

고결(Cementation)에 따른 모래의 비배수 전단거동 변화

Changes of Undrained Shear Behavior of Sand due to Cementation

이 우 진¹ Lee, Woo-Jin

이 문 주² Lee, Moon-Joo

최 성 근³ Choi, Sung-Kun

홍 성 진⁴ Hong, Sung-Jin

Abstract

Triaxial tests at isotropic confining pressure of 200 kPa were carried out to show the undrained shear behavior of artificially cemented sands, which were cemented by gypsum, and the influences of relative density and DOC (degree of cementation) were investigated from the results. The yield strength, the elastic secant modulus at yield point and the peak frictional angle of cemented sands increased abruptly compared to uncemented sands, and it was checked that cementation exerts more influence on the behavior of sand than the relative density. But after breakage of the cementation bonds, the relative density was more important factor on the behavior of sand than the cementation. Because the compressibility and the excess pore pressure of cemented sands were reduced due to the cementation bonds, the effective stress path of cemented sands was going toward to the total stress path of uncemented sands. The cementation of sand restricted the dialtion of sand at the pre-yield condition, but induced more dilation in the post-yield condition.

요 지

본 논문에서는 고결(Cementation)에 의한 모래의 비배수 거동변화를 파악하기 위하여 석고를 고결유발제로 사용한 시료를 조성한 후 등방삼축시험(CIU)을 실시하였으며, 상대밀도 및 고결정도에 따른 거동 양상을 분석하였다. 연구결과 모래의 고결은 항복강도(q_y), 항복시 할선탄성계수(E_y), 첨두마찰각(ϕ_p)의 상당한 증가를 유발시키고, 상대밀도보다 모래의 거동에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 확인되었다. 그러나 고결결합이 파괴된 이후, 모래의 거동은 고결보다는 상대밀도의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 고결결합에 의한 압축성 감소는 간극수압 발생율을 감소시켜 고결모래의 유효응력 경로가 미고결 모래의 전응력 경로쪽으로 편향되어 발생하였다. 고결결합이 파괴되기 전에는 다일레이션 경향이 감소하지만, 결합이 파괴된 후에는 미고결 모래보다 더 큰 다일레이션 경향이 유발되었다.

Keywords : Cementation, Compressibility, Degree of cementation, Dilation, Relative density, Undrained shear behavior

1. 서 론

전형적으로 탄산칼슘(CaCO_3 : calcium carbonate)등

이 입자 사이나 입자표면에 침전하여 입자간 결합력을 증진시키는 현상을 고결(cementation)이라고 한다. 일반적으로 열대와 아열대 지역의 해수는 탄산칼슘으로

1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., kkkcivil@korea.ac.kr)

3 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

4 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

과포화된 상태이기 때문에 주로 이 지역의 해안에서 고결이 발생하지만, 온대지역에서도 이산화탄소의 증가 등과 같은 특정조건에 의해 고결이 발생하기도 한다. 최근 고결에 의한 흙의 공학적 특성변화에 관심이 집중되고 있으며, 이에 대한 연구 활동이 국제적으로 활발하게 진행되고 있다.

입자간의 고결결합을 파괴시키지 않으면서 고결시료를 불교란 상태로 채취하는 것은 기술적, 경제적으로 어렵기 때문에, 대부분의 고결에 대한 연구는 인위적인 고결이 유발된 시료에 대한 실내시험을 실시하여 고결에 영향을 주는 요인을 파악하는 매개변수분석(parametric study) 위주로 진행되어져 왔다. 인위적인 고결 유발을 통한 연구는 자연상태와 유사한 거동을 나타낼 수 있는 적절한 고결유발제를 선택하는 것이 무엇보다 중요하며, 지금까지 포틀랜드 시멘트(Saxena and Lastrico 1978; Clough 등 1981; Acar and El-Tahir 1986; Allman and Poulos 1998; Ismael 2000)나 석고(Coop and Atkinson 1993; Huang and Airey 1998; Haeri 등 2005), 탄산염(Akili and Torrance 1981; Molenaar and Venmans 1993; Ismail 등 2002) 등을 이용한 방법이 보고되고 있다. 특히 석고(gypsum)는 비교적 쉽게 고결을 유발시킬 수 있으면서도 석고로 고결된 흙의 거동이 자연상태에서 고결된 흙의 거동과 유사하기 때문에 많은 연구자에 의해

사용되고 있다.

고결된 모래의 공학적 거동은 고결정도, 상대밀도(간극비), 모래입자의 특성, 전단시 구속압, 고결시 상재하중 등에 의해 영향을 받으며, 특히 고결정도, 상대밀도 및 구속압에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 각종 조건과 고결강도와의 상관관계는 서로 독립적인 것이 아니기 때문에(Clough 등 1989; Huang and Airey 1998; Ismail 등 2002) 여러 조건의 상관관계에 의한 고결의 영향을 분석할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 석고를 이용하여 국내에서 고결이 발생할 가능성이 높은 부산 해사에 인위적인 고결을 유발시켜 시료의 고결정도 및 상대밀도에 따른 거동양상을 분석하였다.

2. 재료적 특성

2.1 모래 기본특성

본 연구에 사용된 모래는 부산 원해 육지도 남단 50km지점에서 채취한 해사로써, 노건조시킨 후 #20체에 통과시켜 사용하였다. 시료의 물성치 및 입도곡선은 표 1, 그림 1과 같으며, 통일분류법(USCS)상 SP에 해당된다. 그림 2에 나타난 전자주사현미경(SEM, Scanning

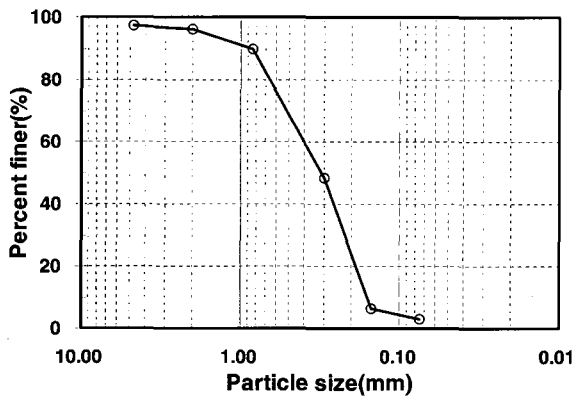


그림 1. 모래시료 입도분포

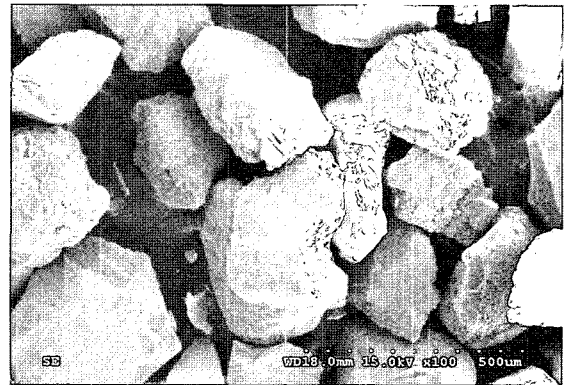


그림 2. 모래시료 SEM 사진($\times 10^2$)

