

댐체-기초 경계 모델링에 따른 콘크리트댐의 지진 균열거동 Effect of Dam-Foundation Boundary Modeling on Cracking Damage Behavior of Concrete Dams

이지호*

Lee, Jee Ho

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.

1. 서론

동하중 및 반복하중 상태의 콘크리트 거동 해석에 관한 최근의 연구 성과로부터 콘크리트의 동적 균열 및 손상해석이 가능하여졌으며 이러한 해석 기술의 진보는 콘크리트 구조체의 정밀한 비선형 지진해석을 수행할 수 있는 기반을 제공하고 있다. 국가 차원의 중요한 구조물인 콘크리트댐의 경우 댐체의 독립된 지진거동과 아울러 지진하중 상태에서의 댐체, 기초 암반부, 호소부의 상호 작용을 고려한 거동의 해석 능력의 확보가 매우 중요하다.

중력식 콘크리트댐의 경우 댐체와 호소부의 상호작용에 관한 연구에 많은 진보가 있어온 반면, 댐체와 기초부의 상호작용은 탄성해석의 수준에 머무르고 있어 실제적인 손상해석이 이루어지지 못하고 있다. 강한 지반운동에 의한 댐체와 기초 경계 부근의 파손은 댐 전체의 거동 및 안전에 크게 영향을 미치며 정밀한 손상해석을 위해서는 댐체와 지반, 두 영역의 상호작용과 아울러 경계부 관통 균열손상에 대한 합리적인 해석모형의 정립이 요구된다.

* 정회원 · 동국대학교 토목환경공학과, 조교수

본 논문에서는 중력식 콘크리트댐의 내진해석 및 성능평가를 보다 정확하고 사실적으로 수행하기 위하여 필요한 비선형 동해석, 특히 주요 파괴양상으로 예상할 수 있는 댐체와 기초암반부 경계 부근의 균열손상해석을 위한 전산해석모형을 제시하고 경계부의 모델링에 따른 영향을 고찰한다.

2. 콘크리트 및 기초 암반 손상모형

강력한 지진하중을 받는 콘크리트 댐체는 균열의 발생, 진전, 닫힘/열림 등의 여러 상태의 손상을 경험하며 이번 절에서는 이러한 비탄성 균열손상을 모두 표현할 수 있는 소성손상모형에 대하여 설명한다. 소성손상모형은 연속손상모형을 소성론과 결합시켜 확장한 연속균열모형의 한 종류로서 최근에 콘크리트 구조물의 비선형 균열해석에 적합한 것으로 연구결과가 보고되고 있다. 이러한 손상모형은 변형연화를 보이는 다양한 취성재료에 적용이 가능하며 최소한의 수정으로 댐체 부근 기초 암반부의 균열해석을 위한 재료모형으로도 사용될 수 있다.

2.1 구성방정식

철근콘크리트 또는 콘크리트 구조물이 강한 동적 하중에 노출되어 구조적 손상을 받을 경우의 정밀한 응답해석 및 손상평가에는 반복하중 하에서 발생하는 미소균열 및 대균열을 표현할 수 있는 모형이 필요하며, 이러한 모형은 일반적으로 비선형 초기경계치 미분방정식으로 연립되는 구성방정식으로 기술된다. 유한요소법에서는 이러한 구성방정식이 연립 상미분방정식의 진전방정식(evolution equations)이 된다.

일반적으로 소성손상모형에서 응력은 강성도저하(stiffness degradation) 부분과 유효응력(effective stress) 부분으로 구성되며 손상은 강성도의 저하 및 비탄성 변형의 발생으로 표현된다. 유효응력 $\bar{\sigma} = E_0 : (\epsilon - \epsilon^p)$ 과 스칼라의 강성도저하모형을 사용하면 응력은 다음과 같이 표현된다:

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

여기서, D 는 강성도저하변수이며, E_0 는 초기탄성강성도텐서, ϵ 는 변형률텐서, ϵ^p 는 소성변형률텐서이다. 소성변형률은 콘크리트 구조체에 발생하는 균열을 연속체의 비탄성 잔류변형으로 표현하는 역할을 하며 여기서는 Drucker-Prager식을 이용하여 다음과 같은 진전방정식으로 계산된다.

