

모래의 미소변형 전단탄성계수에 대한 고결영향 분석

Analysis of cementation effects on Small-strain Shear Modulus of Sand

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 추현욱²⁾, Hyunwook Choo, 이종섭³⁾, Jong-Sub Lee, 이우진³⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

²⁾ 전남개발공사, Jonnam Development Cor., Former Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

³⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

SYNOPSIS : The small-strain shear modulus (G_{max}) of uncemented sand is affected by the the mean principal stress and void ratio, and it has been known that the cementation and aging also affect to G_{max} of sand. For extensive understanding about the effect of cementation on the G_{max} of sand, a series of bender element tests was conducted on the cemented specimens prepared in a large calibration chamber by pluviation of the sand-gypsum mixture. It was observed from the experimental results that the G_{max} of cemented sand is higher above 10 times than value of uncemented one, and it increases exponentially with the gypsum content increases. Whereas, the increase of the vertical stress from 50kPa to 200kPa and the relative density from 40% to 80% result in 20~30% and 2 times increase of G_{max} , respectively. It means that the gypsum content, that is cementation level, is the most influential factor on the G_{max} of cemented sand. In addition, the effect of relative density on G_{max} was more apparent on cemented sand than uncemented one.

Key words : cementation, calibration chamber, bender element, small-strain shear modulus

1. 서론

흙의 전단계수(G)는 전단응력(τ)과 전단변형율(γ)의 비로 정의된다. 흙의 탄성영역을 초과하는 대변형 영역에서는 전단변형율이 증가함에 따라 전단탄성계수가 감소하지만, 0.003% 이하의 미소변형(small strain) 영역에서의 전단계수는 변형율과 무관하게 거의 일정하며, 이 값을 최대전단탄성계수, 혹은 미소변형 최대전단탄성계수 (G_{max})라고 정의한다. 흙의 미소변형 전단 탄성계수는 동적거동이나 흙과 구조물의 상호거동을 분석함에 있어 중요한 지반정수이며, 일반적으로 흙의 전단파속도로부터 식 1을 통해 결정된다. 여기서, ρ 는 흙의 비중(mass density)이다.

$$G_{max} = \rho \times V_s^2 \quad (1)$$

1960년대 이후로, 모래의 미소변형 전단탄성계수를 결정하기 위한 많은 연구가 수행되어지고 있다. Hardin and Richart (1963)과 Hardin and Drnevich (1972)는 모래의 전단탄성계수에 영향을 미치는 중요한 인자로서 유효구속압, 변형율, 그리고 간극비에 대해 기술하였다. 기존 연구들은 대부분 공진주 시험이나 비틀전단시험을 이용하여 모래의 G_{max} 를 구하였으며, Hardin and Drnevich (1972), Iwasaki

등 (1978), Lo Presti 등 (1997)에 의해 미고결 사질토의 전단탄성계수 추정식들이 제안되었다. 고결된 모래의 G_{max} 는 유효응력, 변형률의 크기, 간극비 뿐만 아니라, 고결정도(고결유발제 함유율)의 영향을 받는 것으로 알려지고 있으며, Chiang and Chae(1972), Acar and El-Tahir (1986), Saxena 등(1988), Mohsin and Airey (2005)에 의해 연구가 수행되었다. 또한 이들은 고결유발제 함유율로 모래의 고결정도를 정량적으로 표현하여 고결모래의 G_{max} 추정식을 제안하였다. 그러나 현재까지 측정된 고결모래의 G_{max} 는 그 범위가 매우 광범위하게 분포하기 때문에, 고결이 모래의 미소변형 강성에 미치는 영향에 대해 좀 더 많은 연구와 자료축적이 필요하다.

