Journal of the Korean Geo-Environmental Society
15(7): 31～38. (July, 2014) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI http://dx.doi.org/10.14481/jkges.2014.15.7.31

저소성실트를 이용한 시멘트 혼합토의 강도 예측

Strength Prediction of Cement-Admixed using Low Plasticity Silt

박 종 찬[1] · 박 민 철[2] · 전 제 성[3] · 정 상 국[4] · 박 경 한[1] · 이 송[†]
Jongchan Park · Minchul Park · Jesung Jeon · Sangguk Jeong · Kyunghan Park · Song Lee

Received: April 15th, 2014; Revised: April 30th, 2014; Accepted: June 8th, 2014

ABSTRACT : For analysis of mechanics properties of soil cement, unconfined compressive strength has been proposed by existing case studies. In this study, mechanical changes with water content of silt, curing time and cement content were analyzed through unconfined compressive strength test. In addition, the changes for B factor by Abrams were compared with existing case studies after the prediction equations could be proposed about the unconfined compressive strength of admixed cement soil. Especially, the B constant factor was changed with soil characteristics and curing time. For analysis results of appropriateness status and unconfined compressive strength, consideration of variable form was titrated. The prediction equations at low plasticity silt admixed using the uniaxial compressive strength with applying Abrams's equation and considering cement content, curing time is proposed.

Keywords : Unconfined compression strength, Abrams equation, Silt water content/cement ratio, Cement-admixed

요 지 : 소일 시멘트 혼합토의 역학적 성질을 파악할 수 있는 인자로서는 일축압축강도로 기존 연구사례에서 제시되었다. 본 연구에서는 저소성실트를 이용한 시멘트 혼합토의 일축압축강도 시험을 통해 실트함수비, 재령일, 시멘트 함유율에 대한 역학적 변화를 분석하였으며, Abrams가 제안한 B계수에 대한 변화를 기존연구사례와 비교·분석 및 시멘트 혼합토의 일축압축강도 예측식도 제안하였다. 상수 B계수값은 토질의 특성 및 재령일 등에 따라 변화였으며, B계수 변화의 적정성 여부를 일축압축강도로 분석한 결과 변수형태의 고려가 적정한 것으로 나타났다. Abrams 방정식을 적용하고 재령일, 시멘트 함유율과 재령일을 고려한 저소성실트 혼합토의 일축압축강도 예측식을 제안하였다.

주요어 : 일축압축강도, Abrams 방정식, 실트함수비/시멘트 함유율, 시멘트 혼합토

1. 서 론

다양한 지반보강 및 연약지반 개량, 구조물 기초시공 등에 있어 소일-시멘트 혼합처리 공법은 경제성과 적용성 측면의 장점을 이유로 과거부터 현재까지 가장 보편적 공법으로 적용되었으며, 이에 대한 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 최근에는 다양한 성능의 혼합재료 개발을 통해 강도 및 차수효과 증대와 함께 친환경적인 시공이 가능하고 다양한 혼합처리 기술이 개발되고 있으며, 실제 현장에서도 시공 되어지고 있다(Kawasaki et al., 1981; Broms, 1986; Lorenzo & Bergado, 2004).

국외에서는 다양한 조건에서의 소일 시멘트의 강도특성에 관한 연구가 진행되어 왔다(Broms, 1986; Uddin et al., 1997; Watabe et al., 2000). 국내에서도 토질특성, 재령기간, 시멘트 함유율 및 첨가재료 등을 고려한 강도특성 변화에 대한 연구는 많이 이루어졌다. Kim(1993)은 시멘트 혼합토 공법의 실내시험 결과 실제 시공 후 해수와 담수를 사용했을 경우와 첨가제 사용 여부에 따른 압축강도 변화를 분석하였으며, Lee et al.(2009)은 초빈배합 소일 시멘트 혼합토의 압밀특성과 강도특성을 연구하였다. Jeon(2013)은 해성점토에 대하여 재령기간 및 시멘트 함유율에 따른 강도특성 분석을 수행하였다.

소일 시멘트 혼합토의 기존 국내·외 연구는 제한된 이론을 바탕으로 대부분의 내용이 경험 및 시공 후 확인조사 등을 통하여 이루어지는 것이 현실이다. 특히 소일 시멘트 혼합토에 대한 강도, 변형 예측 및 혼합토와 원지반으로 구성된 복합지반의 역학적 거동을 대표할 수 있는 강도, 변형 특성 예측 등에 대한 이론적 접근은 불가능하였다.

