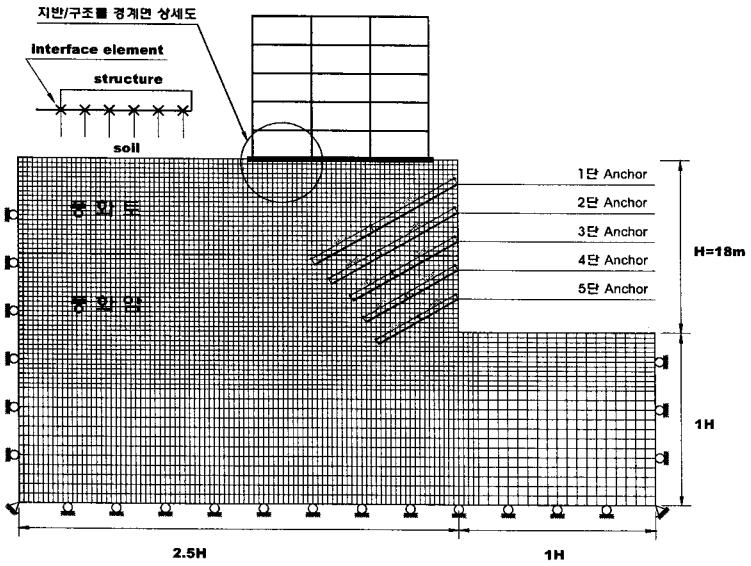

그림 1. 요소망 및 경계조건

$$\Delta\sigma_n = k_n \Delta u_n \qquad (1)$$

$$|F_s| \le cL + \tan\phi F_n = F_{smax}$$

$$\Delta F_s = k_s \Delta u_s \qquad (2)$$

만약, $|F_s| \ge F_{smax}$이면 $F_s = F_{smax}$

여기서, $\Delta\sigma_n$: 유효 수직응력 증가량

Δu_n : 수직 변형 증가량

Δu_s : 전단 변형 증가량

수치해석시 구조물 기초와 기초지반의 경계물성치중 수직강성도(k_{nj})와 전단강성도(k_{sj})는 Kulhawy (1976), Rosso(1976), Bandis 등(1983)이 제안한 식을 통하여 산정하였다.

$$k_{nj} = \frac{E_m E_r}{s(E_r - E_m)} \qquad k_{sj} = \frac{G_m G_r}{s(G_r - G_m)} \tag{3}$$

기초지반의 탄성계수는 풍화토의 일반적인 물성치인 60 MPa을 적용하였으며, 전단탄성계수는 이 (1999)가 국내 화강풍화토에 대하여 공진주시험과 반복삼축시험을 실시하여 제안한 전단탄성계수중 변형율 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ %에 따른 전단탄성계수를 사용하였고, 구조물 기초와 기초지반의 간격(space)는 1mm로 가정하였다. 수치해석시 구조물 기초와 기초지반의 경계물성치중 내부마찰각(ϕ_j)과 점착력(C_j)은 KS F 2343-92에 의거하여 직접전단 시험을 수행하여 산정하였다.

표 1. 수치해석에서 사용한 구조물과 지반의 경계요소 물성치

구 분	수직강성도 (k_{nj}, MPa/mm)	전단강성도 (k_{sj}, MPa/mm)	점착력 (c_j, t/m^2)	내부마찰각 (ϕ_j, °)	인장강도 (σ_{tj}, t/m^2)
물성치	0.602	0.231	1.06	37.04	0

3. 해석결과 및 분석

3.1 대상현장 구조물에 대한 수치해석 평가

지반굴착에 따른 구조물의 안정성을 수치해석으로 평가할 시 지반/구조물의 인터페이스 적용에 대한 타당성에 대한 검토가 필요하다. 대상현장의 굴착공법을 살펴보면 엄지말뚝(H-Pile 300×300×10×15, C.T.C 1,600~1,800)과 토류판 그리고 현장타설 주열식 말뚝(C.I.P : Φ400, C.T.C 400)을 흙막이 벽체로 하고 Ground Anchor(Φ12.7mm×4ea)를 지지체로 사용하고 있으며, 최종굴착고는 GL. -18.2m까지 굴착하였다. 시추조사 성과보고서에 의하면 조사부지의 지층구성 상태는 상부로부터 매립층, 풍화토, 풍화암의 순으로 분포되어 있으며, 주변현황 및 계측기 위치 평면도는 그림 2와 같고, 대표적인 현장의 지질주상도와 단면은 그림 3과 같다.

