

사질토의 미소변형 전단탄성계수에 대한 고결영향 분석

Analysis of Cementation Effect on Small Strain Shear Modulus of Sand

이문주* · 추현욱** · 최성근*** · 이우진****
Lee, Moon-Joo · Choo, Hyunwook · Choi, Sung-Kun · Lee, Woojin

Abstract

In this study, the small strain shear moduli (G_{max}) of uncemented and gypsum-cemented sands are evaluated by performing a series of bender element tests on the specimens reconstituted in the calibration chamber. It is observed from the experimental results that G_{max} of crushed-sands is about 35~50% smaller than that of natural sands. The increase in gypsum content is observed to result in an exponential increase of G_{max} value. It is also shown that the relative density has more significant effect on G_{max} of cemented sand, whereas the vertical effective stress has more significant influence on G_{max} of uncemented one. A prediction equation for cemented sand is expressed as a function of gypsum content as well as void ratio and vertical effective stress.

Keywords : *cemented sand, small strain shear modulus, gypsum content, relative density, vertical effective stress*

요 지

본 연구에서는 챔버에 조성된 미고결, 고결모래에 대한 벤더엘리먼트 시험으로부터 사질토 미소변형 전단탄성계수인 G_{max} 를 평가하였다. 시험결과, 본 연구에서 사용된 파쇄모래의 G_{max} 는 기존의 연구에 사용된 자연상태 모래의 G_{max} 보다 35~50% 작게 평가되었으나, 고결모래의 G_{max} 는 이전 연구 결과보다 크게 평가되었다. 모래의 G_{max} 는 고결유발제로 사용된 석고의 함유율에 가장 큰 영향을 받았으며, 석고함유율에 따라 지수적으로 증가하였다. 상대밀도의 증가는 미고결 모래보다 고결모래의 G_{max} 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었으며, 유효연직응력의 증가는 고결모래의 G_{max} 보다 미고결 모래의 G_{max} 증가에 더 큰 영향을 미쳤다. 이와 같은 영향요인 분석을 바탕으로 고결모래의 G_{max} 를 간극비, 유효연직구속압 뿐만 아니라 석고함유율에 따른 함수로 표현하였다.

핵심용어 : 고결모래, 미소변형 전단탄성계수, 석고함유율, 상대밀도, 유효연직응력

1. 서 론

전단응력과 전단변형률의 비로 정의되는 흙의 전단탄성계수는 탄성영역 이상의 전단변형률에서는 점점 감소하지만, 전단변형률 약 $10^{-3}\%$ 이하의 미소변형에서는 일정한 것으로 알려지고 있으며, 이 값을 미소변형 전단탄성계수(small strain shear modulus, G_{max})라고 한다. 흙의 G_{max} 는 지반의 액상화에 대한 저항력과 동적거동을 예측하기 위한 기본 토질정수 중 하나로써, 현장지반에서는 일반적으로 흙의 전단파속도(V_s)와 밀도(ρ)를 이용하여 $G_{max}=V_s^2\rho$ 로 결정된다.

일반적으로 사질토의 G_{max} 는 평균주응력과 간극비와 관계되지만(Hardin과 Richart, 1963; Hardin과 Drnevich, 1972; Iwasaki 등, 1978; Acar과 El-Tahir, 1986), 흙 입자사이에 접촉결합력이 형성되는 고결(cementation) 또한 흙의 G_{max} 를 증가시키는 주요 요인 중 하나이다. 약한 고결에 의해서

도 사질토의 미소변형강성 및 액상화 저항력이 크게 향상되기 때문에 지반문제 해석 및 설계 시 흙의 고결효과가 중요하게 고려되어야 한다(Yun과 Santamarina, 2005). 사질토의 고결에 대한 연구는 주로 인위적으로 조성된 시료를 이용하여 수행되고 있으며, 현재까지 공진주시험(Chiang과 Chae, 1972; Acar과 El-Tahir, 1986; Saxena 등, 1988; Chang과 Woods, 1992)이나 벤더엘리먼트 시험(Baig 등, 1997; Mohsin과 Airey, 2005; Yun과 Santamarina, 2005; Fernandez와 Santamarina, 2001)과 같은 실내시험으로부터 포틀랜드 시멘트나 석고를 고결유발제로 하는 고결시료의 G_{max} 를 측정하는 다양한 연구가 수행되었다. 이로부터 시료에 포함되는 고결유발제의 함유율이 상대밀도나 구속압보다 G_{max} 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 고결모래의 거동은 고결결합력과 구속압의 상대적인 크기에 의해 지배된다. 상대적으로 고결결합보다 작

* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사후연구원 (E-mail : kkkcivil@korea.ac.kr)

** 전 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정 (E-mail : fortunier99@nate.com)

*** (주)나오지오컨설팅 이사 (E-mail : sungue91@korea.ac.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 부교수 (E-mail : woojin@korea.ac.kr)

은 구속압에서는 고결모래의 거동이 고결결합력에 의해 지배되지만, 구속압이 고결결합을 손상시킬 수 있을 정도로 클 경우, 고결모래의 거동은 응력에 의해 지배되고 미고결 모래와 유사하게 나타난다(Coop과 Atkinson, 1993). 고결모래의 G_{max} 또한 고결결합력과 구속압의 상대적인 크기에 의해 결정된다. 일반적으로 고결모래의 G_{max} 는 미고결 모래보다 구속압의 변화에 둔감하지만(Fernandez와 Santamarina, 2001; Baig 등, 1997; Moshin과 Airey, 2005), 구속압으로 인해 고결결합이 손상되는 경우 고결모래의 G_{max} 가 감소하기도 한다(Fernandez와 Santamarina, 2001; Yun과 Santamarina, 2005; Baig 등, 1997).