본 연구에서는 저소성실트를 점토함수비, 재령기간, 시멘트 함유율 등의 조건으로 120개의 시멘트 혼합토의 공시체

1) Department of Civil Engineering, University of Seoul
2) Korea Institute of Construction Information
3) Department of Construction Information Engineering, Induk University
4) Department of Civil Engineering, Songwon University
† Department of Civil Engineering, University of Seoul (Corresponding Author : scugeo@uos.ac.kr)

를 조성하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 이 결과를 토대로 Abrams가 제안한 방정식에 대한 회귀분석을 수행하여 B계수를 산정하였으며, 이를 기존의 국내·외 연구사례인 부산점토, 방콕점토 및 아리아케 점토와 비교·분석하였다. 또한 재령기간을 고려한 일축압축강도 예측식을 제시하여 임의 조건에 대한 시멘트 혼합토의 강도를 추측할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 시멘트 혼합토의 강도 및 공학적 특성

소일 시멘트 혼합토는 흙의 입도분포, 시멘트의 화학적 성질, 흙의 소성도, 시멘트의 화학구성, 배합수의 염도, pH 등의 인자들에 의해서 강도 및 변형에 영향을 미친다. 또한 지반의 특성 및 조건, 시멘트의 특성, 재령기간, 배합조건 등 크게 4가지로 구분할 수 있으며, 기타 조건으로는 양생온도, 배합과정 및 배합수 특성 등이 있다(Kezdi, 1979; Terasi & Tanaka, 1981).

소일 시멘트는 흙 입자와 간극수의 화학적 반응을 통해 흙과 시멘트의 각 입자간의 결합된 구조를 형성하고, 이러한 본딩효과로 인하여 흙 속에서의 일정 모관흡수력에 해당하는 유효응력 효과가 발생하여 강도가 증가하는 현상을 나타낸다(Nagaraj & Miura, 1996; Horpibulsuk et al., 2003).

Uddin(1994)은 아리아케 점토를 대상으로 시멘트 함유율 200 % 범위 내에서 실내시험을 수행하여, 시멘트 함유율에 따른 점토의 상호작용 및 강도변화 경향을 비활성구간, 점토-시멘트 활성구간, 전이구간, 시멘트-점토 활성구간 4가지 zone으로 제시하였다(Fig. 1). 시멘트 함유율의 대소 여부에 따라 각 zone에서의 활성화하는 주인자의 역할이 바뀌고, 강도 증가도 상이한 경향을 나타내었다.

Mitchell et al.(1974)은 흙의 조건과 재령일에 따른 일축

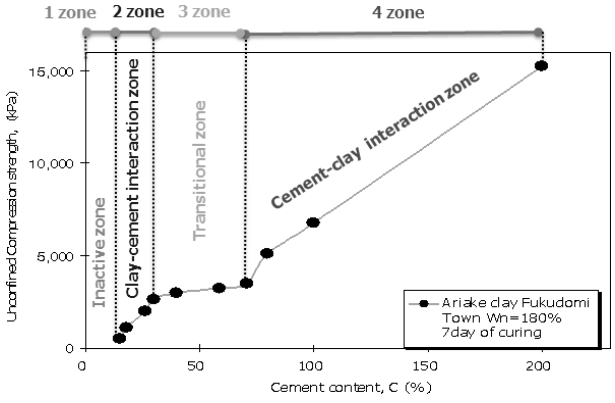


Fig. 1. Clay-cement and cement-clay interaction zones (Uddin, 1994)

압축강도식을 Eq. (1)과 같이 제안하였다.

$$q_D = q_{Do} + K log(\frac{D}{D_o}) \quad (1)$$

여기서 q_D는 재령일 D에서의 일축압축강도(kPa), q_{Do}는 재령일 D_o에서의 일축압축강도(kPa)이며 K는 사질토-480 A_w, 점성토-70A_w이고, A_w는 시멘트 함유율(%)을 나타낸다.

Tan et al.(2002)은 다층지반에서의 재령기간, 함수비 및 시멘트 함유율에 따른 일축압축강도 예측식을 Eq. (2)와 같이 제안하였다.

$$\frac{q_{u,soil1}}{q_{u,soil1(A_w,w,t)}} = \frac{q_{u,soil2}}{q_{u,soil2(A_w,w,t)}} = \frac{q_{u,soil3}}{q_{u,soil3(A_w,w,t)}} \quad (2)$$

여기서 $q_{u,soil1,2,3}$는 $soil(1,2,3)$일 때 일축압축강도(원지반), $q_{u,soil1,2,3(A_w,w,t)}$는 $soil(1,2,3)$일 때 일축압축강도(혼합토), A_w는 시멘트 함유율(%), w는 흙의 함수율(%), t는 재령기간(day)이다

Lorenzo & Bergado(2004)은 간극비와 시멘트 함유율에 따라 혼합토의 강도 특성이 변화는 일축압축강도 예측식 Eq. (3)을 제안하였다.

$$q_u = Ap_a e^{B(e_{ot}/A_w)} \quad (3)$$

여기서 p_a는 대기압(kPa)이며 회귀분석에 의해 구해지는 무차원 계수 A=10.33, B=-0.046이다. e_{ot}는 초기 간극비, A_w는 시멘트 함유율(%)이다.

Horpibulsuk et al.(2003)은 콘크리트 분야에서 사용하는 Abrams 제안식($S = \frac{A}{B^{(W/C)}}$)을 이용하였으며, 점토 함수비-시멘트 함유율의 비(w_c/C)를 적용하여 혼합토의 일축압축강도를 예측하는 연구를 수행하였다.

