

가능최대지진(MCE)을 적용한 중력식 콘크리트 댐 내진성능평가 방안 개선

오정근¹, 정영석², 권민호^{3*}

Improvement of Seismic Performance Evaluation Method of Gravity Type Concrete Dam Applying Maximum Credible Earthquake (MCE)

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

Abstract: The purpose of this paper is to review the applicability of the current standards for the evaluation method of input variables and performance level in seismic performance evaluation by dynamic plastic analysis of the concrete gravity-type dam to which MCE is applied, and to suggest improvements. To this end, a domestic concrete gravity-type dam was selected as a target facility, dynamic plasticity analysis was performed under various conditions, and applicability to input variables such as concrete tensile strength and breaking energy, was reviewed. By analyzing the effect of cracks at the bottom of the gravity dam on the stability of the activity, an improvement plan for the performance level evaluation method required to secure the water storage function was derived. If the proposed improvement plan is applied, it will have the effect of deriving more reasonable evaluation results than the current seismic performance evaluation method to which MCE is applied.

Keywords: Gravity type concrete dam, Dynamic plastic analysis, Maximum credible earthquake (MCE), Fracture energy, Activity stability

1. 서 론

콘크리트 중력식 댐이란 저수된 물의 압력과 지진력 등의 외력에 대해 콘크리트 자체의 무게로 견디는 형식으로서 외력에 대한 전도, 활동 등의 안정성 확보가 중요한 시설이다.

콘크리트 중력식 댐의 내진성능평가는 유사정적해석, 동적해석에 의한 방법이 주로 수행되어 왔으며 ‘댐 내진설계 댐 내진설계 54 17 : 2019’(이하 댐 내진설계 2019)에서는 관리주체가 요구 시 재현주기 4,800년 이상의 설계지반운동을 적용하여 동적소성해석이 가능하다고 제시하고 있다. ‘기존 시설물(댐)의 내진성능평가요령(2019, 국토부)’(이하 댐 내진평가요령 2019)에서는 재현주기 4,800년 이상의 지진을 가능최대지진력(MCE : Maximum Credible Earthquake)로 규정하고 있으며 콘크리트 중력식 댐에 대해 파괴이론에 근거한 동적소성해석법과 성능수준 평가방법을 제시하고 있다.

동적소성해석법은 비선형 시간이력해석이며 재료모델, 지반조건 등의 입력변수에 민감하므로 입력변수의 선정에 신중

한 접근이 필요하다. 또한 중력식 댐은 외적평형이 중요한 구조물이므로 동적소성해석 결과를 활용하여 성능수준 확보여부를 평가하는 데에 있어 손상의 범위가 중력식 댐의 외적 안정성 확보 측면에서 미치는 영향으로 평가할 필요가 있다. 현행 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 동적소성해석법을 위한 입력변수들은 외국사례, 예시, 가정으로 제시되어 있고 저수기능 확보를 위한 성능수준에 대한 평가에서 외적 안정성 측면이 아닌 발생 균열의 범위로 평가하도록 제시하고 있다.

본 연구의 목적은 MCE를 적용한 콘크리트 중력식 댐의 동적소성해석에 의한 내진성능평가 수행 시 입력변수, 성능수준 평가 방법에 대한 현행 기준의 적용성을 검토하고 개선안을 제시하는 것이다.

2. 현행 MCE 적용 내진성능평가 방안 고찰

2.1 MCE(가능최대지진)

미국, 일본 등에서는 댐의 내진성능평가에 MCE를 사용하고 있다. 국제대담회(ICOLD)에서는 주변의 알려진 활성단층으로부터 댐에 도달할 수 있는 최대지진력 또는 주변에 알려진 활성단층이 없는 경우엔 10,000년 빈도 지진력을 MCE로 사용하도록 하고 있다(댐 내진평가요령 2019).

‘댐 내진설계 2019’에서 MCE는 4,800년 빈도로 규정하고 있지만 ‘댐 내진평가요령 2019’에서는 관리주체의 필요에 따

¹정회원, 국토안전관리원 댐항만실 차장, 공학박사, 토목구조기술사

²정회원, 경상국립대학교 토목공학과 학술연구교수, 공학박사

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 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

라 10,000년 빈도를 선택 가능하도록 제시하고 있으며 부록에서 10,000년 빈도를 적용한 평가사례를 제시하고 있다. 또한 최근 수행된 ‘화천댐 등 21개소 내진성능평가, 2021’에서 10,000년 빈도의 지진력을 MCE로 적용하여 동적소성해석을 수행함에 따라 본 연구에서도 10,000년 빈도를 적용하였다.

2.2 파괴에너지 및 인장강도

‘댐 내진평가요령 2019’에서는 중력식 댐의 동적소성해석 수행을 위한 소성재료모델로 DPM(Damaged Plasticity Model)을 제시하고 있으며 인장거동 특성으로 인장강도와 파괴에너지를 입력할 필요가 있다. 파괴에너지 G_F 는 단위면적 안에 단위길이의 균열을 발생시키는데 필요한 에너지로 정의된다.

‘댐 내진평가요령 2019’에서 제시된 파괴에너지 산정식 $G_F = (0.79d_{max} + 80) \times (f_c/10)^{0.7}$ 은 Fig. 1과 같이 일본의 ‘국가 종합 연구소 자료 제 244 호 참고 자료 1-9’(이하 일본 국가 종합 연구 제244호 자료)에서 인용된 것으로 확인된다. 댐체 콘크리트에 근접한 강도크기 18MPa에 대한 데이터 수는 3개로서 데이터 개수가 충분하지 않은 회귀분석식이며 ‘CEB-FIP’ 기준에서의 파괴에너지 값 범위 65~130N/m 보다 파괴에너지가 비교적 크게 산정되는 것으로 확인된다.

동적소성해석에서 파괴에너지의 크기에 따라 해석 결과에 영향을 미친다. 파괴에너지 크기는 골재의 치수가 지배적이며 현장 콘크리트의 배합, 다짐 상태 또한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 ‘댐 내진설계 2019’에 따라 동적해석을 위한 동적 물성은 실내시험을 통해 구하는 것이 가장 바람직 할 것으로 판단된다. 그러나 여건상 실내시험 자료획득이 어려우므로 기존문헌자료를 활용할 필요가 있으며 Fig. 1의 자료를 활용함에 있어 안전측 해석결과가 도출될 수 있도록 최대 골재치수 크기를 작은 값으로 선정할 필요가 있다.

‘수력양수댐 특별 내진성능검증 용역, 2019.12(한국수력원자력)’에서는 비월류부에 대한 동적소성해석 시 굵은 골재 최

대 치수에 대한 수집 자료정보가 없기 때문에 댐 콘크리트에서 일반적으로 사용되는 80mm~150mm 중 재료 비선형 해석에 있어서 안전하게 평가가 되도록 (파괴 에너지가 작아 지도록) 80mm로 가정한 것으로 확인된다.

‘FEMA 2005’에서는 콘크리트댐의 인장 및 결합강도는 골재의 혼합비율만큼이나 혼합의 일관성, 배치방법 및 다짐절차와 관련이 있고, 최대 골재크기, 일관성 및 모르타르 상태가 수평타설이음부의 강도에 영향을 미치고 있으며 실제 수평타설이음부에 대한 동적강도 시험을 적용하는 것이 가장 좋은 방법으로 제시하고 있다.

‘U.S. Army Corps(EM 1110-2-6053, 2007)’(이하 USACE 2007)에서 오래된 댐의 시공이음 불량 부는 실제 인장강도보다 현저히 낮을 수 있으며 내진 안전성 평가에 고려가 필요하고 시공이음부에서 실제 감소된 강도를 재료 시험에 의해 결정하는 것이 중요하다고 명시하고 있다. 또한 일부 기존 댐의 테스트 결과에 따르면 열화되거나 부실한 시공 조인트의 인장강도가 모 콘크리트의 인장 강도보다 50% 이상 낮을 수 있다고 명시하고 있다.

