

과압밀비와 함수비를 고려한 실트질 사질토 지반의 강도 및 변형 특성

Strength and Stiffness of Silty Sands with Different Overconsolidation Ratios and Water Contents

김 현 주¹ Kim, Hyun-Ju
이 경 숙² Lee, Kyoung-Suk
이 준 환³ Lee, Jun-Hwan

Abstract

For geotechnical design in practice, soils are, in general, assumed to behave as a linear elastic or perfect plastic material. More realistic geotechnical design, however, should take into account various factors that affect soil behavior in the field, such as non-linearity of stress-strain response, stress history, and water content. In this study, a series of laboratory tests including triaxial and resonant column tests were performed with sands of various silt contents, relative densities, stress states, OCR and water contents. This aims at investigating effects of various factors that affect strength and stiffness of sands. From the results in this study, it is found that the effect of OCR is significant for the intermediate stress-strain range from the initial to failure, while it may be ignored for the initial stiffness and peak strength. For the effect of water content, it is observed that the initial elastic modulus decreases with increasing water content at lower confining stress and relative density. At higher confining stresses, the effect of water content is found to become small.

요 지

지반설계에 있어 지반거동은 일반적으로 단순화된 선형탄성이나 완전소성으로 간주되어 적용되고 있으나, 비선형 응력-변형률 거동, 응력이력 및 함수비 등의 현장 지반조건 또한 정밀한 지반설계를 위해서는 적절히 반영되어야 한다. 본 연구에서는 삼축압축시험과 공진주시험을 포함한 일련의 실내시험을 통하여 실트함유량, 상대밀도, 응력상태 등 다양한 지반조건과 과압밀비 및 함수비의 변화와 같은 현장 지반조건을 고려하여 사질토의 강도 및 강성도 특성을 분석하였다. 그 결과 최대전단강도 및 초기전단탄성계수에 대한 과압밀의 영향은 미소하게 나타났으나, 초기 미소변형률 이후부터 파괴까지의 비선형 탄성구간에서는 과압밀의 영향이 무시할 수 없는 영향인자임을 확인할 수 있었다. 함수비의 경우 구속압과 상대밀도가 낮은 경우 함수비가 증가함에 따라 초기전단탄성계수는 세립분 증가와 함께 감소하였으며, 구속압이 증가할수록 함수비의 영향은 감소하였다.

Keywords : Initial shear modulus, Over-consolidation ratio, Resonant column tests, Shear strength, Triaxial tests, Water content

1 연세대학교 건설공학연구소 연구원 (ShinSung Engrg. Geotechnical Department)

2 정회원, 현대건설 기술개발원 사원 (Member, Hyundai Construction Technology Development)

3 정회원, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, Asst. Prof., School of Civil & Env. Engrg., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 현장지반은 순수 모래로 구성되는 경우는 매우 드물며, 많은 경우에 있어 일정량의 세립분을 포함하고 있는 혼합토의 형태를 나타내고 있는 경우가 대부분이다. 이러한 경우 세립분 함유량에 따른 지반거동의 변화는 매우 중요한 고려사항으로 간주될 수 있으며, 변화특성 또한 함수비나 응력상태와 같은 현장 지반 상태에 따라 달라지므로 이에 대한 구체적 규명은 매우 중요한 사항이다.

과압밀과 함수비에 따른 거동특성은 주로 점토질 지반에서 매우 중요한 고려사항으로 간주되고 있다. 사질토로 구성된 기초지반의 경우, 굴착이나 성토 등에 의해 지중응력의 많은 변화가 나타나게 되며, 대상심도나 기존 구조물과 같은 각종 여건에 따라 과압밀상태를 보일 수 있으며, 지반거동 역시 많은 영향을 받게 된다. 특히 파괴 이전의 강성도와 지반변형에 있어서는 중요한 영향인자로 작용하는 것으로 알려져 있다 (Yamashita 등 2000). 이러한 사질토 지반에 있어서의 과압밀비의 영향은 많은 경우 안전측으로 간주되어 무시되고 있으나, 보다 세부적이고 정밀한 지반설계를 위해서는 다양한 지반조건과 더불어 과압밀상태와 같은 응력이력의 영향도 고려되어야 할 것이다. 또한 사질토 지반은 일반적으로 완전배수상태로 간주되어 함수비의 영향은 무시되고 있으나, 실트와 같은 세립분이 포함되어 있을 경우, 함유량에 따라 순수사질토와 상이한 배수조건을 나타내게 되며 거동특성도 달라질 수 있으므로 이에 대한 구체적 규명과 분석이 요구된다.

본 연구에서는 세립분이 포함된 사질토 지반을 대상으로 앞서 언급된 바와 같이 실제 현장에서 나타날 수 있는 중요 영향인자를 반영함으로써 다양한 지반조건 하에서의 거동특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 각종 실내시험을 실시하였으며, 그 결과를 토대로 초기미소변형률 구간을 대표하는 초기탄성계수, 응력수준에 따른 감쇠특성 및 파괴강도의 변화추이에 초점을 맞추어 분석을 수행하고자 한다. 본 연구에서 수행된 실내시험은 기본물성시험과 더불어 삼축압축시험 및 공진주시험을 포함하며, 다양한 값의 세립분 함유량, 과압밀비 및 함수비 등이 시험에 반영되었다.

2. 미소변형률구간에서의 초기탄성계수 및 감쇠특성

2.1 미소변형률 상태에서의 초기전단탄성계수

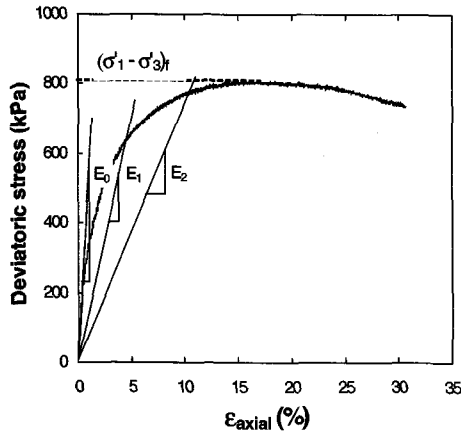
초기탄성계수는 선형탄성구간으로 간주될 수 있는 초기미소변형률 영역을 대표하는 물성치로서, 응력 및 변형률 수준에 따른 탄성계수 감쇠 및 비선형 특성분석의 기준설정을 위한 중요한 지반특성치이다. 초기탄성계수는 구속압과 상대밀도 등의 지반상태에 따라 변화하며, 이의 평가를 위해서는 현장시험, 실내시험 및 경험식 등 다양한 방법들이 적용될 수 있다(Hardin and Black, 1966; Ishibashi and Zhang, 1993). 이들 중 Hardin과 Black (1966)이 제안한 경험식은 초기전단탄성계수(G_0) 산정을 위해 널리 적용되고 있는 방법 중 하나로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 구속압과 간극비의 영향이 고려되어 있다.

$$G_0 = C_g p_A^{1-n_g} \frac{(e_g - e_0)^2}{1+e_0} \sigma'_m{}^{n_g} \quad (1)$$

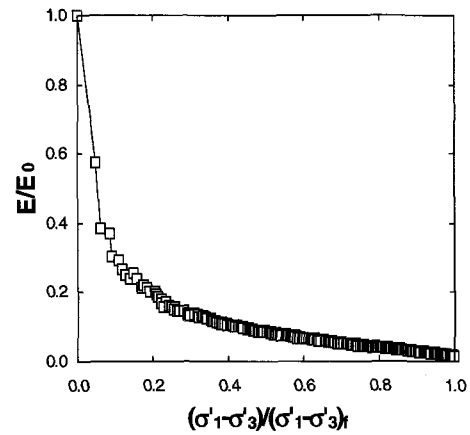
여기서, C_g , e_g , n_g 는 지반의 고유특성에 따른 지반상수, $p_A(=100\text{kPa})$ 는 기준압력, σ'_m 은 평균 유효응력이며, e_0 는 초기간극비이다. Hardin and Black(1966)의 식 (1)은 등근 Ottawa sand에 대하여 수행된 공진주시험 결과를 통해 도출되었으며, 미소변형률 구간으로 간주될 수 있는 전단변형률 10⁻⁴% 이하에서의 초기전단탄성계수 추정식이다. 본 연구에서도 다양한 조건하의 모래질 흙의 초기탄성계수 결정 및 정량화를 위해서 식 (1)을 적용하였으며, 이를 위한 지반상태별 지반 정수의 값들 또한 실험을 통해 도출하였다.