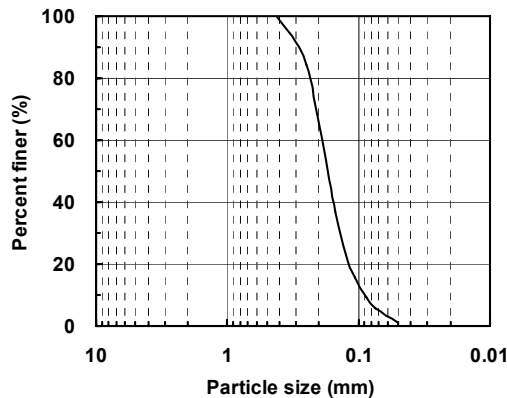
흙의 전단탄성계수를 결정하기 위해 지반의 전단파속도를 직접 측정하는 방법이 가장 신뢰성이 높으나, 현장시험에서는 다양한 영향요인을 고려한 매개변수분석이 현실적으로 불가능하기 때문에, 전단탄성계수에 대한 대부분의 연구는 비교란 혹은 재성형 시료에 대한 공진주시험이나 비틀림시험, 그리고 벤더엘리먼트 시험 등을 이용한 실내시험 위주로 진행되고 있다. 본 연구에서는 대형 챔버에 조성된 인위적인 고결시료에 대한 벤더엘리먼트 시험을 수행하여 고결 영향을 검토하였다. 시험결과로부터, 흙의 G_{max} 에 고결이 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 시료방법

2.1 시료 기본물성

본 연구에 사용된 모래의 입도분포와 기본물성은 그림 1, 표 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.

Ismail 등 (2002b)은 석고로 고결된 시료의 거동이 자연적 고결시료의 거동과 유사함을 보였다. 따라서 본 연구에서는 석고를 고결유발제로 결정하였으며, 사용된 석고는 물-석고비(표준혼수량) 40%로 습윤상태에서 양생될 경우 20MPa의 압축강도를 발현한다. 또한 본 석고의 양생시 팽창율은 보통의 석고보다 작은 0.03% 정도이다.



2.2 시험장비 및 시험방법

2.2.1 대형 챔버시스템

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 높이 1.0m 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입 시험을 위한 아답터가 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 벤더엘리먼트 설치 모식도는 그림 2와 같다.

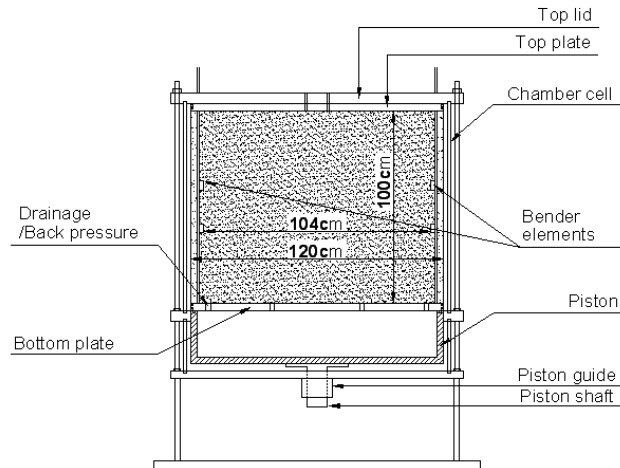


그림 2. 챔버시스템 모식도

2.2.2 레이너시스템

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 연구의 레이너 시스템은 Sweeney and Clough (1990), Puppala 등 (1995)에 의한 시스템을 기본으로 개량되었다 (최성근 등 2007).

2.2.3 전단파 측정장비

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.

2.2.4 시료조성 및 시험

레이너 시스템의 모래 낙하고와 개폐율, 그리고 porous plate의 장착유무를 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. 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.

3. 시험결과 및 분석

3.1 미고결 모래의 미소변형 전단탄성계수

측정된 수평방향 전단파속도로부터 간극비와 연직구속압에 따른 미고결 K-7 모래의 G_{max} 를 그림 3과 같이 결정하였다. 이전의 연구결과와 마찬가지로 상대밀도와 연직구속압이 증가함에 따라 미고결 K-7 모래의 G_{max} 도 증가하였다. 그림 4는 Toyoura sand에 대해 Iwasaka 등 (1978)과 Lo Presti 등 (1997)이 제안한 추정식에 의한 G_{max} 와 본 연구에서 측정된 K-7 모래의 G_{max} 의 변화를 나타낸다. 동일한 연직구속압에서도 K-7 모래의 G_{max} 가 추정식에 의한 G_{max} 보다 작게 나타날 뿐만 아니라, 또한 동일한 모래에 대한 두 추정식에서도 G_{max} 의 차이가 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 동일한 모래시료에 대해서도 시험방법과 시료조성 방법 뿐만 아니라, 모래의 광물학적 특성이나 표면거칠기 등과 같은 광물학적 특성에 의해서도 G_{max} 가 크게 다르게 측정될 수 있음을 의미한다.