A계수값은 흙의 종류와 재령일에 따라 크게 변화하나 B계수값은 조건과 관계없이 일정한 값으로 고려할 것을 제안하였다. B계수값을 1.24로 고려함으로써 점토 함수비-시멘트 함유율의 비$(w_c/C)_1$에서의 일축압축강도를 통해 다른 조건의$(w_c/C)_2$에 대한 일축압축강도 예측이 가능함을 발표하였으나, 이러한 예측방법은 모든 재령일이 동일해야 한다는 한계를 가지고 있다. 동일 재령일에서도 흙의 함수비-시멘트 함유율의 비에 따라 강도가 현저히 달라지는 소일 시멘트의 강도특성을 고려할 때 배합조건과 재령일에 따라 큰 오차를 발생시킬 수 있을 것이다.

3. 실내시험

3.1 시료 및 시험조건

소일 시멘트의 강도 특성을 예측하기 위하여 사용한 시료는 Fig. 2에 나타난 것처럼 군산 새만금 지역에서 채취한 것으로 비중 2.68, 함수비 39.4 %, #200체 통과율 88.5 %, 소성지수 N.P로 통일분류법상 저소성실트로 분류되었다. 공시체를 조성하기 위한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로서 비중이 3.15, 분말도 3,369 cm^2/g, 안정도(르샤틀리에) 0.5 mm의 물리적 특성을 나타내었다.

본 연구에서의 시험조건은 Table 1과 같이 시멘트 함유율은 실트의 건조시료에 대한 비율로 5~25 %로 5가지 조건으로 설정하였으며, 현장의 다양한 함수비 조건을 모사하기 위하여 원지반 함수비를 40, 60, 80 %의 3가지 조건으로 조성하였다. 원지반의 해수에 의한 영향을 고려하여 염분농도를 3 ‰로 보정하였으며, 물-시멘트비는 현장에서 주로 사용하고 있는 80 %로 조정하였다.

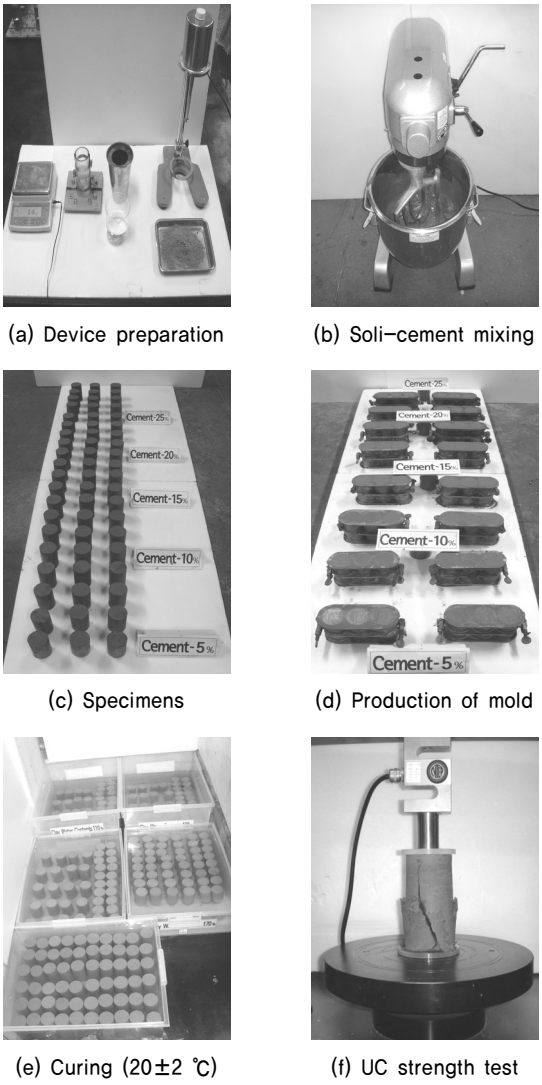
재령기간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 3~28일로 설정하였으며, 혼합토가 물로 완전히 포화된 것으로 가정하여 습윤양생 방법으로 시료를 조성하였다. 양생온도는 자동온도 장치를 이용하여 콘크리트 양생온도와 같은 조건인 20±2 ℃로 한 후 일축압축강도 시험을 수행하였다.

Fig. 2. Location map of sample site

3.2 시료과정 및 방법

Fig. 3은 소일 시멘트의 시험과정을 나타내는 것으로 먼저 계량할 시료를 준비한 후 시멘트와 물을 125 rpm으로 1분간 믹싱하였고, 실트는 각 함수비 조건마다 200 rpm으로 2분간 믹싱 후 재성형 실트의 함수비를 측정하였다.

