

폼과 폴리머를 활용한 EPB 실드 TBM 굴착토의 유동학적 특성 평가

황병현¹ · 강민규² · 권기범¹ · 양정훈¹ · 최항석^{3*}

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사후연구원

³정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 정교수

Evaluating rheological properties of excavated soil for EPB shield TBM with foam and polymer

Byeonghyun Hwang¹ · Minkyu Kang² · Kibeom Kwon¹ · Jeonghun Yang¹ · Hangseok Choi^{3*}

¹Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Postdoctoral Researcher, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*Corresponding Author : Hangseok Choi, hchoi2@korea.ac.kr

Abstract

The Earth Pressure Balanced (EPB) Shield Tunnel Boring Machine (TBM) is widely employed for constructing urban underground spaces due to its minimal vibration and low noise levels. The injection of additives offers several advantages, including maintaining shield chamber pressure, reducing shear strength, minimizing cutter wear, and decreasing the permeability of the excavated soil. This technique is known as soil conditioning and involves the application of additives such as foam, polymer, and bentonite slurry. In this study, weathered granite soil commonly encountered at domestic tunnel sites was used as a soil specimen. Foam and polymer were applied as additives to assess the rheological properties of conditioned soils. The workability was evaluated through slump tests, while the rheological properties were assessed through laboratory pressurized vane shear tests conducted under the same conditions. Specially, the polymer was applied under specific conditions with low workability with high slump values, with the aim of evaluating the impact of polymer application. The test results revealed that with an increase in the Foam Injection Ratio (FIR), the slump value also increased, while the torque, peak strength, yield stress, apparent viscosity, and thixotropic area decreased. Conversely, an increase in the Polymer Injection Ratio (PIR) led to results opposite to those of FIR. Additionally, a correlation between the slump value and yield stress was proposed. When comparing conditions with only foam

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
25(5)387-401(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.5.387>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 14, 2023

Revised September 5, 2023

Accepted September 5, 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

applied to those with both foam and polymer applied, even with similar slump values, the yield stress was found to be lower in the latter conditions.

Keywords: EPB (Earth Pressure Balanced), TBM (Tunnel Boring Machine), Soil conditioning, Additives, Rheological properties

초 록

토압식(Earth Pressure Balanced, EPB) 쉘드 TBM (Tunnel Boring Machine) 공법은 진동과 소음이 적어 도심지 지하 공간 시공에 적극적으로 활용되고 있다. 이때 첨가제 주입은 막장압 유지, 전단강도 감소, 커터의 마모량 최소화, 굴착토의 투수계수 감소 등 다양한 효과를 보인다. 이러한 기술을 쓰일 컨디셔닝이라 하며, 일반적으로 첨가제로 폼, 폴리머, 벤토나이트 슬러리 등을 적용한다. 본 연구에서는 국내 터널 현장에서 빈번하게 조우하는 화강풍화토 시료에 대해 폼과 폴리머를 첨가제로 적용하여 유동학적 특성을 평가하였다. 슬럼프 시험을 통해 작업성(Workability)을 평가하고, 동일한 시험 조건에 대해 실내 가압 베인전단 시험을 수행하여 유동학적 특성을 평가하였다. 이때 슬럼프 값이 높아 작업성이 떨어지는 경우, 폴리머를 추가 적용하여 폴리머 적용이 유동학적 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 시험 결과, 폼 주입비(Foam Injection Ratio, FIR)가 증가함에 따라 슬럼프 값은 증가한 반면 토크, 침투강도 및 항복응력, 겔보기 점도, 틱소트로피 면적은 감소하였다. 하지만, 폴리머 주입비(Polymer Injection Ratio, PIR)는 폼 주입비와 상반되는 결과를 확인하였다. 시험결과 비교를 통해 슬럼프 값과 항복응력 간의 상관관계를 제시하였다. 그리고 폼만을 적용한 조건과 폼과 폴리머 모두 적용한 조건을 비교한 결과, 유사한 슬럼프 값을 보이더라도 폼과 폴리머 모두 적용한 조건에서 더 낮은 항복응력이 도출되었다.

주요어: 토압식, TBM, 쓰일 컨디셔닝, 첨가제, 유동학적 특성

1. 서론

최근 들어, 도심지 인구 집중으로 인한 도심지 지상 공간의 포화와 교통 혼잡비용의 증가는 터널의 중요성을 부각하고 있다(Kwon et al., 2023). 이때, 터널 시공 기법 중 진동과 소음이 적은 TBM (Tunnel Boring Machine) 공법은 막장면 지지 방법에 따라 토압식(Earth Pressure Balanced, EPB) 쉘드 공법과 이수식(Slurry Pressure Balanced, SPB) 쉘드 공법으로 나뉜다(Park et al., 2015). 이수식 쉘드 TBM 공법은 추가적인 슬러리 처리 플랜트(Slurry Treatment Plant, STP)가 필요한 반면, 토압식 쉘드 TBM 공법은 추가적인 설비가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 이에 따라 토압식 쉘드 TBM 공법은 현재 가장 널리 사용되는 기계화 터널 공법 중 하나이다. 토압식 쉘드 TBM은 커터헤드 후방 챔버 내 유입된 굴착토를 스크류 컨베이어를 통해 적절히 배토하여 챔버압을 조절함으로써 막장에 작용하는 토압에 대응하면서 굴진하는 장비이다(Kwon et al., 2022). 이때 조절된 배토량은 막장면의 압력 유지에 큰 영향을 끼치며 일반적으로 사질토 이하의 지반에 적합하다고 알려져 있다(Kim et al., 2018). 그러나 첨가제(폼, 폴리머, 벤토나이트 슬러리 등)의 적절한 사용과 함께 굴착토의 물성을 개선하여 토압식 쉘드 TBM이 적용 가능한 지반 범위를 확장할 수 있게 되었다(Merritt et al., 2003). 또한 첨가제 주입은 막장압의 변동

감소, 전단강도 감소, 커터의 마모량 최소화, 굴착토 투수계수 감소, 스크류 컨베이어 내 연속적인 배토, 작업성 (Workability) 향상 등 다양한 효과를 기대할 수 있다(Peila et al., 2007; Gharahbagh et al., 2014; Zhou and Yang, 2020; Avunduk et al., 2021). 이러한 첨가제 주입에 따른 굴착토 물성 개선 기술을 쏘일 컨디셔닝(Soil conditioning)이라 한다. 토압식 쉘드 TBM을 적용한 터널 시공에 있어 쏘일 컨디셔닝의 적용은 시행착오를 통한 경험적인 방법으로 적용되어 왔다. 그러나 최근에는 설계 단계에서부터 컨디셔닝된 흙의 특성에 대한 반영이 요구됨에 따라 쏘일 컨디셔닝에 대한 연구가 폭 넓게 진행되고 있다(Feng, 2004).

