

제주도 현무암의 Hoek-Brown 계수 m_i 의 추정

Estimation of Hoek-Brown Constant m_i for the Basaltic Intact Rocks in Jeju Island

양 순 보¹ Yang, Soon-Bo

Abstract

In this study, Hoek-Brown constants (m_i) were calculated through nonlinear regression analyses using the results of the triaxial compression tests for the basaltic intact rocks in Jeju Island. The relationships of the m_i with the uniaxial compressive strength (UCS), Brazilian tensile strength (BTS) and UCS/BTS of the Jeju basalts were investigated, respectively. In addition, a method that can be used in determining Hoek-Brown failure envelopes including the tensile and compressive failures of the Jeju basalts has been proposed. As results, the m_i values had no clear correlations with the UCS, BTS and UCS/BTS of the Jeju basalts, but there were two strong correlations between UCS and m_i /UCS, and between BTS and m_i /BTS of the Jeju basalts. In addition, it was found that the tensile strengths calculated by the Hoek-Brown failure criterion underestimate the tensile strengths of the Jeju basalts through the relationship between the m_i and UCS/BTS of the Jeju basalts. The method presented in this study is considered to be useful in determining the Hoek-Brown failure envelope for the tensile and compressive failures of the Jeju basalts.

요 지

본 연구에서는, 제주도 현무암 암석의 삼축압축시험 결과에 대한 비선형 회귀분석을 통하여 Hoek-Brown 계수(m_i)를 계산하였다. 그리고 제주도 현무암 암석의 일축압축강도(UCS), 압열인장강도(BTS) 및 압열인장강도에 대한 일축압축강도의 비(UCS/BTS)와 m_i 의 관계를 각각 살펴보았으며, 제주도 현무암의 Hoek-Brown 파괴 포락선을 결정하는데 있어서, 인장 및 압축파괴영역에서 이용할 수 있는 방법을 제안하였다. 그 결과, 제주도 현무암 암석의 UCS 및 BTS와 m_i 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없었으며, UCS와 m_i /UCS 및 BTS와 m_i /BTS 사이에는 멱함수와 지수함수의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 제주도 현무암의 UCS/BTS와 m_i 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없었으며, Hoek-Brown 파괴기준에 의해 계산되는 인장강도는 제주도 현무암의 인장강도를 과소평가하고 있다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시한 방법은, 제주도 현무암의 인장 및 압축파괴영역에 대한 Hoek-Brown 파괴 포락선을 결정하는데 있어서 유용하게 이용할 수 있을 것이라 사료된다.

Keywords : Jeju Island, Basalts, Hoek-Brown failure criterion, Hoek-Brown's constant m_i , Tension cut-off

¹ 정회원, 일본 국립연구개발법인 해상·항만·항공기술연구소 항만항공기술연구소 연구관 (Member, Researcher, Port and Airport Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Japan, Tel: +81-46-844-5054, Fax: +81-46-844-4577, yan-s2@p.mpat.go.jp, beeo17@hotmail.com, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

제주도는 약 200만 년 전부터 역사시대까지 발생한 여러 차례의 화산활동에 의해 형성된 섬으로(Yoon and Ko, 2011), 제주도의 지반은 얇은 토사층 아래 용암류 암반과 화산쇄설층 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상 구조로 이루어져 있으며, 지역마다 다양한 지질특성을 보이고 있다. 특히 제주도의 암반은, 육지부에 존재하는 심성암 또는 퇴적암과 달리, 용암 속에 존재하던 휘발성분이 미쳐 빠져나가지 못하고 굳으면서 형성된 기공(Vesicle)이 불규칙적으로 발달한 다공성 구조를 갖고 있는 것이 특징이라고 할 수 있다. 그리고 제주도에서는 이전부터 대규모 토목공사 및 지하수 개발에 있어서 수많은 시행착오를 경험하고 있으며(Kim, 2007), 최근에는 육·해상 풍력발전단지의 건설 및 공항인프라 확충을 위한 토목공사 등에 대비하여 제주도 화산암석 및 암반에 대한 공학적 관점에서의 물리·역학적 특성 및 설계에 반영할 지반강도정수에 대한 심도 깊은 연구가 요구되고 있는 실정이다. 이러한 요구에 부응하여, 제주도 화산암에 대한 물리적 및 역학적 특성과 관련하여 제주도의 여러 지역에서 채취된 암석에 대하여 연구가 이루어져 왔다(Kim and Choi, 1991; Eum, 2002; Kim, 2007; Nam et al., 2008a, 2008b, 2009; Cho et al., 2009; Moon et al., 2014; Yang, 2014, 2015a, 2015b, 2016; Yang and Sassa, 2016, 2017; Yang and Boo, 2019; Moon and Yang, 2020; Park and Moon, 2020).

Hoek-Brown 파괴기준은 Mohr-Coulomb 파괴기준과 함께 암반역학 분야에서 자주 이용되고 있는 모델로서, 암석(intact rock)과 암반(rock mass)에 적용할 수 있는 경험적 모델이다(Hoek, 2007). 이 파괴기준에서는 다양한 암석에 대한 Hoek-Brown 계수(m_i) 및 지질강도지수(Geological Strength Index, GSI)를 이용하여 암반의 강도정수를 추정하기 위한 관계식이 제시되어 있으며, 암석에 대한 실내시험이 불가능 할 경우 이 파괴기준에서 제시되어 있는 다양한 도표를 이용하여 예비설계(preliminary design)를 수행할 수 있는 이점이 있다. 그리고 최근에는 인장파괴영역에 대해서도 적용할 수 있도록 Hoek-Brown 파괴기준은 꾸준히 개선되어 오고 있다(Hoek and Brown, 2019).

암석(무결암)의 Hoek-Brown 계수(m_i)는 암석의 일축 압축시험, 삼축압축시험 등 실내 시험을 통하여 산정할 수 있으며, 특히, 삼축압축시험의 경우, 일축압축시험에

비해 시간 및 비용이 들기 때문에 프로젝트에 따라 시험의 수행이 어려운 경우가 있다. 이와 관련하여, 암석에 대한 삼축압축시험을 수행하지 못할 경우, 암석의 일축 압축강도(Uniaxial compressive strength, UCS), 인장강도(Tensile strength, TS) 또는 인장강도에 대한 일축압축강도의 비(UCS/TS) 등을 이용하여 m_i 를 추정하기 위한 다양한 연구가 수행되어 오고 있다(Hoek and Brown, 1980; Cai, 2010; Hoek and Martin, 2014; Shen and Karakus, 2014; Vásárhelyi et al., 2016; Wang and Shen, 2017; Hoek and Brown, 2019). 그러나 현무암에 대한 m_i 의 추정과 관련된 연구는 전무한 상태이며, Hoek-Brown 파괴기준에서 제시된 다양한 암석에 대한 m_i 의 경우, 특히 현무암과 관련하여 추정된 값만이 제시되어 있다(Hoek, 2007).