고결모래의 미소변형특성은 고결유발제의 함유율 뿐만 아니라, 유발제의 특성이나 측정방법에도 크게 영향을 받기 때문에, 선행 연구에서 측정된 미소변형 전단탄성계수의 범위는 광범위하고 차이가 크다. 따라서, 모래의 고결영향을 좀 더 일반화시키기 위해서는 측정된 실험결과를 바탕으로 하는 체계적인 분석이 필수적이다. 본 연구에서는 석고를 고결유발제로 하는 대형 고결시료를 조성한 후, 석고함유율, 상대밀도, 구속압에 따른 고결모래의 미소변형 전단탄성계수의 변화를 분석하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 미고결 모래와 석고함유율에 따른 고결모래의 미소변형 전단탄성계수 추정식을 결정하였다.

2. 시험 방법

2.1 시료 기본특성

본 연구에 사용된 K-7호시는 모암인 규석으로부터 인공적

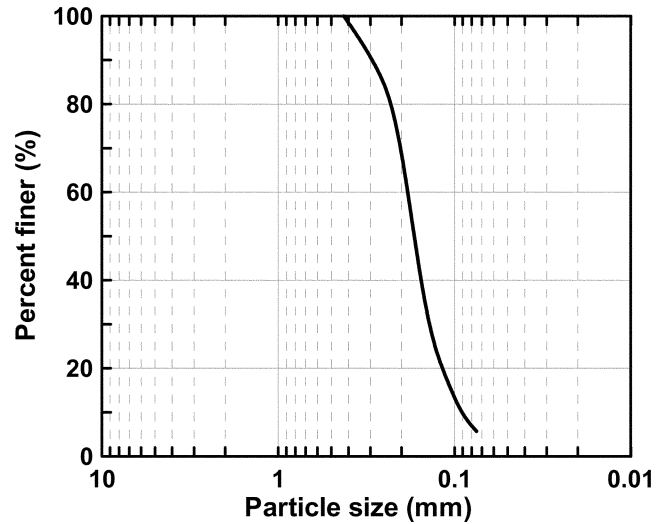


그림 1. K-7호사 입도분포

으로 파쇄된 석영질 모래로써, 입도분포와 기본물성은 그림 1, 표 1과 같다. 모래의 평균입경은 0.17mm이고 통일분류법 상 SP에 해당되며, 조도는 중간 모난(subangular) 정도이다. 본 연구에서 모래 고결을 위해 사용한 도자기용 석고(GM-10)는 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합하여 습윤양생 할 경우 압축강도는 20Mpa 정도이며, 양생시 팽창율은 0.03%이다.

2.2 챔버시스템 및 벤더엘리먼트

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 높이 1.0m, 직경 1.2m 의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입시험을 위한 아

표 1. K-7호사 기본물성

시료	G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	% fines	e_{max}	e_{min}	USCS
K-7	2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	5.70	1.054	0.719	SP

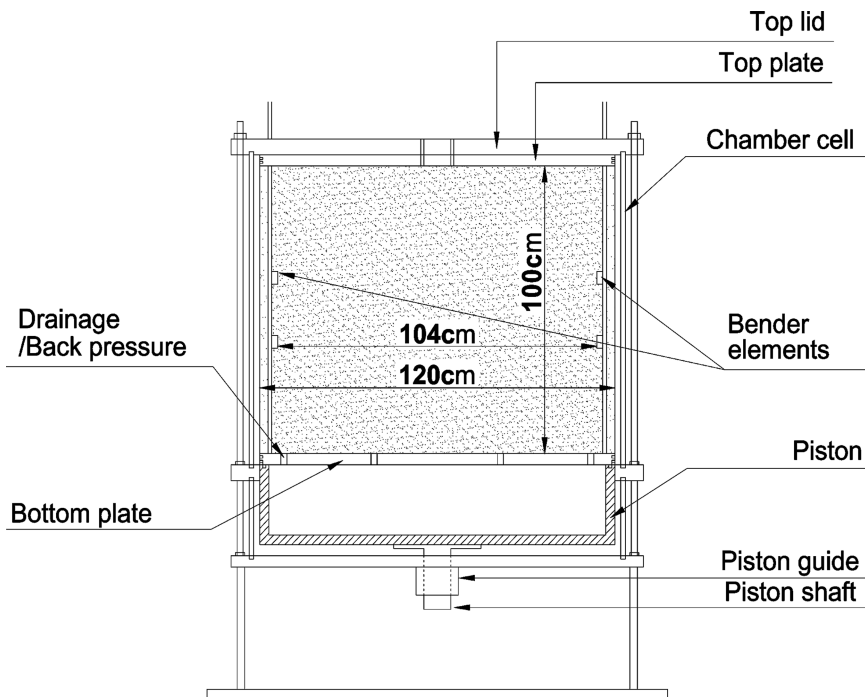


그림 2. 챔버시스템 및 벤더엘리먼트 시험 모식도

답터가 연결된 상판으로 구성되어 있다. 횡방향 경계조건을 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측셀, 외측셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 제어판에서 조절한다. 챔버의 구성 및 작동원리는 Kim(2005)에 설명되어 있으며, 챔버시스템의 모식도는 그림 2와 같다.

시료의 전단파속도 측정을 위해 챔버에 설치된 벤더엘리먼트는 Lee(2003)의 방법을 바탕으로 20.0×10.0×0.6(길이×너비×두께, mm)의 치수로 제작하였다(그림 3). 본 벤더엘리먼트는 발신기와 수신기 사이의 전기적 간섭현상(crosstalk)을 제거하기 위해 병렬형식으로 제작하였으며, 에폭시를 코팅하여 방수처리하였다. 또한 챔버셀을 통해 직접 전달되는 파를 제거하기 위해 셀과 임피던스 차이가 큰 나일론 셋스크류에 벤더엘리먼트를 에폭시 고정하였다(이종섭과 이창호, 2006). 제작된 벤더엘리먼트는 그림 2와 같이 챔버시료의 수평 전단파속도($V_{s(HV)}$) 측정을 위해 설치되었으며, 설치 후 벤더엘리먼트의 끝단거리는 104cm이었다.

