

## 고결모래의 강도정수와 일축압축강도 관계

### Relation of the Strength Parameter and the Unconfined Compressive Strength in Cemented Sand

이문주<sup>1)</sup>, Moon-Joo Lee, 최성근<sup>1)</sup>, Sung-Kun Choi, 조용순<sup>2)</sup>, Yong-Soon Cho, 이우진<sup>3)</sup>, Woojin Lee

<sup>1)</sup>고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 박사과정, PhD Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.

<sup>2)</sup>고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.

<sup>3)</sup>고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 부교수, Associate professor, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.

**SYNOPSIS** : In this study, a series of CID tests were performed on gypsum-cemented specimens to determine the cohesion intercept and the confined stress start to break the cementation bonds ( $q_{i'(BP)}$ ). And the relationships between the unconfined compressive strength ( $q_{ucs}$ ) and cohesion intercept or  $q_{i'(BP)}$  were investigated. From the experiments, it was concluded that the friction angle of cemented sands is not affected by cementation while the cohesion intercept of cemented sands significantly influenced by cementation and is constant before  $q_{i'(BP)}$ . By an analytical interpretation, the failure strength of cemented specimen could be represented by summation of the failure strength of uncemented specimen and the unconfined compressive strength of cemented one. And the cohesion intercept of cemented specimen was represented as a linear relation with the unconfined compressive strength. Those analytical values of failure strength and cohesion intercept almost coincided with the experimental values of those. In addition, the  $q_{i'(BP)}$  also could be related with unconfined compressive strength linearly.

**Key words** : cementation, cohesion intercept, breaking point, unconfined compressive strength, analytical interpretation

## 1. 서론

대부분의 퇴적지반은 입자의 표면이나 입자간 접촉점에 고결 유발물질이 침전하여 어느 정도의 고결이 발생하는 것으로 알려지고 있다. 고결(cementation)은 흙의 액상화에 대한 저항력을 향상시킬 뿐만 아니라, 미소변형 강성을 증가시키며, 기초의 침하량과 지지력에도 큰 영향을 미치기 때문에, 고결지반의 설계 지반정수는 주의 깊게 결정되어야 한다. 특히 구속압이 상대적으로 작을수록 고결효과가 더욱 효율적으로 나타나기 때문에 지표부근의 토목구조물의 안정성에 고결이 미치는 영향은 중요하게 평가되어야 한다(Puppala 등, 1995; Haeri 등, 2005).

대부분의 고결에 대한 연구는 포틀랜드 시멘트, 석고, 탄산염 등을 사용하여 인위적으로 고결을 유발시켜 고결에 영향을 주는 요인에 대한 매개변수분석 위주로 진행되었다. 이로부터 고결모래의 거동은 고결정도, 상대밀도, 응력조건, 입자특성 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Asghari 등 2003; Haeri 등 2005; Clough 등 1981; Consoli 등 2000; Huang and Airey 1998; Ismail 등 2002; Rotta 등 2003; Schnaid

등 2001; Zhu 등 1995). Saxena and Lastrico (1978)에 의하면 고결모래의 거동은 고결결합이 파괴되기 전까지 점착력에 의해 지배되지만, 고결결합 파괴 후에는 마찰성분에 의해 지배되므로, 고결모래의 설계 강도정수는 고결결합의 파괴 유무와 결합에 의한 점착력 증가를 고려하여 결정되어야 한다.

본 연구에서는 다양한 구속압과 고결정도의 시료에 대한 삼축압축시험을 수행하여, 고결시료의 점착력과 고결결합이 파괴되는 구속압을 결정하였다. 또한 강도정수들과 일축압축강도의 관계를 분석하고, 실험적으로 검증하였다.

