

점토-시멘트 혼합 지반의 물리적 특성 예측

박민철* · 전제성** · 정상국*** · 이 송****

Park, Minchul*, Jeon, Jesung**, Jeong, Sangguk***, Lee, Song****

Prediction of Physical Characteristics of Cement-Admixed Clay Ground

ABSTRACT

Physical characteristics of cement-admixed clay such as water content, specific gravity, unit weight and void ratio are main factors for strength, compressibility and prediction of consolidation behavior. In the past, the physical characteristics of admixed soils could be understood through complex laboratory tests and field survey after construction. In this study, the tests were performed with conditions such as clay water contents 0%-170%, cement contents 5%-25% and curing period 3-90days after that analyzed for changes which are water content, specific gravity unit weight and void ratio of admixed soils. A prediction of properties through mechanical relationships with clay in situ water content, cement content and curing period could be proposed using the test results. The prediction equation of void ratio of admixed soils was derived using void ratio equation in geotechnical engineering and compared with test results of bangkok clay and then this study could be verified.

Key words : Cement-admixed clay, Clay water content, Unit weight, Specific gravity, Void ratio

초록

점토-시멘트 혼합토의 물리적 특성인 함수비, 비중, 단위중량과 간극비 등은 혼합토의 강도, 압축성, 압밀거동 예측 등에 적용되는 주요한 인자이다. 기존에는 혼합토의 물리적 특성을 복잡한 실내시험 및 시공 후 확인조사를 통해 이루어 졌다. 본 연구는 점토 함수비 90~170%, 시멘트 함유율 5~25%와 재령기간은 3~90일 조건으로 실내시험을 수행하였으며, 양생 후 혼합토 함수비, 비중, 단위중량과 간극비 등에 대한 변화를 분석하였다. 시험결과를 이용하여 원지반 점토 함수비, 시멘트 함유율과 재령기간 등의 역학적 관계를 바탕으로 혼합토의 함수비, 비중과 단위중량에 관한 물성 예측식을 제안하였다. 혼합토의 물성 예측식을 지반공학 분야에서 일반적으로 사용하는 간극비 산출식에 대입하여 혼합토의 간극비 예측식을 도출하였으며, 방콕 점토를 대상으로 간극비에 대한 실험결과와 본 연구에서 제안한 예측식을 검증하였다.

검색어 : 점토-시멘트 혼합토, 점토 함수비, 단위중량, 비중

1. 서론

일반적인 해성점토는 낮은 전단강도와 높은 압축성의 공학적 특성을 보이고 있다. 이와 같은 특성 때문에 해성점토 지반에서의 건물기초 및 도로, 항만 시설 등에 대한 설계와 시공 시 효과적 지반개량은 필수적 선결과제라 할 수 있다. 혼합토 처리 공법은 경제성 및 기존 시설물과의 간섭조건에 대한 시공성 확보, 주변 시공영향 최소화 등의 장점을 이유로 과거부터 지반보강, 연약지반 개량,

* (주)한국건설정보연구원 연구소장 (pgg007@nate.com)

** 정회원 · 인덕대학교 건설정보공학과 교수 (jesungeon@hanmail.net)

*** 정회원 · 송원대학교 토목공학과 교수 (jungsg@songwon.ac.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · University of Seoul · scugeo@uos.ac.kr)

Received November 13, 2013/ revised November 28, 2013/ accepted December 29, 2013

구조물 기초시공 등에 가장 보편적으로 적용되어온 공법이다.

혼합토 처리 공법에 대한 설계 시 점토-시멘트 혼합토의 물리적 특성인 함수비, 비중, 단위중량, 간극비 등은 혼합토의 강도 및 압밀거동 예측 등에 적용되는 주요 특성치라 할 수 있다(Broms 1986; Uddin et al., 1997; Watabe et al., 2000; Petchgate, 2001; Yin, 2001; Lorenzo et al., 2004). 기존 설계 및 연구사례에서 알 수 있듯이, 혼합토의 물리적 특성치 예측은 제한된 이론을 바탕으로 대부분이 경험 및 시공 후 확인조사 등을 통해 이루어지고 있다. 본 연구에서는 부산 응동 지역의 해성 연약 점토를 이용하여 조건별로 혼합토를 제작하여 양생 후 함수비, 비중, 단위중량과 간극비 등을 측정 한 후, 이 결과를 토대로 손쉽게 도출할 수 있는 혼합토의 물리적 특성 예측식을 제안하였다.

2. 점토-시멘트 혼합토의 공학적 특성

점토-시멘트 혼합토의 물리적 특성에 영향을 미치는 주요한 인자는 원지반 함수비, 단위중량, 배합시간, 원지반의 세립분, 시멘트 함유율, 재령기간, 양생조건 등을 제시하였다(Felt, 1949). Kezdi (1979)에 의하면 소일-시멘트는 점토의 입도분포, 화학적 성질, 소성도와 시멘트의 화학구성 및 배합수의 염도, pH 등에 영향을 미치며, 혼합 시 온도, 다짐, 배합시간 등에 의해서도 물리적 특성, 강도 및 변형 특성이 변화한다(Fig. 1).

