

시멘트 혼합토의 내구성 평가법에 관한 연구

A Study on Durability Test of Cemented Soils

박 성 식¹ Park, Sung-Sik황 세 훈² Hwang, Se-Hoon

Abstract

Cemented soils have been used for subbase or base materials of roads, backfill materials of retaining walls and cofferdam. Such cemented soils can be degraded due to repeated wetting and drying or various weathering actions. Unlike rocks, a standard method was not defined for evaluating the durability of cemented soils. In this study, a slaking durability test and an ultrasound cleaner were used for developing a new durability test method for cemented soils. For durability tests, cemented sands with different cement ratios (4, 6, 8, and 12%) with cylindrical specimens were prepared and then air cured or under-water cured for three days. Three-day-cured specimens were dried for one day and then submerged for one day before testing. The weight loss after the slake durability test or ultrasonic cleaner operation for 10 or 20 min was measured and used for assessing durability. When a cement ratio was 4%, the weight loss from ultrasonic cleaner test was 7-25% but that from slake durability test was as much as 30-60%. For specimens with cement ratio of more than 8%, the weight loss was less than 10% from both tests. A durability index increased with increasing a cement ratio. The durability index of under-water cured specimen was higher than that of air cured specimen. The ultrasonic cleaner test was found to be an effective tool for durability assessment of cemented sands rather than the slake durability test.

요 지

최근 소량의 시멘트를 혼합한 고결토가 도로 보조기층, 뒤채움재, 가물막이 댐 등 각종 토목 현장에서 많이 사용되고 있다. 이와 같이 시멘트비가 낮은 고결토는 반복되는 건습이나 다양한 풍화작용에 의해 내구성이 저하될 수 있다. 하지만 암석과 달리 고결토의 내구성을 평가하는 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 슬레이크 내구성시험과 초음파 세척기를 이용하여 시멘트가 혼합된 고결토의 내구성을 평가하기 위한 시험법을 개발하고자 하였다. 고결모래의 시멘트비(4, 6, 8, 12%)를 달리하여 원기둥 형태의 공시체를 제작한 다음 수중 또는 대기 중에서 3일 동안 양생하였다. 3일 양생 후 건조로에서 1일 동안 건조시킨 다음 다시 1일 동안 수침 시킨 후 슬레이크 내구성시험 및 초음파 세척기를 10분 또는 20분 동안 작동하여 시험 전후의 중량 손실 정도를 계산하여 내구성을 평가하였다. 시멘트비가 4%로 상당히 낮은 경우 고결모래의 중량 손실률은 7-25%인 초음파 세척기 시험법에 비해 슬레이크 내구성시험은 30-60%로 상대적으로 높았으나, 시멘트비가 8% 이상인 경우에는 두 시험방법 모두 중량 손실률이 10% 이내로 큰 차이가 없었다. 내구성지수는 시멘트비가 증가할수록 증가하였으며, 대기중 양생한 공시체보다 수중 양생한 공시체의 내구성지수가 높았다. 시멘트비가 낮은 고결토의 내구성을 평가하기에는 중량 손실이 많은 슬레이크 내구성시험보다 본 연구에서 새롭게 제안한 초음파 세척기를 이용한 시험법이 효과적임을 알 수 있었다.

Keywords : Cemented soils, Durability, Slake durability test, Ultrasonic cleaner

1 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, 교신저자)