## 2. 고결모래의 거동 연구

Clough 등 (1981)은 자연상태 고결시료에 대한 응력-변형률 거동으로부터, 고결모래의 거동은 고결정도, 구속압, 상대밀도, 입자분포 및 모양, 입자배열 등의 영향요인에 의해 지배됨을 분석하였다. 또한 Airey (1993)은 자연상태 탄산염 고결모래를 이용한 연구로부터, 고결은 흙의 전단강도를 증가시키고 항복 궤적(yield locus)을 확장시키지만, 체적변형계수에 미치는 영향은 미비함을 보였다. 그러나 일반적으로 고결결합이 파괴되지 않은 불교란된 자연상태 고결시료를 다량으로 획득하는 것은 매우 난이하기 때문에, 대부분의 고결에 대한 연구는 다음과 같이 인위적으로 조성된 고결시료를 이용하여 수행되어져 왔다.

Coop and Atkinson (1993)은 석고로 고결시킨 탄산염 모래에 대한 삼축압축시험을 수행하여, 구속압과 고결결합 강도의 상대적인 크기에 따른 고결모래의 응력-변형률 거동을 설명할 수 있는 모델을 제안하였으며, Huang and Airey (1998)는 석고로 고결된 시료에 대해 등방, 비등방 삼축압축시험을 수행하여, 선행압밀하중 이전의 구속압에서 고결에 의해 강성과 전단강도, 그리고 항복궤적의 크기가 증가함을 확인하였다. 또한 Schnaid 등 (2001)은 포틀랜드 시멘트로 고결된 시료에 대한 일축압축시험과 배수 삼축압축시험을 통해 일축압축강도와 미고결 모래의 마찰각의 향으로 고결모래의 전단강도를 표현하였다. 최근에 Ismail 등 (2002)은 CIPS 용액으로 고결시킨 탄산염 모래에 대한 비배수 삼축압축시험을 통해 입자의 강도, 상대밀도, 입자크기 및 모양, 그리고 입자표면의 거칠기 등이 고결에 영향을 주는 것을 확인하였으며, Asghari 등 (2003)은 수화석회로 고결된 시료로부터 구속압이 증가할수록 고결효과는 감소하고, 고결모래의 파괴포락선은 비선형으로 증가함을 보였다. 또한 Consoli 등 (2007)은 고결모래의 강도에 시멘트함유율, 간극비, 그리고 함수비가 미치는 영향에 대해 검토하였으며, 간극비와 시멘트함유율의 비율로 고결모래의 일축압축강도를 평가하였다.

## 3. 시료조성 및 시험

### 3.1 시료 기본물성

본 연구의 수행을 위해 규암을 인공적으로 파쇄하여 형성된 crushed sand인 K-7호사와 부산원해 육지도 남단에서 채취된 부산사를 사용하였다. 각 모래의 기본물성은 표 1과 같으며, 입도분포는 그림 1과 같다. 두 시료는 모두 통일분류법상 SP로 구분되며, SiO<sub>2</sub> 함유량이 지배적인 석영질 모래이다. 또한 K-7호사의 조도는 중간 모난 정도이며, 부산사의 조도는 각각 모난 ~ 중간 모난 정도이다.

표 1. 모래 기본물성

모래	Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	Cu	Cc	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	USCS	% SiO <sub>2</sub>
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

