

## 복합댐의 등가정적해석에 의한 안정성 평가

# The Stability Evaluation for Pseudo-Static Analysis of Composite Dam

오병현\*

임정열\*\*

이종욱\*\*

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

---

### ABSTRACT

It was performed that the stability evaluation using pseudo-static method and modified pseudo-static method for rockfill and rockfill-concrete section of composite dam.

As a results of pseudo-static and modified pseudo-static analysis using seismic coefficient 0.154g, the maximum displacement at dam crest was occurred about 14~18cm on rockfill section and about 5~9cm on rockfill-concrete section, respectively. Also, that the factor of safety of down slope was more than 1.0~1.5.

the rockfill and rockfill-concrete section of composite dam did not show any stability problems for 0.154g. Further research is still necessary in seismic safety of composite dam.

---

### 1. 서론

댐 구조물에 대하여 댐 타입별(사력댐, CFRD, 콘크리트댐) 정적 및 동적 거동분석에 대한 연구는 많은 발전을 해왔다. 그러나 댐 형식상 지반조건과 자연적인 환경을 고려한 복합댐의 경우는 지반과 구조물의 관계 및 모델의 복잡성 때문에 각각 구분하여 연구를 실시하였지만, 상호작용을 고려한 연구는 미흡한 실정이다. 일반적으로 복합댐 형식은 사력부와 콘크리트부로 이루어져 있어 상호작용 효과를 고려한 모델과 정적 및 동적거동 분석이 이루어져야 하지만, 복합댐의 거동특성 자료는 국내에서는 거의 이루어지지 않았으며, 선진외국의 경우 역시 연구자료가 희소하여 거동분석에 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 사력부와 콘크리트부가 접합된 형식의 복합댐에서 사력부 거동 및 사력-콘크리트 접합부 모델에서 등가정적해석에 의한 안정성 평가를 실시하였으며, 또한 동적해석 및 3차원 모델에 대한 복합댐의 거동분석을 실시하고 있다.

---

\* 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전연구팀 책임연구원

\*\* 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전연구팀 연구원

## 2. 복합댐 거동 분석 방법

### 2.1 해석조건

해석에 적용한 지반 및 콘크리트부의 물성값은 기존 자료를 검토하여 결정하였으며, 본 사력부 및 콘크리트-사력부에 적용한 모델은 비선형 탄성해석 모델인 Duncan-Chang 모델을 사용하였고, 기본이론에 의거하여 Hyperbolic 매개변수를 적용하였다. 압밀침하 FEM 해석은 大田 - 關 11(오오타 · 세키구치) 점탄성 모델을 적용하였고, 한계평형해석은 Bishop 법, Tschebotarioff 법을 이용하였으며, 또한 본 연구에 적용한 해석 프로그램은 AFIMEX와 COSTANAK 이다.

표 1. 등가정적해석에 사용한 물성값

구 분	$\nu$	c (t/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$\gamma_w$ (t/m <sup>3</sup> )	탄성계수(E)			
					과괴비 ( $R_f$ )	Janbu's K	Janbu's n	Janbu's $K_{ur}$
Core	0.35	10.00	28	1.80	0.85	150	0.45	300
Filter	0.3	5.00	33	1.93	0.7	250	0.6	500
Rock (Fine)	0.3	5.00	38	1.90	0.7	300	0.6	650
Rock (Coarse)	0.3	5.00	38	1.90	0.7	300	0.6	650
Con'c	0.18	50	45	2.30	선형탄성계수 : 3.0E+6			

### 2.2 해석 모델

본 연구의 모델 댐의 제원은 높이 72m, 길이 495m(사력부:136m, 콘크리트부:234m, 접합부 125m)의 복합댐으로서, 사력부에 대한 해석은 댐체의 축조과정을 고려하기 위해서 축제 해석단계를 12단계로 하였고, 또한 댐의 축제해석에 의한 응력의 전달을 원활히 하기 위하여 댐하부의 기반암의 깊이를 67.5m로 하였으며 넓이를 538.0m로 하였다. 사력-콘크리트 접합부의 해석은 축제 해석단계를 13단계로 하고, 모델은 사력댐으로 된 댐체의 내부의 중앙부에 콘크리트가 위치하고 있는 형상에 대하여 모델링하였으며, 모든 해석결과는 마지막 해석단계의 결과를 표시하였다.

