

콘크리트댐 지진응답에서의 수직 지반운동의 영향

Effect of Vertical Ground Motion on Earthquake Response of Concrete Dams

이지호*

Lee, Jeeho

ABSTRACT

In the present paper computational simulation of a concrete dam is performed to determine the effect of vertical ground motions on earthquake response of concrete dams. Cyclic and dynamic versions of the plastic-damage model proposed by Lee and Fenves are used to represent micro-crack development and crack opening/closing, which is important mechanism in nonlinear damage analysis of concrete structures subject to strong earthquake loading. The result shows that the vertical component of ground motion effects on final crack patterns and consequently, on displacement response.

1. 서론

구조물 기초부에 도달한 지반운동은 특정방향으로의 수평 성분과 수직 성분이 존재하나 일반적으로 구조물의 선형 내진해석에서는 지반운동의 수평성분만이 고려된다. 그러나 콘크리트댐과 같은 깊은 보 형태의 구조물의 균열손상거동에는 균열의 전파과정에 수직 지반운동이 영향을 미칠 수 있다. 최근에는 콘크리트댐의 내진 성능 및 안전성평가에 정밀한 손상거동해석의 필요성이 대두되고 있으며 정확한 결과를 얻기 위해서는 고려하여야할 지진파와 이의 영향에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 콘크리트댐의 균열손상해석에서 수직 지반운동성분이 해석결과에 미치는 영향을 실제 콘크리트댐에 대한 수치시물레이션을 수행하여 고찰한다. 이러한 수치해석에는 동하중 상태에서의 복잡한 손상 메카니즘을 정밀하게 표현하는 이론적 모형이 필요하다. Lee-Fenves의 소성손상모형[Lee and Fenves 1998a]과 이의 동해석을 위한 확장모형[Lee and Fenves 1998b]은 반복하중 및 동하중 하에서의 콘크리트 구조체의 손상에 따른 미세균열의 발생과 닫힘, 대균열로의 진전을 연속체이론으로 효과적이고 정밀하게 나타낼 수 있는 것으로 알려졌으며 본 연구에서 수치모형의 근간으로 사용한다.

* 동국대학교 토목환경공학과 전임강사, 정회원

2. 콘크리트 구조물의 지진해석을 위한 소성손상모형

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 되며 본 연구에서는 Lee와 Fenves의 소성손상모형[Lee and Fenves 1998a]을 사용한다.

소성손상모형에서 응력은 강성도저하(stiffness degradation) 부분과 유효응력(effective stress) 부분으로 구성되며 스칼라의 강성도저하모형을 사용하면 다음과 같이 표현된다:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{E}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (1)$$

여기서, D 는 강성도저하변수이며, \mathbf{E}_0 는 탄성강성도텐서, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 는 변형률텐서, $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 는 소성변형률텐서이다. 소성변형률은 콘크리트 구조체에 발생하는 균열을 연속체의 비탄성 잔류변형으로 표현하는 역할을 하며 여기서는 Drucker-Prager식을 이용하여 다음과 같은 진전방정식으로 계산된다:

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

여기서, \mathbf{s} 는 유효응력텐서의 Deviatoric 성분이며, $\dot{\lambda}$ 는 소성파라미터, α_p 는 Drucker-Prager식의 파라미터, \mathbf{I} 는 단위텐서이다. Lee-Fenves 손상모형에서는 인장과 압축 축의 손상지수로 이루어진 벡터 $\boldsymbol{\kappa}$ 로 유효응력 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 의 범위를 제한하는 항복함수 F 를 정의한다.

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

여기서, α 와 β 는 항복함수의 형상을 결정하는 파라미터이고 c 는 항복함수의 크기를 결정하는 파라미터이며 I_1 과 J_2 는 유효응력의 Invariant, $\hat{\sigma}_{\max}$ 는 최대주응력값, $\langle \cdot \rangle$ 는 Ramp 함수이다.

식 (2)와 (3), $\boldsymbol{\kappa}$ 에 대한 진전방정식, 그리고 Kuhn-Tucker 조건에 의한 하중재하상태 결정식에 의하여 식 (1)의 응력이 결정되며 D 는 강성도의 변화를 통한 균열모형을 위한 변수가 되며 다음 절 2.2에서 기술되는 식으로 결정된다.

