

원형 수직구 굴착에 따른 발생 지반침하 분석

손무락^{1*} · 이강렬²

¹정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 정교수

²비회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

Analysis of ground settlement due to circular shaft excavation

Moorak Son^{1*} · Kangryel Lee²

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Daegu University

²Senior Researcher, Korea Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation

*Corresponding Author : Moorak Son, mson@daegu.ac.kr

Abstract

Ground excavation inevitably causes ground displacement of adjacent ground, and structures and facilities exposed to ground displacement may suffer various damages. Therefore, in order to minimize the damage and damage to adjacent structures and facilities caused by excavation, ground displacement (settlement and horizontal displacement) in the adjacent ground caused by excavation must first be predicted. There is many ground displacement information induced by general braced cut excavation, but the information is not enough for circular shaft excavation. This study aims to provide information on the estimation of ground settlement caused by circular shaft excavation through the case analysis of circular shafts and comparison with braced cut excavation. From this study, it was found that the use of the settlement criterion of braced cut excavation as the settlement management criterion for circular shaft excavation is a conservative approach in terms of safety. But when considering the economic aspect, it may result in overdesign of the wall and therefore, a more reasonable settlement criterion can be needed for circular shaft excavation.

Keywords: Ground excavation, Circular shaft, Braced cut, Ground settlement, Settlement criterion

초 록

지반굴착은 필연적으로 인접지반의 지반변위를 유발시키며, 지반변위에 노출된 구조물 및 시설물들은 다양한 피해를 입을 수 있다. 따라서 굴착유발 인접구조물 및 시설물의 손상 및 피해를 최소화하기 위해서는 우선적으로 굴착으로 인해 발생하는 인접지반에서의 지반변위(침하 및 수평변위)를 예측하여야 한다. 흙막이 굴착 유발 지반변위 정보는 상대적으로 많이 존재하지만 원형 형태의 수직구 굴착에 대한 지반변위 정보는 충

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
25(2)87-99(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.2.087>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received February 3, 2023

Revised March 3, 2023

Accepted March 9, 2023



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

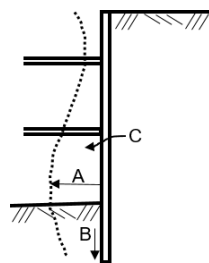
Copyright © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

분치 않다. 본 연구에서는 수직구 굴착에 대한 사례분석 및 흙막이 굴착과의 비교를 통해서 수직구 굴착유발 인접지반 침하예측에 대한 정보를 제공하고자 한다. 본 연구를 통해서 수직구 굴착 시 침하관리 기준으로 흙막이 굴착의 침하기준을 사용하는 것은 안전성 측면에서 보수적인 접근방법으로 판단되나 경제성 측면을 고려할 때 벽체의 과다설계를 초래할 수 있어 수직구 굴착에 대해 보다 합리적인 침하기준이 필요한 것으로 나타났다.

주요어: 지반굴착, 원형 수직구, 흙막이 굴착, 지반침하, 침하기준

1. 서론

지반굴착은 필연적으로 인접지반의 지반변위를 유발시키며, 적절한 통제가 이루어지지 못할 경우 지반변위에 노출된 구조물 및 시설물들은 균열, 전도 등의 다양한 피해를 입게되어 안전 및 경제적으로 상당한 손실이 따르게 된다. 따라서 굴착에 의해 유발되는 인접구조물 및 시설물의 손상 및 피해를 최소화하기 위해서는 우선적으로 굴착으로 인해 발생하는 인접지반에서의 지반변위(침하 및 수평변위)를 예측하여야 한다. 굴착으로 인해 발생하는 지반변위는 지반조건, 굴착조건, 시공조건, 지하수위 조건, 터널조건, 벽체 및 지지대 조건 등의 여러 가지 요인에 의해서 영향을 받으므로 이론적인 접근을 통한 지반변위 예측은 용이하지 않으면서도 여러 가지 문제점들을 내포하고 있다. 따라서, 지반변위 예측은 일반적으로 경험적 방법, 실험적 방법 또는 수치해석적 방법을 통해서 수행되고 있다. 일반적 흙막이 지반굴착과 달리 TBM터널이나 전력구 시공을 위한 수직구 굴착의 경우 원형형태를 주로 나타내고 있다. 그럼에도 불구하고 굴착유발 지반변위를 발생시키는 요인들은 크게 다르지 않다. 지반굴착에 따른 지반변위는 다양한 원인에 의해 발생하는데, Cording (1984)은 지반변위를 유발시키는 세 가지 주요원인에 대해서 언급하였다(Fig. 1). 첫째는 지반과 굴착벽의 상호작용에 의해 발생하고, 둘째는 굴착벽의 침하에 의해서 발생하며, 셋째는 굴착벽을 통해서 유실되는 토사에 의해서 발생한다고 하였다. 이외에도 지반변위는 굴착바닥의 히빙이나 굴착배면토사의 압축 등에 의해서도 발생할 수 있다. Milligan (1974)은 굴착벽의 처짐형상에 대해서 두 가지 형상의 벽체처짐(캔틸레버형상 및 벌징형상)에 대해서 보고하였다(Fig. 2). 이와 같이 서로 다른



A : SOIL-WALL INTERACTION
B : SETTLEMENT
C : SOIL PASSING THROUGH WALL

Fig. 1. Causes of ground displacement (Cording, 1984)

형태의 벽체처짐 형상이 발생하는 이유는 굴착 및 지지구조의 특성에 기인한다.

