

고결모래의 강도특성에 대한 영향요인 분석

Analysis of Influencing Factors on Strength Characteristics of Cemented Sand

이 문 주¹ Lee, Moon-Joo

최 성 근² Choi, Sung-Kun

추 현 옥³ Choo, Hyun-Wook

조 용 순⁴ Cho, Yong-Soon

이 우 진⁵ Lee, Woo-Jin

Abstract

The effects of sitting pressure (σ_{sit}') during cementation, relative density and particle characteristics on the cohesion intercept due to cementation bonds and the confining stress inducing the breakage of cementation bonds ($p_{i(BP)}'$) are investigated from drained shear tests on the cemented sands confined under the isotropic stress up to 400 kPa. It was observed from the experimental results that the cemented sands, with the same density and gypsum content, show similar values of cohesion intercept and $p_{i(BP)}'$, regardless of σ_{sit}' . Although the cohesion intercept and $p_{i(BP)}'$ of cemented sands are observed to increase with increasing relative density and cementation level, the relative density appears to have more significant effect on $p_{i(BP)}'$ than the cohesion intercept does. From analysing the test results of three different sands, it is shown that the smaller the particle size the larger the cohesion intercept and $p_{i(BP)}'$, due to the increased number of contact points between the particles.

요 지

본 연구에서는 고결시 상재구속압(σ_{sit}'), 상대밀도, 그리고 입자특성이 고결모래의 점착력과 고결결합 파괴구속압($p_{i(BP)}'$)에 미치는 영향을 검토하기 위하여 400kPa 까지의 구속압으로 압밀된 고결모래에 대한 배수전단시험을 실시하였다. 시험결과 동일 상대밀도와 석고함유율로 고결된 모래의 점착력과 $p_{i(BP)}'$ 는 σ_{sit}' 에 관계없이 동일하게 결정되어, σ_{sit}' 이 고결모래의 강도특성에 미치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 반면, 상대밀도나 고결정도가 증가할수록 고결모래의 점착력과 $p_{i(BP)}'$ 는 증가하였으며, 상대밀도가 점착력에 미치는 영향보다 $p_{i(BP)}'$ 에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 입자특성이 다른 세 종류의 모래시료에 대한 결과를 분석한 결과, 시료 입경이 작을수록 입자사이의 접촉점이 증가하여 점착력과 $p_{i(BP)}'$ 가 크게 결정되었다.

Keywords : Breaking point, Cementation, Cohesion intercept, Particle characteristics, Relative density, Sitting pressure

1. 서 론

열대나 아열대 지역의 퇴적지반에서 장기간에 걸쳐

발현되는 자연적 고결(cementation)이나 그라우팅 공법과 같이 미고결 지반에 적용되는 인위적 고결은 흙 입자간 결합력을 증가시켜 기초의 침하량을 감소시키고

1 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

5 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate prof., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지지력은 증가시킨다(Asghari 등 2003; Schnaid 등 2001). 고결지반의 거동은 고결결합에 의한 점착성분에 크게 영향을 받으나, 고결결합 파괴 이후에는 점착성분은 사라지기 때문에 마찰성분에 의해 거동이 지배된다(Saxena and Lastrico 1978). 따라서 고결모래의 설계 지반정수는 결합의 파괴 여부에 따라 달리 결정되어야 하며, 고결결합에 의해 발현된 점착력과 고결결합이 파괴되는 응력 수준을 평가하는 것이 중요하다.

이와 같은 관점에서 이문주 등(2007)은 다양한 고결 정도와 구속압에 따른 고결모래의 배수전단시험으로부터 고결모래의 거동을 그림 1과 같이 점착력의 변화 양상으로 표현하였으며, 석고함유율에 따른 고결모래의 점착력(c)과 등방압밀시 고결결합이 파괴되는 구속압($p_i'(BP)$)을 결정하였다. 이때 고결모래의 마찰각은 미고결 모래의 마찰각과 동일하게 나타난 반면, 고결 결합력에 의해 점착력은 크게 증가한다. 고결모래의 점착력은 고결결합 파괴점(breaking point, BP)까지 일정하지만, 압밀구속압에 의해 고결결합이 파괴되면서 점착력이 급격히 감소하기 시작한다. 이러한 고결모래의 점착력 변화양상에 따라 고결모래의 거동구간을 고결지배구간, 전이구간, 응력지배구간으로 분류하였다. 고결지배구간에서는 고결에 의한 점착력이 고결모래의 거동을 지배하며, 응력지배구간에서는 고결모래의 점착력은 사라지고 미고결 모래와 동일한 마찰각으로 응력의 지배를 받아 거동한다.