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \left(\frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} + \alpha_p \mathbf{I} \right) \quad (2)$$

여기서, \mathbf{s} 는 유효응력텐서의 비체적(deviatoric) 성분이며, $\dot{\lambda}$ 는 소성파라미터, α_p 는 Drucker-Prager식의 파라미터, \mathbf{I} 는 단위텐서이다. Lee-Fenves 소성손상모형[Lee and Fenves, 1998a]에서는 콘크리트 구조체의 특정 지점에서의 손상을 표현하는 손상변수(damage variable) \mathbf{k} 는 인장손상과 압축손상을 나타내는 두 개의 변수 성분을 갖는 벡터로 표현된다. 인장손상변수는 단위체적의 파괴에너지(specific fracture energy)가 비탄성 변형으로 소산된 비율로서 정의되

며, 압축손상변수도 압축상태에서 이와 상응하는 방법으로 정의된다. 단위체적의 파괴에너지의 계산을 위해서는 균열폭과 연관된 특성길이(characteristic length) 개념을 이용한다.

콘크리트 파괴포락선은 손상변수벡터 κ 와 유효응력 $\bar{\sigma}$ 으로 정의된 다음과 같은 항복함수 F 로 결정된다:

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

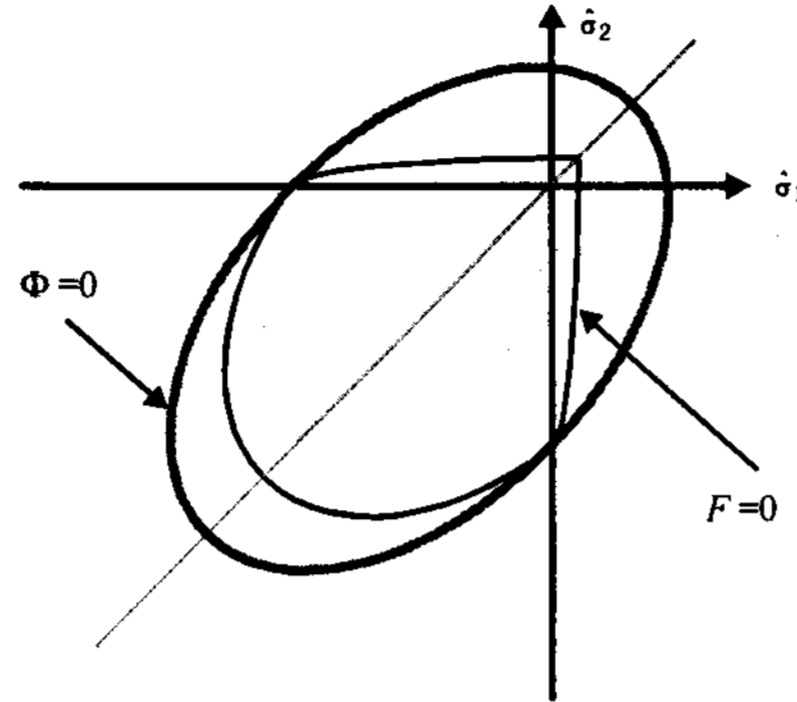


그림 1. Drucker-Prager 식과 Lubliner 식의 비교

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(invariant), $\hat{\sigma}_{\max}$ 는 최대주응력값, $\langle \rangle$ 는 Ramp 함수이다. 균열 상태에서의 식 (1)의 응력은 식 (3)으로 제한되는 유효응력과 다음 절에서 기술되는 강성도저하식으로 결정된다. 인장과 압축 강도 및 비탄성 거동이 크게 다른 콘크리트, 암반 등의 취성재료 특성으로 인하여 대부분의 파손포락면식의 일축압축 부분에서 미분불능점이 존재하며 이는 수치해석에서 좋지 않은 결과를 초래하는 원인이 될 수 있다. 이러한 문제는 콘크리트재료를 Non-associative Flow Rule로 기술하는 이유이기도 하다. 그림 1에 식 (2)와 (3)이 비교되어 있다.