흙막이 굴착과는 달리 수직구 굴착에 대한 지반변위 계측정보는 상대적으로 매우 미흡하여 수직구 굴착 시 지반변위 예측에 필요한 정보를 이용함에 있어서 매우 제한적이다. 본 연구에서는 수직구 굴착에 대한 사례분석 및 흙막이 굴착과의 비교를 통해서 수직구 굴착유발 인접지반 침하예측에 대한 정보를 제공하고자 한다.

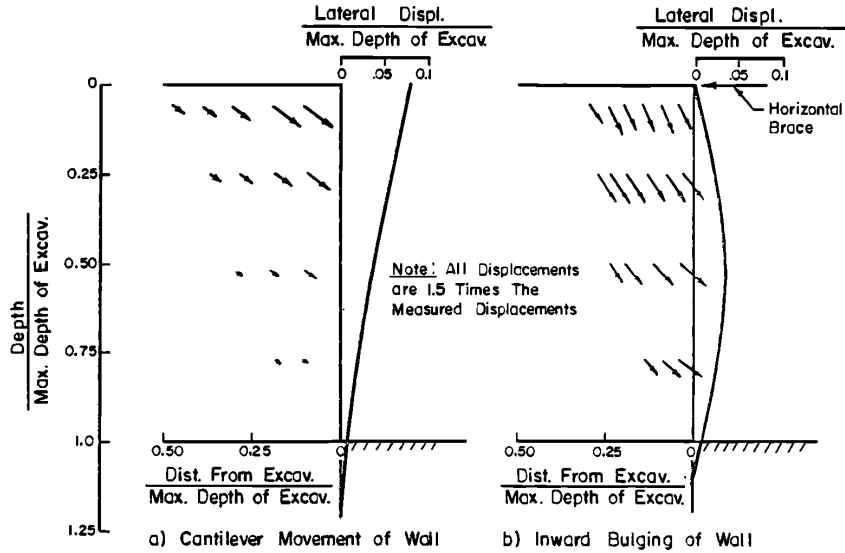


Fig. 2. Deflection shape of excavation wall (Milligan, 1974)

2. 지반굴착 유발 지반변위 계측사례

Peck (1969)은 Chicago지역에서의 지반굴착 시 계측한 다양한 지표변위를 조사 및 분석하였으며(Fig. 3), Cording and O'Rourke (1977), Goldberg et al. (1976)과 Clough and O'Rourke (1990) 등도 다양한 현장조건에서 발생한 지표침하 특성을 제시하였다. Goldberg et al. (1976)에 의하면 모래나 자갈 및 매우 단단한 점토 지반에서는 조사된 굴착현장의 약 75%에서, 발생한 벽체변위는 지보재나 벽체형식에는 큰 영향을 받지 않으면서 굴착깊이의 0.35% 보다 더 작은 것으로 나타났다. 연약점토 내지 약간 단단한 점토에서의 벽체변위는 조건에 따라 그 차이가 뚜렷하였는데, 프리스트레스 브레이싱된 콘크리트 슬러리벽체에서는, 발생한 벽체변위가 굴착깊이의 약 0.25% 정도였고 시트파일이나 H파일 토류벽 벽체에서 그 비는 1%를 초과하였다. 최대 벽체변위에 대한 최대 지표면 침하 비는 연약 내지 보통 점토에서 평균 1.4로 관찰되었으며, 매우 단단한 점토에서는 그 비가 0.7로 조사되었다. Clough and O'Rourke (1990)이 조사한 결과에 따르면, 단단한 점토 및 모래에 있어서 최대 벽체변위는 굴착깊이의 평균 0.2% 정도였고 최대 0.5%까지 벽체변위가 발생한 것으로 나타났다. 또한 최대 지표침하는 굴착깊이의 평균 0.15%였고 최대 0.5%까지 벽체변위가 발생하였다. 이외에도 Hsieh and Ou (1998), Kung et al. (2007), Schuster et al. (2009) 등이 사례조사를 토대로 굴착유발 지반변위를 예측하는 방법에 대하여 제안하였다.

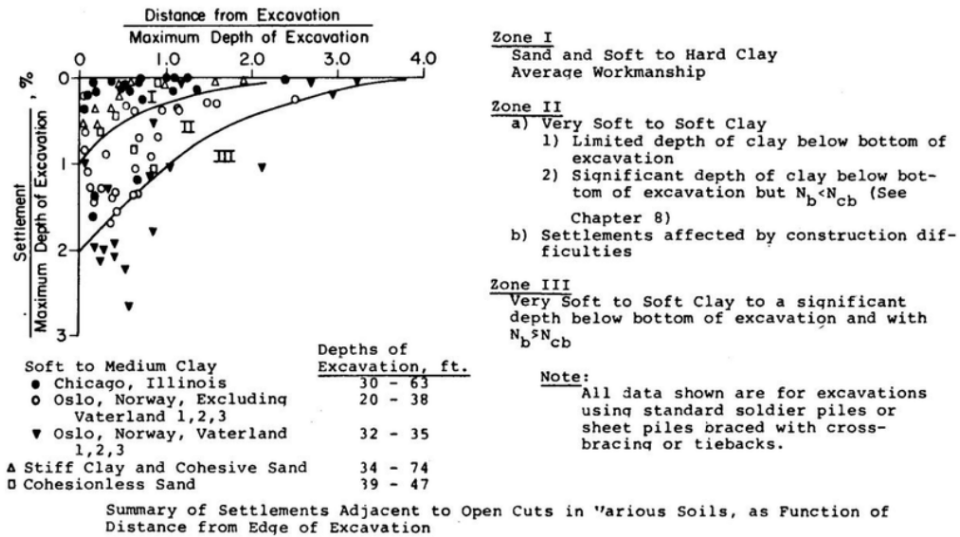


Fig. 3. Settlement due to braced cut excavation in Chicago (Peck, 1969)

굴착유발 인접지반의 수평변위는 인접구조물의 손상에 큰 영향을 미침에도 불구하고 많은 연구가 수행되지 않은 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 Fig. 4는 제한적이지만 굴착유발 인접지반 수평변위에 대한 연구결과의 일부를 보여주고 있다.

