

댐체-기초 경계부의 비탄성 손상을 고려한 콘크리트 중력댐의 지진해석

이 지 호

동국대학교 토목환경공학과
(2005. 8. 31. 접수 / 2005. 9. 20. 채택)

Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Considering Inelastic Damage of Dam-foundation Boundary

Jee-Ho Lee

Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University
(Received August 31, 2005 / Accepted September 20, 2005)

Abstract : In this paper, a computational model for nonlinear crack damage analysis of concrete gravity dam-foundation boundary region subjected to earthquake loading is suggested. An enhanced model based on the Lee-Fenves plastic-damage model is used as the inelastic material model for a concrete dam structure and rock foundation. The suggested model is implemented numerically and used for computational earthquake simulation of Koyna dam, which was severely damaged from the strong earthquake in 1967. From the numerical result it is demonstrated that the suggested computational model can realistically represent crack initiation and propagation in the dam-foundation boundary region.
Key Words : concrete dam, earthquake analysis, plastic-damage model, finite element method, nonlinear dynamic analysis

1. 서 론

높은 안전성이 요구되는 콘크리트 댐은 양질의 암반 위에 건설된다. 이러한 기초암반부는 댐체 하부에 지반운동을 전달하는 매개체인 동시에 댐체와 연속적으로 결합되어 댐체의 진동 및 활동에 대한 저항력을 제공하는 하부구조체이다. 콘크리트 중력댐의 지진 피해는 주로 댐체 중간부의 상류와 하류 측 벽체에서 시작되는 대규모 균열로 나타나며 대개의 경우 하류 측의 균열 손상이 더 심각한 것으로 평가된다. 실제 관측된 경우나 진동대 실험¹⁾에서 댐체 중간부 균열은 표면에서 발생하여 수평에 가까운 각도를 유지하며 댐체 안으로 상당거리 전파하는 것으로 보고되어 있다.

지진에 의한 다른 파손 양상은 댐체 하부와 기초암반부 경계 부근에서 발생하는 균열이다. 이러한 균

열은 균열의 발생위치가 상류 측 수중 하부이고 댐체의 자중으로 잔류변형 없이 닫히게 되어 실제로 관찰하기는 매우 어려우나 중규모 이상의 지진에 콘크리트 댐이 노출될 경우에는 반드시 발생하게 된다는 것이 전산해석실험 등을 통하여 예상되어 있다²⁾. 이러한 댐체-기초경계부 주변에서 발생하는 균열은 상류 측 댐체의 하부와 기초경계면에서 시작하여 전파하는 양상을 보이며 댐 중간부 수평 균열의 진행 및 댐체의 동적 거동에도 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

콘크리트 댐체는 매우 큰 강성의 암반을 기초로 건설되며 이러한 경우 입사된 지진파의 산란 및 방사효과는 적은 것으로 알려져 있으며 댐 지진해석모형의 경계부에서 발생하는 파의 반사 및 흡수는 무시하는 것이 일반적이다²⁾. 많은 경우 기초부를 완전강체로 단순화하여 해석하며, 이때 강체 기초부는 댐체 하단의 구속 경계조건으로 표현된다. 이러한 단순화는 콘크리트 댐의 선형탄성 지진해석에 주로

* To whom correspondence should be addressed.
jeeholee@dgu.ac.kr

사용되며 담체 만 유한요소로 구성되어 전산해석 모델링이 간편하게 된다는 장점이 있다. 그러나 강체 기초 모델링 방법은 댐의 안전도 및 손상평가를 위한 비탄성해석에서 담체-기초암반 경계 부근의 변형 및 균열손상을 고려하지 못하며, 결과적으로 담체 하부에 실제보다 과도한 응력이 집중되는 것으로 해석된다^{1,3)}.

다른 모델링 방법으로는 접속요소를 사용하는 것으로 기초부의 변형을 무시하여 담체 하단의 균열 발생 및 진전을 과대평가하는 점을 보완하면서 댐 시스템의 모델링이 복잡해지는 것을 막기 위하여 담체와 강체기초 사이의 접속요소로 기초암반 경계의 변형을 표현하는 방법이다. 담체 하단에 위치한 선형탄성 또는 비선형 접촉 메커니즘이 고려된 스프링요소가 주로 사용되며 담체의 기초부에 대한 활동에 대한 메커니즘도 수평 스프링요소로 모델링한다. 담체에 대한 균열평가를 보다 현실적으로 수행하는데 도움이 되나 기초암반부를 관통하는 균열에 대하여는 정밀하게 표현할 수 없다.

