주요 영향요소를 고려한 쉴드TBM 터널 3차원 수치해석기법 연구

전기찬[1]* · 김동현[2]

[1]정회원, 대한건설엔지니어링 기술연구소 전무
[2]정회원, 대한건설엔지니어링 기술연구소 부사장

Study on the 3 dimensional numerical analysis method for shield TBM tunnel considering key factors

Gy-chan Jun[1]* · Dong-hyun Kim[2]

[1]Senior Managing Director, Research Institute Dept., KOREA Engineering & Construction Co., Ltd.
[2]Vice President, Research Institute Dept., KOREA Engineering & Construction Co., Ltd.

***Corresponding Author :** Gy-Chan Jun, gychan2005@kecgroup.kr

Abstract

A 3 dimensional numerical analysis for shield TBM tunnel should take into account various characteristics of the shield TBM excavation, such as gap, tail void, segment installation, and backfill injection. However, analysis method considering excavation characteristics are generally mixed with various method, resulting in concern of consistency and reliability degradation of the analytical results. In this paper, a parametric study is carried out by using actually measured ground settlement data on various methods that can be used for 3 dimensional numerical analysis of shield TBM tunneling. As a result, we have analyzed and arranged an analytical method to predict similarly the behavior of ground settlement and tunnel face pressure at the design stage. Skin plate pressure, backfill pressure and soil model have been identified as the most significant influences on the ground settlement. The grout pressure model is considered to be applicable when there is no volume loss information on the excavated ground, such as seabed tunnels, or when it is important to identify the behavior around a tunnel, such as surface settlement as well as face pressure. And it is considered that designers can use these guidelines as a base material to perform a reasonable 3 dimensional numerical analysis that reflects the ground conditions and the features of the shield TBM tunneling.

Keywords: Shield TBM, 3dimension numerical analysis, Surface settlement, Face Pressure, Grout pressure model

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(2)513-525(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.513

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received February 19, 2018
Revised March 2, 2018
Accepted March 6, 2018

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 ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

쉴드TBM 터널을 대상으로 하는 3차원 수치해석은 gap, tail void, 세그먼트설치, 뒤채움재 주입 등과 같은 쉴드TBM 굴착의 여러 특성들을 고려하여 시공과정을 반영할 수 있는 해석이 수행되어야 한다. 그러나 기계 굴착의 특성을 고려하는 해석적 기법은 여러가지 기법들이 혼용되어 적용되는 것이 일반적으로 해석결과의 일관성과 신뢰도에 의문이 제기된다. 본 논문에서는 쉴드TBM 터널의 3차원 수치해석에 사용될 수 있는 여러 기법들을 대상으로 현장에서 실제 계측된 지표침하 데이터를 활용한 매개변수연구를 수행하였다. 그 결과 설계단계에서 지표침하와 막장압 등 터널주변지반의 거동을 유사하게 예측하고 평가하는데 활용할 수 있는 해석기법으로서 분석하고 정리하였다. skin plate 주면압, 뒤채움압과 soil model이 지표침하에 가장 큰 영향요소로 파악되었고, 응력제어기법은 해저터널과같이 굴착지반의 volume loss 정보를 얻을 수 없거나 지표침하나 막장압 등 터널 주변거동파악이 중요한 경우에 적용 가능한 것으로 판단되며, 설계자는 현장여건과 쉴드TBM의 특성이 반영된 합리적인 3차원 수치해석을 수행하는데 본 가이드라인을 기본자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주요어: 쉴드TBM, 3차원수치해석, 지표침하, 막장압, 응력제어기법

1. 서 론

20세기 후반 이후 국내외적으로 인구증가와 도시화에 따라 교통수송문제, 도심지 부지확보 및 기반시설의 지하화로 인해 터널 및 지하공간개발에 대한 필요성이 급증하고 있다.

국내에서도 시공이 완료되어 운영 중인 하해저터널을 제외하고 현재 중대구경 쉴드TBM을 이용한 교통터널 프로젝트는 부전~마산 복선전철(낙동강 하저터널), 대곡~소사 복선전철(한강 하저터널), 별내선 2공구(한강 하저터널) 및 신분당선 용산~강남 간 복선전철(한강 하저터널) 등이 있다. 수도권 및 대도시 지역철도수송 인프라 시설구축 등의 목적으로 하/해저터널은 점진적으로 수요가 증가하는 추세이며, 대부분 터널공법으로는 쉴드TBM을 적용하고 있기 때문에 설계수요 및 연구필요성도 함께 증가하고 있다. 그러나 주로 전력구와 같이 단면에 제한되어 대단면에 대한 시공사례가 부족하고 설계분야에서도 명확한 설계방법이 정립되지 못하고 있는 실정이다. 특히 도심지터널이나 하해저 터널설계에서 터널시공 중 및 완공 후 터널과 주변지반에 미치는 영향의 검토는 중요한 항목임에도 불구하고 3차원 수치해석 수행 시, 기존 수치해석방법과 문헌자료를 이용하고 쉴드TBM의 공법특성이 반영된 해석기법은 검토자나 검토기관 등에 따라 일관되지 않게 적용되고 있고, 안정성검토는 형식적으로 수행되고 있으므로 해석결과가 상당한 차이를 보이고 있는 실정이다.