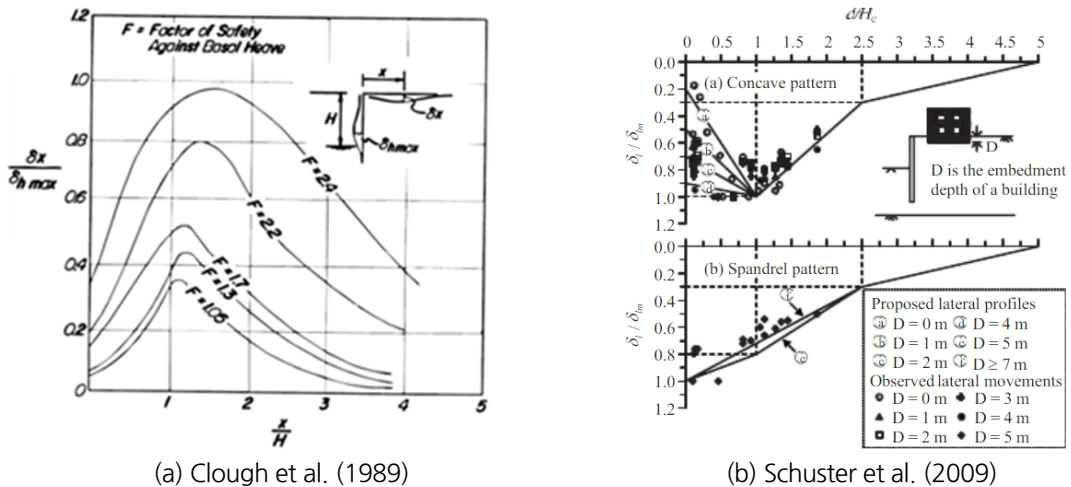


Fig. 4. Estimation of excavation-induced lateral ground displacement

수치해석적 방법을 통한 지반변위 예측은 많이 사용되지만 그 신뢰성은 지층조건 및 지반물성치의 적절성, 지반 구성모델의 적절성, 벽체 및 지지대 구조물과 인접지반의 상호작용 적절성 등에 따라 좌우되며 그 결과 또한

상기 인자들의 적절성 등에 따라 큰 차이를 보인다. 일반적으로, 수치해석을 통해 벽체자체의 변위는 신뢰성을 가지고 예측할 수 있지만(벽체 및 지지대의 강성 및 토압에만 좌우 됨) 주변 지반변위는 보다 복잡한 요인(지반의 응력-변형율-강도 관계, 미소변형 비선형성, 이방성, 부피변화, 응력경로, 변형율 연화 및 경화, 인터페이스 모델링, 지반물성치, 시공단계 등)에 의해서 영향을 받으므로 예측하기가 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 여러 연구자들 (Mana and Clough, 1981; Jardine et al., 1986; Clough et al., 1989; Schuster et al., 2009; etc.)은 굴착유발 주변 지반 거동파악을 위해 수치해석적 방법을 이용한 바 있다.

수직구 굴착관련 지반변위에 대한 계측연구는 흙막이 굴착과 비교하여 상대적으로 많지 않지만 제한된 연구결과가 몇몇 연구자에 의해서 발표되었다(Wong and Kaiser, 1988; New and Bowers, 1994; Muramatsu and Abe, 1996; Menkiti and Long, 2015; Schwamb et al., 2016; Faustin et al., 2017; 2018; New, 2017; Le et al., 2019). New and Bowers (1994)는 영국 히드로 고속철도 시험터널의 굴착과 관련하여 런던 단단한 점토(stiff clay)에 굴착되는 수직구로 인해 발생한 침하를 계측하고 침하예측식을 제안한 바 있으며, New (2017)는 보다 연약한 점토에 대해 고려할 수 있는 보완식을 제안한 바 있다. 하지만, 관련 예측식은 해당 지반 및 수직구 조건(직경 및 깊이, 지보방법)과 유사한 경우에만 적용가능하고 조건이 서로 다른 경우에는 적용에 한계가 있다고 보고되었다 (Faustin et al., 2018). 국내에서도 Shin et al. (2005)은 원형 수직구에 작용하는 토압산정 및 지표침하 예측방법에 관한 연구를 수행한 바 있으며 Ko (2008)는 도심지 수직구 굴착에 따른 지반굴착 거동에 관하여 연구한 바 있다. Park et al. (2022)은 지하수 유동을 고려한 원형 수직구 거동에 대하여 분석한 바 있으며 Kim (2022)은 원심 모형을 실험을 통해 원형 수직구 굴착중 발생하는 지반변형 평가에 대하여 보고한 바 있다. 그럼에도 불구하고 흙막이 굴착과 원형 형상의 수직구 굴착에 따른 지반변위에 대해 현장계측자료를 활용한 직접적인 비교는 찾아보기 어려운 실정이다.

