

영상처리기법과 회전식 수리저항성능 실험을 이용한 다짐화강풍화토의 수리저항특성 분석

Hydraulic Resistance Characteristics of Compacted Weathered Granite Soil by Rotating Cylinder Test and Image Analysis

김 영 상¹ Kim, Young Sang

임 재 성² Lim, Jae Seong

Abstract

Recently, in Korea, problems related with instability of slope or sinkhole in urban area due to erosion of compacted granite soil which was used as a backfill or embankment material have been treated as important issues. Small hole might develop inside of backfill area due to erosion of not only weathered granite soil but also clay, silt, fine sand size particles when underground water flows. Once erosion starts in a soil mass, erosion rate increases gradually to cause rapid destruction. In this study, a rotating cylinder test (RCT) was performed to evaluate the hydraulic resistance characteristics of compacted weathered granite soil under various relative densities and preconsolidation pressures. Meanwhile, an image analysis method was introduced to analyze radius of irregularly eroded sample. It was found that image analysis is an effective means of minimizing the error in calculating a critical shear stress and threshold shear stress on the irregularly eroded sample. Furthermore, in general, hydraulic resistance capacity increases with the increase of relative density and preconsolidation pressure.

요 지

현재 우리나라에서는 해저케이블 또는 해상구조물 기초부, 흙댐, 도로공사 등의 성토재료로 이용된 다짐풍화토에서 침식(Erosion)으로 인한 사면의 불안정성, 오래된 상·하수관이 누수되거나 파열되어 발생하는 도심지 싱크홀 등의 문제가 발생하고 있다. 이와 같이 건설재료로 많이 이용된 풍화토는 지하수 및 지표수 흐름이 발생할 때 다양한 입자 크기의 점토, 실트 및 세립의 모래들과 함께 침식되거나 세굴 되어 소규모 공동을 형성하며, 일단 침식이나 세굴이 발생되기 시작하면 점차 침식율이 증가하게 되어 급격한 파괴에 도달한다. 본 연구에서는 회전식 수리저항성능 실험기(RCT)를 이용하여 다양한 상대밀도와 선행압밀압력으로 압밀된 다짐화강풍화토의 수리저항성능을 평가하였다. 또한 회전으로 인하여 일정하게 세굴되지 않은 시료의 단면해석을 위해 영상처리기법을 도입하였다. 연구결과 침식으로 인하여 시료의 형상이 일정하지 않는 경우, 계산된 임계전단응력에 큰 오차가 발생하는 것으로 확인되었으며 제안된 영상처리기법으로 보정된 반지름을 이용할 경우보다 정확한 한계 및 임계전단응력 계산이 가능한 것으로 나타났다. 또한 상대밀도와 선행압밀압력이 증가할수록 한계전단응력은 증가하나 임계전단응력은 선행압밀하중 증가에 의한

1 정회원, 전남대학교 해양토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Marine and Civil Engrg., Chonnam National Univ., Tel: +82-61-659-7248, Fax: +82-61-659-6713, geoskim@jnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 전남대학교 건설환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Chonnam National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

효과는 크지 않은 것으로 나타났으며, 선행압밀압력에 의한 응력이력보다는 초기 상대밀도의 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Hydraulic resistance capacity, Image analysis, Rotating cylinder test, Compacted weathered granite soil

1. 서론

일반적으로 지반함몰(Sinkhole)은 지반을 구성하는 석회암의 주성분인 탄산칼슘이 땅속을 흐르는 지하수와 화학작용을 일으켜 지반이 용해되면서 커다란 구멍이 상부압력을 견디지 못하고 순차적으로 붕괴되는 현상이다. 그러나 우리나라 지반의 경우 지층이 대부분 단단한 화강암 또는 편마암으로 이루어져 해외와 같은 자연적인 지반함몰은 많이 발생하지 않는다(Ministry of Land, 2014). 하지만 최근 노후화된 상하수관의 누수나 파열로 인한 도심지 지반함몰, 건설공사 중 사용한 풍화토 지반재료나 느슨한 원지반이 지하수 유출과 함께 침식되어 지하구조물이나 실드터널 인근에 대규모 공동이 발생하여 사회적인 문제로 대두되었다(Hyun, 2015). 현재 지반함몰에 대한 전국각적인 연구가 진행 중으로 아직까지 명확한 발생 메커니즘이 밝혀지지 않았으나 상하수관의 누수나 지하수가 유출되어 흐름이 발생할 때 점토, 실트 및 세립의 모래 등 크고 작은 입자들과 다짐 화강풍화토와 같은 현장 다짐토가 함께 침식되고 일단 침식이 시작되면 점차 침식률이 증가하여 결국 공동화장으로 인한 소규모 또는 대규모 붕괴가 발생하는 것으로 알려져 있다(Greyvenstein and Zyl, 2007; Tenbusch, 2009; Yokota et al., 2012). 침식(Erosion)과 유사한 현상인 세굴(Scour)은 구조물 주변에서 흐름에 의한 침식현상으로, 공학적 연구들은 대상구조물에 대한 안정성 평가를 목적으로 하므로 침식보다는 주로 세굴에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 지반분야에서 대표적인 세굴 연구로는 하천흐름에 의한 교량 구조물 주변의 세굴(Kwak et al., 2004)이나 조류 흐름특성을 반영한 해안 구조물 주변의 세굴(Kang et al., 2010; Kim and Kang, 2011)등이 있다. 이 연구들은 현장에서 채취된 지반시료를 손쉽게 이용할 수 있도록 관수로식 수리저항성능 실험기(Erosion Function Apparatus, EFA)를 이용하여 이루어졌다. 국외에서는 EFA(Briaud et al., 1999, 2001), SERF(Trammell, 2004), SEDflume(McNeil et al., 1996)