본 연구에서는 쉴드TBM 터널시공 시 발생하는 지표침하를 예측하는데 활용되는 3차원 수치해석에서 관련 시공자료와 연구자료를 바탕으로 각종 parametric study를 수행하여, 쉴드TBM의 특성으로 인해 발생하는 gap, 뒤채움 그라우팅, 막장압 등을 모델링하는데 있어 신뢰성 높은 지표침하를 예측할 수 있는 쉴드TBM터널 3차원 수치해석 가이드라인을 제안하였다.

2. 쉴드TBM 터널 3차원 수치해석 개요

쉴드TBM 굴착 시 상부에 발생되는 지표침하량은 volume Loss를 이용한 경험식을 활용하여 간단하게 예측할 수 있다. 그러나 간편하게 예측할 수 있는 장점이 있는 반면, 복잡한 지반조건이나 주변 및 지중구조물의 영향을 충분히 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서 이러한 경우에는 3차원수치해석(FEM, FDM 등)을 수행하여 침하뿐만 아니라 터널침하, 주변 지중구조물의 침하 및 인근 구조물에 미치는 영향과 지중응력의 상태를 파악하는 방법으로서 많이 사용하고 있는 추세이다.

쉴드TBM 터널을 대상으로 하는 3차원수치해석은 gap, tail void 발생, 세그먼트설치, 뒤채움재 주입과 같은 쉴드TBM 굴착의 여러 특성들을 고려하여 시공여건이 반영된 해석이 수행되어야 한다. 그러나 기계굴착 특성을 고려하는 해석적 기법은 여러가지 기법들을 혼용하여 적용하고 있는 실정으로서 해석결과의 일관성 및 신뢰도 저하가 우려되고 있다.

2.1 3차원 수치해석 기법

2.1.1 Gap Parameter

Gap Parameter 방법은 해석 모델링기법이라기 보다는 쉴드TBM 굴진 시 체적손실량을 설명하기 위한 개념에 가깝다. 쉴드TBM 수치해석 모델링에서 굴진면 토압에 대한 대응압은 등분포 압력형태의 막장압으로 적용되어 굴진면에서의 3차원 체적손실량이 미소하게 발생하게 되고, 따라서 구해지는 지표침하량은 실제 침하량보다 작게 산정되고 있다. 이러한 차이점을 극복하기 위해 Gap Parameter 개념의 volume Loss 값을 이용하여3차원 굴진면 손실량을 인위적으로 방사방향 손실량으로 환산함으로써 수치해석 결과가 실제 침하거동에 근접하도록 하고 있다.

2.1.2 변위제어기법(Contraction model, Volume loss model)

변위제어기법은 굴진면 손실량, 과다굴착, tail void 등으로 인한 총체적 손실량 만큼 침하가 발생한다는 개념으로서 지반조건과 장비특성에 따른 volume loss 값을 이용하여 예상되는 총 침하량이 발생되도록 장비와 세그먼트구간의 변위를 인위적으로 제어하는 수치해석의 한 방식이다(Chai, 2003).

Volume loss는 지역에 따른 경험적 값으로서 해외에서는 지역특성의 지반조건, 지층구성, 장비특성 및 제원에 따라 volume loss 값을 제공하는 경우는 있다. 그러나 국내에서는 공사사례가 적고 volume loss에 대한 연구가 미비하여 사업계획 및 설계단계에서는 지반조사 자료와 해외사례 등을 참고하여 적정 값을 산정하여야 한다.

즉, 변위제어방식은 지층조건 및 시공조건을 고려하여 경험적으로 volume loss를 산정하여 침하량을 결정한 후, 터널안정성해석을 수행하는 방식으로 설계단계에서 보편적으로 적용되는 방법이다. 그러나 volume loss를 추정하고 총 침하량을 결정한 후 해석을 수행하기 때문에 volume loss에 대한 정보가 없는 지반조건의 경우에는 추정한 volume loss에 따라 결과가 상이해지는 단점을 감안해야 한다. 또한, 변위제어기법은 굴착지층에 대한 인

위적인 강제변위를 적용하는 방법으로 지표침하 검토 시에는 타당한 방법으로 사료되지만, 터널주변의 응력이나 변위는 왜곡된 결과를 도출할 가능성이 높다.

2.1.3 응력제어기법(Grout pressure model)

응력제어기법은 변위제어기법과 달리 실제 쉴드TBM 시공조건에 부합되도록 막장압, 쉴드TBM skin plate 구간 분포압력 및 뒤채움구간 backfill pressure를 압력하중 조건으로 적용하여 쉴드TBM 굴착을 모사하는 기법으로(Chai, 2003), 터널굴착에 의해 발생되는 변위에 대하여 압력을 가하여 변위를 조절하는 해석방법으로 실제 쉴드TBM 시공과정과 부합되는 해석기법이라고 할 수 있다(Fig. 1).

