

고결모래의 일축압축강도와 전단파속도의 상관관계

Relationship between Unconfined Compressive Strength and Shear Wave Velocity of Cemented Sands

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

황 세 훈² Hwang, Se-Hoon

Abstract

Cemented soils have been widely used in road and dam construction, and recently ground improvement of soft soils. The strength of such cemented soils can be tested by using cored sample or laboratory-prepared specimen through unconfined compression or triaxial tests. It takes time to core a sample or prepare a testing specimen in the laboratory. In a certain situation, it is necessary to determine the in-situ strength of cemented soils very quickly and on time. In this study, the relation between unconfined compressive strength and shear wave velocity was investigated for predicting the in-situ strength of cemented soils. A small cemented specimen with 5 cm in diameter and 10 cm in height was prepared by Nakdong river sand and ordinary Portland cement. Its cement ratios were 4, 8, 12, and 16% and air cured for 7, 14, and 28 days. For recycling of resources, a blast furnace slag was also used with sodium hydroxide as an alkaline activator. The shear wave velocity for cemented soils was measured and then unconfined compressive strength test was carried out. As a cement ratio increased, the shear wave velocity and unconfined compressive strength increased due to increased density and denser structure. The relation between unconfined compressive strength and shear wave velocity increased nonlinearly for cemented soils with less than 16% of cement ratio.

요 지

시멘트 혼합토는 도로 및 댐 현장을 비롯하여 최근에는 연약지반 개량공법에도 자주 사용되고 있다. 시멘트 혼합토의 강도는 주로 현장에서 채취한 코어나 실험실에서 양생한 공시체를 이용하여 실내에서 일축압축시험이나 삼축압축시험을 통하여 측정되고 있다. 이와 같이 현장에서 시료를 채취하거나 실내에서 공시체를 양생하기 위해서는 상당한 비용과 시간이 소요된다. 하지만 때론 현장에서 빠르고 신속하게 지반의 고결 정도나 강도를 판단할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 고결된 지반의 강도 예측을 위한 기초연구로서 고결모래의 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계를 연구하였다. 낙동강모래에 보통 포틀랜드 시멘트를 4, 8, 12, 16%로 혼합하여 다짐방법으로 직경 5cm, 높이 10cm의 소형 공시체 제작한 다음, 대기 중에서 7, 14, 28일 동안 양생하였다. 또한 최근 자원 재활용을 위해 자주 사용되고 있는 고로슬래그에 알칼리 활성화제인 수산화나트륨(NaOH)을 혼합하여 고결토를 제작하였다. 양생이 완료된 고결모래에 먼저 전단파속도시험을 실시한 다음 일축압축시험을 통하여 강도를 측정하였다. 고결모래의 시멘트비와 고로슬래그비가 증가할수록 공시체의 건조밀도가 증가하고 생성된 수화물로 인해 구조가 치밀해져

1 정회원, 경북대학교 공과대학 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, Corresponding author, 교신저자)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

일축압축강도가 증가하면서 전단파속도 또한 증가하는 경향을 보였다. 고결제를 16% 이하로 혼합한 고결모래의 경우 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계는 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

Keywords : Cemented soils, Unconfined compressive strength, Shear wave velocity, Blast furnace slag

1. 서론

일본에서는 1970년대부터 연안지역에 쓰레기 매립장, 공항 및 항만 건설을 위해 연약지반에 시멘트를 사용하여 지반을 고결시킴으로써 기초지반의 지지력을 충분히 확보하고 구조물의 침하량을 저감시킬 수 있었다(Takahashi et al., 2011). 국내에서도 현장에서 발생하는 토사에 시멘트를 10~15% 정도 소량으로 혼합하여 댐 공사에 사용한 사례가 있으며(Kim et al., 2005), 관련 시멘트 고결토에 대한 강도 및 내구성시험을 비롯한 다양한 연구가 수행되고 있다(Park and Hwang, 2012). 한편 Park and Choi(2013)는 자원 재활용을 위해 시멘트를 전혀 사용하지 않고 잠재 수경성을 지닌 고로슬래그와 알칼리 활성화제만으로 모래의 고결을 유도하기도 하였다. 일반적으로 고결모래의 강도는 일축압축시험이나 삼축압축시험과 같은 실내시험을 통하여 측정한다. 이러한 실내시험에는 현장에서 채취한 코어나 장기간 양생한 공시체를 사용하므로 많은 시간과 인력 그리고 비용이 소요된다. 따라서 현장에서 신속하게 고결된 지반의 강도를 예측할 수 있는 방법이 필요하다.

Shirley and Hampton(1978)에 의해 지반공학 분야에 처음 사용된 벤더엘리먼트(bender element)는 삼축 셀의 캡에 설치하여 공시체의 강성 측정에 액추에이터와 트랜스듀스로 활용되고 있다. 벤더엘리먼트는 흡과 트랜스듀서 간의 뛰어난 결합 효과를 보여 각종 토질시험에 적용하기 편리한 전단파 트랜스듀서이다(Lee and Lee, 2006). 이를 이용하여 연약지반의 전단탄성계수(G)를 측정하거나 강도 또는 밀도와 같은 기존 물성치와의 상관관계를 규명하기 위한 많은 연구가 수행되었다. Park(2008)은 벤더엘리먼트를 이용한 관입형 현장 탄성파시험 장비 개발하였으며, 이를 이용하여 정규압밀 점성토의 전단파속도와 비배수전단강도 및 밀도의 상관관계를 규명하였다. Oh et al.(2008)도 인천의 한 연약지반에서 채취한 시료를 통하여 실내에서 전단파속도를 계측하고, 계측된 전단파속도를 이용하여 비배수전단강도 및 밀도와의 상관관계를 도출하였다. Chan and Ch'ng(2010)은

시멘트로 고결된 카오린에 대한 전단파속도와 일축압축강도를 측정하기도 하였다. 하지만 기존의 벤더엘리먼트를 불교란시료나 고결시료에 적용시키기 위해서는 센서를 공시체에 관입시켜야 하는데 이 과정에서 일부 교란이 발생하기 때문에 어려움이 있다(Amaral et al., 2011; Pineda et al., 2008). 이와 같은 어려움을 극복하기 위해 Suwal and Kuwano(2013)는 판(disk) 형태의 센서를 개발하여 공시체의 표면에 센서를 부착하여 탄성파를 측정하기도 하였다. 이러한 어려움 등으로 인하여 고결된 공시체에 대한 전단파속도 측정 자료는 아직도 부족한 실정이다.