점토 입자는 미세한 조직으로 집합되어 있고, 미세한 모세관 공극으로 둘러싸여 있는 구조로 되어 있으며, 이러한 점토 입자를 하나의 입자로 놓고 표현한다면 전응력(σ)은 간극수압(u)과 같다고 할 수 있다(Fig. 2(a)). 소일-시멘트에서는 흡입자 및 간극수와의 화학적, 물리적 반응을 통해 입자간의 연결된 구조를 조성하게

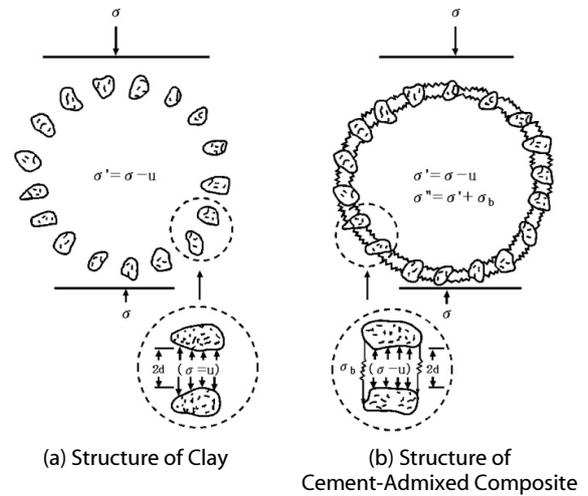


Fig. 2. Structure of Clay and Cement-Admixed Composite (Horpibulsuk et al. 2003)

되는데 이러한 본딩효과로 인하여 점토 내에서는 일정 모관흡수력에 해당하는 유효응력 효과가 발생하게 되어(Fig. 2(b)) 강도, 변형 및 물성특성 변화가 발생한다(Horpibulsuk et al., 2003).

또한 Miura et al. (2001) and Horpibulsuk et al. (2003)는 점토 함수비 W_c 에 대한 시멘트 함유율의 비(W_c/c)가 혼합토의 공학적 거동에 영향을 미치는 주요 인자임을 제시하였다. Lorenzo et al. (2006)은 특정 시간 경과후의 혼합토 조건을 표현하는데 있어 Eq. (1)로 표현되는 그 상태에서의 간극비가 공학적 특성을 결정짓는 주요 요소임을 나타내었으나 이 관계식은 시멘트 함유율(A_w)과 재령일(t)을 고려하지 않은 한계가 있다.

$$e_c = \frac{(1 + c_{cw})G_{cs}r_w}{r_{ct}} - 1 \quad (1)$$

여기서, e_c , c_{cw} , G_{cs} , r_{ct} 는 특정 재령일(t)에서의 간극비, 함수비, 비중과 단위중량을 나타낸다.

3. 실내시험

3.1 시료 및 시험조건

점토-시멘트 혼합토에 대한 물리적 특성을 분석하고자 다양한 배합조건에서의 공시체 조성 및 실내시험을 수행하였다. 연구에 사용된 점토시료는 부산 응동지역에서 채취된 해성점토로서 비중 2.71 자연함수비 61.2%, 액성한계 52.6%, 소성한계 26.7%, 소성지수 25.9, #200체 통과율은 97.8%로 통일분류법상 CH로 분류되었다. 시멘트 혼합토를 조성하기 위해 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로서 비중이 3.15, 분말도 3369cm³/g, 안정도 0.5mm의 물리

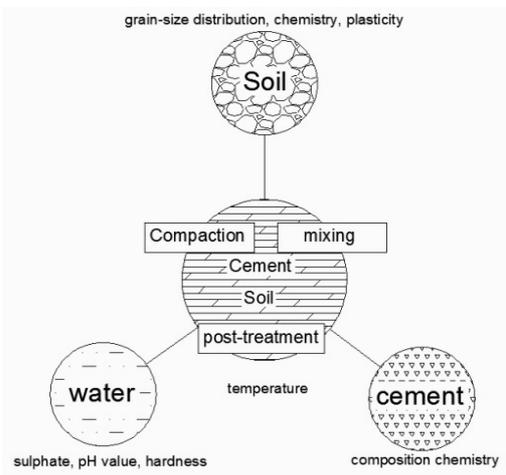


Fig. 1. Factors Affecting the Properties of Soil-Cement (Kezdi, 1979)

적 특성을 보유하고 있다.

혼합토의 물리적 특성에 영향을 미치는 공학적 인자를 분석하기 위하여 본 연구에서는 Table 1과 같은 조건에 대한 실내시험을 수행하였다. 시멘트 함유율은 점토의 건조시료에 대한 비율로 5%, 10%, 15%, 20%, 25%로 5가지 조건으로 설정하였다. 또한 현장의 다양한 함수비 조건을 모사하기 위하여 함수비를 90%, 110%, 130%, 150%, 170%의 5가지 조건으로 조성하였으며, 원지반의 해수에 의한 영향을 고려하여 염분농도를 3‰로 보정하였다. 물-시멘트비는 현장에서 주로 사용하고 있는 80%로 조정하였다.

재령기간은 초기와 장기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 3~90일로 설정하였으며, 혼합토가 물로 완전히 포화된 것으로 가정하여 습윤양생 방법으로 시료를 조성하였다. 양생온도는 자동온도장치를 이용하여 콘크리트 양생온도와 같은 조건인 20±2℃로 한 후, 조건별로 혼합토의 양생 후 함수비, 비중, 단위중량 및 간극비 등을 측정하였다.

