

고결(Cementation)에 의한 모래의 지반공학적 특성 변화 Change of Geotechnical Properties of Sand due to Cementation

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 김승한²⁾, Seung-Han Kim, 최성근²⁾, Sung-Kun Choi, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

²⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

³⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

⁴⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

SYNOPSIS : In this study, the change of geotechnical properties of sand due to cementation was investigated by undrained triaxial test of isotropically consolidated sample. For inducing the cementation, 5~20%(sand weight) gypsum were included in the sand and cured in the mold under the overburden pressure 55kPa. The yielding strength and stiffness of cemented sand were increased and also the aspects of effective pore water pressure were changed as the degree of cementation and the relative density. Generally the degree of cementation exerted more influence on the behavior of cemented sand than the relative density.

Key words : Cementation, Degree of cementation, Relative density, Geotechnical properties

1. 서 론

고결(cementation)은 입자의 표면이나 입자간 접촉점에 고결 유발물질이 침전하여 입자간의 결합력을 증진시키는 현상을 말한다. 고결된 모래의 공학적 거동은 고결정도, 상대밀도, 모래입자의 특성, 전단시 구속압, 고결시 상재하중 등에 의해 영향을 받으며, 특히 고결정도, 상대밀도 및 구속압에 의한 영향이 큰 것으로 알려지고 있다(Clough 등, 1989; Huang and Airey, 1998; Ismail 등, 2002b). 아직까지 국내에서는 고결에 대한 연구실적은 미비하지만 해외의 경우 고결에 대한 많은 연구 성과가 발표되고 있다. 고결된 모래의 공학적 거동은 Leroueil 와 Vaughan (1990), Cuccovillo와 Coop(1999) 등에 의해 설명되고 있으며, 자연상태의 비교란된 고결모래의 거동은 Clough 등(1981)과 Airey(1993)에 의해서 검토된 바 있다. 또한 Huang과 Airey(1998), Isamil 등(2002a, b)은 인위적으로 모래를 고결시켜 고결정도와 상대밀도 등에 따른 고결된 모래의 특성을 검토하였다.

본 논문에서는 이러한 선행 연구를 바탕으로 부산 원해에서 채취한 자연해사에 석고를 사용하여 인위적인 고결을 유발시킨 후 비배수 삼축시험(CIU)을 실시하여, 고결에 의해 모래의 거동특성이 변화하는 경향을 파악하였다.

2. 시험방법

2.1 모래기본특성

본 연구를 위해 부산원해 육지도 남단 50km 지점에서 자연해사를 채취하였다. XRF 성분분석 결과(표 1)를 통해 채취한 모래는 보통의 육지모래에서는 검출되지 않는 CaO 성분이 다량 포함되어 있음을 확인하였으며, SiO_2 의 함유율이 76.06%로 가장 큰 실리카질 모래(silica sand)인 것으로 나타났다. 시료의 물성치 및 입도곡선은 표 2, 그림 1과 같으며, 통일분류법(USCS)상 SP에 해당된다. 또한 전자주사현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy)을 통해 부산해사는 비교적 형상이 둥글고 표면이 매끈한 것으로 확인되었다.

표 1. 부산해사 구성성분(XRF)

성분	SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	MgO	MnO	P_2O_5	TiO_2
함유율(%)	76.06	8.28	3.02	3.06	1.62	0.99	0.29	0.01	0.02	0.16

표 2. 부산해사 기본물성치

G_s	$D_{10}(\text{mm})$	$D_{50}(\text{mm})$	% fines	e_{\max}	e_{\min}	USCS
2.62	0.162	0.310	3.13	1.063	0.658	SP

