

세계 주요국가의 구조물 관리기준



안성권
한국철도기술연구원
철도구조연구실
선임연구원

1. 서론

지하구조물의 시공은 주변 지반을 교란하여 인접구조물의 변위·변형을 유발시켜 이들의 사용성·안정성을 위협할 수도 있다. 현재 구조물의 변위·변형을 효과적으로

기술하기 위해 여러 지표들이 정의되어 사용되고 있다. 본고는 국내외에서 적용하고 있는 구조물관리기준을 소개하는 것으로 용어는 유럽연합(EU)의 Eurocode 7(2004)이 제안한 개념정의를 준용한다(그림 1).

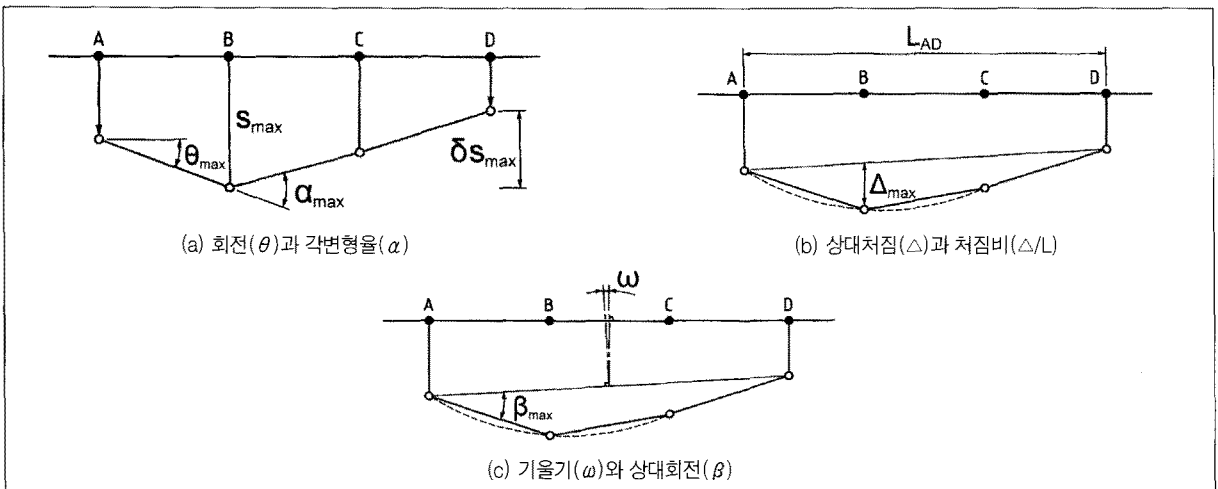


그림 1. 구조물 관리 지표의 정의

- ① 침하(settlement, s)
- ② 상대침하(differential settlement, δs)
- ③ 회전(rotation, θ)
- ④ 각변형률(angular strain, α)
- ⑤ 상대처짐(relative deflection, Δ): 두 개의 기준점을 연결하는 가상의 직선으로부터 측정된 침하곡선의 최대변위
- ⑥ 처짐비(deflection ratio, Δ/L): 상대침하를 기준점 간 거리로 나눈 값
- ⑦ 기울기(tilt, ω): 구조물 전체의 강체회전(rigid body rotation)
- ⑧ 상대회전(relative rotation, β): 두 기준점을 연결하는 가상의 직선이 회전한 값에서 기울어짐(ω)을 제외한 값(= 각변위(angular distortion))
- ⑨ 수평변형률(horizontal strain, ϵ_h): 두 기준점 간 수평상대변위로 인한 변형률
- ⑩ 균열폭(crack width)

2. 세계 주요국가 구조물 관리기준

2.1 Skempton & MacDonald (1956), UK

Skempton & MacDonald(1956)는 100여 개의 빌딩구조물 현장계측자료를 바탕으로 상대회전, 상대침하, 침하를 관리지표로 삼아 표 1과 같은 관리기준을 제안했다. 표 1은 점성토의 경우 상대회전이 1/300이상이고 상대침하가 45mm 이상(사질토의 경우 32mm이상)일 때 벽체균열이 유발되며, 상대회전 1/150이상일 때 구조손상이 우려된다고 제안한다. 표 1은 지반의 침하속도에 따른 시간영향에 대한 고려가 없기 때문에 적용시 주의가 요구된다. 침하속도가 느리다면 구조물은 더 큰 지반변형에 견딜 수 있기 때문이다.