본 연구에서는 고결된 현장 지반의 강도 예측을 위해 시멘트와 고로슬래그로 고결된모래의 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계를 비교 분석하였다. 낙동강 모래에 네 종류(4, 8, 12, 16%)의 시멘트비 또는 고로슬래그비를 사용하여 공시체를 제작하였으며, 제작된 공시체는 대기 중에서 7, 14, 또는 28일 동안 양생하였다(단, 고로슬래그를 사용한 공시체는 28일 동안만 양생함). 양생이 완료되면 벤더엘리먼트로 공시체의 전단파속도를 측정하고 다음 일축압축시험을 실시하였다. 본 실험결과로부터 얻은 고결모래에 대한 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계를 이용하면 현장에서 고결지반의 강도를 신속하게 예측할 수 있다.

2. 고결모래 제작방법

2.1 모래

본 연구에서는 낙동강 유역에서 준설했던 낙동강모래를 사용하여 실내시험을 위한 소형공시체를 제작하였다. 낙동강모래의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같으며, 최대간극비와 최소간극비는 각각 1.181과 0.849이다. 기본 물성치는 Table 1과 같으며, 통일분류법 상 빈입도 모래(SP)로 분류된다. 낙동강모래는 실리카(이산화규소)가 78% 이상인 실리카질 모래로 입자는 약간 모난 형태를 하고 있으며 색깔은 다소 붉은 색을 띠고 있다.

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

Table 2. Chemical composition of blast furnace slag

Component	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe	MgO	S	MnO	TiO_2
Content (%)	40.22	23.11	22.87	7.01	3.14	2.03	0.60	1.02

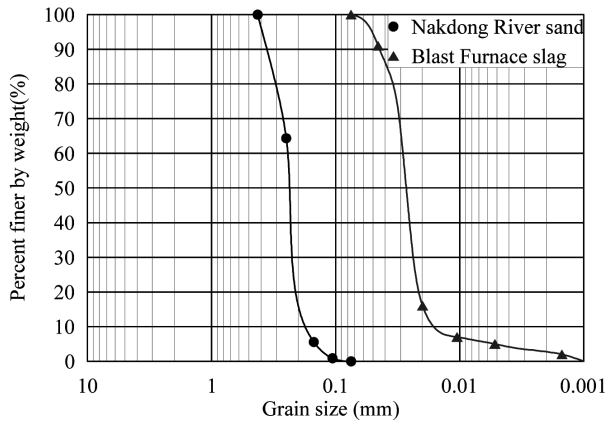


Fig. 1. Grain size distribution curves of Nakdong River sand and blast furnace slag

2.2 시멘트와 고로슬래그

시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고로슬래그(blast furnace slag)의 일반적인 성분은 포틀랜드 시멘트와 유사한 성분으로 구성되어 있으며 알루미늄 규산염이라 할 수 있다. 하지만 고로슬래그는 선철을 제련하는 과정에서 발생하는 부산물이기 때문에 철광석의 품질 및 제조과정에 따라 화학적 성분이 다소 차이 날 수 있으며, 본 연구에 사용한 고로슬래그의 화학적 구성은 Table 2와 같으며 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다.

2.3 공시체 제작방법

낙동강모래에 정해진 양의 보통 포틀랜드 시멘트를 섞은 다음 함수비 15%로 혼합하여 Fig. 2와 같은 성형 몰드와 램머(rammer)를 사용하여 5층으로 나누어 직경 5cm, 높이 10cm인 공시체를 제작하였다. 다짐에 사용한 램머의 직경은 4.7cm이고 무게는 1kg이며, 저다짐방법 (under compaction) (Ladd, 1978)을 사용하여 다짐이 최종적으로 완료되었을 시에 층당 높이 2cm가 되도록 공시체를 제작하였다. Fig. 3과 같이 제작 후 7, 14, 또는

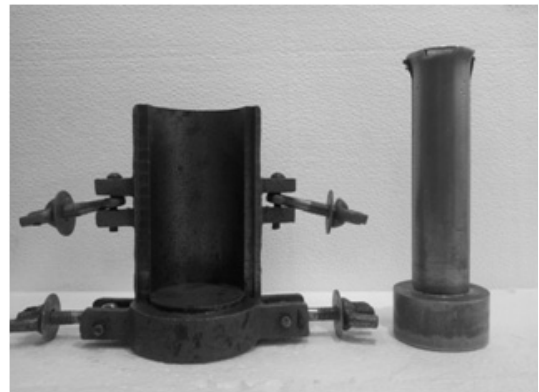


Fig. 2. Mold and rammer

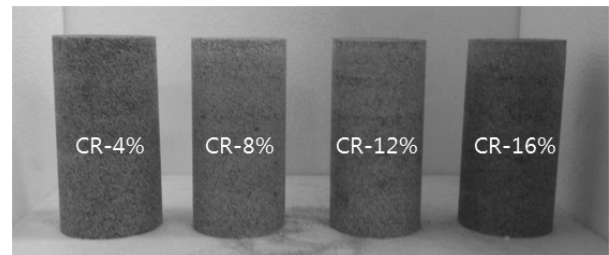


Fig. 3. Prepared specimens with different cement ratio

28일 동안 대기 중 양생하였다. 본 논문에서는 지표면 얇은 곳에 지하수가 없는 경우에 시공되는 고결모래를 대상으로 연구하였다.