이후 시멘트 페이스트와 실트를 같이 섞어 200 rpm으로 2분간 교반 후 함수비를 측정한 다음 50 mm×100 mm 크기



(a) Device preparation (b) Soli-cement mixing

(c) Specimens (d) Production of mold

(e) Curing (20±2 ℃) (f) UC strength test

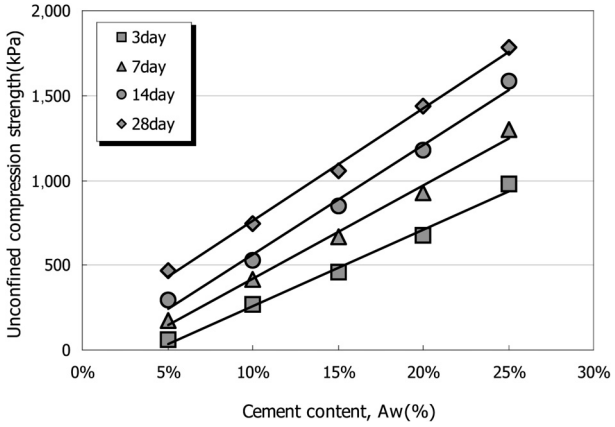
Fig. 3. Testing process of cement-admixed soil

Table 1. Testing condition of cement-admixed soil

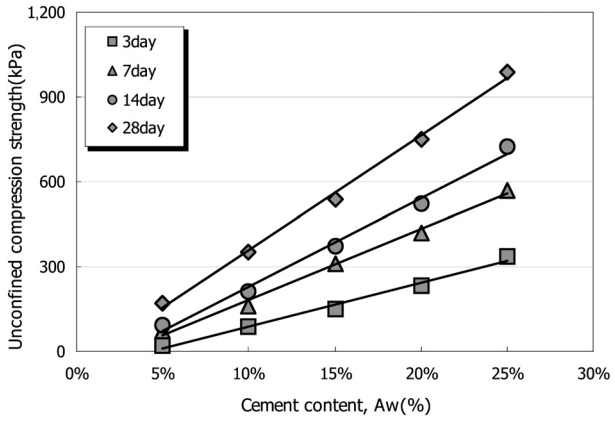
Water content of remold clay, (%)		Cement content A_w (%)	Curing time (day)	Water/Cement	Curing condition
Mix design	Measurement				
40	40.58	5, 10, 15, 20, 25	3, 7, 14, 28	80 %	Salt content ratio : 3 ‰ Water temperature : 20±2 ℃
60	61.02	5, 10, 15, 20, 25	3, 7, 14, 28		
80	81.23	5, 10, 15, 20, 25	3, 7, 14, 28		

의 강재 몰드 안에 투입하였다. 시료 내에 일률적인 다짐과 간극을 제거하기 위하여 7,000 rpm인 소형 진동다짐기를 이용하여 1분 동안 다짐을 수행하였다.

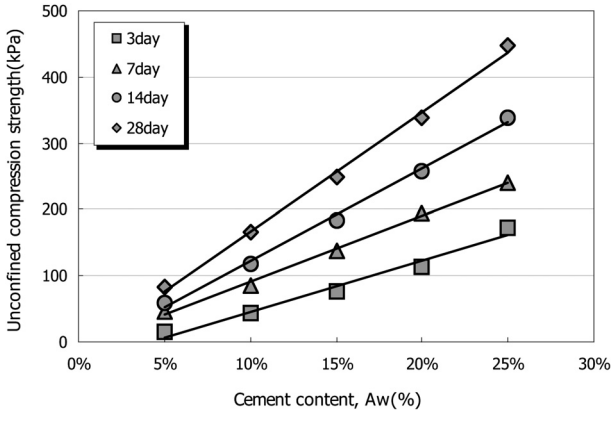
공시체 제작 후 바로 해체 시 자립이 불가능하고, 물리적, 역학적 특성 등에 영향을 미치므로 제작 1일 이후에 몰드를 탈형한 후 현장과 같은 조건을 모사하기 위해 20±2 ℃인 해수 안에서 3～28일 동안 습윤양생을 수행하였으며, 이 공시체를 이용하여 양생 후 일축압축강도 변화를 측정하였다.



(a) Silt water content-40.62 %



(b) Silt water content-61.02 %



(c) Silt water content-81.23 %

Fig. 4. Unconfined compression strength with cement content

4. 소일 시멘트의 강도 예측

4.1 소일 시멘트의 강도 특성 분석

금회 연구는 다양한 함수비 변화, 시멘트 함유율과 재령기간 등을 고려하여 소일 시멘트의 공시체를 조성하고 일축압축강도 시험을 수행하였다.

Fig. 4는 실트함수비, 시멘트 함유율과 재령일에 따른 일축압축강도 변화를 나타낸 것으로 실트 함수비가 적을 수록 일축압축강도는 높게 나타났으며, 시멘트 함유율이 증가할 수록 일축압축강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 재령기간이 증가할 수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이 결과들은 기존의 연구사례와 같은 경향을 나타내고 있다.