3.2 혼합토 배합비

혼합토의 배합비 결정은 물리적인 특성에 지배적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 점토의 건조시료를 기준으로 시멘트 함유율을 5%~25%로 결정한 후, 이 기준으로 배합수, 시멘트와 점토의 배합량을 산정하였다. 재성형한 점토는 해성점토임을 감안하여 남해안 해수 염분농도 3‰로 보정한 후 시료의 양을 결정하였다. 점토 함수비 90%에 대하여 1개 공시체당 재료별 혼합량은 Table 2와 같다.

3.3 시험과정 및 방법

Fig. 3은 점토-시멘트의 시험과정을 나타내는 것으로 먼저 계량할 시료를 준비한 후, 시멘트와 물을 125 rpm으로 1분간 믹싱하였고, 점토는 각 함수비 조건마다 200 rpm으로 2 분간 믹싱 후 재성형 점토의 함수비를 측정하였다. 이후 시멘트 페이스트와 점토를 같이 섞어 200 rpm으로 2분간 교반 후 함수비를 측정한 다음 50 mm × 100 mm 크기의 강제 몰드 안에 투입하였다. 시료 내에 일률적인 다짐과 간극을 제거하기 위하여 7,000 rpm인 소형 진동다짐기를 이용하여 1분 동안 다짐을 수행하였다. 공시체 제작

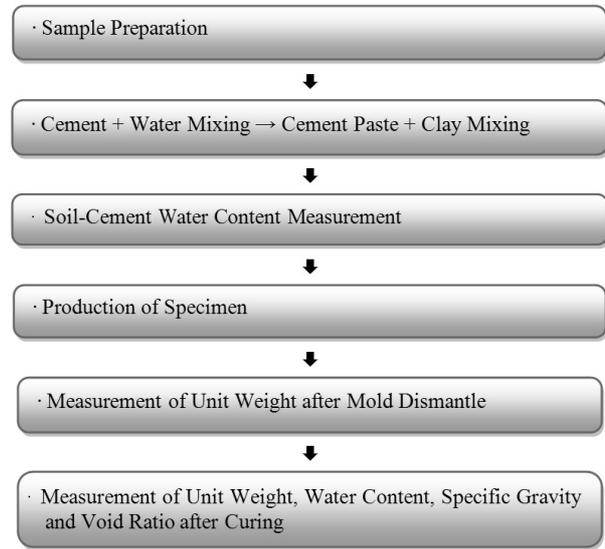


Fig. 3. Laboratory Testing Flow

Table 1. Testing Condition of Cement-Admixed Ground

Water content of remold clay, W_c (%)		A_w (%)	Water/Cement	Curing time (day)	Curing condition
Mix design	Measurement				
90	90.96	5,10,15,20,25	80%	3,7,14,28,60,90	Salt content ratio : 3‰ Water temperature : 20±2℃
110	110.81	5,10,15,20,25		3,7,14,28,60,90	
130	131.91	5,10,15,20,25		3,7,14,28,60,90	
150	155.41	5,10,15,20,25		3,7,14,28,60,90	
170	173.51	5,10,15,20,25		3,7,14,28,60,90	

Table 2. Mixture Ratio of Soil-Cement (Clay Water Content-90%)

W_c (%)	Water/Cement (%)	A_w (%)	Water (g)	Cement (g)	Clay (g)
90	80	5	10.33	12.91	490.66
		10	19.25	24.06	456.82
		15	27.00	33.76	427.63
		20	33.85	42.31	402.18
		25	39.90	49.88	378.96

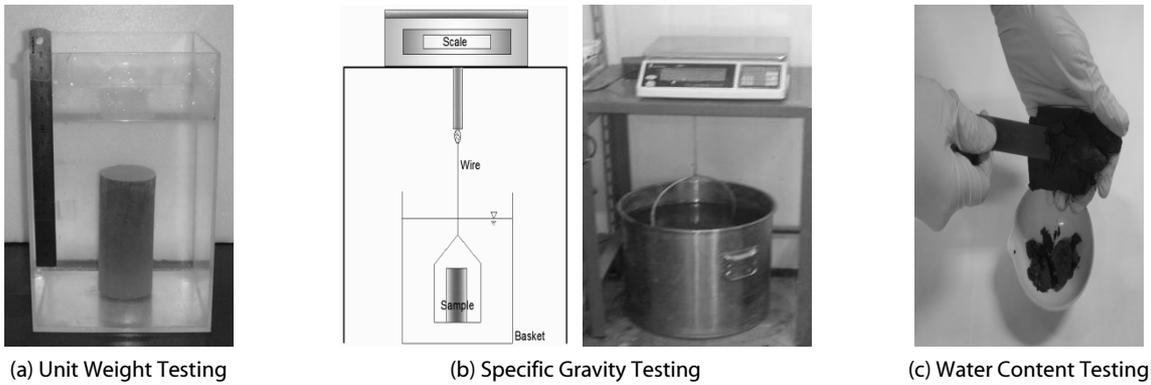


Fig. 4. Laboratory Testing Method

후 바로 해체 시 자립이 불가능하고, 물리적 특성 등에 영향을 미치므로 제작 1일 이후에 몰드를 탈형 한 후 현장과 같은 조건을 모사하기 위해 20±2℃ 인 해수 안에서 3~90일 동안 습윤양생을 수행하였으며, 이 공시체를 이용하여 양생 후 단위중량, 비중, 함수비 등의 변화를 측정하였다.