2.2 균열모형

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:

$$D = 1 - (1 - D_c(\boldsymbol{\kappa}))(1 - sD_l(\boldsymbol{\kappa})) \quad (4)$$

여기서, D_c , D_l 는 각각 일축 압축 및 인장강성도저하지수, 그리고 $s = s(r(\hat{\boldsymbol{\sigma}}))$ 는 균열의 닫힘을 표현하는 식이며 r 은 주유효응력(principle effective stress) $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ 의 가중치함수(weight function)이다.

2.3 연속 점탄성 감쇠모형

소성손상모형에서는 균열을 연속체의 비탄성변형으로 표현하는데 이 값에 기초한 변형률은 탄성변형률에 비해 상대적으로 크며 동해석 문제에서는 과대한 감쇠력을 유발한다[El-Aidi and Hall 1989]. 실제의 경우, 균열 사이에 감쇠력은 오히려 감소하거나 사라진다. 연속적 균열모형의 이러한 과대 감쇠력을 상쇄시키기 위하여 여러 방법이 제안되었으며 그 중 Lee와 Fenves에 의하여 제안된 연속적 점탄성 감쇠모형[Lee and Fenves 1998b]을 본 연구에서는 사용한다.

비선형 운동방정식에서 감쇠력을 포함한 내력 \mathbf{P} 는 다음과 같다:

$$\mathbf{P} = \int \mathbf{B}^T \sigma d\Omega + \int \mathbf{B}^T \chi d\Omega \quad (5)$$

여기서, \mathbf{B} 는 변형률-변위관계매트릭스이다. χ 는 감쇠력을 형성하는 점탄성력이며 연속 점탄성 감쇠모형에서는 강성도저하변수 D 를 이용하여 정의된다:

$$\chi(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = b_0(1 - D)\mathbf{E}_0 \dot{\mathbf{e}} \quad (6)$$

식 (6)의 점탄성력은 비탄성변형의 증가, 즉 손상의 증가와 함께 감소되게 된다.

3. 지진해석에서의 수직 지반운동성분

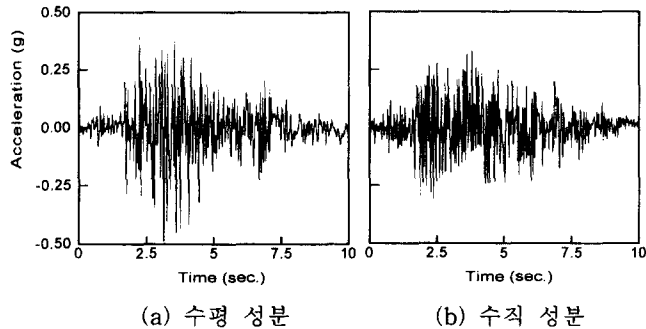


그림 1. 1967년 인도 Koyana 지진의 수평 및 수직 지반운동성분(지반가속도)

지진에 의한 지반운동은 특정방향으로의 수평과 수직 성분으로 나뉘며 균열 손상의 발생 및 진전에 의한 재료비선형성을 고려하지 않는 콘크리트댐의 동적응답해석에서 지반운동의 수직 성분은 큰 영향을 미치지 않으며, 특히 선형탄성해석에 의한 동적응답 결과에는 기여하는 바가 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근에 발생한 강력한 지진에 의한 콘크리트 구조물 피해에서 볼 수 있듯이 수직 지반운동성분이 구조물 손상의 형태에 영향을 주고, 결과적으로 피해를 확대시킬 수도 있다. 그림 1에는 1967년 인도 남서부에서 발생한 규모 6.5, MM 진도 9의 Koyana 지진의 수평 및 수직 지반운동성분이 나타나 있으며 수직 성분의 강도가 수평 지반운동성분에 비견할 정도인 것을 알 수 있다[Chopra and Chakrabarti 1973].

