토압식 쉴드 TBM 굴진을 위한 화강풍화토의 컨디셔닝을 평가하는 간편 시험법

김태환[1] · 권영삼[1] · 정희영[1] · 이인모[2*]

[1]비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료
[2]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 정교수

A simple test method to evaluate workability of conditioned soil used for EPB Shield TBM

Tae-Hwan Kim[1] · Young-Sam Kwon[1] · Heeyoung Chung[1] · In-Mo Lee[2*]

[1]Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[2]Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***Corresponding Author :** In-Mo Lee, inmolee@korea.ac.kr

Abstract

Soil conditioning is one of the key factors for successfull tunnel excavations utilizing the earth pressure-balanced (EPB) shield tunnel boring machine (TBM) by increasing the tunnel face stability and extraction efficiency of excavated soils. In this study, conditioning agents are mixed with the weathered granite soils which are abundant in the Korean peninsula and the workability of the resulting mixture is evaluated through the slump tests to derive and propose the most suitable conditioning agent as well as the most appropriate agent mix ratios. However, since it is cumbersome to perform the slump tests all the time either in the laboratory or in-situ, a simpler test may be needed instead of the slump test; the fall cone test was proposed as a substitute. In this paper, the correlation between the slump value obtained from the slump test and the cone penetration depth obtained from the proposed fall cone test was obtained. Test results showed that a very good correlation between two was observed; it means that the simpler fall cone test can be used to assess the suitability of the conditioned soils instead of the more cumbersome slump test.

Keywords: Soil conditioning, Weathered granite soil, Workability, Slump test, Fall cone test

초 록

토압식(Earth Pressure Balanced, EPB) 쉴드 TBM 굴착에서 첨가제 사용을 통해 막장 안정과 배토효율을 증대시키며, 토사지반에의 적용범위를 확대시킬 수 있다. 첨가제로 배합된 굴착토사는 배합 전과 그 거동을 달리하는데, 일반적으로 워커빌리티를 평가하여 비교할 수 있다. 본 연구에서는 국내 화강풍화토와 첨가제를 배합한 후 슬럼프 시험

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(6)1049-1060(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.1049

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 11, 2018
Revised October 8, 2018
Accepted October 12, 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

을 통해 워커빌리티를 평가하고, 적절한 배합비를 도출하고자 하였는바, 매 경우마다 슬럼프 시험을 실시하는 것이 많은 노력을 요하므로 실내 혹은 현장에서 슬럼프 시험보다 간편한 시험법이 필요하다고 판단되어 대체 실험으로서 낙하 콘 시험을 고안하였다. 같은 시료에 대하여 슬럼프 시험에 의한 슬럼프 치와 낙하 콘 시험에서의 콘 관입깊이와의 상관관계를 구한 결과 매우 상관성이 높음을 알 수 있었다. 따라서 국내에 편재해있는 화강풍화토에 대한 쏘일 컨디셔닝의 평가에 핵심인 슬럼프 치 대신 낙하 콘 시험을 이용할 수 있는 관계식을 제안하였다.

주요어: 쏘일 컨디셔닝, 화강풍화토, 워커빌리티, 슬럼프 시험, 낙하 콘 시험

1. 서 론

토압식 쉴드 TBM (Earth Pressure Balanced (EPB) Shield TBM) 공법은 커터헤드 후면의 챔버를 굴착한 토사로 가득 채우고 압력을 가하여서 막장의 안정성을 도모하는 공법이다. 토사지반에 대한 토압식 쉴드 TBM 공법의 적용 범위를 확장시키기거나, 효과적인 배합비 도출을 위해서 다양한 지반과 첨가제를 배합하는 쏘일 컨디셔닝 연구가 활발히 진행되고 있다(Budach and Thewes, 2015; Peila et al., 2013; Martinelli et al., 2015).

기본적으로 쏘일 컨디셔닝은 시행착오를 통해서 굴진 지반에 대한 적절한 배합비 도출이 가능하며, 비슷한 입도분포곡선을 가졌음에도 그 지반의 특성에 따라 배합비는 변화한다. 국내에서 토압식 쉴드 TBM으로 화강풍화토 지반을 굴착할 때, 화강풍화토는 모래나 점토와는 다른 독특한 특성을 가지고 있기 때문에 배합이 까다롭다고 지적된 바 있으며, 첨가제로 배합된 국내 화강풍화토의 거동을 평가하여 적절한 배합비가 제안된 바 있다(Kim et al., 2018).

