

공진주/비틀전단시험을 이용한 낙동강모래의 동적전단변형특성

Dynamic Shear Properties of Nak-Dong River Sand Determined by Resonant Column/Torsional Shear Test

김진만¹ Kim, Jin Man
 박요환² Park, Yo-Hwan
 임석동³ Lim, Suck-Dong

Abstract

Dynamic shear properties of Nak-Dong river sand were investigated to build a soil property database for Nak-Dong delta region. Samples were taken from the estuary and the midstream of the river. Laboratory specimens were prepared by air pluviation method, and were tested by using RC/TS apparatus at various confining stresses, relative densities and numbers of cycles. Shear modulus reduction and damping curves were developed using Ramberg-Osgood and Modified Hyperbolic Models. The developed curves, compared to those reported by other investigators, show only a slight difference. The outcome of this RC/TS experiments can be very important resources when accessing the dynamic response of sandy soils in Nak-Dong delta region in the future.

요 지

낙동강 델타지역 퇴적토의 동적변형특성에 관한 데이터베이스 구축의 일환으로서 낙동강 모래의 변형특성을 조사하였다. 시험시료는 낙동강 중류와 하구연 인근에서 채취하였으며, 시편은 건조낙사법에 의하여 성형하였다. 성형된 시험시편으로 공진주/비틀전단시험을 수행하였고, 시험시 다양한 영향요소(구속압, 상대밀도, 변형률크기, 반복하중횟수)를 조사하였다. 시험결과는 Ramberg-Osgood 모델과 Modified Hyperbolic 모델을 적용하여 정규화전단계수 감소곡선과 감쇠비곡선으로 나타내었으며, 기존문헌에서 제시하는 곡선들과 비교한 결과 약간의 차이를 보였으나, 전반적으로 유사한 경향을 보여주었다. 본 RC/TS 실험으로부터의 결과는 향후 낙동강델타지역의 사질토지반의 동적응답 거동을 분석할 때 매우 중요한 자료로 쓰일 것으로 판단된다.

Keywords : Damping curve, Dynamic deformation characteristics, Modulus reduction curve, Nak-Dong river sand, RC/TS test

1. 서론

낙동강을 중심으로 하여 밀양, 김해, 양산·물금 및 부산의 녹산지역을 포함하는 낙동강 델타지역 퇴적지반

은 두터운 퇴적층으로 구성되어 있다. 이 지역은 토지 수요 증가와 지반활용의 필요성에 따라 개발되고 있으며 이에 따라 낙동강 점토와 모래에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그동안 낙동강 점토는 압밀거동 등

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., School of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ., jmkim@pusan.ac.kr, 교신저자)

2 학생회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg, Pusan National Univ.)

3 학생회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg, Pusan National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

에 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔으며, 낙동강 모래의 경우 동적거동 및 액상화에 관한 연구가 일부 수행된 바 있으나(Ryu 등, 2008; 김대만, 2004; 김동수와 추연옥, 2001) 전반적으로 낙동강 델타 퇴적지반의 동적변형특성을 규명하기 위한 연구는 드문 실정이다. 따라서 내진설계에 필요한 전단계수 및 감쇠비를 포함한 낙동강 델타지반의 동적변형특성에 대한 데이터베이스를 구축하는 것이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 이러한 데이터베이스 구축의 일환으로서 낙동강 모래에 대한 연구를 수행하여, 다양한 조건에서의 동적변형특성을 조사하였다.

흙의 동적변형특성을 규명하기 위해서는 동적변형에 영향을 미치는 많은 인자들을 고려하여야 한다. 흙의 동적변형특성은 간극비, 과입밀비, 구속응력, 지질학적 이력, 소성지수(PI) 등 다양한 요소들의 영향을 받는다는 연구결과들이 발표되어왔다(Hardin과 Richart, 1963; Hardin과 Black, 1968; Dobry와 Vucetic, 1987). 또한, 비선형 전단계수와 감쇠비에 대한 많은 시험연구들이 수행되어 발표된 바 있다(Seed와 Idriss, 1970; Kim, 1991; Vucetic과 Dobry, 1991; Rollins 등, 1998).

시험시료는 낙동강 중류와 하구연 인근에서 채취되었으며, 시편은 건조낙사법에 의하여 성형되었다. 성형된 시험시편은 공진주/비틀전단시험을 통하여 다양한 영향요소(구속압, 상대밀도, 변형률크기, 반복하중횟수)

등에 따른 전단계수와 감쇠비 값을 산정하였고, 흙의 비선형 응력-변형률 관계를 효과적으로 표현하기 위하여 시험결과를 다양한 해석모델(Ramberg-Osgood model, Modified Hyperbolic model)에 적용하여 시험조건에 따른 동적곡선의 변화양상을 확인하였다(Anderson, 1974; Hardin과 Drnevich, 1972a, 1972b). 시험결과로부터 산정된 곡선들은 기존문헌(Seed와 Idriss, 1970; Vucetic과 Dobry, 1991)의 결과 값과 비교하여 시험결과와 방법의 적절성을 평가하였다.

2. 시험계획

2.1 시험장비

본 연구에서는 저변형률($\gamma < 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$)에서의 낙동강 모래의 동적변형특성을 규명하기 위하여 공진주/비틀전단시험을 수행하였다. 연구에 사용된 공진주/비틀전단시험기는 1970년대에 Stokoe에 의해서 개발된 Stokoe식 시험기이며, 미소변형률 크기에서도 비틀전단시험이 가능하도록 개선된 장비이다(Kim, 1991). 경계조건으로는 시편의 하단을 고정시키는 일단고정조건이며, 압축공기를 이용하여 시편에 등방의 구속압을 재하하는 방식이다.

