

개별요소법을 활용한 스포크 타입 토압식 실드TBM의 예비 해석 연구

이철호¹ · 장수호^{2*} · 최순욱¹ · 박병관³ · 강태호⁴ · 심정길⁵

¹비회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구위원

³학생회원, 과학기술연합대학원대학교(UST) 스마트도시 건설융합 박사과정

⁴정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 신진연구원

⁵비회원, ㈜넥스트이엔에스 책임연구원

Preliminary study on a spoke-type EPB shield TBM by discrete element method

Chulho Lee¹ · Soo-Ho Chang^{2*} · Soon-Wook Choi¹ · Byungkwan Park³ ·
Tae-Ho Kang⁴ · Jung Kil Sim⁵

¹Research Specialist, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Senior Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Graduate Student, Smart City & Construction Engineering, University of Science and Technology

⁴Budding Researcher, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁵Senior Research Engineer, Next Engineering & Service

*Corresponding Author : Soo-Ho Chang, sooho@kict.re.kr

Abstract

The Discrete Element Method (DEM) is one of the useful numerical methods to analyze the behavior of the ground formation by computing the motion and interaction using particles. The DEM has not been applied in civil engineering but also a wide range of industrial fields, such as chemical engineering, pharmacy, material science, food engineering, etc. In this study, to review a performance of the spoke-type earth pressure balance (EPB) shield TBM (Tunnel Boring Machine), the commercial software based on the DEM technology was used. An analysis of the TBM during excavation was conducted according to two pre-defined excavation conditions with the different rotation speed of a cutterhead. During the analysis, the resistant torque at the face of the cutterhead, the compressive force at the cutterhead and shield surface, the muck discharge at the screw auger were measured and compared. Upon the two kinds of excavation conditions, the applicability of the DEM analysis was reviewed as a modelling method for the TBM.

Keywords: EPB Shield TBM, TBM, Excavation, DEM, Numerical analysis

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(6)1029-1044(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.6.1029>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 24, 2017

Revised November 6, 2017

Accepted November 13, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 다수의 작은 입자들의 운동 및 상호영향을 계산하여 시스템의 거동을 해석하는 수치해석법으로써, 실제 화학공학, 약학, 토목공학, 재료과학, 식품공학 등 다양한 산업현장에서 적용되고 있다. 본 연구에서는 DEM 기법에 근거한 입자 역학 전용 해석 상용 소프트웨어를 사용하여 스포크타입 토압식 쉴드 TBM 굴착 성능을 평가하기 위한 예비 해석을 수행하였다. TBM에 대한 해석은 커터헤드의 회전속가 다른 2가지 조건에 대해 수행되었다. 해석을 진행하는 동안 커터헤드면에 작용하는 저항 토크, 커터헤드면과 쉴드면에 작용하는 압축력, 스크루 오거를 통해 배출되는 토사의 양을 검토하였다. 해석을 통해 DEM 해석을 이용한 TBM 장비 모델링의 적용성을 검토하였다.

주요어: 토압식 쉴드 TBM, TBM, 굴착, 개별요소법, 수치해석

1. 서론

경제적인 기계화 시공을 위해서는 지반조건에 따라 최적의 TBM을 선정함과 동시에, 선정된 TBM의 굴착 성능을 예측하는 것이 중요하다. TBM의 굴착 성능을 예측하는 방법들은 매우 다양하며, 대표적인 방법으로는 실험실 실험이나 현장 굴진 자료 분석을 통한 예측 등이 있다. 2000년대 중반 이후로 컴퓨터의 급격한 성능향상으로 인해 수치해석(numerical analysis)을 통해 굴착 성능을 예측하는 연구들이 나타나기 시작했고, 그중 개별요소법(Discrete Element Method, DEM)을 사용하여 지반을 모사하고 굴착성능을 예측하는 방법은 대표적인 수치해석법 중 하나이다.

현재까지 수행된 대부분의 TBM 굴착 성능 예측을 위한 연구들은 실내 실험이나 현장에서 수집한 굴진 자료 분석을 통한 암반용(hard rock) TBM과 관련된 연구들(Bilgin et al., 2012; Burger, 2006; Gehring, 2009; Rostami and Ozdemir, 1993; Tarkoy, 2009; Yagiz and Karahan, 2015; Yazdani-Chamzini and Yakhchali, 2012)이 대부분인 것으로 파악된다. 또한, 성능 예측을 위해 DEM 기법에 기반을 둔 수치해석 역시 대부분 암반을 대상으로 한 연구가 여러 연구를 통해 수행된 바 있다(Gong et al., 2005, 2006; Labra et al., 2017; Liu et al., 2015; Lv et al., 2017; Moon and Oh, 2012).

토압식(Earth Pressure Balanced, EPB) 쉴드 TBM은 커터헤드(cutterhead) 후면에 있는 챔버(chamber)에 굴착 토사 또는 버력을 이용하여 굴진면(tunnel face)의 안정성을 유지하면서 굴진하는 굴착 장비이다. 또한 쉴드 TBM의 커터헤드 형상은 스포크형(spoke)과 면판형(face plate)으로 구분되며, 스포크형은 면판형에 비해 커터에 발생하는 부하가 작고 굴착 토사의 배토가 수월하다는 장점을 갖고 있다(KICT, 2015).

토압식 쉴드 TBM은 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 TBM 종류 중의 하나로서, 토압식 쉴드 TBM의 굴착 성능 예측을 위하여 기존의 실내 실험이나 현장 굴진 자료 분석을 통한 연구들(Avunduk and Copur, 2018; Copur et al., 2014; Maidl and Comulada, 2011) 뿐만 아니라, 복합지반의 모사가 가능한 DEM 기법을 적용하여 성능을 예측하는 연구들이 수행되었다(Maynar and Rodríguez, 2005; Wu et al., 2013; Wu and Liu, 2014).