2.2 콘크리트 댐체 및 기초 경계부 균열의 열림/닫힘 모형

지진하중과 같은 반복적 동적하중 하에서의 콘크리트 구조체의 강성도는 미세 및 대균열의 발생과 열림에 따라 감소되며 역방향 하중상태에 따른 균열의 닫힘으로 전부 내지는 일부 회복되기도 한다. Lee-Fenves 소성손상모형에서는 이러한 현상을 표현하기 위하여 식 (1)의 강성도저하변수 D 를 다음과 같이 정의한다:

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

여기서, D_c , D_i 는 각각 일축압축 및 인장 강성도저하지수, 그리고 주유효응력(principle effective stress) $\hat{\sigma}$ 의 가중치함수(weight function)로 구성된 $s(\bar{\sigma}) = \frac{\sum \langle \hat{\sigma}_i \rangle}{\sum |\hat{\sigma}_i|}$ 는 균열의 닫힘에 따른 강성도 회복을 표현하는 식이다.

3. 댐과 기초 경계부 모델링 방법론

일반적으로 중력식 콘크리트댐은 양질의 경암 기초부 위에 건설된다. 매우 큰 강성(rigidity)에도 불구하고 이러한 기초 암반부는 실제적으로 변형체이다. 기초부는 댐체 하부에 지반운동을 전달하는 매개체인 동시에 댐체와 연속적으로 결합되어 댐체의 전도 및 활동에 대한 저항력을 제공하는 하부구조체이다.

중력식 콘크리트댐의 지진피해는 주로 댐 중간부에서 수평으로 균열이 발생하며 댐 벽체의 상류와 하류 측에서 모두 발생하며 하류 측의 균열이 좀 더 심각한 것으로 평가된다. 균열은 표면에서 발생하기 시작하여 댐체 안으로 수평에 가까운 각도로 상당거리 전파하는 것을 진동대 실험[Niwa and Clough, 1980]에서 관찰할 수 있다. 이와 아울러 반드시 고려하여야 할 또 다른 파손양상은 댐체 하부와 기초 암반부 경계 부근에서 발생하는 균열이다. 이러한 균열은 균열의 발생위치가 상류 측 수중 하부라는 것과 댐체의 자체무게로 잔류변형 없이 닫히게 되어 실제로 관찰하기 매우 어려우나 중규모 이상의 지진하중에 노출될 경우 반드시 발생하게 된다는 것은 간단한 전산 해석실험으로도 예측할 수 있다[NRC, 1990]. 이러한 균열은 보통 상류 측 댐체의 하부와 기초경계면에서 기초 암반부를 일정한 각도로 관통하는 양상을 보이며 댐 중간부 수평 균열의 전파에도 영향을 미친다.

댐체 하부와 연결된 기초 암반부는 지지조건이나 구조물 바로 주변에 위치한 암반(Near Field Foundation)이 변형체로 모델링되며 다음과 같은 방법론이 사용된다.

- 1) 기초부를 강체로 해석할 경우: 강체 기초부(rigid foundation)는 댐체 하단(3차원 모형인 경우 하단 및 양 측단)의 구속 경계조건으로 표현: 댐 구조체 만 유한요소로 구성되어 모델링이 간편한 장점이 있다. 댐체 하단이 수직, 수평으로 지반운동과 같이 움직이는 것으로 가정하며 기초암반부의 변형 및 균열손상은 고려하지 못한다. 구조물의 진동과는 기초경계면에서 반사되어 실제 상황에는 존재하는 기초부의 에너지 흡수능력을 표현하지 못한다. 또한 댐체 하부에 실제보다 과도한 응력이 집중되는 것으로 해석된다.
- 2) 기초 암반부를 접촉요소(interface element)로 모델링: 1)의 모델링이 기초부의 변형을 무시하여 댐체 하단의 균열 발생 및 진전을 과대 평가하는 점을 보완하면서 댐 시스템의 모델링이 복잡해지는 것을 막기 위하여 댐체와 강체 사이의 접촉요소로 기초부를 표현하는 방법이다. 댐체 하단에 위치한 선형탄성 또는 비선형 접촉 메커니즘이 고려된 스프링요소가 주로 사용되며 댐체의 기초부에 대한 활동에 대한 메커니즘도 수평 스프링요소로 모델링한다. 댐체에 대한 균열 평가를 보다 현실적으로 수행하는데 도움이 되나 기초암반부를 일정 각도로 관통하는 균열에 대하여는 정밀하게 표현할 수 없다.
- 3) 댐체-기초부 시스템(dam-foundation interaction system)을 해석할 경우: 기초암반부의 물성에 근거한 탄성 또는 비탄성 유한요소로 댐체 주변 기초부를 표현한다. 복잡성의 증가로 인하여 2차원 해석에서 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 기초암반부의 하부와 측면은 다시 강체의 암반부와 연결되어 있다고 가정하여 구속조건이 사용된다. 입력 지반운동은 이러한 강체암반부에 대한 댐체-기초부 시스템의 상대적 운동으로 정의된다. 실제의 댐 건설 부지의 지반에서 이러한 변형체와 강체 암반부의 경계가 명확하지 않거나 존재하지 않는 문제가 있다. 강체로 시스