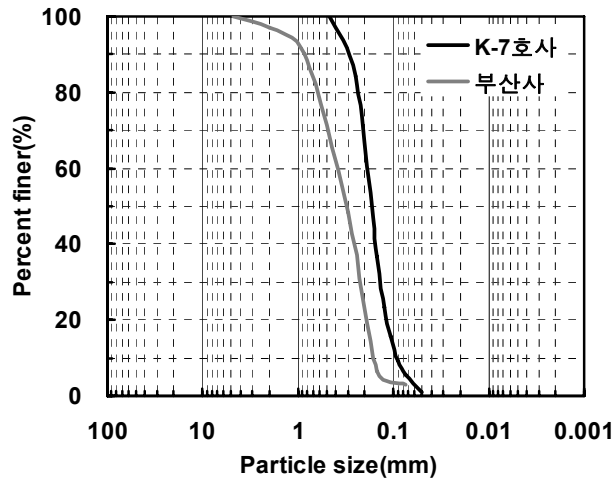


그림 1. 시험모래 입도분포

### 3.2 고결유발제

시료의 인위적인 고결을 위하여, 포틀랜드 시멘트 (Clough 등 1981, Acar and El-Tahir 1986, Yun and Sansamarina 2005), 석고 (Coop and Atkinson 1993, Huang and Airey 1998)등이 고결유발제로 사용되었고, Ismail 등 (2002), Sharma and Fahey (2003)은 미고결 시료에 CIPS 용액을 주입시켜 고결을 유발하기도 하였다. Ismail 등 (2002b)에 의하면 석고로 고결된 모래의 거동은 자연상태 고결모래의 거동과 유사하게 나타나기 때문에, 본 연구에서는 석고를 고결유발제로 결정하였다. 고결유발제로써 모래와 혼합되는 석고는 도자기형재용 석고(GM-10)로써 물-석고비(표준혼수량) 40%로 습윤상태에서 양생될 경우 20MPa의 압축강도를 발현한다. 본 석고는 양생시 팽창율은 보통의 석고보다 작은 0.03% 정도이다.

### 3.3 시료조성 및 시험

#### 3.2.1 미고결 모래시료의 조성 및 시험

미고결 시료의 성형을 위해 삼축압축시험기에 멤브레인과 모래시료 조성용 원통형 몰드를 장착하고 건조 모래를 낙하시킨 후, 몰드를 대칭으로 두드려 원하는 상대밀도로 시료를 조성하였다. 조성된 시료의 직경은 약 70mm, 높이 약 153mm로써 시료의 정확한 직경과 높이는 10kPa의 부압으로 자립시킨 후 측정되었다. 시료의 포화를 위해 10kPa의 구속압이 가해진 상태에서 탄산수와 탈기수를 10kPa의 압력으로 각각 500ml 통과시켰으며, 배압을 100kPa까지 증가시켜 간극수압계수(B)가 0.97 이상이 되도록 하였다. 시료 포화 후 50~400kPa의 유효등방구속압 상태에서 0.1%/min의 변형율 속도로 배수전단시험(CID)을 실시하였다.

#### 3.2.2 미고결 모래시료의 조성 및 시험

낙하시 건조상태로 혼합된 모래와 석고의 재료분리를 방지하기 위해 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 몰드

를 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)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.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 구속압에 따른 고결모래의 강도정수 변화

그림 2는 고결된 K-7호사와 부산사의 파괴시 축차응력으로써, 시료의 고결정도에 비해 구속압이 상대적으로 작게 작용될 경우, 고결모래의 파괴강도는 동일 평균유효응력 상태의 미고결 모래보다 높게 나타난다. 또한 고결모래의 파괴포락선은 미고결 모래의 파괴포락선과 거의 평행하였다. 즉, 고결모래는 고결결합에 의해 미고결 모래에 존재하지 않은 점착력이 나타나며, 고결모래의 내부마찰각은 고결정도에 관계없이 미고결 모래의 내부마찰각과 동일하게 결정된다. 그러나 높은 압밀구속압에 의해 전단 이전에 고결결합이 파괴될 경우, 고결모래의 전단강도는 미고결 모래의 전단강도와 유사하게 나타난다. 고결모래의 점착력은 동일한 평균유효응력에서 고결모래와 미고결모래의 차이로부터 식 1과 같이 결정된다.

