

콘크리트 댐 내진성능평가 시 감쇠비 적용 방안 고찰

오정근¹, 정영석², 권민호^{3*}

Study on the Application of Damping Ratio in the Seismic Performance Evaluation of Concrete Dams

Jeong-Keun Oh¹, Yeong-Seok Jeong², Minho Kwon^{3*}

Abstract: The purpose of this paper is to review the appropriateness of the application method for the value of the damping ratio suggested in the current design standards and evaluation guidelines when evaluating the seismic performance of concrete dams and to suggest improvements. As a result of the study, for the magnitude of the damping ratio in the dynamic elastic analysis, it is necessary to refer to the case of a similar dam in which the magnitude of the earthquake load is similar and the reproducibility of the damping ratio has been verified. Considering this, it is necessary to apply a low damping ratio and consider adding hysteresis damping in case of nonlinear behavior. In addition, since the concrete dam body located on the rock has insignificant radiation attenuation effect, it is not reasonable to increase the damping ratio of the concrete dam body to reflect the radiation damping. Therefore, in order to evaluate the realistic seismic performance of concrete dams, it is necessary to revise the damping ratio-related contents contained in the current dam design standards and evaluation guidelines.

Keywords: Concrete dam, Damping ratio, Artificial damping, Radiation damping, Rayleigh damping

1. 서론

콘크리트 댐 내진성능평가를 위한 동적해석에서 입력변수로 적용되는 감쇠비 값의 크기는 해석결과에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

‘댐 내진설계 KDS 54 17 : 2019’(이하 댐 내진설계 2019)에 따르면 동역학적 내진설계에서 감쇠비는 5%를 적용할 수 있고, 지반을 통한 지진파의 방사조건을 반영하며, 방사조건을 적절히 반영하기 어려우면 콘크리트의 감쇠비를 증가시킬 수 있다. 그러나 방사감쇠를 고려할 경우 콘크리트의 감쇠비의 증가량은 정량적으로 제시하고 있지 않기 때문에 실무적용에 주의가 필요하다.

‘기존 시설물(댐)의 내진성능평가요령(2019, 국토부)’(이하 댐 내진평가요령 2019)에서는 MCE를 적용한 동적소성해석법에 서 수치해석에 사용되는 댐체의 각종 동적계수는 동적 시험 등을 통해 구하는 것이 바람직하다고 제시하고 있다.

또한 유사한 형상과 해석조건을 가진 타댐에서의 해석사례를 참조할 수 있도록 언급하고 있다. 동적소성해석 시 콘크리트 댐의 감쇠정수를 일본 댐의 사례에 따라 댐 본체를 5~10%, 기초암반을 2~5%로 적용하고 기초 고정경계 적용 시 방사감쇠(radiation damping)를 고려하여 15%를 적용한 일본의 사례를 제시하고 있다.

댐체의 콘크리트 비선형 재료특성을 고려하여 동적소성해석을 수행함에 있어 콘크리트 감쇠비의 크기는 중요한 입력 변수이다. 콘크리트 댐의 감쇠비를 동적시험으로 구하는 것은 쉽지 않으므로 유사사례를 참조할 필요가 있으며 ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 일본 댐의 유사사례를 그대로 국내 댐에 적용하기에 앞서 적정성을 검토할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 콘크리트 댐의 내진성능평가 시 현행 설계기준과 평가요령에서 제시하는 감쇠비 값 크기에 대한 적용방안의 적정성을 검토하고 개선안을 제시하는 것이다.

2. 콘크리트 댐 감쇠비 관련 문헌 고찰

2.1 U.S. Army Corps

‘U.S. Army Corps(EM 1110-2-6053, 2007)’(이하 USACE 2007)에 따르면 항복 및 균열발생 전의 낮은 하중에 대한 콘크리트 댐의 감쇠비는 2~3%이며 시공 이음부 개방, 인장균열

¹정회원, 국토안전관리원 댐항만실 부장, 공학박사, 토목구조기술사

²정회원, 텍사스 주립대학교 알링턴 캠퍼스, 박사 후 연구원

³정회원, 경상국립대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: kwonm@gnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Engineering Research Institute(ERI), Gyeongsang National University, Jinju-si, 52828, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

및 항복 등으로 에너지 손실이 발생 시 5% 이상일 수 있고 비선형 거동 시 감쇠비는 최대 10%이다. 구조물-지반 동적상호작용 시 지반의 방사와 이력거동을 통한 에너지 손실에 의해 충분히 변형이 되면 감쇠비가 증가할 수 있으며 또한 유체와 상호작용에 의한 에너지 복사 및 유체 경계에서의 흡수로 감쇠비가 증가할 수 있다. 지반 및 유체의 상호작용효과가 중요하지 않은 경우 감쇠비는 5%로 제한할 필요가 있으며 지반 및 유체와의 상호작용 효과가 중요하지만 이를 포함한 해석을 수행하지 않은 경우 감쇠비는 5~10% 적용할 수 있다.

보통 암반(전단파속도 1,100m/s 이상)상에 건설된 구조물은 지반-구조물 상호작용 효과가 거의 없는 것으로 알려져 있으므로 구조물-지반 동적상호작용 시 지반의 방사와 이력거동을 고려한 감쇠비의 증가효과는 미미할 것이다.

콘크리트 댐체는 강성이 매우 큰 암반에 건설될 경우 입사된 지진파의 산란 및 방사효과는 적은 것으로 알려져 있으며 댐 지진해석모형의 경계부에서 발생하는 파의 반사 및 흡수는 무시하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있다(Lee, 2005).

2.2 ABAQUS 매뉴얼

‘댐 내진평가요령 2019’에 따른 동적소성해석 시 DPM (Damaged Plasticity Model) 손상소성모델에 Rayleigh 강성 비례감쇠가 지정된 경우 ABAQUS는 손상되지 않은 탄성 강성을 기반으로 감쇠 응력을 계산하며 높은 변형률에서 심각한 손상을 받는 요소에 큰 인공감쇠를 도입한다. 인공감쇠는 전체 변형 에너지 중 소산되는 에너지의 비율로 나타내어진다. 이력감쇠는 재료의 이력루프에 의한 에너지 흡수에 따라 진동이 감쇠되는 것으로서 인공감쇠와 의미가 유사하다.