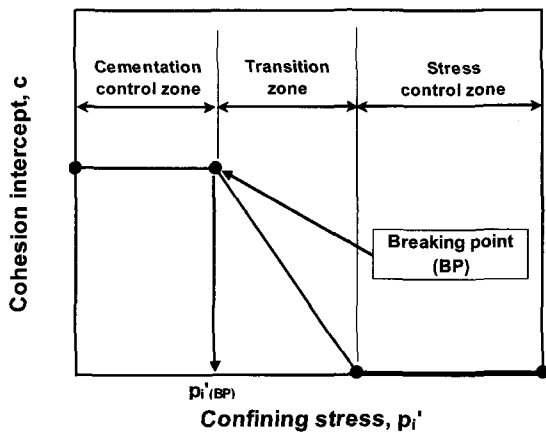


그림 1. 고결모래의 점착력 변화(이문주 등, 2007)

표 1. 시험모래 기본물성

모래	Gs	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _v	C _c	e _{max}	e _{min}	USCS	% SiO ₂
K-7호사	2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	1.054	0.719	SP	98
부산사	2.620	0.16	0.32	2.346	0.808	1.063	0.658	SP	76
주문진사	2.632	0.40	0.52	1.462	1.045	0.977	0.613	SP	86

이문주 등(2007)에서는 동일한 상대밀도에서 석고함유율과 압밀구속압에 따른 점착력과 고결결합 파괴응력을 평가하였다. 그러나, 고결모래의 거동은 고결 정도와 압밀구속압 뿐만 아니라, 상대밀도, 고결시 상재구속압, 그리고 입자크기나 거칠기와 같은 입자특성에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에(이우진 등 2006; Clough 등 1981; Consoli 등 2000; Huang and Airey 1998; Ismail 등 2002a, b; Rotta 등 2003; Schnaid 등 2001; Christopher 등 1989), 이를 고려한 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 그림 1을 기본으로 고결시 구속압, 상대밀도, 그리고 입자특성이 다른 다양한 고결시료의 거동을 분석하고, 각각의 요인이 점착력과 고결결합 파괴응력에 주는 영향정도를 평가하였다.

2. 시험계획 및 방법

2.1 시료 기본특성

전술한 바와 같이, 본 논문은 고결시 상재구속압(σ_{sit}'), 상대밀도, 그리고 입자특성이 고결모래의 점착력과 고결결합 파괴구속압($p_i'(BP)$) 등의 강도특성에 미치는 영향에 대한 연구이며, 이를 위해 K-7호사, 부산사, 그리고 표준사인 주문진사를 대상으로 시험을 실시하였다. 세 모래의 입도분포와 기본물성은 그림 2 및 표 1과 같으며, 각 모래의 조도(roundness)는 그림 3과 같은 SEM 사

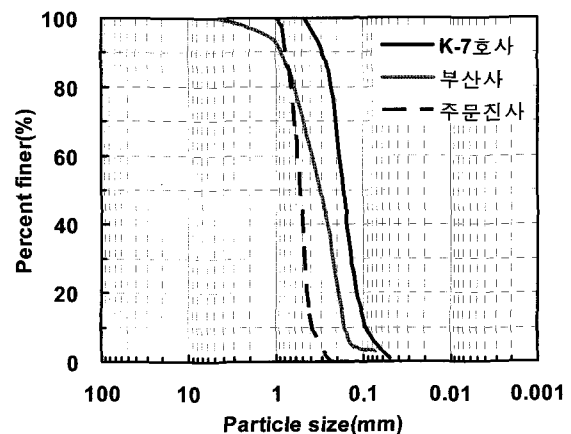
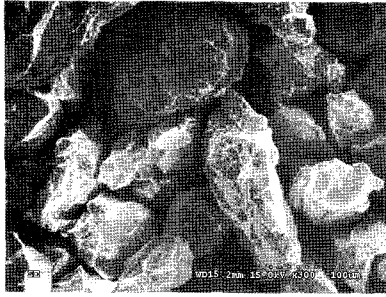
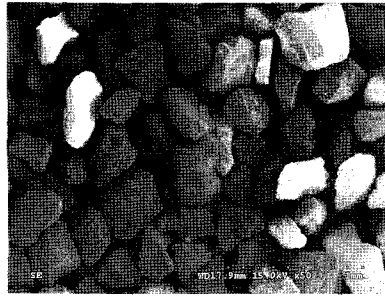


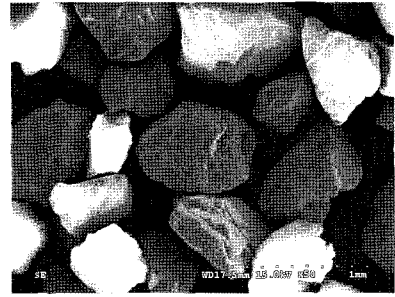
그림 2. 시험모래 입도분포



(a) K-7호사 (×300)



(b) 부산사 (×50)



(c) 주문진사 (×50)

그림 3. 모래시료 SEM 사진

진을 Youd(1973)의 방법으로 분석하여 결정되었다. K-7 호사는 모암인 규석으로부터 인공적으로 파쇄된 모래로써, 평균입경은 0.17mm이고 중간모난 정도의 조도를 갖는다. 부산사는 부산근해 육지도 남단 50km에서 준설된 해사로써, 부산 신항 건설부지의 매립지반에 사용된 모래와 동일하다. 부산사의 평균입경은 0.32mm이고, 조도는 모난~중간모난 정도이다. 주문진사의 평균입경은 0.52mm이고, 중간모난~중간둥근 정도의 조도를 갖는다. 각 모래의 XRF 성분분석 결과, SiO₂ 함유율이 높은 석영질 모래로 나타났으며, 부산사의 경우 다량의 패각으로 인해 CaCO₃ 성분이 약 7% 포함되어 있다.