중력식 콘크리트댐의 경우 담체와 호소부의 상호작용에 관한 연구에 많은 진보가 있어온 반면, 담체와 기초부의 상호작용은 탄성해석의 수준에 머무르고 있어 실제적인 지진안전성 평가를 위한 손상해석이 이루어지지 못하고 있다. 강한 지반운동에 의한 담체와 기초암반 경계 부근의 파손은 댐 전체의 거동 및 안전에 크게 영향을 미치며 정밀한 손상해석을 위해서는 담체와 지반, 두 영역의 상호작용과 아울러 경계부 관통 균열손상에 대한 합리적인 해석 모형의 정립이 필요하다. 동하중 및 반복하중 상태의 콘크리트 거동 해석에 관한 최근의 연구 성과로부터 콘크리트와 같은 취성재료의 동적 균열 손상해석이 가능하여졌으며 이러한 해석 기술의 진보는 콘크리트 구조체와 기초암반부의 정밀한 비선형 지진해석을 수행할 수 있는 기반을 제공한다.

본 논문에서는 콘크리트 중력댐의 지진안전성 평가를 보다 정확하고 사실적으로 수행하기 위하여 콘크리트 담체의 균열손상과 담체와 기초암반부 경계 부근의 손상해석을 함께 수행할 수 있는 전산해석법을 제시하고, 이를 실제 댐의 지진해석에 적용하여 담체-기초경계부에서 발생하는 비탄성 손상이 댐의 동적 거동에 미치는 영향을 고찰한다.

담체와 아울러 손상이 예상되는 담체 부근의 기초암반은 소성손상모형(plastic-damage model)을 사용

하여 재료의 지진 손상을 해석적으로 표현한다. 근역 기초암반에서 충분히 떨어진 암반 영역은 강체로 가정하며, 비탄성 해석모형에서 강체로 가정된 암반영역과 기초암반의 가상경계면에서 반사되는 파의 영향은 매우 작아 무시할 수 있다고 가정한다.

2. 콘크리트 및 기초암반 손상모형

소성손상모형은 연속손상모형을 소성모형으로 확장한 비탄성 재료모형이며 초기 및 대형 균열의 발생, 진전, 닫힘/열림 등을 해석적으로 표현하는데 효과적이다. 소성손상모형은 변형연화 및 균열손상을 함께 보이는 콘크리트, 암반과 같은 취성재료의 비선형해석에서 사용될 수 있다. 본 논문에서는 반복하중 및 동하중을 받는 재료에도 적용이 가능하도록 확장된 Lee와 Fenves의 소성손상모형⁴⁾을 콘크리트 담체와 담체-기초 경계 부근의 암반 재료모형으로 사용한다.

2.1. 구성방정식

소성손상모형에서 응력은 강성도저하(stiffness degradation) 부분과 유효응력(effective stress) $\bar{\sigma} = E_0 : (\varepsilon - \varepsilon^p)$ 부분의 곱 형태로 구성된다. 손상은 초기 강성도의 저하 및 비탄성 변형의 발생으로 표현된다. 스칼라의 강성도저하모형을 사용하면 응력은 다음과 같이 표현된다:

$$\sigma = (1 - D)E_0 : (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (1)$$

여기서 D 는 강성도저하변수이며, E_0 는 초기탄성강성도텐서, ε 는 변형률텐서, ε^p 는 소성변형률텐서이다. 소성변형률은 손상을 연속체의 비탄성 잔류변형으로 표현하는 역할을 한다.

Lee와 Fenves의 소성손상모형에서 특정 지점에서의 손상을 표현하는 손상변수(damage variable) κ 는 인장손상과 압축손상을 나타내는 두 개의 변수 성분을 갖는 벡터이다. 인장손상변수는 단위체적의 파괴에너지가 비탄성 변형으로 소산된 비율로서 정의되며, 압축손상변수도 압축상태에서 이와 상응하는 방법으로 정의된다.