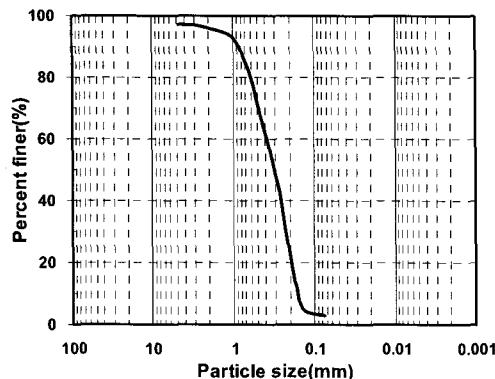


그림 1. 부산해사 입도분포

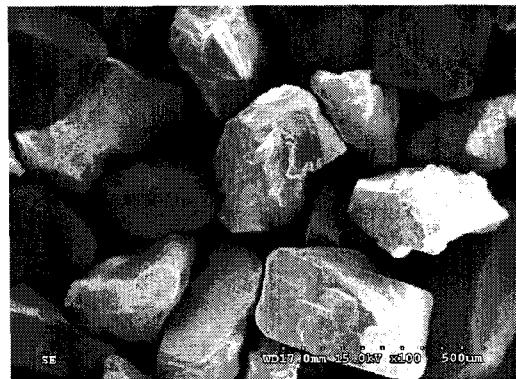


그림 2. 부산해사 입자모양(SEM)

2.2 시험방법

2.2.1 미고결 모래 조성 및 시험

본 연구에 사용된 CKC 삼축시험기는 등방, 비등방 및 K_0 압밀을 수행하여 배수와 비배수조건으로 정적 및 동적전단을 유발시킬 수 있고 응력제어 및 변형율제어가 가능한 자동화 삼축시험기이다. 낙사법을 이용하여 직경 70mm, 높이 153mm인 일정한 상대밀도의 미고결 모래(Uncemented sand)를 원통형 삼축셀에 직접 조성하였다. 시료조성 후, 10kPa의 구속압(cell pressure)이 가해진 상태에서 탄산수를 약 1시간정도 통과시켜 시료내의 공기를 1차로 제거하였다. 시료의 포화를 위해 충분한 양의 deaired water를 통과시킨 후, 10kPa의 유효응력을 유지시키면서 배압(back pressure)을 200kPa까지 증가시

커 간극수압계수(B value)가 0.97 이상이 되도록 하였다. 200kPa의 등방구속압을 가한 후, 0.1%/min의 변형율 속도로 비배수 전단시험(CIU)을 실시하였다.