고로슬래그를 이용한 공시체의 제작방법은 모래와 고로슬래그를 비빈 다음 알칼리 활성화제인 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 최적함수비(15%)로 혼합하여 성형몰드와 램머를 사용하여 공시체를 제작하였다. 제작 후 28일 동안 대기 중 양생하였다.

3. 전단파속도 측정방법

3.1 전단파속도 실험방법

벤더엘리먼트를 사용하여 흙의 강성이나 밀도를 예측하는 방법에 대해 Lee and Lee(2006)가 상세하게 소

개한 바 있다. 공시체의 전단파속도를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 공시체 받침과 상부 캡에 벤더엘리먼트를 부착하여, 각각 전단파를 발생하는 발신 벤더엘리먼트와 전단파 신호를 받는 수신 벤더엘리먼트로 사용하였다. Fig. 5와 같이 함수발생기(function generator)로 신호를 발생하고 상부 캡에 설치한 발신 벤더엘리먼트로 전단파를 발생시킨다. 여기서 발생한 전단파는 공시체를 따라 전파되어 공시체 받침에 설치된 수신 벤더엘리먼트에 도달하게 된다.

벤더엘리먼트를 고결된 공시체에 삽입하기 위하여 송곳으로 공시체 상하부 중심에 폭 9mm, 두께 1mm, 깊이 5mm의 구멍을 뚫었다. 구멍은 벤더엘리먼트 크기만큼 최소화하였으며, 발생된 공극에는 공시체에 사용된 모래보다 약간 가는 모래로 채운 다음 실험을 실시하였다. 한편 Chan and Ch'ng(2010)은 시멘트로 고결된 카오린 공시체에서 벤더엘리먼트와의 빈 공극을 공작용 점토(plasticine)로 채워 공시체와 벤더엘리먼트 사이의 양호한 접촉을 유지하였다. 함수발생기의 전압을 10V, 주파수를 40kHz의 단일 정현파로 전단파를 발생하고,

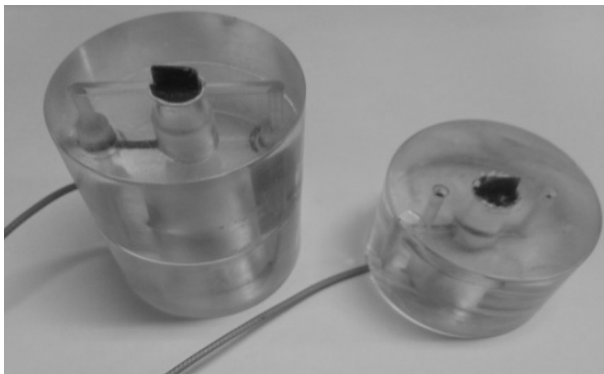


Fig. 4. Base and top pedestals

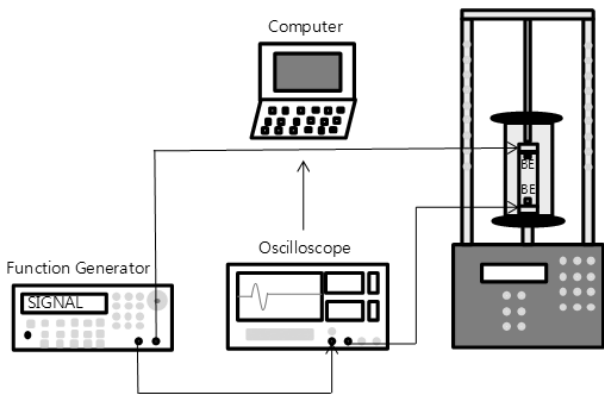


Fig. 5. Measuring system of shear wave velocity and unconfined compressive strength

공시체의 축방향으로 전달되어 수신 벤더엘리먼트에 도달한 전단파를 Fig. 5와 같이 오실로스코프(oscilloscope)로 측정하였다. 모래의 밀도나 고결도가 높을 경우에는 본 연구에서 사용한 40kHz보다 더 높은 주파수를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 현장 응력 상태를 비롯하여 표면이 다소 불규칙한 공시체와 벤더엘리먼트의 접지를 고려해 공시체의 고결결합을 손상시키지 않는 50kPa 정도의 수직응력을 가하였다. 일반적으로 미고결된 흙에서는 구속압의 증가에 따라 전단파속도는 다소 증가하는 경향을 보이지만(Lee and Lee, 2006), 일단 고결이 완료된 흙에서의 탄성파속도는 추가적인 하중 증가에도 일정한 값을 보인다(Lee et al., 2008). 본 연구에서도 공시체가 파괴되지 않도록 수직응력을 100kPa 및 200kPa까지 단계적으로 증가시키면서 전단파속도를 측정할 결과 전단파속도의 변화는 없었다. 따라서 50kPa로 수직응력을 가한 상태에서 전단파속도를 측정한 다음 일축압축시험을 실시하였다.

