

도심지터널 굴착에 따른 상부 구조물 기초의 거동 연구

김주화(대림산업(주))

박연준, 이희성(수원대학교)

1. 서 론

우리나라는 경제성장과 도시화로 인해 도심지의 고밀도화된 고층건물 수요증가 및 각종 사회 기반시설의 확충으로 이어지며, 이에 따라 기존 구조물 하부에 많은 지하공간의 개발이 불가피하게 되었다. 또한 도심지 터널 굴착의 경우 일반적으로 현장에 인접해서 많은 구조물 및 주변지반의 변형을 유발시키며, 이로 인해 구조물의 피해사례가 지속적으로 증가하고 있어 막대한 경제적 손실을 초래하며 토목기술자의 이미지에도 큰 영향을 미치고 있다.

일반적으로 터널굴착 공사에 의해 시공될 본 구조물에 대한 안전한 설계 및 시공기술은 지속적인 연구 및 경험에 의해 점차 확립되고 있는 단계에 있다. 그러나, 굴착 현장에 인접한 도심지 구조물의 세부적인 안정성 평가 연구는 최근에서야 그 관심이 고조되고 있다. 따라서 도심터널은 비교적 얇은 심도에서 시공되는 경우가 많기 때문에 일반 산악터널과는 달리 터널 주변지반의 변위가 터널의 설계를 지배하고 주변 시설 구조물이 안정성 확보에 있어서 주요 인자가 될 수 있다.

상부구조물과 터널의 안정성을 확보하기 위해서는 굴착 진행과 함께 계측이 필수적이며, 이러한 계측을 통해 축적된 자료를 바탕으로 터널 및 지반의 거동을 미리 예측하여 이에 합당한 대책을 세우는 것은 매우 중요하다.

굴착시 구조물의 침하량이나 분포를 파악하는 것이 무엇보다 중요한데 국내에서는 아직 이에 따른 연구가 많지 않다. 본 연구에서는 유한차분해석 프로그램인 FLAC-2D를 사용하여 도심지 터널굴착에 따른 상부구조물의 말뚝기초와 직접기초의 영향을 비교 분석하여 수치해석 연구를 수행하였으며 그로 인한 구조물의 안정성을 검토하고 지표면의 변위를 예측하였다.

2. 구조물 손상평가 인자

2.1 처짐비 (Deflection ratio)

Skempton과 MacDonald(1956)는 침하와 구조물의 손상을 설명하기 위하여 처짐비를 이용하였는데 다음 그림 1과 같이 구조물내의 관심 있는 두 지점을 연결한 직선과 그 구

간에서 발생한 침하 곡선간의 최대 이격거리인 처짐 W_0 를 두 지점의 거리 L_{AB} 로 나누어 준 값으로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\text{처짐비} = \frac{W_0}{L_{AB}} \quad (1)$$

여기서, W_0 : 두 지점 사이의 직선과 침하 곡선과의 최대 이격거리
 L_{AB} : 두 지점의 수평거리이다.

구조물의 처짐은 그림 1과 같이 배사형 처짐(sagging deflection)과 등사형 처짐(hogging deflection)으로 분류되며, 이러한 처짐의 영향으로 보의 형태를 띠는 지상구조물 기초부에는 휨과 전단이 발생하고 휨과 전단에 의한 다양한 형태의 균열을 발생시킬 수 있다.

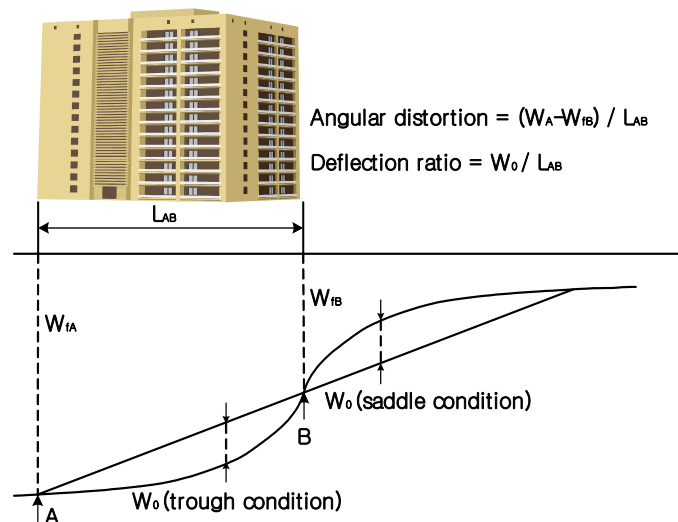


그림 1. 처짐비와 각변위

2.2 부등 침하량 (Differential settlement)

