

해석방법에 따른 콘크리트댐의 내진성능평가

The Evaluation of Seismic Performance on the Concrete Dam of Analysis Method

임 정 열*
Lim, Jeong Yeul

이 종 욱**
Lee, Jong Wook

오 병 현***
Oh, Byung Hyun

국문요약

국내 콘크리트댐의 경우 내진설계는 관성력을 고려한 진도법을 적용하여 설계를 하고 있으나, 보수적인 설계 방법으로 동적특성을 반영하지 못하는 단점이 있어, 동적특성을 고려한 댐 내진설계가 필요하다. 또한 콘크리트댐 내진성능평가는 동적해석으로 평가해야 하지만, 국내의 경우 대부분 진도법으로 평가를 하고 있어 현행 기준을 적용하기에는 어려운 점이 있다. 이에 본 연구에서는 진도법, 수정진도법, 동적해석 방법을 수행하여 내진설계 및 내진성능평가 결과에 대해서 비교 분석하였다.

주요어 콘크리트댐, 진도법, 수정진도법, 지진응답, 내진성능평가

ABSTRACT

The seismic design of the domestic concrete dams has done by seismic coefficient method considering inertia force, but this method has direct not reflect dynamic properties, as a conservative design method. Therefore, it is necessary for seismic design of dam to consider dynamic properties. Also, concrete dam evaluation of seismic performance has done by seismic coefficient method - in fact, it may done by dynamic analysis - that has many problems when applied to the domestic criteria. This study make a comparative analysis for result from seismic design and evaluation of seismic performance by seismic coefficient method, modified seismic coefficient method, and dynamic analysis method.

Key words : concrete dam, seismic coefficient method, modified seismic coefficient method, seismic response, evaluation of seismic performance

1. 서 론

기존 다목적댐의 경우에 건설당시 국내에서 댐 내진설계에 대한 기준이 없어 외국의 내진설계기준을 반영하였으나, 내진설계에 대한 관심이 높아지기 시작하여 건축물, 교량 등 외에도 댐 역시 지진구역에 따라 관성력을 고려한 진도법들을 적용하여 내진설계에 반영하도록 하였다. 그러나 진도법의 경우는 보수적이고 간편한 설계방법이나 지진응답에 대한 동적특성을 반영하지 못하는 단점이 있으며, 또한 기존댐에 대하여 강화된 내진설계기준을 적용하여 진도법으로 내진성능평가를 실시하는 것 역시 현실성을 반영하지 못한다는 결과가 제시되었고⁽¹⁾, 국내에서도 1995년 효고현 남부(Kobe) 지진 이후 댐에 대한 내진설계방법 및 내진성능평가에 대한 시각이 달라지기 시작했다. 이에 따라 2001년도에 댐에 대한 내진설계기준⁽²⁾을 개정하여 콘크리트 댐 내진설계는 경험적인 방법인 진도법으로 설계하는 것을 기본으로 하지만, 본질적인 지진에 대한 거동을 정확히 해석할 경우는 동적특성을 반영한 동역학적인 해석을 하도록 하였다. 하지만, 동적해석에 대해서는 현재 많은 연구가 진행되었고^{(3),(4)}, 또한 많은 연구가 필요한 실정으로, 이에 본 연구는 콘크리트댐에 대해서 정역학적 해석방법인 진도법, 수정진도법(동적특성 반영), 그리고 동역학적인 방법인 지진응답해석을 실시하여 각 방법에 대한 내진설계방법 및 내진성능평가에 결과를 비교분석 하였다.

2. 댐 내진설계 기준

댐에 대한 국내 내진설계 기준은 1993년 '댐시설기준'⁽⁵⁾이 개정되면서 도입되었으며, 내진설계 방법은 관동대지진이후 1925년 Mononobe(物部)가 제안한 강성이 큰 구조물에서는 지반가속도와 동일한 가속도가 등분포형태로 구조물에 작용한다는 가정을 기초로한 정역학적인 방법인 진도법으로 제시하였다.⁽⁶⁾ 그러나 국내의 경우 1995년 효고현 남부지진을 비롯한 국내·외 지진의 발생 빈도가 증가하여 댐을 비롯한 특수구조물에 대한 내진설계 및 내진성능평가방법에 대한 현실적인 기준의 정립이 필요한 실정이었다.

이에 1997년 건설교통부에서 수행된 시설물의 '내진설계 기준연구II'⁽⁷⁾의 일부로서 기존의 지진위험도와 지진구역을 재검토하여 좀더 정밀한 지진재해지도를 작성하였다. 새로운 지진재해도는 한반도에서 각각 5, 10, 20, 50, 100, 250년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 가속도를 등치선 형태로 나타낸 것이며, 이러한 기간과 확률에 해당하는 평균재현주기의 값은 50, 100, 200, 500, 1000, 2400년으로 한다. 댐에 대해서는 내진특등급인 경우 내진설계기준을 기능유지수준(지진재해도 재현주기 200년)과 붕괴방지수준(지진재해도 재현주기 2400년)으로 나타내었고, 진도법을 기본으로 설계 및 평가하도록 하였지만, 현실적인 기준으로 정립하기에는 추가적으로 고려할 사항들이 많아 개정이 불가피한 실정으로서 지난해 9월 건설교통부에서는 '댐시설기준'⁽⁸⁾을 개정하여 '댐설계기준'⁽²⁾을 제시하였다.

개정된 내진설계기준은 댐 내진등급의 경우 댐의 중요도에 따라 내진특등급과 내진1등급댐으로 구분하고 있으며, 내진

* 정회원 : 수자원연구원 댐안전연구소, 연구원(대표저자 : passion@kowaco.or.kr)

** 수자원연구원 댐안전연구소, 연구원

*** 수자원연구원 댐안전연구소, 수석연구원

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 10. 25 / 심사종료일 : 2003. 8. 12)

특등급 댐은 붕괴방지수준의 경우 설계 지진 평균재현주기를 재현주기 1000년으로 결정하여 지진구역I과 지진구역II의 지진계수는 0.154g와 0.098g가 되어 1993년(0.12g, 0.08g) 기준보다는 조금 강화된 값이다.^{(2),(5)}

또한 댐에 대한 내진설계는 진도법으로 이루어져 있어 지진응답에 대한 동적특성이 반영되지 못하고 있으나, 현재는 많은 연구가 진행되어 필댐의 경우 진도법을 보완하여 동적특성을 반영한 수정진도법을 설계에 요구하고 있다⁽²⁾. 콘크리트댐의 경우는 아직까지 진도법을 설계에 반영하고 있지만, 일본 등 외국에서 설계는 진도법과 수정진도법을 사용하고, 내진성능평가는 기존평가 방법보다는 지진응답에 대한 현실성을 고려한 동적해석(응답스펙트럼, 시간이력해석)을 평가에 이용하고 있는 추세다. 또한 고베지진이후, 일본에서는 진도법으로 설계된 댐에 대해서 동적해석에 의한 내진성능평가가 수행되었다.⁽⁶⁾

3. 댐 내진설계 방법

3.1 등가정적해석법(진도법) 및 수정 등가정적해석법(수정진도법)

콘크리트댐과 같이 탄성변형이 적은 강체로 간주할 수 있는 구조물에서는 지반가속도와 동일한 가속도가 등분포로 작용한다는 관성력을 도입하여 정역학적으로 취급한다. 진도법은 설계지진계수와 댐체의 무게를 곱하여 댐체에 등분포로 수평으로 작용시켜 지진력을 구한다. 연직진도는 진원지 부근이 아니면 수평진도의 1/3~1/2이하로 산정하며, 일반적으로 해석시에는 수평진도만을 고려하고, 연직진도는 연직진동을 받을 것으로 예상될 경우에 한하여 고려하는 것으로 한다.