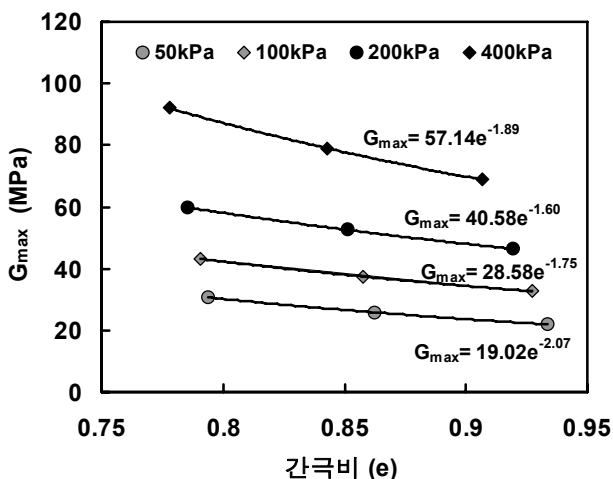


그림 3. 간극비와 연직구속압에 따른 미고결 K-7 모래의 미소변형 전단탄성계수

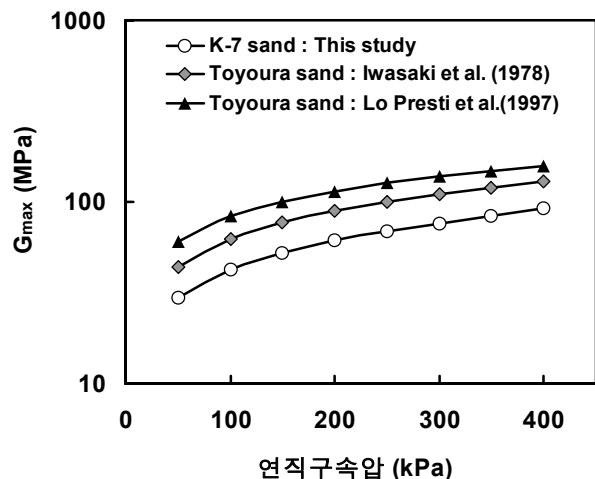


그림 4. 각 시험모래의 미소변형 탄성계수 비교 (Dr=80%)

본 연구에서 측정된 K-7 모래의 G_{max} 는 Lo Presti 등(1997)의 식에 기초하여 식 2와 같이 나타내어진다. 이 때, p_a 는 대기압으로써 98.1kPa이고, σ_m' 은 평균유효응력이며, e 는 간극비이다. 또한, G_{max} , p_a ,

σ_m' 의 단위는 모두 kPa이다.

$$G_{max} = 336.4 \times e^{-1.9} \times (p_a)^{0.49} \times (\sigma_m')^{0.51} \quad (2)$$

3.2 고결 모래의 미소변형 전단탄성계수

3.2.1 석고함유율에 따른 미소변형 전단탄성계수 변화

그림 5는 석고함유율에 따른 K-7 모래의 G_{max} 로써, 약한 고결만으로도 모래의 G_{max} 는 급격하게 증가하였으며, 석고함유율이 증가할수록 G_{max} 가 증가하였다. 석고함유율 7~10%에서의 G_{max} 증가가 석고함유율 5~7%에서의 증가보다 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 이는 고결모래의 G_{max} 는 석고함유율의 증가에 의해 지수적으로 증가함을 의미한다. 이와 같은 결과는 포틀랜드시멘트 함유율과 G_{max} 가 선형으로 증가한 Baig 등(1997)의 결과와는 다소 상이하나, 고결모래의 일축압축강도가 시멘트 함유율에 따라 지수적으로 증가한 Abdulla and Kioussis (1997)과 Ismail 등(2002b)의 결과와는 일치한다. 일반적으로 적은 양의 고결유발제는 주로 시료의 표면에 부착되어 고결유발효과가 미미하지만, 고결유발제 함유율이 높아질수록 고결유발제가 입자사이의 접촉점을 좀 더 효율적으로 결합시켜 고결효과는 고결유발제 함유율에 따라 지수적으로 증가하는 것으로 판단된다 (Abdulla and Kioussis 1997).