DEM 기법을 통해 수행된 최근의 연구들에서는 주로 PFC (Particle Flow Code)라는 수치해석 상용 소프트웨어가 사용되었는데(Maynar and Rodríguez, 2005; Wu et al., 2013; Wu and Liu, 2014), 이 소프트웨어는 1994년에 개발된 이래로 현재까지도 전 세계의 다양한 산업 분야에서 많이 사용되고 있는 상용 소프트웨어이다. PFC는 개발된 이후 많은 보완과 수정을 거쳐 왔고 비교적 간단하게 모델링이 가능하기 때문에 해석이 매우 빠르면서도 정확하다는 장점을 갖고 있지만 다양한 CAE (Computer Aided Engineering) 소프트웨어와의 연동 해석(coupling)이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 점은 TBM과 같이 지반과 장비의 거동이 모두 중요한 분야의 경우, 지반의 변형을 고려하면서 장비에 가해지는 힘을 지반과 연동하여 해석하기가 어렵기 때문에 TBM 장비의 거동을 간접적으로 파악할 수밖에 없다는 한계를 가진다.

TBM 굴착과정 시 지반의 변형과 이로 인해 커터헤드에서 발생하는 각종 균열 및 피로의 발생 가능성을 검토하기 위해, 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램과의 연계와 확장이 가능한 DEM 기반의 입자역학 해석 프로그램을 적용하였다. 특히, 본 연구에서는 이를 위한 선행연구로서 DEM 기반으로 굴착 지반을 모사하고 TBM 장비를 강체(rigid body)로 모사하여 TBM 커터헤드에 가해지는 응력과 토크를 검토하였다. 또한, TBM 굴착 장비에 배토 시스템을 모사하여 주어진 배토 조건에서 굴착 중 적절한 배토량을 검토하는 방안을 제시하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 수치해석 개요

본 연구에서 TBM 커터헤드의 해석을 위해 적용한 EDEM (2017)은 DEM에 기반한 입자역학 전용 해석 소프트웨어로서, 산업현장에서 직면하는 입자 거동에 의한 문제를 해석하는 방안으로 사용된다. EDEM에서 사용하는 입자간 접촉 모델(contact model)은 기존 DEM 해석에서 사용되는 입자와 요소들간의 접촉 모델을 포함한 다양한 접촉 모델의 적용이 가능하다. 본 연구에서는 제어된 입자간 겹침을 고려하여 입자간 접촉력을 산정하는 Hertz-Mindlin 모델(Cundall and Strack, 1979; Sakaguchi et al., 1993; Tsuji et al., 1992)을 기본 접촉 모델로 고려하였다.

Hertz-Mindlin 접촉 모델은 비선형 탄성 모델(non-linear elastic model)이며, 정확하고 효과적인 접촉력 계산이 가능하므로 DEM 해석에서 자주 사용된다. Hertz (1882)가 최초 제안한 모델은 구(sphere) 형상과 같은 단순한 형상으로 이루어진 입자 사이의 접촉에 따른 거동을 설명하는데 효과적인 면을 갖고 있었다. 하지만 제안한 이론의 모델 식이 복잡하고 강성체 입자간 접촉면에서 과도한 힘이 계산될 가능성이 있어 실용성이 낮다는 평가를 받았기 때문에(Peng, 2014), 이후 다양한 연구를 통해 현재의 형태를 갖추게 되었다(Cundall and Strack, 1979; Di Maio and Di Renzo, 2005; Di Renzo and Di Maio, 2004, 2005; Sakaguchi et al., 1993; Tsuji et al., 1992).

본 연구에서 사용된 Hertz-Mindlin 접촉 모델에서 법선 방향의 탄성력(F_n^s)과 수직 강성(K_n)은 Hertz (1882)의 제안에 의해 각각 다음 식 (1)과 (2)로 정의된다.

$$F_n^s = -K_n \cdot \delta_n^{3/2} \quad (1)$$

$$K_n = 2 \cdot E^* \cdot \sqrt{R^* \cdot \delta_n} \quad (2)$$

여기서, δ_n 은 법선 방향의 상대 변위, K_n 은 수직 강성(normal stiffness), R^* 은 등가 반지름(equivalent radius), E^* 은 등가 탄성계수(equivalent elastic modulus)를 나타낸다. Mindlin (1949)에 의해 제시된 접선 방향의 탄성력(F_t^s)은 다음 식 (3)과 같이 정의한다.

$$F_t^s = -K_t \delta_t \quad (3)$$

$$K_t = 8 \cdot G^* \cdot \sqrt{R^* \cdot \delta_n} \quad (4)$$

여기서, δ_t 는 접선 방향의 상대 변위, K_t 는 접선 강성(tangential stiffness), G^* 는 등가 전단계수(equivalent shear modulus)를 나타낸다.

법선 방향의 감쇠력(F_n^d)과 접선 방향의 감쇠력(F_t^d)은 감쇠비(damping ratio)와 반발 계수(restitution coefficient)의 상관성 연구(Tsuji et al., 1992)에 기초하여, 다음 식 (5)~(7)과 같은 수식 형태로 정리된다(Ucgul et al., 2014).

$$F_n^d = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \psi \cdot \sqrt{K_n m^*} v_n \quad (5)$$

$$F_t^d = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \psi \cdot \sqrt{K_t m^*} v_t \quad (6)$$

$$\psi = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (7)$$


여기서, e 는 반발 계수, ψ 는 감쇠비, m^* 는 등가 질량(equivalent mass), v_n 과 v_t 는 접촉 시 두 입자 간 각각의 법선 방향과 접선 방향의 상대속도를 나타낸다. 이를 통해 두 입자가 접촉이 발생했을 때 접촉력을 계산하게 되며, 계산된 접촉력과 입자간 강성을 기초로 입자간 움직임이 정의된다.