구조물의 부등침하량은 그림 1에서 구조물 내의 벽체 양끝점의 지표침하량의 차이를 나타내는 값으로써 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다. 표 1은 Sowers(1962)가 제안한 여러 가지 구조물에 대한 허용부등침하량 기준이다.

$$\text{부등 침하량} = W_{f_A} - W_{f_B} \quad (2)$$

여기서, W_{f_A} : A지점의 지표침하량

W_{f_B} : B지점의 지표침하량이다.

표 1. 허용 부등침하량(Sowers, 1962)

구조물의 종류	최대 침하량
빌딩의 벽돌 벽체	0.005 S ~ 0.002 S
철근콘크리트 뺨대 구조	0.003 S
강 뺨대 구조(연결)	0.002 S
강 뺨대 구조(단순)	0.005 S

* S : 기둥사이의 간격 또는 임의의 두 점 사이의 거리

2.3 각변위 (Angular distortion)

각변위는 그림 1에 구조물의 전단 비틀림 수준을 나타내며, 지표침하에 의해 구조물에 발생하게 되는 강체 기울어짐 (rigid body tilt)을 제외한 구조물상의 두 개의 관심 지점을 연결하는 직선의 회전각으로 표현된다. 일반적으로 계산된 각변위(ϕ)는 두 지점간의 평균 값이며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\text{각변위, } \phi = \frac{(W_{f_A} - W_{f_B})}{L_{AB}} \quad (3)$$

여기서, W_{f_A} , W_{f_B} : A, B 지점의 지표침하량

L_{AB} : A지점과 B지점의 수평거리이다.

Bjerrum(1963)은 부등침하로 인한 각변위의 변화와 건물의 피해정도를 예측할 수 있는 허용기준치를 그림 2와 같이 제시하였다.

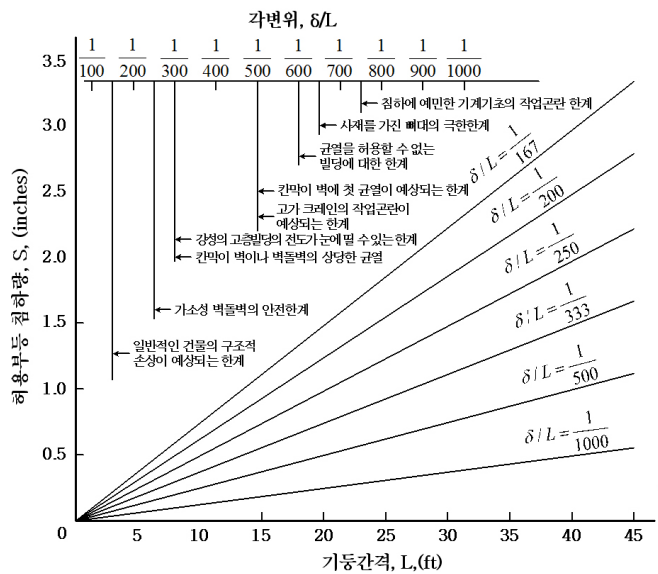


그림 2. 구조물에 대한 각변위의 한계 (Bjerrum, 1963)

3. 지반거동 특성

터널 주변 지반의 거동 특성에 관한 연구는 경험적, 반경험적 방법, 이론적 방법, 모형 실험 방법, 현장 계측 방법 등 4분야로 나눌 수 있다.(배규진, 1989). 경험적, 반경험적 방법은 주로 유럽 등지의 광산 분야에서 광범위하게 적용되어 온 방법이며, 이론적 방법은 터널 자체의 안정해석과 붕괴 조건을 정의하는데 많이 활용되어 온 방법이다. 특히, 이론적 연구의 경우는 최근 대형 컴퓨터의 개발 보급으로 해석 공식보다는 수치해석 모형 개발 쪽으로 연구가 심도있게 진행되고 있다. 모형실험 방법은 1960년대 영국과 미국에서 수행한 핵폭발 대피 시설의 연구와 관련하여 폭넓게 사용되어 왔으며, 현장 계측 방법은 지하철과 같은 대규모 도시 터널 건설이 추진된 1940년대부터 미국과 유럽 등지를 중심으로 적용되기 시작하여 최근에는 각국의 터널 시공 현장에 다양하게 활용되고 있다.

