

지진규모에 따른 콘크리트댐의 동적거동특성

The Dynamic Behavior Properties of Concrete Dam for Seismic Magnitude

임정열¹⁾ 이종욱²⁾ 오병현³⁾

Lim, Jeong Yeul Lee, Jong Wook Oh, Byung Hyun

ABSTRACT

It was performed that the seismic response analysis using seismic magnitude and concrete dam type(Model-1, Model-2) on dynamic behavior properties of concrete dam.

As a results of each seismic magnitude acted on concrete dam, the maximum response acceleration at dam crest was amplified about 3.5~4 times and maximum displacement and stress at dam crest of Model-2 was larger than Model-1.

So, it can be recommended that modified-seismic coefficient method is proper in case of seismic design of concrete dam and Model-1 is better than Model 2 in consideration of stability in displacement and stress of design of concrete dam.

1. 서론

지진응답해석시 구조물은 하중의 방향과 시간, 그리고 외부조건에 따라 변하고 정적하중을 작용하여 해석하는 것과 같이 일정한 방향으로 거동을 하는 것이 아니기 때문에, 작용하는 지진하중을 고려하여 정적거동과 다른효과를 나타내는 구조물의 동적거동 특성을 분석해야 한다.

기존 콘크리트댐의 경우 정적해석 방법인 관성력을 이용한 진도법으로 설계가 되어있어 동적해석시 발생하는 거동특성을 쉽게 알 수가 없다. 또한 현재 국내외 지진 증가에 따라 구조물에 대한 설계지진계수가 커지고 있어 기존 구조물에 대한 내진성능평가 및 내진설계에 대한 방법을 좀 더 현실적으로 반영하는 방법이 부분적으로 연구되었고, 또한 현재 진행중이다.

본 연구에서는 기존 콘크리트댐을 모델로 지진규모에 따라 지진응답해석시 댐체의 지진응답현상 및 동적거동 특성을 분석하고자 한다.

1) 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전팀 연구원
2) 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전팀 연구원
3) 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전팀 팀장

2. 콘크리트댐 거동 분석 방법

2.1 해석조건

본 연구에서 해석 단면은 기존 콘크리트댐의 설계최대단면을 설정하였으며, 댐체의 모델은 단면 형상에 따라 Model-1(그림3)과 Model-2(그림4)로 구성하였고, 콘크리트 물성치는 설계기준강도(내구년수에 따라 강도 증가)를 기준으로 결정하였다.

콘크리트댐의 경우 제체와 기초압반을 포함해 모델화하여 지진응답해석을 실시하는 것이 보다 엄밀한 방법이라고 생각할 수 있지만, 지표에서 관측된 지진동에서 압반까지의 입력지진동을 동일하게 정해야 할 필요가 있어 복잡하기 때문에 중력식 콘크리트댐의 경우는 대부분 경암의 기초 압반에 보다 건설되었으므로 간편하게 댐체만을 모델링하여 해석을 실시하는 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 국내의 콘크리트댐의 기초압반의 특성을 반영하여 댐체만을 대상 모델로 선정하였으며, 해석모델은 기존 삼각형 단면의 기초부를 확대한 모델(Model-1)과 기존 삼각형 단면 모델(Model-2)에 대해서 지진응답해석시 지진규모에 따른 동적거동특성을 알아보하고자 하였으며, 제체 저면은 고정경계로 하여 해석을 실시하였다.

2.2 적용 프로그램

모델댐의 해석은 범용 구조해석프로그램인 GT-STRUDL(Georgia Tech STRUctural Design Language)를 이용하였고, 이용한 유한요소 모델은 2차원 평면에서 평면변형율(Plane strain)을 이용하였으며, 유한요소 모델은 사각형 요소는 4 node를 갖는 PSHQ(Plane Strain-Plane Stress Hybrid Quadrilateral), 삼각형 요소는 3 node를 갖는 CSTG(Plane Strain-Constant Strain Triangle)모형을 이용하여 동적해석을 실시하였다.