고결시료의 조성을 위해 Clough 등(1981), Acar and El-Tahir(1986), Yun and Santamarina(2005), Haeri 등(2005a)은 포틀랜드 시멘트를, Coop and Atkinson(1993), Huang and Airey(1998), Haeri 등(2005b)은 석고를 고결유발제로 사용하였다. 또한 최근에 Ismail 등(2002 a, b), Sharma and Fahey(2003)은 CIPS 용액을 이용하여 고결된 모래에 대한 연구를 수행하였다. 특히 석고로 고결된 모래의 거동은 자연상태 고결모래의 거동과 유사하기 때문에(Ismail, 2002b) 본 연구에서는 석고를 고결유발제로 사용하였다. 사용된 석고는 도자기형재용 석고(GM-10)이며, 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합하여 습윤양생 할 경우 20MPa의 압축강도를 발현하고 양생시 팽창율은 0.03%이다.

2.2 시험계획

σ_{sit} 이 고결에 미치는 영향을 평가하기 위해 석고함유율(Cg) 5, 7, 10%인 K-7호사를 상대밀도 40%로 조성하고, σ_{sit} 이 50, 100, 200kPa인 상태에서 양생된 시료에 대한 배수전단시험을 실시하였다. 상대밀도가 고결에 미치는 영향을 평가하기 위해 5% 석고함유율인 K-7호사

표 2. 시험조건

모래	상대밀도 Dr (%)	석고함유율 Cg (%)	고결시 구속압 σ_{sit} (kPa)	압밀구속압 p_i (kPa)
K-7호사	40	5, 7, 10	50, 100, 200	10 ~ 400
	60, 80	5	200	10 ~ 200
부산사	40, 60, 80	5	200	10 ~ 200
	40	10	200	10 ~ 200
주문진사	40	10	200	10 ~ 200

와 부산사를 40, 60, 80%의 상대밀도로 조성하고, 200kPa 상재구속압에서 고결시킨 후 시험하였다. 또한 입자특성이 다른 세 종류의 모래를 동일한 상재구속압(200kPa), 상대밀도(40%), 석고함유율(모래중량비 10%)로 고결시킨 후, 각 시료별 강도특성을 비교하였다. 본 연구에서 실시한 시험조건은 표 2와 같다.

2.3 시료성형 및 시험

2.3.1 미고결 시료의 성형 및 시험

미고결 시료 및 고결시료의 조성방법은 이문주 등(2007), 이우진 등(2006)의 방법과 동일하다. 미고결 시료의 성형을 위해 삼축압축시험기에 멤브레인과 모래시료 조성용 원통형 몰드를 장착하고 건조 모래를 낙사시킨 후, 몰드를 대칭으로 두드려 원하는 상대밀도로 시료를 조성하였다. 조성된 시료의 직경은 약 70mm, 높이 약 153mm로써 시료의 정확한 직경과 높이는 15kPa의 부압으로 자립시킨 후 측정되었다. 시료의 포화를 위해 10kPa의 구속압이 가해진 상태에서 탄산수와 탈기수를 7kPa의 압력으로 500ml 통과시켰으며, 배압을 100kPa까지 증가시켜 간극수압계수(B)가 0.97 이상이 되도록 하였다. 시료 포화 후 50~200kPa의 유효등방구속압 상태에서 0.1%/min의 변형률 속도로 배수전단시험(CID)을 실시하였다.

2.3.2 고결시료의 성형 및 시험

건조상태로 혼합된 모래와 석고는 낙사시 입자의 낙하속도차로 인한 재료분리가 발생할 수 있으므로, 이를 최소화하기 위해 Puppala 등(1995)의 방법을 적용하여 함수비 0.5%에 해당하는 물을 모래와 충분히 교반시켜 석고입자를 모래표면에 부착시킨 후 낙사시켜 시료를 조성하였다. 시료를 직경 70mm의 몰드에 높이 150mm로 조성하고 50~200kPa의 상재구속압을 가한 뒤, 시료의 하부에서 10cm³/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 삼축압축시험기에 거치하고 미고결 모래와 동일한 조건에서 시료를 1차로 포화시킨 후, 배압을 증가시켜 포화도를 향상시켰다. 일반적으로 고결시료는 포화를 위해 일반 모래시료보다 더 큰 배압이 필요한 것으로 알려져 있다. Ismail 등(2002 a, b)은 배압을 1000kPa까지 증가시켜 0.95이상의 간극수압계수를 확보하였고, Asghari 등(2003)은 300~400kPa의 배압에서 0.90 이상의 간극수압계수를 측정하였다. 본 연구에서는 배압을 300~500kPa까지 증가시켜 0.93 이상의 간극수압계수를 확인한 후 시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 고결시 구속압에 따른 강도 평가