2.3 FEMA

‘FEMA(Federal Guidelines for Dam Safety), 2005’(이하 FEMA 2005)에서 암반상의 콘크리트댐에 균열이 발생하지 않은 경우 일반적으로 5%의 감쇠비를 임계값으로 적용하고, 계산된 응력에서 균열이 발생할 것으로 나타나면 7~10%의 임계값으로 사용할 수 있으며 예상되는 균열의 심각도에 따라 다르게 적용하도록 제안하고 있다.

균열의 심각도에 따라 감쇠비를 다르게 적용한다는 의미는 동적탄성해석에서 감쇠비의 비선형성을 간접적으로 고려하기 위한 것으로서 동적소성해석에서 Rayleigh 강성 비례감쇠 적용으로 댐체의 손상거동에 따른 인공 감쇠비가 자동으로 도입된다면 초기 입력 감쇠비는 낮은 값으로 적용하는 것이 타당할 것이다.

2.4 K-water 연구

‘향상된 해석기법에 의한 기존댐 내진성능평가(III), 2014,

K-water연구원’에 따르면 진동 실험에서 얻어진 구조적 감쇠비는 1에서 2% 정도의 낮은 수준이고 지진파 현장 측정값에서 방사감쇠(radiation damping) 효과는 이미 포함되어 있다고 제시하고 있다. 또한 콘크리트 댐의 내진해석에서 큰 감쇠비를 적용하는 것을 합리화 할 수 있는 관측자료나 증거는 부족한 실정이므로 중력식 댐에 대해 감쇠비를 7% 미만으로 적용할 것으로 제안하고 있다.

2.5 기존 시설물(댐)의 내진성능평가요령(2019, 국토부)

‘댐 내진평가요령 2019’에서는 감쇠비에 대해 댐에서 지진 시 관측된 실 응답파를 활용하여 해석조건에 따라 결정하는 것이 바람직하며 만일 그런 기록이 없을 경우 유사한 형상과 해석조건을 가진 타댐에서의 해석사례를 참조해 감쇠정수를 설정하도록 제안하면서 일본댐의 사례를 제시하고 있다.

‘댐 내진평가요령 2019’에서는 일본댐에서 동적소성해석 시 콘크리트 댐의 감쇠정수는 댐 본체를 5~10%, 기초암반을 2~5%로 적용하고 기초 고정경계 적용 시 방사감쇠(radiation damping)를 고려하여 15%를 적용한 사례를 제시하고 있고 부록편 중력식 댐 동적소성해석 예제에서 Rayleigh 감쇠비를 15%로 적용한 해석내용을 수록하고 있다. 국내 댐에 대한 감쇠비 측정과 연구사례가 드물기 때문에 실무에서는 ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 콘크리트 댐의 내진성능평가를 수행할 경우 부록 예제의 내용대로 감쇠비 15%를 적용할 가능성이 크다.

2.6 일본 토목학회

일본의 ‘토목 학회 댐의 내진 성능에 대한 평가 검토위원회 보고서’의 1995년 효고현 남부 지진 一庫 댐 (위치 : 효고현) 실측 거동 해석에서 댐체 높이별 가속도 응답에 따른 재현성을 검토한 결과 감쇠비를 10%로 적용한 해석이 실제거동에 가장 근접한 결과로 확인되었다. 효고현 남부 지진의 실측 지진에 대한 재현성 해석에 적용한 수평가속도 값은 0.505g로서 국내 내진 I 등급에 해당하는 지진가속도 0.154g보다 3배 이상 큰 것으로 확인된다.

국내 MCE규모의 지진력 적용 시 콘크리트 댐의 균열 발생 가능성을 고려하면 5%보다 큰 감쇠비를 적용할 수 있을 것으로 판단되지만 국내 MCE규모 10,000년 빈도의 지진력이 0.30g 정도임을 고려할 경우 일본 효고현 지진 실측 가속도보다 0.62배 정도의 수준이며 실측거동 해석에 적용한 해석이 탄성해석으로 추정되므로 이력감쇠의 영향이 포함되지 않은 점을 고려하면 일본 댐의 사례에 따른 콘크리트 댐의 재료 감쇠비 10%은 국내 지진하중 크기에 대해 다소 큰 값일 수 있다.

2.7 Rayleigh 감쇠

레이리(Rayleigh)는 감쇠행렬이 식(1)과 같이 구조물의 질

량행렬과 강성행렬의 선형합(linear superposition)으로 구성될 수 있다고 가정하였다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

이 때 α 와 β 는 임의의 비례상수이며, k 번째 모드에 대한 고유진동수와 감쇠비의 관계는 식(2)와 같다.

$$\xi_k = \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{1}{\omega_k} + \beta \omega_k \right) \quad (2)$$

즉, 주요한 2개의 모드인 i 번째 모드와 j 번째의 모드에 대한 감쇠비를 ξ_i 와 ξ_j 라고 할 때, α 와 β 는 연립방정식을 사용해 구할 수 있다. 이와 같은 감쇠를 레일리 감쇠(Rayleigh damping)라고 하며, 이 때의 감쇠행렬을 레일리 감쇠행렬(Rayleigh damping matrix) 또는 비례감쇠행렬(proportional damping matrix)이라 한다.

2.8 감쇠비 문헌 고찰

콘크리트 댐체는 탄성거동 시에는 재료 감쇠비가 지배적이거나 균열이 발생하여 비선형 거동을 할 경우 구조물의 이력감쇠가 지배적인 것으로 알려져 있다. 동적해석 시 입력 지진파는 Fig. 1과 같이 상승, 강진지속시간, 하강의 특성을 가지며 상승단계에서 탄성거동을 하다가 강진지속시간에 비선형 거동을 하는 경우를 고려하여 감쇠비가 비선형적으로 증가하도록 실무에 적용하는 문제는 쉽지 않다.

ABAQUS 동적소성해석 시 손상소성모델에 Rayleigh 강성 비례감쇠를 지정할 경우 심각한 손상을 받는 요소에 큰 인공 감쇠가 도입되므로 비선형 거동에 따른 이력감쇠가 자동으로 반영된다.

