

공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성

Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests

김 동 수*¹ Kim, Dong-Soo
추 연 옥*² Choo, Yun-Wook

Abstract

Dynamic deformation characteristics, expressed in terms of shear moduli and material damping, are important parameters in the design of soil-structure systems subjected to cyclic and dynamic loadings. In this paper, the deformation characteristics of cohesionless soils in Korea were investigated using resonant column tests. A total of 60 samples, which were sampled from sedimentary and residual soils and reconstituted using controlled particle-size distributions, were prepared. The confining pressure applied in the tests ranges from 20 kPa to 500 kPa. The test results were categorized into 3 groups including clean sands, silts and silty sands, and residual soils. Based on test results, the small-strain shear modulus(G_{max}) and damping ratio(D_{min}) were determined and the effects of confinement on G_{max} and D_{min} were characterized. The empirical correlations predicting G_{max} were suggested for 3 group soils. At strains above elastic threshold, the variations of shear modulus(G) and damping ratio(D) were investigated. Nonlinear deformational characteristics of clean sands are significantly affected by confining pressure and the ranges and mean curves for G and D are suggested considering the range of confining pressure. The silts and silty sands and residual soils were weakly affected by confining pressure, so the representative ranges and curves, independent of confining pressure, were proposed. The proposed curves are compared with the Vucetic-Dobry and Seed-Idriss curves. The proposed modulus reduction and damping curves would be used as a valuable database for the site response analysis during earthquake.

요 지

본 논문에서는 반복하중이나 지진하중을 받는 지반-구조물 시스템의 설계에 필수적인 변수인 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 연구를 국내에 존재하는 비점성토 지반에 대하여 수행하였다. 국내 퇴적토지반 및 풍화토지반에서 채취된 자연시료와 입도분포를 조정하여 제작한 시료를 포함하여 총 60개의 시료에 대하여 20kPa에서 500kPa의 구속응력 범위에서 공진주 시험을 수행하고, 이를 조립질 사질토, 실트 및 실트질 모래, 풍화토의 3개의 그룹으로 나누어 결과를 정리하였다. 저변형률 영역의 변형특성인 최대전단탄성계수와 최소감쇠비에 대하여 구속응력의 영향을 확인하였다. 최대전단탄성계수를 예측하는 경험식을 3개의 그룹별로 제안하였다. 최소감쇠비는 구속응력에 따른 분포영역을 제시하였다. 세립분이 적은 조립질 사질토의 경우, 비선형 변형특성이 구속응력의 영향을 뚜렷이 받고 있어 이를 주요한 변수로 고려하여 대표곡선과 분포영역을 제안하였다. 구속응력의 영향을 적게 받는 실트 및 실트질 모래와 풍화토는 구속응력에 관계없이 대표곡선과 분포영역을 제안하였다. 제안된 각 시료의 대표곡선과 기존의 Vucetic-Dobry와 Seed-Idriss가 제안한 곡선과 비교하였다. 본 논문의 연구결과는 국내지반의 비점성토 지반에 대한 지진해석이나 동하중을 받는 시스템의 해석시 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

1. 서론

반복하중이나 동하중을 받는 지반-구조물계의 설계에서 전단탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 동적 변형물성은 매우 중요한 변수이다. 선형탄성변형률 이하의 저변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수(G_{max})로서 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비(D_{min})로서 고려된다. 지진하중이 작용할 경우 변형률 크기가 커져서, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 값의 변화의 결정이 중요해진다. 특히 등가선형 지반응답해석에서 전단탄성계수와 감쇠비의 변화가 중요한 설계 입력변수가 된다.(Schanabel, 1972)

저변형률 변형특성인 최대전단탄성계수에 대한 많은 실험연구들이 수행되어 간극비, 과압밀비, 구속응력, 지질학적 연도, 소성지수(PI) 등 다양한 요소들의 영향을 받는다는 연구결과들이 발표되었다(Hardin 과 Richart, 1963; Hardin과 Black, 1968; Dobry와 Vucetic, 1987). 비선형 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 연구 또한 많은 실험연구들이 수행되어 발표되었다(Seed 등, 1970; Seed 등, 1984; kim, 1991; Vucetic과 Dobry, 1991; Rollins 등, 1998). 이러한 많은 연구의 결과로 변형률 크기에 따른 전단탄성계수의 감소곡선과 감쇠비 곡선은 구속응력, 간극비, 소성지수(PI), 하중반복회수 등의 많은 영향요소를 가짐이 밝혀졌다. Vucetic과 Dobry(1991)는 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 형태가 PI에 따라 변화한다고 발표하였고, 비소성 흙에 대하여 한 개의 대표곡선을 제안하였다. Seed와 그의 동료 연구자들(1970, 1984)은 모래시료와 자갈시료 각각에 대하여 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 가능영역을 제안하였으며, 제안된 결과에서는 모래시료의 전단탄성계수 감소곡선이 자갈시료의 곡선보다 오른쪽으로 치우치는 경향을 보였다. 그러나, Rollins 등(1998)에 의해 발표된 연구결과에서는 자갈시료의 변형특성이 Seed 등의 연구결과 중 모래시료의 결과와 거의 일치하였다. Vucetic과 Dobry(1991)와 Seed와 Idriss(1970)의 연구결과에서는 비소성-비점성 지반에 대하여 구속압과 무관

한 대표곡선이나 대표되는 대역이 제안되었지만, 많은 다른 연구자들에 의해 비선형의 전단탄성계수와 감쇠비 특성에 대한 구속응력의 중요성이 밝혀졌다(PHRI, 1997).

지진하중 작용시, 지반부지의 응답특성의 증폭 및 감폭 현상은 지반의 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 연약지반에서 지반의 동적물성의 영향으로 지반변위를 증폭시킨 사례가 Loma Prieta 와 Mexico City 지진에서 보여졌다(Stone et al., 1987; Idriss, 1993). 이러한 이유로 다양한 지반에 대한 대표적인 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선의 형태에 대한 연구가 필요하나, 앞서 언급된 연구결과에서 처럼 지반의 변형특성은 여러가지 영향요소의 영향을 받고 있다. 때문에 국내지반에 적합한 변형특성에 대한 연구결과와 획득이 필요하며, 변형특성에 영향을 미치는 주요한 인자들을 찾아 D/B화 하는 작업은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

본 논문에서는 국내의 비점성지반에 적용 가능한 대표적인 변형특성을 제안할 수 있도록 국내 여러지역에서 실트, 모래등의 자연시료(퇴적토)를 채취하였고, 또한 국내에 존재하는 풍화토와 풍화암 대역에서 풍화시료를 채취하고 재성형하여 공진주 시험을 수행하였다. 이뿐 아니라, 비소성 사질토에 대한 보다 엄밀한 특성 연구를 위하여 강모래를 채가름을 통하여 분리한 후 입자들을 조합하여 다양한 입도분포를 갖는 시험시료를 조제하여, 공진주 시험을 수행하였다. 20kPa에서 500kPa의 구속압 범위에서 수행된 총 60개의 공진주 시험결과를 획득하였다. 얻어진 시험결과를 바탕으로 국내에 존재하는 비점성지반에 대한 저변형률 영역의 변형특성과 고변형률 영역의 비선형 변형거동을 특징 짓고, 이에 대한 영향 요소들을 평가하여 대표값들을 제안하였다.

2. 시험방법 및 시험시료

2.1 시험장치

본 연구는 Stokoe식의 공진주 시험기를 이용하여 수행되었다. 본 시험기는 지반재료를 원통형으로 성형하여 바닥을 고정시키고, 상단부를 자유조건을 유지하면

서 비틀력을 재하하는 방식을 취한다. 시험의 기본원리는 원통형시료가 비틀력에 의해 일차모드에서 공진이 유발되면, 이때 비틀변위를 측정하여 탄성파전달이론을 바탕으로 시료의 전단탄성계수와 변형률을 획득한다. 시료의 감쇠비는 자유진동감쇠법과 Half-Power bandwidth법을 이용하여 구한다(김동수, 1995; Kim, 1991; Hwang, 1997).

2.2 시험시료

본 논문에서는 인천연안, 영종도, 전남광양, 경남낙동강, 부산연안, 전남신안, 전남여수 등지에서 채취된 퇴적토시료 23개, 인천, 부산, 경남통영, 전남장흥 등지의 풍화대역에서 채취된 풍화시료 14개, 입도분포를 인위적으로 조합하여 만든 입도조정시료 23개에 대하여 공진주시험을 수행하고 결과를 획득하였다.

퇴적토시료 및 풍화토시료는 교란시료로 채취되어 실험실로 운반되었다. 시험시료는 공진주시험 후 체분

석(KSF 2301)과 액소성한계시험(KSF 2303, KSF 2304)을 수행하여 기본물성을 획득하였고 표 1과 표 2에 정리하였다. #200체 통과량이 50%를 넘지 않는 시료에 대한 입도분포곡선은 그림 1.(a), 그림 1.(b)와 같다.

