

# 콘크리트표면차수벽형 석괴댐의 지진응답해석

## Seismic Response Analysis of the Concrete Face Rockfill Dam

오병현<sup>1)</sup>      임정열<sup>2)</sup>      이종욱<sup>3)</sup>

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

---

### ABSTRACT

In this study, comprehensive seismic performance analysis were performed for the concrete face rockfill dam(CFRD) designed seismic coefficient method(0.10g). The static and pseudo-static FEM analysis, limited equilibrium method and dynamic FEM analysis were used for the dam safety analysis. The results of the seismic analysis were that the minimum factor of safety of down slope was 1.2 and horizontal displacement increased 8cm and vertical displacement increased 1.2cm at dam crest rather than those of static condition. The model dam did not show any serious failure in seismic stability for 0.13g. And much more research is still necessary in seismic safety of CFRD.

---

### 1. 서론

최근 준공되었거나 건설중인 댐의 경우는 1993년 댐시설기준(건설부)에 따라 지진계수를 적용하여 진도법에 의해 설계되었으며, 앞으로 건설될 댐은 내진설계기준연구(1997. 건교부)에 의해 다단계 성능에 기초한 내진설계(Multi-Level Performance Based Seismic Design)를 적용하여 보다 정밀한 내진성능평가를 실시하여야 한다.<sup>(1,2)</sup>

콘크리트표면차수벽형 석괴댐(Concrete Face Rockfill Dam)은 오래전부터 건설되어온 댐 형식이며 암석자원이 풍부함에 따른 경제성과 전천후 시공이 가능함에 따른 공사기간 단축, 구조적인 안정성 등 다양한 측면에서 유리하므로 최근에 국내뿐만 아니라 세계적으로 증가 추세이다.

본 연구에서는 콘크리트표면차수벽형 석괴댐의 실제 댐을 모델로 하여 댐체의 단계별 축조에 따른 정적 거동해석과 담수로 인한 제체 거동 분석 및 '97년 내진설계기준연구(건교부)의 모델댐 지역의 내진설계기준인 지진계수 0.13g에 대한 정역학적 방법(진도법)과 Hachinohe 지진파를 이용한 동적 지진응답해석을 실시하여 내진성능평가를 실시하였다.

---

1) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원  
2) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원  
3) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

## 2. 해석 수행 방법

콘크리트표면차수벽형 석괴댐의 특성상 댐체 축조과정에서 발생하는 응력과 침하(총침하량의 약70-80%) 및 담수로 인한 댐체 변형을 고려하기 위하여 다음과 같이 3단계로 거동분석을 실시하였다.

- 1단계 : 댐체의 단계별 축조과정(중분법)에 대한 정적 응력-변형해석
- 2단계 : 축조후 담수에 의한 만수시의 정수압조건의 제체 거동분석
- 3단계 : 운영 관리중인 모델댐의 현재 거동상태 평가

제 3단계 해석이후의 단면에 대하여 지진계수 0.13g 조건의 한계평형법(진도법)에 의한 댐사면의 안정성과 등가정적 FEM해석 및 Hachinohe 지진파를 이용한 동적 지진응답해석에 의해 모델댐의 내진안정성을 평가하였으며, 본 연구에서 수행한 내진 해석 절차는 다음과 같다.

- o 기존자료 검토 : 댐 기존자료 검토, 댐체 및 지반 물성값 평가
- o 내진해석
  - 지반변형 FEM 해석 : 비선형 해석 모델(Duncan-Chang 모델)에 의한 정적 및 등가정적 FEM 해석
  - 한계상태평형 해석 : 원호활동면법(Bishop법, Tschebotarioff법)
  - 동적 FEM 해석 : 지진시의 시간에 따른 댐체의 지진응답 해석
- o 결과 분석 및 평가

## 3. 댐체 안정성 평가 방법

### 3.1 한계상태평형법에 의한 댐사면 안정 평가

한계상태평형해석법은 절성토 사면의 안정해석에 널리 사용되고 있으며, 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 한계상태평형이론에 의한 사면안정해석은 여러 가지가 있으나 그 정확성은 강도정수와 사면의 기하학적 조건의 정확도 및 각 해석방법 고유의 정밀도에 따라서 좌우된다. 대부분의 경우에 있어서는 강도정수와 기하학적 조건이 각 해석방법의 차이 보다 결과에 더 큰 영향을 미치게 된다. 사면의 안정성을 분석하기 위한 한계상태평형이론은 궁극적으로 안전율을 결정하기 위한 방법론이다. 사면안전율(SF)은 사면에서 발생하는 저항력과 활동력의 비를 나타내는 것이다.

