

시멘트 혼합토 및 복합지반의 강도, 변형 특성 및 수치해석

Strength and Deformation Characteristics, and Numerical Analysis for Cement Admixed Clay and Composite Ground

전 제 성[†]
Jesung Jeon

Received: May 14th, 2014; Revised: June 10th, 2014; Accepted: July 3rd, 2014

ABSTRACT : In this research, the composite grounds including original clay and soil-cement were constructed for conducting uniaxial compression test. Strength and deformation properties were analysed using results of laboratory tests with variations of water content of clay, replacement ratio and cement content. Numerical simulation using 3D distinct element method was conducted for soil cement. For strength of composite ground that contains more than cement contents of 15 %, it is more effective to increase cement content than increase of replacement ratio. Strength and elastic modulus of composite ground could be predicted by regression equations using uniaxial compression strength of clay, cement content of soil cement and replacement ratio. For strength and elastic modulus of soil cement, which is most important things for predicting final strength and elastic modulus of composite ground, numerical simulation using the distinct element method adapted bonding model could be used to verify laboratory test, and predict strength and elastic modulus.

Keywords : Soil-cement, Composite ground, Uniaxial compression strength, Elastic modulus, Distinct element method

요 지 : 본 연구에서는 원지반 점토와 시멘트 혼합토를 포함하는 복합지반을 조성하고 이에 대한 실내 일축압축강도 시험을 통해 원지반 점토 함수비 및 치환율, 시멘트 함유율 등에 따른 강도 및 변형 특성치를 분석하였으며, 혼합토에 대한 개별요소 수치모델링을 수행하였다. 시멘트 함유율 15 % 이상에서는 최종적인 복합지반의 강도에 있어 치환율을 증가시키는 것보다 시멘트 함유량 증가 등을 통한 혼합토의 강도를 증가시키는 것이 더욱 유리함을 알 수 있었으며, 회귀분석을 통해 원지반 점성토의 일축압축강도와 시멘트 혼합토의 시멘트 함유율, 복합지반 치환율을 이용하여 최종적인 복합지반의 일축압축강도 및 탄성계수 예측이 가능하였다. 치환율과 함께 최종적인 복합지반의 강도 및 변형 특성치 예측에 가장 중요한 요소인 시멘트 혼합토의 일축압축강도는 실내시험 및 본딩모델이 적용된 3차원 개별요소 수치모델링을 통해 그 검증과 예측이 가능하였다.

주요어 : 시멘트 혼합토, 복합지반, 일축압축강도, 탄성계수, 개별요소방법

1. 서 론

다양한 지반보강 및 연약지반 개량, 구조물 기초시공 등에 있어 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 환경친화적 시공이 가능한 다양한 혼합처리 기술이 개발(Kamon & Bergado, 1991; Bergado et al., 1999) 되고 있으며, 실제 현장에도 활발히 적용되고 있다. 그러나 엄청난 적용사례와 향후의 지속적 수요 대비, 그 설계 및 관련 연구내용을 살펴보면 제한된 이론을 바탕으로 대부분의 기술분석은 경험 및 시공 후 확인조사 등을 통해

이루어지는 것이 현실이다. Watabe et al.(2000), Horpibulsuk et al.(2003), Kim et al.(2006)은 흙-시멘트 혼합토에 대한 일축압축 및 대형삼축압축시험 결과를 통해 흙-시멘트 혼합토의 거동이 일반 흙 및 시멘트 각각의 개별 응력-변형 거동과는 매우 상이함을 제시하였으며, 단위시멘트량 및 흙의 입도분포가 최종 혼합토의 역학적 거동에 큰 영향요소임을 언급하였다. 최근 국내에서도 관련 연구가 활발히 수행되었는데, Lee et al.(2009)은 준서점토를 이용한 초빈배합 혼합점토에 대한 강도특성을 연구하였고, Jeon et al.(2013)은 혼합토에 대한 실내시험을 통해 점토 함수비-시멘트 함유율 및 재령일에 대한 일축압축강도 변화를 분석하였으며, 회귀분석을 통해 각 배합조건별 Abrams 방정식 상의 계수 값 변화 및 재령일에 대한 예측식을 제안하였다. 각종 지반보강 및

[†] Department of Construction Information Engineering, Induk University (Corresponding Author : jsjeon@induk.ac.kr)

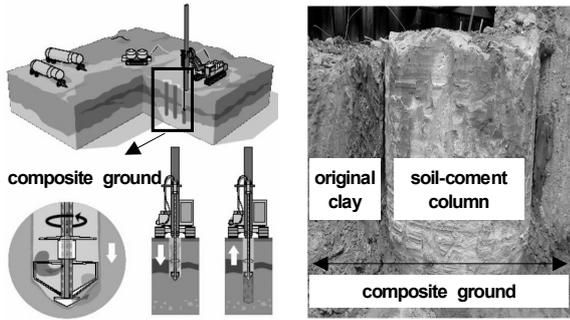


Fig. 1. Composite ground with clay and soil-cement

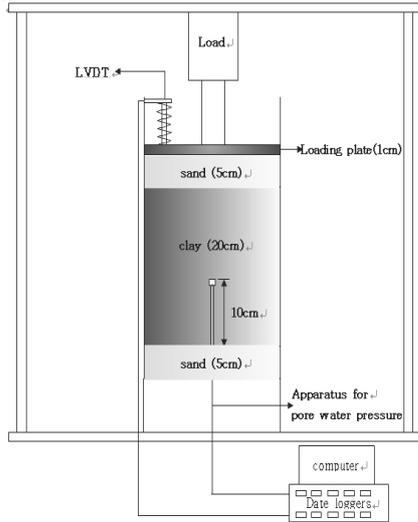


Fig. 2. Consolidation apparatus for making original clay ground

연약지반 처리 시 적용된 흙-시멘트 혼합토 개량체는 지반 내에 특정 단면형상과 배치조건으로 형성되며, 원지반과 혼합토로 구성된 복합지반의 형태를 띠게 된다.