입도조정시료는 강모래와 화강암 쇄석을 체가름 시험용 체를 이용하여 입자크기에 따라 분리한 후, 계획된 입도분포에 따라 중량비를 조합하여 시료를 제작하였다. 제작된 시료의 입도분포는 입자의 크기 및 입도분포 영향을 볼 수 있도록, 통일분류법(USCS)으로 SP, SW로 분류되면서 입자크기가 커지도록 제작하였다. 제작된 입도분포시료의 기본물성 값과 입도분포는 표 3과 그림 1.(c)와 같다.

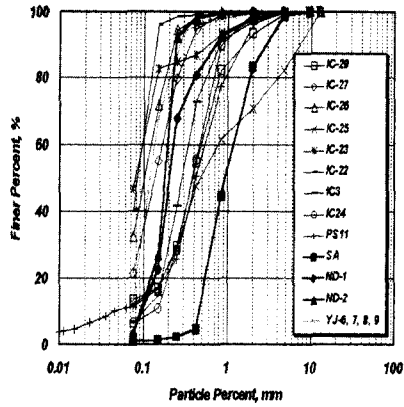
2.3 시험절차

시험시료의 성형조건은 표 1~표 3에 정리된 바와 같고, 시험시편은 과소다짐법(under-compaction method)

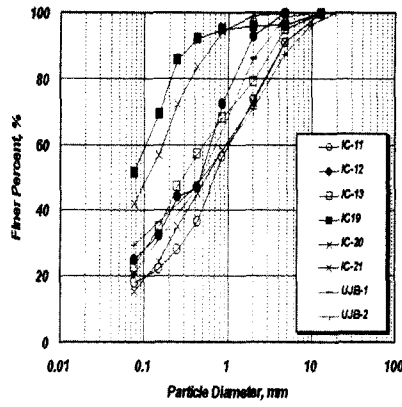
표 1. 퇴적토 시료의 기본물성 및 시험조건

시료번호	채취 지역	깊이	기본물성					시험조건					
			분류 (USCS)	비중	LL, %	PI, %	F, %	D ₅₀ , mm	w, %	γ_t , t/m ³	간극비	구속응력, kPa	
IC-1	인천 연안	15m	ML	2.68	20.5	NP	53.1		27.9	2.04	0.68	80, 100, 200	
IC-2		30m	ML	2.66	NP	NP	60.3		28.0	2.01	0.69	80, 190, 380	
IC-3		45m	SP-SM	2.59	NP	NP	6.5	0.29	19.7	1.94	0.60	80, 280, 500	
IC-4		15m	ML	2.68	20	NP	54.1		24.2	1.99	0.68	110, 220	
IC-5		30m	ML	2.69	23.7	1.17	77.9		29.2	1.95	0.78	80, 200, 400	
IC-22		17m	SM	-	25	NP	40.4	0.08	23.6	1.88	0.76	73, 146, 292	
IC-23		31m	SM	-	25.2	NP	46.7	0.08	25.5	1.88	0.79	115, 230, 460	
IC-24		46m	SP-SM	-	NP	NP	6.2	0.38	16.2	1.80	0.73	160, 320, 500	
IC-25		50m	SM	-	NP	NP	12.2	0.50	15.2	2.16	0.43	160, 320, 500	
IC-26		8m	SM	-	21	NP	32.4	0.10	25.5	1.90	0.77	42, 84, 168	
IC-27		15m	SM	-	NP	NP	21.5	0.14	20.7	1.90	0.70	126, 252, 504	
IC-28		28m	ML	-	23.2	1.57	74.8		26.5	2.00	0.70	102, 204, 408	
IC-29		45m	SM	-	NP	NP	13.2	0.39	18.1	2.02	0.57	155, 310, 500	
ND-1		경남 낙동강	-	SP	2.65	NP	NP	3.1	0.20	10.5	1.51	0.94	25, 50, 100, 200, 400
ND-2	-		SP	2.65	NP	NP	2.7	0.18	9.1	1.56	0.85	50, 100, 200, 400, 550	
PS-3	부산	16m	SP-SM	2.65	NP	NP	11.0	0.42	17.0	2.08	0.49	60, 120, 240	
SA	전남 신안	-	SP	2.64	NP	NP	0.9	0.95	4.6	1.54	0.79	45, 90, 180, 360, 500	
YJ-1	인천 영종도	3m	ML	-	27.1	2			37.8	1.82	1.03	15, 30, 60	
YJ-6								0.12	21.2	1.90	0.69	20, 40, 60, 90, 160, 320	
YJ-7									18.7	1.75	0.79	40, 60, 80, 90, 160, 320	
YJ-8				SM		NP	NP	13.2		19.0	1.65	0.91	20, 40, 60, 80, 90, 160, 320
YJ-9									20.1	1.53	1.07	20, 40, 60, 80, 90, 160, 320	
YS	전남 여수	1~2m	SM	2.67	NP	NP	15.0	0.37	dry	2.20	0.21	35, 70, 140	

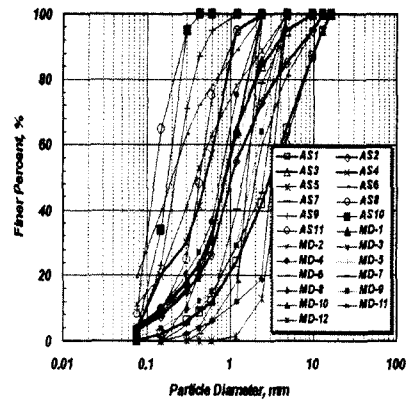
1. γ_t 는 시료의 시험밀도
2. w는 시험함수비
3. F는 #200체 통과량



(a) 자연시료(퇴적토)의 입도분포곡선



(b) 풍화시료의 입도분포곡선



(c) 입도조정시료의 입도분포곡선

그림 1. 시험시료의 입도분포

을 적용하여 제작한 후 공진주시험을 수행하였다. 과소 다짐법은 다짐에 의한 시료성형법으로 여러 층으로 나누어 다지는 경우 동일한 다짐높이를 목표로 다지면 아래층이 더 조밀하게 다져지므로, 시료전체에 균일한 밀도를 확보하기 위하여 각층의 시료는 동일한 무게를 가지고 다음 층으로 갈수록 목표다짐높이가 작아지도록 하여 성형하는 방법이다. 시험시료는 직경 약 50mm, 높이 약 100mm로 성형하였고, 성형밀도, 간극비 및 시험함수비는 표 1~표 3에 정리하였다.

구속응력은 표1 ~ 표 3에 표시된 크기로 공기압을 이

용하여 등방조건으로 재하하였고, 모래시료는 1시간 정도, 실트 시료는 4시간 동안 압밀하였다. 압밀이 끝난 후 다양한 변형률 크기에 따라 배수상태로 공진주시험을 수행하였고, 한 단계의 구속응력에서 시험이 끝나면, 다음의 큰 구속응력에 대하여 압밀하고 공진주시험을 수행하는 다단계시험(multi-stage testing)을 적용하였다.

3. 비점성지반의 동적변형특성

동적변형특성인 전단탄성계수와 감쇠비는 변형률 크기

표 2. 풍화토 시료의 기본물성 및 시험조건

시료번호	채취지역	깊이	기본물성						시험조건				
			USCS	Gs	LL, %	PI, %	F, %	D ₅₀ , mm	w, %	γ_r , t/m ³	간극비	구속응력, kPa	
IC-11	인천	53m	SC-SM	-	26.7	5.26	18.0	0.69	15.3	2.36	0.31	210, 425, 500	
IC-12		62m	SM	-	NP	NP	25.0	0.47	14.1	2.03	0.51	120, 250, 490	
IC-13		70m	SM	-	24	NP	22.9	0.29	12.9	2.16	0.40	120, 240, 480	
IC-19		54m	ML	-	36.9	1.89	51.5	0.11	26.6	1.95	0.74	220, 440, 500	
IC-20		59m	ML	-	29.2	NP	41.9	0.11	24.9	2.04	0.64	120, 240, 480	
IC-21		71m	SM	-	24.8	NP	15.4	0.55	11.8	2.12	0.41	120, 240, 480	
PS-7	부산 신선대	22m	-	-	-	-	-	-	22.9	2.00	0.63	100, 200, 400	
UJB-1	경기 의정부	9m	SM	2.63	NP	NP	20.7	0.46	13.8	2.15	0.39	30, 60, 120	
UJB-2		17m	SM	2.67	NP	NP	29.3	0.48	12.9	2.18	0.38	30, 60, 120	
TY	경남 통영	10m	-	-	-	-	-	-	16.6	1.89	0.63	40, 75, 150	
JH-1	전남 장흥	6m	SM	-	-	-	-	-	23.2	1.69	0.94	30, 60, 120, 240	
JH-2		11m	SM	-	-	-	-	-	14.5	1.83	0.66	45, 90, 180, 360	
YJ-4	전남여수	24m	-	-	-	-	-	-	15.6	1.99	0.54	60, 120, 240	
YJ-5		36m	-	-	-	-	-	-	6.4	1.94	0.45	100, 200, 400	