시공과정이 고려되기 때문에 터널막장이나 주변지반에 미치는 변위나 응력조건을 파악하고, 변위제어기법에 비해 체적손실량 산정이 필요 없이 침하량 산정이 가능하여 보다 합리적인 방법으로 판단되나, 쉴드 플레이트와 굴착면 사이의 gap에 적용되는 압력의 정도가 결과에 영향을 주는 단점이 있다.

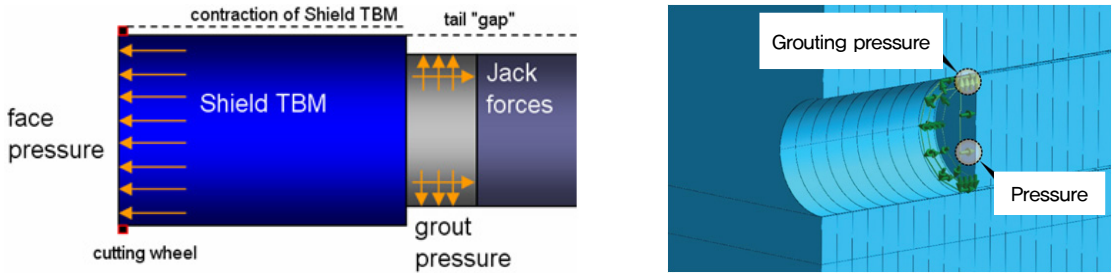


Fig. 1. Concept of grout pressure model

지표면의 침하보다 막장면의 안정성이 우선되는 해저터널이나, 신뢰도 높은 지반 volume loss 자료가 없는 경우에는 굴착 시터널 거동과 차이가 있으므로 쉴드TBM 시공조건만을 감안하여 안정성을 평가하는 방법인 응력제어기법의 적용도 설계단계에서 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 쉴드TBM 터널 수치해석 모델링

3.1 해석 수렴조건 검토

상용화된 수치해석 프로그램에 따라 수렴조건이 상이하게 되어있어, 쉴드터널 해석특성상 강성차이가 큰 요소 간 수렴이 되어야 하는 조건에 따라 많은 해석시간이 소요되고, 수렴이 되지 않는 경우도 빈번히 발생하므로 수렴조건을 완화하여 해석결과를 검토하였다. 비교결과, 수렴조건을 부재력 평형기준 1/1000을 적용한 경우 해석시간은 반으로 감소하였으나, 해석결과에는 차이가 미미함을 알 수 있다(Fig. 2, Table 1).

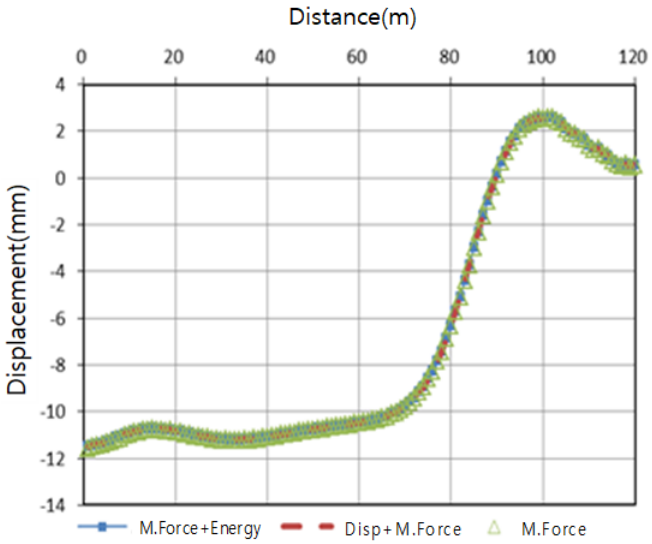


Fig. 2. Analysis result according to the convergence condition

Table 1. Analysis time according to the convergence condition

Convergence condition	Initial value	Case I	Case II
Member force	1e-3	1e-3	1e-3
Displacement	-	1e-3	-
Energy	10e-6	-	-
Analysis time	12.0 hr	8.2 hr	6.1 hr

3.2 Gap 가상요소 검토

쉴드TBM 및 세그먼트와 굴착지반 사이의 gap을 요소망으로 모델링하는 경우, 수치해석 프로그램 특성상 굴착단계에서 gap 영역을 null요소로 모델링 할 경우 이후 뒤채움 그라우팅 단계에서 해당 물성 적용이 불가능하기 때문에 gap 요소구간에 가물성을 적용하여 쉴드TBM 터널과 굴착면 사이 gap을 모사한다.

가물성이 적용되는 요소는 원래 gap 영역(null요소)이므로 물성이 작아질수록 실제 계측 값에 근접한 해석결과를 얻을 것으로 예상할 수 있으나 지반과 물성차이가 급격히 발생할 경우 해석속도 저하 및 결과에 대한 신뢰성이 낮아지므로 적정 가물성 적용 값에 대한 parametric study를 수행하였다.