컨디셔닝된 흙에 대하여 작업성을 평가하는 방법으로는 콘크리트 분야에서 활용되는 슬럼프 시험이 제안되었으며, 이는 국내외적으로 활용빈도가 높다(Langmaack, 2000). EFNARC (2005)에 의하면 최적의 작업성을 갖는 컨디셔닝된 흙의 조건은 슬럼프 값이 10~20 cm이다. 그러나 슬럼프 시험의 경우 컨디셔닝된 흙에 대해 작업성을 평가할 수는 있으나, 대기압 상태에서 시험이 진행되기 때문에 실험실 조건에 따라 상이한 결과를 도출할 수 있다. 또한 가압 상태를 유지하는 TBM 챔버 내부 모사에는 한계가 있다. 이를 극복하고자 유동계(Rheometer)를 통해 컨디셔닝된 흙의 유동학적 특성 평가에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 특히 베인 형상의 유동계를 활용한 첨가제의 주입에 따른 점도 및 전단강도에 대한 연구가 활발히 진행되었다(Karmakar and Kushwaha, 2007; Zumsteg et al., 2009; Galli and Thewes, 2019). 또한 베인 형상을 갖는 유동계 외에도 구 형상과 오거 형상 등 다양한 형상의 유동계를 통한 폼 컨디셔닝된 흙에 대한 연구가 이루어졌으며, 슬럼프 값과 항복응력의 관계, 함수비 및 폼 주입량에 따른 측정 토크의 관계를 도출하였다(Messerklinger et al., 2011; Hu and Rostami, 2021).

본 연구에서는 국내 터널공사에서 빈번히 조우하는 화강풍화토를 대상으로 슬럼프 시험과 실내 가압 베인전단 시험을 수행하였다. 실내 가압 베인전단 시험은 Lee (2021)가 개발한 장비를 활용하였으며, 이 장비는 가압 상태 모사가 불가능한 슬럼프 시험의 단점을 보완할 수 있다. 먼저 폼 만을 주입한 조건에 대해서 작업성 및 유동학적 특성을 평가하고, 최적 작업성을 보이는 슬럼프 값 범위 내 속하지 않는 조건에 대해서 폴리머를 추가 적용하여 이에 따른 영향을 평가하였다. 이를 통해 컨디셔닝된 흙의 전단 특성, 겔보기 점도, 텍스트로피 면적 등의 유동학적 특성 평가를 하여 첨가제 주입에 따른 영향을 검토하였다.

2. EPB 쉘드 TBM의 굴진향상을 위한 쏘일 컨디셔닝

2.1 첨가제 종류 및 주입 변수

토압식 쉘드 TBM은 굴진 성능 향상을 목적으로 쏘일 컨디셔닝을 적용하며, 이를 위해 커터헤드, 챔버, 스크류 컨베이어에서 첨가제 분사가 가능하도록 설계 및 제작된다. 쏘일 컨디셔닝은 굴착 토사 또는 암반 버력의 유동성을 확보하고 굴착토의 마찰계수 감소를 통해 전단강도를 감소시킨다. 또한 굴착된 토사가 낮은 투수성을 갖도록 하여 막장면의 안정성을 도모하는 역할을 가진다. 쏘일 컨디셔닝에 적용되는 첨가제의 종류는 크게 폼, 폴리머, 벤토나이트 슬러리로 나눌 수 있다. 이중 본 연구에서는 폼과 폴리머를 첨가제로 활용하였다.

폼은 다른 첨가제들에 비해 저렴하여 토압식 쉘드 TBM 시공에 적극적으로 사용되고 있다(Lee, 2021). 폼은

물, 공기, 기포제로 구성되어 있으며, 폼을 구성하는 기포제는 계면활성제(Surfactant)로서 표면장력을 감소시켜 굴착토를 유동화시킬 수 있고 전기적 반발(Electrostatic Repulsion)을 일으켜 흙 입자를 서로 분리시킨다(Langmaack, 2000). 또한 주입 시 버력의 내부마찰각 감소, 소성 유동성 및 작업성 확보, 투수계수 감소, 윤회 효과로 인한 TBM 마모량 감소 등의 효과가 있다(Quebaud et al., 1998). 따라서 토압식 실드 TBM 시공에 있어 적절한 폼 주입은 TBM 장비 부하와 시공 리스크를 감소시켜 공기의 단축 뿐만 아니라 굴진면의 안정성을 확보하는 중요한 요소이다(Lee et al., 2019). 폼을 적용할 때는 폼 주입비(Foam Injection Ratio, FIR), 폼 팽창비(Foam Expansion Ratio, FER), 폼 농축계수(Concentration of Foam, C_f)와 같이 3가지 주입 변수가 존재하며, 각각 식 (1)~(3)과 같이 표현된다.

$$FIR = \frac{V_f}{V_{es}} \times 100 (\%) = \frac{V_{lf} + V_a}{V_{es}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$FER = \frac{V_f}{V_{lf}} = \frac{V_{lf} + V_a}{V_{lf}} \quad (2)$$

$$C_f = \frac{V_t}{V_t + V_w} \times 100 (\%) = \frac{V_t}{V_{lf}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서, V_f 는 팽창된 폼의 부피(m^3), V_{es} 는 굴착토의 부피(m^3), V_{lf} 는 폼 수용액의 부피(m^3), V_a 는 공기의 부피(m^3), V_t 는 폼 원액의 부피(m^3), V_w 는 물의 부피(m^3)를 의미한다.