탄성영역을 정의하는 파괴포락면은 손상변수 κ 와 유효응력 $\bar{\sigma}$ 으로 정의된 다음과 같은 항복함수 F 로 결정된다:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} [\alpha I_1 + \sqrt{3J_2} + \beta \langle \hat{\sigma}_{max} \rangle] - c \quad (2)$$

여기서, α 와 β 는 항복함수의 형상을 결정하는 파라미터, c 는 항복함수의 크기를 결정하는 파라미터, I_1 과 J_2 는 각각 유효응력과 비체적성분의 불변치, $\hat{\sigma}_{max}$ 는 최대주응력값, $\langle \rangle$ 는 Ramp 함수이다. 식 (2)에 콘크리트와 암반의 물성을 적용함으로써 댐체와 기초암반의 파괴포락선으로 각각 사용할 수 있다.

인장과 압축 강도 및 비탄성 거동이 크게 다른 콘크리트, 암반 등의 취성재료 특성으로 인하여 식 (2)를 포함한 대부분의 파손포락면 식의 일축압축점 부근에서 미분불능점이 존재하며 이는 수치해석에서 문제점을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 식 (1)의 소성변형률의 변화율식에는 식 (2)와 유사하지만 모든 점에서 미분가능한 함수를 사용한다. Drucker-Prager 식을 포텐셜함수로 사용하면 소성변형률은 다음과 같은 식으로부터 계산된다:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \left(\frac{s}{\|s\|} + \alpha_p I \right) \quad (3)$$

여기서 s 는 유효응력의 비체적텐서이며, $\dot{\lambda}$ 는 소성파라미터, α_p 는 Drucker-Prager 식의 파라미터, I 는 단위텐서이다. Fig. 1에 식 (2)의 파괴포락면($F=0$)과 식 (3)의 Drucker-Prager 포텐셜함수($\Phi=0$)가 주응력공간의 평면응력 상태에서 비교되어 있다.

2.2. 댐체 및 기초암반 균열의 열림/닫힘 모형

Lee와 Fenves 모형에서 지진하중에 의한 손상 지점 균열의 열림과 닫힘을 강성도의 변화로 표현하기 위하여 식 (1)의 강성도저하변수 D 를 다음과 같이 정의한다:

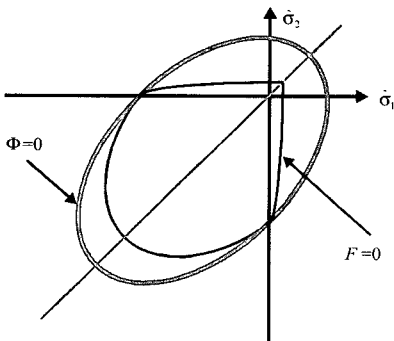


Fig. 1. Drucker-Prager potential and failure surface.

$$D = 1 - (1 - D_c(\kappa))(1 - sD_r(\kappa)) \quad (4)$$

여기서 D_c , D_r 는 각각 일축압축 및 인장 강성도저하시수, 그리고 주유효응력(principle effective stress) $\hat{\sigma}$ 의 가중치함수(weight function)로 구성된 $s(\hat{\sigma}) = \frac{\sum_{i=1}^3 \langle \hat{\sigma}_i \rangle}{\sum_{i=1}^3 |\hat{\sigma}_i|}$ 는 균열의 닫힘에 따른 강성도 회복을 표현하는 식이다. 손상 상태에서의 응력은 식 (2)와 같은 탄성영역을 갖는 유효응력과 식 (4)로 결정되는 강성도저하변수를 식 (1)에 대입하여 계산된다.

2.3. 손상모형을 위한 비선형 동해석 모형

소성손상모형을 포함한 연속균열모형에서는 균열 손상을 연속체의 비탄성변형으로 표현하는데 일반적인 비선형 운동방정식에 기초한 동해석 모형에서는 실제보다 과도한 감쇠력을 유발하는 것으로 계산된다. 그러나 발달된 균열 사이의 감쇠력은 오히려 감소하거나 사라진다. 여기서는 과도 감쇠력을 상쇄시키기 위하여 Lee와 Fenves가 제안한 연속점탄성감쇠모형³⁾을 비선형 운동방정식에 사용한다.