본 연구에서 댐사면의 활동은 원호활동을 하는 것으로 가정하였다. 댐 사면의 원호활동에 대한 허용안전율은 평상시 SF=1.5를 사용하였으며, 지진시에는 SF=1.2를 사용하여 검토하였다.

### 3.2 FEM에 의한 댐체 안정성 평가

FEM 해석에 의하여 제체내의 변형과 응력의 상태를 파악할 수 있고, 실측 데이터와의 사이에 비교적 좋은 일치가 보였다고 하면 실측치가 직접 얻을 수 없는 부분에 관해서도 계산치가 Fill 댐 각부의 상황을 상당한 정밀도로 표현하고 있다고 해석할 수 있다. 따라서 이러한 데이터를 토대로 제체의 안정성을 평가할 수 있다.

#### 4. 안정해석 및 결과고찰

##### 4.1 해석모델

모델댐(B댐)은 높이 49.0m, 길이 280.0m, 상시 만수위 41.20m의 콘크리트표면차수벽형 석괴댐(CFRD)으로 해석 단면은 제체 안정성에 가장 큰 영향을 받을 것으로 예상되는 최대 횡단면을 선정하였으며, 평면변형율요소 절점수는 총 642개, 요소수는 총 642개이다.

댐축조에 의해 발생한 응력의 흐름을 정확하게 파악하기 위하여 기초지반은 댐 하단으로부터 심도 105.6m와 넓이 758.6m로 하였으며, 기초지반의 경계조건은 하부는 완전고정, 좌·우측단은 연직롤러(x방향 고정)로 하였다. 콘크리트표면차수벽은 보요소로 모델링하여 표면차수벽의 축제에 의한 안정성과 함께 지진에 의한 영향을 고려하였다.

적용 프로그램은 지반해석용 유한요소 프로그램인 AFIMEX를 이용하였으며, 비선형 탄성 해석법인 Duncan-Chang 모델을 사용하였다. 댐축조과정과 만수위시의 정적 거동해석후, 한계평형법에 의한 평상시 및 지진시의 사면안전율은 Bishop법과 Tschbotarioff법을 이용하였다.

표 1. 정적 FEM 해석 물성치

| 항 목              | 포아손비 | 점착력<br>(t/m <sup>2</sup> ) | 내부마찰<br>각(φ) | 단위체적중<br>량(t/m <sup>3</sup> ) | 선형탄성계<br>수(E <sub>i</sub> ) | 탄성계수(E)                  |                |                |                               |
|------------------|------|----------------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
|                  |      |                            |              |                               |                             | 파괴비<br>(R <sub>r</sub> ) | Janbu's<br>(K) | Janbu's<br>(n) | Janbu's<br>(K <sub>ur</sub> ) |
| Soft Rock        | 0.20 | 40.0                       | 40           | 2.40                          | 1.0×10 <sup>6</sup>         | -                        | -              | -              | -                             |
| Weathered Rock   | 0.25 | 10.0                       | 40           | 2.20                          | 5.0×10 <sup>4</sup>         | -                        | -              | -              | -                             |
| Rock Fill        | 0.33 | 0.0                        | 41           | 1.90                          | -                           | 0.60                     | 200            | 0.3            | 700                           |
| Graded Rock Fill | 0.30 | 0.0                        | 43           | 2.00                          | -                           | 0.60                     | 200            | 0.3            | 700                           |
| Transition       | 0.30 | 0.0                        | 43           | 2.10                          | -                           | 0.65                     | 200            | 0.3            | 750                           |
| Slab Bedding     | 0.30 | 0.0                        | 45           | 2.10                          | -                           | 0.65                     | 200            | 0.3            | 750                           |
| Blanket          | 0.35 | 3.0                        | 0            | 1.70                          | -                           | 0.90                     | 100            | 0.8            | 250                           |

표 2. 콘크리트표면차수벽의 입력 물성치

| 구분             | 탄성계수(t/m <sup>2</sup> ) | 단면2차모멘트(m <sup>4</sup> ) | 단면적(m <sup>2</sup> ) | 단위체적중량(t/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| 보요소(Face Slab) | 2.0×10 <sup>6</sup>     | 0.0036                   | 0.35                 | 2.3                       |

##### 4.2 정적 FEM 해석(상시 만수위 고려)

댐축조는 총 12단계로 이루어졌으며, 이에 따라 응력-변형해석을 실시하였고 축조완료후 담수에 의한 만수위시(41.20m)의 정수압을 재하하여 총 13단계로 모델링하였으며, AFIMEX 프로그램을 이용하여 해석하였다.