## 3. 복합댐 해석 결과

### 3.1 사력부 등가정적해석(진도법) 해석 결과

본 모델댐은 횡방향에 대하여 담수에 의한 수압을 가장 많이 받고 있어 지진시 수평방향의 지진력에 의한 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되는 최대횡단면에 대하여 모델링 하였다.

또한 각 해석에 대하여 마지막 단계에서 수평진도 0.154g를 적용하여 관성력을 적용한 해석을 하였으며, 마지막 단계에서만 수평진도의 효과를 고려하기 위하여 <그림1>의 모델도와 같이 지반의 양측방을 수평방향으로는 자유롭게 움직이게 하였고 수직방향으로만 구속하였다. 또한 상류측 댐체의 사면에는 지진에 의한 동수압을 고려하여 모델링하였다.

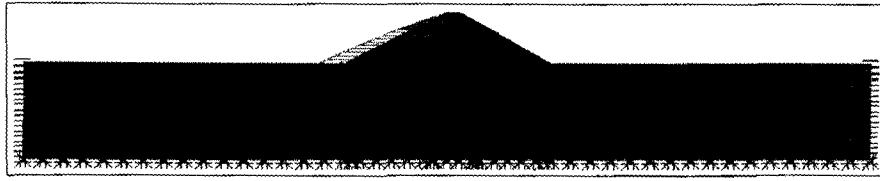


그림 1. 등가정적해석 모델도 (사력부)

1) 변위

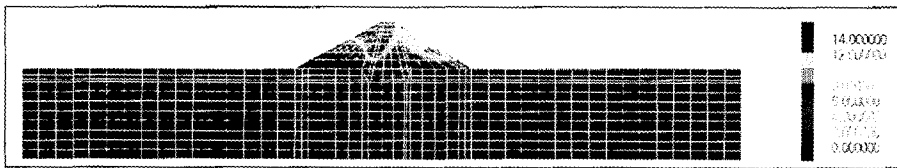


그림 2. 0.154g 적용시 x 방향 변위 결과(사력부)

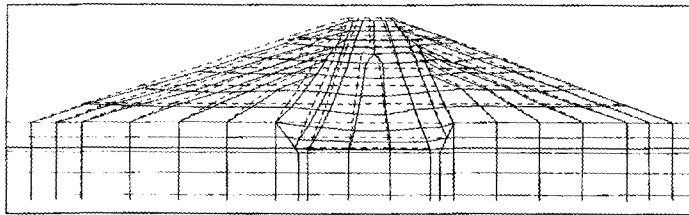


그림 3. 지진계수 0.154g 작용시 변위 형상 (사력부)

변위 결과는 정적해석시 최대변위는 댐체 상부(Crest)에서 x 방향으로 약 4cm 정도 발생하였으나, 등가정적해석시 최대변위는 댐체 상부에서 x 방향으로 14.4cm 정도 발생하여, 정적시보다 지진력에 의하여

약 10cm 정도 변위가 더 크게 발생하였다.

2) 안전율

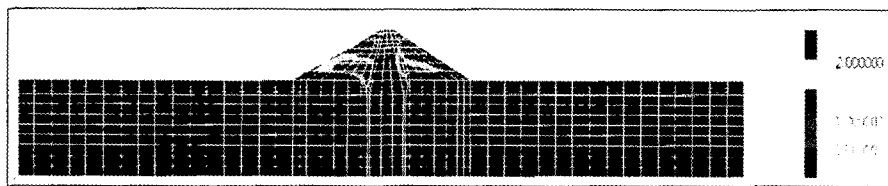


그림 4. 지진계수 0.154g 적용시 안전율 (사력부)

안전율이 모두 1.0 이상으로 나타났으므로 안정한 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 안전율도를 바탕으로 가상활동면을 결정하여 안전율을 계산하면 <그림5>와 같고, SF=1.835 이다.