2.3 레이저 시스템을 이용한 시료조성 및 전단파 측정 시험

챔버시험에서는 자연의 퇴적상태에서 나타나는 흙의 조직과 유사한 시료를 다양한 상대밀도의 범위에서 전체적으로 균등하게 조성하기 위해 대부분 건조낙사법을 사용하고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Sweeney와 Clough(1990), Puppala 등(1995)의 레이저 시스템을 본 연구의 챔버시스템에 적합하게 개량하였다. 본 레이저 시스템은 모래시료 저장을 위한 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 모래저장고(sand storage), 모래시료의 낙하율을 조절하기 위한 모래저장고 하부의 개폐판(shutter plate), 적정 낙하고를 제공하기 위한 연장튜브(extension tube), 시료의 균일한 낙하를 위한 분산체

(diffuser sieve)로 구성된다. 본 연구에 사용된 레이저 시스템은 Choi(2008)에 자세히 설명되어 있다.

건조된 K-7호사를 목표 상대밀도 40, 60, 80%의 시료 조성을 위한 낙하고와 개폐율로 낙사시키고, 시료상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립하여 미고결 챔버시료를 조성하였다. 조성된 시료에 50~400kPa의 연직구속압과 K_0 압밀에 상응하는 수평구속압을 단계적으로 증가시키면서 시료의 전단파속도를 측정하였다. 균질한 고결시료 조성을 위해 0.5% 함수비로 표면을 습윤시킨 모래시료를 석고와 교반하여 석고입자를 모래표면에 부착시킨 후 낙사함으로써, 석고와 모래입자의 재료분리를 최소화하였다(Rad와 Tumay, 1986; Puppala 등, 1995). 낙사가 완료된 시료의 상대밀도를 측정하고, 시료상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립한 후, 50~200kPa의 연직구속압을 가하였다. 가압에 의한 변위를 보정하여 조성된 시료의 초기 상대밀도를 결정하였다. 고결시료의 경우 시료 하부에 30kPa의 주입압으로 탈기수를 주입한 후, 24시간 양생시켰다. 고결완료 후 추가로 가해지는 구속압에 의해 고결결합이 파괴되는 것을 배제하기 위해, 시료 고결시 작용되었던 연직구속압(50, 100, 200kPa)을 유지한 채 각 고결시료의 전단파속도를 측정하였다. 이러한 방법으로 조성된 시료의 균질성은 이문주 등(2008)에서 확인되었으며, 전체적인 시료조성 및 벤더엘리먼트 시험 조건은 표 2와 같다.

본 연구에서는 20MHz 신호발생기와 신호증폭기를 사용하여 미고결 시료인 경우 약 2.5kHz, 고결시료인 경우 5.0kHz~14.0kHz의 단일정현파를 발생/증폭시켰다. 시료를 통과한 전단파는 수신 벤더엘리먼트에서 감지된 후, 필터-증폭기에서 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후, 오실로스코프를 이용하여 전단파를 측정, 저장하였다. 또한 고주파수 잡음을 제거하기 위해 1024개의 신호를 평균하였으며, 벤더엘

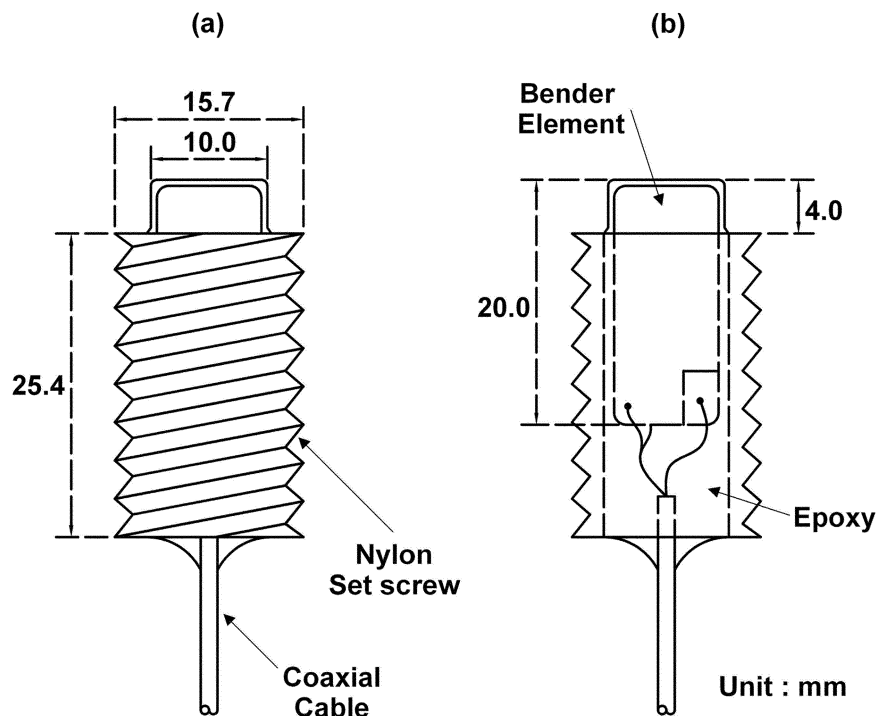


그림 3. 벤더엘리먼트 모식도; (a) 정면도, (b) 투시도(Lee, 2003)

표 2. 조성된 챔버시료 조건

시험시료	석고함유율	상대밀도	연직구속압(kPa)	시료개수
미고결	0%	36 ~ 82	50 ~ 400	3
고결	5%	36 ~ 41	50, 100, 200	9
		57 ~ 59		
		74 ~ 77		
	7%	36 ~ 38	50, 100, 200	9
		51 ~ 55		
		63 ~ 66		
	10%	21 ~ 26	50, 100, 200	9
		38 ~ 40		
		52 ~ 56		

리먼트의 끝단(tip-to-tip)거리로부터 전단파 속도를 계산하였다(Dyvik과 Madshus, 1985; Viggiani와 Atkinson, 1995; Fernandez, 2000). 본 연구에서 벤더엘리먼트의 끝단거리와 전단파의 파장비는 20으로 근접장효과는 발생하지 않을 것으로 판단된다(Lee와 Santamarina, 2005).