2.2 비선형 응력-변형률 거동 및 탄성계수 감쇠특성

실제 지반의 응력변형률 거동은 초기탄성계수에 의해 정의되는 선형탄성구간을 제외하고, 대부분 비선형 응력-변형률 거동을 나타내므로, 지반거동을 선형탄성으로 가정하여 해석할 경우 실제 지반거동과 상당한 차이를 나타낸다. 비선형 특성은 임의의 응력 또는 변형률 수준에서 결정되는 할선탄성계수 E_s 의 변화추이로서 대표될 수 있으며, 상대밀도, 실트함유량 및 응력상태와 응력이력 등의 지반조건에 따라 그 특성이 결정된다. 따라서 응력-변형률 곡선과 응력단계에 따른 탄성계수 감쇠현상은 지반조건별 감쇠곡선의 형상 및 감쇠율로써



(a) 응력-변형률 곡선



(b) 탄성계수 감쇠곡선

그림 1. 지반의 비선형성(Lee and Salgado, 2004)

정량화가 가능하며, 그림 1은 느슨한 상태 Ottawa sand의 응력변형률 거동특성과 파괴시까지의 탄성계수 감쇠곡선을 도시한 그림이다(Lee and Salgado, 2004).

Hyperbolic 모델은 응력-변형률 관계를 비선형 거동으로 나타내기 위해 지반공학 분야에서 널리 사용되어져 온 모델 중 하나로서(Kondner, 1963; Duncan and Chang, 1970; Fahey and Carter, 1993), 본 연구에서도 실트가 함유된 사질토 지반에서 정규압밀상태와 과압밀상태의 거동특성을 분석하고자 hyperbolic 모델을 적용하였다. Duncan and Chang(1970)이 제안한 hyperbolic 모델에 근거해 전단응력 τ 및 변형률 γ 관계를 적용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{G}{G_0} = 1 - R_f \frac{\tau}{\tau_{max}} \quad (2)$$

여기서, G_0 와 G 는 각각 미소변형률 구간에서의 초기전단탄성계수와 할선전단탄성계수, τ 와 τ_{max} 는 각각 현재 상태의 전단응력과 최대전단응력, R_f 는 파괴비이다. Fahey and Carter(1993)는 보다 실질적인 비선형 탄성계수 감쇠 관계를 표현하기 위해 다음 식 (3)과 같은 수정 hyperbolic 모델을 제안하였다.

$$\frac{G}{G_0} = 1 - f \left(\frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^g \quad (3)$$

여기서, 매개변수 f 는 파괴비로 식 (2)의 R_f 와 동일한 의미이고, 매개변수 g 는 감쇠곡선의 형상 및 감쇠율을 결정한다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 변수 f 와 g 는 탄성계수의 응력 변화에 따른 감쇠 특성을 나타내고 있으며, 지반거동의 비선형성은 이들 변수의 구체적 정량화를

통해 정의될 수 있다. 본 연구에서는 실트함유량, 과압밀비, 함수비 등의 지반조건 변화를 통해 f 와 g 값의 변화추이를 도출하고자하며, 이에 근거하여 현장 지반조건에 따른 변형 특성을 분석하고자 한다.

3. 시험시료와 시험방법 및 특성

3.1 시험시료

본 연구에서의 대상시료는 주문진표준사(이하 표준사)와 실트(silt)가 사용되었다. 표준사의 경우 기본적인 물성이 알려져 있어 기존 자료와 비교 및 적용성이 높으며, 실트의 경우 주성분이 규석(silica stone)으로 이루어진 입경이 No. 200 체(mesh)를 통과한 비소성(non-plastic) 실리카 분말이다. 따라서 실트는 0.074mm 이하의 입자로 구성된 입도가 균질한 규격제품을 사용하였다. 실트함유량에 따른 사질토의 강성도 및 응력-변형률 특성을 확인하기 위하여 실내시험인 삼축압축시험과 공진주시험이 수행되었으며, 기본물성 파악을 위해 입도분포시험(체분석시험, ASTM D 422-63), 비중시험(ASTM D 854-00) 및 최대·최소건조단위중량시험(ASTM D 4253-00, ASTM D 4254-00)이 수행되었다. 최대건조단위중량은 오븐에서 건조시킨 시료를 전자기식 수직테이블을 이용하여 일정시간 진동을 가한 뒤 진동 전후의 체적변화량을 측정하여 도출하였으며, 최소건조단위중량의 경우 부피 2830cm³ 몰드에 깔대기식 부상을 이용하여 몰드 내 시료를 최대한 느슨하게 형성하는 방법을 사용하였다. 각 시료 조건별 기본물성결과는 표 1과 같다. 또한 최적함수비의 결정을 위해 추가적으로 표준사와 실트

표 1. 실트함유량에 따른 기본물성시험결과

구 분	실트함유량					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
유효입경 (D_{10} , mm)	0.43	0.38	0.25	-	-	-
균등계수 (C_u)	1.47	1.55	2.36	-	-	-
비중 (G_s)	2.61	2.62	2.62	2.64	2.64	2.64
최대건조단위중량 ($\gamma_{d,max}$, kN/m^3)	15.69	16.18	17.36	17.75	18.55	19.41
최소건조단위중량 ($\gamma_{d,min}$, kN/m^3)	13.63	14.02	14.27	14.61	14.80	14.87
최대간극비 (e_{max})	0.878	0.832	0.801	0.772	0.749	0.741
최소간극비 (e_{min})	0.631	0.588	0.480	0.459	0.395	0.334

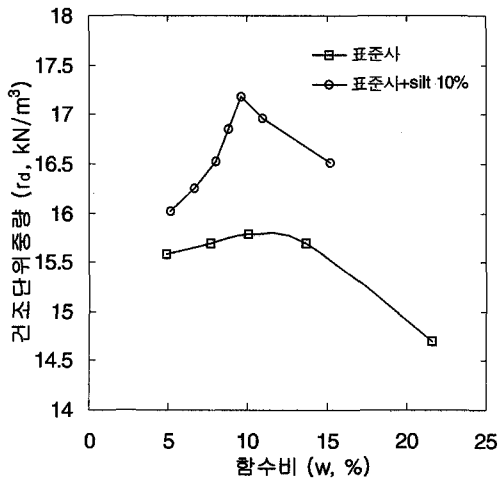


그림 2. 함수비와 건조단위중량의 관계

함유량 10%에 대한 다짐시험(ASTM D 698-00)을 수행하였으며, 표준사의 경우 대략 최적함수비 10.1%, 실트 함유량 10%인 경우 최적함수비 9.6%를 나타내었다(그림 2).