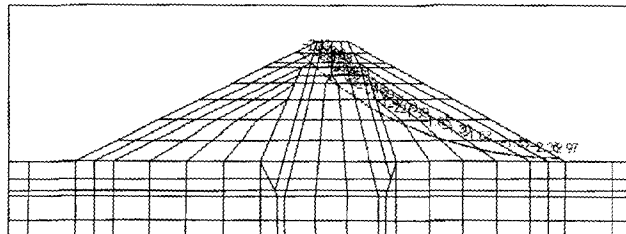


그림 5. 지진계수 0.154g 가상활동면상의 점안전율

3) 원호활동 안정성 해석

수평으로 적용하는 지진계수는 0.154g이고, 댐이 상시만수위인 경우에 수평진도를 적용하여 댐체의 안정성을 검토하였다.

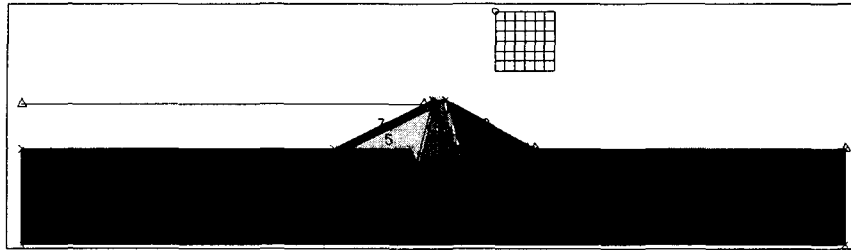


그림 6. 상시만수위시 원호활동 안정성 해석 모델도(사력부)

원호활동 안정성해석에 대한 결과는 <그림7>과 <그림8>과 같고, 댐체 하류측에 대한 Bishop 법과 Tschebotarioff법에 의한 결과는 SF=1.58 이상으로 지진력 작용시 안전율 1.2 이상으로 안전한 결과를 보이고 있다.

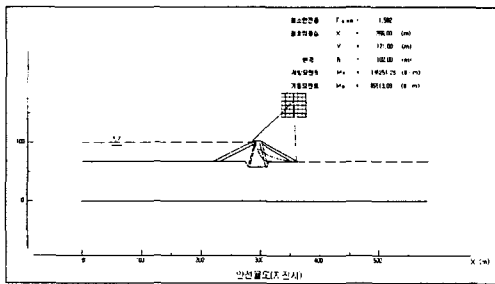


그림 7. Bishop법(사력부)

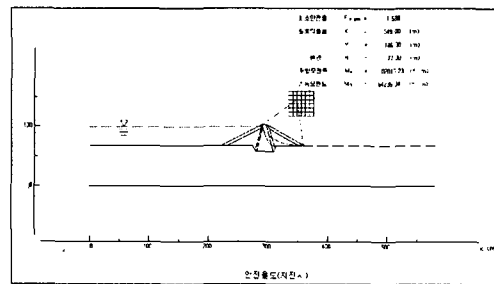


그림 8. Tschebotarioff법(사력부)

3.2 사력부 수정등가정적해석(수정진도법) 해석 결과

1) 변위

수정진도법을 적용하여 해석한 결과 댐 상부에서 x 방향 최대변위는 18.9cm가 발생되었으며, 진도법을 적용했을 경우 댐 상부 최대 변위 14.4cm 보다 약 4cm 정도 더 발생되었다.

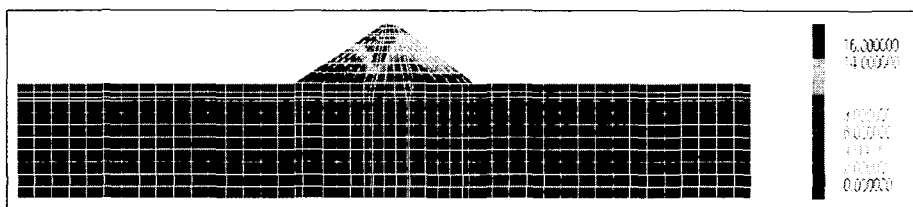


그림 9. 수정진도법 적용시 x 방향 변위결과(사력부)

2) 안전율

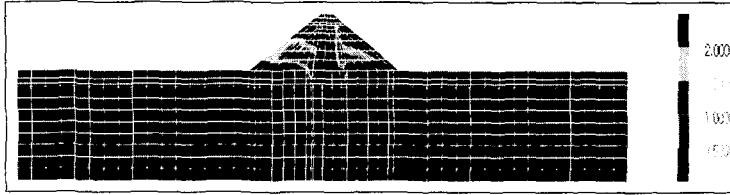


그림 10. 지진계수 0.154g 적용시 수정진도법 안전율(사력부)

지진계수 0.154g를 적용하여 수정진도법으로 해석한 결과 댐체에 발생한 안전율은 진도법을 적용하여 해석한 결과보다 안전율 범위가 낮은 영역이 증가하고 있으나, SF=1.5~1.0 이상으로 대

부분 안정한 결과를 보이고 있으며, 가상활동면에 따른 점안전율은 SF=1.78을 나타내고 있다.