직접적분법에 의한 시간이력해석 시 콘크리트 댐이 소성거동을 할 것으로 가정하여 미리 감쇠비를 크게 적용할 경우 입력 지진파 상승단계에서 탄성거동 시 응답을 과소평가할 여지가 있으므로 상승단계에서의 탄성거동을 고려하여 재료 감

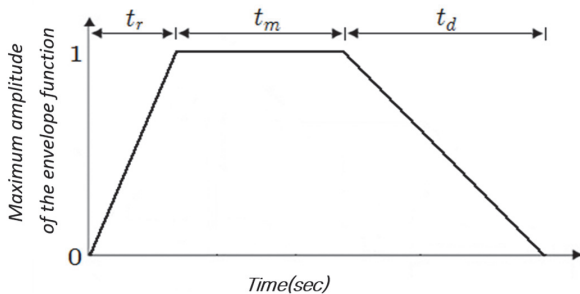


Fig. 1 Sectional linear envelope function of acceleration time history

쇠비를 낮은 값으로 적용할 필요가 있으며 강진지속시간에는 비선형 거동으로 이력감쇠가 추가되도록 감쇠비를 적용하는 것이 합리적일 것이다.

3. 콘크리트 댐 감쇠비 적용 방안

3.1 개요

‘댐 내진평가요령 2019’에 따르면 콘크리트 댐 동적해석 시 적용하는 감쇠비의 종류는 재료의 점성감쇠(viscous damping)와 구조물의 이력감쇠(hysteresis damping), 지반을 통한 방사감쇠(radiation damping) 등이 있다. 본 절에서는 콘크리트 댐체의 동적소성해석 시 재료감쇠, 이력감쇠, 방사감쇠에 대한 적용방안을 검토하였다.

3.2 재료감쇠 및 이력감쇠 적용

동적소성해석 시 ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 콘크리트의 재료 감쇠비는 Rayleigh 감쇠를 적용하고 손상소성모델을 적용할 경우 손상발생 시 ABAQUS 인공감쇠에 의한 이력감쇠가 자동으로 고려될 수 있으며 손상의 정도는 지진하중의 크기와 초기 감쇠비 크기에 비례할 것이다. 따라서 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 제시하는 일본사례의 댐 본체 재료 감쇠비 5~10%에 대해 국내 댐에 적용의 적정성을 검토할 필요가 있다.

‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 MCE를 적용한 내진성능 평가 수행 시 댐 본체의 재료 감쇠비의 적용방안을 검토하기 위해 ‘댐 내진평가요령 2019’의 부록에서 예시로 제시하고 있는 댐과 유사한 규모와 형상으로 Fig. 2와 같이 가정하였다. 지진하중 크기와 감쇠비 크기가 댐체 응답의 감소에 미치는 영향을 확인하기 위해 동적탄성해석 및 동적소성해석을 수행하였다.

3.2.1 Rayleigh 감쇠상수 산정

Rayleigh 감쇠상수 산정을 위해 Fig. 3과 같이 고유치 해석

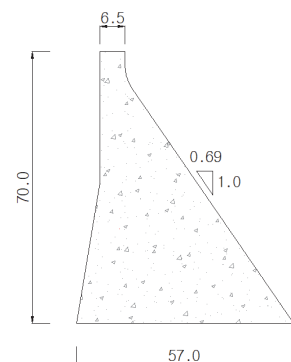


Fig. 2 Cross section of concrete dam

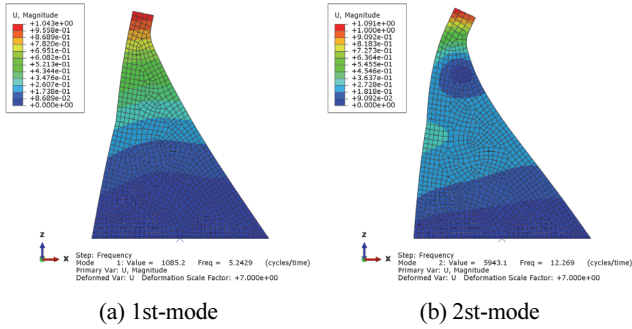


Fig. 3 Eigenvalue analysis result

을 수행하였으며, 1,2차 모드의 고유진동수는 각각 5.2429Hz, 12.269Hz로 해석되었다. 감쇠비 크기별로 산정된 Rayleigh 감쇠상수 α 와 β 는 Table 1과 같다.

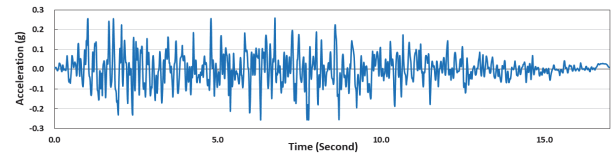
3.2.2 동적해석

암반지반 스펙트럼에 부합하고 상관계수가 0.16미만으로 통계적으로 독립된 지속시간 17sec의 인공지진파를 Fig. 4(a)(b)와 같이 X방향과 Z방향에 대해 각각 생성하였고, Fig. 4(c)와 같이 스펙트럼과의 순응성을 만족함을 확인하였다. 해석 대상 댐체의 고유치해석 결과 1,2차 모드에 대한 고유주기는 각각 0.19sec, 0.08sec인 단주기 특성을 가지며 질량참여율은 각각 58.6%, 29.7%로서 저차모드에서 누적질량참여율이 90%에 가까운 것으로 확인되므로 Fig. 4(c)에서 고유주기 0.2sec 이하 구간의 응답가속도가 해석결과에 주로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 지진파형의 동적특성에 따라 응답가속도에 차이가 발생할 수 있지만 현재 생성된 인공지진파의 응답스펙트럼이 0.2sec 이하 구간에서 표준응답스펙트럼에 유사한 형태를 보이고 있으므로 생성된 지진파는 적절한 것으로 판단된다. 지진하중 크기 증가로 댐체에 발생하는 균열에 의한 인공감쇠의 양상을 상대적인 응답 감소비율로 파악하기 위해 Fig. 4(a)(b)와 같이 X,Z방향에 대한 각각 한가지씩의 지진파에 대해서만 0.1g~0.6g로 스케일링한 지진파들을 다양하게 적용하여 동적탄성해석과 동적소성해석을 수행하였다.

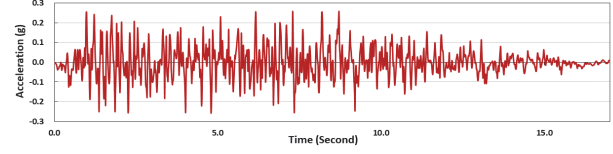
또한 감쇠비 크기가 응답에 미치는 양상을 파악하기 위해 재료 감쇠비 크기를 2.5%~15%로 각각 적용하여 동적해석을 수행하였다.