3.2 수행 시험 및 방법

본 연구에서 수행한 삼축압축시험과 공진주시험의 세부 시험조건은 실트함유량, 상대밀도 및 구속압 등에 의한 영향을 고려할 수 있도록 세분화하여 설정하였으며, 실트함유량은 실트질이 다일러턴시(dilatancy)를 유발하여 강도 증진에 영향을 줄 수 있는 범위인 실트함유량 20%(Yamamuro and Lade 1998)까지로 설정하였다. 또한 전체중량비를 기준으로 실트함유량을 0%, 10%, 그리고 20%인 3개의 그룹으로 나누었으며, 상대밀도 설정은 느슨한 상태와 조밀한 상태에서의 거동 특성에 대한 비교 및 분석을 위해 30%와 70%의 범위로 구분하여 적용하였다.

시험시료는 삼축압축시험의 경우 표준 다짐봉을 이용한 스플릿 몰드내 시료를 5층으로 다지는 과소다짐

법, 즉 under-compaction법(Ladd 1978)을 이용하여 직경 50mm, 높이 100mm의 공시체로 성형하였다. 이 방법은 각 층에 대해 서로 다른 다짐높이로 성형하여 다짐 시료 전체의 균일한 건조단위중량을 확보하는 시료 성형방법으로 아래층이 더 조밀하게 다져지는 것을 방지할 수 있으며, 각 시료 층 사이에는 트리밍과 스크래칭을 통하여 각 층간 분리현상을 방지하였다. 시료를 예비 포화 시킨 후 삼축 cell을 삼축기 프레임으로 옮겨 설치한 후, 구속압을 점진적으로 가하여 Skempton의 간극수 압계수 B값이 0.95 이상이 되면 다음 단계인 압밀을 실시하였다. 과압밀상태를 구현하기 위해 유효구속압을 200kPa, 압밀시간은 2시간으로 설정하였고, 첫 압밀이 끝남과 동시에 유효구속압 100kPa이 적용되도록 하여 압밀을 2시간 설정하여 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 Clarence K. Chan이 개발한 자동화삼축시험기(Automatic triaxial testing system)가 사용되었으며, 시험기의 구성은 그림 3, 표 2와 같다.

공진주시험기의 경우 구속시스템은 600psi(=4137kPa)까지 저항할 수 있는 구속압 챔버, 레귤레이터 압력계 등으로 구성되어 있으며(그림 4), 시료의 성형조건은 삼축 시험과 동일하게 과소다짐법을 적용하였다. 시료 직경 71mm, 높이 142mm를 기준으로 제작하여 시료 제작 후 시료의 상, 중, 하 부분에 해당하는 직경과 높이를 측정하여 체적을 도출하였으며, 이 체적과 시험 완료 후 시료를 건조로에서 건조시켜 무게를 측정함으로써 중량을 이용하여 실제 시험에 적용했던 시료의 상대밀도 등의 상태를 최대한 고려할 수 있도록 하였다. 시료 제작이 완료되면 시료교란을 일으키지 않도록 주의하면서 드라이브 플레이트를 안착시키고, 계측을 위한 LVDT를 장착하고 외부 구속장치를 조립하여 시료 구성을 완료하도록 하였다. 결과 값 측정은 낮은 구속압에서 높은 구속압으로 변화시켜 가며 구속압별로 드라이브 시스템

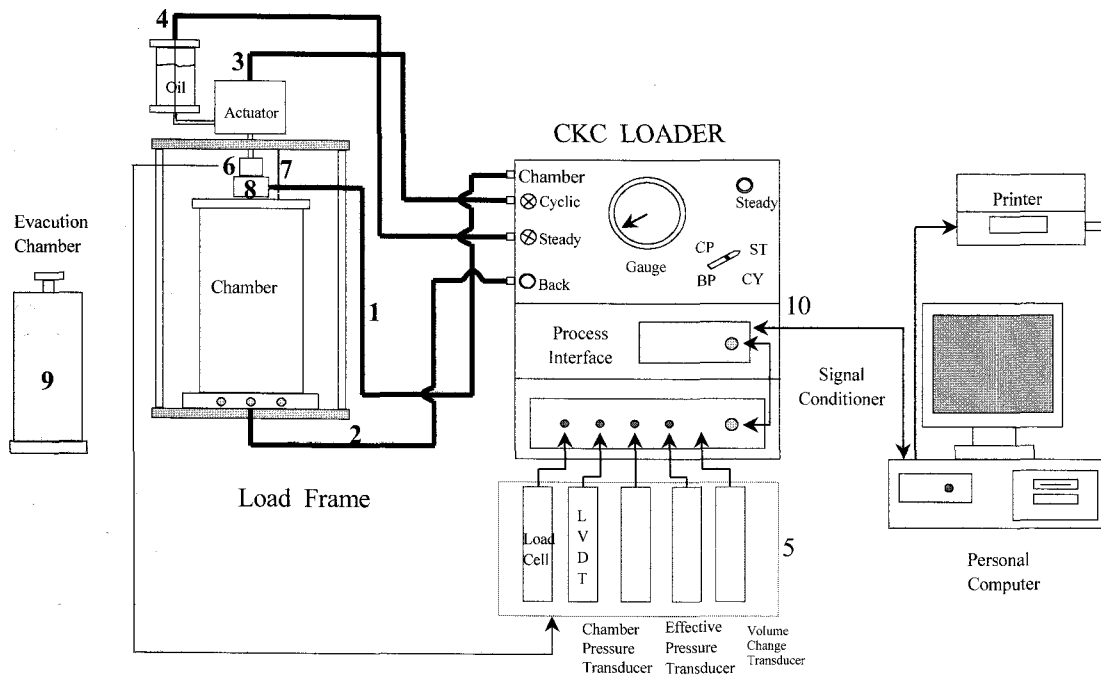


그림 3. 삼축시험기의 구성

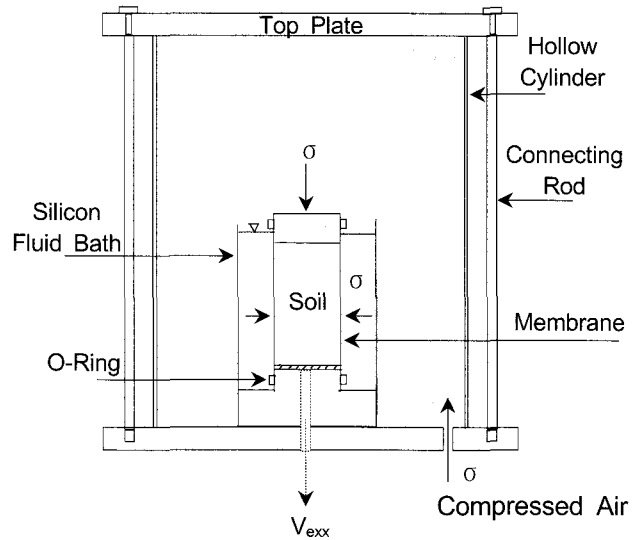
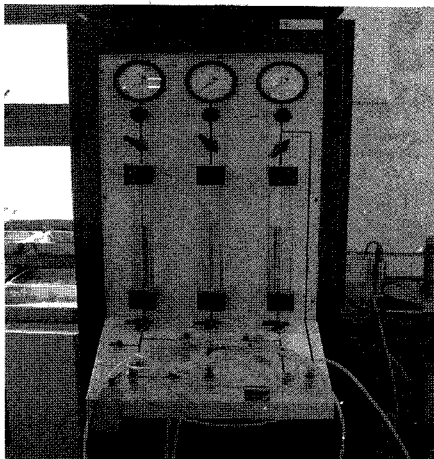