챔버 내에서 막장압력을 담당하는 배합된 굴착토사는 굴착되기 전 지반과 비교했을 때 그 거동이 변화하게 되고 이를 파악하는 것이 중요하다. 왜냐하면, 이런 배합토의 거동은 토압식 쉴드 TBM 굴착 시 막장안정 및 원활한 배토와 밀접한 관계가 있기 때문이다. 국내/외 실내실험 혹은 현장에서 일반적으로 슬럼프 시험을 통해 배합토의 워커빌리티를 평가하며, 여러 연구자들이 연구한 바 있다. 연구결과를 종합적으로 봤을 때 대략적으로 슬럼프 값이 10~20 cm 사이일 때 워커빌리티가 확보된다(Kim et al., 2018; Budach and Thewes, 2015; Peila et al., 2009; Budach, 2012; Pena Duarte, 2007; Quebaud et al., 1998). 따라서 본 연구에서는 여러 연구자들에 의해 제안된 슬럼프 기준을 근거로 첨가제로 배합된 국내 화강풍화토의 워커빌리티 평가를 위하여 슬럼프시험을 대체할 수 있는 시험법을 제안하고자 한다.

슬럼프 시험 시 많은 양의 시료를 필요로 하는데, 간편함을 위해 ASTM C143 (2015)의 규격이 있음에도 불구하고 임의로 슬럼프 콘의 크기를 1/3의 크기로 축소 제작하여 시험을 진행하기도 하므로 슬럼프 시험보다 간편한 시험법이 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 슬럼프 시험과 낙하 콘 시험 간의 상관관계를 도출하여 콘 관입깊이로 슬럼프 치를 추정할 수 있는 보다 간편한 시험법을 제안하고자 한다.

2. 배 경

2.1 토압식 쉴드 TBM에서의 쏘일 컨디셔닝

토압식 쉴드 TBM 굴착 시 사용되는 첨가제는 폼(foam), 물, 폴리머(polymer), 벤토나이트(bentonite), 분산제(anti-clay polymer), 고화제(solidification agent) 등이 있다. 첨가제의 선택은 지반의 종류, 지하수위, TBM의 기계적 구조 등에 따라 이루어지는데, 쏘일 컨디셔닝의 목적을 정리하면 아래와 같다.

- 굴착토 소성유동화를 통해 충분한 워커빌리티를 확보하고, 이는 커터헤드부터 스크류 컨베이어까지의 흐름을 원활하게 한다.
- 챔버 내 굴착토의 투수계수 감소를 통해 챔버 내로의 유입수를 방지할 수 있다.
- 챔버 내 압축성 증가를 통해 균일한 막장압을 유지 및 관리할 수 있다.
- 내부마찰각 감소를 통해 커터헤드와 스크류컨베이어의 토크를 감소시키고, TBM 기계부분과의 마찰을 감소시킬 수 있다.

본 연구에서 사용된 폼은 가장 대표적이고 경제적인 첨가제로써 물, 공기, 기포제(foaming agent)로 구성되어 있다. 기포제는 기포를 발생시키는 재료로 목표 농축계수에 따라 물에 희석되어 기포발생장치를 이용하여 공기와 함께 뿜어내면 기포가 발생된다. 발생된 폼은 일반적으로 토압식 쉴드 TBM의 기계에서 커팅 헤드 전방, 챔버 내, 스크류 컨베이어에 분사된다.

폼은 기포제의 화학적 구성, 농도, 팽창비에 따라 다른 특성을 가지며 선택적으로 폼 생성 시 폼의 안정성, 강도 증대와 윤활정도의 향상을 폴리머를 추가적으로 첨가할 수 있다. 폼의 성질을 나타내는 용어들을 요약하면 다음과 같다(Budach and Thewes, 2015).