3. 시험 결과 및 분석

3.1 미고결 K-7호사의 미소변형 전단탄성계수 검토

일련의 벤더엘리먼트 시험으로부터 결정된 미고결 K-7호사의 전단파속도-상대밀도-응력의 관계는 그림 4와 같으며 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다. Roesler(1979), Stokoe 등(1985)과 마찬가지로 미고결 K-7호사의 경우에도 구속압으로 정규화된 전단파속도는 상대밀도와 선형관계를 만족하였다. 여기서, V_s 는 전단파속도(m/s), p_a 는 대기압(98.1kPa)이고, σ'_0 는 평균유효응력(kPa)이다.

$$D_r(\%) = 1.6 \times \left[\frac{V_s}{(\sigma'_0/p_a)^{0.24}} \right] - 244 \quad (1)$$

Iwasaki와 Tatsuoka(1977)과 Altun과 Goktepe(2006)은 각각 공진주시험과 비틀전단시험을 이용하여 평균입경 0.16~0.17mm인 Toyoura 모래의 G_{max} 를 측정하였다. 또한 Lo Presti 등(1997)은 공진주시험과 비틀전단시험으로부터 평균입경 0.22mm인 Toyoura 모래의 G_{max} 를 측정하였다. 표 3

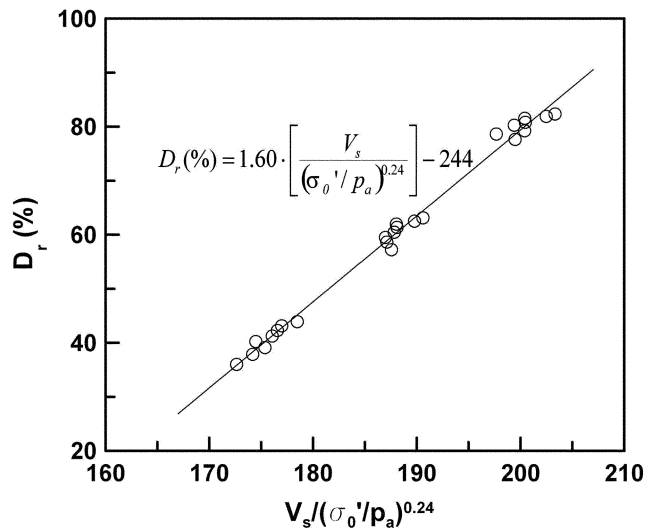


그림 4. 미고결 K-7호사의 상대밀도-구속압-전단파속도 관계

은 이전의 연구에서 결정된 Toyoura 모래와 본 연구에서 결정된 K-7호사의 G_{max} 추정식을 나타낸다. 여기서, e 는 시료의 간극비이다.

표 3의 추정식들로부터 동일 간극비($e=0.85$)에서 평균유효응력에 따른 각 시험모래의 G_{max} 를 그림 5와 같이 비교하였다. 낮은 구속압에서는 Toyoura 모래에 대한 Lo Presti 등(1997)의 추정식이 가장 큰 G_{max} 를 나타내고, 300kPa 이상의 구속압에서는 Iwasaki와 Tatsuoka(1977)의 추정식에 의

표 3. 각 시험모래의 미소변형 전단탄성계수 추정식

Reference	미소변형 전단탄성계수(G_{max})	Sand	시험
Iwasaki와 Tatsuoka (1977)	$900 \times \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \times (\sigma'_0)^{0.5}$ $G_{max}, \sigma'_0, : \text{kg/cm}^2$	Toyourea sand $D_{50}=0.162\text{mm}$ $C_u=1.46$	공진주시험
Lo Presti 등 (1997)	$724 \times e^{-1.3} \times p_a^{0.55} \times (\sigma'_0)^{0.45}$	Toyourea sand $D_{50}=0.22\text{mm}$ $C_u=1.35$	비틀전단시험 공진주시험
Altun과 Goktepe (2006)	$567 \times e^{-1.28} \times p_a^{0.51} \times (\sigma'_0)^{0.49}$	Toyourea sand $D_{50}=0.17\text{mm}$ $C_u=1.43$	비틀전단시험
This study	$336 \times e^{-1.9} \times p_a^{0.49} \times (\sigma'_0)^{0.51}$	K-7 sand $D_{50}=0.17\text{mm}$ $C_u=2.11$	벤더엘리먼트시험

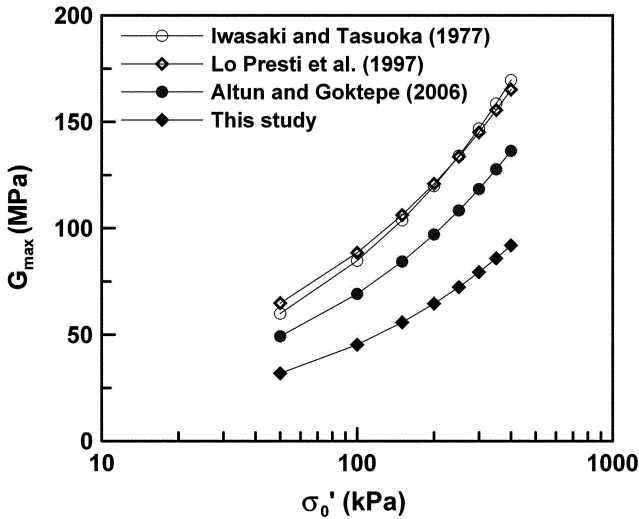


그림 5. 시료 및 시험법에 따른 미고결 사질토의 G_{max} 추정값 비교($e=0.85$)

해 G_{max} 가 가장 크게 평가되었으나, 두 식으로 추정된 G_{max} 는 거의 유사하였다. 반면, Iwasaki와 Tasuoka(1977)와 거의 동일한 시료로부터 결정되었음에도 불구하고, Altun과 Goktepe(2006)에 의한 G_{max} 는 Iwasaki와 Tasuoka(1977)의 G_{max} 보다 약 20% 과소평가되었다. 또한 본 연구에서 결정된 K-7호사의 G_{max} 는 동일 간극비 상태인 Toyoura 모래의 G_{max} 보다 35~50% 작게 평가되었다.