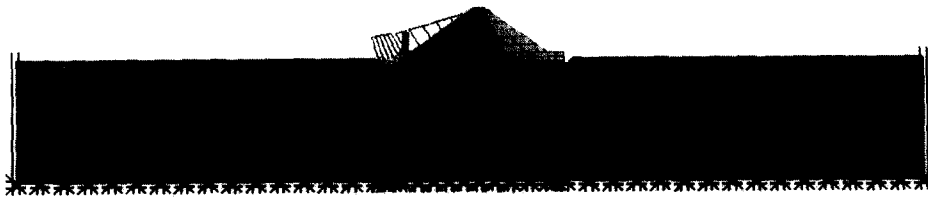


그림 1. 정적 FEM 해석 모델링도

댐축조후의 정적 응력-변형 해석결과에서 최대침하는 댐체내 중앙하부에서 약 65cm, 최대수평 변위는 상하류사면 하단부에서 약 20cm가 발생하였으며, B댐의 설계조건 및 제체에 설치된 층별 침하계와 수평변위계의 계측결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 확인하였다. (3.4)

댐축조후 댐정부에서의 수평변위는 1.93cm, 수직변위는 31.35cm이며 담수로 인한 수평변위는 2.58cm, 수직변위는 31.22cm로 댐정부에서의 담수로 인한 수평변위와 수직변위의 각 변위차는 1cm 이내를 보인다.

안전율 검토결과, 상류사면은 concrete face slab의 영향으로 안정적이었으며, 하류사면의 안전율이 낮은 영역은 정수압을 재하전과 변화가 거의 없어 이 영역을 토대로 가상활동면을 결정하여 안전율(1.395)을 계산하면 <그림3>과 같다.

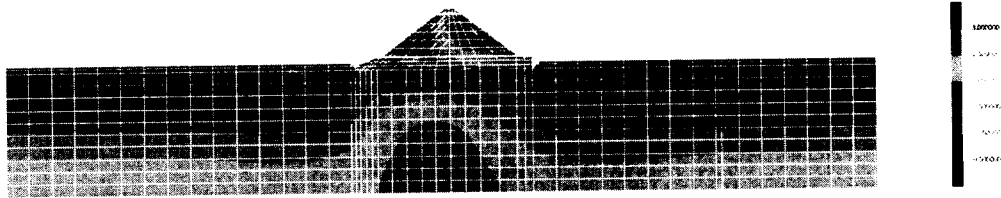


그림 2. 안전율도

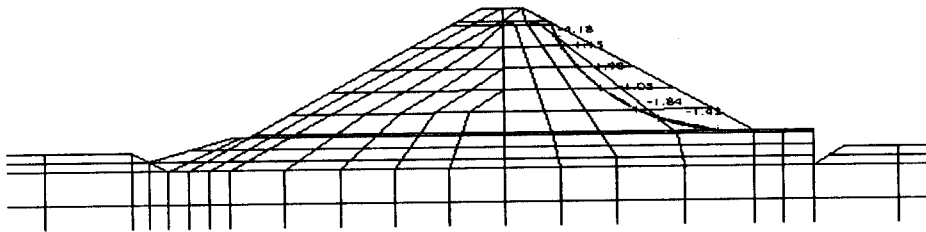


그림 3. 점안전율

#### 4.3 원호활동 안정 해석(한계상태평형법)

정적 FEM 해석후의 단면에 대하여, COSTANAK 프로그램의 자연사면 안정해석과 인공사면 안정 해석에서 널리 쓰이는 Bishop법과 수평외력(수압, 지진력, 파압 등)의 작용을 고려할 수 있는 Tschebotarioff법에 의해 만수위시의 정상시 조건과 0.13g의 지진조건에 대한 사면안정(진도법)을 검토하였다.