1. F는 #200체 통과량
2. w 는 시험함수비
3. γ_r 는 시료의 시험밀도

표 3. 입도조정 시료의 기본물성 및 시험조건

시료번호	기본물성					시험조건	
	USCS	F, %	D ₅₀ , mm	w, %	γ _t , t/m ³	간극비	구속응력, kPa
AS-1	SW	0.0	3.00	4.2	1.78	0.55	20, 40, 80, 160, 320
AS-2	SW	3.0	1.00	4.1	1.76	0.57	
AS-3	SW	3.0	0.86	4.0	1.77	0.56	
AS-4	SW	3.0	0.52	3.9	1.76	0.56	
AS-5	SP	0.0	4.00	4.0	1.76	0.57	
AS-6	SP	0.0	2.00	4.0	1.77	0.56	
AS-7	SP	0.0	1.41	4.1	1.77	0.56	
AS-8	SP	3.0	0.42	3.9	1.67	0.65	
AS-9	SP	3.0	0.22	3.9	1.66	0.66	
AS-10	SP	3.0	0.18	4.1	1.62	0.71	
AS-11	SP-SM	8.0	0.12	4.1	1.65	0.67	
MD-1	SW	3.5	0.88	4.0	1.77	0.56	
MD-2	SW	3.0	1.05	4.0	1.77	0.56	
MD-3	SW-SM	11	0.39	4.0	1.77	0.56	
MD-4	SW	4.1	0.77	3.9	1.77	0.56	
MD-5	SW	3.0	1.05	4.0	1.77	0.56	
MD-6	SM	19.0	0.20	3.9	1.76	0.57	
MD-7	SW	0.0	2.53	4.0	1.76	0.56	
MD-8	SP	0.0	3.13	4.0	1.77	0.56	
MD-9	SW	1.0	1.81	4.0	1.77	0.56	
MD-10	SP	0.0	0.88	4.0	1.76	0.56	
MD-11	SP	0.0	1.61	4.1	1.76	0.57	
MD-12	SW	4.0	0.88	4.1	1.77	0.56	

1. F는 #200체 통과량
2. w 는 시험함수비
3. γ_t 는 시료의 시험밀도

에 큰 영향을 받는다. 그러나, 저변형률(10⁻⁴% 이하)에서 측정되는 변형특성은 변형률 크기에 관계없이 일정한 값을 보인다. 이때, 전단탄성계수는 최대값을 가지며 이를 최대전단탄성계수(G_{max})라 하고, 감쇠비는 최소값을 가지며 최소감쇠비(D_{min})라 한다. 반면 변형률이 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하는 비선형 거동을 보인다. 이러한 현상때문에 전단탄성계수와 감쇠비는 저변형률(10⁻⁴% 이하)과 고변형률(10⁻⁴% 이상)로 나누어 고려되며, 본 논문에서도 저변형률 특성과 고변형률의 비선형거동으로 나누어 결과를 정리하였다.

본 연구에서 수행된 공진주 시험결과를 기본물성 및 통일분류법과 연관지어 정리한 결과, 비슷한 특징을 보이는 실트 및 실트질모래, 깨끗한 조립질 모래, 풍화시료 등 3개의 그룹으로 분류하여 시험결과를 정리하였다. 자유진동감쇠곡선에 의해 구해지는 감쇠비는 사이클에 따라 점차 변형률이 감소하므로 이를 고려하여 감

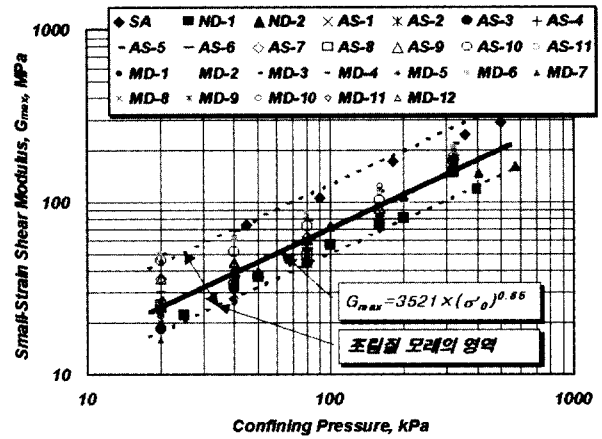


그림 2. 조립질 사질토 시료의 구속응력에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})

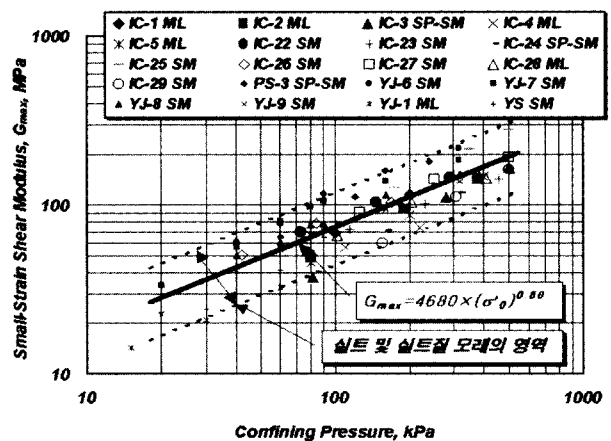


그림 3. 실트 및 실트질모래 시료의 구속응력에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})

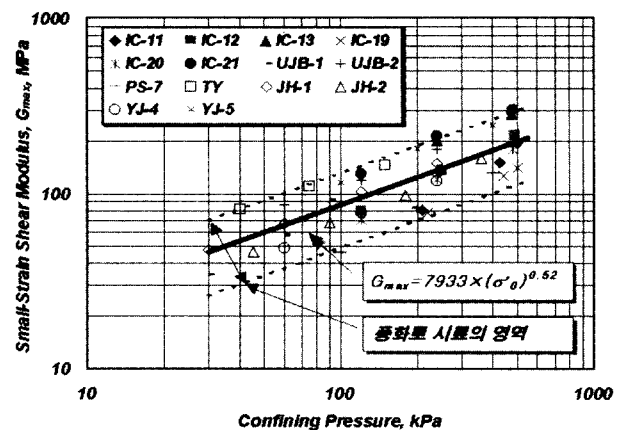


그림 4. 풍화토 시료의 구속응력에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})

쇠시작 후 세 사이클에서의 변형률을 평균하여 대표 변형률로 보정하였으나, 공진주시험기 자체에서 발생하는 시스템감쇠특성은 보정하지 못하였다.

3.1 저변형틀영역의 동적변형특성

3.1.1 최대전단탄성계수

최대전단탄성계수는 간극비, 과압밀비, 구속응력, 지질학적 연도, 소성지수(PI) 등의 다양한 요소들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Hardin와 Black, 1968; Dobry와 Vucetic, 1987). Hardin과 Richart(1963)는 사질토의 경우 구속응력과 간극비의 영향을 주로 받는다고 발표하였고, Hardin(1978)은 최대전단탄성계수에 대한 실험식을 식 1과 같이 제안하였다.

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

여기서, A는 무차원계수, n는 구속압영향상수, F(e)는 간극비 함수, OCR은 과압밀비, k는 소성지수계수, Pa는 대기압, σ'_0 는 평균 유효응력이다. 사질토의 경우 OCR과 소성지수의 영향을 무시할 수 있고 대기압, Pa는 상수이므로, 식 2와 같이 단순화 할 수 있다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (2)$$

최대전단탄성계수와 구속응력은 대수-대수관계에서 n의 기울기와 AF(e)의 절편을 갖는 직선관계임을 의미한다.

시료의 종류별 최대전단탄성계수의 구속응력에 대한 영향을 보면 그림 2~4와 같다. 최대전단탄성계수가 구속응력에 따라 증가하는 현상을 뚜렷이 보이고, 대수-대수 관계에서 거의 직선의 관계를 보이고 있으나, 상수인 AF(e)의 영향으로 다소 분산을 보였다.

이로부터 식 2와 같은 경험식을 제안하기 위해서는 상수 A와 간극비 함수 F(e)를 찾아야 한다. 이를 위해서는 동일시료에 대하여 다양한 간극비에서 시험된 구속응력에 따른 최대전단탄성계수의 결과가 필요하다. 본 연구에서는 YJ시료에서만 간극비를 변화시키며 시험이 수행되었고 모든 시료에 대한 간극비의 영향을 평가하지는 못하였다. YJ시료에 대한 간극비에 따른 최대전단탄성계수의 변화는 그림 5.(a)과 같다. 이에 대하여 Hardin(1978)의 연구결과를 적용하여 보정하면 그림 5.(b)과 같이 비교적 잘 일치하는 결과를 주었다. 그러나, Hardin(1978)의 연구결과를 실트 및 실트질 모래 전체에 대하여 적용한 결과, 그림 6처럼 시료의 종류별로 그다지 집중되지 못하는 결과를 주고 있으며, 이는 상수 A가 시료의 종류만으로 표현되지 못하는 다양한 인자의 영향을

받고 있음이 반영된 것으로 판단된다.