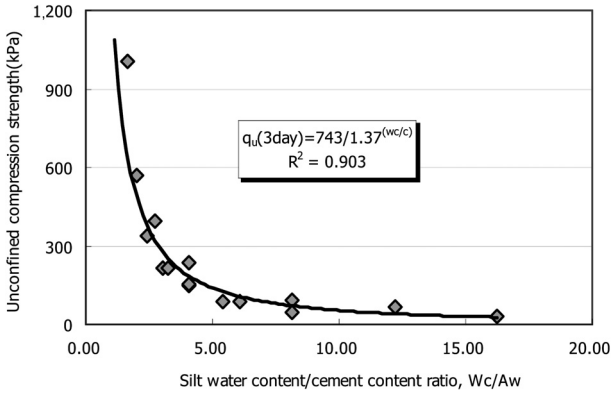
각 조건에 따른 일축압축강도는 15.0～1,780 kPa의 범위를 나타냈으며, 재령일에 따른 일축압축강도는 28일 재령일이 3일 재령일 보다 최소 1.82～최대 7.70배 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 시멘트 함유율에 따른 일축압축강도의 차이는 시멘트 함유율 25 %가 5 %보다 최소 3.8～최대 16.1배가 발생하였으며, 실트의 함수비에 따른 일축압축강도는 원지반 실트함수비 40.62 %가 81.23 %보다 최소 3.8～6.0배 정도 크게 나타났다.

분석결과를 보듯이 시멘트 함유율의 대소 여부에 따라 일축압축강도 차이는 가장 크게 발생했으며, 이는 혼합토내에서 시멘트가 지배적인 영향을 미쳤기 때문이다. 소일 시멘트 혼합토는 흙의 함수비와 시멘트 함유율의 상호 거동을 통해 시멘트 혼합토의 역학적 성질을 바꾸는 중요한 요소임도 확인할 수 있었다.

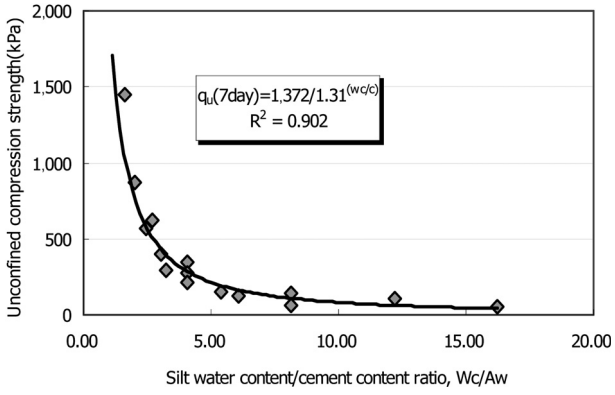
4.2 시멘트 혼합토의 B계수 산정 및 분석

소일 시멘트 혼합토의 일축압축강도 예측에 관한 기존 연구에서 A계수값은 토질특성, 재령기간 및 시멘트 함유율에 따라 변화지만, B계수값은 상대적으로 변화가 미비하여 일정한 값을 적용하였다. Horpibulsuk et al.(2003)은 점토의 종류, 재령기간 및 액성지수 등에 관계없이 B계수값을 1.24로 고정된 상수로 적용하여 일축압축강도 예측식을 제안하였다.

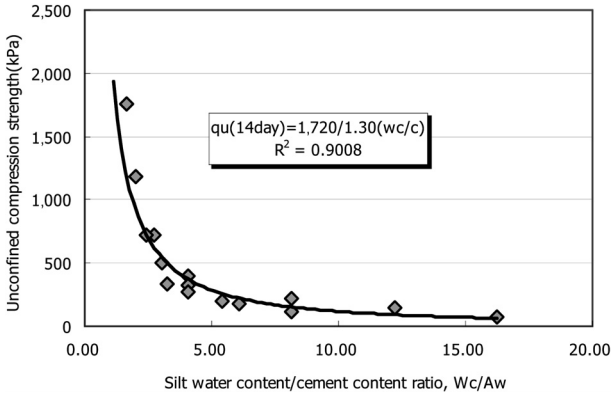
Fig. 5와 Table 2는 본 연구에서 도출한 B계수값의 변화를 나타낸 것으로 재령일에 따라 1.27～1.37의 범위를 보였으며, A계수값의 범위는 743～2,017로 보였다. B계수값의 변화량은 미미한 차이를 보였지만, 재령기간이 증가할 수록 B계수값은 로그함수 형태로 감소하였다. A계수값의 변화량은 재령기간이 증가할 수록 큰 폭으로 증가하는 경향을 나



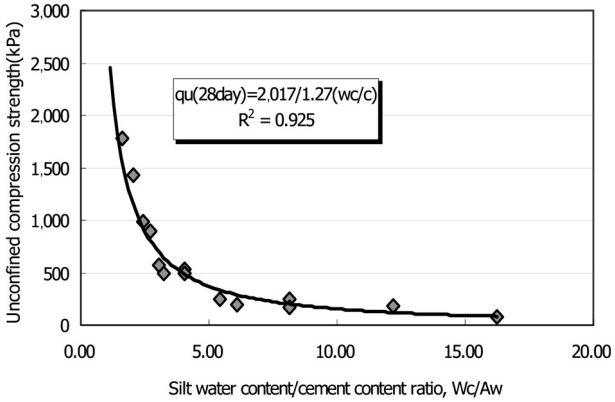
(a) 3day



(b) 7day



(c) 14day



(d) 28day

Fig. 5. Regression analysis with curing time of cement-admixed with Abrams equation

타냈으며, 회귀분석에서의 결정계수값은 0.90~0.93으로서 각 결과값들은 높은 부합도를 나타내었다.