2 비회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 5월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일본에서는 1970년대부터 쓰레기 매립장, 공항 및 항만 건설을 위해 연안지역 연약지반에 시멘트를 사용하여 지반을 고결시킴으로써 기초지반의 지지력을 충분히 확보하고 구조물의 침하량을 저감시킬 수 있었다(Takahashi et al., 2011). 최근까지 일본은 시멘트 혼합토에 대한 기술력을 꾸준히 축적하면서 시멘트 혼합토에 대한 다양한 연구를 수행하고 있다(Park et al., 2009b). 한편 국내에서도 현장에서 발생하는 토사에 시멘트를 소량(10-15% 정도)으로 혼합하여 가물막이댐 공사에 사용한 사례가 있으며(Kim et al., 2005), 최근 하상 모래에 시멘트를 혼합한 고결토(Kim et al., 2006)의 전단 거동을 비롯하여 시멘트 혼합토에 대한 다양한 연구를 수행하고 있다. 예를 들면, 양생방법이나 수침이 고결모래의 강도에 미치는 영향(Park et al., 2009a, 2009b), 세립분이 고결모래의 강도에 미치는 영향(Park and Choi, 2011), 염분이 고결모래의 양생과정이나 강도에 미치는 영향(Park and Lee, 2012) 등 시멘트 혼합토에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 하지만 이와 같이 시멘트를 소량으로 혼합한 시멘트 고결토는 강도가 1-2 MPa 정도이며, 동일한 시멘트를 사용하더라도 양생조건이나 주변 환경, 그리고 계절적 변화에 따라 강도가 크게 달라질 수 있다(Park et al., 2009a, 2009b). 특히 양생과정 중에 반복되는 건습은 공시체 내의 고결성분 용출 등으로 강도가 오히려 감소할 수도 있다(Park et al., 2009b). 즉, 충분한 강도와 내구성(durability)을 가지고 있는 콘크리트와는 달리 시멘트 혼합토는 고결력이 약하기 때문에 강도뿐만 아니라 내구성도 중요하게 평가되어야 한다.

내구성은 일반적으로 외부로부터 가해지는 힘이나 환경인자에 대해 오래 견디는 성질을 말하며, 건축이나 토목 재료를 대상으로 할 경우에는 시간에 따른 재료의 약화 및 풍화작용에 대한 저항성을 나타낸다. Kerali(2001)는 개발도상국에서 많이 사용되고 있는 시멘트를 혼합한 흙 벽돌의 내구성을 개선하기 위한 연구를 수행하였으며, Stavridakis(2005)는 슬레이크 내구성시험(slake durability test)을 이용하여 시멘트로 안정화된 점토의 내구성을 평가하기도 하였다. 하지만, 시멘트 혼합토의 내구성 평가법에 대한 연구 사례는 여전히 부족한 실정이다. 고결모래의 내구성은 온도 변화, 물로 인한 작용, 화학적 작용 등과 관련이 있으나, 본 연구에서는 물과 관련된 내구성을 평가하고자 하였다. 시멘트가 혼합된

고결토의 내구성을 평가하기 위하여 기존 암석의 내구성 평가에 사용되는 슬레이크 내구성시험과 초음파 세척기(ultrasonic cleaner)를 이용한 새로운 내구성 평가법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구결과를 이용하여 내구성이 우수한 시멘트 고결토를 위한 시멘트비나 양생 방법을 제시하고자 하였다.

2. 내구성시험을 위한 고결토 제작방법

본 연구에서는 낙동강 유역 달성보 현장에서 준설한 Fig. 1과 같은 낙동강모래를 사용하여 내구성시험을 위한 시편을 제작하였다. 낙동강모래는 실리카질 모래로 0.25-0.075mm 사이의 입도를 가지도록 체분석하였으며, 기본 물성치는 Table 1과 같다. 시멘트는 국내 S사의 초속경시멘트를 사용하였다. 시멘트비 CR(cement ratio)은 아래 식 (1)과 같이 정의하였으며, W_c 는 시멘트의 중량, W_s 는 건조된 모래의 중량이다.

$$CR(\%) = \frac{W_c}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

낙동강모래에 소량의 시멘트와 함수비 15%의 물을 섞은 다음 Fig. 2와 같은 장치를 이용하여 내구성시험 시편을 제작하였다. 시편의 크기는 Fig. 3과 같이 직경 30mm, 높이 30mm이다. 네 종류(4, 6, 8, 12%)의 시멘트비를 사용하여 동일한 사례에 2개의 시편을 제작한 다음 3일 동안 양생시켰다. 시편 양생조건은 현장조건을

Table 1. Material properties of Nakdong River sand

Specific gravity G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	USCS
2.637	0.19	0.24	1.32	1.04	1.181	0.849	SP