‘댐 설계기준·해설, 2011’(이하 댐 설계기준 2011)에 따르면 댐 체에 적용되는 수평 시공이음은 0.5~2.0m 높이별로 타설되며 하상 암착부는 0.3~0.75m정도를 표준으로 하고 있으므로 댐 전체높이에 대해 비교적 촘촘한 간격으로 시공이음이 설치되어 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 안전측 검토를 위해 댐 전체의 인장강도는 수평 시공이음부에서의 인장강도 저하를 고려하는 것이 바람직할 수 있다.

종래에 적용해 오던 허용응력설계법에서는 발생인장응력이 콘크리트의 허용인장응력을 넘지 않도록 제한하고 있으며 콘크리트의 허용인장응력에 대해 재료, 시공의 불확실성을 담보하기 위해 인장강도의 20% 정도의 수준으로 적용하고 있다. 반면 현행 댐 설계기준에서 동적해석 시 발생인장응력이 콘크리트의 인장강도를 넘지 않도록 제한하고 있으며 콘크리트의 인장강도는 쪼갠인장강도식을 적용하고 있으나 ‘USACE 2007’와 ‘FEMA 2005’에서 언급한 내용과 같이 수평타설부의 강도저하에 대한 영향을 정량적으로 고려하는 방안에 대한 언급은 없다. 또한 콘크리트 인장강도 추정식에서 적용하는 콘크리트의 압축강도가 현장시험강도인지, 설계기준강도인지 명확히 제시된 기준은 없는 것으로 확인된다. 현장 압축강도 시험은 대부분 육상 건전부에서 수행되며 물에 잠겨있는 댐체 하단에 대한 현장강도시험 수행되기 어렵다.

동적소성해석 시 콘크리트 인장강도는 파괴에너지(G_F) 값의 결정에 주요입력 변수로서 해석결과에 영향을 미치므로 신중한 접근이 필요하다. 따라서 동적해석 시 안전측 검토를 위해 댐 전체의 인장강도는 수평 시공이음부에서의 인장강도 저하를 고려하는 것이 바람직하며 공용기간이 오래된 댐체는

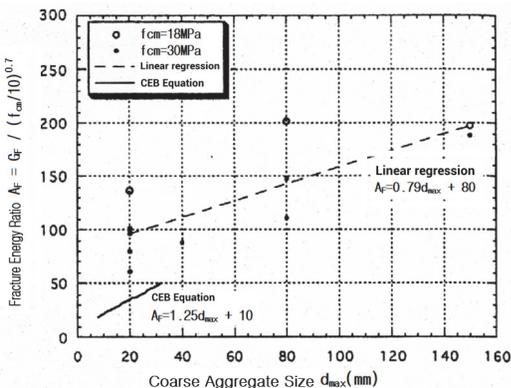


Fig. 1 Coarse aggregate maximum dimension-fracture energy relationship(Data from Japan National Comprehensive Research No. 244)

수평 이음부에 열화의 정도가 클 수 있으므로 파괴에너지 산정식에 적용되는 콘크리트 인장강도 식 $(f_c/10)^{0.7}$ 에서 f_c 값에 대한 적절한 저감을 위해 비건전부에 대한 강도값으로 산정하여 적용하거나 설계기준강도값을 그대로 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2.3 성능수준 평가

‘댐 내진평가요령 2019’에서는 MCE에 대한 평가 시 댐체 저면을 강결조건으로 가정하여 댐체 저면을 상하류 방향으로 관통하는 균열의 발생여부로 성능수준을 확인하고 있으며 균열이 관통하지 않을 경우 저수기능에 대한 성능수준을 확보하는 것으로 평가하고 있다.

‘내진성능검증 용역 2019’에서 ‘대규모지진에 대한 댐 내진 성능평가(안)·동해설(평성 17년 3월), 국토교통성’에 따르면 손상과정을 고려한 비선형동적해석에서 상하류면 사이에 연속하는 인장균열의 발생에 따라 체체의 분단이 생기지 않고, 댐 본체의 압축파괴나(체체와 기반지반과의 경계에 있어서)전단 파괴와 같은 응력이 발생하지 않거나, 또는 발생해도 국소적으로 멈추는지 여부로 성능수준을 검토하고 있다. 그러나 ‘댐 내진평가요령 2019’에서와는 다르게 상하류 방향으로 관통하는 균열부의 위치를 댐체 저면으로만 한정하고 있지는 않다.

‘USACE 2007’에 따르면 지진시 중력식 댐체의 균열이 발생 가능한 위치는 Fig. 2와 같이 댐체 저면 바로 윗 부분과 변단면 구간이다.

‘USACE 2007’에서는 댐체와 암반 접촉면의 인장강도가 콘크리트의 인장강도보다 낮다는 것을 감안하여 중력댐의 선형 탄성해석 시 댐체 저면에 발생하는 응력이 인장강도를 초과하는 경우 댐체 상류측 저면에서 하류측으로 균열이 전달될 것으로 예상한다. 댐체 저면의 인장균열은 활동을 유발하지만 동시에 댐체 저면의 인장응력을 감소시키며 이러한 비선형거동을 고려하기 위해 댐체와 암반의 경계조건을 잼-마찰 요소로 모델링한 후 댐체의 영구변위에 대한 해석을 수행하도록 제시하고 있다.

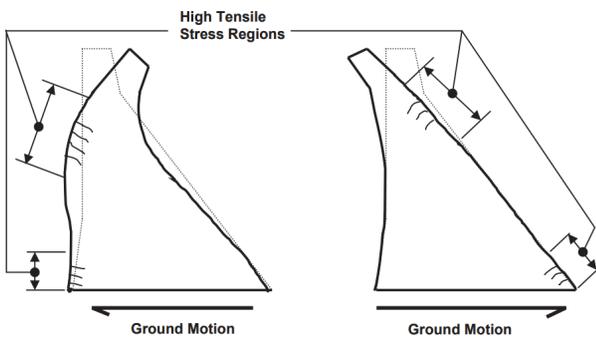


Fig. 2 Concrete gravity dam crack possible locations(USACE, 2007)

댐체 저면을 강결조건으로 동적소성해석을 수행할 경우 댐체 저면에 발생하는 균열은 콘크리트의 인장거동 특성에 따라 손상범위가 결정될 수 있다. 그러나 실제로 댐체 저면 콘크리트와 암반 경계에서는 서로 부착에 의해 결합되어 있으므로 콘크리트와 암반간의 부착강도가 콘크리트의 인장강도보다 작을 경우 댐체 저면의 균열범위가 증가할 수 있다.

콘크리트와 암반간의 부착강도에 대한 정량적인 식이 기준으로 제시되어 있지 않다. 해외의 관련연구(Mechanical properties of rock-concrete interface)에서 콘크리트와 암반 경계에서의 파괴에너지는 콘크리트 파괴에너지의 약 1/5정도인 것으로 밝혀졌다. 국내에서 댐체 콘크리트와 암반간의 부착강도와 관련된 연구사례가 드물며 교량의 앵커리지 정착과 관련한 연구에서 콘크리트와 암반간의 부착강도는 부착면 거칠기에 따라 0.5~0.9MPa 정도의 범위로 나타나고 있는 것으로 확인되었다.(Kim, 2017) 신·구콘크리트 사이의 부착강도에 관한 국내의 실험 연구에서 신·구콘크리트간의 부착강도는 콘크리트 인장강도의 15~27% 정도인 것으로 나타나고 있다(Yang et al., 2009).

Fig. 3의 개념과 같이 단위길이의 균열을 발생시키는데 필요한 에너지로 정의되는 파괴에너지지의 크기가 골재 최대 치수와 콘크리트 인장강도에 의해 결정된다면 댐체 저면과 암반사이에는 골재가 공유되지 않으므로 댐체와 저면사이의 파괴에너지는 콘크리트만의 파괴에너지보다 작아지는 것이 타당하다.

콘크리트 댐 시공초기에는 댐체와 암반이 강결조건일 수 있으나 압력을 받고 있는 물은 댐의 하부에 침투하여 댐체(body)와 기초를 분리시키려는 양압력을 발생시키고 있으며 공용기간을 고려하면 콘크리트와 암반간의 부착력이 저하될 가능성이 있다.

