

지반굴착시 인접구조물의 손상 영향 평가에 대한 수치해석 Numerical Analysis for the Assessment of Building Damage in Urban Excavation

이민근¹⁾, Min-Keun Lee, 황의석²⁾, Eui-Seok Hwang, 김학문³⁾, Hak-Moon Kim

¹⁾ (주)경동기술공사 지반공학부 사원, Kyong Dong Engineering Co., Ltd.

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 박사수료, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ., Eng., Dan. Univ.

³⁾ 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environ., Eng., Dan. Univ.

SYNOPSIS : The protection of adjacent structures in urban excavation has been an important issue. But the research on the interaction between ground movements and adjacent structure has been scarce, therefore this study was necessitated. Current design practice for the prediction of excavation-induced ground movements heavily rely on empirical method.

In this study, damage levels of brick building are examined closely by means of angular distortion, deflection ratio, horizontal strain.

The results of numerical analysis indicated that the movement of actual building was 60~65% of the ground movement, while angular distortion was 45~65%. Also numerical analysis for the assessment of brick building can be applied to the building protection at various construction stages.

Key words : angular distortion, deflection ratio, horizontal strain.

1. 서론

최근 지반굴착시 지반거동에 의한 지중구조물 및 인접구조물들의 피해사례는 건설수요와 더불어 꾸준히 증가하고 있는 실정이며, 지반의 거동이 주변 구조물에 미치는 영향에 대한 관심이 높아짐에 따라 도심지 굴착공사비의 많은 부분이 지반거동을 억제하고 조절하는데 할애되고 있으며, 지반굴착에 따른 인접구조물의 손상정도를 예측하는 부분이 도심지 굴착공사의 계획, 설계, 시공에서 차지하는 비중이 날로 높아지고 있다.

기존의 해석방법들은 지반굴착에 의한 지표침하를 예측하고, 예측된 지표침하량을 통하여 간접적으로 인접구조물의 손상을 평가하므로 실제적인 인접구조물의 손상 계측치와는 차이를 보이며, 또한 지반조건 및 인접구조물의 다양한 요인을 반영하지 못하여 인접구조물에 발생하는 손상정도를 규명하는 연구가 미흡한 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 지반굴착시 인접구조물의 손상정도와 영향을 규명하기 위해서 개별요소 모델을 사용하여 수치해석 연구를 수행하였으며, 지반굴착에 따른 인접구조물의 손상 영향을 평가하기 위해서 지반조건, 구조물의 형상, 굴착지점으로부터의 구조물과의 이격거리 등의 다양한 현장조건을 반영하여 지반굴착시 인접구조물의 손상정도와 그 영향을 규명하는데 목적이 있다.

2. 해 석

2.1 수치해석의 개요

본 연구는 지반굴착시 인접구조물의 손상 정도 및 영향을 평가하기 위하여 표 1에 보인바와 같이 지반 조건, 구조물의 형상, 지반 굴착지점과 인접 구조물의 이격거리(0.2H~2.0H) 등에 따른 10개의 조건으로 2차원 개별요소법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 지반 및 구조물의 대표단면은 다음 그림 1과 같다,

표 1. 수치해석 개요

| 지반조건 | 굴착 깊이 (H) | 구조물의 이격거리 | 구조물 |
|-------|-----------|-----------|------------------------|
| 모래 지반 | 10m | 0.2H | 2층 구조물 (h:6m L:18m) |
| | | 0.4H | |
| | | 0.6H | |
| | | 0.8H | |
| | | 1.0H | |
| | | 1.2H | |
| | | 1.4H | |
| | | 1.6H | |
| | | 1.8H | |
| | | 2.0H | |