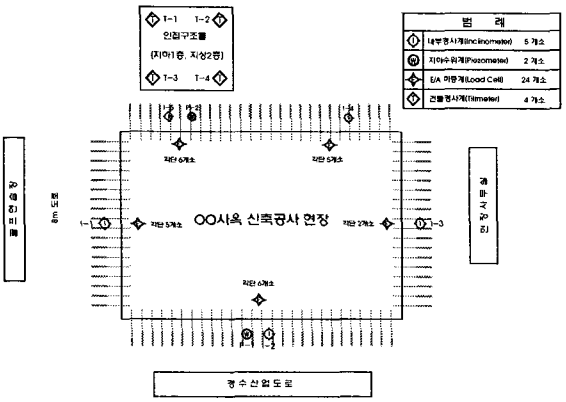

그림 2. 주변현황 및 계측기 설치 위치도

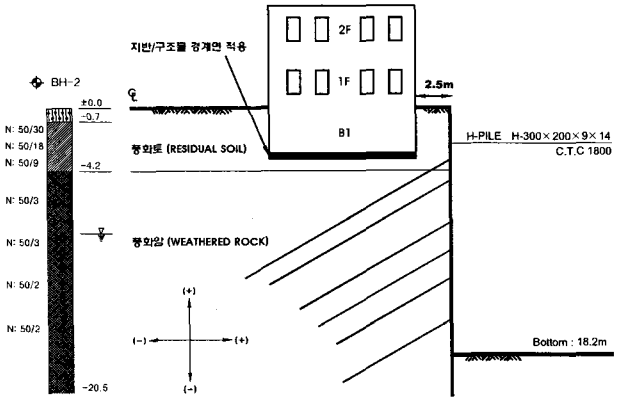

그림 3. 대상현장의 단면과 지질주상도

굴착공사가 진행됨에 따라 대상 현장 구조물과 인접한 벽체 수평변위는 최종굴착시 최대 67.48mm가 발생하였으며, 건물의 기울기를 측정한 결과 1/1236의 기울기를 나타내고 있었다.

대상현상의 수치해석시 적용된 지반물성치는 지반조사 자료를 기초로 하여 평가하였으며, 구조물기초와 기초지반의 경계물성치(interface properties)는 Atkinson et al.(1989), Kulhawy(1976), Rosso(1976), Bandis(1983)등이 제안한 식에 의한 값과 직접전단실험을 통해 물성치를 산정하였다.

수치해석에서 적용된 지반물성치 및 구조물 기초와 기초지반의 경계물성치(interface properties)는 표 1과 표 2와 같이 적용하였다.