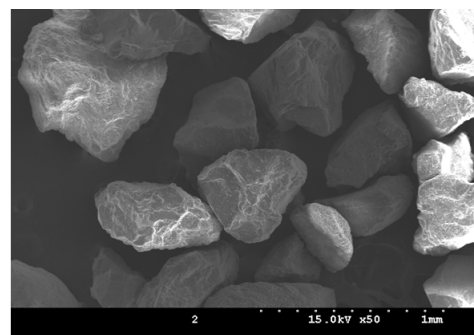


Fig. 1. SEM photo of Nakdong River sand



Fig. 2. Sample preparation device for durability test



Fig. 3. Shape of specimens for durability test

고려하여 두 가지 양생방법(대기중 양생, 수중 양생)으로 실시하였으며, 양생 이후에 함수비가 강도에 미치는 영향을 고려하여 1일 동안 건조로에 건조시킨 다음 내구성시험을 실시하였다.

3. 내구성 평가방법

암석의 내구성을 평가하기 위한 슬레이크 내구성시험과 본 연구에서 새롭게 제안하는 초음파 세척기를 이용한 시험법을 이용하여 고결토의 내구성을 평가하고자 하였다.

3.1 슬레이크 내구성시험

슬레이크 내구성시험은 Franklin and Chandra(1972)에 의해 제안되었으며, 앞으로 진행될 수 있는 암석의 풍화 가능성을 예측하는 데 주로 사용된다. 풍화작용에 대한 암석의 저항성을 측정하는 것은 암석의 풍화 정도를 결정하고 앞으로의 풍화 가능성을 예측한다는 중요한 의미를 가진다. 본 연구에서는 이와 같은 기존 슬레이크 내구성시험 장치를 이용하여 시멘트 혼합토의 내구성을 평가하였다. 이 시험은 1회 또는 2회의 건조 및 습윤을 반복한 후, 시료의 연화 또는 붕괴에 의한 저항

Table 2. Durability index by Gamble (1971)

Group name	$I_{d(1)}(\%)$	$I_{d(2)}(\%)$
Very high durability	> 99	> 98
High durability	98-99	95-98
Medium high durability	95-98	85-95
Medium durability	85-95	60-85
Low durability	60-85	30-60
Very low durability	< 60	< 30

의 정도를 평가하는 것이다. 슬레이크 내구성 시험방법은 다음과 같다.

슬레이크 내구성시험 장치는 2mm 표준 mesh로 제작한 길이 100mm, 직경 140mm의 원통형 드럼(drum)으로 구성되어 있다. 드럼의 회전 속도는 20rpm이며 이때 드럼의 하부 40mm는 물에 잠기게 한다. 건조중량이 약 40-60g정도인 둥근 모양의 시편을 준비한 다음 준비된 시편의 초기 건조중량(Initial Weight, IW)을 측정하고 시편을 드럼에 넣고 24시간 수침시킨다. 수침시킨 시편을 20rpm속도로 약 10분간 드럼을 회전시킨 다음 드럼에서 시편을 꺼내 105°C의 온도로 6시간 이상 건조시켜 시편의 건조중량(Final Weight, FW)을 측정한다. 슬레이크 내구성지수(Slaking durability index) $I_{d(N)}$ 은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 1회 또는 2회 실시한 회수에 따라 $I_{d(1)}$ 또는 $I_{d(2)}$ 로 표시하며 Table 2와 같이 암석의 내구성을 평가할 수 있다.

$$I_{d(N)}(\%) = \frac{N\text{회 실시 후의 건조중량 (FW)}}{\text{초기 건조중량 (IW)}} \times 100 \quad (2)$$

3.2 초음파 세척기를 이용한 시험법

시멘트를 혼합한 고결토를 앞서 설명한 슬레이크 내구성시험과는 달리 초음파 발생 장치를 이용하여 내구성을 평가하고자 하였다. 초음파 발생 장치로는 Fig. 4와 같은 렌즈, 귀금속을 세척하는 소형 초음파 세척기를 사용하였다. 초음파 세척기의 크기는 290×140×150mm, 용량은 6.0L, 최대 발진 주파수는 40kHz이고 진폭은 0.001cm이다. 초음파에 의해 발생하는 진동에너지(E)는 진폭(A) 및 주파수(f) 각각의 제곱에 비례한다($E \propto \rho \cdot A^2 \cdot f^2$). 본 장비는 초음파 주파수를 5단계로 조정 가능하며, 1-4단계에서는 진동에너지가 약해 최대 5단계로 설정하였으며, 이 때 주파수가 40kHz이다. 초음파 세척기를 이용한 고결토의 내구성 시험방법은 다음과 같다.