지반보강 및 연약지반 개량, 구조물 기초시공 등 모든 혼합토 적용 사례에 있어, 이러한 복합지반의 등가 강도 및 변형 특성치는 보강범위와 보강정도를 결정짓는 주요 설계정보로 이용되고 있다. 그러나 현재의 관련 설계 등에 적용되고 있는 복합지반의 등가 강도 및 변형 특성치는 원지반 특성치에 혼합토의 치환율을 산술 적용시키는 등의 단편적 방식으로 수행되고 있으며, 이는 복합지반의 거동예측 오류 및 전체 설계에 대한 기술오류의 주요 원인으로 작용하고 있다. 본 연구에서는 원지반 점토와 시멘트 혼합토를 포함하는 복합지반을 조성하고 이에 대한 실내 일축압축강도 시험을 통해 치환율 및 시멘트 함유율, 양생기간 등에 따른 강도 및 변형 특성치를 분석하였으며, 혼합토에 대한 개별요소 수치모델링을 수행하였다.

2. 혼합토 및 복합지반 조성

복합지반 조성에 앞서 시멘트 함유율을 5, 15, 25 %로 변

Table 1. Sample condition for lab. test

w_n clay (%)	Replacement ratio (%)	Cement content (%)	Water-cement ratio (%)	Curing time (day)
30	20	5, 15, 25	80	7, 28
	40	5, 15, 15		
	60	5, 15, 25		
40	20	5, 15, 25		
	40	5, 15, 25		
	60	5, 15, 25		
50	20	5, 15, 25		
	40	5, 15, 25		
	60	5, 15, 25		

화시키되 물-시멘트비 80 %, 양생기간 7일, 28일 조건에서 점토-시멘트에 대한 혼합토 시료를 조성하였다. 함수비가 30 %, 40 %, 50 %의 원지반 점토와 혼합토로 구성되는 복합지반은 치환율 20, 40, 60 % 조건으로 실내 일축압축시험이 가능하도록 조성하였다. 본 연구에 사용한 점토는 부산 용동지역의 해성 점토로서 자연함수비 61 %, 액성한계 42 %, 소성지수는 21, 비중 2.70, #200체 통과율 97.8 %로서 통일 분류법상 CL로 분류되었다. 혼합토 조성에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로서 비중 3.15, 분말도 3,369 cm^2/g , 안정도 0.5 mm의 물리적 특성을 보였다. 원지반 점토와 시멘트 혼합토를 이용하여 복합지반을 다음과 같은 순서로 조성한 후, 각 시료별 실내 일축압축시험을 실시하였다.

일단 고함수비 점토를 $\phi 380$ mm, L-700 mm 크기의 중형 토조에 압밀시킨 후 원지반 조건을 형성하였다. 중형토조는 상하배수가 가능하고, 하중 및 변위를 자동으로 수집할 수 있는 프로그램 및 장치를 사용하였다. 압밀도를 평가하기 위하여 간극수압계와 침하계를 설치하였으며, 시료 상하부에 모래를 각 50 mm씩 포설하여 배수거리를 짧게 함으로써 압밀을 촉진시키도록 하였다. 압밀중 시료 침하량을 쌍곡선 법으로 분석하여 소정의 압밀도를 평가하였다.

치환율에 따른 복합지반을 조성하기 위하여 3.93 cm^2 (치환율 20 %), 7.85 cm^2 (중치환율 40 %), 11.78 cm^2 (고치환율 60 %) 면적의 핸드 보링 장치를 이용하여 압밀된 시료에서 $\phi 50$ mm, L-180 mm 크기의 점토시료를 채취하였다. 중공 시료 안에 점토 함수비와 시멘트 함유율, 물-시멘트 비 등의 조건별 조성 혼합토를 탈형장치 내에 설치하였다. 탈형장치에서 탈형 된 공시체는 현장조건을 유사하게 모사하기 위하여 해수를 이용하되, 현장 수중조건과 동일한 온도에서 습윤 양생을 7, 28day까지 수행한 후 최종 실내시험을 수행하였다.