그러나, 지진시 구조물의 모든 관측결과에 의하면 상부진동은 하부진동에 비하여 크며, 그 비도 매우 크다. 그러므로 높이가 높은 구조물의 경우에 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 것이 보다 더 합리적일 것이다. 수정진도법에 있어서도 시간적으로 변화하는 지진력을 정적인 힘으로 치환하여 해석을 행하는 것으로, 정적해석의 일종이다. 다만, 지진동과 구조물의 동적성질을 입력하여 정적인 힘을 결정하는 것을 나타내기 때문에, 유사정적해석에 의한 내진설계법으로 분류되어 진다. 그림 1은 콘크리트댐의 설계진도에 대해서 첫 번째는 진도법(지진력 등분포), 두 번째는 1차 진동모드(지진시 동적특성 반영)하는 형상을 보이고 있다.⁽⁹⁾

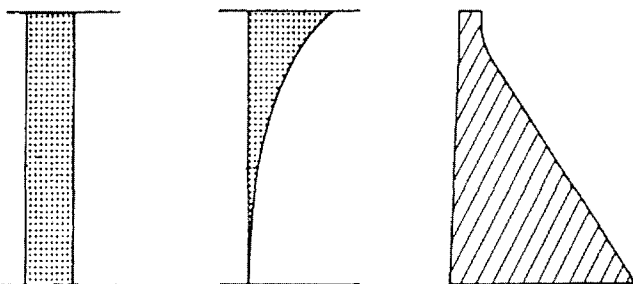


그림 1 콘크리트 댐 설계진도 분포

3.2 지진응답해석법

구조물의 형상이 단순하여 1차 진동모드가 탁월하고 고차모드의 영향을 무시할 수 있는 경우에는 등가정적해석방법(진도법)이나 수정등가정적해석방법(수정진도법)에 의해 구조물의 실제의 지진시의 응답을 나타낼 수 있다. 그러나 진동형상이 복잡한 구조물이나 댐과 같은 중요도가 높은 구조물에 대해서는 상세한 내진 검토가 요구되기 때문에 동적해석법이 사용된다. 동적해석법은 대상으로 하는 구조물 혹은 구조물과 지반을 모델화 하여 지진입력으로 지진동 파형(시간이력해석) 또는 응답 스펙트럼을 입력하여 해석하는 방법으로 등가정적해석법에 비해 보다 실제 현상에 가까운 거동을 재현할 수 있고, 원리적으로 어떠한 구조물에도 적용할 수 있는 방법이다.⁽¹⁰⁾

4. 수치해석 방법

본 연구는 해석방법에 따른 콘크리트댐의 내진성능평가로 기존 콘크리트댐에 대하여 적용 지진력은 수평방향만을 고려하여 정적해석방법인 댐 설계시 적용한 진도법, 진도법을 보완하여 동적특성을 반영한 수정진도법 그리고 동적해석방법인 지진파를 적용한 지진응답해석법(시간이력해석)을 이용하여 그에 대한 결과를 비교분석 하였다.

4.1 해석조건

본 연구 대상 댐의 해석 단면(D1, D2)은 그림 2와 그림 3에 제시한 바와 같으며, 설계단면 중 비월류부에 대한 최대 단면을 설정하였고, 물성치는 기존 자료를 참고하여 표 1과 같이 결정하였다. 해석 방법은 지표에서 관측된 지진동에서 암반까지의 입력지진동을 동일하게 정해야 할 필요가 있어 복잡하기 때문에 댐 기초지반을 강체(체체저면 고정경계)로 모델링한 선형탄성해석을 수행하였다.⁽⁸⁾

본 해석에서 적용한 프로그램은 1975년 Georgia Institute of Technology에서 개발한 범용 구조해석 및 설계용 소프트웨어로 정·동적 해석, 선형·비선형 해석, SSI 해석 및 설계

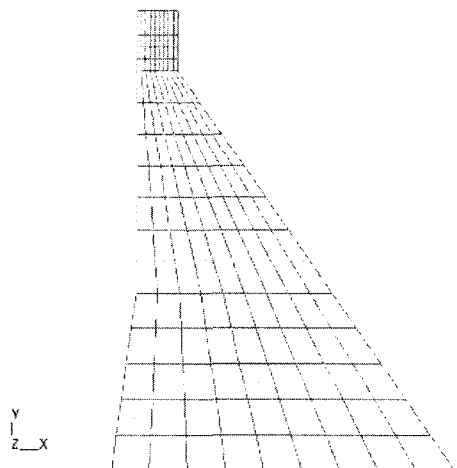


그림 2 대상댐 모델링(D1)

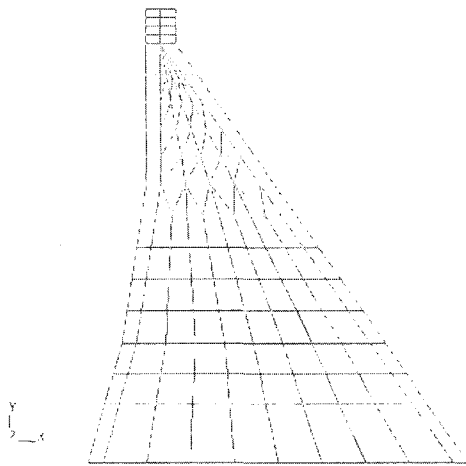


그림 3 대상댐 모델링(D2)

표 1 해석 단면 제원

| Division | D1 | D2 |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| 저원(높이/길이) | 62m/495m | 85.5m/447m |
| 상시만수위(N.H.W.L) | 55.6m | 79m |
| f_{ck} | 265(kgf/cm ²) | 275(kgf/cm ²) |
| Poisson's Ratio | 0.2 | 0.2 |
| Model Joint number | 180 | 149 |
| Node Element number | 153 | 148 |
| Damping | 5% | 5% |
| Mode | 20차 | 25차 |

문에 적용할 수 있는 GT-STRUDL을 이용하였으며, 유한요소 모델은 2차원 평면(X-Y 평면)에서 평면변형율(Plane Strain)을 이용하였고, 삼각형 요소는 3 node를 갖는 CSTG, 사각형 요소는 4 node를 갖는 IPLQ(Isoparametric Linear Quadrilateral) 모형을 이용하여 모델링을 실시하였다.⁽¹¹⁾