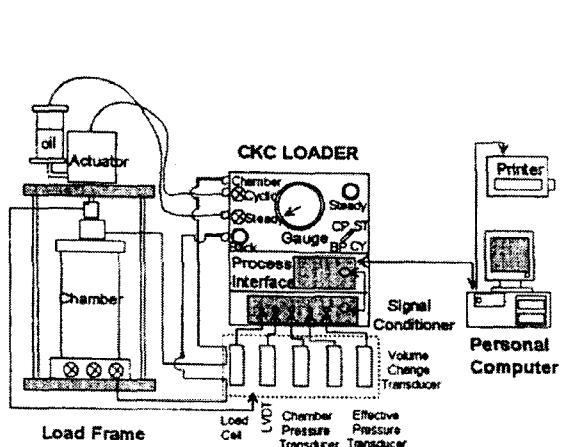


그림 3. CKC 삼축시험기 구성

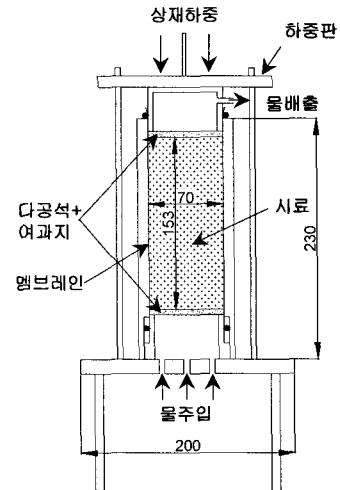


그림 4. 고결모래 성형몰드

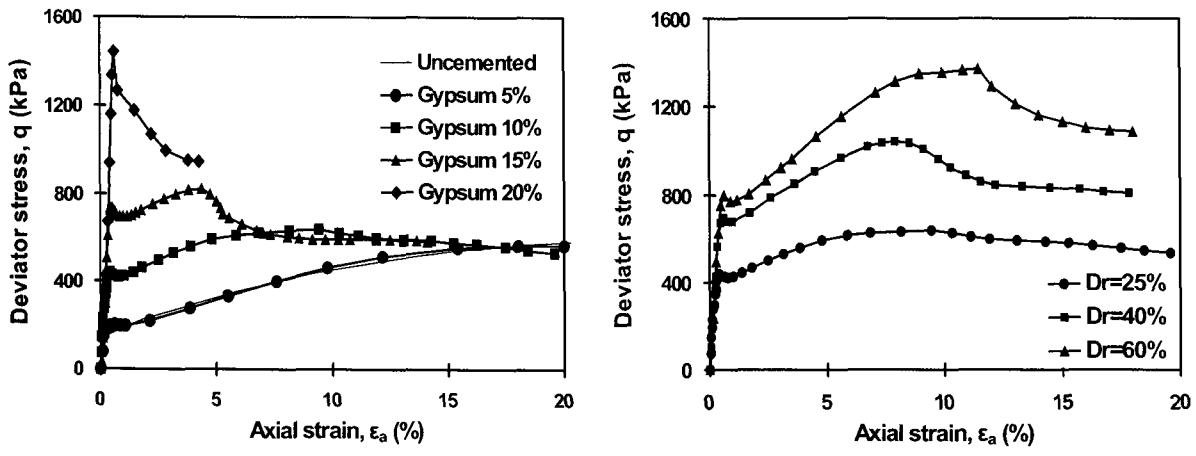
2.2.2 고결모래 조성 및 시험

석고를 사용한 고결모래(Gypsum-cemented sand)의 성형을 위해 그림 4과 같이 몰드를 제작하여 모래중량의 5~20%에 해당하는 석고를 건조모래에 혼합한 후 낙사법을 이용해 미고결 모래와 동일한 크기($70\text{mm} \times 153\text{mm}$)의 시료를 조성하였다. 조성된 시료에 55kPa의 일정한 상재구속압을 가한 후, 시료하부에 적정압으로 증류수를 주입하여 3일간 양생하여 석고의 수화현상으로 고결을 유발시켰다. 양생된 고결모래를 삼축시험기에 거치한 후 미고결 모래와 동일한 방법으로 포화를 실시하였으며, 배압(back pressure)을 400kPa까지 증가시켜 B값이 0.95 이상이 되도록 하였다. 미고결 모래와 마찬가지로 200kPa의 등방구속압 상태에서 0.1%/min의 변형율 속도로 비배수 전단시험을 실시하였다.