Table 1 Rayleigh damping constant by damping ratio

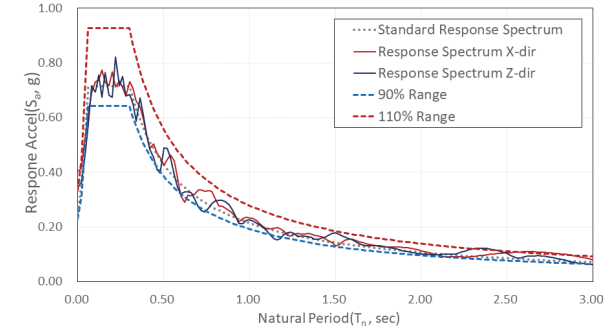
Damping ratio	α	β	Damping ratio	α	β
2.5%	1.1534	0.0005	10.0%	4.6136	0.0018
5.0%	2.3068	0.0009	12.5%	5.7670	0.0023
7.5%	3.4602	0.0014	15.0%	6.9204	0.0027



(a) X-DIR



(b) Z-DIR



(c) Review of seismic compliance

Fig. 4 Input seismic wave

댐체 콘크리트 압축강도는 18MPa로 적용하였으며, 동적 소성해석에 적용한 손상소성모델의 입력 값은 Table 2와 Table 3과 같다.

3.2.3 지진하중 크기별 응답

댐체의 재료 감쇠비를 5%로 적용하고 지진하중 크기별로 동적탄성해석과 동적소성해석을 수행한 결과 댐체 저면 수평 반력의 시간이력을 Fig. 5와 같이 비교의 용이성을 위해 0~3sec구간에 대해서만 나타내었다.

Fig. 5와 같이 모든 지진하중 조건에 대해 지진파 상승단계

Table 2 Concrete Damaged Plasticity model inputs

Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
36.31	0.1	1.16	0.667	0

Table 3 Concrete strength and behavior properties

Compression behavior			Tensile behavior	
Initial Comp.str. (N/m ²)	Comp.str. (N/m ²)	Strain at comp.str.	Tensile str. (N/m ²)	Fracture Energy (N/m)
10,350,000	20,700,000	0.001	2,418,000	216.1

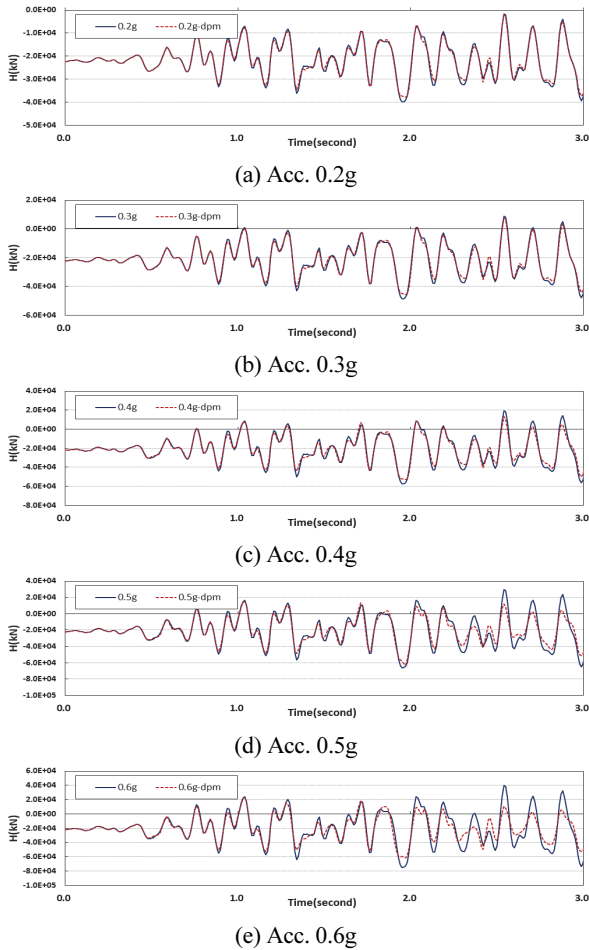


Fig. 5 Comparison of horizontal force at the bottom of the dam body by acceleration magnitude

인 0~1sec 구간에서는 동적탄성해석과 동적소성해석에서의 결과를 차이를 보이고 있지 않으며 강진지속시간 시작 단계인 1sec 이후 구간에서 지진하중이 커질수록 수평반력에 차이가 더 크게 나타났다. 즉 지진하중의 크기가 커질수록 인공감쇠의 영향이 더욱 커지는 것으로 확인된다.

Table 4에서와 같이 0.6g의 지진하중을 적용한 경우 동적탄성해석보다 동적소성해석에서 수평반력값의 크기가 18%정

Table 4 Comparison of response by acceleration magnitude

Acc. (ξ -5%)	H(kN) max		②/①
	Elastic ①	Dpm ②	
0.1g	-3.11E+04	-3.05E+04	0.98
0.2g	-3.99E+04	-3.79E+04	0.95
0.3g	-4.87E+04	-4.57E+04	0.94
0.4g	-5.75E+04	-5.31E+04	0.92
0.5g	-6.63E+04	-6.05E+04	0.91
0.6g	-7.51E+04	-6.16E+04	0.82

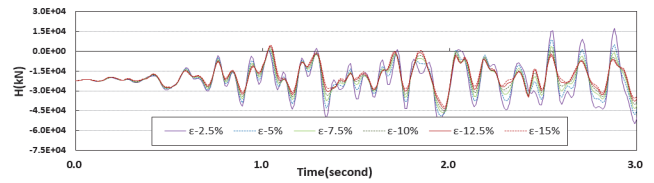


Fig. 6 Comparison of horizontal force at the bottom of the dam body by damping ratio size

도 감소되며 손상이 커짐에 따라 인공감쇠비가 더 크게 추가된 것이 원인일 것이다.

3.2.4 감쇠비 크기별 응답

댐체의 재료 감쇠비를 2.5~15%로 각각 적용하여 동적탄성해석을 수행한 결과 댐체 저면의 수평반력 시간이력을 Fig. 6과 같이 0~3sec구간에 대해서만 나타내었다.

Table 5와 같이 감쇠비의 크기가 커질수록 수평반력 값이 감소하는 것으로 확인되며 동적탄성해석 시 감쇠비 5%를 적용한 값에 대한 비율로 확인하면 동적탄성해석을 수행한 경우가 동적소성해석을 수행한 경우보다 감소비율이 더 커지는 것으로 확인된다. 또한 Fig. 7과 같이 감쇠비가 작을수록 동적탄성해석과 동적소성해석의 값에 차이가 큰 것으로 확인된다.

