

진동대시험에 근거한 댐의 내진설계시 해석 방법의 비교

The Comparison of Analysis Methods in Dynamic Design of Dam based on Shaking Table tests

황성춘* · 오병현**

Hwang, Seong Choon and Oh, Byung Hyun

Key Words : Modified seismic Coefficient Method(수정진도법), Newmark Method(뉴마크법), Frequency Domain Response Anlysis(주파수응답해석), Time Domain History Anlysis(시간이력해석)

ABSTRACT

This paper performed pseudo static analysis and dynamic analysis for CFRD and evaluated reliability with the results of Shaking Table Test. The Seismic coefficient method, modified seismic coefficient method, Newmark method of Pseudo-static analysis and frequency domain response analysis, time domain history analysis of dinamic analysis were used. The analysis results were differ between analysis method, but the trends of acceleration and displacement were good agreement with the results of shaking table test.

1. 서 론

댐의 내진설계는 보통 진도법에 바탕을 둔 원호활동법에 의하도록 규정되어 있다. 그러나 최근 내진에 대한 관심이 커짐에 따라, 내진설계와 내진성능평가에 대한 활발한 연구로 과거에 적용했던 기준만으로는 실제의 동적특성을 반영하지 못한다는 단점이 야기되고 있다. 또한, 시공기술의 진보와 함께 댐의 규모는 커지는 반면 댐의 기초는 비교적 연질 또는 파쇄대가 많은 암반상에 건설되는 경향으로 이러한 추세를 반영하여 댐의 지진응답을 보다 실제에 가까운 모습으로 설계할 필요성이 증대 되었다. 따라서, 댐의 내진해석시 등가정적해석에 진도법을 포함하여 수정진도법, Newmark법이 적용되고 동적해석에 주파수응답해석, 시간이력해석이 실시되고 있으며 이에 대한 연구도 필요한 실정이다.²⁾³⁾ 이에 본 연구는 댐의 내진 안정성 평가방법인 등가정적해석과 동적해석법을 소개하고 최근 댐 시공시 다수 채택되어 관심이 높아진 CFRD(콘크리트 표면차수벽형 석피댐)에 적용하여 댐의 지진시 동적거동특성을 비교하였다.

2. 댐의 내진검토 방법

2.1 등가정적해석(Pseudo Static Analysis)

기존 비탈면의 정적 초기용력상태에 추가로 작용하는 동하중을 상응되는 등가정적하중으로 대체하여 고려함으로써, 정적인 해석방법에 의해 전체 비탈면에 작용하는 동적하중에 대한 안전율을 산정하는 방법으로 진도법, 수정진도법, Newmark 법이 있다.²⁾³⁾⁶⁾ 설계에 작용하는 지진력은 작용정하중에 대한 지진 관성력만 고려되고 동수압은 그 영향이 미미하므로 제외된다. 또한 지진력은 활동면상의 체체 무게에 설계진도를 곱한 지진관성력으로 적용되며 이 힘의 작용점은 활동면의 중심이고, 작용방향은 수평방향이나 안정에 불리한 쪽으로 정해진다.¹⁾

(1) 진도법

진도법은 구조물에 작용하는 불규칙적인 진동인 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중의 일부분을 수평 또는 수직력으로 재하하여 정적해석을 수행하는 방법으로 이때 적용하는 지진력의 크기는 질량에 비례하므로 수평방향의 지진력의 크기를 증량으로 나눈값을 지진계수라고 하며 식 (1)과 같다.

$$F_h = k_h \cdot m \cdot g \quad (1)$$

여기서, F_h 는 수평방향 지진력, k_h 는 지진계수(설계진도), m 은 질량, g 는 중력가속도이다. 연직진도는 진원지

* 경주대학교 사회기반공학과, 부교수
E-mail : yeons@kyoungju.ac.kr
Tel : (054)770-5172, Fax : (054)748-7023

** 수자원연구원 댐안전연구소, 수석연구원

부근이 아니면 수평진도의 1/3~1/2 이하로 산정하며, 일반적으로 해석시에는 수평진도만을 고려하고, 연직진도를 받을 것으로 예상될 경우에 한하여 고려하는 것으로 한다.