3. 시험결과

3.1 항복강도 및 강성

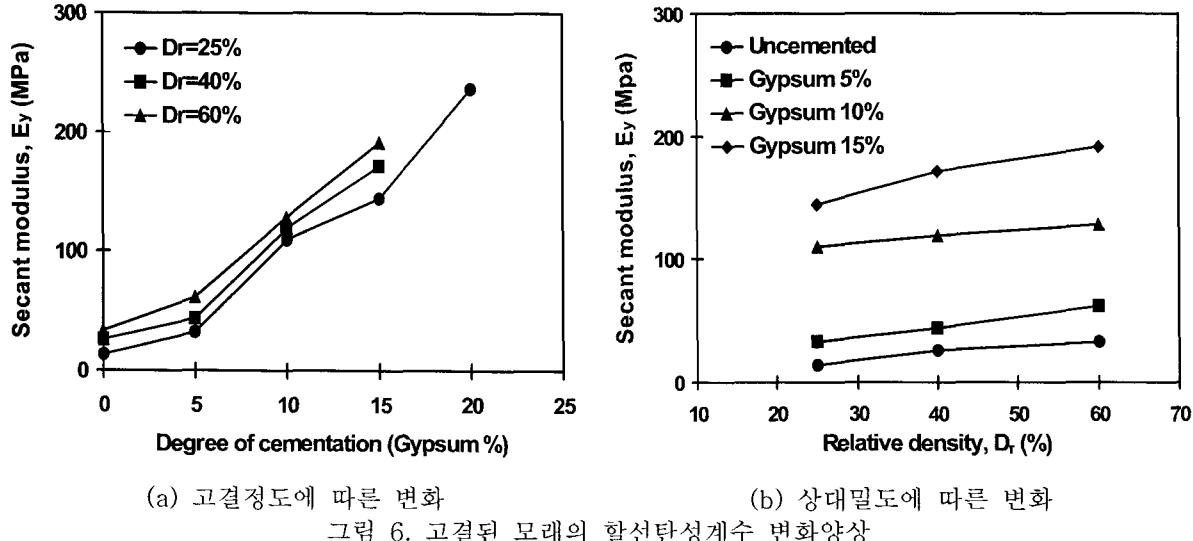
그림 5(a)는 상대밀도 25%에서 고결정도에 따른 응력-변형율 곡선이고 그림 5(b)는 석고함유율 10%에서 상대밀도에 따른 응력-변형율 곡선이다. 고결정도 및 상대밀도가 증가할수록 항복시 축차응력이 크게 증가하며, 고결정도가 증가할수록 항복시 파괴양상이 취성적으로 변하는 것으로 나타났다. 항복시 변형율로부터 결정된 할선탄성계수를 그림 6과 같이 나타낸 결과 고결정도와 상대밀도의 증가에 의해 고결된 모래의 강성이 증가하는 것으로 나타났으며, 상대밀도보다 고결정도에 의해 할선탄성계수가 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 고결정도가 큰 시료는 축차응력이 갑자기 감소하기 시작하는 점이 뚜렷이 나타나므로 쉽게 항복점이 정의되지만, 항복점이 뚜렷하지 않은 미고결 모래나 고결정도가 약한 모래시료의 항복점은 시료의 다일레시션 경향이 시작되어 간극수압이 감소하기 시작하는 상전이점(phase transformation point)으로 정의되었다. 또한 극한상태 도달할수록 고결정도에 상관없이 축차응력이 유사하게 수렴하는 것으로 나타났는데, 고결된 모래는 고결결합이 파괴되기 전에는 고결결합의 영향을 크게 받지만, 결합이 파괴된 후에는 상대밀도에 의한 영향을 크게 받기 때문에 판단된다.



(a) 고결정도에 따른 변화 ($Dr=25\%$)

(b) 상대밀도에 따른 변화 (석고함유율 10%)

그림 5. 고결된 모래의 응력-변형율 관계



(a) 고결정도에 따른 변화

(b) 상대밀도에 따른 변화

그림 6. 고결된 모래의 할선탄성계수 변화양상

3.2 간극수압

항복이 발생하기 전 축차응력은 고결정도에 따라 크게 변하지만, 그림 7의 간극수압 곡선에서 항복전의 간극수압은 비슷하게 발생하였다. 이는 고결결합에 의해 고결모래의 압축성이 감소하여, 고결정도가 증가할수록 실제 가해지는 축차응력에 비해 간극수압 발생율이 적기 때문이다. 그러나 항복이 발생하면서 고결모래의 간극수압이 미고결 모래의 간극수압보다 더 급격한 감소 경향을 보였는데, 고결정도가 증가할수록 고결결합이 파괴되는 순간 급격한 다일레이션 경향이 발생함을 의미한다(Cuccovillo 와 Coop, 1999). 항복이후 변형율이 커질수록 동일한 상대밀도의 시료는 일정한 간극수압으로 수렴하였다. 그림 8은 축차응력과 간극수압을 유효주응력(p')으로 나누어 정규화시킨 유효응력비(q/p')에 대한 간극수압비(u/p') 곡선을 나타낸 것으로, 동일한 유효응력비에서 고결정도가 증가할수록 간극수압비가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

