

배수 조건에 따른 사질토 지반의 동적 변형특성

Dynamic Deformation Characteristics of Sands Under Various Drainage Conditions

추 연 옥¹ Choo, Yun-Wook

김 동 수² Kim, Dong-Soo

Abstract

In this study, dynamic deformation characteristics of sands under dry, saturated drained and undrained conditions were investigated at small to intermediate strains using the modified Stokoe-type torsional shear tests. The equipment was modified to saturate the specimen and to maintain the B-value above 0.99 during the test. On two types of sands, Geumgang sand from Korea and Toyoura sand from Japan, tests were carried out at various drainage conditions, void ratios, and effective confining pressures. Based on the test results, dynamic deformation characteristics, shear modulus (G) and damping ratio (D), and/or pore-water pressure were measured with strain amplitude and number of loading cycles. Variations of G and D at small ($\gamma_c < 10^{-3}\%$) to medium ($10^{-3}\% < \gamma_c < 10^{-1}\%$) strains were measured under various drainage conditions, and test results were intensively compared considering drainage conditions.

요 지

본 논문에서는 포화 및 배수 조건에 따른 사질토 지반의 변형특성을 개선된 Stokoe식 비틀전단시험기를 이용하여 비교·관찰하였다. 기존의 Stokoe식 비틀 전단 시험기를 개선하여 시료의 완전 포화상태를 만들고, 포화 배수 및 비배수 조건에서 비틀 전단 시험이 가능하도록 하였고, 또한, 비배수 시험에서 간극수압을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 국내에서 채취된 금강모래와 일본의 토요라 모래를 사용하여, 건조, 포화 배수 및 포화 비배수 조건, 3가지 간극비, 4가지 구속응력 조건을 달리하여 비틀전단시험을 수행하였다. 시험결과를 바탕으로, 전단탄성계수와 재료 감쇠비를 각 조건에 대하여 반복하중 및 변형률 크기의 영향을 비교·분석하고, 배수 조건에 따라 다르게 나타나는 사질토 지반의 저변형률 ($\gamma_c < 10^{-3}\%$) 및 중간 변형률 ($10^{-3}\% < \gamma_c < 10^{-1}\%$)에서의 변형특성을 관찰하였다.

Keywords : Damping ratio, Drainage conditions, Saturation, Shear modulus, Torsional shear tests

1. 서 론

지진, 파랑과 같은 자연적인 하중 및 도심지에서의 재개발에 따른 발파 등의 인위적인 하중은 동적 하중이면서 반복하중의 특성을 보이고 있다. 이러한 하중이 작용하는 지반-구조물 시스템에서는 해석 및 설계에서

지반의 동적 변형특성(전단탄성계수와 감쇠비)이 매우 중요한 요소로서 사용되고 있다. 지반의 동적 변형특성은 간극비, 응력조건, 지반종류, 소성지수(PI), 변형률 크기와 같은 다양한 요소에 따라 거동을 달리하고 있다(Richart 등, 1970; Ishihara, 1996). 특히, 동적 하중에 의해 지반은 $10^{-3}\% < \gamma_c < 10^{-1}\%$ 변형률 범위의 변형

¹정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 연수연구원 (Member, Post-doc., Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST, nomind@kaist.ac.kr)
²정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

을 경험하고, 이러한 조건에서 지반의 동적 변형특성은 변형률 크기에 따라 민감한 변화를 보인다. 많은 연구자들이 변형률 크기에 따른 변형특성의 변화에 대한 중요성을 인식하고 이에 대한 연구를 지속적으로 수행하여 왔다(Iwasaki 등, 1978; Kokusho, 1980; Dobry 등, 1987; Burland, 1989; Tatsuoka 등, 1992; Kim 등, 1994).

일반적으로 지반은 다음과 같이 변형률 크기에 따라 3가지 영역으로 나뉘어 구별된 현상을 보인다. 1) 선형 탄성 한계변형률(γ_{el}) 보다 작은 미소 변형률 영역($\gamma < \gamma_{el}$)에서는 전단탄성계수(G)나 재료 감쇠비(D)가 사실상 변하지 않는 선형거동을 보인다. 2) 경험하는 변형률이 커져 γ_{el} 을 넘어섬에 따라, 일정한 값을 유지하고 있던 전단탄성계수나 재료 감쇠비는 변형률 크기가 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하고 재료 감쇠비는 증가하기 시작한다. 3) 또한, 지반의 변형이 또 다른 한계 변형률, 반복 한계 전단변형률(γ_{th}) 보다 커지면 동적 변형특성이 하중반복회수에 따라 변화를 보이기 시작한다(Kim, 1991; Stokoe 등, 1994; Vucetic, 1994; Ishihara, 1996). 이는 지반재료의 변형이 커짐에 따라 지반재료를 구성하는 입자들 사이의 상대적인 움직임이 발생하여 회복되지 않는 변형이 남기 때문으로, 결과적으로 하중이 반복됨에 따라 동적 물성의 변화로 나타나게 된다. 입자 구조의 변화는 동적 물성의 변화 뿐 아니라 간극 및 부피 변화도 동시에 보인다.

전술한 바와 같이, 전단 하중을 받는 건조 모래는 반복 한계 전단변형률(γ_{th}^0) 보다 큰 변형률 크기의 하중이 반복되면, 전단탄성계수가 점차 증가하는 현상이 관찰되어 왔고, 이는 입자 구조가 조밀해지는 경향 때문으로 해석된다. 반면, 포화 비배수의 경우, 이러한 입자 구조의 변화가 비배수 조건으로 인하여 간극수압의 증가로 나타나고 지반내의 유효응력을 떨어뜨려 지반의 강성을 연화시킨다. 또한, 이 상태에서 하중 반복이 지속되면 간극수압의 누적으로 액상화 현상이 일어나고 심각한 파괴로 이어지게 된다(Dobry 등, 1982; Ishihara, 1996). 현장 지반은 지하수위의 아래에 있거나 해저지반이나 하상에도 조성되어 있어 포화 상태로도 형성되어 있고, 포화된 지반은 하중조건에 따라 배수 또는 비배수 거동을 나타내며 조건에 따라 다른 거동을 보이게 된다. 특히, 사질토의 경우, 포화 및 배수 조건에 따라 변형특성이 뚜렷하게 상이한 거동을 보이고, 이는 동적 하중을 받는 지반-구조물 해석에 큰 영향을 미친다. 이러한 이유로, 배수 조건에 따라 각 변형률 영역에서 지

반이 보이는 거동을 구분하여 엄밀히 비교·관찰하고 해석할 필요성이 제기된다.

본 논문에서는 포화 및 배수 조건에 따른 사질토 지반의 변형특성을 비교·관찰하기 위하여, 동적 변형특성 연구에서 많이 사용되고 있는 기존의 Stokoe식 비틀 전단(torsional shear test: TS) 시험기를 개선하여, 시료를 포화 시키고 비틀전단 시험 동안 간극수압계수 B값이 0.99이상의 완전포화 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 비틀전단 시험을 건조뿐 아니라 포화 배수 및 비배수 조건에서 시험이 가능하도록 개선하였고, 더불어, 비배수 시험에서는 간극수압을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 국내에서 채취된 금강모래와 일본의 토요라 모래를 사용하여, 배수 및 포화 조건, 간극비, 구속응력 조건을 달리하여 다양한 비틀전단시험을 수행하였다. 시험 결과를 바탕으로, 동적 변형특성인 전단탄성계수와 재료 감쇠비를 전단변형률 크기 및 반복하중에 따라 각각 획득하여 이를 비교·분석하여 배수 조건에 따른 사질토 지반의 저변형률 ($\gamma < 10^{-3}\%$) 및 중간 변형률 ($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$)에서의 변형특성을 관찰하였다.

2. 실험계획

2.1 시험장비

본 연구에서는 고정단-자유단 방식의 Stokoe식 비틀 전단 시험기를 사용하여 사질토의 저변형률 및 중간 변형률에서의 변형특성을 측정하였다. 건조 상태에서의 비틀 전단 시험뿐 아니라, 포화 상태에서 비틀 전단 시험을 수행할 수 있도록, 기존의 Stokoe식 비틀 전단 시험기를 개조하였다. 개조된 비틀 전단 시험기의 개요는 그림 1과 같다. 개선된 비틀 전단 시험기의 특징은, 시료의 포화를 위해 시료받침대(bottom pedestal)를 통하여 시료에 배압(back pressure)을 재하하도록 하였고, 또한, 간극수압 변환기를 설치하여 비배수 조건에서 비틀 전단 시험이 수행되는 동안 유발되는 간극수압을 측정할 수 있도록 하였다. Stokoe식 장비의 특성상 셀 내부에 구속압을 공기압으로 가하고 있어, 시료 주변에 수조(water bath)를 설치하여 공기압이 직접 시료에 닿는 것을 억제하도록 하였다. 그러나 장시간 노출될 경우 공기 확산(air migration)에 의해 포화도가 떨어질 수 있으며 이는 비배수 시험에서 간극수압 증가에 영향을 미칠 수 있다. 개발된 포화 시험시스템의 검증을 위하여, 배압으

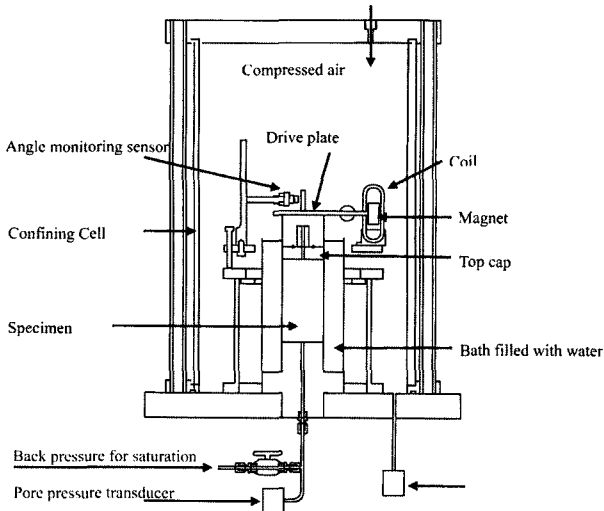


그림 1. 개선된 Stokoe식 비틀 전단 시험 시스템의 개요

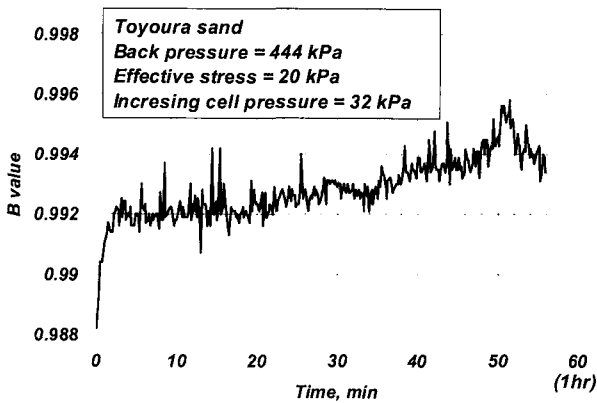


그림 2. 모래시료에 대한 시간에 따른 간극수압계수 (B)의 변화

로 시료를 포화 시키고 이후 간극수압계수를 시간에 따라 측정하여 그림 2에 결과를 나타내었다. 그림 2와 같이 간극수압계수(B)가 0.99 이상으로 1시간 이상 유지되고, 이는 비틀 전단 시험의 수행이 충분히 가능한 시간으로, 본 개발된 시험기를 이용하여 건조 조건뿐 아니라, 완전포화 상태의 배수 및 비배수 조건의 변형특성 연구를 수행할 수 있음을 확인하였다.