2.3 하중 산정

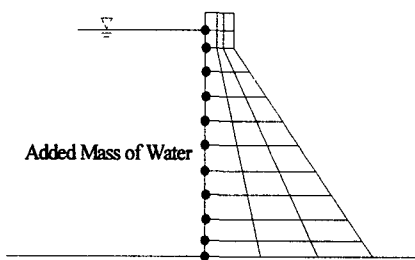


그림 1. 부가질량(Added Mass)

본 연구는 지진규모에 대한 댐체의 동적거동특성을 알아보하고자 해석을 실시하였기 때문에 해석에 적용한 하중은 동적하중만을 설정하였으며, 수압의 경우 지진력 작용시 유체가 댐에 부가하고 댐과 같이 거동하는 것처럼 동수압의 영향을 고려할 수 있다. Westergaard 식을 이용하여 지진시 동수압을 증가의 부가질량(Added Mass)로 고려하였다.

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

여기서, M : 부가질량, γ_w : 물의 단위체적중량,
H : 저수심, y : 저수표면에서 단면의 거리

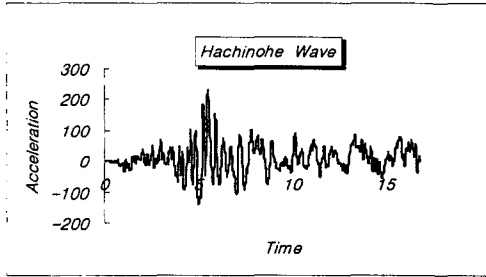


그림 2. HACHINOHE 지진파

또 해석에 사용한 지진하중은 많은 국내 적용 실적을 가지고 있는 Hachinohe파 이용하였으며 원파형의 최대값이 0.23g(232.67gal, Peak time 5.38sec)로 기록되어 있으나, 본 연구에서는 지진가속도가 0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.12g, 0.14g, 0.154g, 0.16g, 0.18g, 0.2g, 0.22g를 만족할 수 있도록 조정하여 사용하였으며, 실제 원파형은 <그림2>와 같다.

3. 모델댐 지진응답해석

3.1 해석모델

본 해석모델인 중력식 콘크리트댐은 Model-1과 Model-2의 단면조건에 대하여 지진규모에 따라 0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.12g, 0.14g, 0.154g, 0.16g, 0.18g, 0.2g, 0.22g의 지진계수를 적용시켜 실제 지진파에 따라 지진응답해석을 실시하여 댐체의 동적거동특성을 분석하였다.

표 1. 해석 단면 제원

구분	Model-1, Model-2	설계기준강도	180(kgf/cm ²)
형식	콘크리트 중력댐	포아송비	0.2
길이	447m	절점수	166개
높이	90m	요소수	146개

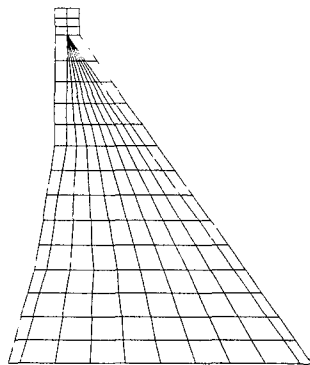


그림 3. Model-1

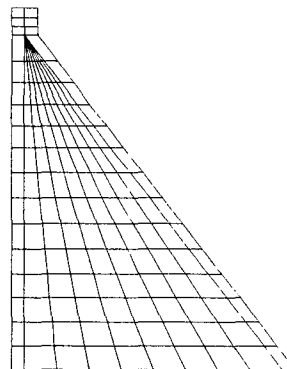


그림 4. Model-2

3.2 지진응답해석 결과

모델댐의 지진응답해석은 지진규모에 따라 지진계수를 고려하여 적용하였으며, Model-1과 Model-2에 대한 변위, 응력·주응력 분포, 그리고 응답가속도 등 해석결과에 따라 댐의 동적거동 특성을 분석하였다.