현실적으로 현장에서 간극비의 결정에 어려움이 많이 존재하므로, 간극비 함수 F(e)를 포함하여 $A \cdot F(e)$ 를 하나의 상수로 고려하고, 기울기로부터 결정된 n값을 포함하여 식 2의 경험식을 간략화 하면 실용적으로 사용될 수 있다고 판단된다. 각 시료의 종류별로 구한 경험식은 식 3~5과 이 곡선들은 그림 2~4에 표현된 바와 같다.

$$\text{조립질 사질토: } G_{max} = 3521 \cdot (\sigma'_0)^{0.65} \quad (4)$$

$$\text{실트 및 실트질 모래: } G_{max} = 4680 \cdot (\sigma'_0)^{0.60} \quad (3)$$

$$\text{풍화토: } G_{max} = 7933 \cdot (\sigma'_0)^{0.52} \quad (5)$$

여기서 G_{max} 는 최대전단탄성계수(kPa), σ'_0 는 평균유효응력(kPa)이다.

3.1.2 최소 감쇠비

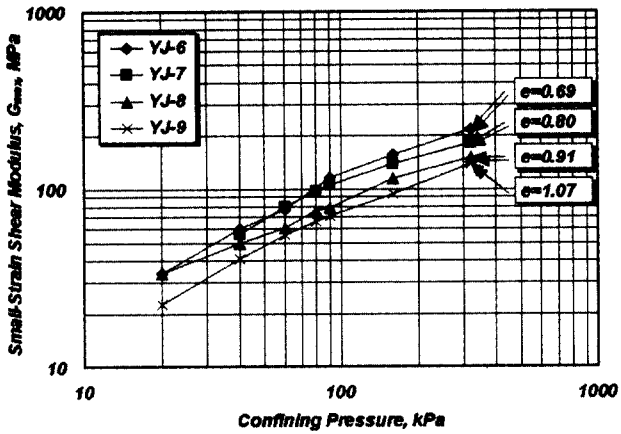
시료의 종류별 최소감쇠비와 구속응력관계는 그림 7~9와 같다. 조립질 사질토시료는 구속응력의 영향을 받아 구속응력이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하였고, D_{min} 값은 범위가 0.63%~3.92%의 분포였다. 또한 구속응력이 작은 20kPa에서는 시료별 감쇠비 값의 차이가 1.6%~3.92%의 분포를 가지나, 320kPa로 구속응력이 커진 경우 0.67%~1.32%로 줄어 들고 있다(그림 7). 실트 및 실트질 모래 시료는 최소감쇠비의 범위가 0.64~2.96%이며, 구속응력의 영향을 다소 받아 구속응력이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하고 있으나, 그 영향은 조립질 사질토시료에 비해 적게 나타났다(그림 8). 반면, 풍화토 시료는 그림 9과 같이 1.5%~7.8%까지 다양한 값을 보이고 있는 반면 구속응력에 대해 그다지 영향을 받지 않고 있을 뿐 아니라, 소성지수나 #200체 통과량 등의 기본물성에도 영향을 받지 않고 있다.

3.2 비선형 변형특성

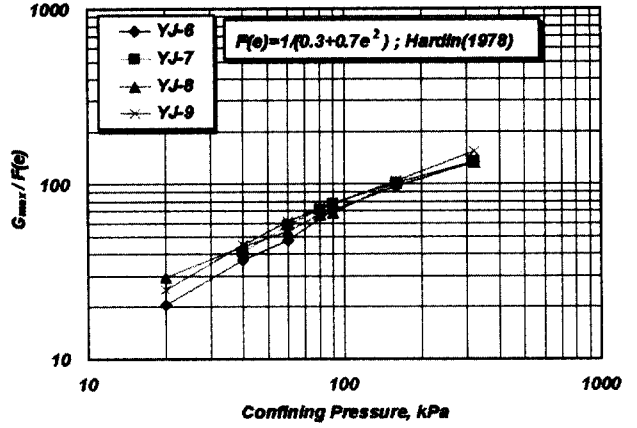
3.2.1 깨끗한 조립질 사질토(Clean sand)-강변 및 해안 채취 모래

비소성 조립질 사질토(통일분류법으로 SP, SW등으로 분류되며 소성지수가 NP인 시료)의 비선형 거동은 그림 10에서처럼 구속응력의 지배적인 영향을 받고 있다.

정규화 전단탄성계수 감소곡선에 영향을 미치는 다



(a) 간극비 차이에 따른 최대전단탄성계수-구속응력 관계의 변화



(b) 간극비 함수에 의해 보정된 최대전단탄성계수-구속응력 관계

그림 5. 최대전단탄성계수에 대한 간극비의 영향(YJ시료)

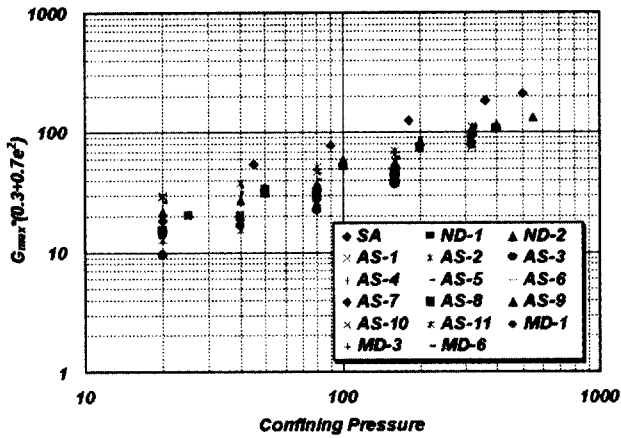


그림 6. 간극비 함수에 의해 보정된 실트 및 실트질 모래시료의 최대전단탄성계수-구속응력 관계

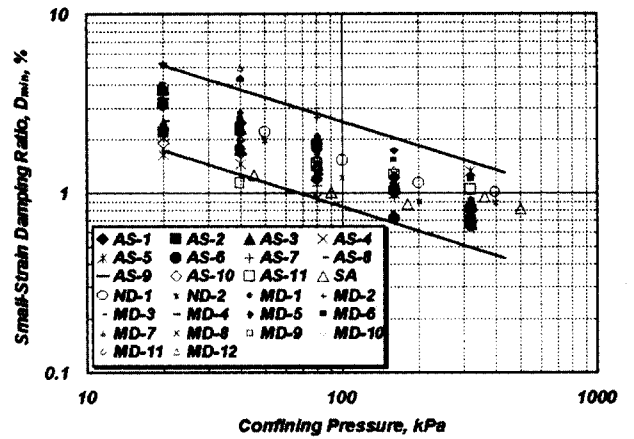


그림 7. 조립질 사질토 시료의 구속응력에 따른 최소감쇠비(D_min)

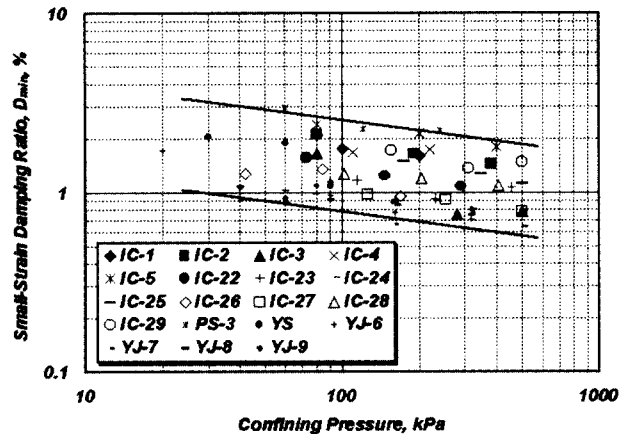


그림 8. 실트 및 실트질 모래 시료의 구속응력에 따른 최소감쇠비(D_min)

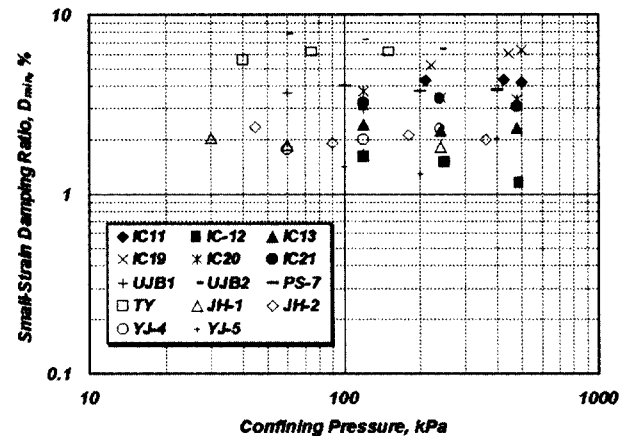


그림 9. 풍화토 시료의 구속응력에 따른 최소감쇠비(D_min)

른 인자를 살펴보기 위해 비교 가능한 비슷한 구속응력 영역에서의 결과들을 모아 그림 11에 표시하였다. 그림 11.(a)는 80kPa에서 100kPa까지의 구속응력에서 실험된