여기서, H : 굴착 깊이
 h : 구조물의 수직 높이
 L : 구조물의 수평 길이

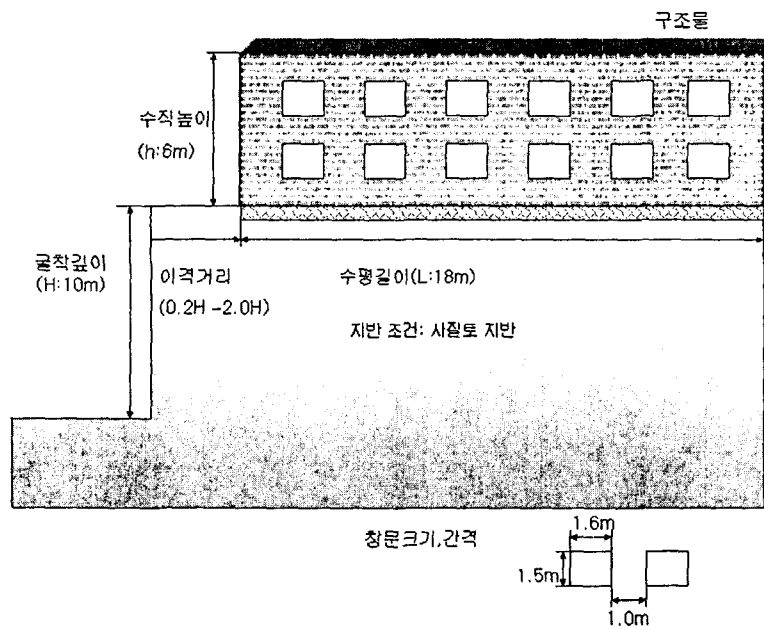


그림 1. 지반 및 구조물의 가정된 대표단면

2.1.1 지반 및 구조물의 물성치

다음 표 2는 연구수행시 가정된 사질토 지반의 물성치이며, 표 3은 인접 조적조 구조물의 물성치로 벽돌은 표준형 점토 벽돌을 모르타르의 줄눈 두께는 10mm로 길이쌓기 방법으로 쌓은 조적식 구조물로 연구를 수행하였다.

표 2. 지반 물성치

| 물성치 | 단위중량 ($r_t, t/m^3$) | 탄성계수 ($E, t/m^2$) | 점착력 ($c, t/m^2$) | 포아송비 (ν) | 내부마찰각 (ϕ) | bulk modulus K(pa) | shear modulus G(pa) |
|-------|--------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 사질토지반 | 1.9 | 7500 | 0 | 0.35 | 30 | 8.3E7 | 2.7E7 |

표 3. 구조물의 물성치

| 개요 | 물성치 | 크기 (mm) | 강도(kgf/cm ²) | bulk modulus K(pa) | shear modulus G(pa) |
|---------|-----|-----------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| 벽돌 | | 210×90×57 | 210 | 8.3E9 | 3.8E8 |
| 모르타르 | | 10 | 110 | - | - |
| 콘크리트 기초 | | 600 | 230 | 1.38E10 | 1.04E10 |

2.1.2 Joint Element 모델링

Joint properties는 구조물 모델링에 있어서 블록과 블록, 블록과 모르타르, 기초와 지반 사이의 접촉면에 대한 요소로 그림 2와 같이 나타내었으며, 지반굴착시 굴착에 의한 영향을 받는 조적식 구조물의 joint 의 물성치는 표 4와 같다.

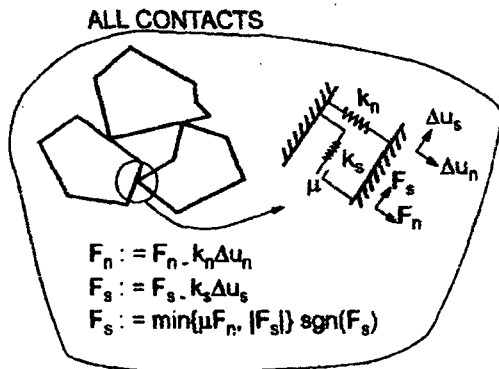


표 4. Joint properties

| 항 목 | 물성치 | joint normal stiffness k_n (pa) | joint shear stiffness k_s (pa) |
|-------------|-----|-----------------------------------|----------------------------------|
| 모래지반 | | 7.0E5 | 7.0E5 |
| 블록-블록(모르타르) | | 2.0E7 | 1.0E7 |
| 콘크리트 기초-지반 | | 2.0E8 | 1.0E8 |

F_n : joint normal force, ΔU_n : joint normal displacement

F_s : joint shear force, ΔU_s : joint shear displacement

그림 2. k_n 및 k_s 개요

3. 해석결과 및 분석

3.1 인접구조물의 이격거리에 따른 지반 및 구조물의 거동

지반 굴착시 인접구조물의 이격거리(0.2H~2.0H)에 따른 수평, 수직변위를 평가하여 지반과 구조물의 상호거동을 규명하고, 인접구조물의 손상평가를 위하여 굴착지점으로부터 인접구조물의 이격거리에 따른 수평, 수직변위량을 산정해 보았다.