한편, 제주도 현무암 암석에 대하여 Hoek-Brown 파괴기준을 적용한 연구는, Kim(2007), Nam et al.(2009), Yang(2016)의 연구가 있지만, m_i 의 추정에 있어서 잘못된 구속응력범위의 적용, 데이터의 수가 충분하지 않은 암석에 대한 m_i 의 추정 등 m_i 의 추정에 있어서 적절하지 않은 측면이 있었다.

따라서 본 연구에서는 제주도 북동부 육·해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취된 현무암 암석에 대한 삼축압축시험 결과(Yang, 2015b, 2016), Kim(2007)의 삼축압축시험 결과 및 제주도 남부 G 항(port)의 지반조사 과정에서 채취된 현무암 암석에 대한 삼축압축시험 결과(Moon and Yang, 2020)에 대하여, 비선형 회귀분석을 이용하여 제주도 현무암 암석에 대한 m_i 값을 새롭게 계산하였다. 그리고 제주도 현무암 암석의 일축압축강도, 압열인장강도 및 압열인장강도에 대한 일축압축강도의 비와 m_i 의 관계를 각각 살펴보고, 제주도 현무암의 Hoek-Brown 파괴 포락선을 결정하는데 있어서, 인장 및 압축파괴영역에서 이용할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. Hoek-Brown 파괴기준

Hoek-Brown 파괴기준은 Hoek and Brown(1980)에 의해 처음 발표된 이후 현재까지 지속적으로 수정되어 오고 있으며, 암석뿐만 아니라 암반에도 적용할 수 있는 경험적 모델이다(Hoek, 2007). 그리고 암석에 대한 Hoek-Brown 파괴기준은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, σ_1 와 σ_3 는 각각 파괴시의 최대주응력, 최소주응력을 의미한다. σ_c 는 암석의 일축압축강도(UCS)를 의미하며, 실내시험을 통하여 얻을 수 있다. 그러나 실내 시험을 수행하지 못할 경우, Hoek(2007)이 제시하고 있는 도표를 이용하여 그 값을 추정할 수 있다. 그러나 Hoek(2007)에서 제시된 현무암의 UCS는 100MPa 이상으로, 이는 ISRM(1981)의 UCS에 따른 암석의 분류에 따르면 경암에서 극경암에 해당하는 강도이다. 한편, 제주도 현무암 암석은 암석의 공극 상태에 따라 연암에서 극경암까지 다양하게 분포하고 있다(Yang, 2014, 2015a). m_i 는 암석에 대한 Hoek-Brown 계수를 의미하며, 암석의 삼축압축시험 결과를 이용하여, $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2 = m_i(\sigma_3/\sigma_c) + 1$ 의 관계 또는 식 (1)을 이용한 비선형 회귀 분석을 통하여 구할 수 있다. 그러나 실내시험을 수행할 수 없을 경우, Hoek(2007)이 제시하고 있는 도표를 이용하여 다양한 암석에 대한 m_i 값을 얻을 수 있다. 참고로, Hoek(2007)이 제시하고 있는 현무암에 대한 m_i 값은 (25 ± 5) 이며, 괄호는 추정된 값을 의미한다.

Hoek and Martin(2014)와 Hoek and Brown(2019)에 의하면, 인장파괴영역 ($\sigma_3 < 0$)에 있어서 식 (1)에 의해 추정되는 인장강도는 실제의 인장강도 값에 비해 과대하게 평가되고 있다고 보고하고 있으며, 이에 대하여 인장파괴영역에서도 적용할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 그 하나의 방법으로서, 시험결과로부터 얻어진 직접 인장강도(Direct tensile strength, DTS)에 대한 UCS의 비와 m_i 사이의 선형관계를 이용하여 인장 컷오프(tension cut-off)를 결정할 것을 제안하고 있다.

한편, 제주도 현무암의 인장강도를 다룬 기존의 연구와 관련하여, 직접인장시험(Direct tensile test)을 수행한 연구는 없었으며, 간접인장시험(Indirect tensile test)의 하나인 암석 시험편의 성형 및 시험의 수행과정이 간단한 압열인장시험(Brazilian tensile test)을 중심으로 이루어져 왔다(Moon and Yang, 2020). 이러한 점을 고려하여, 본 연구에서는 압열인장시험 조건에서 식 (1)에 의해 추정되는 m_i 의 특성을 살펴보기 위해, 식 (2)에 나타난 압열인장시험의 등방성 암석 시험편의 중심에 작용하는 최소주응력 σ_3 와 최대주응력 σ_1 (Jaeger et al., 2007)을 식 (1)에 적용하였으며, 그 결과 식 (3)과 같이 m_i 는 UCS와 BTS의 관계식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

$$\sigma_{3(Btt)} = -\frac{2P}{\pi Dt} = -\sigma_t, \quad \sigma_{1(Btt)} = \frac{6P}{\pi Dt} = 3\sigma_t \quad (2)$$

여기서, P 는 파괴하중, D 는 암석 시험편의 직경, t 는 암석 시험편의 길이, σ_t 는 압열인장강도(Brazilian tensile strength, BTS)를 나타낸다.

$$m_i = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} - 16 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right) \quad (3)$$

3. 제주도 현무암의 삼축압축강도를 다룬 기존의 연구

이 장에서는, 제주도 현무암 암석에 대한 삼축압축시험 결과 등을 다룬 기존의 연구를 간단히 서술하였으며, 그 결과를 표로 정리하였다. 표에는, 각 암석의 삼축압축시험 결과 중에서 $0 \leq \sigma_3/\sigma_c < 0.5$ 인 압축파괴영역에 적어도 4개의 결과를 포함하는 암석을 대상으로, 식 (1)을 이용한 비선형 회귀분석을 통하여 계산된 Hoek-Brown 계수(m_i) 및 (σ_3/σ_c) 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 통하여 얻어진 m_i 를 각각 나타내었다. 그리고 이와 함께 각각의 암석에 대한 UCS, BTS 및 UCS/BTS를 정리하였다. 또한, 본 연구에서는, 기존에 발표된 연구결과를 종합적으로 비교 분석하기 위하여, 아래에 기술한 방법에 따라 암석 시험편의 직경 또는 형상의 영향을 고려하여 UCS와 BTS를 각각 교정하였다.