이 시험장비의 장점은 동일한 시편에 대하여 동적시험

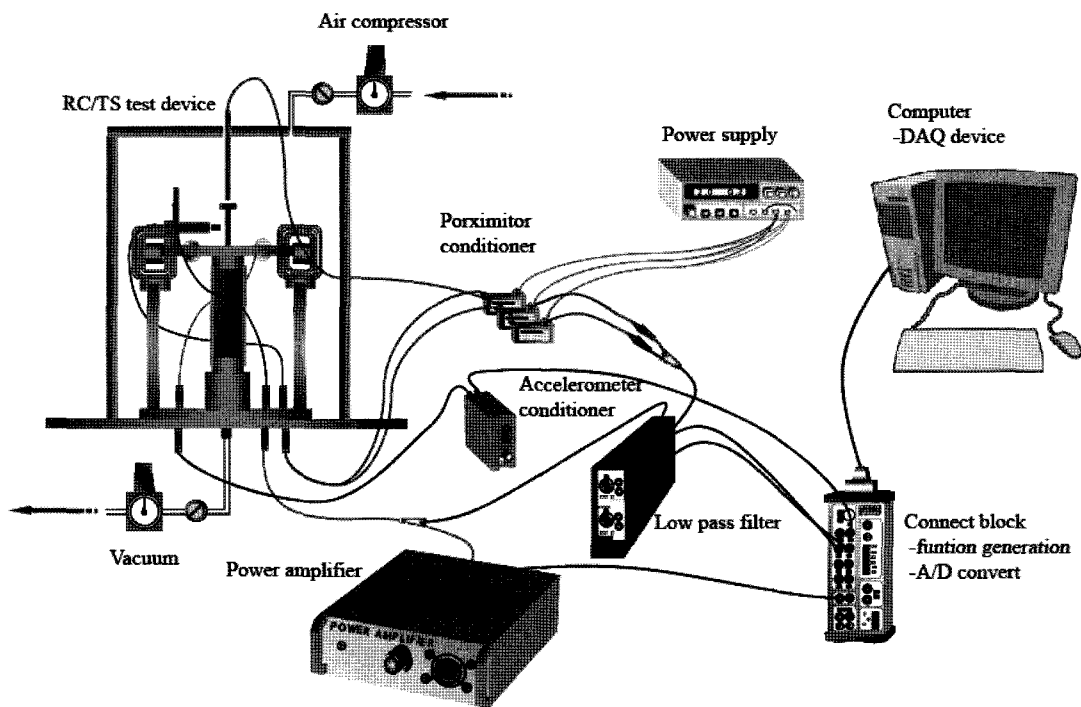
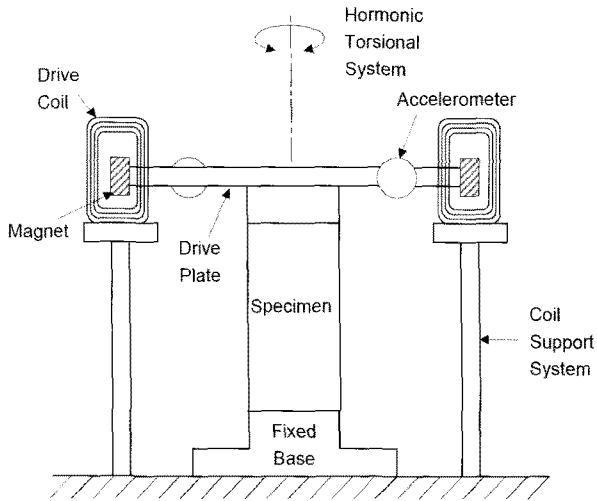


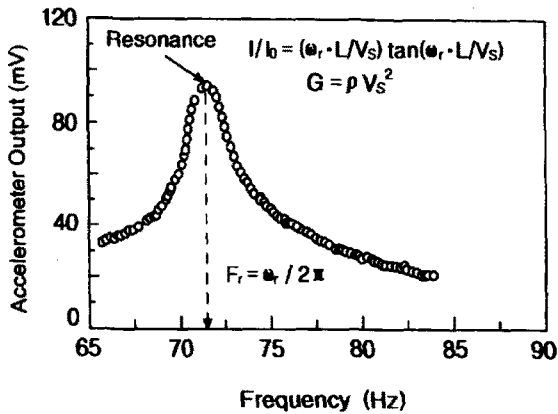
그림 1. 공진주/비틀전단의 구성장치의 모식도

인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험을 수행하므로 두 시험결과의 비교가 가능하다는 점이다. 그리고 자석-코일 시스템에 의한 가진시스템은 저변형률($\gamma < 10^{-3}\%$)에서 비틀전단시험의 수행이 가능하며(추연욱, 1997), 비틀전단시험시 하중주파수를 자유로이 조절할 수 있어 주파수 변화에 대한 지반의 변형특성을 규명할 수 있다. 계측(가속도, 비틀각)부터 결과값 산정(공진주파수, 전단계수, 감쇠비, 변형률 등)과 같은 일련의 과정이 전자동화된 시스템이다. 그림 1은 계측센서와 가진장치 및 기타 하드웨어의 구성에 대하여 보여주고 있다.

공진주시험의 기본원리는 원통형 시편에 10Hz에서 130Hz까지 진동수를 증가시키면서 비틀력을 가하여 그림 2에서와 같이 1차 모드의 공진주파수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도(V_s), 전단계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구하는 동적인 시험방법이다.



(a) 공진주시험기의 개요도



(b) 공진주시험에서 획득한 주파수응답곡선 일례

그림 2. 공진주시험의 개요

감쇠비는 공진주파수의 정현파 하중을 시료에 재하하다가 갑자기 재하하중을 차단하여 시료에 자유진동감쇠를 유발시키고, 이 거동을 측정하여 감소폭으로서 감쇠비를 결정한다.

탄성파전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주시험의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega l}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega l}{V_s}\right) \quad (1)$$

여기서, I = 시편의 질량관성 모멘트
 I_0 = 가진시스템의 질량관성 모멘트
 l = 시편의 길이
 V_s = 전단파속도
 ω = 시편-가진시스템의 고유진동수

식 (1)에서 전단파속도가 구해지면 전단계수(G)를 식 (2)로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

여기서, G = 전단계수
 ρ = 시편 밀도
 V_s = 전단파속도

자유진동감쇠곡선으로부터 감쇠비를 산정하는 이론식은 식 (3)과 같다.

$$\delta \approx \ln \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (3)$$

여기서, θ_n, θ_{n+1} : 연속된 두 개의 진폭의 최대점
 D : 감쇠비

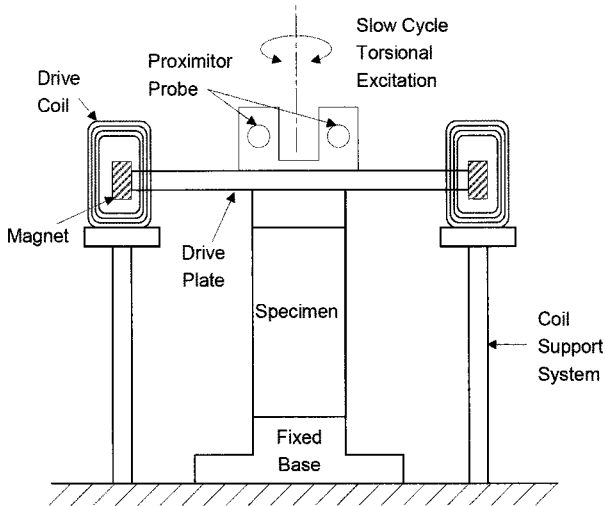
비틀전단시험은 공진주시험기와 동일한 시험기를 사용하고, 작동방법을 달리하여 지반의 변형특성을 결정하는 반복재하 시험방법이다. 시료의 공진거동을 측정하는 대신, 전단응력-전단변형률 이력곡선을 결정하여 변형특성을 관찰한다. 전단탄성계수는 이력곡선의 기울기로부터, 감쇠비는 이력곡선의 면적으로부터 계산된다.