Fig. 6은 본 연구에서 도출한 B값의 변화양상을 나타낸 것으로 재령기간에 따라 B계수값은 변화하는 경향을 보였으며, 결정계수값은 0.92로 높은 부합도를 나타냈다. Eq. (4)는 B계수값을 도출할 수 있는 관계식으로 D는 재령기간을 나타낸다.

$$B = -0.0467\ln(D) + 1.4202 \quad (4)$$

Table 3은 기존의 연구결과인 부산 응동점토, 방콕점토와 아리아케 점토의 B계수값과 금회 연구에서 회귀분석으로 도출한 군산 실트의 B계수값과 비교·분석하였다. Park(2013)이 분석한 부산응동 점토의 B계수값은 1.14~1.15(평균 1.15), Horpibulsuk et al.(2003)가 분석한 아리아케 점토의 경우 1.21~1.23(평균 1.22), Uddin(1994)이 수행한 방콕점토의 B계수값은 1.24로 일정하였으며, 본 연구에서의 산정한 B계수값은 1.27~1.37(평균 1.31)로 나타났다. 군산지역의 B계수값이 크게 나온 이유는 입자의 크기가 타 지역보다 조금 더 커서 B계수에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

저소성실트의 경우 다른 점토보다 B계수값은 크게 산정되었으며, Horpibulsuk et al.(2003)가 제시한 이론과 달리 B계수값은 변화하는 것으로 확인되어 B계수값을 이용한 일축압축강도 예측식을 산정 시 토질의 특성, 재령기간, 시멘트 함유율 등에 따른 조건을 고려해야 할 것이다.

Table 2. Parameters for Abrams using test data

Curing time (days)	A Parameter value	B parameter value	R-Square
3	743	1.37	0.903
7	1,372	1.31	0.902
14	1,720	1.30	0.901
28	2,017	1.27	0.925

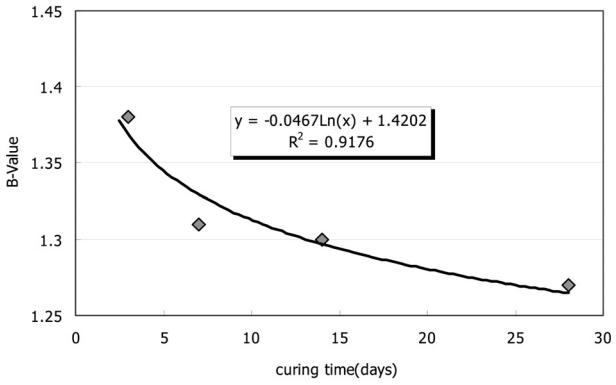


Fig. 6. B-value analysis with curing time

Table 3. B-value comparison analysis with soil character

Curing time (days)	Gunsan silt		Busan clay		Ariake clay		Bangkok clay	
	B-value	R-Square	B-value	R-Square	B-value	R-Square	B-value	R-Square
3	1.37	0.903	1.15	0.977	-	-	-	-
7	1.31	0.902	1.14	0.966	1.21	0.980	1.24	0.99
14	1.30	0.901	1.15	0.910	1.23	0.980	1.24	0.99
28	1.27	0.925	1.15	0.926	1.23	0.970	1.24	0.99
Ave.	1.31	0.908	1.15	0.944	1.22	0.98	1.24	0.99

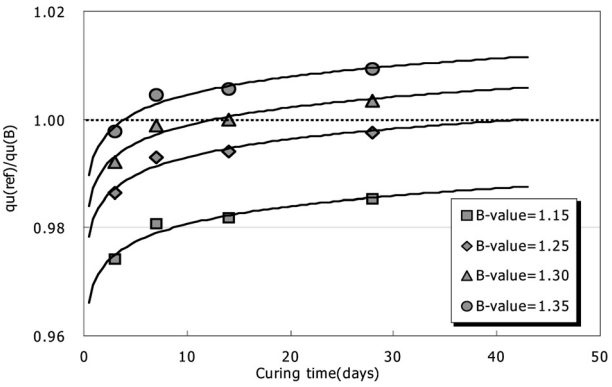


Fig. 7. Effect of B-value on prediction of UC test with curing time

B계수값의 영향을 파악하기 위하여 B계수값을 고려하여 일축압축강도를 비교·분석하였다. 금회 연구에서 구한 B계수값에 대한 일축압축강도($q_{u(ref)}$)와 B=1.15, B=1.25, B=1.30, B=1.35의 고정값으로 구한 일축압축강도($q_{u(B)}$)를 비교하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 B=1.15와 B=1.25는 과대평가 되는 것을 볼 수 있으며, B=1.35는 과소평가 결과를 나타냈으며, B계수값이 커질 수록 비례적으로 과소평가의 결과도 커짐을 알 수 있다.