2.2 시험시료

본 연구에서는 국내에서 채취된 금강모래와 일본에서 채취된 토요라 모래, 두 종의 깨끗한 모래(clean sand)를 사용하였다. 사용한 시료에 대한 입도분포곡선은 그림 3과 같고, 시험시료의 기본 물성치를 표 1에 도시하였다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 금강모래가 토요라 모래보다 굵은 입자를 가지고 있고, 균등계수는 금강모

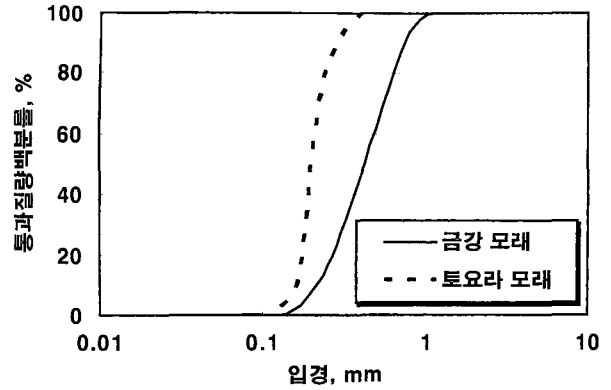


그림 3. 시험시료의 입도 분포

표 1. 시험시료의 기본 물성치

시험 시료	금강 모래	토요라 모래
분류(USCS)	SP	SP
최대 간극비, e_{max}	0.973	0.982
최소 간극비, e_{min}	0.698	0.617
비중 (G_s)	2.66	2.65
곡률계수 (C_c)	0.96	1.00
균등계수 (C_u)	2.46	1.29
소성지수 (PI)	NP	NP
D_{50} , mm	0.424	0.199

래가 큰 값을 보이며, 이는 토요라 모래가 금강모래보다 균등한 입자로 이루어져 있음을 의미한다.

2.3 시험절차

비틀 전단(TS) 시험을 수행하기 위한 모래 시편은 건조 낙사법(air pluviation method)을 적용하여 성형하였다. 이 방법은 건조된 모래 시료를 깔때기를 통하여 몰드 안으로 부어 넣으면서 깔때기 주둥이의 끝부터 모래 시료가 낙하하는 거리를 일정하게 유지하여 성형하는 방법으로, 깔때기 주둥이의 내부 면적의 크기 및 낙하 높이에 따라 시편의 상대밀도를 조절하게 된다. 본 연구에서는 깔때기 주둥이의 내부 모양이 원형인 것을 이용하였고, 내부 직경 2.85mm~6.5mm 범위의 깔때기를 사용하여 상대밀도를 조정하였다. 시료의 성형 후에, 시료 내부에 약 20kPa의 진공압을 가하여 시료를 자립시킨 후, 몰드를 제거하고 셀을 설치하였다.

포화 시험의 경우, 시료 성형 후 시료의 아래와 위에 15kPa의 작은 압력차를 유지하여, CO_2 를 아래에서 위로 흘러 보내 시료 안의 공기를 CO_2 로 치환하였고, 이후 치환된 CO_2 를 CO_2 치환시 사용된 방법과 동일하게 압

력차를 이용하여 공기가 제거된 물로 치환하였다. CO₂는 물에 대한 용해도가 공기에 비해 높기 때문에, 최대한 지반시료 내부의 공기를 추출하고 효율적으로 포화 상태를 만들기 위해 사용되었다. 물 치환 이후, 배압을 단계별로 증가시키면서 재하하여 포화 상태를 달성하였고, 각 단계별로 간극수압계수(B)를 측정하여 포화를 확인하였다. 포화상태가 확인된 후, 표 2에 나타낸 평균 유효 구속응력단계(σ'_0)로 시료를 압밀하고 비틀전단 시험을 수행하였다.

건조상태와 포화 배수 조건에 따른 변형특성을 연구하기 위해, 표 2와 같이 건조상태, 포화 배수, 포화 비배수 상태에서 비틀 전단 시험을 계획·수행하였고, 금강 모래에서는 상대밀도(D_r) 약 40%에서 토요라 모래는 약 50%에서 TS시험을 수행하였다. 또한, 상대밀도에 따른 영향을 확인하기 위해, 표 2와 같이 시료당 3가지 상대 밀도에서 모래시편을 성형하였고, 포화 비배수 상태에서 비틀 전단 시험을 수행하였다.

비틀 전단 시험은 하나의 평균유효 구속응력 단계에서 일련의 TS시험 조합을 수행하고 다음 구속 응력단계로 넘어가는 다단계 시험(staged test)으로 수행하였고, 표 2와 같이 30kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa의 순으로 시험을 수행하였다. 각 평균유효 구속응력단계에서 압밀이 끝난 후, 탄성 한계 변형률 이하의 저변형률의 TS시험으로부터 시료의 손상이 비교적 적은 변형률 크기인 0.03%~0.1%까지 증가시켜가며 TS시험을 반복 수행하였다. 각 변형률 단계의 TS시험에서는 반복회수 20회, 하중주파수 0.06Hz의 정현 하중이 사용되었다. 비배수 시험에서는 각각의 변형률 단계에서 반복 하중 20회가 적용되는 동안 시료의 밸브는 닫혀진 상태로 비배수 상태가 유지되었고, 이때에 유발되는 간극수압을 측정하

였다. 20회의 비틀 전단이 완료되면 시료의 밸브를 열어 간극수압을 소산시킨 후, 다시 밸브를 닫고 다음 변형률 단계의 시험을 수행하였다.

Stokoe식 비틀 전단 시험으로부터 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 결정하는 방법은 김동수(1995)에 의해 자세히 기술되어 있다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 변형률 크기에 따른 이력곡선(Hysteresis loop)의 변화

본 연구에서 수행한 비틀전단 시험으로부터 얻어지는 전형적인 이력곡선을 그림 4와 그림 5에 표현하였고, 4가지 다른 변형률 크기에서 수행된 결과를 각각 비교하여, 조건에 따른 변형특성의 변화를 관찰하였다. 그림 4는 건조 모래의 결과로서, 변형률 크기 0.001%의 결과를 관찰하면(그림 4(a)) 모든 회수의 곡선이 거의 일치하고 선형탄성 거동을 보인다. 변형률 크기가 0.004%로 커지면, 1번째 이력곡선의 면적이 이후 곡선들보다 큰 값을 가지지만, 기울기는 하중 반복회수에 그다지 영향을 받지 않고 있다(그림 4(b)). 변형률 크기 0.01%에서는 이력곡선의 기울기와 면적 모두 하중 반복에 따라 변화를 보인다(그림 4(c)). 변형률 크기 0.035%의 경우에는, 하중반복이 더해감에 따라 곡선의 기울기가 급해지는 반복경화(cyclic hardening) 현상이 명확히 나타나고 있고, 하중반복이 지속됨에 따라 곡선이 수렴해가는 현상을 확인 할 수 있다(그림 4(d)).

그림 5는 포화시료에 대한 비배수 TS시험결과로서, 변형률 크기 0.0012%에서는 건조시료의 경우와 비슷하게 모든 회수의 곡선이 거의 일치하고 있다. 변형률 크기 0.0047%에서는 첫번째 이력곡선의 기울기와 면적이 이후 곡선들보다 기울기와 면적 모두 약간 큰 값을 가지고 있으나, 첫번째 곡선 이후의 곡선들이 수렴하면서 거의 일치하고 있다(그림 5(b)). 반면, 변형률 크기가 0.022%으로 커진 경우, 하중 반복에 따라 기울기가 완만해지는 반복연화(cyclic degradation)이 나타나고, 이력곡선의 면적이 약간 작아지는 현상을 관찰할 수 있다(그림 5(c)). 그림 5(d)와 같이 변형률 크기 0.04%이상으로 커진 경우, 하중회수가 증가함에 따라 반복연화 현상이 더욱 두드러졌고, 하중반복이 증가함에 따라 급격히 기울기가 줄어들고 있어 하중반복이 지속된다면

표 2. 시료의 성형조건 및 시험절차

시료	배수 조건	상대밀도	간극비, e	σ'_0
금강 모래	포화 비배수	41%	0.87	30kPa ▼ 50kPa ▼ 100kPa ▼ 200kPa
		52%	0.84	
		80%	0.76	
	포화 배수	41%	0.87	
	건조	40%	0.87	
토요라 모래	포화 비배수	46%	0.81	
		51%	0.79	
		70%	0.72	
	포화 배수	50%	0.80	
	건조	49%	0.80	

액상화 현상으로 이어지리라 쉽게 예상할 수 있다. 또한, 변형률 크기 0.05%보다 커지면서, 하중회수 11회 이후부터 지속적인 하중 반복에 의하여 강성의 연화가 급격히 발생하기 시작하고, 하중 초기에 약간씩 감소하던 곡선의 면적이 급격히 증가하는 현상을 관찰할 수 있다(그림 5(d)). 반복경화 및 반복연화 현상은 그림 4와 그림 5에 나타낸 30kPa에서 가장 뚜렷하게 나타났고, 유효구속응력이 증가함에 따라 현상의 정도가 감소하였다.

