

고결모래의 콘선단저항과 미소변형전단탄성계수 관계

Relationship between Cone Tip Resistance and Small-Strain Shear Modulus of Cemented Sand

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 이우진²⁾, Woojin Lee, 김재정³⁾, Jaejeong Kim, 최영민³⁾, Youngmin Choi

¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 박사후연구원, Postdoctoral Fellow, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 부교수, Associate professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : This study evaluates the relationship between cone tip resistance (q_c) and small-strain shear modulus (G_{max}) of cemented sand. For this purpose, a series of miniature cone penetration and bender element tests are performed in calibration chamber specimens with various gypsum contents. Experimental results show that both q_c and G_{max} of sand increase with increasing cementation level as well as relative density and vertical confining stress. However, the relative density and vertical confining stress has more significant influence on G_{max} and q_c of uncemented sand than those of cemented sand. It is observed that the G_{max}/q_c ratio of cemented sand decreases with increasing relative density. This result means that state variables have more affect on q_c than G_{max} of cemented sand. Test results also show that the effect of vertical stress on G_{max} - q_c relation is reduced by cementation effect.

Keywords : cementation, relative density, vertical confining stress, cone tip resistance, small-strain shear modulus, G_{max} - q_c relation

1. 서론

미소변형특성 (전단파속도 V_s , 미소변형전단탄성계수 G_{max})는 흙의 액상화 가능성과 동적거동을 예측하기 위한 기본 토질정수 중 하나이다. 일반적으로 사질토의 G_{max} 는 평균유효응력과 간극비의 영향을 받는 것으로 알려지고 있으나 (Hardin and Richart 1963; Hardin and Drnevich 1972; Iwasaki et al. 1978), 최근에는 지반의 응력이력, aging, 고결 (cementation)과 같은 시간이력이 G_{max} 에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 입자 접촉점 사이에 결합 유발물질이 침전하여 사질토의 점착력을 유발하는 고결이 지반의 G_{max} 증가에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하다. Yun and Santamarina (2005), Clough et al. (1989), Monaco and Marchetti (2007)는 고결이 지반의 G_{max} 를 증가시켜 액상화 가능성을 현저하게 감소시킨다고 하였다. Chiang and Chae (1972), Acar and El-Tahir (1986), Saxena et al. (1988), Chang and Woods (1992), Baig et al. (1997), Mohsin and Airey (2005) 등은 다양한 실내 시험으로부터 인공 고결시료의 G_{max} 를 측정하고 G_{max} 에 미치는 영향요인을 평가하였다.

지반의 G_{max} 는 현장 탄성파시험으로부터 결정될 수 있으나, 현장관입시험 결과인 콘선단저항으로부터 미고결 지반의 G_{max} (V_s)를 간접적으로 추정하는 방법이 제안되고 있다 (Baldi et al. 1989; Rix and

Stokoe 1991; Jamiolkowski et al. 1988; Hegazy and Mayne 1995). 그러나 흙의 G_{max} 는 10^{-5} 이하의 미소변형율에서 측정되기 때문에 고결모래의 결합특성을 반영하는 반면, 현장장비의 관입시 유발되는 변형은 관입체 주변의 모든 고결결합을 파괴하기 때문에 (Leon et al. 2006; Monaco and Marchetti 2007; Fonseca and Coutinho 2008), 고결모래의 G_{max} 와 콘선단저항의 관계는 분석이 매우 난해하다. 일반적으로 모래의 G_{max}/q_c 는 평균유효응력이나 상대밀도, 그리고 모래의 압축성에 덜 민감하게 반응하는 것으로 알려진다 (Schnaid 2005; Fonseca and Coutinho 2008; Giacheti and Mio 2008). 그러나, G_{max} 가 q_c 에 비해 aging나 고결에 민감하기 때문에, G_{max}/q_c 는 모래의 aging이나 고결에 의해 증가한다. Schnaid et al. (2004)는 모래의 고결정도를 구분하고 q_c 로부터 고결모래의 G_{max} 를 예측하기 위한 $G_{max}-q_c$ 관계식을 제안하였다.