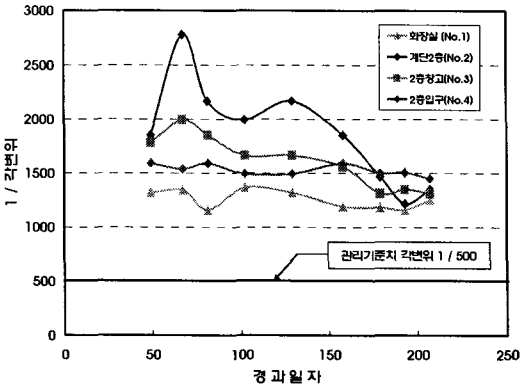

그림 4. 건물의 각변위 변화

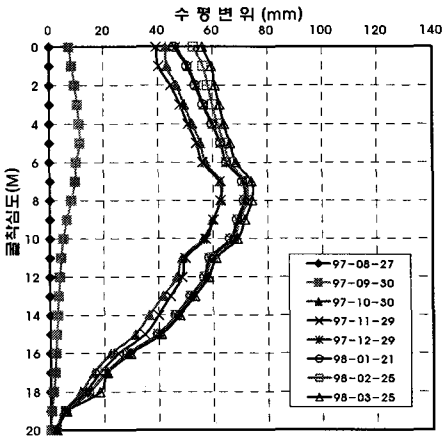

그림 5. 벽체 변위 양상

표 2. 수치해석에서 사용한 지반의 물성치

토 층	단위중량 (γ, t/m^3)	탄성계수 (E, t/m^2)	포아송비 (ν)	ϕ (°)	C (t/m^2)
매립층	1.8	2000	0.35	27	0
풍화토	1.9	6000	0.33	37	1.0
풍화암	2.1	10000	0.30	38	3.0

현장에서 측정된 건물의 거동은 건물옥상의 4 Corner에 설치된 건물경사계 자료를 참조하였다. 검토결과, 구조물 기초와 기초지반의 경계면을 고려하지 않았을 경우의 인접건물의 기울기는 1/1091로 현장측정치 1/1236에 비하여 약 12%의 차이를 보이나 경계면을 고려하였을 경우 인접건물의 기울기는 1/1277로서 현장측정치에 비해 다소 크지만 오차가 약 3%로 근접함을 알 수 있었다. 이처럼 지반굴착에 따른 인접구조물의 거동 및 손상평가시 지반/구조물의 인터페이스의 영향을 고려하는 것이 보다 정밀하고 합리적인 평가임을 알 수 있었다.

3.2 구조물의 층수에 따른 거동평가

본 절에서는 앞서 현장 구조물에 대한 수치해석결과를 바탕으로 구조물 기초와 기초지반 경계면의 영향을 보편화시키기 위하여 건물의 층수를 변화시켰을 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 이때의 건물의 폭은 18m, 높이는 층당 3m이고 굴착지점으로부터 3m이격되어 있는 것으로 설정하였다. 또한, 지반/구조물 경계면의 영향을 고려하지 않은 모델해석 결과를 기준으로 경계면에 의한 영향을 고려해 줄 수 있는 보정계수(modification factor)를 제안하여 각변위(β, angular distortion), 수평변형율(ε_L, lateral strain), 처짐비(Δ/L, deflection ratio)의 변화를 비교하고자 하였다.

$$M^{ad} = \frac{\text{angular distortion}^i}{\text{angular distortion}} = \frac{\beta^i}{\beta} \quad (4)$$

$$M^{la} = \frac{\text{lateral strain}^i}{\text{lateral strain}} = \frac{\varepsilon_L{}^i}{\varepsilon_L} \quad (5)$$

$$M^{de} = \frac{\text{deflection ratio}^i}{\text{deflection ratio}} = \frac{\Delta^i/L^i}{\Delta/L} \quad (6)$$

여기서 M^{ad}는 각변위에 대한 보정계수, M^{la}는 수평변형율에 대한 보정계수, M^{de}는 처짐비에 대한 보정계수를 나타내며, 윗첨자 i는 경계면을 고려한 손상 평가인자를 의미한다.

그림 6~8은 건물의 층수가 증가함에 따른 구조물의 손상 평가인자들의 변화를 보여주는 그림이다. 건물의 층수가 높아질수록 건물의 하중이 증가하기 때문에 대체적으로 3층 이상이 되는 건물에서부터는 각변위와 수평변형율, 처짐비 모두 급격히 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 경계면을 고려했을 경우에는 그렇지 않은 경우에 비해 3층 이하에서는 30~50 % 작게 발생하였고, 층수가 올라갈수록 그 차이가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

그림 9는 손상 평가인자에 대한 보정계수의 변화를 보여주는 그림이다. 보정계수가 1에 가까울수록 건물이 지반과 동일하게 거동함을 나타내며 1에서 멀어질수록 지반/구조물 상호거동이 고려됨을 알 수 있다. 보정계수는 3층 이상의 건물에서는 층수가 증가할수록 보정계수도 증가하여 9층 건물의 경우 모두 1에 가까워짐을 알 수 있었으며, 건물의 층수가 5층 이하에서는 감소하는 경향을 나타내었고 층수가 작아질수록 각변위에 대한 보정계수(M^{ad})는 0.6으로, 수평변형율에 대한 보정계수(M^{la})는 0.4로, 그리고 처짐비에 대한 보정계수(M^{de})는 0.8의 값에 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다.