비틀전단시험의 전단계수 산정식은 식 (4)과 같으며, 감쇠비는 식 (5)와 같다.

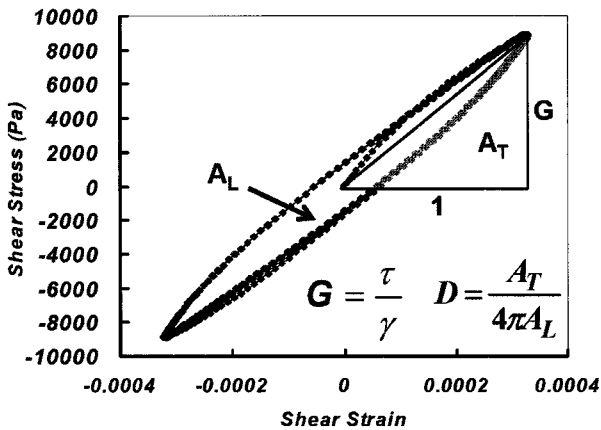
$$G = \tau/\gamma \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{W_d}{W_s} \quad (5)$$

여기서, W_d : 그림 3에서 Hysteresis loop의 면적
 W_s : 그림 3에서 빗금친 삼각형 부분의 면적



(a) 비틀전단시험기의 개요도



(b) 전단응력-전단변형률 이력곡선의 일례

그림 3. 비틀전단시험의 개요

2.2 시험시료

낙동강 중류와 하구에서 채취한 세 가지 모래를 사용하였다. 그림 4는 SEM(Scan Electron Microscope)에 의하여 50배로 확대된 모래입자의 모습을 보여주고 있다. 그림 4(a)와 (b)는 낙동강 하구에서 채취된 것으로 그림 4(a)는 을숙도 하구쪽을 경계로하여 상류 강측의 준설 모래, 그림 4(b)는 하류 바다측 모래이며, 그림 4(c)는 낙동강 중류에서 채취한 모래이다. 낙동강 하구 모래의 경우 중류모래에 비하여 입자가 다소 작음을 알 수 있으며 마모가 조금 더 진행된 것을 볼 수 있다.

세 가지 모래시료에 대한 입도분석결과 균등계수(C_u)가 모두 1.32~1.54 사이로서 입자의 크기가 균일하며, 입도가 균질한 모래로서 통일분류법상으로 SP로 분류되었다. 최대최소건조단위중량시험은 JSF T161-1990의 규정(日本土質工学会, 1991)에 근거하였으며, 최대건조단위중량은 1.555~1.559g/cm³, 최소건조단위중량은 1.195~1.236g/cm³의 범위로서 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 그림 5은 세 가지 모래시료에 대한 입도분포곡선을 보여주고 있다. 보다 자세한 시료의 물성은 표 1에 정리되어 있다.

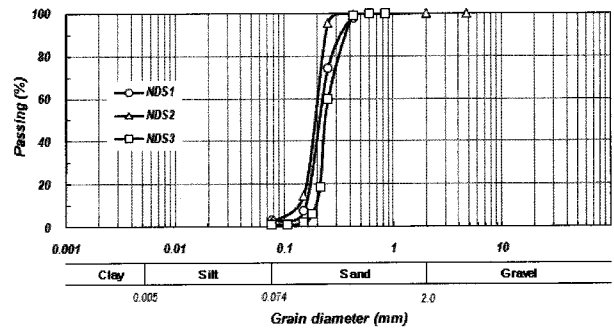


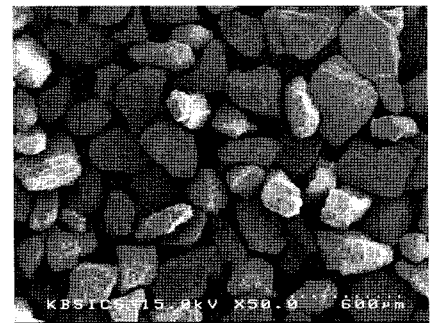
그림 5. 낙동강 모래의 입도분포



(a) 낙동강 하구(NDS1)



(b) 낙동강 하구(바다측 NDS2)



(c) 낙동강 중류(NDS3)

그림 4. 낙동강 모래시료의 SEM(Scan Electron Microscope) 사진

표 1. 낙동강 모래시료의 기본물성

	G_s	γ_{max} (g/cm ³)	γ_{min} (g/cm ³)	C_u	C_g	D_{50} (mm)	USCS
NDS1	2.65	1.555	1.195	1.467	0.992	0.20	SP
NDS2	2.60	1.559	1.203	1.538	1.112	0.19	SP
NDS3	2.63	1.555	1.236	1.316	1.316	0.23	SP

2.3 시험방법

모래시편은 건조 낙사법(air pluviation method)을 사용하여 성형하였다. 이 방법은 건조된 모래시료를 깔대기를 통하여 몰드 안쪽으로 시료를 낙하시켜 성형하는 방법으로서 낙하고와 낙사구의 직경을 조절하여 소정의 밀도로 시편을 성형하는 방법이다. 건조 낙사법의 경우 다짐으로 성형하는 다른 방법들 보다 전체적으로 균일한 밀도로 시료를 성형할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용된 깔대기의 낙사구는 원형이며 직경이 3mm~6mm인 것을 사용하였다. 그림 6는 건조낙사법의 개략적인 모습을 보여주고 있다.

건조낙사법에 의하여 성형된 모래시편을 top cap으로 잘 정착시킨 후 건조조건에서 시험을 수행하였다. 공진주/비틀전단시험시 시편에 가해지는 손상은 무시할 수 있는 정도(추연욱, 1997)이므로 하나의 시료로 모든 구속하중에서 시험을 실시하는 단계별시험법(staged testing)을 채택하였다(그림 7). 단계별시험법은 동일 시료에 대하여 구속압을 높여가면서 시험을 수행하는 것으로서, 각각의 시험시 필요한 시편성형시간을 줄일 수 있다. 그러나, 시험시 시편의 높이가 변화하여 간극비와 상대밀

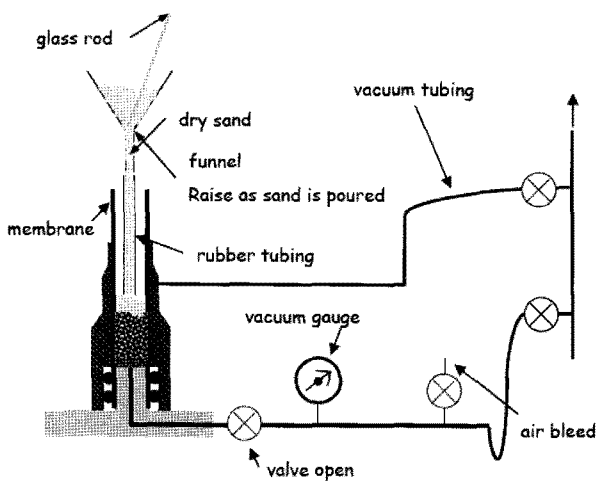


그림 6. 건조 모래 시편성형을 위한 건조낙사법의 개요도(Bishop과 Henkel, 1962)