상대밀도 40%로 조성된 K-7호사의 σ_{sit}' 에 따른 파괴상태 응력은 그림 4와 같다. 고결모래의 파괴포락선은 일정 구속압 이전까지 미고결 모래의 파괴포락선과 거의 평행하였으며, 이 같은 경향은 고결이 모래의 마찰각에 영향을 주지 못하는 이전의 연구결과와 일치한다(Dupas and Pecker 1979; Clough 등 1981; Acar and El-Tahir 1986; Consoli 등 2000; Schnaid 등 2001). 그림 4에서 50~200kPa의 σ_{sit}' 이 석고함유율이 동일한 고결모래의 파괴포락선에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

전단시 압밀구속압(p_i')에 따른 점착력 변화를 그림 5와 같이 나타낸 결과, 각 고결모래의 고결결합 파괴구속압($p_i'(BP)$)과 점착력($c = \sigma_1 - \sigma_3$)은 σ_{sit}' 에 관계없이 유사하게 나타났다. 5% 고결모래의 경우, $p_i' = 30kPa$ 까지 점착력이 일정하게 유지되었으며, 40kPa 이상의 p_i' 에서 점착력이 급격히 감소하면서 전이구간이 시작되었다. 또한

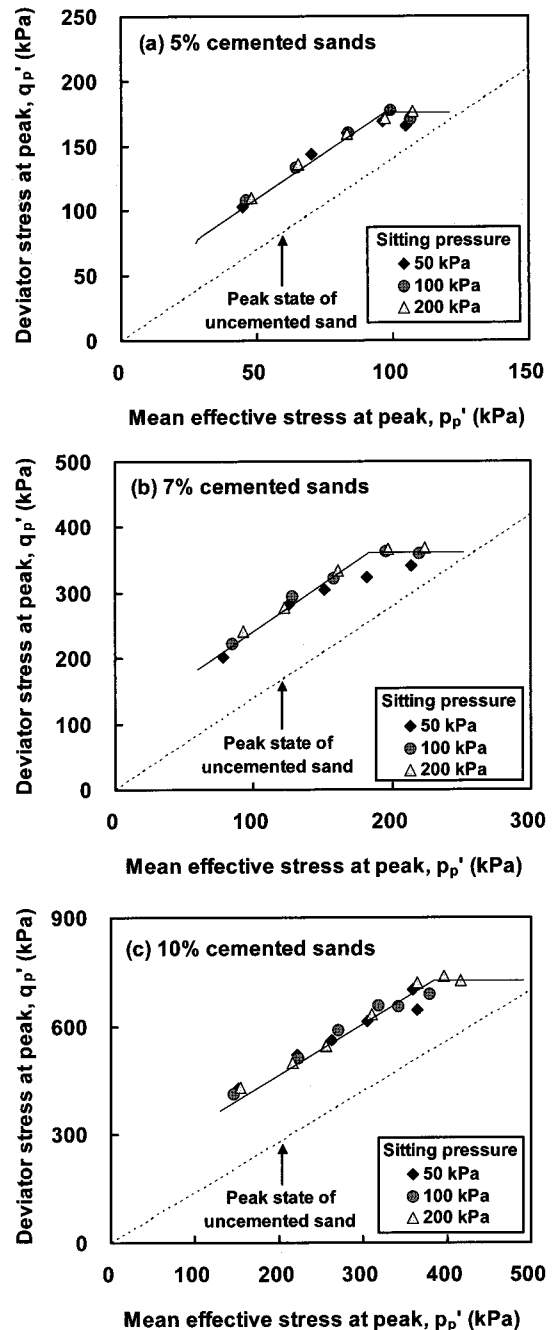


그림 4. 고결시 구속압(σ_{sit}')에 따른 파괴포락선 (K-7호사, $D_r = 40\%$)

7% 고결모래의 경우는 50kPa, 10% 고결모래의 경우는 125kPa에서 전이구간이 시작되었다.

표 3과 그림 6, 7은 $p_i'(BP)$ 이전에서 각 시험모래의 파괴상태로부터 결정된 마찰각과 고결결합에 의해 나타난 점착력이다. 고결모래의 마찰각은 미고결 모래의 마찰각(34.5°)을 기준으로 $-2.3^\circ \sim +2.9^\circ$ 범위에서 나타났으나, 석고함유율과 σ_{sit}' 의 변화에 대해 뚜렷한 경향은 없으며, 석고함유율이 증가할수록 $p_i'(BP)$ 이전까지의 마찰각의 편차는 감소하였다. 반면, 고결모래의 점착력은 석

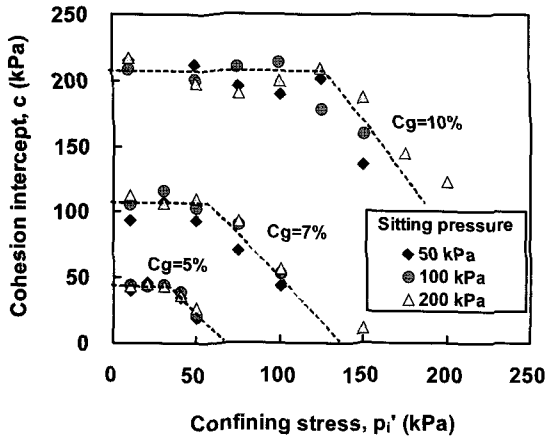


그림 5. 고결시 구속압(σ_{sit})과 입밀구속압에 따른 점착력 변화 (K-7호사, $D_r=40\%$)