폴리머는 물, 폴리머 원액으로 구성되어 있으며, 폴리머 원액은 수용성과 점성을 갖는 고분자 물질이다. 폴리머는 특성상 소량의 적용으로도 충분한 점도를 확보할 수 있으며, 굴착토 내 존재하는 간극수를 흡수하여 보존하는 특성을 갖는다. 또한 주입 시 굴착토가 커터에 부착되는 현상을 방지하며, 굴착토 투수성 감소의 효과가 있다. 이에 따라 투수성이 높거나 지하수위 아래 지반의 토압식 실드 TBM 시공에 있어 폴리머를 적절하게 활용하는 것은 매우 중요하다. 폴리머는 폼과 다르게 특별한 팽창 장치를 필요로 하지 않으며, 목표한 농도에 맞게 물과 희석하여 적용된다. 폴리머를 적용할 때는 폴리머 주입비(Polymer Injection Ratio, PIR), 폴리머 농축계수(Polymer Expansion Ratio, C_p)와 같이 2가지 주입 변수를 고려해야 하며, 각각 식 (4), 식 (5)와 같이 표현된다.

$$PIR = \frac{V_{lp}}{V_{es}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

$$C_p = \frac{V_p}{V_p + V_w} \times 100 (\%) = \frac{V_p}{V_{lp}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

여기서, V_{lp} 는 폴리머 수용액 부피(m^3), V_p 는 폴리머 원액의 부피(m^3)를 의미한다.

2.2 유동학적 특성

대상 지반에 대한 최적의 첨가제 주입 조건을 결정하기 위해서는 첨가제로 컨디셔닝된 굴착토의 유동학적 특성을 정량적으로 평가해야 한다. 유동학적 특성으로는 작업성, 전단 특성, 걸보기 점도, 틱소트로피 면적이 있다.

작업성은 쓰일 컨디셔닝을 통해 굴착토를 고체와 액체 중간 사이의 상태인 소성 유동화 상태로 형성하는 것과 관련이 있다. 굴착토의 작업성을 향상시켜 소성 유동화를 발생시키면 막장 전방에 균일한 압력을 생성하고 스크류 컨베이어를 통한 연속적인 배토를 가능하게 한다. 컨디셔닝된 굴착토의 작업성을 평가하기 위해서는 주로 슬럼프 시험을 수행한다.

전단 특성은 베인전단 시험을 통해 도출된 토크 데이터로부터 유동곡선을 도출하여 첨두강도와 항복응력을 산정함으로써 평가된다. 유동곡선은 유동학적 변수인 전단속도와 전단응력 간의 관계를 나타내는 곡선으로 식 (6), 식 (7)과 같이 각 변수를 산정하게 된다. 이 때 전단응력은 베인전단 시험 종료 후 파괴면의 형태가 베인 직경 및 높이와 동일한 원통형이고 파괴면의 겉면에 균일한 전단응력이 가해짐을 가정하며(Karmakar and Kushwaha, 2007), 전단속도는 베인전단 시험 중 베인이상, 하부의 경계면이 없는 원통형으로 회전한다고 가정한다(Meng et al., 2011).

$$\tau = \frac{2T_m}{\pi D_v^3 \left(\frac{H_v}{D_v} + \frac{1}{3} \right)} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4\pi D_c^2}{60(D_c^2 - D_v^2)} \omega_{vane} \quad (7)$$

여기서, τ 는 전단응력(Pa), T_m 은 측정된 토크 데이터($N \cdot m$), D_v 은 베인 직경(m), H_v 는 베인 높이(m)를 의미하며, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도(1/s), D_c 는 챔버 내경(m), ω_{vane} 은 베인 회전 속도(rpm)를 의미한다.

걸보기 점도는 유체에 적용된 전단응력을 전단속도로 나눈 값을 말한다. 첨가제로 컨디셔닝된 굴착토는 전단응력과 전단속도가 비선형 관계를 갖는 비뉴턴 유체로 알려져 있으며(Lee et al., 2022), 이에 따라 적절한 비뉴턴 유체 거동 모델을 선정하여 굴착토의 유동 특성을 파악해야 한다. 본 연구에서는 첨가제로 컨디셔닝된 굴착토의 비뉴턴 유체 거동을 빙햄 소성 모델(Bingham Plastic Model)로 가정하여 걸보기 점도를 산정하였으며, 식 (8)과 같다.

$$\begin{cases} \tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} & (|\tau| > \tau_y) \\ \dot{\gamma} = 0 & (|\tau| \leq \tau_y) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, τ 는 전단응력(Pa), τ_y 는 항복응력(Pa), μ 는 겔보기 점도(Pa·s), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도(1/s)를 나타낸다.

유동곡선은 전단속도가 증가하는 상향곡선(Up-curve)과 감소하는 하향곡선(Down-curve)으로 이루어져 있다. 상향곡선 아래 영역은 컨디셔닝 흙의 유동학적 파괴를 의미하고, 하향곡선 아래 영역은 파괴된 구조로부터 초기 상태로의 구조적 회복을 의미한다. 따라서, 텍스토로피 면적은 상향곡선과 하향곡선 사이 영역의 면적으로 산정한다(Ghica et al., 2016).

3. 화강풍화토의 유동학적 특성 평가

3.1 시료 조성 및 첨가제 조건

본 연구에서는 화강풍화토를 통해 슬럼프 시험과 실내 가압 베인전단 시험의 수행하였다. 이때 Budach and Thewes (2015)는 Fig. 1과 같이 지반의 입도에 따른 첨가제 적용 조건 및 토압식 쉴드 TBM을 적용할 수 있는 지반 입도를 제안하였으며, 본 연구에 적용한 화강풍화토의 입도는 Fig. 1에 실선으로 표시하였다. 통일분류법에 의해 시험시료는 SP로 분류되며, 비중은 2.69, 첨가제를 적용한 시료의 목표 단위중량은 1.9 t/m³으로 적용하였다.