‘USACE 2007’에 따르면 중력식 댐은 지진시 전도모멘트가 각 사이클에서 단 몇 분의 1초 동안만 발생하며 중간에 언로드가 되므로 전도에 대한 불안정성을 초래할 가능성은 낮

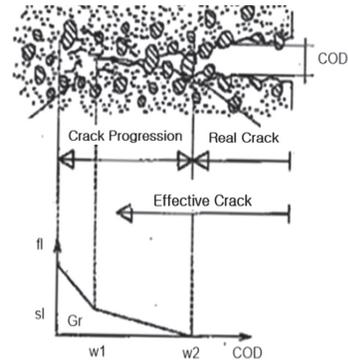


Fig. 3 Relationship between tensile stress and cracking(Guidelines for Dam Seismic performance evaluation 2019)

으나 댐체가 기울어지고 흔들리는 과정에서 높은 베어링 압력과 활동이 발생할 수 있다.

외력에 의해 댐체와 암반 사이에 부착력이 상실되어 관통하는 균열이 발생된 조건에서도 중력식 구조물 자체의 무게로 활동, 전도 등에 대한 외적 안정이 확보된다면 저수기능에는 문제가 없을 것이다. 그러나 댐체와 암반 사이에 균열이 댐체 저면을 관통하지 않고 일부구간에만 발생할 경우에도 활동을 부담하는 댐체 전단저항 길이가 감소하여 댐체 저면과 기초암반 사이의 활동 저항력이 감소하므로 ‘댐 설계기준 2011’에서 제시하는 아래의 전단마찰 안전율 식에서 안전율이 감소할 수 있다. 따라서 댐체 저면 균열 발생 후 상시의 활동에 대한 안정검토 결과를 토대로 저수기능에 대한 성능수준을 평가할 필요가 있다.

$$SF = \frac{f \cdot V + \tau \cdot l}{H} \quad (1)$$

- 여기서, SF : 전단마찰 안전율 (≥ 4.0)
- f : 댐 체체의 재료 또는 기초암반의 내부마찰계수
- τ : 댐 체체의 재료 또는 기초암반의 순 전단강도
- ΣV : 전단면에 작용하는 전 연직력
- ΣH : 전단면에 작용하는 전 수평력
- $l \cdot B$: 전단저항 길이(m)

또한 댐체 관통 균열의 발생지점이 Fig. 4(b)와 같이 댐체 저면이 아닌 댐체 상단부 수평 시공이음부일 경우 활동에 대한 안정성이 확보되지 않아 저수기능에 문제가 될 수 있으므로 댐체 시공이음부에 대한 균열 발생여부를 확인할 필요가 있다.

Fig. 4(a)는 댐 본체와 지반의 접합 조건이 수평시공이음부 접합조건보다 약할 경우의 활동에 의한 영구변위를 나타내고 Fig. 4(b)는 수평시공이음부의 접합조건이 약할 경우에 활동 변위를 나타낸다.

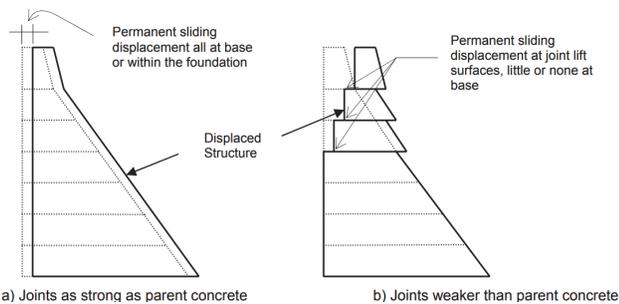


Fig. 4 Concrete dam horizontal construction joint activities (USACE, 2007)

3. MCE 적용 내진성능평가 방안 개선

3.1 개요

‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 MCE를 적용한 내진성능평가 방안의 개선안을 도출하기 위해 ‘댐 내진평가요령 2019’의 부록에서 예시로 제시하고 있는 댐과 유사한 규모와 형상으로 Fig. 5와 같이 가정하여 MCE 10,000년 빈도의 지진에 대해 Abaqus를 활용하여 동적소성해석을 수행하였다. 대상 댐의 댐체 저면 하류측에 전단키가 설치되어 있는 조건을 고려하였다.

‘댐 내진평가요령 2019’의 중력식 댐 평가예시를 참조하여 재료 물성치와 하중을 적용하였다. 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 질량은 각각 18MPa, 25.5GPa, 2,230kg/m³로 적용하였다. 지반은 경암지반 조건으로 질량과 탄성계수를 각각 2,750kg/m³, 53.5GPa로 적용하였다. 하중조건으로 자중, 정수압과 Westergaard 동수압을 부가질량법으로 적용하였다.

‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 동적소성해석을 위한 Abaqus DPM(Damaged Plasticity model) 입력변수에 대해 실험값이 없으므로 Dilation angle은 보수적인 결과가 도출되도록 큰 값을 적용하였고 Eccentricity, fb/fc0, K, Viscosity Parameter 등의 값은 프로그램의 기본값을 사용하였다. 압축거동 시 동적압축강도의 절반에서 소성이 발현되고 압축강도 시 변형률은 0.001로 가정하였다.

콘크리트의 인장특성은 Fig. 6과 같이 Tension stiffening

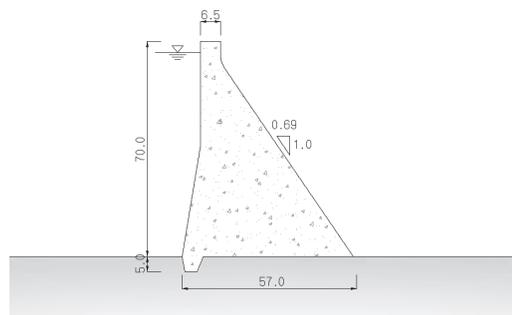


Fig. 5 Cross section of concrete dam

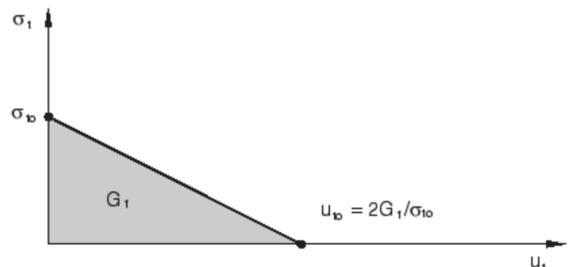


Fig. 6 Postfailure stress-fracture energy curve(Abaqus Manual)

Table 1. Concrete damaged plasticity model inputs

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

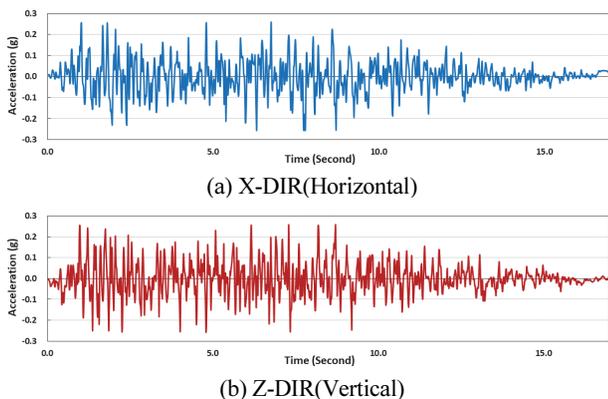
Table 2. Concrete strength and behavior properties

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

(strain softening) curve를 단일직선으로 가정하였고 인장거동 시 파괴에너지를 산정하기 위한 조골재 최대치수 정보가 없기 때문에 댐 콘크리트에서 일반적으로 사용되는 80mm~150mm 중 안전측 검토를 위해 80mm를 적용하여 산정하였으며 콘크리트의 인장강도($f_t/10$)는 수평타설이음부 및 댐체 저면에서의 강도가 타설부에 비해 적을 수 있으므로 보수적으로 설계기준강도에 의한 정적 쪼갬인장강도를 사용하였다.

댐체 재료 감쇠비는 Rayleigh감쇠의 질량 및 강성비례함수로 적용하였다. DPM 손상소성모델에 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 나타내며 재료의 이력루프에 의한 에너지 흡수에 따른 이력감쇠와 유사한 개념일 것이다. 따라서 감쇠비는 댐 설계기준에 따라 5%를 Rayleigh감쇠로 적용하고 MCE 작용시 강진지속시간에 댐체에 손상이 발생할 경우 재료의 이력루프에 의한 인공감쇠가 추가로 도입되도록 하였다.