이러한 수직 지반운동성분은 콘크리트댐과 같은 깊은 캔틸레버보 형태 구조물의 손상 형태에 상당한 영향을 미치며 이는 지진 하에서의 균열의 진전에 상대적으로 시간이 소요되어 수직성분이 구조물의 최종 파손 이전에 진전방향에 기여할 수 있기 때문으로 사료된다.

4. 손상을 고려한 콘크리트댐 응답해석에서의 수직 지반운동의 영향

4.1 Koyna 댐 수치모형

본 연구에서는 수직 지반운동성분의 영향을 평가하기 위하여 1967년 인도 Koyna에서 발생한 강진으로 실제 구조적 피해를 입은 Koyna 댐의 비선형 동적손상해석을 2절에서 기술한 소성손상 모형을 이용하여 수행한다. 2절의 소성손상모형은 유한요소법과 함께 사용되도록 Return-Mapping 알고리즘[Simo and Taylor 1985; Lee and Fenves 2001]을 적용하여 수치모형으로 변환된다[Lee and Fenves 1998a; Lee and Fenves 2001]. Koyna 댐의 유한요소모형은 평면응력 상태의 4절점 4변 Isotroparametric 요소로 구성되며 유한요소망은 그림 2에 나타나 있다.

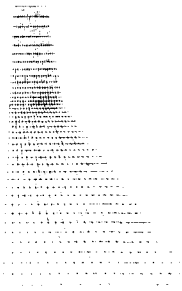


그림 2. Koyna 댐 유한요소망

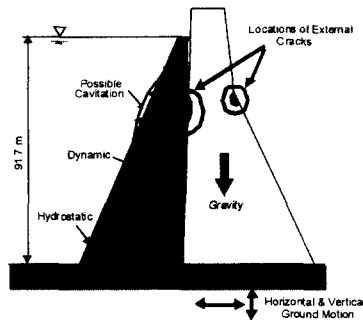


그림 3. 댐에 작용하는 하중

Koyna 댐의 기초는 댐 콘크리트재료 강도에 비교하여 매우 강성이 높은 경암으로 구성되어 있으며 이를 고려하기 위하여 본 연구에서는 별도의 기초모형을 생략하고 하단의 구속 경계조건으로 모형화 하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 댐 해석에 고려되는 하중은 지진력 이외에 댐체 자중, 정수압 및 동수압이 있으며 동수압 하중의 계산에는 댐체의 변형이 유체에 미치는 영향이 무시할 정도로 작다고 가정하여 Westergaad 동수압식을 이용하였다.

4.2 해석결과

비선형 운동방정식의 수치적분에는 해의 안정성을 고려하여 Generalized Midpoint법[Simo 1992]이 사용되었으며 해석시간간격은 0.005 sec이다. 시간이력해석은 그림 1의 Koyna 지진의 수평 지반가속도성분만을 적용한 경우(해석 1)와 수평 및 수직 성분을 모두 사용한 경우(해석 2)로 나누어서 수행되었다.

각각의 해석경우에 대한 댐 상단에서의 수평 변위응답 결과곡선은 그림 4와 같다. 수평 지반 운동성분만을 적용한 경우보다 두 성분을 모두 사용하여 계산한 결과의 변위응답에서 평균 변위 값 및 최대값이 큰 것으로 나타났다. 최대 수평 변위는 두 경우 모두 상류 방향으로 발생하며 해석 2의 경우가 해석 1보다 21% 정도 크다.

이러한 경향에 대한 해석은 그림 5에 표시된 해석 1의 균열손상분포도와 그림 6에 표시된 해

석 2의 균열손상 분포도를 비교하여 얻을 수 있다. 해석 1의 경우 균열은 하류 측 댐체의 급격한 형상변화 부분에서 발생하여 상류 측으로 수평 전진하다가 중앙 부근에서 댐의 하단을 향하여 직각에 가까운 방향으로 전파하다가 정지하는 것을 볼 수 있다. 이런 방향전환은 강체진동을 하는 균열 상부 댐체의 자중의 영향으로 발생한다. 상류 측 댐체에서 독립된 균열이 발생하여 하류 측 균열과 합하여진다.