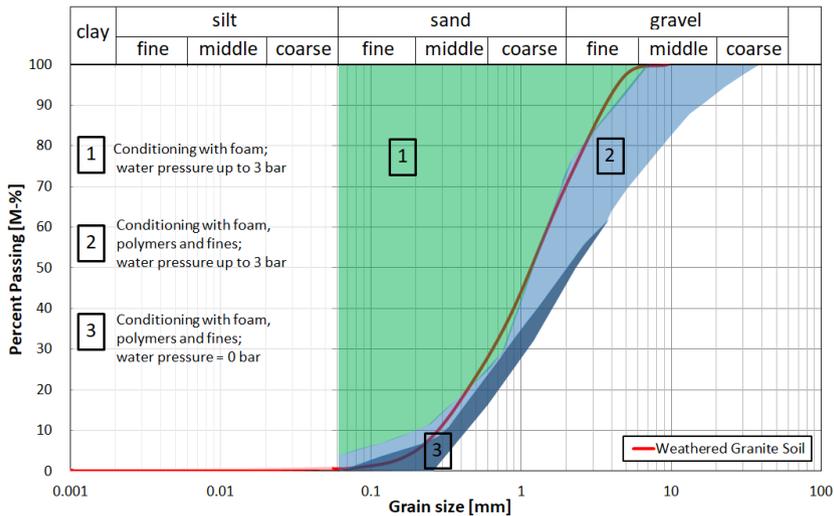


Fig. 1. Particle size distribution of weathered granite soil

화강풍화토에 대해서 컨디셔닝을 수행하기 위해 첨가제로 계면활성제가 주원료인 폼과 폴리아크릴산계 폴리머를 사용하였으며, 첨가제의 물성은 Table 1과 같다. 폼의 주입변수 폼 주입비는 30~60%, 폼 팽창비는 5~30, 폼

농축계수는 0.5~5%의 범위가 적절하다고 제시된 바가 있다(Shin, 2020; Oh, 2021). 이때 EFNARC (2005)가 제안한 최적 작업성을 갖는 슬럼프 값 10~20 cm 범위를 고려하여 함수비는 14%, 폼 주입비는 20~40%, 폼 팽창비는 15, 폼 농축계수는 3%로 구성하여 시험을 진행하였다. 폴리머는 제조사가 제안하는 주입변수 범위를 고려하여 폴리머 주입비는 5~20%, 폴리머 농축계수는 0.2~0.3%로 구성하였다. 폼의 경우 폼 발생 장치를 활용하여 기포를 생성하고 시료에 주입하였으며, 첨가제가 주입된 시료는 핸드 믹서를 활용하여 2분간 균일 속도로 교반하였다.

Table 1. Properties of foam and polymer agent

Additives	Apparent color	Specific gravity	pH
Foam	Transparent light brown	1.00~1.10	8.0~11.0
Polymer	Milky white	1.00~1.10	7.0~9.0

3.2 슬럼프 시험

실내 가압 베인전단 시험을 진행하기 앞서 ASTM C143 (2017)에 따라 슬럼프 시험을 수행하였다. 폼 만을 적용한 조건(F1, F2, F3), 폼과 폴리머 모두 적용한 조건(P1, P2, P3, P4)으로 시험 조건을 조성하였으며, 모든 조건의 함수비는 14%, 폼 팽창비는 15, 폼 농축계수는 3%로 적용하였다. 적용된 시험 조건 및 슬럼프 시험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Slump test cases and results

Case No.	W (%)	FER	C _f (%)	FIR (%)	C _p (%)	PIR	Slump value (cm)
F1	14	15	3	20	-	-	7.2
F2				30	-	-	19.4
F3				40	-	-	24.3
P1				40	0.2	5	14.1
P2						10	7.7
P3						15	5.3
P4						20	1.2

폼 만을 적용한 조건(F1, F2, F3)을 통해 폼 주입비가 증가함에 따라 슬럼프 값이 증가하는 결과를 확인하였다. 이 중 F2 조건의 슬럼프 값은 19.4 cm로 최적 작업성을 갖는 슬럼프 값 범위(10~20 cm) 내에 속함에 따라 가장 적합한 컨디셔닝 조건임을 알 수 있었다. 한편 최적 작업성을 갖는 슬럼프 값 범위에 속하지 않으며 유동성이 큰 F3 조건의 경우 폴리머를 추가 적용하였고, P1~P4 결과를 확인해 보면 폴리머 주입비가 증가함에 따라 슬럼프 값이

낮아졌다. 이 중 P1 조건의 슬럼프 값은 14.1 cm로 최적 작업성을 갖는 슬럼프 값 범위 내에 속하여 폴리머가 추가 될 경우 가장 적합한 컨디셔닝 조건임을 확인하였다.

3.3 실내 가압 베인전단 시험

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 Lee (2021)가 개발한 실내 가압 베인전단 시험 장비를 통해 컨디셔닝된 흙에 대한 유동학적 특성 평가를 진행하였다. 실내 가압 베인전단 시험 장비는 챔버 내부의 시료를 상부 덮개를 통해 가압이 가능하도록 제작된 장비로서, 베인을 회전시켜 전단을 유발시키는 유동계이다. 이 시험 장비에서는 토크센서가 설치되어 베인이 회전함에 따라 발생하는 토크를 측정할 수 있다. 또한 챔버에는 2개의 압력 센서가 설치되어 챔버 내부 압력을 측정할 수 있다. 이때, ASTM D4648 (2016)에 따라 직경 대비 높이 비가 1:2인 4개의 블레이드로 이루어진 베인을 적용하였으며, 높이는 10 cm, 직경은 5 cm이다. 또한, 추가적인 제어 시스템을 통해 시험 진행에 따른 토크 값을 실시간으로 확인할 수 있도록 구성하였다.