결과의 모음이고, 그림 11.(b)는 320kPa에서 400kPa까지의 영역에 해당하는 결과들의 모음이다. 두 구속응력 영역에서 각각 다른 현상을 보이고 있다. 80kPa-100kPa

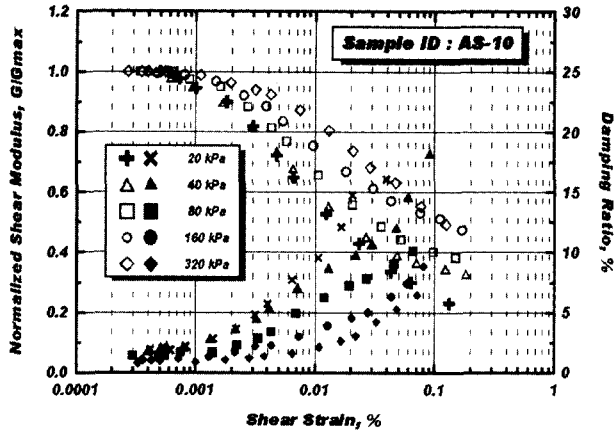
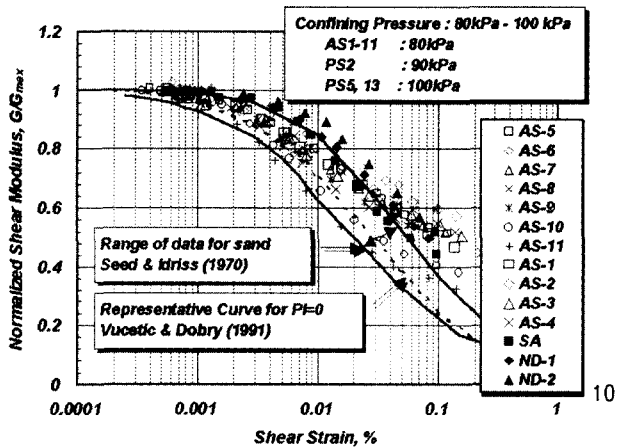


그림 10. 조립질 사질토의 대표적인 공진주 시험결과(AS-10)

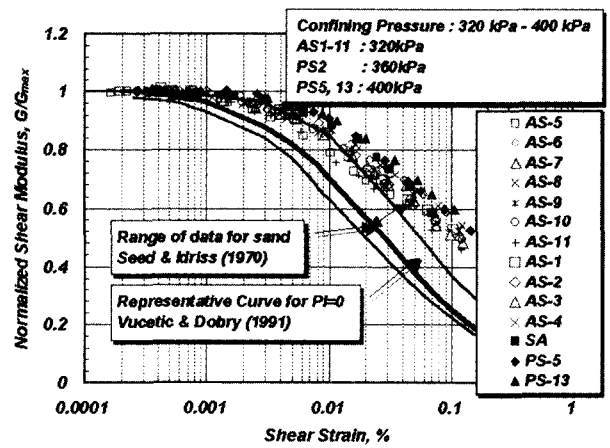
영역의 결과는 Vucetic과 Dobry의 소성지수가 0인 연구 결과처럼 한 개의 곡선으로 대표될 수 없고, Seed와 Idriss의 연구결과와 같이 넓은 분포를 보이고 있으나,

그 분포 또한 Seed와 Idriss의 상한선을 더 벗어나 넓게 분포하고 있다(그림 11.(a)). 이는 두 선행 연구결과의 적용이 무리가 있고, 구속압 효과들을 고려한 더 많은 연구가 필요함을 말한다. 반면 320kPa에서 400kPa까지의 다소 큰 구속응력에서 시험된 결과는 시험된 시료의 종류나 개수에 비해 얇은 밴드를 형성하며 집중하고 있고, 결과는 Seed와 Idriss의 상한계를 벗어나 분포하고 있다(그림 11.(b)). 구속응력이 작을 때는 시료 고유의 특징이 주도적으로 나타나는 반면 구속응력이 커지면 시료의 특징이 사라지고 구속응력에 따라 변형특성이 수렴됨을 확인하였다.

감쇠비의 결과에서도 정규화 전단탄성계수의 결과와 비슷한 경향을 확인하였다. 구속응력 80kPa-100kPa 영역에서는 Seed와 Idriss의 연구결과와 같이 넓은 분포로 퍼져 있으나(그림 12.(a)), 320kPa-400kPa의 큰 구속응

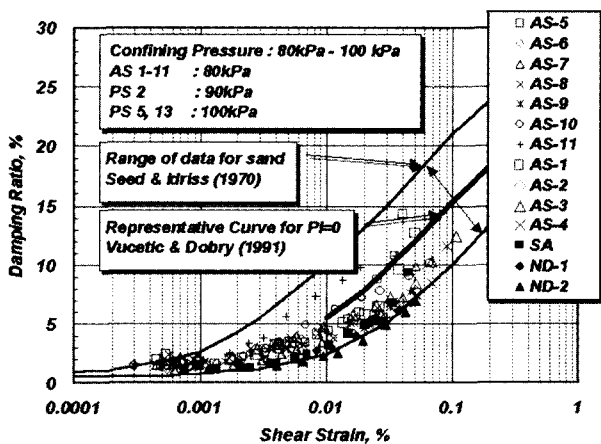


(a) 구속응력 80-0kPa

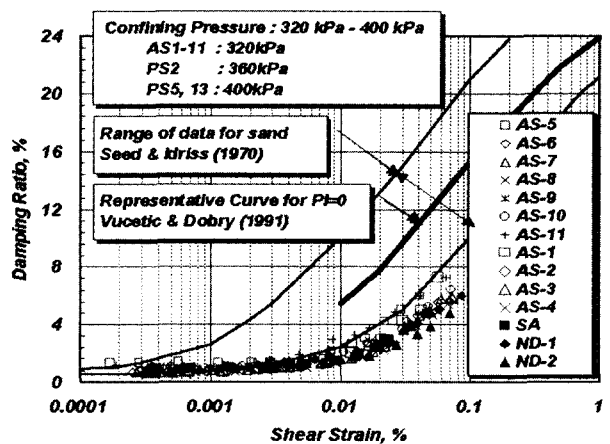


(b) 구속응력 320-400kPa

그림 11. 조립질 사질토의 정규화 전단탄성계수 감소곡선



(a) 구속응력 80-100kPa



(b) 구속응력 320-400kPa

그림 12. 조립질 사질토의 변형률 크기에 따른 감쇠비 곡선

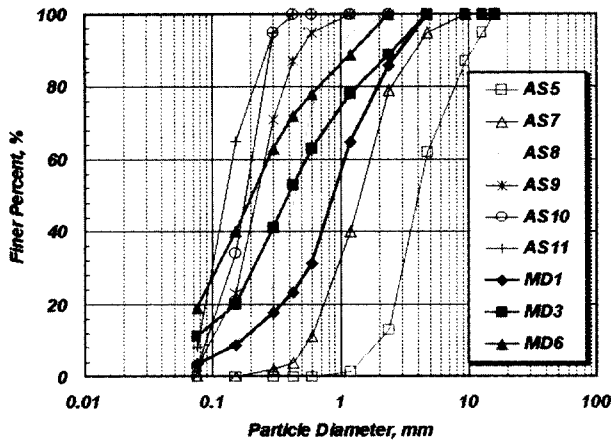


그림 13. 입도조정시료의 입도분포곡선

력에서는 매우 좁은 영역으로 겹쳐지는 결과를 보이며, Seed와 Idriss의 연구결과의 하한선의 오른쪽 방향으로 벗어나 위치하였다(그림 12.(b)).

변형특성에 영향을 미치는 다른 인자를 알아보기 위하여 AS5, AS7, AS8, AS9, AS10, AS11, MD1, MD3, MD6의 9개의 시료를 선정하여 비교해 보았다. 입도분포는 그림 13에 보이는 바와 같이 시료번호가 증가할수록 시료를 구성하는 입자의 전체적인 크기가 작아지는 시료이고 입도분포는 거의 평행이동을 하는 형태를 취하였다. AS계열은 나쁜 입도(Poorly graded)를 가지면서 입도분포가 비슷한 형태로 평행이동하고 있고, MD계열은 좋은 입도(Well graded)를 가지면서 입도분포가 평행이동하고 있다. 그림 14에 의하면, 입자크기가 증가함에 따라, 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 감소정도가 줄어들어 비선형성이 나타나는 중간변형을 부분이 위로 올라가고 있으나, MD1과 AS8시료보다 입자가 큰 시료들은 거의 겹치고 있었다. 그러나, 입자 크기에 따른 영향이 AS계열과 MD계열이 서로 다르게 나타나고 있어, 모든 시료의 결과를 통합하여 정의 할 수 있는 정량화된 변수를 찾기는 힘들었다. 감쇠비에서 비슷한 경향을 확인할 수 있었고, 감쇠비는 정규화 전단탄성계수와 반대로 입자크기가 증가함에 따라 중간변형을 영역의 감쇠비가 줄어들어 곡선이 아래로 처지는 현상을 보였다. 이러한 입도에 따른 차이도 구속응력이 증가함에 따라 줄어들면서 집중되고 있음을 그림 15에서 확인할 수 있다.