2.2 Polshin & Tokar (1957), USSR

러시아 구조물 관리기준(USSR building code 1955)은 상대

표 1. Skempton & MacDonald (1956)

Relative rotation	Clay	1/300	
	Sand		
Differential settlement	Clay	45mm	
	Sand	32mm	
Total settlement		Isolated foundation	Rafts
		Clay	76mm
	Sand	51mm	51-76mm

표 2. Polshin & Tokar (1957)

Relative deflection (Masonry wall)	Multi-storey buildings	0.0003-0.0007
	One-storey mills	0.001
Differential settlement (Column foundation)	0.002 × Distance between two neighbouring supports	
Total settlement	Buildings with plain brick walls	80-100mm
	Buildings with reinforced concrete	150mm
	Framed buildings	100mm
	Solid reinforced concrete foundations	300mm

회전 대신 상대힘을 관리지표로 이용했다. 상대처짐(처짐비)은 상대회전에 비해 측정이 용이한 장점이 있다(Burland, 1997). 그러나 구조물 길이에 비해 지반변형 영향범위가 작을 때는 상대회전의 사용이 더 적합하다(Boscardin & Cording, 1989). 표 2는 최대허용 상대처짐을 0.0003-0.001로 제안하며, 최대허용 상대침하를 기둥 간 거리의 0.002배로 제안하였다. 빌딩구조물의 최대허용 침하는 80-150mm로 제안되는데, 이는 표 1의 기준(51-127mm)에 비해 다소 완화된 값이다.

2.3 Mayerhof (1956), USA

Mayerhof(1956)는 구조물 관리기준을 두 가지 기준(최대허용기준과 극한한계상태기준)으로 나누어 제안했다(표 3). 여기서 최대허용상태란 구조물이 변형, 침하, 진동, 국부파괴 등으로 인해 더 이상 제 기능을 하지 못하는 상태를 말하며, 극한한계상태란 구조물의 붕괴로 인명 및 재산 피해가 우려되는 상태를 말한다. 이들 기준은 각각 Eurocode 7(2004)이 정의하는 Serviceability limit state 및 Ultimate limit state와 동일한 의미이다. 표 3은 전체 안전율 3을 확보하기 위한 상대회전에 대한 안전율을 구조물 부분별로 제안했다. 균열이 구조물 붕괴로

직결될 수 있는 내력벽의 경우 안전율 3이 제안되며, 비내력벽의 경우 다소 낮은 안전율 2가 제안되었다.

2.4 Bjerrum (1963), Norway

Bjerrum(1963)은 상대회전을 지표로 여러 개의 관리기준을 제시했다(표 4). 하나의 기준을 구조물의 특성 및 용도를 고려하지 않고 획일적으로 적용하는 것은 적절치 않기 때문이다. 표 4는 균열을 허용하지 않는 구조물의 최대 허용상대회전 값을 1/500로 제안하고, 비내력벽의 초기균열이 발생할 때의 상대회전을 1/300로 제안했다. 이는 표 3이 제안하는 1/1000-1/500에 대응하는 값으로, 표 4가 표 3에 비해 다소 완화된 기준을 제시함을 알 수 있다.

2.5 Burland & Wroth (1975), UK

Burland & Wroth(1975)는 처음으로 한계인장변형률(Critical tensile strain)을 구조물 관리지표로 사용했다(표 5). 한계인장변형률이란 초기균열이 발생하는 순간의 변형률로 정의된다. 표 5는 상대적으로 유연한 구조물 골조에 대해 한계인장변형률 0.05-0.10%를 제안하고, 벽

표 3. Mayerhof (1956)

		Load bearing wall	Non load bearing wall	Beams and columns
Relative rotation	Max. allowable	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{250}$
	Ultimate limit state		$\frac{1}{300} \sim \frac{1}{150}$	
Factor of safety		3 >	2 >	N/A
Overall factor of safety		3		

표 4. Bjerrum (1963)

Relative rotation	Danger for frames with diagonals	1/600
	Buildings where cracking is not permissible	1/500
	First cracking in panel walls is to be expected	1/300
	Tilting of high, rigid buildings might become visible	1/250
	Structural damage of general buildings is to be feared	1/150

돌벽체에 대해서는 다소 낮은 0.03-0.06%를 제안했다. 한계인장변형율은 다른 관리지표(상대회전, 처짐비 등)에 비해 측정이 용이하기 때문에 특히 복잡한 형태의 구조물 거동평가에 적합하다.