3.2 전단파속도 계산방법

전단파속도 V_s 는 식 (1)과 같이 전단파의 이동거리 L 을 전파시간 T 로 나누어 계산하였다.

$$V_s = \frac{L}{T} \quad (1)$$

벤더엘리먼트를 이용하여 전단파속도를 구할 때 전단파의 이동거리는 대부분의 연구자들에 의해 벤더엘리먼트 끝단 간의 거리로 계산한다(Dyvik and Madshus, 1985; Lee and Lee, 2006). Dyvik and Madshus(1985)는 벤더엘리먼트시험 결과를 공진주시험 결과와 비교하였고, Viggiani and Atkinson(1995)은 전단파의 이동시간과 시편의 길이를 비교하여 벤더엘리먼트 끝단 간의 거리가 전단파의 이동거리임을 밝혔다. 하지만 벤더엘리먼트를 이용한 전단파시험을 시행할 때, 압축파 및 근접장 효과 등으로 인하여 정확한 전단파속도의 전파시간을 결정하는데 어려움이 있다.

전단파의 전파시간을 결정하기 위하여 입력파와 수신파 사이의 유사한 전파 특성을 보이는 지점을 선정하여 두 점 사이의 시간 차이를 전파시간으로 설정하여 전단파속도를 산출할 수 있다. 가장 많이 사용되는 방법은 Fig. 6과 같이 입력파와 수신파의 peak값 사이의 시

간 차이를 이용하여 전파시간을 계산하는 peak to peak 방법이 널리 사용된다(Kim, 2011). 본 연구에서도 peak to peak 방법으로 전파시간을 결정하고 벤더엘리먼트의

양 끝단 간의 거리를 이동거리로 하여 전단파속도를 계산하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 고결모래의 일축압축강도

낙동강모래에 고결제로 시멘트 또는 고로슬래그를 4, 8, 12, 16%로 섞어 만든 공시체에 대한 실험 결과를 Table 3에 정리하였다. 각각의 경우에 세 개의 공시체를 제작하였으며, 실험 결과가 유사한 두 경우에 대해 본 연구에서 분석하였다. 먼저 일축압축강도에 대한 실험

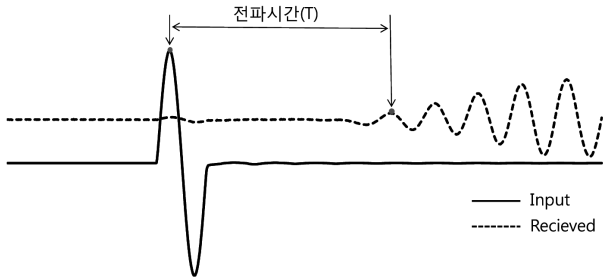


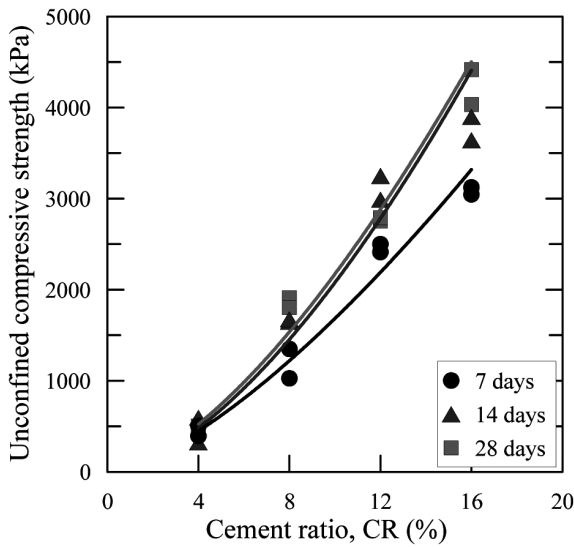
Fig. 6. Decision method of propagation time

Table 3. Results of unconfined compression test and shear wave velocity measurement

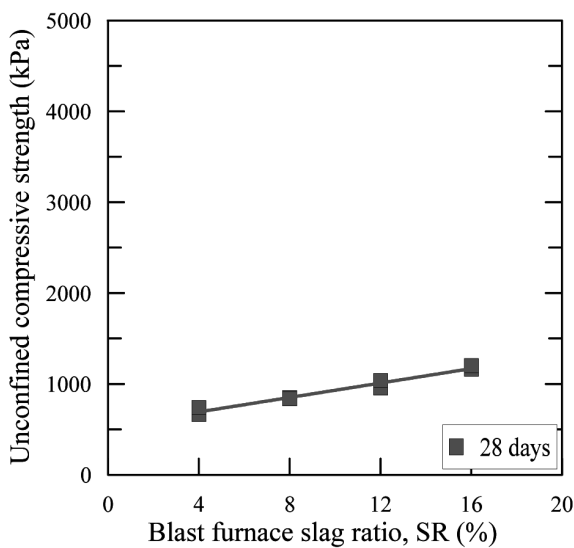
Cementing material	Curing period (days)	Cement ratio (%)	Dry density (g/cm ³)	Water content (%)	Unconfined compressive strength (kPa)	Shear wave velocity, Vs (m/s)	Shear modulus, G (MPa)	
Ordinary Portland cement	7	4	1.534	0.72	504	749	860	
			1.529	0.79	395	735	826	
		8	1.611	1.11	1,027	780	980	
			1.613	0.91	1,350	788	1,002	
		12	1.636	1.40	2,501	891	1,299	
			1.647	1.62	2,414	884	1,287	
		16	1.688	2.00	3,047	924	1,441	
			1.699	1.87	3,125	962	1,572	
		14	4	1.540	0.72	323	665	681
				1.535	0.79	593	603	558
	8		1.606	1.12	1,650	823	1,088	
			1.612	1.14	1,675	836	1,127	
	12		1.660	1.16	3,249	964	1,543	
			1.654	1.77	2,989	970	1,556	
	16		1.697	1.99	3,641	1,074	1,957	
			1.692	1.73	3,899	1,064	1,916	
	28		4	1.541	0.60	461	591	538
				1.541	0.34	502	584	526
		8	1.620	0.94	1,914	811	1,066	
			1.611	1.60	1,804	801	1,034	
		12	1.662	1.66	2,755	941	1,472	
			1.677	1.15	2,792	943	1,491	
		16	1.707	1.77	4,034	1,044	1,861	
			1.710	1.53	4,418	1,047	1,875	
Blast furnace slag		4	1.641	0.69	665	474	369	
			1.648	0.73	741	486	389	
	8	1.649	0.80	851	513	434		
		1.650	0.79	835	511	431		
	12	1.681	0.75	955	544	497		
		1.682	0.85	1,036	547	503		
	16	1.685	0.86	1,161	602	611		
		1.685	0.86	1,202	610	627		

결과는 다음과 같다.

