

## 응력조건에 따른 고결모래의 강도정수 평가

### Effect of Stress Level on Strength Parameters of Cemented Sand

이 문 주<sup>1</sup> Lee, Moon-Joo

최 성 근<sup>2</sup> Choi, Sung-Kun

추 현 옥<sup>3</sup> Choo, Hyun-Wook

조 용 순<sup>4</sup> Cho, Yong-Soon

이 우 진<sup>5</sup> Lee, Woo-Jin

#### Abstract

The factors affecting the geotechnical properties of cemented sands are known to be relative density, cementation level, stress level, and particle characteristics such as particle size, shape and surface conditions. It has been widely accepted that the friction angle of cemented sands is not affected by cementation while the cohesion of cemented sands was significantly influenced by cementation. The cementation that is a critical component of the strength of cemented sands will be broken with increasing confining pressure and great caution is required in evaluating the cohesion of cemented specimens due to their fragilities. In this study, a series of drained shear tests were performed with specimens at various cementation levels and confining stresses to evaluate the strength parameters of cemented sands. From the experiments, it was concluded that the cohesion intercept of cemented sand experiences three distinctive zone (cementation control zone, transition zone, and stress control zone), as the cementation level and the confining stress varies. In addition, for accurate evaluation of the strength parameters, the level of confining stress triggering the breakage of cementation bond should be determined. In this study, the relationship between the maximum confining stresses capable of maintaining the cementation bond intact and unconfined compression strength of the cemented sand was established.

#### 요 지

고결모래의 거동은 고결정도, 상대밀도, 응력조건, 그리고 입자특성 등에 의해 영향을 받으며, 특히 고결모래의 강도에 영향을 끼치는 고결결합은 응력에 의해 파괴되기 때문에 고결모래의 강도정수는 응력조건을 고려하여 평가되어야 한다. 일반적으로 고결모래의 마찰각은 고결결합에 의해 영향을 받지 않기 때문에 미고결 상태의 마찰각과 동일한 반면, 점착력은 고결결합에 의해 증가하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서는 석고를 고결유발제로 하는 고결시료를 조성하여 다양한 구속압 조건에서 배수전단시험을 실시함으로써, 구속압 변화에 따른 고결모래의 강도정수를 평가하였다. 실험결과 고결모래의 점착력은 고결정도와 구속압의 크기에 따라 고결지배구간, 천이구간, 응력지배구간에서 다르게 평가되었다. 또한 본 연구에서는 고결결합을 파괴시키지 않고 강도정수를 평가하기 위한 적정 구속압을 결정하기 위해 고결정도를 표현하는 일축압축강도와 고결결합을 파괴시키지 않는 최대 구속압의 관계를 결정하였다.

**Keywords :** Cementation, Cementation level, Cohesion, Drained triaxial test, Friction angle, Stress level

1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, PhD Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, PhD Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

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

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

5 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

모래의 고결(cementation)은 모래 입자의 표면이나 입자간 접촉점에 고결 유발물질이 침전하여 입자간 결합력이 증진되는 현상이다. 약한 고결에 의해서도 흙의 미소변형강성 및 액상화에 대한 저항력이 크게 향상될 뿐만 아니라(Yun and Santamarina 2005), 지반의 침하량은 감소하고 지지력은 증가하기 때문에(Asghari 등 2003) 지반문제의 해석 및 설계시 고결된 흙에 대한 주의가 필요하다. 특히 유효점착력이 중요시되는 낮은 구속압 상태에서 고결의 효과가 크게 나타날 수 있다(Haeri 등 2005). 입자간의 고결결합을 파괴시키지 않고 불교란된 고결시료를 채취하는 것은 기술적, 경제적으로 어려움이 따를 뿐만 아니라, 또한 균질한 상태의 시료를 다량으로 확보하는 것이 불가능하기 때문에, 대부분의 고결에 대한 연구는 포틀랜드 시멘트, 석고, 탄산염 등을 사용하여 인위적으로 고결을 유발시켜 고결에 영향을 주는 요인에 대한 매개변수분석 위주로 진행되었다. 그러나 고결모래는 다양한 영향요인에 의해 고결정도가 크게 달라질 뿐만 아니라, 고결결합 파괴전후의 거동이 크게 다르기 때문에 거동을 예측하기 매우 난해하다. Saxena and Lastrico(1978)는 입자사이의 고결결합이 약 1%의 변형율에서 파괴되며, 고결결합 파괴 이전에는 점착성분이 거동을 지배하지만 고결결합 파괴 이후에는 점착성분은 사라지고 과찰성분에 의해 강도가 지배된다고 주장하였다. 또한 고결결합은 높은 구속압 상태에서도 파괴되기 때문에 구속압 조건에 따른 고결모래의 거동에 대하여 많은 연구성과가 보고되었지만, 대부분의 연구에서 고결모래의 강도정수는 구속압 조건에 관계없이 일괄적으로 결정되었다.

따라서 본 연구에서는 고결정도가 다른 모래에 대해 배수전단시험을 실시하여, 구속압 조건에 따른 고결모래의 강도정수 변화 양상을 평가하였다. 실험결과로부터 고결결합의 파괴로 인해 점착력이 급격히 감소하기 시작하는 구속압을 결정하였으며, 구속압의 변화에 따른 강도정수의 변화양상을 관찰하였다. 또한 모래의 일축압축강도로 표현되는 고결정도와 고결결합이 파괴되는 구속압의 관계를 검토하였다.