4.2 동수압 및 지진파

본 해석에서 콘크리트 댐에 작용하는 수하중은 표 1에서 제시한 상시만수위(N.H.W.L)를 기준으로 설정하였으며, 지진시 발생하는 동수압은 그림 4와 같이 Westergaard의 가정을 기본으로 지진시 동수압의 근사해로부터 지진력 작용시

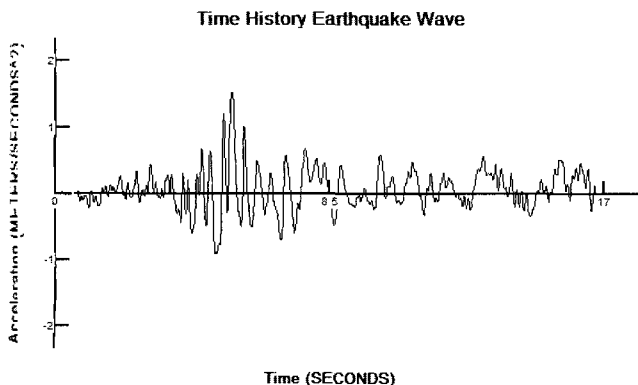


그림 5 Hachinohe NS Wave

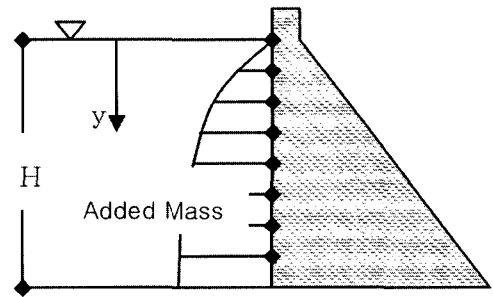


그림 4 Westergaard Added Mass

물의 질량이 댐에 부가하고 댐과 같이 거동하는 것처럼 관성력을 계산하여 댐에 주는 동수압의 영향을 고려할 수 있다. 이때의 부가질량은 댐 체체 상류면의 각 절점에 합산하여 해석을 수행하며, A_m 은 다음 식 (1)로 표현되는 동수압 근사식으로부터 유도된 물의 부가질량(Added Mass)이다.^{(12),(13)}

본 연구에서 지진응답해석에 사용한 지진동은 인공지진파(지진구역I - 경암, 0.154g, 국내표준응답스펙트럼 적용)와 Hachinohe NS파(1968년 Tokachi-Earthquake, Peak 5.47sec, 0.2374g)이며, 본 연구에서는 지진파의 최대가속도를 1.5092m/sec²(0.154g)로 조정하여 사용하였고, 각 지진동은 그림 5와 그림 6에 표시하였다.

$$A_m = \frac{7\gamma_w}{8g} \sqrt{H \cdot y} \quad (1)$$

여기서,

γ_w : 물의 단위중량

g : 중력가속도

H : 댐높이

y : 임의점까지 수위

4.3 평가 방법

해석방법에 따른 콘크리트댐의 내진성능평가는 정적해석 방법인 진도법과 수정진도법의 경우는 각 적용방법에 따라 응력과 변형을 산출하여 표 2의 국내 댐 설계기준을 이용하여 평가하였다. 또한 동적해석방법인 시간이력해석방법은 동적해석 결과와 정적해석에 대한 결과를 합산하여 평가를 실시하였다.^{(8),(14)}

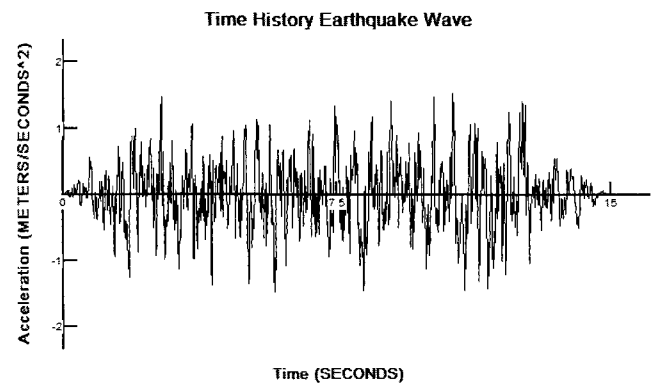


그림 6 Artificial Earthquake Wave

표 2 국내 댐 설계기준과 USACE 기준 비교

| 구 분 | | 국내(2001. 댐설계기준) | | 미국(1995, USACE) | | |
|------|----|---------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | 정적해석 | 동적해석 | 정적해석(Usual) | Unusual(OBE) | Extreme(MCE) |
| 허용응력 | 압축 | $0.25f_{ck}$ | $0.25f_{ck} \times 1.3$ | $0.3f_{ck}$ | $0.5f_{ck}$ | $0.9f_{ck}$ |
| | 인장 | $0.42\sqrt{f_{ck}}$ | $0.42\sqrt{f_{ck}} \times 1.3$ | 0 | $0.6f_{ck}^{2/3}$ | $1.5f_{ck}^{2/3}$ |

국내의 경우 지진력 작용시 응력에 대한 평가 기준은 일본과 같으며, 기존 댐에 대한 내진성능평가는 콘크리트의 압축·인장응력에 대해서 정적인 조건에서 실시하여 지진력 고려시 정적인 조건의 30% 할증을 하여^{(2),(5)} 평가를 하고 있으나, 지진응답해석시 구조물에 발생하는 인장응력은 예측할 수 없는 결과와 순간적으로 발생하는 경우이기 때문에 기존의 국내 평가기준을 적용하기에는 어려운 점이 많다. 표 2는 국내의 댐 설계기준과 미국 USACE의 기준을 비교한 것이다.^{(2),(3),(15)}

뒷굽에서 발생하였고, 이는 모델의 경계조건으로 나타난 현상으로 판단된다. 최대 변위는 D1=3.19mm, D2=5.04mm가 발생하였으며, 그림 8~11을 보면 댐체에 발생한 최대압축응력과 최대인장응력은 D1은 각각 10kgf/cm², 6.6kgf/cm²이며, D2는 각각 13.9kgf/cm², 8.6kgf/cm²로 나타났다. 위 모델댐의 결과를 보면 진도법 적용시 댐의 높이에 따라 변위와 응력의 차이를 보이고 있으나, D1, D2 댐 모두 콘크리트 댐의 허용인장응력(표 2 적용)은 지진조건에서 30% 할증된 9.05kgf/cm² 보다 작은 값을 나타낸다.

5. 해석 방법에 따른 댐 내진성능평가

본 연구에서는 모델 댐 D1, D2에 대해서 4.2절의 수평방향 지진계수를 적용하여 진도법, 수정진도법, 시간이력해석 방법을 이용하여 비교분석을 하였다.