3. 흙막이 굴착 및 원형 수직구 굴착유발 지반침하 비교

본 절에서는 흙막이 굴착과 원형 형상의 수직구 굴착유발 주변 지반침하에 대한 비교를 수행하였다. 수평변위의 비교는 계측자료가 충분치 않아 본 연구에서는 제외하였다. 비교를 위해 사용된 흙막이 굴착 계측자료는 미국 시카고(Peck, 1969; O'Rourke et al., 1976) 및 워싱턴 D.C. (O'Rourke et al., 1976) 굴착현장 등을 포함한 세계 여러 지역에서 수집된 자료(참고문헌 참조)를 토대로 하였다. 과거 계측기술 및 장비 등이 최근과 비교하여 큰 차이가 있어 최근에 계측된 계측결과와 비교함에 있어 한계성이 있을 수 있으나 과거에 제시된 기준들이 현재에도 여전히 침하관리 기준 및 자료로서 활용되고 있어 비교를 위해 현장 계측관리가 잘 된 자료를 이용하였다. 시카고 현장의 지반조건은 연약점토와 단단한 점토가 혼재된 전체적으로 점토거동을 나타내는 지반이며, 시트파일, 슬러리벽체 등을 사용한 다양한 벽체로 시공되었으며 굴착깊이는 약 8~21 m이다. 워싱턴 D.C. 현장의 지반은 모래 및 자갈, 점토 등이 혼재된 지반이나 전체적으로 사질토 거동을 나타내는 지반이며, H파일과 토류판, 버팀대를 사용한 벽체로 시공되었으며 굴착깊이는 약 20~26 m이다. Clough and O'Rourke (1990)는 흙막이 굴착관련 슬러리

벽체 설치 시 발생한 지반침하에 대해서 조사하고 발표하였다(Fig. 5). 지반조건은 연약점토(Bell Common, South Cove 현장) 및 단단한 점토(London NPY, Studenterlunden 현장), 사질토(Hong Kong 현장)까지 다양하며, 굴착 깊이는 37 m에 달했다.

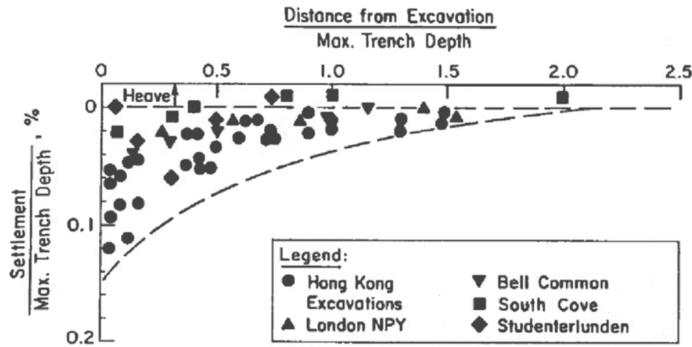


Fig. 5. Settlement due to installation of diaphragm wall (Clough and O'Rourke, 1990)

Mohamed (2017)도 다양한 현장 및 지반조건에서 계측된 흠막이 굴착관련 슬러리벽체 설치로 인해 발생한 지반침하를 조사하고 관련 데이터를 이용하여 침하예측 곡선을 제시하였으며 Fig. 6에 Clough and O'Rourke (1990)이 제시한 침하예측 곡선과 함께 나타냈다. 유사한 종류의 지반이라 할지라도 서로 다른 침하예측 곡선을 제시함으로써 발생침하는 지층종류 뿐만 아니라 시공품질, 지층분포, 지층특성 및 굴착조건 등 여러 요소에 의해서 영향을 받을 수도 있다는 것을 보여주고 있다.

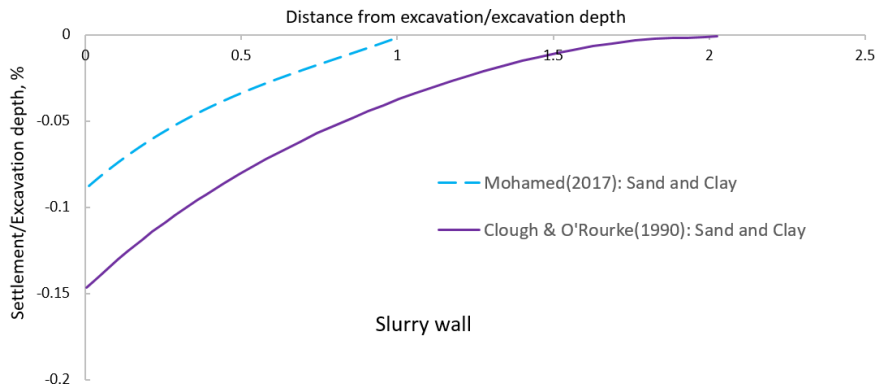


Fig. 6. Settlement due to installation of diaphragm wall

Fig. 3과 Fig. 5를 비교해 볼 때 흠막이 굴착에서는 굴착 전 지지방식인 슬러리벽체에서 굴착 후 지지방식인 H파일 토류벽체 보다 전반적으로 작은 침하가 발생하였으며, 지반조건 측면에서 볼 때 H파일과 토류판, 버팀대를

사용한 굴착벽체를 사용했을 경우는 지반종류에 따라 침하에 있어서 큰 차이가 낮지만 슬러리벽체를 사용했을 경우 지반종류에 따른 침하차이는 크게 발생하지 않았다. 이는 슬러리벽체의 강성이 커서 발생침하 자체가 전반적으로 작았고 시공품질 등에 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

앞에서도 언급한 바와 같이 New (2017)는 New and Bowers (1994)가 단단한 점토(Stiff clay)에 대해 최초 제시한 식을 이용하여 연약한 점토에 대해서도 고려할 수 있는 보완식을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$S_v = \alpha H \left(1 - \frac{d}{nH}\right)^2 \quad [\text{식 (1)} : \alpha = 0.06\%, n = 1; \text{식 (2)} : \alpha = 0.06\%, n = 1.5] \quad (1)$$

여기서, S_v : 지표면 침하, H : 굴착깊이, d : 굴착면으로부터 거리, α 및 n : 계수, 그림에 나타냄.