비틀 전단시험으로부터 결정된 G와 D를 변형률 크기에 따라 1번째, 10번째, 20번째 하중회수에서 선택하여 그림 6과 그림 7에 나타내었고, 그림 6은 건조모래, 그림 7은 포화 비배수 조건의 시험결과이다. 이력곡선의

관찰에서와 같이, 건조모래와 포화 비배수 조건 모두, 저변형률에서는 G와 D가 변형률 크기 및 하중회수의 변화에 일정한 값을 보이지만, 변형률 크기가 커짐에 따라 하중회수에 따른 변화가 나타나기 시작한다. 건조 모래의 경우 그림 6에서처럼 반복 한계 전단변형률 보다 큰 변형률 영역에서는 10회의 G가 1번째의 G보다 컸고, 반대로 10회의 D는 1회의 D보다 작게 나타났다. 포화 비배수 조건에서의 G와 D의 하중회수에 따른 변화량은 건조시료와 비하여 작게 일어나고, 0.02%이상의 변형률 크기부터 G와 D가 차이가 뚜렷하게 나타나기 시작하였다. G는 하중회수에 따라 작아지는 연화가 일어나고, 감쇠비는 커졌다. 건조 모래뿐 아니라 포화 모래의 비배수 시험에서도, 변형률 크기나 하중회수에 영향 받지 않고

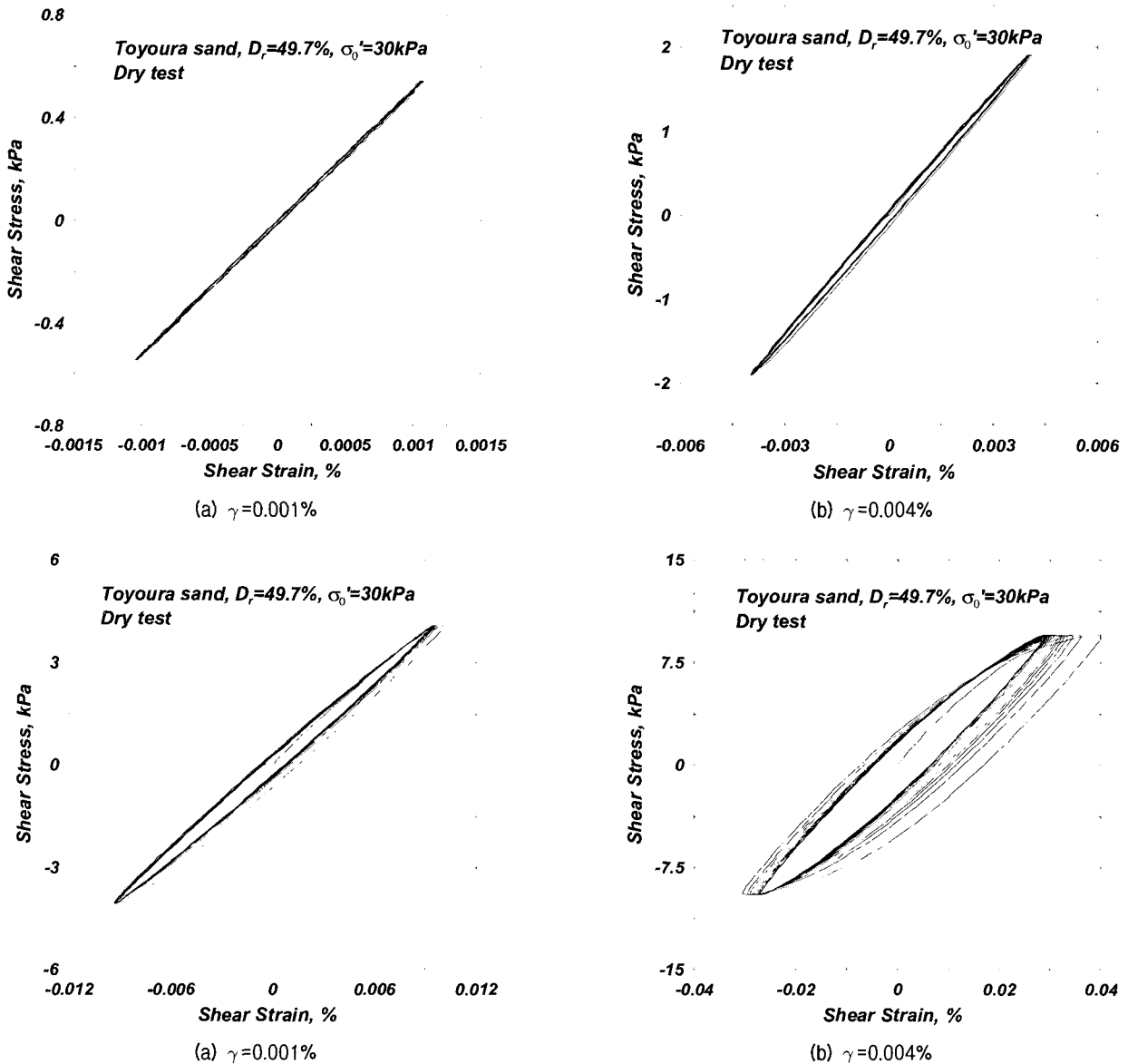
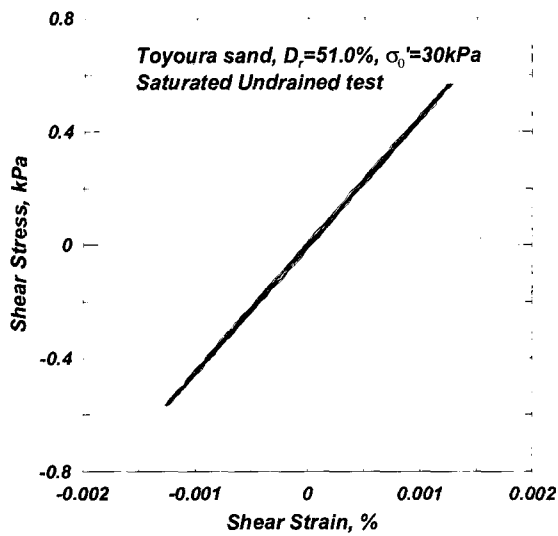
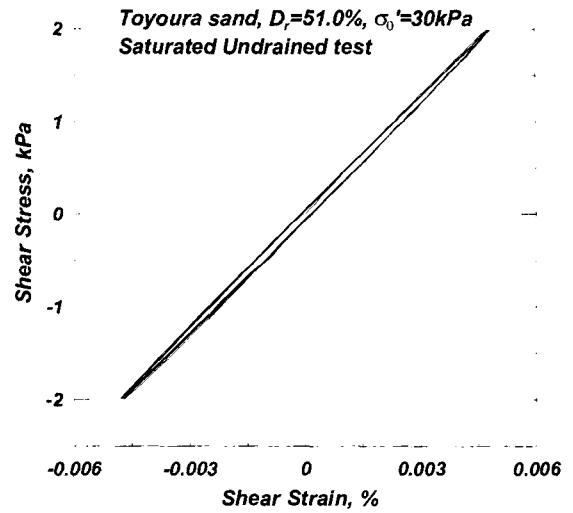


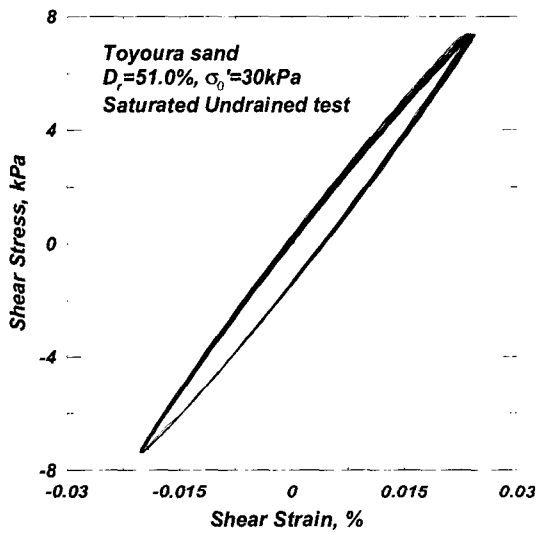
그림 4. 건조 모래에 대한 비틀 전단 시험의 전형적인 이력곡선



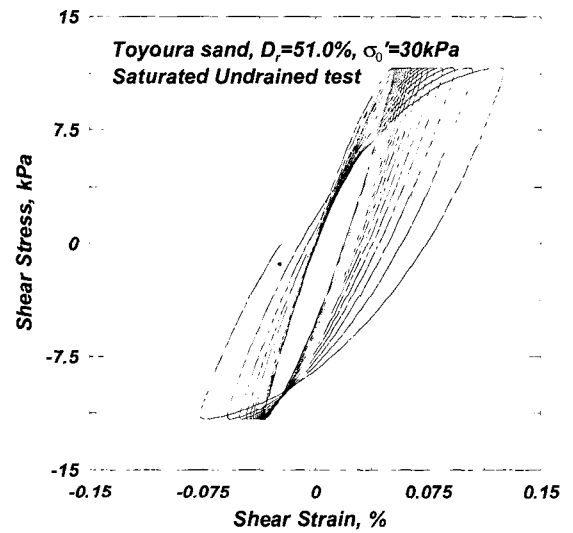
(a) $\gamma=0.0012\%$



(b) $\gamma=0.0047\%$



(c) $\gamma=0.022\%$



(d) $\gamma=0.04\sim 0.07\%$

그림 5. 포화 모래에 대한 비배수 비율 전단 시험의 전형적인 이력곡선

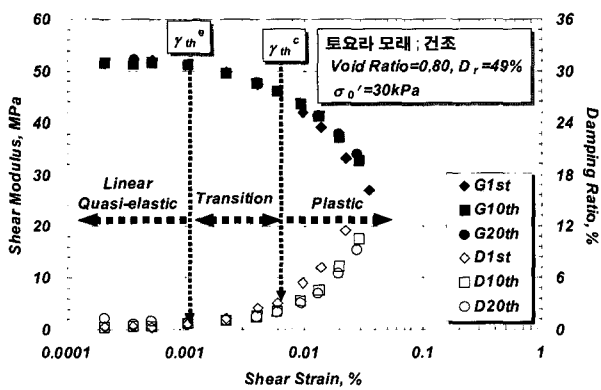


그림 6. 건조 모래의 변형률 크기 및 하중회수에 따른 G와 D

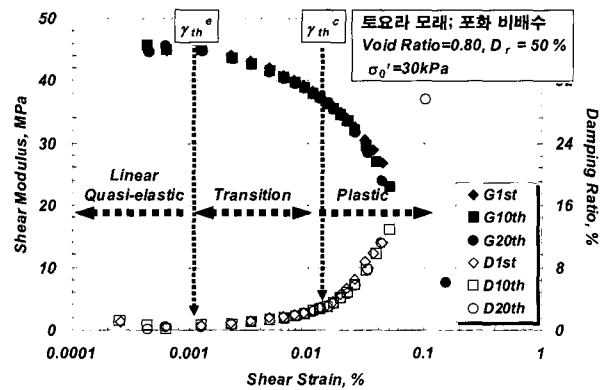


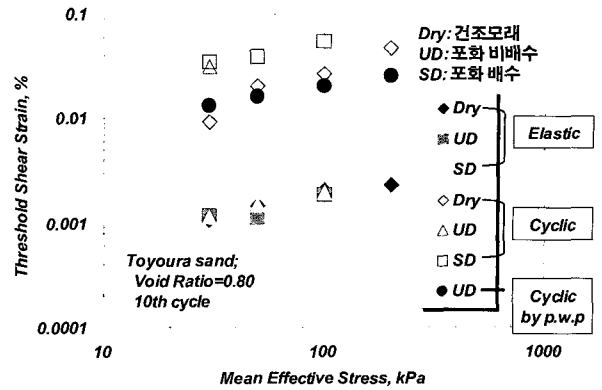
그림 7. 포화 모래의 비배수 TS시험의 변형률 크기와 하중회수에 따른 G와 D

G와 D가 일정한 값을 유지하는 저변형률 영역과 변형률 크기에 따라 비선형 거동을 하는 영역, 변형률 크기와 더불어 하중회수의 영향을 받는 영역들이 관측되었고, 이 영역은 선형 탄성 한계 전단변형률(γ_{th}^l)과 반복 한계 전단 변형률(γ_{th}^c)으로 구분될 수 있었다. 따라서, 본 논문에서는 선형특성을 보이는 저변형률 영역($\gamma < \gamma_{th}^l$)과 비선형 거동을 보이는 중간변형률 영역($\gamma < \gamma_{th}^c$)으로 나누어 동적 변형 특성을 비교·분석하였고, 각 영역에서의 배수조건에 따른 변형특성의 변화를 관찰하였다.

