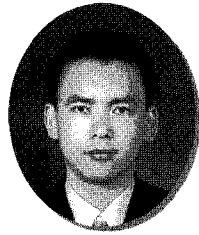




도심지 터널 및 지반굴착공사에 따른 인접구조물의 손상도 예측/평가를 위한 기준에는 어떤 것들이 있으며 각 기준의 개발배경과 문제점은 무엇인지 알고 싶습니다.



손 무 락
대구대 토목공학과 교수,
공학박사/토질및기초기술사

서론

혼잡한 도심지 지역에서의 지하철 등의 사회기반시설 및 신축건물 건설로 인한 터널 및 지반굴착공사가 날이 증가하고 있으며, 이로 인해 발생한 지반변위가 인접구조물에 변형과 손상을 유발시키는 주요 원인으로 대두되고 있다. 이러한 각종 굴착공사에 의해 발생한 지반변위로부터 인접구조물을 보호하는 것은 민원문제, 공사비 및 공사기간 등 여러 문제들을 해소함에 있어서 매우 중요하다. 터널 및 지반굴착으로 인해 발생한 지반변위가 인접구조물에 미치는 영향을 최소화하기 위해선, 굴착단계부터 구조물손상 단계까지의 전 과정에 대한 폭넓은 이해가 필요하며, 굴착공사가 시행되기 이전에 인접구조물에 발생할 수 있는 손상정도를 미리 예측 및 평가하여, 적절한 대책공법을 수립하는 것이 매우 중요하다.

따라서, 본 논고에서는 현재 실무에서 자주 이용되는 터널 및 지반굴착으로 인해 발생된 지반변위의 인접구조물에 대한 영향을 미리 예측 및 평가할 수 있는 여러 기준들과 각 기준의 개발배경과 문제점에 대해서 살펴보고 이를 통해 향후 터널 및 지반굴착과 관련한 인접구조물의 손상도 예측 및 평가가 보다 적절하게 이루어질 수 있도록 하는 바램이다.

인접구조물 손상도 파악을 위한 다양한 예측/평가 기준과 특징

지반변위가 구조물에 유발시키는 손상정도는 표1에서 보는바와 같이 구조물의 자중만으로 인해 발생된 지반침하(지반의 수직방향변위)에 의해 구조물에 발생된 피해를 상호 관련시키려는 연구에서 비롯되었다. 구조물의 자중

표 1. 구조물 벽체의 손상기준

기준설정인	기준인자	각변형률	
		크랙발생	구조물 불안정
Terzaghi and Peck(1948)		1/300	-
Skempton and MacDonald (1956)		1/300	1/150
Meyerhof (1956)		1/1000	-
Bjerrum (1963)		1/300	1/150

등에 의한 지반침하와 관련하여 구조물에서의 손상을 예측하는 기준은 여러 현장사례조사 및 벽체실험 등을 통해 Terzaghi and Peck (1948), Skempton and MacDonald (1956), Meyerhof (1956), 및 Bjerrum (1963) 등에 의해서 제시되었다 (표 1). 하지만 이와 같은 기준들은 구조물의 지중에 의한 수직방향만의 부등침하가 발생한 경우에 대해 설정된 기준들로서, 구조물이 인접지반의 터널 및 지반굴착에 의해 수직방향뿐만 아니라 수평방향의 지반 변위에 동시에 노출되는 경우에는 이들 수직방향만의 부등침하에 근거한 기준만을 가지고 구조물의 손상정도를 예측하는 것은 구조물 손상도를 과소 예측할 수 있는 문제점이 발생한다.

따라서, 터널 또는 지반굴착 현장의 인근에서와 같이 지반의 수직방향변위와 수평방향변위에 동시에 노출되는 구조물의 손상예측을 위한 보다 합리적인 예측기준들이 개발되어 왔으며, 현재 국내,외에서 흔히 사용되고 있는 예측/평가기준은 Boscardin and Cording (1989), Burland (1995) 및 Boone et al. (1999)와 최근 개발된 Son and Cording (2005)에 의한 기준들이 있다. 각각의 기준들은 굴착계획 및 설계단계에서 국내에서 자주 이용되어져 왔지만, 각 기준의 개발배경과 문제점이 무엇인지를 제대로 알고 사용하는 기술자들은 많지 않은 것 같다. 따라서, 본 논고의 서론에서 언급한 바와 같이 이러한 다양한 예측/평가기준의 개발배경과 문제점들을 살펴보고