2.2 토사지반 모델

DEM에서 입자의 형상은 해석 모델의 전체적인 거동에 영향을 미친다. 정밀한 토사지반의 구축을 위해서는 반드시 지반 내부에 포함된 토립자의 구조적 불균일성, 다시 말해 단일 구형(single sphere)의 토립자 뿐만 아니라 무작위(random)로 나타나는 형상의 토립자 까지도 지반 모델링에 반영되어야 한다. 하지만 해석 대상 영역이 크고 복잡한 경우, 해석 시간이 급증하게 되고 수렴이 힘들어지는 문제를 갖기 때문에 해석에 적합한 입자 형상을 먼저 고려해야 한다. 본 연구에서는 특정 지반 조건이 아닌 일반적인 토사지반을 단순하게 고려하고 계산시간과 해석의 편의를 위해 모델링에 사용된 모든 입자의 형상을 단일 구형으로 근사하여 모델링하였다. 다만, 직접 굴착이 일어나는 부분의 입자의 지름을 상대적으로 작게 모델링하여 해석 효율을 높이고, 반면 굴착에 직접적인 영향을 주지 않는 부분에 대한 불필요한 계산을 방지하고자 하였다. 입자의 크기를 작게 모델링하면 상대적으로 해석의 정확도를 높일 수 있으나, 계산에 소요되는 시간이 과도하게 증가한다. 반대로 해석시간 단축을 위해 입자의 직경을 크게 할 경우, 본 연구에서와 같은 해석에서는 스크루 오거(screw auger)를 통해 입자 배출이 원활하게 이루어지지 않는 경우가 발생하기 때문에 입자 크기에 대한 합리적인 결정이 수반되어야 한다.

본 연구의 해석에 사용된 입자 모델과 접촉 물성을 Table 1에 정리하였다. 해석에 사용된 입자는 두 종류로 구성되어 있으며, 상대적으로 직경이 작은 ‘Soil 1’ 입자는 굴착이 실제로 진행되는 영역, ‘Soil 2’ 입자는 비굴착 영역의 모델링을 위해 사용되었다. 지반은 자갈(gravel)이 포함된 지반으로 이루어졌다고 가정하였으며, 자갈이 포함된 지반의 물성은 EDEM이 문헌연구와 해석경험을 통해 자체적으로 보유하고 있는 GEMM (Generic EDEM Material Model) 데이터베이스(EDEM, 2017)를 활용하였다.

Table 1. Soil properties and constant interaction parameters used for analysis (EDEM, 2017)

Property	Soil 1	Soil 2
Particle shape	 Single sphere	 Single sphere
Bulk density (kg/m ³)	2,500	2,500
Poisson's ratio	0.4	0.4
Shear modulus (MPa)	10	10
Particle size (mm)	200	500
Number of particles	180,000	26,000
Restitution coefficient	0.01	0.01
Coefficient of static friction	0.9	0.9
Coefficient of rolling friction	0.7	0.7

DEM 해석에서 입자간 전단 계수는 해석의 속도 및 결과를 지배하는 매우 중요한 인자이다. 대상 지반의 실제 거동을 반영하되 해석 결과를 거의 왜곡시키지 않으면서, 동시에 해석 속도 향상을 가져올 수 있도록 모사된 입자에 맞는 최적의 전단계수를 찾는 것이 중요하다. 본 연구에서는 지반 모델의 다짐이나 압축과 같은 현상이 고려되지 않으며, 단순 중력에 의한 토립자의 퇴적과 입자 공극에 따른 침투 등의 현상만 고려되었다. 따라서 본 연구에서 사용된 입자의 전단계수는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 10 MPa로 설정하였다. 입자의 상호 작용 계수는 접촉 시 입자 사이에서 발생하는 상호작용을 결정하는 계수로서, 반발계수, 정적 마찰 계수(Coefficient of static friction) 및 구름 마찰 계수(Coefficient of rolling friction)로 구성되어 있다.

토사지반은 TBM의 직경과 해석시간을 고려하여 35 m × 35 m × 4 m의 크기로 모사되었다(Fig. 1(a)). 굴착이 진행됨에 따라 굴착 주변부에서 발생하는 지반 거동까지 해석할 수 있도록, 지반의 해석영역을 TBM 커터헤드 직경(D)의 2배(2D)로 고려하여 해석영역에 대한 영향을 최소화 하도록 하였다(Fig 1(b)).