$$c' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \quad (1)$$

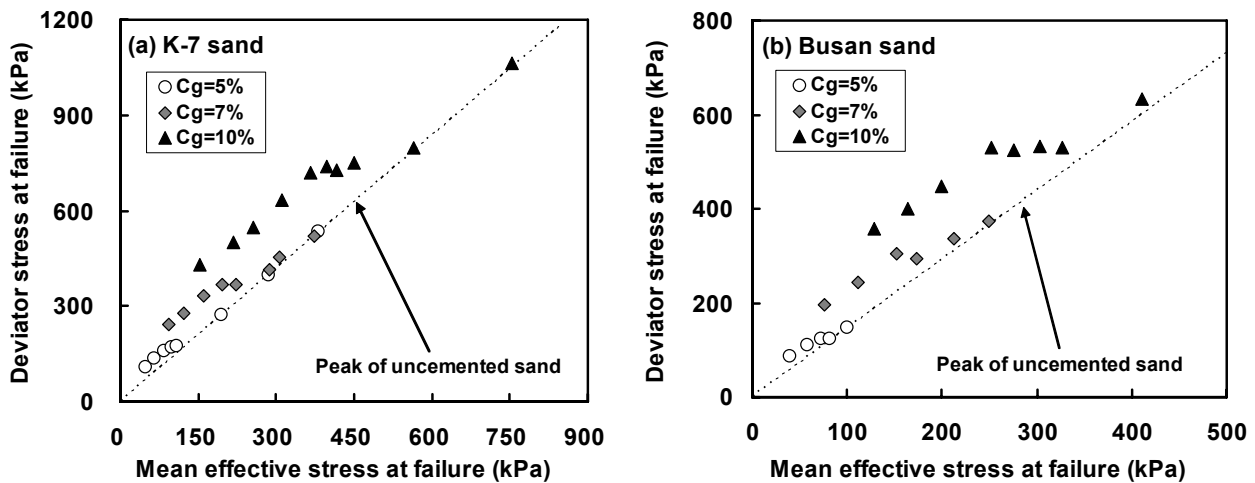


그림 2. 고결된 K-7호사와 부산사의 파괴포락선 ( $D_r=40\%$ ,  $\sigma_{sit}'=200\text{kPa}$ )

그림 3은 구속압에 따른 고결된 K-7호사의 점착력의 변화로써, 고결결합력에 비해 상대적으로 낮은 구속압에서는 거의 일정한 점착력이 나타나지만, 고결결합이 파괴된 직후의 점착력은 급격히 감소하기 시작한다. 본 연구에서는 이 구속압을 BP(breaking point)로 나타내었으며, 시료의 석고함유율이 높을수록 점착력과 BP 또한 증가한다.

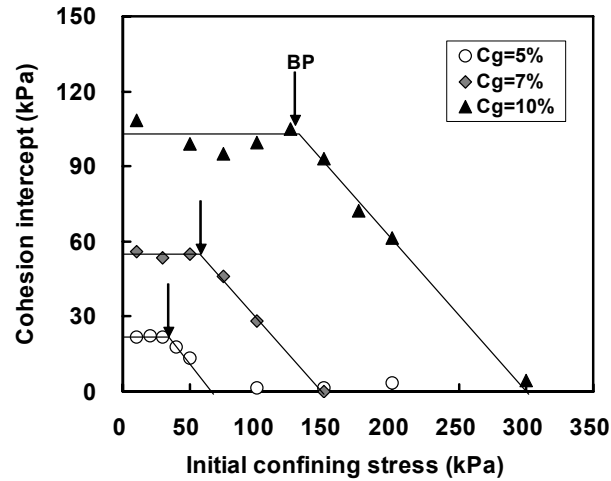


그림 3. 고결된 K-7호사의 점착력 변화

## 4.2 고결모래의 강도정수 분석

### 4.2.1 고결모래의 파괴강도

실험결과로부터, 고결모래의 파괴포락선은 고결결합이 파괴되기 전까지 선형으로 증가하며, 고결모래는 미고결 모래와 동일한 마찰각을 가진다고 가정할 수 있다. 이와 같은 가정하에서 배수상태에서 고결모래의 응력경로는 그림 4와 같이 이상적으로 표현할 수 있다. 그림 4에서 초기 구속압  $p_i'$ 에서 미고결모래의 파괴강도  $q_{f(us)}$ 는 식 2와 같이 마찰각과 초기 구속압의 함수로 표현된다.

$$q_{f(us)} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p_i' \quad (2)$$

또한 초기 구속압  $p_i'$  상태에서 고결모래의 파괴강도는 미고결 모래의 파괴강도와 고결모래의 일축압축강도( $q_{ucs}$ )의 합으로써 식 3과 같이 나타내어진다.