Table 4에서 지진파를 0.5g로 적용한 경우 수평반력 값이 인공감쇠에 의해 91%정도로 감소되는 것으로 확인되며 Table 5에서와 같이 동적탄성해석에서 감쇠비를 10%로 적용한 경우가 감쇠비 5%를 적용한 경우보다 수평반력 값이 93%정도로 감소되는 것으로 확인된다. 즉 0.5g의 지진하중에 대한 동적탄성해석에서는 해석에서 반영되지 않을 인공감쇠의 영향을 고려하여 감쇠비를 10%로 적용하는 것은 합리적일 수 있다. 그러나 동적소성해석에서 손상소성모델 적용시 인공감쇠가 자동으로 추가되는 영향을 무시하고 감쇠비를 10%로 미리 크게 적용하는 것은 합리적이지 않을 것이다.

‘2.6 일본 토목학회’결과 같이 일본에서 1995년 효고현 남부 지진 一庫 댐 (위치: 효고현) 실측 거동 해석에서 재현성을 확인 한 감쇠비 10%는 효고현 남부 지진의 실측 지진 수평가

Table 5 Comparison of horizontal force at the bottom of the dam body by damping ratio size

Damping ratio	Elastic ①		Dpm ②		②/①
	H(kN)	Ratio	H(kN)	Ratio	
ξ -2.5%	-5.47E+04	1.12	-4.74E+04	0.97	0.87
ξ -5%	-4.87E+04	1.00	-4.57E+04	0.94	0.94
ξ -7.5%	-4.67E+04	0.96	-4.53E+04	0.93	0.97
ξ -10%	-4.52E+04	0.93	-4.42E+04	0.91	0.98
ξ -12.5%	-4.35E+04	0.89	-4.27E+04	0.88	0.98
ξ -15%	-4.19E+04	0.86	-4.11E+04	0.84	0.98

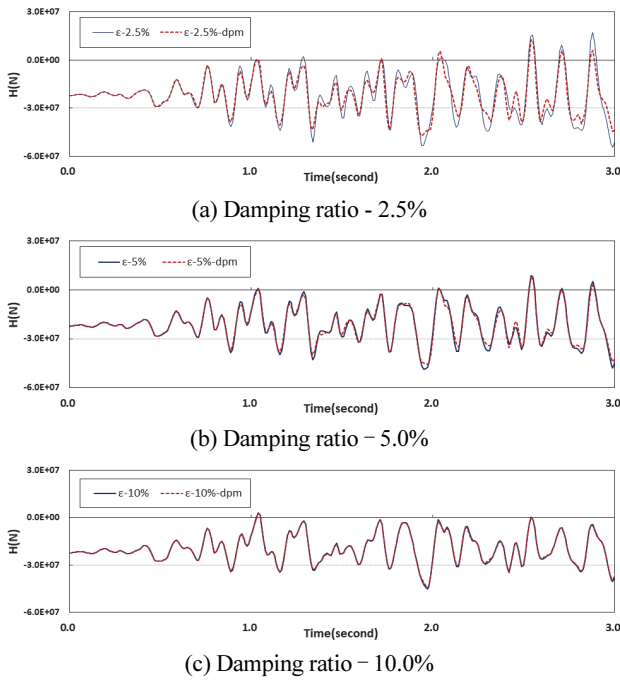


Fig. 7 Comparison of the horizontal force at the bottom of the dam body when the Damaged Plasticity Model is applied

속도 0.505g에 해당하는 값이며 실제 지진시 균열발생에 따른 이력감쇠가 반영된 값으로 판단된다. 따라서 국내 MCE 지진 하중의 크기에 대한 고려 없이 국내보다 지진하중이 큰 일본의 사례에 따라 감쇠비를 10%로 그대로 적용하여 동적해석을 수행하는 것은 바람직하지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 8 및 Table 6과 같이 동적탄성해석 시 댐체 저면의 응력 값으로 비교할 경우 감쇠비의 크기에 따라 최대응력값의 차이비율이 수평반력 값의 비율보다 더 크게 나타나는 것으로 확인된다. 이는 전체응력의 합력값으로 표현되는 수평반력보다 응력이 집중되어 변형이 크게 발생하는 위치에서 감쇠에 대한 영향이 더 크다는 의미로 해석될 수 있다.

3.3 방사감쇠 적용

방사감쇠(radiation damping)는 지반영역의 무한성으로 인하여 발생하는 감쇠로 파동에너지를 감쇠하는 현상에 기인한

Table 6 Comparison of stress at the bottom of the dam body by damping ratio size

Damping ratio	Elastic		Damping ratio	Elastic	
	Stress (MPa)	Ratio		Stress (MPa)	Ratio
ξ-2.5%	5.296	1.16	ξ-10%	4.086	0.89
ξ-5%	4.578	1.00	ξ-12.5%	3.847	0.84
ξ-7.5%	4.434	0.97	ξ-15%	3.707	0.81

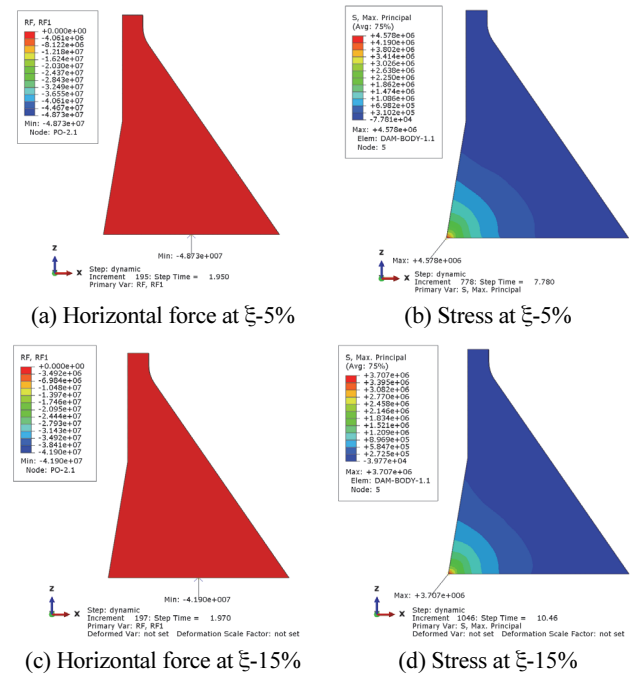


Fig. 8 Comparison of response at the bottom of the dam body by damping ratio size