사질토의 G_{max} 와 q_c 에 영향을 미치는 다양한 영향요인이 시험결과에 미치는 영향정도가 상이하기 때문에, 현장시험 결과로부터 각각의 영향정도를 독립적으로 분리할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 동일한 조건으로 조성된 고결시료의 G_{max} 와 콘선단저항을 측정하고, 상대밀도, 구속압, 고결정도가 각 시험결과에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 시료조성 및 시험

2.1 시료 기본물성

본 연구에 사용된 모래의 기본물성과 입도분포는 표 1, 그림 1과 같으며, 평균입경은 0.17mm이고 통일분류법(USCS)상 SP에 해당된다. 또한 전자주사현미경을 통하여 관찰한 결과, subangular의 조도를 갖는 것으로 나타났고, 성분분석(XRF)결과 SiO_2 함유량이 98% 이상의 석영질 모래인 것으로 나타났다. 고결유발제로 사용된 석고는 습윤양생시 20MPa의 압축강도를 발현하고, 양생시 팽창율은 0.03%이다.

표 1. 모래 기본물성

G_s	$D_{10}(\text{mm})$	$D_{50}(\text{mm})$	Cu	Cc	e_{max}	e_{min}	USCS
2.647	0.09	0.170	2.111	0.988	1.054	0.719	SP

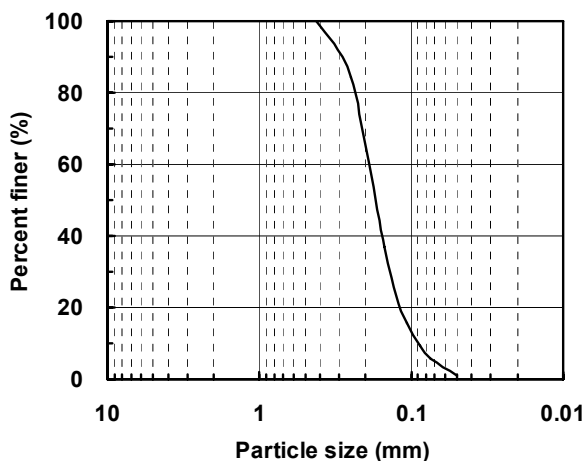


그림 1. 시험모래 입도분포

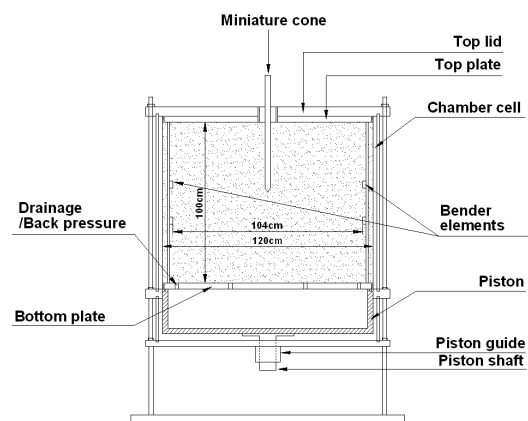


그림 2. 챔버시스템 및 콘관입시험/벤더엘리먼트시험 모식도

2.2 대형 챔버시료 조성

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 높이 1.0m 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입 시험을 위한 어댑터가 연결된 상판으로 구성되어 있다. 횡방향 응력을 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측셀, 외측셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 제어판에서 조절한다. 챔버시스템과 딜라토미터 관입시험 모식도는 그림 2와 같다.

대형 챔버에서는 자연의 퇴적상태에서 나타나는 흙의 조직과 유사할 뿐만 아니라, 다양한 상대밀도의 범위에서 전체적으로 균등하게 시료가 조성되도록 하기 위해 대부분 건조낙사법으로 시료를 조성하고 있다. 본 연구에서는 최성근 등 (2007)에 의해 개량된 레이저 시스템의 모래 낙하고와 개폐율을 조절하여 다양한 상대밀도의 미고결, 고결시료를 조성하였다. 낙사도중 모래와 고결유발제로 사용된 석고의 낙하속도차에 의한 재료분리를 방지하기 위해, 0.5% 함수비로 표면을 습윤시킨 모래시료와 석고를 교반하여 석고입자를 모래표면에 부착시킨 후 시료를 낙사하였다 (Rad and Tumay 1986; Puppala 등 1995). 낙사가 완료된 시료의 상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립하고 연직구속압 50~400kPa의 다양한 구속압을 가한 후, 가압에 의한 변위를 보정하여 조성된 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다.