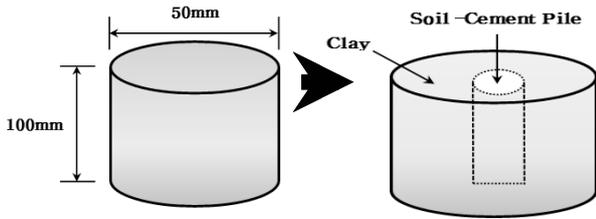


Fig. 3. Construction diagram of composite ground

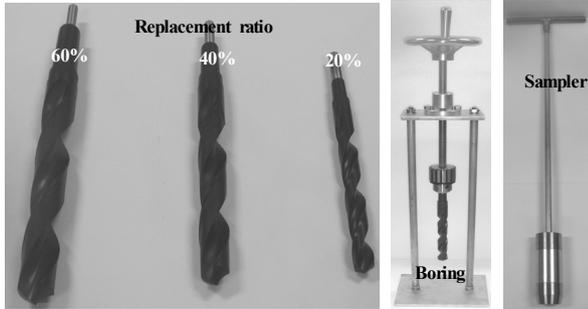


Fig. 4. Devices for making composite ground

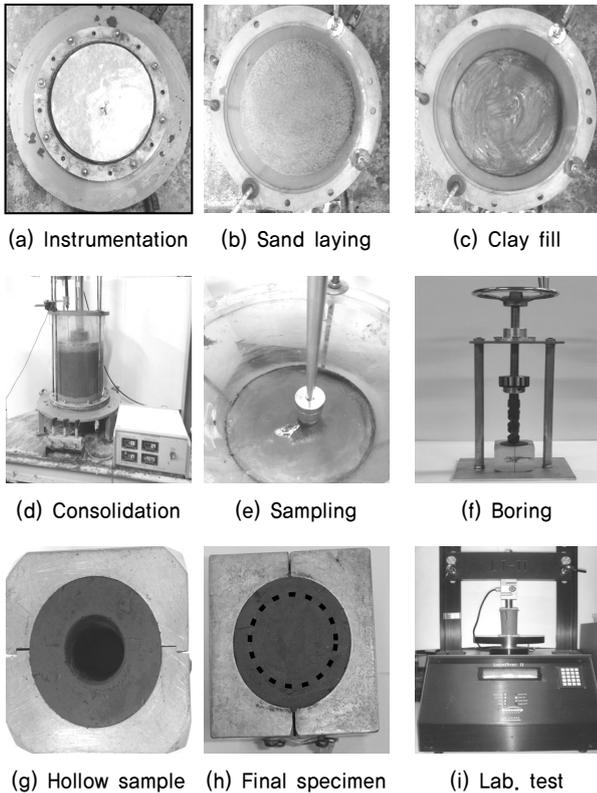
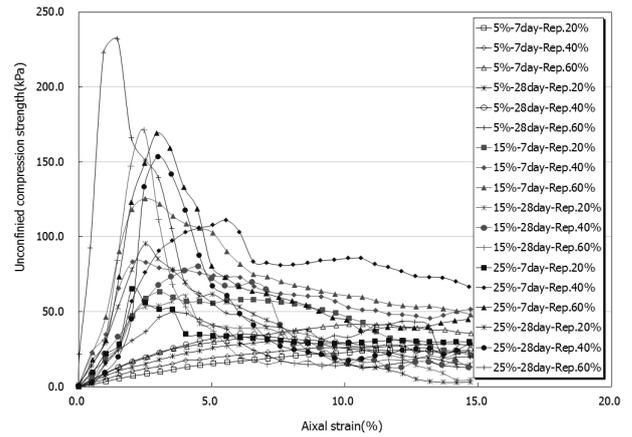


Fig. 5. Building process of composite ground and lab. test

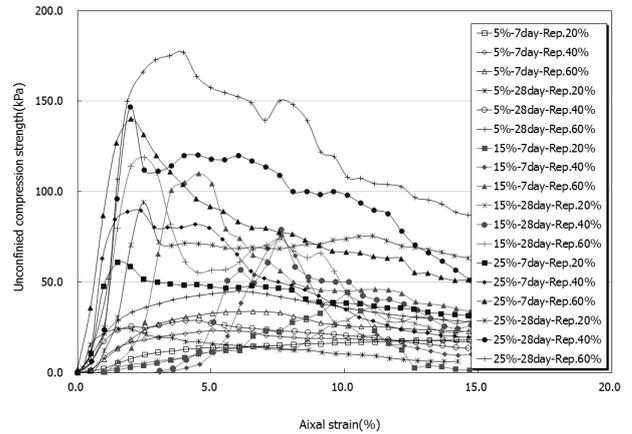
3. 복합지반의 강도 및 변형특성 분석

3.1 복합지반의 응력-변형 관계

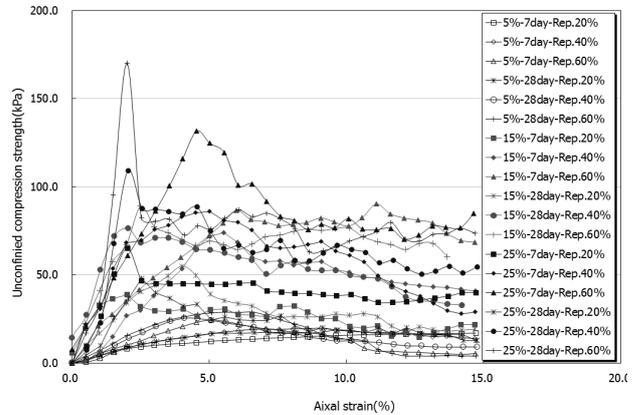
원지반의 점토 함유비가 30 %, 40 %, 50 % 일 때, 치환율 20 %, 40 %, 60 % 조건 및 양생일 7일, 28일 조건에 대한