## 2. 고결 영향요인

다양한 매개변수분석으로부터 고결모래의 거동은 고

결정도, 상대밀도, 고결시 또는 전단시 구속압, 입자특성 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(이우진 등 2006; Asghari 등 2003; Haeri 등 2005; Clough 등 1981; Clough 등 1989; Consoli 등 2000; Huang and Airey 1993; Huang and Airey 1998; Ismael 2000; Ismail 등 2002a, b; Rotta 등 2003; Schnaid 등 2001; Zhu 등 1995). 인위적인 고결모래의 고결정도는 모래에 첨가되는 고결유발제의 양에 의해 주로 표현되며, 일축압축강도 등과 같은 강도특성에 의해 주로 평가되고 있다. 고결정도가 클수록 고결모래의 항복강도와 변형계수가 증가하며(이우진 등 2006; Clough 등 1981; Consoli 등 2000; Schnaid 등 2001; Ismail 등 2002a; Rotta 등 2003; Haeri 등 2005), 겉보기 선행압밀응력(apparent preconsolidation stress)이 증가한다(Huang and Airey 1998; Rotta 등 2003). 또한 동일모래에서 상대밀도가 높은 시료일수록 입자의 접촉점이 증가하기 때문에 고결 유발물질이 더 효율적으로 흡착되어 고결 효과가 증가한다(Christopher 등 1989; Ismail 2002b). 동일 구속압에서 상대밀도가 증가할수록 항복시 축차응력이 증가하지만, 고결결합이 파괴된 후 고결의 영향이 대부분 사라져 상대밀도 차이에 따른 내부마찰각으로 저항하게 된다(Ismail 2002a).

모래의 고결에 영향을 끼치는 입자특성으로는 입자강도, 입자크기 및 분포, 입자거칠기 등이 있다. 실리카질 모래의 경우, 입자 강도가 크기 때문에 고결결합이 파괴되기 전까지 입자와 입자로 충분히 강한 응력이 전달될 수 있어 고결결합이 강도의 지배요인으로 작용하지만, 입자가 쉽게 깨지고 압축성이 큰 석회질모래(calcareous sand)의 경우, 입자의 파쇄가 발생할 수 있기 때문에 입자의 강도와 고결결합의 크기에 따라 고결모래의 거동이 복합적으로 변화한다(Ismael 2000; Ismail 등 2002b). 또한 모래입자의 크기가 작을수록 입자간 접촉점이 증가할 뿐만 아니라, 모래의 비표면적이 증가하기 때문에 고결유발제의 침전이 더 효과적으로 발생하여 고결모래의 강도가 증가하고(Clough 등 1981; Christopher 등 1989, Ismail 등 2002b), 입도분포가 고를수록 고결모래의 강도와 변형계수가 증가한다(Christopher 등 1989). 일반적으로 둥근모양의 입자보다 각진모양의 입자에서 고결효과가 더 크게 발휘되는 것으로 알려지고 있으나(Clough 등 1989), Christopher 등(1989)은 입자의 모양이 고결모래의 마찰저항에는 영향을 끼치나 강도와 강성에는 영향을 끼치지 않는다고 하였다.

또한 고결모래의 거동은 구속압의 영향을 크게 받는

다. 높은 구속압에서 고결이 형성될수록 고결모래의 강성이 증가하지만(Consoli 등 2000), 고결결합 형성 후 가해지는 구속압의 영향이 고결모래의 거동에 더 큰 영향을 끼친다. Coop and Atkinson(1993)은 고결모래의 응력-변형을 거동을 초기 구속응력 상태와 고결결합의 항복강도에 따라 나타내어 고결결합에 비해 낮은 구속압 단계에서는 전단시 미소변형에서 침투강도가 발생하여 응력상태가 미고결 상태의 강도를 초과하지만, 고결결합에 비해 큰 구속압이 가해진 상태에서는 시료가 이미 항복에 도달하기 때문에 미고결 모래와 유사한 거동이 나타난다고 하였다. Huang and Airey(1998)의 연구에서도 구속압의 증가에 의해 고결결합이 파괴된 시료의 체적변형계수는 고결정도에 관계없이 미고결 모래의 체적변형계수와 유사하게 나타났다. 일반적으로 고결모래에 작용하는 구속압이 증가할수록 팽창, 변형을 연화, 취성의 거동특성이 압축, 변형을 경화, 연성거동으로 바뀌게 된다(Abdulla and Kioussis 1997; Clough 등 1989; Huang and Airey, 1993).

### 3. 시험방법

#### 3.1 시료 기본특성

본 연구에 사용된 모래는 모암인 규석으로부터 인공

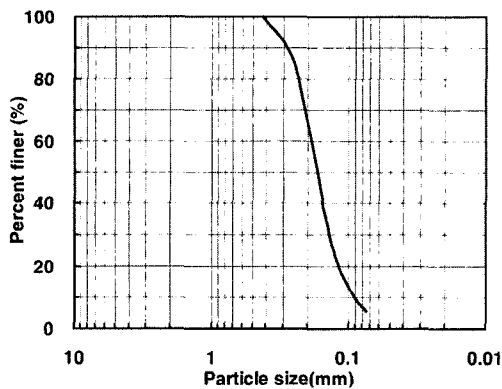


그림 1. 모래 입도분포

표 1. 모래 기본물성

Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	% fines	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	USCS
2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	5.7	1.054	0.719	SP

표 2. 모래 구성성분(함유율, %)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
0.68	0.10	0.50	0.17	0.07	0.01	0.01	0.01	98.47	0.05