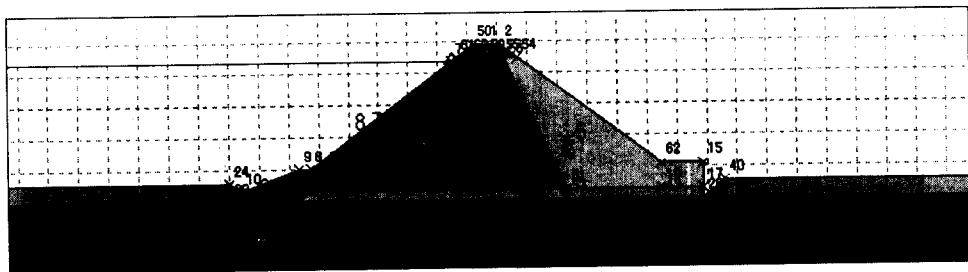


그림 4. 만수위시의 모델도

만수시 하류사면의 평상시 조건과 각 지진계수 조건에 대한 안전율은 <표3>과 같다. 동일한 해석조건인 경우에 Tschebotarioff법에 의한 안전율이 Bishop법에 의한 안전율보다 다소 작게 나오며, 지진시 소요의 안전율(1.20) 이상으로 내진안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 3. 원호활동 안정성 해석결과 (안전율)

| 구 분       | Bishop법 | Tschebotarioff법 |
|-----------|---------|-----------------|
| 평상시(정적)   | 1.717   | 1.486           |
| 수평진도0.13g | 1.368   | 1.254           |

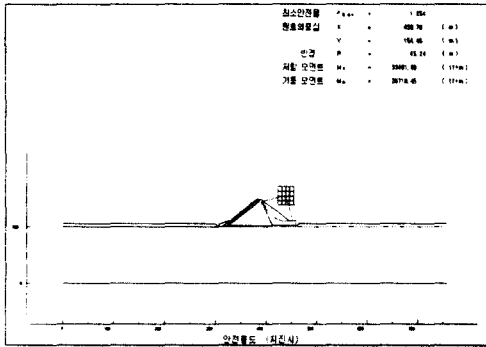


그림 5. 지진계수 0.13g(Tschebotarioff법)

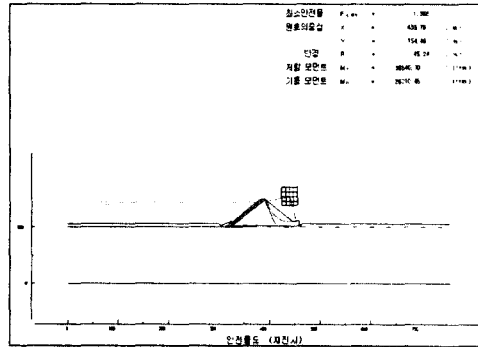


그림 6. 지진계수 0.13g(Bishop법)

#### 4.4 등가정적 FEM 해석

댐 축조후와 만수시의 정적 응력-변형 해석후, 관성력(0.13g)을 적용(제14단계) 하였으며 기초 지반 경계조건은 수평진도의 효과를 고려하기 위하여 양측방을 수평방향으로는 자유롭게 움직이게 하였고 수직방향으로만 구속하였다.

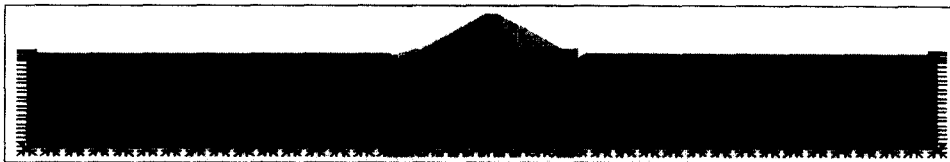


그림 7. 관성력을 고려한 모델도

만수시의 평상시(정적) 조건의 댐정상부 변위(수평 2.58cm, 수직 31.22cm)에 비하여 지진계수 0.13g 조건에서 수평변위는 10.39cm로 약 8cm가 증가하고 수직변위는 32.38cm로 약 1.2cm가 증가하여 비교적 침하 영향은 작으며, 하류사면 안전율은 약 1.2로서 하류사면의 안정성도 확보되고 있다.