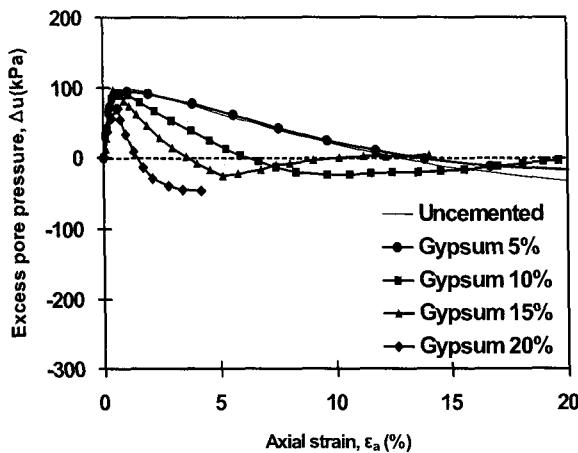


그림 7. 간극수압-변형율 관계 ($Dr=25\%$)

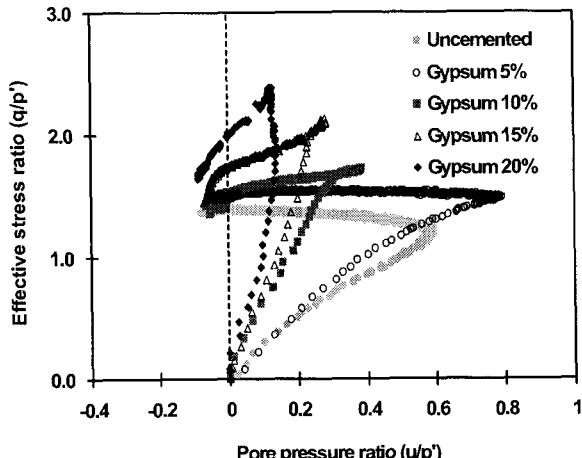
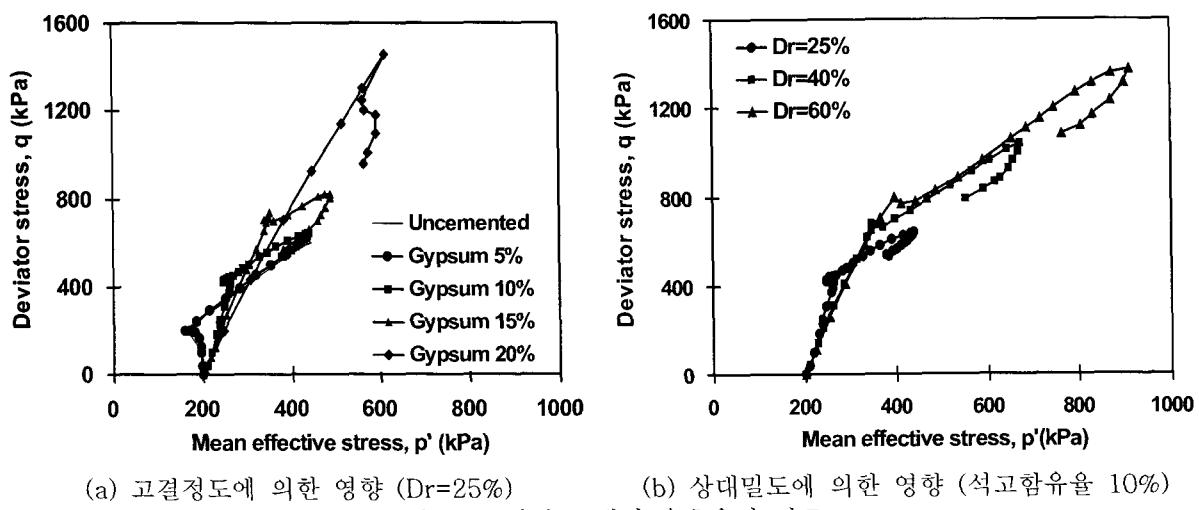