3.1 터널 굴착에 따른 지반 거동

일반적으로 터널 굴착으로 인한 지표면 침하나 지표구조물 변위의 예측 방법에는 표 2와 같은 방법이 있다.

표 2. 터널 굴착에 따른 지반 변위 예측방법의 분류

예측방법		예측식	비고
유사사례에 의한 예측		-	유사지반조건, 성토, 형상, 공법의 사례
통계데이터에 의한 예측		Peak의 식, 요코하마의 식	침하영향범위, 침하분포, 침하구배의 예측
모형실험 및 통계데이터에 의한 예측		시마다의 식	
해석방법에 의한 예측	수치해석	선형탄성 FEM 비선형탄성 FEM 탄소성FEM	복잡한 지층이나 터널형상, 시공순서 고려가능
	탄소성론 해석	Limanov의 식	균일지층, 원형단면

최근 복잡한 지층이나 굴착패턴, 시공순서 등을 고려하여 수치해석을 적용한 침하예측이 실시되고 있다. 수치해석에서는 지표면침하나 지표구조물 변위를 상세히 얻기 위하여, 적절한 해석조건을 정하는 것에 의하여 비교적 정확한 침하 예측을 할 수 있다. 하지만 지반정수나 경계조건의 설정에 따라 해석결과가 병동하기 쉬우므로 해석결과 평가에 대해서는 유사사례에 의한 방법이나 간편식에 의한 방법과 조합해서 종합적으로 판단할 필요가 있다.

또한 수치해석의 경우에는 침하발생 범위가 광범위하게 미치고 완만한 침하형태를 나타내므로 침하량의 절대치의 예측이 가능하여도 침하구배는 과소평가 되는 경우가 있다. 이 경우 지표구조물은 침하구배나 경사각으로 관리되므로 이들의 예측을 잘못하면 지표구조물에 영향을 발생하게 된다. 따라서 토사지반(특히 사질토 지반) 특유의 급격한 침하를 평가할 수 있는 예측방법이 요구되고 있다.

3.2 지표면 침하

얕고 연약한 지반에서의 터널 굴착에 의해 발생하는 지표면 침하의 예측은 터널 기술자 누구에게나 중요한 과제이다 지표면 침하는 몇몇 요소들에 의해 야기될 수 있고 그것들의 일부는 터널 막장면에서의 지반 손실처럼 초기에 논의된다. 터널 굴착에 의하여 지표면 침하 외에 터널 굴착은 터널 막장 전방 지반의 횡방향 변형과 지반의 길이방향 거동을 발생시킨다.

4. 현장 개요

4.1 적용대상현장

본 연구에서 활용된 현장은 지하철 OO호선으로 굴착공법은 막장주변의 지반이완을 최소화하기 위해 링컷(Ring cut)공법으로 시공되었으며 상부에는 아파트와 빌딩등의 건물이 있어 시공시 주의를 요하는 구간이다.

그림 2는 지층 및 터널의 종단면도이다. 지층분포는 충적층이 깊게 분포하고 있으며, 지표면은 매립층으로 구성되어 있다. 대상지반은 풍화토와 풍화암의 경계부로 터널의 천단부는 풍화토이고 하부는 풍화암으로 형성되어 있다.