2.6 Boscardin & Cording (1989), USA

Boscardin & Cording(1989)은 구조물의 손상정도를 6 단계로 세분화하고 수평변형율, 상대회전, 균열폭을 지표

표 5. Burland & Wroth (1975)

Critical tensile strain	
Infilled frame	0.05-0.10%
Masonry wall	0.03-0.06%

표 6. Boscardin & Cording (1989)

Damage category	Degree of severity	Horizontal strain, ϵ_h (%)	Angular distortion, β	Crack width (mm)
0	Negligible	0 - 0.05	0 - 1/900	< 0.1
1	Very slight	0.05 - 0.075	1/900 - 1/600	0.1 - 1
2	Slight	0.075 - 0.15	1/600 - 1/300	1 - 5
3	Moderate	0.15 - 0.3	1/300 - 1/150	5 - 15
4	Severe	> 0.3	> 1/150	15 - 25
5	Very severe	> 0.3	> 1/150	> 25

로 삼아 구조물 관리기준을 제시했다(표 6). 측정이 비교적 용이한 균열두께를 지표를 사용한 점이 주목된다. 표 6은 구조물을 지표면에 놓인 길이와 높이가 같은 보(Deep beam, L/H=1; 여기서 L과 H는 각각 구조물의 길이와 높이)란 가정 하에 제안되었다. 따라서 길이 높이가 다른 구조물(L/H≠1)에는 적용되지 않는다. 최근에는 깊은보 모델의 단점을 개선하기 위해 얇은판 모델(Laminated beam model) 사용되기도 한다(Finno et al., 2005).

2.7 Burland (1997), UK

Burland(1997)도 깊은 보 모델을 이용했는데, 흥미로운 점은 구조물의 길이-높이 비율(L/H=0.5-4)에 따른 구조물 관리기준을 제시한 것이다. 또한 관리지표로 상대회전

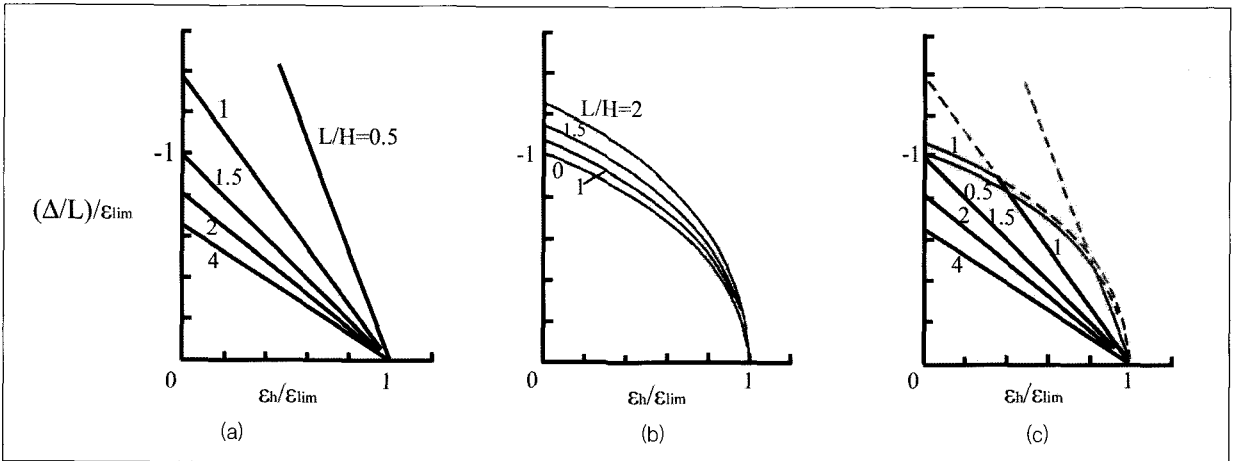


그림 2. (a) 휨변형모드, (b) 전단변형모드, (c) (a)와(b) 조합 (Burland, 1997)