그림 8. 정규화된 간극수압곡선 ($Dr=25\%$)

3.3 유효응력경로

고결정도 및 상대밀도에 따른 유효응력 경로를 그림 9와 같이 나타내었다. 그림 9(a)에서 상대밀도가 25%로 동일할지라도 석고함유율이 증가할수록 유효응력 경로가 오른쪽으로 편향되어 나타났으며, 이는 고결에 의해 정규압밀 모래의 거동이 과압밀 흙의 거동으로 바뀌는 것을 의미한다. 그러나 그림 9(b)에서는 석고함유율이 10%로 동일하고 상대밀도가 증가하여도 유효응력 경로의 초기 기울기가 일정하였다. 즉 고결된 모래의 유효응력 경로는 상대밀도보다 고결정도의 영향을 더 크게 받는 것을 의미한다.

Vaid와 Chern(1983) 등의 연구자들에 의해 일반적인 모래는 구속압력, 압밀응력비, 상대밀도 등에 관계없이 유효응력 경로의 원점과 최대 간극수압이 발생하는 상전이점을 연결한 상전이선이 일정한 기울기를 나타냄이 밝혀졌다. 본 연구결과에서는 일반적인 모래와는 달리 고결된 모래의 상전이선의 기울기가 변화하는 것으로 확인되었다. 미고결 시료와 마찬가지로 고결된 시료의 상전이점을 최대 간극수압이 발생하는 점으로 가정하여 표 3의 (2)와 같이 상전이선의 기울기인 상전이점의 유효응력비(M_{PTL}')를 구하였다. 미고결 모래의 M_{PTL}' 은 상대밀도에 관계없이 거의 일정한 1.23~1.24를 취하여 Vaid와 Chern의 연구결과와 일치하는 반면, 고결모래는 고결정도와 상대밀도가 증가할수록 M_{PTL}' 가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유효응력비가 높다는 것은 고결된 시료의 항복에 대한 저항이 크다는 것을 의미하며, 결국 고결된 모래의 동적 저항력이 향상됨을 의미한다(Ismail, 2002b).



(a) 고결정도에 의한 영향 ($Dr=25\%$) (b) 상대밀도에 의한 영향 (석고함유율 10%)

그림 9. 고결된 모래의 유효응력 경로

표 3. 고결된 모래의 상전이선 유효응력비

상대밀도	25%					40%					60%				
석고 함유율(%)	0	5	10	15	20	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5
(1) $\varepsilon_{u_{max}} (\%)$	1.32	1.03	0.71	0.45	0.53	0.79	0.65	0.48	0.45	0.74	0.58	0.52	0.58	0.58	0.58
(2) M_{PTL}'	1.24	1.49	1.72	2.13	2.38	1.23	1.57	1.95	2.21	1.23	1.59	2.04	2.42	2.04	2.42

(1) $\varepsilon_{u_{max}}$: 최대 간극수압시 축변형율, 즉 상전이점의 변형율 (Axial strain in phase transformation point)