(2) 수정진도법

댐의 설계에서 진도는 댐상부에서 저면까지 진도가 같다고 가정하나, 모든 관측결과에 의하면 댐 상부의 진동은 하부진동에 비하여 크게 관측되며 그 비도 매우 크다. 따라서, 높은 댐의 경우에 댐 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 것이 합리적이다. 한계평형해석에서 적용되는 수정진도법은 댐의 천단표고와 활동면의 최저표고 차와 댐의 높이비에 따라 다음과 같이 제체지진계수를 적용하고 있다.)

$0 < y/H \leq 0.4$ 일때,

$$k = k_r \times \{2.5 - 1.85 \times (y/H)\} \quad (2)$$

$0.4 < y/H \leq 1$ 일때,

$$k = k_r \times \{2.0 - 0.60 \times (y/H)\} \quad (3)$$

여기서, H 는 제방높이, y 는 천단표고와 활동면의 최저표고차, k_r 는 설계지반진도이다.

유한요소해석에서는 댐설계기준(2003, p466)에 의하여 댐상부(댐 높이의 3/4이상 부분)에 대해 설계진도의 2배 값을 채택하며 댐 상부에 설치되는 수리구조물의 경우 또한 동일하게 적용한다.¹⁾

(3) Newmark 법

일반적인 유사정적법은 단순히 지진계수로 인한 수평력을 증가시켜 댐 체체의 안전율을 계산하므로 안전율과 관계없이 댐의 발생변위에 대해서는 알 수가 없다. Prater는 사면의 잔류변형을 유발시키는 시점의 지진계수를 정의하여 그때의 안전율을 1로 간주하였다. 한편, Newmark는 사면의 잔류변형을 발생시키는 항복수평가속도의 개념을 제안하였으며,⁵⁾ 안전율이 1이되는 진도(항복진도)를 결정후 후 활동량을 계산하였다. Newmark법은 지진파를 입력하여 댐 체체의 지진시 파괴형태를 원호형상으로 판정하고, 이 활동면상의 토괴를 강체로 하여 강체의 회전에 대한 운동방정식을 수치적분해서 활동변위를 산정하게 된다.

2.2 동적해석(Dynamic Analysis)

등가정적해석법은 방법 자체가 내포하고 있는 한계성으로 인하여 작은 흙댐이나 작은 규모의 성토사면인 경우에만 적절히 이용될 수 있는 방법이며 중요 구조물의 경우, 적용되는 동하중의 특성 및 주어진 지반구조물의 동적거동 특성을 적절히 고려하기 위해서는 동적해석법을 적용한다. 동적해석법은 대상으로 하는 구조물 혹은 지반을 모델화 하여 지진

입력으로 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.⁴⁾

(1) 주파수응답해석법

주파수응답해석법은 진동계의 운동방정식을 주파수영역에서 계산하여 구조물의 시각력응답을 구하는 방법이다. 시각 영역에서 주파수영역으로, 또는 그 반대의 변환은 일반적으로 고속 후리에 변환(FFT)이 사용된다.⁴⁾ 최근에는 지반과 구조물의 상호작용을 고려한 지진응답해석을 실시하는 경우가 종종 있다. 이 경우 지반반력이 주파수에 의존하여 변화하는 복수강성으로 표현되기 때문에 이 해석법에 의하여 해석할 필요가 있다.

(2) 시간이력해석

시간이력응답해석은 모드중첩법과 직접적분법으로 분류할 수 있다. 일반적으로 구조물이 탄성거동을 하는 경우에는 모드중첩법이 편리하게 사용되며, 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법이 사용된다. 지진발생시 지반운동의 시간에 따른 변화를 알 때 구조물의 거동을 알아낼 수 있는 가장 정확한 해석방법으로 중요한 구조물의 설계, 구조물의 비선형 해석 등 정밀 해석을 요구하는 경우에 적용된다.⁴⁾

3. 댐의 안정성 검토

본 연구는 댐의 내진해석방법을 소개하고 그 적용성을 평가하기 위해 최근 많이 시공되고 있는 댐 형식중 CFRD에 대하여 수평방향의 지진력만을 고려한 등가정적해석인 진도법, 수정진도법, Newmark법과 동적해석인 주파수응답해석, 시간이력해석을 실시하여 그에 대한 결과를 비교분석 하였다.

