

지중 박스 구조물 굴착시 침하형상에 대한 연구

A Study on the Settlement Profile during Excavation of Underground Box Structures

조동환*, 오정호*†, 박준경**, 김현기***

Donghwan Cho*, Jeongho Oh*†, Junkyung Park**, HyunKi Kim***

Abstract Various empirical equations have been proposed to predict the ground settlement profile due to excavation of conventional circular tunnels, and used to estimate the settlement influential range along with evaluate the relaxation area in advance. However, the study on ground movements for the underground box structures has not been fully studied. In this study, the ground settlement induced from underground box excavations is investigated using the two dimensional finite element analyses. A formulation to assess the settlement profile applicable to underground box structure is proposed based on the parametric analyses by the changes of ground condition, geometric condition of structure, and construction conditions.

Keywords : Underground box structure, Ground settlement, Parametric analyses, Empirical equation

초 록 기존의 원형터널은 터널굴착으로 인한 지표침하량 예측을 위한 다양한 경험식이 제안되어, 이를 활용한 침하영향범위산정 및 이완영역을 사전에 평가할 수 있는 지표로 활용되고 있다. 그러나, 지중박스구조물 굴착시 침하형상에 대한 연구는 미진한 실정으로, 본 연구에서는 2차원 유한요소해석을 이용하여 구형단면 터널에 대한 침하형상곡선에 대한 연구를 수행하였다. 매개변수분석을 통해 지하수위조건, 토피고, 터널단면형상, 시공조건등의 변화시 지표침하거동을 분석하여 기존 경험식의 적용가능성을 검토하고, 수치해석 결과를 바탕으로 지중박스구조물 굴착시 적용가능한 침하형상곡선식을 제안하였다.

주요어 : 구형터널, 침하형상곡선, 지표침하거동, 매개변수분석, 경험식

1. 서 론

터널굴착으로 인한 지표침하의 영향은 크게 (1) 경험식을 통한 방법, (2) 탄성론에 근거한 해석적인 방법, (3) 수치해석, (4) 실험적인 방법 (모형실험, 원심모형실험)등에 의해 산정할 수 있다. 이중 경험식에 근거한 지표침하 산정기법은 계산의 용이성으로 인해 초기설계단계나 현장계측관리기준치 설정에 많이 적용되고 있는 실정이다. 기존의 경험식들은 대부분 원형터널단면에 대한 현장계측자료를 근거로 유도된 식으로서 지중박스구조물 굴착시의 적용성에 대한 검토가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 2차원 유한요소해석을 통해 지중박스구조물 굴착시 침하형상곡선의 특성을 분석하고, 매개변수 분석을 통해 토피고, 터널형상, 시공조건등의 변화를 고려한 침하형상 곡선식을 제안하였다.

† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도시설공학과(j-oh@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 철도대학 철도시설공학과

** HBC Inc

*** 철도기술연구원 고속철도연구본부 첨단인프라연구팀

2. 터널굴착에 따른 침하형상곡선

2.1 기존연구요약

Peck[1]은 정규분포곡선(Gaussian curve)을 이용한 식(1)과 같은 침하형상곡선 식을 제안하였고, 체적변화가 없는 상태에서는 식(1)을 적분하면 $V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max}$ (지표침하량의 단위길이당 부피)를 구할 수 있다 (Fig. 1).

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

여기서, i =침하형상폭 변수, $x=i$ 일 때 $S(x)=0.61S_{\max}$, $x>3i$ 일 때 $S(x)<0.012S_{\max}$

침하형상폭 변수(i)는 지반조건에 의해 결정되는 변수로 모형실험 및 다양한 현장측량자료로부터 여러 학자에 의해 Table 1과 같이 제안되고 있다. 또한, Aversin[8]과 Arato[9]는 최대 침하량(S_{\max}), 최대 침하량 발생 지점으로부터 임의점까지의 거리(x), 침하형상폭의 절반(L)