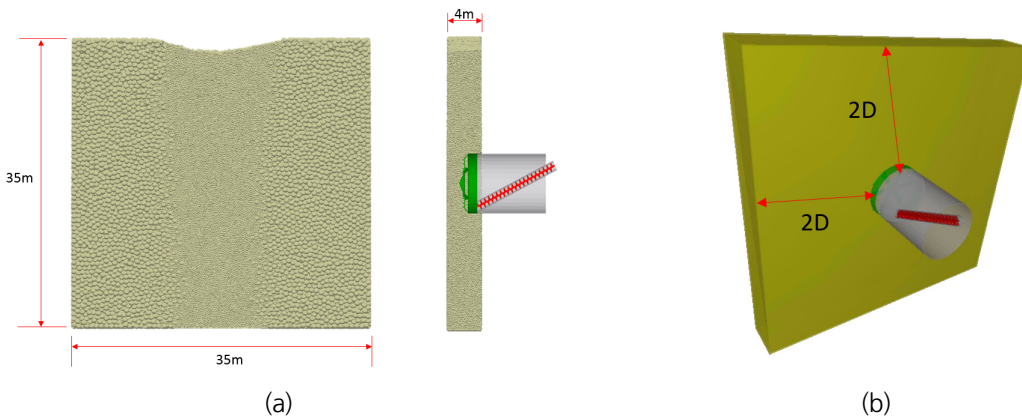


Fig. 1. Dimension of the 3-D numerical ground model

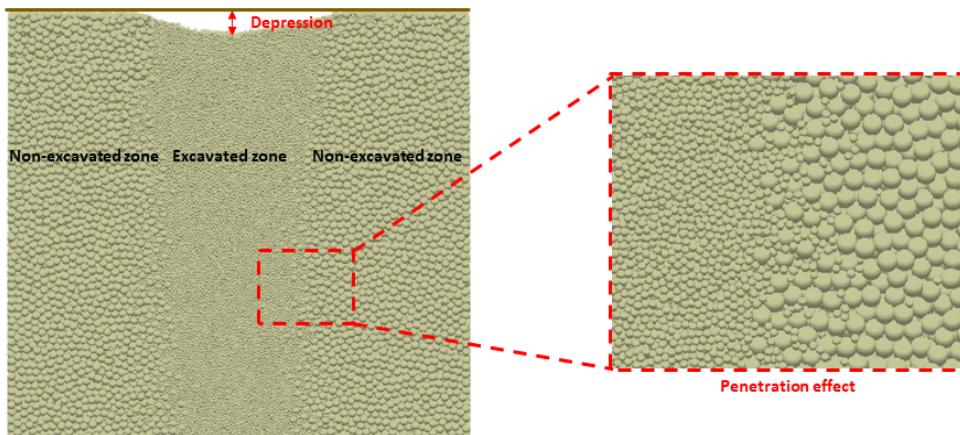


Fig. 2. Initial state of ground particle before stabilization step

본 연구에서 사용한 입자 모델의 직경 차이로 인해 지반 모델에 대한 초기 안정화 과정을 거쳤다. 두 가지 종류의 입자 직경이 상대적으로 2.5배 차이가 발생하기 때문에 중력이 모델에 적용되었을 때 작은 입자들이 큰 입자들 사이로 재배치되는 현상이 일어나기 때문이다(Fig. 2). 따라서 중력이 가해진 상태에서 입자들의 변형이 일정 수준으로 수렴이 되도록 안정화 해석을 수행하였다. 안정화 과정을 거친 이후에는 Fig. 3과 같이 자연스럽게 직경이 작은 입자와 큰 입자가 혼합된 지반의 모양을 가지게 된다. 또한 해석 시에는 Fig. 3과 같이 상부의 처짐 영역을 제거한 상태에서 해석을 수행하였다.

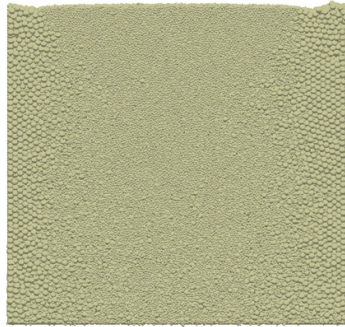


Fig. 3. State of ground particle after stabilization step

2.3 쉴드TBM 모델

본 연구에서 사용된 스포크형 쉴드TBM의 모델은 중국에서 제작된 직경 6.14 m급 쉴드TBM을 기준으로 적용하였다(Fig. 4). 해석 대상의 쉴드TBM은 커터헤드의 스포크 개수가 6개이고 개구율이 75.5%인 장비로서 스크래퍼 82개와 Shell bit 12개, precut bit 28개 등으로 구성되며 Center fish-tail bit의 직경은 1,500 mm 이다.

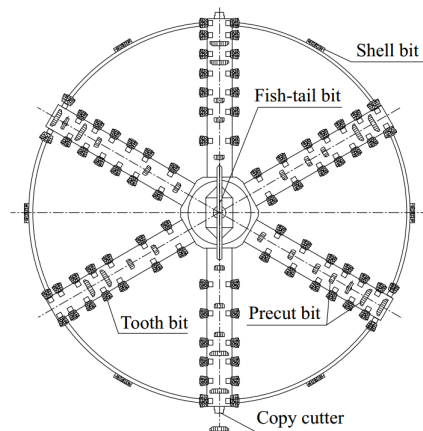


Fig. 4. Schematics of a spoke-type shield TBM cutterhead (Li et al., 2017)

이상과 같이 본 연구에서 고려한 스포크형 쉴드TBM의 형상을 고려하여 해석에서 작성된 쉴드TBM 모델의 형상은 Fig. 5와 같다. 쉴드TBM의 모델은 해석 결과의 처리를 위해 크게 커터헤드와 쉴드 부분, 스크루 오거 시스템의 세 부분으로 나누어 모델링하였다. 직경은 대상 모델과 같은 6.14 m이며 챔버의 길이는 1.5 m, 쉴드의 길이는 8 m로 적용하였다. 스크루 오거의 직경은 0.9 m, 피치간격은 0.5 m, 그리고 길이는 12 m로 적용하였고 설치 각도는 28°로 적용하였다. 또한 스크루 오거와 연결된 커터헤드면의 개구부의 크기는 스크루 오거의 직경을 고려하여 1.01 m로 적용하였다. 커터비트의 크기와 개수도 대상 커터헤드와 같도록 모사하였다. 본 연구에서는 TBM 굴착 해석의 가능성 검토의 방안으로 입자 해석과 유한요소 해석을 연동하지 않고 DEM 해석 모델로만 수행하기 때문에, TBM 장비 모델 자체의 변형은 고려되지 않으므로 TBM 장비 부분의 재료 물성은 해석에서 크게 고려되지 않는다. 다만, 장비의 형상이나 입자와 장비간의 접촉면 특성을 통해 장비에 가해지는 힘이 계산되므로 접촉 물성으로 일반 강재(steel)과 토립자 사이의 접촉 물성을 적용하였다(EDM, 2017). 이상과 같이 쉴드TBM에 적용된 물성은 Table 2와 같다.

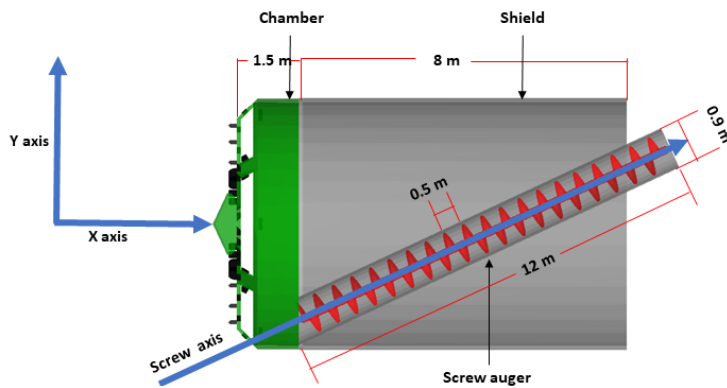



Fig. 5. Numerical model for a spoke-type shield TBM

Table 2. Properties and constant interaction parameters of the shield TBM

Property	TBM
Shape	 Cylinder type
Bulk density (kg/m ³)	2500
Poisson's ratio	0.25
Shear modulus (MPa)	100
Restitution coefficient	0.01
Coefficient of static friction	1.2
Coefficient of rolling friction	1.2