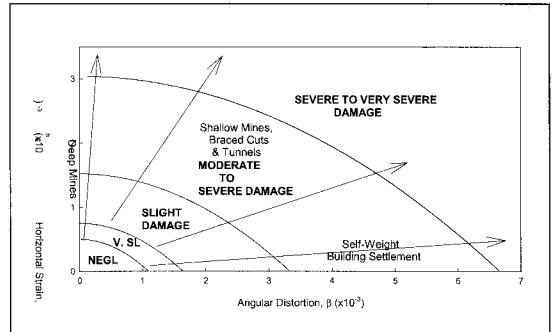


그림 1. 손상도 예측/평가 기준 (Boscardin and Cording, 1989)

표 2. 손상정도에 대한 한계인장변형률

손상정도 (Boscardin and Cording, 1989)	손상정도 (Burland, 1995)	한계인장변형률, ($\times 10^{-3}$)
Negligible	0	0 - 0.5
Very Slight	Category 1	0.5 - 0.75
Slight	Category 2	0.75 - 1.50
Moderate to Severe	Category 3	1.50 - 3.00
Severe to Very Severe	Category 4 and 5	> 3.00

자 한다.

그림 1은 Boscardin and Cording (1989)에 의해서 제시된 예측/평가기준을 보여주고 있으며, 예측/평가를 위한 인자로서 각변형률(angular distortion, β)과 수평변형률(horizontal strain, ϵ_h)이 사용되고 있다. Boscardin and Cording은 실제구조물을 묘사하기 위해 단순 지지되고 집중하중을 받는 Deep Beam모형을 가정하였으며, 구조물에서의 손상정도를 구분하기 위하여 한계인장변형률 (표 2참조)을 사용하였다. 구조물을 묘사하기 위해 가정된 Beam의 탄성계수의 비 (E/G)는 2.6이 사용되었고 구조물의 길이와 높이 비 (L/H)는 1로 가정하였다. 이와 같은 실제구조물의 Beam을 통한 단순한 묘사 및 적용된 가정들을 가지고선 조건이 다른 구조물의 손상도 예측을 하기에는 여러 가지 논란 및 문제점이 발생할 수 있다.

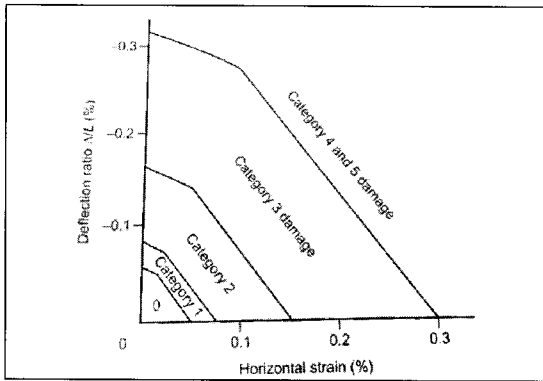


그림 2. 손상도 예측/평가 기준 (Burland, 1995)

그림 2는 Burland (1995)의 의해서 제시된 예측/평가 기준을 보여주고 있으며, 예측/평가를 위한 인자로서 처짐비(deflection ratio, Δ/L)와 수평변형률(horizontal strain, ϵ_h)이 사용되고 있다. Boscardin and Cording 과 마찬가지로 Burland도 실제구조물을 묘사하기 위해 단순 지지되고 집중하중을 받는 Deep Beam 모델을 사용하였으며 구조물에서의 손상정도를 구분하는 한계인장변형률은 Boscardin and Cording이 제시한 값들(표 2참조)을 사용하였다. 단지, Burland는 “Category 3”의 영역에 “Severe”한 손상을 포함시키지 않았다. 실제구조물을 묘사하기 위해 가정된 Beam의 탄성계수의 비(E/G)는 2.6이 사용되었고 구조물의 길이와 높이 비(L/H)는 1로 가정하였다. 이와 같은 실제구조물의 단순한 묘사 및 가정조건들을 가지고서 조건이 다른 다양한 구조물의 손상도 예측을 하기에는 앞서서와 마찬가지로의 여러 가지 논란 및 문제점이 발생할 수 있다. 뿐만아니라, Burland 기준에서 예측/평가인자로서 사용하는 처짐비(deflection ratio)는 각변형률(angular distortion)과는 달리 구조물의 변형을 파악함에 있어서 강제회전요소인 틸트(tilt)의 영향을 반영하지 못하는 문제점이 있다.