단위중량시험은 무게를 측정 후 100 × 150 mm 크기로 제작한 아크릴박스 안에 물을 채운 다음 공시체를 넣은 후 물의 변화량을 통해 체적을 구하여 단위 중량을 산정하였으며(Fig. 4(a)), 비중시험은 혼합토임을 감안하여 공시체를 물속에서 무게를 측정하는 방법으로 Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 KSF 2518 (2005) 기준으로 수행하였다. 양생 후 함수비 측정은 Fig. 4(c)에 나타난

것처럼 공시체내에서 일정한 양의 시료를 4분법으로 채취하여 함수비를 측정하였다.

4. 혼합토의 물리적 특성

4.1 혼합토의 양생 후 함수비 특성

혼합토의 함수비 변화는 공학적 거동에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 점토와 시멘트를 혼합 후 바로 측정된 결과와 일정한 재령기간에 맞추어 함수비를 측정된 결과를 비교·분석 하였다. 혼합토 조성 후 재령기간에 따른 함수비 변화를 분석한 결과, Fig. 5에서 알 수 있듯이 양생기간 7일 까지는 함수비가 점진적으로

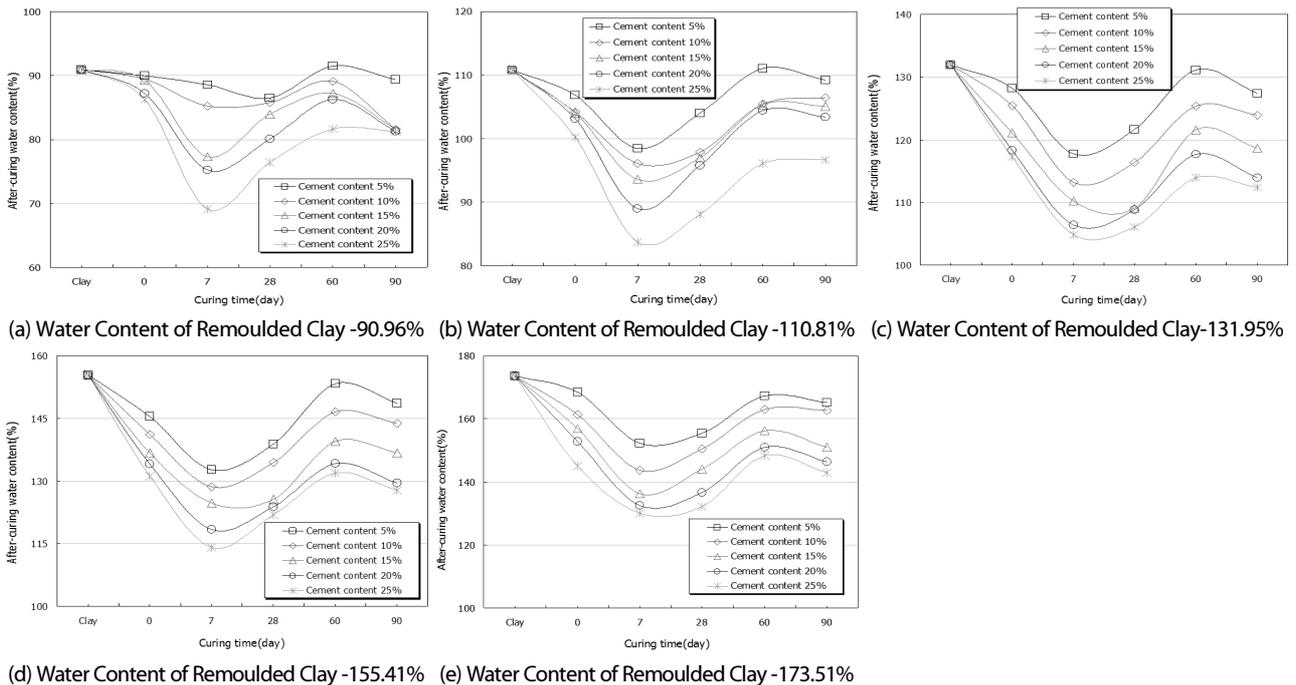


Fig. 5. After-curing Water Content with Curing Time of Cement-Admixed Ground

감소하다가 그 이후에는 초기(0일) 함수비까지 회복되는 경향을 나타낸 후 다시 감소하는 경향이 나타나는 특성을 보였다.

이러한 현상의 주원인은 습윤양생 때문인 것으로 판단된다. 즉, 초기 재령일에는 수화반응이 활발하게 활성화 되어 함수비가 급격히 감소되었지만, 시멘트의 수화반응이 종료되면 물속의 압력으로 인해 소산된 수화반응의 영역으로 물이 침투하여 나타난 결과라고 판단된다. 또한 재령 60일 이후에는 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 즉 믹싱 후 초기 함수비와 같아지는 양상을 나타내고 있는데 이러한 이유는 점토와 시멘트의 2차 화학적 반응이 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

양생 후 혼합토의 최대 함수비 감소는 모든 조건에서 시멘트 함유율 25%일 때이고, Fig. 6은 재령기간 7일 일 때 함수비 최대 감소율을 나타낸 것으로 점토 함수비 보다 21.82~43.52%로 감소되는 경향을 보여주고 있으며, 점토 함수비가 높을수록 감소는 더 크게 이루어졌다. 또한 혼합토를 믹싱 한 후 즉시 측정된 함수비와 원지반 점토의 함수비를 비교한 경우 함수비 감소는 최소 1.68%~ 최대 28.52%로 나타나 시멘트 수화반응은 혼합토 함수비에 큰