$$C_f = \frac{Q_f}{Q_L} \times 100\ (\%) \tag{1}$$

$$FER = \frac{Q_F}{Q_L} \tag{2}$$

$$FIR = \frac{Q_F}{Q_S} \times 100\ (\%) \tag{3}$$

$$PIR = \frac{Q_P}{Q_S} \times 100\ (\%) \tag{4}$$

$$LIR = \frac{FIR}{FER} + PIR\ (\%) \tag{5}$$

여기서, C_f는 폼 용액 내 기포제의 농도(%), FER은 폼 팽창비(무차원), FIR은 폼 주입비(%), PIR은 폴리머 주입비(%), LIR은 유량 주입비(%), Q_f는 시간 당 기포제 유량(m^3/min), Q_F는 시간 당 폼 유량(m^3/min), Q_L은 시간 당 폼 용액 유량(기포제 + 물)(m^3/min), Q_F는 시간 당 폴리머 유량(m^3/min), 그리고 Q_S는 시간 당 굴착토량(m^3/min)을 의미한다.

2.2 슬럼프 시험(Slump test)

슬럼프 시험은 ASTM C143 (2015)의 규정에 맞추어 콘크리트 공학에서 사용되는 시험법이다. 하지만 쏘일 컨디셔닝 분야에서 배합토의 소성화상태, 즉 워커빌리티를 평가하는 시험법으로 실내실험 뿐만 아니라 현장에서도 사용하고 있다. 앞서 언급한대로 이 시험법을 통해 진행된 연구들을 살펴보면 배합토의 슬럼프 값이 대략 10~20 cm 사이 값이 도출되면 충분한 워커빌리티를 가진다고 판단한다. 따라서 본 연구에서는 목표 시료인 국내 화강풍화토에 첨가제를 적절하게 배합하여 10~20 cm 사이의 슬럼프 값이 도출되는 최적의 배합비에 대해 낙하 콘 시험을 수행하여 슬럼프와 콘 관입깊이의 상관관계를 분석하고자 한다.

2.3 낙하 콘 시험(Fall cone test)

낙하 콘 관입시험은 콘을 시료 위에 올려 놓으면 흙의 컨시스턴시에 따라 콘의 자중에 의해 관입량이 달라지는 원리를 이용하여 흙의 액성한계 및 소성한계를 구하는 시험으로, 콘 관입시험은 Casagrande 방법에 비하여 절차가 단순하여 시험결과에 미치는 장치의 영향이 작고, 시험자의 주관적인 판단 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 낙하 콘 장치는 크게 영국과 스웨덴 기준으로 분류되며 각 나라마다 시험장치 및 기준이 조금 다른데, 본 연구에서는 영국 기준에 맞는 시험장치를 사용하였으며, 본래의 기준 시험법에 따르면, 액성한계 값은 표준 콘이 5초 동안에 20 mm 관입될 때의 함수비이고, 소성한계 값은 5초 동안 콘 관입량이 2 mm 일 때의 함수비이다.

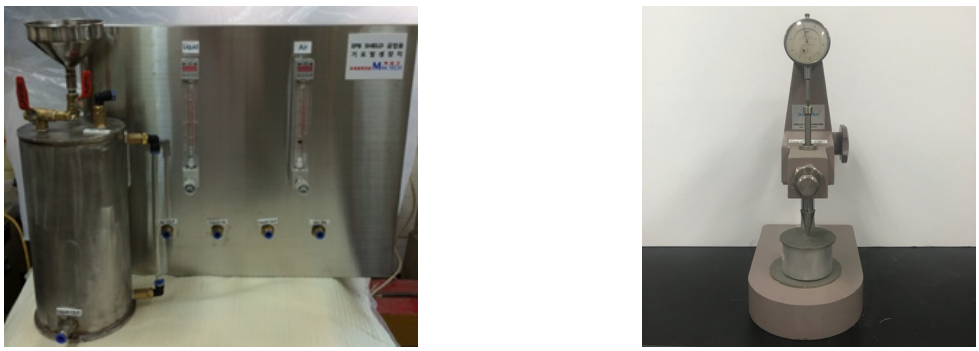
하지만, 본 연구에서는 배합토의 액성한계 또는 소성한계를 도출하는 것이 목적이 아니며, 슬럼프 시험으로부터 얻은 슬럼프 값과 낙하 콘 관입깊이 간의 상관관계를 도출하여 간편한 낙하 콘 시험으로 슬럼프 시험을 대체할 수 있는지 확인하고 이는 배합토의 워커빌리티를 평가하는 새로운 시험법을 제안하고자 한다.