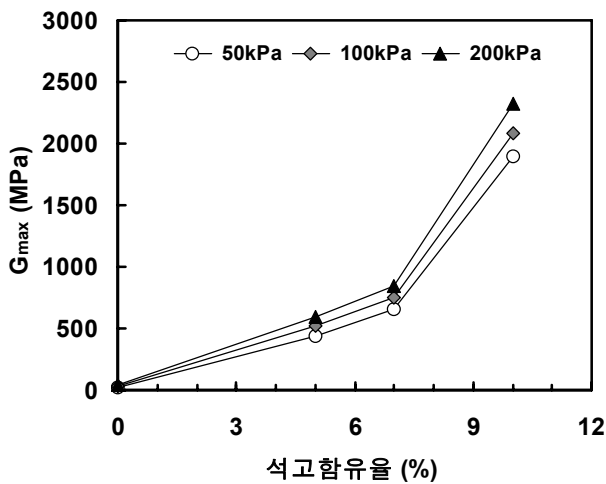


그림 5. 석고함유율에 따른 미소변형 탄성계수 변화 (Dr=40%)

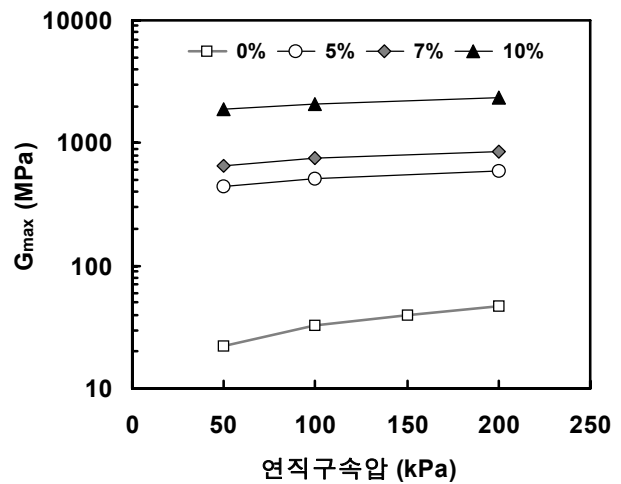


그림 6. 연직구속압에 따른 미소변형 탄성계수 변화 (Dr=40%)

3.2.2 연직구속압에 따른 미소변형 전단탄성계수 변화

그림 6에서 연직구속압의 증가할수록 시료의 G_{max} 는 증가한다. 그러나, 미고결 모래의 경우 200kPa에서의 G_{max} 는 50kPa에서의 경우보다 2배 정도 증가한 반면, 고결모래의 경우 동일한 연직구속압 변화에서 G_{max} 는 약 20~30%정도 증가하였다. 이와 같은 결과는 연직구속압이 고결모래의 전단탄성계수에 미치는 영향은 미고결 모래에 비해 상대적으로 미미함을 나타내며, Baig 등 (1997), Fernandez and Santamarina (2001), 그리고 Mohsin and Airey (2005)와 유사한 결과이다.

3.2.3 상대밀도에 따른 미소변형 전단탄성계수 변화

그림 7에서 상대밀도가 증가함에 따라 미고결 K-7 모래 뿐만 아니라 고결된 K-7 모래의 G_{max} 도 증가하였다. 이와 같은 결과는 상대밀도가 증가함에 따라 입자간 접촉점이 증가하여 고결유발제가가 좀 더 효율적으로 흡착되어 고결효과가 증가하기 때문이다 (Ismail 등 2002a). 시료의 상대밀도가 40~80%로 증가함에 따라 미고결 시료의 G_{max} 는 30~40% 증가한 반면, 5% 고결시료의 G_{max} 는 약 2배 정도 증가하였다. 또한 7%, 10% 고결시료의 G_{max} 는 각각 60%, 30% 정도 증가하였다. 즉 상대밀도의 증가는 미고결 모래보다 고결모래의 G_{max} 증가에 더 큰 영향을 미치지만, 석고함유율이 증가할수록 상대밀도가 G_{max} 에 미치는 영향은 점점 감소하였다.