대신 처짐비를 사용한 것도 주목된다. 그림 2(a)는 구조물이 휨변형모드일 때 처짐비와 수평변형율의 관계이고, 그림 2(b)는 전단변형모드일 때의 관계이다. 그림 2(c)의 실선은 그림 2(a)와 2(b)를 조합한 것으로, 구조물의 길이-높이 비율에 따라 구조물의 변형을 지배하는 모드가 다음을 보여준다. $L/H=1$ 인 구조물의 경우, 변형초기에는 전단 변형모드의 지배를 받지만 수평변형율이 커지면 휨변형모드의 지배를 받는다. 길이방향이 큰 구조물($L/H=4$)의 경우, 변형율의 크기에 관계없이 휨변형모드의 지배만 받음을 알 수 있다. 표 7과 그림 3은 Burland(1997)가 제안하는 구조물 관리기준의 한 예이다($L/H=1$ 일 때). 다양한 비율의 구조물

에 대한 관리기준을 제시했음은 괄목할 성과이다.

2.8 Eurocode 7 (2004), EU

Eurocode7(2004)은 구조물이 놓인 지반의 침하형상(Hogging 또는 Sagging)에 따라 으로 구조물의 거동을 이분(二分)하여 각기 다른 관리기준을 제시했다(표 8). Sagging이란 아래로 볼록한 지반침하 형상이며, Hogging이란 위로 볼록한 지반침하 형상이다(그림 4). 표 8은 일반적인 구조물이 Sagging보다 Hogging에 더욱 취약함을 반영하여 Sagging일 때(상대회전) 관리기준의 절반을 Hogging일 때 관리기준으로 제안했다. 그러나 구조물이 존재하는 지반의 거동특성은 원지반조건(지표 및 지중에 구조물이 없는 이상적인 조건)일 때와 다르다고 보고되고 있으므로(그림 5), 구조물의 변형형상을 지반변형형상으로 이분하는 것은 쉽지 않을 것으로 보인다. 그림 4와 같이 구조물이 원지반조건을 가정한 지반침하 형상을 그대로 따라 변형되는 사례는 구조물의 강성이 지반의 강성에

표 7. Burland (1997)

Damage category	Horizontal strain, ϵ_h (%)	Deflection ratio, Δ/L
0	0 - 0.05	0 - 1/2000
1	0.05 - 0.075	1/2000 - 1/1333
2	0.075 - 0.15	1/1333 - 1/667
3	0.15 - 0.3	1/667 - 1/313
4	> 0.3	> 1/313
5	> 0.3	> 1/313

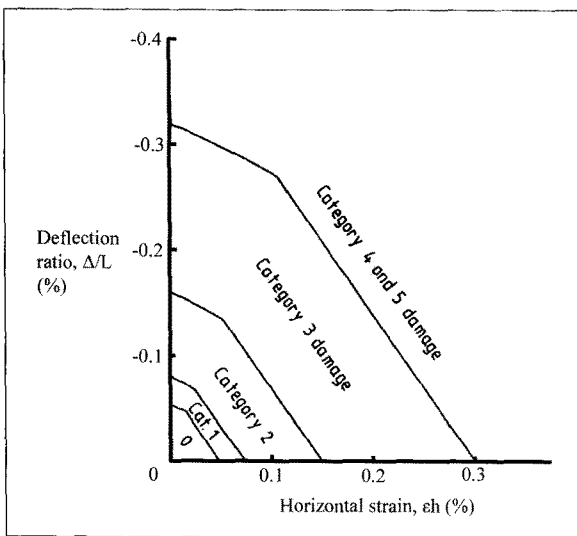


그림 3. 구조물의 손상등급도표(Burland, 1997)

표 8. Eurocode 7 (2004)

	Sagging mode	Hogging mode
Relative rotation (Max. allowable)	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{1000}$
Relative rotation (Ultimate limit state)	$\frac{1}{150}$	$\frac{1}{300}$
Total settlement	50mm	