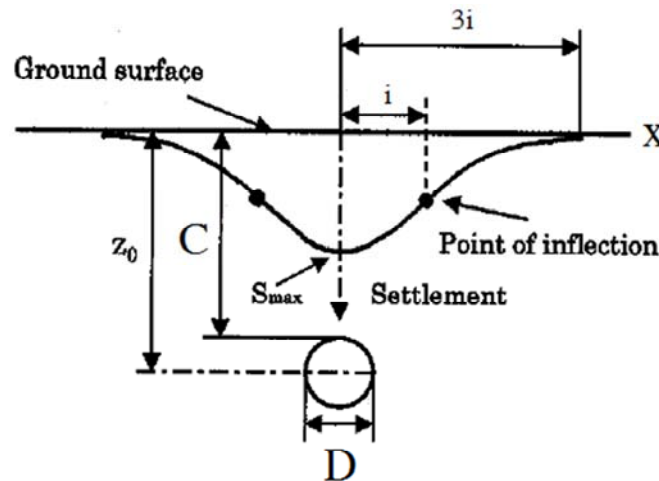


Fig. 1 Definition of settlement profiles of Gaussian form

Table 1 Different empirical solutions for estimation of settlement trough width,

References	Width of settlement trough,	Basis for empirical solution
Peck[1]	;	Field observations
Attewell and Farmer[2]	;	Field observations of UK tunnels
Atkinson and Potts[3]	; loose sand ; dense sand/OC clay	Field observations and model tests
Mair et al.[4]		Field observations and centrifuge tests
Clough and Schmidt[5]	;	Field observations of UK tunnels
O'Reilly and New[6]	; cohesive soil, ; granular soil,	Field observations of UK tunnels
Rankin[7]	; for clay	Field observations

Notes: =the depth of tunnel below ground(at tunnel springline), =tunnel radius

을 이용한 식(2), 식(3)을 제안하였다.

$$S(x) = S_{\max} (1 - x/L)^{4.54} \exp(4.54x/L) \quad (2)$$

$$S(x) = S_{\max} \left(\frac{0.75}{\exp(2x/L)^2} + \frac{0.25}{\exp(2x/L)^4} \right) \quad (3)$$

여기서, 침하형상폭의 절반(L)은 터널하부에서 $\tan(45 + \phi/2)$ 만큼의 거리이다.

2.2 수치해석

본 연구에서는 지중박스구조물에서의 침하형상곡선식을 제안하고자 2차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 2D를 사용하여 수치해석을 수행하고 이를 통해 기존 제안식과 비교 및 검토를 통해 침하영향범위 파악 및 침하형상에 대한 곡선식을 제안하고자 한다.

2.2.1 해석조건

저토피구간의 터널굴착으로 인한 침하영향평가를 위해 토피고(C)는 2m, 3.5m, 7.5m의 세가지 경우를 고려하였으며, 터널형상은 사각형단면(7.5m(B)×7.5m(H))을 기본으로 비교를 위해 원형(D=7.5m)단면을 고려하였다. 지반조건은 일반적인 풍화토의 물성치를 사용하여 Plane Strain 15-Node 요소로 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 철근콘크리트 라이닝은 Plate요소를 이용하여 각각 1.0m(Box터널), 0.5m(원형터널) 두께로 가정하고 Linear elastic모델을 적용하였다. 또한, 지하수위에 대한 영향을 파악하고자 지하수위 유무에 따른 해석을 실시하였으며,

Table 2 Material properties for the FEM analysis

Ground conditions		Plate properties	
Material Model	Mohr-Coulomb	EA(kN/m)	2.44E+7 / 6.10E+6
Unit weight (kN/m ³)	18	$\frac{EI}{d}$ (kNm ² /m)	2.03E+6 / 1.27E+5
Elastic Modulus (kN/m ²)	200,000	d	1 / 0.5
ν	0.3	w(kN/m/m)	25
cohesion (kN/m ²)	30	ν	0.15
friction angle(deg.)	33	-	-

과굴(overcut)의 크기(50mm, 100mm)를 변화시켜 시공조건변화의 영향을 고려하였다. Table 2에는 해석에 사용된 지반 및 Plate 물성치를 정리하였다.

2.2.2 해석결과분석

(1) 터널단면형상/Overcut크기변화/지하수위유무에 따른 침하량 분석결과

원형터널에 비해 지중박스구조물의 최대침하량(S_{\max})이 크게 나타났으며, 지중박스구조물의 경우 Overcut이 증가함에 따라 터널굴착으로 인한 지반손실량의 증가로 최대침하량이 더 커지는 것으로 나타났다. 원형터널에서의 Overcut의 영향은 지중박스구조물에 비해 미미한 것으로