2.3 전단파측정 및 미니콘 관입시험

시료의 수평방향 전단파 속도(V_{HV})를 측정하기 위해 그림 2와 같이 tip to tip 거리 104cm로 벤더엘리먼트를 설치하였다. 각 벤더엘리먼트는 폭 1cm, 길이 2cm이며, cross-talk를 방지하기 위해 silver coating하였으며, 내구성 향상 및 방수를 위해 epoxy coating하였다. 또한 frame wave 생성을 방지하기 위해 HDPE set screw에 선장착한 후 챔버에 설치된 소켓에 고정하였다. Function generator와 Linear amplifier를 이용하여 20~40 V_{pp} 의 단일정현파를 입력신호로 하였으며, 출력신호의 노이즈제거 및 증폭을 위해 filtering과 stacking을 실시하였고, 처리된 신호의 저장을 위해 Digital oscilloscope를 사용하였다. 미고결 시료의 경우, 연직구속압 50~400kPa을 50kPa 간격으로 증가시키면서 전단파속도를 측정하였다. 고결시료의 경우, 목표 연직구속압 (50, 100, 200kPa) 상태에서 시료 하부에 30kPa의 주입압으로 탈기수를 주입하고 24시간 양생한 후, 전단파속도를 측정하였다.

각 시료의 전단파속도를 측정한 후, 시료 중심에서 미니콘 관입시험을 수행하였다. 챔버시스템에서 측정된 모래의 콘선단저항은 상대밀도, 수평응력, 챔버와 콘의 직경비, 그리고 경계조건 등의 영향을 받으며, 시료의 상대밀도가 높고 구속압이 낮을수록 직경비와 경계조건의 영향은 증가한다 (Salgado 등 1998). 일반적으로 낮은 상대밀도($Dr < 30\%$)에서 직경비 20 이상, 높은 상대밀도($Dr > 90\%$)의 경우 직경비 50 이상에서 경계조건이 콘시험 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있다 (Bean 등 1986). 본 챔버시스템에 직경 3.57cm의 레퍼런스콘을 적용할 경우, 시료 중심에서의 직경비는 33.6로써 높은 상대밀도의 시료에서 측정된 콘시험 결과가 경계조건의 영향을 받을 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 AP Vanderberg사에서 제조한 직경 1.6cm의 미니콘 (직경비 75)을 사용하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 시험모래 기본특성

모래의 콘선단저항은 반대수상에서 상대밀도와 선형관계로 식 1과 같이 표현된다 (Jamolkowski 등

1985, Baldi 등 1986). 여기서, D_r (%)은 모래의 상대밀도이고, q_c 와 σ_{v0}' 은 kPa 단위로 표현되는 콘선단 저항과 유효연직구속압이다. C_0, C_1, C_2 는 경험적으로 결정되는 상수로써, 본 연구에서 사용된 K-7호사의 경우 선행연구 (이문주 등 2008)로부터 표 2와 같이 결정되었다. 석고함유율 (C_g)이 증가할수록 상수 C_0 는 급격히 증가한 반면, C_1 은 점차 감소하였다. 또한 모든 시료에서 상수 C_2 는 지반의 고결여부 및 고결정도에 관계없이 거의 유사하게 결정되었다 (이문주 등 2008).

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{q_c}{C_0(\sigma_{v0}')^{C_1}} \right] \quad (1)$$

표 2. K-7호사의 콘선단저항-상대밀도 관계에서의 경험적 상수 (이문주 등 2008)

석고함유율, (C_g , %)	C_0	C_1	C_2
0	61.6	0.65	0.0212
5	390.9	0.40	0.0218
7	852.9	0.29	0.0233
10	1280.5	0.26	0.0262

Roesler (1979), Stokoe 등 (1985)은 구속압으로 정규화된 사질토의 전단파속도와 상대밀도의 선형관계를 제시하였으며, 일련의 벤더엘리먼트 시험으로부터 결정된 미고결 K-7호사의 전단파속도-상대밀도-응력의 관계도 그림 3과 같이 선형관계를 만족하였으며, 식 2로 표현되었다. 여기서, V_s 는 전단파속도 (m/s), p_a 는 대기압 (=98.1kPa)이고, σ_0' 은 평균유효응력 (kPa)이다.