3. 실험계획

3.1 실험 장비 및 과정

폼을 이용한 첨가제 배합실험에서 가장 중요한 장비 중 하나는 폼 발생장치이며, 본 연구를 위해 실내실험용 폼 발생장치를 Fig. 1(a)와 같이 제작하였다. 본 장비는 폼 용액의 양과 공기량을 각각 조절하는 계량기를 통해 폼 팽

창비(FER)를 조절할 수 있다. 폼 주입비(FIR)는 굴착토 대비 폼 양의 부피에 비례하기 때문에 일정한 부피의 폼을 주입하는 것이 중요하며, 이를 확인하기 위해 팽창비 별로 시간당 폼 분사량을 측정한 실험 결과는 Fig. 2와 같다. 실험 과정은 화강풍화토 모든 시료의 초기 함수비를 10%로 맞춘 후 추가적인 물과 폼 주입비별로 폼을 생성한 후 교반기를 통해 배합을 실시하였다. 배합을 실시한 후 즉시 슬럼프 및 낙하 콘 시험을 수행하였으며, 두 시험법은 아래와 같다.



(a) Laboratory-scale foam generator (b) Fall cone test apparatus

Fig. 1. Experimental apparatus used in laboratory-scale tests

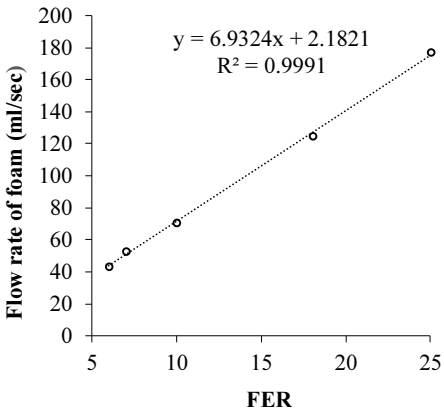


Fig. 2. Flow rate of foam versus FER

슬럼프 실험은 콘크리트 공학에 사용되는 ASTM (2015) C143에 근거하여 수행하였다. 슬럼프 실험과 동시에 수행한 낙하 콘 시험에서는 Fig. 1(b)와 같이 콘의 선단각이 30°, 콘과 수직관의 무게가 80 g으로 표준화된 콘을 사용하는 영국 규정인 BS 1377-2에 맞는 장치를 사용하였다(British Standard Institution, 1990). 그리고 시료컵은 황동이나 알루미늄 합금으로 만들며 단면이 원형이고 내경 55 mm, 깊이 40 mm의 컵 형태이고, 시료는 대략 400 g을 준비한다.

또한, 앞서 언급한대로 낙하 콘 시험의 본 목적인 액성한계 및 소성한계 도출과는 다르게 콘 관입깊이를 측정하여 슬럼프 값과 상관관계를 도출하는 것이 목적이다. 따라서 콘을 시료에 관입시키기 전 초기 값을 0.01 mm 단위까지 읽은 후, 콘을 자유낙하 시켜서 시료에 관입시킨 후 5초 경과 후에 콘을 고정시키고 콘의 위치를 0.01 mm 단위까지 읽는다. 콘 관입 전후의 값 차이가 콘 관입량이며, 이를 슬럼프 값과 비교하였다.

3.2 실험에 사용한 화강풍화토 시료 및 폼 물성치

실험에 사용한 국내 화강풍화토는 확연한 입도분포곡선의 차이를 보이는 것으로 준비하였고, 두 시료의 입도분포곡선은 Fig. 3과 같다. 첨가제 배합방법은 시료의 입도분포곡선 및 #200 통과량에 큰 영향을 받기 때문에, 실험의 오차를 줄이기 위해서 입경 크기별로 시료를 준비하여 실험 시 섞어서 시료를 10 kg씩 조성하였다. 조성한 시료에 첨가제를 배합하면 대부분의 배합토는 슬럼프 시험에 사용되며, 낙하 콘 시험은 배합토 중 400 g만으로도 충분히 시험이 가능하다. 또한 실험에 사용한 화강풍화토의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 본 연구는 세립분이 포함되어 있는 화강풍화토에 한하며, 세립분이 전혀 없는 모래에는 적용이 어렵다.