1) Mode

본 해석에서는 각 방향(x-y 평면)에 대한 Mode 질량 기여도가 90% 이상이 되도록 수행한 결과 1차 Mode에서 20차 Mode까지 실시를 하였다. Model-1의 경우 각 방향에 대한 질량기여도는 x축 방향으로 97.7%, y축 방향으로 91.3%가 나타났으며, 각 Mode의 결과는 다음 <그림5~6>과 같다.

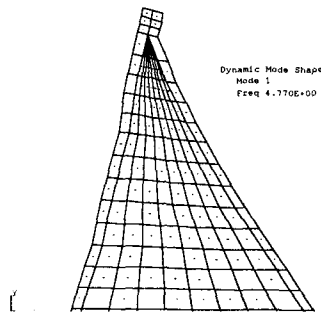


그림 5. 1차 Mode

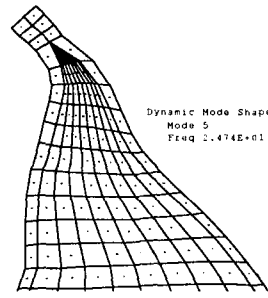


그림 6. 5차 Mode

해석결과 Model-1의 경우 Mode 4까지 Period는 Empty Reservoir시 0.191, 0.965, 0.806, 0.575sec 이고, Full Reservoir시 0.210, 0.100, 0.0809, 0.0597sec로 동수압에 의해 다소 증가한 경향을 보이고 있다.

2) 응답변위

본 지진응답 해석결과 Model-1과 Model-2에 대해서 댐체 각 부위에 대한 절점 위치도를 나타내었으며<그림7>, 지진규모에 대한 댐체 각 부위의 응답변위를 살펴보면 <그림8>과 같다.

