

필댐 제체 재료의 동적 물성치 평가 : II. 비선형 동적 변형특성

Estimation of Dynamic Material Properties for Fill Dam : II. Nonlinear Deformation Characteristics

이 세 현¹ Lee, Sei-Hyun

김 동 수² Kim, Dong-Soo

추 연 욱³ Choo, Yun-Wook

권 혁 기⁴ Kwon, Hyek-Kee

Abstract

Nonlinear dynamic deformation characteristics, expressed in terms of normalized shear modulus reduction curve (G/G_{\max} - $\log\gamma$, G/G_{\max} curve) and damping curve (D - $\log\gamma$), are important input parameters with shear wave velocity profile (V_s -profile) in the seismic analysis of (new or existing) fill dam. In this paper, the reasonable and economical methods to evaluate the nonlinear dynamic deformation characteristics for core zone and rockfill zone respectively are presented. For the core zone, 111 G/G_{\max} curves and 98 damping curves which meet the requirements of core material were compiled and representative curves and ranges were proposed for the three ranges of confining pressure (0~100 kPa, 100 kPa~200 kPa, more than 200 kPa). The reliability of the proposed curves for the core zone were verified by comparing with the resonant column test results of two kinds of core materials. For the rockfill zone, 135 G/G_{\max} curves and 65 damping curves were compiled from the test results of gravelly materials using large scale testing equipments. The representative curves and ranges for G/G_{\max} were proposed for the three ranges of confining pressure (0~50 kPa, 50 kPa~100 kPa, more than 100 kPa) and those for damping were proposed independently of confining pressure. The reliability of the proposed curves for the rockfill zone were verified by comparing with the large scale triaxial test results of rockfill materials in the B-dam which is being constructed.

요 지

정규화 전단탄성계수 감소곡선(G/G_{\max} - $\log\gamma$)과 감쇠비 곡선(D - $\log\gamma$)으로 표현되는 비선형 동적 변형특성은 현장 전단파속도 주상도와 함께 필댐의 동적 내진해석시 중요한 입력 물성치로 사용된다. 본 논문에서는 필댐 심벽부와 사력부 각각에 대하여 합리적이고 경제적인 비선형 동적 변형특성 산정 방법을 제시하였다. 심벽부의 경우, 기존 여러 연구 결과로부터 심벽부 구성 재료의 조건을 만족하는 정규화 전단탄성계수 감소곡선 111개, 감쇠비 곡선 98개를 확보하여 3개의 구속응력 영역(0~100kPa, 100kPa~200kPa, 200kPa 초과)에 대한 대표 곡선 및 범위를 제안하였고, 2종의 기존 댐 심벽부 시료에 대한 공진주 시험 결과와 비교하여 신뢰성을 확인하였다. 사력부의 경우, 자갈 등 입자가 큰 사석 재료에 대해 대형 시험장비를 이용하여 시험을 수행한 국외 연구 결과로부터 정규화 전단탄성계수 감소곡선 135개, 감쇠비 곡선 65개를 획득하였다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 3개의 구속응력 영역(50kPa 이하, 50kPa~100kPa, 100kPa 초과)에 대해 대표 곡선을 제안하였고, 감쇠비 곡선은 구속응력에 관계없이 하나의 대표 곡선으로 제안하였다. 또한 현재 시공중인 B댐의 사석 재료에 대한 결과와 비교하여 대표 곡선 및 범위에 대한 신뢰성을 검증하였다.

Keywords : Core zone, Damping curve (D - $\log\gamma$), Fill dam, Normalized shear modulus reduction curve (G/G_{\max} - $\log\gamma$), Rockfill zone

1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST)

4 정희원, 한국시설안전공단 차장, 인천대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Manager, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Incheon)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지진하중, 파랑하중, 폭발하중과 같은 반복적인 동적 하중을 받는 지반구조물의 설계에서 전단탄성계수 (shear modulus, G) 및 감쇠비(damping ratio, D)로 표현되는 지반의 동적물성치는 매우 중요한 변수이다. 미소 변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수(G_{max})로서, 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비(D_{min})로서 고려된다. 반면, 지진하중이 작용할 경우 지반 재료는 변형 정도에 따라 비선형 거동특성을 보이는데, 이러한 비선형 거동특성을 신뢰성 있게 평가하기 위하여 지반 재료의 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선으로 표현되는 비선형 동적 변형특성의 결정이 중요해진다. 특히, 등가선형 및 비선형 지반응답해석에서 비선형 동적 변형특성이 중요한 설계입력변수로 이용된다(Bardet과 Tobita, 2001; Schnabel 등, 1972; Yoshida와 Towhata, 1997).

지반의 비선형성은 그림 1과 같이 동적물성치- \log (전단변형률)의 관계로 나타내는 것이 일반적이다. 이것은 실제 작용하는 하중의 범위에서 지반 재료가 경험하는 변형률의 범위는 1% 이하(Burland, 1989)이고 이 범위에서 탄성계수를 보다 엄밀하게 표현하기 위함이다. 그림 1에서 보듯이 탄성계수와 감쇠비가 변형률의 크기에 무관하게 일정한 선형영역과 변형률이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하고, 감쇠비가 증가하는 비선형 영역으로 구분되며, 두 영역을 구분 짓는 변형률의 크기를 선형한계변형률(γ_t^e)이라 칭한다. 일반적으로 지반재료

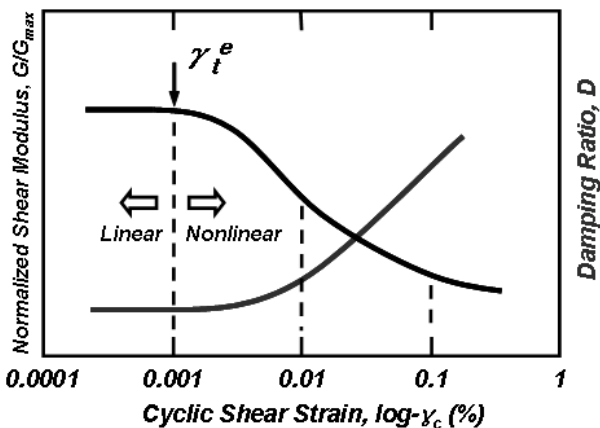


그림 1. 지반 재료의 비선형 동적 변형특성

의 선형한계변형률은 10⁻⁴%~0.01% 범위에 존재하며, 필댐의 사력부 구성 재료인 입자가 큰 자갈 등 점성이 없는 지반 재료는 낮은 선형한계변형률을 갖는 반면, 심벽부 구성 재료인 점성 및 세립분을 다량 함유한 지반 재료의 경우에는 비교적 높은 선형한계변형률을 갖는다.

그림 1에 나타난 전단변형률 크기에 따른 전단탄성계수는 지반 재료의 종류, 함수상태, 교란정도, 구속응력, 하중주파수 등 다양한 영향 조건에 따라서 다르게 결정된다(Hardin과 Black, 1968). 그러나 전단탄성계수를 미소변형률에서의 최대전단탄성계수(G_{max})로 정규화하여 나타난 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 변형률 크기의 관계(정규화 전단탄성계수 감소곡선)로 나타내면 시료의 교란, 함수비, 하중주파수 등에 관계없이 일정하게 나타나며, 지반 재료의 종류(자갈, 모래, 점토 등)와 구속응력에 따라 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1986). Seed 등(1986)은 많은 자료 조사를 통하여 모래와 자갈에 대한 대표 비선형 동적 변형특성을 제안하였고, Vucetic과 Dobry(1991)는 점성토의 선형한계변형률은 소성지수(PI)의 증가에 따라서 증가함을 밝히고, 소성지수에 따른 비선형 동적 변형특성을 제안하였다. 한편 김동수와 추연욱(2001)은 국내에 분포한 다양한 지반 종류에 대한 결과를 제시한 바 있고, 권기철(2000)은 국내 도로 하부 노상토에 대한 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 필댐의 동적 내진해석시, 입력 물성치를 가정함으로써 발생하는 오류를 최소화하고, 재료의 이질성 및 비선형 거동특성을 고려한 신뢰성 있는 내진성능평가를 수행하기 위해, 필댐의 심벽부 및 사력부 구성 재료에 국한하여 정규화 전단탄성계수 감소곡선(G/G_{max} - $\log\gamma$) 및 감쇠비 곡선(D - $\log\gamma$)의 경제적이고 합리적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 사력부의 경우, 필댐 전체 부피의 80% 이상을 차지하며 강성유지에 중요한 역할을 하지만 입자가 큰 사석 재료를 이용하여 경사진 사면의 형태로 시공이 이루어지므로 시추를 통한 시료의 확보가 거의 불가능한 상황이다. 따라서 사석 재료를 이용하여 시험이 수행된 기존 연구 결과를 바탕으로 비선형 동적 변형특성에 관한 데이터베이스(D/B)를 구축하고 대표 곡선을 제안하여 이를 활용하는 방안을 마련하고자 한다. 반면, 심벽부의 경우, 사력부와 비교하여 구성 재료의 입자가 작고, 시추가 용이하여 시료 채취가 가능하지만 차수라는 댐의 기능적 측면에서 중요한 역할을 수행하므로 항상 시추가 가능한 것은 아니다. 따라서 시

추를 통해 시료가 채취되었을 경우에는 현장 조건에 맞게 시편을 성형하여, 공진주/비틀전단(Resonant Column and Torsional Shear, RC/TS)시험을 수행하고, 시료 채취가 불가능할 경우에는 심벽부 구성 재료의 조건에 만족하는 기존 국내·외 연구 결과를 바탕으로 D/B를 구축하고 대표 곡선을 제안하여 합리적으로 비선형 동적 변형 특성을 평가할 수 있도록 방안을 마련하고자 한다.

2. 심벽부 재료의 비선형 동적 변형특성 평가

심벽부 구성 재료의 조건에 만족하는 기존 연구 결과를 바탕으로 D/B를 구축하고, 구속압 범위에 따른 대표 곡선을 제안하였다. 또한 총 2종의 기존 댐 심벽부 시료에 대해 공진주 시험을 수행하고, 이 결과를 바탕으로 제안한 대표 곡선의 타당성을 검증하였다.

2.1 비선형 동적 변형특성에 대한 D/B 구축 및 대표 곡선 제안

심벽부의 현장 진단과 속도 주상도는 시추공이 없어도 동반 논문에서 설명한 표면과 탐사를 댐마루에서 수행함으로써 비교적 손쉽게 평가가 가능하지만, 일반적으로 비선형 동적 변형특성은 시추를 통해 채취한 시료로부터 공진주/비틀전단시험을 수행하여야 결정할 수 있다. 그러나, 심벽부는 기능적 측면에서 항시 시추가 가능하지 않으므로 공진주/비틀전단시험에 대한 대안이 필요하다. 이를 위해, 2004년 발간된 “기존 댐의 내진성능평가 및 향상요령”(한국시설안전공단, 2004)에서는 문헌 자료들을 제시하여 동적 해석에 활용할 수 있도록 하고 있다. 그러나 이들은 1970년대~1980년대에 국외에서 구축된 오래된 시험 결과가 대부분이고, 당시 시험 장비의 여건상 신뢰성이 부족할 수 있다. 또한 댐 설계기준(건설교통부, 2005)에서 명시한 심벽부 구성 재료의 조건에 부합하는 지반 재료에 대한 결과가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 심벽부 구성 재료의 조건에 만족하는 국내·외 최근 연구 결과들로부터 D/B를 구축하고, 이를 바탕으로 구속압 범위에 따른 대표 비선형 동적 변형특성 곡선을 산정하여 동해석시 활용할 수 있도록 제안하였다.

(1) D/B 구축 현황

댐 설계기준(건설교통부, 2005)에는 “심벽부 구성 재

료로서 이상적인 재료는 0.05mm 이하의 입자를 15~20% 함유하는 입도 분포가 좋은 점토, 실트, 모래, 자갈의 혼합물이다. 흙의 통일분류법으로 말하면 GC, SC, CL, SM, CH 정도가 적당하고 ML이 그 다음이며, OL, MH, OH는 부적당하다. 또한 착암부 재료는 점착성이 양호하고 균열 발생을 방지토록 소성지수(PI)가 15 이상 세립재료를 사용해야 한다.” 라고 명시되어 있다. 본 연구에서는 착암부 재료에 대한 조건은 배제하고, 통일분류법 및 세립분 함유량에 대한 조건을 바탕으로 D/B를 구축하였다. 일반적으로 문헌자료에는 체가름 시험시 조립질 시료와 세립질 시료를 구분하는 #200체 통과량(0.075mm)이 주로 기술되어 있으므로 편의상 0.05mm 이하의 입자 함유량 대신 #200체 통과량을 기준으로 D/B를 구축하였다.