그림 4. 공진주시험에 사용된 가압장치 및 구속시스템

표 2. 삼축압축기의 구성

1	Chamber Pressure Line	6	Load Cell
2	Back Pressure Line	7	LVDT
3	Cyclic Pressure Line	8	Pressure Cell
4	Steady Pressure Line	9	Evacuation Chamber
5	Transducer	10	5-way valve

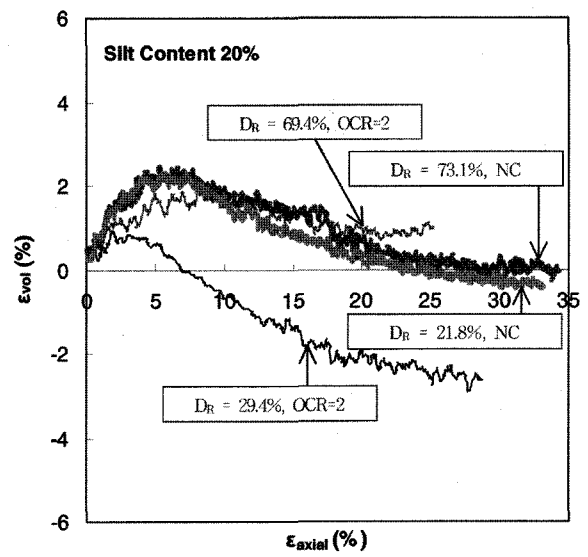
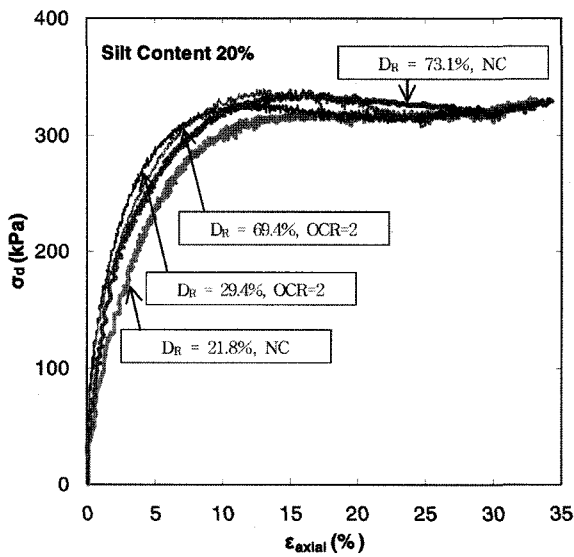
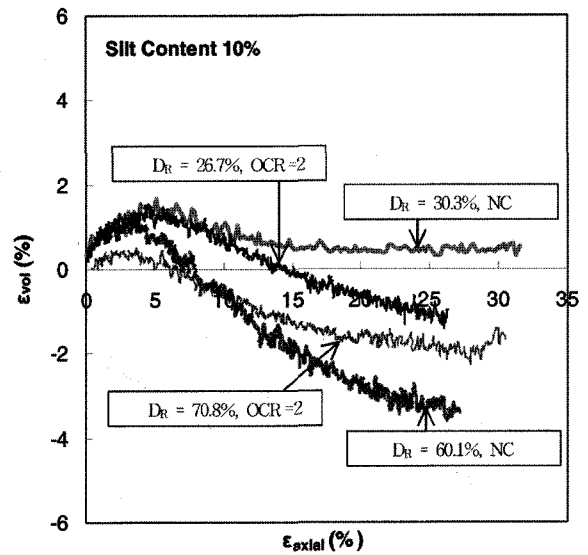
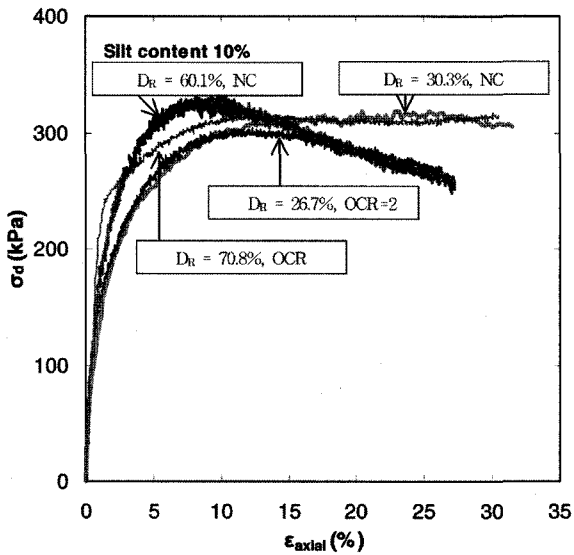
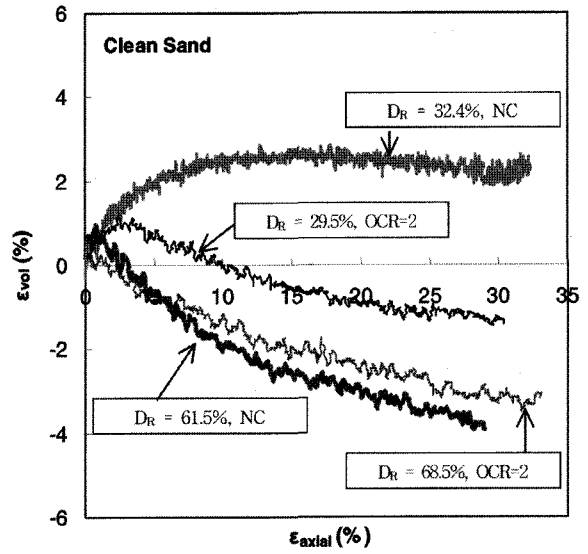
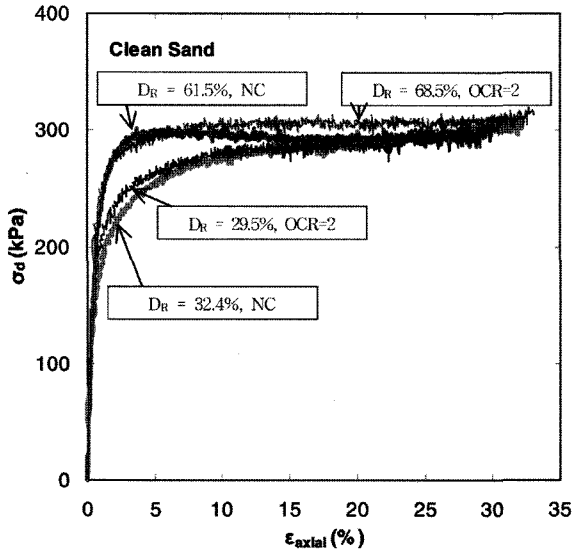
으로 공급되는 전압의 크기를 변화시킨 다음 AC전압계의 출력이 최대가 될 때의 공진 진동수를 찾도록 하였다. 과압밀상태를 구현하기 위해서 동일한 시료에 대해

높은 구속압을 가하여 압밀시킨 뒤 결과를 도출하고, 다음 단계로 과압밀상태를 구현하기 위해 낮은 구속압(높은 구속압의 절반)을 가하여 압밀시키는 방법을 통하여 구속압별 과압밀상태를 적용하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 과압밀상태에 의한 강도 및 초기강성도 변화 추이

삼축압축시험을 수행하여 표준사, 실트함유량 10%,



(a) 응력-변형을 곡선

(b) 체적변형을 곡선

그림 5. 실트함유량에 따른 정규압밀 및 과압밀상태에서의 삼축압축시험 결과

그리고 실트함유량 20%인 3개의 그룹으로 나누어 조건 별 응력-변형률 곡선과 체적변형률 곡선을 얻으며, 그 결과는 그림 5와 같다. 표준사의 경우 상대밀도와 압밀 상태에 따른 최대축차응력(파괴시 축차응력)을 비교하면, 상대밀도가 비슷한 경우 최대축차응력은 뚜렷한 차이를 나타내지 않고 있다. 정규압밀상태에 비해 과압밀 상태에서의 최대축차응력은 미소하게 증가하였으나, 이는 상대밀도 차이에 의한 것으로 실질적인 과압밀에 의한 영향이라고 설명할 수 없을 것으로 보이며, 따라서 순수 사질토 지반에서 전단강도에 대한 과압밀의 영향은 미미한 것으로 판단된다.