5.1 진도법

모델 댐(D1, D2)에 대한 해석결과 최대 변위는 각각 댐 정부에서 x 방향으로 발생하였으며, 최대응력은 댐 상류면

5.2 수정등가정적해석법(수정진도법)

수정진도법의 개념을 최초로 도입한 Chopra 교수는 인도 Koyana 댐이 손상을 입어 콘크리트댐의 경우는 수평지진력의 분포가 댐체의 높이에 따라 균등한 형태가 아니고, 댐과 같이 짧은 진동주기를 가지는 구조물은 기본진동모드에 의한 응답이 발생되어 지진력의 분포가 그림 1, 그림 12와 같다고 제시하였다.⁽⁹⁾

이에 본 연구에서는 모델 댐 D1, D2에 대해서 기본 진동모드에 따라 수평지진력을 산정하여 해석을 수행하였다. 해석

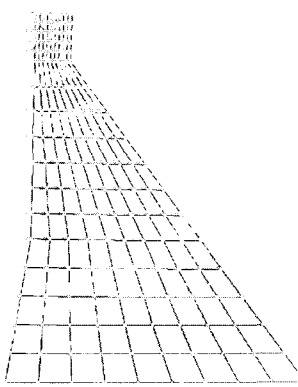


그림 7 진도법시 D1 변위

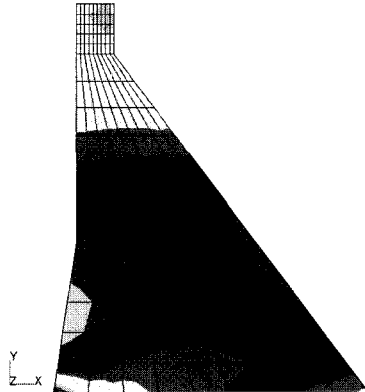


그림 8 진도법시 D1 응력(σ_x)

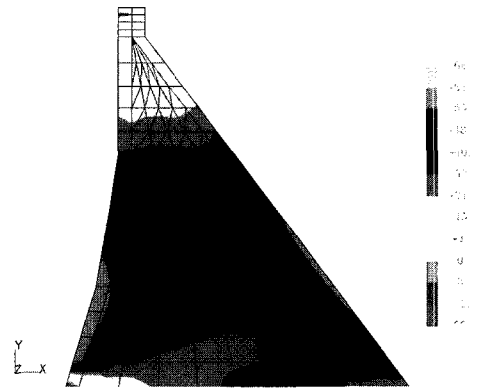


그림 9 진도법시 D2 응력(σ_x)

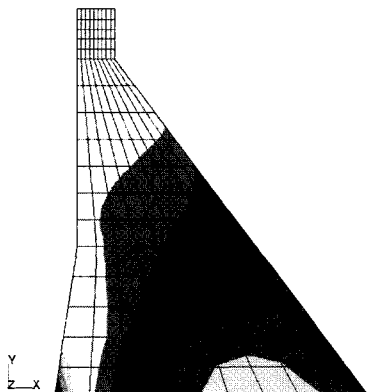


그림 10 진도법시 D1 응력(σ_y)

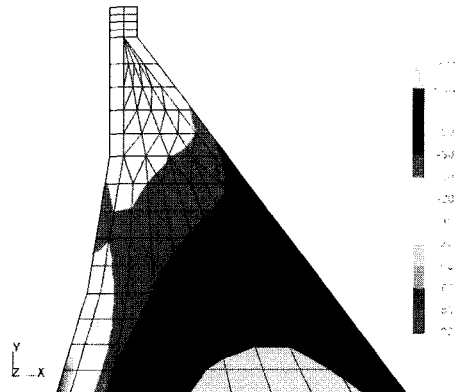


그림 11 진도법시 D2 응력(σ_y)

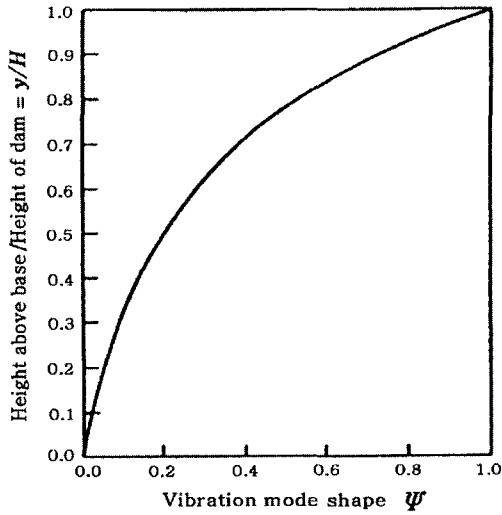


그림 12 Fundamental Vibration Mode

결과 D1, D2 모두 댐체 정부에서 최대변위(수평 방향)가 발생하였으며, 그 크기는 각각 D1=4.33mm, D2=6.37mm로 진도법 적용시 보다는 다소 증가한 것을 알 수 있다. 그림 13~16을 보면 댐체에 발생한 응력은 진도법에서 발생한 응력과 전반적으로 비슷한 경향을 보이고 있으며, 최대압축 및 인장응력은 D1은 10.4kgf/cm², 6.8kgf/cm² 이고, D2는 14.3kgf/cm², 8.3kgf/cm²로 나타났다. 이는 앞서 제시한 국내 댐 설계기준의 지진시 허용인장응력 9.05kgf/cm² 보다 작은 값이다. 모델댐(D1, D2)의 진도법(SM)과 수정진도법(MSM)에 의한 댐체 높이별 변위 결과를 그림 17, 18에 나타내었으며, 두 경우 모두 댐 하단에서는 진도법의 변위가 크게 나타나지만, 댐 상부로 갈수록 수정진도법의 변위가 커지고 있음을 알 수 있다. 이것은 앞서 제시한 것처럼 콘크리트 댐의 경우 기본진동모드에 따라 높이별로 지진력을 적용하여 나타난 결

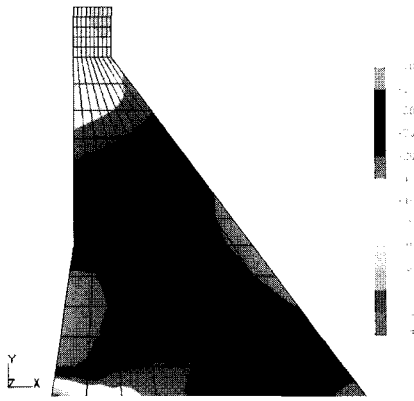


그림 13 수정진도법시 D1 응력(σ_x)

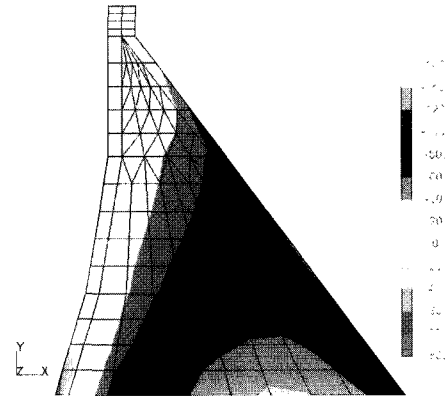


그림 16 수정진도법시 D2 응력(σ_y)

