

실측 동적물성을 이용한 기존 사력댐의 동적거동분석

Dynamic Analysis of Existing Rockfill Dam Using Dynamic Properties by Field Test and Geophysical Exploration

이종욱¹⁾, Jong-Wook Lee, 오병현²⁾, Byung-Hyun Oh

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, KIWE, KOWACO

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원, Head Researcher, KIWE, KOWACO

SYNOPSIS : For seismic response analysis of rockfill dam, dynamic material properties, by field test, are needed. Density and elastic wave profiles have to be known to get an information of the material properties of structure. In this study, various field tests are applied to the example of rockfill dam to get an information of dynamic material properties and seismic safety is evaluated by seismic response analysis with the result of field tests.

Keywords : Dynamic Properties, Rockfill Dam, Field Test, Seismic Response Analysis

1. 서론

지진 발생시 사력댐의 거동을 분석하는 지진응답 해석을 위해서는 댐 체체의 동적 물성 자료가 필수적이다. 댐 체체의 동적 물성을 얻기 위해서는 심도 또는 지층별 밀도와 탄성과 속도를 구하여야 한다. 한편, 댐체의 지진응답 해석에는 동적 물성을 이용한 동적 해석과 정적 물성을 이용한 정적 해석이 있으며, 정적 해석에서는 탄성과 속도 대신 응력-변형률에 의한 탄성계수를 입력변수로 한다. 이에 본 연구에서는 다양한 현장조사방법을 대상댐에 적용하여, 댐체의 지진응답 해석의 입력변수가 되는 정적 물성과 동적 물성을 산출하고 이를 적용하여 지진응답해석을 통한 본댐의 내진성능을 평가를 실시하였다.

2. 대상댐 동적해석

2.1 개요

본 댐의 동적 FEM 해석에 사용된 동적해석 프로그램은 AFIMEX에 내장되어 있는 2차원 유한요소 지반변형해석 전용 솔버인 SAMBA를 사용하였다. SAMBA는 2차원 전응력 지반동적해석 솔버로 잘 알려진 FLUSH와 동일한 프로그램이다. 해석에 사용된 모델링은 아래 그림과 같다. 총 절점수 910개이고 총 요소수는 886개이다. 그리고 좌우양단의 지반을 전달경계로 정의하고 기반암의 저면을 고정으로 하였다. 또한 지진동은 기반암 저면의 좌측에 입사하는 것으로 하였으며 지진동의 크기는 기반암에서 0.154g 되도록 조정하였다. 또한 지진시 댐의 상류측 사면에 작용하는 동수압은 부가질량을 이용하여 해석에 적용하였다.