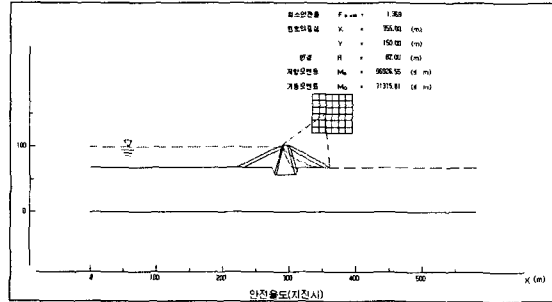


그림 11. 원호활동 안정성 해석결과(수정진도법-사력부)

3) 원호활동 안정성 해석

원호활동 안정성 해석결과 안전율은 하류사면에서 1.359로 진도법의 SF=1.58보다 조금 낮으나, 안전율 1.2 이상으로 안정한 결과를 보이고 있다.

3.3 사력-콘크리트부 등가정적해석(진도법) 해석 결과

<그림12>와 같이 사력-콘크리트부는 댐체의 내부의 중앙부에 콘크리트가 위치하고 있는 형상에 대하여 모델링 하였다. 해석시 마지막 단계로 수평진도 0.154g의 관성력을 적용한 해석을 하였으며, 마지막 단계에서만 수평진도의 효과를 고려하기 위하여 지반의 양측방을 수평방향으로는 자유롭게 움직이게 하였고 수직방향으로만 구속하였다.

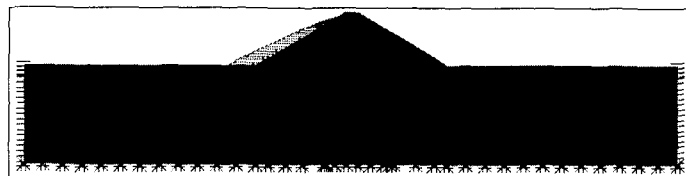


그림 12. 사력-콘크리트부 해석 모델도

1) 변위

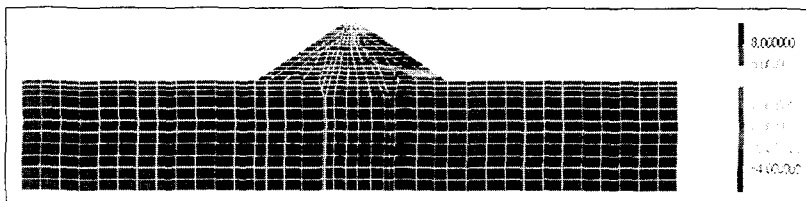


그림 13. 0.154g 적용시 x 방향 변위

사력-콘크리트부의 변위는 정적해석(상시만수위시) 최대 변위는 댐 상부에서 0.02cm 가 발생하였으나, 진도법 적용시 댐 상부에서 최대변위는 5.53cm 발생하였다. 댐 상부에서 정적해석보다 약 5cm 정도 증가하였다.

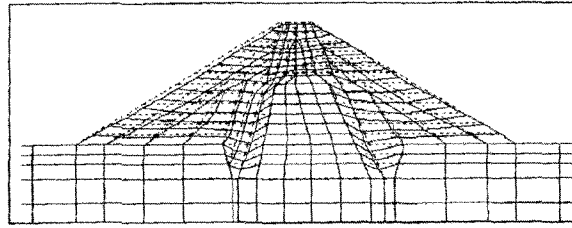


그림 14. 변위 형상(사력-콘크리트부)

2) 안전율

사력-콘크리트부의 안전율은 댐체 중간에 콘크리트가 채워져 있어 댐체 전체적인 안전율은 1.5 이상으로 크게 나타나 있고, 가상활동면 점안전율은 1.89로 SF=1.2이상으로 안정한 결과를 보이고 있다.