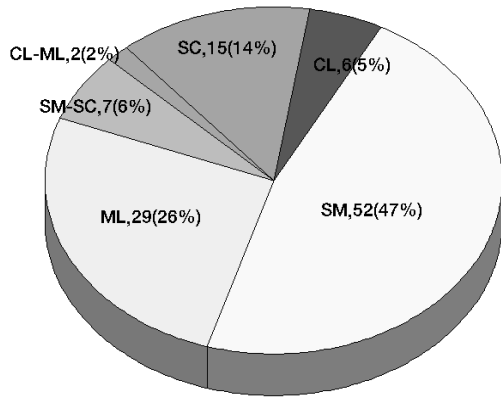
총 3편의 논문(김동수와 추연옥, 2001; 서원석 등, 2007; Hwang, 1996)에서 심벽부 구성 재료의 조건을 만족하는 48개의 시험 시료에 대해, 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max}-\log \gamma$) 111개를 획득하였고, 감쇠비 곡선($D-\log \gamma$)은 43개의 시험 시료에 대해, 98개의 데이터를 획득하였다. 모든 연구 결과는 앞서 언급한 Stokoe식 공진주/비틀전단시험 시스템을 이용하였다. 김동수와 추연옥(2001)과 서원석 등(2007)은 KAIST에서 수행되었고, Hwang(1996)은 미국 텍사스 주립대학교에서 수행된 연구 결과이다. 시료의 채취 지역, 기본 물성 정보, 시험 조건 등을 표 1에 나타내었다.

총 111개의 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 대해서 통일분류법에 의한 흙의 분류 결과와 체가름 시험시 #200체 통과량(0.075mm 이하의 입자 함유량)의 분포를 그림 2에 나타내었다. 통일분류법에 의한 분류는 SM(실트질이 섞인 모래) 계열의 시료를 이용한 결과가 52개(47%)로 가장 많았고, ML(무기질 실트) 계열에 대한 결과가 29개(26%), SC(점토질이 섞인 모래) 계열이 15개(14%)가 분포하여 전체의 85% 이상을 차지하였다. #200체 통과량은 15%~30%가 38개(34%), 30~45%가 28개(25%)로 전체의 59%를 차지하였고, #200체 통과량 60% 이상에 대한 결과도 21개(19%)가 분포하였다. 또한 일반적으로 국내에 분포하고 있는 지반은 PI가 높지 않기 때문에 획득한 시험 결과중에는 NP(non-plastic) 시료가 많고, 14.2%가 최대이지만, Hwang(1996)에 의한 시험 결과중에는 19%, 23% 그리고 최대 61%의 PI를 가진 시료도 존재하였다. KAIST에서 수행된 국내 시험 결과는 모두 교란 시료를 과소다짐법(under-compaction method)

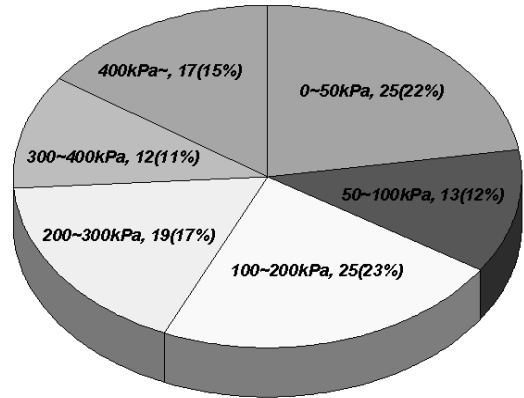
표 1. 심벽부 구성 재료에 대해 획득한 D/B의 기본 물성 및 시험 조건 정보

| 문헌 | 시험 시편 | 채취 지역 | 기본물성 | | | | | 시험 조건 | | | | | 보유 데이터 |
|-----------------|-----------------|----------------|--------|------|--------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|---------|--|------------------------|------------------------|
| | | | 통일 분류법 | 비중 | LL (%) | PI (%) | F ₂₀₀ ⁽¹⁾ (%) | D ₅₀ ⁽²⁾ (mm) | 시험 방법 | 함수비 (%) | γ_i ⁽³⁾ (kN/m ³) | 시험 구속응력 (kPa) | |
| 김동수와 추연옥 (2001) | IC-1 | 인천연안 | ML | 2.68 | 20.5 | NP | 53.1 | - | RC | 27.9 | 20.0 | 80, 100, 200 | G/G _{max} , D |
| | IC-2 | | ML | 2.66 | NP | NP | 60.3 | - | RC | 28.0 | 19.7 | 80, 190, 380 | |
| | IC-4 | | ML | 2.68 | 20 | NP | 54.1 | - | RC | 24.2 | 19.5 | 110, 220 | |
| | IC-5 | | ML | 2.69 | 23.7 | 1.17 | 77.9 | - | RC | 29.2 | 19.1 | 80, 200, 400 | |
| | IC-11 | 인천 | SM-SC | - | 26.7 | 5.26 | 18.0 | 0.69 | RC | 15.3 | 23.2 | 210, 425, 500 | |
| | IC-12 | | SM | - | NP | NP | 25.0 | 0.47 | RC | 14.1 | 19.9 | 120, 250, 490 | |
| | IC-13 | | SM | - | 24 | NP | 22.9 | 0.29 | RC | 12.9 | 21.2 | 120, 240, 480 | |
| | IC-19 | | ML | - | 36.9 | 1.89 | 51.5 | - | RC | 26.6 | 19.1 | 220, 440, 500 | |
| | IC-20 | | ML | - | 29.2 | NP | 41.9 | 0.11 | RC | 24.9 | 20.0 | 120, 240, 480 | |
| | IC-21 | SM | - | 24.8 | NP | 15.4 | 0.55 | RC | 11.8 | 20.8 | 120, 240, 480 | | |
| | IC-22 | 인천연안 | SM | - | 25 | NP | 40.4 | 0.08 | RC | 23.6 | 18.4 | 73, 146, 292 | |
| | IC-23 | | SM | - | 25.2 | NP | 46.7 | 0.08 | RC | 25.5 | 18.4 | 115, 230, 460 | |
| | IC-26 | | SM | - | 21 | NP | 32.4 | 0.10 | RC | 25.5 | 18.6 | 42, 84 | |
| | IC-27 | | SM | - | NP | NP | 21.5 | 0.14 | RC | 20.7 | 18.6 | 126, 252, 504 | |
| | IC-28 | | ML | - | 23.2 | 1.57 | 74.8 | - | RC | 26.5 | 19.6 | 102, 204, 408 | |
| | JH-1 | 전남장흥 | SM | - | - | - | - | - | RC | 23.2 | 16.6 | 30, 60, 120, 240 | |
| | JH-2 | | SM | - | - | - | - | - | RC | 14.5 | 18.0 | 45, 90, 180, 360 | |
| | UJB-1 | 의정부 | SM | 2.63 | NP | NP | 20.7 | 0.46 | RC | 13.8 | 21.1 | 30, 60, 120 | |
| UJB-2 | SM | | 2.67 | NP | NP | 29.3 | 0.48 | RC | 12.9 | 21.4 | 30, 60, 120 | | |
| YJ-1 | 영종도 | ML | - | 27.1 | 2 | - | - | RC | 37.8 | 17.9 | 15, 30, 60 | | |
| YS | 전남여수 | SM | 2.67 | NP | NP | 15.0 | 0.37 | RC | Dry | 21.6 | 35, 70, 140 | | |
| 서원석 등 (2007) | IS-1 | 전북익산 | SC | 2.71 | 38.8 | 14.2 | 33.9 | 0.34 | RC | 14.8 | 20.1 | 21, 41, 100, 200, 400 | G/G _{max} , D |
| | IS-2 | | | | | | | | | 22.0 | 20.3 | 41 | |
| | IS-3 | | | | | | | | | 19.5 | 20.4 | 41 | |
| 서원석 등 (2007) | IS-4 | 전북익산 | SC | 2.71 | 38.8 | 14.2 | 33.9 | 0.34 | RC | 17.3 | 20.2 | 41 | G/G _{max} , D |
| | IS-5 | | | | | | | | | 15.0 | 19.6 | 41 | |
| | IS-6 | | | | | | | | | 12.9 | 19.4 | 41 | |
| | IS-7 | | | | | | | | | 11.4 | 19.1 | 41 | |
| | IS-8 | | | | | | | | | 8.9 | 18.4 | 41 | |
| | IS-9 | | | | | | | | | 6.8 | 18.1 | 41 | |
| Hwang (1996) | P18 | Borrego | SM | 2.65 | - | NP | 16.0 | - | RC+TS | 11.5 | 17.4 | 41.4 | G/G _{max} , D |
| | G1 | Gilroy#2 | CL-ML | 2.70 | 29 | 7 | 65 | - | RC+TS | 26.1 | 18.3 | 41.4 | G/G _{max} , D |
| | G5 | | ML | 2.65 | - | NP | 62 | - | RC+TS | 19.8 | 20.7 | 331.2 | G/G _{max} , D |
| | G8 | | CL | 2.70 | 35 | 13 | 65 | - | RC+TS | 23.7 | 20.0 | 869.4 | G/G _{max} , D |
| | G5-1 | | ML | 2.65 | - | NP | 62 | - | RC+TS | 19.1 | 20.6 | 331.2 | G/G _{max} |
| | LT1 | | ML | 2.70 | - | NP | 52 | - | RC+TS | 31 | 17.7 | 34.5 | G/G _{max} , D |
| | LT2 | Lotung, Taiwan | SM | 2.73 | - | NP | 30 | - | RC+TS | 31.2 | 18.7 | 172.5 | G/G _{max} , D |
| | LT3 | | SM | 2.73 | - | NP | 40 | - | RC | 33.3 | 17.2 | 110.4 | G/G _{max} |
| | OH2 | Oakland | SM-SC | 2.70 | 21 | 4 | 37 | - | RC+TS | 15.4 | 17.5 | 151.8 | G/G _{max} , D |
| | OH5 | | SM-SC | 2.65 | 25 | 7 | 40 | - | RC+TS | 17.9 | 20.1 | 828 | G/G _{max} , D |
| | PS3B | Savannah River | SM | 2.65 | - | NP | 16 | - | RC+TS | 26.7 | 17.8 | 158.7 | G/G _{max} , D |
| | PS4A | | SM | 2.65 | - | NP | 20 | - | RC+TS | 32.7 | 18.0 | 213.9 | G/G _{max} , D |
| | PS5A | | SC | 2.65 | - | 61 | 23 | - | RC+TS | 31.1 | 18.0 | 241.5 | G/G _{max} , D |
| | PS12A | | SM | 2.65 | - | NP | 20 | - | RC+TS | 24.1 | 17.4 | 600.3 | G/G _{max} , D |
| PS7A | SM | | 2.65 | - | NP | 23 | - | RC+TS | 28.1 | 17.9 | 317.4 | G/G _{max} | |
| T1 | Treasure Island | SM | 2.65 | - | NP | 34 | - | RC+TS | 19.9 | 18.8 | 41.4 | G/G _{max} | |
| T6 | | CL | 2.70 | 37 | 23 | 62 | - | RC+TS | 37.0 | 18.0 | 289.8 | G/G _{max} , D | |
| T7 | | CL | 2.70 | 34 | 19 | 69 | - | RC+TS | 20.7 | 20.1 | 386.4 | G/G _{max} | |

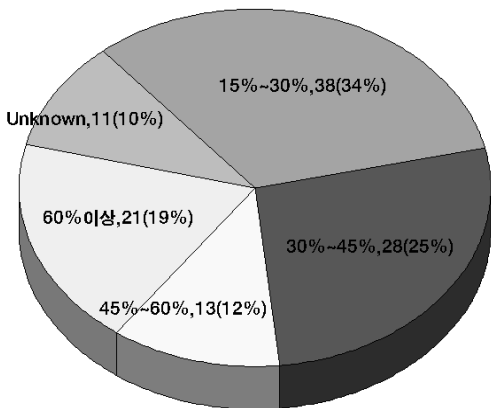
1) F₂₀₀은 #200체 통과량 (0.075mm 이하)
 2) D₅₀은 통과 백분율 50%에 해당하는 입경
 3) γ_i 는 시험이 수행된 전체단위중량



(a) 통일 분류법

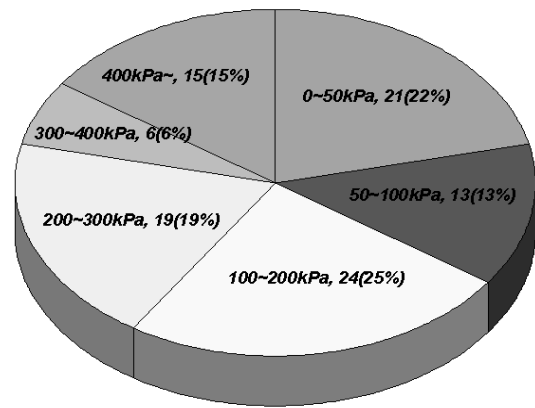


(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선(111개)



(b) 세립분 함유량(#200체 통과량)

그림 2. 구축된 D/B의 기본 물성 분포(G/G_{max} : 111개)



(b) 감쇠비 곡선(98개)

그림 3. 6개의 구속응력에 대한 데이터 개수

으로 성형하여 획득하였고, Hwang(1996)은 모두 불교란 시료를 이용하였다.