UCS와 관련하여, Hoek(2007)은 암석 시험편의 직경(D)에 대한 영향을 교정하기 위하여 식 (4)를 제안하고 있다. 한편, BTS는 암석 시험편의 직경(D)에 대한 영향 보다는 암석 시험편의 형상(t/D ; t : 암석 공시체의 두께, D : 암석 공시체의 직경)의 영향을 크게 받으며(Thuro et al., 2001), Yu et al.(2006)는 암석 시험편의 형상(t/D)의 영향을 고려한 BTS의 교정식을 식 (5)와 같이 제시하고 있다. Table 1, 2 및 3에 각각 나타낸 σ_{c50} 는 식 (4)를 고려한 직경(D)이 50mm인 암석 시험편에 대한 UCS 값이며, σ'_t 는 식 (5)에 의해 교정된 BTS 값을 나타내고 있다.

$$\sigma_{c50} = \frac{\sigma_c}{(50/D)^{0.18}} \quad (4)$$

여기서, σ_{c50} 은 암석 시험편의 직경이 50mm인 암석에

대한 일축압축강도, σ_c 는 측정된 일축압축강도를 나타낸다.

$$\sigma_t' = (0.262(t/D) + 1)\sigma_t \quad (5)$$

여기서, σ_t' 는 암석 시험편 형상의 영향을 고려한 압열인장강도, σ_t 는 측정된 압열인장강도를 나타낸다.

Kim(2007)은 서귀포시 성산읍 삼달리 일대에서의 시추를 통하여 채취된 각각의 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 암석 시험편(D : 43mm, H : 86mm)을 제작하여, 다양한 물성시험 및 강도시험을 수행하였으며, 각각의 암석에 대한 대표적인 물성 값과 강도 값을 보고하였다. 본 연구에서는, 삼축압축시험 결과 중에서 $0 \leq \sigma_3/\sigma_c < 0.5$ 인 범위 안에 드는 자료의 수가 적은 스크리아를 제외한 표선리 현무암과 조면암질 현무암에 대한 다양한 강도시험의 결과를 Table 1에 정리하였다.

제주 광역경제권 R&D사업의 제주 해역 특성에 적합한 해상풍력발전기의 설치를 위한 기반설계기술 개발의 일환으로, 2012년에서 2014년까지 약 3년간에 걸쳐 제주도 북동부 육·해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 시추가 이루어졌으며, 채취된 암석에 대하여 KS 및 ASTM 시험규정에 입각한 다양한 물성시험 및 강도시험이 수행되었다(Yang, 2014, 2015a, 2015b, 2016; Yang and Sassa, 2016, 2017; Yang and Boo, 2019; Park and Moon, 2020). 제주도 북동부 육·해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취한 현무암 암석의 다양한 강도시

험 결과를 Table 2에 각각 정리하였다.

또한 제주도 남부 G 항(port) 지반조사 보고서의 제주도 현무암에 대한 KS 및 ASTM 시험규정에 입각한 다양한 강도시험 결과(Moon and Yang, 2020)를 Table 3에 정리하였다.

4. 제주도 현무암의 Hoek-Brown 계수

4.1 Hoek-Brown 계수의 산정방법에 따른 결과 비교

Hoek-Brown 계수(m_i)의 산정방법에 따른 제주도 현무암 암석의 m_i 값의 차이를 살펴보기 위하여, 식 (1)을 이용한 비선형 회귀분석을 통하여 계산된 m_i 와 (σ_3/σ_c) 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 통하여 얻어진 m_i 의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 전체적으로 비선형 회귀분석을 통하여 얻어진 m_i 값이 (σ_3/σ_c) 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 통하여 얻어진 m_i 값에 비해 작게 추정되고 있었다(Tables 1, 2 and 3). 구체적으로, m_i 값이 20 미만에서는 두 산정방법에 의해 각각 얻어진 m_i 값의 차이는 미미하였지만, m_i 값이 20 이상인 경우 산정방법에 따른 m_i 값의 차이가 현저히 증가하였으며, 특히, Kim(2007)의 결과가 큰 차이를 보이고 있었다(Fig. 1). 그리고 m_i 의 산정방법에 따른 결정계수(R^2) 차이를 살펴보면, Kim(2007)의 결과를 제외하면 비선형 회귀분석이 결정계수가 높은 m_i 값을 추정하고 있음을 알 수 있었다(Tables 1, 2 and 3). Kim(2007)의 결과가 특히 큰 차이를 보이는 요인의 하나로써, 일축압축강도에 비해 구속압력(5MPa)

Table 1. Summary of the mechanical characteristics for Pyoseonri basalt and Trachy-basalt (Kim, 2007)

	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	m_i (R^2)	$Y = m_i X + 1$ (R^2)	σ_{c50} (MPa)	σ_t (MPa)	σ_t' (MPa)	σ_{c50}/σ_t'
Pyoseonri basalt	0	41.19	21.050 (0.826)	$Y = 25.937X + 1$ (0.858)	40.19	3.32	5.07	7.91
	5	42.53						
	10	101.72						
	20	182.65						
Trachy -basalt	0	183.08	35.499 (0.837)	$Y = 39.274X + 1$ (0.892)	178.17	10.33	15.74	11.32
	5	173.64						
	10	331.10						
	20	454.44						

σ_3 : Minimum principal stress, σ_1 : Maximum principal stress, m_i : Hoek-Brown constant, which was calculated from nonlinear regression analysis over a confining stress σ_3 range from 0 to $0.5\sigma_c$.

$Y = ((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$, $X = \frac{\sigma_3}{\sigma_c}$, $Y = m_i X + 1$: Results in a range of $0 \leq \sigma_3 < 0.5\sigma_c$

σ_t : Brazilian tensile strength measured by Brazilian tensile test, σ_{c50} : Uniaxial compressive strength corrected by Eq. (4), σ_t' : Brazilian tensile strength corrected by Eq. (5).

Table 2. Summary of the mechanical characteristics for basalts sampled in northeastern, southeastern and northwestern Jeju Island (Yang, 2015b, 2016)