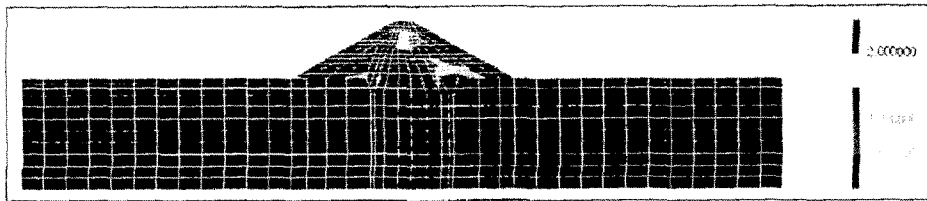


그림 15. 진도법 해석 결과 안전율도(사력-콘크리트부)

3) 원호활동 안정성 해석

원호활동 안정성 해석결과를 보면 Bishop법(SF=1.67)과 Tschebotarioff법(SF=1.65)로 SF=1.5이상을 나타내고 있어 원호활동 해석결과 안정한 결과를 나타내었다.

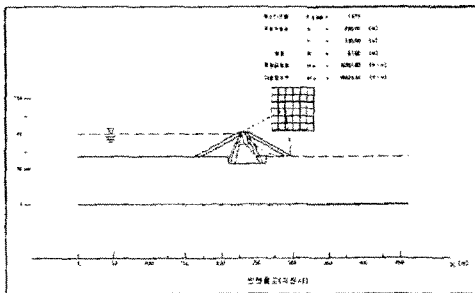


그림 16. Bishop법 해석결과

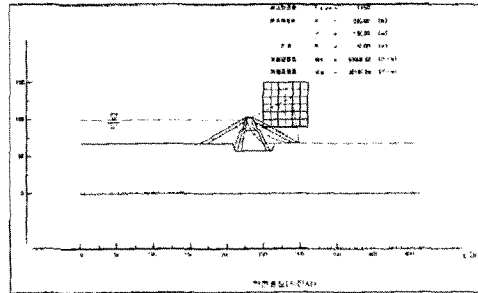


그림 17. Tschebotarioff 법 해석결과

3.4 사력-콘크리트부 수정 등가정적해석(수정진도법) 해석 결과

사력-콘크리트부에 수정진도법을 적용하여 해석결과를 나타내면 다음과 같다.

1) 변위

해석결과 변위는 전체적으로 진도법의 결과보다 증가하고 있으며, 최대변위는 댐 상부(Crest)에서 x 방향으로 9.33cm 발생하였다. 이것은 진도법 해석결과 5.53cm 보다 약 4cm 정도 더 크게 발

생하고 있음을 알 수 있다.

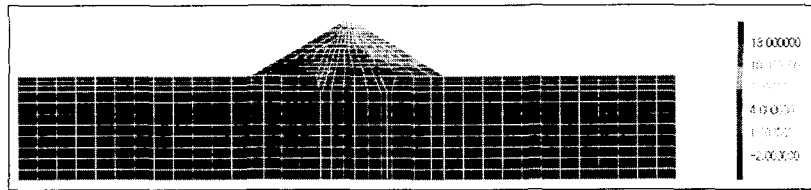


그림 18. 수정진도법 적용시 x 방향 변위(사력-콘크리트부)

## 2) 안전율

수정진도법 적용한 안전율을 보면 댐 하류사면의 안전율이 감소하는 부분이 증가하는 것을 알 수 있고, 필터재 영역에서 전체적인 안전율(SF=1.5이상)보다 다소 작은 영역을 보이고 있으나, 안전율은 1.0이상을 보이고 있다. 가상활동 점안전율을 보면 SF=1.77로 안정한 결과를 보이고 있다.