재료비선형성을 포함한 콘크리트 댐체 및 기초암반 모형의 다자유계 운동방정식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다:

$$M\ddot{u} + P(u, \dot{u}) = F \quad (5)$$

여기서 M 은 질량매트릭스, u 는 변위벡터, F 는 지반운동을 포함한 외력벡터이다. 식 (5)의 P 는 비선형 응력과 점탄성 감쇠력으로 구성된 내력벡터이며 유한요소법에서는 다음과 같은 식으로 표현된다:

$$P = \int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega + \int_{\Omega} B^T \chi d\Omega \quad (6)$$

여기서 B 는 변형률-변위관계 매트릭스이다. 식 (6)에서 χ 는 감쇠력을 구성하는 비선형 점탄성력이다. 연속점탄성감쇠모형에서 점탄성력은 재료 손상의 증가와 함께 일관성 있게 감소되도록 식 (4)의 강성도저하변수 D 에 연동되어 다음과 같이 정의된다:

$$\chi(\epsilon, \dot{\epsilon}) = b_0(1 - D)E_0\dot{\epsilon} \quad (7)$$

3. 콘크리트 댐의 지진해석

3.1. 해석대상

실제 지진 피해를 겪은 콘크리트 댐의 파손사례를 대상으로 콘크리트 댐체 및 댐 기초암반 경계부의 재료비선형 시간이력해석을 수행하여 소성손상 모형의 유용성 및 기초암반 경계부 손상의 영향을 평가하였다. Koyna 댐은 길이 850m, 중심부 높이 103m의 콘크리트 중력댐으로 1967년 인도 남서부 Koyna에서 발생한 규모 6.5, MM 진도 9의 강력한 지진으로 실제 균열이 발생한 경우로, 댐체의 균열 모형을 평가하는데 적합하여 여러 전산실험연구의 대상이 되고 있다^{3,5,6}.

3.2. 전산해석모형

비선형 시간이력해석에서 댐 길이 방향의 일정 두께로 격리된 댐체(monolith)와 기초암반부의 유한요소모형은 2절에서 기술한 평면응력의 소성손상모형 요소로 구성한다. 지진하중에 의한 댐체와 기초 경계부의 균열손상을 해석하기 위하여 댐체와 연속되게 기초 암반부를 유한요소로 모델링하였다(Fig. 2). 댐체의 기초암반에서 충분히 떨어진 암반 영역은 완전 강체로 가정하며, 암반 영역과 기초암반의 가상경계면에서 반사되는 파의 영향은 매우 작아 무시할 수 있다고 가정한다. 해석시간간격은 $\Delta t = 0.005$ sec이고 지진해석은 10sec까지 수행되었다. 해석에 사용된 콘크리트의 재료물성은 다음과 같다: 인장강도 = 2.9MPa, 압축강도 = 24.1MPa, 초기탄성계수 = 30GPa, Poisson비 = 0.2, 파괴에너지 = 200N/m, 밀도 = 2630kg/m³. 지진시간이력해석을 위한 기초암반의 물성은 균질한 등방성으로 가정하였으며 다음과 같은 재료물성을 사용하였다: 인장강도 = 3MPa, 압축강도 = 60MPa, 초기탄성계수 = 30GPa, Poisson비 = 0.25, 밀도 = 2700 kg/m³.

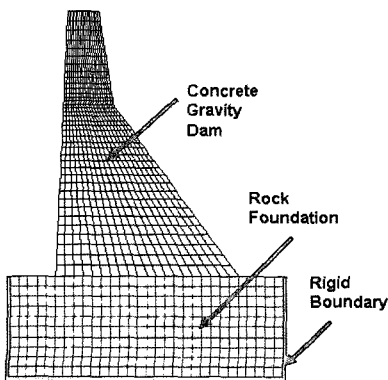


Fig. 2. Finite element mesh for dam structure and rock foundation.

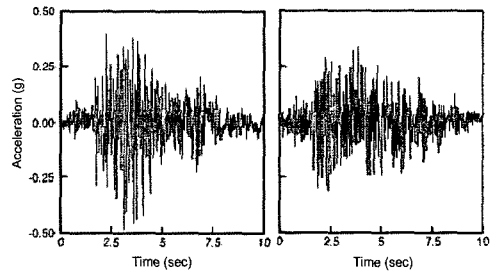


Fig. 3. Koyna earthquake ground motion: horizontal(left) and vertical(right) components.