$$D_r(\%) = 1.6 \times \left[\frac{V_s}{(\sigma_0'/p_a)^{0.24}} \right] - 244 \quad (2)$$

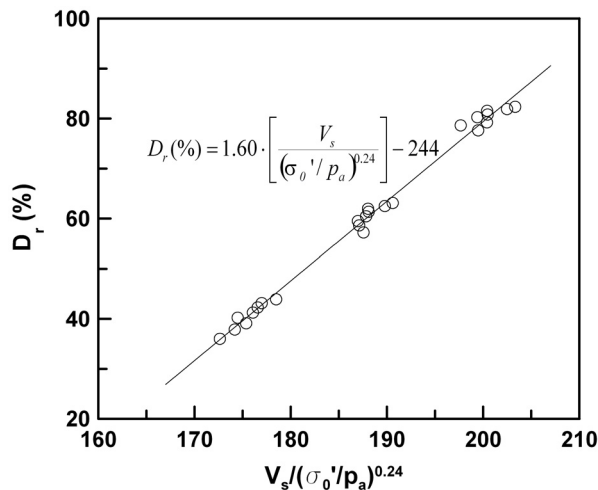


그림 3. 미고결 K-7호사의 상대밀도-구속압-전단파속도 관계

3.2 고결모래의 콘선단저항에 미치는 영향

이문주 등 (2008)은 고결결합에 의한 고결모래의 콘선단저항에 영향을 미치는 영향요인을 분석하였다. 그림 4는 동일한 상대밀도와 연직구속압 상태의 미고결 모래의 콘선단저항($q_{c(us)}$)과 고결모래의 콘선단저항($q_{c(cs)}$)을 비교한 결과로써, 5% 석고함유율은 미고결 모래의 콘선단저항에 비해 고결모래의 콘선단저항을 1.7~2.5배 증가시켰다. 또한, 7%, 10% 석고함유율은 콘선단저항을 각각 2.2~4.0, 3.2~6.8배 증가시켰다. 연직구속압이 증가할수록 미고결 모래의 콘선단저항에 대한 고결모래의 콘선단저항은 점차 감소하였으며, 동일 석고함유율에서 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 콘선단저항이 다소 증가하였다.

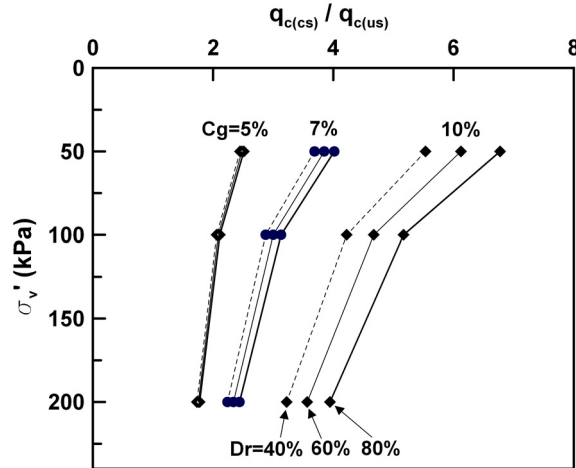


그림 4. 고결모래의 콘선단저항에 미치는 석고함유율, 상대밀도, 연직구속압의 영향 (이문주 등 2008)

3.3 고결모래의 미소변형전단탄성계수에 미치는 영향

그림 5는 동일한 상대밀도와 연직구속압 상태의 미고결 모래의 G_{max} ($G_{max(us)}$)와 고결모래의 G_{max} ($G_{max(cs)}$)를 비교한 결과이다. 각 시험모래의 G_{max} 는 측정된 전단파속도로부터 $G_{max}=V_s^2 \rho$ 로 결정되었다. 시험결과 5% 석고함유율로 약하게 고결된 경우, 100kPa에서 40% 상대밀도로 조성된 고결시료의 G_{max} 는 동일한 조건의 미고결 모래의 G_{max} 보다 16배 더 큰 540MPa로 결정되었다. 또한 7~10%의 석고함유율의 증가는 5~7%의 석고함유율 증가보다 더 큰 G_{max} 의 증가를 유발하였다. 이는, G_{max} 는 석고함유율이 증가할수록 지수적으로 증가하는 것을 의미하며, 시멘트 함유율에 따라 일축압축강도가 지수적으로 증가한 Ismail 등 (2002)과 Schnaid 등 (2001)의 연구와 유사하다.