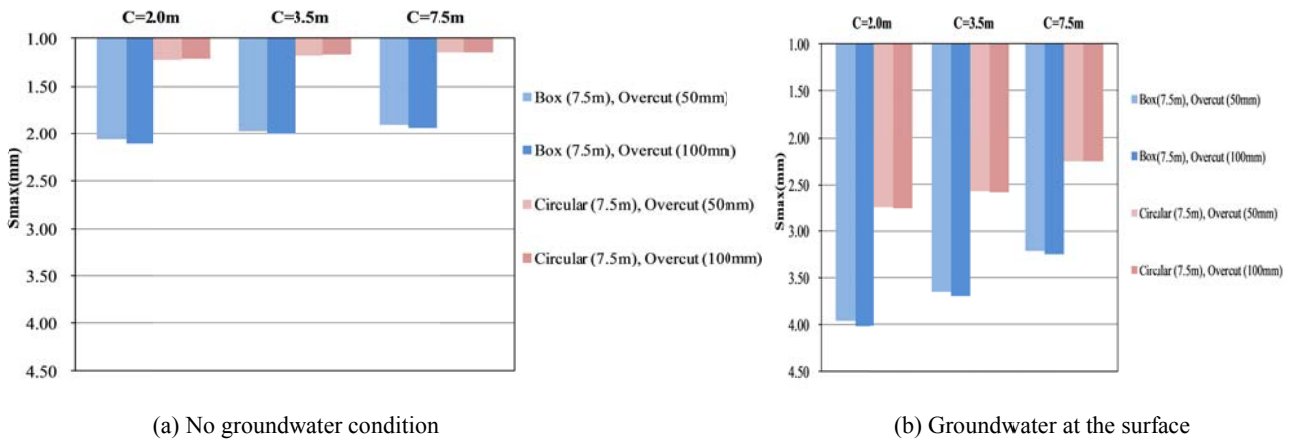


Fig. 2 FEM analysis results - maximum settlement ()

나타났다. 또한, 최대침하량은 토피고(C) 증가에 따라 감소하는 경향을 보이며 지하수위가 지표에 존재하는 경우의 최대침하량이 지하수위가 없는 경우에 비해 크게 나타났다 (Fig. 2).

(2) 침하형상곡선 분석결과

2.1절에서 정리한 기존 경험식과 수치해석결과와의 비교를 위해 침하량을 최대침하량(S_{max})으로 나누어 정규화(Normalize)시킨 후 비교하였다. 지하수위를 고려하지 않은 원형터널의 경우 수치해석결과와 기존 경험식이 비교적 유사한 경향성을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 지중박스구조물의 경우에는 터널로부터 1D 범위 이후부터 큰 편차를 보였으며, 이는 저토피터널의 경우 터널굴착으로 인한 지반내 응력불평형이 터널형상에 따라 달라지며, 얇은 토피고로 인해 지반의 Arching 효과를 충분히 기대할 수 없기 때문인 것으로 판단된다 (Fig. 3). 또한, 지