댐의 경계를 표현할 경우 실제와 다르게 진동파가 경계에서의 반사되며 이러한 파동에너지를 흡수하기 위한 특수요소(해석적 무한요소)를 경계 부근에 사용하기도 한다.

4. 콘크리트댐의 지진해석

4.1 해석대상

콘크리트 댐체 및 댐 기저부와 기초 경계부의 균열손상해석을 위한 전산해석모형을 실제 대규모 지진을 겪은 콘크리트댐의 파손사례에 적용하여 거동을 분석하고 성능을 평가하기 위하여 1967년 인도 Koyna에서 발생한 강진으로 댐체에 구조적 피해를 입은 Koyna 댐의 비선형 시간이력해석을 수행한다. Koyna 댐은 길이 850 m, 중심부 높이 103 m의 중력식 콘크리트 댐이다.

Koyna 댐은 1967년 인도 남서부 Koyna에서 발생한 규모 6.5, MM 진도 9의 강력한 지진으로 실제 균열이 발생한 경우로, 댐체의 균열모형을 평가하는데 적합하여 여러 전산실험연구의 대상이 되고 있다[Chopra and Chakrabarti, 1972; Lee and Fenves, 1998b; Vargas-Loli and Fenves, 1987].

4.2 전산실험모형

댐 길이 방향의 일정 두께로 격리된 댐체(monolith)의 유한요소모형은 전 절에서 기술한 평면응력의 소성손상모형 요소로 구성한다. 지진하중에 의한 댐체와 기초 경계부의 균열손상을 해석하기 위하여 댐체와 연속되게 기초 암반부를 유한요소로 모델링하였다(그림 2). 기초 암반부의 비탄성 재료거동도 소성손상모형을 사용하였다. 해석시간간격은 $\Delta t=0.005$ sec이고 지진해석은 10 sec까지 수행되었다. 해석에 사용된 콘크리트의 재료물성은 다음과 같다: 인장강도 = 2.9 MPa, 압축강도 = 24.1 MPa, 초기탄성계수 = 30 GPa, Poisson비 = 0.2, 파괴에너지 = 200 N/m, 밀도 = 2630 kg/m³.