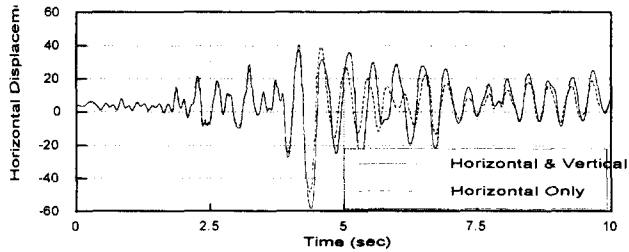


그림 4. 댐 상단에서의 수평 변위응답 결과곡선 비교

그림 6의 해석 2의 결과에서 하류 측 균열은 해석 1의 경우보다 완만하게 하단부를 향하여 전파하며 결과적으로 상류 측에 좀 더 접근하게 된다. 이는 수직 지반운동성분이 수평 전파하는 균열의 진전방향을 수평으로 유지시키는 외력의 역할을 하였기 때문으로 판단된다. 수평 방향으로 상대적으로 더 길고 완만하게 진전된 균열은 해석 2의 변위응답이 해석 1의 경우보다 더 크게 나온 원인이 된다.



그림 5. 수평 지반운동 성분에 의한 균열손상

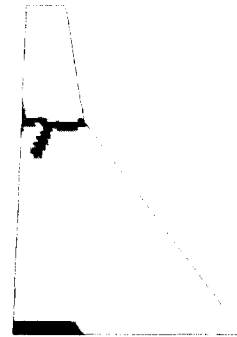


그림 6. 수평 및 수직 지반운동 성분에 의한 균열손상

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트댐이 강한 지반운동에 의하여 균열발생과 같은 대규모 손상을 입을 경우에 대한 해석적 평가에서 수직 지반운동성분이 결과에 미치는 영향을 소성손상모형과 유한요소법에 의한 수치모형을 사용하여 고찰하여 보았다.

콘크리트 댐의 수치시물레이션에 의한 응답해석결과 수직 지반운동성분을 수평운동성분과 함께 고려할 경우가 그렇지 않을 경우보다 최대 수평 변위값이 21% 정도 큰 결과를 나타내며 이는 하류 측 댐체에서 발생한 균열이 댐체 내부로 수평 전파하다 중앙부 부근에서 방향을 하단쪽으로 바꾸는 과정에서 수직 지반운동성분이 진전 크기 및 각도에 영향을 미치기 때문으로 분석된다.

수직 지반운동성분이 콘크리트댐의 균열손상해석 결과에 미치는 영향이 상당한 것으로 나타남에 따라 콘크리트댐 및 이와 유사한 구조물의 정밀 내진성능평가를 위한 수치시물레이션에서 수평 지반운동성분과 함께 사용되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. A.K. Chopra, and P. Chakrabarti(1973), "The Koyna earthquake and damage to Koyna dam," Bull. Seimol. Soc. Amer., Vol.63, pp.381-397.
2. B.El-Adi, and J.F.Hall(1989), "Nonlinear earthquake response of concrete gravity dams, part 1: modeling; part2: behavior," Earthquake Engrg. Str. Dyn., Vol.18, pp.837-865.
3. J.Lee and, G.L.Fenves(2001), "A return-mapping algorithm for plastic-damage models: 3-D and plane stress fomulation," Int. J. Numer. Meth. Engrg, Vol 50., pp.487-506.
4. J.Lee and, G.L.Fenves(1998a), "A plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures," J. Engrg. Mech., ASCE, Vol 124., pp.892-900.
5. J.Lee and, G.L.Fenves(1998b), "A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams," Earthquake Engrg. Str. Dyn., Vol.27, pp.937-956.
6. J.C.Simo(1992), "Algorithm for static and dynamics multiplicative plasticity that preserve the classical return mapping schemes of the infinitesimal theory," Comput. Meth. Appl. Mech., Vol.99, pp.61-112.
7. J.C.Simo, and R.L.Taylor(1986), "A return mapping algorithm for plane stress elastoplasticity," Int. J. Numer. Meth. Engrg, Vol 22., pp.649-670.