(2) 구속응력에 따른 대표 곡선 제안

일반적으로 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max}-\log v$), 감쇠비 곡선($D-\log v$)과 같은 지반의 비선형 동적 변형특성은 구속응력에 지배적인 영향을 받는다. 또한 심벽부 구성 재료와 같이 세립분을 포함하고 있는 지반은 침윤선의 분포에 따라 함수상태가 달라지고, 이로 인해 발생하는 모관흡수력은 전단파속도와 전단탄성계수에 영향을 주지만, 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 함수비와 모관흡수력에 관계없이 일정하게 나타난다(Kim 등, 2003). 따라서, 구축된 D/B를 바탕으로 구속응력만을 기준으로 영역을 구분하고, 각 영역에 대한 비선형 동적 변형특성의 대표 곡선을 제안하여 기존 필름의 비선형 동적 해석에 입력물성치로서 사용할 수 있도록 하였다.

먼저, 구축한 D/B의 구속응력에 따른 분포를 확인하기

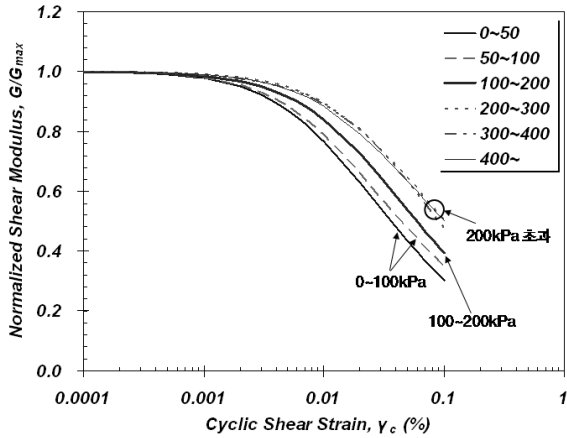
위하여, 우선 구속응력 0~50kPa, 50kPa~100kPa, 100kPa~200kPa, 200kPa~300kPa, 300kPa~400kPa, 400kPa초과의 비교적 세밀하게 6개의 그룹으로 구분하였고, 각각에 속하는 D/B의 개수를 그림 3에 나타내었다.

또한 각 구속응력 영역에 속하는 시험 결과를 바탕으로 평균 곡선을 획득하였고, 그림 4에 나타내었다. 획득한 시험 결과들의 최대 전단변형률 분포를 고려하여 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 전단변형률 0.1% 이하, 감쇠비 곡선은 0.06% 이하의 시험 결과들만을 이용하여 평균 곡선을 획득하였다. 전체적으로 구속압이 증가함에 따라 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 오른쪽으로 이동하는 경향을, 감쇠비 곡선은 아래쪽으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 단, 구속압 300~400kPa의 평균 곡선은 상이한 경향을 보이고 있는데, 이는 데이터 개수의 부족으로 구속응력 영역에서의 대표성을 갖기 어려운 것으로 판단된다.

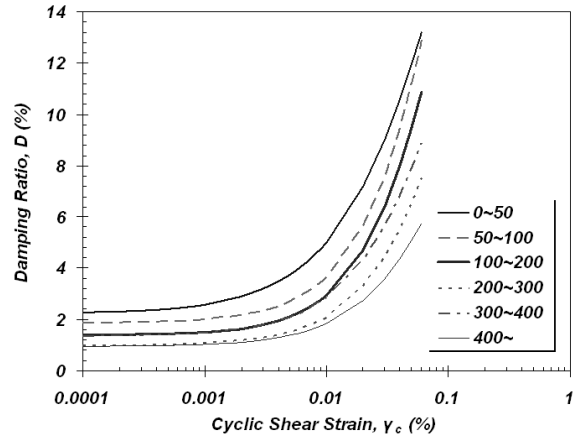
정규화 전단탄성계수 감소곡선에 대한 평균 곡선들의 경향성으로부터(그림 8(a)), 0~50kPa과 50kPa~100kPa

을 합쳐서 0~100kPa의 하나의 그룹으로 구분하고, 100kPa~200kPa을 또 하나의 그룹으로, 200kPa 초과를 하나의 그룹으로 구분하면 합리적일 것으로 판단된다. 감쇠비 곡선의 경우(그림 4(b)), 정규화 전단탄성계수 감소곡선

과 같이 구속응력에 따라 명확하게 구분되지는 않지만, 사용성의 편의를 위해, 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 동일한 0~100kPa, 100kPa~200kPa, 200kPa 초과의 3개 구속응력 영역에 대해 구분하여도 문제가 없을 것

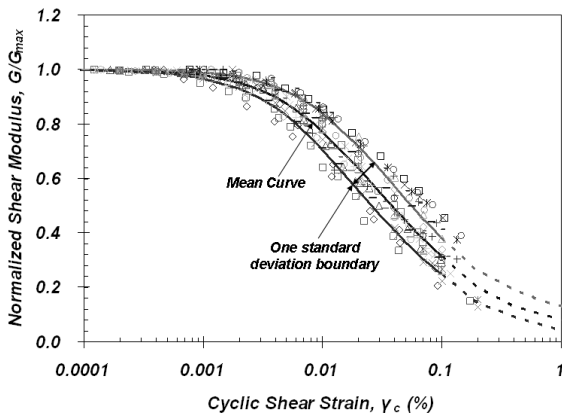


(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선

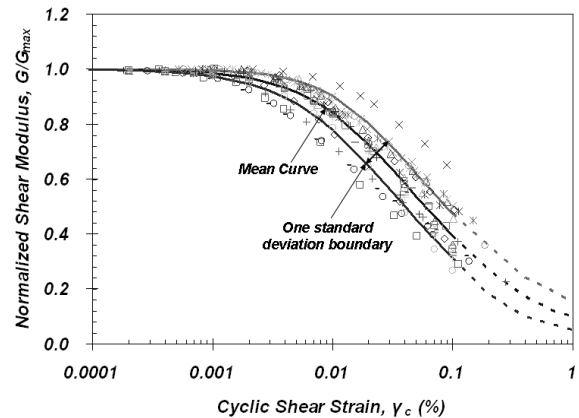


(b) 감쇠비 곡선

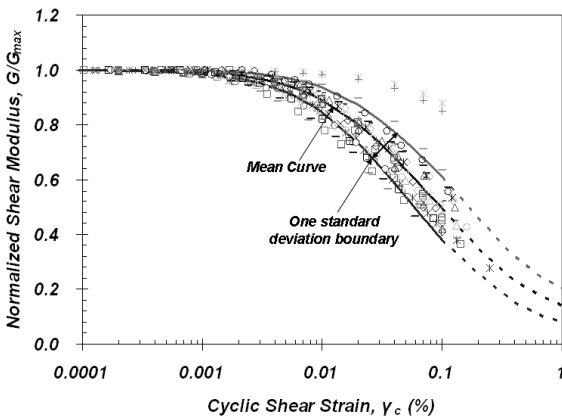
그림 4. 6개 구속응력 영역에 따른 비선형 동적 변형특성의 평균 곡선



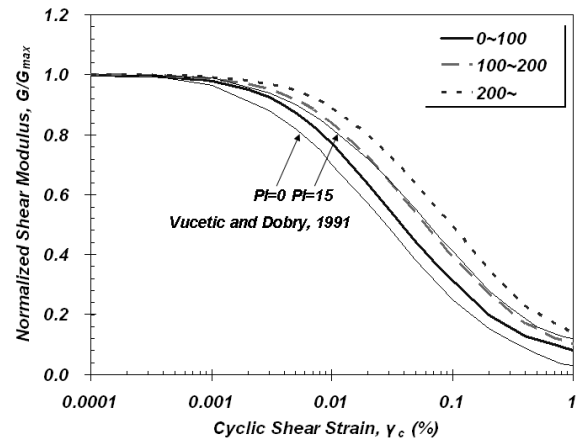
(a) 구속응력 100kPa 이하



(b) 구속응력 100kPa 초과 200kPa 이하

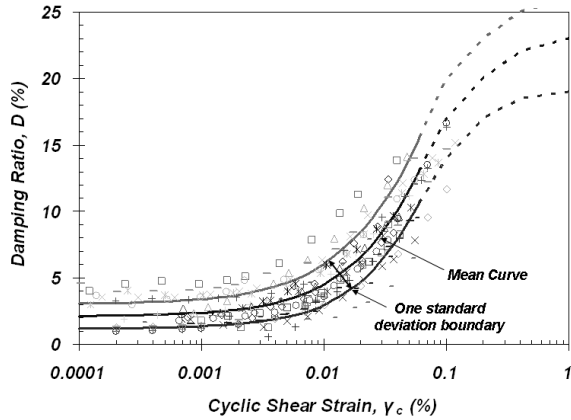


(c) 구속응력 200kPa 초과

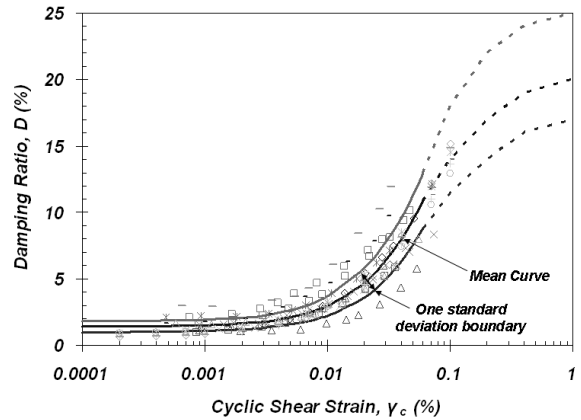


(d) 구속응력별 대표 곡선

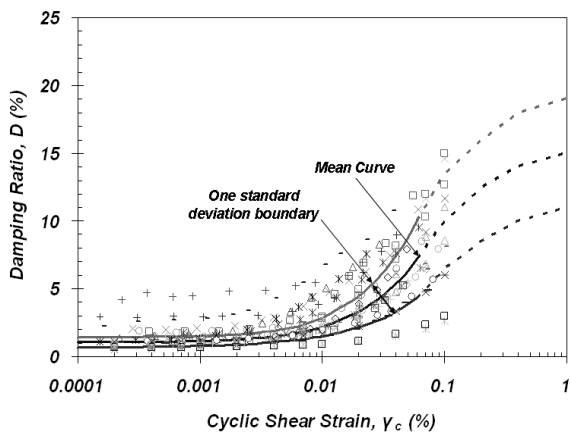
그림 5. 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 D/B 및 대표 곡선



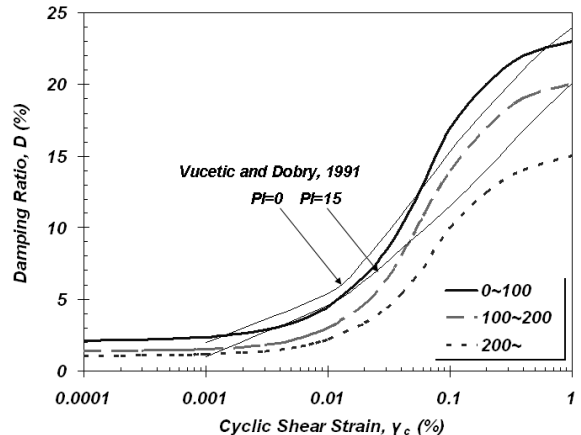
(a) 구속응력 100kPa 이하



(b) 구속응력 100kPa 초과 200kPa 이하



(c) 구속응력 200kPa 초과



(d) 구속응력별 대표 곡선

그림 6. 감쇠비 곡선의 D/B 및 대표 곡선

표 2. 심벽부 구성 재료의 비선형 동적 변형특성에 대한 대표 곡선

| 전단변형률 γ (%) | 정규화 전단탄성계수, G/G_{max} | | | 감쇠비, D (%) | | |
|-----------------------|-------------------------|------------|----------|--------------|------------|----------|
| | 0~100kPa | 100~200kPa | 200kPa초과 | 0~100kPa | 100~200kPa | 200kPa초과 |
| 0.0001 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.1 | 1.4 | 1.1 |
| 0.0002 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.2 | 1.4 | 1.1 |
| 0.0004 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 2.2 | 1.4 | 1.1 |
| 0.0007 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 2.3 | 1.5 | 1.1 |
| 0.001 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 2.4 | 1.5 | 1.2 |
| 0.002 | 0.95 | 0.97 | 0.98 | 2.6 | 1.6 | 1.3 |
| 0.004 | 0.90 | 0.93 | 0.96 | 3.1 | 2.0 | 1.5 |
| 0.007 | 0.83 | 0.88 | 0.92 | 3.8 | 2.4 | 1.8 |
| 0.01 | 0.77 | 0.84 | 0.89 | 4.5 | 3.0 | 2.2 |
| 0.02 | 0.64 | 0.73 | 0.80 | 6.6 | 4.7 | 3.3 |
| 0.04 | 0.49 | 0.58 | 0.68 | 10.1 | 8.0 | 5.4 |
| 0.07 | 0.38 | 0.47 | 0.57 | 14.5 | 12.0 | 8.2 |
| 0.1 | 0.31 | 0.39 | 0.50 | 17.0 | 14.0 | 10.0 |
| 0.2 | 0.20 | 0.27 | 0.35 | 20.0 | 17.0 | 12.5 |
| 0.4 | 0.13 | 0.17 | 0.23 | 22.0 | 19.0 | 14.0 |
| 0.7 | 0.10 | 0.12 | 0.17 | 22.6 | 19.6 | 14.6 |
| 1 | 0.08 | 0.10 | 0.14 | 23.0 | 20.0 | 15.0 |

로 판단된다. 3개의 각 구속응력 영역에 속하는 D/B와 함께 평균 곡선(m)과 ± 1 표준편차($m \pm 1\sigma$) 곡선을 재산정하여 그림 5~6에 나타내었다. 평균 곡선 및 ± 1 표준편차 곡선은 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 데이터가 주로 분포하는 전단변형률 0.1% 이하, 감쇠비 곡선의 데이터가 주로 분포하는 0.06% 이하에서는 실선으로 그 이상의 영역에서는 점선으로 표시하였다. 또한 각 구속응력 수준에 대해 대표 비선형 변형특성 결과로 제안하는 평균 곡선을 현재 필댐의 내진성능평가시 널리 이용하고 있는 Vucetic과 Dobry (1991)의 연구 결과와 비교하여 앞선 그림에 포함하였다. 일부 소수의 시료를 제외하면, 소성지수가 NP~10% 범위에 분포하고 있지만, 평균 곡선들이 Vucetic과 Dobry의 연구 결과의 오른편에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 Vucetic과 Dobry의 연구 결과를 심벽부 구성 재료에 적용하기에 무리가 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안한 구속응력별 비선형 동적 변형특성의 대표 곡선을 표 2에 전단변형률에 따른 값으로 나타내었다.