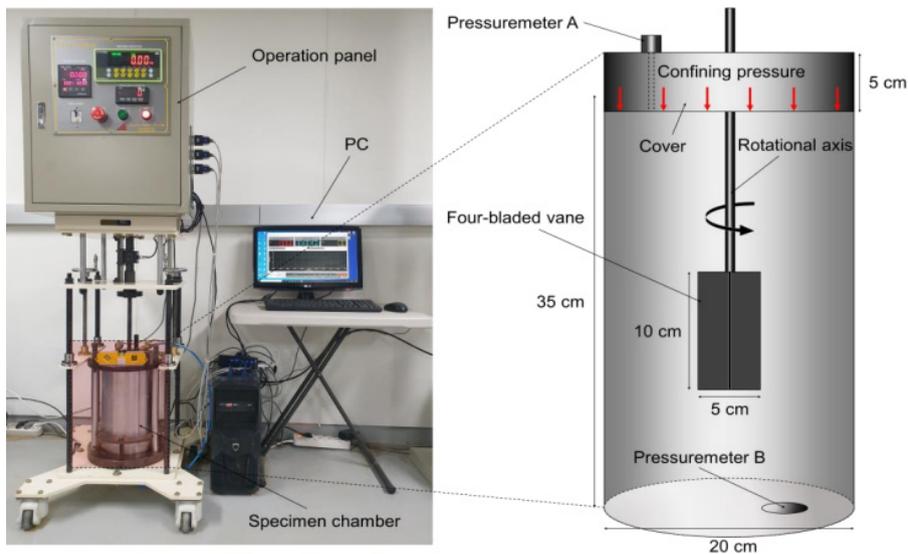


Fig. 2. Photograph and detailed schematics of laboratory pressurized vane shear test apparatus (Lee, 2021)

유동곡선을 통해 텍스트로피 면적을 산정하기 위하여 AC 서보모터를 통해 베인의 회전 속도에 변화를 줄 수 있도록 시스템을 구성하였다. ASTM D4648 (2016)은 2~3분 사이에 챔버 내 시료의 전단파괴가 이루어질 수 있도록 베인 회전 속도를 조합하는 것을 제안하였다. 따라서 회전 속도를 15단계로 구성하여 시험을 진행하였고, 회전 속도는 1/60, 1/30, 1/15, 1/10, 1/5, 1/3, 1/2, 3/4 RPM으로 구성하였다. 회전속도는 30초 간격으로 변화시키고, 3/4 RPM 이후에는 속도가 다시 낮아지며 1/60 RPM까지 동일 시간 간격으로 줄어들도록 하였다. 이러한 과정을 통해 시험의 총 회전 각도는 360°가 된다(Fig. 3).

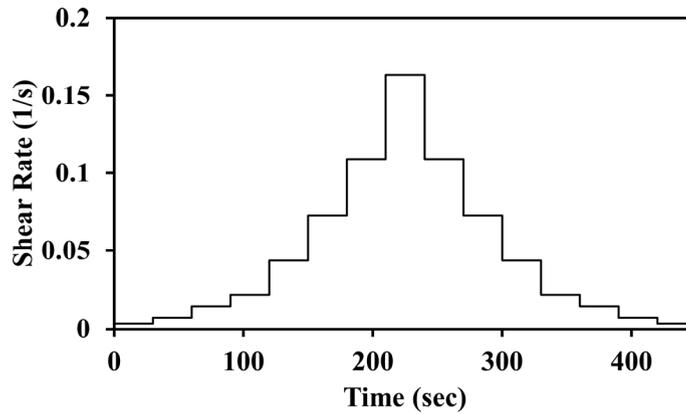


Fig. 3. Adopted test steps of laboratory vane shear test

실내 가압 베인전단 시험 또한 슬럼프 시험의 조건과 동일하게 핸드 믹서를 활용하여 시료 및 첨가제를 2분간 교반 하였으며, 이후 챔버에 별도의 다짐 없이 조성하였다. 상부 덮개를 통해 챔버의 구속압력은 200 kPa로 고정 하였으며, 이는 대략적으로 토압식 실드 TBM의 심도 20 m 지점 굴착 상태를 모사한 것이다. 실내 가압 베인전단 시험을 통해 전단특성, 겉보기 점도, 텍스토로피 면적을 평가하였다.

4. 실내 가압 베인전단 시험을 통한 유동학적 특성 분석

4.1 폼 주입에 따른 결과 분석

폼 주입비가 컨디셔닝된 흙의 유동학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시험 조건 F1~F3에 대한 실내 가압 베인전단 시험을 수행한 결과, Fig. 4와 같이 폼 주입비가 증가함에 따라 토크는 감소하는 결과를 보였다.

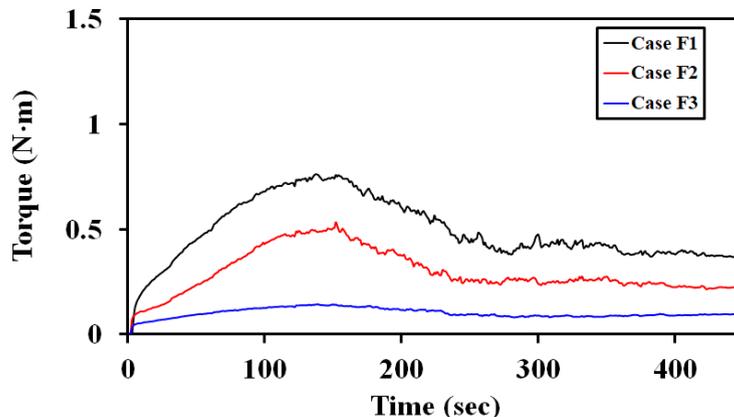


Fig. 4. Torque results according to FIR

서로 다른 폼 주입비를 갖는 컨디셔닝된 흙에 대한 유동학적 특성 결과는 Fig. 5와 같다. 폼 주입비가 증가함에 따라 침투강도 및 항복응력, 걸보기 점도, 틱소트로피 면적 모두 감소하였으며, 이는 슬럼프 시험 결과와 부합한다. 시험 조건 F2와 F3 사이에 모든 유동학적 특성들이 급격하게 감소하는 결과를 보여 최적 컨디셔닝 조건이라 볼 수 있으나, 슬럼프 시험을 통해 확인한 작업성을 고려해보면 시험 조건 F2가 가장 적절한 컨디셔닝 조건이라 판단된다.