Fig. 4. Ultrasonic cleaner

초음파 세척기 용기 내에 물을 넣고 초음파 세척기의 온도를 25°C로 설정한 다음 주파수를 40kHz로 하여 10분 또는 20분 동안 초음파를 발생시켜 시멘트 혼합토의 고결력을 시험하였다. 3일 양생 후 1일 건조시킨 시멘트 비 4, 6, 8, 12%의 시편 초기 건조중량(Initial Weight, IW)을 측정하고 시편을 24시간 수침시킨 후 중량을 측정하는 다음 초음파 세척기에 넣어 실험하였다. 그리고 시편을 꺼내 105°C의 온도로 6시간 이상 건조시킨다. 건조시킨 시편의 건조중량(Final Weight, FW)를 측정하여

내구성을 평가하였다. 초음파 세척기를 이용한 내구성 지수 $I_{d(ultra)}$ 는 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$I_{d(ultra)}(\%) = \frac{\text{초음파 진동 후의 건조중량 (FW)}}{\text{초기 건조중량 (IW)}} \times 100 \quad (3)$$

4. 내구성시험 결과

기존의 슬레이크 내구성시험과 본 연구에서 새롭게 제안한 초음파 세척기를 이용한 방법으로 약하게 고결된 모래의 내구성을 평가하였다. Table 3 및 4에 대기중 및 수중 양생한 공시체의 내구성시험 결과를 비교 정리하였다. 7번째 열에 있는 값($FW/IW \times 100$)이 내구성지수 $I_{d(1)}$ 또는 $I_{d(ultra)}$ 를 나타내며, 8번째 열에 있는 값이 중량손실률($(IW-FW)/IW \times 100$)을 나타낸다. Fig. 5는 양생방법이 다른 각각의 공시체에 대한 슬레이크 내구성시험과 초음파 세척기를 이용한 시험법으로 구한 내구성지

Table 3. Summary of durability tests for air cured cemented sands

Test ID	Cement ratio (%)	Test type	Case	Initial weight (IW)	Final weight (FW)	(FW/IW) × 100 ⁽ⁱ⁾	(IW-FW)/IW × 100 ⁽ⁱⁱ⁾
AC4-S1	4	Slake test	Case 1	43.33	17.90	41.31	58.69
AC4-S2			Case 2	43.42	21.60	49.75	50.25
AC4-U1		Ultrasonic cleaner 10 min	Case 1	42.88	35.74	83.35	16.65
AC4-U2			Case 2	43.02	32.36	75.22	24.78
AC4-U3		Ultrasonic cleaner 20 min	Case 1	43.53	35.90	82.47	17.53
AC4-U4			Case 2	43.21	36.97	85.56	14.44
AC6-S1	6	Slake test	Case 1	43.87	23.30	53.11	46.89
AC6-S2			Case 2	44.43	27.76	62.48	37.52
AC6-U1		Ultrasonic cleaner 10 min	Case 1	44.20	40.82	92.35	7.65
AC6-U2			Case 2	44.24	40.80	92.22	7.78
AC6-U3		Ultrasonic wave 20 min	Case 1	44.71	39.42	88.17	11.83
AC6-U4			Case 2	44.37	39.52	89.07	10.93
AC8-S1	8	Slake test	Case 1	45.83	41.11	89.70	10.30
AC8-S2			Case 2	46.10	40.95	88.83	11.17
AC8-U1		Ultrasonic cleaner 10 min	Case 1	45.56	43.38	95.22	4.78
AC8-U2			Case 2	45.37	42.85	94.45	5.55
AC8-U3		Ultrasonic cleaner 20 min	Case 1	45.59	43.29	94.96	5.04
AC8-U4			Case 2	45.43	43.18	95.05	4.95
AC12-S1	12	Slake test	Case 1	47.47	46.10	97.11	2.89
AC12-S2			Case 2	47.17	45.52	96.50	3.50
AC12-U1		Ultrasonic cleaner 10 min	Case 1	46.73	45.63	97.65	2.35
AC12-U2			Case 2	46.58	45.54	97.77	2.23
AC12-U3		Ultrasonic cleaner 20 min	Case 1	47.34	45.59	96.30	3.70
AC12-U4			Case 2	46.89	45.08	96.14	3.86