표 1. 모래시료 기본물성

비 중 (G_s)	유효입경 (D_{10} , mm)	평균입경 (D_{50} , mm)	#200체 통과량 (%)	최대건조밀도 ($\gamma_{d(max)}$)	최소건조밀도 ($\gamma_{d(min)}$)
2.62	0.162	0.31	3.13	1.58	1.27

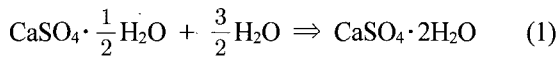
표 2. 모래시료 구성성분(XRF)

성분	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
함유율(%)	8.28	3.02	0.99	3.06	0.29	0.01	1.62	0.02	76.06	0.16

Electron Microscopy)을 통한 관찰결과 모래입자는 비교적 둥근 형상을 나타내지만 입자표면은 거칠게 형성되어 있고, 이물질에 의한 침착은 없지만 다량의 패각(조개껍데기)이 포함되어 있는 것이 확인되었다. 또한 표 2의 성분분석(XRF)결과 보통의 육지 모래에서는 검출되지 않는 CaO 성분이 검출되었고, SiO₂ 함유량이 큰 실리카질 모래(silica sand)인 것으로 나타났다.

2.2 석고(Gypsum) 특성

일반적으로 석고라 함은 반수석고(CaSO₄·½H₂O)를 말하며, 반수석고는 이수석고(CaSO₄·2H₂O)를 소성하여 얻어진다. 반수석고는 식 (1)과 같이 물과 반응하여 이수석고로 경화되어 굳기 2, 비중 2.2~2.4의 능판상 또는 주상결정을 이루며, 투명 또는 반투명을 나타낸다. 본 연구에서 고결유발제로 사용한 석고는 도자기형재용 석고(GM-10)로써, 습윤양생시 20MPa의 압축강도를 발현한다. 특히 양생시 팽창율이 0.03%로써 보통의 석고에 비해 저팽창성을 띄기 때문에 고결 과정에서 시료의 부피팽창을 최소화 할 수 있다.



3. 시험방법

3.1 시험장비

본 연구에 사용된 삼축시험기는 C. K. Chan이 개발한 자동화 삼축시험기로써, 하중프레임(load frame), 삼축

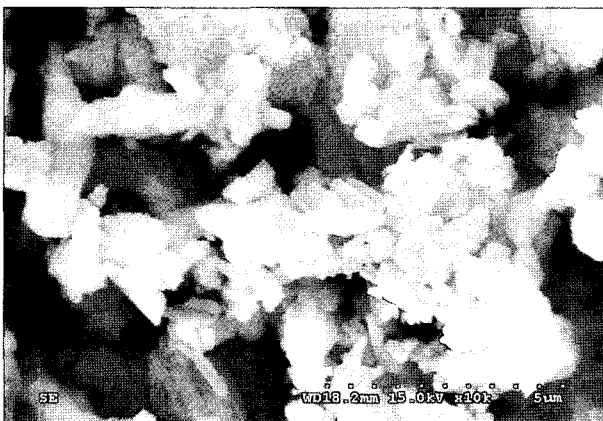


그림 3. 수화전 석고 SEM 사진(×10⁴)

셀(triaxial cell), 하중재하장치(load actuator), 체적측정장치(volume measuring device), 신호조절장치(signal conditioning unit), 컴퓨터 및 프린터 등으로 구성되어 있다. 또한 본 삼축시험기는 축하중을 측정하기 위한 로드셀(load cell), 연직침하량 측정을 위한 LVDT, 챔버압(chamber pressure), 유효압(effective pressure), 체적변화(volume change) 등을 탐지하기 위한 3개의 압력센서(pressure transducer)등, 5개의 계측센서가 내장되어 있다. 본 시험기는 압력과 변위 및 체적변화를 5개의 계측센서로 측정하여 디지털 신호로 컴퓨터에 저장하고, 이를 다시 D-A 변환기에서 아날로그 신호로 바꾸어 시스템의 압력을 조절하여 구속압 및 축하응력을 자동제어하는 원리로 작동한다. 또한 본 시험기는 등방, 비등방 및 K₀ 압밀을 수행하여 배수와 비배수조건으로 정적, 동적전단을 유발시킬 수 있고 응력제어 및 변형율제어가 가능하여 시료에 대한 다양한 조건의 거동을 분석할 수 있다. CKC 삼축장비의 전체적인 구성은 그림 4와 같다.

3.2 시료성형 및 포화

3.2.1 미고결 모래(Uncemented sand)의 성형 및 포화

모래시료 조성용 원통형 몰드에 낙사법(pluviation method, Miura and Toki 1982)을 이용하여 상대밀도 25%, 40%, 60%인 미고결 시료를 직경 70mm, 높이 153mm 크기로 조성하였다. 조성된 시료는 10kPa의 구속압(cell pressure)이 가해진 상태에서 이산화탄소로 포화된 탄산수를 7kPa의 압력으로 약 1시간정도 통과시켜 시료내의 공기를 1차로 제거하였다. 시료의 포화를 위해 deaired water를 7kPa의 압력으로 통과시킨 후, 10kPa의 유효응력(effective pressure)을 유지시키면서 배압(back pressure)을

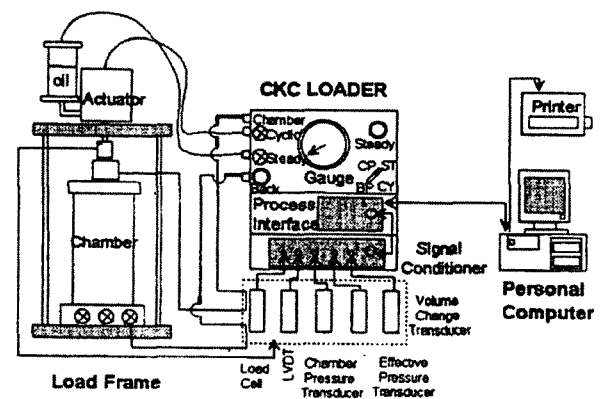


그림 4. CKC 삼축장비 구성

200kPa까지 증가시켜 간극수압계수(B value)가 0.97 이상이 되도록 하였다. 시료의 포화가 충분히 이루어진 상태에서 200kPa의 등방구속압을 가하여 압밀이 완료된 후, 0.1%/min의 변형을 속도로 비배수 전단시험(CIU)을 실시하였다.