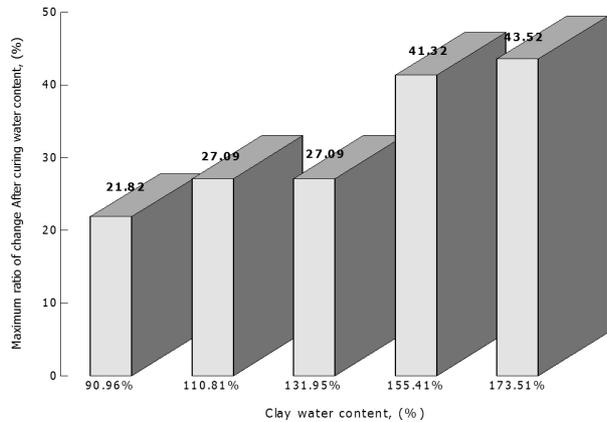


Fig. 6. Maximum Ratio of Change After-Curing Water Content with Curing Time (7day)

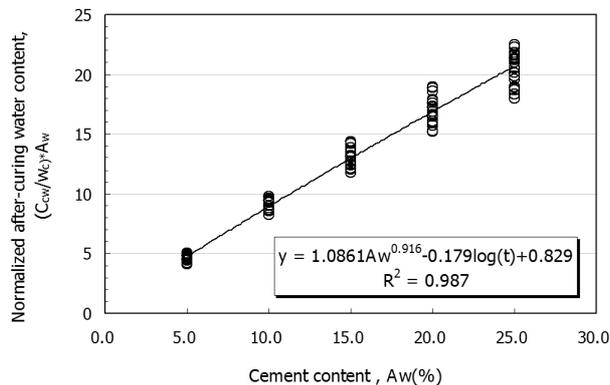


Fig. 7. Normalized After-Curing Water Content with Cement Content of Cement-Admixed Ground

영향을 미치는 것으로 확인되었다.

혼합토의 함수비 변화는 시멘트 함유율, 점토함수비, 물-시멘트 비와 재령기간 등에 지배적인 영향을 받는다. 기존 연구사례 및 설계에 의하면 시멘트 혼합토의 양생 후 함수비 변화를 파악하기 위한 방법으로는 제한된 이론을 바탕으로 대부분 경험 및 시공 후 확인조사, 복잡한 실내시험 등을 통해 이루어졌다. 본 연구에서는 점토함수비, 재령기간과 시멘트 함유율의 구성관계를 통해 양생 후 함수비 예측식을 제안하였다. Fig. 7은 재성형 점토의 초기함수비 W_c 및 시멘트 함유율 A_w , 재령일(t)에 대한 혼합토의 관계를 나타낸 것으로서, 이를 통해 특정 재령일 t 에서의 시멘트 함유율별 A_w 혼합토 함수비 C_{cw} 의 Eq. (2)와 같이 표현되었다.

$$C_{cw} = (1.086Aw^{0.916} - 0.179\log(t) + 0.829) \frac{w_c}{A_w} \quad (2)$$

여기서, C_{cw} : 혼합토의 양생 후 함수비(A_w , %); 시멘트 함유율 (W_c , %); 재성형한 점토의 함수비(t , %); 재령기간(day) 이다.

4.2 혼합토의 비중 특성

혼합토의 비중시험은 KS F 2518 (2005)을 기준으로 수행 했으며 분석결과, Fig. 8에 나타난 것처럼 2.42~3.31 범위로 시멘트 함유율 A_w , 재령기간(t)과 원지반 점토 함수비 W_c 에 따라서 비중 값은 미미한 차이를 나타냈다. 시멘트 함유율 A_w 이 증가할수록 혼합토의 비중 G_{cs} 은 감소하는 경향을 나타내고 있는데 시멘트의 수화작용으로 인하여 혼합토내에서 단위체적이 증가했기 때문으로 판단된다. 재령기간 t 와 원지반 점토 함수비 W_c 에 따른 혼합토의 비중 변화는 뚜렷한 경향을 찾아 볼 수 없었다. 각 재료별 물성시험 결과에서 원지반 점토의 비중-2.71과 시멘트 비중-3.15을 혼합토의 비중과 비교했을 경우, 다른 경향을 나타냈다. 이러한 이유는 점토에 시멘트를 첨가 함으로서 혼합토내에서 형성된 새로운 화합물의