등 다양한 형식의 관수로식 수리저항성능실험기와 함께 환형수조(Annular flume)와 회전식 수리저항성능실험기(Rotating Cylinder Tester, RCT)를 이용한 연구(Dixit et al., 1982; Parchure and Mehta, 1985; Moore and Masch, 1962; Chapuis and Gatién, 1986; Lim, 2006)들이 이루어진 바 있다. 환형수조를 이용한 퇴적토의 침식에 관한 연구(Hwang and So, 2002; Yim et al., 2008; Kim et al., 2014)는 국내에서도 수행된 바가 있으나 회전식 수리저항성능실험기를 이용한 연구는 Kim and Jeong (2015) 외에는 이루어진 바가 없다. Kim and Jeong(2015)은 우리나라 해안지반의 특성과 지반의 심도를 고려하여 설계된 인공점토 시료에 대하여 회전식 수리저항성능실험을 실시하고 전단파속도 및 비저항 같은 비파괴 특성과 수리저항성능 간의 상관관계를 도출한 바가 있다. 회전식 수리저항성능실험기는 관수로식 수리저항성능실험과 달리 일정 유속에서 침식된 시료의 무게를 직접 측정하기 때문에 실험자의 주관적 판단을 최소화할 수 있고, 보다 객관적인 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 회전식 수리저항성능실험기를 이용하여 우리나라 흙댐, 도로 및 지중 구조물의 성토재료나 뒷채움 재료로 많이 이용되는 다짐화강풍화토의 침식에 대한 수리저항성능을 평가하였다. 이때 불균질하게 발생하는 침식형상을 고려하기 위하여 영상처리기법을 이용하여 시료의 반지름 변화를 해석하고 이를 이용하여 좀 더 합리적인 수리저항특성을 결정할 수 있도록 하였다.

2. 실험장비 및 실험법

2.1 회전식 수리저항성능실험

회전식 수리저항성능실험은 Moore and Masch(1962)에 의해 처음으로 사용되었으나 기계적인 마찰을 고려하지 않아 전단응력을 정확하게 측정할 수 없었으며 침식된 지반시료의 무게 측정이 어려워 침식률을 결정하

는데 어려움이 있었다. 이후 Chapuis and Gatién(1986) 과 Chapuis(1986a,b)에 의해 자연 상태의 지반시료와 재성형된 지반시료에 대한 정확한 세굴량을 측정할 수 있도록 개선되었다. 한편 Lim(2006)은 지반시료의 고정장치에 발생하는 전단응력을 측정하여 지반시료에 발생하는 전단응력을 정확히 측정할 수 있도록 개선하였다. 회전식 수리저항성능시험기(Fig. 1)는 물로 채워진 직경 120mm, 높이 210mm의 실린더의 중심에 지반시료를 고정시킨 후 실린더를 회전시켜 회전하는 물로 지반시료의 표면에 전단응력을 발생시키는 원리로, 실린더 및

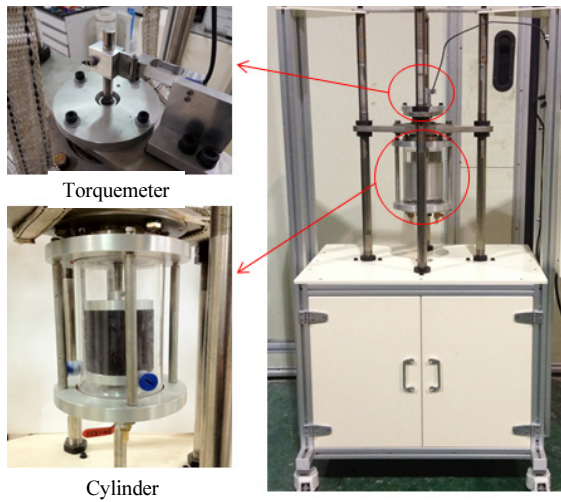


Fig. 1. Rotating cylinder tester

Table 1. Specification of rotating cylinder tester

Division	Specifications	
Equipment	Width	740mm
	Height	1500mm
Load cell	Model	BCL-1L
	Size	200×200mm
	Tightening Torque	1.5Nm
Temperature sensor	Model	HY-48D_PPMMR05
	Range	0~399℃
Rotary motor	Base rotations	Right and left 360°
	Characteristic	Low vibration motor
	Velocity	0~1870RPM
Real-time output torque measuring device	Model	NT-301A
	Size	193×100×140mm
Cylinder	Material	Acryl
	Diameter	120mm
	Height	210mm
Option	<ul style="list-style-type: none"> - Variable speed drives (IG5A) - Sampling and drainage - Specimen grips 	

물의 회전 작용으로 인해 발생하는 힘을 토크력으로 측정하고 다음 식 (1)을 이용하여 전단응력을 산정한다. 실험에 사용된 회전식 수리저항성능시험기의 제원을 Table 1에 정리하였다.

$$\tau = T / (2\pi RL) \quad (1)$$

여기서, T는 시료 상부의 토크장치에서 측정된 토크력(N·m), R은 시료 반지름(m), L은 시료의 길이(m)이다.

모터의 회전속도를 최초 75RPM부터 각 단계별로 2배씩 증가시켜 최대 1200RPM까지 단계별로 1분 동안 회전시킨 후 침식이 발생된 시료를 채취하여 100% 건조시켜 질량을 측정하며 측정된 모터의 회전속도로부터 Fig. 2를 이용하여 유속을 산정한다. 또한 식 (1)로부터 산정된 전단응력과 침식물의 상관관계를 도식한다.