그림 3은 Boone et al. (1999)에 의해서 제시된 예측/평

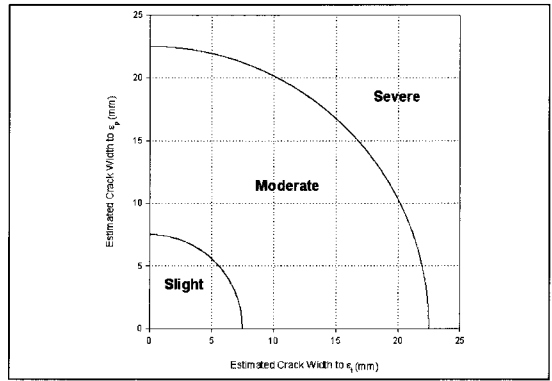


그림 3. 손상도 예측/평가기준 (Boone et al., 1999)

가기준을 보여주고 있으며, 예측/평가를 위한 인자로서 누적계산된 크랙의 크기가 사용되고 있다. 실제구조물을 묘사하기 위해 단순 지지되고 등분포하중을 받는 Deep Beam 모델을 가정하였으며 구조물에서의 손상정도를 구분하는 크랙의 크기는 Burland et al. (1977)에 의해서 제시된 값들(표 3참조)이 기준으로 사용되었다. 실제구조물을 묘사하기 위해 가정된 Beam은 지반침하를 그대로 따라서 변형되고 중립축은 Beam의 도심에 있는 것으로 가정하였다. 지반의 수평변위는 침하분포와 동일한 것으로 가정하였고 적용된 침하 및 수평변위에 의한 Beam의

표 3. 손상정도의 구분, 묘사 및 균열크기 (Burland et al., 1977)

Degree of damage	Description of typical damage* (Ease of repair is underlined>	Approximate crack width mm
1. Very slight	Hairline cracks of less than about 0.1 mm are classed as negligible. <i>Fine cracks which can easily be treated during normal decoration</i> . Perhaps isolated slight fracture in building. Cracks in external brickwork visible on close inspection.	1"
2. Slight	<i>Cracks easily filled</i> . Re-decoration probably required. Several slight fractures showing inside of building. Cracks are visible externally and some re-pointing may be required externally to ensure weathertightness. Doors and windows may stick slightly.	1/2"
3. Moderate	<i>The cracks require some opening up and can be patched by a mason</i> . Re-current cracks can be masked by suitable linings. Re-pointing of external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced. Doors and windows sticking. Service pipes may fracture. Weathertightness often impaired.	5 to 15" or a number of cracks ≥ 3
4. Severe	<i>Extensive repair work involving breaking out and replacing sections of walls, especially over doors and windows</i> . Windows and door frames distorted, floor sloping noticeably. Walls leaning or bulging noticeably, some loss of bearing in beams. Service pipes disrupted.	15 to 25" but also depends on number of cracks
5. Very severe	<i>This requires a major repair job involving partial or complete re-building</i> . Beams lose bearing, walls lean badly and require shoring. Windows broken with distortion. Danger of instability.	usually > 25" but depends on number of cracks

* In assessing the degree of damage account must be taken of its location in the building or structures.
* Crack width is only one aspect of damage and should not be used on its own as a direct measure of it.

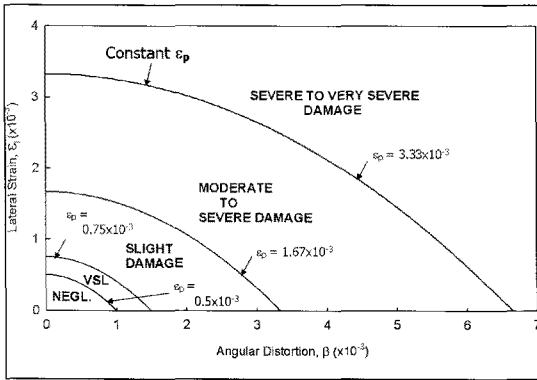


그림 4. 손상도 예측/평가 기준 (Son and Cording, 2005)

변형으로부터 인장변형률과 전단변형률이 구해지고 이를 이용하여 누적된 크랙의 크기가 계산되게 된다. 이와 같이 Boone et al.의 기준 또한 실제로 발생할 수 있는 조건들과는 서로 다를 수 있는 여러 가정조건에 근거하여 개발되어 여러 가지 논란 및 문제점이 야기될 수 있다.

이상에서 언급한 예측/평가기준들은 모두 실제구조물을 Deep Beam으로 단순화시켜 Beam이론을 적용시킨 사항을 포함하여 여러 가정조건을 근거로 하여 개발되었기 때문에 실제 현장구조물의 손상정도를 예측 및 평가함에 있어서 가정조건과 다른 상황에서는 여러 가지 논란 및 문제점들이 야기될 수 있다.