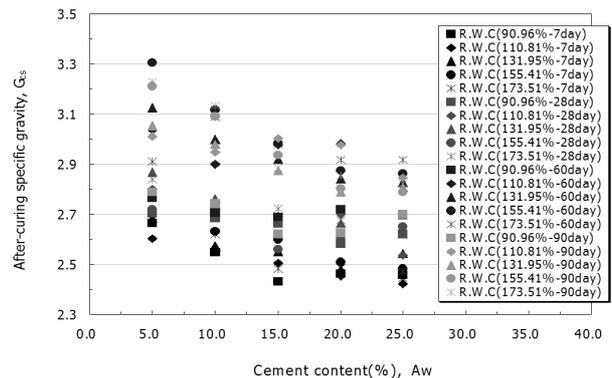


Fig. 8. After-Curing Specific with Cement Content of Cement-Admixed Ground

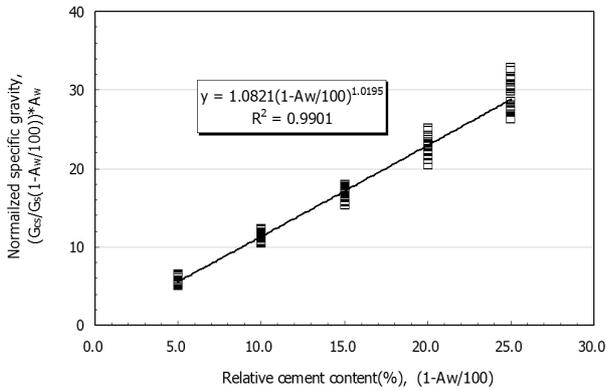


Fig. 9. Normalized Specific Gravity with Relative Cement Content

양과 상태가 시멘트와 고결된 흙입자 양에 영향을 미치기 때문에 상이한 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

혼합토의 비중은 물리적 특성에 영향을 주는 요인이다. Fig. 9는 원지반 비중 G_s 와 시멘트 함유율 A_w 로 양생 후 비중 G_{cs} 을 정규화 시킨 결과로서, R^2 은 0.99 로 나타나 신뢰성 있는 Eq. (3)으로 구현하였다. Eq. (3)을 역계산하여 Eq. (4)와 같이 혼합토의 양생 후 비중 G_{cs} 을 도출할 수 있는 제안식이다.

$$\frac{G_{cs}}{G_s \left(1 - \frac{A_w}{100}\right)} \times A_w = 1.082 \times \left(1 - \frac{A_w}{100}\right)^{1.020} \quad (3)$$

$$G_{cs} = G_s \times \left(1.082 - \frac{A_w}{100}\right)^{2.020} \times \frac{1}{A_w} \quad (4)$$

여기서, G_{cs} : 혼합토 양생 후 비중, G_s : 원지반 점토의 비중, A_w : 시멘트 함유율(%) 이다.

4.3 혼합토의 단위중량 특성

혼합토 조성 후 재령기간에 따른 단위중량 변화를 분석한 결과, Fig. 10에 나타난 것처럼 혼합토의 단위중량은 13.38~15.40 kN/m³ 범위를 나타냈으며, 시멘트 함유율이 증가 할 수록 단위중량은 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 혼합토내에서 단위체적당 고결된 입자의 양이 증가하였기 때문으로 판단할 수 있다. 점토 함수비가 높을수록 혼합토의 단위중량은 작게 나타나는 경향을 보였는데 이는 혼합토내에서 단위체적당 흙의 간극비 체적이 증가했기 때문이다. 재령기간에 따른 단위중량의 변화는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

Fig. 11에 나타난 것처럼 양생 후 혼합토 단위중량을 시멘트 함유율 A_w 과 원지반 점토의 단위중량 r_t 으로 정규화 시켜 원지반

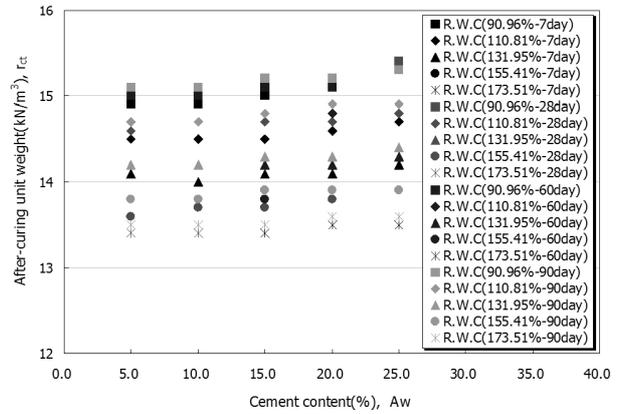


Fig. 10. After-Curing Unit Weight with Cement Content of Cement-Admixed Ground

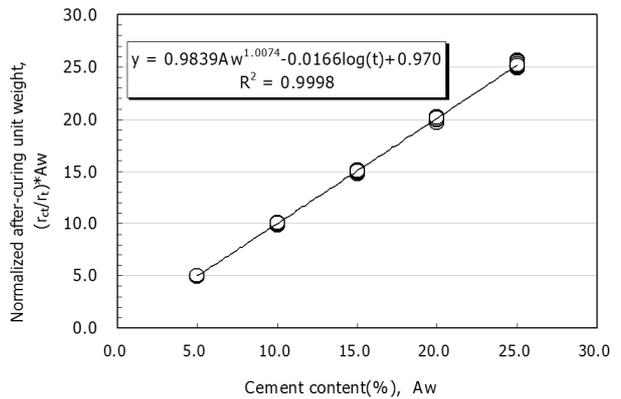


Fig. 11. Normalized After-Curing Unit Weight with Cement Content

점토 단위중량 r_t , 시멘트 함유율 A_w 과 특정 재령일(t)에 따른 혼합토 단위중량 r_{ct} 식은 Eq. (5)와 같다.

$$r_{ct} = (0.983 A_w^{1.007} - 0.017 \log(t) + 0.970) \frac{r_t}{A_w} \quad (5)$$

여기서, r_{ct} : 양생 후 단위중량(kN/m³), A_w : 시멘트 함유율(%), t : 재령기간(day), r_t : 원지반 점토의 단위중량(kN/m³) 이다.