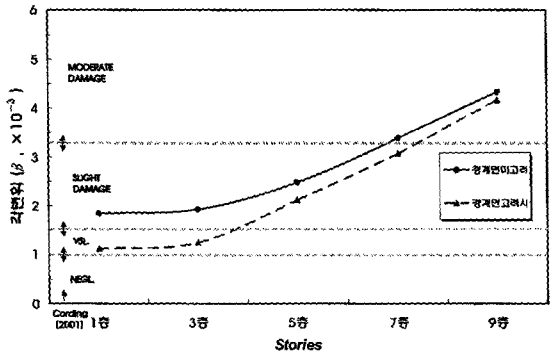

그림 6. 건물 층수에 따른 각변위(β)

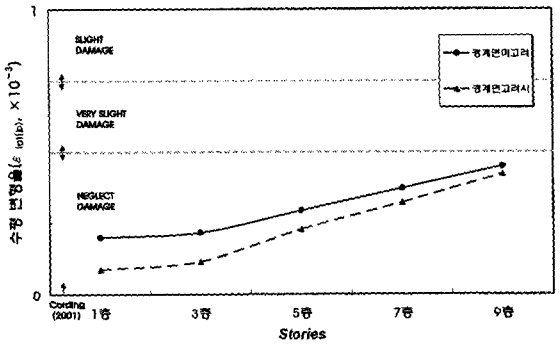

그림 7. 건물 층수에 따른 수평변형율(ε_L)

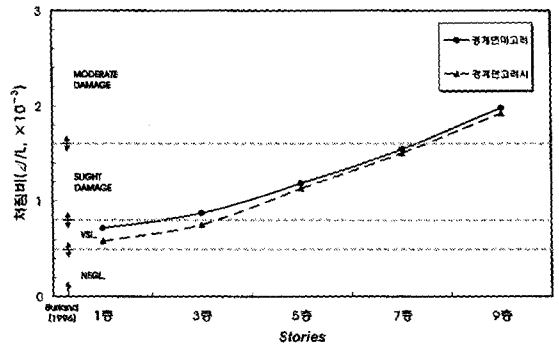

그림 8. 건물 층수에 따른 처짐비(Δ/L)

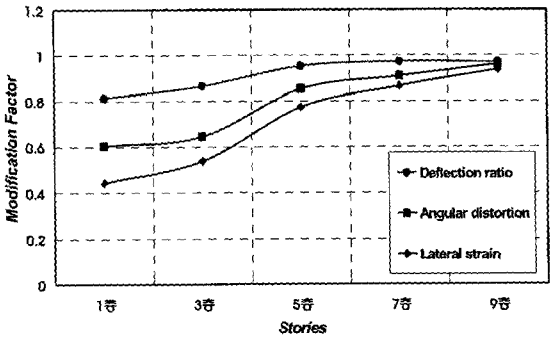

그림 9. 건물 층수에 따른 보정계수

3.3 구조물의 이격거리에 따른 거동평가

지반 굴착시 인접한 건물의 이격거리에 따른 지반/구조물 상호작용을 알아보기 위하여 경계면을 고려했을 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 이때의 건물의 폭은 18m, 높이는 1층, 5층, 9층 건물에 대하여 최종굴착깊이(H)에 대한 이격거리(X)인 이격거리비(X/H)를 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83의 조건으로 손상 평가인자의 변화를 비교·분석 하였다.