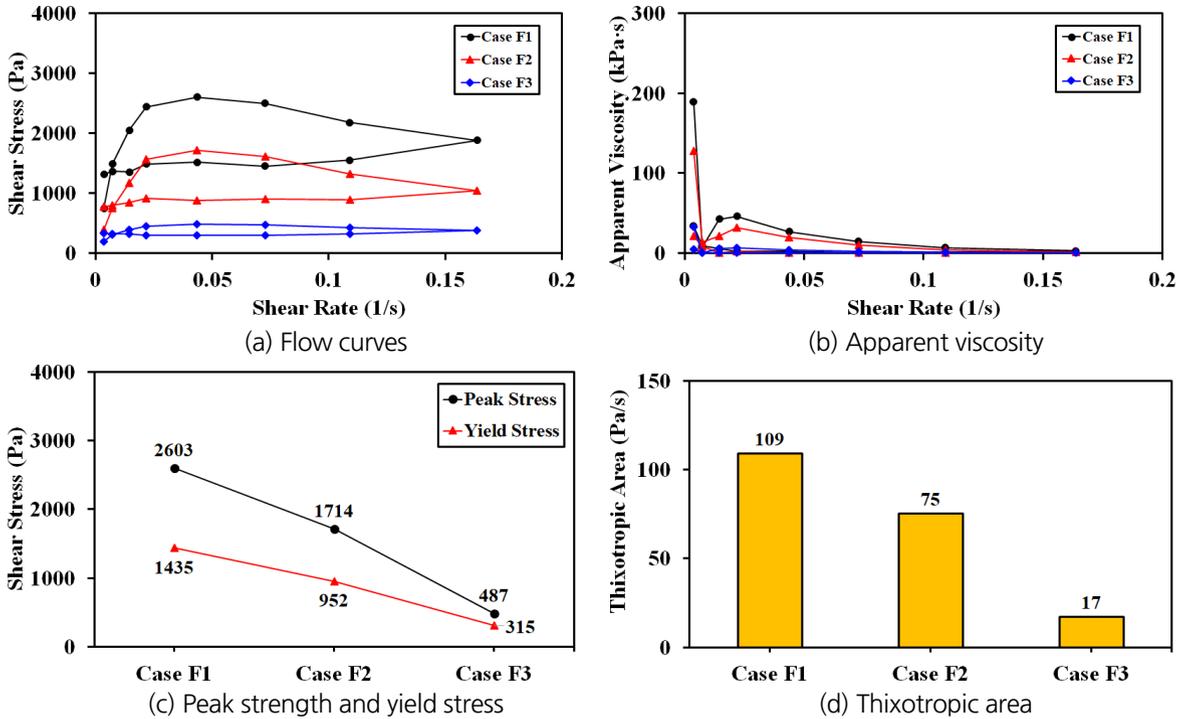


Fig. 5. Rheological properties according to FIR

4.2 폴리머 주입에 따른 결과 분석

폴리머 주입비가 컨디셔닝된 흙의 유동학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시험 조건 P1~P4에 대한 실내 가압 배전단 시험을 수행하였다. 이는 시험 조건 F1에 폴리머를 추가 적용한 조건이며, 지반 내 수분 함량이 높아 폼만으로는 토압식 쉴드 TBM의 굴착이 어려운 상황을 모사한 것이다. 그 결과, Fig. 6과 같이 폴리머 주입비가 증가함에 따라 토크 또한 증가하는 결과를 확인하였다.

서로 다른 폴리머 주입비를 갖는 컨디셔닝된 흙에 대한 유동학적 특성 결과는 Fig. 7과 같다. 폴리머 주입비가 증가함에 따라 침투강도 및 항복응력, 걸보기 점도, 틱소트로피 면적 모두 증가하였으며, 이는 폼만을 적용한 조건과 마찬가지로 슬럼프 시험 결과에 부합하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8과 같이 폼 적용 조건 및 폼-폴리

며 적용 조건 모두 슬럼프 값과 항복응력 사이의 역지수관계가 있음을 확인하였으며, 시험 조건 F1, P2와 같이 유사한 슬럼프 값을 보이더라도 폼과 폴리머 두 종류의 첨가제가 모두 적용되었을 경우 항복응력이 더 낮음을 알 수 있다.