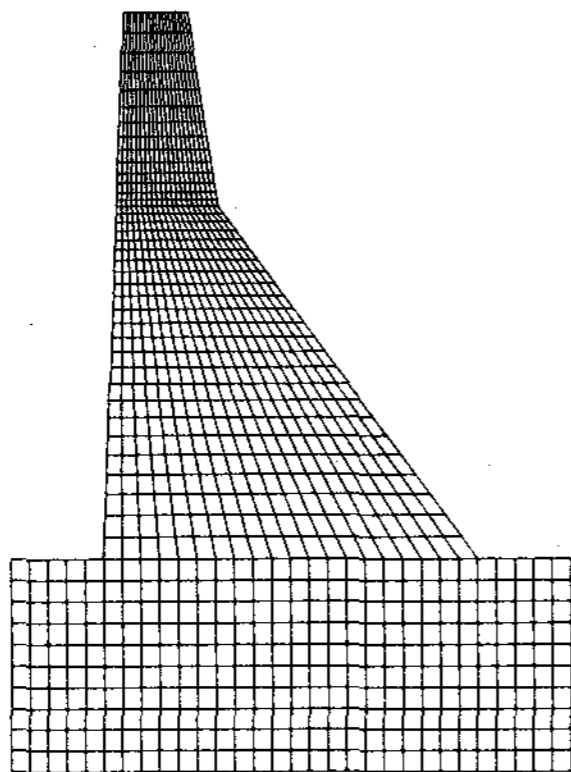


그림 2. 댐체와 기초 암반부의 유한요소모형

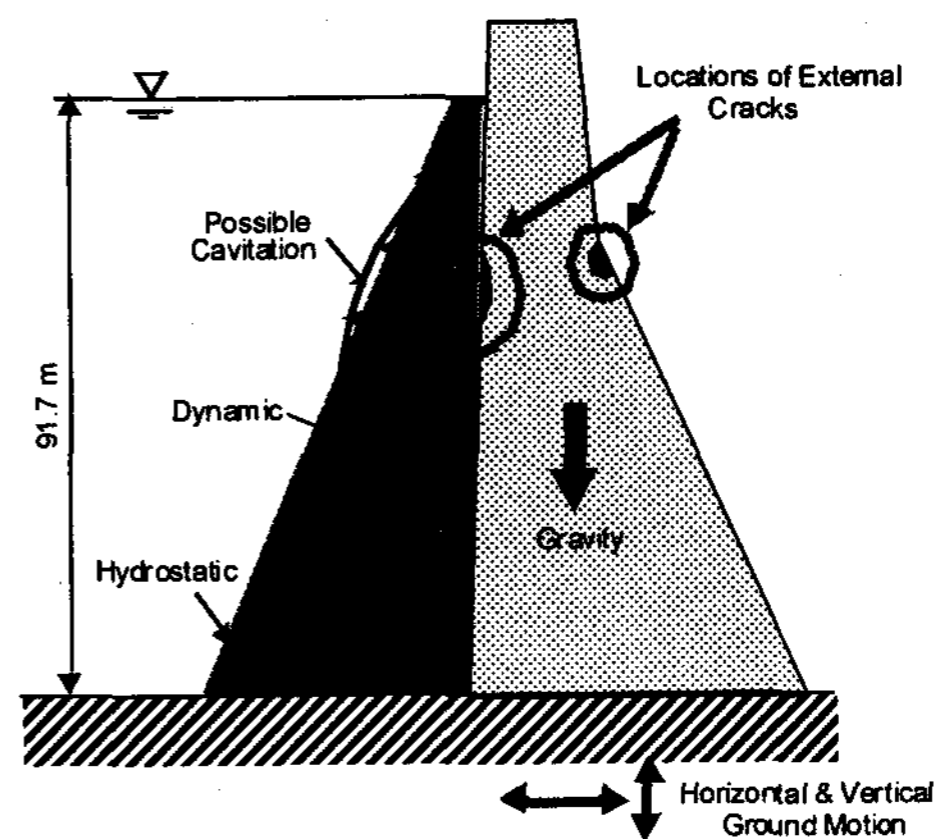


그림 3. 댐체에 작용하는 정하중 및 동하중

그림 3에 나타낸 바와 같이 댐 해석에 고려되는 하중은 수평, 수직지진력 이외에 댐체 자중, 정수압 및 동수압이 있으며, 동수압 하중의 계산에는 댐체의 변형이 유체에 미치는 영향이 무시할 정도로 작다고 가정하여 Westergaard 동수압식에 의한 부가질량법을 이용하였다.

4.3 해석 결과

그림 4는 댐 상단 상류 방향 지점에서 시간에 따른 수평변위의 변화를 나타낸다. 시작 시점에서의 초기 변위(약 5 mm)는 정수압으로 인하여 발생한 것이다. 댐 기초 암반부를 강체로 모형화한 경우[Lee and Fenves, 1998b]의 결과와 비교하여 하류방향(양의 수평변위 값)으로 댐의 변위가 증가하였다. 이러한 결과는 상류부 댐체와 기초 경계부에서 발생한 균열이 하류방향으로 강성도를 더욱 감소시키는 양상으로 발전하였으며 강체 암반부 모형에 비하여 실제 거동에 가깝다고 사료된다. 상류방향 최대 수평변위는 60 mm로 기초 암반부 모형과 관계없이 일정하며, 이는 상류 기초부 균열이 닫힘으로써 상류방향 변위에는 영향을 거의 미치지 않기 때문이다.