그림 10 ~ 12는 건물의 이격거리별 층수를 변화시켰을 때 손상 평가인자의 변화를 보여주는 그림이다. 건물의 각변위와 처짐비를 살펴보면 이격거리가 0.33H인 지점에서 손상 평가인자가 최대인 경향을 확인할 수 있는데, 이는 벽체변위 형태가 측방 배부름(bulging) 형태를 나타내고 있어 배면지반이 0.33H 주변에서 최대침하를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 이격거리에 대한 손상 평가인자는 대체적으로 이격거리가 증가할수록 건물의 층수가 낮아질수록 작아지는 경향을 확인할 수 있었으며, 경계면을 고려했을 경우에는 이격거리 0.17H의 5층 이하의 건물에 있어 경계면을 고려하지 않은 경우에 비해 각변위의 경우 39 ~ 18% 감소하였고, 수평변형율의 경우 56 ~ 23%, 그리고 처짐비의 경우 22 ~ 13% 작게 발생하였고 이격거리가 증가할수록 그 차이가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 그림 13은 손상 평가인자중 각변위에 대한 보정계수의 변화를 보여주는 그림이다. 보정계수는 5층 이하의 건물에서 이격거리 0.50H 이내에서 감소하는 경향을 볼 수 있었고, 특히 0.33H 이내에서는 급격히 감소하는 경향성을 볼 수 있었다.

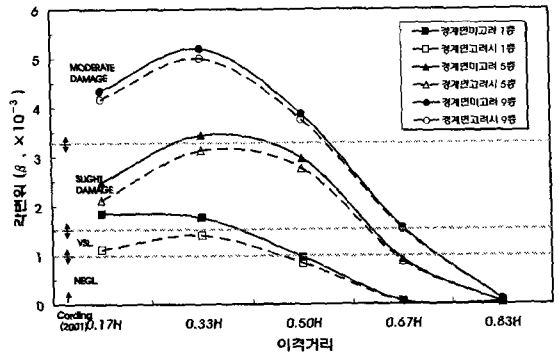

그림 10. 건물 이격거리에 따른 각변위(β)

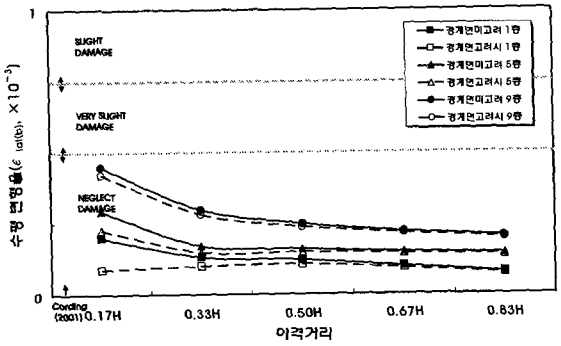

그림 11. 건물 이격거리에 따른 수평변형율(ε_L)

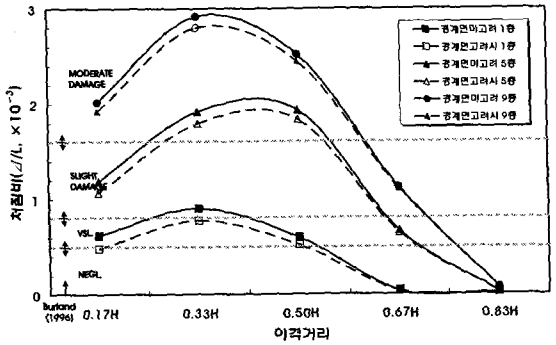

그림 12. 건물 이격거리에 따른 처짐비(⊿/L)

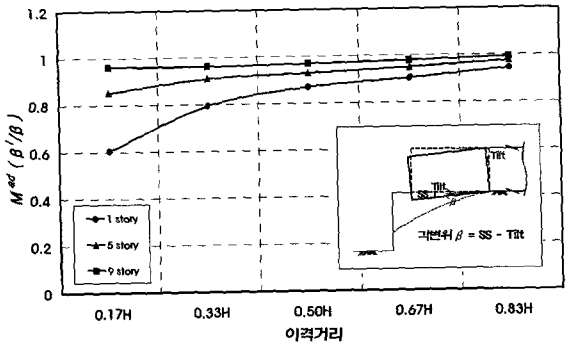

그림 13. 이격거리에 따른 각변위보정계수(M^{ad})