유효연직응력이 증가할수록 $G_{max(cs)}/G_{max(us)}$ 가 점차 감소하였다. 예를 들어, 연직구속압이 50에서 200kPa로 증가함에 따라 고결모래의 G_{max} 는 20~30% 증가한 반면, 미고결 모래의 G_{max} 는 약 2배 증가하였다. 이와 같은 결과는 고결모래의 G_{max} 에 대한 구속압의 영향은 미고결 모래의 G_{max} 에 미치는 영향보다 적음을 의미하며, Baig et al. (1997), Fernandez and Santamarina (2001), and Mohsin and Airey (2005)의 결과와도 일치한다.

그림 5에서 석고함유율 5, 7% 고결모래의 G_{max} 비는 상대밀도가 증가할수록 다소 증가하였으나, 석고함유율 10%인 고결모래의 G_{max} 비는 상대밀도의 영향이 거의 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는, 미고결 모래의 G_{max} 또한 상대밀도가 증가하면 증가하지만, 10% 석고함유율과 같이 모래의 고결정도가 높

아질 경우, 고결모래의 G_{max} 에 대한 상대밀도의 영향이 사라짐을 의미한다.

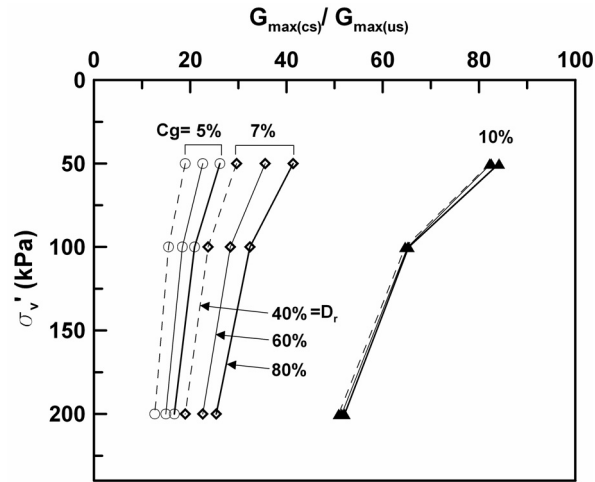


그림 5. 고결모래의 G_{max} 에 미치는 석고함유율, 상대밀도, 연직구속압의 영향

3.4 고결모래의 G_{max}/q_c 에 미치는 영향

그림 6은 석고함유율과 연직구속압에 의한 미고결 모래와 고결모래의 G_{max}/q_c 변화이다. 모래의 석고함유율이 증가할수록 G_{max}/q_c 가 급격히 증가하였으며, 이와 같은 결과는 모래의 미소변형장성이 콘선단저항보다 고결에 민감하게 반응함을 의미한다. Schneider et al. (2004)의 결과에서 지반의 응력이력(OCR)은 G_{max}/q_c 에 약 10%의 변화만을 유발하며, aging은 2배의 증가를 유발하였다. 따라서 고결은 응력이력이나 aging보다 G_{max}/q_c 에 더 큰 영향을 미치며, 이와 같은 결과는 고결에 의한 콘선단저항의 증가보다 G_{max} 의 증가가 뚜렷하기 때문이다.

그림 6에서 연직구속압이 증가할수록 미고결 모래와 고결모래의 G_{max}/q_c 가 점차 감소하였다. 미고결 모래의 경우 50~200kPa의 연직구속압 증가로 인해 G_{max}/q_c 가 약 18% 감소하였으며, 고결모래의 경우에도 약 13~23% 감소하였다. 연직구속압의 변화는 G_{max} 보다 콘선단저항의 변화에 좀 더 민감하지만, 연직구속압이 고결모래와 미고결 모래의 G_{max}/q_c 에 미치는 상대적인 영향은 적은 것으로 분석된다.