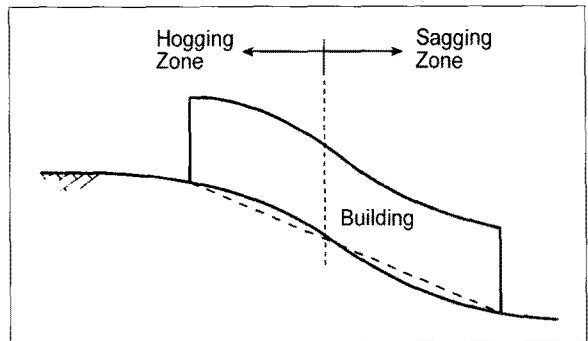


그림 4. Hogging zone & Sagging zone

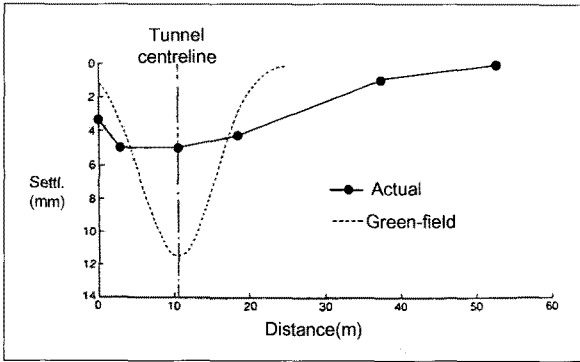


그림 5. 지반침하(Frischmann et al., 1994)

비해 무시할 정도로 작을 때만 가능한 이상적인 경우이다. 지반 위에 놓인 구조물의 강성이 증가할수록 침하의 크기 및 형상을 변형시키는 정도가 커지는 것은 주지의 사실이다(Addenbrooke, 1996). Eurocode7(2004)은 사용성한계상태 및 극한한계상태 기준을 사용하고 있으며, 표 3이 제안한 바와 같이 3 이상의 안전율을 사용했다.

