

사력댐의 향상된 내진성능 평가방법

Improved Evaluation for the Seismic Capacity of Rock-Fill Dam

권혁기¹⁾, Hyek-Kee Kwon, 장중렬²⁾, Jung-Ryeol Jang, 허춘근³⁾, Choon-Kun Hur

1) 한국시설안전기술공단 댐항만실 차장, Manager, Dam Safety Division, Korea Infrastructure Safety & Technology(KISTEC)

2) 한국시설안전기술공단 댐항만실 과장, Assistant Manager, Dam Safety Division, KISTEC

3) 한국시설안전기술공단 댐항만실 직원, Staff, Dam Safety Division, KISTEC

SYNOPSIS : The objective of this study is firstly to frame up the seismic safety of rock-fill dams. It is necessary to analyze seismic response and evaluate seismic performance of rock-fill dams during earthquake. In this study, seismic damage and dynamic analysis of rock-fill dams using structural analysis package such as FLAC were performed. According detailed analysis, the vibration through the dam structure seems to be very critical depending on the shape of the dams. For more precise evaluation of seismic fragility of rock-fill dams, further research is still needed.

Key words : rock-fill dam, seismic performance evaluation

1. 서 론

지진에 대한 댐 사면의 안정성 표현방법은 유사정적해석법(진도법)과 동적해석법(지진응답해석)으로 크게 구분될 수 있다. 유사정적 해석법은 기존 사면의 정적 초기 응력상태에 추가로 작용하는 동하중을 유사정적하중으로 대체하는 정역학적 방법으로 간편하고 보수적인 해석결과를 얻을 수 있는 반면, 구조물의 동적특성과 지반-구조물 상호작용을 규명할 수 없는 한계성을 내포하고 있다. 동적해석법은 지진으로 인해 유발되는 지반의 관성력을 시간이력으로 고려함으로써 각 시간에 따라 발생하는 응력과 변형에 대한 변화를 해석할 수 있다.

「댐설계기준(건설교통부, 2003)」에서는 국내의 빈약한 지진 해석자료와 연구 미흡으로 동적해석법을 댐의 내진기준으로 규정하기에는 무리가 있다고 보고 종래의 보수적으로 채택되어온 진도법을 내진설계의 기본으로 정하고 있다. 반면에 최근 외국에서는 지진파에 의한 댐의 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있는 실정이다.

본 고에서는 하나의 사력댐을 대상으로 진도법에 의한 사면안정해석과 인공지진 및 실지진의 시간이력을 이용한 동적해석을 실시하여 댐체의 내진안전성평가 결과를 분석하고 해석방법에 따른 차이점을 비교하였다. 입력지진 결정시 필요한 영향인자는 「댐설계기준」과 「기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령(건설교통부·한국시설안전기술공단, 2004)」의 기준을 근거로 하였다.

2. 본 론

2.1 시설물 개요

대상 시설물은 1980년 준공된 길이 300m, 높이 42m의 중앙차수벽형 사력댐으로, 제체는 Core,

Filter, Sand & Gravel, Riprap 존으로 구성되어 있다.