Fig. 3은 회전식 수리저항성능시험기(Rotating cylinder

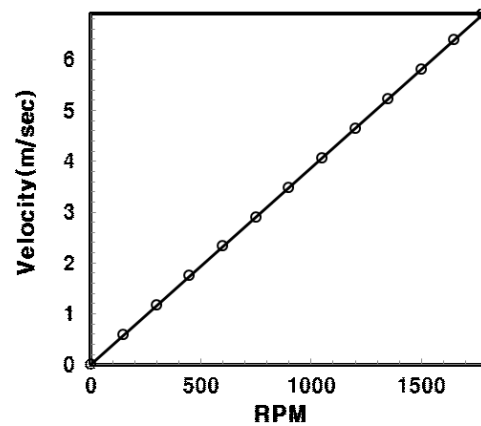


Fig. 2. Relationship between RPM and flow velocity of RCT apparatus (Han, 2012)

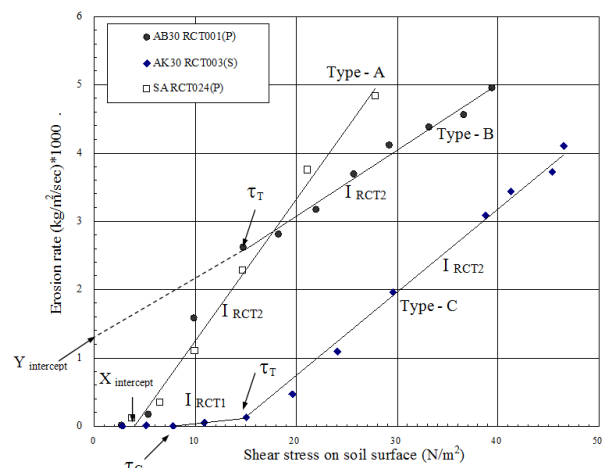


Fig. 3. Typical types of soil erosion

test, RCT)를 이용하여 얻어진 대표적인 실험결과이다. A형 곡선은 X축 절편의 교차점을 처음 침식이 발생한 한계전단응력(Critical shear stress, τ_c)이라고 정의한다 (Shaikh et al., 1988a,b; Ghebreyessus et al., 1994; Briaud et al., 1999, 2001; Wan and Fell., 2004a,b). B형 곡선은 A형 곡선과 비슷하지만 Y축 절편에 교차되어 한계전단 응력(τ_c)에 해당하는 세굴에 대한 저항성은 없는 것으로 정의한다. C형 곡선은 이중 침식곡선으로서, 시료에서 처음 침식이 측정되었을 때를 한계전단응력(τ_c)으로 정의하고 이후 한계전단응력(τ_c)을 포함하는 침식곡선의 기울기 끝 점에서 침식곡선의 기울기가 급격하게 변화가 된 교점을 임계전단응력(Threshold shear stress, τ_t)으로 정의한다(Shields, 1936; Masch et al., 1963; Arulanandan et al., 1973).

2.2 영상처리기법을 이용한 시료 형상 분석

영상(Image)은 공학적 렌즈를 통하여 형성되는 물체의 상을 나타내며 빛으로부터 반사된 물체는 다양한 변

화에 의해 영상이 만들어 진다. 영상처리 방법은 물체의 크기, 면적, 경계 등을 분석하는 방법이다. Strom et al. (2005)은 거석(Pebble)에 대한 입도분포 정보 분석을 위해 자동영상 입도분석법(AGS, automatic grain sizing)을 사용하였으며 Harb and Schneider(2009)는 하천 실측자료와 비교하여 영상처리방법이 비교적 일치함을 보고한 바가 있다. Fig. 4는 동일한 상대밀도($Dr=75\%$)를 갖는 시료를 다른 압밀압력($\sigma'_p = 100kPa$ 과 $\sigma'_p = 300kPa$)에서 선행압밀하여 회전식 수리저항성능실험을 실시한 뒤에 촬영된 영상의 처리 절차와 그 결과이다. 선행압밀압력이 작을($\sigma'_p = 100kPa$)경우 침식량이 클 뿐만 아니라 공간적으로 불균일하게 발생하여 식 (1)로 전단응력을 결정하기 위해서는 환산된 등가의 반지름이 필요하다. 본 연구에서는 불균일하게 침식된 시료의 등가 반지름을 결정하기 위하여 ImageJ 프로그램을 사용한 영상처리를 실시하였다. ImageJ는 2004년 미국 국립보건원(National Institute of Health)에서 개발하였으며 지속적으로 업데이트되고 있고 무료(<https://imagej.nih.gov/ij/>)로 사용할 수 있다. 제일 먼저 Fig. 4에 도시된 바와 같