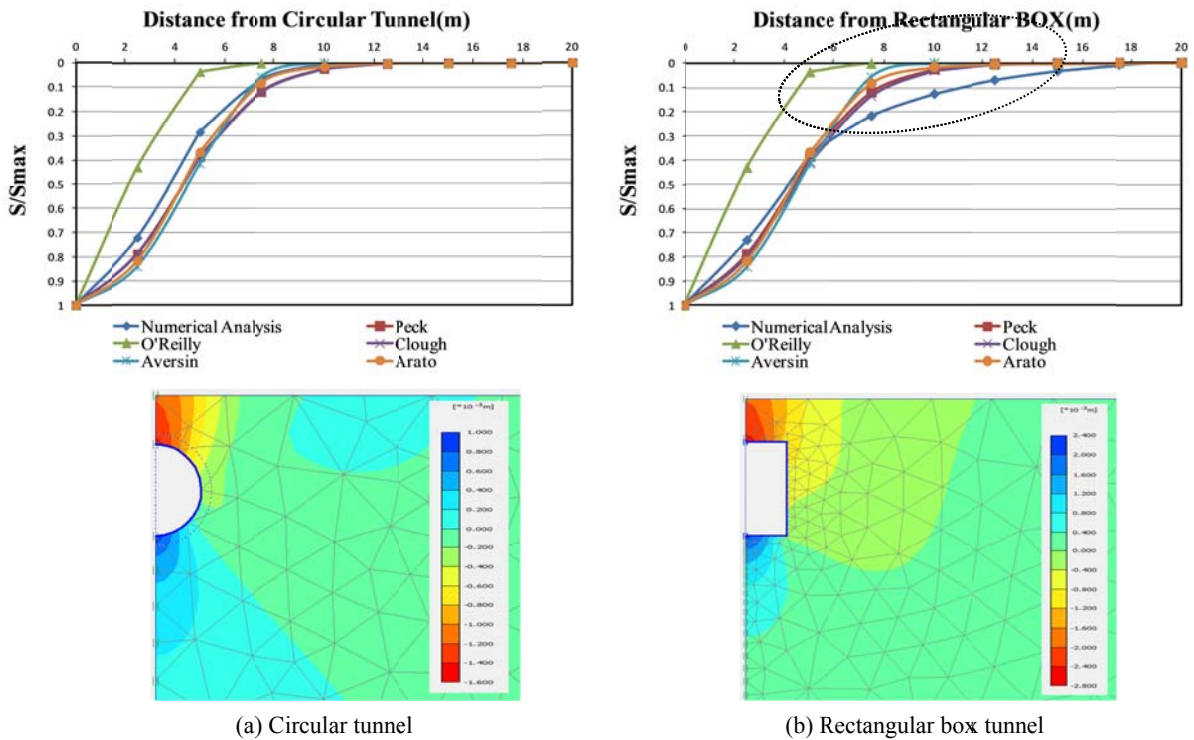


Fig. 3 Settlement trough and vertical displacements ($C=3.5m$) - no groundwater condition

중박스구조물이 전체적으로 원형터널보다 침하량이 크고, 침하량과 최대침하량간의 비는 곡선의 기울기가 더 완만하며, 침하영향범위가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

지하수위가 지표면에 위치하는 것으로 가정하고 배수조건으로 해석한 경우의 결과를 Fig.4에 정리하였다. 단면형상에 관계없이 기존 경험식과 비교하여 비교하여 큰 편차를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 경험식들이 대부분 London clay와 같은 비배수상태의 체적변화가 없는 경우에 대한 계측데이터로부터 유도된 식으로, 지하수위 아래의 화강풍화토와 같이 배수가 발생하는 조건에서는 터널굴착으로 인한 영향범위가 더 커질 수 있음을 나타낸다.

2.3. 침하형상 곡선식 제안 및 검토

수치해석결과에 적합한 지중박스구조물 침하형상 곡선식의 제안을 위해 다음과 같은 수정정규분포곡선식을 제안하였다.

$$S(x) = S_{\max} \frac{n}{(n-1) + \exp\left[\alpha\left(\frac{x}{i}\right)^2\right]} \quad (4)$$

$$n = e^{\alpha} \frac{2\alpha - 1}{2\alpha + 1} + 1 \quad (5)$$

여기서, n = 침하형상곡선의 폭의 크기를 결정하는 형상계수, α = 식(1)에서와 같이 i 가 변곡점(inflection point)에 위치하도록 조정하는 보정계수

통계분석을 통해 Fig.5와 같이 $i = 0.5Z_0$, $\alpha = 0.25$ (지하수위의 영향이 없는 경우), $i = Z_0$, $\alpha = 0.005$ (지하수위가 지표에 위치하는 경우)를 사용하는 경우 수치해석결과와 근사한 침하형