도가 달라질 수 있으므로 시편의 변화높이를 측정하여 그에 따라 변화하는 상대밀도와 간극비를 계산하였다. 시편에 등방의 구속압 재하 후 비접촉식 변위측정센서(proximity transducer)로 시편의 높이변화를 측정하며, 시편의 높이변화가 없을 때 까지 충분히 압밀한 후 시험을 수행하였다. 구속압재하가 끝나면, 저변형율에서 중간변형율영역까지의 비틀전단시험과 공진주시험을 차례로 수행하였다. 비틀전단시험 보다 공진주시험을 먼저 수행하게 되면, 공진주시험시에 발생하는 많은 반복하중으로 인해 이후 비틀전단시험으로 반복하중에 따른 반복경화현상(cyclic hardening)이나 반복연화현상(cyclic softening)을 관찰할 수 없기 때문에, 비틀전단시험을 우

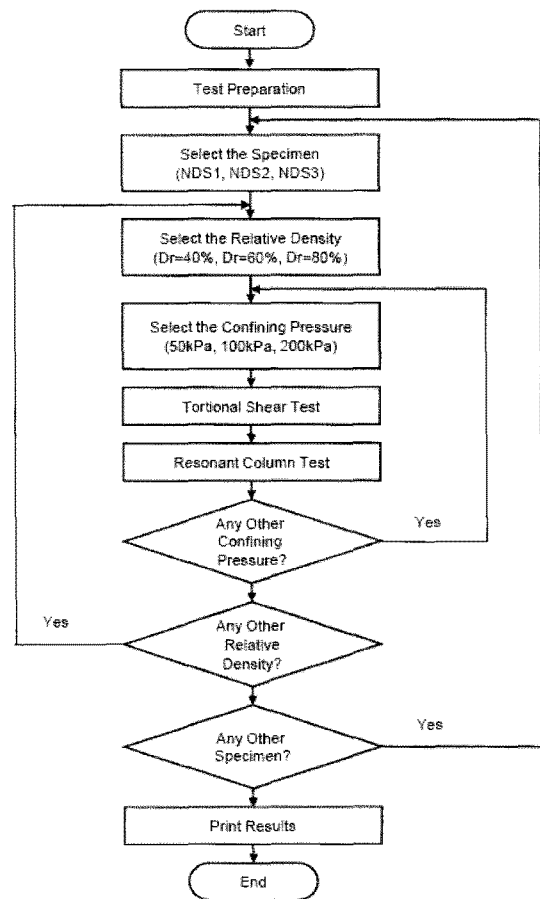


그림 7. 공진주/비틀전단시험 순서도

선 수행하였다(추연욱, 1997). 하나의 시편에 대한 시험이 끝나면 다른 상대밀도로 시편을 성형하여 반복적으로 시험을 수행하였다. 공진주시험은 10Hz에서 130Hz까지 가진주파수를 증가시키며 자동으로 시험이 진행되었다. 반면, 비틀전단시험은 통상적으로 많이 적용하는 0.5Hz로 입력하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용

된 시편의 상대밀도와 간극비는 표 2에 정리하였다.

표 2. 성형시편의 상대밀도 및 간극비

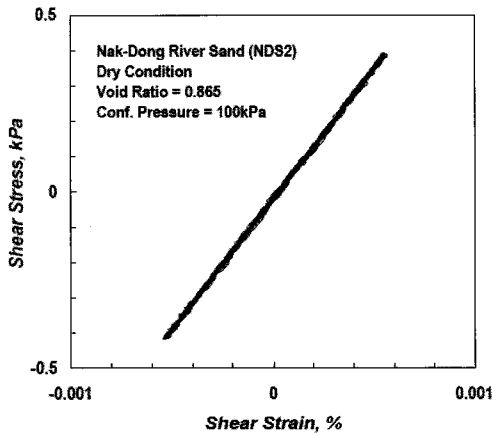
시료	상대밀도	간극비	
낙동강 하구 모래	NDS1	40%	0.974
		56%	0.894
		80%	0.773
	NDS2 (바다측)	42%	0.954
		60%	0.865
		81%	0.762
낙동강 중류 모래	NDS3	40%	0.953
		66%	0.840
		76%	0.796

3. 시험결과 및 분석

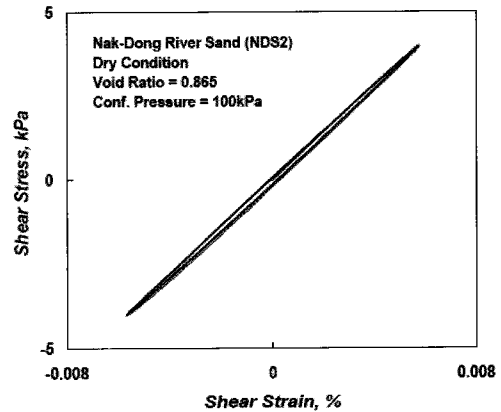
3.1 변형을 크기에 따른 이력곡선(hysteresis loop)의 변화

그림 8은 비틀전단시험 결과를 나타낸 전단응력-전단 변형을 이력곡선이다. 전단변형률 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}\%$ 의 범위에서 수행된 비틀전단시험결과를 4 가지 서로 다른 전단변형률 크기에서 나타내었다.

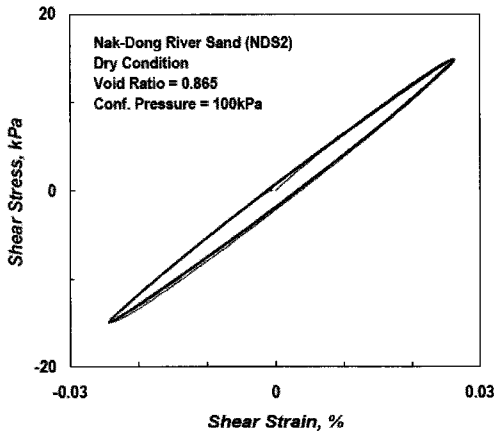
그림 8은 낙동강하구(NDS2)모래를 구속압 100kPa에서 상대밀도 약 40%로 성형한 모래시편의 시험결과로서, 전단변형률 0.0005%의 결과를 관찰하면 이력곡선이 하나의 선으로 간주할 수 있는 선형의 거동을 보인다. 그리고 전단변형률 0.005% 크기에서 초기 1회 하중이 가해지는 이력곡선의 면적은 그 이상의 반복하중에서 그려진 이력곡선의 면적보다 크게 관찰되지만 응력이