Gap요소에 적용되는 가물성은 원지반을 기준으로 변형계수 비율 1.0, 1/10, 1/100, 1/1,000 및 1/10,000 총 5가지 조건에 대해 수치해석을 수행하고 결과를 비교하였다. 원지반에 대한 변형계수 비율이 낮아질수록 계측 값에 근접하는 침하거동이 나타났으나, 1/10,000 비율에서는 급격한 물성변화로 인해 해석이 완료되지 않았다(Table 2, Fig. 3).

Table 2. Application of fictitious property (modulus of deformation)

Type	Natural ground	Case I	Case II	Case III	Case IV
Modulus of deformation	30 MPa	3 MPa	0.3 MPa	0.03 MPa	0.003 MPa
Stiffness ratio	1	1/10	1/100	1/1000	1/10000
Analysis time	-	0.3 hr	9.5 hr	13.6 hr	Not convergent

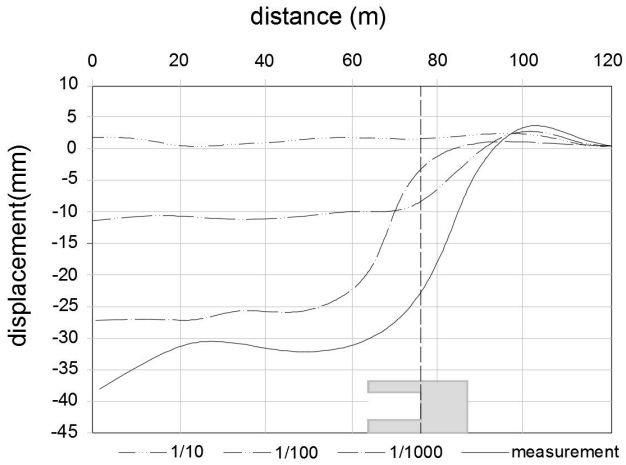


Fig. 3. Surface settlement result according to gap fictitious property and measurement result

3.3 뒤채움압 적용 검토

쉴드TBM 공법은 굴진 시 tail void로 인한 주변지반의 변위를 억제하기 위하여 굴착면과 세그먼트 사이 공간에 그라우팅을 주입하고, 주입방식에 따라 주변지반 변위량에 차이가 발생한다.

그라우팅 주입방식으로는 동시주입방식, 반동시주입방식, 즉시주입방식 및 후방주입방식으로 구분되며, 주입방식에 따라 굴착 후 그라우팅 뒤채움까지의 시간차이로 인하여 주변지반 변위에도 차이가 발생할 것으로 예상되므로 그라우팅 주입계획에 맞추어 수치해석에서도 이를 반영하여야 한다.

또한 그라우팅은 뒤채움 충진된 이후에도 경화과정을 거쳐서 서서히 강도를 발현하므로 초기에는 gel 형태의 물성에서 시간경과에 따라 탄성체 물성으로 변화하는 것으로 모사할 수 있다. 또한 gel 상태에서는 유체의 압력으로 뒤채움압으로서 판단할 수 있으나, 경화 후에는 주변지반에 뒤채움압이 작용하지 않는 것으로 추정되므로 수치해석시 2~8 Ring 구간에 대하여 뒤채움압을 적용하는 방법이 일반적이다. 따라서 시공조건을 고려하여 적정한 뒤채움압 적용구간 선정이 필요하다.

검토결과, Fig. 4와 같은 뒤채움재 적용방법에 따른 5개 Case에 따른 지표침하결과는 모두 비슷한 경향을 나타내었고 침하량도 각각 미소한 차이만 발생하여 큰 차이가 없는 것으로 검토되어(Fig. 5), 뒤채움압이 작용하는 후

방의 영향범위와 뒤채움재 물성변화 적용방법에 따른 결과 영향이 미소한 것으로 판단된다. 따라서 적용하는 방법보다는 시공에 적용되는 뒤채움방식(동시주입, 반동시주입 등)이나 뒤채움재의 물성 등이 보다 중요하게 작용할 것으로 판단된다.