3.1.1 구조물의 이격거리별 지반 및 구조물의 수직, 수평변위에 따른 거동

다음 그림 3은 10m 지반 굴착시 굴착지점으로부터의 이격거리에 따른 인접구조물의 수직변위를 지반의 수직변위와 함께 도식한 결과이다. 지반의 수직변위에 비해 인접구조물의 수직 변위는 60%의 값을 나타낸다. 표 5에서 각변위를 살펴보면 지반은 1/86~1/666, 구조물은 1/150~1/1500의 각변위를 나타내고, 구조물의 각변위가 지반의 각변위에 비해 40%~55%정도 감소됨을 확인 할수 있다.

그림 4는 10m 지반 굴착시 굴착지점으로부터 이격거리에 따른 인접 구조물의 수평변위를 지반의 수평 변위와 함께 나타낸 그림이다. 지반의 수평변위에 비해 인접구조물의 수평 변위는 65%의 값을 나타내며, 이는 인접구조물과 지반, 조적식 구조물의 블록과 블록사이의 저항으로 인해 구조물의 수평 변위가 감소하는 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 표 5에서 수평변형률을 살펴보면 지반은 0.188%~0.022%, 구조물은 0.125%~0.01%의 수평 변형률을 나타내며, 구조물의 수평변형률이 지반의 수평변형률에 비해 35%~55%정도 감소됨을 확인할 수 있다.

표 5. 이격거리에 따른 지반 및 구조물의 각변위와 수평변형률

| 항목 | 이격거리 | 0.2H | 0.6H | 1.0H | 1.4H | 2.0H |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | 각변위 | 지반 | 1/86 | 1/150 | 1/214 |
| | 구조물 | 1/150 | 1/240 | 1/375 | 1/666 | 1/1500 |
| 수평변형률(%) | 지반 | 0.188 | 0.136 | 0.083 | 0.05 | 0.022 |
| | 구조물 | 0.125 | 0.078 | 0.045 | 0.028 | 0.01 |