	Borehole No.	Depth (m)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	m_i (R^2)	$Y = m_i X + 1$ (R^2)	σ_{c50} (MPa)	σ_t (MPa)	σ_t' (MPa)	σ_{c50}/σ_t'
Northeast (JB: onshore, BH: offshore)	JB-1	4.0 ~ 4.5	0.0	51.85	20.375 (0.933)	$Y = 22.015X + 1$ (0.907)	52.25	3.05	3.44	15.19
			5.0	78.12						
			10.0	118.42						
			15.0	164.64						
	BH-1	12.2 ~ 12.6	0.0	132.13	22.659 (0.926)	$Y = 23.9X + 1$ (0.921)	132.32			
			5.0	157.76						
			10.0	224.33						
			15.0	279.95						
	BH-8	8.8 ~ 9.5	0.0	52.68	28.657 (0.956)	$Y = 30.522X + 1$ (0.933)	52.72	3.10	3.51	15.02
			5.0	92.20						
			10.0	138.08						
			15.0	188.02						
BH-9	9.5 ~ 10.0	0.0	40.53	28.003 (0.953)	$Y = 30.057X + 1$ (0.928)	40.54	3.43	3.86	10.50	
		5.0	76.29							
		10.0	117.57							
		15.0	164.34							
Southeastern offshore	BH-1	4.6 ~ 5.0	0.0	244.3	16.419 (0.997)	$Y = 16.489X + 1$ (0.997)	250.00	16.65	17.99	13.90
			5.0	283.1						
			10.0	326.1						
			15.0	362.8						
	BH-3	3.6 ~ 4.0	0.0	68.0	9.008 (0.995)	$Y = 9.116X + 1$ (0.991)	68.18	6.81	7.82	8.72
			5.0	90.2						
			10.0	112.5						
			15.0	134.6						
	BH-5	9.3 ~ 9.7	0.0	114.8	18.546 (0.993)	$Y = 18.796X + 1$ (0.991)	114.98	7.66	9.04	12.72
			5.0	152.6						
			10.0	195.3						
			15.0	230.7						
BH-7	9.0 ~ 9.4	0.0	79.9	13.802 (0.993)	$Y = 14.014X + 1$ (0.984)	80.16	4.73	5.52	14.52	
		5.0	109.5							
		10.0	140.8							
		15.0	169.5							
BH-10	9.6 ~ 9.9	0.0	117.8	12.582 (0.996)	$Y = 12.695X + 1$ (0.994)	117.84	7.28	8.46	13.93	
		5.0	147.5							
		10.0	178.2							
		15.0	207.4							
Northwestern offshore	HBH-1	4.7 ~ 5.0	0.0	73.5	16.693 (0.990)	$Y = 17.038X + 1$ (0.985)	73.45			
			5.0	106.7						
			10.0	140.9						
			15.0	173.6						
	HBH-3	8.4 ~ 8.9	0.0	67.9	16.087 (0.989)	$Y = 16.447X + 1$ (0.982)	67.95	5.18	5.89	11.54
			5.0	100.2						
			10.0	131.9						
			15.0	164.5						
	HBH-5	5.3 ~ 5.7	0.0	94.9	19.157 (0.990)	$Y = 19.521X + 1$ (0.986)	94.79	6.07	6.91	13.72
			5.0	133.5						
			10.0	171.9						
			15.0	210.6						

Uniaxial compressive strengths (σ_c) for intact rocks in Southeastern and Northwestern offshore were estimated by Mohr–Coulomb failure criterion in terms of principal stresses, namely $\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3$.

Diameter of the intact rock specimens used in the uniaxial and triaxial compressive tests and Brazilian tensile tests (Avg.±SD): 50.35±0.65 (Northeast), 50.56±0.26 (Southeastern offshore), 49.73±0.86 (Northwestern offshore).

The ratio of D/H of the intact rock specimens used in the uniaxial and triaxial compressive tests (Avg.±SD): 0.49±0.01 (Northeast), 0.46±0.03 (Southeastern offshore), 0.48±0.03 (Northwestern offshore).

The ratio of t/D of the intact rock specimens used in Brazilian tensile tests (Avg.±SD): 0.49±0.02 (Northeast), 0.62±0.05 (Southeastern offshore), 0.52±0.02 (Northwestern offshore).

Table 3. Summary of the mechanical characteristics for the basaltic intact rock specimens sampled at G port in Jeju Island (Moon and Yang, 2020)

Borehole No.	Depth (m)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	m_i (R^2)	$Y = m_i X + 1$ (R^2)	σ_{c50} (MPa)	σ_t (MPa)	σ_t' (MPa)	σ_{c50}/σ_t'
NB-8	11	0	128.58	16.335 (0.986)	$Y=16.639X+1$ (0.980)	129.49	12.71	14.35	9.02
		5	162.12						
		10	200.51						
		15	239.86						
NH-11	10	0	78.31	14.560 (0.990)	$Y=14.84X+1$ (0.984)	78.86	7.65	8.65	9.12
		5	109.24						
		10	139.57						
		15	171.74						

Diameter of the intact rock specimens used in the uniaxial and triaxial compressive tests and Brazilian tensile tests: 52mm, the ratio of D/H of the intact rock specimens used in the uniaxial and triaxial compressive tests (Avg.±SD): 0.514 ± 0.003 and the ratio of t/D of the intact rock specimens used in Brazilian tensile tests (Avg.±SD): 0.496 ± 0.005 .

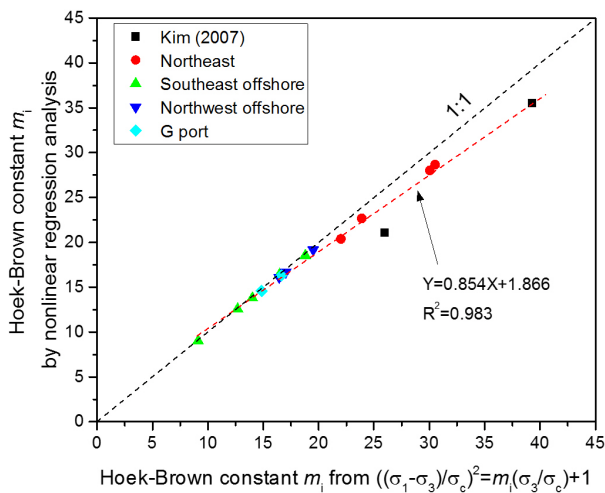


Fig. 1. Comparison between the Hoek-Brown constants calculated by two different methods

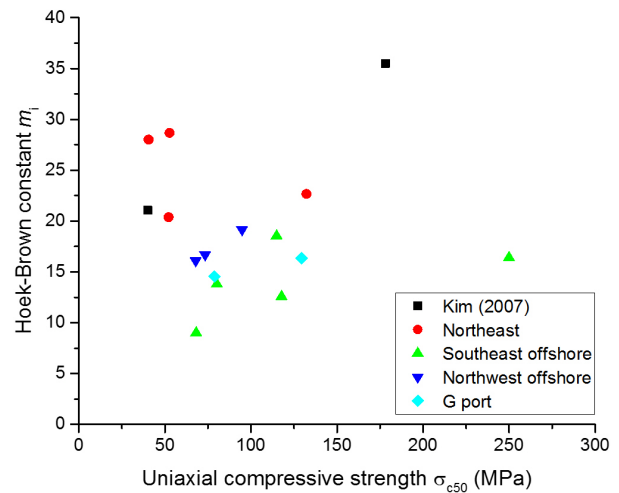


Fig. 2. Relationship between uniaxial compressive strength (UCS) and Hoek-Brown constant (m_i)

에 대한 최대응력의 증가가 명확하게 나타나고 있지 않은 데에서 기인한다고 사료된다. 본 연구에서는 전체적으로 m_i 값을 안전 측으로 추정하고 있는 비선형 회귀분석을 통하여 얻어진 m_i 값을 중심으로 분석하고자 한다.

4.2 일축압축강도(UCS)와 Hoek-Brown 계수의 관계

Table 1~3에 나타난 제주도 현무암의 일축압축강도(UCS)와 Hoek-Brown 계수(m_i)의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 전체적으로, 제주도 현무암의 UCS와 m_i 사이에는 뚜렷한 상관관계를 확인할 수 없었다. 본 연구에서 대상으로 한 제주도 현무암은, UCS에 따른 암석의 분류(ISRM, 1981)에 의하면 보통암에서 극경암에 해당하였으며, m_i 값은 약 9 ~ 36 사이에 분포하고 있었다. 그리

고 Hoek(2007)가 제시한 현무암의 m_i 값 (25 ± 5)에 비해 약 5 정도 작은 19.34 ± 6.73 (Avg.±SD)인 값을 보이고 있었다.