3.2 고결에 의한 전단파속도 변화

지반이 이방성 응력상태에 있는 경우, 전단파속도는 파진 행방향의 응력(σ'_p)과 입자이동방향의 응력(σ'_m)에 의해 식 (2)와 같이 결정된다. α 계수와 β 지수는 입자 구조 이방성 특성에 따라 실험적으로 결정되며, α 계수는 패키지의 형태, 입자 재료의 특성, 입자간의 접촉거동, 구조의 변화에 따라 변화하며, β 지수는 입상매질의 접촉특성(입자크기, 입자모양, 입자들의 구조)에 따라 결정된다(Santamarina 등 2001). Santamarina 등(2001)은 미고결 사질토의 α - β 관계를 식 (3)과 같이 제시하였다. 본 연구에 사용된 미고결 K-7호사의 α 계수는 53~62, β 지수는 약 0.25정도로 식 (3)과 비교적 잘 일치하는 것으로 관찰되었다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_p + \sigma'_m}{2kPa} \right)^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.36 - \frac{\alpha}{700} \quad (3)$$

반면 고결된 K-7호사의 α 계수와 β 지수의 관계를 나타낸 그림 6에 의하면, 고결에 의해 모래의 α 계수가 크게 증가하였다. 즉 5% 석고함유율로 고결된 K-7호사의 α 계수는 384~555의 범위에 있고, 7%, 10% 석고함유율에 의해 499~653, 808~956의 범위로 나타났으며, 상대밀도가 증가할수록 점차 증가하였다. 반면 고결모래의 β 지수는 미고결 모래보다 작은 것으로 관찰되었으며, 석고함유율이 증가할수록 점차 감소하였다. 또한 고결모래의 α - β 관계는 Santamarina 등(2001)의 제시한 미고결 모래의 일반적인 경향과 다르게 나타났다. 미고결 모래에 비해 작은 고결모래의 β 지수는 구속압이 고결모래의 전단파속도에 미치는 영향이 미고결 모

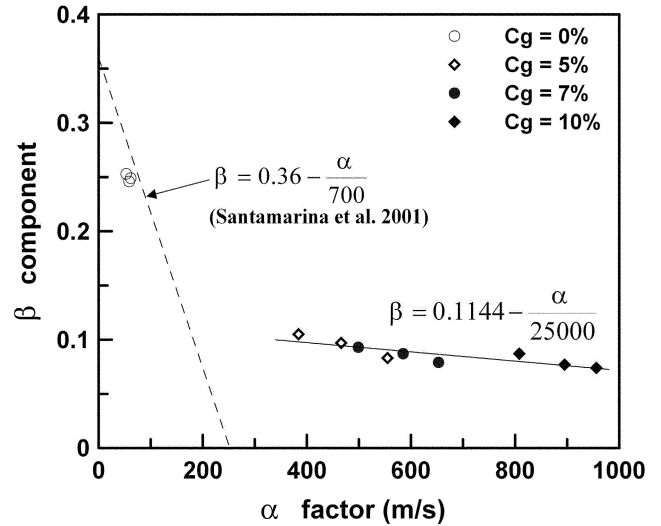


그림 6. 고결 K-7호사의 α - β 관계

래에 미치는 영향보다 적음을 의미한다. 그러나 석고함유율 증가에 의한 β 지수 감소경향보다 α 계수의 증가경향이 더욱 뚜렷하며, 이와 같은 결과는 모래의 고결정도보다 고결여부가 β 지수에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

3.3 고결모래의 미소변형 전단탄성계수에 대한 영향요인 분석

측정된 전단파속도로부터 미고결 모래와 고결모래의 G_{max} 를 결정한 후, 그림 7과 같이 상대밀도에 따른 G_{max} 변화를 도시하였다. 고결모래와 미고결 모래의 G_{max} 는 동일한 연직구속압에서 상대밀도(D_r)가 증가할수록 선형으로 증가하였다. 석고함유율이 증가할수록 G_{max} - D_r 의 기울기가 점차 증가하였으나, 동일 석고함유율에서 구속압이 G_{max} - D_r 의 기울기에 미치는 영향은 크지 않았다. 기존연구에 의하면 사용된 고결유발제의 종류와 시험법 뿐만 아니라, 입자의 특성에 의해 고결모래의 G_{max} 의 범위가 매우 광범위하게 분포하였다. 본 연구의 5% 석고함유율로 고결된 K-7호사의 G_{max} 는 Mohsin과 Airey(2005)의 10% 석고함유율로 고결된 모래의 G_{max} 와 유사하게 나타났다. 일반적으로 입자크기의 감소로 인한 입자간 접촉점의 증가는 고결모래의 G_{max} 증가에 큰 영향을 미치며, 입자 표면이 거칠고 모난 입자일수록 고결유발제를 더 효과적으로 흡착시키기 때문에, 적은 양의 고결유발제로도 K-7호사에 큰 고결효과가 발생되었기 때문이다. 또한 본 연구에서는 적은 양으로도 효율적인 고결을 유발하기 위해 일반적인 석고보다 양생시 더 큰 압축강도를 발현하는 경석고를 사용하였으며, 이 또한 고결된 K-7호사의 G_{max} 증가에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