그림 7은 상대밀도에 따른 모래와 고결모래의 G_{max}/q_c 변화이다. 상대밀도가 증가할수록 미고결, 고결모래의 G_{max}/q_c 는 점차 감소하였다. 즉 상대밀도의 증가는 고결여부에 관계없이 G_{max} 보다 콘선단저항의 변화에 더 큰 영향을 미친다. 미고결 모래의 경우, 40~80%의 상대밀도 증가로 인해 약 40%의 G_{max}/q_c 감소가 유발되었다. 5%, 7% 고결모래의 경우에는 동일한 상대밀도 증가로 인해 약 25% 감소하였으나, 10% 고결모래의 경우에는 50% 이상의 G_{max}/q_c 감소가 나타났다. 그림 5에서 확인된 바와 같이, 강한 고결결합이 발생할 경우, 고결모래의 G_{max} 에 대한 상대밀도의 영향이 사라진 반면, 콘선단저항은 10% 고결에도 여전히 상대밀도의 영향이 상당히 크게 작용하기 때문이다.

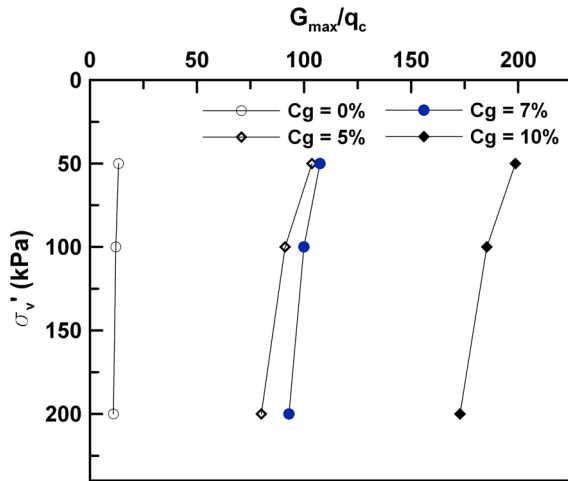


그림 6. 고결모래의 G_{max}/q_c 에 미치는 연직구속압의 영향

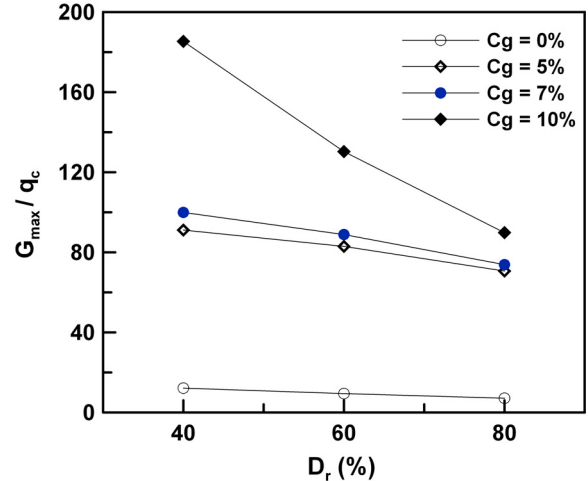


그림 7. 고결모래의 G_{max}/q_c 에 미치는 상대밀도의 영향

3.4 고결모래의 $G_{max}-q_c$ 관계

그림 7은 미고결 모래의 $G_{max}-q_c$ 관계이다. Rix and Stokoe (1991)의 결과와 마찬가지로 미고결 K-7 호사의 G_{max}/q_c 는 구속압으로 정규화된 콘선단저항 ($q_c/(\sigma_v')^{0.5}$)이 증가할수록 점차 감소하였다. 그림 8은 고결모래의 $G_{max}-q_c$ 관계로써, 동일 콘선단저항에서 석고함유율이 증가할수록 고결모래의 G_{max} 가 급격히 증가하여, 고결이 콘선단저항보다 미소변형특성에 더 큰 영향을 미친 그림 6, 7의 결과가 확인되었다. 미고결 모래와는 달리 고결모래의 $G_{max}-q_c$ 관계에 연직구속압이 미치는 영향은 없었으며, 이와 같은 결과는 G_{max} 와 q_c 에 미치는 연직구속압의 영향이 고결결합에 의해 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