Fig. 7은 New (2017)가 단단한 점토 및 연약점토에서 시공된 수직구 굴착 관련 침하결과들을 보여주고 있다. Fig. 7에서 식 (1)은 런던점토와 같이 단단한 점토에 대해 제안된 침하예측식이며 식 (2)는 연약점토에 대해서 보완 제안된 침하예측식을 가리킨다. 굴착 지지방식은 프리캐스트 세그먼트와 SCL (Sprayed Concrete Lining)을 사용하였다. 이러한 지지방식은 굴착 후 지지하는 방식에 해당한다. Faustin et al. (2018)도 프리캐스트 세그먼트와 SCL 지지방식으로 굴착된 런던에서의 다양한 수직구의 침하에 대해서 보고하였으나(Fig. 8 참조) 그 결과는 New (2017)가 제시한 식의 범주 내에 있는 것으로 나타났다.

이에 비해 굴착 전 지지하는 방식으로서 슬러리벽체(diaphragm wall), 시트파일(sheet pile), 천공말뚝(bored pile)방식이 있으며 잭을 사용한 프리캐스트 방식은 그 중간쯤에 해당하는 것으로 볼 수 있다. 원형 수직구 굴착에 있어서 굴착 전 지지방식으로 볼 수 있는 슬러리벽체 및 천공말뚝을 사용한 수직구 현장을 Table 1에 정리하였다.

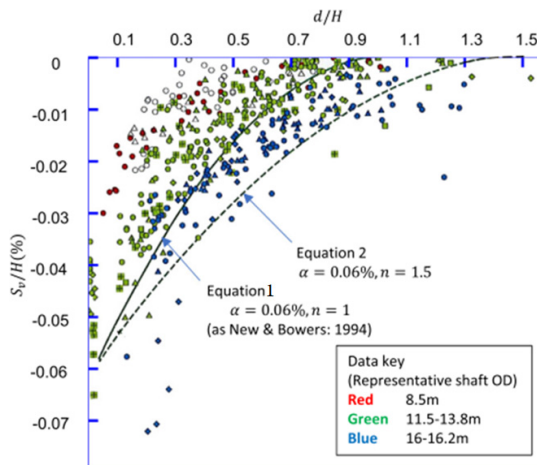


Fig. 7. Settlement due to excavation of circular vertical shaft in clayey soils (New, 2017)

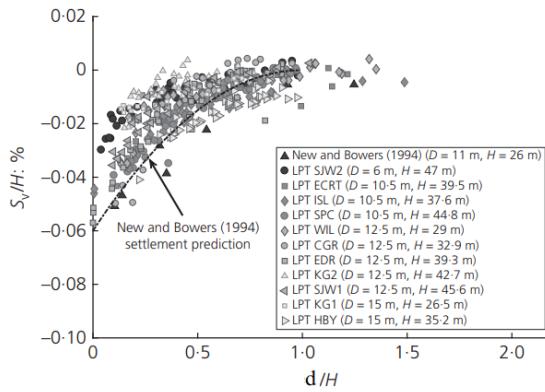


Fig. 8. Field observations of settlements around concurrent shaft linings involving pre-cast segments and SCL (Faustin et al., 2018)

Table 1. Cases of circular shafts with slurry (diaphragm) wall

Shaft location	Construction method	Internal diameter (m)	Excavation depth (m)	Wall thickness (mm)	Encountered strata	References
Musashino, Japan	Diaphragm wall	28.2	60.3	1,200	Loam (8 m) Musashino gravel (14 m) Bay sediments (consolidated silt, sand, and gravel)	Muramatsu and Abe (1996)
Abbey Mills shaft, London	Diaphragm wall	30	73	1,200	London basin deposits	Schwamb et al. (2016)
Limmo Peninsula main shaft, London	Diaphragm wall	30	44	1,200	Superficial deposits (17 m) London clay (31 m) Lambeth group (18 m) Thanet sand	Faustin et al. (2018)
Whitechapel Cambridge heath, London	Diaphragm wall	28.2	32	1,500	Made ground (4.5 m) Superficial deposits (3 m) London clay (25.5 m) Lambeth group	Faustin et al. (2018)
Hackney, London	Diaphragm wall	12.7	27.2	1,300	Made ground (2.2 m) Superficial deposits (3.2 m) Lambeth group (6.3 m)	Faustin et al. (2018)
Farringdon Western ticket hall, London	Secant bored piles	15	24.7	1,200	Made ground (3 m) London clay (6 m) Lambeth group (17 m) Thanet sand	Faustin et al. (2018)

이와 같은 굴착 전 지지방식을 적용한 수직구 굴착현장에 대한 사례들에 대한 계측데이터를 Fig. 9에 New (2017)가 제시한 식들과 같이 나타냈다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 굴착 전 지지방식을 사용한 수직구 굴착현장