모래의 G_{max} 에 대한 석고함유율, 상대밀도, 연직구속압의 영향을 분석하기 위해, 동일한 조건에서 고결모래의 $G_{max}(G_{max}(CS))$ 와 미고결 모래 $G_{max}(G_{max}(US))$ 의 비율을 평가하였다. 그림 8(a)는, 연직구속압 100kPa 상태에서, 석고함유율 변화에 따른 고결모래와 미고결 모래의 G_{max} 비를 나타낸다. 5% 석고함유율은 미고결 모래의 G_{max} 를 16~20배 증가시켰으며, 석고함유율이 증가할수록 G_{max} 가 지수적으로 증가하였다. 이와 같은 결과는 시멘트 함유율 1~5%로 고결된 모래의 G_{max} 가 선형으로 증가한 Baig 등(1997)의 결과와는

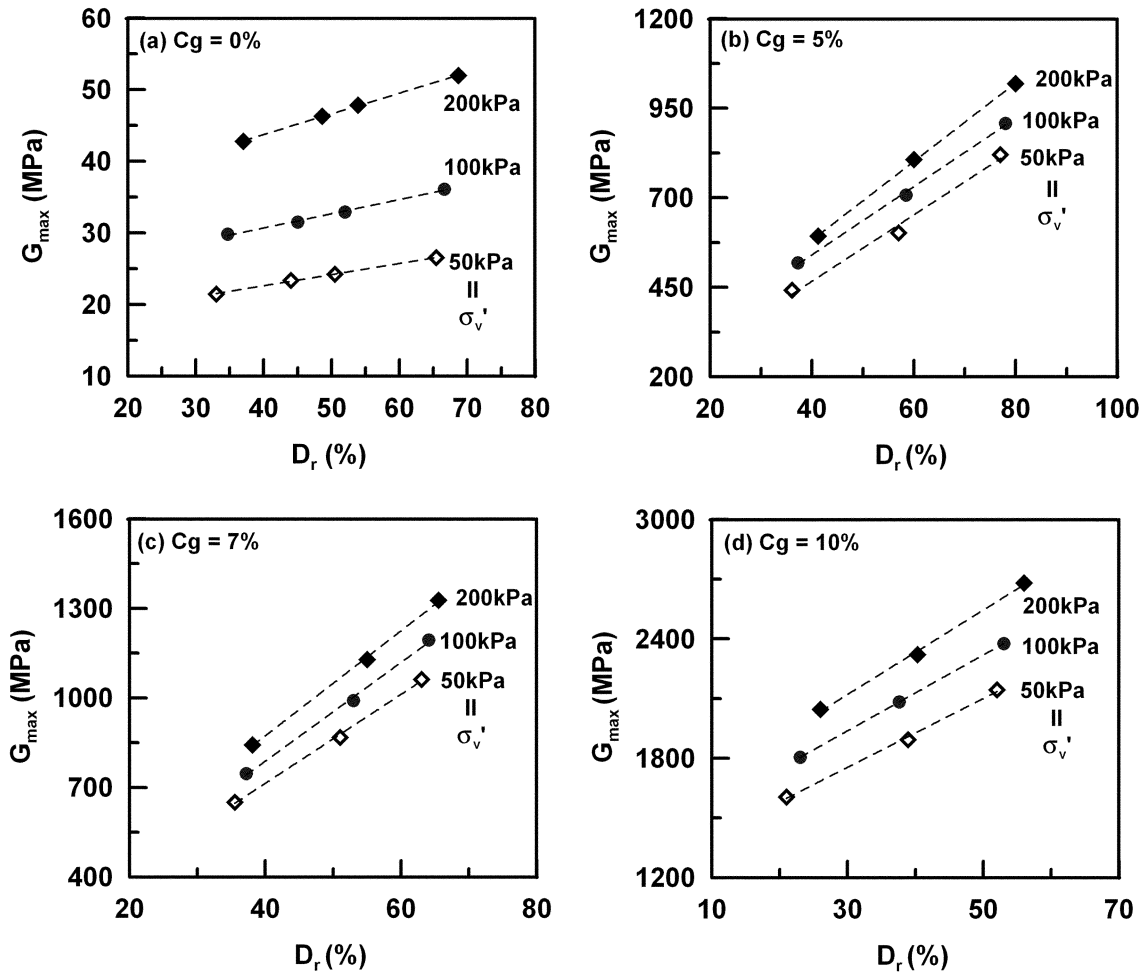


그림 7. 상대밀도에 따른 각 시험모래의 미소변형 전단탄성계수 변화

상이다. Chang과 Woods(1992), Abdulla와 Kiouis(1997)에 의하면 고결유발제의 함유율이 낮은 경우 대부분의 고결유발제는 입자의 표면에 흡착되어 시료의 강도와 강성 증가에 큰 영향을 미치지 못하는 반면, 고결유발제의 함유율이 증가할수록 유발제가 입자간 접촉점에 침전하여 고결결합을 형성하는 비율이 증가한다. 따라서 포틀랜드 시멘트를 5% 미만으로 함유한 Baig 등(1997)의 연구에서는 고결유발제가 대부분 입자 표면에 주로 흡착되었을 것으로 판단된다. Schnaid 등(2001)의 연구에서 1~5% 시멘트로 고결된 시료의 일축압축강도가 선형으로 증가한 반면, Ismail 등(2002)의 연구에서는 6~18%의 시멘트 함유율로 고결시료의 일축압축강도가 지수적으로 증가하였다.

그림 8(b)는 상대밀도 증가가 고결시료의 G_{max} 에 미치는 영향을 나타낸다. 연직구속압 100kPa 상태에서 고결된 시료의 경우, 40%에서 80%까지의 상대밀도 증가에 의해 미고결 모래와 고결모래의 G_{max} 비가 약 1.3~1.4배 증가하였다. 즉 상대밀도가 증가할수록 입자간 접촉점이 증가하여, 고결모래의 G_{max} 가 미고결 모래에 비해 좀 더 큰 폭으로 증가하였다. 반면, 석고함유율 10%의 고결모래의 경우, 상대밀도에 따른 고결모래와 미고결 모래의 G_{max} 비가 거의 일정하였으며, 모래의 고결정도가 큰 경우 상대밀도가 고결모래의 거동에 미치는 상대적인 영향은 감소하는 것을 의미한다.