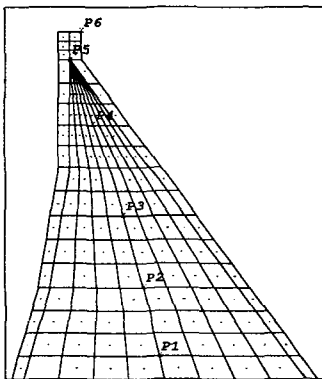


그림 7. 댐 절점 위치도

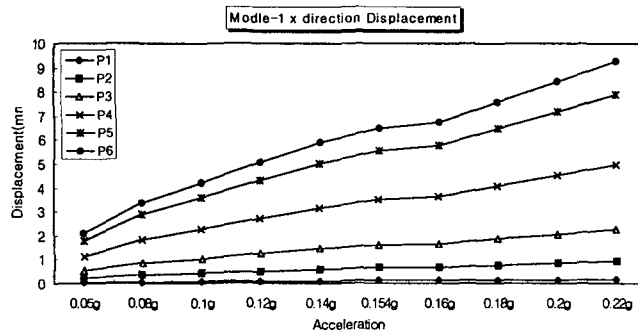


그림 8. Model-1 x Direction Displacement

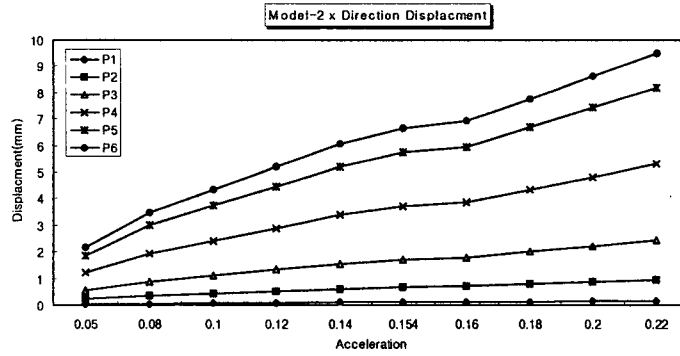


그림 9. Model-2 x Direction Displacement

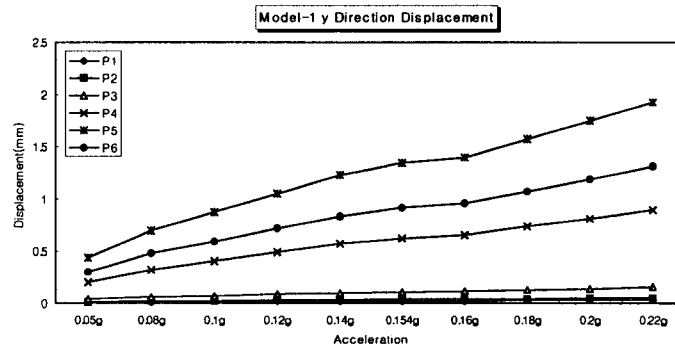


그림 10. Model-1 y Direction Displacement

<그림8>과 <그림9>는 각각 Model-1, Model-2의 x방향에 대한 응답변위 결과를 나타낸 것이다. 해석결과에서 지진규모에 따른 변위 증가의 경향은 0.16g 이상에서 크게 증가하는 경향을 보이고 있으며, 상단부인 P4와 P5에서 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 Model-1보다 Model-2의 최대응답변위가 약간 증가한 것을 알 수 있다. <그림10>은 Model-1의 y방향에 대한 응답변위의 결과를 나타낸 결과인데, y방향의 최대변위 위치가 P6보다 P5가 더 크다는 것을 알 수 있다.

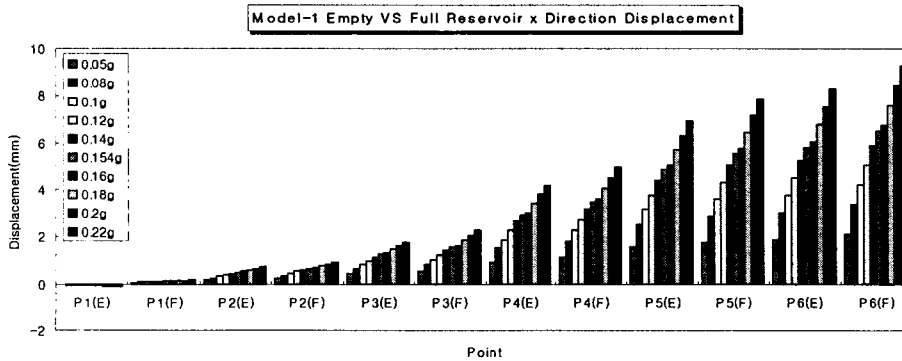


그림 11. Model-1 Empty VS Full Reservoir x Direction Displacement

3) 응답가속도

지진규모에 대한 댐체의 응답가속도 증폭을 알아보기 위하여 변위 절점 위치도와 같은 지점에서 응답가속도를 비교해보았다.