Fig. 3에 제주도 현무암의 UCS와 m_i/UCS 의 관계를 나타내었다. 그리고 이와 함께 암석의 삼축압축시험 결과의 부재 시, 암석의 m_i 를 추정하기 위해 Shen and Karakus(2014)에 의해 제안된 UCS를 기반으로 한 방법, 즉, UCS와 m_i/UCS 사이의 멱함수 관계를 나타내었다. 한편, Shen and Karakus(2014)은 다양한 암석의 UCS와 m_i/UCS 사이의 멱함수 관계($m_i/UCS = AUCS^B$)를 나타내고 있지만, 현무암에 대한 상관관계는 제시하고 있지 않다. Fig. 3의 결과를 통하여, 제주도 현무암 또한 UCS와 m_i/UCS 사이에는 멱함수의 상관관계가 있음을 확인할 수 있었으며, 멱함수의 상관관계 이외에 지수함수의 상관관계 또한 존재하고 있음을 알 수 있었다. 이는 경암

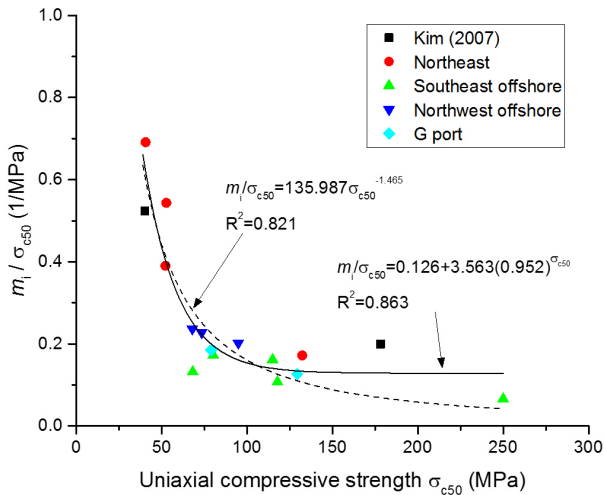


Fig. 3. Relationship between uniaxial compressive strength (UCS) and m_i/UCS

에서 극경암에 해당하는 UCS가 약 150MPa 이상인 현무암 암석에 대한 삼축압축시험 자료의 부족으로 인한 것이며, 추후 이에 대한 결과를 추가함으로써, UCS를 이용하여 정도가 높은 m_i 값의 추정이 가능하다고 사료된다.

4.3 압열인장강도(BTS)와 Hoek-Brown 계수의 관계

제주도 현무암의 압열인장강도(BTS)와 Hoek-Brown 계수(m_i)의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 전체적으로 Fig. 2의 결과와 같이 제주도 현무암의 BTS와 m_i 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없었다. 한편, Wang and Shen(2017)에 의하면, 인장강도와 m_i 사이에는 멱함수의 상관관계가 있음을 보고하고 있지만, 인장강도와 관련하여 어떤

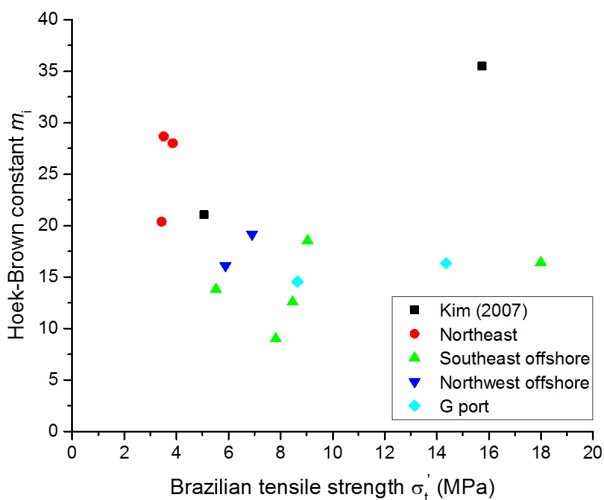


Fig. 4. Relationship between Brazilian tensile strength (BTS) and Hoek-Brown constant (m_i)

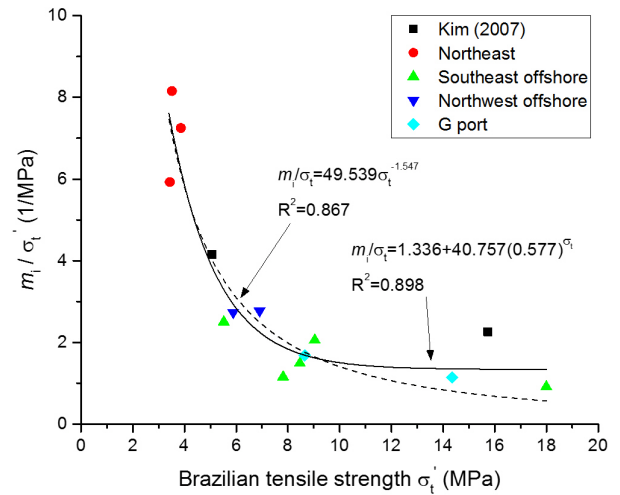


Fig. 5. Relationship between Brazilian tensile strength (BTS) and m_i/BTS

한 인장강도를 사용하였는지 특정하고 있지 않다.

Fig. 5에 BTS와 m_i/BTS 의 관계를 나타내었다. BTS와 m_i/BTS 사이에는 Fig. 3의 결과와 같이 멱함수와 지수함수의 상관관계가 있었으며, BTS를 이용하여 제주도 현무암 암석의 m_i 값을 추정할 수 있을 것이라 사료된다. 그리고 BTS가 10MPa 이상인 현무암 암석에 대한 시험을 추가함으로써, BTS를 이용한 정도가 높은 m_i 값의 추정이 가능하다고 사료된다.