(a) Clay water content = 30 %



(b) Clay water content = 40 %



(c) Clay water content = 50 %

Fig. 6. Uniaxial compression strength of composite ground

복합지반 시료를 이용하여 일축압축강도시험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

일축압축강도는 17.04~232.19 kPa로 나타났으며, 일축 압축강도가 최대일 때의 변형률은 1.5~13.7 %로 다양하게 나타났다. 모든 조건에서 치환율이 크고 점토 함유비가 적을수록 일축압축강도는 크게 나타나는 경향을 보였으며, 시멘트 함유율이 많고 재령일이 28day일 때가 다른 조건에 비해 큰 일축압축강도를 나타내었다. 치환율이 커짐에 따라

응력-변형률 기울기도 커져 탄성계수가 증가하는 결과를 나타내었다.

3.2 영향 인자별 일축압축강도 변화 및 예측

원지반 점토 함수비와 치환율에 따른 복합지반의 강도변화를 분석하였다. Fig. 7은 원지반 점토 함수비에 따른 시멘트 함유율, 치환율, 재령일별 일축압축강도를 나타낸다. 모든 경우에 있어 원지반 점토 함수비가 낮고 치환율이 높을수록 높은 강도를 나타내는 일반적인 결과를 보였다. 동일한 원지반 점토 함수비 조건에서는 시멘트 함유율이 높을수록 치환율 증가에 따른 복합지반의 강도 증가율이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

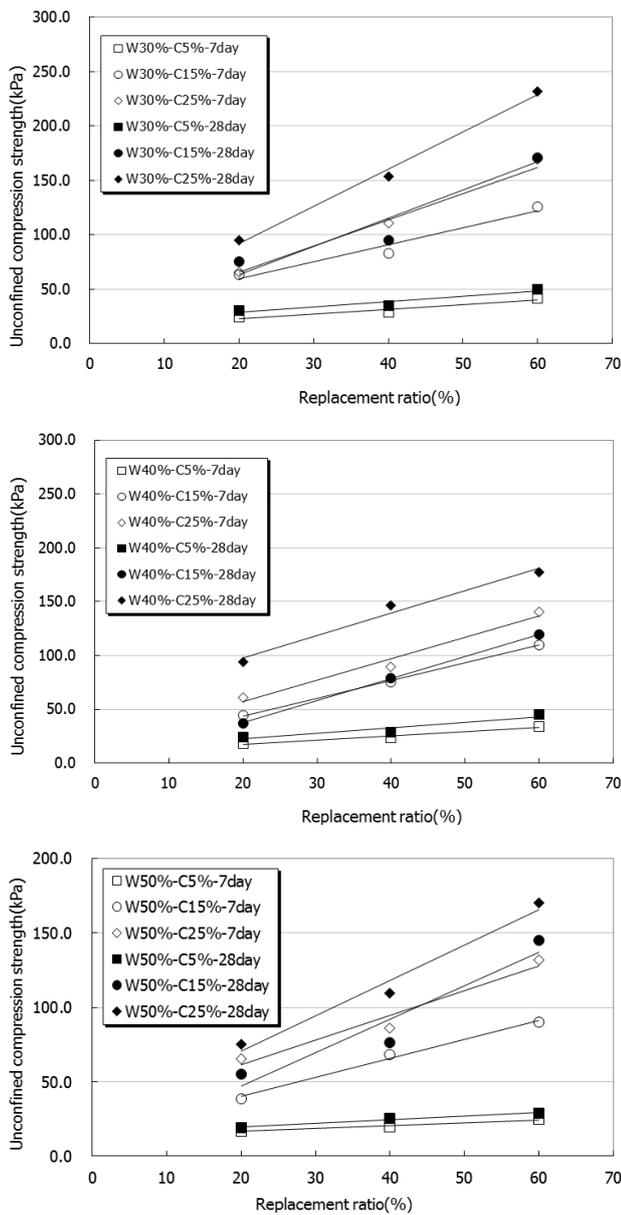


Fig. 7. Uniaxial compression strength with clay water content (W), cement ratio (C) and curing time

최종적인 복합지반의 강도에 있어 시멘트 함유율과 치환율에 대한 각각의 영향을 파악하기 위하여, 점토 함수비 40 % 시료에서 각 조건별 일축압축강도를 시멘트 함유율 5 %, 재령일 28일 조건에서의 일축압축강도로 정규화하였다(Fig. 8). 결과에서 알 수 있듯이, 치환율 증가에 따른 강도의 증가율은 시멘트 함유율 5 % 일 때 치환율 증가에 따라 최대 1.86 배의 강도 증가비를 나타내는 반면, 시멘트 함유율이 15 % 인 경우는 최대 4.92배, 시멘트 함유율이 2 %인 경우는 최대 7.32배의 강도 증가비를 나타내었다. 동일한 치환율 40 %에 대해 시멘트 함유율 증가에 따른 최대 강도 증가비는 6.07인데 반해, 동일한 시멘트 함유율 15 %에 대해 치환율 증가에 따른 최대 강도 증가비는 4.92로 나타났다. 본 실내 시험상의 결과로 그 대상을 국한한다면, 매우 작은 시멘트 함유율의 경우를 제외하고는 최종적인 복합지반의 강도에 있어 치환율을 증가시키는 것보다는 혼합토의 시멘트 함유량을 증가시키는 것이 더욱 유리함을 알 수 있다.