3.2.2 고결모래(Gypsum-cemented sand)의 성형 및 포화
 석고를 사용한 고결된 모래(Gypsum-cemented sand)의 성형을 위해 그림 5와 같은 몰드를 제작하였다. 제작된 몰드는 횡방향 구속된 상재하중을 가한 상태에서 시료가 고결될 수 있도록 설계되었다. 원하는 중량의 모래 시료와 모래중량비 5~20%에 해당하는 석고를 혼합한 후 낙사법으로 직경 70mm, 높이 153mm의 시료를 조성하였다. 조성된 시료에 55kPa의 상재구속압을 가한 뒤, 시료의 하부에서 적정압으로 증류수를 주입하여 석고의 수화를 유도한다. 모든 시료의 양생기간은 3일로 동일하게 유지시켰으며, 양생 후 몰드를 해체하고 시료의 정확한 직경과 높이를 측정하여 최종적인 시료의 상대밀도를 결정하였다. 그림 6은 SEM을 이용하여 150배 확대된 고결된 모래의 사진이며, 모래입자의 표면과 접촉점에 석고입자가 수화되어 고결이 유발되었음을 확인할 수 있다. 고결된 모래시료를 삼축시험기에 거치하고 미고결 모래와 동일한 조건에서 탄산수와 deaired water를 이용하여 시료를 포화시킨 후, 배압을 400kPa

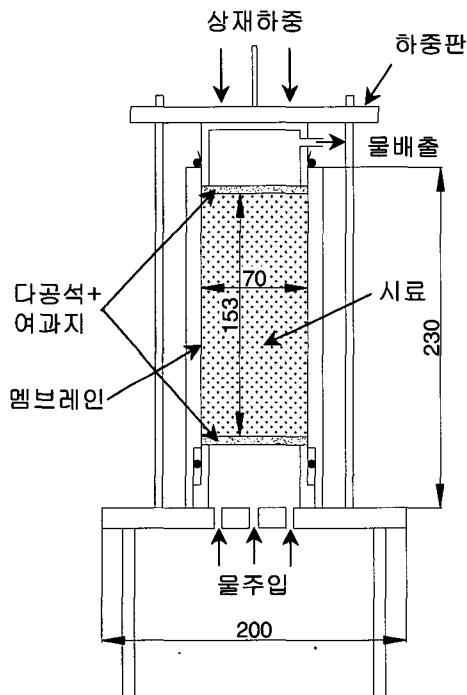


그림 5. 고결모래 성형몰드

까지 증가시켜 0.95이상의 간극수압계수(B value)를 확인하였다. 시료 포화 후 미고결 모래와 동일하게 200kPa의 구속압으로 등방압밀시킨 후 0.1%/min의 변형을 속도로 비배수 전단시험을 실시하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 고결정도에 따른 영향

4.1.1 항복강도와 강성 증가

고결된 모래의 응력-변형을 관계는 많은 연구자들에 의해 소개되고 있으며(Airey 1993; Coop and Atkinson 1993; Huang and Airey 1993; Ismael 2000; Ismail 등 2002a), 고결된 모래의 항복파괴 양상은 미고결 모래와 뚜렷하게 구별된다. 그림 7의 고결정도에 따른 거동에서 미고결 모래는 뚜렷한 항복점이 나타나지 않지만, 고결된 모래는 항복점이 뚜렷하고, 항복시 급격한 취성파괴(brittle failure) 양상을 보인다. 고결정도가 증가할수록 취성파괴 경향이 더욱 뚜렷지는데, 특히 석고함유량이 10%보다 큰 경우 그 경향이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 상대밀도의 시료일지라도 고결정도에 따라 항복강도(yield strength)와 전단에 저항하는 강성(stiffness)에 큰 차이가 나타난다. 상대밀도 25, 40, 60% 별로 각각의 석고함유량에 따른 항복시 축차응력(q_y)과 축변형율(ϵ_y), 그리고 항복시 할선탄성계수(E_y)를 표 3에 정리하여, 그림 8에 나타내었다. 이때 항복점이 불명확한 미고결 모래의 항복점은 간극수압이 감소하기 시작하는 상전이점(phase transformation point)으로 가정하였다. 그림 8(a), (b)에서 동일한 상대밀도일지라도 고결정도가 증가할수록 항복시 축차응력, 즉 항복강도와 할

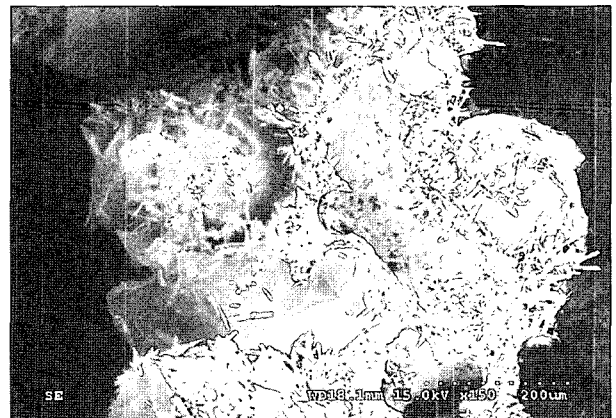
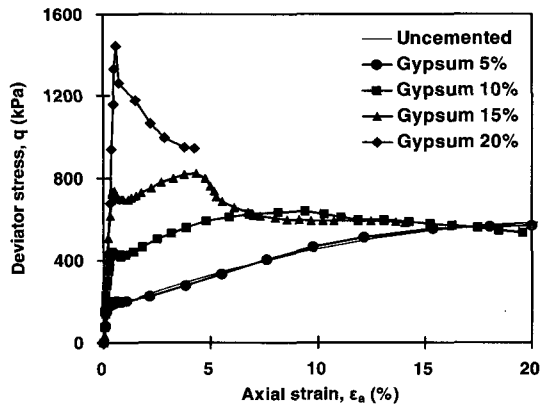
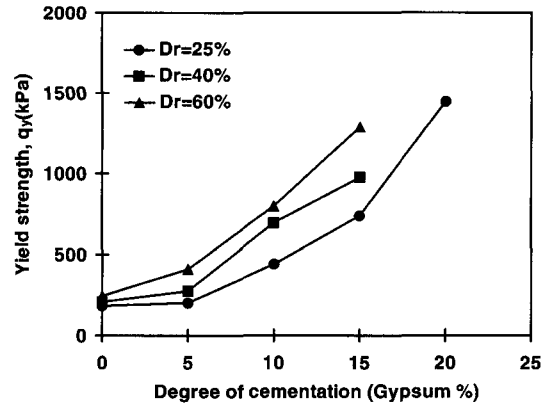