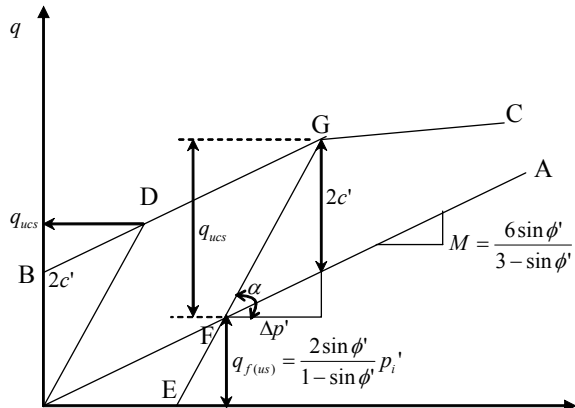
$$q_f = q_{f(us)} + q_{ucs} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p_i' + q_{ucs} \quad (3)$$

그림 4로부터 결정되는 식 4와 식 5를 조합함으로써, 식 6과 같이 고결모래의 점착력은 일축압축강도로 표현될 수 있다. 즉, 고결모래의 점착력은 마찰각과 일축압축강도의 함수로 표현되며, 동일한 고결시료의 점착력은 일축압축강도와 선형관계로 나타난다. 따라서 고결모래의 일축압축강도는 고결정도를 평가하기 위한 적절한 변수로 결정될 수 있다.

$$\tan\alpha = \frac{q_{ucs}}{\Delta p'} = 3 \quad (4)$$

$$M = \frac{q_{ucs} - 2c'}{\Delta p'} \quad (5)$$

$$c' = \frac{3-M}{6} q_{ucs} = \frac{3(1-\sin\phi')}{2(3-\sin\phi')} q_{ucs} \quad (6)$$



- OA : 미고결 모래의 파괴포락선
- BGC : 고결 모래의 파괴포락선
- OD : 비구속상태의 고결모래의 응력경로
- EF : 초기 구속압  $p_i'$ 에서 미고결 모래의 응력경로
- EG : 초기 구속압  $p_i'$ 에서 고결 모래의 응력경로

그림 4. 고결모래의 이상적인 응력경로

#### 4.2.2 일축압축강도와 강도정수의 관계 평가

고결모래의 일축압축강도와 삼축압축강도를 측정된 이전의 연구결과(Clough 등 1981, Acar and El-Tahir 1986, O'Rourke and Crespo 1988, Schnaid et al. 2001)를 조합하여, 각종 고결모래의 점착력을 결정하였다. 이전의 연구결과에서는 고결시료의 전단시 가해지는 구속압의 간격이 넓고 불규칙하여 고결 결합 파괴 구속압을 결정하기는 매우 부적절하지만, 점착력은 상대적으로 낮은 구속압에서 비교적 정확한 추정이 가능하였다. 기존의 연구와 본 연구의 결과를 조합하여 식 3에 의해 추정된 고결모래의 파괴강도와 실험에서 측정된 파괴강도를 그림 5와 같이 비교하였다. 그림 5에서 고결모래의 파괴강도는 식 3에 의해 측정된 파괴강도의 96% 정도에서 결정되었다. 또한 식 7과 같이 결정계수 0.99 이상의 상관관계로 좀 더 정확하게 고결모래의 파괴시 축차응력을 추정할 수 있었다. 이 같은 결과는 해석적으로 추정된 고결모래의 파괴강도가 실험적에 의한 측정값과 상당히 일치함을 보여준다.