Fig. 7은 모래에 포함된 고결제의 양이 증가함에 따라 고결제의 종류에 관계없이 일축압축강도가 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 고결제의 양이 4%에서 16%로 증가함에 따라 시멘트로 고결된 경우 일축압축강도가 평균 463kPa에서 3,694kPa로 8배 정도 증가하는 경향을 보이지만, 고로슬래그의 경우에는 703kPa에서 1,182kPa로 2배 정도만 증가하였다. 시멘트의 경우에는 기존 연구 사례(Park et al., 2009; Park and Lee, 2012)와 유사하게 시멘트비 증가에 따라 뚜렷한 강도 증가가 나타났으나, 고로슬래그의 경우에는 기존 연구 사례(Park and Choi, 2013)와 달리 뚜렷한 강도 증가가 나타나지



(a) Cement used



(b) Blast furnace slag used

Fig. 7. Unconfined compressive strength vs. cement or blast furnace slag ratio

않았다. Park and Choi(2013)의 경우 실내 평균 온도가 20°C인 실험실에서 3일 또는 7일 동안 대기 중 양생하였지만, 본 연구에서는 30°C가 넘는 비교적 높은 온도에서 공시체를 제작하여 28일 동안 대기 중 양생하였다. 따라서 제작 및 양생 중의 높은 온도로 인하여 화학반응에 필요한 수분이 조기에 증발하면서 고로슬래그의 수화반응이 충분히 발생하지 않았기 때문으로 판단된다. 한편 고로슬래그가 대기 중에 장시간 노출되면서 풍화가 발생한 것도 일부 원인으로 판단된다.

Yu(2001)에 의하면 시멘트의 수화반응에 필요한 이론수량은 시멘트 페이스트량의 약 40% 정도이며 이 가운데 25%는 시멘트 중의 각 성분과 화학적으로 결합하는데 사용되고 15% 정도는 수화물에 고착되는 수량이다. 즉, 절반 정도의 수량은 공시체 내 공극에 남아 있으면서 시간에 따라 증발하게 된다. 시멘트의 함유량이 높을수록 생성되는 수화물의 증가로 공시체 내 공극이 감소하고 조직이 치밀해지면서 증발하는 수분이 감소하여 공시체의 함수비는 약간 증가하는 경향을 보였다. 공시체의 건조밀도는 시멘트비가 증가함에 따라 평균 1.54g/cm³에서 1.70g/cm³ 정도로 약 10% 정도 증가하였다. 이와 같은 건조밀도의 증가는 비중이 높은 시멘트 양의 증가와 공극 내 수화물이 증가하였기 때문으로 판단된다. 고로슬래그도 함유량이 증가함에 따라 공시체 내 수화물 증가로 건조밀도가 1.64g/cm³에서 1.69g/cm³으로 3% 정도 약간 증가하였고, 함수비도 약간 증가하였다.

Fig. 8은 시멘트로 고결된 모래의 양생기간에 따른

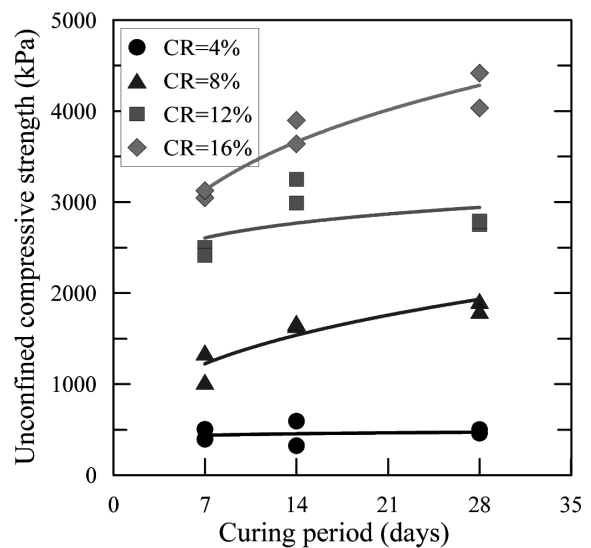


Fig. 8. Unconfined compressive strength vs. curing period

일축압축강도 변화를 비교하고 있다. 시멘트비 8%와 16%의 경우에는 양생기간이 길어질수록 일축압축강도가 증가하지만, 시멘트비 4%와 12%의 경우에는 양생기간이 길어질수록 일축압축강도가 비슷하거나 오히려 감소하였다. 특히 28일 양생한 경우에 오히려 강도가 감소한 것은 대기 중에서 양생할 경우 수분 증발로 인해 필요한 수분이 지속적으로 공급되지 않으면서 대기 중 공기와 접하고 있는 공시체 외부로부터 조기에 풍화가 시작된 것으로 판단된다. 기존 고결모래의 연구사례(Park et al., 2009)에 비해 공시체의 수분 증발이 다소 빠르게 진행되면서 본 연구에서 제작한 공시체의 강도발현이 전반적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

4.2 고결모래의 전단파속도

Fig. 9와 10은 일축압축시험 전에 측정된 고결모래의 전단파속도를 비교하고 있다. 기존 연구 사례(Cho and Lee, 2002)에 의하면 건조 자갈의 경우 150~500m/s, 건조 모래의 경우 200~300m/s의 전단파속도가 측정되었다. 본 연구에서 시멘트로 고결된 모래의 경우에는 전단파속도가 약 600~1000m/s 정도, 고로슬래그를 사용한 경우에는 약 500~600m/s 정도로 측정되어 미고결 재료 보다는 2-3배 정도 높은 값을 얻었다. Chan and Ch'ng (2010)에 의하면 카오린의 경우 시멘트를 사용하지 않은 경우 전단파속도가 240m/s, 시멘트를 6% 혼합한 경우 480m/s로 2배 정도의 속도 증가가 발생하였다. Fig.