본 연구에서의 각 조건별 시험결과를 이용하여 원지반 점토 함수비, 시멘트 함유율, 치환율 등을 종합적으로 고려한 복합지반의 일축압축강도 예측식을 도출하였다. Fig. 9는 각 조건별 복합지반의 일축압축강도를 원지반 점토의 일축압축강도로 정규화한 결과로서, Eq. (1)과 같은 회귀분석

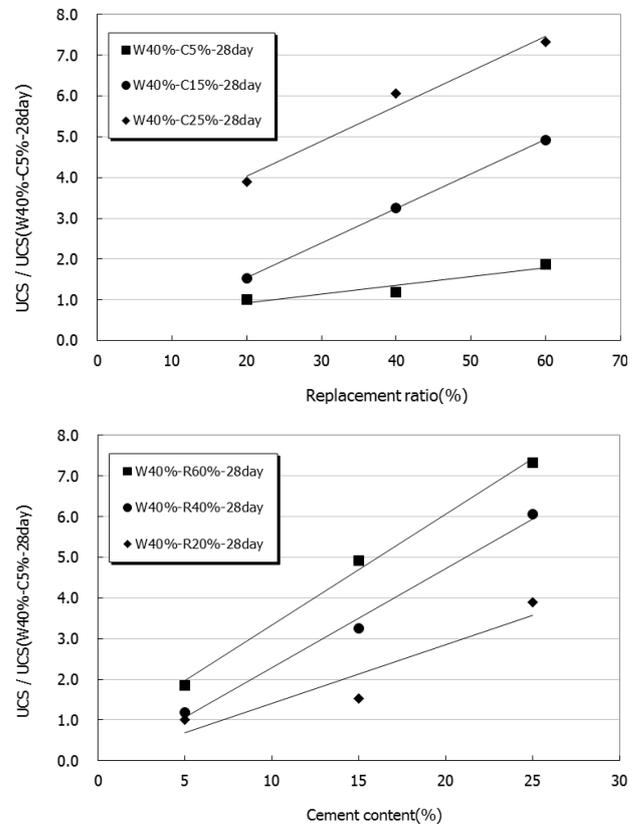


Fig. 8. Normalized uniaxial compression strength by UCS (w40 %-C5 %-28day)

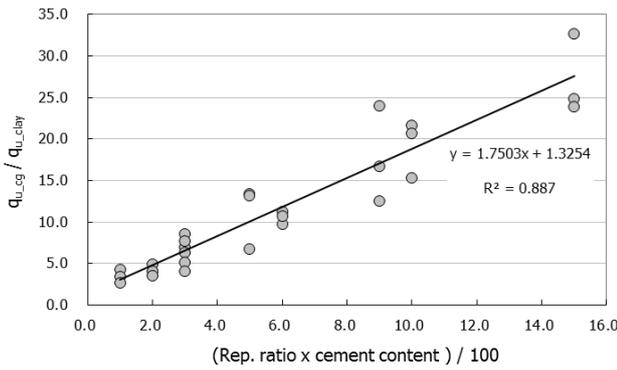


Fig. 9. UCS of composite ground by UCS of clay, replacement ratio and cement ratio

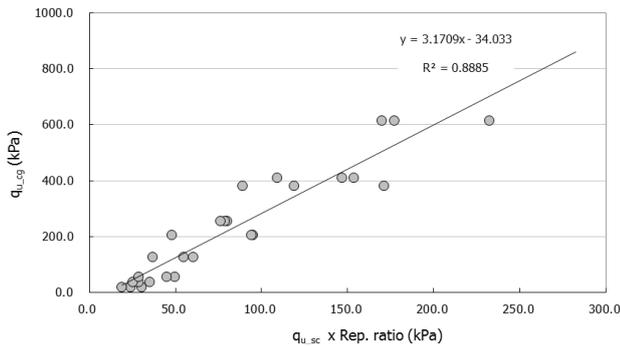


Fig. 10. UCS of composite ground by UCS of soil-cement and replacement ratio

결과를 얻을 수 있었다.

$$q_{u-cg} = \frac{1.7503 \times (CC \times RE) + 1.3254}{q_{u-clay}} \quad (1)$$

여기서 q_{u-cg} 는 복합지반의 일축압축강도, q_{u-clay} 는 원지반 점성토만의 일축압축강도, CC 는 시멘트 함유율, RE 는 치환율을 나타낸다. 시멘트 함유율 및 재령일 등에 대한 변수를 단순화시키기 위하여 시멘트 혼합토의 일축압축강도를 이용한 복합지반의 일축압축강도예측을 수행하였다. Fig. 10은 시멘트 혼합토 강도와 치환율에 대한 복합지반의 일축압축강도를 나타낸 것으로서, 이들은 Eq. (2)와 같은 일정 상관관계를 보임을 알 수 있다.

$$q_{u-cg} = 3.1709 \times (q_{u-sc} \times RE) - 34.033 \quad (2)$$

여기서 q_{u-sc} 는 시멘트 혼합토의 일축압축강도를 나타낸다. 즉 특정 시멘트 함유율과 재령일에 대한 효과를 포함하고 있는 시멘트 혼합토의 일축압축강도를 알 수 있다면, 여기에 치환율이 적용된 복합지반의 일축압축강도의 예측이 가능하였다.