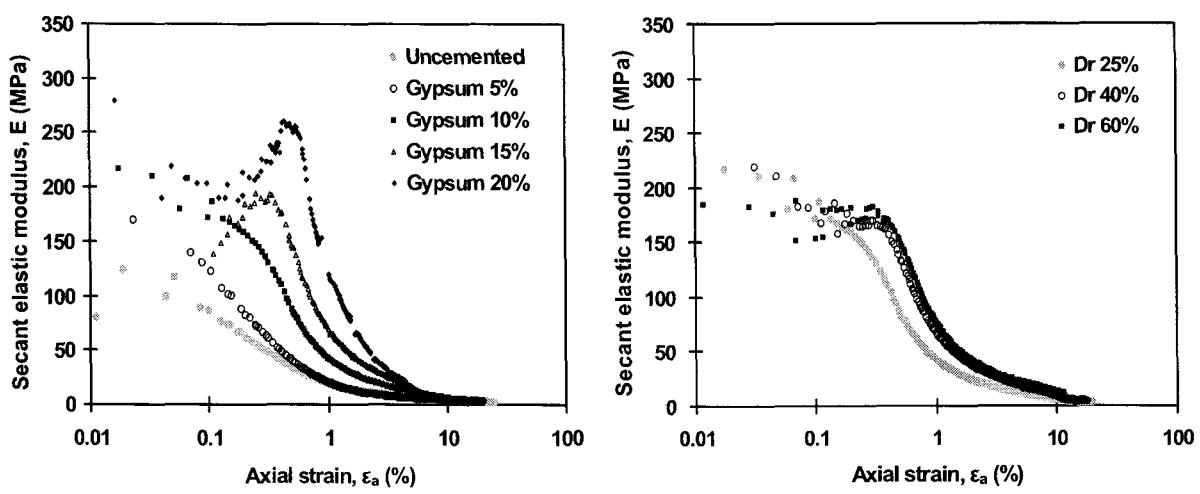
(2) M_{PTL}' : 상전이선에서의 유효응력비 (Effective stress ratio in phase transformation line)

3.4 탄성계수

고결된 모래의 압축특성에 대해 Schnail 등(2001)은 고결 결합이 파괴되기 전까지 거의 일정한 할선변형계수(secant deformation modulus)를 나타내다가 고결 결합이 파괴되면서 할선변형계수가 감소하는 양상이 나타남을 보였으며, 구속압 등의 다른 조건보다 고결정도의 영향을 가장 크게 받는다고 하였다.

고결정도 및 상대밀도에 따른 고결시료의 할선탄성계수 변화를 그림 10과 같이 나타내었다. 고결정도 및 상대밀도가 증가할수록 할선탄성계수가 증가하는 경향이 확인되었다. 또한 상대밀도의 변화에 비해 고결정도의 변화에 의해 할선탄성계수의 변화율이 더 크게 나타났으며, 이 또한 고결모래의 거동은 상대밀도보다는 고결정도에 의해 더 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다.

그림 11에서 상대밀도 25%와 석고함유율 5%인 시료의 $E_{0.5}$ (축변형율 0.5%에서의 할선탄성계수)를 기준으로 상대밀도 및 석고함유율의 증가율에 따른 $E_{0.5}$ 증가율을 검토한 결과, 동일한 석고함유율에 대해 상대밀도가 25%에서 40%로 1.6배 증가할 경우 1.3~1.56배의 $E_{0.5}$ 증가율이 나타났고, 상대밀도 2.4배의 증가율에 의해 1.5~1.87배의 $E_{0.5}$ 증가율이 나타났다. 반면, 동일한 상대밀도에 대해 석고함유율이 5%에서 10%로 2배 증가할 경우 1.99~2.92배의 $E_{0.5}$ 증가가 나타났고, 석고함유율이 3배 증가할 경우 2.83~3.56배의 $E_{0.5}$ 증가가 발생했다. 즉, 상대밀도에 비해 고결정도가 고결된 모래의 항복전 거동에 더 큰 영향을 끼침을 확인할 수 있으며, Baig 등(1997), Huang과 Airey(1998), Ismail 등(2002)도 다양한 연구방법을 통해 이 같은 경향을 확인하였다.