3. TBM 굴착 모델링

굴착 해석을 진행하기 위해서 앞서 모델링 된 토사 지반과 TBM 장비 모델의 결합이 필요하다. 장비와 지반의 결합은 토사 지반이 시작되는 부분에서 진행되는 것이 아니라 TBM 커터헤드 부분을 지반 내부 일정 깊이에 미리 위치시킨 상태로 모델링하였다. 이는 굴착 해석 초기에 발생할 수 있는 입자의 관통이나 이탈 등의 비정상적인 거동을 미연에 방지하기 위함으로써 쉴드의 격벽부가 지반에 닿기 시작하는 깊이(약 1.5 m)까지 장비 부분을 관입한 상태로 위치시킨 다음, 간단한 안정화 해석을 진행한 이후에 굴착 해석을 진행하였다(Fig. 6). 굴착 해석을 진행하면서 커터헤드와 쉴드에 작용하는 힘과 스크루 오거를 통해 배출되는 입자의 양을 검토하였다. 입자에 의해 커터헤드면에 작용하는 힘은 커터헤드면에 작용하는 힘과 커터헤드가 회전할 때 반작용으로 발생하는 회전력(torque)을 분리하여 검토하였다. 해석에서 고려되는 전체 굴착 해석 시간은 1,040 초이며 이때 굴진 거리는 커터헤드의 회전속도에 따라 대략 0.174 m와 0.347 m이다.

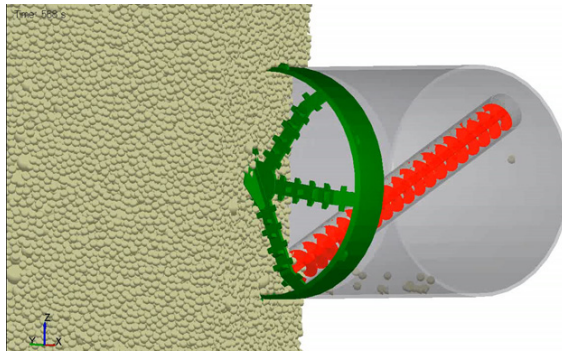


Fig. 6. Numerical model for excavation of shield TBM

쉴드TBM 장비 부분을 구성하는 주요 요소들의 운동은 주어진 두 가지 굴착 조건에 따라, 각각 병진 운동(translational motion)과 회전 운동(rotational motion)으로 표현된다. 즉, 커터헤드가 주어진 분당 회전수(rpm)로 회전하면서 터널의 길이방향(x axis)으로 수평하게 전진하는 것을 모사하기 위함이다. 본 연구에서 고려한 쉴드TBM의 굴진 거리는 커터헤드 1회전 당 10 mm/rev으로 가정하였다. 쉴드 부분은 장비와 일체화된 굴진을 위해 회전하지 않고 커터헤드의 전진속도와 같도록 모델링 하였다. 스크루 오거 부분은 스크루 오거의 중심축을 기준으로 회전하도록 하였으며 마찬가지로 커터헤드의 전진속도와 같도록 길이방향 속도를 적용하였다. 해석에 적용된 굴진 조건은 2가지이다. Condition 1은 커터헤드의 회전속도가 2 rpm이며 Condition 2는 1 rpm 이다. 또한 스크루 오거의 회전 속도의 경우, Condition 1에서 10 rpm, Condition 2에서 15 rpm으로 적용하였다. 이상과 같이 쉴드TBM의 굴착 해석에 사용된 각 부분의 병진 운동과 회전 운동 조건을 Table 3에 정리하였다.

지반을 굴착하며 쉴드TBM이 전진함에 따라 입자와 중력에 의해 생성된 토압으로 인해 커터헤드와 쉴드에 반력(reaction force)이 작용하며, 커터헤드의 회전운동에 따라 회전력(torque)이 나타난다. 또한, 회전력에 따른 반

작용의 힘으로 저항 토크(resistant torque)가 나타난다. 발생하는 반력은 굴진 방향의 압축력(compressive force) 으로부터 계산되며, 회전력은 회전운동에 저항하는 저항 토크(resistant torque)로부터 계산할 수 있다. 이때 굴진에 의해 발생하는 쉴드TBM의 회전력(토크)은 스크래퍼나 비트에서 발생하는 저항 토크와 커터헤드면에서 발생하는 저항 토크의 합으로 계산하였다.

Table 3. Motion condition of TBM parts during its excavation

Component	Motion	Excavation conditions			
		Condition 1		Condition 2	
		Direction	Velocity	Direction	Velocity
Cutterhead	Translational	X axis	-10 mm/rev	X axis	-10 mm/rev
	Rotational	X axis	2 rpm	X axis	1 rpm
Shield	Translational	X axis	-10 mm/rev	X axis	-10 mm/rev
	Rotational	-	-	-	-
Screw auger	Translational	X axis	-10 mm/rev	X axis	-10 mm/rev
	Rotational	Screw axis	10 rpm	Screw axis	15 rpm

4. 해석 결과 및 분석

Fig. 7은 커터헤드면(격벽부)과 쉴드에 나타난 압축력을 굴진 거리에 따라 도시한 결과이다. 그림에서 나타나듯이 굴진면에 비해 쉴드 부분에서 더 큰 압축력이 작용하는 것으로 나타났다. 이는 커터헤드 부분에서는 스크루 오거에 의해 지속적으로 입자가 배출되기 때문으로 판단된다. 즉, 쉴드 부분이 받는 압축력은 Condition 1과 2에