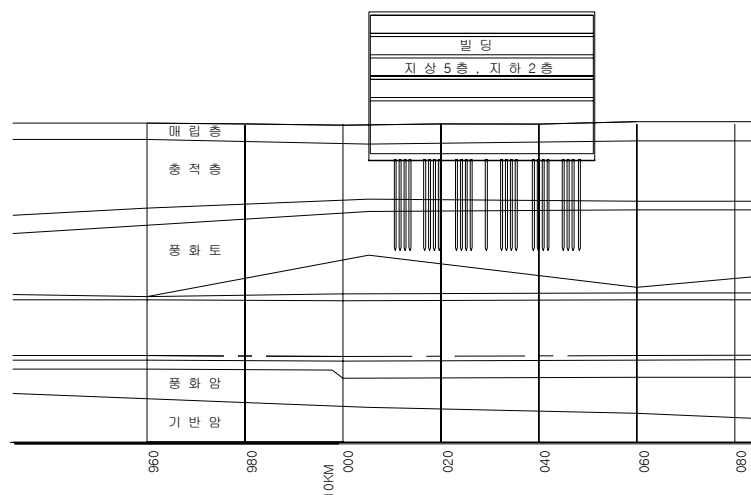


그림 2. 지층 및 터널의 종단면도

5. 수치해석결과 및 분석

5.1 해석조건

본 연구에서는 유한차분방식(FDM, finite difference method)에 근거하여 작성된 지반 해석용 프로그램인 FLAC-2D를 사용하여 탄소성 해석을 실시하였다. 지반은 M-C모델(Mohr-Coulomb)을 통해 해석을 수행하였으며 록볼트는 cable요소, 숏크리트는 beam요소를 통해 모델링 하여 해석을 수행하였다.

터널의 해석에 있어서 가장 중요한 것은 현지 지반 특성을 얼마나 해석에 잘 적용하는가에 달려 있다. 터널 설계 시 지반물성이 터널 주변 지반 거동에 미치는 영향은 매우 크기 때문에 보다 합리적인 터널 해석을 위해서는 해석에 사용되는 설계정수 산정에 세심한 주의가 요구 된다. 본 연구에서는 대상터널의 실내시험과 설계보고서를 통해서 표 3과 같이 기본 입력 자료를 사용하였다.

지보부재의 기본 물성값은 본 현장에서 설계시 사용한 설계값과 동일하게 사용하여 숏크리트의 두께는 25cm이며 경화단계에 따라 연성 숏크리트와 경성 숏크리트로 나누어 적용하였다.

강관다단은 15m길이의 강관을 굴착수평면에서부터 37°의 방향으로 터널 천단부에 시공되었으나 해석에서는 등가두께 20cm로 모델링 하였으며, 터널 하부에는 4.0m의 록볼트를 좌, 우측면에 모델링하였다. 지상 5층, 지하 2층으로 구성된 상부구조물 빌딩의 기초 PHC 말뚝기초와 직접기초로 모사하여 적용하였다. 2차원 해석에서 3차원적 터널 시공과정을 모사하기위해 하중분배개념을 도입하여 해석을 수행하였다. 굴착단계(터널굴착 - 연성숏크리트 타설 - 경성숏크리트 타설)별 하중 분담율을 30%-40%-30%로 가정하였으며, 측압계수는 1.0에 대해서 검토 하였다.

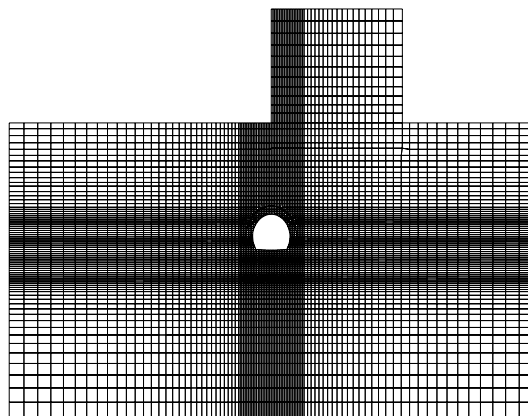


그림 3. 해석 모델링

표 3. 지반 물성치

지층종류	분포심도 (GL.-m)	단위체적중량 γ_i (kg/m ³)	탄성계수 E(MPa)	점착력 C(kPa)	내부 마찰각 (ϕ)	포아 송비 (ν)
매 립 층	3m	1,800	9.81	-	30	0.35
층 적 층	6m	1,900	5.88	10.00	35	0.35
풍 화 토	6m	1,900	196.13	19.61	30	0.35
풍 화 암	25m	2,000	343.23	49.03	35	0.33
연 암	30m	2,300	1470.99	196.13	35	0.3