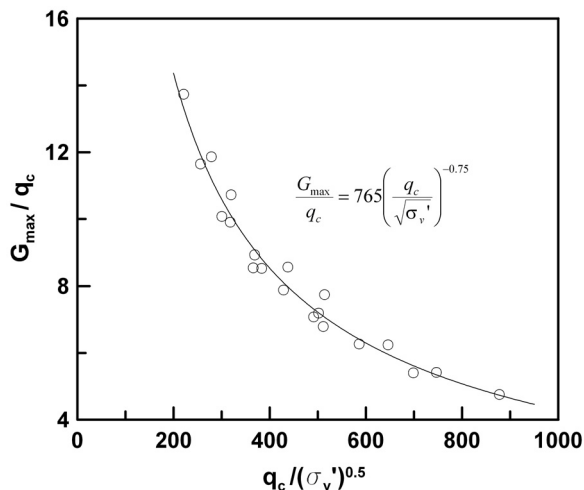


그림 8. 미고결 모래의 $G_{max}-q_c$ 관계

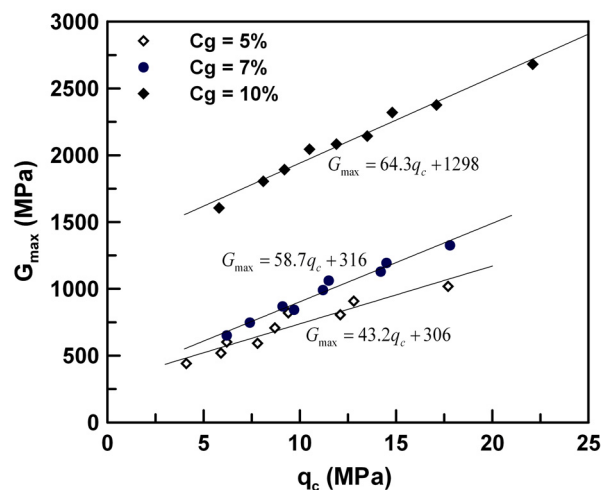


그림 9. 고결모래의 $G_{max}-q_c$ 관계

4. 결론

본 연구에서는 모래중량비 5, 7, 10%의 석고를 혼합하여 고결이 유발된 시료에 대한 미니콘 관입시험과 전단파 측정시험을 수행하였다. 시험결과로부터 석고함유율, 상대밀도, 그리고 구속압이 콘선단저항과

흙의 미소변형전단탄성계수 (G_{max})에 미치는 영향과 $G_{max}-q_c$ 의 관계를 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 고결은 모래의 콘선단저항과 G_{max} 를 증가시켰으며, 연직구속압의 증가는 고결모래보다 미고결 모래의 q_c 와 G_{max} 에 더 큰 영향을 미쳤다. 또한 동일 석고함유율에서 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 q_c 와 G_{max} 가 증가하였다.
- (2) 상대밀도가 증가할수록 미고결 모래와 고결모래의 G_{max} 는 증가하지만, 강한 고결이 형성된 경우 고결모래의 G_{max} 에 대한 상대밀도의 영향이 점차 사라진다.
- (3) 고결은 일반적인 응력이력이나 aging보다 사질토의 G_{max}/q_c 증가에 더 큰 영향을 미쳤으며, 고결에 의한 콘선단저항의 증가보다 미소변형특성인 G_{max} 의 증가가 더욱 뚜렷하였다.
- (4) 연직구속압과 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 G_{max}/q_c 가 점차 감소하였으며, 지반의 state variables가 고결모래의 G_{max} 보다 콘선단저항에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.
- (5) 모래의 $G_{max}-q_c$ 관계에 연직구속압이 미치는 영향 고결결합에 의해 감소하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), "Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템", **한국지반공학회논문집**, Vol.23, No.6, pp.67-76
2. 이문주, 최성근, 추현욱, 이우진 (2008), "고결모래의 콘선단저항과 변형계수의 관계", **한국지반공학회논문집**, Vol.24, No.12, pp.53-63.
3. Acar, Y. B. and El-Tahir, E. A. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1001-1015.
4. Baig, S., Picornell, M. and Nazarian, S. (1997), "Low strain shear moduli of cemented sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.6, pp.540-545.
5. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, N., Jamiolkowski, M. and Lo Presti, D. C. F. (1989). "Modulus of sands from CPTs and DMTs", *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, Balkema, Rotterdam, pp.165-170.
6. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E. (1986), "Interpretation of CPTs and CPTUs; second part: drained penetration of sands", *Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar*, Singapore, pp.143-156.
7. Been, K., Crooks, J. H, Becker, D. E. and Jefferies, M. G. (1986), "The cone penetration test in sand: part I, state parameter interpretation", *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.239-249.
8. Chang, T. S. and Woods, R. D. (1992), "Effect of particle contact bond on shear modulus", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.118, No.8, pp.1216-1233.
9. Chiang, Y. C. and Chae, Y. S. (1972), *Dynamic properties of cement treated soils*, Highway Research Record 379, Highway Research Board, National Academy of Science, Washington, D. C., pp.39-51.
10. Clough, W. G., Iwabuchi J., Rad N. S. and Kuppusamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
11. Giacheti, H. L. and Mio, G. D. (2008), "Seismic cone tests in tropical soils and the G_0/q_c ratio",

- Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization*, Taipei, Taiwan, pp.1289–1295.
12. Fernandez, A. Z. and Santamarina, J. C. (2001), "Effect of cementation on the small-strain parameters of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.191–199.
 13. Fonseca, A. V. and Coutinho, R. Q. (2008), "Characterization of residual soils", *Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization*, Taipei, Taiwan, pp.195–248.
 14. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.98, pp.667–692.
 15. Hardin, B. O. and Richart, F. E. (1963), "Elastic wave velocities in granular soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.89, pp.603–624.
 16. Hegazy, Y., and Mayne, P. W. (1995), "Statistical correlations between Vs and cone penetration test data for different soil types", *Proceedings, CPT-95*, Vol.2, Linköping, pp.173–178.
 17. Ismail, M. A., Joer, H. A, Sim, W. H. and Randolph, M. F. (2002), "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.6, pp.520–529.
 18. Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. (1977), "Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands", *Soils and Foundation*, Vol.17, No.3, pp.19–35.
 19. Jamiolkowski, M., Ghionna, V. N., Lancellotta, R. and Pasqualini, E. (1988), "New correlation of penetration tests for design practice", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, Vol.2, Orlando, Florida, pp.263–296.
 20. Mohsin, A. K. M. and Airey, D. W. (2005), "Influence of cementation and density on G_{max} for sand", *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, pp.413–416.
 21. Monaco, P. and Marchetti, S. (2007), "Evaluation liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history", *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Paper No. 1626
 22. Leon, E., Gassman, S. L. and Talwani, P. (2006), "Accounting for soil aging when assessing liquefaction potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.3, pp.363–377
 23. Puppala, A. J., Acar, Y. B. and Tumay, M. T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589–600.
 24. Rad, N. S. and Tumay, M. T. (1986), "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand", *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, GSP 6, ASCE, New York, pp.926–948.
 25. Rix, G. J. and Stokoe, K. H. (1991), "Correlation of initial tangent modulus and cone resistance", *Proceeding of International Symposium of Calibration Chamber Testing*, Posdam, New York, Elsevier, pp.351–362.
 26. Roesler, S. K. (1979), "Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, No.7, pp.871–880.
 27. Salgado, R., Mitchell, J. K. and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, pp.878–888.
 28. Saxena, S., Avramidis, A. S. and Reddy, K. R. (1988), "Dynamic moduli and damping ratio for cemented sands at low strains", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, pp.353–368.
 29. Schnaid, F. (2005), "Geo-characterisation and properties of natural soils by in situ tests",

Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, pp.3-45.

30. Schnaid, F., Prietto, P. D. M. and Consoli, N. C. (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.10, pp.857-868.
31. Schnaid, F., Lehane, B. M. and Fahey, M. (2004), "In situ test characterization of unusual geomaterials", *Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization*, Milpress, Porto, Vol.1, pp.49-74.
32. Schneider, J. A., McGilivray, A. V. and Mayne P. W. (2004), "Evaluation of SCPTU intra-correlations at sand sites in the Lower Mississippi River Valley, USA", *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Porto, Milpress, pp.1003-1010.
33. Stokoe, K. H., Lee, S. H. H. and Knox, D. P. (1985), "Shear Moduli Measurements Under True Tri-Axial Stresses", *Proceedings of Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, NewYork, pp.166-185.
34. Yun, T. S. and Santamarina, J. C. (2005), "Decementation, softening, and collapse: changes in small-strain shear stiffness in K_0 loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.3, pp.350-358.