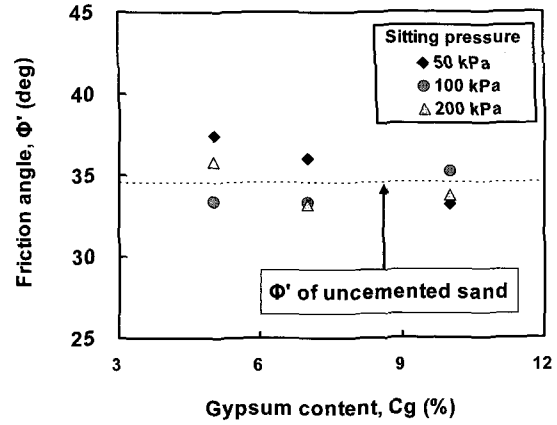


그림 6. 고결모래의 마찰각에 대한 고결시 구속압의 영향 (K-7호사, $D_r=40\%$)

표 3. 고결정도 및 구속압에 따른 강도정수 (K-7호사, $D_r=40\%$)

C_g (%)	σ_{sit} (kPa)	ϕ' (deg)	$c=\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)
5	50	37.4	43.2
	100	33.4	43.8
	200	35.8	43.8
7	50	36.0	97.9
	100	33.3	108.1
	200	33.2	109.4
10	50	33.2	202.8
	100	35.2	208.3
	200	33.7	202.8

고함유율이 증가함에 따라 증가하였으며, 동일 석고함유율에서의 점착력은 σ_{sit} 의 크기에 관계없이 평균의 $\pm 7\%$ 이내에서 비교적 일정하였다. 이와 같은 결과는 Consoli 등(2000)의 결과와 일치하며, 고결모래의 미소 변형 특성에 관한 연구로부터 각각 70, 415kPa의 연직 구속압에서 고결된 시료의 전단파속도 차이가 3% 이내에서 발생한 Fernandez and Santamarina(2001)의 결과와도 유사하다.

3.2 상대밀도에 따른 강도 평가

그림 8은 $\sigma_{sit} = 200\text{kPa}$ 에서 5% 석고함유율로 고결된 K-7호사와 부산사의 상대밀도에 따른 점착력 변화이다. 각 시험모래의 점착력은 $p'_{(BP)}$ 이전까지 비교적 일정하게 유지되었으며, 이는 그림 1의 거동이 다양한 상대밀도의 고결모래에 적용될 수 있음을 의미한다.

상대밀도에 따른 고결된 K-7호사와 부산사의 점착력과 $p'_{(BP)}$ 를 그림 9와 같이 나타내었다. K-7호사의 경우, 상대밀도 40% 시료의 $p'_{(BP)}$ 는 약 34kPa인 반면, 상대밀도

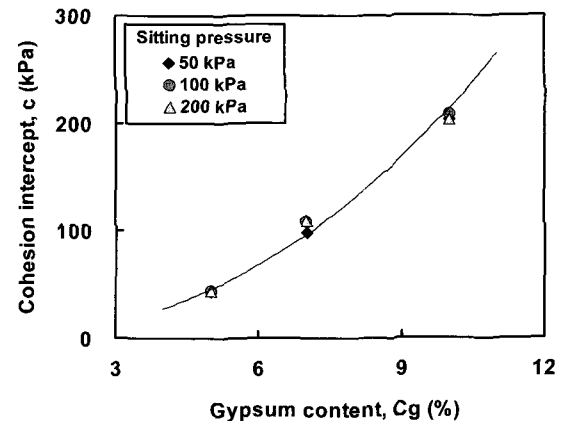


그림 7. 고결모래의 점착력에 대한 고결시 구속압의 영향 (K-7호사, $D_r=40\%$)

도 60%와 80% 고결모래의 $p'_{(BP)}$ 는 51, 53kPa로 유사하였다. 또한 상대밀도 40% 고결시료의 점착력은 약 43kPa이고, 상대밀도 60%, 80% 시료의 점착력은 49kPa, 53kPa로 관찰되었다. 부산사의 경우, 상대밀도 40, 60, 80%에서 $p'_{(BP)}$ 는 24, 31, 33kPa, 점착력은 29, 32, 35kPa로 관찰되어, 시료에 관계없이 상대밀도가 높아질수록 점착력과 $p'_{(BP)}$ 가 증가하였다. Ismail 등(2002b)에 의하면 시료의 상대밀도가 높을수록 입자의 접촉점이 증가하기 때문에 고결 유발물질이 더 효율적으로 흡착되어 고결 효과가 증가한다. 본 연구에서도 동일 석고함유율에서 고결시료의 상대밀도가 높을수록 파괴강도, 점착력, $p'_{(BP)}$ 등의 강도특성이 향상되었다. 특히 비교적 낮은 상대밀도 구간(40~60%)에서의 상대밀도 증가가 시료의 $p'_{(BP)}$ 에 큰 영향을 주었으며, 부산사보다 입자크기가 작은 K-7호사에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그림 10과 같이 상대밀도와 구속압에 따라 고결된 K-7호사의 점착력을 나타내었다. 모든 시료에서 구속압