표 4. 슛크리트 물성치

두께(cm)	포아송비		탄성계수(MPa)		단면2차모멘트 (m ⁴)
	soft	hard	soft	hard	
25	0.2	0.25	5×10^3	5×10^4	1.3×10^{-3}

표 5. 강관다단 물성치

두께(cm)	단위체적중량 γ_i (kg/m ³)	탄성계수 E(MPa)	점착력 C(kPa)	인장력 (kPa)	내부 마찰각 (ϕ)	포아 송비 (ν)
20cm	2,150	367.70	196.20	98.10	35	0.30

표 6. 록볼트 물성치

록볼트 종간격(m)	면적(m ²)	탄성계수(MPa)	인장항복강도(N)
1	4.9×10^{-4}	2.1×10^5	1×10^5

5.2 구조물의 변위 해석결과

그림 4는 터널굴착으로 인한 말뚝기초와 직접기초 구조물의 수평변위를 나타내었다. 구조물 좌측 터널직상부 부분의 변위가 가장 적게 나타났으며, 말뚝기초와 직접기초 영향에 따른 변위 차이는 터널직상부 구조물 좌측부분에서 가장 많은 7%의 차이를 보였으며 다른 부분에서는 3%의 차이를 보였다.

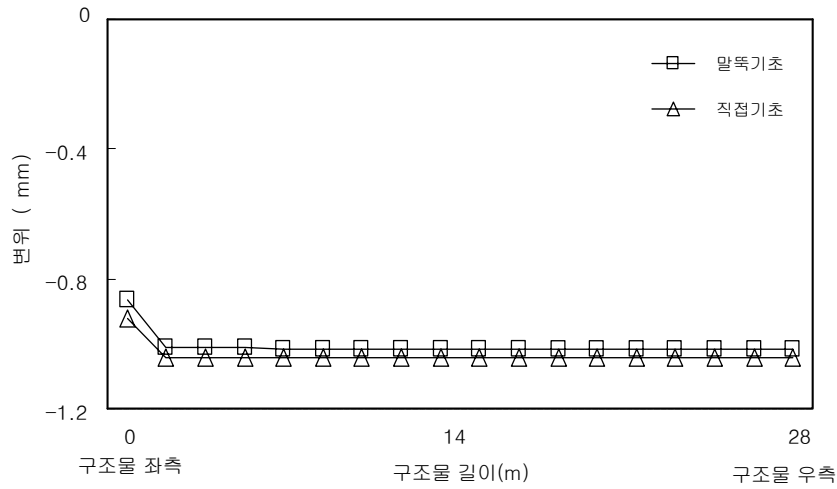


그림 4. 굴착에 따른 구조물 수평변위

터널 굴착시 지반의 수직변위가 발생하므로 인접구조물도 수직변위가 발생할 것이다. 다음 그림 5는 말뚝기초와 직접기초에 따른 구조물의 터널굴착후 수직변위를 나타내었다. 터널 굴착의 영향이 가장 적은 구조물 우측부분에서는 말뚝기초가 직접기초보다 0.22mm 많은 수직변위가 발생하였으나 터널굴착의 따른 영향이 커지는 구조물의 좌측부분에서는 직접기초의 수직변위가 0.44mm 많게 나타났다.