대상 댐은 내진 특등급 시설로 가정하였으며 설계진도(2,400년 빈도)는 0.14g(지진구역계수 0.07g×위험도 계수 2.0)

**Fig. 7** MCE input seismic wave

를 적용하고 MCE 10,000년 빈도의 위험도 계수가 제시되어 있지 않으므로 ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 추세선을 통하여 PGA는 0.260g로 추정하였다.

동적소성해석을 위한 MCE 지진파는 상관계수가 0.16미만으로 통계적으로 독립된 인공지진파를 스케일링하여 Fig. 7과 같이 지진지속시간 17sec의 지진파를 댐 상하류 방향(수평방향)과 댐 수직방향으로 적용하였다.

‘내진설계 일반 KDS 17 10 00 : 2018’(이하 내진설계 일반 2018)에서 지진규모 6.5이상 7.0미만인 경우 지진지속시간을 21sec로 제시하고 있으며 10,000년 빈도의 지진을 지진규모로 환산하면 6.9에 해당되어 지진지속시간은 21sec로 적용하는 것이 바람직하다. 그러나 ‘댐 내진평가요령 2019’ 부록의 평가예시에서 10,000년 빈도의 지진에 대한 지진지속시간을 17sec로 적용함에 따라 본 연구에서도 17sec를 적용하였으며 후술되는 3.7절에서 지진지속시간에 대한 현행 ‘댐 내진평가요령 2019’에 대한 개선점을 언급하였다.

3.2 기초지반과 댐체의 상호작용(SSI) 적용성

기초지반과 구조물의 상호작용은 구조물이 세워진 후에 발생하는데, 구조물-기초지반 체계에서 입력 지진파가 구조물 기초를 진동시키면 구조물에 가속도가 발생하여 구조물에 관성력이 유발되고, 이 관성력이 구조물 기초에 수직축력, 전단력 및 전도 모멘트가 전달된다. 기초에 전달된 이 힘들이 다시 기초지반을 통해 에너지를 발산하면서 기초지반의 특성과 구조물 기초저면의 지진거동(입력지진파)에 영향을 미치고 이와 같은 구조물과 지반사이의 순환작용, 기초지반 강성과 구조물의 강성차가 클수록 커지는 것으로 알려져 있다(Kim, 2013).

‘댐 내진평가요령 2019’에서는 기초암반과 댐체의 상호작용(SSI)을 고려하기 위해 기초암반을 모델링할 때는 분산감쇠를 고려한 질량모델이나 점탄성모델 등을 사용할 수 있다고 제시하고 있다. 그러나 보통 암반(전단파속도 1,100m/s 이상)상에 건설된 콘크리트 구조물은 지반-구조물 상호작용 효과가 거의 없기 때문에 이 효과를 무시할 수 있다고 알려져 있다(Kim, 2013).

대상 댐의 기초지반은 경암으로 가정하였으며 Fig. 8과 같이 댐체만을 강체 지반 고정지점으로 해석할 경우와 기초지반과 댐체의 상호작용을 고려한 동적해석을 수행할 경우로 구분하여 지진시 응답의 차이를 비교하였다.

기초암반과 댐체의 상호작용 효과를 검토하기 위한 기초암반 지반의 근역지반은 깊이 80.0m, 폭 240.0m로 모델링하고 원역지반은 방사효과를 고려하기 위해 무한요소를 적용하고 지반과 댐체 저면은 ABAQUS Constraint Tie 기능으로 강결로 구속하였다. 지반의 비선형성을 고려하기 위한 지반의 등

가선형 전단탄성계수와 감쇠비를 산정하기 위해 기초암반의 전단파 속도를 2,800m/s를 적용하여 1차원 등가선형 부지응답해석 프로그램인 Proshake를 활용하여 부지응답해석을 수행하고 지반 깊이별 감쇠비를 산정하였다. Proshake 해석결과로 산정된 지반 깊이별 재료의 damping data를 ABAQUS 근역지반 모델링에 입력하고 Proshake 부지응답해석에서 outcrop motion에 의한 deconvolution 수행으로 산정된 기초암반 하단 가속도(g)를 지반 모델링 하단에 가속도로 입력 후 ABAQUS Dynamic Implicit Analysis 수행하였다.

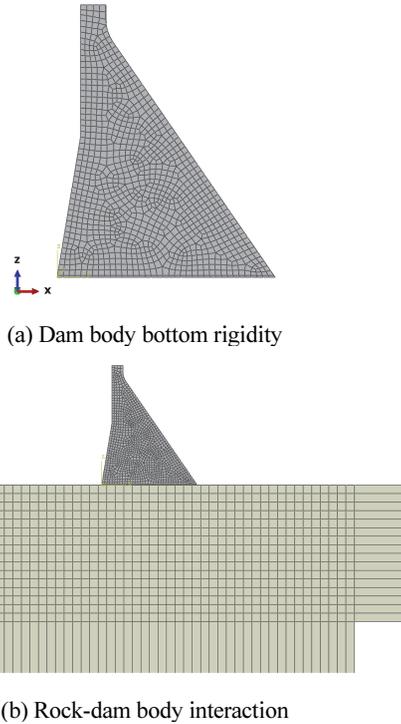


Fig. 8 Dam modeling conditions

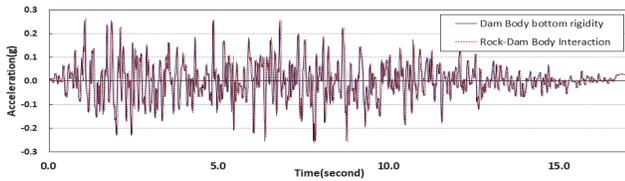


Fig. 9 Comparison of dam body bottom acceleration response

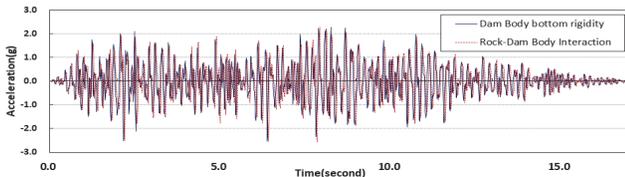


Fig. 10 Comparison of dam body top acceleration response

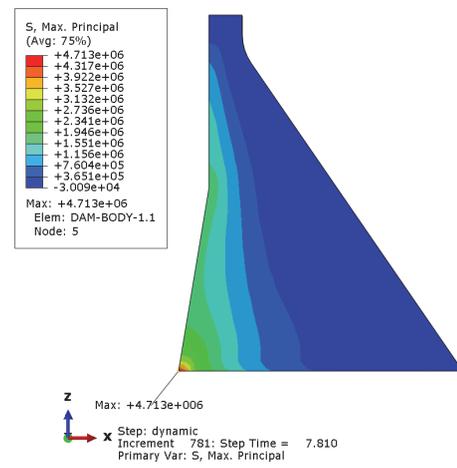
MCE를 적용한 동적탄성해석에서 고정단을 적용한 조건과 SSI를 적용한 조건에 대해 댐체 저면과 상단부의 가속도시간이력 비교결과 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 약간의 위상 차이가 발생하지만 가속도 크기는 유사한 것으로 확인되었다. 따라서 기초암반의 모델링은 적절히 수행된 것으로 판단된다.

해석결과 최대응력은 상류측 하단에 발생하고 있으며 SSI를 고려한 조건의 응력값은 Fig. 11과 같이 고정단으로 적용한 조건의 95%정도의 수준으로 해석되었다.

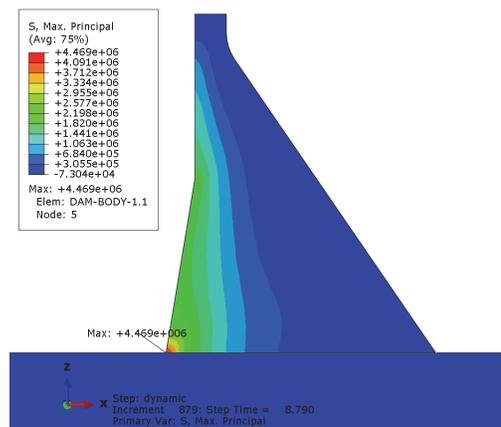
해석결과와 차이는 Fig. 9와 같이 댐체 상단부 가속도 응답결과가 유사하다는 점으로 판단하면 기초지반의 감쇠효과라기 보다는 지반의 유연성이 반영된 것이 원인일 것이다.