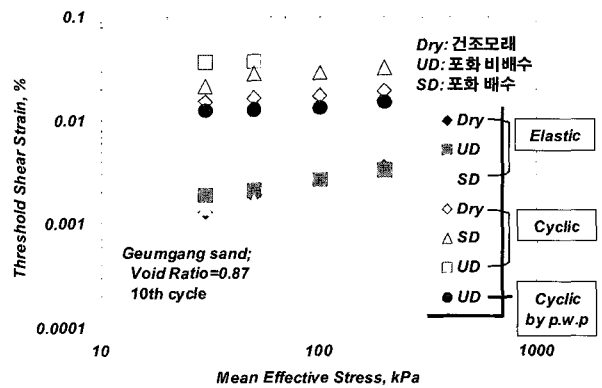
3.2 선형-탄성 및 반복 한계 전단변형률

전술한 바와 같이 동적 변형특성은 변형률 크기에 따라 선형-탄성영역, 전이영역, 소성영역의 3가지 영역으로 구분되고, 이 영역들은 두 가지의 한계 전단변형률에 의해 정의된다. 선형거동을 보이는 저변형률 영역(선형-탄성 영역)과 비선형 거동을 보이기 시작하는 영역(전이영역)을 구분하는 선형-탄성 한계 전단변형률과 비선형 거동을 보이다 반복하중의 영향을 받기 시작하는 영역(소성영역)을 구분하는 반복 한계 전단변형률로 정의되고, 이들은 지반-구조물 해석에서 중요한 변수로 사용되고 있다. 선형-탄성 한계 전단변형률을 구하기 위해, 먼저, 1번째와 10번째 하중회수의 전단탄성계수를 Ramberg-Osgood(R-O)모델을 이용하여 곡선 맞추기를 수행하고(Ni, 1987; Kim, 1991), 구해진 맞춤곡선으로부터 $G/G_{max}=0.98$ 이 되는 지점의 변형률 크기를 선형-탄성 한계 전단변형률로 수치적으로 산정하고, 이를 그림 8에 나타내었다. 선형-탄성 한계 전단변형률이 평균 유효 구속응력에 따라 조금씩 증가하였고, 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건 모두에 대하여 금강모래는 0.0013%에서 0.0035%의 분포를, 토요라 모래는 0.0011%에서 0.0023%의 분포로 거의 비슷한 값을 보였다.

반복 한계 전단변형률의 경우, 구해진 R-O 맞춤곡선을 이용하여 $G_{1st}/G_{10th}=0.98$ 이 되는 전단변형률 크기로 부터 결정하였고, 이는 반복 경화가 일어나는 건조 및 포화 배수 조건에 사용되었다. 포화 비배수의 경우 반복 연화가 발생하기 때문에 $G_{10th}/G_{1st}=0.98$ 을 적용하였다. 추가적으로, 포화 비배수 TS시험의 경우 응력-이력 곡선과 동시에 간극수압도 측정이 되기 때문에, 하중 반복에 의해 입자 구조가 변화를 시작하는 반복 한계



(a) 금강 모래



(b) 토요라 모래

그림 8. 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건의 탄성 및 반복 한계 전단 변형률

전단변형률을 간극수압의 증가로부터 결정할 수 있었다. 10번째 하중회수에서 측정되는 정규화 간극수압(du/σ'_v)을 비선형 모델을 이용하여 곡선 맞추기를 수행하고, 결정된 맞춤곡선을 이용하여 $du/\sigma'_v=0.5\%$ 가 되는 변형률 크기로부터 반복 한계 전단변형률을 산정하였다. 결정된 반복 한계 전단 변형률을 그림 8에 나타내었다. 건조 모래의 반복한계 전단변형률은 포화 비배수의 간극수압으로부터 결정되는 γ_{th}^c 과 비슷한 값을 보였고, 이는 건조 조건의 경우 2%의 G의 증가를 주는 입자 구조 변화는 0.5%의 간극수압을 유발하게 됨을 의미한다. 포화 배수의 γ_{th}^c 는 0.035%~0.055%의 분포를 보이고 건조 시료는 0.009%~0.046%의 값을 보였고, 포화 배수의 γ_{th}^c 이 비교적 큰 값을 나타냈다. 건조 및 포화 사질토 지반에 대한 반복 한계 전단변형률의 특성 및 영향요소에 대해서는 김동수 등(2004)에서 자세히 논하였다.

3.3 저변형률 영역($\gamma < \gamma_{th}^{lc}$)의 변형특성

선형-탄성 한계 전단변형률에 의해 정의되는 저변형률 영역(선형-탄성 영역)에서는 G와 D가 변형률 크기의 변화에도 일정한 값을 유지하는 선형 탄성적인 거동을 보인다. 저변형률 영역에서 결정되는 전단탄성계수를 저변형률 전단탄성계수 또는 최대 전단탄성계수(G_{max}), 재료감쇠비를 저변형률 감쇠비 또는 최소 감쇠비(D_{min})라고 정의한다. 2장에서 기술한 시험절차에 따라 수행된 TS시험결과로부터 최대 전단탄성계수와 최소 감쇠비를 각각 결정하였고, 영향요소에 따라 정리하여 다음의 사실을 관찰하였다.

3.3.1 최대 전단탄성계수(G_{max})

금강모래와 토요라 모래에 대하여 동일한 간극비에 서 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건의 TS시험을 수행하여 결정된 3가지 조건의 G_{max} 를 그림 9에 비교하였다. 본 연구에서 측정한 G_{max} 중에서 금강 모래와 토요라 모래에 대하여 각각 동일한 간극비에서 결정된 건조 모래에 대한 G_{max} 와 포화 모래의 배수 및 비배수 G_{max} 를 그림 9에 비교하였다. 포화 모래의 배수와 비배수 조건의 G_{max} 값은 거의 일치하였으나, 건조 모래의 G_{max} 는 약간 큰 값을 보였고, 금강모래와 토요라 모래 모두에서 동일한 경향으로 나타났다. 탄성이론에 의하면, 배수와 비배수 조건에서는 전단변형은 동일하고, 전단력은 간극수압의 영향을 받지 않기 때문에 배수와 비배수의 G가 동일한 식을 가진다(Wood, 1990). 마찬가지로 본 논문의

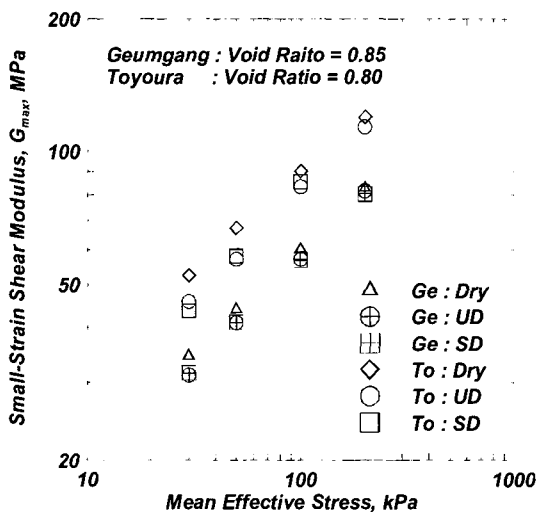


그림 9. 건조 모래의 G_{max} 와 포화 모래의 배수 및 비배수 G_{max} 의 비교

실험결과에서도 배수와 비배수의 G_{max} 가 동일하였다. Santamarina 등(1996)은 미소 역학을 토대로 응력에 의한 지반의 변형 거동은 입자간 방향성, 접촉, 입자간 접촉응력의 영향을 받는다고 하였다. 이러한 미소 역학의 시점에서 건조 모래와 포화 모래를 살펴보면, 포화 모래는 포화로 인해 시료를 구성하는 입자 사이에 간극수가 존재하게 된다. 이 상태에서 구속응력이 작용하게 되면 순수한 모래입자의 골격과 간극수가 구속응력을 분담하여 받게 되고, 건조 모래보다 작은 접촉응력을 형성하리라 예상된다. 접촉응력의 차이가 건조 모래와 포화 모래의 G_{max} 의 차이로 나타난다고 판단된다. 그러나, 이에 대한 명확한 해명을 위해서는 미소 역학을 토대로 한 엄밀한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 측정한 최대 전단탄성계수를 간극비(e)와 평균 유효 구속응력(σ'_0)에 따라 그림 10에 표현하였다. 이때, 포화 모래와 다른 경향을 보이는 건조 모래의 결과는 제외하고 표시하였다. 그림 10으로부터 간극비의 감소에 따라 G_{max} 가 증가하고, 평균 유효 구속응력의 증가에 따라 G_{max} 가 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 Hardin 등(1963)에 의해 수행된 연구 결과와 일치하는 경향으로, Hardin 등은 최대 전단탄성계수에 대하여 식 (1)과 같은 형태의 간극비와 구속응력의 함수로 표현하였다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (1)$$

여기서, A와 n은 상수, F(e)는 간극비의 함수, G_{max} 와 σ'_0 는 kPa로 표현하고, 간극비의 영향은 식 (2)로 제한

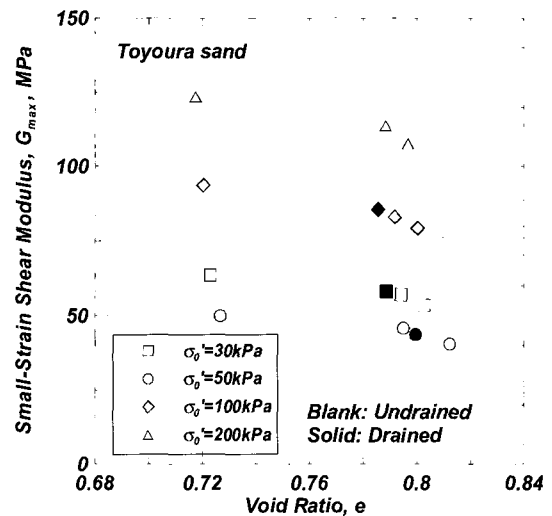


그림 10. 전형적인 간극비와 평균유효 구속응력에 따른 최대 전단탄성계수

하였다.