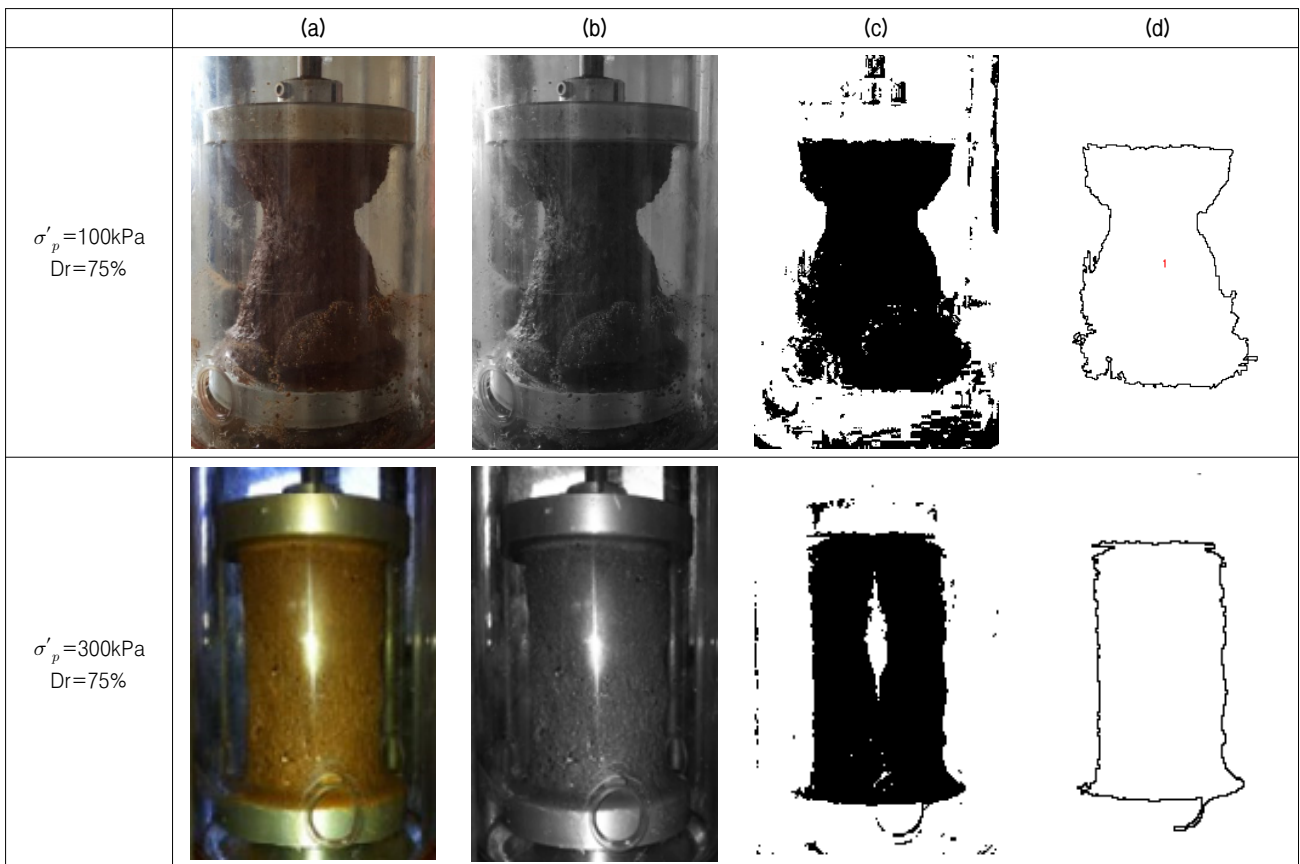


Fig. 4. Image analysis steps: (a) Original image (b) Convert scanned color image to gray scale with 8-bit (c) Threshold the image using the automated routine (d) Outline of analyzed area

이 컬러로 촬영된 원본 사진을 8-bit gray scale된 이미지로 전환한다. Gray scale 이미지는 threshold함수에 의해 흑백으로만 이루어진 binary image로 저장하고 outline 함수로 면적을 계산한다(Cho, 2014). 이와 같이 4단계의 처리를 통하여 불규칙하게 침식된 시료의 단면적을 계산해 내고 식 (2)로부터 동일한 단면을 갖는 환산된 원통의 반지름(R_i)을 산정하여 전단응력을 계산하였다. 단, 이 연구에서는 촬영된 단면을 영상처리하여 환산 반지름을 산정하였으므로 3차원적인 변화는 고려하지 않았다.

$$R_i = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad (2)$$

여기서, R_i =환산된 반지름, A_i =ImageJ 프로그램으로 계산된 단면적

3. 실험결과 및 분석

3.1 다짐화강풍화토의 공학적 특성 및 시료제작

우리나라 풍화토는 사질토에서 점성토까지 아주 다양한 형태로 존재하며 따라서 그 역학적인 특성도 아주 광범위하게 나타나므로 획일적으로 정의하기가 어렵다. 본 연구에서 사용한 시료는 전라남도 OO시 사면(위도:34.78°, 경도:127.71°)의 소단에서 교란된 형태로 채취하였다. 채취한 풍화토의 다짐특성을 평가하기 위하여 Proctor가 제안한 표준다짐방법(Standard proctor test)으로 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도($\gamma_{d,max}$)를 결정하였다. 또한 체분석(KS F2302), 액·소성한계(KS F2303), 비중(KS F2308), 최대 및 최소간극비(KS F2345) 등 지반공학적인 기초물성을 파악하여 Table 2에 정리하였다.