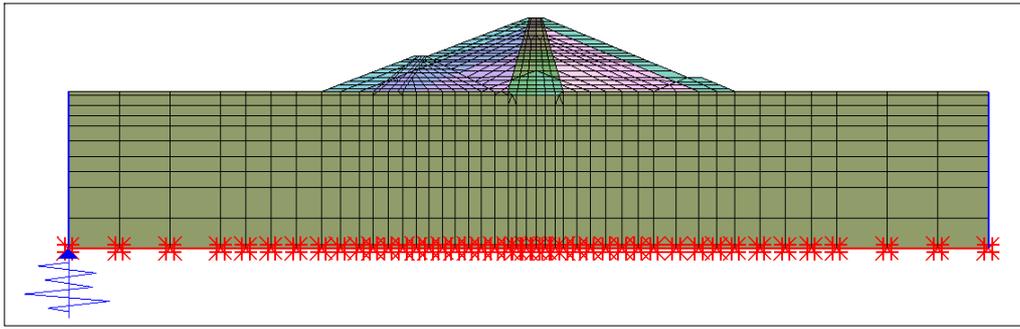


그림 1. 대상댐 동적해석 모델도

2.2 재료의 동적특성

댐 재료는 그림 2에 나타난 것과 같이 댐의 축조재료별로 댐 표면에서의 깊이에 따라 11개의 존(Zone)으로 나누어 해석을 수행하였다. 각 존은 금번 과업을 수행하면서 실시한 영천댐에 대한 물리탐사(전기비저항 탐사, 굴절법 탄성과 탐사, 표면파 탐사), 현장조사 및 시험(시추 조사, 표준관입 시험, 공내 재하 시험, 밀도 검증, 공내 탄성과 탐사, 시추공간 탄성과 탐사), 실내시험(기본물성시험, 등방삼축 ($\bar{\sigma}$) 시험, 반복비배수삼축 시험) 등의 사력댐의 동적물성치 산정을 위하여 실시한 각종 조사 및 시험 결과를 이용하여 표 1, 그림 2와 같이 결정하였다. 특히, 본 댐의 Core재에 대해서는 변형율의존특성곡선을 구하기 위하여 총 3개 Set(1Set = 구속압에 따라 3개의 공시체를 시험)의 반복비배수삼축 시험을 수행하였고 1개 Set(1Set = 구속압에 따라 3개의 공시체를 시험)의 공진주 시험을 수행하였다. 이와 같이 실시한 동적변형율시험을 비교·분석하여 표 2, 그림 3과 같은 정규화된 변형율의존특성곡선을 구하여 동적 FEM 해석에 적용하였다. 본 해석에 적용한 물성값은 기존 해석시 보다 Core 존은 대략 40%정도 감소되었고 Filter 존은 200%증가되었으며 S & G존은 대략적으로 유사하게 적용되었다. 또한, 기초지반의 경우에도 물리탐사 결과를 이용하여 기존 해석시 보다는 50% 감소된 값을 적용하였다.

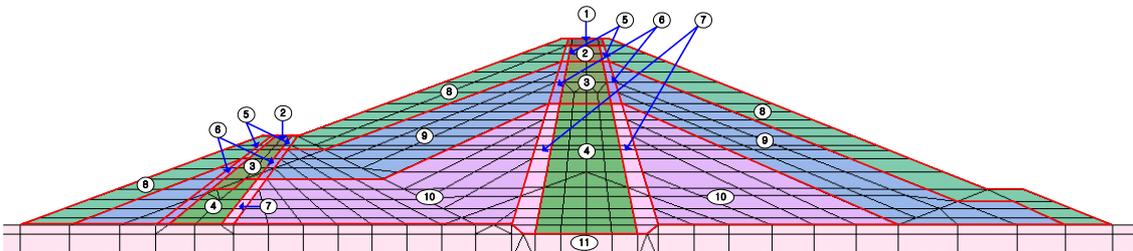


그림 2. 대상댐 동적해석을 위한 재료번호

2.3 입력지진파

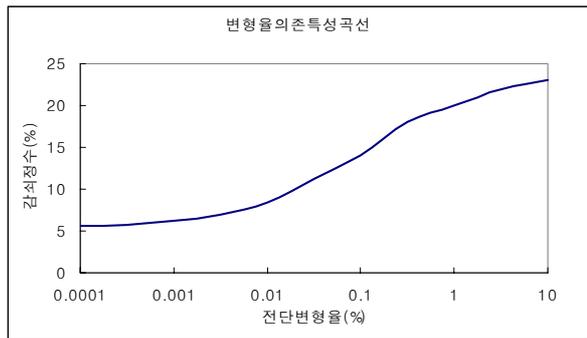
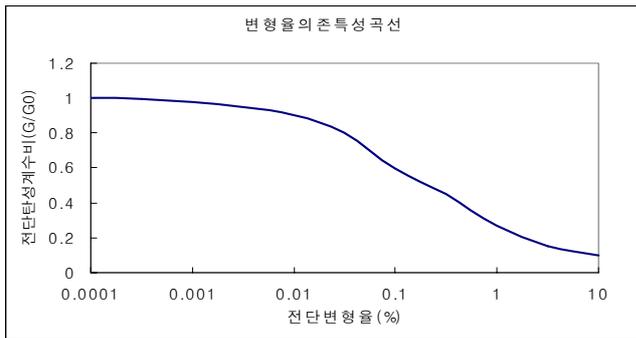
지진에 의한 동하중 작용시 지반과 구조물의 시간에 따른 응력변화 및 변형을 해석하기 위해서는 지반운동에 대한 전체시간이력과정을 나타내어야 한다. 지반운동에 대한 시간이력은 가속도로서 나타내며, 이를 가속도시간이력(지진동)이라 한다. 그러나 실제 지진이 지속되는 시간을 전부 가속도시간이력으로써 동적해석에 사용하는 경우는 거의 없으며, 대상이 되는 구조물의 형상, 사용목적 등에 따라 적절한 가속도시간이력을 선정하는 것이 일반적이다. 가속도시간이력의 선정은 파의 주파수분포, 최대가속도의 크기, 지속시간, 데이터마다의 시간간격 등의 조건에 따라 이루어진다. 동적해석에 적용한 실측지진파는 동적 FEM 해석에 널리 사용되는 대표적인 장주기파인 Hachinohe 지진기록(그림 4)을 사용하였다.