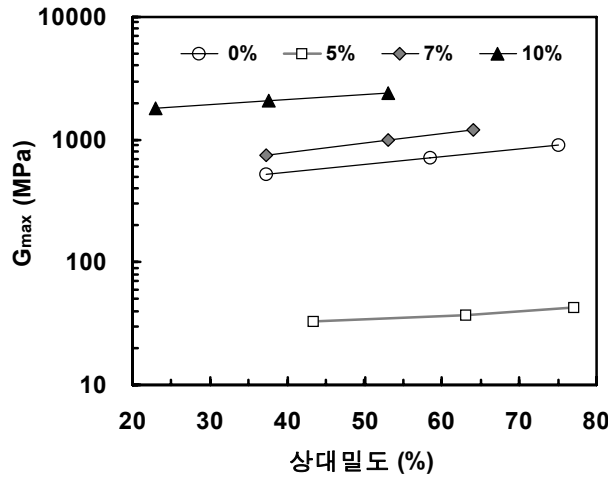


그림 7. 상대밀도에 따른 미소변형 전단탄성계수 변화 ($\sigma_v' = 100\text{kPa}$)

4. 결론

본 연구에서는 벤더엘리먼트를 이용하여 대형 챔버에 조성된 미고결, 고결모래의 전단파속도를 측정하고, 석고함유율, 상대밀도, 구속압이 전단파속도로부터 추정된 시료의 미소변형 전단탄성계수 (G_{max})에 미치는 영향을 분석하였다.

이전의 연구결과와 마찬가지로, 미고결 모래의 G_{max} 는 간극비와 평균유효응력의 영향이 지배적이었으며, 이에 대한 관계로 표현이 가능하였다. 그러나 미고결 모래의 G_{max} 추정식은 본 연구에서 사용된 모래의 구속압 및 상대밀도에 따른 G_{max} 를 과대평가하였으며,

고결모래의 G_{max} 는 석고함유율, 상대밀도, 그리고 구속압의 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 석고함유율이 고결모래의 G_{max} 변화에 가장 큰 영향요인인 것으로 나타났으며, 고결모래의 G_{max} 는 미고결 모래에 비해 연직구속압의 영향을 상대적으로 적게 받았다. 또한 고결모래의 G_{max} 는 미고결 모래에 비해 상대밀도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 그러나 석고함유율이 증가할수록 상대밀도가 고결모래의 G_{max} 에 미치는 영향은 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. Abdulla, A. A. and Kiousis, P. D. (1997), "Behavior of cemented sands - I. Testing", *Int. J. Num. Analy. Methods in Geomech.*, Vol. 21, pp. 533-547.
3. Acar, Y. B. and El-Tahir, E. A. (1986). "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1001-1015
4. Baig, S., Picornell, M. and Nazarian, S. (1997), "Low strain shear moduli of cemented sands", *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, Vol. 123, No. 6, pp. 540-545
5. 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, Washingto, D.C., pp. 39-51.
6. Choo, H. W. (2007), "Effect of the cementation on the shear modulus of quartz sands", Master thesis, Korea Univ., Seoul, Korea.
7. 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.
8. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972). "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves", *J. Soil Mech. Found. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 98, pp. 667-692
9. Hardin, B.O. and Richart, F.E. (1963), "Elastic wave velocities in granular soils", *J. Soil Mech. Found. Eng. Div.*, No.89, pp.603-624.
10. Ismail, M. A., Joer, H. A. and Randolph, M. F. (2002a). "Cementation of porous materials using calcite", *Geotechnique*, Vol. 52, No. 5, pp. 313-324.
11. Ismail, M. A, Joer, H. A., Sim, W. H. and Randolph. M. F. (2002b). "Effect of cement type on shear behaviour of cemented calcareous soil", *J. Geotech. Geoenviron. Engrg.*, Vol. 128, No. 6, pp. 520-529
12. Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. (1978). "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading", *J. Soils Found.*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-56.
13. Mohsin, A. K. M. and Airey, D. W. (2005). "Influence of cementation and density on Gmax for sand", *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo Japan, pp. 413-416.
14. Puppala, A. J., Acar, Y. B., and Tumay, M.T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *J. of Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589-600.
15. 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*, GSP6, ASCE, New York, pp.926-948.
16. Saxena, S., Avramidis, A. S. and Reddy, K. R. (1988). "Dynamic moduli and damping ratio for cemented sands at low strains", *Can. Geotech. J.*, Vol. 25, pp. 353-368.
17. Sweeney, B. P., and Clough, G. W. (1990), "Design of a large calibration chamber", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.13, No.1, pp.36-44.