이러한 결과를 볼 때 B계수값을 일정한 값으로 적용하여 시멘트 혼합토의 일축압축강도를 산출한다면 결과값에 대한 신뢰성이 저하 될 것이다.

4.3 저소성실트를 이용한 시멘트 혼합토의 강도 예측식

본 연구에서는 저소성실트를 이용한 시멘트 혼합토의 일축압축강도 예측식을 도출하기 위하여 콘크리트 공학에서 많이 사용되고 있는 Abrams(1918)가 제안한 Eq. (5)를 인용하였다.

$$S = \frac{A}{B^{(w/c)}} \tag{5}$$

여기서 S는 콘크리트의 일축압축강도(kPa)이고, A, B는 경험적 상수이며, w/c는 물-시멘트비(%)이다.

본 연구 결과에서 나타났듯이 흙의 종류 및 동일 재령일 조건이 만족한다면 소일 시멘트의 일축압축강도는 흙의 초기 함수비에 관계없이 w_c/c에 따라 일정한 변화경향을 나타냈으며, Eq. (5)를 통해 소일 시멘트 혼합토의 일축압축강도 관계식을 나타낼 수 있다. Eq. (6)은 A계수값을 배제하며, B계수값 만에 의해 $(w_c/c)_1$에서의 일축압축강도 값을 이용하여 $(w_c/c)_2$ 조건에서의 혼합토 일축압축강도 예측을 할 수 있다.

$$\frac{q_{u(wc/A_w)1}}{q_{u(wc/A_w)2}} = \frac{A/B^{(wc/A_w)1}}{A/B^{(wc/A_w)2}} = B^{(wc/A_w)1-(wc/A_w)2} \tag{6}$$

여기서 $q_{(w_c/C)_1}$, $q_{(w_c/C)_2}$는 동일 시료 및 동일 재령일 조건에 대하여 $(wc/c)_1$, $(wc/c)_2$에서의 일축압축강도 이며, A와 B는 Abrams의 방정식 상수이고, A_w는 시멘트 함유율(%)이다.

금회 연구에서 도출한 저소성실트 혼합토의 B계수값인 1.31을 Eq. (6)에 대입하여 Eq. (7)과 같이 표현하였다.

$$\frac{q_{u(wc/A_w)1}}{q_{u(wc/A_w)2}} = 1.31^{(wc/A_w)1-(wc/A_w)2} \tag{7}$$

Fig. 8은 각 실험결과를 통해 얻은 일축압축강도(q_D)를 재령기간 28일 일축압축강도(q_{28}) 기준으로 정규화시켜 재령일의 관계식을 Eq. (8)과 같이 산출하였으며, Eq. (7)과의 조합을 통해 재령기간에 따른 혼합토의 강도식을 구현하였다.

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.300 \times \ln(D) - 0.031 \tag{8}$$

여기서 q_D는 임의의 재령일의 일축압축강도(kPa)이고, q_{28}는 재령일 28일 일축압축강도(kPa)이며, D는 재령기간(day)이다.

기존에 제시한 일축압축강도 예측식은 원지반 함수비,

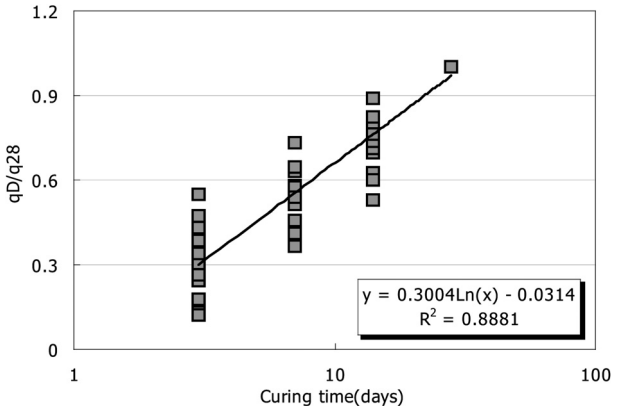


Fig. 8. $\frac{q_D}{q_{28}}$ with curing time

시멘트 함유율, 재령기간 등 다양한 조건을 반영하지 못하는 이론적 한계를 보였다. 이러한 이론적 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 Eq. (7)과 Eq. (8)을 조합하여 Eq. (9)와 같은 일축압축강도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 구성관계식 Eq. (9)는 저소성실트 시멘트 혼합토에서의 적정 강도를 예측할 수 있도록 간편하게 제안된 식으로 임의의 원지반 점토 함수비, 재령기간과 시멘트 함유율 등을 적용하여 혼합토의 일축압축강도를 도출할 수 있으며, 혼합토에 대한 강도, 변형, 예측 등의 이론적 접근이 가능한 방정식이라고 판단된다.

$$\frac{q_{u(wc/A_w)1,D}}{q_{u(wc/A_w)28}} = (1.31^{(wc/A_w)28-(wc/A_w)D}) \times (0.30\ln(D)-0.031) \quad (9)$$

5. 결 론

본 연구에서는 군산 새만금 지역의 저소성실트를 이용하여 함수비, 시멘트 함유율, 재령기간 등의 조건으로 공시체 제작 및 일축압축강도 시험을 수행하였다. 시험결과를 토대로 혼합토 강도 특성 변화를 분석하였으며, Abrams 방정식의 상수 변화 분석 및 저소성실트의 혼합토 일축압축강도 예측식을 제안하였다. 이와 관련된 주 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 혼합토의 일축압축강도는 15.0～1,780 kPa의 범위를 나타냈으며, 재령일이 길수록 1.82～7.70배, 시멘트 함유율의 많을수록 3.8～16.1배가 크게 도출되었으며, 실트의 함수비가 적을수록 3.8～6.0배 크게 발생하였다.