표 1. 대상댐 재료의 동적특성

재료 번호	재료명	단위체적중량 (γ , t/m ³)	동포아송비 (ν_d)	초기전단탄성계수 (G_0)	초기감쇠비 (h_0)
1	Sand&Gravel	1.8	0.374	33,960	0.05
2	Core	2.136	0.404	67,240	0.056
3	Core	2.145	0.401	93,140	0.056
4	Core	2.146	0.425	164,000	0.056
5	Fillter	2.0	0.342	11,370	0.05
6	Fillter	2.0	0.372	31,030	0.05
7	Fillter	2.0	0.435	57,430	0.05
8	Sand&Gravel	2.0	0.342	11,370	0.05
9	Sand&Gravel	2.0	0.372	31,030	0.05
10	Sand&Gravel	2.0	0.435	57,430	0.05
11	HARD ROCK	2.5	0.2	833,333	0.05

표 2. 대상댐 심벽의 정규화 변형률 의존특성

전단변형률(%)	전단탄성계수비(G/G_0)	감쇠정수(%)
0.0001000	1.000	5.600
0.0003162	0.995	5.768
0.0010000	0.980	6.160
0.0031620	0.950	6.944
0.0100000	0.900	8.400
0.0316200	0.800	11.200
0.1000000	0.600	14.000
0.3162000	0.450	18.000
1.0000000	0.270	20.000
3.3162000	0.150	22.000
10.0000000	0.100	23.000



(a) 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 변화 (b) 전단변형률에 따른 정규화 감쇠비의 변화
그림 3. 대상댐 심벽의 정규화 변형률 의존특성곡선

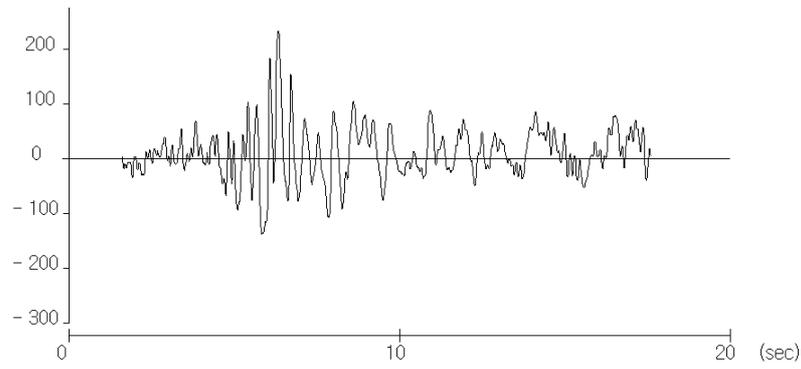


그림 4. 입력지진파(Hachinohe 지진파)

3. 해석결과

3.1 응력

콘터도로 나타낸 각 해석결과는 지진동이 적용된 전 시간 동안에서 가장 큰 값을 나타낸 것이다.