본 실험에서는 시료의 초기 상대밀도를 느슨(40%),

Table 2. Geotechnical properties of weathered soils

No.200 passing percent (%)	Soil Classification by USCS	Atterberg Limit	Specific gravity (G_s)
15.05	SM	LL=28.6 PL=N.P	2.62
Max. Void ratio (e_{max})	Min. Void ratio (e_{min})	Max. dry density (γ_{dmax} , g/cm ³)	Optimum water content (ω_{OMC} , %)
1.430	0.689	1.559	19.4

보통(60%), 조밀(75%)의 세 가지 경우로 구분하고 최적함수비상태에서 직경100mm, 높이 100mm의 몰드에 시료가 균질하게 성형되도록 6층으로 가볍게 다져서 (Tamping) 형태를 잡는다. 이때 정적인 압축장치(Fig. 5b)를 이용하여 각층의 두께가 17.5mm가 되도록 1mm/min의 속도로 재하(load)하여 상대밀도 40%, 60%, 75%로 시료를 성형하였다. 또한 삼축압축시험기를 이용하여 시료를 완전포화 되도록 하였다. 이때 시료 내부 및 시료와 멤브레인 사이에 존재하는 미세한 공기를 제거하기 위해 Cell과 Pore의 압력을 15kPa과 5kPa로 가압하고 순환(Circulation)과정을 실시하였다. 포화과정에서는 Cell pressure와 Pore pressure를 순차적으로 20kPa씩 증가시켜 시료를 포화시켰으며 Skempton(1954)의 간극수압계수 B값이 0.95이상일 때를 완전포화로 판단하였다. 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

3.2 영상처리기법을 이용한 다짐화강풍화토의 환산반지름 산정결과

식 (2)를 이용하여 도출된 환산 반지름 R_i 이 시료 조성 시 초기 반지름 R_0 과 얼마나 달라지는지 다음 식 (3)에 의해 반지름 변화율을 계산하였다.



(a) Tamping each layer



(b) Static compression by large oedometer

Fig. 5. Manufacturing soil sample

$$\frac{R_o - R_i}{R_o} \times 100 \quad (3)$$

여기서, R_o 는 초기 반지름, R_i 는 영상처리를 이용하여 도출된 환산 반지름

Table 4에 정리된 바와 같이 초기 반지름(R_o)과 영상

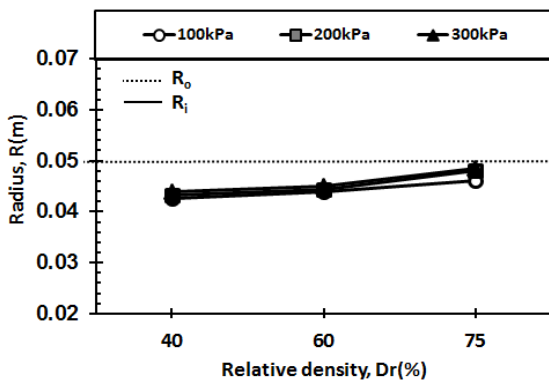
처리를 이용하여 도출된 환산 반지름(R_i)에 대한 변화율을 분석한 결과, 침식이 발생하기 시작하는 한계전단 응력 단계에서는 환산 반지름(R_i)과 초기 반지름(R_o)의 최대 변화율이 14.86%로 큰 차이는 발생하지 않은 것으로 나타났다. 이에 비하여 침식이 급격히 발생하는 임계 상태에서는 최대 49.20%의 변화율이 발생해 임계전단

Table 3. Degrees of saturation with respect to the relative density

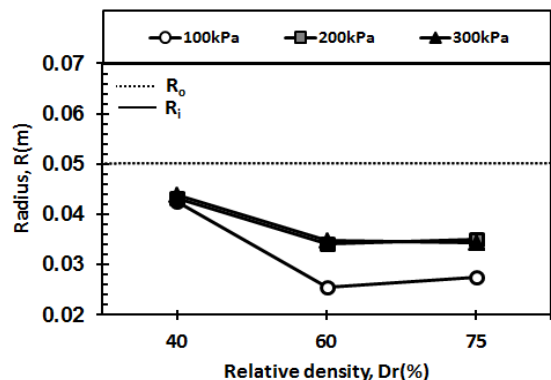
Dr (%)	e_o	γ_d (g/cm^3)	Volume of specimen (cm^3)	Weight of specimen (g)	Confining pressure (kPa)	Degree of saturation (%)
40	1.13	1.228	785.4	964.5	100	96.1
					200	96.5
					300	98.5
60	0.98	1.320	785.4	1036.7	100	96.4
					200	99.5
					300	96.8
75	0.87	1.398	785.4	1097.9	100	95.7
					200	96.9
					300	97.8

Table 4. Radius change rate from initial radius to equivalent radius

Dr, %	σ_p^1 , kPa	$\tau_c (N/m^2)$			$\tau_i (N/m^2)$				
		R_o (m)	R_i (m)	Rate of change (%)	R_o (m)	R_i (m)	Rate of change (%)		
40	100	0.05	0.0426	14.86	0.05	0.0426	14.86		
	200		0.0433	13.45		0.0433	13.45		
	300		0.0440	12.04		0.0440	12.04		
60	100		0.0438	12.40		0.05	0.0254	49.20	
	200		0.0443	11.38			0.0348	30.44	
	300		0.0450	9.91			0.0340	31.91	
75	100		0.0460	8.00			0.05	0.0275	45.00
	200		0.0481	3.90				0.0351	29.87
	300		0.0484	3.20				0.0344	31.20



(a) Radius at the critical shear stress state



(b) Radius at the threshold shear stress state

Fig. 6. Change of radius with respect to relative density and preconsolidation pressure

응력 산정 시 초기 반지름을 그대로 사용할 경우 매우 큰 오차가 발생될 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 6에 상대밀도변화에 따른 환산 반지름의 변화가 도시되어 있다. 그림과 같이, 한계전단응력 산정 시 반지름의 변화는 상대밀도가 증가할수록 줄어드는 것으로 나타났으며 선행압밀응력은 큰 영향을 주지 않았다. 그러나 침식량이 급격히 증가하는 임계상태에서는 초기 상대밀도가 큰 시료일수록 반지름의 변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 시료가 조밀한 상태로 조성될 경우 수리저항성능이 크므로 임계상태까지 도달하는 데 많은 회전을 경험하게 되고 이로 인해 임계상태에 도달했을 때 많은 침식이 발생하여 반지름이 크게 감소되는 것으로 판단된다.