실트함유량 10%인 경우 최대축차응력은 표준사에서와 마찬가지로 과압밀에 의한 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 최대축차응력은 상대밀도가 높은 경우 축변형률 약 7% 지점을 전후하여 발생하고 있으며, 상대밀도가 낮은 경우 축변형률 10%를 지난 지점에서 발생되어 표준사와 유사한 경향을 나타내었으나, 체적팽창 따른 다일러턴시현상은 표준사에 비해 다소 증가하는 것으로 나타났다.

실트함유량이 20%인 경우, 순수표준사와 실트함유량 10%인 경우와 동일하게 과압밀에 의한 최대전단강도의 영향은 없다고 판단된다. 그러나 최대축차응력의 발현 지점을 확인해 보면, 상대밀도가 높은 경우에도 표준사와 실트함유량 10%일 때와 달리 상대밀도가 낮은 경우와 유사하게 축변형률(ϵ_a) 12% 이상인 지점에서 발현했음을 확인할 수 있으며, 체적팽창에 따른 다일러턴시 경향은 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 실트함유량이 일정량 이상 혼합됨으로 인하여 실트입자가 전반적인 거동의 지배적인 요소로 작용하게 되어 입자간의 물리적 특성 또한 변화하여 강도발현 및 다일러턴시 현상에 영향을 준 것으로 판단되지만, 과압밀비가 낮은 범위에서는 최대전단강도에 끼치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 초기전단탄성계수 도출을 위한 공진주시험의 경우, 삼축압축시험과 동일하게 3개의 그룹으로 나누어 시험이 수행되었으며, 정규압밀상태와 과압밀상태로 구분하여 분석한 결과는 그림 6과 같다. 시료 성형시 원하는 목표 상대밀도에 맞추어 시료를 성형한 뒤 구속압을 가하여 정규압밀상태의 시험값을 획득하고 그 시료에 대해 다시 낮은 구속압을 가하여 과압밀 상태의 시험값을 측정하도록 하였다. 즉, 그림 6에 나타난 간극비는 포화된 점토지반의 시료와 같이 물의 배수량에 따른 간극비를 고려한 것이 아니라 건조된 사

질토 시료에 대한 공기압축량에 따른 간극비로 구속압에 따른 간극비의 변화는 고려하지 않았으며, 이에 따라 정규압밀상태와 과압밀상태에서 초기간극비는 동일한 값을 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 모든 실트함유량의 경우에서 과압밀에 의한 초기탄성계수의 변화량은 강도에서와 마찬가지로 미미한 것으로 관찰되고 있으며, 이는 초기탄성계수가 응력역에는 커다란 영향을 받지 않으며 입자들에 의해 구성되고 있는 절대 간극비가 중요한 지배인자로 작용함을 나타내고 있다.

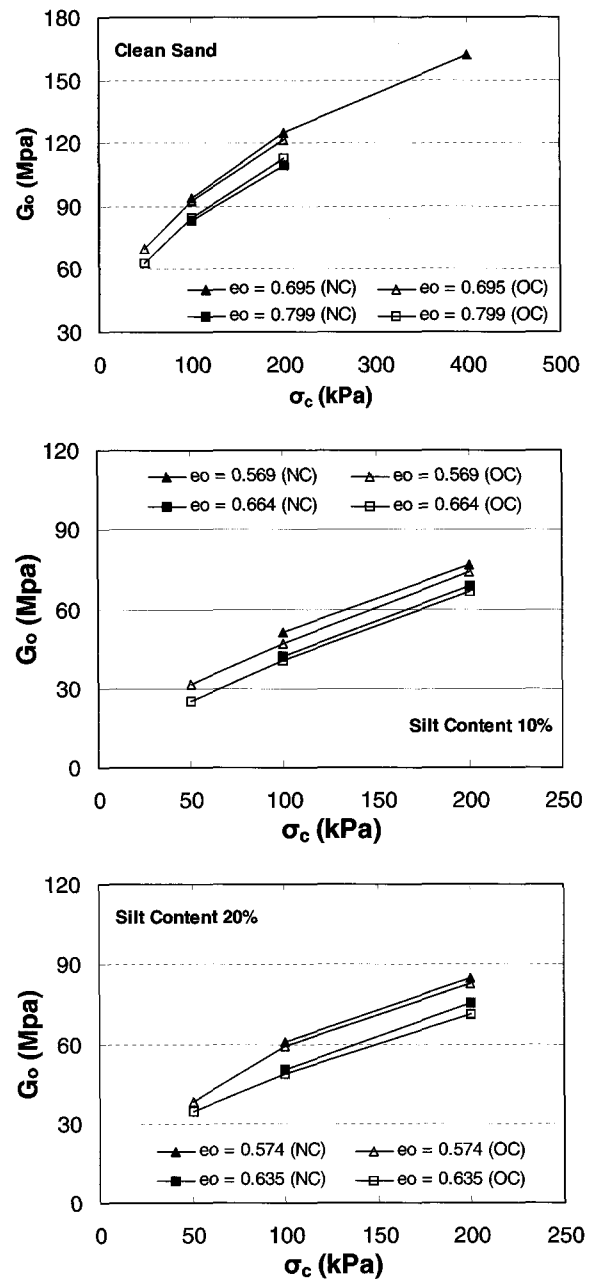


그림 6. 실트함유량에 따른 정규압밀상태와 과압밀상태의 초기전단탄성계수 비교

4.2 실트함유량별 비선형 감쇠곡선 도출

지반요소의 비선형 응력-변형률 거동 및 강도특성은 탄성계수 감쇠곡선을 통해 정량화될 수 있다. 따라서 실트질 지반에서 정규압밀상태와 과압밀상태의 탄성계수 감쇠 매개변수를 산정하고자 본 연구에서 수행한 압밀 상태에 따른 삼축압축시험의 결과와 초기전단탄성계수를 이용하여 정규화한 응력단계별 탄성계수 감쇠곡선을 도출하였다.

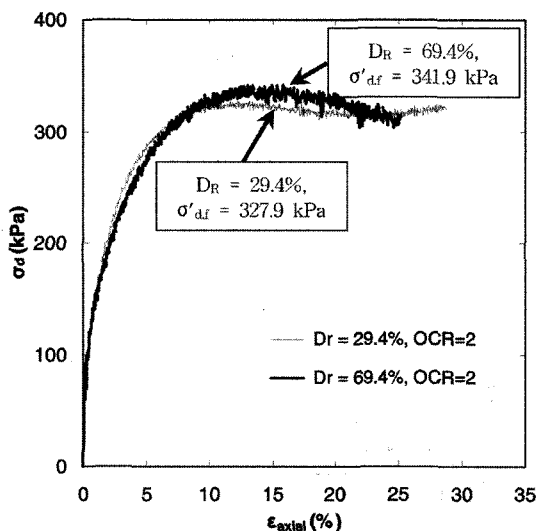
삼축압축시험을 통해서 미소변형률 구간의 초기전단탄성계수를 도출할 수 없으므로, 동일한 조건에서 수행된 공진주시험을 통해 도출된 초기전단탄성계수와 식 (4)를 적용함으로써 감쇠곡선 도출에 사용하였다.