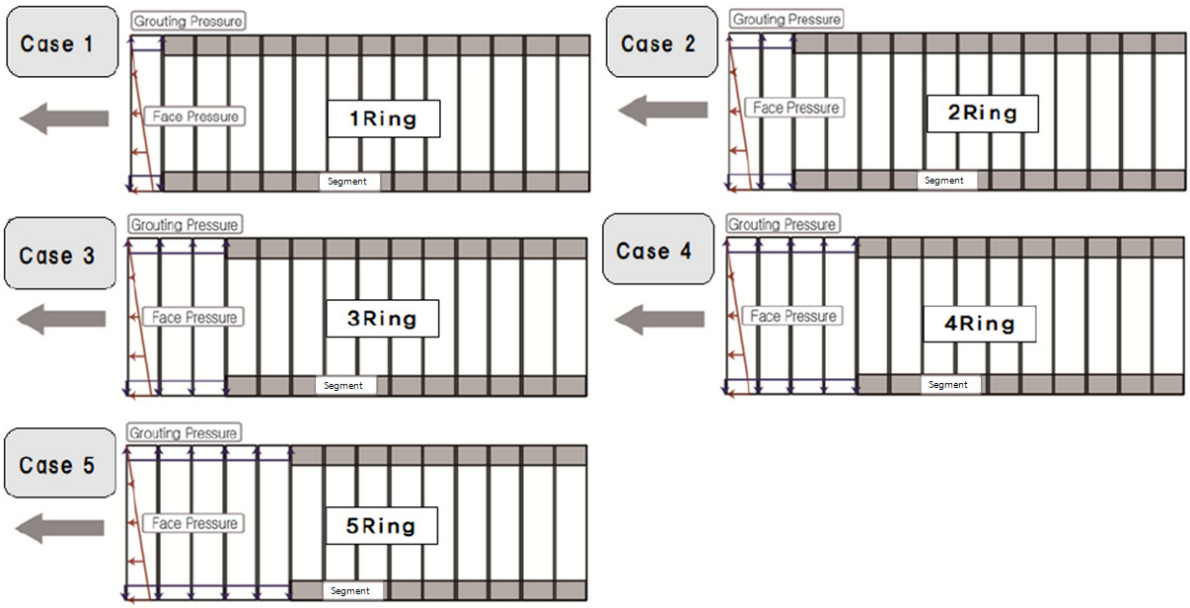


Fig. 4. Backfill grouting application case

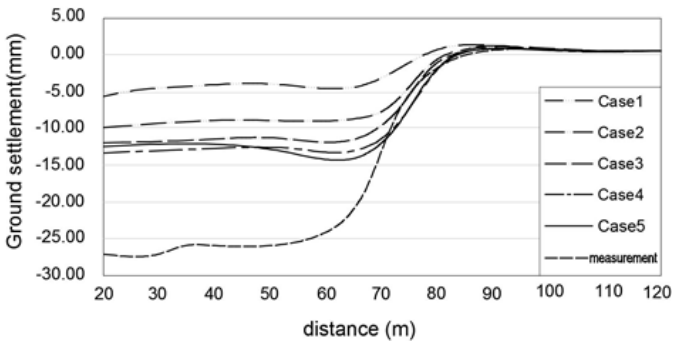


Fig. 5. Ground settlement of the backfill grouting method

4. 지표침하에 미치는 영향요소 검토

Jun and Kim (2015)과 Jun and Kim (2017)이 쉴드TBM 굴착 시 지표침하에 미치는 영향요소를 검토한 연구결과를 분석하여 설계단계에서 3차원 수치해석을 통한 지표침하예측에 활용될 수 있는 가이드라인을 제안하였다.

4.1 기존연구 자료분석

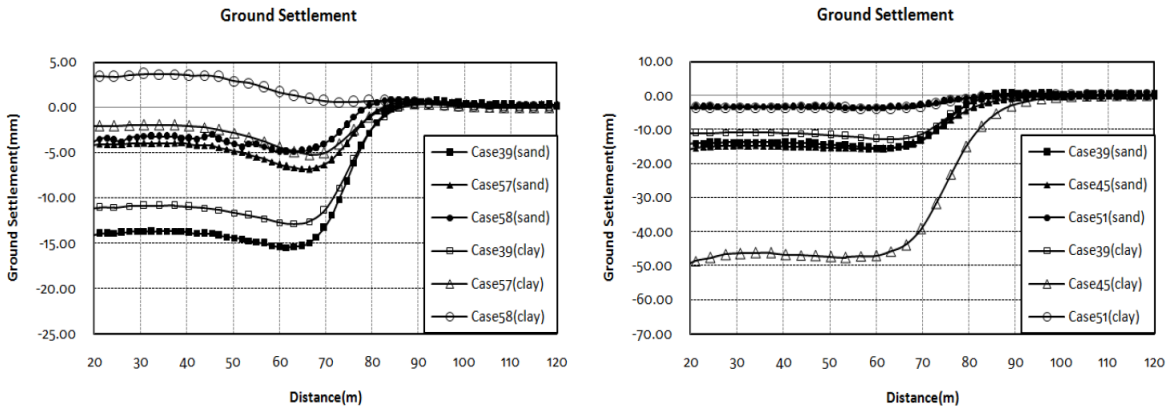
막장압, Skin plate 주면압과 뒤채움압, 굴진장, soil model 및 요소망 크기 등 5가지 영향요소를 대상으로 다양한 매개변수에 대해 연구하였다. 물성치는 네덜란드 하저터널인 Second heinenoord tunnel에 대한 연구자료를 활용하였다(Möller, 2006).

먼저, 굴진장과 요소망 크기는 굴착지반의 종류(점토층/사질토층)에 관계없이 지표침하에 미치는 영향은 적었다. 다만, 굴진장 검토 시 점토층에서는 soil model에 따라 침하가 다소 변화되는 경향이 나타났다. 그리고 요소망 크기에서는 점토층 결과가 사질토층에 비해 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

막장압의 경우, 지표침하에 미치는 영향이 크지 않았다. 이는 실제 시공 시 작용하는 막장압과 막장면 변형상황에 비해 해석에 반영되는 조건은 상대적으로 이상적이기 때문인 것으로 제시하였다. 다만, 막장압이 클수록 전방에 융기가 발생하는 현상이 나타나고 특히 MC model 적용 시 전방 융기현상이 증가되는 것으로 나타나고, 점토층에 HSS model 적용 시에는 상대적으로 막장압 변화에 지표침하 차이가 크게 발생하는 것으로 타나났다.