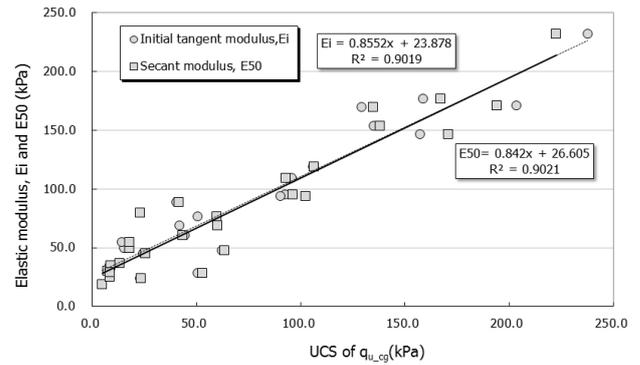


Fig. 11. Elastic modulus vs UCS of composite ground

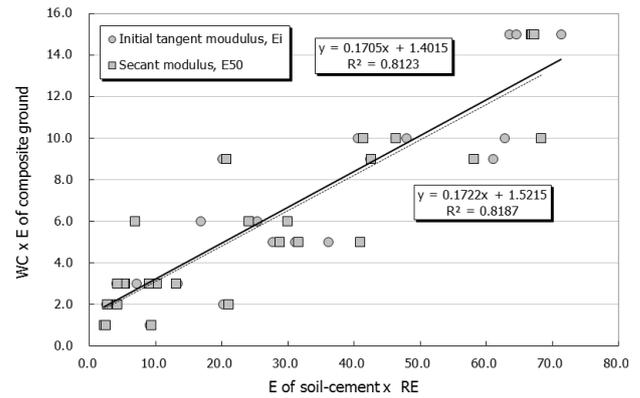


Fig. 12. Elastic modulus of composite ground with UCS of soil-cement, replacement ratio and clay water content

3.3 탄성계수 변화 및 예측

시멘트 혼합토 공법 적용 시 복합지반의 적정 탄성계수 산정은 수치해석 등을 이용한 지반변형 예측 시 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 원지반 점토 함수비 및 시멘트 함유율, 치환율 등을 변수로 한 실내시험 결과를 바탕으로 이들 영향 인자들과 탄성계수에 대한 상관관계를 분석하였다. Fig. 11은 복합지반의 일축압축강도와 초기 접선탄성계수 및 할선 탄성계수 관계를 나타낸 것으로서, Eq. (3)에서와 같이 높은 부합도를 보이며 일정한 관계를 나타냄을 알 수 있다. 즉 Eq. (1) 및 Eq. (2)를 통해 복합지반의 일축압축강도 예측이 가능하다면 이 결과를 통해 탄성계수의 예측이 가능함을 알 수 있다.

$$E_i = 0.8552 \times q_{u-cg} + 23.878 \quad (3)$$

$$E_{50} = 0.842 \times q_{u-cg} + 26.605 \quad (4)$$

여기서 E_i , E_{50} 은 초기 접선탄성계수 및 할선탄성계수를 각각 나타낸다. Fig. 12는 시멘트 혼합토의 탄성계수, 치환율, 원지반 점토 함수비와 복합지반의 탄성계수간의 회귀분

석 결과를 나타낸 것으로서, 일정 상관관계를 나타내고는 있으나 부합도는 복합지반의 일축압축강도를 직접 이용한 것이 비해 떨어지는 것을 알 수 있다.

$$E_{i-cg} = \frac{0.1722 \times (E_{i-sc} \times RE + 1.5215)}{WC} \quad (5)$$

$$E_{50-cg} = \frac{0.1705 \times (E_{50-sc} \times RE + 1.4015)}{WC} \quad (6)$$

여기서 E_{i-cg} , E_{50-cg} 는 복합지반의 초기 접선탄성계수 및 할선탄성계수를 각각 나타내며, E_{i-sc} , E_{50-sc} 는 시멘트 혼합토의 탄성계수, WC 는 원지반 점토의 함수비를 나타낸다.

4. 3차원 개별요소 수치모델링

특정 함수비 조건을 갖는 점토-시멘트 혼합토를 조성, 이에 대한 실내 일축압축시험을 수행하였으며 개별요소 기법을 이용하여 시험과정에 대한 수치모델링을 수행하였다. 개별요소법은 조립재료 및 락필재료를 대상으로 한 지반공학 분야에 그 활용성이 증가하고 있는데, 지반공학분야의 응용방안 제시(Cundall & Strack, 1979; Cundall, 2001)를 시작으로 조립재료의 미시적 강도특성(Ting et al., 1989), 락