3.3 상대밀도와 선행압밀압력에 따른 다짐화강풍화토의 수리저항특성 분석

목표한 압밀압력으로 선행압밀이 종료된 포화(saturation) 상태의 시료는 회전식 수리저항성능실험기에 설치하여 수리저항성능 실험을 실시하였다. 흐름 실험은 1분 동안 정회전 방향으로 회전시키면서 침식된 시료의 량을

측정하였으며 낮은 회전속도부터 빠른 회전속도까지 증가시키면서 반복적으로 수리저항성능을 측정하였다. 3.2절에 설명된 바와 같이 영상처리결과 계산된 환산 반지름(R_i)과 초기 반지름(R_o)을 이용하여 식 (1)로부터 계산된 한계전단응력과 임계전단응력을 Table 5와 Fig. 7에 정리하였다.

Fig. 7(a)에 보는 바와 같이 다짐에 의하여 조성한 초기 상대밀도와 선행압밀압력이 증가하면 대부분의 경우에 한계전단응력(τ_c)이 증가하는 것으로 나타났다. 다만 초기 상대밀도가 40%로 느슨하게 성형된 시료는 선행압밀압력 증가에 의한 한계전단응력 증가가 거의 없으며 선행압밀압력 100kPa로 압밀된 시료의 경우에 상대밀도 증가의 효과도 200kPa 및 300kPa에 비하여 매우 제한적인 것으로 나타났다. 이상에서 초기 다짐이 불량한 상태에서는 심도가 증가에 의한 선행압밀하중이 증가하더라도 한계전단응력의 증가가 제한적이어서 지하수나 지표수 흐름에 의한 침식이 매우 쉽게 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Fig. 7(b)의 임계전단응력(τ_i)은 초기 상대밀도에 따라 크게 증가하나 선행압밀압력에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는

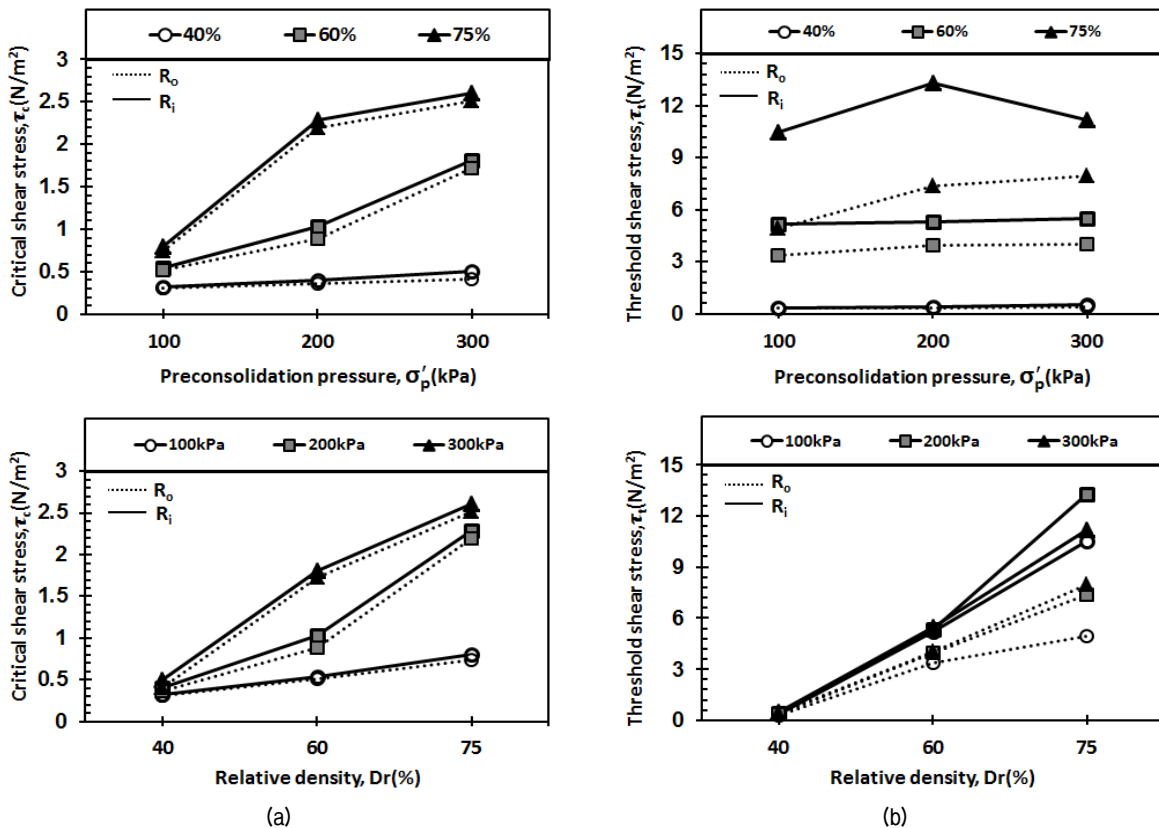


Fig. 7. Critical shear stress (a) and Threshold shear stress (b) with Preconsolidation pressure and Relative density

Table 5. Change rate of Shear stress determined from initial radius and equivalent radius of image analysis