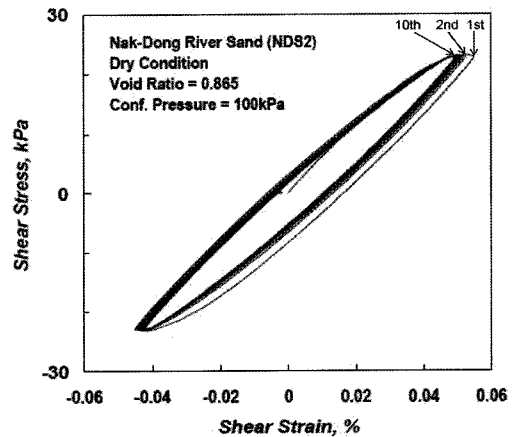
(a) $\gamma = 0.0005\%$



(b) $\gamma = 0.005\%$



(c) $\gamma = 0.025\%$



(d) $\gamma = 0.049\%$

그림 8. 비틀전단시험에서의 전단변형률크기에 따른 이력곡선의 변화

력곡선의 기울기는 큰 상관 관계가 없는 것으로 추정된다. 반면 0.025%로 전단변형률이 큰 조건에서는 반복하중이 증가함에 따라 이력곡선의 면적은 작아지고, 기울기가 커지는 반복경화(cyclic hardening) 현상이 나타나고 있다. 그림 8(d)는 이러한 반복경화현상을 명확히 보여주고 있다. 또한, 하중반복횟수가 늘어감에 따라 응력 이력곡선이 특정 곡선에 수렴해 가는 경향을 보였다.

3.2 상대밀도 및 시료종류에 따른 동적곡선의 변화

본 연구에서는 상대밀도의 차이에 따른 시편의 정규화전단계수와 감쇠비 값을 비교하여, 상대밀도가 동적곡선에 어떠한 영향을 주는지 관찰하였다. 낙동강시료를 약 40, 60, 80%의 상대밀도로 조성하여 시험하였으며, 시험결과 동일시료의 경우 상대밀도의 크기와는 무관하게 정규화전단계수와 감쇠비 값이 일치하는 경향을 보였다(그림 9). 추연욱과 김동수(2005)도 일본 토요라 모래와 한국 금강 모래의 간극비를 달리하며 공진주/비틀전단시험을 수행한 결과 최대전단계수(G_{max})는 간극비 감소에 따라 증가하지만 최대전단계수(G_{max})에 의해 정규화된 정규화전단계수(G/G_{max})는 간극비와는 무관하게 일치하는 결과를 보였다고 발표한 바 있으며 이는 외국의 연구사례(Vucetic과 Dobry 1991)와 전반적으로 일치하는 결과이다.

한편, 시료종류에 따른 동적변형특성을 파악하기 위하여 채취한 위치가 다른 모래들을 대상으로 한 시험을 수행하였고 전단변형률 크기에 따른 정규화전단계수 및 감쇠비 값을 측정하였다. 그림 10은 약 60%의 상대밀도 조건에서 측정된 시료별 결과를 나타낸 그래프로서, 시료별로 미소한 차이가 나지만 모든 시료는 구속압 크기에 지배적인 영향을 받음이 관찰되었다. 낙동강 중류모래와 하구언모래로 시험한 결과 동적곡선 모두 각 구속압별로 비교적 좁은 폭의 띠를 형성하였고, 구속압의 증가에 따라 정규화전단계수는 증가하고 감쇠비는 감소하는 경향을 보였다.

3.3 낙동강 모래에 대한 대표동적곡선

세 가지 낙동강 모래시료는 모두 시료종류 및 상대밀도 등의 차이가 정규화전단계수 및 감쇠비 값에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었으며, 구속압과 전단변형률 크기가 지배적인 영향을 주는 것으로 관찰되었다. 따

라서, 본 연구에서는 세 가지 모래시료에 대한 모든 시험결과를 정리하여, 전단변형률 크기에 따른 구속압별 대표동적곡선을 제시하였다. Ramberg-Osgood 모델은

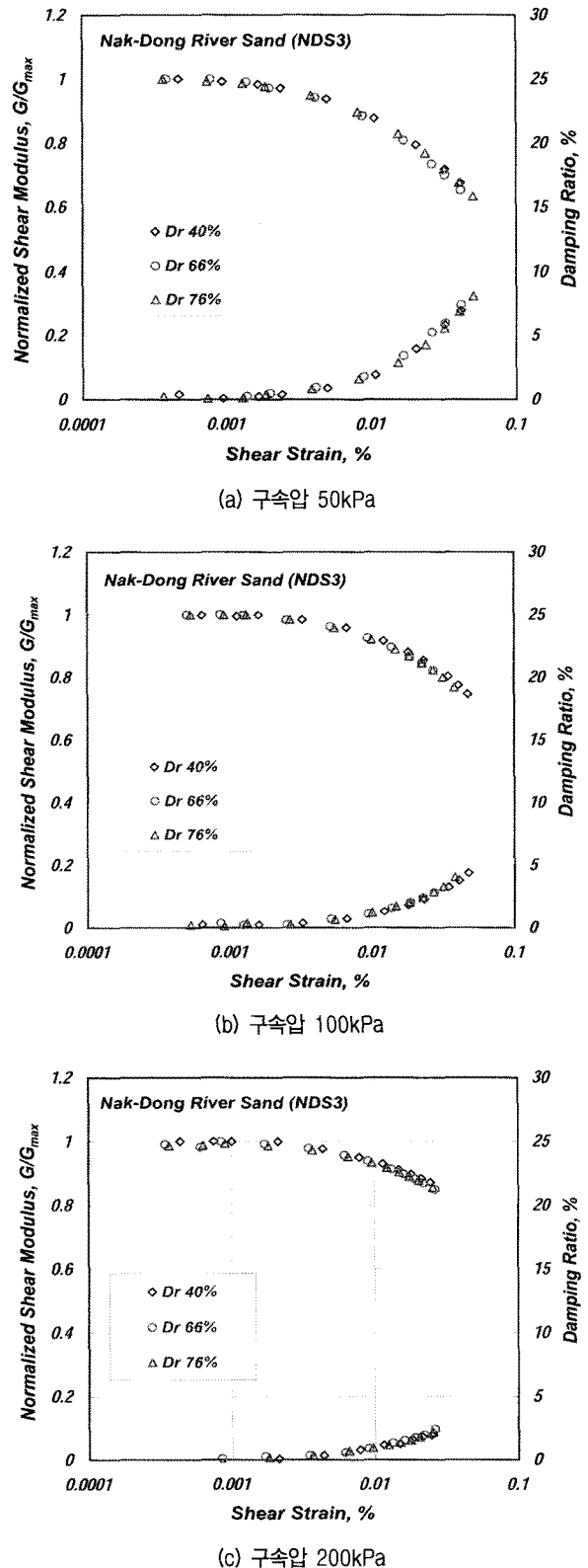
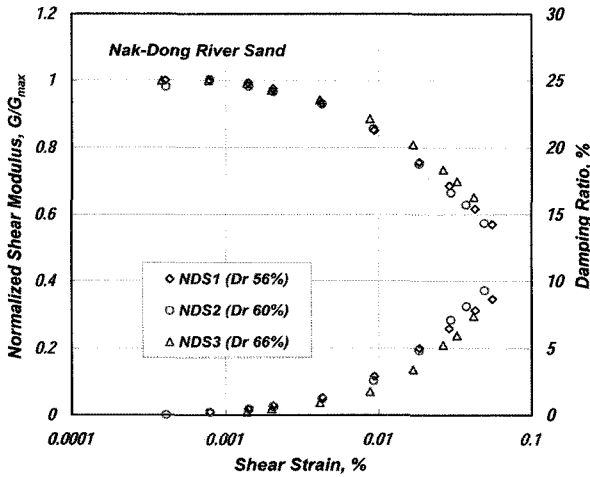
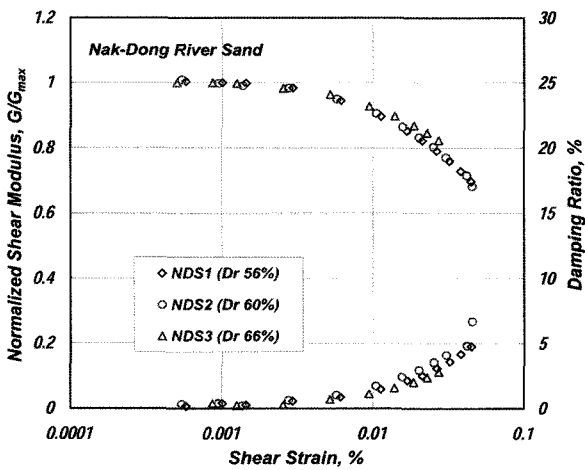