(2) 저소성실트의 혼합토 B계수값의 변화는 재령일에 따라 1.27～1.37의 범위를 보였으며, A계수값의 범위는 743～2,017로 나타났다. B계수값의 변화량은 재령기간이 증가할 수록 B계수값은 로그함수 형태로 감소하였다. B계수값을 도출할 수 있는 일반화된 Eq. (4)를 제안하였다.

(3) Abrams 방정식의 상수인 B계수값은 토질에 특성에 따라 상이한 결과를 보였으며, Horpibulsuk et al.(2003)가 제시한 이론과 달리 B계수값은 변화하는 것으로 확인되어 B계수값을 이용한 일축압축강도 예측식 제안 시 토질의 특성, 재령기간, 시멘트 함유율 등에 따른 조건을 고려해야 할 것이다.

(4) 일축압축강도 예측식은 원지반 함수비, 시멘트 함유율, 재령기간 등 다양한 조건을 고려하여 Abrams 방정식에 대입하여 Eq. (9)와 같이 제안하였다. 구성관계식 Eq. (9)는 저소성실트 시멘트 혼합토에서의 적정 강도를 예측할 수 있도록 간편하게 제안된 식으로 혼합토에 대한 강도, 변형, 예측 등의 이론적 접근이 가능한 방정식이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NO.2011-0013057)이며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. Abrams, D. A. (1918), Design of concrete mixtures, Bulletin, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Bulletin 1. pp. 25~36.
2. Broms, B. B. (1986), Stabilization of soft clay with lime and cement columns in Southeast Asia, Applied Research Project RP10/83, Nanyang Technological Institute, Singapore, pp. 34~47.
3. Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T. S. (2003), Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams's law as a basis, Géotechnique, Vol. 53, No. 4, pp. 439~444.
4. Jeon, B. S. (2013), Experimental study on determination of DCM optimal mix proportion, Master's Thesis, Seoul National University, pp. 38~52 (in Korean).
5. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981), Deep mixing method using cement hardening agent, Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng., Stockholm, pp. 721~724.
6. Kezdi, A. (1979), Stabilization with lime cement in geotechnical engineering, Amsterdam, Elsevier Scientific Publication Co, Vol. 9, pp. 163~174.
7. Kim, Y. G. (1993), A study on unconfined compressive strength characteristics of DCM, Master's Thesis, Pusan National University, pp. 25~36 (in Korean).

8. Lee, J. M., Kwon, Y. C. and Lee, H. G. (2009), Experimental study on characteristics of soil-cement include lean mixed concrete for dredged and reclaimed ground, Korean Geo-Environmental Conference, pp. 113~116 (in Korean).
9. Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T. (2004), Fundamental parameters of cement-admixed clay, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, Vol. 130, No. 10, pp. 1042~1050.
10. Mitchell, J. K., Veng, T. S. and Monismith, C. L. (1974), Behavior of stabilized soils under repeated loading, Report 5: performance evaluation of cement-stabilized soil layers and its relationship to pavement design, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California. pp. 15~27.
11. Nagaraj, T. S. and Miura, N. (1996), Induced cementation of soft ground-A parametric assessment, Proc. Int. Symp. on Lowland Technology, Saga Univ, pp. 85~97 (in Japanese).
12. Park. M. C. (2013), Prediction of geotechnical characteristics in cement-admixed ground, Ph D. dissertation, Seoul National University, pp. 87~93 (in Korean).
13. Tan, T. S., Goh, T. L. and Yong, K. Y. (2002), Properties of singapore marine clays improved by cement mixing, Geotech Testing J. ASTM, Vol. 25, No. 4 : 422~433.
14. Terasi, M. and Tanaka, H. (1981), Ground improvement by in-situ deep mixing method, Proc. 10Int. Conf. Soil Mech. Found. Engn.,, Stockholm, pp. 777~780.
15. Uddin, K. (1994), Strength and deformation behaviour of cement treated Bangkok clay, Ph D. dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 66~75 (in Thailand).
16. Uddin, K., Balasubramaniam, A. S. and Bergado, D. T. (1997), Engineering behavior of cement-treated bangkok soft clay, Geotech. Eng., Vol. 28, No. 1, pp. 89~119.
17. Watabe, Y., Tsuchida, T., Furuno, T. and Yuasa, H. (2000), Mechanical characteristics of a cement treated dredge soil utilized for waste reclamation landfill, International Symposium. Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Balkema, pp. 739~745.