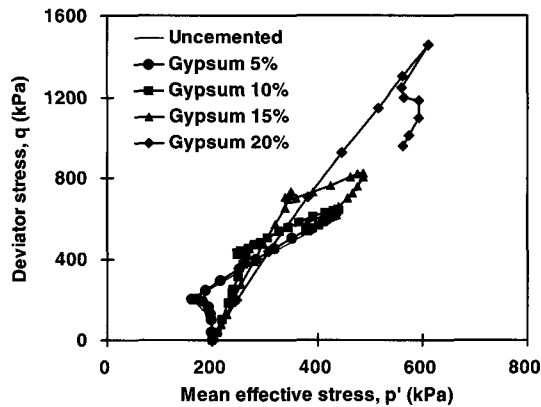
그림 6. 석고로 고결된 모래(SEM, ×150)



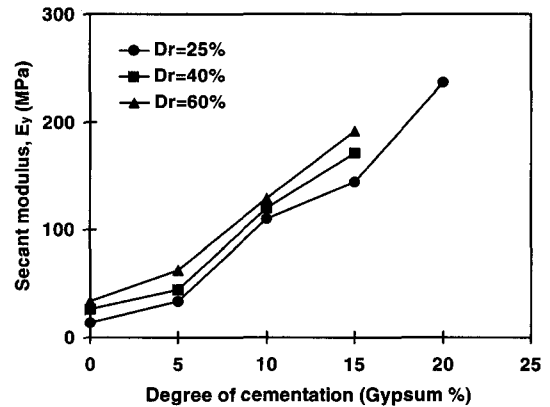
(a) 응력-변형을 관계



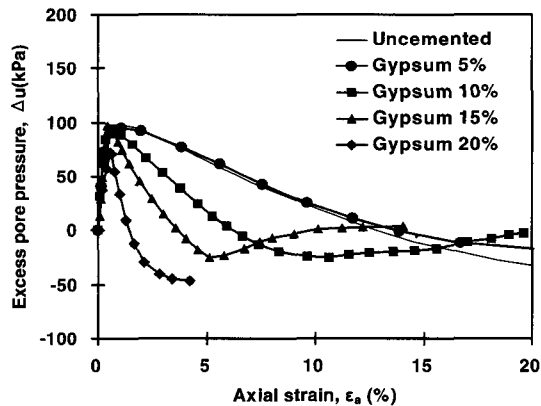
(a) 고결정도에 따른 항복강도 변화



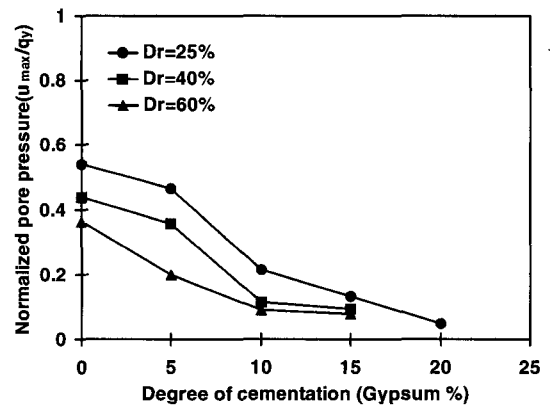
(b) 유효응력 경로



(b) 고결정도에 따른 할선탄성계수 변화



(c) 간극수압-변형을 관계



(c) 고결정도에 따른 정규화된 간극수압변화

그림 7. 고결정도에 따른 고결된 모래의 거동 ($D_r=25\%$, $\sigma_3'=200\text{kPa}$)

그림 8. 고결정도에 따른 고결화 영향

표 3. 고결정도 및 상대밀도에 따른 고결화 영향

상대밀도	25%					40%				60%			
	0	5	10	15	20	0	5	10	15	0	5	10	15
석고 함유량(%)	0	5	10	15	20	0	5	10	15	0	5	10	15
q_y^* (kPa)	184	204	441	737	1443	209	275	693	976	245	409	796	1284
ϵ_y^{**} (%)	1.32	0.62	0.40	0.51	0.61	0.79	0.62	0.58	0.57	0.74	0.66	0.62	0.67
E_y^{***} (Mpa)	13.9	32.9	110.3	144.5	236.6	26.5	44.4	119.5	171.2	33.1	62.0	128.4	191.6

* q_y : 항복시 축차응력 (Deviator stress in yielding)

** ϵ_y : 항복시 축변형률 (Axial strain in yielding)

*** $E_y (=q_y/\epsilon_y)$: 항복시 할선탄성계수 (Secant elastic modulus in yielding)

선탄성계수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.1.2 간극수압 발생경향

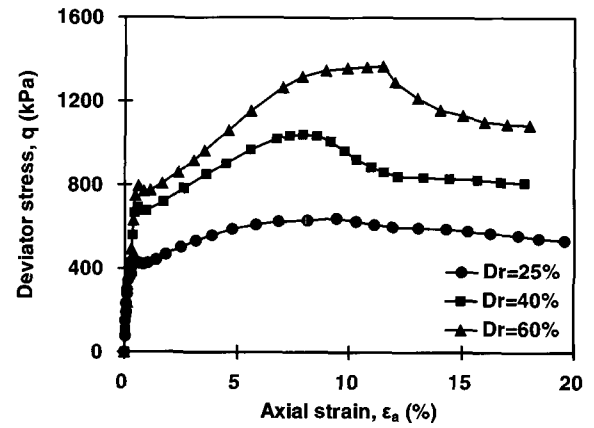
전단에 의한 고결된 모래의 간극수압 발생 경향은 고결정도에 의해 다르게 나타난다. 그림 7(c)의 변형율에 따른 간극수압 곡선에서 고결정도가 증가하여도 항복이 발생하기 이전의 간극수압 경향은 거의 일정하며 최대 간극수압도 비슷한 값을 나타내고 있다. 그러나 그림 8(c)와 같이 최대 간극수압을 항복강도로 정규화시켜 나타냈을 경우, 고결정도가 증가할수록 입자의 결합력이 증가하여 가해지는 하중에 비해 간극수압 발생율이 감소하였다. 따라서 고결정도가 증가할수록 전단시 유효응력은 전응력에 근접하게 되어, 그림 7(b)에서와 같이 유효응력 경로(effective stress path)가 오른쪽으로 편향되는 현상이 발생한다. 즉, 미고결 모래와 고결정도가 약한 석고함유율 5% 모래와는 달리 고결정도가 큰 석고함유율 10% 이상 모래의 유효응력 경로는 일반적인 과압밀된 흙의 유효응력 경로와 유사하게 나타나고 있다.