적으로 파쇄된 모래로써, 입도분포와 기본물성은 그림 1, 표 1과 같으며, 평균입경은 0.17mm이고, 통일분류법 상 SP에 해당된다. 또한 전자주사현미경(SEM)을 통하여 관찰된 모래입자의 모양은 그림 2와 같으며, 이를 Wadell(1932)의 방법에 의해 분석한 결과 중간모난(subangular) 정도의 조도(roundness)를 갖는 것으로 나타났다. 또한 표 2의 성분분석(XRF)결과 SiO<sub>2</sub> 함유량이 98% 이상인 석영질 모래인 것으로 나타났다. 모래의 고결을 위해 도자기형재용 석고(GM-10)를 사용하였으며, 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합되어 습윤양생 될 경우 20Mpa의 압축강도를 발현하고 양생시 팽창율은 0.03%이다.

#### 3.2 시험장비

본 연구에 사용된 CKC 자동화 삼축시험기는 하중프레임, 삼축셀, 하중재하장치, 체적측정장치, 신호조정장치, 컴퓨터 및 프린터 등으로 구성되어 있다. 또한 본 삼축시험기는 축하중을 측정하기 위한 로드셀, 연직침하량 측정을 위한 LVDT, 셀압, 유효압, 체적변화 등을 탐지하기 위한 3개의 압력센서 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 바



그림 2. 모래시료 SEM 사진

꾸어 시스템의 압력을 조절하여 구속압 및 축차응력을 자동제어하는 원리로 작동한다. 또한 본 시험기는 등방, 비등방 및  $K_0$  압밀을 수행하여 배수와 비배수조건으로 정적, 동적전단을 유발시킬 수 있고 응력제어 및 변형을 제어가 가능하여 시료에 대한 다양한 조건의 거동을 분석할 수 있다.

### 3.3 시료성형 및 시험

가장 오래된 실내 시료조성 방법인 습윤다짐법(moist tamping method)은 롤러로 다져지는 흙의 구조를 모델링하기에 적절한 방법이지만, 흙의 밀도나 입도분포에 따라 부분적으로 불균등한 시료가 조성될 수 있다(Miura 등 1984, Kurbis and Vaid 1988). 건조낙사법(air pluviation method)은 바람에 의해 퇴적된 흙의 구조를 가장 잘 나타낼 수 있는 시료조성 방법으로써, 빈입도 시료에 적용할 경우 매우 균등한 시료의 조성이 가능하지만, 실트질 모래와 같이 세립분이 함유된 양입도 시료에 적용할 경우 입자의 낙하차에 의한 재료분리와 시료조성 후 포화 과정에 의한 재료분리가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Kurbis and Vaid 1988). 수중낙사법(water pluviation method)은 수중에서 퇴적된 자연상태 흙의 구조를 가장 잘 모사할 수 있는 시료조성 방법이다(Chaney 등 1978, Vaid and Negussey 1984). 이 방법은 탈기수(deaired water)에 시료를 낙하시키기 때문에 건조낙사법보다 낮은 상대밀도의 시료가 조성되지만, 양입도 시료나 실트질 모래를 조성할 경우 재료분리가 발생할 수 있다. Kurbis and Vaid (1988)가 제안한 슬러리침전법(slurry deposition method)은 탈기수에서 완벽한 포화상태로 시료가 조성되며, 퇴적도중 입자 낙하거리를 최소화할 수 있기 때문에 재료분리가 최소화되어, 흙의 입도분포나 세립분 함유율에 관계없이 균질한 시료를 조성할 수 있다.

고결시료 조성 중 모래와 고결유발제의 재료분리를 방지하는 것이 중요하지만, 고결유발제로 본 연구에서 사용한 석고의 초기 경화시간은 20분 이내이기 때문에, 수중낙사법이나 슬러리침전법은 부적절하다. 반면 건조낙사법은 시료의 재료분리를 방지하는 적절한 조치만 취해진다면 균등한 시료를 반복적으로 조성할 수 있는 방법으로 판단된다.

미고결 시료의 성형을 위해 삼축압축시험기에 멤브레인과 모래시료 조성용 원통형 몰드를 장착하고 건조 모래를 낙하시킨 후, 원하는 상대밀도(시료높이)가 되도록 몰드를 대칭으로 두드려 상대밀도 40%인 미고결 시

표 3. CID 시험조건

구분	시험조건	
상대밀도(%)	40	
석고함유율(%)	0, 5, 7, 10	
고결시 상재하중(kPa)	200	
압밀 구속압 (kPa)	미고결 시료	50, 100, 200, 400
	5% 고결시료	10, 30, 50, 100, 150, 200
	7% 고결시료	10, 50, 75, 100, 150, 200
	10% 고결시료	10, 50, 100, 150, 200, 300, 400
전단변형률속도(%/min)	0.1	

료를 조성하였다. 조성된 시료의 직경은 약 70mm, 높이 약 153mm로써 시료의 정확한 직경과 높이는 15kPa의 부압으로 시료를 자립시킨 후 측정되었다. 시료의 포화를 위해 10kPa의 구속압이 가해진 상태에서 이산화탄소로 포화된 탄산수와 탈기수를 7kPa의 압력으로 각각 500ml 통과시켰으며, 10kPa의 유효응력을 유지시키면서 배압(back pressure)을 100kPa까지 증가시켜 간극수압계수(B value)가 0.97 이상이 되도록 하였다. 시료의 포화가 충분히 이루어진 상태에서 단계적으로 50~200kPa의 등방 유효구속압으로 압밀시킨 후, 0.1%/min의 변형률 속도로 배수전단시험(CID)을 실시하였다.