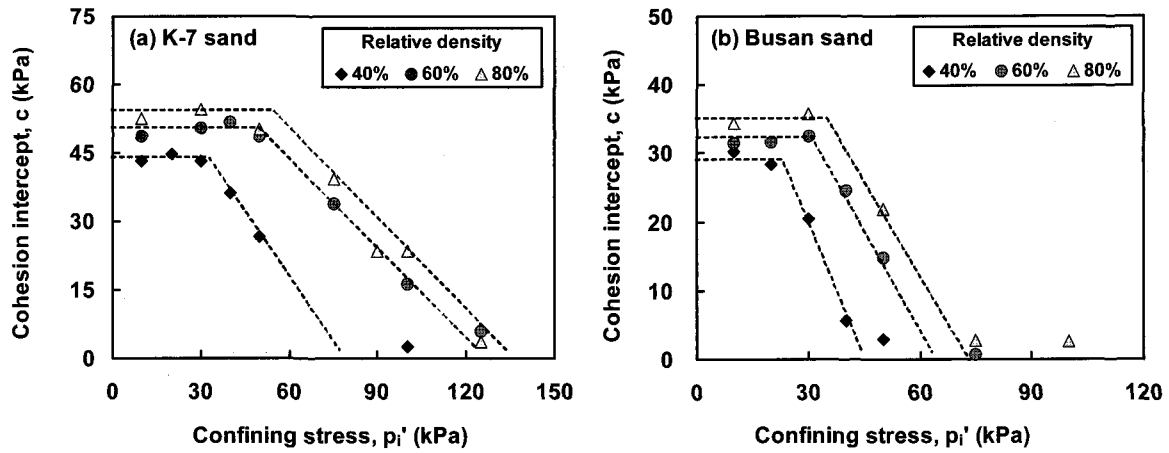


그림 8. 상대밀도와 구속압에 따른 점착력 변화 ($C_g=5\%$, $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$)

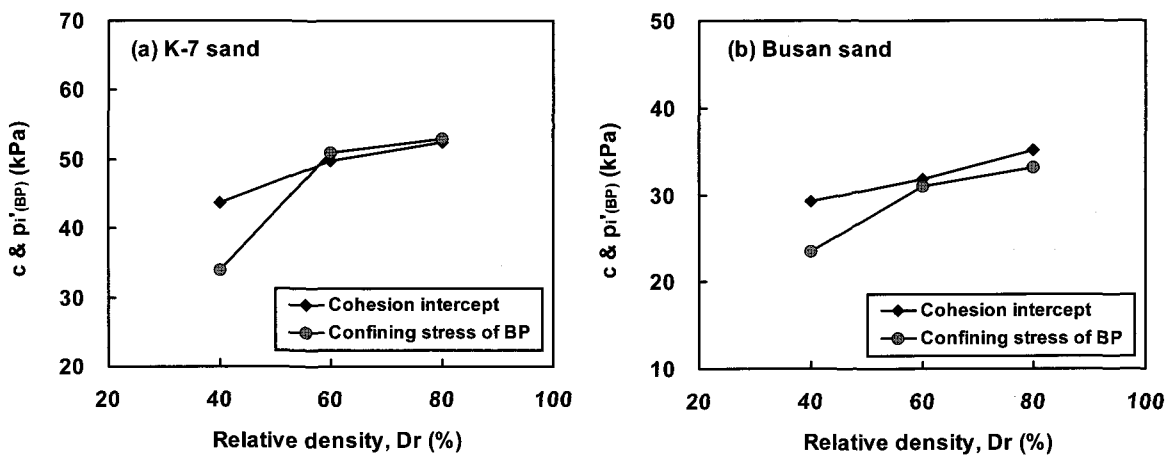


그림 9. 상대밀도에 따른 점착력 및 $p'_{i(BP)}$ 변화 ($C_g=5\%$, $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$)

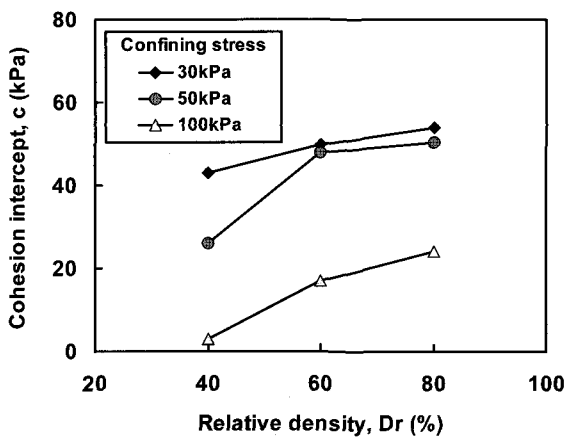


그림 10. 상대밀도 및 구속압이 고결에 미치는 영향정도 (K-7호사, $C_g=5\%$, $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$)

30kPa은 $p'_{i(BP)}$ 이전인 고결지배구간에 해당되고, 상대 밀도에 따라 점착력이 다소 증가하였으나, 고결결합이 파괴되기 이전상태에서 상대밀도가 고결모래의 점착력에 미치는 영향은 적었다. 반면, 구속압 50kPa에서 상대 밀도 60, 80%인 고결시료의 점착력은 유사한 반면, 40%

상대밀도 시료의 점착력은 크게 감소하였다. 즉, 상대밀도의 증가는 고결모래의 점착력보다는 $p'_{i(BP)}$ 에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.