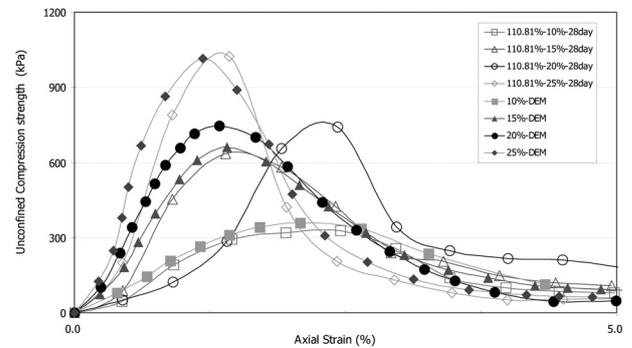
필재료에 대한 대형삼축압축시험 수치모델링 및 수리연동 해석(Jeon et al., 2006), 수리연동해석을 응용한 댐체 침투 그라우팅 수치모델링(Lee & Lim., 2007) 등 많은 분야에 그 적용이 증가하고 있다. 혼합토는 점토 함수비 111 %와 155 % 조건에 대하여 시멘트 함유율을 10 %, 15 %, 20 %, 25 %로 변화시켜가며 조성하였다. 사용된 점토는 복합지반의 점토와 동일한 것을 사용하였다. 개별요소 수치모델은 실내 시험에 사용되었던 시료의 1/10 크기로 축소하여 구성하였는데, 기존 연구에서와같이 원통형 실린더 형태의 경계면 내에 구(球)형의 개별요소들을 생성하였다(Itasca, 2004). 생성된 개별요소들은 상하부 및 측면의 총 3개 경계면에 의해 구속되도록 하였다. 일축압축시험 시 시료 측면에는 별도의 구속조건이 없으나, 개별요소 수치모델링 초기 과정에서 개별요소들이 시료를 이탈하여 불평형 상태로 발산하는 수치적 오류현상을 방지하고자, 개별요소 수치모델링에서는 측면에 별도 경계면을 배치하였다. 해석 초기에서는 매우 작은 축압을 가하되 개별요소들의 접촉이 안정적으로 이루어진 후에는 측면 경계면을 제거하는 방식으로 실내시험을 모사하였다. 수치모델링에 적용된 개별요소들은 $R_{min} = 0.20 \text{ mm}$, $R_{max} = 0.25 \text{ mm}$ 범위에서 정규분포형태로 임의 위치에 생성하였으며, 총 5,402개의 개별요소를 생성하였다. 기존의 조립토에 적용되었던 선형 접촉모델은 시멘트

Table 2. Micro parameters for DEM

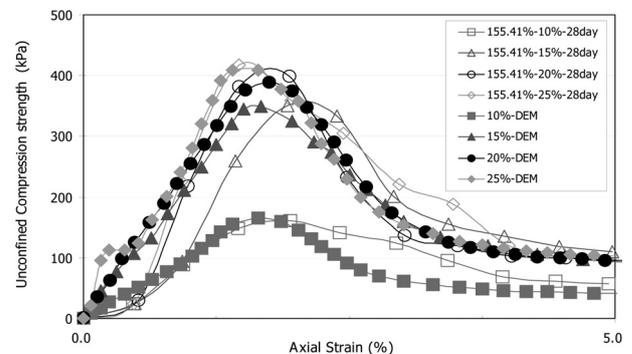
Micro parameters	Clay water content	
	111 %	155 %
Density, ρ (kN/m ³)	2,200	2,200
Normal stiffness, k_n (N/m)	7.0×10^2	3.3×10^2
Shear stiffness, k_s (N/m)	7.0×10^2	3.3×10^2
Friction coefficient, μ	0.5	0.4
Wall stiffness, k_w (N/m)	5.0×10^{15}	5.0×10^{15}

Table 3. Micro parameters for parallel bonding

w_{day} (%)	cement content	\bar{k}_n (Pa)	\bar{k}_s (Pa)	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
111	10 %	5.0×10^{11}	5.0×10^{11}	0.7×10^5	0.7×10^5
	15 %			1.95×10^5	1.95×10^5
	20 %			2.16×10^5	2.16×10^5
	25 %			3.2×10^5	3.2×10^5
155	10 %	5.0×10^{11}	5.0×10^{11}	0.23×10^5	0.23×10^5
	15 %			0.99×10^5	0.99×10^5
	20 %			1.12×10^5	1.12×10^5
	25 %			3.0×10^5	3.0×10^5



(a) Clay water content = 111 %



(b) Clay water content = 155 %

Fig. 13. Numerical modelling with clay water content and cement content

와 점토의 고결현상을 표현하지 못하는 한계가 있는바, 본 연구에서는 병렬 본딩모델을 개별요소들의 접촉점 모델로 적용하였으며, 수치 보정과정을 통해 세부 미시물성치를 Table 2 및 Table 3과 같이 산정하였다.