Dr (%)	σ_p' (kPa)	$\tau_c (N/m^2)$		$\tau_t (N/m^2)$		Rate of change (%)	
		R_o	R_i	R_o	R_i	τ_c	τ_t
40	100	0.31	0.32	0.31	0.32	3.9	3.9
	200	0.36	0.40	0.36	0.40	5.4	5.4
	300	0.41	0.50	0.41	0.50	17.6	17.6
60	100	0.52	0.54	3.36	5.19	4.5	35.2
	200	0.89	1.03	3.97	5.33	13.8	25.5
	300	1.72	1.81	4.04	5.48	4.9	26.3
75	100	0.74	0.8	4.93	10.49	7.6	53.0
	200	2.20	2.29	7.37	13.27	4.0	44.5
	300	2.51	2.61	7.93	11.2	3.7	29.2

이미 한계전단응력을 지난 응력상태에서는 선행압밀압력에 의한 효과는 이미 사라진 것으로 판단되며 오로지 초기 다짐에 의한 시료의 상대밀도가 침식(erosibility)에 대한 저항성을 결정짓는 요소임을 알 수 있다. 초기 반지름과 환산 반지름을 사용하여 결정된 전단응력간 변화율을 다음 식 (4)를 이용하여 계산하고 Table 5에 정리하였다.

$$\frac{\tau(R_o) - \tau(R_i)}{\tau(R_o)} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서, $\tau(R_o)$ =초기 반지름(R_o)을 이용하여 산정된 한계전단응력과 임계전단응력, $\tau(R_i)$ =영상처리방법으로 산정된 환산 반지름(R_i)을 이용하여 산정된 한계전단응력과 임계전단응력

Table 5에 나타난 바와 같이 시료회전에 의한 침식량이 크지 않은 한계전단응력 산정 시에는 반지름 재산정에 의한 오차가 최대 17.6%로 크지 않으나 침식량이 크게 늘어나는 임계전단응력 산정 시에는 최대 53.0%의 오차가 발생하므로 영상처리를 이용한 환산 반지름을 사용하여 한계전단응력과 임계전단응력을 산정하는 것이 경제적이고 합리적인 것으로 판단된다.

4. 결론

(1) 침식이 발생하기 시작하는 한계전단응력 단계에서는 영상처리에 의해 산정된 환산 반지름과 초기 반지름 간의 변화율이 최대 14.8%로 크지 않으며 시료 조성 시 초기 상대밀도가 클수록 반지름 변화가 크지 않았다. 그러나 침식이 급격하게 일어나는 임

계전단응력 단계에서는 환산 반지름과 초기 반지름의 변화율이 최대 45.0%에 이를 정도로 크며 초기 상대밀도가 큰 시료일수록 침식에 대한 저항성이 크므로 임계전단응력 상태까지 많은 침식을 경험하여 반지름 변화가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

(2) 다짐화강풍화토는 대체로 상대밀도와 선행압밀압력이 증가할수록 한계전단응력(τ_c)이 증가한다. 그러나 초기 상대밀도가 낮은 시료의 경우에는 선행압밀압력이 증가하더라도 한계전단응력(τ_c)이 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이로부터 초기 다짐이 향후 흙의 침식 및 세굴에 미치는 영향이 큰 것으로 판단되므로 시공 시 다짐에 신중을 기해야 한다. 또한 한계전단응력 산정시 침식으로 인한 반지름 변화를 고려하지 않는 경우의 최대 17.6% 과소평가하는 것으로 나타났다.

(3) 또한 임계전단응력(τ_t)은 초기 상대밀도가 증가하면 증가하지만 선행압밀압력이 증가하여도 증가하지는 않는 것으로 나타났다. 이는 이미 한계전단응력을 지난 응력상태에서는 선행압밀압력에 의한 효과는 이미 사라진 것으로 판단되며 오로지 초기다짐에 의한 시료의 상대밀도가 침식에 대한 저항성을 결정짓는 요소임을 알 수 있다. 또한 임계전단응력 산정시 반지름의 변화를 고려하지 않는 경우에 최대 53.0% 과소평가하는 것으로 나타나, 영상처리에 의한 환산 반지름을 사용하여 임계전단응력을 산정하는 것이 합리적일 뿐만 아니라 경제적임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 NRF 일반연구지원사업(지역대