본 시험에서는 목표한 건조단위중량이 대부분 $1.7t/m^3$ 으로 맞추었으나, 입자크기가 작아짐에 따라 동일조건으로 맞추는 것이 불가능하여 AS-8, AS-9, AS-10, AS-11은

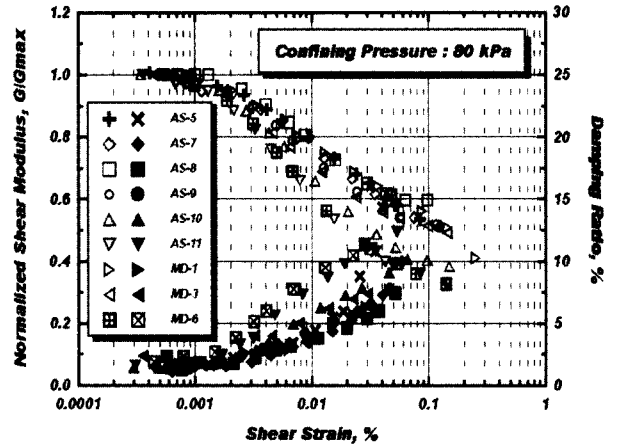


그림 14. 입도조정시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 비교(구속응력 80kPa)

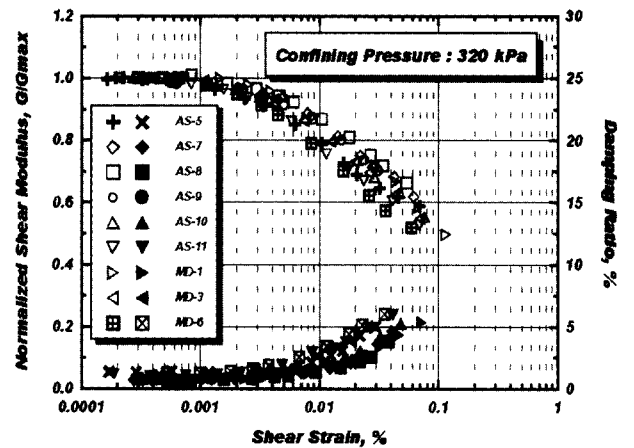
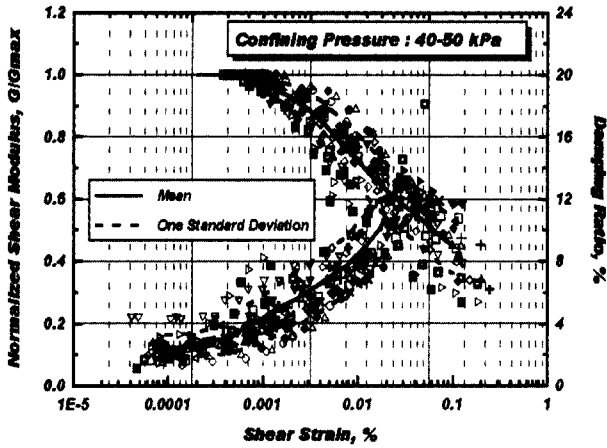


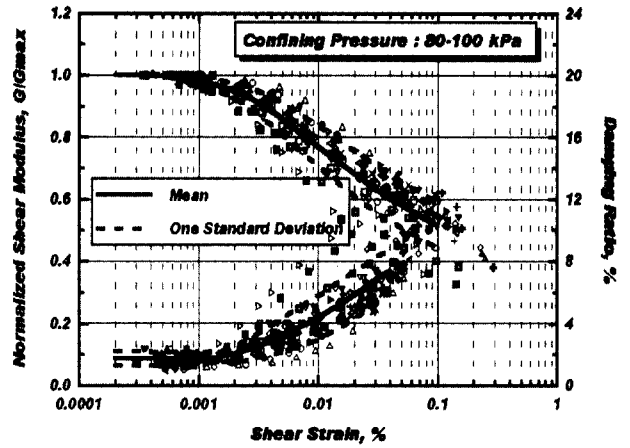
그림 15. 입도조정시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 비교(구속응력 320kPa)

각각 $1.6t/m^3$, $1.6t/m^3$, $1.55t/m^3$ 과 $1.58t/m^3$ 으로 맞추고 나머지 시료는 모두 $1.7t/m^3$ 으로 성형하였다. 앞에서 기술된 입자크기에 의해 나타나는 현상은 시험시료를 동일밀도로 일치시키는 과정에서, 입도분포의 입자크기가 작아짐에 따라 상대밀도가 변화하여 나타나는 현상일 수도 있으리라 판단되며 향후, 이를 고려한 상대밀도에 대한 영향을 평가할 필요가 있다.

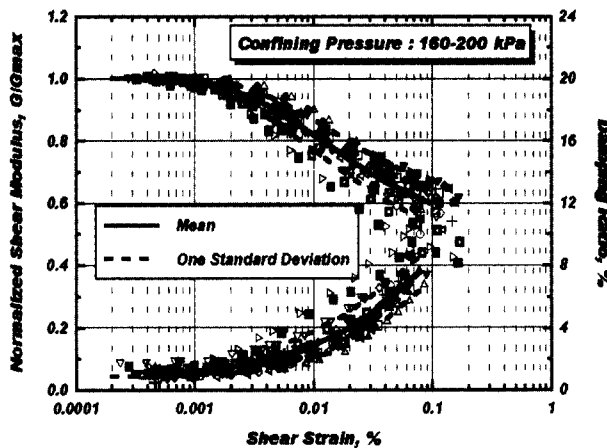
또한, 조립질 모래의 시험결과 중에서 다른 지역에서 채취되었지만 비슷한 분포를 갖는 시료의 시험결과들이 일치하지 않는 현상을 보였다. 이는 변형특성에는 단순히 입도분포만의 영향이 아님을 시사하고 있다. 입자의 특징이 달라짐에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 이를 고려할 수 있는 입자의 형상(angularity, roughness 등) 등을 고려한 연구가 추후에 필요할 것으로 판단된다. 이러한 결론들을 종합해보면, 세립분의 양이 적은 조립



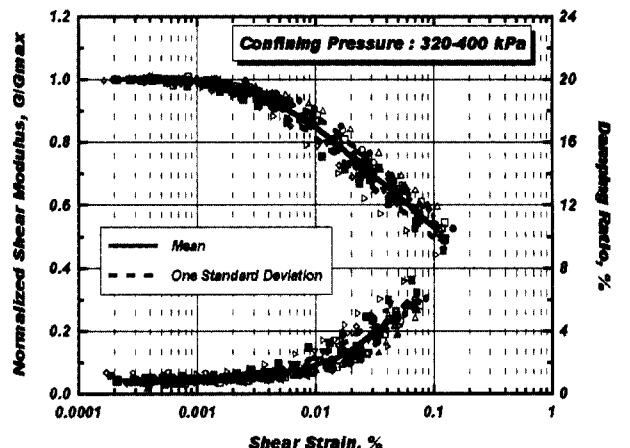
(a) 구속응력 40kPa~50kPa



(b) 구속응력 80kPa~100kPa



(c) 구속응력 160kPa~200kPa



(d) 구속응력 320kPa~400kPa

그림 16. 조립질 사질토의 구속응력에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선의 변화

질 모래(대표적으로 강이나 해안에서 채취된 모래)의 경우 구속응력의 영향이 뚜렷하여 해석이나 설계에 적용시 구속응력의 영향을 고려하여야 한다. 또한 작은 구속응력에서는 시료마다 다양한 분산을 보이지만 구속응력이 증가할수록 좁은 영역으로 집중함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 구속응력이 작을 때는 입도분포에 따라 달라지는 입자구조 또는 입자의 형상등이 입자와 입자간의 맞물림이나 미끄러짐 등의 입자간 거동에 영향을 주어 다양한 변형특성을 보이다가, 구속응력이 증가함에 따라 입자간 마찰력이 증가하게 되어 거동특성이 입자광물자체의 영향을 많이 받게 되면서 좁은 영역으로 집중되는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 확인하지는 못하였지만, 다짐 및 성형방법에 따라 다르게 형성되는 입자구조의 영향도 있으리라 판단된다.

본 시료의 연구결과, 구속응력의 영향을 뚜렷이 받

므로 조립질모래에 대하여 각 구속응력 수준에서의 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 그림 16과 같이 획득하여 제안하였다.