3.4 구조물의 형상에 따른 거동평가

지반 굴착시 인접한 건물의 형상에 따른 지반/구조물 상호작용을 알아보기 위하여 경계면을 고려했을 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 이때의 건물의 높이(h)는 6m인 2층 건물에 대하

여 구조물의 높이(h)에 대한 구조물의 길이(L)인 형상비(L/h)를 1, 2, 3의 조건으로 손상 평가인자의 변화를 비교·분석 하였다.

그림 14 ~ 15는 건물의 형상을 변화시켰을 때 손상 평가인자의 변화를 보여주는 그림이다. 건물의 형상비가 커질수록 건물의 길이가 증가하기 때문에 각변위와 처짐비 모두 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 경계면을 고려했을 경우에는 형상비가 2이상의 건물에 있어 경계면을 고려하지 않은 경우에 비해 각변위의 경우 35 ~ 40 %, 처짐비의 경우 15 ~ 17 % 감소하였고, 형상비가 작아질수록 그 차이가 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 그림 16 ~ 17은 손상 평가인자에 대한 보정계수의 변화를 보여주는 그림이다. 보정계수는 건물의 형상비가 감소할수록 모두 1에 가까워짐을 알 수 있었으며, 건물의 형상비가 2이상의 건물에서는 형상비가 커질수록 각변위에 대한 보정계수(M^{ad})는 0.8로, 처짐비에 대한 보정계수(M^{de})는 0.6의 값에 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다.

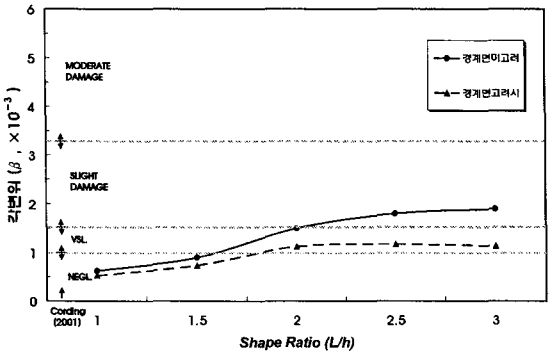

그림 14. 건물 형상비에 따른 각변위(β)

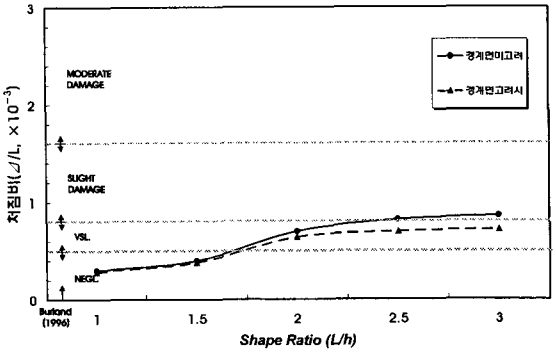

그림 15. 건물 형상비에 따른 처짐비(⊿/L)

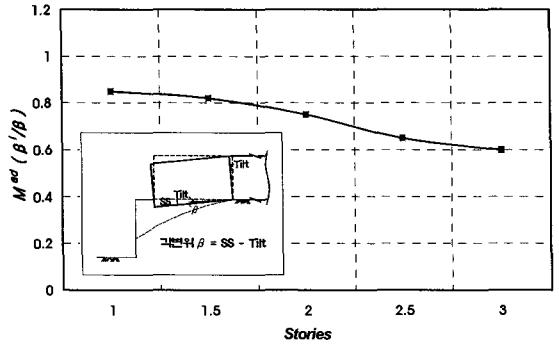

그림 16. 형상비에 따른 각변위보정계수(M^{ad})