MCE를 적용한 동적소성해석 결과 Fig. 12와 같이 상류측 댐체 중앙부와 저면에 소성변형률(균열)이 발생하고 있으며 SSI를 고려한 해석에서 지반의 유연성이 반영되어 균열길이가 4%정도 감소하는 것으로 해석되었다.

지반을 모델링하여 동적해석을 수행하는 것은 다소 복잡하고 많은 노력과 시간이 필요하나 상기의 해석결과에서와 같

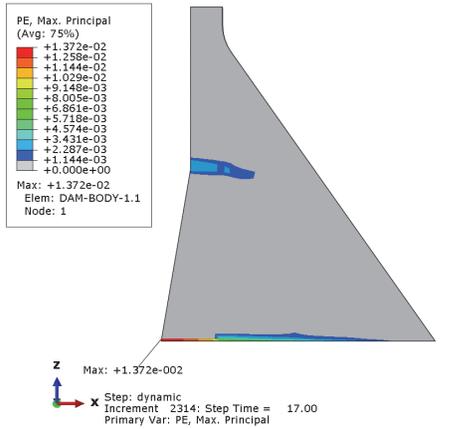


(a) Dam Body bottom rigidity

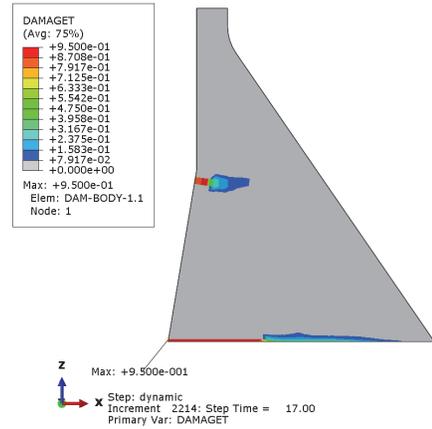


(b) Rock-Dam Body Interaction

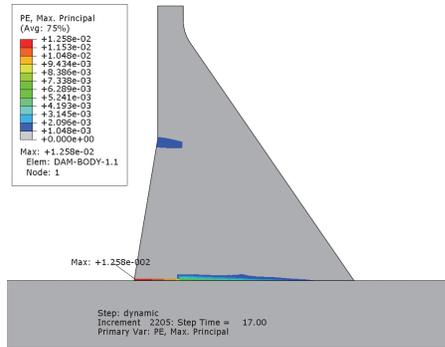
Fig. 11 Dynamic analysis stress results when MCE is applied



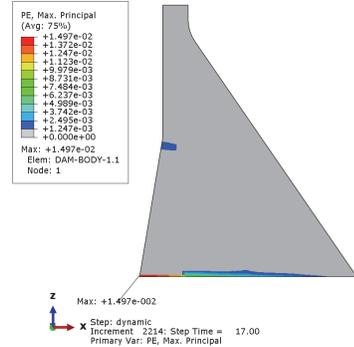
(a) Dam Body bottom rigidity, Crack length 47m



(a) Damage Parameter, Crack length 48.5m



(b) Rock-Dam Body Interaction, Crack length 45m



(b) Plastic strain, Crack length 48.5m

Fig. 12 Crack analysis results by damping ratio size when MCE is applied

이 암반지반에서는 지반-구조물 상호작용에 의한 효과가 크지 않은 것으로 확인되며 고정단으로 모델링 한 조건이 보수적으로 검토되었다. 따라서 해석의 효율성을 고려하여 댐 체만을 모델링하여 동적해석을 수행하는 것이 합리적인 것으로 판단되며 지반의 유연성이 고려된 실제적인 거동을 반영하기 위해서는 지반조건에 부합하도록 지반스프링을 모델링에 적용하는 방안도 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 손상변수(Damage Parameter) 적용

ABAQUS에서 DPM 손상소성모델에 대해 손상 시 강성저하율을 고려하여 인장 및 압축에 대한 손상 변수(Damage Parameter)를 적용하고 있으며 소성변형률과 균열변형률에 대해 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_t^{pl} = \epsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (2)$$

식(2)에 따르면 인장손상변수 d_t 를 입력하지 않을 경우

Fig. 13 Analysis results considering damage parameter

$\epsilon_t^{pl} = \epsilon_t^{ck}$ 가 되므로 소성변형률이 발생하는 범위가 균열이 발생된 범위로 볼 수 있다.

현행 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 중력식 댐에 적용하는 손상변수는 별도로 제시된 기준이 없으나 손상변수가 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 11과 같이 해석을 수행하였다. ‘댐 내진평가요령 2019’에서 제시된 손상변수 적용기준이 없으므로 최대압축응력 및 균열응력부터 적용하여 최고 변형률까지 0에서 0.95까지 선형적으로 변화하는 것으로 가정하여 적용하여 해석을 수행하였다.

해석결과 손상변수를 적용할 경우 Fig. 13(a)에서와 같이 균열발생범위를 확인할 수 있으며 Fig. 13(b)와 같이 소성변형률 발생범위는 손상변수를 적용하지 않은 경우와 큰 차이가 없으며 소성변형률의 최대값 크기가 9%정도 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 손상변수 적용에 따른 강성저하율이 반영됨에 변형률이 더 크게 해석된 것으로 판단되며 실제 거동과 더 부합한 해석을 위해 손상변수를 적용할 필요가 있으며 ‘댐 내진평가요령 2019’에서 손상변수 적용방법에 대한 기준을 제시하도록 개선이 필요하다.

3.4 댐체-암반 경계면 부착강도 적용

댐체 저면 콘크리트와 암반 경계에서는 서로 부착에 의해 결합되어 있는 조건을 고려하여 콘크리트와 암반의 경계부는 콘크리트의 인장강도와 파괴에너지가 아닌 콘크리트의 부착강도와 감소된 파괴에너지를 적용하여 동적소성해석을 수행하였다.

콘크리트와 암반간의 부착강도에 대한 실험값이 없으므로 콘크리트 인장강도의 30%를 부착강도로 적용하고 $G_f = (0.79d_{max} + 80) \times (fc/10)^{0.7}$ 에서 골재최대치수 크기의 영향을 무시하여 파괴에너지를 산정하였으며 댐체 저면과 지반과의 부착력을 고려하기 위해 댐체 저면 0.5m의 높이의 요소에 대해서만 Table 3과 같이 부착강도에 대한 물성치를 가정하여 입력하였다.

해석결과는 Fig. 14와 같으며 균열 발생길이는 콘크리트 인장강도와 파괴에너지를 적용한 조건보다 부착강도를 적용한 조건에서 7%정도 증가하는 것으로 확인되었다.

따라서 댐체 저면의 균열 발생범위 확인 시 콘크리트의 인장거동 특성으로만 고려하여 해석한다면 균열 길이가 실제보다 작게 평가될 여지가 있을 것으로 판단된다. 본 해석에서 적용한 댐체와 암반간의 부착강도 및 파괴에너지 값이 실험값이 아닌 가정값이므로 해석결과에 변동성이 클 수 있으므로 파괴에너지 값에 대해서는 불확실성을 고려하여 보수적으로 적용할 필요가 있다.