(i) Durability index; (ii) Weight loss ratio

수가 시멘트비 증가에 따라 어떻게 변하는지를 비교하고 있다. 슬레이크 내구성시험과 초음파 세척기 시험법 모두 양생방법에 관계없이 시멘트비(4, 6, 8, 12%)가 증가함에 따라 내구성의 우수한 정도를 나타내는 내구성

지수는 증가하는 경향을 보였다. 시멘트비가 증가함에 따라 모래 입자간의 고결력이 증가하여 외부 충격이나 미소 진동에 의한 입자 소실이 감소하기 때문으로 판단된다.

Table 4. Summary of durability tests for under-water cured cemented sands

Test ID	Cement ratio (%)	Test type	Case	Initial weight (IW)	Final weight (FW)	(FW/IW) × 100 ⁽ⁱ⁾	(IW-FW)/IW × 100 ⁽ⁱⁱ⁾	
WC4-S1	4	Slake test	Case 1	43.49	31.08	71.46	28.54	
WC4-S2			Case 2	43.50	31.58	72.60	27.40	
WC4-U1		Ultrasonic cleaner 10 min	Case 1	43.50	39.80	91.49	8.51	
WC4-U2			Case 2	43.26	39.13	90.45	9.55	
WC4-U3		Ultrasonic cleaner 20 min	Case 1	43.51	40.00	91.93	8.07	
WC4-U4			Case 2	43.06	40.26	93.50	6.50	
WC6-S1		6	Slake test	Case 1	44.26	33.70	76.14	23.86
WC6-S2				Case 2	44.13	35.03	79.38	20.62
WC6-U1	Ultrasonic cleaner 10 min		Case 1	44.90	43.56	97.02	2.98	
WC6-U2			Case 2	44.32	42.71	96.37	3.63	
WC6-U3	Ultrasonic cleaner 20 min		Case 1	44.28	42.19	95.28	4.72	
WC6-U4			Case 2	44.05	42.70	96.94	3.06	
WC8-S1	8		Slake test	Case 1	45.88	44.21	96.36	3.64
WC8-S2				Case 2	45.53	43.96	96.55	3.45
WC8-U1		Ultrasonic cleaner 10 min	Case 1	46.32	44.78	96.68	3.32	
WC8-U2			Case 2	45.44	44.27	97.43	2.57	
WC8-U3		Ultrasonic cleaner 20 min	Case 1	45.91	44.47	96.86	3.14	
WC8-U4			Case 2	46.00	44.83	97.46	2.54	
WC12-S1		12	Slake test	Case 1	47.51	46.82	98.55	1.45
WC12-S2				Case 2	47.60	46.67	98.05	1.95
WC12-U1	Ultrasonic cleaner 10 min		Case 1	47.39	46.68	98.50	1.50	
WC12-U2			Case 2	47.53	46.77	98.40	1.60	
WC12-U3	Ultrasonic cleaner 20 min		Case 1	47.55	46.45	97.69	2.31	
WC12-U4			Case 2	47.51	46.40	97.66	2.34	