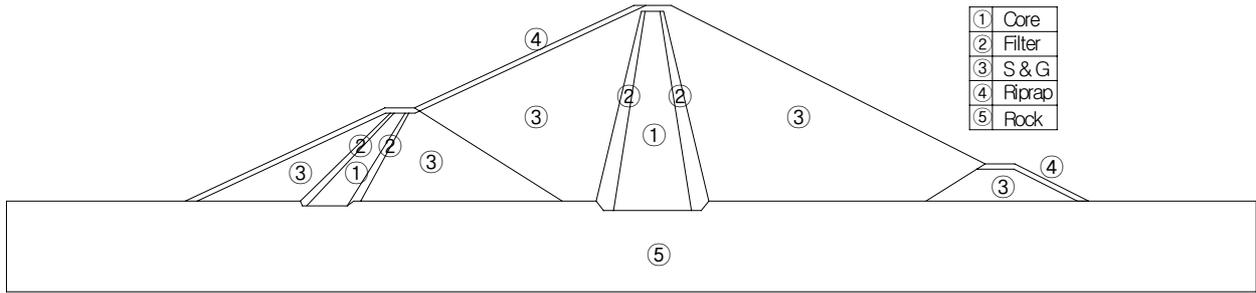


그림 1. 댐 표준단면도

2.2 내진성능 평가기준

「댐설계기준」에서는 지진재해도 분석결과에 의해 우리나라 지진구역을 지진 I, II 구역으로 분류하고 있으며, 이중 강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도를 지진 II 구역으로 구분하고 있다. 또한 각 지진구역에 대한 평균재현주기별 최대 유효지반 가속도가 중력가속도에 대한 비를 의미하는 위험도 계수는 평균재현주기 500년에 대한 지반운동을 기준으로 재현주기에 따라 증감을 하도록 되어 있으며, 댐의 중요도에 따라 내진특등급과 내진 I 등급의 두가지로 분류하여 각 내진등급별 평균재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 평가하도록 하고 있다.

본 해석에서는 ○○댐을 내진 I 등급, 지진 I 구역, 보통암 지반으로 분류하고 여기에 상응하는 지진계수를 적용하여 진도법 및 동적해석법에 의해 댐체의 안전성여부를 판단하였다. 평가시의 안전성 판단기준은 진도법의 경우 「댐설계기준」의 지진시 최소안전율 1.2이상을 취하였으며, 동적해석법은 「기존댐의 내진성능평가 및 향상요령」에 제시하고 있는 지진시 댐체의 변형기준인 체체높이 1%이하를 적용하였다.

2.3 진도법에 의한 사면안정해석

2.3.1 해석방법

대상댐에 대한 해석은 예상 파괴활동면을 원호 또는 비원호라고 가정하고 여러 개의 절편으로 나누어 각 절편의 저면에 작용하는 토괴의 활동에 대한 평형을 고려하여 최소안전율을 구하는 방법으로서 현재 댐 사면의 안정해석시 가장 널리 사용되고 있는 절편법(slice method)을 적용하였다. 사용된 수치해석 프로그램은 SLOPE/W이며, 해석방법으로는 Bishop의 간편법을 적용하였다. Bishop의 간편법으로 얻은 안전율은 그 정확도가 실용상 충분한 것으로 평가되고 있으며 그 이유는 모멘트평형이 만족되는 경우 안전율은 절편간 작용력에 대한 가정에 둔감하게 반응하기 때문이다. 이 방법은 전응력해석과 유효응력해석에 모두 적용할 수 있으며 현재 가장 널리 쓰이고 있다.

해석단면은 댐체 최대단면부를 표준단면으로 선정하였으며, 지진에 의한 안정성 검토시 ○○댐이 지진 I 구역에 속하므로 재현주기 500년(내진 I 등급)에 해당되는 수평지진계수 0.11을 사용하였고, 수직지진관성력은 일반적으로 수평관성력의 1/2로 적용하므로 이를 준용하여 해석을 실시하였다.

입력정수의 결정은 코어의 경우 시험굴(Test Pit)조사에 의한 실내시험 결과치를 이용하였으며, 그 외의 재료에 대한 입력정수는 설계시의 값을 적용하였다.

표 1. 입력 물성치

구 분	습윤단위중량(tf/m ³)	점착력(tf/m ²)	내부마찰각(°)
Core	2.72	2.5	30.8
Filter	2.00	-	30.0
Sand & Gravel	2.00	-	30.0
Riprap	1.80	-	40.03

2.3.2 해석결과

사면안전을 기준은 절대적인 값으로 정하기에는 한계성이 있으며, 원칙적으로는 안정계산에 적용된 토질정수값의 대표성, 안정해석 방법 및 계산횟수, 시공과 설계의 일치가능성 여부, 외부 하중조건의 변화, 구조물의 중요도 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 하며 「댐설계기준」에서는 이러한 요소 등을 고려하여 지진시 최소안전율을 1.2로 규정하고 있다.