3.1 해석조건

본 연구대상의 댐은 CFRD, 즉 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐으로 Fig. 1와 같이 댐체는 각 Zone별 여러 가지 입도를 가진 재료로 축조되어 있으며, 댐 상류면이 콘크리트 Face slab로 되어 있어 1차적인 누수를 차단하고 있다. 따라서 Face slab의 안정성이 매우 중요하므로 2차원 유한요소해석시 보요소로 모델링하여 휨인장응력을 검토하여 안정성을 판단하였다. 적용 지진가속도는 본 연구 대상지역의 인근 지진 발생 현황과 현재의 내진설계기준, 지진에 대한 댐의 안정성 문제를 종합하여 0.154g를 적용하였다.

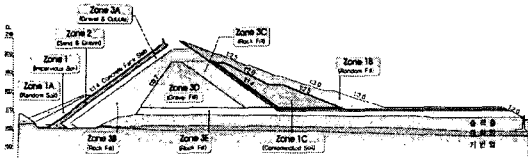


Fig. 1 해석단면

3.2 해석방법별 적용프로그램

본 해석에 적용한 프로그램의 해석 방법별 적용 프로그램 개요는 Table 1과 같다.

Table 1 해석방법별 프로그램 소개

해석방법		사용프로그램
등가 정적 해석	진도법	COSTANAK (사면안정해석 프로그램)
		AFIMEX 2D-SANC (2차원 유한요소해석프로그램)
		3D-SIGMA (3차원 유한요소해석프로그램)
	수정 진도법	COSTANAK (사면안정해석 프로그램)
		AFIMEX2D-SANC (2차원 유한요소해석프로그램)
	Newmark법	COSTANAK (사면안정해석 프로그램)
동적 해석	주파수 응답해석	AFIMEX 2D-SAMBA (2차원 동적해석 프로그램)
	시간이력 해석	TDAP III (3차원 동적응답해석 시스템)

3.3 동수압 및 적용지진파

본 해석에서 댐에 작용하는 수위는 상시만수위(N.H.W.L) 기준으로 적용하였으며, 지진시 발생하는 동수압은 Westergaard 식을 사용하여 물의 질량이 댐에 부가되어 댐과 같이 거동하는 것 처럼 관성력을 계산하여 댐에 주는 동수압의 영향을 고려하였다.⁷⁾

$$P_d = \frac{7}{8} W_w K_1 \sqrt{Hh} \quad (3)$$

여기서, P_d 는 동수압(tf/m²), W_w 는 물의 단위중량(tf/m³), K_1 은 설계지진계수, H 는 상시 만수위면에서 기초지반까지 수심, h 는 상시 만수위면에서 임의 점까지 수심이다. 동적해석시 장주기파 특성을 지닌 Hachinohe파와 단주기파 특성의 Ofunato파 지역적 특성을 고려한 인공지진파(지진구역1-경암, 0.154g)를 적용하였으며 지진파의 최대가속도

를 0.154g로 조정하여 기반암에 가진시켰다. 각 입력 지진동은 Table 2와 같다.

Table 2 입력 지진동

구분	지진파형	지진 규모	최대 가속도
장주기파 (Hachinohe)		7.9	232.671 (gal)
단주기파 (Ofunato)		7.4	161.100 (gal)
인공지진파		6.5	150.92 (gal)

4. 해석결과

본 연구는 CFRD에 대해서 Table 2의 수평방향의 지진동을 적용하여 등가정적해석법 및 동적해석법에 의한 댐의 내진해석을 실시한 후 진동대 시험 결과와 비교 분석하였다.