고결시료의 성형 시 본 연구에서는 재료분리 영향을 최소화 하기 위해 Puppala 등(1995)의 방법을 적용하여 함수비 0.5%에 해당하는 물을 모래와 충분히 교반시켜 석고입자를 모래표면에 부착시킨 후 낙하시켜 시료를 조성하였다. 시료를 직경 70mm의 몰드에 높이 150mm로 조성하고 200kPa의 상재구속압을 가한 뒤, 시료의 하부에서 10cm<sup>3</sup>/min의 속도로 증류수를 주입하여 석고의 수화를 통한 고결을 유도하였다. 24시간동안 시료를 양생한 후 몰드를 해체하고 시료의 정확한 직경과 높이를 측정하여 시료의 상대밀도를 결정하였다. 고결된 모래시료를 삼축시험기에 거치하고 미고결 모래와 동일한 조건에서 시료를 포화시킨 후, 배압을 300kPa까지 증가시켜 0.93 이상의 간극수압계수를 확인하였다. 충분한 포화상태에서 단계적으로 등방구속압을 가한 후, 0.1%/min의 변형률 속도로 배수전단시험(CID)을 실시하였다. 전체적인 시험조건은 표 3과 같다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 모래의 고결정도 평가

인위적인 고결모래의 고결정도는 유발제의 함유율

뿐만 아니라, 유발제의 종류, 모래의 상대밀도, 그리고 입자특성 등의 다양한 조건에 의해 영향을 받기 때문에 각 시험시료의 고결정도에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 기존의 선행 연구와 마찬가지로 고결모래의 일축압축강도( $q_{ucs}$ )를 결정하여 고결정도를 간접적으로 평가하였다. 그림 3은 본 연구 및 기존 연구에서 결정된 고결모래의 일축압축강도와 고결유발제 함유율의 관계를 비교한 것이다. 각 고결시료의 특성은 표 4와 같다. 고결유발제의 종류에 따라 일축압축강도의 증가정도는 다르지만 유사한 경향이 나타났으며, 강도차이는 고결유발제의 종류차이, 시료의 단위중량, 혹은 입자특성 때문이다. 일반적으로 석고보다는 포틀랜드 시멘트가 적은 양으로도 큰 고결효과를 발현하므로, 포틀랜드 시멘트로 고결된 모래의 일축압축강도가 더 크게 나타났다. 석고를 이용하여 고결된 모래의 거동이 자연상태에서 고결된 모래의 거동과 좀 더 유사하기 때문에(Ismail, 2002b) 일축압축강도 500kPa 이하의 고결에는 석고사용이 적합하지만, 좀 더 강한 고결을 유발시키기 위해선 적은 양으로도 큰 고결효과를 나타내는 포틀랜드 시멘트의 사용이 바람직할 것으로 판단된다.

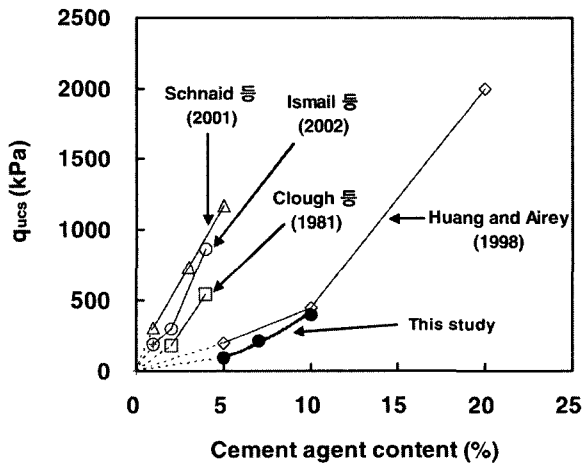


그림 3. 각 시험모래의 고결유발제 함유율-일축압축강도 관계

표 4. 각 시험모래의 특성

출처	Gs	D <sub>50</sub> (mm)	분류	고결유발제	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	비고
Clough 등(1981)	-	0.75	-	포틀랜드 시멘트	15.5(Dr=74%)	
Huang and Airey(1998)	2.82	-	-	석고	15.00	석회질모래
Ismail(2000)	S-1	0.31	SW-SM	포틀랜드 시멘트	19.8	
Schnaid 등(2001)	2.70	0.09(D <sub>60</sub> )	실트질모래	포틀랜드 시멘트	17.5	
This study	2.64	0.17	SP	석고	13.5(Dr=40%)	석영질모래

#### 4.2 고결모래의 배수전단거동

동일 구속압(100kPa)에서 고결정도에 따른 모래의 거동양상은 그림 4와 같다. 고결정도가 클수록 침투강도 이전의 강성이 크고, 전단강도가 증가하며 파괴양상이 취성적이지만, 파괴이후에는 변형을 연화거동 양상이 증가하였다. 그러나 전단파괴 이후 극한상태(축변형율 15~20%)에서는 고결모래의 거동이 미고결 모래의 거동양상으로 접근하였다. 또한 전단시 체적이 팽창(dilation) 거동을 보이는 미고결 모래와는 달리 고결모래는 상대적으로 압축(contraction) 경향이 있음을 알 수 있다. 이 같은 경향은 항복, 혹은 파괴 이전의 고결모래는 하중에 대한 압축저항이 크기 때문에 고결에 의해 모래의 팽창이 지연되었기 때문이며, 이는 Cuccovillo and Coop(1999)의 연구결과와 일치한다. 또한 고결정도가 크면 고결결합이 파괴되면서 급격한 팽창이 발생하였으며, 이는 Huang