의 지표침하가 전반적으로 굴착 후 지지방식인 프리캐스트 세그먼트와 SCL (Sprayed Concrete Lining)을 사용한 굴착현장으로부터 New (2017)가 제시한 예측식들 보다 작은 것으로 나타났지만 유사한 값을 나타내는 것들도 많은 것으로 나타났다. 이와 같은 이유로는 여러 가지가 있겠지만 시공품질과 지층조건 및 굴착조건들의 복합성이 주된 이유로 판단된다. Faustin et al. (2018)이 발표한 연구결과를 살펴봐도 굴착 전 지지방식이 굴착 후 지지방식보다 전반적으로 더 작은 지표침하가 발생하였지만 예외도 많은 것으로 나타나 굴착 지지방식 뿐만 아니라 시공품질, 지층조건 및 굴착조건들의 복합성을 종합적으로 고려하여 지표침하를 예측해야 할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 New (2017)가 연약점토 지반에 대해서 제시한 식은 일반적 범주 내에서 수직구 굴착에 따른 지표침하 예측에 있어서 보수적 기준으로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

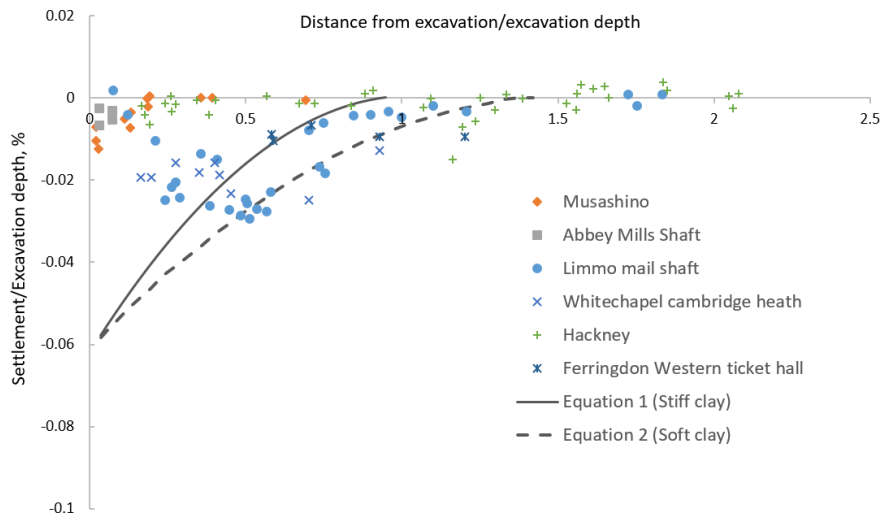


Fig. 9. Settlement due to excavation of circular vertical shaft with slurry wall

원형 형상의 수직구 굴착에 따른 지표침하를 흙막이 굴착에 따른 지표침하와 비교하였다. 비교는 굴착 지지방식과 지반조건을 중심으로 분석하였다. 먼저 굴착 지지방식은 굴착 전 지지방식과 굴착 후 지지방식으로 나누었으며 수직구 굴착에 있어서 슬러리벽체와 천공말뚝 방식은 굴착 전 지지방식이고 프리캐스트 세그먼트와 SCL 방식은 굴착 후 지지방식이다. 흙막이 굴착에 있어서 비교를 위해 사용된 자료의 굴착 전 지지방식은 슬러리벽체 형식이며 굴착 후 지지방식은 H파일과 토류판, 버팀대를 사용한 벽체 형식이다. 지반은 크게 모래지반과 점토지반을 대상으로 하였다. Fig. 10은 굴착 전 지지방식인 슬러리벽체를 적용한 수직구 굴착과 흙막이 굴착에 따른 지표침하(Clough and O'Rourke, 1990 이용)를 비교한 것이다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 같은 종류의 슬러리벽체를 사용하였다 할지라도 흙막이 굴착에 따른 지표침하가 수직구 굴착에 따른 지표침하보다 더 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 이는 원형 형상의 수직구가 토압저항 측면에서 유리하게 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

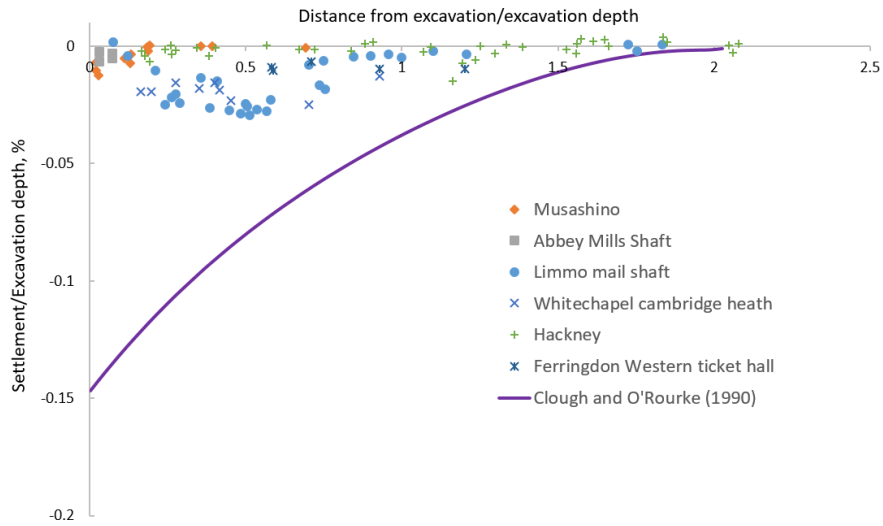


Fig. 10. Comparison of settlement between circular vertical shaft and earth retaining structure with slurry wall