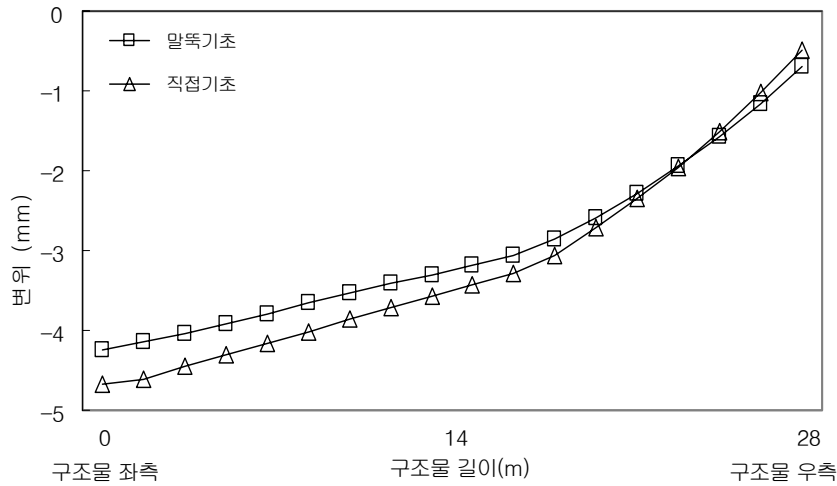


그림 5. 굴착에 따른 구조물 수직변위

터널 굴착에 따른 구조물의 총 발생 변위량을 그림 6에 나타내었다. 터널 굴착에 있어서 구조물 기초에 따른 구조물의 변위거동은 터널굴착의 영향이 적은 구조물 우측부분에서는 말뚝기초 1.23mm, 직접기초 1.18mm로 변위 차이가 0.05mm로 영향이 적었으나 터널굴착의 영향이 큰 구조물 좌측부분에서는 말뚝기초 4.33mm, 직접기초 4.73mm로 0.4mm로 구조물 우측부보다 8배 가량의 차이가 나타났다.

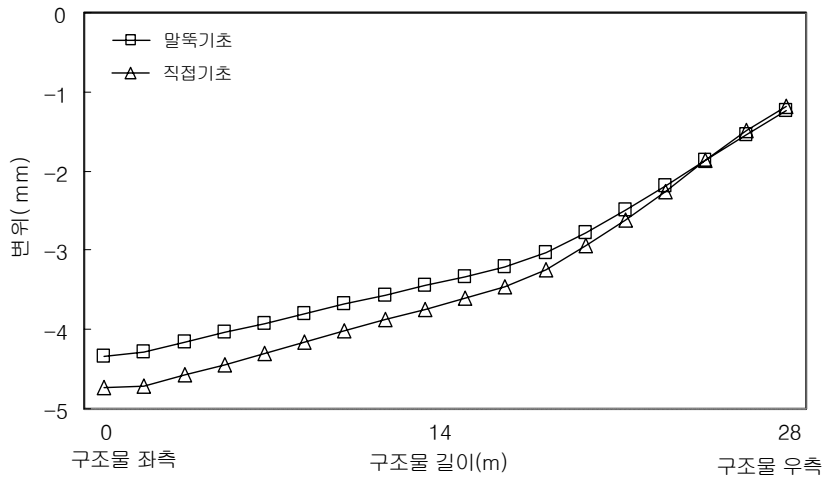


그림 6. 굴착에 따른 구조물 변위

5.3 지표면 침하거동

그림 7은 터널 굴착으로 인한 구조물 기초의 영향에 따른 지표면 침하곡선을 나타낸 것이다. 말뚝기초를 사용한 경우 터널을 중심으로 해서 우측은 빌딩의 영향으로 빌딩 하부의 지표면 침하량이 좌측보다 15~20%정도 많게 나타났으며 직접기초를 사용한 경우에는 빌딩위치의 지표면 침하량이 12~25%정도 많게 나타났다. 말뚝기초의 영향으로 직접기초를 사용한 경우보다 지표면 침하량이 2~15% 적게 발생하였다. 구조물의 영향이 작용하지 않는 위치에서는 대체적으로 대칭곡선이 일어남을 알 수 있었다. 또한 최대 침하량은 말뚝기초에서 4.58mm 정도 일어났고 직접기초에서는 5.06mm로 10%이상 말뚝기초의 영향으로 최대침하량이 작게 나타났음을 알 수 있었다.