댐의 지진해석에 고려된 하중은 수평, 수직지진력(Fig. 3) 이외에 댐체 자중, 정수압 및 동수압이 있으며, 동수압 하중의 계산에는 댐체의 변형이 유체에 미치는 영향이 무시할 정도로 작다고 가정하여 Westergaard 동수압식에 의한 부가질량법을 이용하였다.

3.3. 해석 결과

Fig. 4는 댐 상단 상류 방향 지점에서 시간에 따른 수평변위의 변화를 나타내며, 댐체와 기초암반부를 모두 소성손상모형으로 모델링한 결과와 콘크리트 댐체만을 변형체로 모델링하고 기초암반부를 강체로 이상화한 경우의 결과가 비교되어 있다.

시작 시점에서의 초기 변위는 정수압으로 인하여 발생한 것이다. 댐체만의 손상을 고려한 경우의 결과와 비교하여, 기초암반부의 변형과 손상도 함께 고려한 해석결과에서 하류방향, 즉 양의 수평변위 값으로 댐의 최대 변위가 증가하였다. 이러한 결과는 상류부 댐체와 기초 경계부에서 발생한 균열이 하류 방향으로 강성도를 더욱 감소시키는 양상으로 발전하였으며 강체 암반부 모형에 비하여 실제 거동에 가깝다고 사료된다. 상류방향 최대 수평변위는 60mm로 기초암반부 모형과 관계없이 일정하며, 이는 상류 기초암반부 균열이 단함으로써 상류방향 변위에는 영향을 거의 미치지 않기 때문이다.

재료모형에 따른 경계부 기초암반 모델링의 영향을 분석하기 위하여 손상해석과 유사하게 댐체와 기초암반부를 고려한 경우와 댐체만을 고려한 경우로 나눠서 선형탄성해석을 수행한 결과가 Fig. 5에 도식되어 있다. 선형탄성 재료모형의 경우보다 비탄성 소성손상모형을 사용한 경우에서 암반을 포함하여 댐체와 기초암반 경계부에서 발생하는 손상을 고려하는 효과가 더 크다는 것을 관찰할 수 있다.

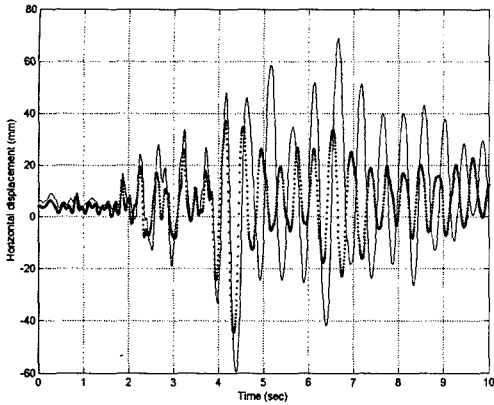


Fig. 4. Displacement history by plastic-damage model analysis (solid line: dam and foundation; dotted line: dam only).

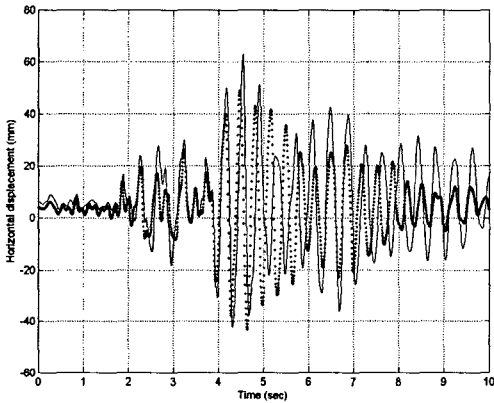


Fig. 5. Displacement history by elastic model analysis (solid line: dam and foundation; dotted line: dam only).