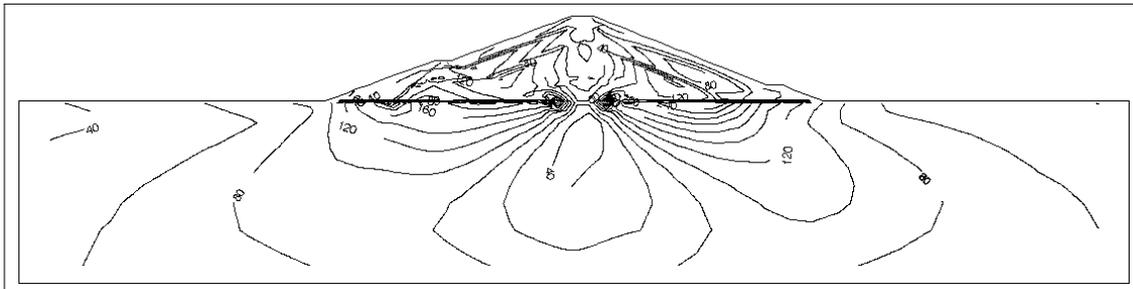


그림 5. 수평응력의 최대값 분포도

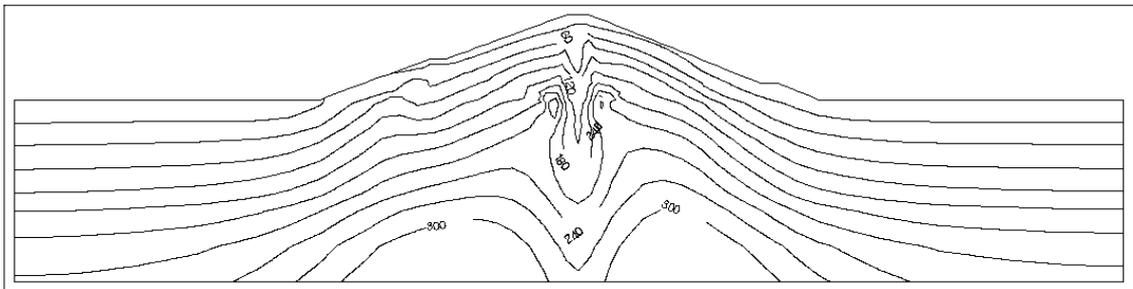


그림 6. 수직응력의 최대값 분포

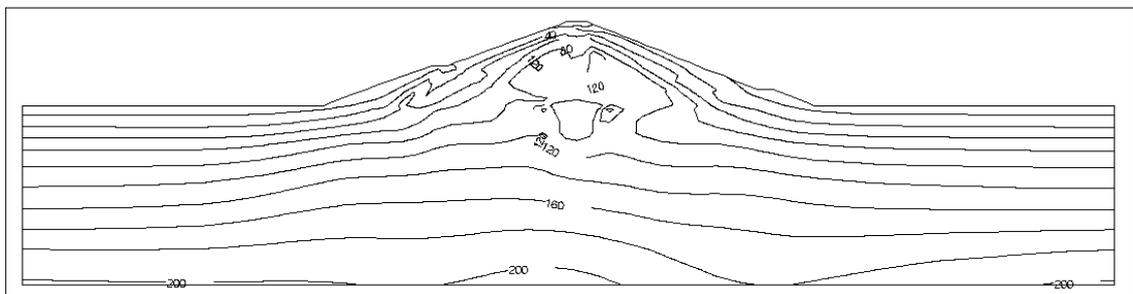


그림 7. 전단응력의 최대값 분포도

각 방향 응력은 댐과 지반이 접하는 곳에서 응력이 집중되며, 특히 댐의 Core부가 기반암에 관입되어 있는 곳에서 응력이 집중적으로 커지는 것으로 나타났다.