Skin plate 주면압과 뒤채움압에 의한 영향은 soil model과 더불어 막장압보다 훨씬 지표침하에 영향을 많이 주는 것으로 나타났다. 점토층 통과 시 skin plate 주면압과 뒤채움압이 커질수록 지반융기가 증가하나, 사질토층의 경우 적용압이 일정범위를 넘어서면 변위차이가 크지 않는 것으로 나타나, 지반조건에 따라 미치는 영향이 상이한 것으로 나타났다(Fig. 6).

Soil model에 의한 영향은 굴착 지반조건에 따라 차이가 큰 것으로 제시하였다. 사질토층에서는 HSS model 적용 시 상대적으로 작은 지표침하 발생경향을 보였으며, 점토층에서는 HS model 적용 시 상대적으로 큰 지표침하를 보였다. 실무적으로 많이 적용되는 MC model의 경우 적용 실용성에도 불구하고 보다 상세하고 구체적인 soil model보다는 실측 계측 값과는 상이한 결과를 보였다(Fig. 6).



(a) Case 39 125 kpa/case 57 180 kpa/case 58 250 kpa (b) Case 39,51 HSS model/case 45 HS model/case

Fig. 6. Results of skin plate pressure & backfill grout pressure and soil model (Jun and Kim, 2017)

4.2 지표침하 영향요소 검토 시 가이드라인

상술한 Jun and Kim (2015)과 Jun and Kim (2017)의 자료분석을 통해 쉴드TBM 3차원 수치해석에서 지표침하는 skin plate 주면압과 뒤채움압 그리고 soil model이 가장 큰 영향을 받는 것으로 파악되었다.

따라서 본 연구에서는 설계단계에서 막장압 보다는 skin plate 주면압과 뒤채움압의 합리적인 선정과 활용가능한 지반정수를 고려한 soil model 선정과정이 중요할 것으로 판단하였다.

3차원 해석에서 터널굴진장은 지표침하결과에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 해석초기나 중요 관심구간통과 후에는 굴진장을 증가시켜 적용시킴으로서 해석시간도 단축하면서 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 점토층에서는 soil model에 따라 다소 지표침하결과가 상이해질 수 있기 때문에 해석에 적용하는 soil model에 유의하면서 굴진장을 적용할 필요가 있다.

요소망 크기도 굴진장과 유사하게 지표침하에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났으나, 요소망 크기에 따라 해석에 소요되는 시간과 컴퓨터 저장용량은 매우 큰 차이를 보일 수 있기 때문에 지반조건, 기하구조 및 해석 목적 등을 감안하여 요소망 크기를 선정할 필요가 있다.

막장압 크기에 따라 막장 전방에 과도한 융기현상을 초래하여 실제 거동과 상이한 지표침하가 예측될 수 있고 일반적으로 많이 적용되는 MC model일수록 융기현상이 두드러지기 때문에 설계단계에서 지반조건과 시공조건을 고려하여 다양한 방법으로 막장압을 검토하고 예비해석을 수행하여 적합한 막장압을 선정할 필요가 있다.

Skin plate 주면압과 뒤채움압 그리고 soil model은 굴착지반에 따라 지표침하 발생 값의 차이가 크게 발생 할 수 있으므로 적절한 skin plate 주면압과 뒤채움압 산정에 유의해야 하며, soil model의 경우, HS model과 HSS model은 실측 계측 값과 유사한 결과를 도출하는 장점이 있지만, 산정하는데 많은 비용이 소요되는 지반특성치가 다수 요구되기 때문에 MC model을 중심으로 해석을 수행하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

5. 굴진면 막장압 산정

Jun and Kim (2016)이 쉴드TBM 굴착 시 굴진면 막장압 산정과 관련된 연구결과를 분석하여 설계단계에서 3차원수치해석을 통한 막장압 산정에 활용될 수 있는 가이드라인을 제안하였다.