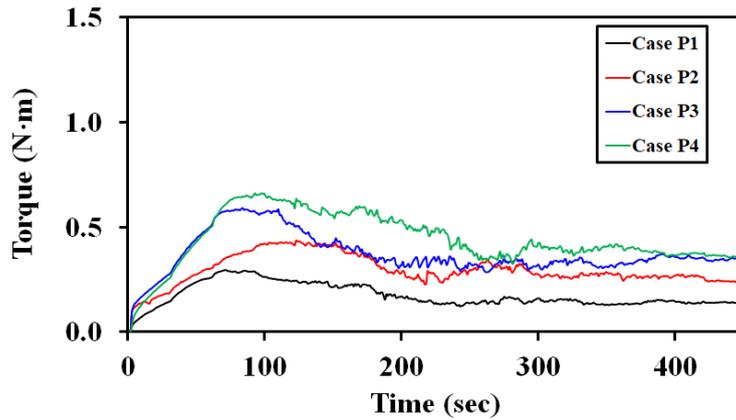


Fig. 6. Torque results according to PIR

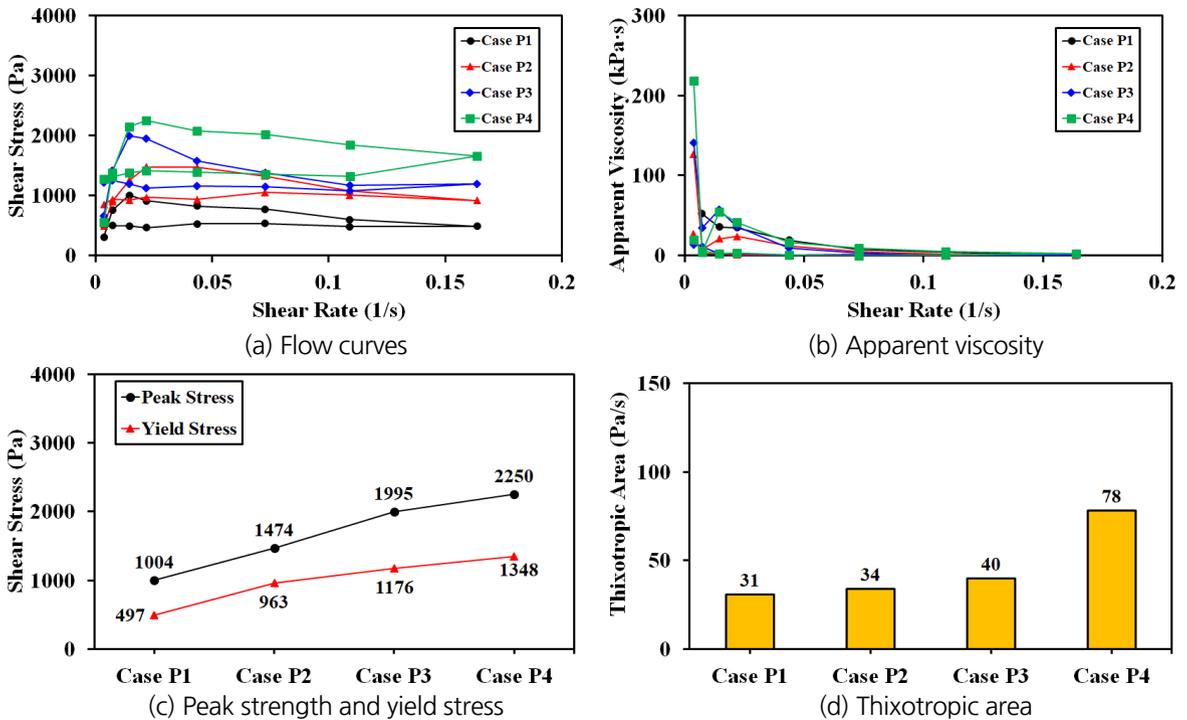


Fig. 7. Rheological properties according to PIR

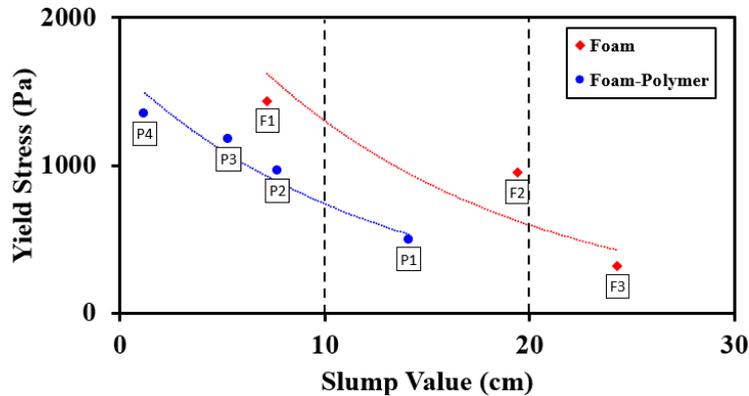


Fig. 8. Relationship of slump value and yield stress

5. 결론

본 연구에서는 슬럼프 시험 및 실내 가압 베인전단 시험을 통해 심도 약 20 m 조건을 모사한 화강풍화토의 첨가제 주입에 따른 유동학적 특성을 파악하였다. 시료는 빙햄 소성 모델(Bingham Plastic Model)로 가정하여 유동학적 특성을 평가하였다. 시험에 있어 폼 주입비(Foam Injection Ratio, FIR) 및 폴리머 주입비(Polymer Injection Ratio, PIR)를 변수로 고려하였다. 슬럼프 시험을 통해 컨디셔닝된 흙의 작업성(Workability)을 확인하였고, 실내 가압 베인전단 시험을 통해 시간에 따른 토크를 측정하여 이에 따른 침투강도 및 항복응력, 겔보기 점도, 텍스트로피 면적을 산정하였다. 또한 컨디셔닝된 시료의 슬럼프 값과 항복응력 간의 상관관계를 도출하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약된다.

1. 슬럼프 시험을 통해 컨디셔닝 된 흙에 대한 작업성 평가를 진행하였다. 이때 폼 주입비가 증가함에 따라 슬럼프 값이 커지며, 폴리머 주입비가 증가함에 따라 슬럼프 값이 작아지는 결과를 얻었다.
2. 실내 가압 베인전단 시험을 통해 토크 데이터 분석을 통해, 폼만이 주입된 시료의 경우 폼 주입비가 증가함에 따라 토크, 침투강도 및 항복응력, 겔보기 점도, 텍스트로피 면적 모두 감소함을 알 수 있었다. 또한, 폴리머가 추가적으로 적용된 시료의 경우 폴리머 주입비가 증가함에 따라 유동학적 특성들이 모두 증가하였다. 이는 각 조건의 슬럼프 측정 결과와 부합하였다.
3. 슬럼프 측정값과 항복응력 간의 역지수관계를 확인하였으며, 슬럼프 값이 유사하더라도 폼과 폴리머가 모두 적용된 시험 조건(P2)이 폼만 적용된 시험 조건(F1) 보다 항복응력이 낮음을 알 수 있었다. 또한 폴리머의 적용은 슬럼프 값이 높아 작업성이 낮은 시험 조건 F3 (슬럼프 값: 24.3 cm)을 시험 조건 P1 (슬럼프 값: 14.1 cm) 과 같이 최적의 작업성을 보이는 슬럼프 범위(10~20 cm) 내에 들도록 하였다. 향후 토압식(Earth Pressure Balanced, EPB) 쉴드 TBM (Tunnel Boring Machine)의 시공에 있어 시공 현장의 지반 조건에 대한 첨가제 최적 주입 조건이 도출되어 이를 설계에 반영한다면 시공성 및 경제성 향상에 크게 이바지할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(TBM 굴진향상을 위한 연속굴착 기술개발, RS-2022-00144188)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