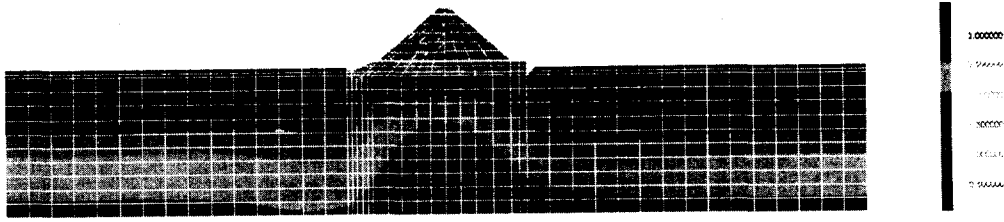


그림 8. 안전율도

#### 4.5 지진계수 0.13g를 고려한 지진응답 FEM 해석

AFIMEX 프로그램을 이용한 해석 모델의 총 절점수는 701개, 총 요소수는 642개이며, 경계조건은 기초지반의 좌우양단을 전달경계로 정의하고 하단면은 고정으로 하였으며 지진동은 기반지반 암 저면의 좌측에 입사하는 것으로 하였다.

해석에 사용한 지진동은 1968년 TOKACHI Earthquake HACHINOHE N-S파이며, 실제 원파형은 최대 가속도 232.671 gal, Peak time 5.38 sec이며, 적용 지진동의 크기는 0.13g로 조정하여 사용하였다.



그림 9. 동적해석 모델링도

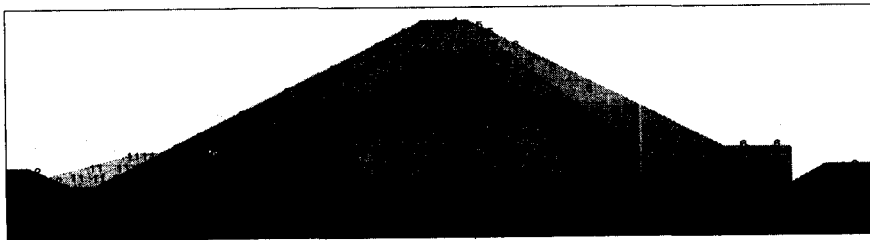


그림 10. 댐체 재료별 구분

표 4. 각 ZONE별 물성값

| 구분 | 단위체적질량<br>( $\gamma_t, t/m^3$ ) | 포아슨비<br>( $\nu$ ) | 초기전단탄성계수<br>( $G_0, t/m^2$ ) | 감쇠비<br>(%) |
|----|---------------------------------|-------------------|------------------------------|------------|
| 1  | 2.4                             | 0.20              | 416,667                      | 5.0        |
| 2  | 2.2                             | 0.30              | 224,490                      | 5.0        |
| 3  | 2.1                             | 0.37              | 12,863                       | 5.0        |
| 4  | 2.1                             | 0.36              | 12,863                       | 5.0        |
| 5  | 2.0                             | 0.36              | 12,250                       | 5.0        |
| 6  | 1.9                             | 0.36              | 11,638                       | 5.0        |
| 7  | 2.0                             | 0.34              | 40,077                       | 5.0        |
| 9  | 1.9                             | 0.34              | 38,073                       | 5.0        |
| 10 | 2.0                             | 0.33              | 80,747                       | 5.0        |
| 11 | 1.7                             | 0.45              | 7,650                        | 5.0        |

표 5. 표면차수벽의 물성값(보요소)

| 구분  | 단위체적중량<br>( $\gamma_t, t/m^3$ ) | 포아슨비<br>( $\nu$ ) | 초기전단탄성계수<br>( $G_0, t/m^2$ ) | 단면2차모멘트<br>( $I_{xy}$ ) | 단면적<br>( $m^2$ ) | 감쇠비<br>(%) |
|-----|---------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------|------------------|------------|
| 보요소 | 2.3                             | 0.18              | 847548                       | 0.0036                  | 0.35             | 5.0        |

입력지진파의 최대가속도 발생시간은 5.38sec이나 수평방향의 최대변위는 8.45sec에서 약 25.6cm가 발생하며 수직변위는 7.55sec에서 약1.2cm가 발생하는 것을 알 수 있다.