4.1 등가정적해석 결과

(1) 한계평형 해석법

댐의 상시 만수위시에 대하여 진도법, 수정진도법을 적용하여 하류 비탈면의 안정해석을 실시한 결과 최소안전율이 각각 1.2, 1.07로 댐 높이의 3/4이상에 대하여 설계진도 2배의 값을 적용시킨 수정진도법의 안전율이 다소 낮게 나타났다. 장주기파(Hachinoe)를 적용하여 Newmark법에 의한 활동변위 및 발생진도를 검토한 결과 활동발생진도는 0.17g 이고 활동변위는 발생하지 않아 0.154g를 적용한 본 댐에서는 지진시 활동에 대한 안정성이 확보되는 것으로 판단된다.



Fig. 2 한계상태 평형해석(수정진도법) 결과

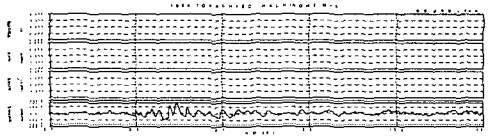


Fig. 3 Newmark법 해석결과

(2) 2차원 등가정적 해석

진도법을 적용한 등가정적 FEM해석결과 상시 만수위시에 비해 수평변위는 댐 정부에서 최대 6.6cm 증가하였으며, 침하량의 증가는 미소한 값을 나타냈다. 댐체 위치별 변위증감을 나타낸 Fig. 4와 같이 댐 저부에서 정부로 갈수록 변위가 크게 발생하였다. 이러한 결과는 CFRD의 진동모드가 정부로 갈수록 증가되는 것으로 등가정적해석시 진도법보다는 심도별 진도를 달리하는 수정진도법을 적용하여 해석하는 것이 바람직하다고 판단된다. 점안전을 검토결과 댐의 상류측 사면 상부에서 안전을 1.0이하인 영역이 국부적으로 분포하여 댐의 안정성 저하에는 미치는 영향은 미소한 것으로 판단된다. 또한, Face slab을 보요소로 모델링하여 휨인장응력을 검토한 결과 최대응력이 0.49kgf/cm^2 로 허용응력(6.02kgf/cm^2)이하이므로 안정한 것으로 판단된다.

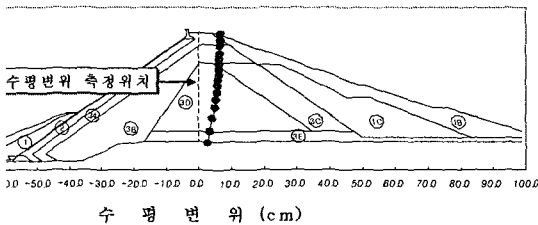


Fig. 4 진도법에 의한 변위 증감도

수정진도법은 Fig. 6과 같이 댐 높이의 3/4 이상에 대하여 설계진도의 2배, 그 하부에 대해서는 1배를 적용하여 해석하였다. 해석결과 상시 만수위시에 비해 수평변위는 댐 정부에서 최대 8.78cm 증가하였고, 침하량의 증가는 미소하게 나타났다. Fig. 7은 댐체의 위치별 변위 증감도를 나타낸 것으로 댐 저부에서 정부로 갈수록 변위가 크게 발생하며, 진도법을 적용한 결과 보다 수평변위가 최대 2.0cm 증가하였다. 점안전을 검토결과 댐의 진도법에 의한 결과보다 안전율이 다소 낮아지는 결과를 보이나 댐 체체의 전반적인 점안전을 분포와 주응력 방향 등을 고려하면 댐 사면의 파괴로 이어질 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다. Face slab의 휨인장응력은 진도법과 동일하게 나타나 안정한 것으로 판단된다.