고결된 모래의 항복이후 간극수압 변화양상은 고결정도에 따라 뚜렷이 구분되었다. 고결이 약한 석고함유율 5%의 시료는 미고결 시료와 유사한 간극수압을 나타내지만, 석고함유율 10% 이상의 고결시료의 경우, 항복이 발생하는 순간 급격한 다일레이션(dilation)경향으로 인해 간극수압이 감소하기 시작하며, 이때 고결정도가 클수록 변형율에 따른 간극수압 감소율이 더 크게 나타났다. 이는 모래의 고결결합이 파괴되기 전에는 고결결합이 하중에 저항하여 시료의 다일레이션 경향이 억제되지만(Clough 등 1989), 고결결합이 파괴된 이후에는 고결정도가 클수록 더 큰 다일레이션 경향이 발생함을 의미한다. 항복이후 최대 축차응력 상태인 침두강도(peak strength)에 도달할 때까지 다일레이션 경향이 계속 발생하며, 시료가 침두강도에 도달한 직후 간극수압이 다시 증가하여 일정하게 수렴하였다. 또한 그림 7(a)의 응력-변형을 관계에서도 상대밀도가 일정하면 고결정도에 상관없이 침두강도 이후 유사한 축차응력으로 수렴되는 것으로 나타났다. 이 같은 경향은 고결결합이 파괴되면 고결이 모래의 거동에 끼치는 영향이 적기 때문으로, 고결결합 파괴 이후 모래의 거동양상은 상대밀도에 의해 주로 결정됨을 의미한다.

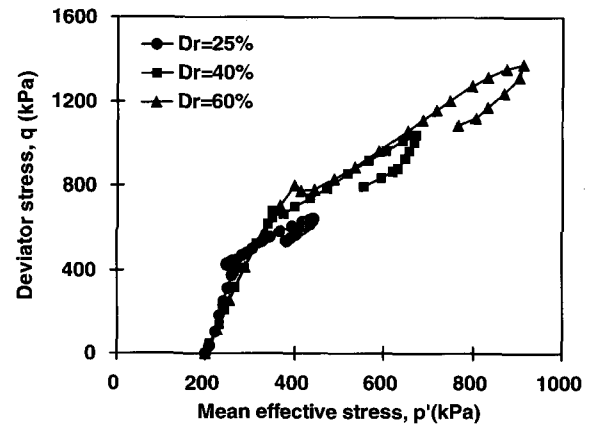
4.2 상대밀도에 따른 영향

4.2.1 항복강도 및 강성 증가

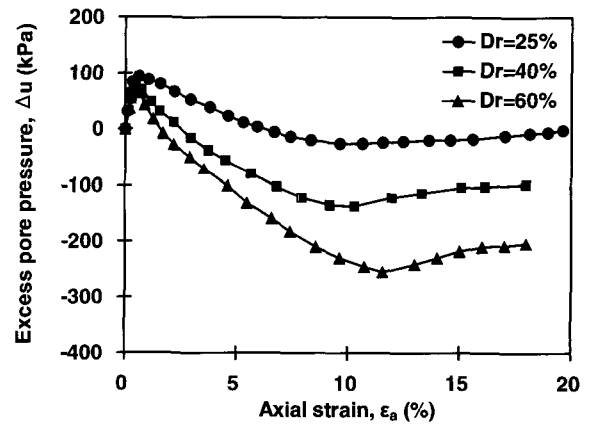
상대밀도가 증가할수록 입자간 접촉점이 증가하므로 더 효율적인 고결이 유발되어 고결된 모래의 강도 또한 증가하는 것으로 알려져 있다(Ismail 등 2002b). 그림 9



(a) 응력-변형을 관계

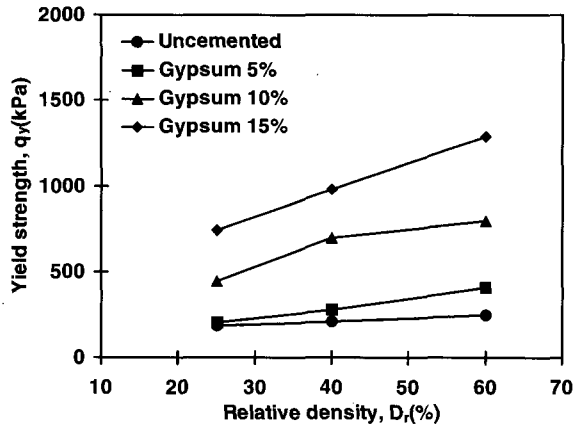


(b) 유효응력 경로

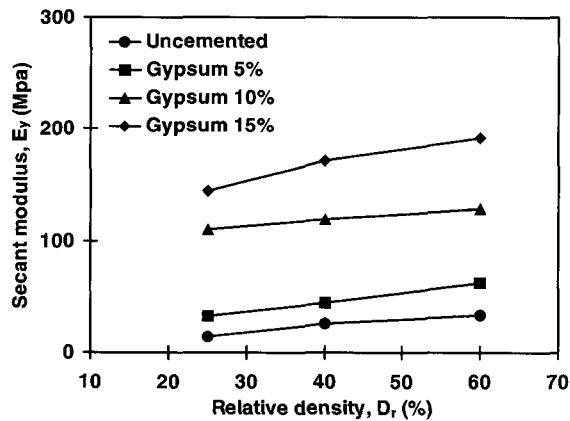


(c) 간극수압-변형을 관계

그림 9. 상대밀도에 따른 고결된 모래의 거동 (석고함유율 10%, $\sigma_3' = 200\text{kPa}$)