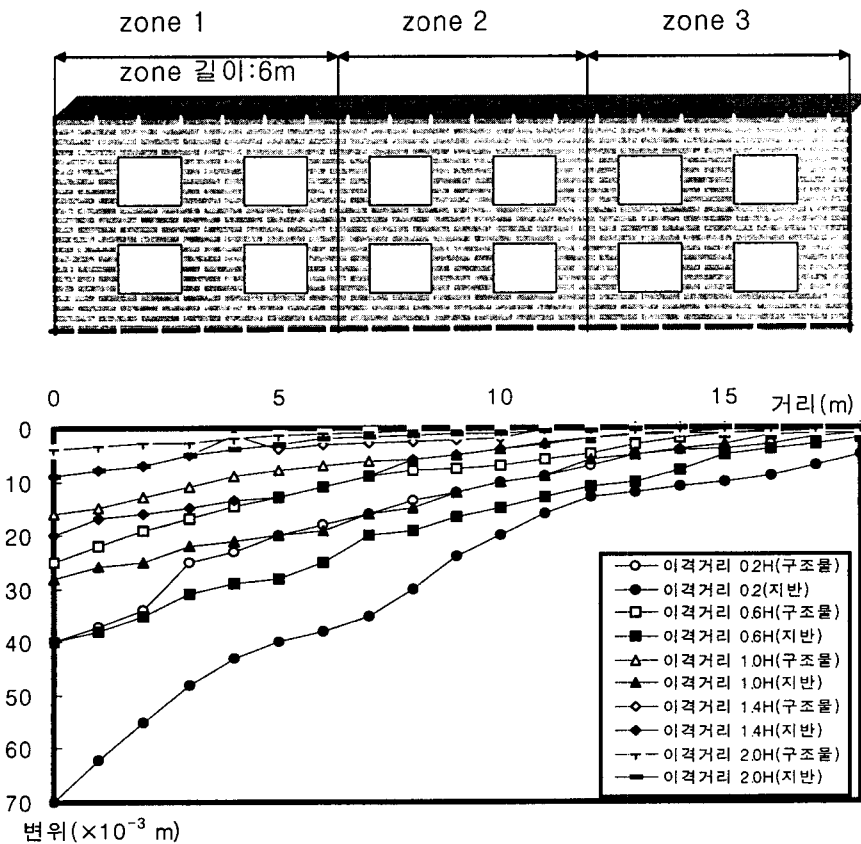


그림 3. 굴착에 따른 지반 및 구조물의 수직변위

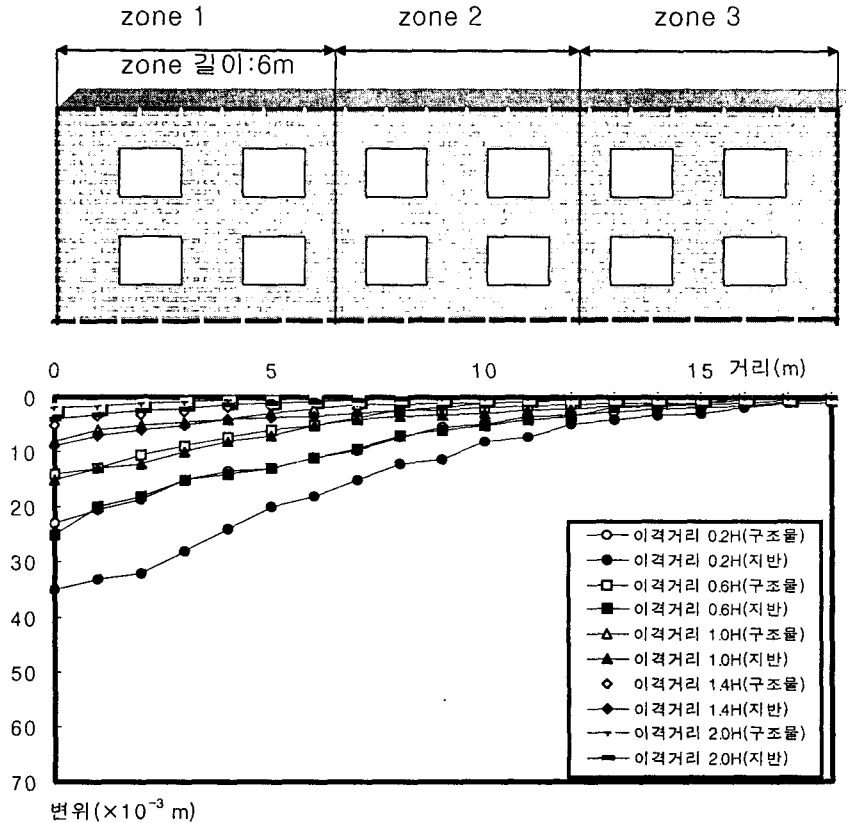


그림 4. 굴착에 따른 지반 및 구조물의 수평변위

3.2 구조물의 수평변형률과 처짐비에 의한 손상 평가

굴착깊이 10m를 단계별로 굴착시, 굴착지점과 인접구조물의 이격거리에 따른 손상정도를 Boscardin and Cording(1989)이 제시한 수평변형률과 처짐비에 따른 손상수준을 다음 그림 5에 나타내었고, 표 6에 이격거리에 따른 손상수준과 손상정도를 나타내었다.

이격거리가 0.2H~0.4H에서는 category 4 and 5로써 손상 정도가 심각~매우 심각이고, 굴착 단계별로 처짐비가 현저히 증가되는 값을 보이고 있는 것을 확인할 수 있고, 0.6H~1.0H에서는 category 3으로서 손상 정도가 보통정도를 나타내고 있고, 1.2H~1.4H에서는 category 2로써 손상정도가 작으며, 1.6H~1.8H에서는 category 1로써 손상정도가 아주 작고, 2.0H에서는 손상정도를 무시할 수 있다. 따라서 수평 변형률과 처짐비를 이용한 인접건물의 손상에 대한 영향 평가는 이격거리가 1.0H 이상 떨어진 인접건물에서는 굴착에 따른 손상정도가 작음을 확인 할수 있다.