4.4 혼합토의 간극비 특성

혼합토의 간극비는 압축특성과 관련된 공학적 거동을 좌우하는 하나의 인자이다(Lorenzo et al., 2004). 혼합토의 간극비는 입자의 크기, 함수비 변화, 시멘트 함유율 및 점토의 구조적 성질 등에 따라 상이한 결과를 나타낸다. 양생 후 혼합토의 간극비 e_c 를 분석한 결과, 혼합토의 간극비는 원지반 간극비 보다 최소 1.32에서 최대 5.44배로 크게 나타났다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 시멘트 함유율

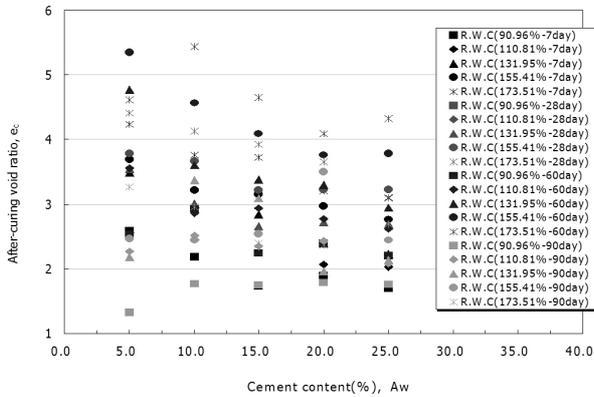


Fig. 12. After-Curing Void Ratio with Cement Content of Cement-Admixed Ground

A_w 이 증가 할 수록 혼합토 간극비 e_c 는 감소하는데 혼합토내에서 시멘테이션 효과로 흡입자와 흡입자 사이의 간극이 줄어드는 것이다. 점토 함수비 W_c 가 높을수록 혼합토의 간극비 e_c 는 거의 증가하는 경향을 확인할 수 있었는데 이는 단위체적당 흙의 간극비 체적이 증가했기 때문이다. 재령기간에 따른 간극비 변화는 뚜렷한 경향을 찾아볼 수는 없었다.

혼합토에서 간극비에 미치는 영향 인자는 시멘트 함유율, 함수비, 비중, 재령기간 및 원지반 함수비 등이 있으며, 이러한 주요한 인자를 이용하여 혼합토에서의 간극비 예측식을 제안하였다. Lorenzo et al. (2004)가 제안한 (1)의 관계식은 일반적으로 지반공학 분야에서 사용하는 양생 후 혼합토 간극비 e_c 를 도출하기 위한 식으로서 양생 후 함수비, 비중과 단위중량의 상호관계를 나타내고 있으나, 이 관계식은 시멘트 함유율 A_w 과 재령기간(t)등을 고려하지 못하는 한계를 내포하고 있다.

Figs. 7, 9 and 11은 양생 후 함수비 Eq. (2), 비중 Eq. (4), 단위중량 Eq. (5)을 구현한 결과로서 일반 간극비 관계식에 혼합토 물성 예측식 Eqs. (2), (4) and (5)를 대입하여 양생 후 혼합토 간극비 Eq. (6)을 제안하였다. 양생 후 혼합토 간극비 예측식 e_c 은 원지반 점토의 비중, 혼합토의 함수비, 시멘트 함유율과 재령기간 등을 기본적으로 반영하고 있어, 혼합토에서 설계 정수 산정 시 유용한 식임을 알 수 있다.

$$e_c = \left[\left(\frac{r_w}{r_i} \right) \left(\frac{W_c}{100} \right) G_s \left(\frac{100A_w}{W_c} + 1.086A_w^{0.916} - 0.179\log(t) + 0.829 \right) \left(1.0821 \left(1 - \frac{A_w}{100} \right) \right)^{2.020} \right]^{-1} \quad (6)$$

Eq. (6)의 원지반 점토 시료가 완전포화 시 r_i 는 포화단위중량 (r_{sat})이므로 $\frac{1+e}{G_s+e}$ 놓고 정리하면 Eq. (7)과 같이 표현할 수 있다.

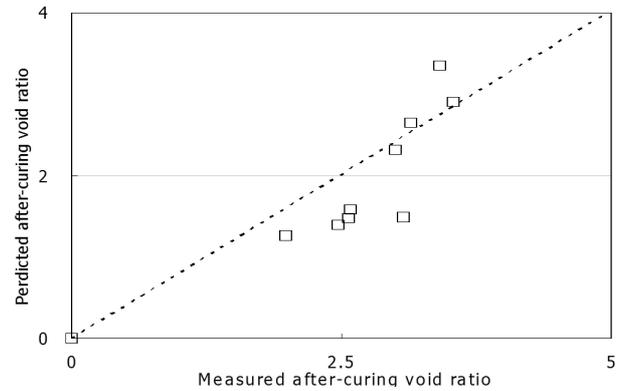


Fig. 13. Predicted After-Curing Void Ratio with Measured After-Curing Void Ratio

$$e_c = \left[\left(\frac{W_c}{100} \right) G_s \left(\frac{r_w}{r_i} \right) \left(\frac{W_c}{100} \right) G_s \left(\frac{100A_w}{W_c} + 1.086A_w^{0.916} - 0.179\log(t) + 0.829 \right) \left(1.0821 \left(1 - \frac{A_w}{100} \right) \right)^{2.020} \right]^{-1} \quad (7)$$

본 연구에서 제안한 간극비 예측식(Eq. 7)을 검증하기 위하여 방콕 점토를 대상으로 간극비에 대한 실험결과와 예측식에 의한 평가를 비교하였다. 방콕 점토의 조건은 함수비 76~84%, 액성한계 103%, 소성지수 60%로 본 대상지역 보다 조금 더 연약한 점토 조건이다(Lorenzo et al. 2006).