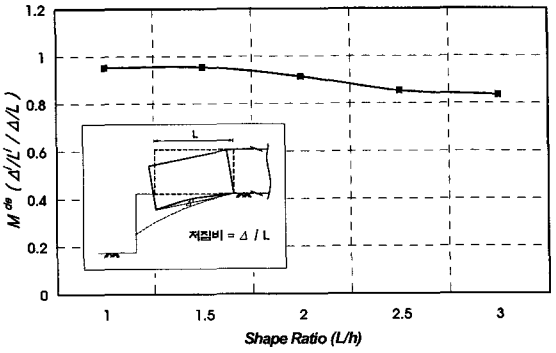

그림 17. 형상비에 따른 처짐비보정계수(M^{de})

4. 결 론

본 연구에서는 풍화토 지반 굴착시 지반/구조물 상호작용이 구조물 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 건물의 층수와 형상, 그리고 이격거리를 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 구조물 기초와 기초지반의 상호작용을 고려하기 위하여 경계면(interface)을 적용하여 인접구조물 손상 평가인자의 변화하는 경향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 대상현장 구조물에 대한 검토결과, 구조물 기초와 기초지반의 경계면을 고려하지 않았을 경우의 인접건물의 기울기는 현장측정치에 비하여 다소 차이를 보이나 경계면을 고려하였을 경우 현장측정치에 근접함을 알 수 있었다. 이처럼 지반굴착에 따른 인접구조물의 거동 및 손상평가시 지반/구조물 경계면의 영향을 고려하는 것이 보다 정밀하고 구체적인 평가임을 알 수 있었다.

(2) 구조물의 층수에 따른 검토결과, 5층 이하의 건물에서는 경계면의 영향이 증가하는 경향을 나타내었고 층수가 낮아질수록 각변위에 대한 보정계수(M^{ad}), 수평변형율에 대한 보정계수(M^{la}), 그리고 처짐비에 대한 보정계수(M^{de})는 일정한 값에 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 5층 이하의 건물에 있어서 지반/구조물 경계면을 고려한 영향을 반영한 구조물의 거동 및 손상평가가 이루어져야 함을 알 수 있었다.

(3) 구조물의 이격거리에 따른 검토결과, 경계면의 영향은 이격거리 0.50H 이내에서 증가하는 경향을 볼 수 있었고, 이격거리 0.50H이상에 위치하는 5층 이상의 건물에 있어서는 현저하게 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 인접구조물의 이격거리에 따른 경계면 고려 여부가 보다 정확한 구조물의 거동을 평가할 수 있는 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

(4) 구조물의 형상에 따른 검토결과, 형상비(L/h)가 2이상인 구조물의 경우 에는 경계면의 영향이 증가하는 경향을 나타내었고 형상비가 커질수록 각변위에 대한 보정계수(M^{ad})와 처짐비에 대한 보정계수(M^{de})는 감소하다가 형상비가 3이상인 경우에는 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 형상비(L/h)에 따른 지반/구조물 경계면을 고려한 영향을 반영해야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김창용 (1998), "도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성예측과 인접 구조물 손상평가에 관한 연구", 박사학위 논문, 한양대학교.
2. 김학문 (1997), "도심지 지반굴착에서 인접건물의 손상영향과 보호", 대한 토목학회 논문집.
3. 유충식 (2002), "도심지 깊은 굴착시 주변 건물 및 매설관 손상평가", 대한토목학회 학술발표회논문집(II).
4. Burland, J. B. and Broms, B. B. and de Mello, V. F. B. (1977), "Behavior of foundations and structures", State of the Art Report. Proc., 9th Int'l Conf. on SMFE, II, Tokyo, Japan, pp. 495-546.
5. Cording, E. J. and Long, J. H., Son, M., Laefer, D. F. (2001), "Modelling and analysis of excavation-induced building distortion and damage using a strain-based damage criterion", London Conference for Responses of Buildings to Excavation-Induced Ground Movements in London.
6. Itasca Consulting Group, Inc., FLAC Ver3.3, User's Manual, 1996.
7. Laefer, D. F. (2001), "Prediction and assessment of ground movement and building damage induced by adjacent excavation", Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
8. Son, M. (2003), "The Response of buildings to excavation-induced ground movements", Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana- Champaign.