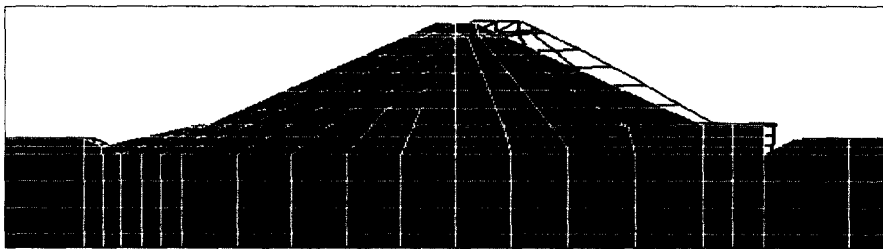


그림 11. 지진계수 0.13g 일 때 댐체의 최대변위 형상

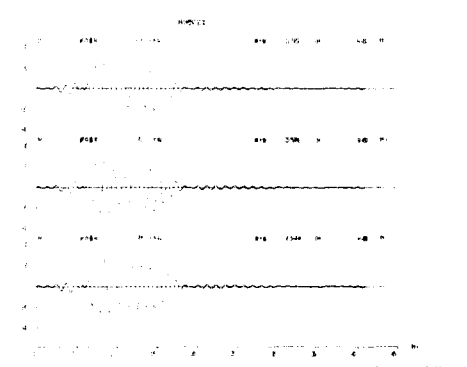


그림 12. x 방향 응답변위도

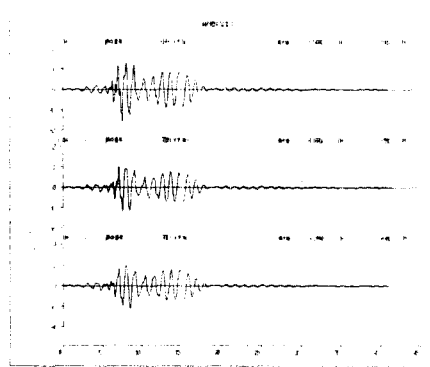


그림 13. y 방향 응답변위도

## 5. 결론 및 향후연구

일반적으로 진도법에 의해 설계된 기존의 댐들에 대하여 보다 정밀한 내진성능을 평가하기 위해서는 동적 지진응답해석 등을 수행하게 된다. 일본의 경우 역시, 고베지진 이후 진도법 등으로 설계된 기존 댐구조물에 대하여 동적 지진응답해석을 이용한 보다 정확한 내진성능평가를 실시하고 있다.

본 연구에서는 0.10g의 지진계수를 적용하여 진도법으로 설계된 콘크리트표면차수벽형 석괴댐 모델에 대하여 1997년 내진설계기준연구에서 제시한 지진계수(0.13g)를 적용하여 동가정적해석 및 동적 지진응답해석에 의한 CFRD의 내진성능을 평가하였다.

연구결과, 댐 축조직후의 안전율은 하류사면에서 약간 낮게 나타나고 있으나 만수시의 정수압 재하에 의한 큰 영향이 없으며 안전율은 약 1.4를 나타내고 있어 안정적임을 알 수 있고, 상시만수위 평상시조건의 안전율은 1.48 이상, 0.13g 지진계수 적용시 진도법에 의한 안정 해석결과 제체 사면은 안전율 1.2로 내진안정성을 확보하고 있다. 0.13g의 관성력을 이용한 경우 담수시보다 수평변위는 약 8cm, 수직변위는 1.2cm가 크게 나타나며 제체는 안정성을 유지하고 있다. 입력지진파의 최대가속도 발생시간은 5.38sec이나 응답 최대수평변위는 8.45sec, 최대수직변위는 7.55sec에 발생하고 있어 입력지진파의 최대가속도 시간보다 다소 늦게 최대 변위를 보이고 있다. 지진조건에 대한 제체의 발생응력, 응답변형, 응답가속도 등을 분석한 결과 댐체는 큰 변형 없이 안정성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

댐구조물에 대한 보다 정밀한 내진안정성 평가를 위해서는 다양한 지진파특성, 지진규모, 기초지반과 댐 축조재료의 동특성치 등의 조건에 대한 지진응답해석이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997.12) 내진설계기준 연구(II),
2. 건설부(1993) 댐시설기준,
3. 한국수자원공사(1997.12) 댐 내진안정성에 관한 연구(1차년도),
4. 한국수자원공사(2000.12) 수자원시설물의 내진성능평가 연구(I),
5. 오병현, 박성진, 황성준(2000), "수정진도법에 의한 지진시의 사면안정해석에 관하여", 한국지진공학회
- 6 오병현, 이종욱, 정우성(2000) "콘크리트표면차수식 석괴댐의 거동분석", 대한토목학회
7. 한국수자원공사, B댐 설계보고서
8. 한국수자원공사, B댐 공사지
9. USBR(1989), Design Standards : Embankment Dams, No.13