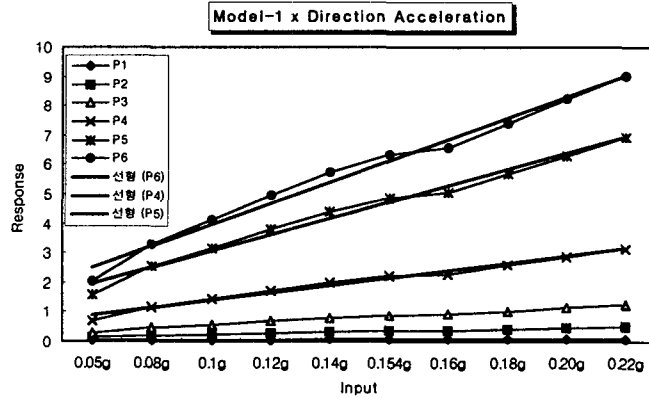


그림 12. Model-1 x Direction Response Acceleration

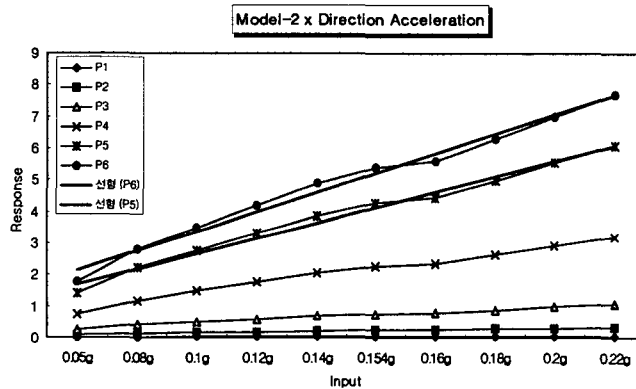


그림 13. Model-2 x Direction Response Acceleration

해석결과 Model-1, Model-2 모두 응답가속도의 증폭은 댐 상부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, P3지점 이상의 상부 가속도는 크게 증폭하는 것을 알 수 있다. 최대응답가속도의 경우 Model-1은 약 4배, Model-2는 약 3.5배정도 증폭하는 결과를 보인다. 콘크리트 댐의 경우는 재료의 특성상 일반 사력댐이나 CFRD 보다는 응답가속도의 증폭량이 대체적으로 큰 것으로 알려져 있다.

현재 댐내진설계지침에서는 콘크리트댐 설계시 기존 설계방법인 진도법보다는 댐체는 댐마루로 갈수록 기본 진동모드(ψ) 형상으로 증폭한다는 것을 고려한 수정진도법에 대한 설계방법을 제시하고 있다. 수정진도법으로 설계시 지진력 산정은 “특수구조물 내진설계 및 내진성능향상 기법”(2000. 과학기술부)에서 제시한 방법으로 다음과 같다.

$$f = \frac{L_1}{M_1} \frac{k}{g} \psi(y) W(y) \quad (2)$$

여기서, L_1 : 정규화된 지진력 계수, $L_1 = \int_0^{H_s} \psi(y) W(y) dy$

M_1 : 정규화된 질량, $M_1 = \int_0^{H_s} \psi^2(y) W(y) dy$

k : 설계지진계수

W : 댐체의 단위무게 (ton)

ψ : 기본진동모드 (y/H_s 에 대한 값)

이에 따라 본 연구에서는 y/H_s 에 대한 기본진동모드 횡거값과 지진응답해석결과에서 나타난 댐체의 증폭에 대한 결과를 분석해 보았다. 분석결과 y/H_s 에 대한 횡거값과 지진응답해석결과 댐체의 응답가속도의 증폭비가 대체로 비슷한 경향을 보이고 있다.

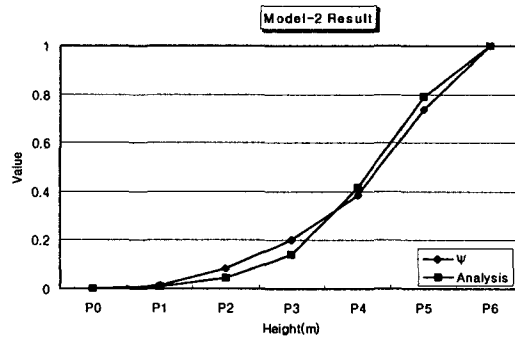


그림 14. Model-2 Result

4) 응력 분포

Model-1과 Model-2의 지진규모별 지진응답해석결과의 응력 분포를 보면 <그림15~17>과 같으며, 응력분포 경향에 대한 분석은 <그림18,19>와 같다.