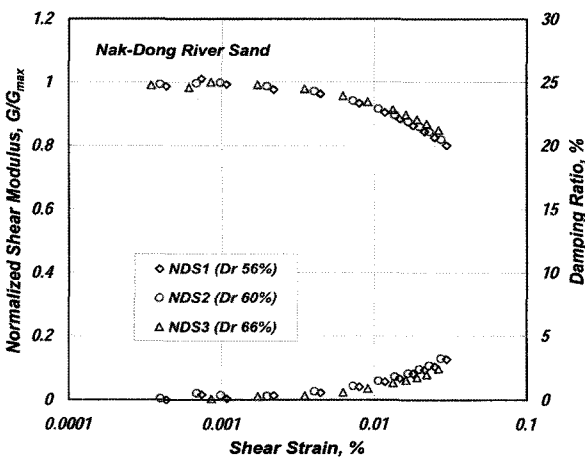
그림 9. 상대밀도별 동적곡선의 비교(NDS3)



(a) 구속압 50kPa



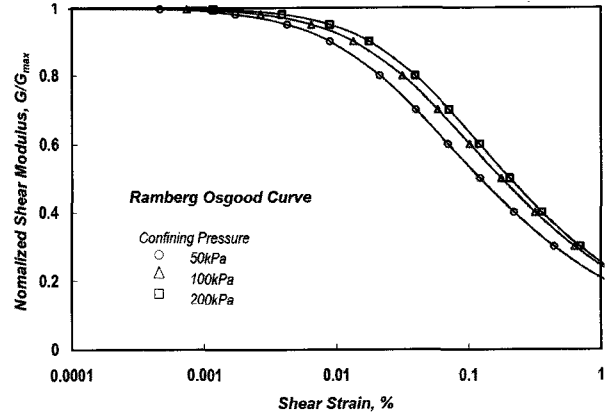
(b) 구속압 100kPa



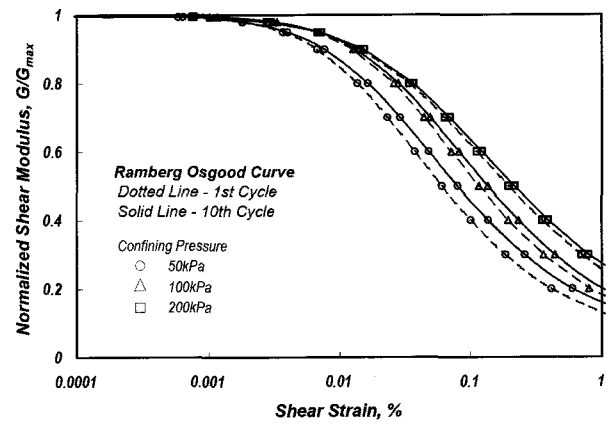
(c) 구속압 200kPa

그림 10. 시료별 동적곡선 비교

0.1% 이하의 저변형률 영역에서 실험결과들의 비선형성을 나타내는데 매우 적합하다고 알려져 있다(Anderson, 1974). 이 모델은 기본적으로 전단변형률 크기에 따른 비선형 전단계수를 회귀 분석하는 모델이다. 그러나



(a) 구속압별 공진주시험 결과

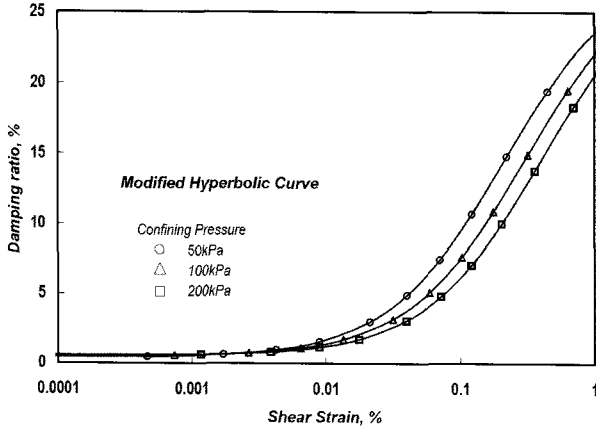


(b) 구속압별 비틀전단시험 결과

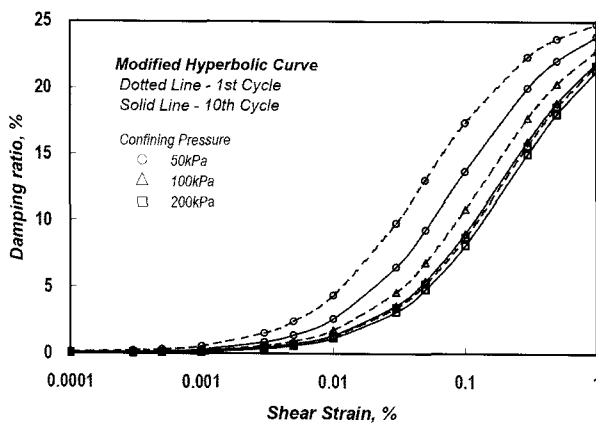
그림 11. Ramberg Osgood 모델을 사용하여 전단변형률 1%까지 보간한 정규화전단계수 감소 곡선