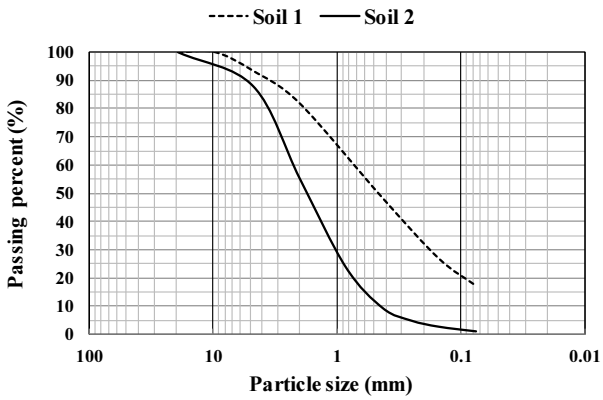


Fig. 3. Particle size gradation curves of the two weathered granite soils

Table 1. Physical properties of two types of weathered granite soils

	Soil 1	Soil 2
Percent passing through a #200 sieve (%)	17.1	1.2
Initial water content (%)	10	10
Dry unit weight (kN/m^3), γ_d	16.70	19.08
Consistency	NP	NP
G_S	2.62	2.64
Unified classification	SM	SP

Note: γ_d Value was obtained from the compaction test, ASTM (2012) D698-12e2

실험에 사용한 폼에 대한 정보는 Table 2와 같다. 폼은 전단면 기계굴착터널에서 전반적 지층에 사용되는 제품을 사용하였으며, 특수 생분해성 계면활성제가 주원료이다. 두 시료 모두 같은 농축계수, 폼 팽창비, 폼 주입비를 사용하였다.

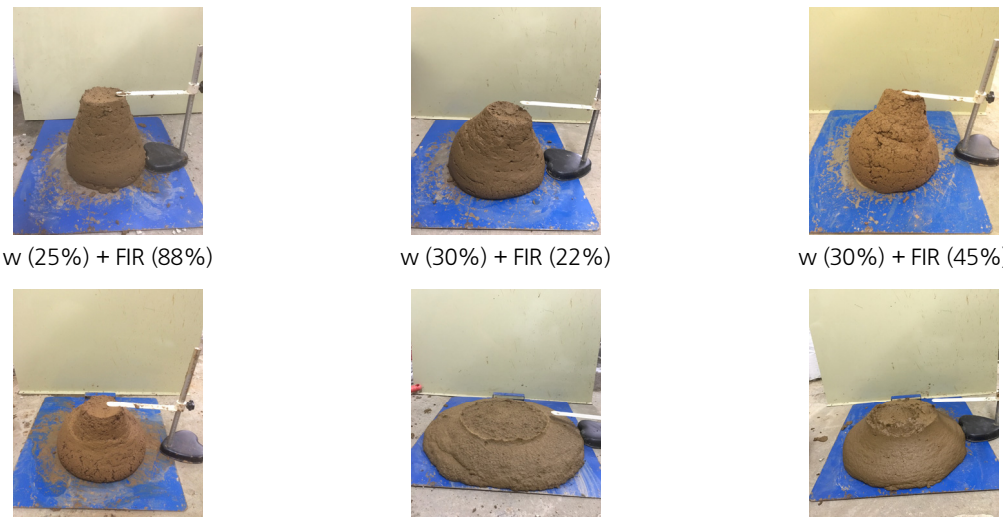
Table 2. Properties of the foam used in the experiment (Kim et al., 2018)

Parameter	Value
Type	MAK foam
Density	1.02~1.03
PH	8~9
C_f (%)	2
FER	10
FIR (%)	22, 45, 67, 88
Supply pressure (bar)	6