Fig. 11은 굴착 후 지지방식을 적용한 수직구 굴착(프리캐스트 세그먼트와 SCL 사용)과 흙막이 굴착(H파일과 토류판, 버팀대 사용)에 따른 지표침하(수직구: New, 2017; 흙막이굴착: Peck, 1969 이용)를 비교한 것이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 굴착 전 지지방식과 마찬가지로 흙막이 굴착에서 발생한 침하가 수직구 굴착으로 인한 침하보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있으며, 상대적인 침하의 차이 또한 슬러리벽체를 사용한 경우보다 더 크게 나타났다. 앞에서와 마찬가지로 수직구 굴착에서 침하가 더 작게 발생한 이유는 원형 형상의 수직구가 토압저항 측면에서 유리하게 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

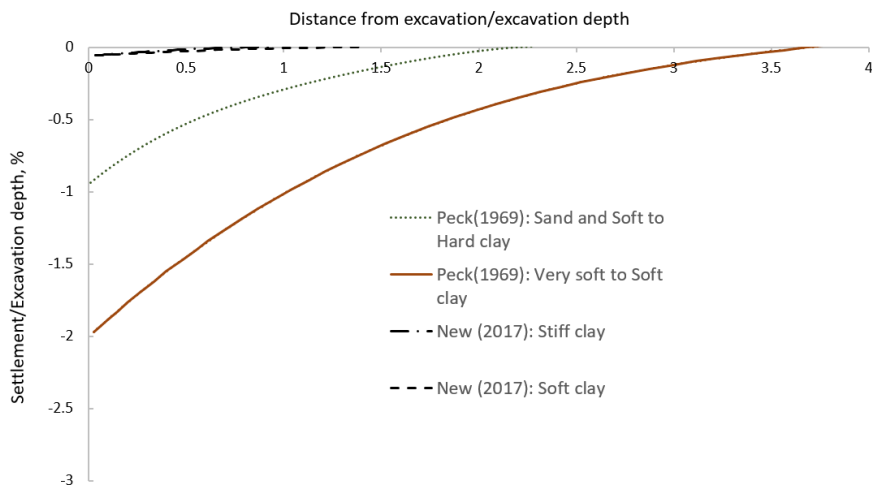


Fig. 11. Comparison of settlement between circular vertical shaft and earth retaining structure with excavation before support

본 연구결과를 통해 수직구 굴착 시 침하관리 기준으로서 상대적으로 더 큰 침하가 발생하는 흙막이 굴착의 침하기준을 사용하는 것은 안전성 측면에서 보수적인 접근방법으로 판단되나 경제성 측면을 고려할 때 벽체의 과다설계를 초래할 수 있어 수직구 굴착에 대해 보다 합리적인 침하기준이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흙막이 굴착에서는 굴착 전 지지방식인 슬러리벽체를 사용하는 경우가 굴착 후 지지방식인 H파일 토류벽체를 사용하는 경우보다 전반적으로 작은 침하가 발생하였다. 지반조건 측면에서 볼 때 H파일 토류판을 사용한 굴착벽체를 사용했을 경우는 지반종류에 따라 침하에 있어서 큰 차이가 났지만 슬러리벽체를 사용했을 경우 지반종류에 따른 침하차이는 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 슬러리벽체의 강성이 커서 발생침하 자체가 전반적으로 작았고 시공품질 등에 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.
2. 굴착 전 지지방식을 사용한 수직구 굴착현장의 지표침하가 전반적으로 굴착 후 지지방식인 프리캐스트 세그먼트와 SCL (Sprayed Concrete Lining)을 사용한 굴착현장으로부터 New (2017)가 제시한 예측식들 보다 더 작은 것으로 나타났지만 유사한 값을 나타내거나 예외도 많은 것으로 나타났다. 따라서, 수직구 굴착유발 지표침하는 굴착 지지방식뿐만 아니라 시공품질, 지층조건 및 굴착조건들의 복합성을 종합적으로 고려하여 예측해야 할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 New (2017)가 연약점토 지반에 대해서 제시한 식은 일반적 토사 범주 내에서 수직구 굴착에 따른 지표침하 예측에 있어서 보수적 기준으로서 활용할 수 있음을 알 수 있었다.
3. 굴착 전 지지방식의 하나인 슬러리벽체를 사용하였다 할지라도 흙막이 굴착에 따른 지표침하가 수직구 굴착에 따른 지표침하보다 더 크게 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 굴착 전 지지방식과 마찬가지로 굴착 후 지지방식을 사용한 비교에서도 흙막이 굴착에서 발생한 침하가 수직구 굴착으로 인한 침하보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있었으며, 상대적인 침하의 차이 또한 슬러리벽체를 사용한 경우보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 수직구 굴착에서 침하가 더 작게 발생한 이유는 원형 형상의 수직구가 토압저항 측면에서 유리하게 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.
4. 본 연구결과를 통해 수직구 굴착 시 침하관리 기준으로서 상대적으로 더 큰 침하가 발생하는 흙막이 굴착의 침하기준을 사용하는 것은 안전성 측면에서 보수적인 접근방법으로 판단되나 경제성 측면을 고려할 때 벽체의 과다설계를 초래할 수 있어 수직구 굴착에 대해 보다 합리적인 침하기준이 필요한 것으로 나타났다.
5. 본 연구에서는 흙막이 굴착과 수직구 굴착에 따른 발생침하에 대해서 사례조사 및 계측자료를 통해 직접 비교하는데 주안점을 두었으며 향후 보다 자세한 정량적 분석과 수치해석 등을 이용한 매개변수 연구도 필요할 것으로 판단된다.