3.3 입자특성에 따른 강도 평가

모래의 고결에 영향을 미치는 입자특성으로는 입자 강도, 입자크기 및 분포, 입자거칠기 등이 있다. 일반적으로 모암의 강도가 큰 석영질모래가 석회질모래(calcareous sand)보다 고결시 강도가 크며, 입자크기가 작고 입도분포가 고르며, 입자가 각진모양이고 표면이 거칠수록 고결효과가 더 크게 발휘되는 것으로 알려져 있다(Ismael 2000; Ismail 등 2002b; Christopher 등 1989). 그러나 자연시료의 경우 입자특성이 매우 다양하기 때문에, 상대 밀도, 석고함유율, 구속압 등의 영향요인과는 달리 입자 특성이 고결에 미치는 영향에 대한 매개변수분석은 매우 난이하다. 본 연구에서 사용된 세 모래시료의 경우에

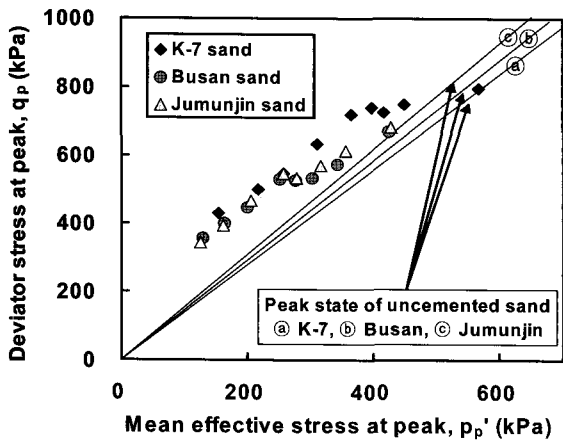


그림 11. 시료별 파괴포락선 ($D_r=40\%$, $C_g=10\%$, $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$)

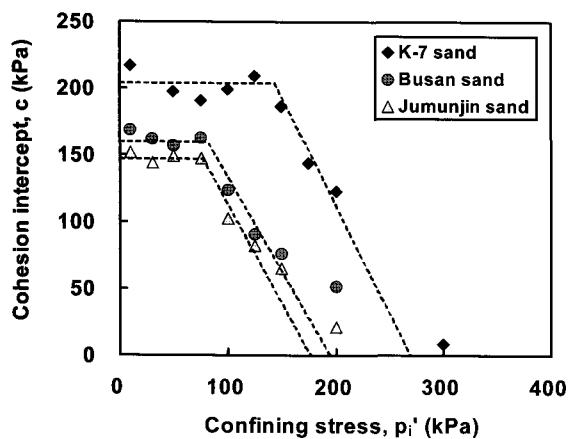


그림 12. 구속압에 따른 시료별 점착력 변화 ($D_r=40\%$, $C_g=10\%$, $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$)

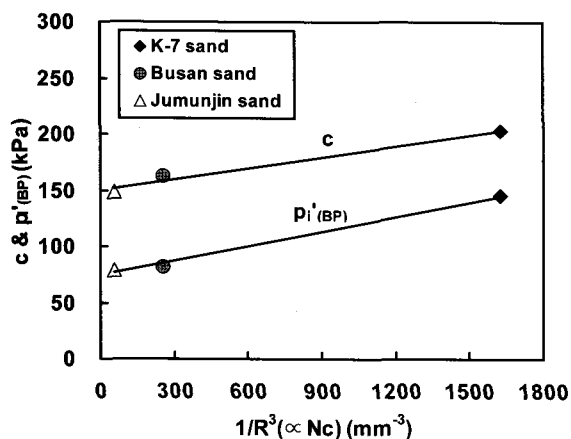


그림 13. 시료 접촉점(N_c)과 점착력 및 $p_i'(BP)$ 관계 ($D_r=40\%$, $C_g=10\%$, $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$)

도, 모두 통일분류법상 SP에 해당하는 석영질 모래이나, SiO_2 함유율이 모두 다를 뿐만 아니라, 서로 다른 Cu값을 가지며, 입자 크기 및 모양도 동일하지 않다. 따라서 본 연구에서는 여타의 조건은 제외하고 입자크기가 점착력과 $p_i'(BP)$ 에 미치는 영향만을 검토하였다.