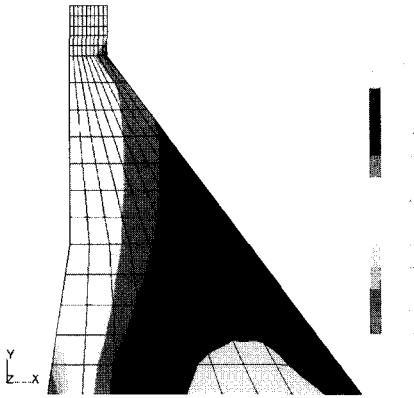


그림 14 수정진도법시 D1 응력(σ_y)

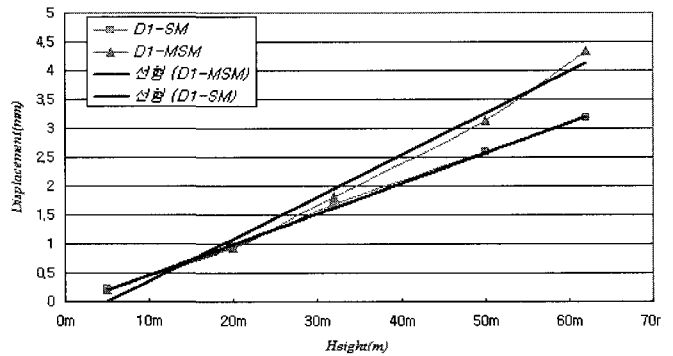


그림 17 진도법(SM)과 수정진도법(MSM) 변위비교(D1)

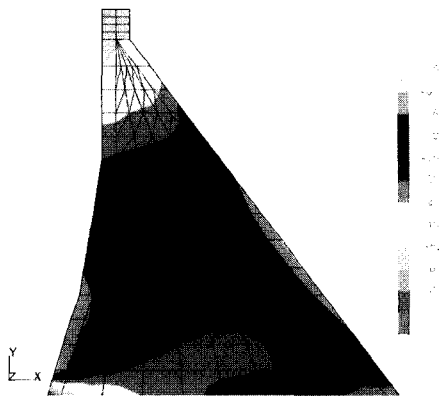


그림 15 수정진도법시 D2 응력(σ_x)

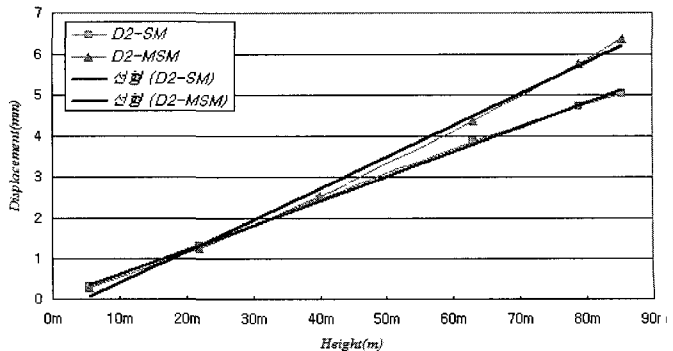


그림 18 진도법(SM)과 수정진도법(MSM) 변위비교(D2)

과이다. 그림 17, 18에서 응답변위 결과를 보면 진도법의 경우 직선적 변화가 일어나지만, 수정진도법의 경우는 댐체 2/3 지점에서부터 변위가 크게 증가하고 있어 지진시 댐은 상부로 갈수록 지진응답이 증폭한다는 것을 나타낸 결과라고 판단된다.

5.3 지진응답해석

본 연구에서 지진응답해석은 대상 댐 D1, D2에 대해서 상시만수위시(N.H.W.L)를 기준으로 그림 5, 6의 지진파를 진도법과 수정진도법과 동일한 지진력 크기로 입력지진동을 적용하여 해석을 수행하였다.

5.3.1 해석결과

1) Mode

본 해석에서는 각 방향(x-y 평면)에 대한 유효 Mode 질량 기여도가 90% 이상이 되도록 수행한 결과 D1의 경우는 20차 Mode까지, D2는 25차 Mode까지 실시를 하였다. 각 방향에 대한 질량기여도는 x축 방향으로 97% 이상, y축 방향으로 90% 이상이 나타났으며, 1차 모드시 주기는 D1은 0.193sec, D2는 0.229sec로 나타났다. D1의 경우 상시만수위(N.H.W.L)시 주기가 공수위(Empty)시 주기 0.151sec 보다 동수압에 의해서 증가함을 보였다.

2) 지진응답해석에 의한 변위

지진응답해석에 따른 변위 결과 최대 변위는 그림 19~그림 22

에 제시한 바와 같이 댐 정부에서 수평방향으로 Hachinohe 지진파 적용시 D1은 7.69mm, D2는 12.98mm가 발생되었고, 인공지진파(AW)를 적용시 D1은 8.70mm, D2는 11.98mm가 발생되었다. 지진응답해석 결과 그림 19~22에서 보면 D1댐과 D2댐의 경우는 높이차이로 인한 변위차를 보이고 있으나, 적용 지진파에 대한 변위 응답은 대체적으로 비슷한 결과를 보이고 있으며, 그림 23, 24에서 보는 바와 같이 댐 높이가 70% 정도부터 크게 증가하고 있다.

3) 지진응답해석에 의한 응력 분포

지진시 발생하는 응력은 인장응력의 크기가 중요하다. 그림 25~27에서 보는 바와 같이 응력 분포를 보면 적용 지진파에 대하여 하류사면 2/3 지점 부근과 댐 상류 하단부에 응력이 집중되는 것을 볼 수 있고, 또한 지진시 발생하는 응력은 순간적으로 변동하고, 변동의 위상도 위치에 따라 차이를 보이고 있지만, 전시각에서 발생하는 인장응력의 최대치를 나타내면 그림 25~27과 같다. 모델댐 D1과 D2에 발생한 수평방향 응력(σ_x)은 $0.4\text{kgf/cm}^2 \sim 7.7\text{kgf/cm}^2$ 를 나타내고 있어 지진시 체체에 생기는 응력은 충분히 안정성을 가지고 있다고 판단된다. 지진에 의해 댐체에 발생하는 인장응력은 순간적으로 발생하는 것으로 발생인장응력에 대해서 부분적으로 허용을 하고 있는 실정이다.⁽⁸⁾ 국내에서는 동적해석에 대한 기준이 제안은 되어 있지만⁽⁹⁾, 아직은 동적해석에 대한 허용응력에 대한 기준이 마련되지 않아서 이에 대한 판단기준을 보다 현실적으로 나타내는 것이 바람직 할 것으로 보인다.