저자 기여도

손무락은 연구 개념 정립 및 데이터 분석, 원고 작성을 하였고, 이강렬은 데이터 검토를 하였다.

References

1. Clough, G.W., O'Rourke, T.D. (1990), "Construction-induced movements of insitu walls", Proceedings of the Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Special Conference, Ithaca, New York, pp. 439-470.
2. Clough, G.W., Smith, E.M., Sweeney, B.P. (1989), "Movement control of excavation support systems by iterative design", Proceedings of the ASCE Foundation Engineering: Current Principles and Practice, Vol. 2, ASCE, New York, 869-884.
3. Cording, E.J. (1984), Use of empirical data for braced excavations and tunnels in soil, Lecture Series, Chicago ASCE, Chicago, IL.
4. Cording, E.J., O'Rourke, T.D. (1977), "Excavation, ground movements and their influence on buildings", Proceedings of the ASCE Annual Convention, Session 40, San Francisco.
5. Faustin, N.E., Mair, R.J., Elshafie, M.Z.E.B., Menkiti, C.O., Black, M. (2017), "Field measurements of ground movements associated with circular shaft construction", Proceedings of the 9th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (IS-São Paulo), CRC Press, Leiden, The Netherlands, pp. 301-308.
6. Fausitn, N.E., Elshafie, M.Z.E.B., Mair, R.J. (2018), "Case studies of circular shaft construction in London", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 171, No. 5, pp. 391-404.
7. Goldberg, D.T., Jaworski, W.E., Gordon, M.D. (1976), Lateral support systems and underpinning, Report FHWA-RD-75-128, Vol. 1, Federal Highway Administration, Washington D.C., pp. 312.
8. Hsieh, P.G., Ou, C.Y. (1998), "Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 6, pp. 1004-1017.
9. Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B., Burland, J.B. (1986), "Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction", Geotechnique, Vol. 36, No. 3, pp. 377-396.
10. Kim, J.Y. (2022), "Evaluation of ground deformation during excavation of vertical shaft through centrifuge model test", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 38, No. 1, pp. 35-45.
11. Ko, B.K. (2008), A study on ground deformation due to vertical shaft excavation in urban area, Master's Thesis, Hanyang University, pp. 73.
12. Kung, G.T.C., Juang, C.H., Hsiao, E.C.L., Hashash, Y.M.A. (2007), "Simplified model for wall deflection and ground surface settlement caused by braced excavation in clays", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 6, pp. 731-747.
13. Le, B.T., Goodey, R.J., Divall, S. (2019), "Surface ground movements due to circular shaft construction", Soils and Foundations, Vol. 59, No. 5, pp. 1160-1171.

14. Mana, A.I., Clough, G.W. (1981), "Prediction of movements for braced cuts in clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, No. 6, pp. 759-777.
15. Menkiti, C.O., Long, M. (2015), "Consolidation settlements in Dublin boulder clay", *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ICE Publishing, London, UK, pp. 313-318.
16. Milligan, G.W.E. (1974), *The behavior of rigid and flexible retaining walls in sand*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, London, UK.
17. Mohamed, A.Z. (2017), *Effect of diaphragm wall construction on adjacent deep foundation*, Ph.D. Thesis, Technische Universitat Bergakademie, Freiberg, Germany.
18. Muramatsu, M., Abe, Y. (1996), "Considerations in shaft excavation and peripheral ground deformation", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 173-178.
19. New, B. (2017), "Settlements due to shaft construction", *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 16-17.
20. New, B.M., Bowers, K. (1994), "Ground movement model validation at the Heathrow Express trial tunnel", *Proceedings of the 7th International Symposium Tunnelling '94*, Chapman and Hall, London, UK, pp. 301-329.
21. O'Rourke, T.D., Cording, E.J., Boscardin, M. (1976), *The ground movements related to braced excavation and their influence on adjacent buildings*, Final Report No. DOT-TST 76T-23.
22. Park, H.J., Park, J.J., Jeong, S.S. (2022), "Effect of groundwater flow on the behavior of circular vertical shaft", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 38, No. 6, pp. 29-39.
23. Peck, R.B. (1969), "State-of-the-art: Deep excavation and tunneling in soft ground", *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Ingeniera, Mexico City, Mexico, Vol. 3, pp. 225-290.
24. Schuster, M., Kung, G.T.C., Juang, C.H., Hashash, Y.M.A. (2009), "Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 12, pp. 1823-1835.
25. Schwamb, T., Elshafie, M.Z.E.B., Soga, K., Mair, R.J. (2016), "Considerations for monitoring of deep circular excavations", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, Vol. 169, No. 6, pp. 477-493.
26. Shin, Y.W., Park, T.S., Lee, I.K. (2005), "A method of estimating earth pressure on a shaft wall and ground settlement caused by excavation", *Proceedings of the KSCE Tunnel Committee Special Conference*, Goyang, pp. 151-167.
27. Wong, R.C.K., Kaiser, P.K. (1988), "Behaviour of vertical shafts: reevaluation of model test results and evaluation of field measurements", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 2, pp. 338-352.