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)
11,827,100	23,654,200	0.001	528,000	51.2

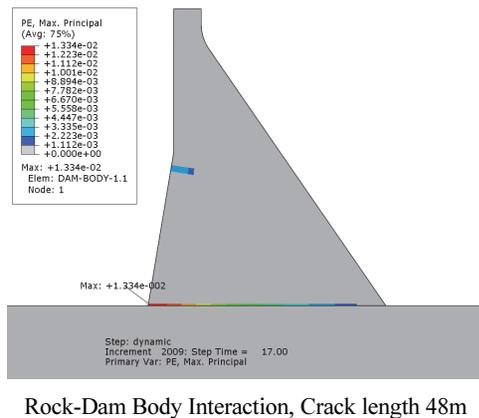


Fig. 14 Crack analysis results when applying the adhesive strength to the bottom of the dam body

3.5 지진 후 활동 안정성 평가

외력에 의해 댐체와 암반 사이에 부착력이 상실되어 균열이 발생된 조건에서 활동을 부담하는 댐체 저면 길이가 감소하여 댐체 저면과 기초암반 사이의 부착력이 감소하므로 활동에 대한 안전율이 감소할 수 있다. ‘구조물 기초설계기준, 2016 제6장 옹벽편’(이하 구조물 기초설계기준 2016)에 따르면 기초 하단에 전단키를 설치하였을 경우 Fig. 15와 같은 개념으로 수평력에 저항하여 활동에 대한 안정을 확보한다.

$$F = (W + P_V)\mu + c_a(B - a_1b) + c(a_1b) + P_p \quad (3)$$

여기서, c_a : 부착력(adhesion), c : 점착력(cohesion), W : 자중, P_V : 연직토압, P_p : 수동토압, μ : 마찰계수, B : 저면길이이다.

점착력(cohesion)은 동일 재료간의 응집력이고 부착력(adhesion)은 이질 재료간의 응집력이라는 차이가 있으며 전단키 전면부는 기초지반의 점착력과 내부마찰력으로 활동에 저항하고, 전단키 배면부에서는 콘크리트와 지반과의 부착력과 마찰력으로 활동에 저항하는 것이 일반적이다.

‘댐 설계기준 2011’에서 제시하는 중력댐의 전단마찰 안전율 식은 활동에 대한 안정성을 확인하기 위한 식으로서 기호 τ 는 댐 체체의 재료 또는 기초암반의 순 전단강도를 나타내고, f 는 댐 체체의 재료 또는 기초암반의 내부마찰계수를 나타내고 있다. ‘구조물 기초설계기준 2016’에서 기초와 지반경계에 작용하는 응집력을 점착력과 부착력으로 구분하는 것과 다르게 ‘댐 설계기준 2011’에서는 점착력 c 를 전단강도 ($\tau = c + \tan\Phi$)와 동일한 개념으로 적용하고 있다.

대상 댐 댐체 저면 뒤쪽에는 전단키가 설치되어 있고 전단키 전면부 기초암반의 점착력과 기초암반 내부마찰력으로 외력에 대한 활동에 저항하고 있는 구조이다. 지진시 전단키에 손상이 발생할 경우 활동에 저항하는 구조계에 변동이 발생할 수 있으나 댐체 저면을 수평으로 모델링하여 해석을 수행할 경우 전단키의 파괴양상을 파악하기 어려우므로 Fig. 16과

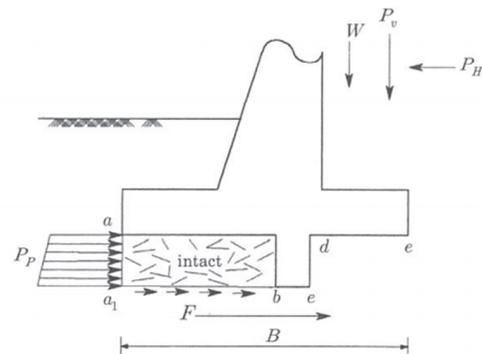


Fig. 15 Retaining wall activity prevention shear key concept

같이 댐체 저면 하류측의 전단키를 고려한 모델링으로 해석을 수행하였다.

댐체와 암반 경계부에서 콘크리트의 인장강도를 적용한 조건과 부착강도를 적용한 조건으로 구분하여 동적소성해석을 수행하였으며 해석결과 Fig. 17과 같이 균열길이에 차이를 보이고 있다. 균열의 크기는 댐체 저면을 수평으로 해석한 조건과 유사한 것으로 확인되며 두 조건에서 모두 전단키에 대한 관통균열이 발생하는 것으로 해석되었다. 또한 전단키를 미설치한 조건에서 해석된 결과 Fig. 14에서 보다 하류측 변단면 위치에서의 균열이 더 증가하는 양상을 보이고 있다.

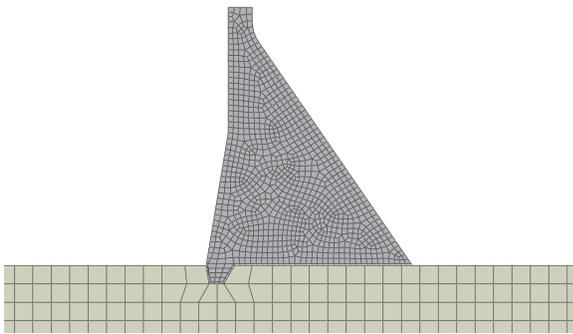
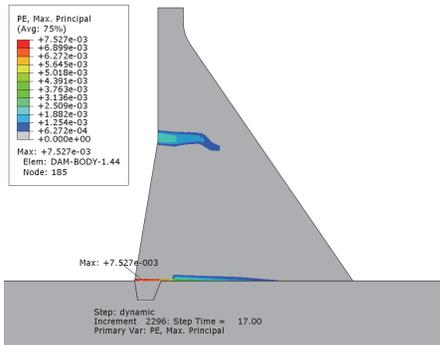
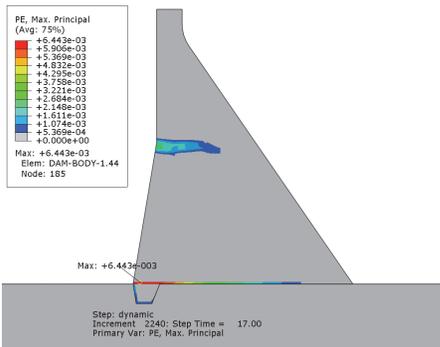


Fig. 16 Rock-Dam Body modeling with shear key



(a) Concrete tensile strength at the bottom of dam, Crack length 37m



(b) Adhesive strength at the bottom of dam, Crack length 43m

Fig. 17 Crack analysis results for each dam body strength condition

‘구조물 기초설계기준 2016’에서의 개념을 적용한다면 댐체 저면 전단키에 관통균열이 발생하지 않은 경우는 Fig. 18(a)와 같이 암반지반의 점착력과 내부마찰계수로 활동에 저항할 수 있으나 Fig. 18(b)와 같이 전단키에 관통균열이 발생하였을 경우 균열이 발생한 43.0m 구간에 대한 활동에 대한 저항력은 기초암반의 점착력이 아닌 콘크리트와 암반간의 마찰계수에 의해 결정되며 암반의 점착력으로 저항하는 댐체 저면 전단저항 길이가 14.0m로 감소할 것이다.

대상 댐에 MCE 지진 발생 전과 발생 후에 대한 상시 활동에 대한 안정성 평가결과는 Table 4와 같다. 대상 댐 경암지반의 전단강도는 1.8MPa로 적용하였고 균열 발생면에서 부착력은 고려하지 않았다. 균열 발생 후 균열발생 길이 44.4m에 대해 ‘USBR 1976’ 기준에 따라 콘크리트와 암반 접합면의 마찰계수 0.65를 적용하고 균열이 발생하지 않은 구간 14.0m에 대해서는 암반의 전단강도와 마찰계수 1.0을 적용할 경우 전단마찰에 대한 안전율이 2.41로 감소하며 상시 활동에 대한 기준 안전율 4.0 미만으로 평가되는 것으로 확인된다.