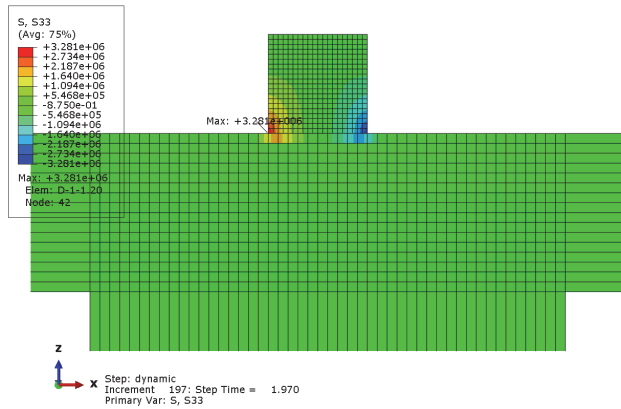
다. 보통 암반(전단파속도 1,100m/s 이상)상에 건설된 구조물은 지반-구조물 상호작용 효과가 거의 없는 것으로 알려져 있으므로 구조물-지반 동적상호작용 시 지반의 방사와 이력거동을 고려한 감쇠비의 증가효과는 미미한 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 ‘댐 내진설계 2019’에서는 지반을 통한 지진파의 방사조건을 고려하여 콘크리트의 감쇠비를 적절히 증가하도록 제시하고 있으므로 실무 적용에 모호할 수 있다.

‘댐 내진평가요령 2019’에서는 일본댐에서 동적소성해석 시 콘크리트 댐의 감쇠정수는 댐 본체를 5~10%, 기초암반을 2~5%로 적용하고 기초 고정경계 적용 시 방사감쇠를 고려하여 15%를 적용한 사례를 제시하고 있다. 부록에 예제로 수록된 중력식 댐의 동적소성해석에서도 15%를 적용하였으며 이는 ‘댐 내진설계 2019’에 따라 지반의 방사조건을 고려하여 콘크리트의 감쇠비를 적절히 증가하도록 제시한 내용에 부합된다.

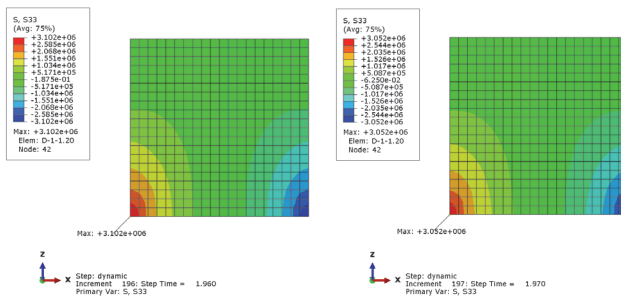
본 절에서는 지반의 방사감쇠가 댐체의 응답에 미치는 영향을 확인하기 위해 지반-구조물 상호작용 모델링으로 동적해석을 수행하였다.

3.3.1 지반-구조물 상호작용 모델링

지진시 지반의 방사효과를 검토하기 위해 댐체 폭×높이(50×50m)를 가정하고 댐체 저면 기초암반 지반의 근역지반은 깊이 80.0m, 폭 240.0m로 모델링하였다. 원역지반은 방사효과를 고려하기 위해 무한요소를 적용하여 동적해석을 수행하였다. 또한 댐체 저면을 고정단을 적용한 조건과 지반스프링으로



(a) Rock-Dam Body Interaction



(b) Dam Body bottom Rigidity (c) Dam Body bottom Spring

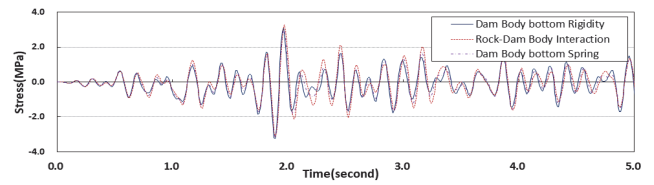
Fig. 9 Comparison of response for each boundary condition at the bottom of a dam body

적용한 조건으로 동적해석을 추가로 수행하였다. 지반의 비선형성을 고려하기 위한 지반의 등가선형 전단탄성계수와 감쇠비를 산정하기 위해 기초암반의 전단파 속도를 2,800m/s를 적용하여 Proshake 1차원 부지응답해석을 수행하고 Proshake 부지응답해결과를 통해 지반 깊이별 감쇠비를 산정하였다. Proshake 해석결과로 산정된 지반 깊이별 재료의 damping data를 ABAQUS 근역지반 모델링에 입력하고 Proshake 부지응답 해석에서 outcrop motion에 의한 deconvolution 수행으로 산정된 기초암반 하단가속도(g)를 지반 모델링 하단에 가속도로 입력 후 ABAQUS Dynamic Implicit Analysis 수행하였다.

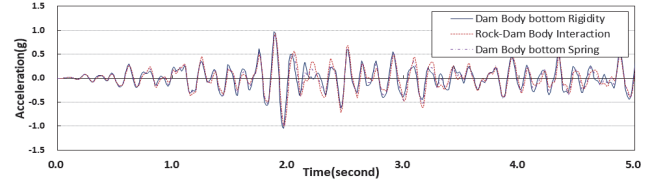
3.3.2 해석결과

해석결과는 Fig. 9 및 Table 7과 같다. 댐체 저면을 고정단을 적용한 조건에 비해 방사감쇠 영향을 고려한 조건이 댐체 상단부의 최대 가속도가 95%정도로 감소하고 있으나 댐체 저면의 최대 응력은 크게 감소하고 있지 않다. 지반스프링을 적용한 조건이 고정단을 적용한 조건보다 최대응력값과 최대가속도값이 작게 발생하고 있으며 방사감쇠를 고려한 조건과 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 10과 같이 댐체 저면 경계조건 별로 응력이력과 가속도 이력에 약간의 차이를 보이고 있지만 크게 감소하는 경향



(a) Stress of Dam body bottom



(b) Acceleration of Dam body top

Fig. 10 Comparison of response for each boundary condition at the bottom of a dam body

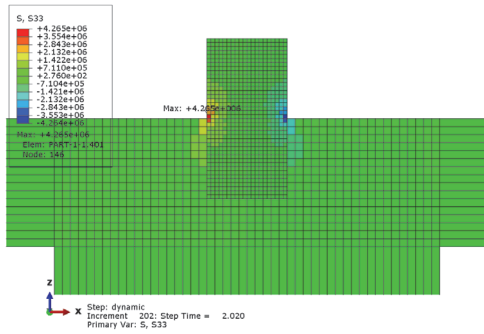
은 보이고 있지 않다. 방사감쇠 효과를 고려한 지반-구조물 상호작용 모델링 해석에서 댐체의 응답이 약간 감소한 것은 방사감쇠의 효과이기 보다는 지반의 유연성에 기인한 것으로 판단되며 암반상에 위치한 댐체에 방사효과를 고려하여 댐체의 재료 감쇠비를 증가시키는 것은 합리적이지 않을 것이다.