표 6. 수평변형률과 처짐비에 의한 손상 평가

| 굴착깊이 | 이격거리 | 손상수준 | 손상정도 |
|------|------------------|------|--------------|
| 10m | 0.2H, 0.4H | 4~5 | 심각에서 매우심각 |
| | 0.6H, 0.8H, 1.0H | 3 | 보통 (우려내지 심함) |
| | 1.2H, 1.4H | 2 | 작음 |
| | 1.6H, 1.8H | 1 | 아주작음 |
| | 2.0H | 0 | 무시가능 |

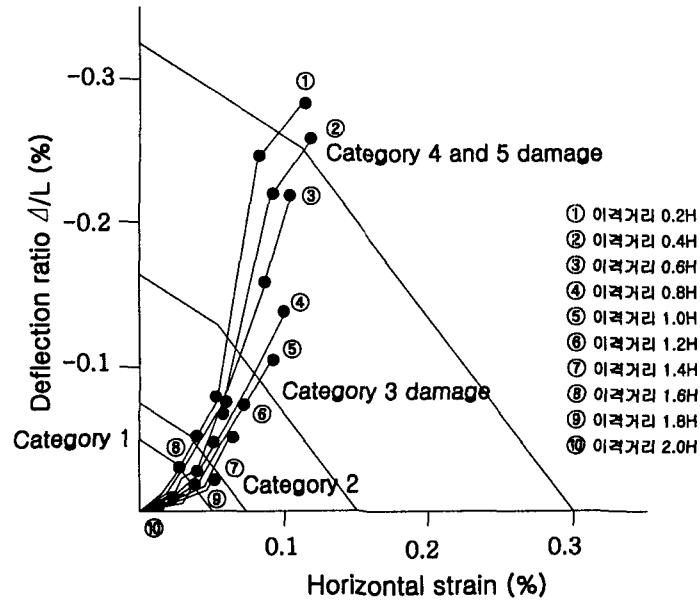


그림 5. 수평변형률과 처짐비에 따른 손상수준

3.3 구조물의 각변위와 수평변형률에 의한 손상 평가

굴착깊이 10m를 단계별로 굴착시, 굴착지점과 인접구조물의 이격거리에 따른 손상정도를 Boscardin and Cording(1989)이 제시한 각변위와 수평변형률에 따른 손상수준 도표인 다음 그림 6에 나타내었고, 표 7에 이격거리에 따른 손상수준과 손상정도를 나타내었다.

각변위 및 수평 변형률에 따른 건물 손상수준을 살펴보면 이격거리 0.2H~0.8H에서는 보통단계로써 우려내지 심한 상태이며, 이격거리 1.0H~1.6H에서는 경미한 단계이고, 이격거리 1.8H에서는 매우 경미한 단계이며 이격거리 2.0H이상은 무시 가능한 단계이다. 따라서 각변위와 수평변형률을 이용한 지반굴착시 인접건물의 손상에 대한 영향평가는 이격거리가 1.0H 이상 떨어진 인접건물에서는 굴착에 따른 손상 정도가 작음을 확인 할수 있다.

단계별 굴착에 따라서 인접 구조물의 손상 정도가 무시가능한 상태에서 매우 경미, 경미, 우려내지 심한 상태로 되면서 구조물에 손상을 초래함을 확인 할 수 있다. 그러므로, 이격거리에 따라서 단계별 굴착시에는 초기 굴착 단계에서 최종 굴착단계까지 구조물의 손상 정도가 변하는 시점을 주의깊게 관찰하여야 할 것이다.

표 7. 각변위와 수평변형률에 의한 손상 평가

| 굴착깊이 | 이격거리 | 손상수준 | 손상정도 |
|------|------------------------|------|---------------|
| 10m | 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H | 3 | 보통 (우려 내지 심함) |
| | 1.0H, 1.2H, 1.4H, 1.6H | 2 | 작음 |
| | 1.8H | 1 | 아주 작음 |
| | 2.0H | 0 | 무시 가능 |