Fig. 6은 손상해석에서 댐체 및 기초암반부에 균열이 발생하여 전파하는 양상을 단계 별로 보여준다. 초기 균열은 댐체의 상류부 하단과 기초 암반부가 만나는 지점에서 발생한다(Fig. 6a). 다음으로 댐체의 하류부 중간 지점에서 발생한 균열(Fig. 6b)은 중심부로 전파되다 상류부 동일 높이에서 별개로 발생한 균열과 합치된다(Fig. 6c, d). 상류 기초 경계부에서 발생한 균열은 점차 댐체 기초 암반부에 약 45° 기울기로 전파되며(Fig. 6d) 콘크리트 댐체의 자중으로 빠른 진전은 억제되는 것으로 보인다. 전산지진해석 결과, 균열은 지진 발생 5 sec 후에는 더 이상 크게 진전되지 않으며 최종 균열손상 상태는 Fig. 6d와 유사하다. 댐체 중간부 균열이 관통하였지만 댐체의 균열 지점 상부의 자중으로 전면적 붕괴는 발생하지 않는 것으로 해석되었으며 실제의 경우도 그러하였다.

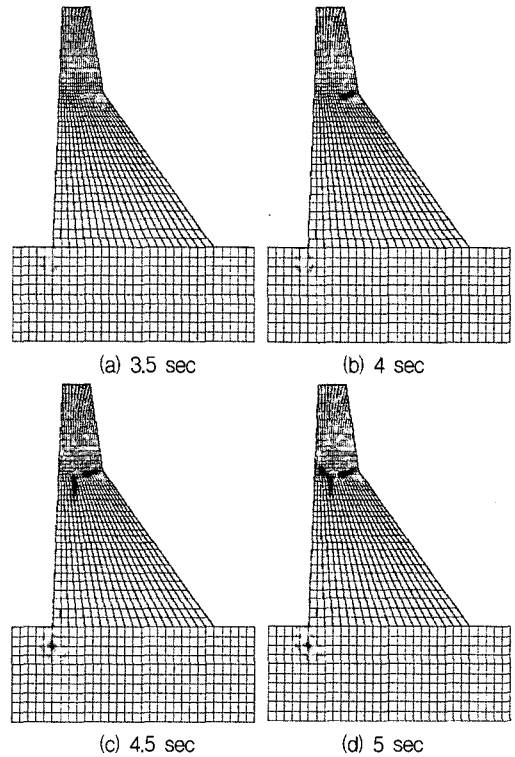


Fig. 6. Crack damage contour at four stages.

4. 결론

본 논문에서는 콘크리트 중력댐의 내진해석 및 성능평가를 보다 정확하고 사실적으로 수행하기 위하여 주요 파괴양상이라고 할 수 있는 댐체 및 댐 하부와 기초암반 경계부근의 균열손상해석을 모두 고려한 전산해석연구를 수행하였다. 이를 통하여 댐체와 기초암반 경계부에서 발생하는 비탄성 손상이 강력한 지진을 받는 댐의 동적 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 콘크리트 댐체와 기초 암반부의 비탄성 재료모형으로는 Lee와 Ferves 소성손상모형을 비선형 동해석에서 사용하도록 확장한 균열손상모형을 사용하였다.

콘크리트 댐체 및 기초암반부의 균열손상을 고려하여 실제 발생한 강진으로 파손된 콘크리트 댐의 비선형 시간이력해석을 수행한 결과, 본 논문에서 제안하는 소성손상모형의 콘크리트 댐체 및 기초암반 경계부의 균열 발생 및 전파를 표현하는 능력이 기존의 강체 기초부 모형에 비하여 사실적이라는 것을 확인하였다. 아울러 정밀을 요하는 콘크리트 중력댐의 내진성능해석 및 지진안전성 평가

에는 댐체와 더불어 댐체-기초암반 경계부의 손상도 반드시 고려하여야 될 것으로 사료된다.

감사의 글 : 이 연구는 2002년도 한국학술진흥재단의 신진교수연구과제(KRF-2002-003-D00365) 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Niwa, A., and Clough, R. W., "Shaking Table Research on Concrete Dam Models", UCB/EERC-80/05, University of California, Berkeley, 1980.
- 2) National Research Council, Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance, and Research Needs, National Academy Press, USA, 1990.
- 3) Lee, J. and Fenves, G. L., "A Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 937~956, 1998b.
- 4) Lee, J. and Fenves, G. L., "A Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, pp. 892~900, 1998a.
- 5) Chopra, A. K., and Chakrabarti, P., "The Earthquake Experience at Koyna Dam and Stresses in Concrete Dams", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, pp. 151~164, 1972.
- 6) Vargas-Loli, L. M. and Fenves, G. L., Nonlinear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, The University of Texas at Austin, Texas, 1987.