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu_0) \quad (4)$$

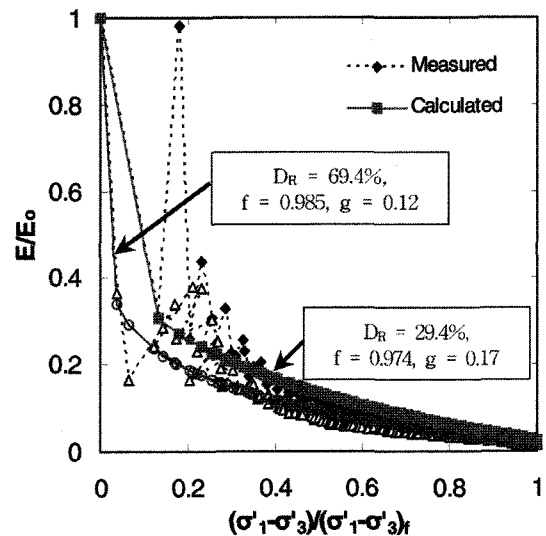
여기서, E_0 는 초기탄성계수, ν_0 는 초기상태에서의 포아송비를 나타낸다. 초기포아송비는 일반적으로 0.1 - 0.15 범위의 값을 보이는 것으로 알려져 있으므로(Lee and Salgado 1999), 본 연구에서는 0.15로 가정하였다. 응력 단계별 할선탄성계수 E_s 는 삼축압축시험을 통해 도출된 누적축차응력 및 각 응력단계에서의 변형률을 통해 얻어질 수 있다.

그림 7은 삼축압축시험을 통해 얻어진 응력-변형률 곡선 및 이에 상응하는 탄성계수 감쇠곡선을 나타내고 있다. 모든 수행 시험료에 대해 그림 7에 나타난 감쇠곡선을 도출하였으며, 이는 최대축차응력 단계에서 탄성계수 비

율이 감쇠변수 f 를 나타내며, 도출된 f 값을 반복계산을 통하여 실제 탄성계수 감쇠곡선과 가장 잘 부합하는 값으로 g 값을 추정하였다. 즉, 감쇠곡선에서 “Measured”값은 공진주시험과 삼축압축시험의 결과 값을 응력단계에 따른 최대축차응력과 탄성계수에 의해 도출된 것으로 매개변수 f 값이 결정된다. 반면 “Calculated”값은 “Measured”값을 통해 도출한 변수 f 를 비선형 탄성계수 감쇠관계를 나타내는 수정 hyperbolic 모델인 식 (3)에 적용하여 g 값에 의해 “Calculated”값이 실제 “Measured”곡선에 가장 일치할 때를 나타내는 값이다. 이와 같은 과정을 통해 도출된 정규압밀상태와 과압밀상태에서의 응력단계별 탄성계수 감쇠 매개변수는 표 3, 그림 8과 같다. 매개변수 f 의 경우, 파괴시 발현되는 강도와 밀접한 관련이 있는 계수로서 강도에서와 같이 과압밀의 영향은 미미한 것으로 나타나고 있다. f 값은 실트함유량 및 과압밀비에 의해 크게 좌우되지 않았으며, 그 값은 0.97~0.99의 범위를 나타내고 있다. 반면 탄성감쇠 매개변수 g 값은 탄성계수의 감쇠비를 및 탄성계수 감쇠곡선의 형태를 결정하게 되며, g 값이 1이 되는 경우 지반의 탄성계수 감쇠곡선의 형태는 선형으로 나타내게 된다. g 값은 전반적으로 상대밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나 실트함유량이 20%인 경우에는 감소하는 경향을 나타내고 있다. g 값의 증가는 주어진 응력 혹은 변형률 수준에서 강성도 혹은 탄성계수의 증가를 나타내게 되므로, 실트함유량 20%의 경우 실트가 전반적인 역학거동을 지배하게 되어 강성도가 감



(a) 응력-변형률 곡선

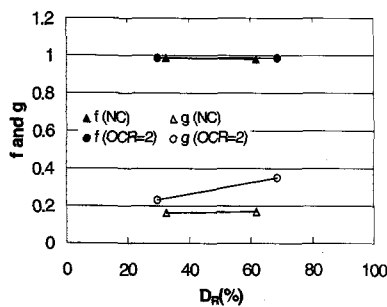


(b) 탄성계수 감쇠곡선

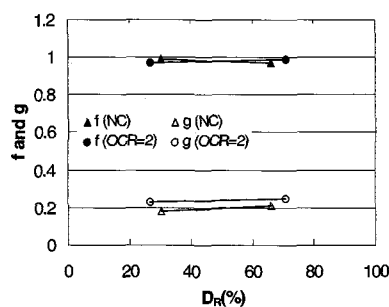
그림 7. 비선형 감쇠 매개변수 도출과정

표 3. 응력이력에 따른 탄성계수 감쇠 매개변수(f, g)

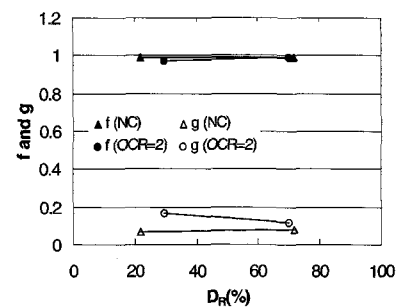
실트함유량 (%)	압밀조건	DR (%)	σ'_m (kPa)	f	g
0	NC	32.4	100	0.99	0.16
	OCR=2	29.5	100	0.99	0.23
	NC	61.5	100	0.98	0.17
	OCR=2	68.7	100	0.99	0.35
10	NC	30.3	100	0.99	0.18
	OCR=2	26.7	100	0.97	0.23
	NC	66.0	100	0.97	0.21
	OCR=2	70.8	100	0.99	0.25
20	NC	21.8	100	0.99	0.07
	OCR=2	29.4	100	0.97	0.17
	NC	71.7	100	0.99	0.08
	OCR=2	69.9	100	0.99	0.12