2.2 공진주 시험 결과를 이용한 대표 곡선의 검증

심벽부 재료의 비선형 동적 변형특성에 대한 D/B 및 구속응력별 대표 곡선을 검증하기 위해, 총 2종의 기존 댐 심벽부 시료를 확보하여 공진주 시험을 수행하였고, 이 결과와 비교하였다.

(1) 심벽부 시험 시료 및 시험 절차

2개의 기존 댐(MJ댐, D댐) 심벽부에서 교란상태로 시험 시료를 채취하였다. 시험 시료의 주요 기본물성치

와 입도분포곡선을 표 3과 그림 7에 각각 나타내었다.

시험 시편은 5층 과소다짐법을 이용하여 성형하였다. 과소다짐법은 다짐에 의한 시편 성형법으로 여러 층으로 나누어 다지는 경우 동일한 다짐높이를 목표로 다지면 아래층이 더 조밀하게 다져지므로, 시편 전체에 균일한 밀도를 확보하기 위하여 각 층의 시료는 동일한 무게를 가지고 다음 층으로 갈수록 목표 다짐높이가 작아지도록 성형하는 방법이다(Ladd, 1978). 시험 시편은 각 대상 현장에서 측정된 시험 시료의 현장 함수비와 건조단위중량으로 성형하였고, 직경은 약 50mm, 높이는 약 100mm이다. 이후 각 측정 센서를 비롯한 공진주/비틀전단시험 시스템을 세팅하였고, 압축공기를 이용하여 등방의 구속응력을 재하하였다. 재하된 구속응력 단계는 총 5단계로 30kPa, 60kPa, 120kPa, 240kPa, 480kPa 순으로 시험을 수행하였다. 시편내에 균일한 구속응력 분포를 위하여 각 구속응력 단계에서 6시간

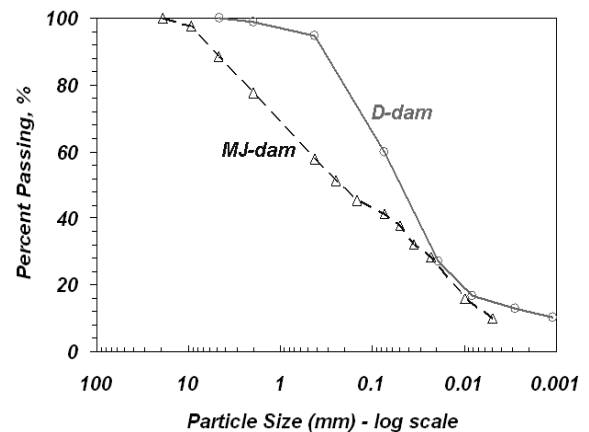


그림 7. 심벽부 시험 시료의 입도분포곡선

표 3. 심벽부 시험 시료의 기본 물성치

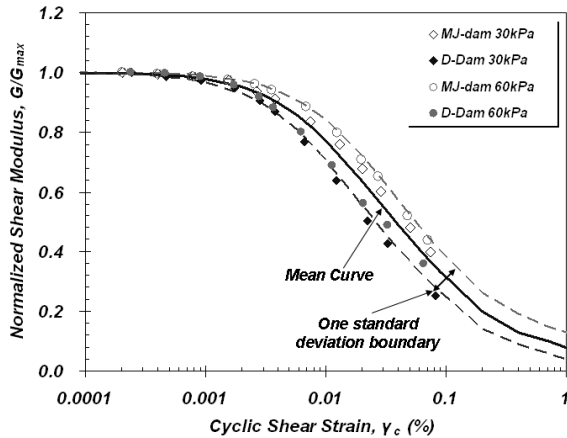
| 기본 물성치 | | MJ댐 | D댐 |
|----------|--------------------------------|--------|-------|
| 입도분포시험 | D ₅₀ (mm) | 0.22 | 0.05 |
| | #4체 통과량 (%) | 88.6 | 100.0 |
| | #200체 통과량 (%) | 41.4 | 59.9 |
| | CC | 0.27 | 6.98 |
| | CU | 118.03 | 69.10 |
| 비중 | | 2.65 | 2.70 |
| 에터버그한계 | 액성한계 (LL) | 31.6 | 35.5 |
| | 소성지수 (PI) | 9.7 | 12.3 |
| 흙 분류 | 통일분류법 | SC | CL |
| | AASHTO | A-4 | A-6 |
| 시편 성형 조건 | 현장 함수비 (%) | 16.2 | 20.0 |
| | 현장 건조단위중량 (kN/m ³) | 16.5 | 16.7 |

동안의 구속응력 재하를 완료한 후, 저변형률에서 고 변형률로 변형률의 크기를 증가시키며 공진주 시험을 수행하였다. 해당 구속압에서의 시험이 완료되면 다음 구속압 단계로 올려서 시험을 수행하는 다단계시험법 (multi-stage testing method)을 적용하여 하나의 시료로

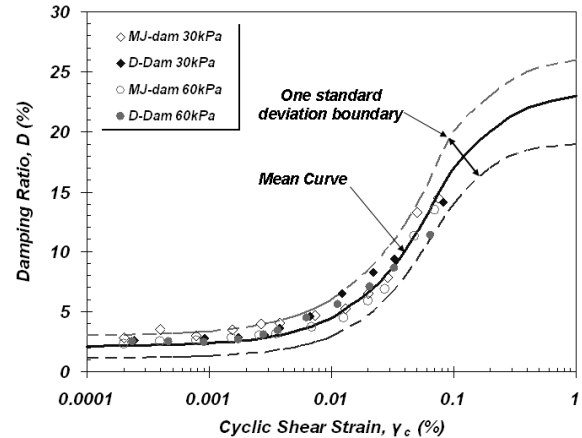
여러 구속압 상태에서의 변형특성을 효과적으로 평가 하였다.

(2) 대표 곡선의 검증

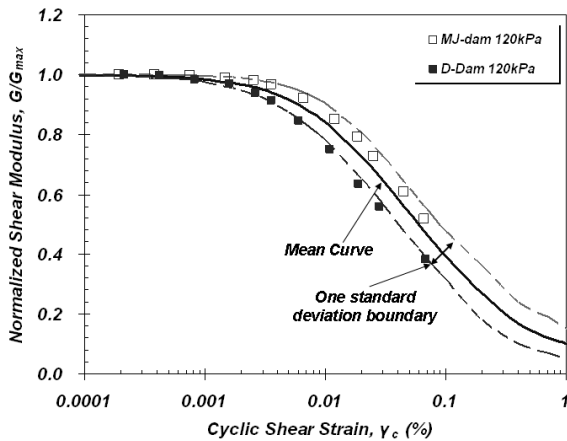
구속응력에 따라 제안된 대표 곡선을 검증하기 위해,



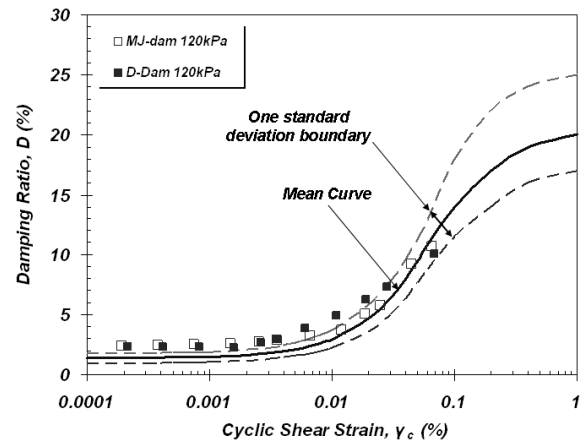
(a) 구속응력 100kPa 이하



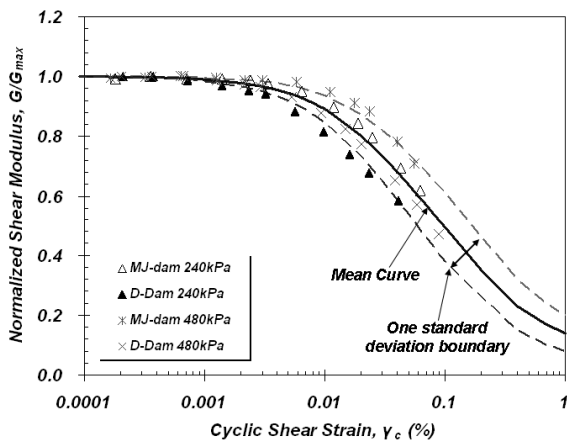
(a) 구속응력 100kPa 이하



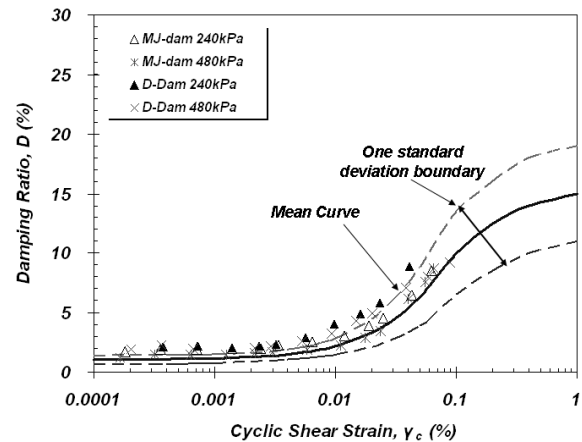
(b) 구속응력 100kPa 초과 200kPa 이하



(b) 구속응력 100kPa 초과 200kPa 이하



(c) 구속응력 200kPa 초과



(c) 구속응력 200kPa 초과

그림 8. 공진주 시험 결과를 이용한 대표 곡선의 검증(G/G_{max})

그림 9. 공진주 시험 결과를 이용한 대표 곡선의 검증(D)

본 연구에서 수행한 공진주 시험 결과와 함께 그림 8~9에 나타내었다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 경우(그림 8), D댐의 결과는 MJ댐의 결과보다 비선형 거동이 일찍 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 결과, 제안한 대표 곡선에 비하여 D댐의 공진주 시험 결과는 약간 왼쪽에 위치하고 있고, MJ댐의 결과는 약간 오른쪽에 위치하고 있지만, 각 구속응력에 대해 제안된 ± 1 표준편차 영역내에는 포함됨으로써 구축된 D/B 및 대표 곡선의 신뢰성을 확인하였다. 감쇠비 곡선의 경우(그림 9), 두 시험 시료의 공진주 시험 결과가 미소변형률 영역에서는 대표 곡선과 비교하여 약간 큰 값을 나타내고 있지만, 전체적으로 모든 구속응력 수준에서 대표 곡선 및 ± 1 표준편차 영역에 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 사력부 재료의 비선형 동적 변형특성 평가

사력부를 구성하고 있는 자갈 등 입자가 큰 사석 재료에 대한 기존 비선형 동적 변형특성 평가 결과를 수집하여 심벽부와 마찬가지로 구속압 영역에 따른 D/B를 구축하고 대표 곡선을 제안하였다. 또한 한국수자원공사 연구원에 보유하고 있는 대형삼축시험기에 미소변형 측정이 가능하도록 개선하여 현재 시공중에 있는 B댐 사력부 구성 재료에 대한 비선형 동적 변형특성을 획득하여 구축된 D/B 및 대표 곡선을 검증하였다.

3.1 비선형 동적 변형특성에 대한 D/B 구축 및 대표 곡선 제안

일반적으로 사력부는 시추가 불가능하지만, 동반논문에서 나타낸 바와 같이 현장 전단파속도 주상도는 소단 또는 사면에서 직접 표면과 탐사를 수행함으로써 평가가 가능하다. 반면, 비선형 동적 변형특성은 실내 시험을 수행할 수 없으므로 기존 연구 결과 및 문헌 자료로부터 결정하여야 한다. 본 연구에서는 사석 재료를 이용한 국외 최근 연구 결과들로부터 D/B를 구축하고, 이를 바탕으로 구속압 범위에 따른 대표 비선형 동적 변형특성 곡선을 산정하여 동해석시 활용할 수 있도록 제안하였다.