2.9 서울시철도 (2007), Korea

서울도시철도(2007)는 구조물 주변지반을 근접도에 따

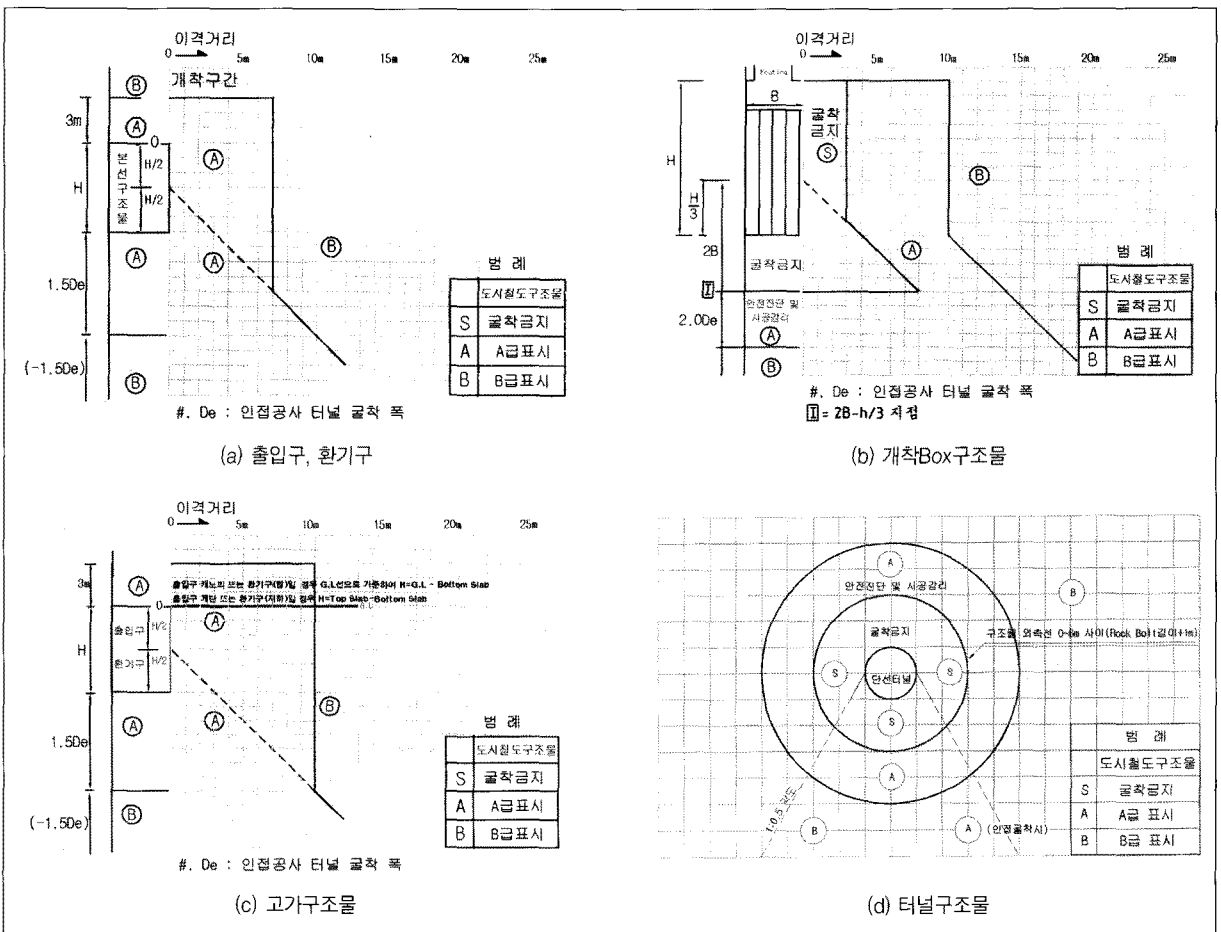


그림 6. 구조물 종류에 따른 점검기준등급(도시철도 인접굴착공사 관리실무, 2007)

라 등급화하고(S, A, B등급), 각 등급별 점검기준을 제시했다(표 9). 그림 6은 구조물의 종류(출입구 및 환기구, 개착Box구조물, 고가구조물, 터널구조물)에 따른 점검기준등급을 보여준다. S등급으로 분류된 지반은 굴착이 금지되며, 부득이하게 굴착이 필요한 경우 외부전문기관 검토가 의무화되어 있다. A 및 B등급 지반은 지속적인 안전진단 및 시공감리 하에 굴착이 허용된다.

표 9. 서울도시철도(2007)

등급	점검기준
S	굴착금지
A	안전진단 및 시공감리 주 1회
B	안전진단 및 시공감리 월 1회

3. 세계 주요국가 구조물 현황

3.1 시설물통계연보 (2005), Korea

시설물통계연보(2005)에 따르면, 한국의 '시설물 안전 관리에 관한 특별법'에 의한 주요시설물(총26,459개) 중 대부분(87%)이 철근콘크리트 아파트 구조물(그림 7)이다. 과반수 이상이 서울 및 경기지역(56%)에 밀집 분포되어 있으며, 대부분이 1990년 이후(96%)에 시공된 20년 이하의 구조물인 것으로 나타났다.

3.2 American housing survey for the US: 2007 (2008), USA

American housing survey for the US:2007(2008)에

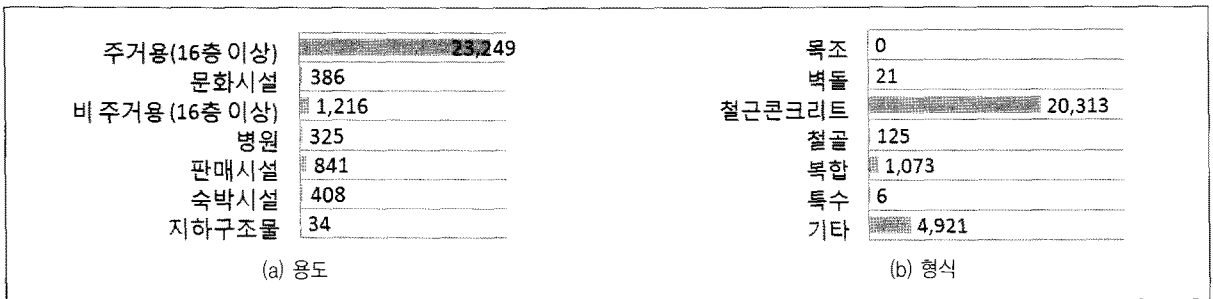


그림 7. 한국의 구조물 현황(시설물통계연보, 2005)