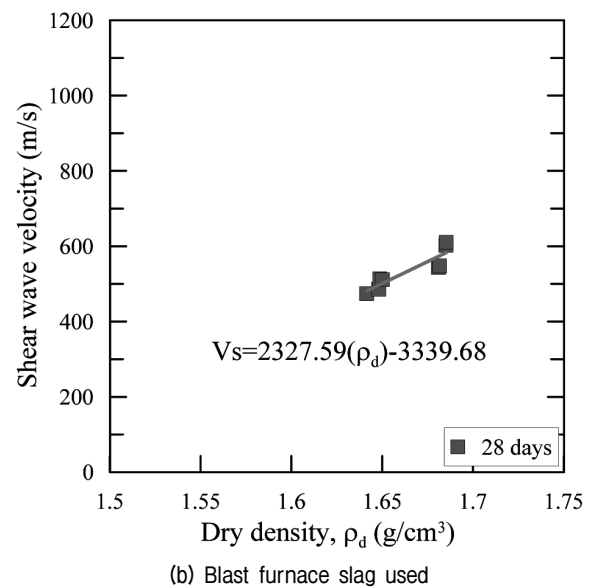
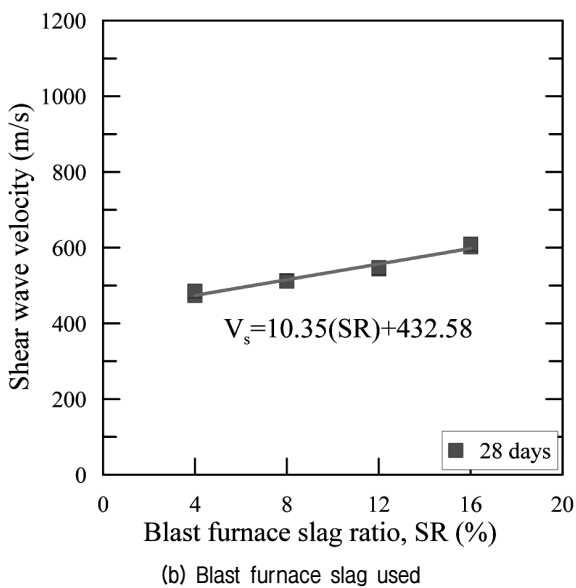
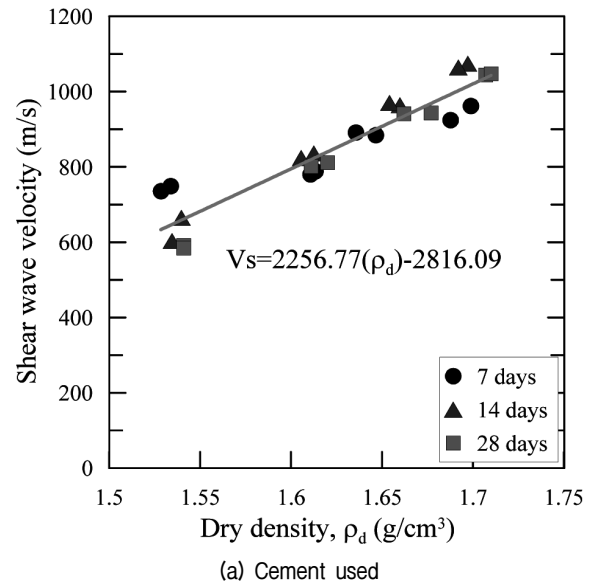
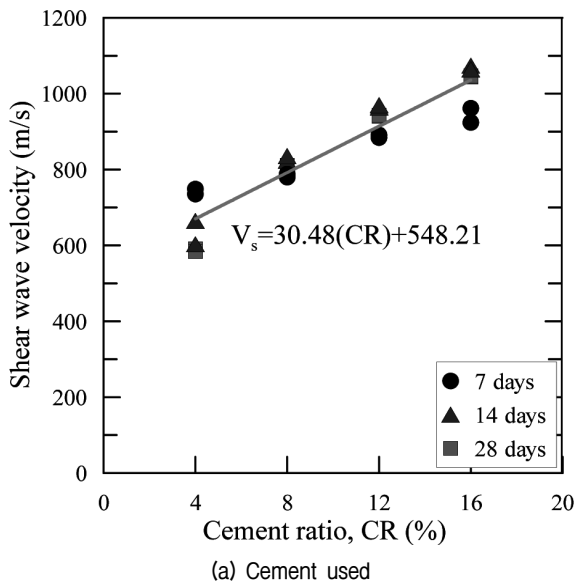


Fig. 9. Shear wave velocity vs. cement or furnace slag ratio

Fig. 10. Shear wave velocity vs. dry density

9로부터 시멘트비와 고로슬래그비가 증가함에 따라 양생기간에 상관없이 고결모래의 전단파속도가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 식 (2)는 시멘트비(CR) 또는 고로슬래그비(SR)와 전단파속도(V_s)의 상관관계를 나타내고 있다.