일반적으로 사력댐의 경우 정상침투시는 하류사면, 수위급강하시는 상류사면에서 안전율이 가장 작은 것으로 알려져 있다. 그러나 본댐의 해석결과에서는 표 2와 같이 상시만수위 상류사면에서의 지진시 최소안전율이 1.077로서 가장 작은 것으로 해석되었으며, 상시만수위 지진시 하류사면과 수위급강하 지진시 상류사면 또한 「댐설계기준」의 활동에 대한 최소안전율 기준 1.2 이하로서 지진발생시 사면은 불안정한 상태로 나타났다. 이는 원호활동 안전율에 가장 큰 영향을 미치는 Sand & Gravel Zone의 강도정수를 설계당시의 내부마찰각(30°)을 적용하여 해석한 결과로서 Sand & Gravel Zone이 타댐에서 일반적으로 내부마찰각이 35°이상인 점을 고려할 때 설계시의 강도정수는 매우 작게 적용된 결과에 기인한 것으로 판단된다.

표 2. 해석결과 안전율

구 분		지진시 최소안전율
상시만수위(정상침투)	상류사면	1.077
	하류사면	1.109
수위급강하	상류사면	1.105

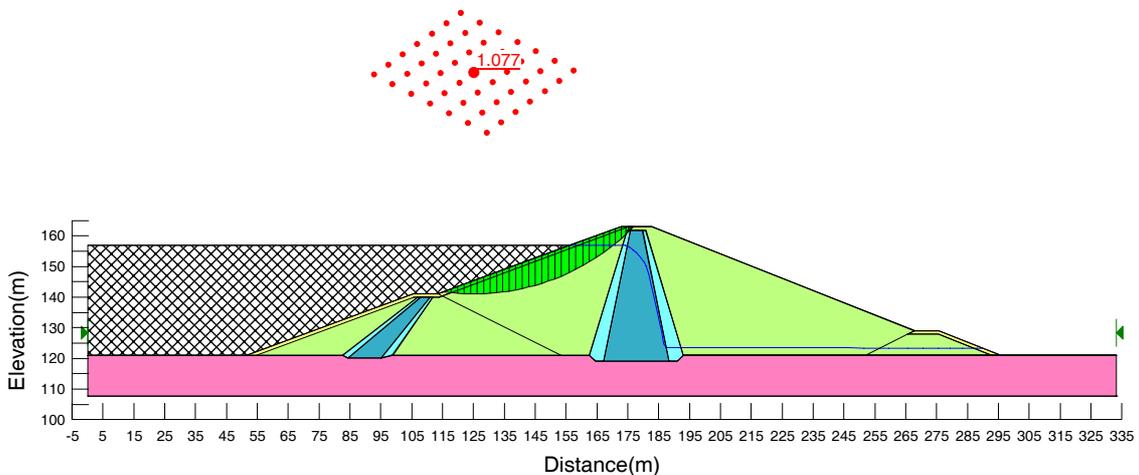


그림 2. 상시만수위 상류사면 지진시 해석결과

2.4 지진응답해석

2.4.1 입력지진과 결정

일반적으로 지진응답해석을 위한 가속도 시간이력은 내진설계를 하고자 하는 지점에서 계측된 지진기록을 사용하는 것이 가장 이상적이거나 이러한 경우는 극히 드물며, 특히 국내의 경우에는 사용할 수 있는 지진기록이 거의 없는 상태이므로 가상의 인공지진 및 여타 지역(국내·외)에서 계측된 지진기록을 이용하여야 한다. 이렇게 선택되어진 지진기록은 내진설계 대상지역에서 발생 가능한 모든 지진의 주파수 대역을 포함하여야 한다. 따라서 일반적으로 장주기 및 단주기 실지진 기록을 사용하여 설계에 반영하거나, 해당지역의 표준설계응답스펙트럼으로부터 작성된 인공지진 가속도 이력곡선을 사용하는 방법이 있다.