(i) Durability index; (ii) Weight loss ratio

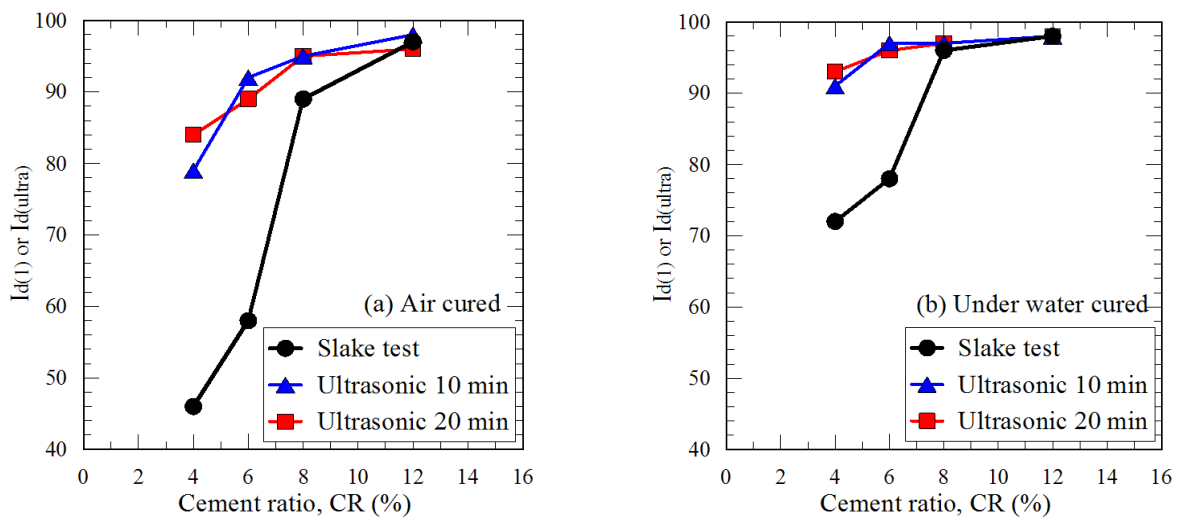


Fig. 5. Comparison of durability index for air cured and under-water cured specimens

초음파 세척기 시험법보다 슬레이크 내구성시험으로 구한 내구성지수가 전반적으로 낮게 나타났다. 특히 시멘트비 4%로 대기중 양생한 공시체의 경우 슬레이크 내구성시험으로 구한 내구성지수가 50 이하로 초음파 세척기 시험법으로 구한 값의 절반 정도로 상당히 낮은 값을 보였다. 초음파 작동시간(10분과 20분)에 따른 내구성지수의 차이는 시멘트비가 6, 8, 12%인 경우 크게 나타나지 않았다. 하지만 시멘트비가 4%인 경우 작동시간이 증가함에 따라 내구성이 다소 증가하는 경향을 보이지만 이것은 낮은 시멘트비로 인한 오차로 볼 수 있으므로 초음파 작동시간에 따른 내구성 차이는 전반적으로 무시할 수준이라 판단된다.

대기중에서 양생한 공시체보다 수중에서 양생한 공시체의 내구성지수가 높게 나타났으며, 특히 시멘트비가 낮은 4%의 경우 그 차이가 심하게 나타났다. 즉, 슬레이크 내구성시험, 초음파 세척기 10분 및 20분 작동시킨 경우, 대기중 양생보다 수중 양생시킨 공시체의 내구성지수가 각각 26, 12, 9 정도 높게 나타났다. 이것은 대기중에서 양생한 공시체의 외부가 공기 중에 노출되면서 풍화가 일부 발생한 것으로 판단되며, 이로 인하여 공시체의 내구성이 상대적으로 감소한 것으로 판단된다.

Table 5는 각각의 내구성 시험법으로부터 구한 내구성지수의 평균값과 그 차이를 비교하고 있다. 여기서 양생방법이 다른 공시체의 결과는 평균하였으며, 초음파 세척기 10분 및 20분 시험법 결과도 모두 평균하여 사용하였다. 시멘트비가 낮은 경우에는 시험방법에 따른 차이가 심하였으나, 시멘트비가 8% 이상인 경우에는 그 차이가 미미하였으며 12%인 경우에는 차이가 나지 않았다.