$$F(e) = \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \quad (2)$$

식 (2)는 이후 연구자들은 모래 지반의 G_{max} 측정을 통하여 검증하여 적용성을 확인하였고(Iwasaki 등, 1978; Kokusho, 1980), 반면, 몇몇 연구자들은 지속적인 노력을 통하여 새로운 간극비 함수를 제안하였다. Hardin (1973)은 식 (2)를 보완하여 식 (3)을 제안하였고,

$$F(e) = \frac{1}{0.3+0.7e^2} \quad (3)$$

Lo Presti(1989)는 식 (4)와 같은 새로운 간극비 함수를 제안하였다.

$$F(e) = e^{-1.3} \quad (4)$$

이러한, 기존에 제안된 모델을 이용하여 본 연구에서 구한 G_{max} 를 간극비 함수에 의해 정규화하고, 평균 유효 구속응력과 정규화된 G_{max} 를 로그를 취한 후 최소자승법으로 상수 A와 n을 획득하였다. 식 (2)~(4)의 세 가지 F(e)을 이용하여 획득한 G_{max} 를 분석한 전형적인 결과를 그림 11에 나타내었고, 각 방법에 의해 구해진 A와 n을 표 3에 정리하였다. 전술한 바와 같이 포화 모래와 건조 모래의 G_{max} 가 차이를 보이므로 건조와 포화 모래로 구분하여 정리하였다. 그림 11에서 세 가지 F(e)에 의해 정규화된 G_{max} 가 각각의 경우에서 잘 일치하고 있어, 세 가지의 F(e)함수 모두 간극비의 영향을 잘 모사한다고 판단된다. 세 가지 F(e)함수를 간극비에 따라 비교하면

표 3. 제안된 F(e)에 의해 구해진 A와 n계수

시료명	조건	F(e)	A	n
금강 모래	건조	Hardin 등 (1963)	8615	0.44
		Hardin (1978)	6030	0.46
		Lo Presti (1989)	6377	0.45
	포화	Hardin 등 (1963)	7134	0.47
		Hardin (1978)	5126	0.48
		Lo Presti (1989)	5393	0.47
토요라 모래	건조	Hardin 등 (1963)	12025	0.43
		Hardin (1978)	9140	0.43
		Lo Presti (1989)	9334	0.43
	포화	Hardin 등 (1963)	7903	0.49
		Hardin (1978)	5984	0.50
		Lo Presti (1989)	6146	0.49

그림 12와 같고, F(e)가 가지는 절대값이 다르기 때문에 비교를 위해 Hardin 등에 의한 F(e)함수를 축을 달리 하여 비교하였다. 절대값은 달랐지만, 본 논문에서 시험된 간극비 영역에서 간극비에 따른 증가 경향이 비슷하게 나타나고 있어 3 가지 F(e) 함수가 모두 잘 적용되었다고 판단되고, 본 논문의 시험된 간극비 영역이상에서의 적용에 대해서는 더 많은 사례 연구가 필요하다고 판단된다. 구해진 A와 n값을 비교해보면, 건조 모래의 A값은 포화 모래 보다 큰 값을 보이면서 그 차이는 15~34%의 차이를 보였다. 반면, 건조 모래의 n은 0.43~0.46의 값을 보이고, 포화 모래는 0.47~0.50의 값을 보이면서 건조 모래보다 큰 값을 보였다. 금강모래와 토요라 모래의 n계수는 비슷한 값을 보였으나, 반면, A계수는 토요라 모래가 금강 모래보다 큰 값을 나타내었다.

3.3.2 저변형률 재료 감쇠비(D_{min})

건조 모래의 D_{min} 과 포화 모래의 배수 및 비배수 조건 의 D_{min} 을 함께 그림 13에 표현하였다. 건조 모래와 포화 모래의 배수 및 비배수 경우 모두 D_{min} 이 평균 유효

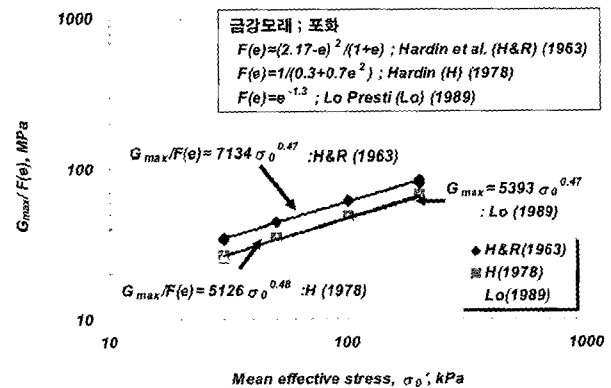


그림 11. 포화된 금강 모래의 3가지 F(e)에 의해 정규화된 G_{max} 와 구해진 모델식

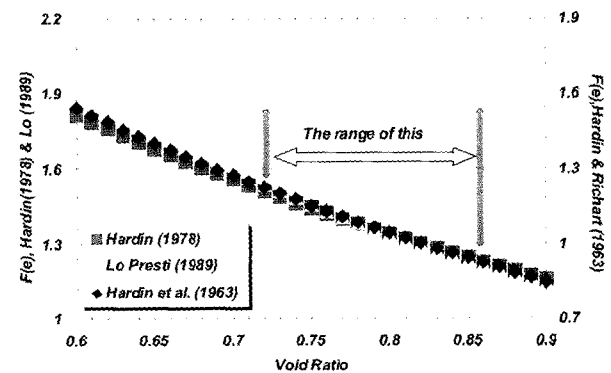
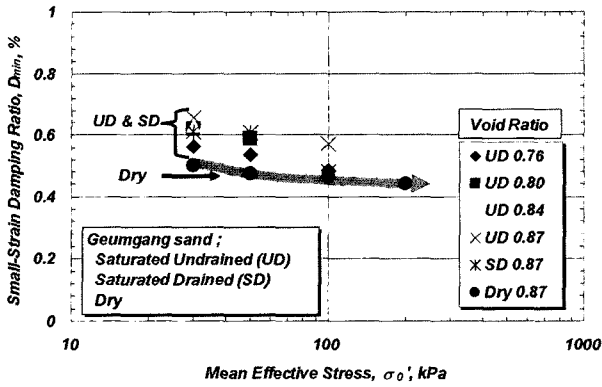
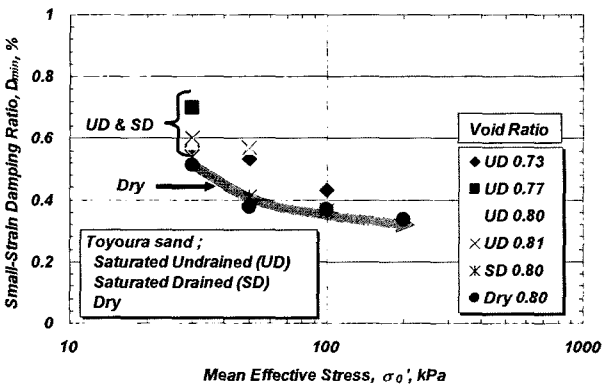


그림 12. 각 F(e)의 간극비에 따른 변화

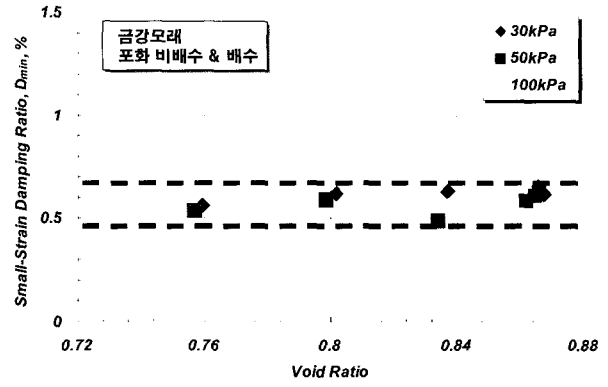


(a) 금강 모래

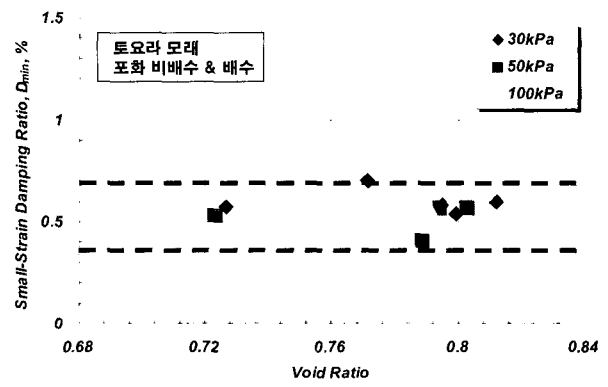


(b) 토요라 모래

그림 13. 건조 모래, 포화 모래의 배수 및 비배수 조건에서의 D_{min}



(a) 금강 모래



(b) 토요라 모래

그림 14. 간극비에 따른 D_{min} 의 변화

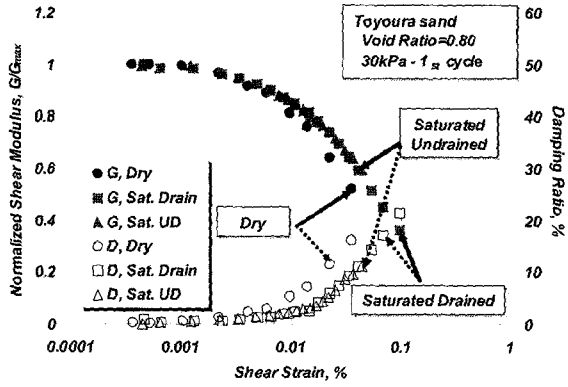
구속응력에 따라 변화가 작게 일어나지만 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 건조 모래의 D_{min} 이 포화 모래의 배수와 비배수 보다 작은 값을 보이면서 아래 한계를 형성하지만, D_{min} 의 값은 0.3%~0.7%로 그 차이가 그다지 크지 않았다. D_{min} 을 간극비에 따라 그림 14에 나타낸 결과, 금강모래와 토요라 모래 모두 다소 분산도가 있지만 간극비의 영향이 나타나지 않고 있다. 저변형률 영역에서의 변형률 측정에 정밀도가 좀 떨어져 다소 큰 분산을 보이고 있어, 이 영역에서의 변형률 측정을 보완할 필요가 있다고 판단된다.