$$V_s(\text{m/s}) = 30.48 \cdot \text{CR}(\%) + 548.21 \quad \text{for cement} \quad (2a)$$

$$V_s(\text{m/s}) = 10.35 \cdot \text{SR}(\%) + 432.58 \quad \text{for blast furnace slag} \quad (2b)$$

Fig. 10은 건조밀도의 증가에 따른 전단파속도의 변화를 나타내고 있다. 시멘트비와 고로슬래그비가 증가할수록 모래 입자 사이의 수화물 증가로 인하여 입자 사이 공극이 감소하면서 건조밀도와 전단파속도가 증가한 것으로 판단된다. 식 (3)은 건조밀도(ρ_d)와 전단파속도(V_s)의 상관관계를 나타내고 있다. Fig. 11은 양생기간에 따른 전단파속도 변화를 비교하고 있다. 시멘트비 4%를 제외하면 양생기간 14일까지는 전단파속도가 증가하는 경향을 보이지만, 28일 이후에는 오히려 약간 감소하는 경향을 보였다. 장기간 대기 중에서 양생할 경우 공시체 표면으로부터 풍화가 발생하면서 이와 같은 전단파속도 또는 강도 저하가 발생한 것으로 판단된다.

$$V_s(\text{m/s}) = 2256.77 \cdot \rho_d(\text{g/cm}^3) - 2816.09 \quad \text{for cement} \quad (3a)$$

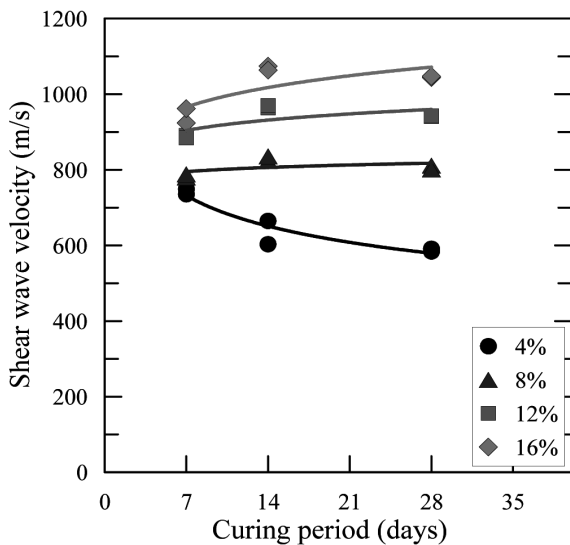
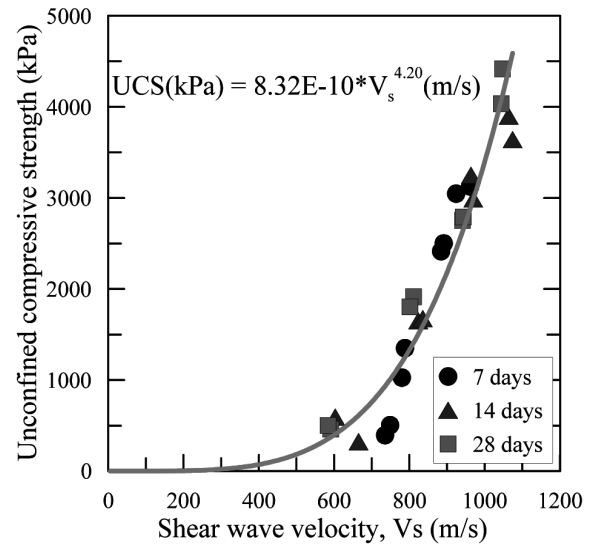


Fig. 11. Shear wave velocity vs. curing period

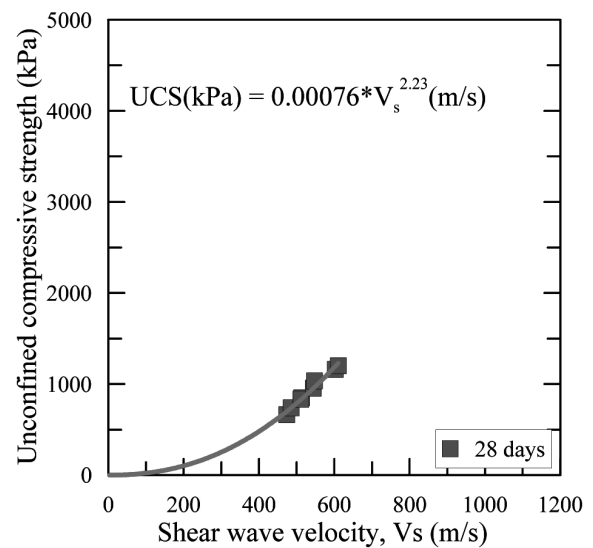
$$V_s(\text{m/s}) = 2327.59 \cdot \rho_d(\text{g/cm}^3) - 3339.68 \quad \text{for blast furnace slag} \quad (3b)$$

4.3 고결모래의 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계

Fig. 12는 시멘트 또는 고로슬래그로 고결된 모래의 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계를 나타내고 있다. Fig. 12(a)는 네 종류의 시멘트비와 세 종류의 양생기간 동안 고결된 모래의 전단파속도와 일축압축강도의 관계가 비선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 고로슬래그로 고결된 모래의 전단파속도와 일축압축강도도 Fig. 12(b)와 같이 비선형적으로 증가하는 경



(a) Cement used



(b) Blast furnace slag used

Fig. 12. Relationship between unconfined compressive strength and shear wave velocity