(1) D/B 구축 현황

사력부의 구성 재료는 입경이 45~60cm이고 10cm 이하의 입경을 5% 이상 포함하지 않아야 하며, D_{50} = 2~10cm

의 큰 자갈이어야 한다고 댐 설계기준(건설교통부, 2005)에서 규정하고 있다. 그러나 일반적으로 대형삼축시험을 위한 시편의 크기는 지름 30cm, 높이 60cm로 실제 구성 재료의 조건을 만족시키면서 시험을 수행하는 것은 불가능하기 때문에 시편의 크기에 적합하도록 시료의 입도를 조정하여 시험을 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대형시험장비를 이용한 사석재료의 비선형 동적 변형특성 평가 결과를 수집하여 D/B를 구축하였다.

현재까지 국내에서는 자갈과 같은 사석 재료에 대한 비선형 동적 변형특성을 평가한 연구사례가 없으므로 미국, 일본 등 해외 연구자들에 의해 1988년부터 2006년까지 출판된 총 18편의 논문을 바탕으로 사석 재료에 대한 D/B를 구축하였다. 각 논문에서 사용한 시험 시료의 기본 물성 정보, 수행된 시험, 시험 조건 등을 표 4에 나타내었다.

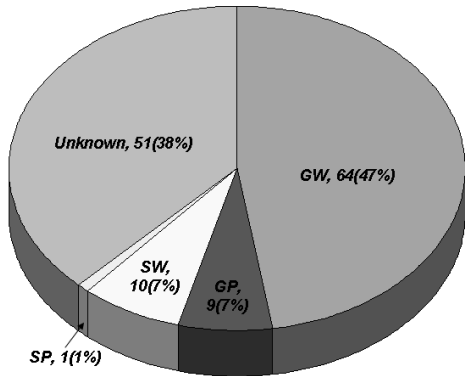
18편의 논문을 통하여 총 135개의 정규화 전단탄성계수 감소곡선(G/G_{max} - $\log \gamma$)과 총 65개의 감쇠비 곡선(D- $\log \gamma$)을 획득하였다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 대한 135개의 시험 결과를 바탕으로 통일 분류법에 의한 흙의 분류 결과, 시험 시편의 최대 입자 크기, 시험 방법, 배수 조건의 분포를 그림 10에 나타내었다. 통일 분류법에 의해 자갈(GW 또는 GP)로 분류되는 시편의 결과가 73개(54%)로 대부분이었고, 모래(SW 또는 SP)로 분류되는 시편의 결과도 일부 존재하였다. 그러나 5편의 논문에서는 입도분포곡선이 나타나 있지 않아서 51개(38%)의 결과에 대해서는 흙 분류를 확인할 수 없었다. 시험 시편의 최대 입자 크기는 최소 3mm에서 최대 303mm까지 존재하고, 50mm 초과 100mm 이하 영역에서 44개(33%)로 가장 많이 분포하였다. 각 논문에서 정규화 전단탄성계수를 획득하기 위해 수행된 시험 방법은 반복삼축시험(Cyclic Triaxial Test, CTX)이 75개(56%)로 가장 많았고, 대형 공진주시험(Large-scale RC Test)이 37(27%), 반복비틀단순전단시험(Cyclic Torsional Simple Shear Test, CTSS)이 10개(7%), 정적삼축시험(Monotonic Triaxial Test, MTX)이 9개(7%)를 차지하였다. 또한 전단변형률 0.01%이하에서는 공진주시험 결과를 이용하고, 그 이상에서는 반복삼축시험 결과를 이용하여 결합한 데이터도 4(3%)개 존재하였다. 배수 조건은 건조배수(DD), 포화배수(SD), 포화비배수(SU)가 골고루 분포하였고, 시편의 포화도가 30% 이하인 불포화 조건(US)에서 수행된 시험 결과도 12개(9%)가 존재하였다.

표 4. 사력부 구성 재료에 대해 획득한 D/B의 기본 물성 및 시험 조건 정보

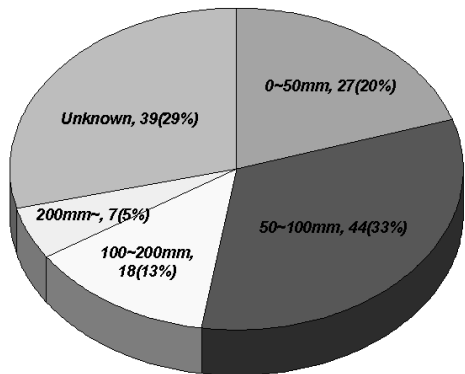
| Reference | 기본물성 | | 시험 조건 | | | | | | 보유 데이터 |
|--------------------------|--------|----------------------------|----------------|----------------------|----------------------------|-------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | 통일 분류법 | 최대입경 D _{max} (mm) | 시험 방법 | 시편성형방법 ¹⁾ | 시편(mm) 지름/높이 ²⁾ | 간극비 (상대밀도) | 배수 조건 | 구속응력 (kPa) | |
| Modoni 등(1999) | - | 30 | TX | R | 230/570 | 0.22 | DD | 294 | G/G _{max} |
| Hatanaka 등 (1988) | GP | 90 | CTX | U, R | 300/600 | 0.33(57) | SU | 294.3 | G/G _{max} , D |
| | GP | 90 | CTX | U, R | 300/600 | 0.26(69) | SU | 490.5 | |
| Goto 등 (1992) | GP | 91 | CTX | U, R | 300/600 | 0.27(69) | SU | 127.5 | G/G _{max} , D |
| | GP | 77 | CTX | U, R | 300/600 | 0.39(27) | SU | 186.4 | |
| Yasuda와 Matsumoto (1993) | GW | 38.1 | CTX | R | 400/800 | 0.42 | DD | 100, 200, 300, 400 | G/G _{max} , D |
| | GW | 38.1 | CTSS | R | 400(800)*/800 | 0.42 | DD | 100, 200, 300, 400 | |
| Dong 등 (1994) | SP | 3 | CTX | R | 300/600 | 0.48(100) | DD | 78.5 | G/G _{max} , D |
| | GP | 20 | CTX | R | 300/600 | 0.58(100) | DD | 78.5 | |
| | GW | 40 | CTX | R | 300/600 | 0.28(93) | DD | 78.5 | |
| | GW | 50 | CTX | R | 300/600 | 0.22(99) | DD | 78.5 | |
| Yasuda 등 (1996) | GW | 170 | CTX | U | 300/550 | 0.27(79) | SD | 50, 100, 290, 590 | G/G _{max} , D |
| | GW | 303 | CTX | U | 300/550 | 0.23(82) | SD | 50, 290, 590 | |
| | GW | 173 | CTX | U | 300/550 | 0.21(91) | SD | 50, 290, 590 | |
| | GW | 207 | CTX | U | 300/550 | 0.21(96) | SD | 50, 100, 290, 590 | |
| | GW | 63.5 | CTX | R | 300/600 | 0.25(59) | SD | 50, 290, 590 | |
| | GW | 63.5 | CTX | R | 300/600 | 0.27(53) | SD | 50, 290, 590 | |
| | GW | 174 | CTX | R | 300/600 | 0.27(74) | SD | 50, 290, 590 | |
| Tanaka 등 (1994) | GW | 100 | CTX | U | 100/200 | 0.09 | SU | 88.3 | G/G _{max} , D |
| | GW | 100 | CTX | U | 300/600 | 0.15 | SU | 78.5 | |
| Flora 등 (1994) | GW | 40 | CTX | R | 300/600 | 0.43 | DD | 20, 50, 80 | G/G _{max} |
| Kokusho와 Tanaka (1994) | GW | 100 | CTX | U, R | 300/600 | 0.21~0.29 (80~90) | SU | 160 | G/G _{max} , D |
| | SW | 40 | CTX | U | 100/200 | 0.26~0.46 | SU | 75, 100, 200, 400 | |
| Goto 등 (1994) | GW | 105 | CTX | U, R | 300/600 | 0.34 | SU | 127 | G/G _{max} |
| | GW | 94 | CTX | U, R | 300/600 | 0.39 | SU | 118 | |
| Konno 등 (1994) | - | 70~150 | CTX | U, R | 300/600 | 0.30~0.46 | SU | 186, 392 | G/G _{max} , D |
| Yasuda와 Matsumoto (1994) | GW | 63.5 | MTX | R | 300/600 | 0.38(70) | DD | 100, 200, 400 | G/G _{max} |
| | GW | 63.5 | CTX | R | 300/600 | 0.28(90) | DD | 100, 200, 400 | |
| | GW | 63.5 | MTX | R | 300/600 | 0.36(68) | DD | 100, 200, 400 | |
| | GW | 63.5 | CTX | R | 300/600 | 0.3(89) | DD | 100, 200, 400 | |
| | GW | 63.5 | CTSS | R | 400(800)*/800 | 0.3(85) | DD | 100, 200, 300 | |
| Hatanaka와 Uchida (1995) | - | 90 | CTX | U, R | 300/600 | 0.32 | SU | 294.3 | G/G _{max} , D |
| | - | 99 | CTX | U, R | 300/600 | 0.47 | SU | 186.4 | |
| | - | 110 | CTX | U, R | 300/600 | 0.33 | SU | 186.4 | |
| | - | 125 | CTX | U | 300/600 | 0.22 | SU | 98.1 | |
| | - | 106 | CTX | U | 300/600 | 0.22 | SU | 392.4 | |
| Rollins 등 (1998) | SW | 10 | CTX | R | 71/150 | 0.69(40) | SU | 100 | G/G _{max} |
| | SW | 10 | CTX | R | 71/150 | 0.53(40) | SU | 100 | |
| | GW | 10 | CTX | R | 71/150 | 0.43(40) | SU | 100 | |
| Lin 등 (2000) | SW | 12.7 | RC+CTX | R | 70/150(RC) 150/300(CTX) | 0.31 | SU | 58.7, 147, 244, 342 | G/G _{max} , D |
| Stokoe 등 (2004) | GW | - | Large Scale RC | R | 152/305 | 0.3 | DD | 101.3 | G/G _{max} , D |
| Hardin과 Kalinski (2005) | - | - | Large Scale RC | R | 150/300 | 0.68~0.73 | DD | 30, 50, 90 | G/G _{max} |
| | - | - | | R | 150/300 | 0.4~0.73 | US, DD | 30, 50, 90 | |
| | - | - | | R | 150/300 | 0.51, 0.52 | DD | 30, 50, 90 | |
| | - | - | | R | 150/300 | 0.33~0.50 | US | 30, 50, 90 | |
| Pallara 등 (2006) | - | - | CTX | U, R | 300/600 | 0.246~0.488 | SU | 60.5~82.7, 46.2~47.6 | G/G _{max} , D |

1) 시편 성형 방법에서 R은 재성형(Reconstituted), U는 비교란(Undisturbed)을 의미함.

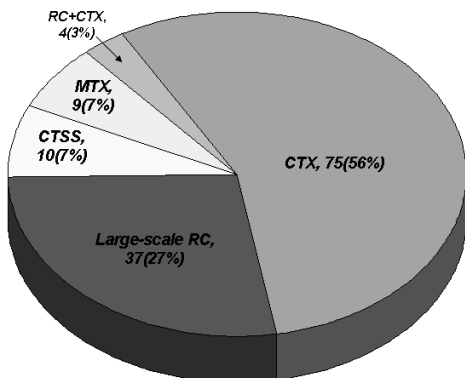
2) 400(800)*은 hollow 원통시편에 대한 내경이 400mm, 외경이 800mm임을 의미함.



(a) 통일 분류법



(b) 시험 시편의 최대 입경



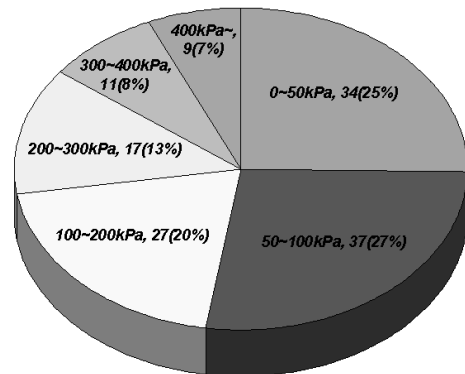
(c) 시험 방법

(2) 구속응력에 따른 대표 곡선 제안

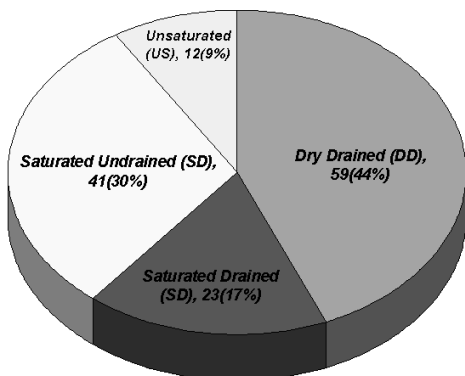
앞선, 심벽부 구성 재료에서 사용한 방법과 마찬가지로, 구축한 D/B의 구속응력에 따른 분포를 확인하기 위하여, 우선 구속응력 0~50kPa, 50kPa~100kPa, 100kPa~200kPa, 200kPa~300kPa, 300kPa~400kPa, 400kPa 초과 의 비교적 세밀하게 6개의 그룹으로 구분하였고, 각각에 속하는 D/B의 개수를 그림 11에 나타내었다.