4. 실내실험 결과 분석

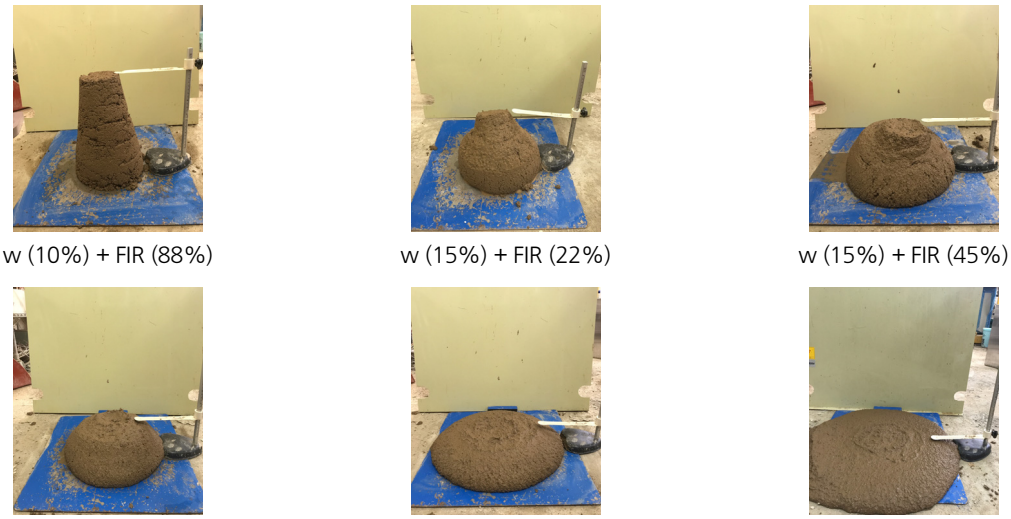
4.1 슬럼프 실험(Slump test)

Kim et al. (2018)은 터널 굴착에 적합한 화강풍화토의 배합비를 찾기 위해 함수비와 폼 주입비를 바꾸어가는 시행착오를 통해 시료와 첨가제를 배합하여 슬럼프 실험을 수행하였고, 그 결과는 Fig. 4, 5와 같다. Fig. 4는 슬럼



(a) Soil 1

Fig. 4. Soil samples with the variation of water content and FIR



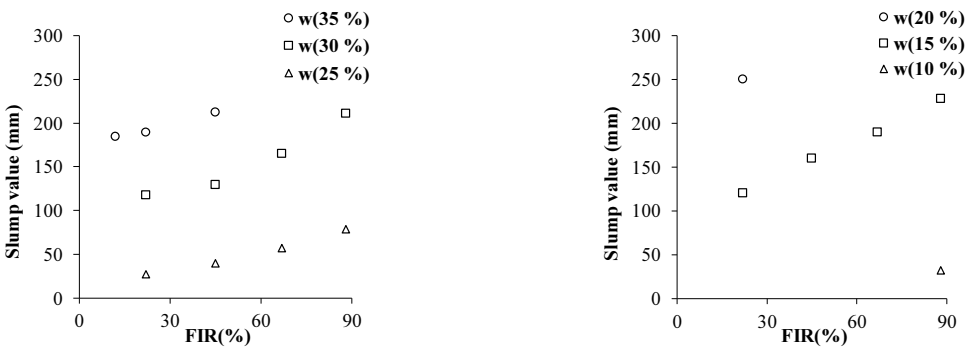
w (10%) + FIR (88%) w (15%) + FIR (22%) w (15%) + FIR (45%)

w (15%) + FIR (67%) w (15%) + FIR (88%) w (20%) + FIR (22%)

(b) Soil 2

Fig. 4. Soil samples with the variation of water content and FIR (continue)

프 실험을 실시한 시료의 양상을 보여준다. 또한 각 시료에 대하여 슬럼프 치를 정리한 것이 Fig. 5이다. Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이, 함수비 30%의 경우 폼 주입비 22%부터 88%까지 주입한 결과, 88%만을 제외하고 슬럼프 값이 10~20 cm 사이가 도출된다. 즉, 화강풍화토 시료 1번의 경우 슬럼프 실험을 통해서 함수비 30% 일 때, 폼을 22~67% 정도 주입하면 충분한 워커빌리티를 확보하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)를 보면 화강풍화토 시료 2번의 경우는 함수비 15%일 때, 폼을 22~67% 정도 주입하면 충분한 워커빌리티를 확보한다(Kim et al., 2018). 본 연구에서는 터널 굴착에 적합하도록 충분한 워커빌리티를 확보하는 배합비에 대해 낙하 콘 시험을 수행하였고, 슬럼프 값과 콘 관입깊이 간의 상관관계를 확인하고자 하였다.