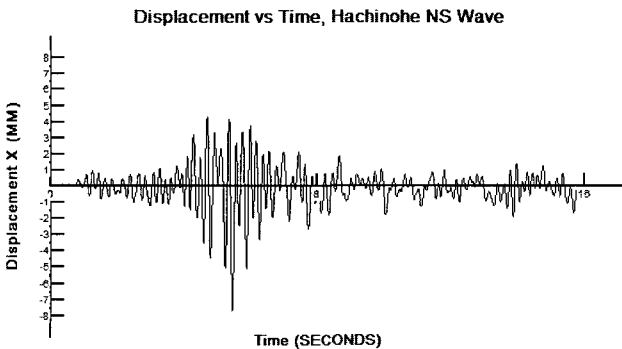


그림 19 D1 최대변위(Hachinohe)

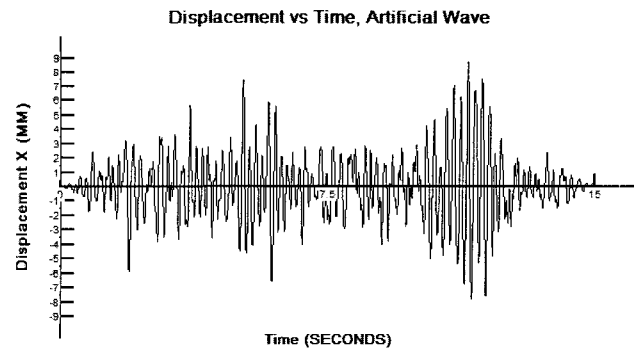


그림 21 D1 최대변위(AW)

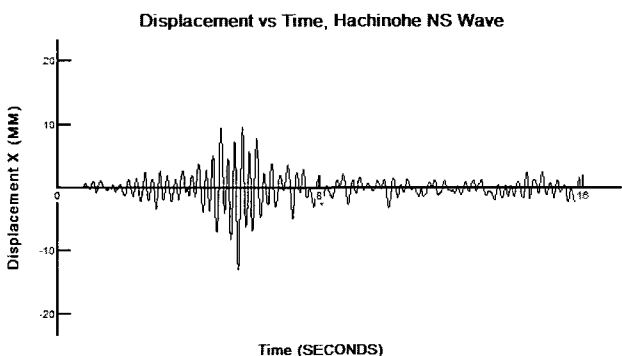


그림 20 D2 최대변위(Hachinohe)

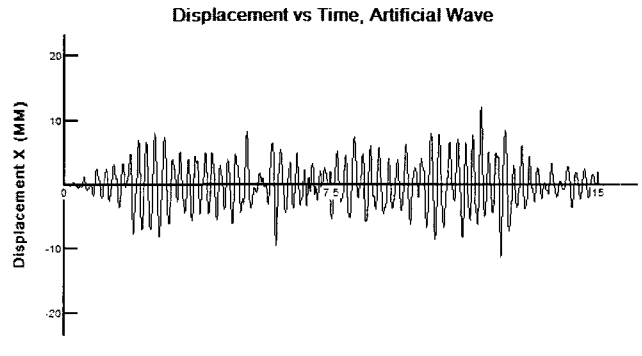


그림 22 D2 최대변위(AW)

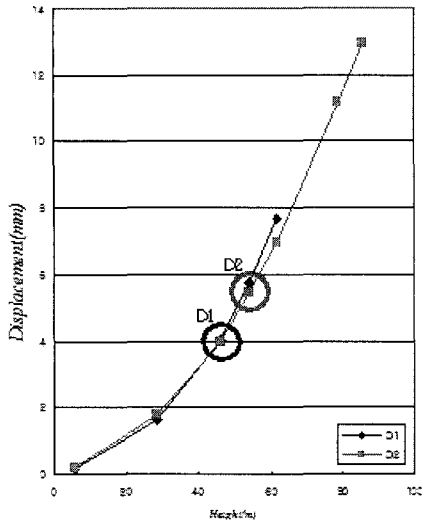


그림 23 D2 최대변위(AW)

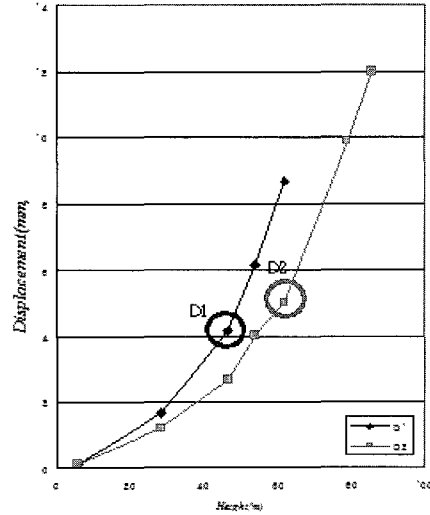


그림 24 변위 vs 높이(AW)

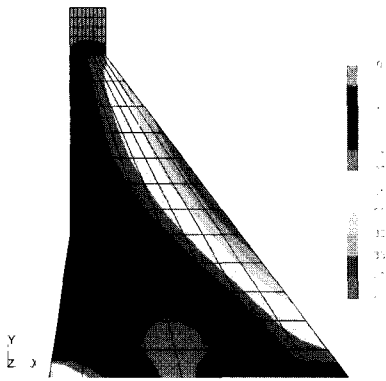


그림 25 D1- σ_x (Hachinohe)

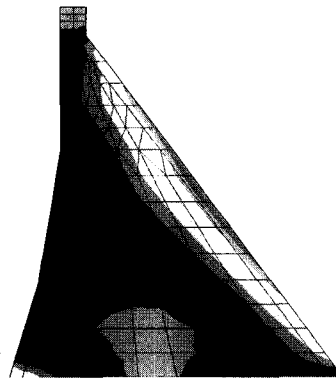


그림 26 D2- σ_x (Hachinohe)

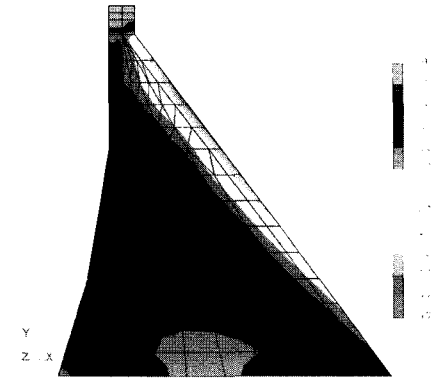


그림 27 D2- σ_x (AW)

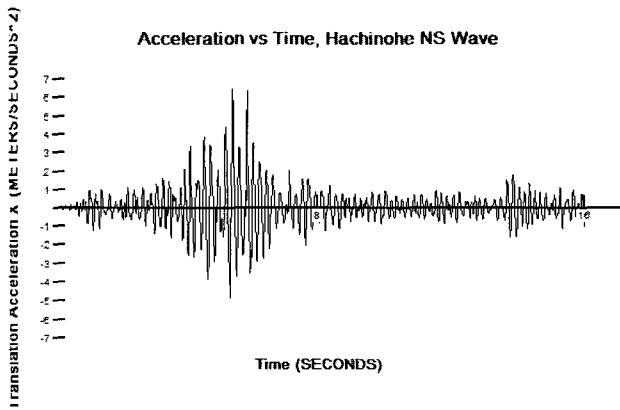


그림 28 D1 응답가속도(Hachinohe)