Ramberg-Osgood 모델은 비선형전단계수의 회귀 분석으로서 감쇠비를 결정하기 때문에 최소감쇠비(D_{min})의 경우 지나치게 작게 평가되며, 비선형 구간에서는 과대하게 평가되는 단점이 있다. 반면, Modified Hyperbolic 모델(Hardin and Drnevich, 1972a, 1972b)은 전단응력-전단변형률 관계를 바탕으로 회귀 분석하는 모델로서 감쇠비 산정시에 Ramberg-Osgood 모델에 비하여 적용성이 뛰어나다고 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 Ramberg-Osgood 모델에 적용하여 정규화전단계수 감소곡선을 제시하였고(그림 11) Modified Hyperbolic 모델로서 감쇠비 곡선을 제시하였다(그림 12). 그리고 공진주시험과 비틀전단시험결과를 나누어 관찰하여 각각의 시험결과를 서로 비교하였다.

그림 13과 그림 14는 각각 공진주시험과 비틀전단시험결과로 구해진 동적곡선으로서 기존문헌(Seed와 Idriss, 1970; Vucetic과 Dobry, 1991; Kokusho, 1980)에서 제안한 지반의 동적곡선들과 비교한 그래프이다. Seed-Idriss



(a) 구속압별 공진주시험 결과

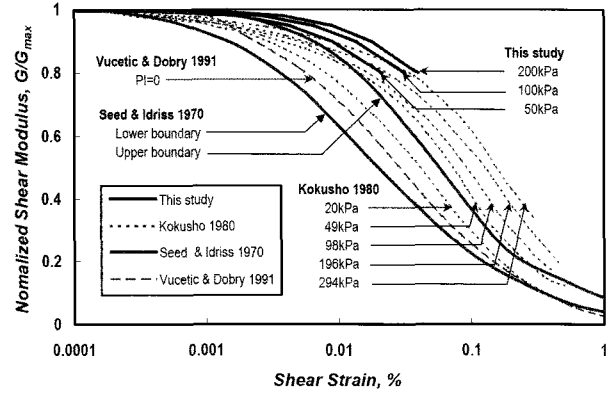


(b) 구속압별 비틀전단시험 결과

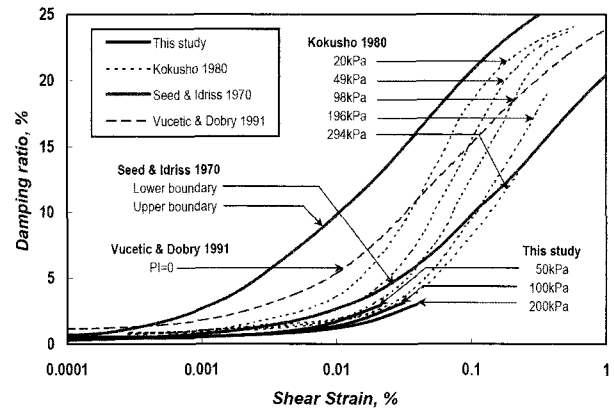
그림 12. Modified Hyperbolic 모델을 사용하여 전단변형률 1%까지 보간한 감쇠비 곡선

곡선은 약 20~500kPa의 구속압 범위와 30~90%의 상대밀도 및 최대변형률 1%이하의 많은 연구자들의 기존연구결과를 분석하여 제안한 동적곡선이다. 그리고 Vucetic-Dobry(1991) 곡선은 공진주(Resonant Column)시험, 삼축 압축시험 및 단순전단(Simple Shear)시험으로 결정된 기존연구결과들을 분석하여 제시한 곡선이며, Kokusho(1980) 곡선은 반복삼축압축시험을 통한 토요라 모래의 구속압별 대표곡선이다.

본 연구결과로부터 작성된 정규화전단계수 및 감쇠비 곡선은 Seed-Idiss 곡선과 비교할 때 정규화전단계수와 감쇠비가 비교적 큰 폭으로 오른쪽에 위치하며 Seed 등의 결과보다 선형탄성구간이 길게 나타났다(그림 13). 이것은 더 큰 전단변형률 크기까지 선형성을 보임을 의미한다. 또한, Vucetic-Dobry(1991)의 $PI=0$ 의 곡선과 비교해도 많이 오른쪽에 위치하고 있다. Kokusho(1980)의 결과와는 비슷한 영역을 형성하면서 구속압에 따라 비슷한 변화를 나타내고 있지만, 본 연구의 결과가 조금



(a) 정규화전단계수곡선 ($G/G_{max} - \log\gamma$)-공진주시험결과



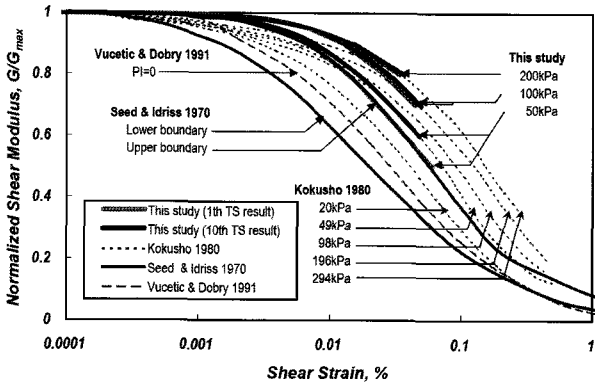
(b) 감쇠비 곡선 ($D - \log\gamma$)-공진주시험결과

그림 13. 낙동강 모래의 구속압별 대표곡선과 기존 연구에서 제시한 동적곡선과의 비교(I)

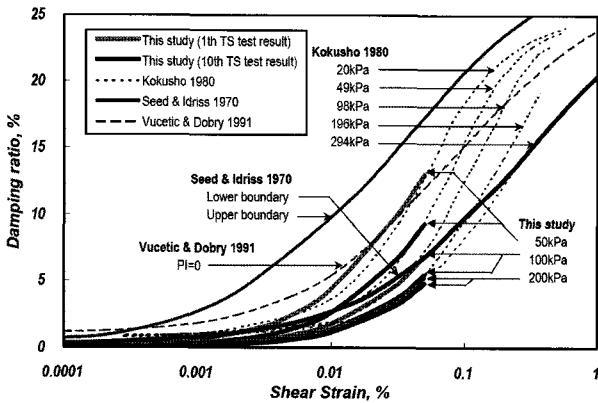
더 오른쪽에 위치하고 있다.