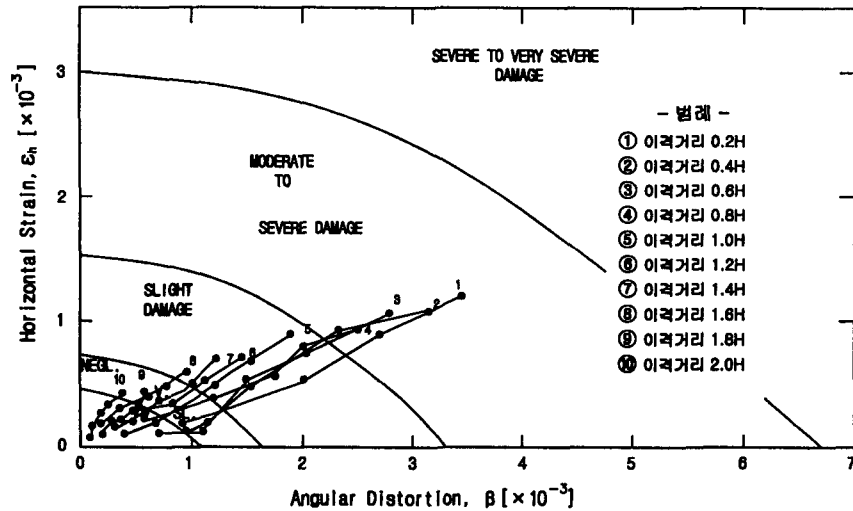


그림 6. 각변위와 수평 변형률에 따른 건물 손상수준

4. 결론

지반 굴착시 굴착지점으로부터 이격거리(0.2H~2.0H)에 따른 인접구조물의 손상정도를 각변위, 처짐비, 수평변형률을 이용하여 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지반굴착시 지반 수직 및 수평변위에 비해 인접구조물의 수직 변위는 60%, 수평변위는 65%의 값을 나타내며, 이는 인접구조물과 지반, 조적식 구조물의 블록과 블록 사이의 저항으로 인해 구조물의 수직변위가 감소하는 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

(2) 수평변형률과 처짐비에 의한 손상 평가시 이격거리 1.0H 이내의 인접구조물은 손상 정도가 보통(우려내지 심함) 이상이며, 이격거리가 1.2H 이상에서는 손상 정도가 작으며, 이격거리가 2.0H 이상에서는 손상 정도를 무시 할 수 있었다.

수평변형률과 각변위에 의한 손상 평가시 이격거리 0.8H 이내의 인접구조물은 손상 정도가 보통(우려내지 심함) 이상이며, 이격거리가 1.0H 이상에서는 손상 정도가 작으며, 이격거리가 2.0H 이상에서는 손상 정도를 무시 할 수 있었다.

또한 굴착 단계에 따라 손상의 영향 범위가 크게 나타나므로, 지반 굴착시 인접 구조물의 손상 평가시 굴착 단계에 따라 손상 평가가 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

1. 김명모, 양구승(1997) “도심지 깊은 굴착으로 발생하는 지반 지표침하 분석”, 한국지반공학회 논문집.
2. 김학문(1997), “도심지 지반굴착에서 인접건물의 손상영향과 보호”, 대한토목학회 논문집.
3. 배규진(1989), “토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구”, 연세대학교 박사학위논문.
4. 최성웅, 정소걸(1999) “Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반사면의 안정성 해석”, 한국암반공학회.
5. 유충식(2002), “도심지 깊은 굴착시 주변 건물 및 매설관 손상 평가”, 한국지반공학회.

6. 이종규(1994), “흙막이 구조물(Ⅳ)” 한국지반공학회지 제 10권 제 1호.
7. 이종규(2002), “굴착 공법의 문제점과 개선 방안”, 한국지반공학회.
8. Boscardin. M. D. & Cording. E. J.(1989), “Building Response to Excavation induced Settlement”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No 1, pp. 1-21.
9. Burland, J. B.(1995), “Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavation” *International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-Tokyo.
10. Burland, J. B., Wroth, C. P.(1974), “Settlement of Buildings and Associated Damage”, *Proc. Conf. Settlement of Structures*, Pentech Press, London England, pp. 611-654.
11. 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.
12. Cording. E. J., J. H. Long, M. R. Son(2001) “Modeling and analysis of excavation-induced building distortion and damage using strain-based damage criterion”, Pre-conference papers at 18 june.
- 13.. UDEC Manual(2000), Itasca Consulting Group, Inc.