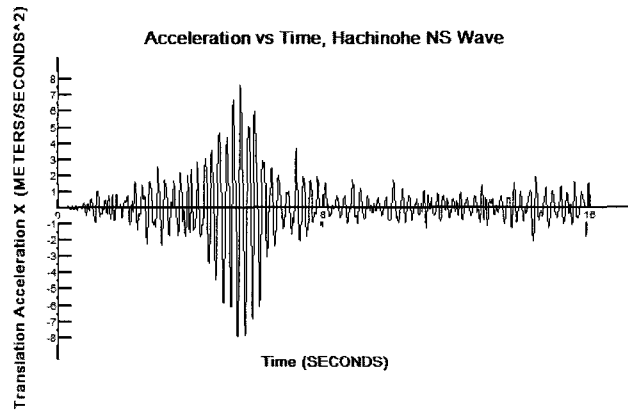


그림 29 D2 응답가속도(Hachinohe)

4) 응답 가속도 및 댐체 증폭

그림 28과 29는 모델 댐 D1과 D2의 댐체 상부에서 발생한 응답가속도로 댐체 상단에서 발생한 응답가속도 결과 D1과 D2는 각각 입력가속도의 약 4배와 약 4.5배가 증폭하였다. 동수압 작용시 댐 높이별 증폭비(%)를 보면 댐체 하단에서 1/3 지점까지는 약 9%, 2/3지점까지는 33%, 댐 상단까지는 32%로 댐 중간이후에는 크게 증폭하고 있다는 결과를 얻었다. 일반적으로 응답가속도의 증폭 현상은 콘크리트 댐 재료의 특성상 사력댐이나 CFRD 보다는 대체적으로 크게 나타나는 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾

댐체 증폭현상에 따라 앞서 수정진도법에서 제시한 y/H_s 에 대한 기본진동모드 횡거값과 지진응답해석결과(D1-Hachinohe)에서 나타난 댐체의 증폭에 대한 결과를 분석해 보았다(그림 30). 분석결과 공허시(E) y/H_s 에 대한 횡거값(Mode(ψ))과 지진응답해석결과(Analysis(E)) 댐체의 응답가속도의 증폭비가 대체로 비슷한 경향을 보이고 있으나, 동수압을 적용하여 분석한 결과(Analysis(F))와는 차이를 보이고 있다. 댐체 설계시 기본 진동모드에 대한 동적특성을 반영하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

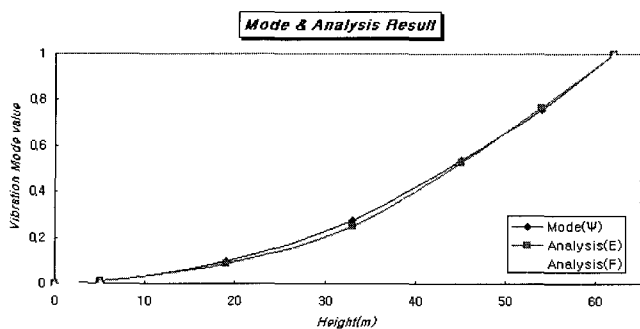


그림 30 Amplification Ratio for Dam Height

5) 지진응답해석에 의한 댐 내진성능평가

지진응답해석에 의한 콘크리트댐 내진성능평가는 정적해석시 최대응력과 동적해석시 발생하는 최대응력을 합산하여 평가를 하는 것으로 하며, 현재 동적해석에 의한 기준은 국내에서 제시되어있지 않다. 일본의 경우 효고현 남부 지진 후 진도법으로 설계된 댐을 동적해석 방법으로 평가를 실시하고 있으나, 역시 기준 및 지침은 제시되어 있지 않다.⁽⁶⁾

본 연구에서 평가한 결과 D1 댐체에 발생한 최대인장력은 수평방향으로 4.7kgf/cm²이고, 연직방향으로 14.0kgf/cm², D2 댐체에 발생한 최대인장응력은 수평방향으로 6.4kgf/cm², 연직방향으로 15.2kgf/cm²을 보이고 있다. 그러나 지진시 댐체에 발생한 인장응력은 순간적으로 발생하는 응력이고, 모델의 경계에 따라 차이가 나타나므로, 본 연구의 결과는 위 두 조건을 고려할 때 충분히 허용할 수 있는 수치로 판단

되며, 또한 국내 동적해석에 의한 댐 내진성능평가시 제안한 기준⁽³⁾과 비교해 볼 때 만족한 결과를 보이고 있다. 그림 37과 그림 38은 해석방법에 따른 응답결과를 비교한 것이다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 모델 댐(D1, D2)으로 해석방법에 따른 콘크리트댐에 대한 내진성능평가를 실시하여 결과를 비교함으로써 보다 현실적인 내진설계방법과 내진성능평가에 대해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모델 댐(D1, D2)의 변위와 응력에 대한 해석결과만을 비교한 경우 진도법과 수정진도법은 큰 차이가 없는 것으로 보이지만, 댐체에 발생하는 변위를 보면 수정진도법을 적용한 경우가 동적특성을 반영한 결과라고 할 수 있으며, 지진응답해석의 변위 결과 댐체 높이 약 70%부터 증가하는 경향과 비슷한 결과를 보이고 있다.
- 2) 응답가속도의 경우 증폭비는 수정진도법을 고려하여 제시한 결과와 지진응답해석에 의한 결과 비슷한 경향을 보이고 있어 댐체 설계시 동적특성을 반영한 수정진도법이 바람직 할 것으로 판단된다.
- 3) 기존 진도법으로 내진설계된 콘크리트댐은 안정성에는 문제가 없다고 판단되지만, 동적특성을 반영한 수정진도법으로 적용하여 설계하는 것이 실제에 가까운 설계법이

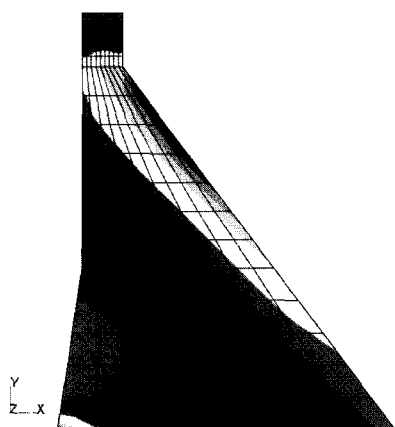


그림 31 D1- σ_x (AW)

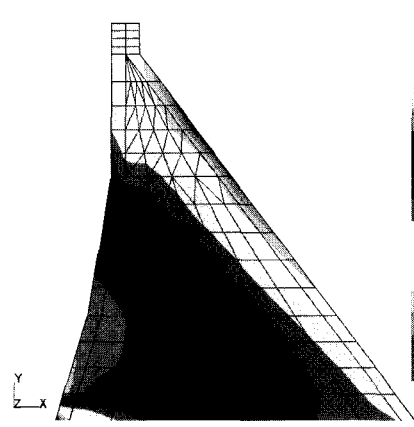


그림 33 D2- σ_x (Hachinohe)