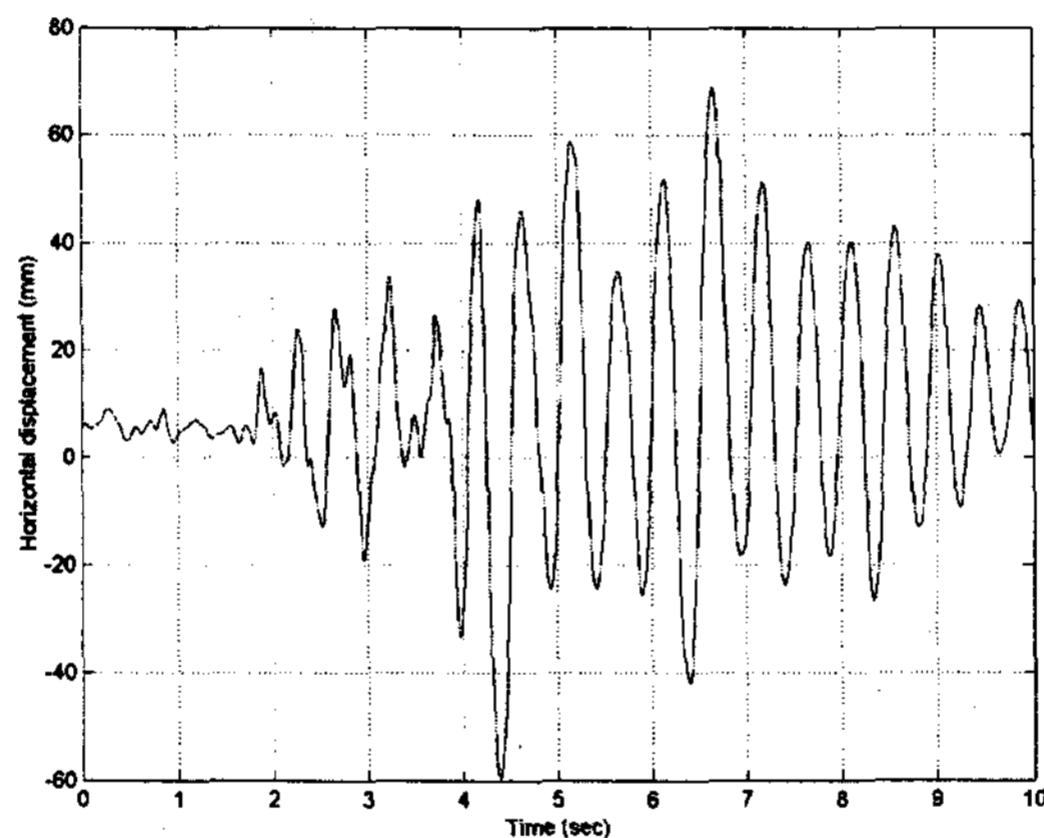
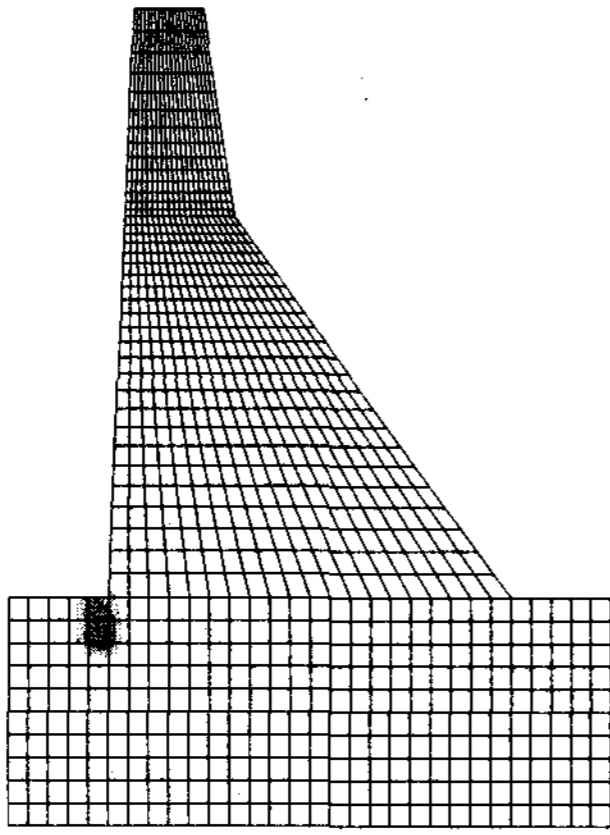
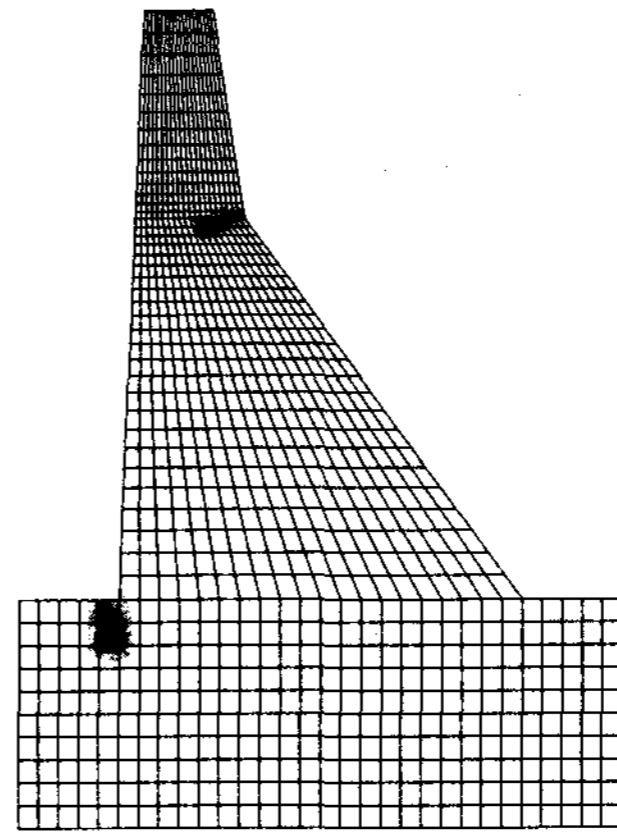