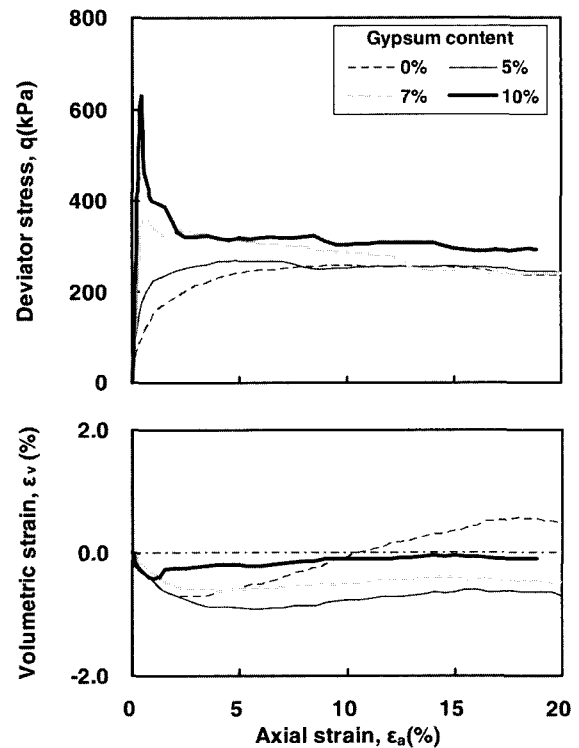


그림 4. 고결정도에 따른 고결모래의 배수전단거동(100kPa 구속압)

and Airey(1993), Asghari 등(2003)의 결과와 일치한다.

그림 5는 구속압에 따른 7% 고결모래의 배수전단거동으로써, 구속압의 증가에 의해 고결모래의 변형률 연화경향이 감소하고 파괴경향이 연성적으로 변하였다. 특히 5% 이하의 변형률에서는 고결모래의 강성이 미고결 모래보다 상당히 크게 나타나지만, 10% 이상의 변형률에서는 고결모래의 축차응력이 미고결 모래의 축차응력에 접근함을 알 수 있다. 동일한 고결정도에서 구속압이 클수록 고결모래는 압축거동이 나타나며, 극한 팽창율은 감소하였다. 또한 낮은 구속압에서는 파괴후 급격한 팽창거동이 나타나지만, 구속압이 증가하면 압축거동이 지배적이다.

고결정도와 구속압에 따른 모래의 전단강도는 그림 6과 같다. 고결정도와 구속압이 증가할수록 모래의 전단강도는 증가하지만, 고결결합력에 비해 큰 구속압이 가해진 고결모래(구속압 200kPa 상태의 5~7% 고결모래)의 전단강도는 미고결 모래의 전단강도와 유사하게 나타났다. 반면 10% 고결모래의 경우, 200kPa의 구속압 조건에서도 고결결합이 여전히 거동을 지배하여 미고결 모래보다 큰 전단강도를 유지하였다. 구속압에 따른 각 고결모래의 극한강도 변화를 나타낸 그림 6(b)로부터 축변형률 15~20% 사이에서 나타난 각 모래의 극한

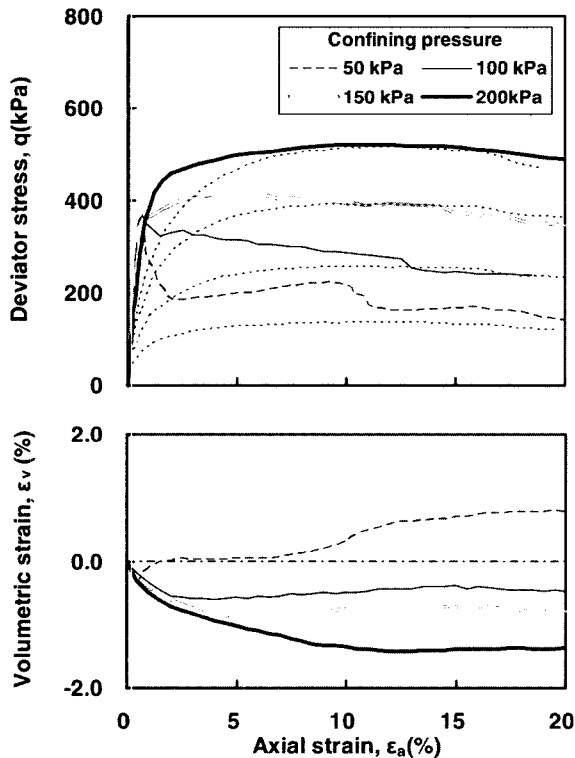


그림 5. 구속압에 따른 고결모래의 배수전단거동(7% cemented sand)

강도는 동일 구속압 조건에서 유사하게 나타났다. 이 같은 경향은 Saxena and Lastrico(1978)의 연구와 같이 고결결합 파괴 이전에는 점착성분이 거동을 지배하지만, 고결결합 파괴 이후에는 점착성분은 사라지고 마찰성분에 의해 강도가 지배되기 때문이다.