3.2 가속도 및 변위

가속도시간이력을 적용한 동적 FEM 해석결과는 응답가속도와 응답변위로써 그림 8과 같이 댐 중앙에서 나타내었다. 또한 댐에 재하한 가속도시간이력의 재하방향이 수평방향이므로 수평방향의 변위와 가속도에 대한 결과만을 나타내었다.

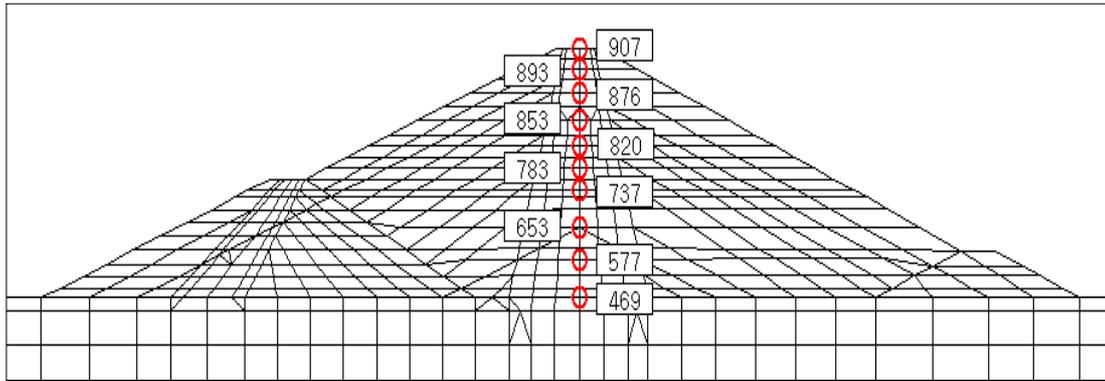


그림 8. 동적시간이력해석결과 추출위치

본 댐에서 발생한 최대응답가속도는 댐 하단부(절점번호 469: 151.02gal)에서부터 댐의 상부쪽으로 갈수록 서서히 증가하다가 댐의 중앙부(절점번호 737: 209.56gal)에서부터 댐 천단(절점번호 907: 771.84gal)으로 갈수록 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 댐 하단부에 대한 댐 천단에서의 가속도 증폭량은 약 5.11배인 것으로 나타나 기존 해석('02년)에 의한 4.65배보다는 다소 증가된 값을 나타내었다.