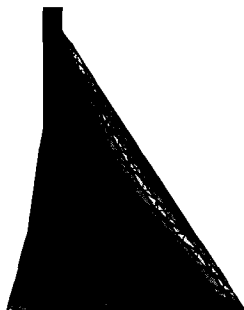


그림 15. Model-1 Sxx

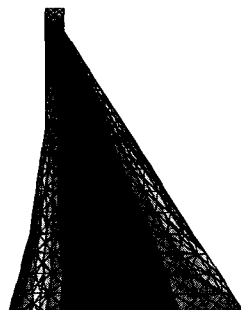


그림 16. Model-1 S1

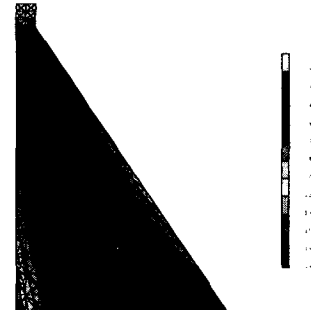


그림 17. Model-2 S1

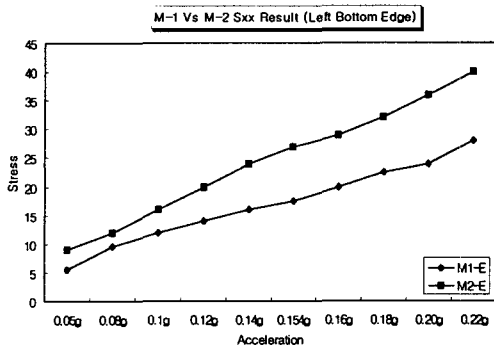


그림 18. M-1 VS M-2 Sxx Result

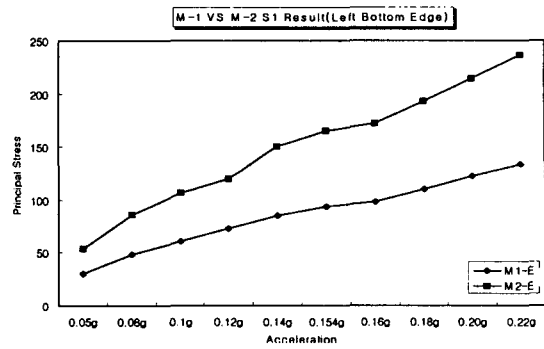


그림 19. M-1 VS M-2 S1 Result

해석결과 댐체 상류면 하단부의 응력분포의 경우 σ_x 에 대한 응력은 Model-1과 Model-2의 차이가 비교적 크지 않지만, σ_1 의 경우 Model-2의 응력이 Model-1 보다 크게 증가하고 있고, 또한 응력 분포도 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 Model-1과 Model-2의 중력식 콘크리트댐에 지진규모에 따라 Hachinohe 지진파를 이용하여 콘크리트댐의 지진응답해석을 통한 동적거동특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 최대 응답가속도는 댐체 상부에서 약3.5~4배의 증폭 결과(Model-1:4배, Model-2:3.5배)를 나타내고 있으므로, 콘크리트댐에 대한 내진설계는 기존의 진도법보다는 댐체 상부의 증폭을 고려한 수정진도법을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.
2. 응답변위 및 응력분포 해석결과 Model-1의 최대응답변위와 σ_x , σ_1 에 대한 응력값과 분포범위가 Model-2 보다 작은 값을 나타내고 있으므로, 콘크리트댐에 대한 설계시 변위와 응력에 대한 안정성을 고려하기 위해서는 Model-2보다는 기초부를 확대한 Model-1과 같은 형상이 보다 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 두가지 단면조건에 따라 콘크리트댐의 댐체만을 모델로 지진규모에 따른 지진응답해석을 실시하여 동적거동특성을 분석하고자 하였으며, 추후 연구로는 콘크리트댐의 여러 가지 형상 및 입력파 등 민감도 분석을 실시하여 추가적인 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국수자원공사 수자원연구소(2001), "수자원시설물 내진성능평가에 관한 연구"
2. 日本國水資源開發公團(1998), "第15回 技術交流會議 資料"
3. Anil K. Chopra(1978), "Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dam", ASCE, Vol.104, No. ST6 pp 953~971
4. 과학기술부(2000), "특수구조물의 내진설계 및 내진성능 향상기법개발"
5. P. Chakrabarti, Anil K. Chopra, "EADHI", EERC Report No. 73-7