그림 4는 Son and Cording (2005)에 의해서 제시된 예측/평가기준을 보여주고 있으며, 예측/평가를 위한 인자로서 각변형률(angular distortion, β)과 수평변형률(horizontal strain, ϵ_h)이 사용되고 있다. Son and Cording은 어떤 구조물 또는 구조물의 한 부분에 있어서의 변형률은 구조물에서 발생하는 각변형률(angular distortion)과 수평변형률(lateral strain)의 조합에 의해 일어나고 최대 변형률은 각변형률과 수평변형률의 조합에 의해 발생하는 최대 주인장 변형률에 의해서 결정되어진다는 개념에 근거하여 구조물의 손상도 예측/평가기준

표 4. 손상도 정도의 구분에 따른 최대 주인장 변형률 (Son and Cording, 2005)

손상정도	최대 주인장 변형률, ($\times 10^{-3}$)
Negligible	0 - 0.5
Very Slight	0.5 - 0.75
Slight	0.75 - 1.67
Moderate to Severe	1.67 - 3.33
Severe to Very Severe	> 3.33

을 개발하였다. 상기 Son and Cording (2005)에 의한 예측/평가기준은 앞서 언급한 Boscardin and Cording (1989)이 제시한 예측/평가기준의 가정 및 접근방법에 따른 문제점들을 해소하고 모든 구조물에 아무런 제한사항 없이 적용할 수 있는 일반화된 예측/평가기준을 제시할 수 있도록 변형률 상태이론(the state of strain theory)에 근거해 Boscardin and Cording (1989)기준을 수정 및 업데이트 한 기준이며 손상도 정도를 구분하는 최대 주인장 변형률은 표 4와 같다. 상기 Son and Cording (2005) 기준은 다양한 현장계측자료, 실험대형 모형실험 및 수치해석 등으로부터 얻어진 결과들을 토대로 그 기준의 신뢰성 및 적용성이 검증된 바 있으며, 향후 다양한 터널 및 지반굴착공사에 따른 인접구조물 손상예측 및 평가시 다른 기준들과 비교할 때 보다 일반성 및 타당성이 있어 실무적으로 적절하고 신뢰성있게 이용될 수 있는 기준으로 판단된다.

결론

도심지에서 터널 및 지반굴착으로 인해 발생한 지반변위가 인접구조물에 미치는 영향을 최소화하기 위해선, 굴착단계부터 구조물손상 단계까지의 전 과정에 대한 폭넓은 이해가 무엇보다도 필요하다. 더불어 인접구조물에 발생할 수 있는 손상정도를 미리 예측하여, 적절한 대책공



법을 제공하는 것도 매우 중요하다. 이를 위해선 인접구조물의 손상예측이 신뢰성있게 이루어져야 하고, 이러한 신뢰성은 관련 기술자가 이용하고자 하는 기준들의 개발 배경과 문제점들을 제대로 파악하고 적절히 적용할 때만이 비로서 얻어질 수 있을 것이다. 따라서 본 논고에서는 현재 실무에서 자주 이용되는 터널 및 지반굴착으로 인해

발생된 지반변위의 인접구조물에 대한 영향을 미리 예측 및 평가할 수 있는 여러 기준들과 각 기준의 개발배경과 문제점에 대해서 간단히 살펴보았으며, 이를 토대로 향후 도심지에서의 터널 및 지반굴착공사로 인한 인접구조물 손상 및 예측이 보다 적절하고 신뢰성있게 이루어지길 바란다.

[참고문헌]

1. Bjerrum, L. (1963), "Discussion on: Proceedings of the European conference on soil mechanics and foundation engineering, vol III," Norwegian Geotechnical Institute, Publ. No 98, Oslo, Norway, 1-3.
2. Boone, S. J., Westland, J., and Nusink, R. (1999). "Comparative evaluation of building response to an adjacent braced excavation" Can. Geotech. J., 36, 210-223.
3. Boscardin, M. D. and Cording, E. J. (1989). "Building response to excavation-induced settlement," J. Geotech. Engrg., ASCE, 115(1), 1-21.
4. Burland, J. B. (1995). "Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavation," Proceedings of 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, IS-Tokyo.
5. Burland, J. B. and Broms. B. B., and de Mello, V. F. B. (1977). "Behavior of foundations and structures." Proc., 9th Int'l Conf. on Soil Mech. and Foun. Eng., II, State of the Art Report, Tokyo, Japan, 495-546.
6. Meyerhof, G. G. (1956). "Discussion of The allowable settlements of buildings by Skempton and MacDonald." Proc., Inst. Civ. Engrs., Part II, pp. 774-775.
7. Son, M and Cording, E. J. (2005) "Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131(2), pp. 162-177.
8. Skempton, A. W. and MacDonald, D. H. (1956). "The allowable settlement of Buildings." Proc., Inst. of Civ. Engrs., III, 5, 727-784.
9. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948). "Soil mechanics in engineering practice" New York, Wiley.