그림 4. 댐 상단 수평변위의 시간이력곡선

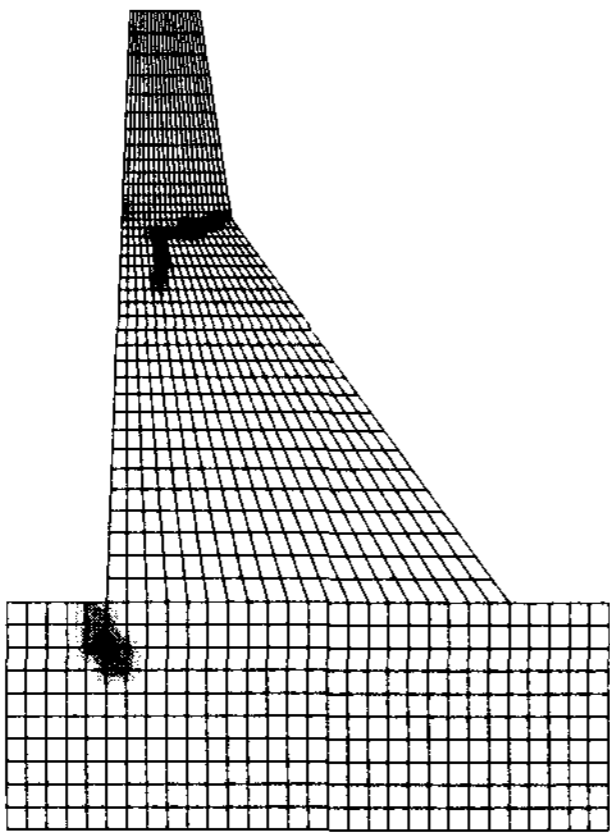
그림 5는 주요 시간 별로 댐체 및 기초 암반부에 균열이 발생하여 전파하는 양상을 보여준다. 초기 균열은 댐체의 상류부 하단과 기초 암반부가 만나는 지점에서 발생한다(그림 5a). 다음으로 댐체의 하류부 댐체 중간부에서 발생한 균열(그림 5b)은 중심부로 전파되다 상류부 동일 높이에서 별개로 발생한 균열과 합치된다(그림 5c, 5d). 상류 기초 경계부에서 발생한 균열은 점차 댐체 기초 암반부에 45° 기울기로 전파되며(그림 5d) 콘크리트 댐체의 자중으로 빠른 진전은 억제되는 것으로 보인다. 전산지진해석 결과, 균열은 지진 발생 5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