Fig. 13에서 알 수 있듯이 기존에 발표되었던 실험결과와 본 연구에서의 예측식 평가결과는 매우 유사하게 나타났으며, 이를 통해 본 연구에서 제안한 예측식이 일반 혼합토의 간극비 예측에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 제안한 간극비 예측식은 혼합토의 시멘트 함유율에 따른 비중, 단위중량과 함수비 등을 조합하여 만든 구성관계식으로 기존의 제한된 이론을 바탕으로한 경험식을 극복할 수 있는 관계식이며, 복잡한 실내시험과 시공 후 확인조사를 수행하지 않고도 설계정수를 유추할 수 있는 제안식임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 점토 함수비 90~170% 조건에 대하여 각각의 시멘트 함유율 5~25%로 혼합토를 조성하였으며, 제작한 공시체는 일정한 재령기간 3~90일에 맞추어 함수비, 비중과 단위중량 등에 대한 물리적 특성 시험을 수행하였다. 시험결과를 이용하여 원지반 점토의 물리적 특성, 시멘트 함유율과 재령기간 등을 고려한 혼합토의 함수비, 비중과 단위중량에 관한 예측식을 제안하였다. 혼합토의 물성 예측식을 지반공학 분야에서 일반적으로 사용하는 간극비 산출식에 대입하여 혼합토의 간극비 예측식을 제안하였는데, 이와

관련된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 혼합토의 양생 후 함수비 변화는 초기조건에서 재령기간 7일까지는 점진적으로 감소하지만 이후에는 초기(0일) 함수비까지 회복되는 경향을 확인할 수 있었으며, 재령기간 7일 때 함수비는 최대 감소율을 보였는데 원지반 점토 보다 최소 21.82%에서 최대 43.52%으로 감소율을 나타내었다. 이러한 원인은 시멘트 첨가의 영향으로 초기 재령일에는 수화반응이 활발하게 활성화 되어 함수비가 급격히 감소되지만 수화반응이 종료되면 물속의 압력으로 인해 소산된 수화반응의 영역으로 물이 침투하여 나타난 결과라고 판단된다.
- (2) 혼합토의 단위중량은 13.38~15.40kN/m³, 비중은 2.42~3.31로 나타났으며, 시멘트 함유율이 증가할수록 단위중량은 증가하였으나 비중은 감소하였다. 점토 함수비가 높을수록 혼합토의 단위중량은 작게 나타났으나 비중은 명확한 경향을 확인할 수 없었으며, 재령기간에 따른 혼합토의 단위중량과 비중의 변화도 뚜렷한 경향을 볼 수 없었다. 이러한 원인들은 점토에 시멘트를 첨가 함으로서 혼합토내에서 형성된 새로운 화합물의 양과 상태가 시멘트와 고결된 흡입자 양에 영향을 미치기 때문인 것으로 확인할 수 있다.
- (3) 혼합토의 물리적 특성에 영향을 미치는 요소인 원지반 점토 함수비, 시멘트 함유율, 재령기간등을 고려한 양생 후 혼합토 함수비(Eq. 2), 단위중량(Eq. 4)와 비중(Eq. 5)에 대한 예측식을 도출하였다. 혼합토의 물리적 예측식을 일반 간극비 관계식에 대입하여 (Eq. 7)과 같은 혼합토 간극비 예측치를 제안하였다.
- (4) 본 연구의 간극비 예측식(Eq. 7)을 검증하기 위하여 방콕 점토를 대상으로 간극비에 대한 실험결과와 예측식에 의한 평가를 비교하였다. 기존에 발표되었던 시험결과와 본 연구에서의 예측식 평가결과는 매우 유사하게 나타났으며, 이를 통해 본 연구에서 제안한 예측식이 일반 혼합토의 간극비 예측에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0013057).

References

- 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 (in Singapore).
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T. S. (2003). "Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with abrams' law as a basis." *Geotechnique* 53, No. 4, pp. 439-444.
- Kezdi, A. (1979). "Stabilization with lime cement in geotechnical engineering." *Elsevier Scientific Publication Co*, Amsterdam, Vol. 9, pp. 163-174.
- KS F 2518 (2005). *Standard test method for absorption and bulk specific gravity of rock*, pp. 1-4 (in Korean).
- Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T. (2004). "Fundamental parameters of cement-admixed clay." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 10, pp. 1042-1050.
- Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T. (2006). "Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 161-174.
- Miura, N., Horpibulsok, S. and Nagaraj, T. S. (2001). "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content." *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 5, pp. 33-45.
- Petchgate, K., Sukmongkol, W. and Voottipruex, P. (2001). "Effect of height and diameter ratio on the strength of cement stabilized soft bangkok clay." *Geotech. Eng.*, Vol. 31, No. 3, pp. 227-239.
- 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.
- Watabe, Y., Tsuchida, T., Furuno, T. and Yuasa, H. (2000). "Mechanical characteristics of a cement treated dredge soil utilized for waste reclamation landfill." *Proc. Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, pp. 739-745.
- Yin, J. H. (2001). "Stress-strain-strength characteristics of soft hong kong marine deposits without or with cement treatment." *Lowland Technol.*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-13.