$$q_f = \frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} p_i' + 1.08 q_{ucs} \quad (7)$$

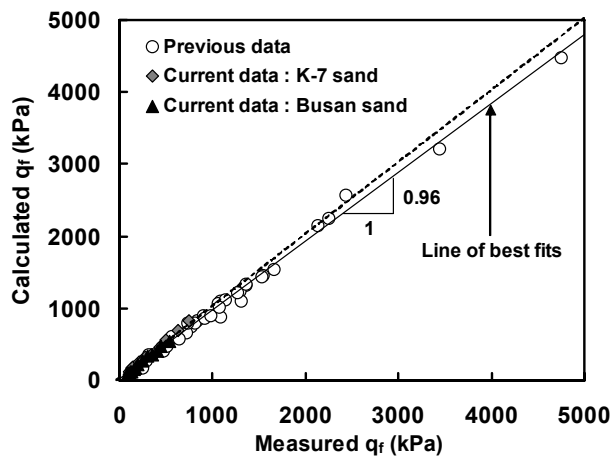


그림 5. 고결모래의 파괴강도 비교

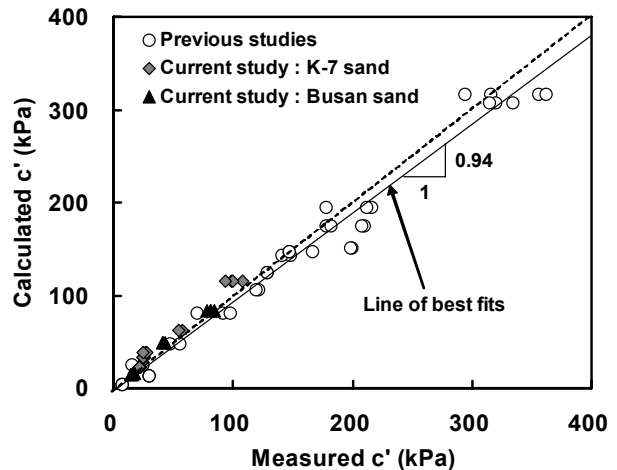


그림 6. 고결모래의 점착력 비교

또한 실험에 의해 결정된 고결모래의 점착력과 식 6에 의해 해석적으로 결정된 점착력을 그림 6과 같이 비교하였으며, 실험에서의 측정값은 추정값보다 6% 정도 과소평가되었으나, 고결모래의 점착력도 해

석적 방법과 실험적 방법이 매우 일치된 결과를 보였다. 고결모래의 점착력은 고결유발제의 종류나 함유율, 그리고 입자특성 등의 다양한 요인에 의해 영향을 받음에도 불구하고 일축압축강도의 0.22~0.28배 정도의 범위에서 나타났으며, 기존의 연구결과와 본 연구의 K-7호사와 부산사의 결과를 조합한 결과, 점착력과 일축압축강도는  $c'=0.265q_{ucs}$ 의 관계로 결정되었다( $R^2=0.98$ ).

이전의 시험결과에서는 고결결합의 파괴구속압을 정확히 결정할 수 없기 때문에, 본 연구의 K-7호사와 부산사의 시험결과로부터 일축압축강도와 고결결합 파괴구속압의 관계를 추정하였다. 그림 7은 일축압축강도와 고결결합 파괴구속압의 관계로써, 비교적 선형의 관계로 식 8과 같이 결정되었다.

$$p_i'(BP) = kq_{ucs} \quad (8)$$

이 때, 결정계수 0.932의 높은 상관관계로  $k=0.307$ 로 결정되었다. 그러나 점착력과 일축압축강도의 관계와는 달리 그림 7과 식 8의 관계는 해석적 방법에 근거하지 않으며, 사용된 데이터의 양도 적기 때문에 다양한 모래시료를 이용한 좀 더 많은 연구를 통해 보완되어야 할 필요가 있다.