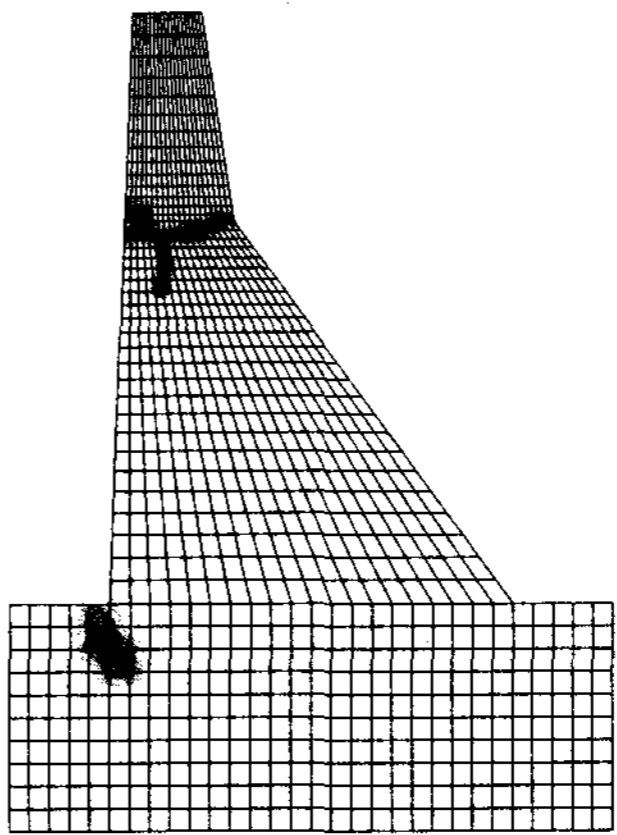
(a) 3.5 sec에서의 균열손상



(b) 4 sec에서의 균열손상



(c) 4.5 sec에서의 균열손상



(d) 5 sec에서의 균열손상

그림 5. 시간에 따른 균열손상의 전파 양상

5. 결 론

본 논문에서는 콘크리트중력댐의 내진성능을 평가하기 위한 지진해석방법에 대하여 고찰하고, 내진해석 및 성능평가를 보다 정확하고 사실적으로 수행하기 위하여 필요한 비선형 손상해석, 특히 주요 파괴양상이라고 할 수 있는 댐 기저부와 기초암반부 경계부근의 균열손상해석을 위한 전산해석모형 제시하였다.

콘크리트 댐체와 기초 암반부의 비탄성 재료모형으로는 Lee-Fenves 소성손상모형을 기반으로 개선된 균열손상모형을 사용하였다. 이러한 모형은 각 재료의 균열 거동과 아울러 경계부의 균열 전파도 표현할 수 있다. 제안된 콘크리트 댐체 및 기초 암반부 균열손상 모형을 이용하여 실제 대형 지진으로 파손된 콘크리트댐의 비선형 균열손상해석을 수행하였다.

해석 결과 본 연구에서 제안된 균열손상모형이 콘크리트 댐체 및 기초 경계부의 균열 발생 및 전파를 기존의 강체 기초부 모형에 비하여 보다 사실적으로 모사할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 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.
2. Golze, A. R., *Handbook of Dam engineering*, Van Nostrand Reinhold, 1977.
3. Hall, J. F., Dowling, M. J., and El-Aidi, B., *Defensive Design of Concrete Gravity Dams*, Caltech/EERL Report 91-02, California institute of Technology, 1991.
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. 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.
6. National Research Council, *Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance, and Research Needs*, National Academy Press, USA, 1990.
7. Niwa, A., and Clough, R. W., "Shaking Table Research on Concrete Dam Models", UCB/EERC-80/05, University of California, Berkeley, 1980.
8. Vargas-Loli, L. M. and Fenves, G. L., *Nonlinear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams*, The University of Texas at Austin, Texas, 1987.