3.4 중간변형률 영역 ($\gamma > \gamma_{th}$)의 변형특성

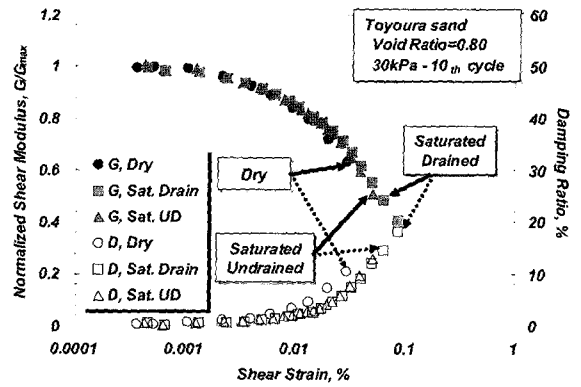
3.4.1 각 배수조건 및 하중회수에서의 비선형 특성 비교

이력곡선으로 확인한 바와 같이 하중회수에 따라 전단탄성계수는 경화 또는 연화현상을 보인다. 이러한 현상이 건조 모래 및 포화 모래의 배수, 비배수 조건에서 비선형 특성에 어떠한 모습으로 반영이 되고 각 조

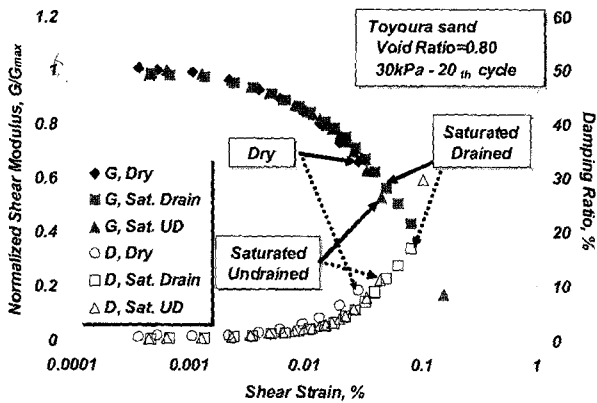
건에서 어떠한 차이를 보이는지 관찰하기 위하여, 1번째, 10번째, 20번째 하중회수에서 측정된 G/G_{max} - $\log \gamma$ 와 D - $\log \gamma$ 곡선을 각 하중회수 별로 나누어 건조, 포화 비배수, 포화 배수 조건을 그림 15에서 직접 비교하였다. G/G_{max} - $\log \gamma$ 와 D - $\log \gamma$ 곡선은 동일한 구속응력 30kPa과 간극비 0.80의 시험 결과로부터 구성하였다. 건조 모래의 1번째 하중회수 G/G_{max} 가 탄성구간에서는 다른 조건들과 거의 일치하나, 전이영역 이후부터 포화 조건의 G/G_{max} 보다 작은 값을 보이면서 큰 비선형성을 보인다. 반면, 포화 배수와 비배수는 비슷한 값이 측정되었다. 하중회수가 10번째, 20번째로 증가함에 따라 건조 모래는 경화 현상으로 인하여 G/G_{max} 곡선이 위쪽으로 이동하여 포화 조건에 근접한다. 반면, 포화 비배수 및 배수 조건에서는 간극수 존재로 인해 변형률 크기 0.06~0.1% 미만에서는 하중 반복 회수에 따른 전단탄성계수의 변화가 크게 나타나지 않고 있으며, 10회 이상의 하중회수에서 G/G_{max} 는 건조, 포화 비배수, 포화 배수 모두 좁은 폭의 분포를 보이면서 일치한다. 포화 비배수 조건의 경우, 그림 15(c)에서처럼 0.1%이상에서 간



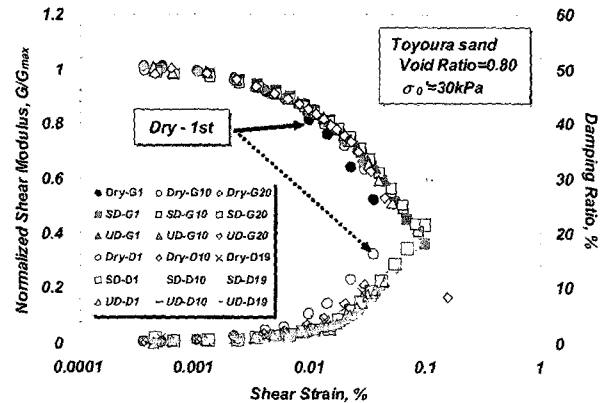
(a) 1번째 하중회수



(b) 10번째 하중회수



(c) 20번째 하중회수



(d) 1번째, 10번째, 20번째 하중회수

그림 15. 건조, 포화 비배수, 포화 배수 조건의 1번째, 10번째, 20번째 하중회수에서의 G/G_{max} - $\log \gamma$ 와 D - $\log \gamma$ 곡선

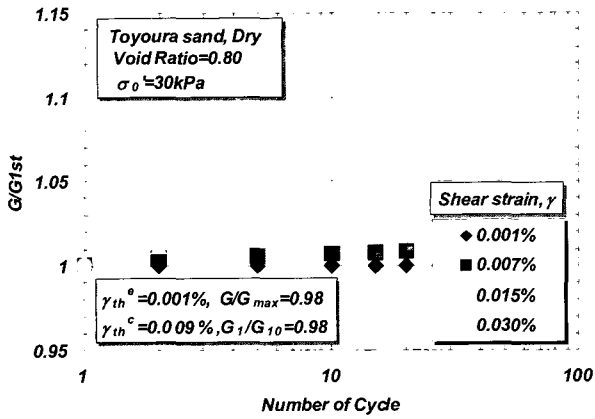
극수압의 증가로 급격히 연화 현상이 일어나나, 다른 조건들과 비교가 가능한 0.1%미만의 영역에서는 주목할 만한 변화가 관찰되지 않는다. 3개의 모든 조건과 하중회수의 결과를 그림 15(d)에 함께 나타내었고, 건조 모래의 1번째 하중회수의 G/G_{max} 곡선이 변형률 크기가 커짐에 따라 다른 조건보다 일찍 큰 감소를 보이면서 특별히 다른 경향을 보이고, 이외의 다른 결과들은 좁은 폭으로 일치하는 분포를 보였다.

재료 감쇠비의 경우 그림 15에서 보이는 바와 같이, 건조 모래의 1번째 감쇠비 곡선이 전이영역에서부터 비교적 큰 값을 보이고, 하중회수에 따라 감소하면서 포화 모래의 결과로 접근하였다. 포화 모래의 경우 0.05%미만의 범위에서는 그다지 큰 변화를 보이지 않고 있고, 10번째 하중회수 이상에서는 G/G_{max} 의 경우보다는 다소 큰 분산을 보이지만, 비교적 수렴하는 결과를 보였다.

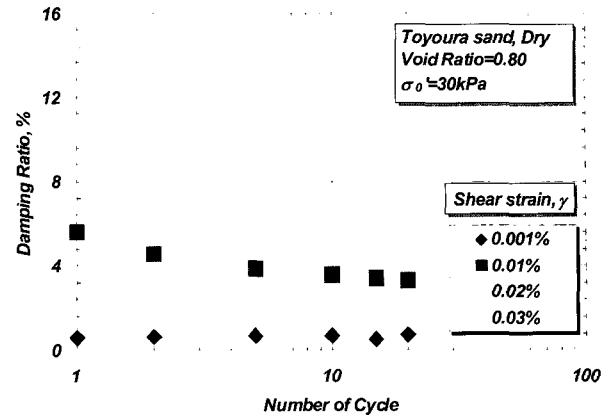
하중회수에 따른 G 와 D 의 변화 추이를 관찰하기 위해, 변형률 크기 0.001%~0.06% 영역에서 반복하중에 따라 1번째 하중회수의 G 로 정규화한 G/G_{1st} 과 D 의 4개

의 변형률 크기에 대한 하중회수에 따른 변화를 그림 16과 그림 17에 나타내었고, 하중회수에 따른 G 와 D 의 변화 특성을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 건조시험의 G 의 경우, γ_{th} 인 0.009%보다 작은 변형률 크기에서는 하중회수에 따라 거의 변화가 없거나, 증가량이 2%미만으로 작은 양이 발생하나, 변형률 크기가 γ_{th} 보다 커지면 하중회수에 따라 확연히 증가하고 변형률 크기가 커짐에 따라 증가량 또한 커졌다. 포화 배수 시험의 경우도 반복하중에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 그 변화량은 건조시험에 비해 작았고, 증가의 시작은 매우 큰 변형률 크기부터 관측되었다. 반면, 포화 비배수 시험은 이력곡선에서 관찰한 바와 같이 반복 연화현상이 나타났고, G 의 감소량은 변형률 크기가 커짐에 따라 커졌다.

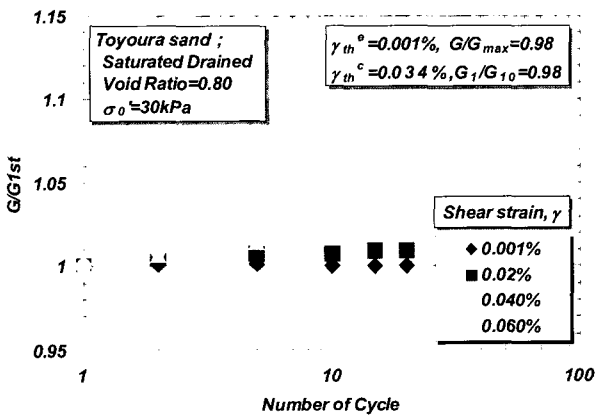
감쇠비에 대하여 전단변형률 크기 0.001%~0.06%영역에서 반복하중에 따른 변화를 4개의 전단변형률 크기 별로 그림 17에 나타내었다. 건조 모래의 재료 감쇠비는 하중회수에 따라 뚜렷이 감소하고, 포화 배수 시험의 경우도 마찬가지로 경향을 보이지만, 그 변화는 건조시험에 비하여 매우 작았다. 또한, 변형률 크기가 증가함에 따라