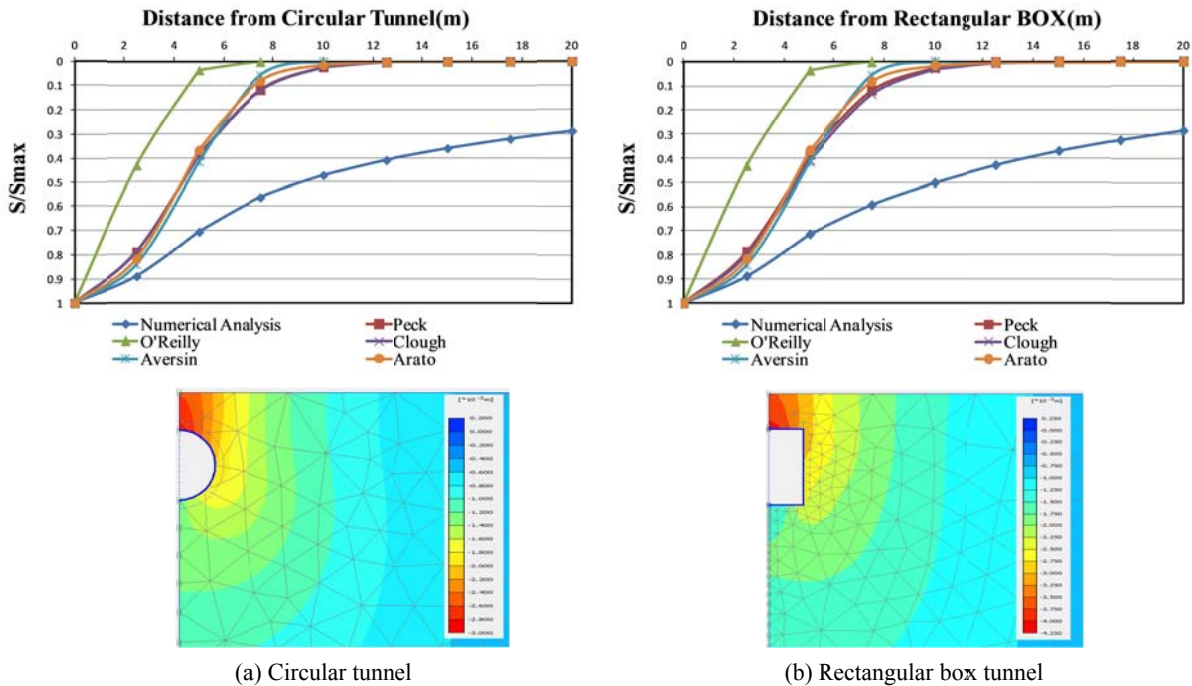


Fig. 4 Settlement trough and vertical displacements (C=3.5m) – groundwater at the surface

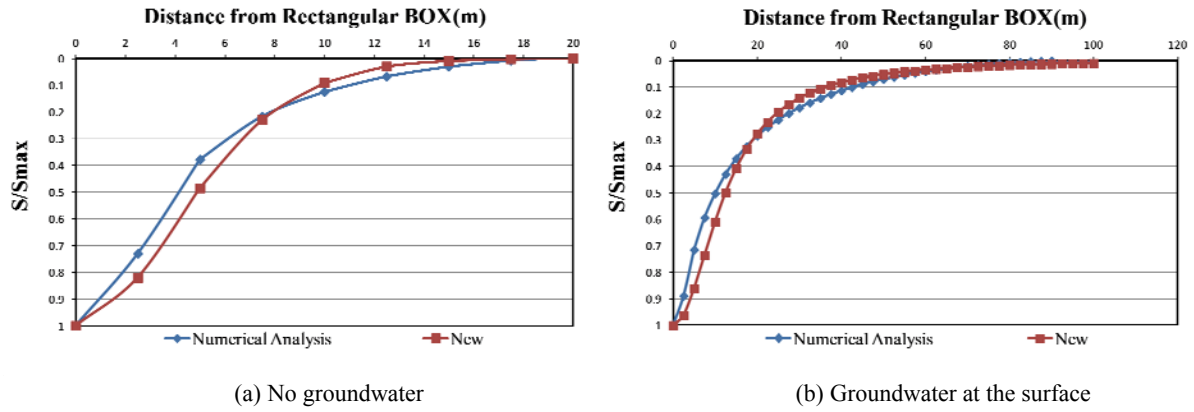


Fig. 5 Comparison between numerical analysis and proposed settlement trough for rectangular box tunnel (C=3.5m)

상곡선을 얻을수 있었다. 배수조건에서는 침하형상곡선 변곡점의 위치를 변화시켜 터널굴착영향범위가 커진 영향을 고려하였다.

3. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 지중박스구조물에 대한 침하형상곡선에 대한 연구를 수행하여, 지하수위조건, 토피고, 터널단면형상, 시공조건등의 변화에 따라 지중박스구조물 굴착시 적용 가능한 새로운 횡단면 침하형상 곡선식을 제시하였으며, 배수조건에 따라 침하형상곡선 변곡점의 위치를 변화시킬 것을 제안하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구산업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착 보강 기술 개발, 16SCIP-B108153-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] R.B. Peck (1969) Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proceedings of the 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Mexico, pp. 225-290.
- [2] P.B. Attewell, I.W. Farmer (1974) Ground deformation resulting from shield tunneling in London clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 11(3), pp. 380-395.
- [3] J.H. Atkinson, D.M. Potts (1977) Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil, *Geotechnique*, 27(2), pp. 203-213.
- [4] R. Mair, M. Gunn, M. O'Reilly (1981) Ground movements around shallow tunnels in soft clay, *Proceedings of 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, vol 2, Stockholm, pp. 323-328.
- [5] G.W. Clough, B. Schmidt (1981) Excavation and tunneling. In: Brand EW, Brenner RP (eds) *Soft clay engineering*, Chap 8. Elsevier.
- [6] M.P. O'Reilly, B.M. New (1982) Settlements above tunnels in the UK-their magnitude and prediction, *Tunneling* 82, pp. 173-181.
- [7] W. Rankin (1988) Ground movements resulting from urban tunneling, *Proceedings of 23rd conference of the engineering group of the geological society*, London Geological Society, pp. 79-92.
- [8] S.G. Aversin (1953) Rock movements Related to Mining (in Hungarian), Nehezpari Kiado, Budapest.

[9] A. Arato (1992) Deformation due to cavities, Soil settlement effects on buildings (ed E Dulacska), Elsevier, Amsterdam, pp. 54–97.