그림 14는 본 연구에서 비틀전단시험결과로부터 작성한 정규화전단계수 감소곡선과 감쇠비 곡선으로서 1회 및 10회의 반복하중작용시의 결과를 정리하여 제시한 대표곡선이다. 공진주시험은 공진시 전단변형률에서 전단계수와 감쇠비를 구하는 것으로, 시편의 전단계수와 감쇠비를 측정하기까지 약 1000회의 반복하중을 받는 것으로 알려져있다(Kim, 1991). 그림 13과 그림 14를 비교해보면 공진주시험으로 나온 결과가 비틀전단시험 결과에 비해 조금 더 오른쪽에 위치한다는 것을 알 수 있으며, 이는 반복하중에 의한 영향인 것으로 판단된다. 10회의 반복하중으로 결정된 전단계수와 감쇠비 곡선은 1회 반복하중시 곡선보다 보다 오른쪽에 위치하며, 구속압이 낮은 경우에 더욱 큰 차이를 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 전단변형률이 커짐에 따라 시편에 가해지는 진동하중횟수도 증가하게 되며, 이러한 진동하중은 시편을 구성하는 흙입자의 재배열을 초래하게 되어 정규화



(a) 정규화전단계수곡선($G/G_{max} - \log\gamma$)-비틀전단시험결과



(b) 감쇠비 곡선($D - \log\gamma$)-비틀전단시험결과

그림 14. 낙동강 모래의 구속압별 대표곡선과 기존 연구에서 제시한 동적곡선과의 비교(II)

전단계수 감소곡선과 감쇠비곡선에 영향을 줄 수도 있을 것으로 추정된다. 하지만 동적곡선들 간의 차이가 시료 고유의 특성에 따른 것인지 시험방법이나 장비에 따른 차이인지 여부는 본 연구 결과만으로는 규명하기 어렵기 때문에 추가 연구를 통해 더 확실히 규명해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

낙동강 델타지역 퇴적토의 동적변형특성에 관한 데이터베이스 구축의 일환으로서 낙동강 모래의 변형특성을 조사하였다. 구속압, 상대밀도, 반복하중 등을 고려한 공진주/비틀전단시험을 수행하여, 각 조건에 따라 나타나는 변형특성에 대한 연구를 수행하였다. 전단변형률 크기에 따른 전단계수와 감쇠비 값을 정리하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세 가지의 모래시료에 대한 시험결과에 의하면 시료종류 및 상대밀도 등의 차이는 정규화전단계수

및 감쇠비 값에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었으며, 구속압과 전단변형률 차이가 지배적인 영향을 주는 것으로 관찰되었다. 따라서 본 연구에서는 전단변형률 크기에 따른 구속압별 대표동적곡선을 제시하였다.

(2) Ramberg-Osgood 모델에 적용하여 정규화전단계수 감소곡선을 그리고 Modified Hyperbolic 모델로서 감쇠비곡선을 제시하였다. 공진주시험과 비틀전단 시험결과를 나누어 관찰하였으며 각각의 시험결과를 서로 비교하였다.

(3) 본 연구로 제안된 동적곡선을 기존문헌의 결과와 비교하였을 때 상대적으로 오른쪽으로 치우치는 경향이 관찰되었다. 기존문헌의 결과보다 오른쪽으로 치우치는 것은 선형탄성구간이 길며 더 큰 전단변형률 크기까지 탄성거동을 보임을 의미한다. 한편 Kokusho(1980)의 결과와는 비슷한 영역을 형성하면서 구속압에 따라 비슷한 변화를 나타내고 있지만, 본 연구의 결과가 조금 더 오른쪽에 위치하고 있다.

(4) 시험 시 반복하중을 더 많이 받는 공진주시험결과가 비틀전단시험결과에 비해 조금더 오른쪽에 위치하였으며, 비틀전단시험시 10회의 반복하중으로 결정된 전단계수와 감쇠비 곡선은 1회 반복하중 시 곡선보다 보다 오른쪽에 위치하고 있어, 반복하중횟수가 동적곡선에 일부 영향을 주는 것으로 확인되었다.

(5) 1회 반복하중시의 비틀전단시험결과 Kokusho(1980)의 결과와 가장 비슷한 경향을 보였다. 한편, 시험시 시편이 겪게 되는 많은 진동하중이 흙 입자의 재배열을 초래하여 동적곡선에 일부 영향을 미칠 수도 있을 것으로 추정되나 본 연구 결과만을 가지고 판단하기 어려우며 동적곡선들 간의 차이가 시료 고유의 특성에 따른 것인지 시험방법이나 장비에 따른 차이인지 여부는 추가 연구를 통해 더 확실히 규명해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업(과제번호 B04-01)의 지원으로 이루어졌다.

참 고 문 헌

1. 김대만 (2004), *Aging 효과에 따른 낙동강 모래의 비배수 전단거동 특성*, 박사학위논문, 경북대학교.
2. 김동수, 추연욱 (2001), “공진주시험을 이용한 국내 비점토 지반의 동적변형특성”, *한국지반공학회*, 제17권 5호, pp.115-128.
3. 김동수, 추연욱 (2004), “간극수압증가와 동적변형특성 변화에 근거한 사질토 지반의 반복한계 전단변형률”, *대한토목학회*, 제24권 3C호, pp.193-203.
4. 추연욱 (1997), *공진주비틀전단시험을 이용한 사질토의 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 관한 연구*, 석사학위논문, 한국과학기술원.
5. 추연욱, 김동수 (2005), “배수 조건에 따른 사질토 지반의 동적 변형특성”, *한국지반공학회*, 제21권 3호, pp.27-42.
6. 日本工質工学会 (1991), *土質試験の方法と解説*, pp.106-115.
7. Anderson, D.G. (1974), “*Dynamic Modulus of Cohesive Soils*”, Ph.D. Thesis, University of Michigan.
8. Bishop, A. W. and Henkel, D. J. (1962), “*The Measurement of Soil properties in the Triaxial test (second edition)*”, Edward Arnold, London.
9. 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.
10. 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.
11. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972a), “Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects”, *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.98, No.SM6, June, pp.603-624.
12. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972b), “Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves”, *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.98, No.SM7, June, pp.667-692.
13. 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, pp33-65.
14. 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.
15. Kokusho, T. (1980), “Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range”, *Soils and foundations*, Vol.20, No.2, pp. 45-60.
16. 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
17. Ryu, J.H. S.J. Kim, Y.H. Park and J.M. Kim (2008), “DYNAMIC BEHAVIOR OF NAK-DONG RIVER SAND”, *Proceeding of the International Symposium on Lowland Technology, Busan, Korea*, pp.493-499
18. 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.
19. 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 2009. 4. 24, 심사완료일 2009. 11. 20)