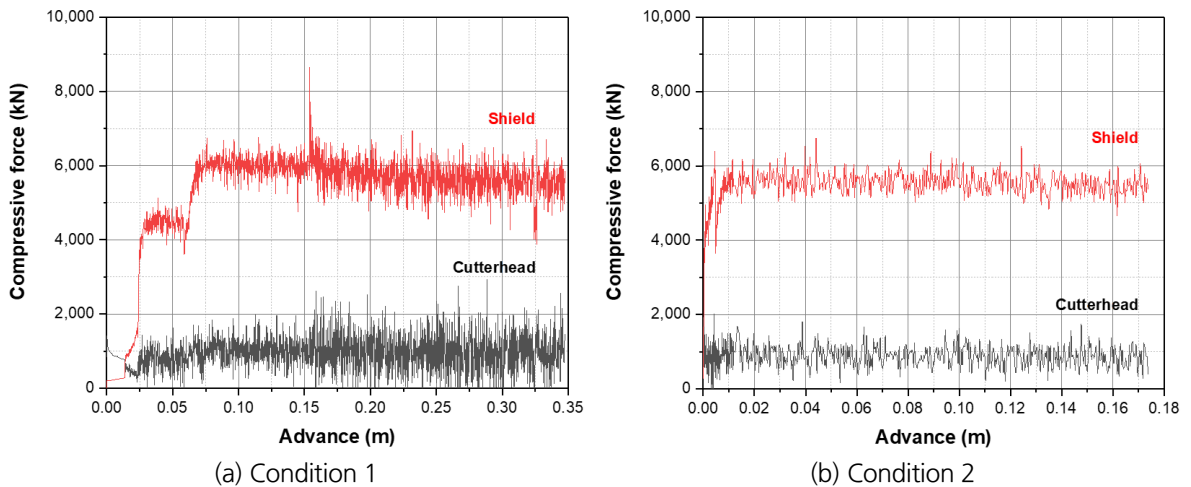


Fig. 7. Compressive forces acted on the cutterhead and the shield

서 동일한 지반 모델을 사용하고 굴착 깊이도 같기 때문에 굴착이 진행됨에 따라 구성된 입자에 의해 비교적 일정한 힘을 받는다. 하지만 커터헤드면의 경우 커터헤드면으로 유입된 입자가 스크루 오거를 통해 배출되기 때문에 커터헤드에 작용하는 압축력이 쉴드에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 이는 굴착 조건에 따라 커터헤드 회전속도의 차이가 있었지만 쉴드에 작용하는 압축력이 유사하게 나타난 것을 통해서도 알 수 있다. 또한, 굴착 조건에 따라 상대적으로 Condition 1에서 편차가 크게 나타났지만 커터헤드면에 작용하는 압축력의 평균적인 크기는 본 연구에서 고려한 두 가지 조건에서는 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 7).

Fig. 8은 굴착 조건에 따라 회전운동으로부터 발생하는 저항 토크를 나타낸다. 저항 토크의 상대적인 크기가 Condition 2에서 작게 나타난 것을 알 수 있으며 빈도수 분석을 통해 상대적 크기를 비교할 수 있다(Fig. 9). Condition 1에서 커터헤드면에 발생한 저항 토크는 대체로 2,112 kN/m 내외로 발생하였으며 Condition 2에서는 1,265 kN/m 내외로 발생하였다. 저항 토크는 커터헤드면에서 측정된 값으로서, Condition 1에 비해 Condition 2

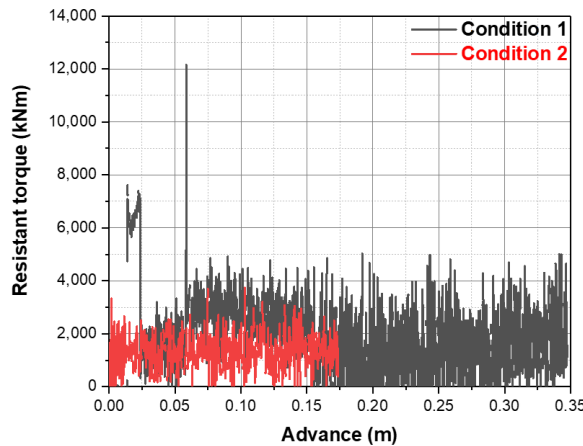


Fig. 8. Resistant torque generated at the cutterhead

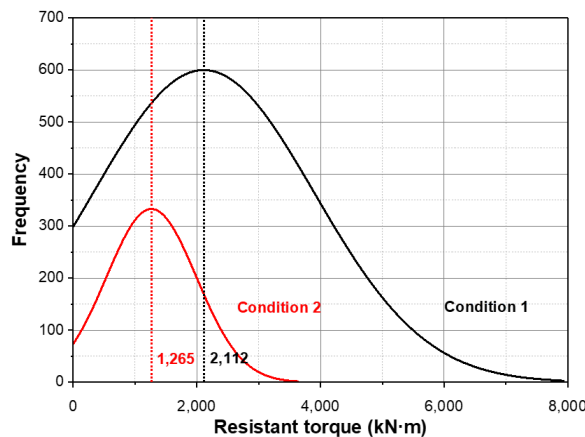


Fig. 9. Frequency of resistant torque generated at the cutterhead

에서 커터헤드의 회전속도가 상대적으로 느리지만 스크루 오거를 통한 토립자 배출량이 많기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서 수행된 두 가지 해석 조건 모두에서 커터헤드면에 일정한 압축력이 작용하는 것으로 나타나 주어진 조건에서 배토가 일정하게 유지되고 있는 것을 유추할 수 있다. 결과적으로 굴진이 일정하게 진행되는 동안 배출량이 일정한 수준으로 유지되며 커터헤드면에서도 일정한 압축력이 발생하지만 스크루 오거에서의 배출량이나 커터헤드의 회전수에 따라 그 크기가 달라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 스크루 오거를 통해 배출되는 토사의 양을 단위시간당 배출되는 무게로 나타낸 것이다. 스크루 오거를 통해 배출되는 토사의 양은 굴진이 진행됨에 따라 스크루 오거 끝단에서 낙하하는 입자들을 순차적으로 제거하면서 측정된 결과이다. 스크루 오거의 회전수가 증가함에 따라(Condition 2) 단위 시간당 배토량이 증가한 것을 확인함을 통해, 스크루 오거의 회전 모델이 적절하게 적용된 것으로 판단할 수 있다. 이는 입자들이 초기에 배출되는 시점을 확인한 결과에서도 주어진 조건에 맞게 Condition 2에서 먼저 배출이 시작된 점을 통해서도 확인