본 해석에서는 실지진 기록으로 장주기 및 단주기 지진과, 대상지역 내진 I 등급 구조물의 표준설계응답스펙트럼으로부터 작성된 인공지진 가속도 이력곡선을 보통암 지반의 입력 지진운동으로 사용하였다. 실지진 기록은 지진응답해석에 널리 쓰이고, 지진기록의 주파수 대역이 비교적 넓은 일본 Miyagi-ken-oki 단주기 지진파인 Ofunato항 지진기록 및 Tokachi-oki 장주기 지진파인 Hachinohe항의 지진기록을 이용하였으며, 해석 대상지역의 설계지반운동(0.11g)에 맞추어 최대지반가속도 크기를 조절하였다.

표 3. 실지진 기록

지진형태	제 원	지진규모	최대가속도
Hachinohe	1968년3월16일 Tokachi 앞바다에서 발생	7.9	0.170g
Ofunato	1978년6월12일 Miyagi현 앞바다에서 발생	7.4	0.161g

인공지진의 경우는 주파수영역에서 인공지진기록을 생성하는 대표적 프로그램인 Eqmaker를 이용해 내진 I 등급수준의 표준설계응답스펙트럼에 대하여 지진기록을 작성하였다. 그림 3은 생성된 인공지진기록의 시간영역 이력곡선을 나타낸 것이며, 그림 4는 인공지진과 표준응답스펙트럼을 비교한 것으로서 인공적으로 생성시킨 지진기록은 표준응답스펙트럼에 부합되는 기록임을 알 수 있다.

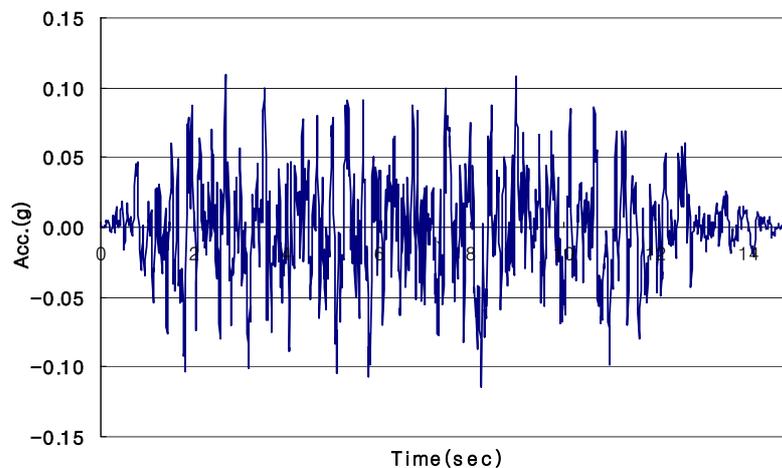


그림 3. 인공지진 가속도 시간영역 이력곡선

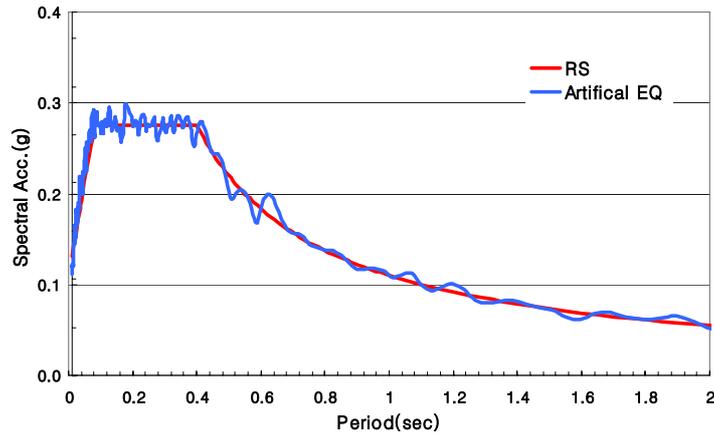


그림 4. 인공지진과 표준응답스펙트럼 비교

2.4.2 해석방법

지진응답해석을 위해 사용된 수치해석 프로그램은 지반해석에 널리 사용되고 있는 FLAC-2D이며, 모델은 Mohr-Coulomb Model을 적용하였다. 해석시의 대표단면은 진도법과 동일한 최대단면부를 선정하여 해석수위는 상시만수위로 설정하고 정적해석을 실시한 다음 정적해석결과를 초기조건으로 하여 동적해석을 실시하였다.