3.3.3 지중 구조물

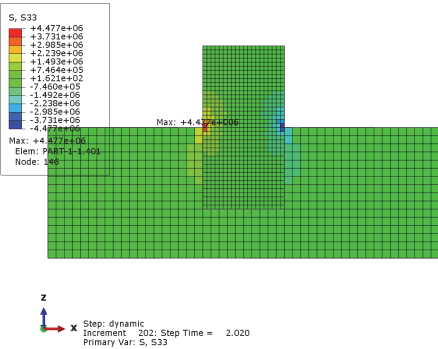
댐체 저면이 암반상에 위치한 경우 방사감쇠에 의한 응답의 감소는 미미한 것으로 확인되었다. 댐체 저면을 고정단으로 모델링하고 댐체 저면에 입력하는 지진파는 암반지반의 가속도이력으로서 방사감쇠 효과가 이미 포함되어 있는 것으로 볼 수 있기 때문에 방사감쇠의 효과는 무시하는 것이 바람직할 것이다. 그러나 구조물이 지중에 묻혀 있는 경우에는 방사감쇠의 효과가 다른 양상을 보일 수 있을 것으로 판단되며 그 영향을 검토하기 위해 폭×높이(50×100m)구조물의 절반이 지중에 묻혀 있는 것으로 가정하여 동적해석을 수행하였다.

Table 7 Comparison of response for each boundary condition at the bottom of a dam body

Division		Dam Body bottom Rigidity	Rock-Dam Body Interaction	Dam Body bottom Spring
Stress (MPa)	Max	3.10	3.28	3.04
	Ratio	1.00	1.06	0.98
	Min	-3.22	-3.15	-3.16
	Ratio	1.00	0.98	0.98
Acc. of top (g)	Max	0.98	0.93	0.92
	Ratio	1.00	0.96	0.95
	Min	-1.05	-1.00	-1.02
	Ratio	1.00	0.95	0.98



(a) Rock-Dam Body Interaction



(b) Dam Body bottom and side Spring

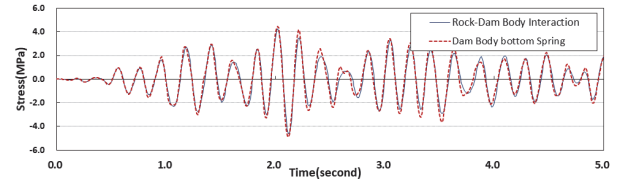
Fig. 11 Comparison of response for each boundary condition at the bottom of a dam body

지반의 경계조건은 두가지로 구분하였다. 첫 번째, 지반의 비선형성을 고려하기 위한 지반의 등가선형 전단탄성계수와 지반의 재료 감쇠비를 적용하여 지반을 모델링하고 방사감쇠 효과를 고려하여 지반모델링 원역지반에 무한요소를 적용하였다. 두 번째, 지중구조물 주변 지반을 탄성 지반스프링으로 고려하기 위해 탄성지반으로 모델링하고 지반 양측과 저면을 고정경계로 적용하였다.

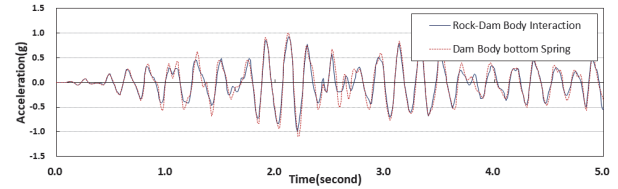
해석결과는 Fig. 11, Fig. 12 및 Table 8과 같다. 최대응력은

Table 8 Comparison of response for each boundary condition at the bottom of a dam body

Division		Dam Body bottom and side Spring	Rock-Dam Body Interaction
Stress (MPa)	Max	4.48	4.26
	Ratio	1.00	0.95
	Min	-4.89	-4.60
	Ratio	1.00	0.94
Acc. of top (g)	Max	1.00	0.93
	Ratio	1.00	0.92
	Min	-1.10	-1.00
	Ratio	1.00	0.91



(a) Stress of Dam body side center



(b) Acceleration of Dam body top

Fig. 12 Comparison of response for each boundary condition at the bottom of a dam body

방사감쇠 조건을 고려한 경우가 지반스프링 조건보다 95% 정도로 감소하고 구조물 상단 최대가속도는 92% 정도로 감소하는 경향을 보이고 있다. 댐체 저면이 암반상에 위치한 조건보다 응답이 더 감소하는 경향을 보이고 있으며 지반의 재료감쇠와 방사감쇠가 영향을 미친 것으로 판단된다.

따라서 지중에 묻혀 있는 경우에는 지반의 재료감쇠와 방사감쇠의 영향으로 지반스프링으로 해석한 경우보다 실제로 응답이 더 감소할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 콘크리트 댐은 일반적으로 암반상에 위치하고 댐체 하단 일부에 성토압과 퇴사압이 작용할 수 있으나 방사감쇠 영향을 고려할 만큼 깊지는 않을 경우 방사감쇠의 영향은 고려하지 않는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