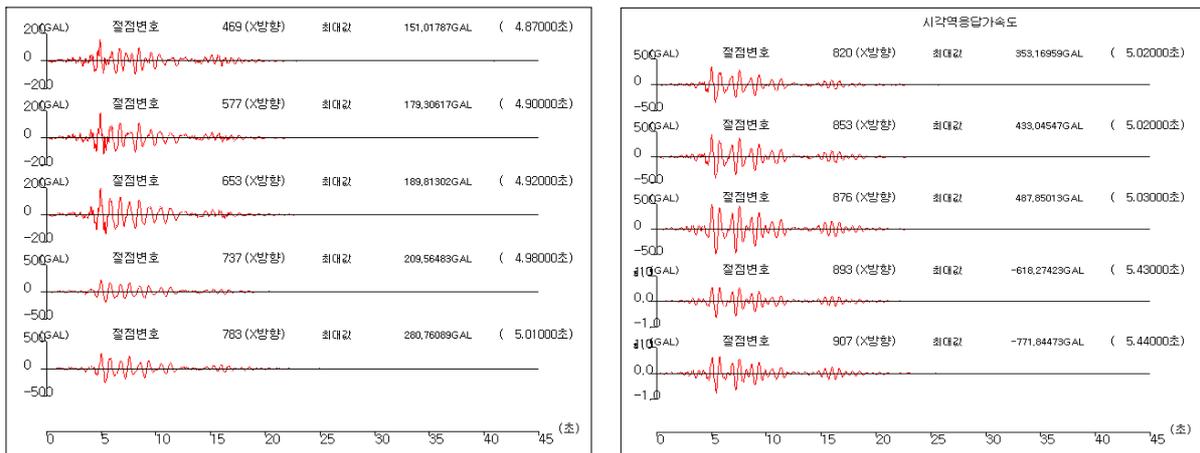


그림 9. 체체 중앙에서의 수평방향 응답가속도

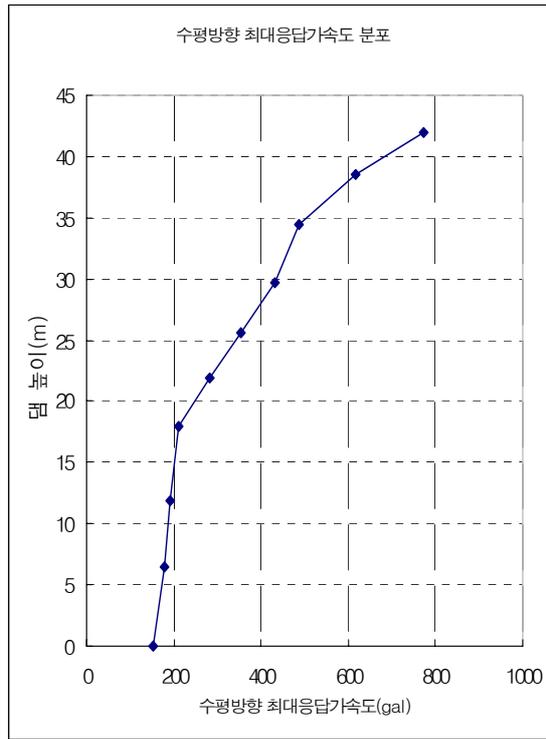


그림 10. 수평방향 최대응답가속도 분포

최대응답변위는 댐의 하단부(절점번호 469: 1.80cm)에서 댐의 중앙부(절점번호 820: 5.24cm)까지 서서히 증가하기 시작한 변위는 댐의 중앙부에서부터 댐의 천단(절점번호 907: 10.08cm)에 이를 때까지 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있으며 기존 해석에 의한 댐 천단의 변위인 15.01cm 보다는 작은 값을 나타내었다. 이 경향은 댐의 최대응답가속도분포와 유사하며, 댐 체 내부의 큰 구속압의 영향을 받았기 때문에 댐 천단부에 비하여 댐 중앙하부에서의 응답값이 작은 것으로 판단된다.