4.4 UCS/BTS와 Hoek-Brown 계수의 관계

제주도 현무암의 Hoek-Brown 계수(m_i)와 압열인장강도에 대한 일축압축강도 비(UCS/BTS)의 관계를 Fig. 6에

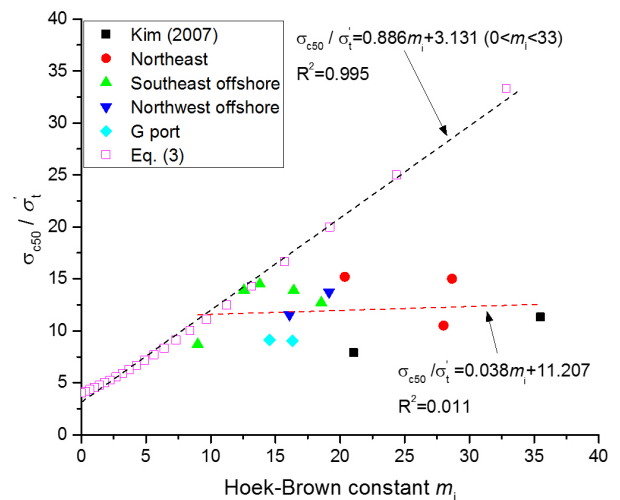


Fig. 6. Relationship between the ratio of the uniaxial compressive strength to the Brazilian tensile strength (UCS/BTS) and Hoek-Brown constant (m_i)

나타내었으며, 이와 함께 식 (3)에 나타난 m_i 와 UCS/BTS의 관계를 나타내었다. 제주도 현무암의 m_i 와 UCS/BTS 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없는 반면, 식 (3)의 m_i 와 UCS/BTS 사이에는 선형에 가까운 상관관계가 있었으며, 일차함수의 형태로 근사화시킬 수 있음을 알 수 있었다.

서론에서 서술한 바와 같이 인장강도에 대한 일축압축강도의 비(UCS/TS)를 이용하여 m_i 값을 추정하기 위해 많은 연구가 수행되어 왔지만, 제주도 현무암의 경우 UCS/BTS를 이용한 m_i 값의 추정은 곤란하다고 사료된다(Fig. 6). 암석의 인장강도를 구하기 위한 시험으로서, 압열인장시험은 널리 수행되어 오고 있지만, 방법의 타당성에 있어서 의문점이 여전히 남아 있으며(Cai, 2010), Hoek and Brown(2019)에 의하면, 압열인장강도는 적절한 인장강도라 할 수 없으며, 직접인장강도로 교정을 해야 하는 지표강도로서 간주할 수 있다고 기술하고 있다.

Fig. 6을 통하여, 제주도 현무암의 m_i 값은 식 (3)의 오른쪽에 분포하고 있음을 알 수 있으며, 이는 실내시험 결과를 통하여 추정된 m_i 값을 이용하여 식 (1)에 의해 계산되는 압열인장강도는 실제의 제주도 현무암의 압열인장강도를 과소평가하고 있다는 것을 의미한다. 이는 다시 말해서, 서론에서 기술한 Hoek and Martin(2014)와 Hoek and Brown(2019)에 의해 제안된 인장 컷오프 결정방법은 제주도 현무암에 대해서는 적용할 필요가 없다는 것을 나타낸다.

Fig. 6의 결과를 토대로, 식 (1)을 제주도 현무암의 인장파괴영역 ($\sigma_3 < 0$)에 대하여 적용할 시, 인장 컷오프를 결정하는 방법에 대해서 논하고자 한다. 제주도 현무암의 UCS를 알고 있을 경우, Fig. 3을 통하여 m_i 값을 추정할 수 있다. 그리고 이들 값을 Fig. 6에 나타난 일차함수에 적용하면, 제주도 현무암의 BTS를 추정할 수 있다. 여기서, 추정된 제주도 현무암의 m_i 값이 20을 초과할 경우 m_i 값을 20 이라고 가정하고, m_i 값이 20 이하인 경우, m_i 값을 그대로 Fig. 6의 일차함수에 적용함으로써 실내시험 결과에 가까운 BTS 값을 안전 측으로 추정할 수 있을 것이라 사료된다. 한편, Perras and Diederichs (2014)에 의하면, DTS와 BTS 사이에는 DTS=BTS인 관계로 나타낼 수 있으며, 화성암(igneous rock)의 경우 f 는 0.8이라고 보고하고 있다. 이러한 결과를 이용하여, 위에서 추정된 BTS 값을 DTS 값으로 변환할 수 있으며, 제주도 현무암에 대한 예비설계에 있어서, 인장파괴영역 ($\sigma_3 < 0$)에 대한 인장 컷오프의 결정 시 유용하게

이용될 수 있을 것이라 사료된다.

위의 인장 컷오프를 결정하는 데 있어서 m_i 값을 20을 중심으로 나누는 이유는, 제주도 현무암의 UCS/BTS는 약 5 ~ 20 사이에 분포하고 있다(Moon and Yang, 2020)는 연구 결과를 반영하여, 제주도 현무암의 UCS/BTS가 20 이하임을 전제로 하고 있으며, 이에 유의할 필요가 있다.

4.5 제주도 현무암의 Hoek-Brown 파괴 포락선

Table 1~3에 나타난 제주도 현무암의 삼축압축시험 결과, 즉, 최소주응력(σ_3)과 최대주응력(σ_1)을 일축압축강도(σ_c)에 대하여 각각 무차원화 한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그리고 이와 함께 압축파괴영역($0 \leq \sigma_3/\sigma_c < 0.5$)에 해당하는 삼축압축시험의 전체 결과에 대한 비선형 회귀분석을 통하여 추정된 Hoek-Brown 계수(m_i) 및 이를 이용하여 작성된 Hoek-Brown 파괴 포락선(실선)을 나타내었으며, Table 1~3에 나타난 m_i 값 중에서, 가장 큰 값을 보인 Trachy-basalt(Kim, 2007)과 가장 작은 값을 보인 제주도 남동부 BH-3의 m_i 값을 이용하여 작성된 Hoek-Brown 파괴 포락선(파선, 점선)을 각각 나타내었다. 또한, 4.4절에서 설명한 인장 컷오프 작성 방법을 이용하여 추정된 인장 컷오프를 함께 나타내었다. 한편, Trachy-basalt와 제주도 남동부 BH-3의 각각의 m_i 값은 큰 차이를 보이고 있었으며, 이에 대한 요인의 하나로서 제주도 현무암의 특성 중의 하나인 공극 상태의 차이로

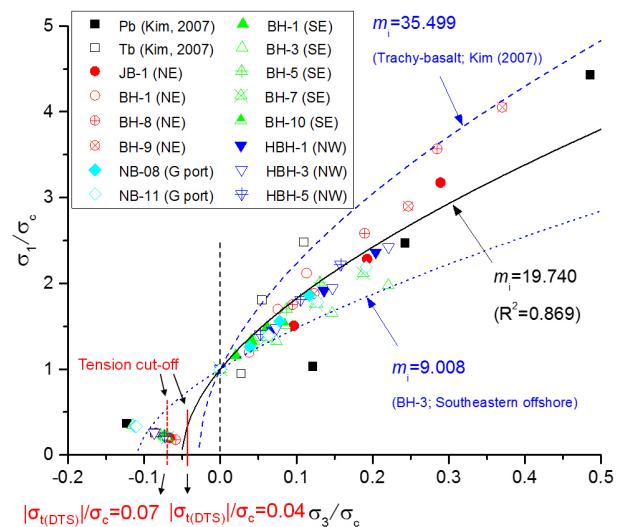


Fig. 7. Dimensionless plot of triaxial test data for basalts in Jeju Island showing the use of Fig. 6 for tensile failure and Hoek-Brown criterion for shear failure

인한 것으로 사료된다. 본 연구의 부록(Appendix) Fig. 2에 나타난 제주도 화산암의 공극 상태를 나타내는 파라미터의 하나인 흡수율(w)과 UCS의 관계에 의하면, w 가 감소함에 따라 UCS는 급격히 증가하고 있다. 이를 통하여, 삼축압축시험 결과 또한 암석의 공극 상태에 따라 구속압력에 따른 최대응력의 기울기가 달라질 것이라 사료되며, 암석의 m_i 값 또한 달라질 것이라 사료된다.