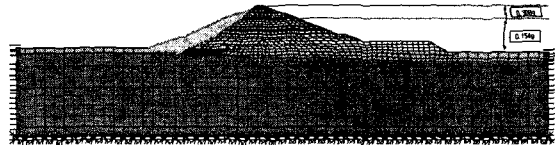


Fig. 5 수정진도법 해석모델도

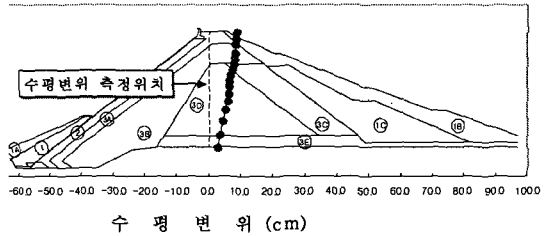


Fig. 6 수정진도법에 의한 변위 증감도

(3) 3차원 등가정적 해석

진도법을 적용한 3차원 등가정적해석의 모델은 Fig. 7과 같으며, 시공과정을 고려한 단계해석 및 Westergaard 식에 의한 동수압 재하 후 댐체에 수평진도를 가진하였다. 해석결과 Fig. 8과 같이 지진시 수평변위는 댐 정부에서 최대 6.0cm 증가하였다. 댐 정부의 지진시 누계변위는 수평방향 9.81cm로 2차원 해석보다는 다소 크게 나타났으나, 허용변위(30cm) 이내로 나타나 체체의 안정성에는 문제가 없다고 판단된다. Face slab의 휨인장응력을 검토한 결과 최대응력이 2.46kgf/cm^2 로 허용응력(6.02kgf/cm^2)이하이므로 안정한 것으로 판단된다.

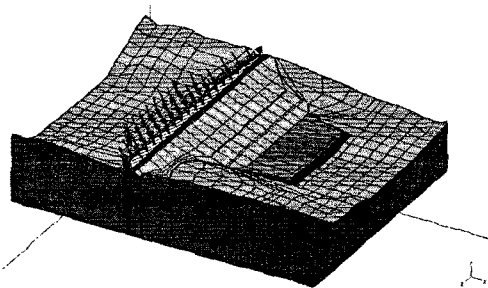


Fig. 7 3차원 등가정적 해석 모델도

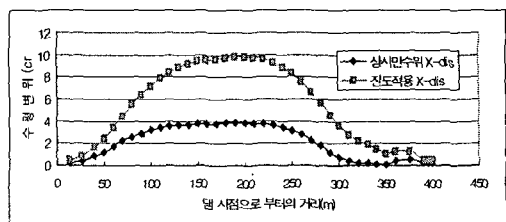


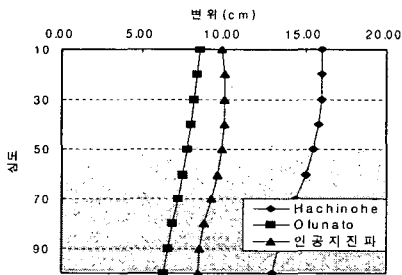
Fig. 8 3차원 진도법에 의한 변위증감도

4.2 동적해석 결과

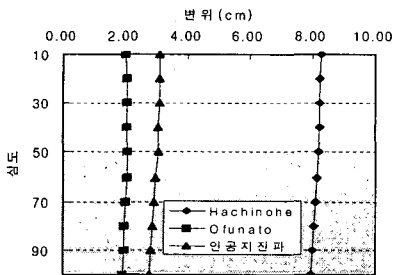
동적해석시 Hachinohe파, Ofunato파 및 인공지진파를 적용하여 2차원 주파수응답해석과 시간이력해석을 실시하였다. 또한, 2차원 해석결과 응답변위 및 응답가속도가 가장 크게 나타난 Hachinohe파를 적용하여 3차원 해석을 실시하고 진동대시험 결과와 비교하였다.

(1) 2차원 동적해석

본 댐에서 주파수응답해석과 시간이력해석에 의해 2차원 동적해석을 실시하여 댐 축상의 심도별 변위와 가속도 응답값을 정리하였다. 해석결과 댐 정부에서 최대변위와 가속도값은 두 해석법 모두 장주기파인 Hachinohe파를 적용하였을 때 가장 크게 나타났다. 최대 수평변위는 주파수 응답해석 결과가 1.94배 정도 더 크게 나타났으며, 최대 응답가속도는 시간이력 해석법이 약 1.16배 정도 크게 나타났다. 유한요소법에 의한 댐판리의 안정기준이 변위조건임을 고려한다면 주파수 응답해석결과가 댐의 안정성에 더욱 보수적인 해석결과를 제시하는 것으로 판단된다. 해석별 댐축상의 심도별 변위는 Fig.9와 같다.