(a) 표준사



(b) 표준사+실트함유량 10%



(c) 표준사+실트함유량 20%

그림 8. 실트함유량별 정규압밀상태와 과압밀상태에서의 탄성계수 감쇠 매개변수

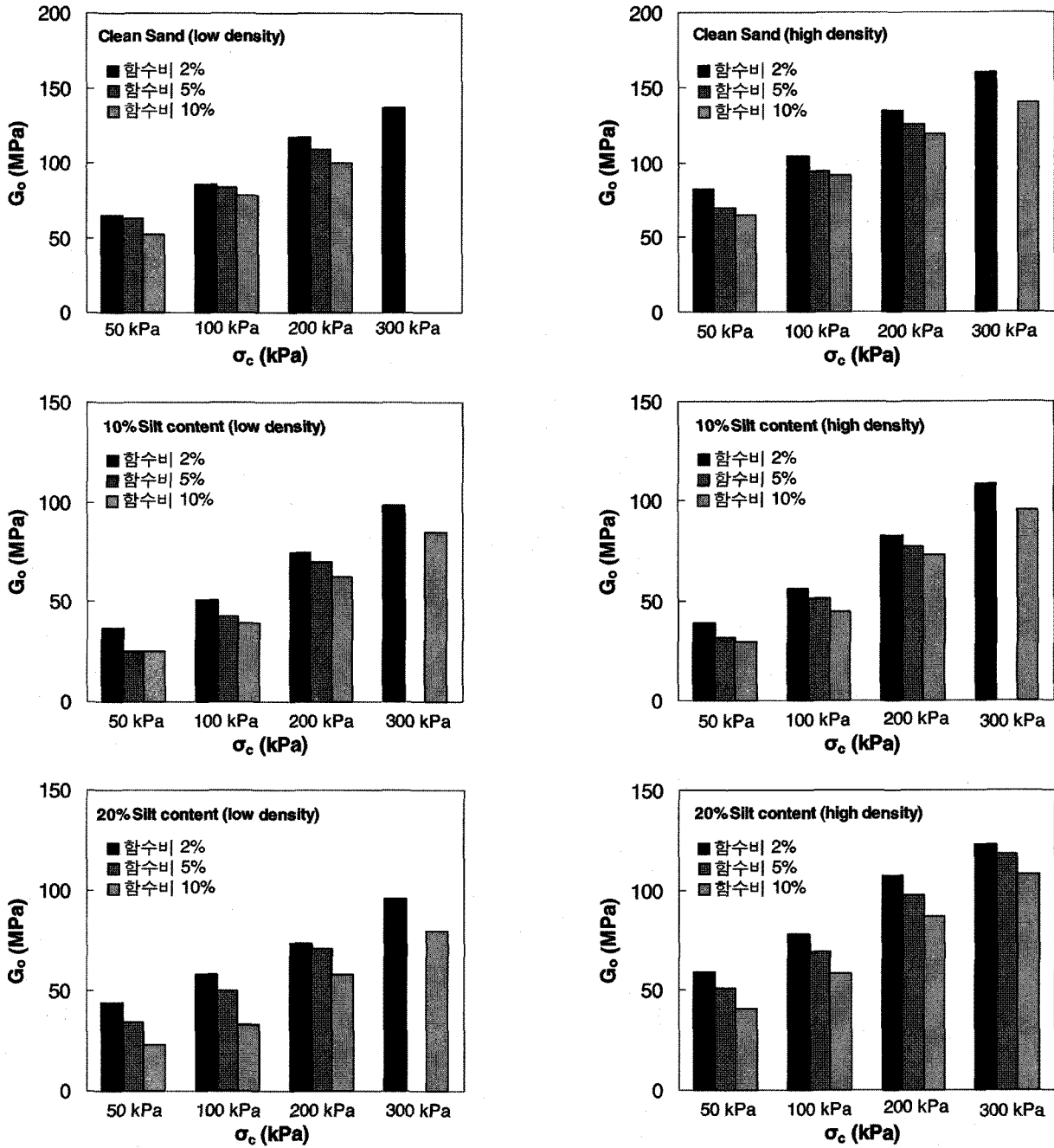
소하는 것으로 판단된다. 표 3에서 보는 바와 같이 과압 밀비가 증가함으로써 g값은 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 세립분이 포함된 사질토의 경우 비선형 강성도 (E_{sec})는 과압밀의 영향을 받는다는 기존 연구결과와 상응하다 할 수 있다(Lo Presti 등 1995; Yamashita 등 2000). 시험결과 실트가 함유된 사질토 지반에서 과압 밀에 의한 전단강도와 초기전단탄성계수의 영향은 거의 나타나지 않았다. 이를 통하여 미소변형률 구간의 한계상태에서 과압밀의 영향은 발생하지 않았지만, 미소 변형률 구간을 벗어나 파괴시 까지 과정에서 발생하는 과압밀의 영향을 확인할 수 있었다.

4.3 함수비에 따른 초기전단탄성계수의 변화 특성

실트가 함유된 사질토 지반의 함수비에 따른 초기전 단탄성계수의 영향을 확인하기 위해 함수비를 각 시료 별 2%, 5%, 그리고 10%로 구분하여 공진주시험을 수행 하였다. 본 연구에서는 적용된 함수비의 최대값은 실내 시험을 통해 얻어진 최적함수비의 범위인 10%를 기준

으로 설정하였다. Johnson and Sallberg(1960)은 표준다 짐시험을 통한 여러 종류의 흙에 대한 다짐곡선을 통하여 최적함수비를 구하였는데, 이 연구에 따르면 입도가 균등한 사질토(모래 73%, 실트 15%, 점토 13%)에서의 최적함수비는 대략 10%의 범위를 보였으며, 본 연구에서 수행한 다짐시험결과, 표준사의 경우 최적함수비 10.1%, 실트함유량 10%인 경우 최적함수비 9.6%를 나타내었다(그림 2).

그림 9는 함수비를 달리하여 측정된 구속압과 실트함 유량에 따른 초기전단탄성계수와 그 경향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실트함유량에 따라 상대 밀도가 비슷한 각각의 경우, 함수비가 낮아질수록, 즉 포화도가 감소할수록 각 구속압별 초기전단탄성계수는 증가하고 있다. 이는 함수비가 증가할수록 입자간의 마찰력은 감소하게 되고, 포화도가 50% 이하인 경우 과잉 간극수압은 무시(Lambe과 Whitman, 1979)할 수 있다는 것으로 설명될 수 있다. 표 4는 본 연구에서 적용한 함수비 정도에 따른 포화도를 나타내고 있으며, 실트함유 량 20%에서 상대밀도가 높은 경우를 제외하고 포화도



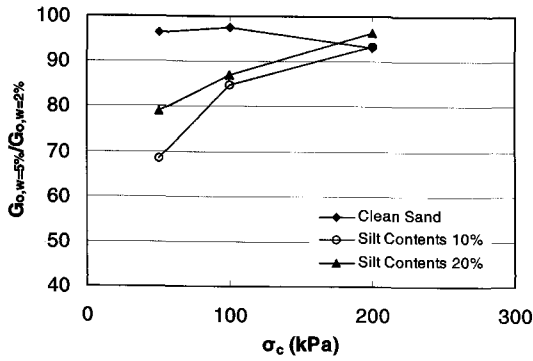
(a) 상대밀도가 낮은 경우

(b) 상대밀도가 높은 경우

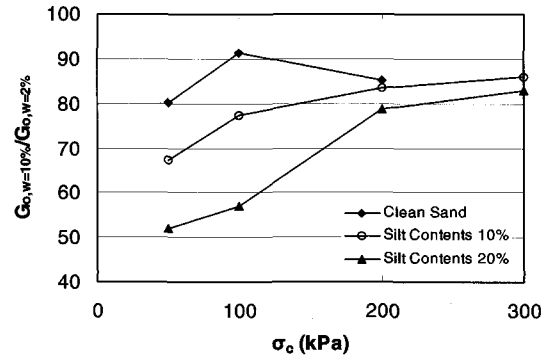
그림 9. 조건별 초기전단탄성계수의 변화

표 4. 함수비에 따른 초기전단탄성계수 결정을 위한 시험조건

실트함유량 (%)	함수비(w)=2%		함수비(w)=5%		함수비(w)=10%	
	DR (%)	S (%)	DR (%)	S (%)	DR (%)	S (%)
0	36.7	6.6	31.9	16.3	42.9	33.8
	81.0	7.7	74.1	18.8	77.5	38.0
10	42.4	7.9	41.6	19.7	40.5	39.3
	74.9	9.4	71.7	23.0	78.9	47.9
20	39.9	8.7	32.3	20.8	40.5	39.3
	72.4	10.7	72.7	26.8	75.3	54.6