제주도 현무암의 삼축압축시험 전체 결과에 대한 비선형 회귀분석 결과를 통하여, 결정계수가 높은 m_i (=19.740) 값을 얻을 수 있었으며, 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험의 결과가 없을 경우, m_i 의 초기 값으로서 예비설계에 충분히 이용할 수 있을 것이라 사료된다. 그리고 Trachybasalt(Kim, 2007)과 제주도 남동부 BH-3의 각각의 m_i 값을 이용하여 작성된 Hoek-Brown 파괴 포락선(파선, 점선)은, Table 1~3에 나타난 삼축압축시험 결과의 상한과 하한을 적절히 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한, 4.4절에서 제시한 인장 컷오프의 작성 방법을 통하여, m_i 가 20 이상인 경우, DTS/UCS를 적어도 0.04로 설정함으로써, 인장강도를 안전 측으로 추정할 수 있을 것이라 사료된다.

Yang(2014, 2015a)가 나타난 제주도 화산암의 흡수율(w)과 겉보기 비중(G)의 관계 및 흡수율(w)과 UCS(σ_c)의 관계에 대하여, 최근의 연구결과를 포함하여 새롭게 작성된 각각의 관계를 부록 Fig. 1과 부록 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 부록 Fig. 2에 나타난 UCS는 식 (4)를 이용하여 암석 시험편의 직경이 50mm에 대한 UCS(σ_{c50})로 교정하였다.

부록 Fig. 1의 제주도 화산암의 w 과 G 의 관계 및 부록 Fig. 2(b)와 Fig. 3을 각각 이용하여, UCS와 m_i 값을 추정할 수 있으며, 제주도 현무암에 대한 예비설계에 있어서 유용하게 이용할 수 있을 것이라 사료된다. 한편, BTS를 이용하여 m_i 값을 추정할 경우, 부록 Fig. 1의 선형근사 (1)에 해당하는 제주도 현무암에 대한 w 과 BTS의 관계를 Moon and Yang(2020)이 나타내고 있으며, 이를 이용하여 m_i 값을 추정할 수 있을 것이라 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는, 제주도 현무암 암석의 일축압축강도, 압열인장강도 및 압열인장강도에 대한 일축압축강도의 비와 Hoek-Brown 계수(m_i)의 관계를 각각 살펴보았으

며, Hoek-Brown 파괴 포락선을 결정하는데 있어서, 인장 및 압축파괴영역에서 이용할 수 있는 방법을 제안하였다. 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 제주도 현무암 암석의 일축압축강도(UCS)와 Hoek-Brown 계수(m_i) 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없었으며, 제주도 현무암의 UCS와 m_i /UCS 사이에는 높은 결정계수의 멱함수와 지수함수의 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
- (2) 제주도 현무암 암석의 압열인장강도(BTS)와 Hoek-Brown 계수(m_i) 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없었으며, 제주도 현무암의 BTS와 m_i /BTS 사이에는 높은 결정계수의 멱함수와 지수함수의 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
- (3) 제주도 현무암의 UCS/BTS와 Hoek-Brown 계수(m_i) 사이에는 뚜렷한 상관관계가 없었으며, 식 (1)에 의해 계산되는 압열인장강도는 실제의 제주도 현무암의 압열인장강도를 과소평가하고 있다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 제주도 현무암에 대한 예비설계에 있어서, 본 연구에서 제시한 방법은 인장 및 압축파괴영역에 대한 Hoek-Brown 파괴 포락선을 결정하는데 있어서 유용하게 이용될 수 있을 것이라 생각하며, 제주도 현무암 암석의 정도가 높은 Hoek-Brown 계수(m_i)를 추정하기 위하여, 연암 및 경암·극경암에 해당하는 제주도 현무암의 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌 (References)

1. Cai, M. (2010), "Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek-Brown Strength Parameter m_i of Brittle Rocks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.43, pp.167-184.
2. Cho, T.C., Lee, S.B., Hwang, T.J., and Won, K.S. (2009), "Variations of Mechanical Properties of Hallasan Trachyte with Respect to the Degree of Weathering", *Tunnel & Underground Space*, Vol.19, No.4, pp.287-303. (in Korean)
3. Eum, K.Y. (2002), *Study on the Mechanical Properties of Volcanic Rocks in Chejudo*, Master thesis, Yonsei University, 63p. (in Korean)
4. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), "Empirical Strength Criterion for Rock Masses", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.106, No.GT9, pp.1013-1035.
5. Hoek, E. (2007), *Practical rock engineering*, <http://www.rocksience.com>, 342p.
6. Hoek, E. and Martin, C.D. (2014), "Fracture Initiation and Propagation in Intact Rock - A Review", *Journal of Rock Mechanics and*