저자 기여도

황병현은 연구 개념 및 설계, 원고 작성을 하였고, 강민규는 데이터 분석을 하였고, 권기범은 데이터 수집을 하였고, 양정훈은 데이터 해석을 하였고, 최항석은 연구 방향 제시, 원고 검토를 하였다.

References

1. ASTM C143 (2017), Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, ASTM International, Vol. 04.02, pp. 1-4.
2. ASTM D4648 (2016), Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine grained clayey soil, ASTM International, Vol. 04.08, pp. 1-7.
3. Avunduk, E., Copur, H., Tolouei, S., Tumac, D., Balci, C., Bilgin, N., Shaterpour-Mamaghani, A. (2021), "Possibility of using torvane shear testing device for soil conditioning optimization", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 107, 103665.
4. Budach, C., Thewes, M. (2015), "Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 50, pp. 296-304.
5. EFNARC (2005), Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tunneling (TBM) in soft ground and hard rock, European Federation of National Associations Representing for Concrete, pp. 1-45.
6. Feng, Q.L. (2004), "Soil conditioning for modern EPBM drives", Tunnels and Tunnelling International, Vol. 36, No. 12, pp. 18-20.
7. Galli, M., Thewes, M. (2019), "Rheological characterisation of foam-conditioned sands in EPB tunneling", International Journal of Civil Engineering, Vol. 17, pp. 145-160.
8. Gharahbagh, E.A., Rostami, J., Talebi, K. (2014), "Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 41, pp. 127-136.
9. Ghica, M.V., Hîrjău, M., Lupuleasa, D., Dinu-Pîrvu, C.E. (2016), "Flow and thixotropic parameters for rheological characterization of hydrogels", Molecules, Vol. 21, No. 6, pp. 786-802.
10. Hu, W., Rostami, J. (2021), "Evaluating rheology of conditioned soil using commercially available surfactants (foam) for simulation of material flow through EPB machine", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 112, 103881.
11. Karmakar, S., Kushwaha, R.L. (2007), "Development and laboratory evaluation of a rheometer for soil

- visco-plastic parameters”, *Journal of Terramechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 197-204.
12. Kim, T.H., Kwon, Y.S., Chung, H., Lee, I.M. (2018), “A simple test method to evaluate workability of conditioned soil used for EPB shield TBM”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 6, pp. 1049-1060.
 13. Kwon, K., Choi, H., Oh, J.Y., Kim, D. (2022), “A study on EPB shield TBM face pressure prediction using machine learning algorithms”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 24, No. 2, pp. 217-230.
 14. Kwon, K., Kang, M., Kim, D., Choi, H. (2023), “Prioritization of hazardous zones using an advanced risk management model combining the analytic hierarchy process and fuzzy set theory”, *Sustainability*, Vol. 15, No. 15, 12018.
 15. Langmaack, L. (2000), “Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunneling”, *Proceedings of the North American Tunneling*, Vol. 2000, Boston, pp. 525-542.
 16. Lee, H. (2021), Evaluation on performance of EPB shield tunnelling with foam conditioning, Ph.D. Thesis, Korea University, pp. 1-272.
 17. Lee, H., Kwak, J., Choi, J., Hwang, B., Choi, H. (2022), “A lab-scale experimental approach to evaluate rheological properties of foam-conditioned soil for EPB shield tunnelling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 128, 104667.
 18. Lee, H., Shin, D., Kim, D.Y., Shin, Y.J., Choi, H. (2019), “Study on EPB TBM performance by conducting lab-scaled excavation tests with different foam injection for artificial sand”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 4, pp. 545-560.
 19. Meng, Q., Qu, F., Li, S. (2011), “Experimental investigation on viscoplastic parameters of conditioned sands in earth pressure balance shield tunneling”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 9, pp. 2259-2266.
 20. Merritt, A.S., Borghi, F.X., Mair, R.J. (2003), “Conditioning of clay soils for earth pressure balance tunnelling machines”, *Proceedings of the Underground Construction 2003*, London, pp. 455-466.
 21. Messerklinger, S., Zumsteg, R., Puzrin, A. (2011), “A new pressurized vane shear apparatus”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 112-121.
 22. Oh, J. (2021), Laboratory study on optimum foam injection condition for EPB shield TBM in weathered granite soil, Master Thesis, Korea University, pp. 1-96.
 23. Park, J.O., Yoo, Y.H., Park, B.J. (2015), “An analysis study for reasonable installation of tunnel fire safety facility”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 243-248.
 24. Peila, D., Oggeri, C., Vinai, R. (2007), “Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 1622-1625.
 25. Quebaud, S., Sibai, M., Henry, J.P. (1998), “Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 173-180.

26. Shin, D. (2020), Evaluation of EPB TBM excavation performance on artificial sandy soils with foam injection conditions, Master Thesis, Korea University, pp. 1-272.
27. Zhou, X., Yang, Y. (2020), “Effect of foam parameters on cohesionless soil permeability and its application to prevent the water spewing”, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 5, pp. 1787-1797.
28. Zumsteg, R., Messerklinger, S., Puzrin, A.M., Egli, H., Walliser, A. (2009), “Pressurized vane shear test for soil conditioning”, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, pp. 275-278.