또한 각 구속응력 영역에 속하는 시험 결과를 바탕으로 평균 곡선을 획득하였고, 그림 12에 나타내었다. 구축된 시험 결과들의 최대 전단변형률 분포를 고려하여 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선 모두 전단변형률 0.1%이하의 시험 결과들만을 이용하여 평균 곡선을 획득하였다. 데이터 개수가 많은 0~50kPa과 50~100kPa의 낮은 구속응력 영역에서는 구속응력이 증가함에 따라 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 오른쪽으로 이동하고 감쇠비 곡선은 아래쪽으로 이동하는 일반적인 경향을 보이고 있지만, 나머지 구속응력 영역에서는 특별한 경향성을 보이지 않고 있다.

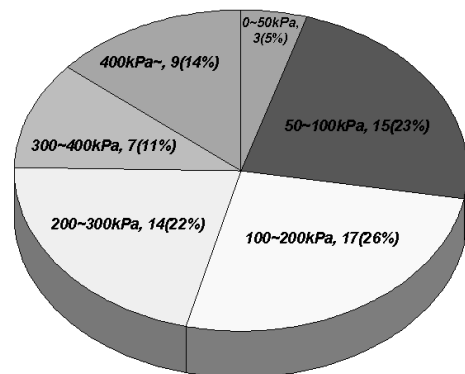
따라서, 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 대한 평균 곡선



(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선(135개)



(d) 배수 조건



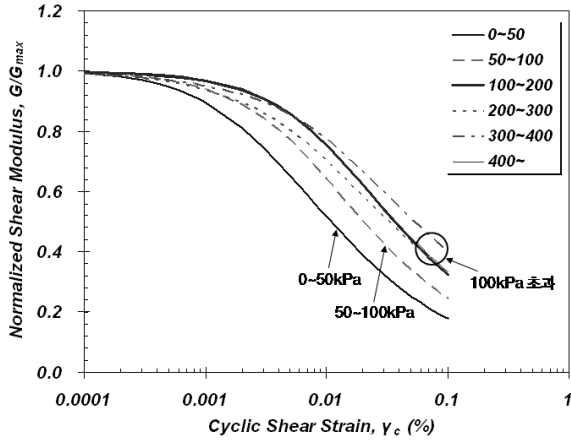
(b) 감쇠비 곡선(65개)

그림 10. 구축된 D/B의 기본 물성 분포(G/G_{max} : 135개)

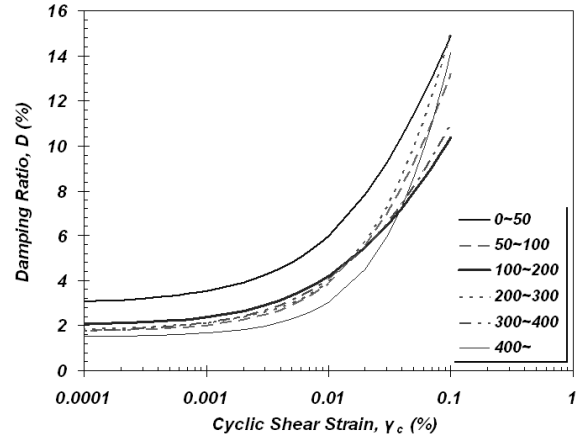
그림 11. 6개의 구속응력에 대한 데이터 개수

들의 경향성으로부터(그림 12(a)), 0~50kPa과 50kPa~100kPa 을 각각 하나의 그룹으로 구분하고, 100kPa 이상을 하나의 그룹으로 구분하면 합리적일 것으로 판단된다. 반면, 감쇠비 곡선의 경우(그림 12(b)), 정규화 전단탄성계

수 감소곡선과는 달리, 구속응력에 따라 명확히 구분되지 않으므로 사용성의 편의를 위해 구속응력에 관계없이 하나의 대표 곡선으로 제안하였다. 각 구속응력 영역에 속하는 D/B와 함께 평균 곡선과 ± 1 표준편차 곡선을

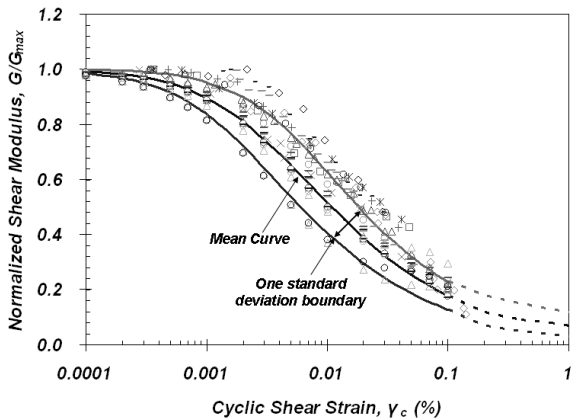


(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선

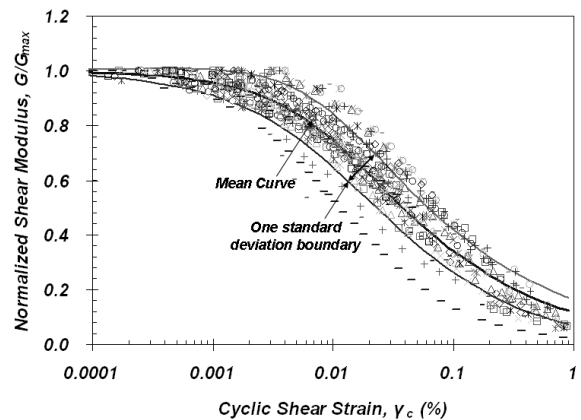


(b) 감쇠비 곡선

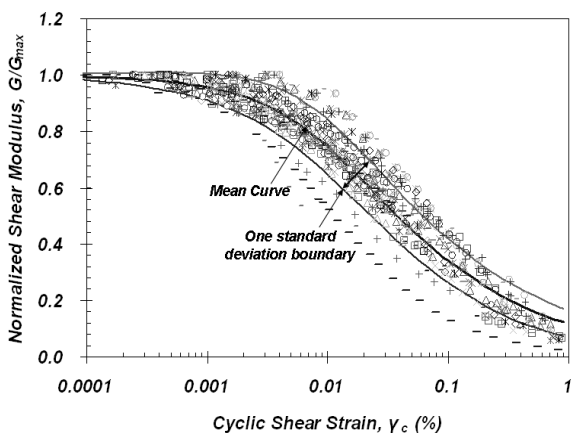
그림 12. 6개 구속응력 영역에 따른 비선형 동적 변형특성의 평균 곡선



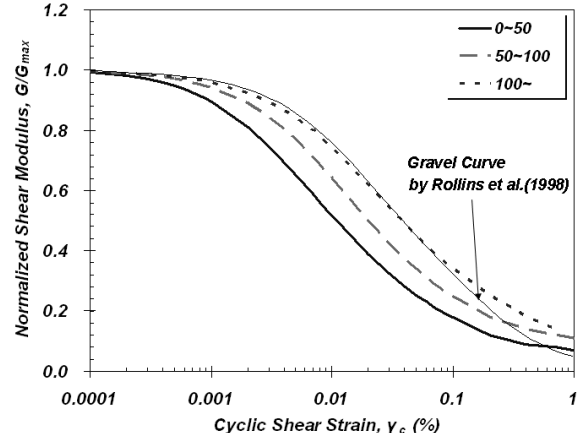
(a) 구속응력 50kPa 이하



(b) 구속응력 50kPa 초과 100kPa 이하



(c) 구속응력 100kPa 초과

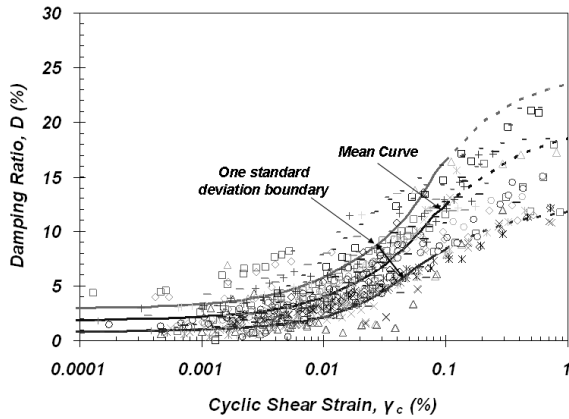


(d) 구속응력별 대표 곡선의 Rollins 곡선과의 비교

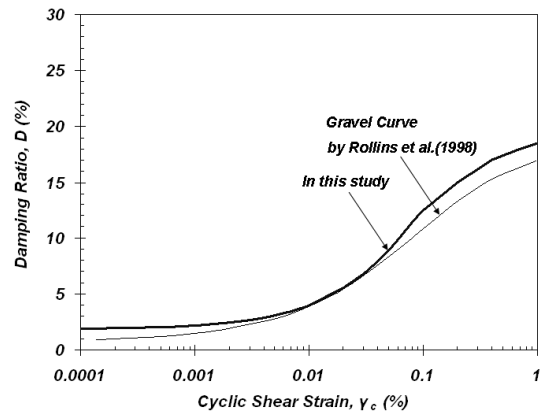
그림 13. 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 D/B 및 대표 곡선

재산정하여 그림 13~14에 나타내었다. 평균 곡선 및 ± 1 표준편차 곡선은 데이터가 주로 분포하는 전단변형률 0.1% 이하에서는 실선으로 그 이상의 영역에서는 점선으로 표시하였다. 단, 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 100kPa 이상에 대해서는 대부분의 데이터가 전단변형률 0.9%까지 존재하여 그 이하에 대해 실선으로 나타내었다. 또한 각 구속응력 영역에 대한 평균 곡선을 내진설계시 사석 및 자갈질 토층에 널리 사용하고 있는 Rollins

등(1998)의 연구결과와 비교하여 앞선 그림에 포함하였다. 정규화 전단탄성계수의 경우, 100kPa 이상의 대표 곡선은 Rollins 등의 연구 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는, Rollins 곡선이 대부분 100kPa 이상의 구속응력에서 획득한 시험 결과들을 바탕으로 하였기 때문이다. 본 연구에서는 사력부의 상부 영역을 대표할 수 있는 낮은 구속응력의 데이터들을 추가로 수집하여 Rollins 등의 연구 결과를 보충하였다. 감쇠비 곡선의 경



(a) D/B



(d) 대표 곡선의 Rollins 곡선과의 비교

그림 14. 감쇠비 곡선의 D/B 및 대표 곡선

표 5. 사력부 구성 재료의 비선형 동적 변형특성에 대한 대표 곡선

| 전단변형률 γ (%) | 정규화 전단탄성계수, G/G_{max} | | | 감쇠비, D (%) 모든 구속응력 |
|-----------------------|-------------------------|-----------|----------|-------------------------|
| | 0~50kPa | 50~100kPa | 100kPa이상 | |
| 0.00001 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.9 |
| 0.00002 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.9 |
| 0.00004 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.9 |
| 0.00007 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.9 |
| 0.0001 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.9 |
| 0.0002 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 1.9 |
| 0.0004 | 0.96 | 0.98 | 0.98 | 2.0 |
| 0.0007 | 0.93 | 0.96 | 0.97 | 2.1 |
| 0.001 | 0.90 | 0.94 | 0.96 | 2.2 |
| 0.002 | 0.81 | 0.89 | 0.92 | 2.4 |
| 0.004 | 0.69 | 0.81 | 0.87 | 2.9 |
| 0.007 | 0.59 | 0.71 | 0.80 | 3.5 |
| 0.01 | 0.52 | 0.64 | 0.74 | 4.0 |
| 0.02 | 0.39 | 0.50 | 0.62 | 5.5 |
| 0.04 | 0.28 | 0.38 | 0.49 | 7.9 |
| 0.07 | 0.21 | 0.29 | 0.40 | 10.7 |
| 0.1 | 0.18 | 0.25 | 0.34 | 12.5 |
| 0.2 | 0.12 | 0.18 | 0.25 | 15.0 |
| 0.4 | 0.09 | 0.14 | 0.18 | 17.0 |
| 0.7 | 0.08 | 0.12 | 0.14 | 18.0 |
| 1 | 0.07 | 0.11 | | 18.5 |

우, 제안한 곡선과 Rollins 곡선이 거의 일치함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 구속응력별 비선형 동적 변형 특성의 대표 곡선을 표 5에 전단변형률에 따른 값으로 나타내었다.

3.2 B댐 사석 재료 시험 결과를 이용한 대표 곡선의 검증

사력부 재료의 비선형 동적 변형특성에 대한 D/B 및 구속응력별 대표 곡선을 검증하기 위해, 현재 시공중인 B댐의 사석 재료에 대해 반복삼축압축시험을 수행하고, 그 결과와 비교하였다.