기계 진동기초의 경우 진동의 근원이 기초이며 지표면에 발생한 진동이 지반영역의 무한성으로 파동에너지가 감소하는 방사감쇠의 영향이 크므로 그 영향을 고려하지 않을 경우 과도한 해석결과가 도출될 수 있으므로 기초지반을 모델링하지 않은 경우라도 지반 재료감쇠와 방사감쇠의 영향을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그러나 방사감쇠 효과가 이미 반영된 기반암상의 인공 지진파를 적용하는 동적해석에서 방사감쇠를 추가로 고려하는 것은 비현실적일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 댐의 내진성능평가 시 현행 설계 기준과 평가요령에서 제시하는 감쇠비 값 크기에 대한 적용 방안의 적정성을 검토하기 위해 콘크리트 댐에 대해 다양한 지진하중 조건과 다양한 감쇠비 조건으로 동적탄성해석과 동적소성해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 콘크리트 댐 감쇠비 관련 국내외 문헌자료들의 검토 결과 댐체가 비선형 거동시 예상되는 균열의 심각도에 따라 감쇠비를 다르게 적용할 수 있으며 5%보다 높은 감쇠비로 7~10%의 임계값의 적용이 타당한 것으로 제시되어 있다. 이는 감쇠비의 비선형성과 이력감쇠의 추가적인 영향을 고려할 수 없는 동적탄성해석에 국한된 사항으로 볼 수 있다.
2. 댐체의 동적소성해석 시 손상소성모델에 Rayleigh 감쇠를 적용할 경우 균열손상 발생 시 요소에 인공감쇠가 도입되어 동적탄성해석보다 응답이 작게 발생하는 것으로 해석되었다. 지진하중의 크기가 클수록 균열이 더 크게 발생하여 인공감쇠의 영향이 더욱 커지는 양상을 보이고 있다. 동적해석 시 입력 지진파는 상승, 강진지속시간, 하강의 특성을 가지며 상승단계에서 탄성거동을 하다가 강진지속시간에 비선형 거동으로 인공감쇠가 자동으로 추가되므로 초기 입력 감쇠비는 낮은 값을 적용하는 것이 합리적이며 감쇠비의 크기를 미리 크게 적용하는 것은 비현실적인 것으로 판단된다.
3. 댐체의 비선형 거동에 가장 큰 영향을 미치는 입력변수는 지진하중의 크기이므로 ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 유사한 형상과 해석조건을 가진 타댐에서의 해석사례를 참조하여 감쇠비의 크기를 적용할 경우 적용된 지진하중의 크기의 유사성을 우선적으로 확인할 필요가 있으며 이력감쇠를 포함한 동적소성해석인지 또는 동적탄성해석인지 여부를 확인할 필요가 있다.
4. 구조물이 지중에 깊히 묻혀 있는 경우와는 다르게 콘크리트 댐체가 암반상에 위치하는 경우 방사감쇠에 의한 영향은 미미한 것으로 확인이 되며 그 영향을 무시하는 것이 합리적일 것이다. 따라서 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 댐체 기초 고정경계 적용 시 방사감쇠를 고려하여 15%를 적용한 일본의 사례로 제시한 내용은 일반적인 조건이 아닌 사항이므로 유사사례로 참조하여 적용하는 것은 비합리적일 수 있으며 댐체의 응답을 과소평가하는 결과가 도출될 여지가 있다.
5. 결론적으로 동적탄성해석 시 감쇠비의 크기는 지진하중의 크기가 유사하고 감쇠비에 대한 재현성이 검증된 유사댐의 사례를 참조할 필요가 있으며, 동적소성해석 시에는 지진하중의 크기와 상관없이 초기 탄성거동을 고려하여 감쇠비를 낮은 값으로 적용하고 비선형 거동시 이력감쇠가 추가되도록 고려할 필요가 있다. 또한 암반상에 위치한 콘크리트 댐체는 방사감쇠 효과가 미미하므로 방사감

쇠를 반영하기 위해 콘크리트 댐체의 감쇠비를 증가시키는 것은 합리적이지 않다.

6. 따라서 콘크리트 댐의 현실적인 내진성능평가를 위해 현행 ‘댐 내진설계 2019’와 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 감쇠비를 일관되게 5%로 통일하고, ‘댐 내진설계 2019’에서 방사조건을 적절히 반영하기 어려우면 콘크리트의 감쇠비를 증가시킬 수 있다는 내용은 삭제하는 것으로 개정이 필요할 것으로 판단된다. 또한 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 동적소성해석 시 15%의 감쇠비를 적용한 부록 예제에 대해서도 5%로 수정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C1003007).

References

1. Ministry of Land, (2019), Infrastructure and Transport, Dam seismic design KDS 54 17: 2019 (in Korean).
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation. (2019), Seismic performance evaluation and improvement tips for existing facilities (Dam) (in Korean).
3. U.S. Army Corps. (2007), EM 1110-2-6053.
4. Lee, J. H. (2005), Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Considering Inelastic Damage of Dam-foundation Boundary, *Journal of the Korean Society of Safety*, 20(3), 174-179 (in Korean).
5. ABAQUS, Dassault System Simulia Corp. (2011), Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10.
6. FEMA. (2005), Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams.
7. Korea Water Resources Corporation. (2014), A Study on the Advanced Seismic Evaluation of Existing Dams(III), Report no. 2015-WR-RR-7-16. (in Korean).
8. Report of the evaluation review committee on the seismic performance of the civil society dam, Japan.
9. Kim, D. K. (2013), Structural dynamics, Gumi Library. (in Korean).
10. ProShake, EduPro Civil Systems Inc. (2019), ProShake Ground Response Analysis Program Version 2.0 User's Manual.

Received : 09/20/2022

Revised : 01/09/2023

Accepted : 01/19/2023

요 지 : 이 논문의 목적은 콘크리트 댐의 내진성능평가 시 현행 설계기준과 평가요령에서 제시하는 감쇠비 값 크기에 대한 적용방안의 적정성을 검토하고 개선안을 제시하는 것이다. 연구결과 동적탄성해석 시 감쇠비의 크기는 지진하중의 크기가 유사하고 감쇠비에 대한 재현성이 검증된 유사댐의 사례를 참조할 필요가 있으며, 동적소성해석 시에는 지진하중의 크기와 상관없이 초기 탄성거동을 고려하여 감쇠비를 낮은값으로 적용하고 비선형 거동 시 이력감쇠가 추가되도록 고려할 필요가 있다. 또한 암반상에 위치한 콘크리트 댐체는 방사감쇠 효과가 미미하므로 방사감쇠를 반영하기 위해 콘크리트 댐체의 감쇠비를 증가시키는 것은 합리적이지 않다. 따라서 콘크리트 댐의 현실적인 내진성능평가를 위해 현행 댐 설계기준과 평가요령에 수록된 감쇠비 관련내용에 대해 개정이 필요하다.

핵심용어 : 콘크리트 댐, 감쇠비, 인공감쇠, 방사감쇠, 레일리 감쇠