지반의 재료감쇠를 고려하기 위하여 Rayleigh 감쇠를 5%로 적용하였고 지진동은 기반암 저면에 입사하는 것으로 하였다. 해석단면은 유한요소(finite element)영역과 유한요소 바깥쪽의 무한요소(infinite element) 영역으로 구분하여, 유한요소는 사각형 요소를 사용하였고 무한요소는 하중이 가해지고 나서 일정시간이 흐른 후 경계 지점에서 파가 반사되어 돌아오는 영향을 없애기 위하여 사용하였다. 이러한 무한요소의 사용은 동적해석에서 매우 중요하며, 해석에서는 Lysmer와 Kuhlemeyer(1969)에 의해 개발된 에너지 흡수 무한요소를 이용하였다. 이 무한요소는 모델의 경계면에 수직·수평 방향으로 두 개의 독립적인 감쇠기를 붙여 경계면에서 에너지를 흡수하도록 되어있다. 따라서, 무한요소가 사용된 원거리 영역에서는 변위, 응력, 에너지 등이 지수함수 형태로 감소하여 매우 작은 값이 되므로 특별한 경계조건의 적용이 필요치 않다.

입력정수 결정에 있어서 코어의 최대진단탄성계수는 MASW탐사 결과로부터 획득하였으며, 그 외의 Zone에 대해서는 표 4와 같이 沢田(Sawada) 등이 5개 사력댐에 대한 지진파속도측정에 의해 제안된 사력댐의 일반적인 속도모델을 이용하여 동적 진단탄성계수와 포와슨비를 추정하였다.

표 4. 사력댐의 속도분포(단위 : m/s)

Zone 깊이Z(m)	Rock		Core	
	불포화	포화	High	Low
0~5	245		210	
5~30 30~	$250Z^{0.20}$ $250Z^{0.315}$	$250Z^{0.20}$	$180Z^{0.35}$	$140Z^{0.34}$
포와슨비	$0.375\sim 0.006Z^{0.58}$	$0.49\sim 0.001Z^{0.95}$	$0.45\sim 0.006Z^{0.60}$	

댐체의 동적강성은 실제 완성된 댐에서는 내부의 구속압이 높고 체체 재료가 잘 다짐되어 댐의 표면 부근보다 내부에서 더 크므로 그림 5와 같이 높이별로 몇 개의 Zone으로 구분하여 입력물성을 적용하였다.