(a) 상대밀도에 따른 항복강도 변화

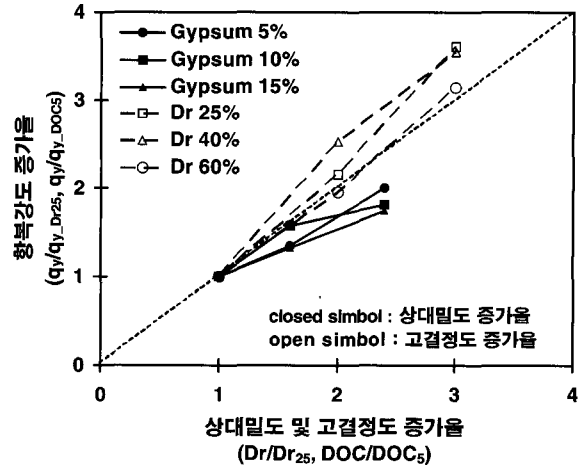


(b) 상대밀도에 따른 할선탄성계수 변화

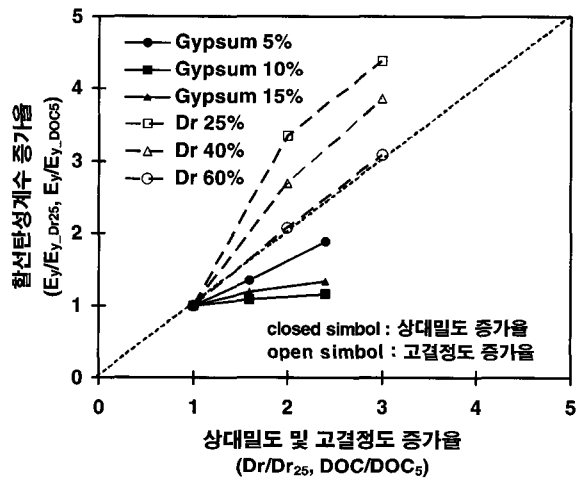
그림 10. 상대밀도에 따른 고결화 영향

에 나타난 결과에서도 석고함유율이 동일할지라도 상대밀도가 증가할수록 고결된 모래의 항복강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이때 항복시 축차응력과 할선탄성계수의 증가 정도를 그림 10으로 나타난 결과, 상대밀도의 증가에 의해 항복강도와 탄성계수가 선형 증가하는 경향을 보였다.

고결에 미치는 상대밀도의 영향은 고결정도의 영향보다 작다는 것이 여러 연구자에 의해 밝혀진 바 있으며 (Baig 등 1997; Huang and Airey 1998; Ismail 등 2002), 본 연구에서도 고결정도 및 상대밀도에 따른 항복강도 및 할선탄성계수의 변화경향을 나타낸 그림 8(a), (b)와 그림 10(a), (b)을 비교함으로써 확인이 가능하였다. 또한 그림 11과 같이 상대밀도 25%와 석고함유율 5%인 시료를 기준으로 상대밀도 및 고결정도의 증가율에 따른 항복시 축차응력과 할선탄성계수의 증가율을 비교한 결과, 상대밀도가 25%에서 40%로 1.6배 증가할 경우 1.35~1.57배, 60%로 2.4배 증가할 경우 1.74~2.4배의 항복강도가 증가하였다. 반면 석고함유율이 5%에서



(a) 항복강도 증가율



(b) 할선탄성계수 증가율

그림 11. 항복강도 및 할선탄성계수 증가율

10%로 2배 증가할 경우 1.95~2.52배, 15%로 3배 증가할 경우 3.14~3.61배의 항복강도가 증가하였다. 마찬가지로 할선탄성계수는 상대밀도의 증가에 의해 1.08~1.88배가 증가하였고, 고결정도의 증가에 의해 2.07~4.39배 증가하였다. 즉 고결된 모래의 항복 이전 거동은 상대밀도보다는 고결정도에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 분석된다.

또한 본 연구에서는 고결정도 및 상대밀도에 따른 유효응력 경로를 비교하여 고결정도가 상대밀도보다 고결된 모래의 거동에 더 큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 그림 7(b)의 고결정도에 따른 유효응력 경로에서는 고결정도가 증가할수록 유효응력 경로가 뚜렷이 전응력 경로 쪽으로 편향되지만, 그림 9(b)의 상대밀도에 따른 석고함유율 10% 시료의 유효응력 경로에서는 상대밀도가 증가하여도 항복이전 유효응력 경로의 초기 기

울기가 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 이는 고결정도가 동일한 모래는 상대밀도의 증가에 따른 항복이전 강성의 증가가 상대적으로 작음을 의미한다.

4.2.2 간극수압 발생경향

그림 9(c)의 상대밀도에 따른 간극수압 곡선에서 고결된 모래의 항복이전 간극수압 경향은 고결정도가 같을 경우 상대밀도에 관계없이 거의 일정한 증가경향을 보였으며, 이는 4.1.2절에서 고결정도가 달라도 항복전 간극수압 증가경향은 거의 동일하다는 결과와 유사하다. 동일한 고결정도일지라도 상대밀도가 다르면 항복 이후 거동 양상은 뚜렷하게 구분됨을 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 즉 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 항복강도가 증가함에 따라 불구하고, 항복이전에는 동일한 간극수압 발생 경향을 보이며, 항복이 발생한 이후에는 상대밀도가 클수록 더 큰 간극수압 감소경향을 나타내었는데, 이 같은 경향은 모래의 일반적인 비배수 거동과 일치한다.

4.3 고결정도 및 상대밀도에 따른 거동양상

일반적으로 모래의 항복이후 거동은 모래의 초기 상대밀도 및 구속압에 의해 변형을 연화(strain softening) 거동이나 변형을 경화(strain hardening) 거동으로 구분된다. 상대밀도와 구속압이 작을수록 변형을 연화거동이 지배적이고 반대로 상대밀도와 구속압이 클수록 변형을 경화거동이 지배적이다. 그림 12의 상대밀도 25%인 고결모래의 응력-변형률 곡선에서 고결정도가 증가할수록 변형을 연화경향이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또

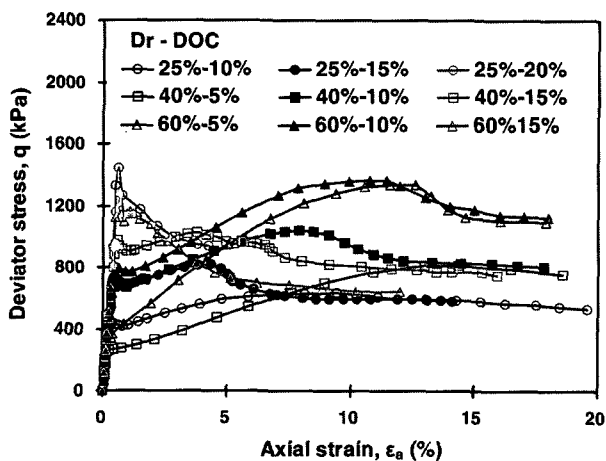


그림 12. 고결정도 및 상대밀도에 따른 비배수 전단거동($\sigma_3' = 200\text{kPa}$)