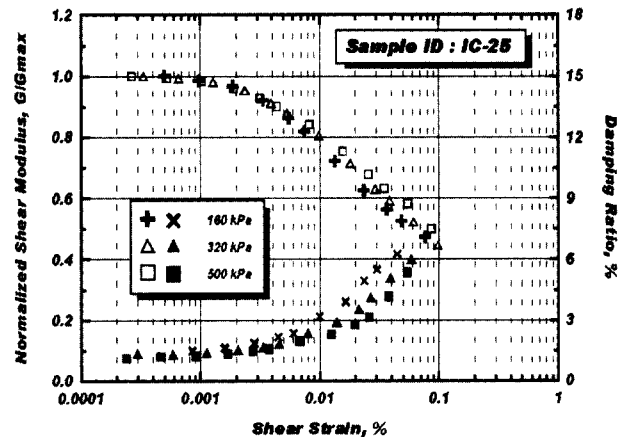
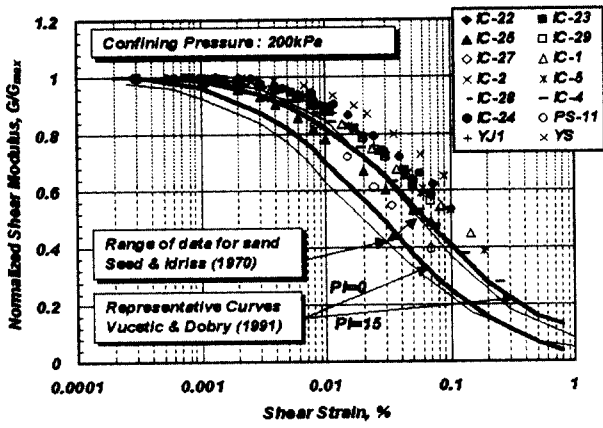
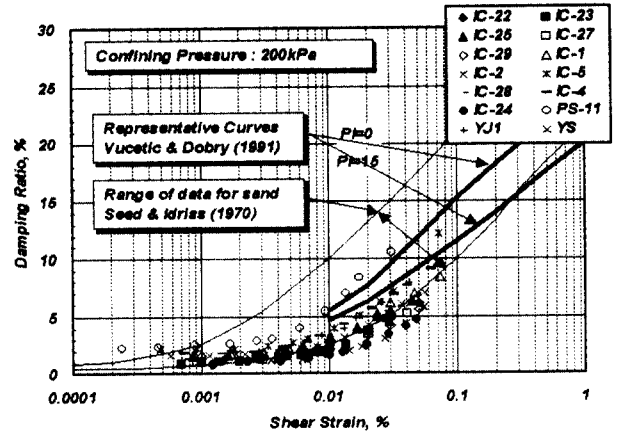


그림 17. 실트 및 실트질 모래시료(IC25)의 대표적인 공진주시험 결과

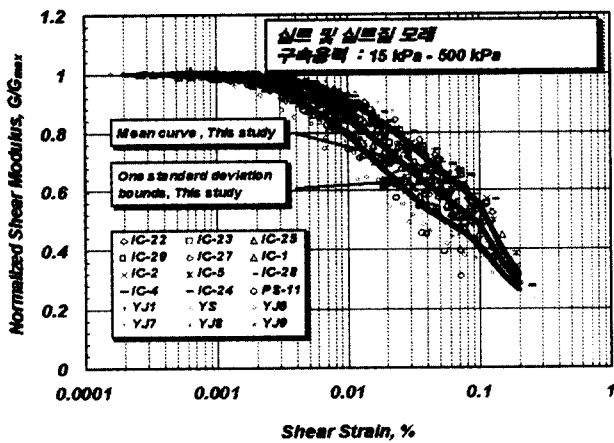


(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선

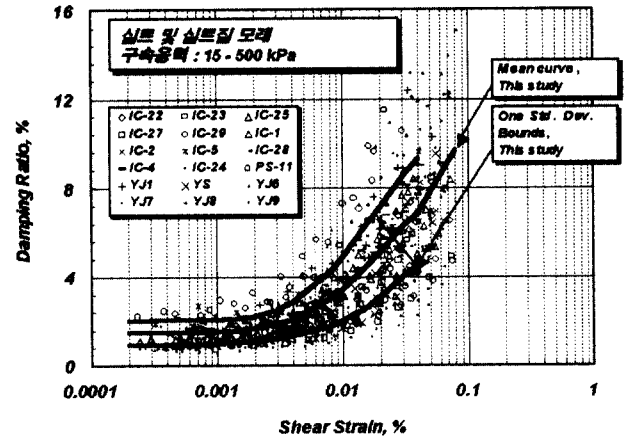


(b) 변형률크기에 따른 감쇠비곡선

그림 18. 실트 및 실트질 모래시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선(구속응력 : 200kPa)



(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선



(b) 감쇠비 곡선

그림 19. 실트 및 실트질 모래시료의 비선형 변형특성

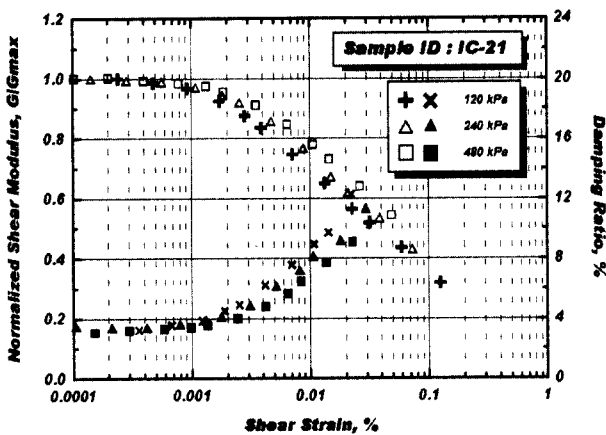


그림 20. 대표적인 풍화시료(IC21)의 공진주시험 결과

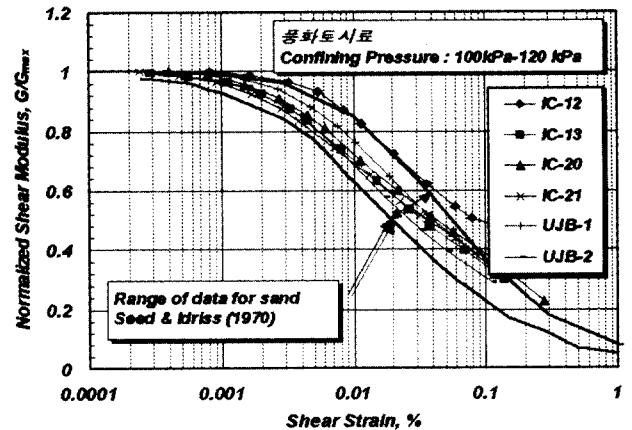


그림 21. 풍화시료의 100kPa-120kPa영역 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수

3.2.2 실트 및 실트질 모래

실트 및 실트질 모래는 통일분류법으로 ML, SM, SP-SM 등으로 분류되는 시료로서, 세립분을 다소 포함하고

있어 조립질 모래와 소성지수를 갖는 점성토의 중간적인 특성을 보인다. 그림 17에서처럼 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 모두에서 구속응력의 영향을 확인할 수 있지만,

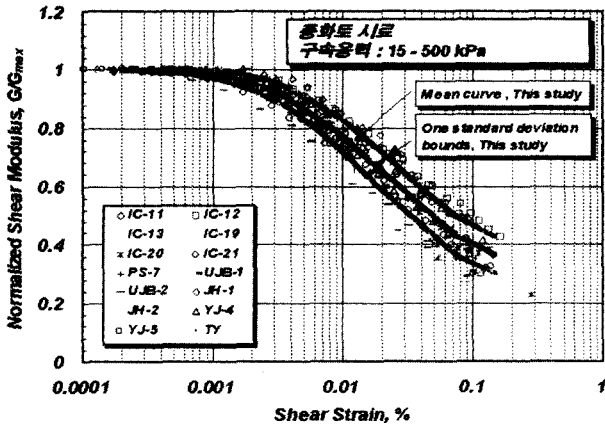


그림 22. 풍화토시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선

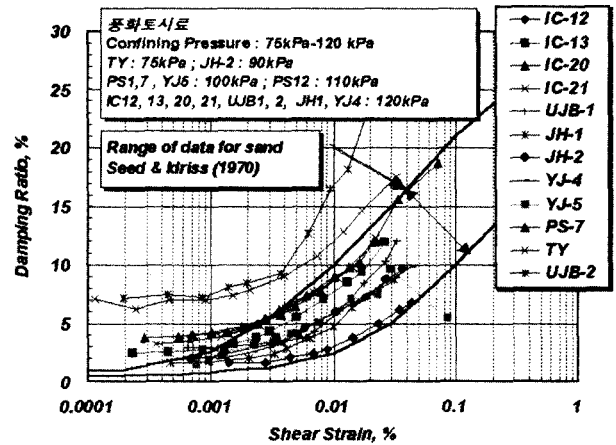


그림 23. 풍화토시료의 100kPa-120kPa영역 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

조립질 모래의 경우에 비해 영향정도가 작았다.