(a) 고결정도에 따른 영향 (Dr=25%) (b) 상대밀도에 따른 영향 (석고함유율 10%)
그림 10. 고결된 모래의 할선탄성계수 변화

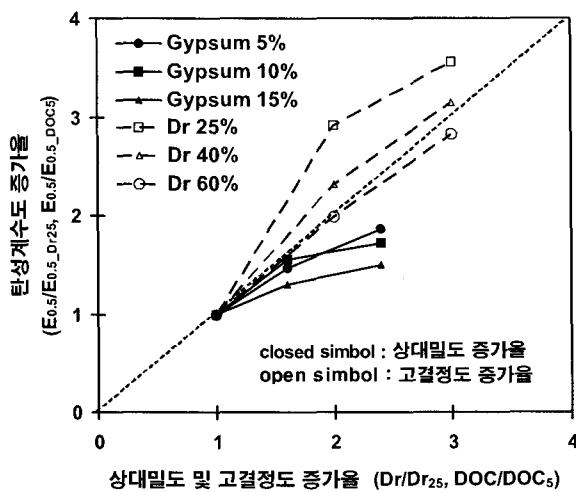


그림 11. 고결정도 및 상대밀도에 따른 $E_{0.5}$ 증가경향

4. 결론

본 연구에서는 고결에 의한 모래의 공학적 특성 변화를 파악하기 위해 인위적인 고결모래를 조성하여 비배수 전단시험을 실시하였으며, 고결모래는 고결정도 및 상대밀도가 증가할수록 항복강도 및 강성이 증가하는 것으로 나타났다. 고결은 항복이전의 간극수압 발생율을 감소시켜 고결된 모래의 거동을 과압밀된 흙의 거동과 유사하게 변화시키며, 고결정도에 관계없이 동일한 상대밀도의 고결된 시료는 변형율이 커짐에 따라 간극수압, 축차응력 및 유효응력비가 거의 일정한 값에 수렴하였다. 이는 과괴된 고결합이 모래의 잔류 거동에 끼치는 영향이 적음을 의미한다. 고결정도에 따른 할선탄성계수 경향을 통해 고결된 시료는 고결정도가 증가할수록 변형에 대한 강성이 증가함을 확인하였다. 특히 축변형율 0.5%에서의 할선탄성계수를 분석한 결과 상대밀도에 비해 고결정도가 고결모래의 변형계수에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술 연구개발사업 (과제번호 : C104A1000009-04A0200-00900)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Airey, D. W. (1993), "Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil", *J. Geotech. Engng.*, ASCE, Vol.119, No.9, pp.1379-1398
2. Coop, M. R. and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67
3. Cuccovillo, T. and Coop, M. R. (1999), "On the mechanics of structured sands", *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.741-760
4. Clough, W. G., Sitar N., and Bachus R. (1981), "Cemented sands under static loading", *Geotech. Engng. Div*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.799-817

5. Clough, W. G., Iwabuchi J., Rad N. S., and Kuppusamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sand", *J. Geotech. Engrg. Div*, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1102-1117
6. Huang, J. T. and Airey, D. W. (1998), "Properties of artificially cemented carbonate sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.6, pp.492-499
7. Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., and Randolph, M. F. (2002a), "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.128, No.6, pp.520-529
8. Ismail, M. A., Joer, H. A., and Randolph, M. F. (2002b), "Cementation of porous materials using calcite", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.313-324
9. Leroueil, S and Vaughan, P. R., (1990), "The general congruent effects of structure in natural soils and weak rocks", *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.467-488
10. Schnail, F., Prietto, P. D. M., and Consoli, N. C. (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.127, No.10, pp.857-868
11. Vaid, Y.P. and Chern, J.C. (1983) Effects of static shear on resistance to liquefaction, *Soils and Foundation*, Vol. 23, No. 1, pp. 47-60
12. Vaid, Y.P. and Chern, J.C. (1985) Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands, *Proceedings, Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, V. Khosla, (ed.), ASCE Convention, Detroit, MI, pp. 120-147