(a) 주파수응답 해석결과



(b) 시간력응답 해석결과

Fig. 9 댐 축상의 변위 결과

(2) 3차원 동적해석

2차원 해석에 적용한 지진동중 가장 영향이 큰 장주기파(Hachinohe)를 이용하여 3차원 동적해석(시간이력해석)을 실시하였으며, 해석모델은 Fig. 10과 같다.



Fig. 10 3차원 해석모델(전체모델)

지진에 의한 유체와 지반 및 지반과 구조물의 상호작용에 의한 영향을 고려하기 위해 원지반과 댐체, 저수된 물, 원지반과 댐체의 물의 접합면 요소를 각각 모델링 하여 해석에 적용하였다. 해석결과 댐 정부의 가속도는 0.318g로 지반가속도의 0.154g보다 2.06배 증폭하였으며, 수평변위는 6.17cm, 연직변위는 0.33cm로 나타났다. 2차원 동적해석과 비교하여 변위와 가속도가 다소 작게 발생하였으나, 이는 해석조건에 차이로 2차원 해석은 지반조건을 반무한체로 가정한 반면, 3차원 해석시에는 현장상태와 동일한 지반조건을 적용했기 때문으로 사료된다.

(3) 진동대 시험 결과와 비교

2차원 및 3차원 동적해석결과와 신뢰성을 평가하고자 진동대 시험결과와 비교하였다. 진동대시험시 댐의 단면을 1/158 scale로 축소 제작한 모형체를 사용하였으며, 원형 구조물의 거동을 정량적으로 모사하고자 상사법칙을 적용하여 가속도계 및 변위계를 통한 댐 모형의 동적 거동특성을 파악하였다. 진동대 모형진경은 Fig. 11과 같다. 2차원 동적해석시 가장 영향이 큰 장주기파(Hachinohe)에 대하여 진동대 시험을 실시하였다. 결과 댐 정부의 가속도는 0.226g로 지반가속도의 0.154g보다 1.46배 증폭하였으며, 원형스케일로 환산한 최대변위는 수평변위 2.58cm, 연직변위 1.93cm 발생하였다. 이는 동적해석 결과와 비교하여 가속도, 변위가 다소 작게 발생하였으나, 댐 정부로 갈수록 가속도 변위가 증폭되는 경향 및 변위 발생 경향은 동적해석 결과와 비교적 잘 일치하였다.

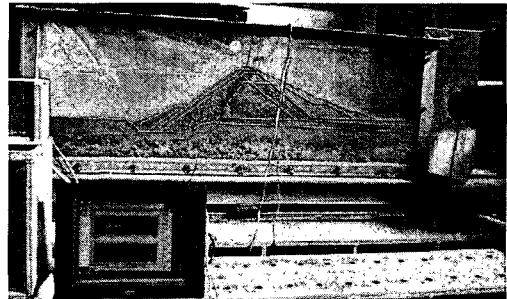


Fig. 11 진동대 시험 전경

4.3 해석 결과 비교

본 연구에서 댐의 내진해석시 적용한 등가정적해석과 동적해석 결과를 정리하면 Table 3과 같다.

등가정적해석 결과 수정진도법의 변위가 진도법에 비해 약

1.3배 크게 나타났다. 진동대 시험과 동적해석을 이용하여 설계지진 발생시 체체의 거동분석을 실시한 결과 Hachinohe파의 경우, 댐 정부의 지반가속도는 0.226에서 0.321g로 증폭되는 것으로 나타났다. 해석방법에 따른 편차는 다소 있지만 발생변위는 주파수응답해석이 크게 나타났으며, 응답가속도는 시간이력해석법이 크게 나타났다.