(a) Soil 1 (b) Soil 2

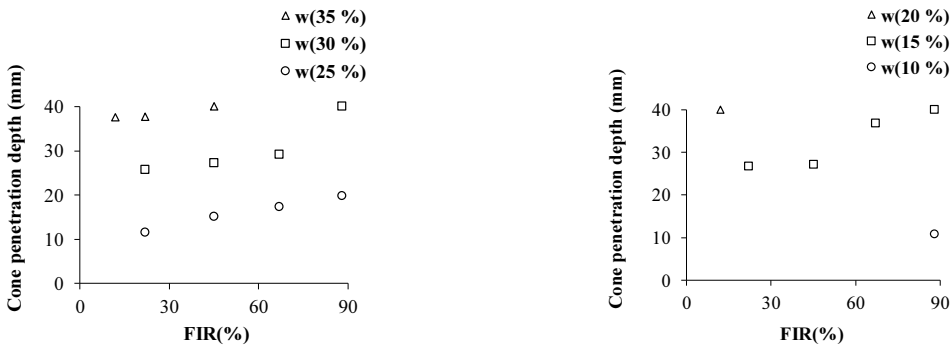
Fig. 5. Slump values with the variation of water content and FIR

4.2 낙하 콘 시험(Fall cone test) 및 상관관계 도출

함수비 및 폼 주입량에 따라 수행한 슬럼프 시험과 동시에 수행한 낙하 콘 시험의 관입깊이 결과는 Table 3과 같다. Fig. 6은 콘 관입깊이를 배합비에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 함수비 및 폼 주입량이 증가함에 따라 콘 관입깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 슬럼프 시험과 비슷한 경향임을 알 수 있다.

Table 3. Slump values and cone penetration depths of conditioned soils

Soil	FER	FIR (%)	w (%)	Slump value (mm)	Cone penetration depth (mm)	Estimated values using correlation Equation (6)
Weathered granite soil 1	10	22	25	27	11.6	27
	10	45	25	40	15.17	51
	10	67	25	57	17.3	65
	10	88	25	79	19.8	82
	10	22	30	118	26.7	129
	10	45	30	130	26.9	131
	10	67	30	165	27.6	135
	10	88	30	211	40	220
	10	12	35	185	37.6	203
	10	22	35	190	37.7	204
	10	45	35	213	40	220
Weathered granite soil 2	10	88	10	32	10.9	22
	10	22	15	120	26.7	129
	10	45	15	160	27.2	133
	10	67	15	190	36.8	198
	10	88	15	228	40	220
	10	12	20	250	40	220



(a) Soil 1 (b) Soil 2

Fig. 6. Cone penetration depth with the variation of water content and FIR

본 연구에서는 실내실험 혹은 현장에서 간단한 낙하 콘 관입시험을 통해 슬럼프 시험 없이 슬럼프 값을 예측하는 것이 목적인 바, Table 3에서 구해진 슬럼프 값과 콘 관입 깊이와의 관계를 Fig. 7로 표시하였다. Fig. 7을 보면 슬럼프 값과 낙하 콘 관입깊이 간에는 결정계수 0.96으로 강한 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (6)의 관계식을 통해 낙하 콘 관입깊이로 슬럼프 값을 추정할 수 있다. 식 (6)의 상관관계식을 통해 추정한 슬럼프 값은 Table 3과 같다.

$$\text{Slump Value (cm)} = 6.80 \times \text{Cone Penetration Depth} - 52.24 \text{ (mm)} \quad (6)$$

앞서 언급한대로 배합토의 슬럼프 값이 10~20 cm이면 충분한 워커빌리티가 확보된다는 기준에 근거하면, 콘 관입깊이의 경우 22.4~37.1 mm 사이의 값임을 알 수 있다. 즉, 해당 콘 관입깊이 범위 내에서 배합토가 충분한 워커빌리티를 확보한다는 의미이다. 그리고 Table 3의 결과에서 알 수 있듯이, 슬럼프 값이 20 cm를 넘어가는 경우 콘 관입깊이는 시료컵의 최대 길이인 40 mm이다. 즉, 제안한 시험법에 의해 낙하 콘 시험을 수행하였을 때, 콘이 시료컵의 바닥부에 닿는다면 배합토가 매우 유동적인 상태라는 것을 의미한다. 그리고 슬럼프 시험 시 대략 10 kg 정도의 많은 양의 시료가 필요하지만 낙하 콘 시험은 대략 400 g의 작은 양의 배합토로 시험이 가능한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 슬럼프 값과 콘 관입깊이는 강한 상관관계를 가지는 것을 확인하였고, 배합토가 충분한 워커빌리티를 확보하는지를 평가할 때, 간편한 낙하 콘 시험법이 슬럼프 시험을 대체할 수 있다고 판단된다.