5.1 연구결과 분석

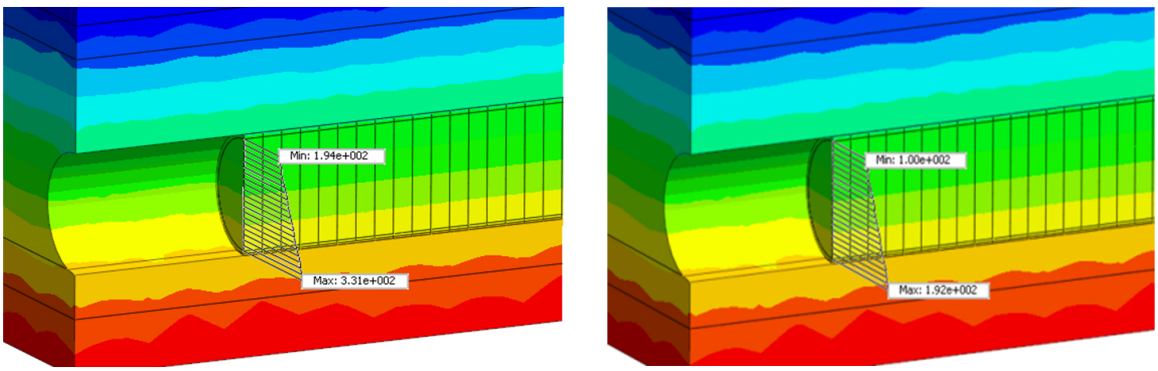
동일한 조건을 대상으로 막장압을 이론해와 수치해석으로 산출하여 비교검토 및 분석을 수행하여 수치해석을 통해 산출되는 막장압의 적용성을 검토하였다.

설계단계에서 적용되고 있는 이론식 8가지를 선정(Yu et al., 2016)하여 산출된 이론해는 Table 3과 같다.

Table 3. A result of the estimating theoretical tunnel face pressure (Jun and Kim, 2016)

Analytical method	Soil condition		Face pressure (kPa)		Etc.
	ϕ	c	Sandy soil	Cohesive soil	
Murayama	○	○	242	199	2D model, pore pressure
Broms & Bennemark	X	○	254	234	3D model
Davis et al.	X	○	298	277	3D model
DIN4085	○	○	242	395	3D model, pore pressure
Jancsecz & Steiner	○	○	225	216	3D model
Anagnostou & Kovari	○	○	370	281	3D model, pore pressure
JapanGeotechnical Society (JGS)	○	○	318	437	2D model, pore pressure
Caquot-Kerisel	○	○	301	284	3D model, pore pressure

해석 모델링시 이론해와 비교검토하기 위해서 막장면 주변 지반거동에 영향을 미치는 요소들을 최대한 배제할 수 있는 경계조건을 적용하였다. 막장면에 작용하는 압력산정 시 지반경계조건의 영향을 최소화하기 위하여 12 m 굴착(8 Ring)까지 굴진한 위치에서 1.5 m (1 Ring) 굴착했을 때 막장면에 작용하는 반력을 조사하였다(Fig. 7).

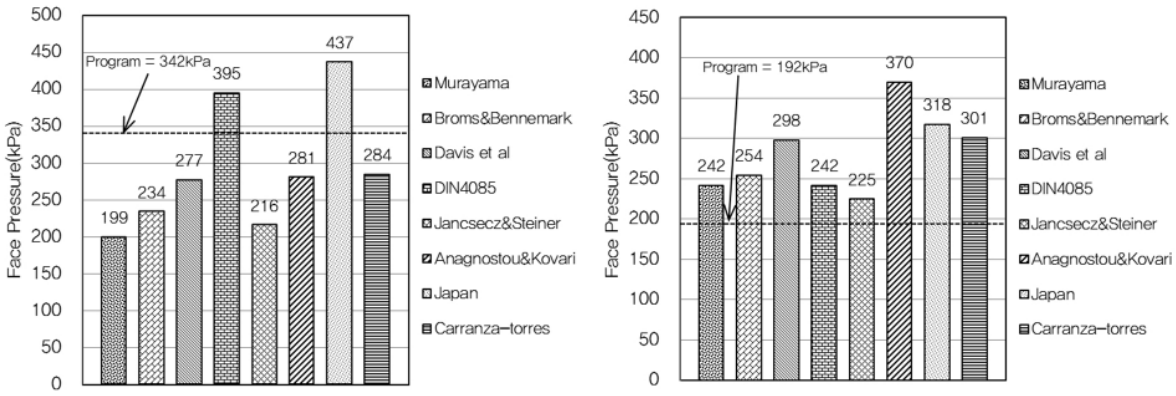


(a) Cohesive soil (b) Sandy soil

Fig. 7. Earth pressure at 9 step (Jun and Kim, 2016)

이론해와 수치해석결과(점성토지반 342 kpa, 사질토지반 192 kpa)를 비교한 그래프를 Fig. 8에 나타내었다.

내부마찰각의 영향으로 인해 사질토지반의 경우, 수치해석에 의한 막장압이 모든 이론해 결과보다 작게 산정되었으며, 점성토 지반에서는 수치해석결과가 대부분의 이론해보다 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 이론식과 수치해석간의 다양한 조건차이가 큰 영향을 미친 것으로 나타났다.



(a) Cohesive soil (b) Sandy soil

Fig. 8. A result of the estimating tunnel face pressure by soil condition(Jun and Kim, 2016)

5.2 연구 결과 활용

상술한 Jun and Kim (2016)의 자료분석을 통해 이론해는 이론식에 따라 많은 편차를 보여주고 있으며, 지반강도가 불량한 점성토 지반의 경우 수치해석 결과 값이 이론해 대비 118%로 비교적 유사한 결과를 보이고 있으므로 수치해석을 통한 막장압 산정은 비교적 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 다만 이론해들이 수치해석 결과보다 작게 발생한 경우가 많음에 따라, 지반조건(c, ϕ, E 등)을 고려하여 판단해야 할 것으로 사료된다. 따라서 향후 지반조건에 대한 보다 상세한 연구를 할 필요가 있다.