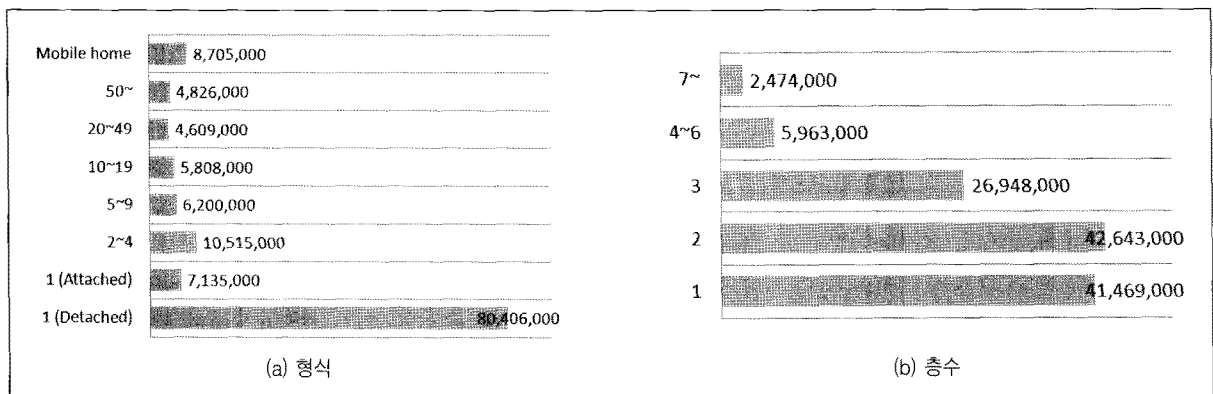


그림 8. 미국의 구조물 현황(American housing survey for the US: 2007, 2008)

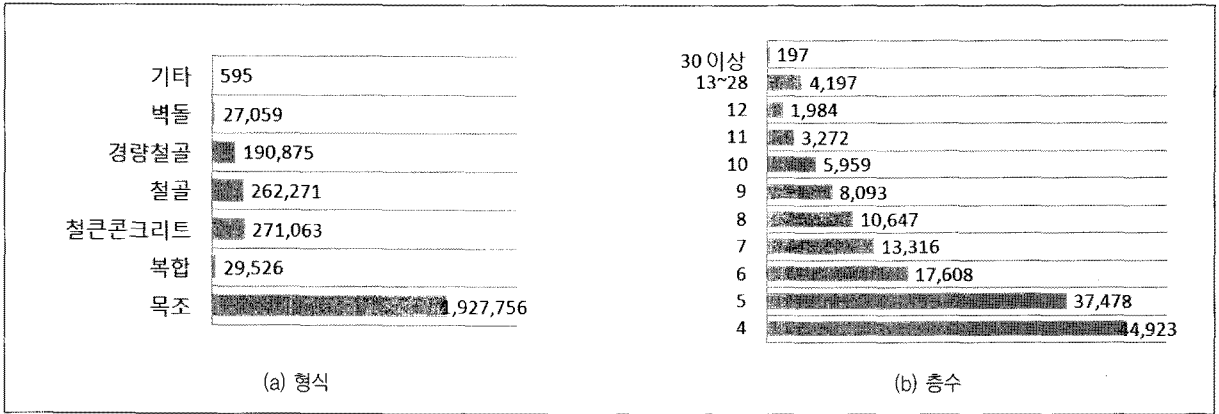


그림 9. 일본의 구조물 현황(Tokyo statistical yearbook, 2007)

따르면, 미국의 주거용 구조물은 약 1억 3천만 개로 보고하고 있다. 미국의 인구가 약 3억 명이므로, 2.3명이 한 개의 주거용 구조물을 공유하고 있는 셈이다. 그림 8(a)와 8(b)는 이들 구조물 대부분이 단독주택(63%, Single detached house)이며, 3층 이하(87%)임을 보여준다. 또한 이들 주거용 구조물 대부분이 도심지역(76%)에 밀집되어 분포하는 것으로 조사되었다.

3.3 Tokyo statistical yearbook (2007), Japan

Tokyo statistical yearbook(2007)은 동경 내에 총 2,709,145개의 주거용 구조물이 있다고 보고하고 있다. 동경의 주거용 구조물 중 71%가 목조구조물로 분류된다(그림 9(a)). 동경의 주거용 구조물 중 4층 이상 구조물은 5.5%(147,674)로 조사되었으며, 13층 이상의 고층 구조물은 0.16%(4,394개)로 조사되었다(그림 9(b)). 이는 일본 동경의 주거용 구조물이 미국(4층 이상 13%)에 비해 저(低)층화 되어있음을 알 수 있다.