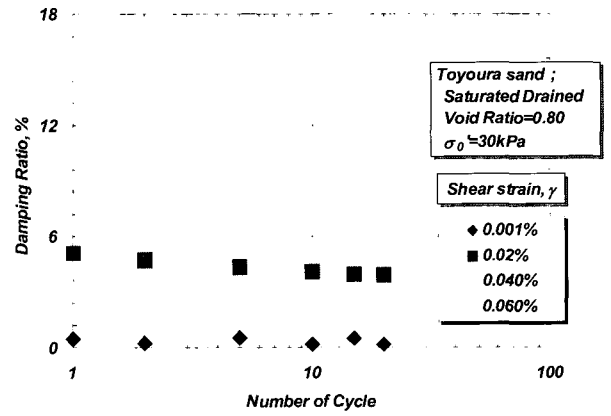
(a) 건조



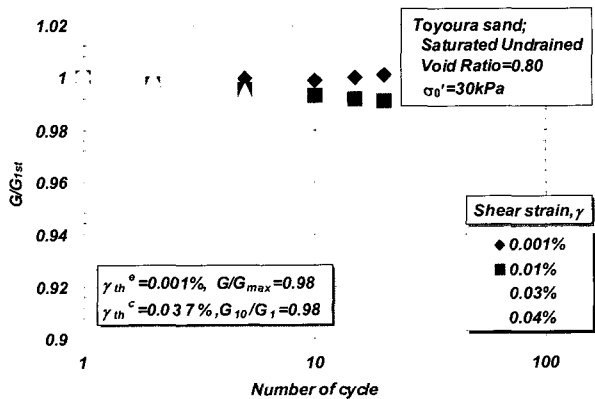
(a) 건조



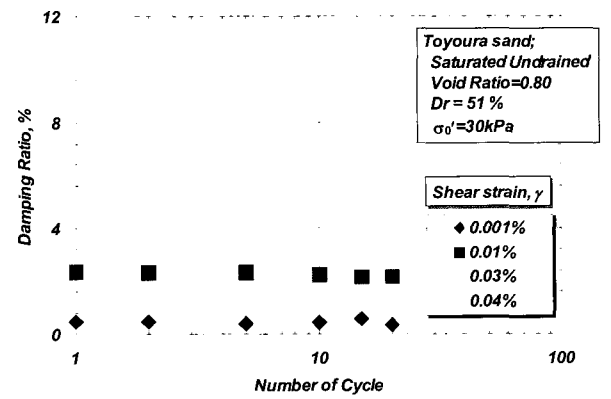
(b) 포화 배수



(b) 포화 배수



(c) 포화 비배수



(c) 포화 비배수

그림 16. 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건의 하중회수에 따른 G/G_{1st} 변화

그림 17. 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건의 하중회수에 따른 D 변화

라 그 감소량은 커졌다. 특이할 만한 현상은 포화 비배수 조건의 경우 이력곡선의 관찰에서도 확인한 바와 같이, 감쇠비의 변화가 나타나기 시작하는 변형률 크기부터 반복 연화 현상이 나타나는 변형률 크기(즉, 간극수압의 증가가 뚜렷이 영향을 미치기 시작하는 시점)보다 작은 변형률 크기까지는 그림 17(c)에서처럼 감쇠비가

감소하는 현상을 보인다. 반복연화가 나타나는 변형률 크기에서도 하중 초기에는 감쇠비의 감소가 나타나다가 하중이 지속됨에 따라 급격히 증가하기 시작한다. 이는, 간극수압의 발생으로 유효응력이 급격히 감소하기 전까지는 감쇠비가 감소하다가 유효응력의 상실이 발생하면 강성의 연화와 감쇠비의 증가가 급격히 나타남

을 의미한다.

포화 비배수 조건에서 관측되는 전단탄성계수의 연화 현상은 하중 반복 시 발생하는 간극수압의 증가 때문으로, 포화 비배수 TS시험에서 전단탄성계수와 동시에 측정되는 간극수압을 비교하여 이를 확인할 수 있다 (그림 18). 그림에서 나타난 바와 같이 변형률 크기 약 0.031% 정도에서 G의 연화가 2% 정도 발생하기 시작하였고($G_{10th}/G_{1st}=0.98$), 이때 동시에 10번째 하중회수에서 측정되는 정규화 간극수압(du/σ'_0)의 값이 약 0.052(5.2%) 임을 찾을 수 있다. σ'_0 이 50kPa 이상에서는, 커진 유효 구속응력으로 인해 모래 시료의 강성이 증가하여 시험이 가능한 변형률 크기가 줄어들고 유발된 간극수압의 정규화된 값이 상대적으로 작아지게 되어 G 및 D의 확인한 변화를 관측하기 어려웠다. 유효 구속응력 30kPa의 금강 모래와 토요라 모래에서는 정규화 간극수압이 3.8%~5.2% 정도 발생할 때, G의 연화가 2% 정도 발생하였다. 이는 매우 주목할 만한 현상으로 전단탄성계수

의 연화와 간극수압의 증가가 직접적인 연관성을 가지고 물리량 사이에도 관계가 있음을 의미한다. 이러한 사실을 연장하여, 하중회수에 따른 G와 D의 변화를 간극수압 증가와 연관 지어 비교해보면 그림 19와 같다. 앞에서 언급된 바와 비슷하게, du/σ'_0 이 약 5%~6% 이상에서부터 전단탄성계수의 감소하는 기울기가 급해지기 시작하고, 하중초기에 감소하던 재료 감쇠비가 역으로 증가하기 시작하는 현상을 확인할 수 있다.

3.4.2 간극비 및 구속응력의 영향분석 및 기존 연구 결과와의 비교

3가지 간극비에서 결정된 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 재료 감쇠비를 함께 그림 20에 나타내었다. 3.3.1절에서 보인 바와 같이 G_{max} 는 간극비의 감소에 따라 증가하였으나, G_{max} 에 의해 정규화된 G/G_{max} 는 간극비의 영향이 사라짐을 확인할 수 있다. 또한, 변형률 크기에 따른 D곡선도 마찬가지로 간극비의 변화에도 불구하고 거의 일치하는 경향을 나타냈다.

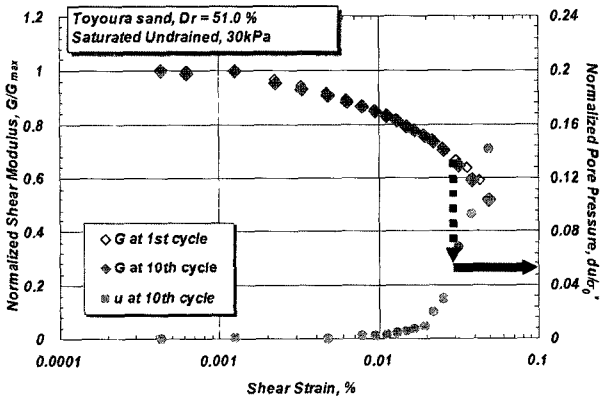


그림 18. 토요라 모래에 대한 포화 비배수 조건의 1번째, 10번째 G/G_{max} 와 10번째 du/σ'_0 비교

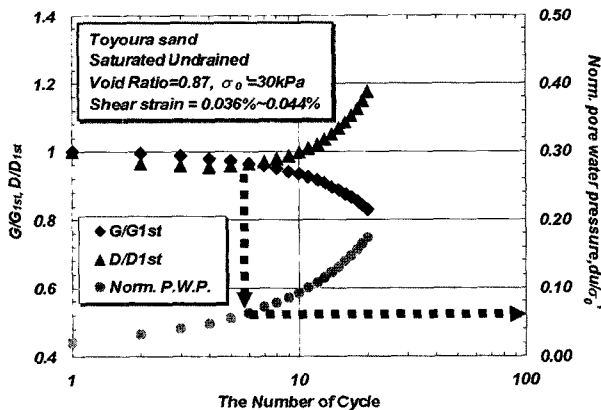
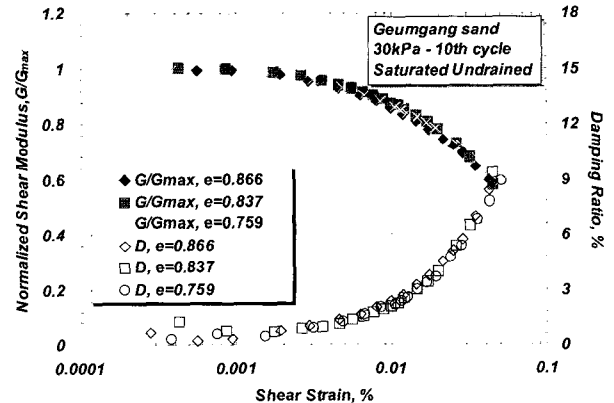
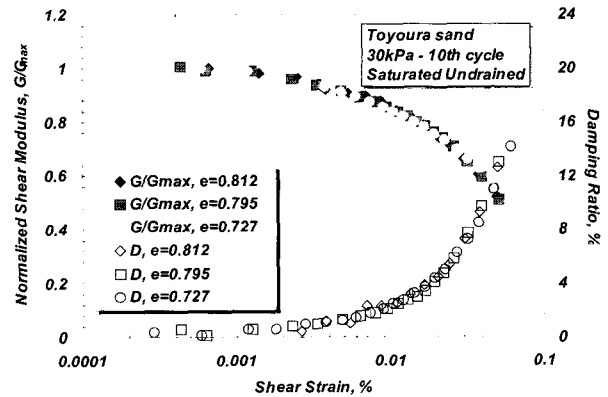