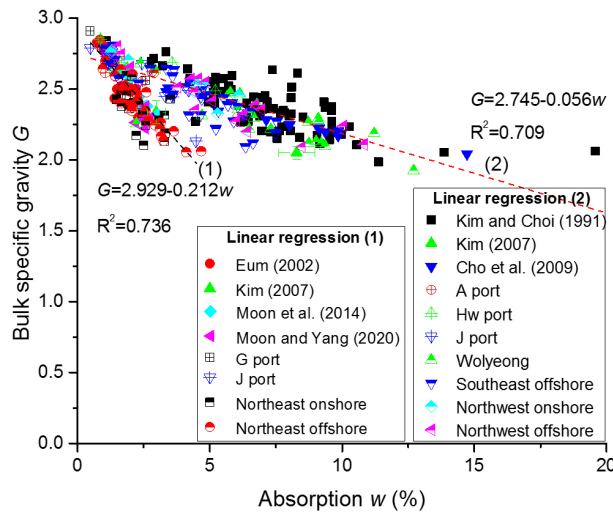
- Geotechnical Engineering*, Vol.6, pp.287-300.
7. Hoek, E. and Brown, E.T. (2019), "The Hoek-Brown Failure Criterion and GSI – 2018 Edition", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.11, pp.445-463.
 8. International Society for Rock Mechanics (1981), *Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*, Pergamon Press.
 9. Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., and Zimmerman, R.W. (2007), *Fundamentals of Rock Mechanics*, Blackwell Publishing Ltd, pp. 158-160.
 10. Kim, J.H. (2007), *A Study on the Mechanical Characteristics and the Strength in Pyoseonri Basalt*, Master thesis, Cheju National University, 93p. (in Korean)
 11. Kim, Y.K. and Choi, O.G. (1991), "Engineering Geological Characteristics of Volcanic Rocks of the Northwestern Cheju Island, Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.1, No.1, pp. 19-37. (in Korean)
 12. Moon, K., Park, S., Kim, Y., and Yang, S. (2014), "Mechanical Characteristics of Basalt in Jeju Island with Relation to Porosity", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.34, No.4, pp.1215-1225. (in Korean)
 13. Moon, K. and Yang, S.B. (2020), "Cohesion and Internal Friction Angle Estimated from Brazilian Tensile Strength and Unconfined Compressive Strength of Volcanic Rocks in Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.36, No.2, pp.17-28. (in Korean)
 14. Nam, J.M., Yun, J.M., Song, Y.S., and Kim, J.H. (2008a), "Analysis of Engineering Properties to Basalt in Cheju Island", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.7, No.1, pp.13-21. (in Korean)
 15. Nam, J.M., Yun, J.M., Song, Y.S., and Kim, J.H. (2008b), "Analysis of Influence Factors to Compressive and Tensile Strength of Basalt in Cheju Island", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.18, No.2, pp.215-225. (in Korean)
 16. Nam, J.M., Yun, J.M., and Song, Y.S. (2009), "Estimation to the Strength of Basalt in Jeju Island according to Rock Failure Criteria", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.19, No.2, pp.153-163. (in Korean)
 17. Park, S. and Moon, K. (2020), "Mechanical Characteristics of Basalt in Jeju Island with Relation to Moisture Condition", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.36, No.7, pp.29-40. (in Korean)
 18. Perras, M.A. and Diederichs, M.S. (2014), "A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.32, pp.525-546.
 19. Shen, J. and Karakus, M. (2014), "Simplified Method for Estimating the Hoek-Brown Constant for Intact Rocks", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.140, No.2, pp.27-35.
 20. Thuro, K., Plinninger, R.J., Záh, S., and Schütz, S. (2001), "Scale Effects in Rock Strength Properties. Part 1: Unconfined Compressive Test and Brazilian Test", *ISRM Regional Symposium EUROCK 2001*, pp.169-174.
 21. Vásárhelyi, B., Kovács, L., and Török, Á. (2016), "Analysing the Modified Hoek-Brown Failure Criteria Using Hungarian Granitic Rocks", *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, Vol.2, pp.131-136.
 22. Wang, W. and Shen, J. (2017), "Comparison of Existing Methods and a New Tensile Strength based Model in Estimating the Hoek-Brown Constant m_i for Intact Rocks", *Engineering Geology*, Vol. 224, pp.87-96.
 23. Yang, S.B. (2014), "Comparative Study on Physical and Mechanical Characteristics of Volcanic Rocks in Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.11, pp.39-49. (in Korean)
 24. Yang, S.B. (2015a), "Physical and Mechanical Characteristics of Basalts in Northwestern and Southeastern Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.7, pp.41-52. (in Korean)
 25. Yang, S.B. (2015b), "Cohesion and Internal Friction Angle of Basalts in Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.33-40. (in Korean)
 26. Yang, S.B. (2016), "Strength Parameters of Basalts in Jeju Island according to Rock Failure Criteria", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.3, pp.15-27. (in Korean)
 27. Yang, S. and Sassa, S. (2016), "Mechanical Characteristics and Design Strength Parameters due to Vesicular Property of Basalts", *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B3, Vol.72, No.2, pp.437-442. (in Japanese)
 28. Yang, S. and Sassa, S. (2017), "Effects of Porosity on Mechanical Characteristics of Vesicular Basalts", *Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.705-711.
 29. Yang, S.B. and Boo, S.P. (2019), "Estimation of Deformation Modulus of Basaltic Rock Masses in Northeastern and Northwestern Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.1, pp.5-15. (in Korean)
 30. Yoon, S.H. and Ko, K.W. (2011), *Topography, Geology and Underground Water in Jeju Island*, Nae Ha Publishing Company, pp.5-57. (in Korean)
 31. Yu, Y., Yin, J., and Zhang, Z. (2006), "Shape Effects in the Brazilian Tensile Strength Test and a 3D FEM Correction", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.43, pp.623-627.

Received : July 14th, 2020

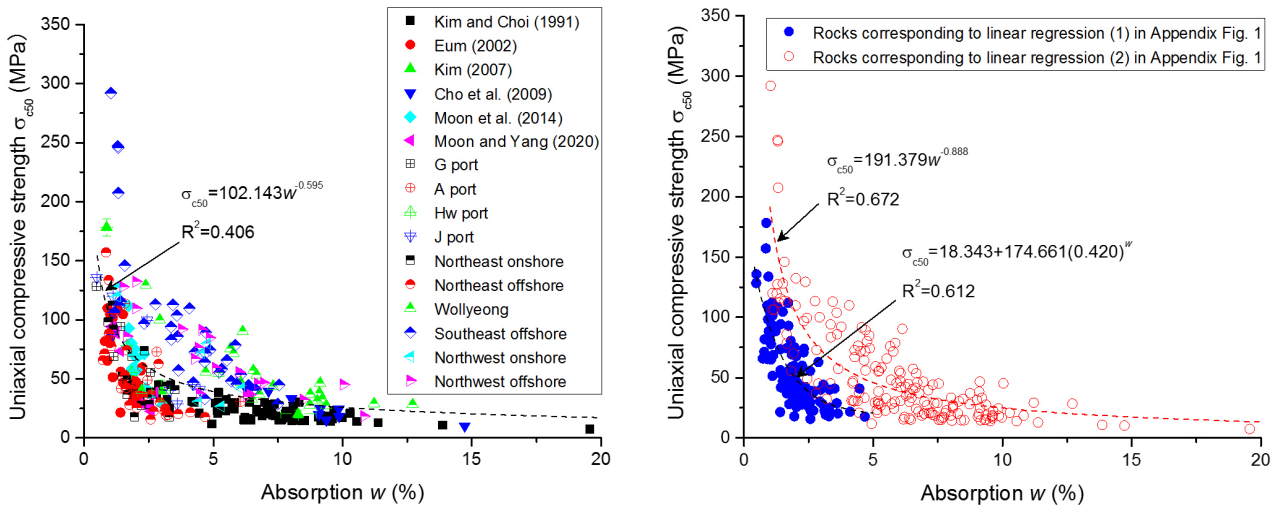
Revised : September 7th, 2020

Accepted : September 15th, 2020

부 록 (Appendix)



Appendix Fig. 1. Relationship between the absorption and bulk specific gravity of volcanic rocks in Jeju Island



(a) Non-linear regression analysis for total data

(b) Non-linear regression analyses for rocks corresponding to respective linear regressions in Appendix Fig. 1

Appendix Fig. 2. Relationship between the absorption and uniaxial compressive strength of volcanic rocks in Jeju Island