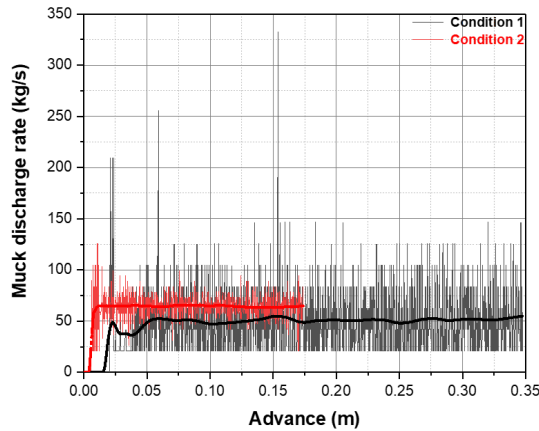


Fig. 10. Muck discharge rate versus TBM advance

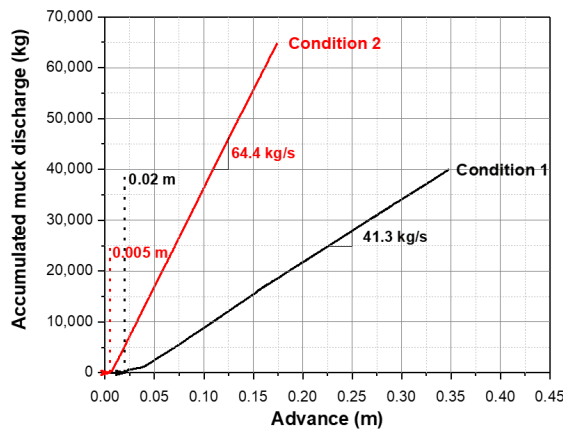


Fig. 11. Accumulated muck discharge rate versus TBM advance

할 수 있었다. 스크루 오거를 통해 배출되는 단위시간당 토사의 양은 Condition 1과 Condition 2에서 각각 41.3 kg/sec 및 64.4 kg/sec 정도로 수렴하였다. 배출량의 누적 그래프(Fig. 11)에서도 나타나듯이, 초기 배출량이 증가하다가 일정한 수준에서 수렴한 것으로 나타나는데 이를 통해 두 가지 경우 모두 스크루 오거에 적용된 조건에 맞게 배출이 원활히 이루어진 것을 유추할 수 있다.

앞선 커터헤드면에 작용하는 압축력의 분석 결과에서 언급하였듯이, 커터헤드면에 작용하는 압축력은 커터헤드면으로 유입된 입자의 양과 관련이 높으므로 배출량이 일정하게 유지된 경우, 커터헤드면의 압축력이나 저항 토크도 일정하게 유지된다. 이를 통해 적절한 스크루 오거의 회전수에 대한 검토를 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 커터헤드면에 작용하는 압축력이나 저항 토크를 상호 비교하는 해석을 통해 커터헤드면에 작용하는 토압을 비교 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행된 이상과 같은 굴착 해석 방법을 통해 커터헤드면에 작용하는 저항 토크를 함께 검토하여 배출량, 토압 및 토크를 상호 연계하여 비교할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후에는 본 연구에서 적용한 방법을 사용하여 스크루 오거의 직경이나 설치 각도 등의 조건들을 해석에 적용하고, 지반조건별로 TBM의 운전 방식에 적합한 스크루 오거의 설계 검토를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 DEM 해석을 통해 토사 지반을 모델링하고 스포크 형태의 커터헤드가 포함된 토압식 쉴드 TBM의 굴착 과정을 모사하였다. 굴착에 진행됨에 따라 커터헤드와 쉴드에 작용하는 반력을 정량적으로 계산할 수 있었으며, 스크루 오거의 모델링을 통해 배토 과정에서 발생하는 단위 시간당 배출량을 검토할 수 있었다. 본 연구를 통해 검토한 연구 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 토사 지반을 모사하기 위해 직경이 다른 두 종류의 입자를 사용하였다. 이런 경우, 입자간 공극 차이로 인해 상대적으로 작은 입자가 큰 입자 사이로 침투하는 현상이 발생하기 때문에 지반의 안정화 해석 과정이 필요하다. 입자의 크기를 작게 모델링할 경우, 해석의 정확도를 높일 수 있으나 계산에 소요되는 시간이 과도하게 많아지며 반대로 해석시간 단축을 위해 입자의 직경을 크게 할 경우, 스크루 오거를 통한 입자 배출이 원활하지 않기 때문에 DEM 해석으로 TBM 장비의 굴진을 모사할 경우 입자 크기에 대한 합리적 결정이 수반되어야 한다.
2. 커터헤드면(격벽부)과 쉴드에 나타난 압축력을 검토한 결과, 커터헤드면에 비해 쉴드 부분에 더 큰 압축력이 작용하는 것으로 나타났다. 이는 커터헤드 부분에서는 스크루 오거에 의해 지속적으로 입자가 배출되기 때문에 나타나는 차이로 판단되며 해석에서 작성한 스크루 오거에 의해 입자의 배출이 적절히 이루어지고 다시 커터헤드면으로 입자가 유입되고 있음을 나타내는 결과로 판단된다.
3. 본 연구에서 수행된 두 가지 해석 조건에서 커터헤드면의 회전수와 스크루 오거의 회전수가 다르게 적용되었음에도 주어진 조건에서 커터헤드면에 일정한 압축력을 유지하는 것으로 나타났다. 또한 커터헤드면에 일정

한 압축력이 작용할 때 커터헤드의 회전수가 낮고, 스크루 오거의 배출속도가 높은 경우에 저항 토크가 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다.