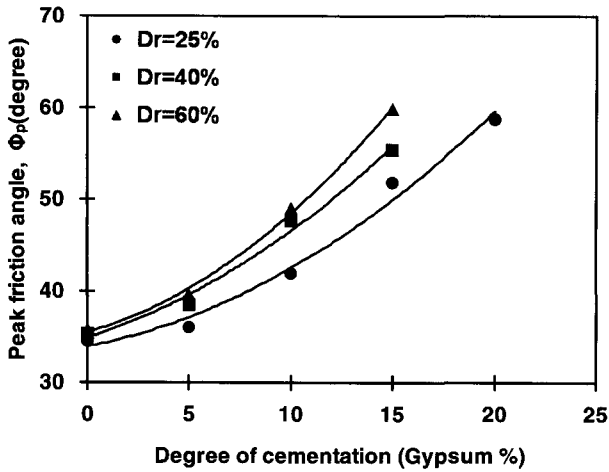
한 축변형율이 증가함에 따라 축차응력이 미고결 모래의 축차응력과 유사한 값으로 접근하는 것으로 나타났는데, 상대밀도 40%, 60%의 고결된 모래도 동일한 경향을 보였다. 그러나, 석고함유율 10%인 고결모래의 응력-변형률 곡선을 통해 상대밀도가 증가할수록 변형을 경화경향이 증가하는 것을 볼 수 있다.

상대밀도에 비해 고결정도가 큰 모래일수록 변형을 연화거동이 지배적으로 발생하지만, 석고함유율 15%이고 상대밀도 40%인 시료는 변형을 경화거동이, 반대로 석고함유율 15%이고 상대밀도가 더 큰 60% 시료는 변형을 연화거동이 발생하여 다른 거동을 나타내었다. 이는 상대밀도 60% 시료의 경우, 다량의 석고 침전물이 모래입자의 공극을 채워 고결결합이 파괴되면서 급격한 전단파괴면(shear plane)이 형성되어 미끄러짐이 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

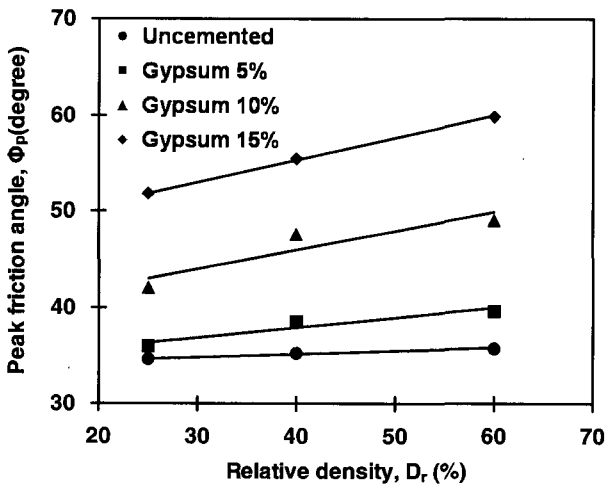
4.4 마찰각(friction angle)의 변화

고결현상은 입자 사이에 고결유발제가 침전되는 현상이므로 결과적으로 모래의 상대밀도를 증가시켜 압축에 대한 저항 및 겉보기 선형압밀응력(apparent preconsolidation pressure)의 증가를 유발시킨다(Coop and Atkinson 1993; Huang and Airey 1998). 그러나 고결유발제는 단순히 모래입자의 공극만 채우는 것이 아니라, 모래 입자들을 강하게 결합시키거나 모래입자의 표면에 부착되기 때문에, 고결은 모래의 내부마찰각에도 영향을 줄 수 있다. Coop and Atkinson(1993)은 석고를 이용한 고결(중량비 25%)을 통해 시료의 한계상태 내부마찰각(ϕ_{cs} , critical state friction angle)이 3°정도 감소함을 보였고, Ismail (2000)은 10% 석고로 고결된 시료의 극한 내부마찰각(ϕ_{ult} , ultimate friction angle)이 1.2° 증가한다고 보고하였다.

본 연구에서는 전단시 발생하는 각 시료의 응력비(stress ratio, M)로부터 마찰각을 결정하여 그림 13과 같이 고결정도 및 상대밀도에 따른 첨두마찰각(ϕ_p , peak friction angle)으로 나타내었다. 이때 첨두마찰각이 나타나는 변형율은 고결된 시료의 항복이 발생하는 변형률과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그림 13(a)에서 상대밀도가 25%인 미고결 모래의 첨두마찰각은 34.6°로 나타났으며, 석고함유율이 5%씩 증가함에 따라 1.4°, 5.9°, 9.9°의 첨두마찰각 증가가 발생하여 고결정도의 증가에 의해 급속한 첨두마찰각의 증가경향을 보였고, 상대밀도 40%, 60%의 모래에 대해서도 유사한 경향이



(a) 고결정도에 따른 침두마찰각 변화



(b) 상대밀도에 따른 침두마찰각 변화

그림 13. 고결정도 및 상대밀도에 따른 침두마찰각 변화

나타났다. 반면 그림 13(b)에서 석고함유율 5%인 시료의 상대밀도가 25%에서 40%, 60%로 증가할 경우 침두마찰각 증가량은 각각 2.5°, 1.4°이고, 석고함유율 10%인 시료의 침두마찰각 증가량은 5.7°, 1.5°로써, 상대밀도의 증가에 의해 완만한 침두마찰각 증가경향을 보였다. 즉 고결정도와 상대밀도의 증가는 고결된 모래의 침두마찰각의 증가에 영향을 주지만 상대밀도보다는 고결에 의한 영향이 더 크며, 이는 고결된 모래의 일반적인 거동 양상과 일치한다.