(1) 대형 삼축시험기의 개선 사항

본 연구에서는 한국수자원공사 연구원에 보유하고 있는 대형 삼축시험기를 이용하여 B댐 사석 재료에 대한 시험을 수행하였고, 이는 정적 및 반복 하중 조건 모두 구현이 가능하다. 본 시험기에 대한 자세한 사항은 서민우 등(2006)에 기술되어 있다. 그러나 현재 대형삼축시험기는 시편에 가해지는 하중과 변형을 모두 구속셀 외부에서 측정하도록 되어 있다. 이와 같은 외부 측정은 미소변형률~중간변형률 영역($10^{-2}\%$ 이하)에서의 강성을 평가하는데 많은 오차를 포함할 수 있으며, 이러한 오차의 주요한 원인으로는 상부캡(topcap), 하부좌대(base pedestal), 시료 사이에 발생하는 불연속면(bedding error), 하중재하봉과 시료사이의 어긋난 정렬(alignment), 저해상도의 감지기 이용, 시스템 순응도 문제 등을 들 수 있다(Baldi 등, 1988). 따라서 기술된 이러한 오차를 제거하고 정확도를 높이기 위하여 시료의 변형을 구속셀 내부에서 측정하는 방법들이 대두되었다. 본 연구에

서는 내부변형 측정(Internal displacement measurement)을 위해, 2개의 근접센서(Gap Sensor)를 추가하였고, 국부변형 측정(Local displacement measurement)을 위해, 2개의 LDT(Local Deformation Transducer, Tatusoka와 Shibuya, 1991)를 사용하였다. 그러나 하중을 측정하는 로드셀은 여전히 구속셀 외부에서 측정하여 일부 오차를 포함하고 있을 것으로 판단된다. 그림 15는 본 연구에서 사용한 외부 변형 및 하중 측정, 내부변형 측정, 국부변형 측정에 대한 개요도를 나타낸다.

내부변형 측정을 위해 사용된 근접센서는 에디커런트 로스(Eddy current loss) 원리를 이용해서 작동하는 비접촉식 트랜스듀서이다. 에디커런트는 센서의 코일에 의해 금속판 타겟(target)에서 유발되고, 센서와 타겟 사이의 거리가 변함에 따라 코일의 임피던스가 변하고, 결과적으로 직류전압의 크기가 변하게 된다. 구속셀 상단에 근접센서를 설치하고, 금속판 타겟은 탑캡(top cap)의 윗면에 고정시킴으로써 시편 전체에 걸친 내부변형 측정을 수행하였다. 국부변형 측정을 위해 사용된 LDT는 1% 이하의 변형률을 측정하고자 할 때 사용되며, 비교적 단단한 흙이나 연암을 대상으로 사용하고 있다. LDT는 얇은 인칭동 판에 4개의 Strain Gauge를 full bridge 형식으로 붙여서 인칭동 판이 휘어질 때 발생하는 변형을 측정하는 장치이다. 본 연구를 통해 제작된 시험 시편에 근접센서와 LDT를 장치한 모습을 그림 16에 나타내었다.

(2) 시험 시료 및 시험 조건

현재 시공중인 B댐의 사력부 축조재료를 이용하여 반복삼축시험을 수행하였다. 일반적으로 댐 축조에 사용

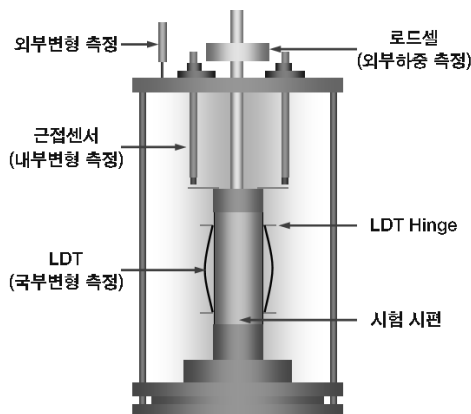


그림 15. 본 연구에서 사용한 변형 및 하중 측정 시스템 개요도

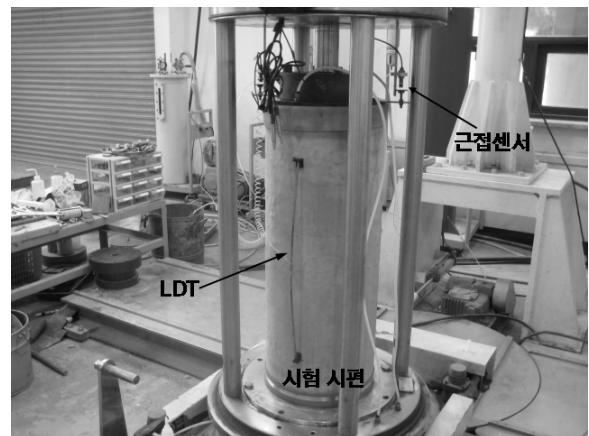


그림 16. 시험 시편에 설치된 근접센서와 LDT

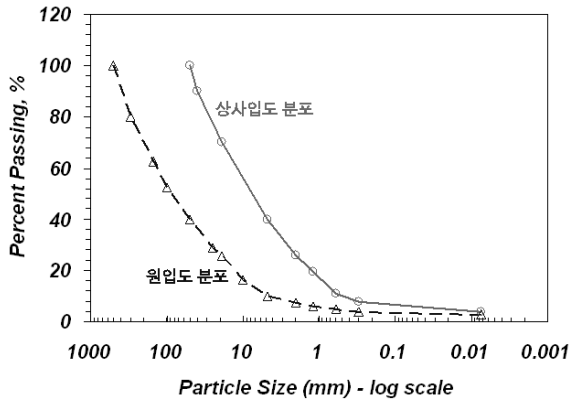
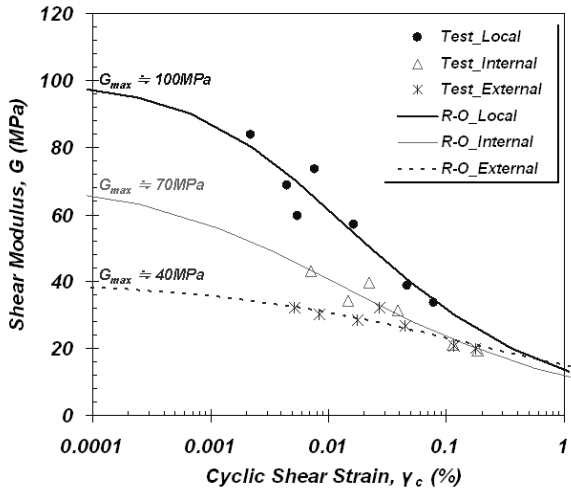


그림 17. B댐 사석 재료의 원입도와 상사입도 분포

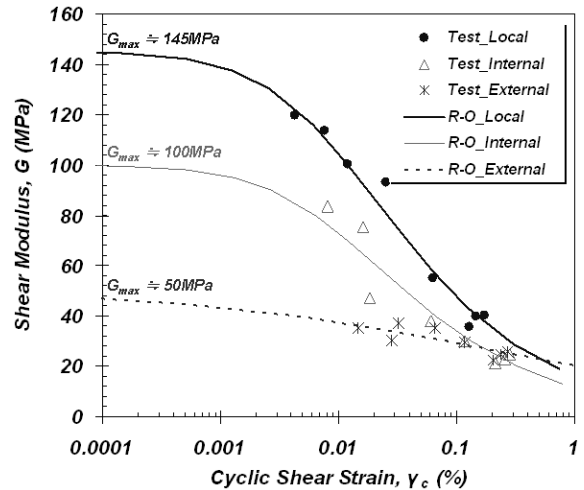
되는 재료의 최대 입자 크기는 500mm 이상이지만, 본 시험에서는 최대 입자 크기를 시험기의 규모에 맞추어

50mm로 축소시킨 후, 원입도의 상사입도(parallel gradation technique)를 적용시켜 시험 시편을 성형하였다. 이 방법은 시험기의 시편 크기에 맞추어 최대 입경을 결정한 후, 원재료의 입도곡선을 평행 이동하여 시험입도의 균등계수가 원입도와 같도록 입도를 축소 조정하는 방법이다(한국수자원공사, 1999). 본 시험에서 적용된 원입도와 상사입도 분포를 그림 17에 나타내었다.

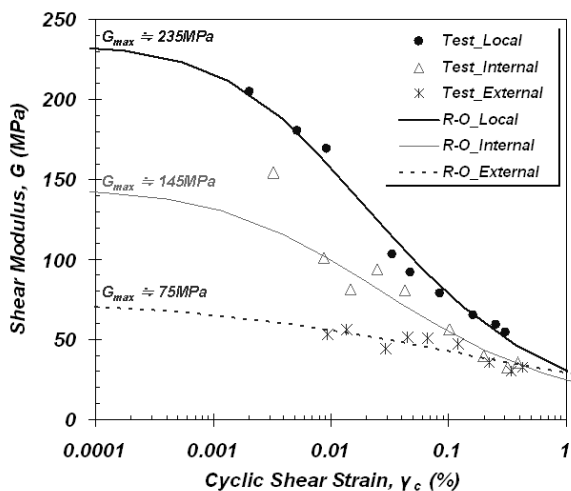
시험 시편은 공진주/비틀전단시험과 동일하게 5층 과소다짐법(under-compaction method)을 이용하여 성형하였다. 시험 시편은 건조 조건에서 단위중량 2.04t/m³으로 성형하였고, 직경은 약 300mm, 높이는 약 620mm이다. 이후 각 측정 센서와 구속셀을 설치하였고, 구속셀에 물을 채운후, 압축공기를 이용하여 등방의 구속응력을 재하하였다. 재하된 구속응력 단계는 총 4단계로 40kPa,



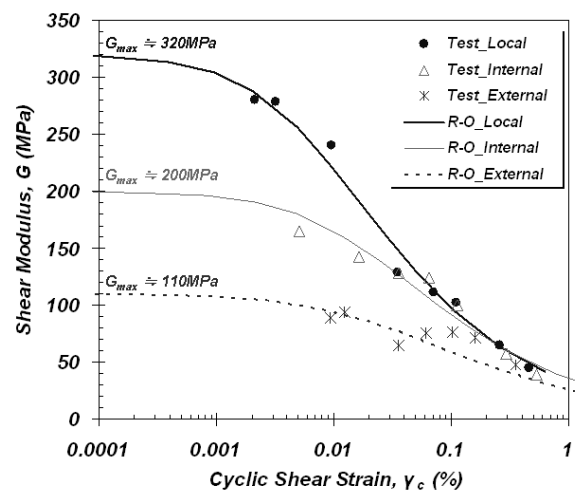
(a) 구속응력 40kPa



(b) 구속응력 80kPa



(c) 구속응력 160kPa



(d) 구속응력 320kPa

그림 18. B댐 사석재료의 전단탄성계수 감소곡선

80kPa, 160kPa, 320kPa 순으로 시험을 수행하였다. 시편 내에 균일한 구속응력분포를 위하여 각 구속응력 단계에서 일정 시간 동안의 압밀과정을 완료한 후, 낮은 하중 단계부터 가해지는 축하중 크기를 증가시키며 시험을 수행하였다. 0.1% 이상의 변형률 영역까지 시험이 완료되면 다음 구속압 단계로 올려서 위와 같은 과정을 반복 수행하는 다단계시험법(multi-stage testing method)을 적용하였다.

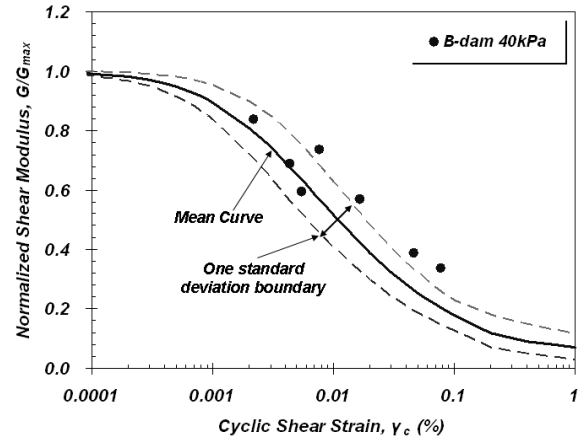
(3) 비선형 동적 변형특성의 평가 및 대표 곡선의 검증

개선된 변형측정 시스템과 함께 대형삼축시험으로부터 획득한 전단탄성계수 감소곡선(Shear Modulus Reduction Curve, $G\text{-log}\gamma$)을 그림 18에 나타내었다. 변형측정 시스템은 개선이 되었지만, 구속셀 외부에 설치되어 있는 로드셀의 영향으로 하중을 측정하는데 오차를 발생시킬 수 있고, 또한 현재 사용하고 있는 Actuator로 미소 변형률 영역의 작은 하중을 발현하는데 어려움이 있어, 그림에서 보듯이, $10^{-3}\%$ 이하의 미소변형률 영역에 대해서는 전단탄성계수를 평가하기 어려웠다. 따라서 시험 결과의 경향성을 고려하여 각 구속응력 및 변형측정 방법에 따른 최대 전단탄성계수(G_{max})를 가정하였고(그림 18), 이를 바탕으로 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 결정하였다. 또한 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 각 시험 결과에 대해 곡선 맞추기(curve fitting)를 수행하였고, 맞춤 곡선을 그림 18에 함께 나타내었다.