그림 7은 구속압 증가에 따른 미고결 모래와 고결모래의 파괴강도 비율 변화를 나타낸 것으로, 구속압이 증가할수록 파괴강도비가 점차 증가하면서 1에 수렴하였

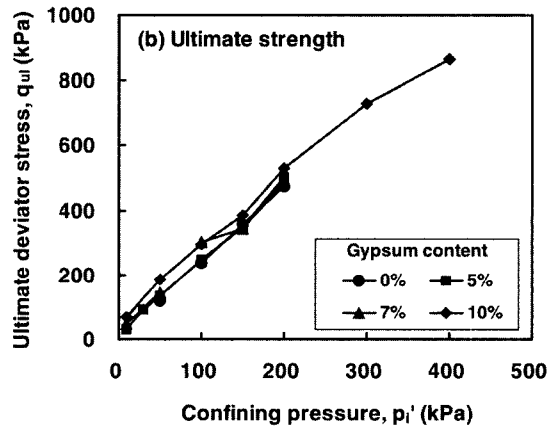
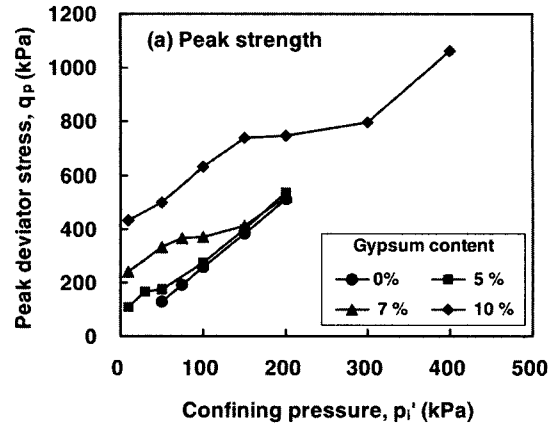


그림 6. 구속압 및 고결정도에 따른 고결모래의 강도변화

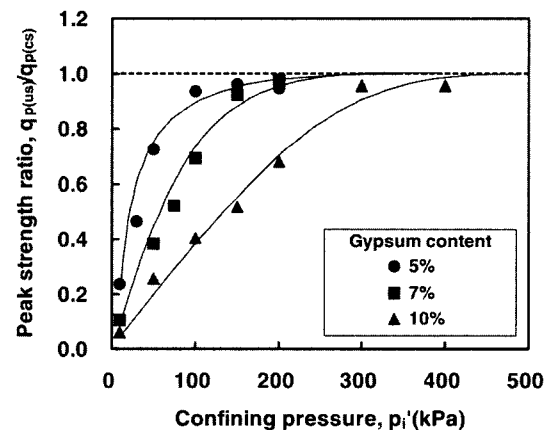


그림 7. 구속압에 따른 고결영향정도(전단강도비)

다. 이는 낮은 구속압 상태에서 고결의 영향이 크게 나타나며, 구속압이 증가할수록 고결의 영향이 점차 감소함을 의미한다.

### 4.3 구속압에 따른 고결모래의 강도정수 평가

실험 결과로부터 구속압 및 고결정도에 따른 모래의 전단강도 변화를 정리하면 그림 8과 같다. 고결결합력에 비해 낮은 구속압에서는 고결결합력이 파괴되기 전 상태로서, 구속압에 의한 고결모래의 전단강도의 증가양

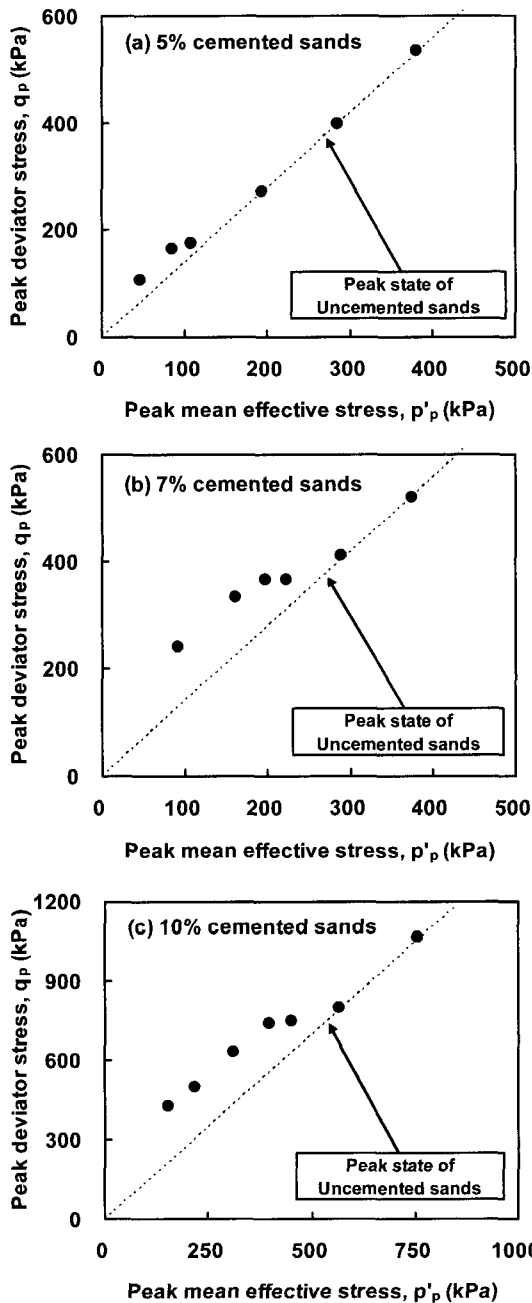


그림 8. 고결모래의 파괴상태( $p'$ - $q$  관계)

상이 미고결 모래와 유사하게 나타났다. 즉, 낮은 구속압에서는 고결모래의 파괴포락선이 미고결 모래의 파괴포락선과 나란하므로 고결결합 파괴전 고결모래의 마찰각은 미고결 모래의 마찰각과 동일한 것으로 판단된다. 그러나 구속압의 증가에 의해 전단강도의 증가 경향이 급격히 완화되는 경계점이 관찰되었으며, 이는 구속압에 의해 모래의 고결결합이 파괴되었기 때문으로 판단된다.