지반강도가 양호한 사질토지반에서는 수치해석 결과 값이 모두 이론해보다 작게 산출되었으며, 이는 3차원수치해석이 지반의 아칭효과 등 이론해가 반영할 수 없는 3차원적인 조건들이 감안된 결과로 판단된다. 따라서 보수적인 안전측 설계가 필요한 경우에는 막장압 산정 시 이론해를 활용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 쉴드TBM 3차원 수치해석에 사용되는 여러 가지 기법들을 대상으로 실측 data를 활용하여 다양한 매개변수로 연구를 수행한 결과들을 분석하여 설계단계에서 활용될 수 있는 가이드라인을 제시하고 있다.

해석수렴조건, gap 가상요소, 뒤채움압 적용, 지표침하에 미치는 영향요소 및 수치해석을 이용한 막장압 검토 등 다양한 연구결과를 분석, 정리하여 실무자가 다양한 지반조건 및 쉴드TBM 특성을 고려하여 실제 거동에 가까운 예측을 수행하는데 필요한 결론은 다음과 같다.

1. 수치해석시간에 영향을 크게 미치는 수렴조건의 경우, 수렴조건을 부재력 평형기준 1/1,000을 적용했을 때 해석시간은 반으로 감소하였으나, 해석결과에는 차이가 미미함을 알 수 있다.

2. Gap 가상요소 물성치는 원지반에 대한 변형계수 비율이 낮아질수록 계측 값에 근접하는 침하 경향을 나타나지만 1/10,000 비율에서는 급격한 물성변화로 인해 해석이 완료되지 않았다. 1/1,000 비율의 경우 해석시간은 증가하나 실제 지표침하 계측 값에 가까운 결과를 나타내었다. 설계에서는 해석시간과 해석목적을 고려하여 gap 가상요소 물성치를 선정하는 것이 합리적이라 판단된다.
3. 뒤채움재 적용방법에 따른 지표침하 결과는 모두 유사한 경향을 나타내었고 침하량도 각각 미소한 차이만 발생하여 큰 차이가 없는 것으로 검토되어, 압력시공방법에 따른 결과 영향이 미소한 것으로 판단된다. 따라서 뒤채움의 경우, 적용하는 기법보다는 시공에 적용되는 뒤채움방식(동시주입, 반동시주입등)이나 뒤채움재의 물성 등이 보다 중요하게 작용할 것으로 판단된다.
4. 쉴드TBM 수치해석시 지표침하에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 skin plate 주면압, 뒤채움압 및 soil model로 나타났다. Skin plate 주면압과 뒤채움압 그리고 soil model은 굴착지반에 따라 지표침하 발생 값의 차이가 크게 발생할 수 있으므로 적절한 skin plate 주면압과 뒤채움압 산정에 유의해야 할 것으로 판단되며, soil model 의경우, HS model과 HSS model은 계측 값과 유사한 결과를 도출하는 장점이 있지만 MC model에 비해 산정하는데 많은 비용이 소요되는 지반특성치가 다수 요구되기 때문에 설계계획단계에서부터 고려되지 않는다면, 실무에서는 MC model을 중심으로 해석을 수행하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
5. 수치해석을 통한 막장압은 굴착지반(점성토지반, 사질토지반)에 따라 이론해와 상이한 경향을 보이나, 이론해 대비 118%에서 68% 정도의 상관관계가 나타났으며, 대응 막장압을 선정하고 판단하는데, 수치해석결과의 활용이 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

The research was supported by the Construction Technology Research Project through the Ministry Of Construction & Transportation, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (Development of Key Subsea Tunnelling Technology, 13 Construction Research T01).

References

1. Chai, L.K. (2003), Three-dimensional finite element analysis of earth pressure balance tunnelling, Ph.D. Thesis, National University of Singapore, pp. 135-162.
2. Jun, G.C., Kim, D.H. (2015), “A study on key factors of ground surface settlement due to shield TBM excavation using 3-dimension numerical analysis”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 305-317.
3. Jun, G.C., Kim, D.H. (2016), “A Intercomparison on the estimating shield TBM tunnel face pressure through analytical and numerical analysis”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 3, pp. 273-282.

4. Jun, G.C., Kim, D.H. (2017), “A study on key factors of ground settlement due to shield TBM excavation using numerical analysis and field measurement compasion”, Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 16, No. 1, pp. 63-72.
5. Lee, S.W., Yu, J.S., An, C.K., Heo, S.M. (2016), “Theoretical study on evaluation of face pressure for shield TBM”, Proceedings of the KSCE 2016 Convention Program, pp. 194-195.
6. Möller, S.C. (2006), Tunnel induced settlements and structural forces in linings, Ph.D. Thesis, Universität Stuttgart, pp. 97-125.