본 연구에서 실트 및 실트질 모래로 분류한 시료들의 소성지수는 최소 NP에서 최대 2%의 값을 가진다. 구속응력 200kPa에서의 시험결과는 그림 18과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 200kPa의 동일한 구속응력에서의 시험결과임에도 불구하고 매우 넓게 다양한 분포를 나타내고 있다. 종래의 연구결과와 비교하면, 정규화 전단탄성계수와 감쇠비의 시험결과 대부분이 Seed와 Idriss의 연구결과 상한선의 오른쪽 밖으로 위치하고 있다. 또한, 시료들의 소성지수가 NP~2%범위에 있지만 결과들이 Vucetic과 Dobry의 연구결과 소성지수 15%에 해당하는 결과보다도 더 오른쪽에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 두 연구자의 대표곡선이 실트 및 실트질 모래 지반에 대하여 적용하기에 무리가 있음을 확인할 수 있었다.

실트 및 실트질 모래시료의 경우 시료가 갖는 고유의 특성에 의해 나타나는 분산이 구속응력에 의해 나타나는 차이보다 커서, 구속응력에 의한 구분이 의미가 없었다. 따라서, 구속응력에 관계없이 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 그림 19와 같이 제안하였다.

3.2.3 풍화시료

풍화시료는 풍화잔적토와 풍화암 대역에서 채취되었지만 재성형(remold)이 가능한 입자크기 정도로 풍화된 시료를 포함하였다. 이들 시료는 점토나 사질토와는 다른 공학적 성질을 가지기 때문에 따로 분류하여 정리하였다. 풍화시료의 경우에도 구속응력의 영향이 작지만 존재함을 그림 20에서 확인할 수 있다.

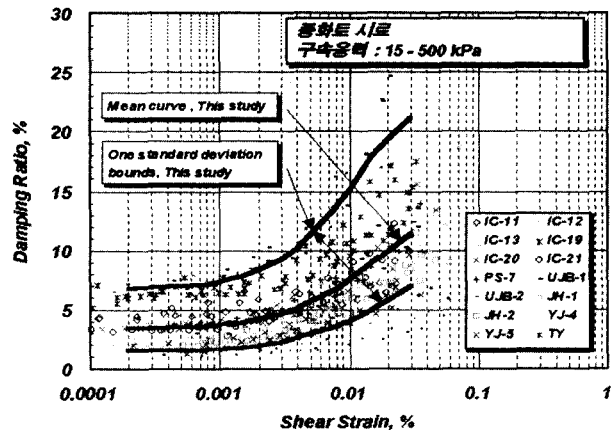


그림 24. 풍화토시료의 감쇠비곡선

그림 21에 풍화시료의 100kPa~120kPa영역의 시험결과를 보면 본 연구의 사질토의 시험결과와 비교하여 비선형 현상이 일찍 시작되어 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 Seed와 Idriss의 연구결과 범위의 잘 부합하게 분포하였다. 그림 20에서 확인했듯이 구속응력의 영향을 거의 받지 않고 있어, 모든 구속응력의 시험결과를 함께 표시하여도 결과의 범위가 크게 변하지 않고 있어, 구속응력에 관계없이 전단탄성계수에 대한 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 제안하였다(그림 22).

감쇠비의 결과에서도 그림 23에서 확인할 수 있는 것과 같이, 비슷한 구속압에 대한 시험결과에서도 시료간에 매우 큰 차이를 보이고 있고, 비선형이 시작되는 선형한계 변형률의 값이나 비선형 영역에서의 감쇠비 값들이 기본물성과는 관계없이 다양하게 분포하고 있다. 또한 구속응력에 큰 영향을 받지 않고 있어, 그림 24와 같이 하나의 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 제안하였다.

본 연구에서 사용된 시료들은 풍화시료의 특성상, 현장의 깊은 곳에 위치하여 비교란시료로 채취하는데 어려움이 있어 대부분 교란시료로 채취되었고, 실험시 재성형(remolded)되어 사용되었다. 화강풍화토의 경우 교란-비교란의 영향이 크지 않다고 발표된 연구결과들이 있으나(정순용, 1997; 고동희, 2001), 교란-비교란의 영향은 정규화 전단탄성계수보다는 감쇠비가 더 민감할 것으로 판단되어 비교란 시료를 중심으로 많은 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 국내 여러지역의 실트, 모래 등의 퇴적토 시료를 채취하고, 풍화토와 풍화암 대역에서 풍화시료를 채취한 후, 재성형하여 공진주 시험을 수행하였다. 또한, 강모래를 체가름을 통하여 분리한 후 입자들을 조합하여 다양한 입도분포를 갖는 시험시료를 조제하였다. 각 시료들을 다양한 구속응력단계로 등방압밀한 후 변형률 크기를 변화시키면서 공진주 시험을 수행하였다. 획득된 시험결과를 실트 및 실트질 모래, 조립질 사질토, 풍화토의 3개의 그룹으로 나누어 정리하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최대전단탄성계수는 구속응력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 뚜렷이 보였다. Hardin(1978)의 경험식을 간략화 하여 실용적으로 적용할 수 있도록 구속응력만의 경험식을 3개의 그룹에 대하여 제안하였다.
- (2) 조립질 사질토 시료의 최소감쇠비는 구속응력이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하며 0.63%~3.92%의 값의 분포를 보였다. 실트 및 실트질 모래시료의 최소감쇠비는 범위가 0.64~2.96%이며, 구속응력의 영향이 조립질 사질토보다 작게 나타나고 있다. 풍화토시료는 1.5%~7.8%까지 다양한 값을 보이고 있는 반면 구속응력 및 기본물성에 대해 그다지 영향을 받지 않았다.
- (3) 조립질 사질토의 비선형 변형특성은 구속응력의 지배적인 영향을 받았고, 본 연구에서는 조립질 사질토에 대하여 4가지 구속응력에 대하여 결과를 정리하여 대표영역과 대표곡선을 제안하였다. 실트 및 실트질 모래는 세립분의 영향으로 조립질 사질토보다는 구속응력의 영향이 작게 나타났다. 구속응력의 영향보다 시료특성에 의한 분산이 더 커서 구속응력

에 따라 구별할 수 없었고, 구속응력에 관계없이 대표영역과 대표곡선을 제안하였다. 풍화토 시료도 실트 및 실트질 모래와 비슷하게 구속응력의 영향이 있지만 매우 작게 나타났고, 모든 구속응력의 결과를 통합하여 대표영역과 대표곡선을 제안하였다.

- (4) 조립질 사질토와 실트질 모래의 경우 제안된 비선형 대표곡선이 Vucetic-Dobry와 Seed-Idriss에 의해 제안된 곡선과는 많은 차이를 보였으며 선행연구의 결과적용에 무리가 있었다. 풍화시료의 경우, 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 결과는 Seed와 Idriss의 연구결과의 범위와 잘 부합하게 분포한 반면, 감쇠비 곡선은 Seed와 Idriss의 연구결과의 범위보다 더 다양한 값을 가졌다.
- (5) 본 연구에서는 모든 시료가 교란시료로서 재성형되어 시험되었으나, 교란-비교란의 영향이 감쇠비에 큰 영향을 줄 것으로 판단되며, 추후 비교란 시료를 중심으로 많은 연구가 수행될 필요가 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터 과제(2000 G0103)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 고동희(2001), 미소변형 삼축시험과 공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화토의 변형특성 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, pp.71~88.
2. 김동수(1995), "공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp.101~112.
3. 정순용(1997), 비교란 및 정적다짐 화강풍화토의 응력-변형률관계에 대한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, pp.41~47.
4. 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.
5. Hardin, B.O.(1978), "The nature of stress-strain behavior of soil", Proc. Geotech. Eng. Div. Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.1, ASCE, Pasadena, June, pp.3~90.
6. Hardin, B.O. and Richart, F.E.(1963), "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol.9, No.SM1, pp.33~65.
7. Hardin, B.O. and Black, W.L.(1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol.94, No.SM2, pp.353~369.
8. Hwang, S.K.(1997), Dynamic Properties of Natural Soils, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.

9. Idriss, I.M.(1993), Assessment of Site Response Analysis Procedure, Report No. NIST GCR 95-667, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.
10. Kim, D.S.(1991) Deformational characteristics of soils at small to intermediate strain from cyclic tests, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
11. Port and Harbour Research Institute, Handbook in Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfeild, 1997, pp.57~67.
12. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B. and Daily, W.D.(1998), "Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No.5, pp.396~405.
13. Seed, H. B., Wang, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, (1984), Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils , Report No. UCB/EERC-84/14, University of California, Berkeley.
14. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.[1972] SHAKE: A computer program for earthquake response of horizontally layered soils, Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
15. Stone, W.C., Yokel, F.Y., Celebi, M., Hanks, T., and Leyendecker, E.V.(1987), Engineering aspects of the September 19, 1985 Mexico earthquake, NBS Building Science Series 165, National Bureau of Standard, Washington, D.C., pp.207.
16. Vucetic, M. and Dobry, R.(1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.1, pp.89~107.

(접수일자 2001. 6. 18)