항복 이후 축변형을 10~20% 사이에서 나타나는 잔류마찰각(ϕ_r , residual friction angle)이 시료의 상대밀도 및 고결정도에 따라 변화하는 양상을 검토한 결과는 그림 14와 같다. 상대밀도가 25%인 시료는 고결정도에 따라 34.5~37.1°의 잔류마찰각을 나타냈고, 상대밀도 40%, 60%인 시료는 34.7~36.6°, 34.4~37.6°의 잔류마찰각을 나타냈다. 즉, 고결정도가 0~15%로 증가함에

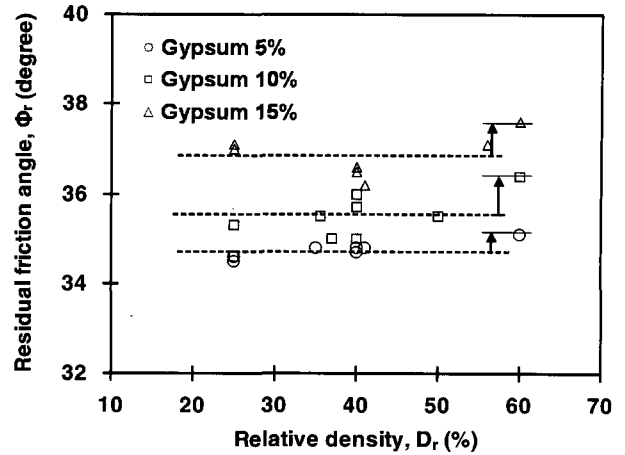


그림 14. 고결된 모래의 잔류마찰각

따라 잔류마찰각이 1.9~3.2°정도 증가하여 동일한 상대밀도일지라도 고결정도에 따른 잔류마찰각 증가경향이 나타났다. 또한 석고함유율 5% 시료는 25~40% 상대밀도에서 평균 34.7°의 잔류마찰각을 나타내고, 석고함유율 10%, 15% 시료는 각각 35.4°, 36.6°의 평균 잔류마찰각을 보이는데, 동일한 고결정도에서는 상대밀도에 의한 잔류마찰각의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 상대밀도 60%인 시료는 상대밀도 40% 시료보다 0.4~0.9°의 잔류마찰각이 증가하였는데, 상대밀도의 증가에 의해 동일한 고결정도로도 좀더 효율적인 고결이 발생하였기 때문으로 판단된다. 전체적으로 상대밀도 및 고결정도의 증가에 의해 잔류마찰각이 증가하는 경향을 보였지만, 상대밀도의 변화보다는 고결정도의 변화가 잔류마찰각에 더 큰 영향을 주는 것으로 분석된다. 고결이 적게 유발된 시료(석고함유율 5%)는 상대적으로 고결유발제의 침전량이 적기 때문에 상대밀도에 관계없이 미고결 모래와 유사한 잔류마찰각을 나타내어 고결이 잔류상태 시료의 마찰각에 거의 영향을 주지 않지만, 석고함유율 10% 이상의 강한 고결이 발현된 시료는 고결유발제가 입자 표면에 부착되어 입자와 입자사이의 마찰을 증가시켜 잔류마찰각이 뚜렷하게 증가하는 양상을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 고결(cementation)이 모래의 거동에 끼치는 영향을 알아보기 위해 석고를 고결 유발제로 사용하여 양생한 후 비배수 전단시험(CIU)을 실시하였다.

일반적으로 고결정도가 증가할수록 모래의 항복강도

및 강성이 증가하고 항복시 취성과괴 거동이 뚜렷하였으며, 또한 고결된 모래의 항복이전 거동은 상대밀도보다는 고결정도에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 즉 고결정도가 증가할수록 항복시 축차응력 및 할선탄성계수의 증가율이 크게 나타나고, 유효응력 경로가 점점 전응력 경로에 근접하여 나타났지만, 동일한 고결정도에서는 상대밀도가 할선탄성계수에 미치는 영향은 상대적으로 적으며, 항복전 유효응력 경로의 기울기도 거의 동일하게 나타났다. 또한 모래의 침두마찰각이 고결정도와 상대밀도에 따라 증가하는 경향을 보였는데, 상대밀도에 비해 고결정도가 모래의 침두마찰각에 끼치는 영향이 더 크게 나타났다.

고결은 입자의 표면과 입자의 접촉점에서 입자의 결합력을 증가시켜 압축성을 감소시키므로, 고결정도가 클수록 가해지는 하중에 비해 간극수압의 발생율이 작아 고결된 모래의 유효응력 경로는 과압밀된 흙의 유효응력 경로와 유사하게 나타났다. 또한, 항복이전 고결된 모래는 다일레이션 경향이 감소되지만, 항복이후에는 오히려 더 큰 다일레이션 경향이 발생되었으며, 침두강도 이후에는 상대밀도의 영향으로 미고결 모래의 축차응력과 유사하게 접근하였다.

고결정도가 클수록 고결된 시료의 항복이후 거동은 변형을 연화거동으로 나타나며, 반대로 고결정도가 작은 경우에는 변형을 경화거동으로 나타났다. 그러나 상대밀도에 비해 고결정도가 작을지라도 고결유발제가 시료의 공극을 충분히 채울 경우 변형을 연화거동이 나타나기도 한다. 또한 고결유발제가 모래 입자의 접촉점 사이나 입자 표면에 부착되어 모래의 잔류마찰각이 증가하였으며, 상대밀도보다 고결정도에 의한 잔류마찰각의 증가 경향이 더 뚜렷하였다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(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. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.9, pp.1379-1398.
2. Akili, W. and Torrance, J. K. (1981), "The development and geotechnical problems of Sabkha, with preliminary experiments on static penetration resistance of cemented sands", *Q. J. Engrg. Geol.* Vol.14, pp.59-73.
3. Baig, B., Picornell, M., and Nazarian, S, "Low strain shear moduli of cemented sands", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.123, No.6, pp.540-545.
4. Coop, M. R. and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
5. Cuccovillo, T. and Coop, M. R. (1999), "On the mechanics of structured sands", *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.741-760.
6. Clough, W. G., Sitar N., and Bachus R. (1981), "Cemented sands under static loading", *Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.799-817.
7. 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.
8. Haeri, S. M, Hamidi, A., and Tabatabaee, N. (2005), "The effect of gypsum cementation on the mechanical behavior of gravelly sands", *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol.28, No.4, pp.1-11.
9. 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.
10. Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, Vol.43, No.3, pp.351-415.
11. Ismael, N. F. (2000), "Influence of artificial cementation on the properties of Kuwaiti sands", *Kuwait J. Sci. Eng.*, Vol.27, pp.59-75.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Miura S. and Toki S. (1982), "Sample Preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.61-77.
16. Molenaar, M. and Venmanns, A. A. M. (1993), "Calcium carbonate cementation of sand : A method for producing artificially cemented samples for geotechnical testing and a comparison with natural cementation processes", *Engineering Geology*, Vol.35, pp.103-122.
17. 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.
18. Ismail, M. A. (2000), *Strength and deformation behaviour of calcite-cemented calcareous soil*, Ph.D. Thesis, the University of Western Australia.

(접수일자 2006. 1. 10, 심사완료일 2006. 4. 15)