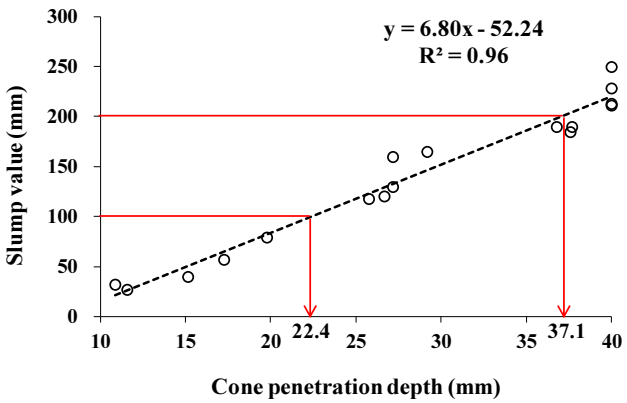


Fig. 7. Slump value and cone penetration depth correlation

5. 결 론

본 연구에서는 여러 연구자들에 의해 제안된 10~20 cm 슬럼프 기준에 근거하여, 충분한 워커빌리티를 확보하는 국내 화강풍화토의 최적 배합비에 대해 낙하 콘 시험을 수행하여, 슬럼프 시험과 낙하 콘 시험 간의 높은 상관성을 확인하였다. 여기서 검토된 결론은 다음과 같다.

1. 슬럼프 값과 낙하 콘 관입깊이는 결정계수 0.96으로 강한 상관관계를 가지며, ‘Slump Value (cm) = 6.80 × Cone Penetration Depth - 52.24 (mm)’의 관계식을 통해 낙하 콘 관입깊이로 슬럼프 값을 추정할 수 있다.
2. 충분한 워커빌리티가 확보되는 10~20 cm의 슬럼프 기준에 대응하는 콘 관입깊이의 범위는 22.4~37.1 mm 정도임을 확인하였다.
3. 낙하 콘이 시료컵의 바닥부에 닿을 경우 배합토는 매우 유동적인 상태로, 슬럼프 치는 20 cm를 넘음을 알 수 있어서 소요 함수비 추정에 쉽게 응용될 수 있다.
4. 슬럼프 값과 콘 관입깊이 사이의 상관관계를 입증한 바, 실내실험 혹은 현장에서 배합토의 워커빌리티를 평가할 때, 상대적으로 간편한 낙하 콘 시험법이 슬럼프 시험을 대체할 수 있는 시험법임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(18SCIP-B066321-06)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. ASTM (2012). Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,000 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)), D698-12e2, West Conshohocken, PA, ASTM International.
2. ASTM (2015). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, C143/C143M-15a, West Conshohocken, PA, ASTM International.
3. British Standard Institution (1990). BS 1377-2: Soils for civil engineering purposes - part 2: classification, London.
4. Budach, C. (2012). Untersuchungen zum erweiterten Einsatz von Erddruckschilden in grobkörnigem Lockergestein, Ph.D. Thesis, Bochum University, North Rhine-Westphalia, Germany, pp. 101-105.
5. 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.
6. Kim, T.H., Kim, B.K., Lee, K.H., Lee, I.M. (2018). “Soil conditioning of weathered granite soil used for EPB shield TBM: a laboratory scale study”, KSCE Journal of Civil Engineering, Under Review.
7. Martinelli, D., Peila, D., Campa, E. (2015). “Feasibility study of tar sands conditioning for earth pressure balance tunnelling”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 684-690.
8. Peila, D., Oggeri, C., Borio, L. (2009). “Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling”, Environmental and Engineering Geoscience, Vol. 15, No. 3, pp. 167-174.
9. Peila, D., Picchio, A., Chieregato, A. (2013). “Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 35, pp. 55-66.
10. Pena Duarte, M.A. (2007). Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of

conditioned sands. Ph.D. Thesis, Oxford University, Oxfordshire County Oxford, England, United Kingdom, pp. 68-71.

11. Quebaud, S., Sibaï, 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.