향을 보여주고 있다. 식 (4)는 시멘트 또는 고로슬래그로 고결된 모래의 전단파속도(V_s in m/s)와 일축압축강도(UCS in kPa)의 상관관계를 나타내고 있다. 이러한 실험결과를 바탕으로 고결된 지반의 전단파속도 측정만으로 다양한 고결토의 일축압축강도의 신속한 예측이 가능하리라 판단된다. 한편 Tezcan et al.(2009)은 현장에서 측정된 전단파속도를 이용하여 흙이나 암반 위에 놓인 얇은기초의 허용지지력을 신속하게 예측할 수 있는 경험식을 제안하기도 하였다.

$$UCS(kPa) = 8.32E - 10 \cdot V_s^{4.20} (m/s) \quad \text{for cement} \quad (4a)$$

$$UCS(kPa) = 0.00076 \cdot V_s^{2.23} (m/s) \quad \text{for blast furnace slag} \quad (4b)$$

5. 결론

본 연구는 현장에서 고결지반의 강도 예측을 위한 기초연구로서 실내에서 제작한 고결모래의 강도를 일축압축시험을 통하여 측정하고, 벤더엘리먼트를 이용하여 고결모래의 전단파속도를 측정하였다. 고결제의 종류와 함유량 그리고 양생기간에 따른 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계를 비교 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 시멘트비와 고로슬래그비가 증가할수록 공시체 내에 수화물이 더 많이 생성되면서 입자 간의 고결력과 건조밀도가 증가하여 고결모래의 일축압축강도가 증가하였다. 한편 고결제로 시멘트가 아닌 고로슬래그를 사용할 경우 제작이나 양생 중인 온도가 강도발현에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) 고결모래의 전단파속도는 고결제의 함유량이나 건조밀도 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 하지만 대기 중 온도가 높은 상태로 양생할 경우 풍화로 인하여 양생기간에 따른 전단파속도의 뚜렷한 증가는 나타나지 않았다.
- (3) 낙동강 모래를 사용하여 대기 중에서 양생한 고결모래의 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계는 시멘트와 고로슬래그를 사용한 고결모래 모두 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 고결제의 종류에 따른 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계는 시멘트의 경우는 $UCS(kPa) = 8.32E - 10 \cdot V_s^{4.20} (m/s)$ 이고, 고로

슬래그의 경우 $UCS(kPa) = 0.00076 \cdot V_s^{2.23} (m/s)$ 이다.

- (4) 본 연구에서 사용한 고결재료와 양생조건이 유사한 경우 앞서 (3)에서 언급한 상관관계를 이용하면 고결모래의 일축압축강도를 전단파속도로부터 신속하게 예측할 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신 F01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Amaral, M., Viana da Fonseca, A., Arroyo, M., Cascante, G., and Carvalho, J. M. (2011), "Compression and shear wave propagation in cementes-sand specimens", *Geotechnique Letters (ICE Publication)*.
2. Chan, C. M. and Ch'ng, S. S. (2010), "Preliminary Study of S-Wave Velocity and Unconfined Compressive Strength of Cement-Palf Stabilised Kaolin", *International Journal of Intergrated Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 27-34.
3. Cho, G. C. and Lee, I. M. (2002), "Soil Properties in Relation to Elastic Wave", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.6, pp.83-101.
4. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), "Laboratory Measurement of G_{max} Using Bender Elements", *Proceedings ASCE Annual Convention, Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan*.
5. Kim, H. S. (2011), *Development and Applications of Piezo-electric Penetration Probe for In-Situ Measurement of Shear Wave Velocities Soft Clay*, Ph.D. Thesis, Kyung Hee University.
6. 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.
7. Ladd, R. S. (1978), "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
8. Lee, J. S. and Lee, C. H. (2006), "Principles and Considerations of Bender Element Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.5, pp.47-57.
9. Lee, C. H., Yoon, H. K., Lee, W. J., and Lee, J. S. (2008), "Elastic Wave Characteristics in Cemented Engineered Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.2, pp.87-97.
10. Oh, S. H., Jung, J. W., Mok, Y. J., Park, D. S., and Park, C. S. (2008), "Correlation Undrained Shear Strength and Density of Silt with Shear Wave Velocity", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.5, pp.79-87.
11. Park, D. S. (2008), *Relationship between Shear Modulus and Undrained Shear Strength of Normally Consolidated Silt*, Ph.D. Thesis, Kyung Hee University.
12. Park, S. S. and Choi, S. G. (2013), "A Study on Sand Cementation and its Early-Strength Using Blast Furnace Slag and Alkaline Activators", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29,

- No.4, pp.45-56.
13. Park, S. S. and Hwang, S. H. (2012), "A Study on Durability Test of Cemented Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.11, pp.79-86.
 14. Park, S. S., Kim, K. Y., Choi, H. S., and Kim, C. W. (2009), "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.
 15. 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.
 16. Pineda, J. A., Arroyo, M., Romero, E., and Alonso, E. E. (2008), "Dynamic tracking of hydraulically induced clay stone degradation", *Proceedings of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials IOS Press*, pp.809-817.
 17. Shirley, D. J. and Hampton, L. D. (1978), "Shear wave measurements in laboratory sediments", *J. Acoustical Society of America*, Vol.63, No.2, pp.607-613.
 18. Suwal, L. P. and Kuwano, R. (2013), "Disk shaped piezo-ceramic transducer for P and S wave measurement in a laboratory soil specimen", *Soils and Foundations*, Vol.53, No.4, pp.510-524.
 19. 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.
 20. Tezcan, S. S., Ozdemir, Z., and Keceli, A. (2009), "Seismic technique to determine the allowable bearing pressure for shallow foundations in soils and rocks", *Acta Geophysica*, Vol.57, No.2, pp.1-14.
 21. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.
 22. Yu, H. G. (2001), *A Comparative Study of Compressive Strength of Concrete Concerned On Methods of Curing*, Master's Thesis, Konkuk University.

Received : October 13th, 2013
 Revised : December 9th, 2013
 Accepted : January 14th, 2014