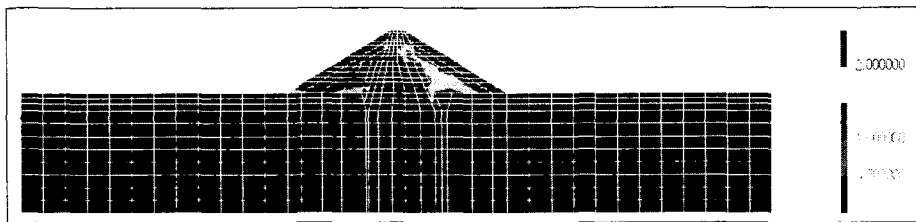


그림 19. 수정진도법 적용시 안전율도(사력-콘크리트부)

## 3) 원호활동 안정성 해석

수정진도법 적용시 댐체 하류사면의 해석결과는 SF=1.44를 보이고 있어 안정한 결과를 나타내고 있다.

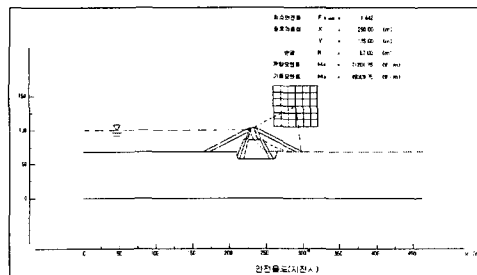


그림 20. 수정진도법 적용시 원호활동 안정성 해석결과(사력-콘크리트부)

## 4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 복합댐의 사력부,사력-콘크리트부에 지진계수 0.154g를 적용하여 등가정적해석(진도법) 및 수정등가정적해석법(수정진도법)으로 안정성 평가를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 복합댐의 사력부 경우 최대 변위는 등가정적해석시 댐 상부(Crest)에서 x 방향으로 14.4cm, 수정진도법 적용시는 x 방향으로 18.9cm가 발생하였고, 응력-변형 해석에 따른 안전율은 1.5이상으로 SF=1.2 이상을 나타내어 안정한 결과를 나타내고 있다.

2. 복합댐의 사력부에 대한 원호활동안정성 해석 결과는 등가정적해석시 SF=1.58, 수정진도법 적용시는 SF=1.36으로 나타나 안정한 결과를 보이고 있다.
3. 복합댐의 사력-콘크리트부 경우 최대 변위는 등가정적해석시 댐 상부(Crest)에서 x 방향으로 5.5cm, 수정진도법 적용시는 x 방향으로 9.3cm가 발생하였고, 안전율 해석결과 콘크리트부와 필터재 주변에 전체안전율 보다 낮은 영역이 증가하고 있으나, 전체 안전율은 1.5이상으로 안정한 결과를 나타내고 있다.
4. 복합댐의 사력-콘크리트부에 대한 원호활동안정성 해석 결과는 등가정적해석시 SF=1.65, 수정진도법 적용시는 SF=1.44로 나타나 안정한 결과를 보이고 있다.
5. 본 해석조건에서는 복합댐의 사력부와 사력-콘크리트부에 대한 등가정적 및 수정등가정적해석에 대한 안정성 검토를 실시하여 변위, 안전율, 원호활동안정성 해석에 대한 분석결과 안정한 결과를 보이고 있으며, 등가정적해석 보다는 동적특성을 조금 더 반영한 수정진도법에 대한 해석을 실시하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 복합댐의 두 부분에 대한 등가정적해석을 실시하여 안정성 평가를 하였으나, 추후 연구로는 사력부, 사력-콘크리트부, 콘크리트부에 대해서 각각 지진응답해석을 실시하여 동적 거동특성을 분석하고, 3차원에 대한 해석을 실시하여 복합댐 거동특성에 대한 추가적인 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국수자원공사 수자원연구소(2001), "수자원시설물 내진성능평가 관한 연구"
2. 건설교통부(2001. 9), "댐설계기준"
3. 도서출판 과학기술 : 댐의 조사 설계에서 시공까지, 1988
4. 도덕현 외 : 내진공학, 효성출판사, 1992
5. 日本國水資源開發公團(2001), "第18回 韓·日 技術交流會議 資料"
6. 과학기술부(2000), "특수구조물의 내진설계 및 내진성능 향상기법개발"
7. Steven L. klomer, "Geotechnical Earthquake Engineering", Prenticehall, 1996
8. ICOLD : Earthquake Analysis Procedure For Dams, state of the art, Bulletin, 1986
9. Vahid Lotfi,"Analysis of the Response of Dams to Earthquakes", Geotechnical Engineering report, January 1986