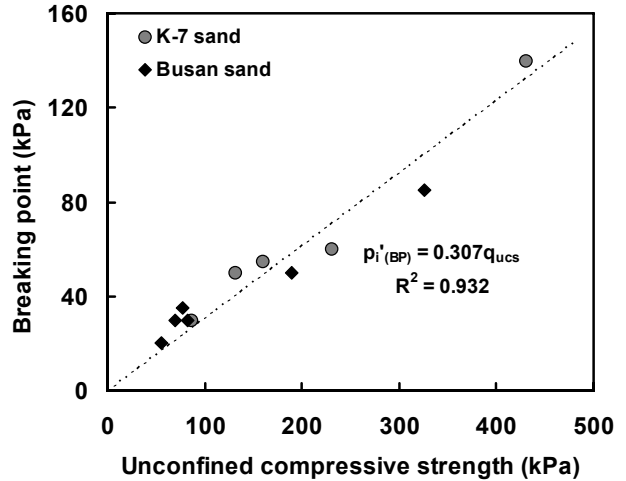


그림 7. 고결모래의 일축압축강도와 파괴구속압 관계

## 5. 결론

본 연구에서는 삼축압축시험으로부터 고결시료의 점착력과 고결결합이 파괴되는 구속압을 결정하고, 일축압축강도와 관계의 평가를 하였다.

다양한 고결정도와 구속압에 따른 고결모래의 전단거동으로부터, 고결모래는 고결결합력에 의한 점착력이 나타나며, 고결모래의 내부마찰각은 고결정도에 관계없이 미고결 모래의 내부마찰각과 동일하게 평가되었다. 또한 고결결합력에 비해 상대적으로 낮은 구속압에서는 점착력이 거의 일정하며, 고결결합 파괴구속압인  $p_i'(BP)$  이후의 점착력은 급격히 감소하였다. 고결모래의 파괴강도는 미고결 모래의 파괴강도와 고결모래의 일축압축강도의 합으로 표현될 수 있었으며, 고결모래의 점착력은 마찰각과 일축압축강도의 향으로 표현되었다. 이와 같이 표현된 고결모래의 파괴강도와 점착력은 실험에 의해 측정된 값과 매우 일치된 결과를 보였다. 또한 실험결과로부터 일축압축강도와 고결결합 파괴구속압은 비교적 선형의 관계로 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 (207), “응력조건에 따른 고결모래의 강도정수 평가”, **한국지반공학회논문집**, 제 23권, 5호, pp. 143~151.
2. Acar, Y.B. and El-Tahir, E.A. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand", *J. of Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1001~1015.

3. Airey, D.W. (1993), "Triaxial testing on naturally cemented carbonate soil", *J. of Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.9, pp.1379~1398.
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. 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.
6. Coop, M.R. and Atkinson, J.H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53~67.
7. Consoli, N. C., Foppa, D, Festugato, L. and Heineck, K. S. (2007), "Key parameters for strength control of artificially cemented soils", *J. of Geotech. Geoenvir. Engrg.*, ASCE, Vol.133, No.2, pp.197~205.
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. Frydman, S., Hendron, D., Horn, H., Steinbach, J., Baker, R. and Shaal, B. (1980), "Liquefaction study of cemented sand", *J. of Geotech. Engrg.*, Vol.106, No.3, pp.275~297.
10. 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.
11. 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.
12. Ismail, M.A., Joer, H.A., and Randolph, M.F. (2002), "Cementation of porous materials using calcite", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.313~324.
13. O'Rourke, T.D. and Crespo, E. (1988), "Geotechnical properties of cemented volcanic soil", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1126~1147.
14. 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.
15. 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.
16. Saxena, S.K. and Lastrico, R.M. (1978), "Static properties of lightly cemented sands", *Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.104, No.12, pp.1449~1464.
17. 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.
18. Sharma, S. S. and Fahey, M. (2003), "Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests", *J. of Geotech. Geoenvir. Engrg.* ASCE, Vol.129, No.7, pp.619~629.
19. 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.