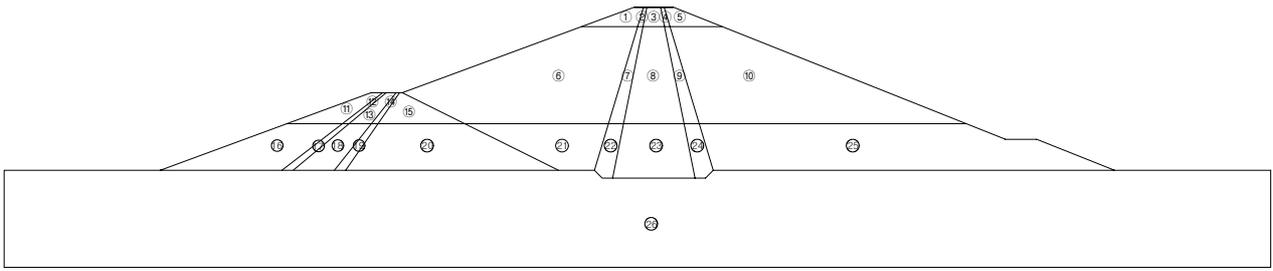


그림 5. 해석단면 재료별 구분

표 5. 동적해석 입력정수

Zone	단위중량 (tf/m ³)	최대전단 탄성계수(tf/m ²)	포와슨비	점착력 (tf/m ²)	마찰각 (°)	투수계수 (m/sec)
1	2.0	12,250	0.36		30.0	2.30×10 ⁻⁴
2	2.1	9,450	0.44		30.0	1.02×10 ⁻⁵
3	2.1	8,744	0.44	2.5	30.8	1.62×10 ⁻⁸
4	2.1	9,450	0.44		30.0	1.02×10 ⁻⁵
5	2.0	12,250	0.36		30.0	2.30×10 ⁻⁴
6	2.0	39,145	0.48		30.0	2.30×10 ⁻⁴
7	2.1	28,258	0.42		30.0	1.02×10 ⁻⁵
8	2.1	25,430	0.42	2.5	30.8	1.62×10 ⁻⁸
9	2.1	28,258	0.42		30.0	1.02×10 ⁻⁵
10	2.0	39,145	0.48		30.0	2.30×10 ⁻⁴
11	2.0	46,223	0.47		30.0	2.30×10 ⁻⁴
12	2.1	37,484	0.41		30.0	1.02×10 ⁻⁵
13	2.1	37,484	0.41	2.5	30.8	1.62×10 ⁻⁸
14	2.1	37,484	0.41		30.0	1.02×10 ⁻⁵
15	2.0	39,145	0.48		30.0	2.30×10 ⁻⁴
16	2.0	75,283	0.46		30.0	2.30×10 ⁻⁴
17	2.0	46,201	0.40		30.0	1.02×10 ⁻⁵
18	2.0	46,201	0.44	2.5	30.8	1.62×10 ⁻⁸
19	2.0	46,201	0.44		30.0	1.02×10 ⁻⁵
20	2.0	75,283	0.46		30.0	2.30×10 ⁻⁴
21	2.0	76,670	0.46		30.0	2.60×10 ⁻⁴
22	2.1	47,120	0.40		30.0	1.02×10 ⁻⁵
23	2.1	45,793	0.40	2.5	30.8	1.62×10 ⁻⁸
24	2.1	47,120	0.40		30.0	1.02×10 ⁻⁵
25	2.0	75,283	0.33		30.0	2.30×10 ⁻⁴
26	2.4	244,897	0.25	300	45.0	1.00×10 ⁻⁸

2.4.3 동적 해석결과

그림 6과 7은 Ofunato 지진에 대한 해석결과로서 지진시의 거동경향은 주로 댐마루 어깨부인 상층부가 댐 저부에 비해 상대적으로 큰 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 댐체 중앙 및 하단부의 변형은 상대적으로 작게 발생하였다. Ofunato 지진하중시 기반암의 변위를 제외한 최대횡방향 및 연직방

향 상대변위는 하류측 댐마루부에서 나타나며, 크기는 13.9cm(제체높이의 0.33%), 7cm(0.16%)로 산출되었다. Hachinohe 지진 및 인공지진하중에 대한 해석결과에서도 댐 상층부에서 최대변위가 발생하는 것으로 나타났으며 최대횡방향 및 연직방향 상대변위는 Hachinohe 지진이 8.2cm(0.19%), 5cm(0.11%), 인공지진은 17.7cm(0.42%), 9cm(0.21%)로 나타났다.

실지진 및 인공지진에 대한 해석결과 전반적인 변위경향은 댐마루에서 최대변위가 발생하는 형태를 보이고 있으며 이와 같은 변위는 댐마루의 국부적인 부분에서 발생된 변위이며 댐마루의 중앙과 하류는 상대적으로 작은 변위가 나타남을 알 수 있다. 최대변위를 근거로 「기준댐의 내진성능 평가 및 향상요령」에서 제시하는 허용변위량(제체 높이의 1%)과 비교시 본댐은 지진시 과다변위는 발생하지 않을 것으로 보이며 동적 변형거동에 있어서 내진 성능을 만족하는 것으로 평가되었다.

Mohr-Coulomb의 파괴규준은 계산된 주응력값이 Mohr원의 파괴포락선에 접할 때 재료가 파괴에 이른다는 개념으로서 주응력값을 토대로 안전율을 검토한 결과, 각각의 지진하중에 대한 국소안전율은 대부분 2이상으로 안전기준 1.0을 만족하는 것으로 나타났다.