1995년 ICOLD에서는 콘크리트 중력식댐의 붕괴 사례들의 원인 중 전체 붕괴 수의 50% 이상이 기초 지반의 불충분한 전단강도나 내부 침식 등과 같이 댐 기초부 및 양안 접촉부와 관련된 것으로 보고하였다(Cho et al., 2016). 국내/외 댐 설계 기준 등에서 정의하는 콘크리트 중력식 댐의 파괴모드는 크

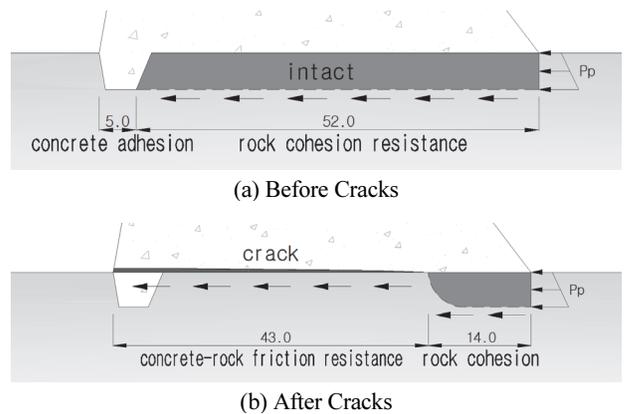


Fig. 18 Activity behavior by condition of the dam body bottom

Table 4 Comparison of safety rates for normal activities

division	Before Cracks	After Cracks
H(kN)	22.349	22.349
V(kN)	38.954	38.954
τ (Mpa)	1.8(rock)	-
l(m)	57.0	43.0(14.0)
f	1.0(rock)	0.65(concrete to rock)
SF	6.33	2.41

계 전도(Overturning)와 활동(Sliding), 과응력(Overstress)과 관련한 파괴모드로 나누고 있다(Cho et al., 2016). 국내 중력식 댐의 붕괴사례는 보고된 바 없으나 ‘댐 설계기준 2011’에서 상시 활동에 대한 안전율 기준은 항만, 옹벽에서 보다 다소 보수적인 값으로 4.0을 적용하고 있으며 외적안정의 중요성과 기초재료의 불확실성을 담보하기 위한 것으로 판단된다.

현행 상시 댐 활동 안정성 기준이 다소 보수적이기 때문에 활동 안전율의 부족이 바로 댐체의 붕괴를 의미한다고 볼 수는 없지만 MCE라는 가능성이 극히 드문 지진력에 대한 성능 평가라는 측면에서 저수기능이라는 성능을 확보하기 위해서는 중력식 댐의 본질인 외적 평형이 우선적인 평가항목일 것이다. ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 MCE 적용시 동적소성 해석에서 댐체 저면의 균열 발생범위로만 저수기능의 성능수준을 평가한다면 기존의 동적안정 및 국부응력 해석에 적용해오던 내진설계등급의 지진력보다 PGA값이 2배 정도 큰 MCE 지진력에 대해 오히려 더 안전한 것으로 평가할 여지가 있으므로 성능수준 평가방법에 대한 개선이 필요하다.

3.6 지진하중 크기별 파괴 형상

대상 댐 동적소성해석에 적용한 MCE의 PGA값은 0.260g이며 해석결과 댐체 저면에 균열손상이 발생하고 댐 본체에

는 균열이 일부 발생하는 것으로 해석되었다. 균열의 발생 크기와 위치는 지진력의 크기에 따라 변동 될 수 있으므로 다양한 지진력 크기를 적용하여 동적소성해석을 수행하였으며 지진력의 크기는 대상 댐 내진설계등급인 2,400년 빈도, MCE 크기의 2배로 구분하여 적용하였다. 지진력 크기별로 동적소성해석을 수행한 결과는 Fig. 19와 같다.

2,400년 빈도의 지진력 적용시 전단기를 관통하는 균열이 발생하지 않은 것으로 해석되었다. MCE 크기의 2배(0.520g) 지진력 적용시에는 전단기 기능이 상실되는 균열이 발생하고 균열길이는 49m로 해석되며 댐 본체 내부에 관통 균열이 발생하였다.

국내의 MCE는 0.3g 정도의 크기로서 일본의 레벨1 내진기준인 0.6g와 일본의 MCE로 추정되는 0.9g에 비해 크지 않은 값이다. 따라서 국내 중력식 댐에 MCE 적용시 댐 본체를 관통하는 균열이 발생할 가능성은 크지 않을 것으로 판단된다.

3.7 지진 지속시간 영향 검토

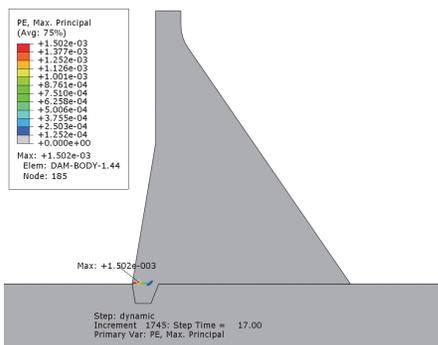
동적소성해석에서 균열의 크기에 영향을 미치는 또 하나의 주요변수는 지진지속시간이다. 일반적으로 본진이 발생한 이후에 여진이 발생한다. ‘USACE 2007’에서는 비선형 동적 해석 이후에 손상에 대해 정하중 및 여진에 대한 지진 해석을 수행하도록 제시하고 있다.

대상 댐에 적용한 MCE 이후에 동일한 크기의 MCE가 발생하는 경우와 MCE 이후에 내진설계등급인 2,400년 빈도의 지진이 추가적으로 발생하는 것으로 가정하여 총 지진지속시간을 34sec로 적용한 동적소성해석을 수행하였으며 해석결과는 Fig. 20과 같다.

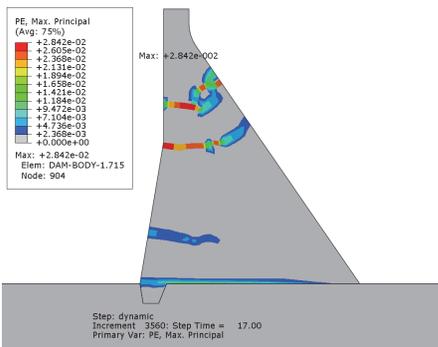
MCE 발생 후 동일한 크기의 MCE가 추가적으로 발생할 경우 Fig. 18(a)와 같이 댐체 저면과 본체의 균열이 11%정도 증가하는 것으로 해석되었다. MCE 발생 후 2,400년 빈도의 지진이 추가적으로 발생 시 댐체 저면 균열의 범위는 Fig. 18(b)와 같이 Fig. 15(a)의 MCE만 작용한 경우와 동일하게 37m로 해석되며 소성변형률의 크기만 0.2%정도 증가하는 경향을 보이고 있다.

10,000년 빈도의 지진을 지진규모로 환산하면 6.9에 해당되어 지진지속시간은 21sec로 적용하여야 하나 ‘댐 내진평가요령 2019’의 중력식 댐 평가예시에서 MCE 적용시 지진 지속시간을 17sec로 적용하고 있으므로 개선이 필요하다.

동적탄성해석에서 지진파는 PGA값과 스펙트럼이 중요하나 동적소성해석에서는 PGA값과 더불어 지진파 지속시간이 소성변형 해석결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 세계적으로 역대 발생 지진중 멕시코 시티 지진에서 지속시간이 3분 20초였던 점을 고려하면 국내 설계기준에서 제시하는 지진지속시간은 공학적 판단과 더불어 국내실정에 맞도록 사회적인 합의

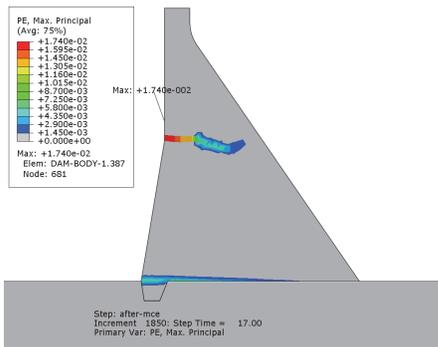


(a) 2400-year frequency earthquake, Crack length 5m

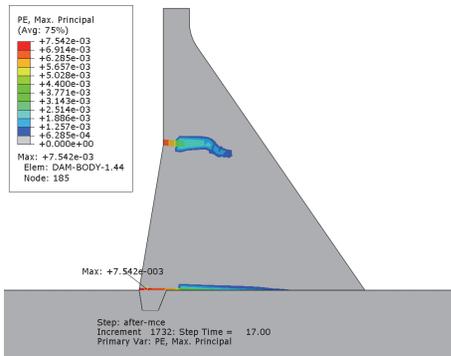


(b) Twice the size of MCE, Crack length 49m

Fig. 19 Crack analysis results by seismic load size



(a) Same magnitude MCE applied after MCE earthquake, Crack length 41m



(b) 2400-year frequency earthquake applied after MCE earthquake, Crack length 37m

Fig. 20 Crack analysis results by earthquake duration

로 도출된 가정이며 국내 MCE 규모의 지진이 21sec 이하로만 발생한다고는 어느 누구도 장담할 수 없을 것이다. 따라서 본 진에 대한 동적소성해석 결과만으로 댐체의 성능수준을 판정하는 데에는 한계가 있을 것으로 판단되며 여진을 고려한 추가검토가 필요하다.