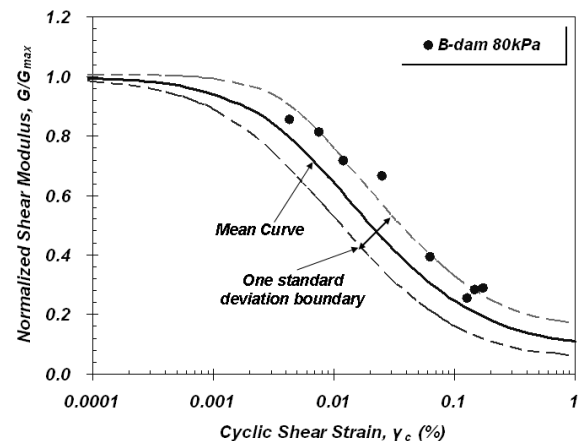
내부변형 및 국부변형 측정 시스템을 추가함으로써 0.1% 이하의 중간변형률 영역에서 외부변형 측정으로부터 획득한 탄성계수에 비하여 큰 탄성계수를 획득하는 것을 확인할 수 있다. 이는 계측의 정확도 증가로 인하여 내부변형과 국부변형이 외부변형 측정으로부터 야기되는 오차의 원인을 제거하고 시편 자체만의 변형을 신뢰성 있게 평가하고 있음을 의미한다. 따라서 국부변형 측정으로부터 획득한 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 이용하여 앞서 제안한 구속응력별 대표 곡선을 검증하였다.

미소변형률 영역의 최대 전단탄성계수를 명확히 획득할 수 없었고, 여전히 남아있는 오차 가능성으로 인하여 공진주/비틀전단시험 결과와 비교하여 분산이 크지만, 그림 19에 나타낸 바와 같이 구속응력에 따라 제안된 대표 곡선과 비교하여 어느 정도 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 각 구속응력에 대해 제안된 ± 1 표

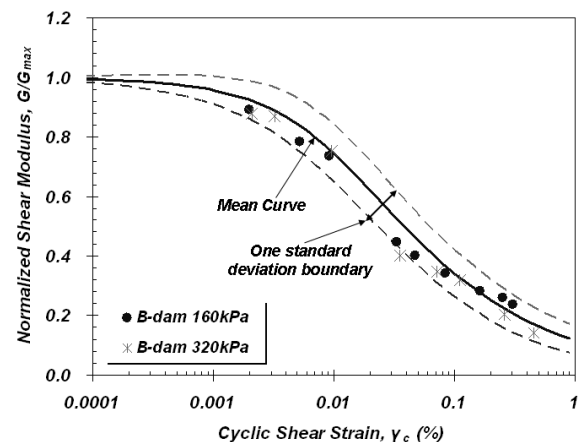
준편차 영역내에 포함됨으로써 구축된 D/B 및 대표 곡선의 충분히 신뢰성을 갖는다는 것을 확인하였다. 그러나 감쇠비의 경우, 기존의 Rollins에 의해 제안된 곡선과의 일치하고 있으므로 검증 과정을 생략하였다.



(a) 구속응력 50kPa 이하



(b) 구속응력 50kPa 초과 100kPa 이하



(c) 구속응력 100kPa 초과

그림 19. B댐 시험 결과를 이용한 대표 곡선의 검증(G/G_{max})

4. 결론

본 논문에서는 동반논문에서 언급한 현장 전단파속도 주상도와 함께 필댐의 동적 내진해석시 중요한 입력 물성치로 사용되는 정규화 전단탄성계수 감소곡선 ($G/G_{max}-\log\gamma$)과 감쇠비 곡선($D-\log\gamma$)에 대한 평가 방법을 심벽부와 사력부 각각에 대하여 제시하였다.

- (1) 심벽부의 경우, 일반적으로 사력부와 비교하여 구성 재료의 입자가 작고, 댐마루에서의 시추가 용이하여 시료 채취가 가능하다. 본 연구에서 확보한 2종의 심벽부 시료에 대해 공진주/비틀전단시험을 수행하여 비선형 동적 변형특성을 평가하였고, 동반논문의 현장 전단파속도와 비교하여 시험 결과 및 시험 방법의 신뢰성을 확인하였다.
- (2) 심벽부는 Rockfill 댐 전체 부피의 10% 정도를 차지하지만, 차수라는 댐의 기능적 측면에서 중요한 역할을 수행하므로 항시 시추가 가능하지는 않다. 이를 고려하여, 댐 설계기준에서 제시하는 심벽부 구성 재료의 조건을 만족하는 시험 시료에 대해, 정규화 전단탄성계수 감소곡선 111개, 감쇠비 곡선 98개를 기존 국내·외 연구 결과로부터 획득하였다. 시험 결과들의 구속응력에 따른 경향성을 고려하여, 3개의 구속응력 영역(100kPa 이하, 100kPa~200kPa, 200kPa 초과)에 대한 대표 곡선을 제안하였고, 2종의 심벽부 시료에 대해 수행한 공진주 시험 결과와 비교하여 신뢰성을 확인하였다.
- (3) 사력부는 필댐 전체 부피의 80% 이상을 차지하며 강성유지에 중요한 역할을 하지만 입자가 큰 사석 재료를 이용하여 시공되므로 시추를 통한 시료채취가 거의 불가능하다. 따라서 사력부를 구성하고 있는 자갈 등 입자가 큰 사석 재료에 대해 대형 시험장비를 이용하여 시험을 수행한 국외 연구 결과로부터 정규화 전단탄성계수 감소곡선 135개, 감쇠비 곡선 65개를 획득하였다. 시험 결과들의 구속응력에 따른 경향성을 고려하여, 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 3개의 구속응력 영역(50kPa 이하, 50kPa~100kPa, 100kPa 초과)에 대해 대표 곡선을 제안하였고, 감쇠비 곡선은 구속응력에 따라 명확히 구분되지 않으므로 사용성의 편의를 위해 구속응력에 관계없이 하나의 대표 곡선으로 제안하였다.
- (4) 현재 시공중인 B댐의 사석 재료에 대해 반복삼축압

축시험을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 사력부의 비선형 동적 변형특성에 대한 대표곡선의 신뢰성을 검증하였다. 이 과정에서 한국수자원공사 연구원에 보유하고 있는 대형 삼축시험기에 2개의 근접센서와 2개의 LDT를 추가로 장치하여 미소변형률~중간변형률 영역($10^{-2}\%$ 이하)에서의 강성을 평가하는데 있어 발생할 수 있는 오차를 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단에서 주관하는 2008년 한국시설안전공단 기술개발 사업의 수탁과제인 “기존댐의 내진성능평가 및 향상요령 보완·개정”의 연구비 지원에 의해 수행된 것이며 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 대형 삼축시험 수행에 대한 조언을 아끼지 않으신 한국수자원공사 연구원의 신동훈 박사님을 비롯한 여러 연구원님들에게도 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설통부 (2005), “댐 설계기준”, 한국수자원학회.
2. 권기철 (2000), “국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델”, *대한토목학회논문집*, 제30권, 제3-D호, pp.301-310.
3. 김동수, 추연옥 (2001), “공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성”, *한국지반공학학회논문집*, 제17권, 제5호, pp. 115-128.
4. 서민우, 신동훈, 하익수, 박한규 (2006), “대형 삼축시험을 통한 석산재와 사력재의 거동 특성 평가”, *한국지반공학학회 2006 가을 학술발표회*, 대구, pp.844-853.
5. 서원석, 이세현, 김동수 (2007), “다짐후의 흡수력 조절 시험을 이용한 노상토의 함수비에 따른 변형특성 평가 : I. 거동”, *대한토목학회 논문집*, Vol.27, No.1D, pp.89-99.
6. 한국수자원공사 (1999), “댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화 방안 연구”, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-99-3, pp.16-18.
7. 한국시설안전공단 (2004), “기존 댐의 내진성능평가 및 향상요령”.
8. Bardet, J.P. and Tobita, T. (1986), “NERA : A Computer program for nonlinear earthquake site response analysis of layered soil deposits”, University of Southern California.
9. Baldi, G., Hueckel, T., Pellegrini, R. (1988), “Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.4, pp.807-825.
10. Burland, J.B. (1989), “Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture : Small is Beautiful - The Stiffness of Soils at Small Strains”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, pp.52-65.
11. Dong, J., Nakamura, K., Tatsuoka, F. and Kohata, Y. (1994), “Deformation characteristics of gravels in triaxial compression tests and cyclic triaxial tests”, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Vol.1, pp.17-23.
12. Flora, A., Jiang, G.L., Kohata, Y. and Tatsuoka, F. (1994), “Small

- strain behavior of a gravel along some triaxial stress paths”, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Vol.1, pp.279-285.
13. Goto, S., Nishio, S. and Yoshimi, Y. (1994), “Dynamic properties of gravels sampled by ground freezing”, *Ground Failures under Seismic Conditions*, ASCE Geotechnical Special Publication 44, pp.141-157.
 14. Goto, S., Suzuki, Y., Nishio, S. and Oh-oka, H. (1992), “Mechanical properties of undisturbed tone-river gravel obtained by in-situ freezing method”, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.3, pp.15-25.
 15. 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.
 16. Hardin, B.O. and Kalinski, M.E. (2005), “Estimating the shear modulus of gravelly soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.7, pp.867-875.
 17. Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. and Endo, M. (1988), “Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed tokyo gravel”, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.57-68.
 18. Hatanaka, M., and Uchida, A. (1995), “Effects of test methods on the cyclic deformation characteristics of high quality undisturbed gravel samples”, *Static and dynamic properties of gravelly soils*, ASCE Geotechnical Special Publication 56, pp.136-161.
 19. Hwang, S.K. (1996), “Dynamic properties of natural soils”, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
 20. Kim, D.S., Seo, W.S. and Kim, M.J. (2003), “Deformational characteristics of soils with variations of capillary pressure and water content”, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.4, pp.71-79.
 21. Kokusho, T. and Tanaka, Y. (1994), “Dynamic properties of gravel layers investigated by in-situ freezing sampling”, *Ground Failures under Seismic Conditions*, ASCE Geotechnical Special Publication 44, pp.121-140.
 22. Konno, T., Hatanaka, M., Ishihara, K., Ibe, Y. and Iizuka, S. (1994), “Gravelly soil properties evaluation by large scale in-situ cyclic shear tests”, *Ground Failures under Seismic Conditions*, ASCE Geotechnical Special Publication 44, pp.177-200.
 23. Ladd, R.S. (1978), “Preparing test specimens using undercompaction”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
 24. Lin, S., Lin, P.S., Luo, H. and Juang, C.H. (2000), “Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, No.3, pp.638-651.
 25. Modoni, G., Flora, A., Mancuso, C., Anhdan, L.Q., Koseki, J., Balakrishnaiyer, K. and Tatsuoka, F. (1999), “Asimple experimental procedure for the complete characterization of small strain stiffness of gravels”, *Proceeding of 2nd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, Italy, Vol.1, pp.123-130.
 26. Pallara, O., Froio, F., Rinolfi, A. and Presti, D.L. (2006), “Assessment of strength and deformation of coarse grained soils by means of penetration tests and laboratory tests on undisturbed samples”, *Soil Stress-Strain Behavior : Measurement, Modeling and Analysis*, pp.201-213.
 27. 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.
 28. Seed, H.B., Robert, T.W., Idriss, I.H., and Tokimatsu, K. (1986), “Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1016-1032.
 29. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972), “SHAKE : A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
 30. Stokoe, K.H., Darendeli, M.B., Menq, F.Y. and Choi., W.K. (2004), “Comparison of the linear and nonlinear dynamic properties of gravels, sands, silts and clays”, *Proceeding of 11th SDEE and 3rd ICEGE*, pp.1-4.
 31. Tanaka, Y., Kudo, K., Nishi, K. and Okamoto, T. (1994), “Shear modulus and damping ratio of gravelly soils measured by several methods”, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Vol.1, pp.47-53.
 32. Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991), “Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests”, Key Note Lecture for Session No. 1, The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, pp. 101-170.
 33. 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.
 34. Yasuda, N. and Matsumoto, N. (1993), “Dynamic deformation characteristics of sands and rockfill materials”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, pp.747-757.
 35. Yasuda, N. and Matsumoto, N. (1994), “Comparisons of deformation characteristics of rockfill materials using monotonic and cyclic loading laboratory tests and in situ tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.2, pp.162-174.
 36. Yasuda, N., Ohta, N. and Nakamura, A. (1996), “Dynamic deformation characteristics of undisturbed riverbed gravels”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.2, pp.237-249.
 37. Yoshida, N. and Towhata, I. (1997), “YUSAYUSA, Theory and Practice”.

(접수일자 2009. 9. 28, 심사완료일 2009. 12. 11)