4. 해석을 통해 스크루 오거를 통한 입자의 배출을 효과적으로 모사할 수 있었다. 해석 결과에서 단위시간당 배출 무게와 누적 무게를 검토한 결과, 초기 배출량이 증가하다가 일정한 수준에서 수렴한 것으로 나타나, 이를 통해 두 가지 경우 모두 주어진 조건에서 스크루 오거에 의한 입자의 배출이 원활하게 이루어진 것을 유추할 수 있었다.
5. 커터헤드면에 작용하는 압축력은 커터헤드면으로 유입된 입자의 양과 관련이 높기 때문에, 배출량이 일정하게 유지된 경우에는 압축력도 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 적절한 스크루 오거의 회전수에 대한 검토를 수행할 수 있을 것으로 판단되며 커터헤드면에 작용하는 압축력과 상호 비교하는 해석을 통해 커터헤드면에 작용하는 토압을 비교 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 굴착 해석 방법을 통해 커터헤드면에 작용하는 저항 토크를 함께 검토하여 배출량, 토압 및 토크를 연계하여 비교할 수 있을 것으로 판단된다.
6. 본 연구에서는 DEM 해석을 적용하여 쉘드TBM의 굴진을 모사하고 커터헤드, 쉘드 및 스크루 오거를 중심으로 쉘드TBM의 해석적인 검토 방안을 고려하였다. 향후 유한요소 연계 해석 연구 등을 통해, 실제 현장과 유사한 지반 모사와 세부적인 커터헤드 설계 검토를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업인 “TBM (Tunnel Boring Machine) 설계·제작 국산화 기술 개발(과제번호: 17SCIP-B129646-01)-2세부과제: TBM 운전·제어 시스템 및 커터헤드의 최적화 설계 기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Avunduk, E., Copur, H. (2018), “Empirical modeling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 71, January 2018, pp. 340-353.
2. Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. (2012), “Effect of replacing disc cutters with chisel tools on performance of a TBM in difficult ground conditions”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 41-51.
3. Burger, W. (2006), “Hard rock cutterhead design”, *Proceedings of the North American Tunneling 2006 Conference*, Chicago, pp. 257-263.
4. Copur, H., Aydin, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumac, D., Dayanc, C. (2014), “Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model. *Tunnelling and Underground Space Technology*”, Vol. 42, May 2014, pp. 1-14.

5. Cundall, P.A., Strack, O.D. (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
6. Di Maio, F.P., Di Renzo, A. (2005), "Modelling particle contacts in distinct element simulations: linear and non-linear approach", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 83, No. 11, pp. 1287-1297.
7. Di Renzo, A., Di Maio, F.P. (2004), "Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, No. 3, pp. 525-541.
8. Di Renzo, A., Di Maio, F.P. (2005), "An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 5, pp. 1303-1312.
9. EDEM (2017), *EDEM User's Manual*, DEM solution, Edinburgh.
10. Gehring, K. (2009), "The influence of TBM design and machine features on performance and tool wear in rock. Der Einfluss von TBM-Konstruktion und Maschineneigenschaften auf Leistung und Werkzeugverbrauch in Gestein", *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 2, No. 2, pp.140-155.
11. Gong, Q.M., Jiao, Y.Y., Zhao, J. (2006), "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 1, pp. 46-55.
12. Gong, Q.M., Zhao, J., Jiao, Y.Y. (2005), "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 183-191.
13. Hertz, H. (1882), "Über die Berührung fester elastischer Körper", *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 156-172.
14. KICT (2015), *Development of optimized TBM cutterhead design method and high-performance disc cutter*, ISBN 979-11-954377-2-6, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp. 7-9.
15. Labra, C., Rojek, J., Oñate, E. (2017), "Discrete/finite element modelling of rock cutting with a TBM disc cutter", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 50, No. 3, pp. 621-638.
16. Li, X., Yuan, D., Huang, Q. (2017), "Cutterhead and cutting tools configurations in coarse grain soils", *The Open Construction and Building Technology Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 182-199.
17. Liu, J., Cao, P., Du, C.H., Jiang, Z., Liu, J.S. (2015), "Effects of discontinuities on penetration of TBM cutters", *Journal of Central South University*, Vol. 22, No. 9, pp. 3624-3632.
18. Lv, Y., Li, H., Zhu, X., Liu, W. (2017), "Discrete element method simulation of random Voronoi grain-based models", *Cluster Computing*, Vol. 20, No. 1, pp. 335-345.
19. Maidl, U., Comulada, M. (2011), "Prediction of EPB shield performance in soils", *Proc. of the In Rapid Excavation and Tunneling Conference*, January 2011, pp. 1083-1091.
20. Maynar, M.J., Rodríguez, L.E. (2005), "Discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 10, pp. 1234-1242.
21. Mindlin, R.D. (1949), "Compliance of elastic bodies in contact", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 16, pp. 259-268.
22. Moon, T., Oh, J. (2012), "A study of optimal rock-cutting conditions for hard rock TBM using the discrete element method", *Rock mechanics and rock engineering*, Vol. 45, No. 5, pp. 837-849.
23. Oñate E., Owen R. (2011), *Particle-Based Methods. Computational Methods in Applied Sciences*, Vol. 25,

Springer, Dordrecht, pp. 247-267.

24. Peng, B. (2014), Discrete element method (DEM) contact models applied to pavement simulation, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 19-23.
25. Rostami, J., Ozdemir, L. (1993), "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", Proc. of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, INC, pp. 793-793.
26. Sakaguchi, H., Ozaki, E., Igarashi, T. (1993), "Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo", International Journal of Modern Physics B, Vol. 7, No. 09n10, pp. 1949-1963.
27. Tarkoy, P.J. (2009), "Simple and practical TBM performance prediction. Einfache und praxistaugliche Voraussage von TBM-Leistungen", Geomechanics and Tunnelling, Vol. 2, No. 2, pp. 128-139.
28. Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T. (1992), "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe", Powder Technology, Vol. 71, No. 3, pp. 239-250.
29. Ucgul, M., Fielke, J.M., Saunders, C. (2014), "Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil", Biosystems Engineering, Vol. 121, May 2014, pp. 105-117.
30. Wu, L., Guan, T., Lei, L. (2013), "Discrete element model for performance analysis of cutterhead excavation system of EPB machine", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 37, August 2013, pp. 37-44.
31. Wu, L., Liu, C. (2014), "Modeling of shield machine tunneling experiment by discrete element method", Applied Mechanics and Materials, Vols. 556-562, pp. 1200-1204.
32. Yagiz, S., Karahan, H. (2015), "Application of various optimization techniques and comparison of their performances for predicting TBM penetration rate in rock mass", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 80, December 2015, pp. 308-315.
33. Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S.H. (2012), "Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 30, July 2012, pp. 194-204.