그림 19. 토요라 모래에 대한 포화 비배수 조건의 하중회수에 따른 G, D, 간극수압의 변화

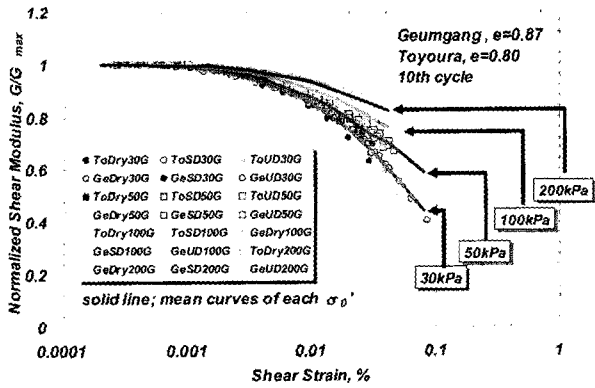


(a) 금강 모래

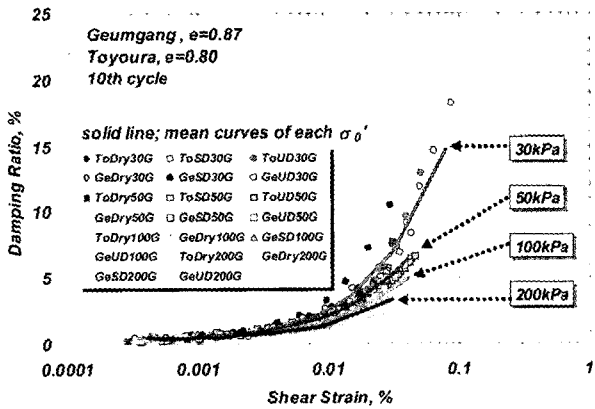


(b) 토요라 모래

그림 20. 간극비 및 변형률 크기에 따른 G/G_{max} 와 D의 변화

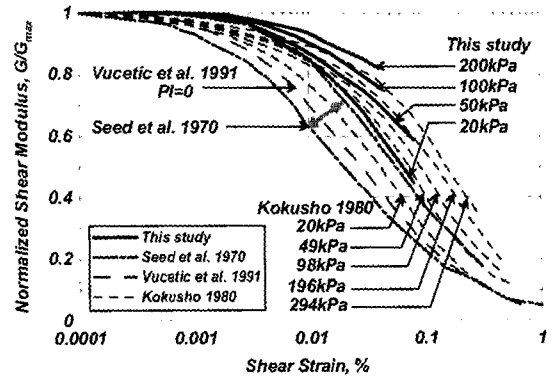


(a) G/G_{max} - $\log \gamma$ 곡선

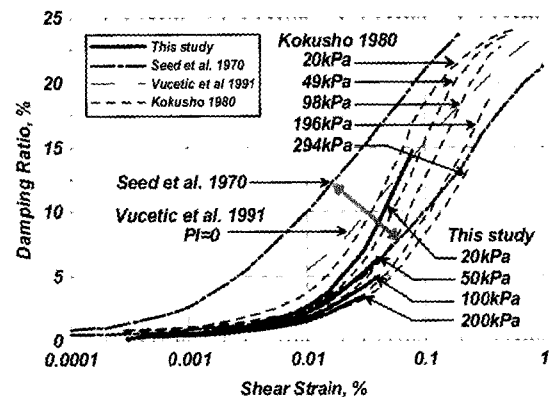


(b) D - $\log \gamma$ 곡선

그림 21. 구속응력에 따른 G/G_{max} - $\log \gamma$ 와 D - $\log \gamma$ 의 변화



(a) G/G_{max} - $\log \gamma$ 곡선



(b) D - $\log \gamma$ 곡선

그림 22. 구속응력별 대표곡선과 모래 지반에 대한 기존 연구결과와의 비교

앞 절에서 설명한 바와 같이 구속응력이 동일한 경우, 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건의 변화에 따른 변화에도 G/G_{max} 와 D 곡선들이 하중회수 10회 이상에서는 비교적 좁은 분포를 이루면서 일치함을 확인하였다. 이러한 사실을 토대로 각 구속응력에 대하여 3가지 배수 조건에서 결정되는 G/G_{max} 와 D 모두를 그림 21에 나타내었다. 금강모래와 토요라 모래의 결과 모두 각 구속응력 별로 비교적 좁은 폭의 띠를 형성하였고, 구속응력의 증가에 따라 G/G_{max} 는 증가하고 D 는 감소하는 경향을 보였다. 이 현상은 과거 Kokusho(1980), Kim(1991), Stokoe 등(1994)에 의해 밝혀진 사실로서 본 연구에서도 확인할 수 있었다. 4가지 구속응력에 대하여 각각의 대표 곡선을 구하였고, 그림 21의 실선으로 나타내었다. 구해진 구속응력에 대한 대표 곡선을 기존에 발표된 모래 지반의 연구결과와 그림 22에서 비교하였다. 모래 지반에 대한 비선형 변형특성 관계로 많이 인용되고 있는 Seed 등(1970)의 연구 결과와 비교하여 본 논문의 제안 곡선은 G/G_{max} 와 D 가 비교적 큰 폭으로 오른쪽에 위치하며

Seed 등의 결과보다 큰 변형을 크기에서 비선형성을 보임을 의미한다. 마찬가지로 Vucetic 등(1991)의 모래 지반을 의미하는 $PI=0$ 의 곡선과 비교해도 매우 큰 폭으로 오른쪽에 위치하고 있다. Kokusho(1980)의 결과와는 비슷한 영역을 형성하면서 똑같이 구속응력에 따른 변화를 나타내고 있지만, 본 논문의 결과가 조금 더 오른쪽으로 위치하고 있다. Kokusho(1980)는 삼축 시험을 이용하여 연구를 수행하였고 본 논문에서 사용한 비틀 전단 시험과 비교하여 시험법의 차이가 결과의 차이를 낳는 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 깨끗한 모래와 같은 모래의 경우, 모래 지반으로 분류됨에도 불구하고 기존에 널리 사용되고 있는 Seed 등(1970)과 Vucetic 등(1991)의 제안 곡선들보다 더 넓고 다양한 분포를 보이고 있어, 이와 같은 현상이 반영되어야 하며, 또한, 구속응력에 따른 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 종래의 Stokoe식 비틀 전단 시험기를 개선하여, 시료의 포화 및 비배수 TS시험 시 유발되는 간극수압의 측정이 가능하도록 하였고, 이를 이용하여 금강 모래와 토요라 모래에 대하여 건조, 포화 배수, 포화 비배수 조건에서의 TS시험을 실시하여 각 조건에 따라 나타나는 변형특성에 대한 연구를 수행하였다. 추가적으로 상대밀도, 평균 유효 구속응력의 시험조건을 변화시키고, 변형특성에 대한 영향을 평가하였다. 각 조건 및 변형률 크기에 따라 전단탄성계수와 재료 감쇠비를 결정하였고, 이를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 획득하였다.

- (1) G_{max} 가 구속응력의 증가에 따라, 간극비의 감소에 따라 증가하였다. Hardin등(1963)에 의해 제안된 G_{max} 의 모델식 형태를 적용하여 본 연구에서 측정한 G_{max} 에 대한 모델식을 추정하였고, 매개변수 A와 n을 제안하였다. 건조 모래의 A상수는 포화 모래보다 15%~34% 정도 큰 값을 보이고, 구속응력 영향상수 n은 건조 모래의 경우 0.43~0.46, 포화 모래의 경우 0.47~0.50의 값을 보였다. 최소 감쇠비의 경우, 구속응력의 증가에 따라 비교적 작은 감소를 보였고, 포화 모래의 D_{min} 이 건조모래보다 조금 큰 값을 보였다. D_{min} 는 간극비의 변화에도 불구하고 그다지 큰 영향을 보이지 않고, 0.3%~0.7% 범위의 작은 값을 가졌다.
- (2) 중간변형률 영역에서 변형률 크기에 따라 G는 감소하고, D는 증가하는 비선형을 관찰하였고, 선형-탄성 영역을 정의하는 γ_{th}^c 과 소성영역을 구분하는 γ_{th}^s 을 정의하였다. 선형-탄성 영역에서는 건조, 포화 비배수, 포화 배수 조건 모두에서 G와 D는 일정한 값을 보이나, γ_{th}^c 보다 큰 변형률에서 건조 모래 경우 하중반복에 따라 G가 증가하는 반복경화가 관찰되었고, D는 감소하였다. 포화 배수 조건에서도 같은 경향을 보이나, 변화가 건조 모래보다 큰 변형률에서 시작하였고, 그 변화량은 작았다. 포화 비배수 조건에서는 하중반복에 따라 G는 감소하는 반복연화가 관측되었고, D는 하중 초기에는 감소하다가 하중이 지속됨에 따라 증가하는 현상을 보였다. 간극수압의 증가가 뚜렷이 나타나면서 G의 감소는 급격히 일어나고, 감소하던 D가 증가하기 시작하였으며, 이

때의 du/σ_0' 는 5%~6%정도였다.

- (3) 1번째 하중회수에서 결정된 G/G_{max} 과 D곡선은 건조 모래의 경우, 포화 모래보다 비선형이 매우 일찍 시작하면서 큰 감소를 보이고, 하중회수가 증가함에 따라 건조 및 포화모래의 G/G_{max} 과 D곡선은 좁은 영역으로 수렴하면서 비교적 좁은 폭의 띠를 형성하였다.
- (4) G/G_{max} -log γ 곡선과 D-log γ 곡선은 간극비의 변화에 관계없이 일치하였고, 구속응력의 증가에 따라 오른쪽으로 이동하는 경향을 보였다. 본 논문의 결과로부터 30kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa, 4개의 구속응력에 대한 대표 곡선을 제안하였다. 본 연구의 제안 곡선은 Seed 등(1970)과 Vucetic 등(1991)의 제안 곡선보다 오른쪽으로 많이 치우쳐있고, Kokusho(1980)의 결과와 비슷한 분포를 나타내지만, 다소 오른쪽으로 위치하였다. 이는 본 논문의 결과와 시험법의 차이에서 이유를 찾을 수 있다. 또한, 모래지반의 경우, G/G_{max} -log γ 곡선과 D-log γ 곡선이 기존에 널리 상용되고 있는 Seed 등 (1970)의 결과와 달리 구속응력의 민감한 영향을 받고 있어 이를 고려하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 두뇌한국21사업과 스마트 사회 기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수 (1995), "공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 건조사질토의 변형특성", 한국지반공학회 논문집, 제11권, 제1호, pp.101-112.
2. 김동수, 추연욱 (2004), "간극수압증가와 동적변형특성 변화에 근거한 사질토 지반의 반복한계 전단변형률", 대한토목학회논문집, 제24권, 제3C호, pp.193-203.
3. Burland, J.B. (1989), "Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: "Small is beautiful"- the stiffness of soils at small strains", *Canadian Geotech. Journal*, 26, 499-516.
4. Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M., and Powell, D. (1982), *Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method*, National Bureau of Standards, Building Science Series 138, Washington, D.C.
5. Dobry, R., and Vucetic, M. (1987), "State-of-the-art report: dynamic properties and response of soft clay deposits", *Proc. Int. Symp. On Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Vol.2, pp.51-87.

6. Hardin, B.O. and Richart, F.E.Jr. (1963), "Elastic wave velocities in granular soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.89, No.1, pp.33-35.
7. 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.
8. Ishihara, K. (1996), *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press Inc., New York, pp.152-179.
9. Hwang, S.K. (1997), *Dynamic Properties of Natural Soils*, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
10. Kim, D.S. (1991), *Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests*, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
11. Kim, D.S. and Stokoe, II, K.H. (1994), "Torsional Motion Monitoring System for Small-Strain (10^{-6} to $10^{-3}\%$) Soil Testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, No.1, pp.17-26.
12. Kokusho, T. (1980), "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range", *Soils and Foundations*, Vol.20, No.2, pp.45-60.
13. Lo Presti (1989), "Proprietà dinamiche dei terreni", *Proc. 14th Conf. Geotech. Turin*.
14. Ni, S.H. (1987), *Dynamic properties of sands under true triaxial stress states from resonant column/torsional shear tests*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
15. Richart, F.E., Hall, J.R., and Wood, R.D. (1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
16. Santamarina, J.C. and Cascante, G. (1996), "Stress anisotropy and wave propagation: a micromechanical view", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.5, pp.770-782.
17. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*, Report No. UCB/EERC-70/10, University of California, Berkeley.
18. Stokoe, K.H., II, Hwang, S.K., Lee, J.N.-K., and Andrus, R.D. (1994), "Effects of various parameters on the stiffness and damping of soils at small to medium strains", *In Proceedings of the First International Conference on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Sapporo, Japan. Vol.2, pp.785-816.
19. Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1992), "Engineering properties of soils and rocks from in-situ and laboratory tests, Key note lecture for session 1", *Proc. of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.101-170.
20. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.117, No.1, 89-107.
21. Vucetic, M. (1994), "Cyclic threshold shear strains in soils", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.120, No.12, pp.2208-2228.
22. Wood, D.M. (1990), *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York, pp.37-46.

(접수일자 2004. 6. 25, 심사완료일 2005. 4. 1)