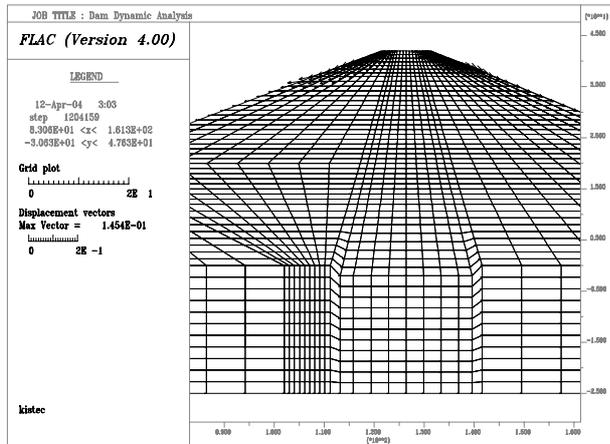


그림 6. Ofunato지진시 변위벡터

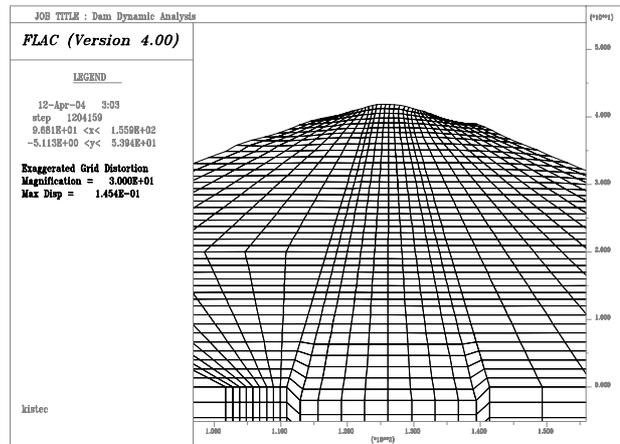


그림 7. Ofunato지진시 변형형상

3. 결론

본 고에서는 진도법에 의한 사면안정해석과 지진응답해석을 수행하여 사력댐의 내진성능평가 결과를 비교한 것으로 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 진도법을 적용한 경우 사면의 최소안전율은 1.2 미만으로 「댐설계기준」에서 제시하는 최소안전율 기준에 만족하지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 지진응답해석결과 거동경향은 댐마루와 사면끝단을 중심으로 국부적으로 발생하는 것으로 나타났다. 최대변위는 「기준댐의 내진성능 평가 및 향상요령」에서 제시하는 허용변위량 이내이며 진도법과 비교시 상대적으로 안정한 결과를 나타내어 지진응답해석보다 진도법을 적용함이 보수적인 측면에서 안정성을 확보하는데 더 유리한 것으로 나타났다.
- 3) 실지진 기록인 Ofunato와 Hachinohe의 지진파 주기특성에 따른 최대응답변위는 Ofunato지진파의 최대응답변위가 크게 나타나 본댐의 경우에는 상대적으로 단주기파에 취약성을 갖고 있는 것으로 나타났다.
- 4) 금회의 진도법 및 지진응답해석 결과를 고려할 때 사력댐의 내진성능평가는 보수적 관점에서 진도법을 기본으로 하되 지진응답해석의 변위 및 거동형태 등을 종합적으로 평가함이 타당할 것으로

판단되며, 보다 신뢰성 있는 지진응답해석을 위해서 지진파특성, 동적 물성결정, 댐 양안의 구속조건 등에 대한 자료축적과 해석기법 개발이 지속적으로 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), 댐설계기준
2. 건설교통부(2004), 기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령
3. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(Ⅱ)
4. 해양수산부(1999), 항만 및 어항시설의 내진설계표준서
5. 日本 土木学会(1989), 動的解析と耐震設計(地震動・動的物性). Vol. 1
6. 沢田義博·他 3名(1977), ロックフィルダムの物性分布特性 および堤体の動的特性, 電力中央研究報告書, No.377008