Table 3 내진검토 결과

구 분		댐 정부의 결과			비탈면 안전율	Face slab 인장응력 (kgf/cm ²)
		최 대 가속도 (g)	가속도 증폭비	최대 수평 변위 (cm)		
진동대 시험	장주기파	0.226	1.46	2.58	-	-
	FEM	-	-	6.60 (8.34)	-	0.49
진도법 (2차원)	한계평형해석	-	-	-	1.20	-
	Newmak	-	-	0.00	1.00	-
진도법 (3차원)	FEM	-	-	6.00 (9.81)	-	2.46
수정 진도법 (2차원)	FEM	-	-	8.78 (10.52)	-	0.49
	한계평형해석	-	-	-	1.07	-
주파수 응답 (2차원)	장주기파	0.277	1.80	16.03	-	-
	단주기파	0.160	1.04	8.49	-	-
	인공지진	0.177	1.15	9.91	-	-
시간 이력 (2차원)	장주기파	0.321	2.08	8.25	-	-
	단주기파	0.176	1.14	2.04	-	-
	인공지진	0.222	1.44	3.10	-	-
시간 이력 (3차원)	장주기파	0.318	2.06	6.17	-	-

5. 결론

본 연구에서는 최근 댐 시공시 다수 채택되어 관심이 높아진 CFRD(콘크리트 표면차수벽형 석괴댐)에 대하여 댐의 내진 안정성 평가방법인 등가정적해석과 동적해석법을 적용하고 댐의 지진시 동적거동특성을 비교하였다.

1) 등가정적 해석시 진도법과 수정진도법의 차이를 분석하고자 안전율에 기초한 한계평형해석법과 지반변위에 기초한 유한요소해석을 수행하였다. 한계평형해석결과 최소안전율은 진도법 1.2, 수정진도법 1.07로 나타났으며, 유한요소 해석결과 수정진도법에 의한 최대변위가 약 2cm 정도 더 크게 나타났다. 진도법에 의한 2차원 및 3차원 유한요소해석결과 3차원 조건의 최대 수평변위가 약 1.5cm정도 더 크게 나타났다.

2) 주파수응답해석과 시간이력해석에 의해 2차원 동적해석을 실시한 결과 최대 수평변위는 주파수 응답해석결과가 1.94배 정도 더 크게 나타났으며, 최대 응답가속도는 시간이력 해석법이 약 1.16배 정도 크게 나타났다. 유한요소법에 의한 댐관리의 안정기준이 변위조건임을 고려한다면 주파수 응답해석결과가 댐의 안정성에 더욱 보수적인 해석결과를 제시하는 것으로 판단된다.

3) 시간이력 해석법에 의한 3차원 해석결과 응답변위 및 가속도값이 2차원 해석결과 보다 다소 작게 발생하였다. 이는 2차원 해석시 지반조건을 반무한체로 가정한 반면, 3차원 해석시에는 현장상태와 동일한 지반조건을 적용했기 때문으로 사료된다.

4) 2차원 및 3차원 동적해석결과와 신뢰성을 평가하고자 진동대 시험결과와 비교한 결과 진동대 시험의 결과 값이 해석결과 보다 과소 평가되었으나, 댐 정부의 응답가속도 및 변위 발생 경향은 동적해석 결과와 비교적 잘 일치하였다.

5) 이상의 해석결과 안전율에 기초한 등가정적 해석시 구조물의 심도별 진도를 고려하는 수정진도법, 변위에 기초한 유한요소 해석시 주파수 응답해석법을 적용함이 댐의 안정성에 더욱 보수적인 해석결과를 제시하는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1)사단법인 한국수자원학회, 댐설계기준, 2003
- (2)이종근, "사력댐의 지진시 역학적 거동특성과 내진안정해석", 공학석사, 동국대 산업기술환경대학원, 2001, 62p
- (3)임정열, "해석방법에 따른 콘크리트댐의 내진성능평가", 한국지진공학회 논문집, 제7권 제5호, 2003년 10월
- (4)편집부, "내진설계법/한계상태 설계법", 과학기술, 1998
- (5)Newmark, N.M.(1965) "Effect of Earthquakes on Dams and Embankments", Geotechnique, Institute of Civil Engineers, London, Vol. 15, No.2, p.139
- (6)Kopplula, S. D. "Pseudo-Static Analysis of Clay Slopes Subjected to Earthquakes", Geotechnique, Institute of Civil Engineering, London, Vol. 34, No.1 pp.71-79
- (7)Seed, H.B., Makdisi, F.I., and DeAlba,P.(1978). "Performance of Earth Dams During Earthquakes", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, No. GT7 pp. 967-994