Fig. 13은 실내 일축압축시험 및 이에 대한 개별요소 수치모델링 결과를 나타낸 것으로서, 적정 수치보정 과정을 통한 본딩모델 적용에 의해 점토-시멘트 고결현상에 대한 수치모사가 가능함을 알 수 있다. 기존 수치모델링에서와 같이 초기의 점토 함수비에 따라 기본 미시물성치를 달리 적용해야 하며, 시멘트 함유율에 따라 비선형적 본딩 미시물성치가 요구됨을 알 수 있다. 시멘트의 함유율이 높아짐에 따라 일축압축강도가 증가하고, 이는 적정 미시물성치 산정과정에서 본딩 미시물성치중 $\text{normal}(\bar{\sigma})$ & $\text{shear}(\bar{\tau})$ 값의 증가를 수반함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 시멘트 혼합토 및 복합지반에 대한 시료 조성과 실내 일축압축시험, 수치해석 등을 수행하여 원지반 점성토 함수비, 치환율, 시멘트 함유량 등에 따른 강도 및 탄성계수 변화를 분석하고 이를 이용한 각각의 예측식을 제안하였다. 원지반 점성토를 중형 토조에서 소정의 조건으로 압밀시킨 후, 샘플러에 의한 실내시험용 크기의 시료 채취 및 각각의 치환율 조건을 모사할 수 있는 보링장치를 고안하여 시멘트 함유율을 달리한 혼합토를 설치하는 방식으로 최종적인 복합지반을 구성할 수 있었다.

시멘트 함유율과 치환율이 최종 복합지반 강도에 미치는 영향을 파악한 결과, 시멘트 함유율 15 % 이상에서는 최종적인 복합지반의 강도에 있어 치환율을 증가시키는 것보다는 혼합토의 시멘트 함유량을 증가시키는 것이 더욱 유리함을 알 수 있었다. 원지반 점성토의 일축압축강도와 시멘트 혼합토의 시멘트 함유율, 치환율 및 최종 복합지반의 일축압축강도에 대한 회귀분석을 통해 Eq. (1)과 같은 상관식을 도출하였다. 시멘트 혼합토의 일축압축강도와 복합지반의 일축압축강도의 관계는 치환율을 이용하여 Eq. (2)와 같이 표현될 수 있었는데, 시멘트 혼합토의 강도에는 시멘트 함유율과 재령일, 점성토와의 상호작용 효과 등이 모두 포함된 것이므로, 이러한 방식으로 유도된 관계식은 치환율에 따른 복합지반의 강도예측 시 그 활용성이 높을 것으로 판단된다.

원지반 점토의 함수비, 시멘트 함유율, 치환율에 따른 복합지반의 탄성계수를 분석한 결과, Eq. (3) 및 Eq. (4)와 같은 상관관계를 확인할 수 있었는데, 시멘트 혼합토의 탄성

계수 및 치환율, 원지반 점토 함수비를 적용한 복합지반 탄성계수 예측식에 비해 복합지반의 일축압축강도를 적용한 예측식이 더욱 높은 부합도를 나타내었다. 즉 시멘트 혼합토의 일축압축강도를 이용한 복합지반의 일축압축강도 예측 및 이를 이용한 복합지반의 탄성계수 예측이 가장 효과적 복합지반의 강도와 변형 특성치 예측 방식임을 확인할 수 있었다.

시멘트 혼합토의 일축압축강도는 치환율과 함께 최종적인 복합지반의 강도 및 변형 특성치 예측에 가장 중요한 요소이며, 3차원 개별요소 수치모델링을 통해 실내 일축압축강도 시험결과의 검증 및 예측이 가능하였다. 개별요소 수치모델링 수행 시는 점토와 시멘트의 고결현상을 표현할 수 있는 본딩모델의 적용이 가장 중요하였으며, 본딩에 대한 미시물성치는 원지반 점토 함수비에 큰 영향을 받지 않았던 반면 시멘트 함유율 및 재령일에 따라 상당한 변화가 발생함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 인덕대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bergado, D. T., Ruenkairergsa, T., Taesiri, Y. and Balasubramaniam, A. S. (1999), Deep soil mixing to reduce embankment settlement, *Ground Improvement*, Vol. 3, No. 3, pp. 145~162.
- Cundall, P. A. (2001), A discontinuous future for numerical modelling in feomechanics, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, UK., Geotechnical Engineering*, Vol. 149, No. 1, pp. 41~48.
- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47~65.
- 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, *Geotechnique*, Vol. 53, No. 4, pp. 439~444.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2004), PFC3D user's guide, Minneapolis, Minnesota, pp. 3-31~3-84.
- Jeon, J. S., Kim, K. Y. and Shin, D. H. (2006), Modelling of large triaxial test with rockfill materials by distinct element method, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 10, pp. 111~120.
- Jeon, J. S., Park, M. C. and Lee, S. (2013), Strength prediction of mixing condition and curing time using cement-admixed marine clay, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 12, pp. 45~56 (in Korean).

8. Kamon, M. and Bergado, D. T. (1991), Ground improvement techniques, Proc. 9th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol. 2, pp. 526~534.
9. Kim, S. G., Kim, W. J., Kang, H. B. and Kim, J. R. (2006), A study of engineering characteristics of soil-cement, KSCE Conference, pp. 4362~4365 (in Korean).
10. 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).
11. Lee, W. H. and Lim, H. D. (2007), Analysis of fine particle transfer and shear strength increase using PFC in permeation grouting, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 23, No. 11, pp. 49~58 (in Korean).
12. Ting, J. M., Corkum, B. T., Kauffman, C. R. and Greco, C. (1989), Discrete numerical model for soil mechanics, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 115, No. 3, pp. 379~398.
13. 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, Yokohama, Japan, pp. 739~745.