3.8 소결

중력식 댐에 대한 다양한 모델링 조건으로 해석을 수행하여 댐체 저면에 발생하는 균열의 크기를 Table 5 및 Fig. 21와 같이 비교하였다. 실무에서 주로 적용하는 댐체 저면 고정경계 방법(case-1)에 비해 지반모델링을 포함한 경우(case-2) 균열길이가 감소하나 댐체 저면을 부착강도로 적용(case-3) 시 균열이 약간 증가하고 있다. 댐체 저면의 전단키를 고려한 해석(case-4,5)에서는 균열이 감소하는 것으로 해석되었다.

결과적으로 댐체 저면을 고정경계로 적용(case-1)하여 해석을 수행하면 전단키와 부착강도를 고려한 조건(case-5)보다 보수적인 해석결과가 도출되는 것으로 확인된다.

현행 ‘댐 내진평가요령 2019’을 적용하여 내진성능평가를 수행함에 있어 본 절에서 검토한 주요 개선사항을 Table 6과 같이 요약 정리하였다.

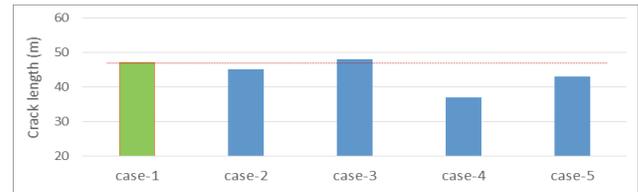


Fig. 21 Comparison of crack results by modeling conditions

Table 5 Comparison of crack results by modeling conditions

Division	Case	Crack length (m)
Dam Body bottom rigidity	case-1	47
	case-2	45
Rock-Dam	case-3	48
	case-4	37
Body Interaction	case-5	43

Table 6 Dam Seismic Performance Evaluation Improvements

Division	Improvements
Damage variable apply	When the damage variable is applied to the DPM model, the plastic strain rate increases, so it is necessary to suggest a method for applying the damage variable.
Post-earthquake activity stability evaluation	In consideration of the fluctuations in the structural system that resists activities after an earthquake, it is necessary to further review the stability of regular activities.
Earthquake Duration Impact Review	For the same seismic load magnitude, the longer the earthquake duration, the larger the damage. After the main earthquake, aftershocks need further analysis. It is necessary to present a reasonable earthquake duration for MCE.

4. 결론

본 연구에서는 MCE를 적용한 콘크리트 중력식 댐의 동적소성해석으로 내진성능평가 수행 시 입력변수, 성능수준 평가 방법에 대한 현행 기준의 적용성을 검토하기 위해 콘크리트 중력식 댐을 대상 시설로 선정하여 다양한 재료모델 입력변수, 지진하중 크기 등의 조건으로 동적소성해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 국내 MCE의 PGA가 0.3g 정도임을 고려할 경우 댐 본체를 관통하는 균열은 발생하기 어려운 것으로 판단되며 상류측 저면 일부구간에서 댐체와 암반간의 부착력

상실이 발생하나 저면을 관통하는 균열이 발생할 가능성은 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 ‘댐 내진평가요령 2019’에 따라 MCE 작용시 댐체 저면을 상하류 방향으로 관통하는 균열발생 여부로만 성능수준을 확인한다면 대부분의 댐은 안전한 것으로 평가될 수 있다.

- (2) 중력식 구조물의 본질은 자중에 의한 외적 안정이다. 댐체 상류측 저면에 균열이 발생한다는 것은 활동방지를 위한 전단키의 손상을 의미하며 기초압반의 점착력과 내부마찰력으로 활동에 저항하는 구조계가 변동이 발생하여 댐체의 전단강도와 기초압반간의 마찰력으로 활동에 저항할 경우 활동에 대한 안전율이 감소할 수 있다. 따라서 지진 발생 후 균열의 범위를 고려한 댐체 저면 활동 저항길이를 적용하여 상시하중에 대한 활동 안정성 평가를 수행하여 저수기능에 대한 성능수준을 추가적으로 확인할 필요가 있다.
- (3) 댐체 균열의 발생 범위는 동적소성해석 입력변수 중 인장강도, 파괴에너지, 지진지속시간 등에 큰 영향을 받는 것으로 확인되며 실제 시험값이 아닌 가정된 입력변수를 적용할 경우와 본진 이후의 여진에 대한 영향이 해석에 반영되지 않을 경우 균열범위에 대한 해석결과에 대해 적절한 안전율의 도입이 필요하다.

감사의 글

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

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Dam seismic design, 54 17 : 2019.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation. (2019), Seismic performance evaluation and improvement tips for existing facilities (Dam).
3. FEMA, Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analyses and Design of Dams, May 2005.

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.
5. Report of the evaluation review committee on the seismic performance of the civil society dam, 2017 Japan.
6. A Study on the Advanced Seismic Evaluation of Existing Dams (III) KOREA 2014, WATER RESOURCES CORPORATION SASEED.
7. U.S. Army Corps, Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures, May 2007.
8. Dam Design Criteria. Commentary. 2011, Korea Water Resources Association.
9. Special seismic performance verification service for hydro pumping dams, 2019.12, KHNP.
10. Seismic performance evaluation of dams for large-scale earthquakes (plan), East interpretation (March 2017), Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
11. Yang, I. H., Yoo, S. W., and Seo, J. I. (2009), An Experimental Study on Flexural Tensile Strength and Bond Strength Between Concrete- to-Concrete, *Journal of the Society for Structural Diagnosis*, 13(3), 155-163.
12. Kim, J. S. (2017), Suspension Bridge Tunnel Type Anchorage Construction Example, *Korea Association of Construction Engineering & Management News*, 65.
13. Jonas Magnusson. (2014), Mechanical properties of rock-concrete interface, Mathias Flansbjer, SP Technical Research Institute of Sweden.
14. Ministry of Land, Transport Affairs, Structure foundation design standard. Commentary, 2016 Chapter 6 Retaining Walls.
15. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2018), Seismic design general.
16. Kim, D. K. (2013), Structural dynamics, Gumi Library
17. ProShake Ground Response Analysis Program Version 2.0 User's Manual.
18. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION, DESIGN OF GRAVITY DAMS, A Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado 1976
19. Cho, S. J., Shin, S. W., Sim, S. H., and Lim, J. Y. (2016), Failure Probability Assessment for Risk Analysis of Concrete Gravity Dam under Flood, *Journal of the Korean Society of Safety*, 31(6), 58-66.
20. ABAQUS, Dassault System Simulia Corp. (2011), Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10, 2011.

Received : 08/29/2022

Revised : 09/19/2022

Accepted : 09/29/2022

요 지 : 이 논문의 목적은 MCE를 적용한 콘크리트 중력식 댐의 동적소성해석에 의한 내진성능평가 수행 시 입력변수, 성능수준 평가 방법에 대한 현행 기준의 적용성을 검토하고 개선안을 제시하는 것이다. 이를 위하여 국내 콘크리트 중력식 댐을 대상 시설로 선정하여 다양한 조건으로 동적소성해석을 수행하였으며 입력변수인 콘크리트 인장강도, 파괴에너지 등에 대한 적용성을 검토하였다. 중력식 댐체 저면의 균열이 활동의 안정성 미치는 영향을 분석하여 저수기능 확보에 필요한 성능수준 평가 방법의 개선안을 도출하였다. 연구 결과 개선사항을 적용할 경우 MCE를 적용한 현행 내진성능평가 방법보다 합리적인 평가결과를 도출하는 효과가 있을 것이다.

핵심용어 : 콘크리트 중력식 댐, 동적소성해석, 가능최대지진(MCE), 파괴에너지, 활동 안정성