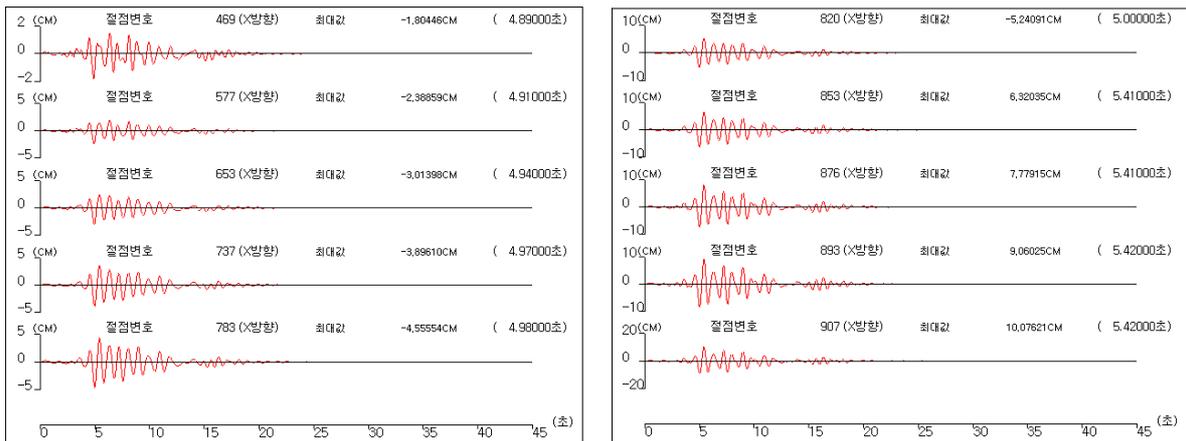


그림 11. 수평방향 응답변위도

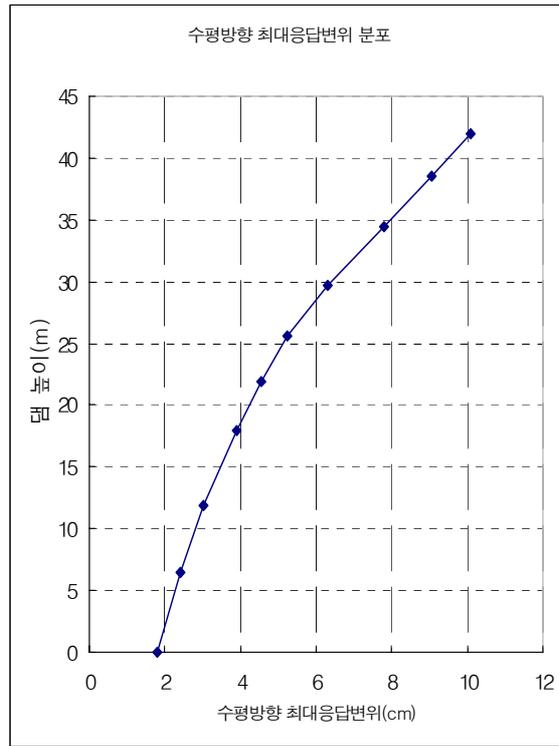


그림 12. 수평방향 최대응답변위도

4. 결론

본 연구에서는 다양한 현장조사방법을 대상댐에 적용하여, 댐체의 지진응답 해석의 입력변수가 되는 정적 물성과 동적 물성을 산출하고 이를 적용하여 지진응답해석을 통한 본댐의 내진성능을 평가를 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 각 방향의 응력은 댐과 지반이 접하는 곳에서 응력이 집중되며, 특히 댐의 Core부가 기반암에 관입되어있는 곳에서 응력이 집중적으로 커지는 것으로 나타났다.
- 2) 최대응답가속도는 댐 하단부에서부터 댐의 상부쪽으로 갈수록 서서히 증가하다가 댐의 중앙부에서부터 댐 천단으로 갈수록 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 댐 하단부에 대한 댐 천단에서의 가속도 증폭량은 약 5.11배인 것으로 나타나 기존 해석('02년)에 의한 4.65배보다는 다소 증가된 값을 나타내었다.
- 3) 최대응답변위는 댐의 하단부에서 댐의 중앙부까지 서서히 증가하기 시작한 변위는 댐의 중앙부에서부터 댐의 천단에 이를 때까지 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있으며 기존 해석에 의한 댐 천단의 변위인 15.01cm 보다는 작은 값을 나타내었다. 이것은 댐의 최대응답가속도분포와 유사하며, 댐체 내부의 큰 구속압의 영향을 받았기 때문에 댐 천단부에 비하여 댐 중앙하부에서의 응답값이 작은 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 오병현, 임정열, 이종욱(2003), “댐 시설물의 내진성능 및 안전도 평가 연구”, 한국수자원공사, pp.44~455.
2. 손호응 외(1999), “지반환경물리탐사”, 시그마프레스.
3. 장현삼, 임해룡, 홍재호(1999), “시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적 응용”, 한국지구물리탐사학회 특별심포지움.
4. 한국지반공학회(1994), “지반조사결과의 해석 및 이용”.
5. 도덕현 외, 내진공학, 효성출판사, 1992
6. ICOLD : Earthquake Analysis Procedure For Dams, state of the art, Bulletin, 1986
7. Norihisa Matsumoto, Nario Yasuda, Masahiko Ohkubo, Norio Sakaino, “Dynamic Analysis of a Rockfill Dam”, Public Works Research Institute Ministry of Construction, Japan, 1988.
8. AFIMEX user's Manual