4. 결론

본고는 세계 주요 국가(유럽, 영국, 미국, 러시아, 노르웨이, 한국)의 구조물 관리기준을 비교·분석하였다. 20세기 중반 이후부터 지속적인 발전을 거듭한 구조물 관리기준은 최근에 이르러 다양한 관리지표를 복합적으로 이용한 관리기준을 제시하고 있으며, 구조물의 손상정도에 따라 세분화된 규준을 제시하는 방향으로 체계화 되어가고 있다. 구조물의 사용성 및 안정성에 대한 평가는 구조물의 특성 및 용도 그리고 구조물이 위치하는 지역의 문화 및 상황에 따라 차이를 보일 수 있으므로 쉽지 않다. 그러나 현재까지 국내에는 근접지 시공에 따른 구조물 점검기준만 있을 뿐 관리기준은 없는 것으로 조사되었다. 본 논문의 '세계 주요국가 구조물 현황'에서 살펴본 바와 같이 한국의 구조물은 미국 및 유럽의 구조물과 차이를 보이기 때문에 이들 기준을 준용하는 것도 적절치 않을 것으로 판단되며, 따라서 한국 실정에 맞는 구조물 관리기준 제안이 필요하다.

참고문헌

1. 도시철도 인접굴착공사 관리실무, 서울도시철도, 2007.
2. 시설물통계연보, 한국시설안전기술공단, 2005.
3. Addenbrooke, T.I., 1996. Numerical analysis of tunnelling in stiff clay. PhD thesis, Imperial College, UK.
4. American Housing Survey for the United States: 2007, 2008. U.S. Department of Housing and Urban Development, U.S. Department of Commerce Economics and Statistics Administration.
5. Bjerrum, L., 1963. Problems of settlements and compressibility of soils. Proceedings of the 3rd European conference on soil mechanics and foundation engineering (held in Wiesbaden, Germany), Deutsche Gesellschaft Erd- und Grundbau, 1964, volume 2, 135-137.
6. Boscardin, M.D., Cording, E.J., 1989. Building response to excavation-induced settlement. Journal of geotechnical engineering, ASCE 115(1), 1-21.
7. BS EN 1997-1:2004 Eurocode 7. Geotechnical design. General rules.
8. Burland, J.B., Wroth, C.P., 1975. Settlement of buildings and associated damage. Building research establishment current paper, 33(75), Building research establishment, Watford, England.
9. Burland, J.B., 1997. Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Earthquake geotechnical engineering, Ishihara(ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 578 X, 1189-1201.
10. Finno, R.J., Voss Jr, F.T., Rossow, E., Blackburn, J.T., 2005. Evaluating damage potential in Building affected by excavations. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE 131(10), 1199-1210.
11. Frischmann, W.W., Helliings, J.E., Gittoes, G., Snowden, C., 1994. Protection of the mansion house against damage caused by ground movements due to the Docklands light railway extension. Proceedings of the institution of civil engineers, 107, 65-76.
12. Meyerhof, G.G., 1956. Discussion on paper by Skempton, A.W. & MacDonald, D.H., 1956. The allowable settlements of buildings. Institution of Civil Engineers, Structural and building division meeting 10 May 1956, 727-784.
13. Polshin, D.E., Tokar, R.A., 1957. Maximum allowable non-uniform settlement of structures. Proceedings on 4th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Volume 1, Butterworth's Scientific, London, England, 402-405.
14. Skempton, A.W., MacDonald, D.H., 1956. The allowable settlements of buildings. Institution of Civil Engineers, Structural and building division meeting 10 May 1956, 727-784.
15. Stallebrass, S.E., 1990. Modelling the effects of recent stress history on the deformation of overconsolidated clays. PhD thesis, City University, UK.
16. Tokyo statistical yearbook, Construction and housing, 2007. <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/2007/tn07qyte0510i.htm>
17. Viggiani, G., Atkinson, J.H., 1995. Stiffness of fine-grained soil at very small strains. Geotechnique 45(2), 249-465.