그림 11은 상대밀도 40% 상태에서 석고함유율 10%로 고결된 각 시험모래의 파괴상태 응력으로써, 부산사와 주문진사는 유사한 경향을 보이는 반면, K-7호사의 파괴상태 응력은 다소 크게 나타났다. 또한 그림 12는 구속압에 따른 각 시험모래의 점착력 변화로써, 각 시료가 동일한 조건에서 고결되었음에도 불구하고 점착력과 $p_i'(BP)$ 이 다르게 결정되었다. K-7호사의 점착력은 약 203kPa이고, 부산사와 주문진사는 각각 163kPa, 150kPa 정도이며, $p_i'(BP)$ 의 경우, K-7호사, 부산사, 주문진사가 각각 145kPa, 85kPa, 79kPa로 결정되었다. 시험모래의 입자크기가 작을수록 점착력과 $p_i'(BP)$ 가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 모래입자의 크기가 작을수록 입자간 접촉점이 증가할 뿐만 아니라, 모래의 비표면적이 증가하여 고결유발제의 침전이 더 효과적으로 발생하기 때문이다(Ismael 2000; Ismail 등 2002b; Christopher 등 1989).

일반적으로 입자의 반경(R)과 시료 접촉점(N_c)은 $N_c \propto (1/R^3)$ 의 관계를 가지므로, $1/R^3$ 에 대한 각 시험모래의 점착력과 $p_i'(BP)$ 를 그림 13과 같이 나타낼 경우, 고결모래의 점착력과 $p_i'(BP)$ 는 시료 접촉점에 따라 비교적 선형관계로 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 상재구속압과 석고함유율을 달리하여 다양한 고결모래에 대한 배수전단시험을 수행하였으며, 고결시 상재구속압(σ_{sit}'), 상대밀도, 그리고 입자특성이 고결모래의 점착력과 고결결합 파괴구속압($p_i'(BP)$)에 미치는 영향을 분석하였다. 시험결과 각 고결모래의 점착력 변화는 석고함유율, 시료의 상대밀도, σ_{sit}' , 그리고 시료특성 등에 관계없이 이문주 등(2007)이 제시한 거동과 유사한 것으로 확인되었다.

본 연구에서 50~200kPa의 σ_{sit}' 이 고결모래의 거동에 미치는 영향은 고결정도나 상대밀도에 비해 상당히 작으며, 고결된 모래의 파괴강도와 점착력, 그리고 $p_i'(BP)$ 는 서로 다른 σ_{sit}' 에서 고결되었음에도 거의 유사하게 결정되었다. 또한 시료의 상대밀도가 클수록 고결모래의 파괴강도와 점착력, 그리고 $p_i'(BP)$ 가 증가하는 것으로 나타났다. 이때 비교적 낮은 상대밀도 구간에서 고결의 영향이 더 크게 발휘되었고, 상대밀도는 점착력보다 $p_i'(BP)$ 에 좀 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 사용된 각 시험모래의 강도특성은 동일한 상

대밀도와 석고함유율에서도 다르게 결정되었으며, 시료의 크기가 작을수록 점착력과 $p'_i(BP)$ 가 크게 나타났다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진 (2007), “응력조건에 따른 고결모래의 강도정수 평가”, *한국지반공학회논문집*, Vol.23, No.5, pp.143-151.
2. 이우진, 이문주, 최성근, 홍성진 (2006), “고결(Cementation)에 따른 모래의 비배수 전단거동 변화”, *한국지반공학회논문집*, Vol.22, No.4, pp.85-94.
3. Acar, Y.B. and El-Tahir, A.E. (1986), “Low strain dynamic properties of artificially cemented sand”, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1001-1015.
4. 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.
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., Sitar N., and Bachus R. (1981), “Cemented sands under static loading”, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.799-817.
7. 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.
8. Coop, M.R. and Atkinson, J.H. (1993), “The mechanics of cemented carbonate sands”, *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
9. Dupas, J. and Pecker, A. (1979), “Static and dynamic properties of sand-cement”, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.105, No.3, pp.419-436.
10. Fernandez, A.L. and Santamarina, J.C. (2001), “Effect of cementation on the small-strain parameters of sands”, *Can. Geotech. J.*,

- Vol.38, pp.191-199.
11. Haeri, S.M., Hosseini, S.M., Toll, D.G. and Yasrebi, S.S. (2005a), “The behaviour of an artificially cemented sandy gravel”, *Geotech. Geological Engrg.*, Vol.23, pp.537-560.
12. Haeri, S.M., Hamidi, A. and Tabatabaee, N. (2005b), “The effect of gypsum cementation on the mechanical behavior of gravely sands”, *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol.28, No.4, 1-11.
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. 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.
18. 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.
19. Saxena, S.K. and Lastrico, R.M. (1978), “Static properties of lightly cemented sands”, *Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.104, No.12, pp.1449-1464.
20. 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.
21. Sharma, S.S. and Fahey, M. (2003), “Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests”, *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.129, No.7, pp.619-629.
22. Youd, T.L. (1973), “Factors controlling maximum and minimum densities of sands”, *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils (STP 523)*, ASTM, Philadelphia, pp.98-122.
23. Yun, T.S. and Santamarina, J.C. (2005), “Decementation, softening, and collapse : changes in small-strain shear stiffness in k_0 loading”, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.131, No.3, pp.350-358.

(접수일자 2007. 10. 2, 심사완료일 2007. 12. 17)