고결모래의 점착력은 동일한 평균유효응력에서 고결모래와 미고결 모래의 축차응력차로 결정되며, 고결정도와 구속압에 따라 그림 9와 같은 점착력의 변화가 나타났다. 낮은 구속압에서는 구속압에 관계없이 고결모래의 점착력이 거의 일정하였다. 그러나 점착력이 급격히 감소하는 구속압이 나타나며, 본 연구에서는 이러한 경계점을 고결결합 파괴점(breaking point, BP)으로 정의하였다. 고결정도가 클수록 결합 파괴이전의 점착력과 고결결합이 파괴되는 BP는 증가한다. 그림 9의 결과로부터 구속압에 따른 고결모래의 이상적인 거동양상을 그림 10과 같이 나타내었다. 결합파괴점 이하의 응력상태는 고결모래가 응력보다는 고결에 의한 영향을

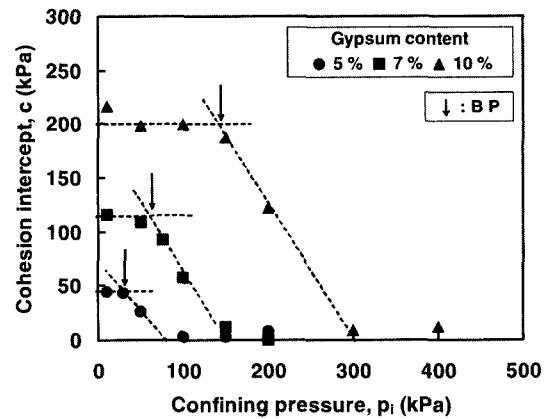


그림 9. 구속압에 따른 고결모래의 점착력 변화 및 파괴점

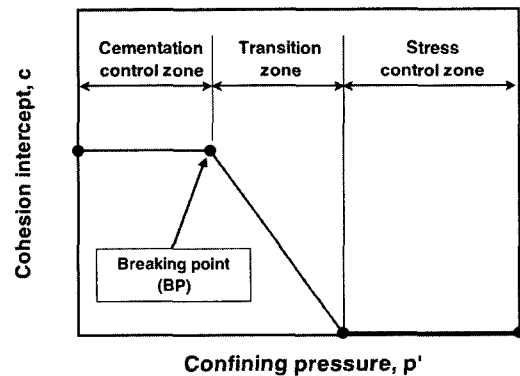


그림 10. 구속압에 따른 고결모래의 이상적 거동

주로 받는 고결지배구간(cementation control zone)이며, 고결모래의 점착력은 구속압에 관계없이 일정하게 나타난다. 결합파괴점 이상의 응력상태에서 고결모래의 점착력이 급격히 감소하기 시작하는 천이구간(transition zone)이 나타나며, 천이구간을 지나 고결모래와 미고결모래의 거동이 유사하게 되는 응력지배구간(stress control zone)이 존재한다. 응력지배구간에서는 고결효과가 발휘되지 못하므로 고결모래의 점착력이 완전히 소멸되고, 고결모래와 미고결 모래 모두 마찰에 의해서만 강도가 발현됨을 알 수 있다. 전 구간에서 고결모래의 마찰각은 미고결 모래의 마찰각과 동일한 것으로 판단된다.

그림 9에서 결정된 고결모래의 점착력과 결합파괴점으로부터 그림 11과 같이 석고함유율에 따른 점착력과 결합파괴점의 관계가 거듭제곱 형태의 비례관계임이 파악되었다. 또한 그림 12와 같이 각 고결모래의 일축압축강도에 따른 점착력과 파괴점의 구속압의 관계를 나타낸 결과, 두 관계 모두 선형 비례적으로 나타났다.

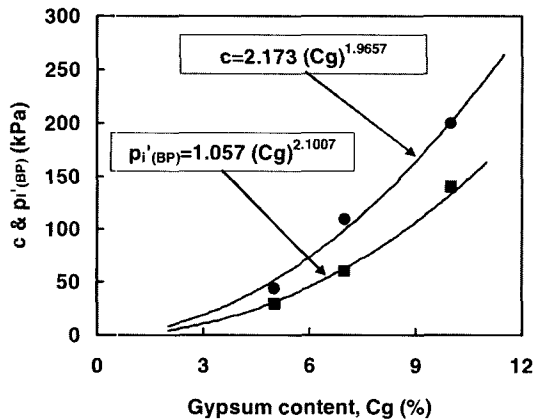


그림 11. 석고함유율(Cg)에 따른 고결모래의 점착력 및 파괴점 변화

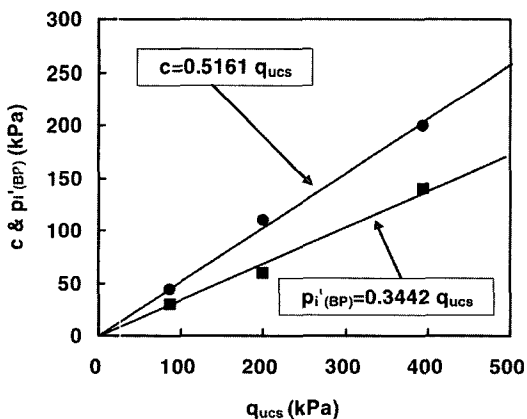


그림 12. 일축압축강도에 따른 고결모래의 점착력 및 파괴점 변화

## 5. 결론

본 연구에서는 석고로 고결된 고결모래에 대하여 다양한 구속압 상태에서 배수전단시험을 실시함으로써, 구속압에 따른 고결모래의 강도정수를 평가하였다. 조성된 시료의 고결정도는 모래에 포함된 석고중량비로 조절되었으며, 일축압축강도로 간단히 평가하였다.