Fig. 6은 본 연구에서 사용한 낙동강모래를 시멘트비 4, 8, 12%로 고결시킨 공시체의 일축압축강도(Unconfined compressive strength, UCS)(Park and Lee(2012)의 실험 결과를 사용함)와 본 연구에서 구한 내구성지수와의 상관성을 나타내고 있다. 내구성 평가방법 중에서 초음파 세척기 시험법으로 구한 내구성지수 $I_{d(ultra)}$ 와 시멘트비 4, 8, 12%로 대기중 양생(식 4) 및 수중 양생한(식 5) 공시체의 일축압축강도(UCS)와의 상관관계를 단순 수식화해 보았다. 대기중 양생한 공시체의 경우에는 일축압축강도가 내구성지수와 일부 연관성이 있는 것으로 판단되지만, 수중 양생한 공시체의 경우에는 내구성지수가 전반적으로 높아 합리적인 강도 예측은 어려울 것으로 판단된다.

Table 5. Comparison of durability index of cemented soils depending on testing methods

Cement ratio	Avg. Slaking durability index $I_{d(1)}$ (%)	Avg. Ultrasonic cleaner durability index $I_{d(ultra)}$ (%)	$I_{d(ultra)}(\%) - I_{d(1)}(\%)$
4%	59	87	28
6%	68	94	26
8%	93	96	3
12%	98	98	0

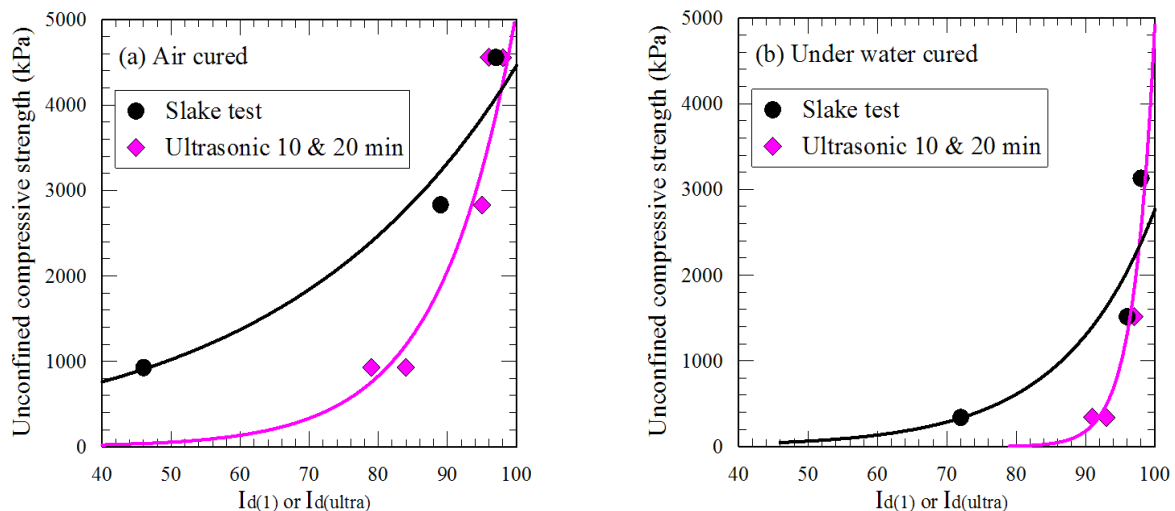


Fig. 6. Relationship between durability index and unconfined compressive strength



Fig. 7. Under-water cured specimens after slaking durability tests (CR = 4, 8, 12%)

$$UCS(kPa) = 0.580 \times EXP(0.0908 * I_{d(ultra)}(\%)) \quad (4)$$

$$UCS(kPa) = 2.175 \times 10^{-11} \times EXP(0.3305 \times I_{d(ultra)}(\%)) \quad (5)$$

모래의 고결력이 낮은 공시체(특히 시멘트비 4%)의 경우 슬레이크 내구성시험으로 내구성을 평가하면 Fig. 7과 같이 공시체의 상당 부분이 손실되거나 마모가 발생하였다. 하지만 40kHz 초음파 세척기를 이용하여 발생하는 진동으로 시멘트비 10% 이내의 고결모래의 내구성 또는 고결력을 평가하기에는 적합한 것으로 판단되었다. 그러나 시멘트비가 10% 이상으로 비교적 단단한 경우 진동으로 감소하는 시편의 중량이 다소 적으므로 진폭이나 진동주파수를 증가시켜 진동에너지를 증가시킨다면 적용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 실시한 실험 결과를 바탕으로 초음파세척기 내구성지수는 95%를 기준으로 양호와 불량으로 나눌 수 있으며, 이 기준을 바탕으로 추가 연구를 실시한다면 Table 2와 같이 더욱 세분화된 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