학우수과학자지원사업, 과제번호 2013R1A1A4A01011403)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- Arulanandan, K., Sargunam, A., Loganathan, P., and Krone, R.B. (1973), "Application of Chemical and Electrical Parameters to Prediction of Erodibility", *Highway Research Board Special Report*, (135).
- Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H.C., Gudavalli, S.R., Perugu, S., and Wei, G. (1999), "SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Reston, Virginia, USA, Vol.125, No.4, pp. 237-246.
- Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W., and Kwak, K.S. (2001), "Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.2, pp.105-113.
- Chapius, R.P. (1986a), "Quantitative Measurement of the Scour Resistance of Natural Solid Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, pp.132-141.
- Chapius, R.P. (1986b), "Use of Rotational Erosion Device on Cohesive Soils", *Transportation Research Record*, No.1089, pp.23-28.
- Chapius, R.P. and Gatiem, T. (1986), "An Improved Rotating Cylinder Technique for Quantitative Measurements of the Scour Resistance of Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, pp.83-87.
- Cho, W.S. (2014), "Analysis of grain-size distribution of gravel river-bed using digital image processing", Master's Thesis, Dong-eui University.
- Dixit, J.G., Mehta, A.J., and Partheniades, E. (1982), "Redepositional Properties of Cohesive Sediments Deposited in a Long Flume", University of Florida, Coastal and Oceanographic Engineering Department.
- Ghebreyessus, Y.T., Gantzer, C.J., Alberts, E.E., and Lentz, R.W. (1994), "Soil Erosion by Concentrated Flow: Shear Stress and Bulk Density", *Transactions of the ASAE*, Vol.37, No.6, pp.1791-1797.
- Greyvenstein, B. and Van Zyl, J.E. (2007), "An Experimental Investigation into the Pressure-leakage Relationship of Some Failed Water Pipes", *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, Vol.56, No.2, pp.117-124.
- Han, B.D. (2012), "The Effect of the Incidence Angle of Current and Consolidation Pressure on the Hydraulic Resistance Capacity of Clayey Soil", Master's Thesis, Chonnam National University.
- Harb, G. and Schneider, J. (2009), "Application of Two Automated Grain Sizing Approaches and Comparison with Traditional Methods", *33d IAHR Congress*, pp.4973-4979.
- Hwang, K.N. and So, S.D. (2002), "An Investigation on Erosional Properties of Kaolinite Sediments Using Annular Flume", *Conference of Korean Society of Civil Engineers*, (3-6), pp.3192-3195.
- Hyun, Y.J. (2015), "Direction of Policy Related to the Development of Underground Space for the Sinkhole Prevention in Urban Areas", *Korean Society of Road Engineers*, Vol.17, No.1, pp.61-63.
- Lim, S.S. (2006), "Experimental Investigation of Erosion in Variably Saturated Clay Soils", Doctoral dissertation, The University of New South Wales.
- Kang, K.O. and Jeong, H.C., and Kim, Y.S. (2010), "Development of Apparatus for Measuring Hydraulic Resistance of Sea Ground Considering Tidal Current Flow", *KGS Fall National Conference*, September 9-10, pp.538.
- Kim, Y.M., Kim, H.M., and Hwang, K.N. (2014), "A Laboratory Study on Erosional Properties of the Deposit Bed of Kaolinite Sediments", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No.3, pp.1181-1190.
- Kim, Y.S. and Gang, G.O. (2011), "Experimental Study on Hydraulic Resistance of Sea Ground Considering Tidal Current Flow", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.23, No.1, pp.118-125.
- Kim, Y.S. and Jeong, S.H. (2015), "Relationship between Electrical Resistivity and Hydraulic Resistance Capacity Measured by Rotating Cylinder Test", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.27, No.1, pp.1-8.
- Kim, Y.S., Jeong, S.H., and Lee, C. (2015), "Effects of Flow Direction and Consolidation Pressure on Hydraulic Resistance Capacity of Soils", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.16, No.5, pp.55-66.
- Kwak, K.S., Lee, J.H., Par, J.H., Chung, M.K., and Bae, G.J. (2004), "Influence of Soil Properties on Erodibility of Fine-grained Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.8, pp.89-96.
- Masch, F.D.Jr., Espey, W.H.Jr., and Moore, W.L. (1963), "Measurements of the Shear Resistance of Cohesive Sediments", *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, Agricultural Research Service, Publication No. 970, Washington, D.C., pp. 151-155.
- McNeil, J., Taylor, C., and Lick, W. (1996), "Measurement of Erosion of Undisturbed Bottom Sediments with Depth", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.122, Issue 6, pp.316-324.
- Ministry of Land (2014), "Measures of Ground for Sinkhole Prevention".
- Moore, W.L. and Masch, F.D., Jr. (1962), "Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments", *Journal of Geophysical Research*, Vol.67, No.4, pp.1437-1449.
- Parchure, T.M. and Mehta, A.J. (1985), "Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.111, No.10, pp.1308-1326.
- Shields, A. (1936), "Anwendung der Aenlickeitsmeckanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung", *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau*, W.P. Ott and J.C. Van Uchelen, translators, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- Shaikh, A., Ruff, J.F., and Abt, S.R. (1988a), "Erosion Rate of Compacted NA-montmorillonite Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.3, pp.296-305.
- Shaikh, A., Ruff, J.F., Charlie, W.A., and Abt, S.R. (1988b), "Erosion Rate of Dispersive and Nondispersive Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.5, pp.589-600.
- Strom, K.B., Papanicolaou, A.N., Billing, B., Ely, L.L., and Hendricks, R.R. (2005), "Characterization of Particle Cluster Bedforms in a Mountain Stream", *Impacts of Global Climate Change*, pp.1-12.
- Tenbusch Sr, A. and Tenbusch, A.F. (2009), "Quick Culvert Repair", *CE News*, 21(7).
- Trammell, M.A. (2004), "Laboratory Apparatus and Methodology

- for Determining Water Erosion Rates of Erodible Rock and Cohesive Sediments*", M.E. Thesis, University of Florida, Gainesville, Florida.
33. Wan, C.F. and Fell, R. (2004a), "Laboratory Tests on the Rate of Piping Erosion of Soils in Embankment Dams", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.27, No.3, pp.295-303.
34. Wan, C.F. and Fell, R. (2004b), "Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.4, pp.373-380.
35. Yim, S.H., Ryu, H.R., and Hwang, K.N. (2008), "Analyses on Local-Seasonal Variations of Erosional Properties of Cohesive Sediments in Keum Estuary", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.28, No.1, pp.125-135.
36. Yokota, T., Fukatani, W., and Miyamoto, T. (2012), "The Present Situation of the Road Cave in Sinkholes Caused by Sewer Systems (FY2006-FY2009)", *Technical Note of NILIM*, No.668.

Received : May 4th, 2016

Revised : June 30th, 2016

Accepted : June 30th, 2016