그림 7에 의하면 50kPa에서 200kPa로 연직구속압이 증가할수록 미고결 모래의 G_{max} 는 2배 이상 증가한 반면, 고결

모래의 G_{max} 는 단지 20~30%만 증가하였다. 그림 8(c)는 이런 결과를 요약한 것으로 연직구속압이 증가할수록 고결이 모래의 G_{max} 에 미치는 영향은 점차 감소하였다. 이와 같은 결과는 구속압의 변화는 고결모래보다 미고결 모래의 G_{max} 에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미하며, Baig 등(1997), Fernandez와 Santamarina(2001), Mohsin과 Airey(2005)의 결과와 유사하다. 반면, Baig 등(1997), Saxena 등(1988)의 연구에서는 시료의 고결정도가 약할수록 구속압의 증가에 의해 G_{max} 의 변화가 더 크게 발생하였으며, 이는 구속압의 증가에 의한 시료의 고결결합이 파괴됨으로써 구속압이 G_{max} 를 증가시켰기 때문이다. 이전의 연구와는 달리, 본 연구의 경우 고결시 가해진 구속압의 변화없이 고결시료의 전단파속도가 측정되었기 때문에, 구속압에 의한 고결결합의 파괴는 전혀 발생하지 않았다. 결론적으로 구속압 변화에 의해 고결결합이 파괴되지 않을 경우, 고결모래의 G_{max} 는 미고결 모래의 G_{max} 에 비해 구속압의 영향을 적게 받는다.

3.4 고결모래의 미소변형 전단탄성계수 추정

고결모래의 G_{max} 를 추정하기 위해 Saxena 등(1988)은 고결에 의해 증가된 G_{max} 를 시멘트함유율, 간극비, 구속압 등의 함수로 표현하였다. 또한 Mohsin과 Airey(2005)은 석고함유율과 간극비 및 구속압 뿐만 아니라, 전단강도로 표현되는 G_{max} 추정식을 제안하였다. 본 연구에서는 고결모래의 G_{max} 에 대한 영향요인 분석 결과를 바탕으로 고결된 K-7호

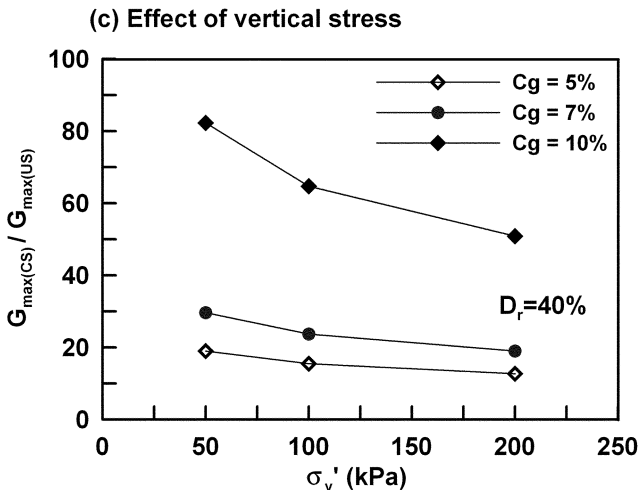
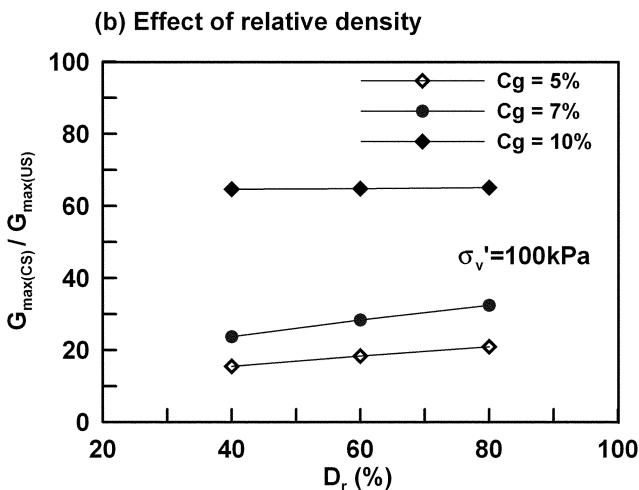
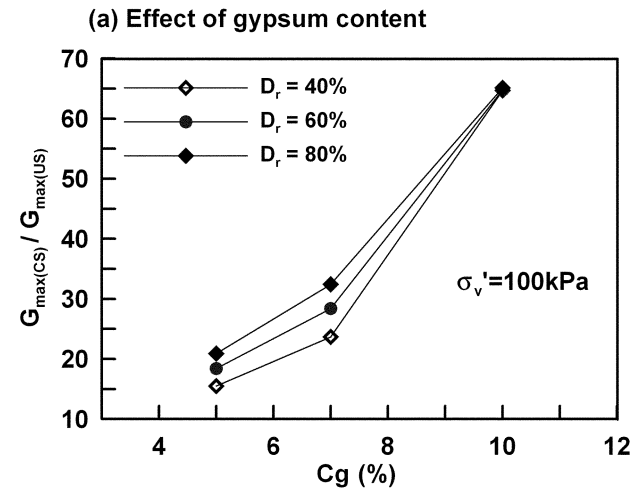


그림 8. 석고함유율, 상대밀도, 연직구속압이 고결모래의 G_{max} 에 미치는 영향

사의 G_{max} 를 식 (4)와 같이 결정하였으며, 그림 9와 같이 측정값과 식 (4)에 의한 추정값을 비교하였다. 여기서, G_{max} , p_a , σ_m 은 모두 kPa 단위이며, $C_g(\%)$ 는 석고함유율을 의미한다. 식 (4)에서 고결된 시료의 G_{max} 는 석고함유율에 따라 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 표 3에 나타난 미고결 K-7호사의 G_{max} 추정식과 비교할 경우, 구속압의 지수는 크게 감소하였으며, 이는 전술한바와 같이 고결모래의 G_{max} 에 대한 응력의 영향이 적음을 의미한다. 또한 간극비의 지수항은 -1.9에서 -3.62로 감소하였으며, 이는 고결 발생시 간극