시멘트를 혼합한 고결토가 다양한 현장에 사용되고 있으나, 이와 같은 고결토의 내구성을 평가하기 위한 방법에 대한 연구는 상당히 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 암석의 내구성 평가에 사용되는 방법인 슬레이크 내구성시험을 이용하여 시멘트 혼합토의 내구성을 평가하였다. 또한 초음파 세척기를 이용하여 시멘트 혼합토의 내구성을 평가하는 방법을 본 연구에서 새롭게 제안하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 슬레이크 내구성시험, 초음파 세척기 시험법 모두 시멘트비가 증가할수록 중량 손실이 감소하면서 내구성이 증가하는 것으로 나타났다. 수중 양생한 공

시체의 내구성이 대기중 양생한 공시체 보다 높게 나타났다.

- (2) 시멘트비가 낮은 공시체의 경우 슬레이크 내구성시험으로 다량의 중량 손실이 발생하므로 초음파 세척기를 이용한 고결토의 내구성 평가방법이 더욱 효과적이며 그 적용 가능성을 보여 주었다.
- (3) 시멘트비가 낮은 대기중 양생한 공시체의 경우 내구성지수 $I_{d(ultra)}$ 와 일축압축강도 UCS가 $UCS(kPa) = 0.580 \times EXP(0.0908 * I_{d(ultra)}(\%))$ 과 같이 상관성이 있는 것으로 나타났다.
- (4) 내구성이 우수한 시멘트 혼합토를 얻기 위해 시멘트비는 8% 이상 필요할 뿐 아니라 수중 양생과 같이 충분한 수분을 공급할 필요가 있다.
- (5) 시멘트 고결토의 사용량은 점점 증가하는 상황이지만 고결토의 내구성을 평가할 수 있는 방법은 부족하므로 앞으로 초음파 장치를 비롯한 다양한 장치를 사용한 고결토의 내구성 평가법이 제안될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신F01)에 의해 수행되었으며, 일부는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었으며 (No. 2010-0023540) 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Franklin, J. A. and Chandra, R. (1972), "The slake durability test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.9, pp.325-341.
2. Gamble, J. C. (1971), "Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks", Ph. D. Thesis, University of Illinois.
3. Kerali, A. G. (2001), "Durability of compressed and cement-stabilised building blocks", Ph.D. Thesis, University of Warwick.

4. Kim, Y. S., Jeong, W. S., and Kim, K. Y. (2006), "Shear behavior of river sand due to cement contents", *Proceedings of the Korean Geotechnical Society fall national conference*.
5. Kim, K. Y., Park, H. G., and Jeon, J. S. (2005), "Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.10, pp.61-71.
6. Park, S. S. and Choi, S. K. (2011), "Effect of Fines on Unconfined Compressive Strength of Cemented Sands", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.31, No.6C, pp.213-220.
7. Park, S. S., Kim, K. Y., Choi, H. S., and Kim, C. W. (2009a), "Effect of Different Curing Methods on the Unconfined Compressive Strength of Cemented Sand", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.5C, pp.207-215.
8. Park, S. S., Kim, K. Y., Kim, C. W., and Choi, H. S. (2009b), "Strength Variation of Cemented Sand Due to Wetting", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.6C, pp.303-311.
9. Park, S. S. and Lee, J. W. (2012), "Effect of Sea Water on Curing and Strength of Cemented Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.71-79.
10. Stavridakis, I. E. (2005), "Presentation and assessment of clay influence on engineering parameters of cement-treated clayey mixtures", *Electric Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.10.
11. Takahashi, H., Kitazume, M., Noguchi, T., and Suzuki, N. (2011), "Seismic-resistant effect of cement-treated soil for quay wall", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, Vol.164, No.3.

(접수일자 2012. 9. 21, 심사완료일 2012. 11. 16)