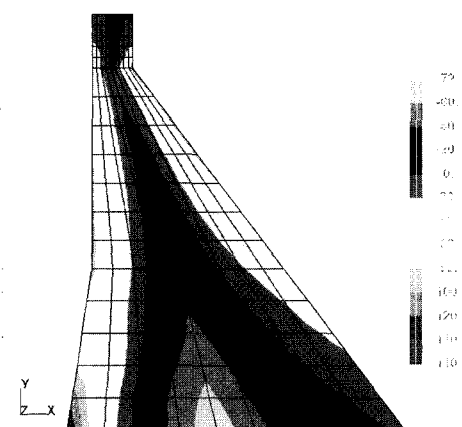


그림 35 D1- σ_y (AW)

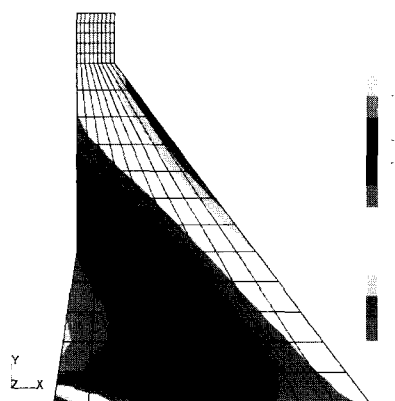


그림 32 D1- σ_x (Hachinohe)

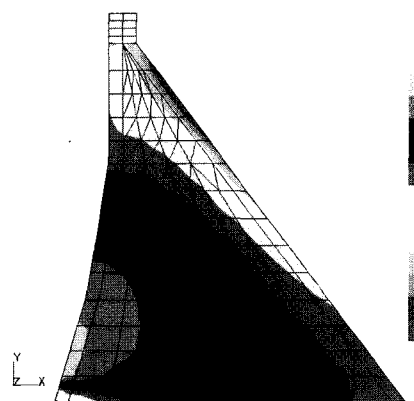


그림 34 D2- σ_x (AW)

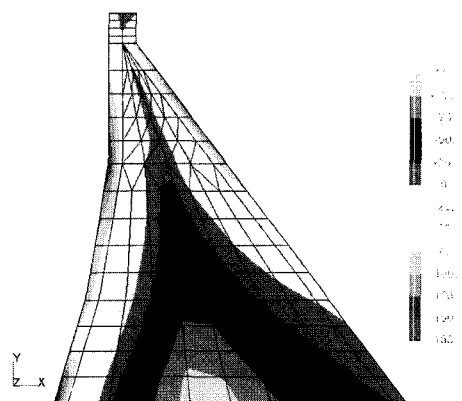


그림 36 D2- σ_y (AW)

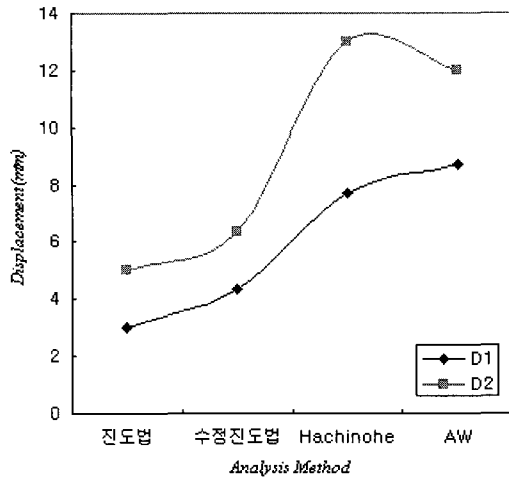


그림 37 Displacement(Maximum)

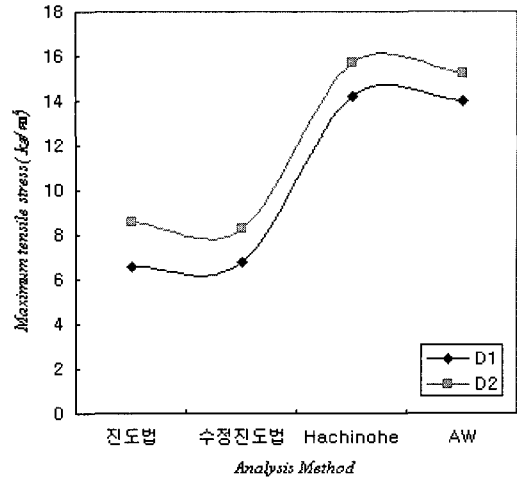


그림 38 Stress(tensile)

라고 할 수 있으며, 현재 진도법으로 설계되어 있는 댐에 대한 내진성능평가는 진도법을 적용하여 평가하는 것보다 동적해석법을 이용하여 평가하는 것이 최근 추세이며, 또한 향후 지진시 댐의 응답거동을 평가하기 위해서는 동적해석을 실시하는 것이 합리적이고, 또한 동적해석에 대한 적용기준의 정립이 필요할 것으로 생각된다.

- 본 연구에서는 모델 댐(D1, D2)에 대한 선형탄성해석을 실시하여 평가를 하였으며, 평가 결과 변위, 응력에서 차이를 보였지만 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 평가결과는 해석방법, 경계조건 및 지진규모, 댐의 형상 등에 따라 달라지므로 더 많은 연구를 통하여 국내에 적합한 댐 내진설계 및 내진성능평가에 대한 기준을 제시하는 것이 검토되어야 한다.

참고 문헌

- 한국시설안전기술공단, "시설물별 안전취약요소발굴 및 대책방안 연구", 보고서, 2000.
- 건설교통부, 댐설계기준, 2001.
- 소진호, 정영수, 김용곤, "콘크리트 중력식 댐의 내진 안전성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제1호, 2002, pp. 33-41.
- 이지호, "콘크리트댐의 비선형 지진해석에서의 유한요소망 영향", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 2001.12.
- 건설부, 댐시설기준, 1993.
- 日本 建設省 河川局, 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編(I), 1997.
- 건설교통부, 한국지진공학회, "내진설계기준연구(II)", 보고서, 건설교통부, 1997.
- 日本國水資源開發公團, "第15回 技術交流會議 資料", 보고서, 1998.
- Anil K. Chopra, "Earthquake resistant design of concrete gravity dam," ASCE ,Vol. 104, No. ST6, 1978, pp. 953~971.
- 과학기술부, "특수구조물의 내진설계 및 내진성능 향상 기법개발", 보고서, 과학기술부, 2000.
- GT-STRU DL user's Manual.
- 도덕현 외, 내진공학, 효성출판사, 1992.
- 大原資牛, 最新土木工學シリーズ 12 最新 耐震工學(第3版), 森北出版(株), 1994.
- 수자원연구소, "댐 시설물의 내진성능 및 안전도 평가 연구", 보고서, 한국수자원공사, 2002.
- US Army Corps of Engineers, Gravity Dam Desig : EM1110-2-2200, 1995.
- P. Chakrabarti, Anil K. Chopra, "EADHL," EERC Report No. 73-7.
- 日本 建設省 河川局 河川部 建設工學研究所, "Dam 耐震設計基準(案) 解説", 보고서, 1991.
- CSCD, Safety of Dams Flood and Earthquake Criteria, National Academy Press, 1985.