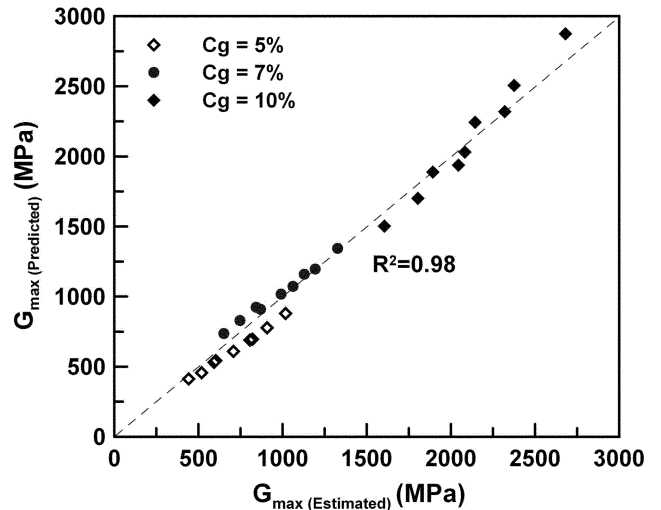


그림 9. 고결모래의 G_{max} 비교(측정값과 추정값)

비의 영향이 증가하였던 Mohsin과 Airey(2005)의 경향과 일치한다.

$$G_{max} = 860 \times \exp(0.3C_g) \times e^{-3.62} \times (p_a)^{0.86} \times (\sigma'_m)^{0.14} \quad (4)$$

4. 결 론

본 연구에서는 대형 챔버에 조성된 미고결, 고결시료에 대해 실시한 벤더엘리먼트 시험으로부터 사질토 미소변형 전 단탄성계수인 G_{max} 를 평가하고, 고결된 사질토의 G_{max} 에 미치는 영향요인을 분석하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 미고결 모래와 고결모래의 G_{max} 추정식을 제안하고 이전의 결과와 비교하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서 사용된 파쇄모래의 G_{max} 는 기존의 자연상태 모래의 G_{max} 보다 35~50% 정도 작은 것으로 관찰되었다. 반면, 석고로 고결된 파쇄모래의 G_{max} 는 이전 연구에 나타난 고결모래의 G_{max} 보다 다소 크게 결정되었다. 따라서 모래의 G_{max} 를 추정함에 있어 시험방법 뿐만 아니라 시험모래의 특성, 그리고 고결에 사용되는 유발제의 특성까지 복합적으로 고려되어야 한다.
2. 모래의 G_{max} 는 고결유발제 함유율의 영향을 가장 크게 받으며, 유발제 함유율에 따라 지수적으로 증가하였다. 또한 상대밀도의 증가는 입자간 접촉점을 증가시켜 모래의 G_{max} 를 증가시키지만, 미고결 모래보다 고결모래의 G_{max} 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
3. 구속압 변화에 의해 고결결합이 파괴되지 않을 경우, 구속압 증가는 고결모래의 G_{max} 보다 미고결 모래의 G_{max} 증가에 더 큰 영향을 미친다.
4. 본 연구에서 사용된 K-7호사의 G_{max} 도 이전의 연구와 마찬가지로 간극비와 구속압으로 표현되었으며, 석고함유율에 따라 지수적으로 증가하는 고결된 K-7호사의 G_{max} 추정식이 결정되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원

에서 위탁 시행한 2004~2007년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : C104A1000009-06A0200-00800)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진(2008) 낙사범으로 조성된 대형 석고 고결시료의 균질성, *한국지반공학회논문집*, 한국지반공학회, Vol. 24, No. 1, pp. 91-99.
- Abdulla, A.A. and Kioussis, P.D. (1997) Behavior of cemented sands - I. Testing. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 21, No. 8, pp. 533-547.
- 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.
- Altun, S. and Goktepe, A.B. (2006) Dependence of dynamic shear modulus of uniform sands on stress level and density. *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 101-116.
- Baig, S., Picornell, M., and Nazarian, S. (1997) Low strain shear modulus of cemented sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 540-545.
- 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.
- 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.
- Choi, S.K. (2008) *Estimation of stress history of sands using CPT and DMT*, Ph.D. thesis, Korea University.
- Dyvik, R. and Madshus, C. (1985) Lab measurements of G_{max} using bender element, *Proceeding, ASCE Convention on Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Condition*, pp. 186-196.
- Fernandez, A.Z. (2000) *Tomographic imaging the state of stress*, Ph.D. thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takagi, Y. (1978) Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-56.
- Kim, T.J. (2005) *Dissipation of porewater pressure due to piezocone penetration in OC clay*, Ph.D. dissertation, Korea University.
- Lee, J.S. (2003) *High resolution geophysical techniques for small-scale model testing*. Ph.D. thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2005) Bender elements: Performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
- Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A., and Pedroni, S. (1997) Shear modulus and damping of soils. *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 603-617.
- Mohsin, A.K.M. and Airey, D.W. (2005) Influence of cementation and density on G_{max} for sand, *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering(ICSMFE)*, Tokyo, Japan, pp. 413-416.
- 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.
- 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.
- Roesler, S.K. (1979) Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 105, No. 7, pp. 871-880.
- Santamarina, J.C., Klein, K.A., and Fam, M.A. (2001) *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley and Sons, New York.
- 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.
- 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.
- 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, New York, pp. 166-185.
- 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.
- Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995) Interpretation of bender element tests, *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 149-154.
- 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.

(접수일: 2008.12.22/심사일: 2009.2.16/심사완료일: 2009.2.16)