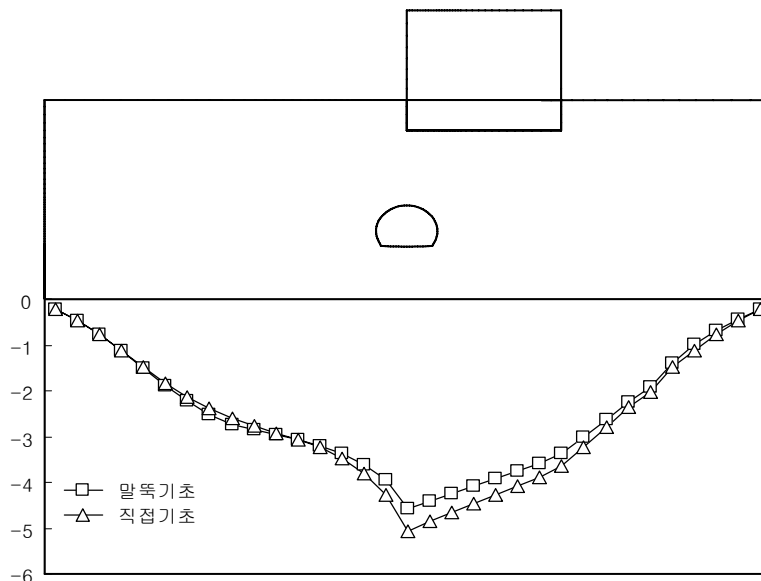


그림 7. 지표면 침하곡선

5.4 구조물의 부등침하

구조물에 하중이 가해져서 침하가 균등하게 발생하는 경우에는 구조물이 손상되기보다는 구조물의 침하가 문제가 된다. 그러나 침하가 균등하지 않으면 이로 인한 힘이 구조물에 추가로 작용하게 되어 구조물이 손상되는 수가 있다. 이러한 부등침하 (differential settlement)로 인한 구조물의 손상은 구조물과 지반의 상대적인 강성도에 따라 다르므로 일반화하여 수치로 나타내기가 어렵기 때문에 허용부등침하 (allowable differential settlement)는 대개 경험적으로 정한다.

터널굴착에 따른 구조물의 각변위량을 검토하여 굴착에 따른 구조물 하부의 침하량을 이용하여 표 7에 나타내었다. 구조물의 각변위는 말뚝기초일때 0.11/1000 발생하였고, 직접기초일때 0.13/1000이 발생하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이 Bjerrum(1963)이 제안한 각변위 한계값보다 모두 적은 값의 변위가 발생하여 구조물의 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다.

표 7. 터널 굴착에 따른 구조물의 각변위량

기 초	L(m)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	ΔSm(m)	ΔS/L
말뚝기초	28	4.331	1.233	3.098	0.11/1000
직접기초	28	4.787	1.175	3.612	0.13/1000

6. 결 론

본 연구에서는 터널 굴착시 인접 구조물의 말뚝기초와 직접기초에 따른 영향과 구조물이 미치는 영향을 수치해석을 통해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 굴착에 따른 구조물의 거동은 터널에 근접한 위치일수록 변위가 많이 발생하였다. 기초에 따른 변위 차이는 터널굴착의 영향이 적은 구조물 우측부분의 변위차이가 0.05mm로 적었으며 터널의 영향이 많은 구조물 좌측부분의 변위차이가 0.4mm의 차이로 8배 가량의 차이가 있었다.
2. 터널 굴착후의 지표면 침하는 구조물 하중의 영향으로 15~20%정도 많이 나타났으며 말뚝기초의 영향으로 2~15%정도 적게 발생하였다. 최대침하량은 말뚝기초에서 4.58mm, 직접기초에서 5.06mm가 발생하였다.
3. 굴착에 따른 구조물의 각변위량을 검토한 결과 지반에 따른 각변위는 Bjerrum(1963)이 제안한 각변위 한계보다 적은 값을 나타내어 구조물의 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났으나, 구조물에 발생하는 각변위는 매우 중요한 요소이므로 정확한 부등침하량 측정에 의한 각변위의 계산이 필요하다. 또한, 각변위 값은 반드시 Bjerrum(1963)에 제안한 각변위 한계치와 비교하여 구조물의 손상여부를 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. 김경모, 양구승, 1997, “도심지 깊은 굴착으로 발생하는 지반 지표침하 분석”, 한국 지반공학회 논문집.
2. 배규진, 1989, “토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구”, 연세대학교.
3. 이민근, 2002, “지반굴착시 인접구조물의 손상 영향 평가에 대한 수치해석”, 단국대학교.
4. Cording, E. J. and Long, J. H., Son, M., Laefer, D. F. 2001, "Modeling 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.
5. Skempton, A. W., MacDonald, D. H., "The Allowable Settlement of Buildings", Proc. Inst. of civil Eng., Part III, Vol. 5, pp. 727-784.
6. Sowers G. F. 1962. "Shallow Foundations." Foundation Engineering, G. A. Leonards, ed., McGraw Hill, New York, USA.
7. 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.