실험결과 고결정도와 구속압이 증가할수록 고결모래의 전단강도가 증가하는 일반적인 경향이 확인되었다. 그러나 고결모래의 취성적인 파괴경향이 구속압의 증가에 의해 연성적으로 변하였다. 고결모래가 낮은 구속압 상태에서 파괴될 경우, 급격한 체적팽창이 발생하였으나, 대부분의 고결시료는 구속압의 증가에 의해 전단시 체적이 압축되었다.

본 연구에서는 응력에 의한 고결결합의 파괴정도에 따라 고결모래의 거동을 고결지배구간, 천이구간, 그리고 응력지배구간으로 구분하였다. 고결지배구간은 고결결합이 파괴되기 전 상태로서, 파괴포락선은 거의 선형이며 미고결모래의 파괴포락선과 동일한 기울기로 나타난다. 그러나 구속압에 의해 고결결합이 파괴되면 고결모래의 파괴포락선이 급격히 미고결 모래의 파괴포락선에 수렴하면서 고결모래의 점착력이 점차 사라지며, 결국 응력지배구간에서 고결모래와 미고결 모래의 파괴포락선이 일치하여 고결보다는 응력이 거동을 지배하였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: C104A1000009-06A0200-00800)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 이우진, 이문주, 최성근, 홍성진 (2006), “고결(Cementation)에 따른 모래의 비배수 전단거동 변화” *한국지반공학회논문집*, Vol. 22, No.4, pp.85-94.
2. Abdulla, A.A. and Kioussis, P.D. (1997), “Behavior of cemented sands- I. Testing”, *Int. J. Numer. Analyt. Methods Geomech.*, Vol. 21, pp.533-547.
3. Asghari, E., Toll, D.G. and Haeri, S.M. (2003), “Triaxial behaviour of a cemented gravely sand, Tehran alluvium”, *Geotech. Geological Engrg.*, Vol.21, pp.1-28.



4. Chaney, R. and Mulilis, P.J. (1978), "Suggested method for soil specimen remolding by wet raining", *Geotech. Testing J.* ASTM, Vol.1, No.2, pp.107-108.
5. Christopher, B.R., Atmatzidis, D.K. and Krizek, R.J. (1989), "Laboratory testing of chemically grouted sand", *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol.12, No.2, pp.109-118.
6. Clough, W.G., Iwabuchi J., Rad N.S., and Kuppasamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
7. 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.
8. Consoli, N.C., Rotta, G.V. and Prietto, P.D. M. (2000), "Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils", *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.99-105.
9. Coop, M.R. and Atkinson, J.H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
10. Cuccovillo, T. and Coop, M.R. (1999), "On the mechanics of structured sands", *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.741-760.
11. Haeri, S.M., Hosseini, S.M., Toll, D.G. and Yasrebi, S.S. (2005), "The behaviour of an artificially cemented sandy gravel", *Geotech. Geological Engrg.*, Vol.23, pp.537-560.
12. Huang, J.T. and Airey, D.W. (1993), "Effects of cement and density on an artificially cemented sand", *Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*, Anagnostopoulos et al., eds., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.1, pp.553-560.
13. 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.
14. Ismael, N.F. (2000), "Influence of artificial cementation on the properties of Kuwaiti sands", *Kuwait J. Sci. Eng.*, Vol.27, pp.59-75
15. 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.
16. 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.
17. Kuerbis, R. and Vaid, Y.P. (1988), "Sand sample preparation - the slurry deposition method", *Soils and Foundations*, Vol.28 No.4, pp.107-118.
18. Miura, S., Toki, S. and Tanizawa, F. (1984), "Cone penetration characteristics and its correlation to static and cyclic deformation-strength behaviors of anisotropic sand", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.58-74.
19. Puppala, A.J., Acar, Y.B. and Tumay, M.T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589-600.
20. Rotta, G.V., Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Coop, M.R. and Graham, J. (2003), "Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress", *Geotechnique*, Vol.53, No.5, pp.493-501
21. Saxena, S.K. and Lastrico, R.M. (1978), "Static properties of lightly cemented sands", *Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.104, No.12, pp. 1449-1464.
22. Schnaid, 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.
23. Vaid, Y.P. and Nequssey, D. (1984), "Relative density of air and water pluviated sand", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp. 101-105.
24. Wadell, H. (1932) Volume, shape and roundness of rock particles, *J. Geol.* Vol.40, pp.443-461.
25. Yun, T.S. and Santamarina, J.C. (2005), "Decementation, softening, and collapse : changes in small-strain shear stiffness in k<sub>0</sub> loading", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.131, No.3, pp.350-358.
26. Zhu, F., Clark, J.I. and Paulin, M.J. (1995), "Factor affecting at-rest lateral stress in artificially cemented sands", *Can. Geotech. J.*, NRC, Vol.32, pp.195-203.

(접수일자 2007. 3. 7, 심사완료일 2007. 5. 16)