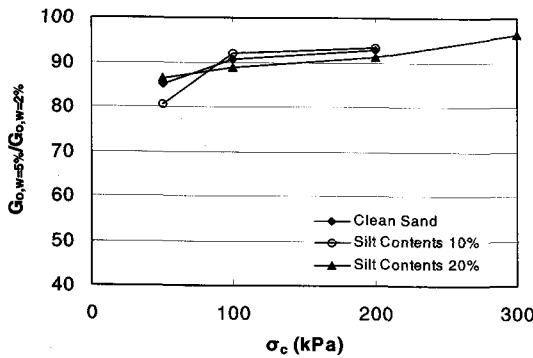


(a) 함수비 5% vs 함수비 2%

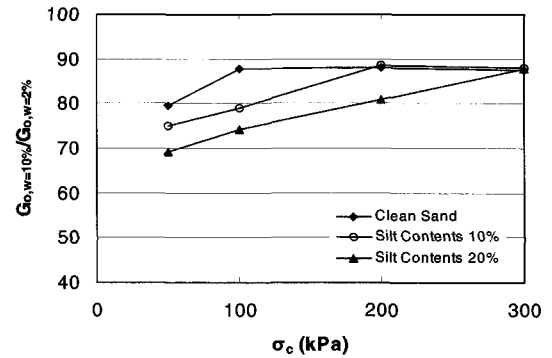


(b) 함수비 10% vs 함수비 2%

그림 10. 함수비와 실트함유량에 따른 정규화된 전단탄성계수의 변화추이 ($D_R < 43\%$)



(a) 함수비 5% vs 함수비 2%



(b) 함수비 10% vs 함수비 2%

그림 11. 함수비와 실트함유량에 따른 정규화된 전단탄성계수의 변화추이 ($D_R > 70\%$)

는 50%를 넘지 않고 있다.

또한 함수비를 기준으로 실트함유량과 구속압에 따른 초기전단탄성계수의 특성을 분석하고자, 함수비 2%를 기준으로 하여 상대밀도 별로 함수비 5%와 함수비 10%에 대한 초기전단탄성계수를 정규화하여 백분율로 나타내었으며 그림 10, 그림 11과 같다. 그림에서 보는 바와 같이, 구속압이 증가할수록 함수비의 영향은 감소하고 있다. 이는 구속압이 증가할수록 함수비에 의한 입자의 활동성 또한 감소함을 나타내고 있다. 낮은 구속압의 경우($\sigma_c=50\sim 100\text{kPa}$), 실트함유량에 따른 함수비의 영향은 상당히 큰 것으로 관찰되었으며, 특히 느슨한 상태에서($D_R < 43\%$)의 함수비와 실트함유량에 따른 초기전단탄성계수는 큰 것으로 나타났다. 이는 상대밀도가 낮은 경우 입자의 배열이 느슨하기 때문에 세립질인 실트가 간극내 공기와 물에 의해 조립질인 표준사에 비해 보다 활동성이 용이하게 되어 활동저항이 감소하게 되고, 이로 인해 강성도 또한 저하되어 낮은 초기전단탄성계수를 나타낸다고 판단된다. 반대로 상대밀도가 높은 조밀한 경우 실트가 함유되어도 입자 구조의 조밀성에

의해 활동저항의 감소가 함수비가 증가하여도 상대밀도가 낮은 경우에 비하여 크지 않다고 판단되며, 전단탄성계수 값의 감소량 또한 크지 않은 것으로 사료된다. 이를 통하여 구속압과 상대밀도가 높은 심도가 깊은 지층에서 보다 심도가 얇은 토층에서 함수비의 영향은 중요하다라는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다양한 현장 지반 조건을 고려하여 보다 세부적인 지반 특성을 파악하기 위해서 실트가 포함된 사질토 지반에서 과압밀비와 함수비를 고려한 비선형 거동특성을 분석하고 검증하고자 하였으며, 이를 위해 지반조건 변화를 반영하여 다양한 실내시험을 수행하였다. 본 연구 범위내의 결과에 의한 결론은 다음과 같다.

- (1) 삼축압축시험을 통해 실트가 함유된 사질토 지반에서 과압밀의 영향을 분석한 결과, 과압밀에 의한 최

참 고 문 헌

- 대전단강도의 변화는 크게 나타나지 않았으며, 실트가 함유된 경우 또한 과압밀비가 낮은 범위에서 과압밀이 최대대전단강도에 끼치는 영향은 미미하였다.
- (2) 미소변형률 수준에서 초기전단탄성계수는 주문진 표준사의 경우 과압밀의 영향을 받지 않았으며, 실트가 함유된 시료에서도 실트함유량에 관계없이 과압밀의 영향을 받지 않았다. 이러한 결과는 초기전단탄성계수의 경우 초기 및 현재상태의 절대 간극비가 지배적인 인자로 작용하기 때문이며, 응력이력에 의한 영향은 크지 않음을 나타낸다.
- (3) 지반요소의 비선형 응력-변형률 거동 및 강도특성을 탄성계수 감쇠곡선을 통해 나타낼 수 있으며, 감쇠특성은 과압밀상태에 따라 달라짐을 확인하였다. 이러한 영향은 감쇠곡선의 형태 및 특성을 토대로 확인할 수 있었으며, 과압밀비가 증가할수록 감쇠율은 감소하였다. 이는 주어진 응력단계에서 탄성계수의 증가 뿐만아니라 응력 및 변형을 증가에 따른 감소율 또한 저하됨을 의미한다.
- (4) 초기전단탄성계수는 유사한 조건에서 함수비, 즉 포화도가 낮아질수록 증가하였으며, 초기전단탄성계수의 증가량은 실트함유량 및 구속압에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 함수비가 증가함에 따라 상대밀도가 낮고, 구속압이 낮은 경우 초기전단탄성계수는 실트가 함유됨으로써 상당히 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 구속압이 증가할수록 함수비의 영향은 감소하였다.

1. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), "Nonlinear Analysis of Stress-Strain in Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.96, No.5, pp.1629-1653.
2. Fahey, M. and Carter, J. P. (1993), "A Finite Element Study of the Pressuremeter Test in Sand Using Non-Linear Elastic Plastic Model", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, No.2, pp.348-361.
3. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1966), "Sand Stiffness under Various Triaxial Stresses", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.92, No.2, pp.12-17.
4. Hardin, B. O. and Drnevich, V. O. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurements and Parameter Effects", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.98, No.6, pp.788-805.
5. Ishibashi, I., and Zhang, X. (1993), "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay", *Soils and Foundation*, Vol.33, No.1, pp.182-191.
6. Johnson, A. W. and Sallberg, J. R. (1960), "Factors that Influence Field Compaction of Soils", *HRR Bulletin*, 272, *Highway Research Board*, pp.206.
7. Kondner, R. L. (1963), "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soil", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.189, No.1, pp.115-143.
8. Ladd, R. S. (1978), "Preparation Test Specimens Using Undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), pp.16-23.
9. Lambe, T. W. and Whitmann, R. V. (1979), *Soil Mechanics*, New York, John Wiley and Sons.
10. Lee, J. H. and Salgado, R. (1999), "Determination of Pile Base Resistance in Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.8, pp.673-683.
11. Lee, J. H. and Salgado, R. (2004), "Stiffness Degradation and Shear Strength of Silty Sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, No.5, pp.831-843.
12. Lo Presti, D. C. F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Pisciotto, V., and Ture, S. (1995), "Stress Dependence of Sand Stiffness", *Proceeding, 3rd International Conference on Recent Adv. in Geotech. Earthquake Engineering and Soil Dynamic*, University of Missouri, Rolla, pp.71-76.
13. Yamamuro, J. A. and Lade, P. V. (1998), "Steady-State Concepts and Static Liquefaction of Silty Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.9, pp.868-877.
14. Yamashita, S., Jamiolkowski, M., and Lo Presti, D. C. F. (2000), "Stiffness Nonlinearity of Three Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.101.

(접수일자 2005. 5. 20, 심사완료일 2005. 11. 15)