

중심코아형사력댐의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of the Center-Core Rockfill Dam

오병현¹⁾ 임정열²⁾ 이종욱³⁾

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

ABSTRACT

The seismic safety analysis were performed for the center-core rockfill dam(CCRD). The static and pseudo-static FEM analysis using seismic coefficient method, and dynamic FEM analysis using Hachinohe earthquake wave(0.12g) were used for the seismic safety of CCRD. The results of seismic analysis were that the factor of safety of down slope was 1.5, horizontal displacement is about 14.3cm, and vertical displacement is 3.3cm at dam crest. The model dam did not show any seismic stability problems for 0.12g. And much more research is still necessary in seismic safety of CCRD.

1. 서론

중심코아형사력댐은 오래 전부터 건설되어온 댐형식으로서 지진에 대하여 일반적으로 MMI VI이하에서는 거의 피해가 없는 것으로 알려져 있으나 Mikawaz진(1945년)과 Yoshino진(1952년)의 MMI VII에서는 일부 관개용댐이 균열, 부동침하, 누수발생 등의 지진피해를 받기도 하였으며, MMI VIII~IX인 일본의 Oga진(1939년)시 Oga지역의 관개용댐 58개소중 12개소가 피해를 입었다.

국내의 경우도 많은 중심코아형사력댐들이 운영·관리중에 있으며, 건설당시 내진설계가 다수 미흡한 경우가 많아 보다 정밀한 내진성능의 재평가가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 단일목적용 중심코아형사력댐에 대하여 댐축조과정과 운영과정에 대한 정적 FEM 해석 및 '93년 댐시설기준의 지진계수(0.12g)를 적용하여 운영중인 사력댐에 대하여 지진응답해석을 실시하고 내진안정성을 평가하였다.

2. 내진안정성 평가 방법

지진하중 등에 의한 댐사면의 안정 해석 방법은 크게 동가정적해석(Pseudo-Static Analysis)

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

방법과 동적해석(Dynamic Analysis)방법으로 구분될 수 있다. 등가정적 해석방법에서는 기존사면의 정적 초기응력상태 외에 추가로 작용하는 동하중을 상응되는 등가정적하중으로 대체하여 고려함으로써 기존의 정적 사면해석방법으로 적용되고 있는 한계상태평형해석방법이나 응력해석방법을 이용하여 해석하는 방법이다. 반면 동적해석 방법은 지진하중으로 인한 가속도 성분에 의해 유발되는 지반의 관성력을 고려하고 지진이나 각종 동하중의 시간에 따른 실제 시간이력을 고려함으로써 각 시간에 따라 유발되는 응력과 변형에 대한 변화를 해석할 수 있는 방법이다.

본 중심코아형사력댐에 대한 내진성능평가 연구는 모델댐에 대한 현황조사 및 관련자료 검토 분석, 기초 지질 지반 조사, 댐체와 지반의 물성값 평가를 실시하였으며, 비선형 해석 모델(Duncan-Chang 모델)의 정적 FEM 해석에 의한 댐체 응력-변형을 분석하고, 지진시의 시간에 따른 댐체의 지진응답 해석 결과를 분석하여 내진안정성을 평가하였다.

3. 사력댐 안정성 평가

3.1 해석모델

본 모델댐(B댐)은 높이 50m, 길이 407m의 중심코아형사력댐이며, 상류부의 계획 홍수위는 EL.75.5m, 댐의 상시 만수위는 EL.74.0m이다. 해석 단면은 담수에 의한 수압을 가장 많이 받고 있어 지진시 수평방향의 지진력에 의한 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되는 최대횡단면에 대하여 모델링하였으며, 댐 축조과정에 의한 응력 전달을 원활히 하기 위하여 댐하부의 기반암 깊이를 80m, 넓이를 750.00m로 하였다.

B댐의 해석과정은 초기응력해석 - 코퍼댐(5단계) - 본댐(12단계) - 담수에 의한 정수압의 재하(13단계) - 관성력 적용의 총 14단계로 해석을 하였으며, 해석방법은 축조직후와 상시만수위시의 정적 FEM 해석과 댐시설기준('93)의 지역구분(II)에 대한 지진계수(0.12g)의 실제 지진파에 대한 지진응답해석을 실시하고 안정성 평가를 하였다.

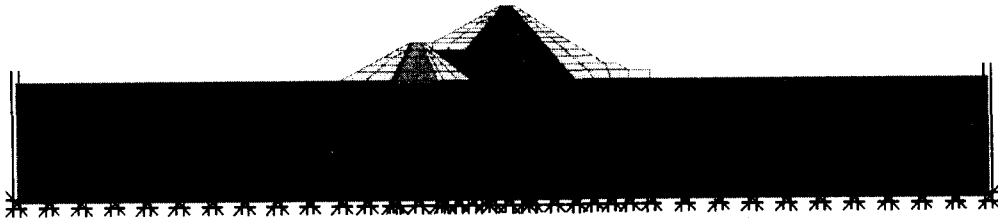


그림 1. B댐 모델링

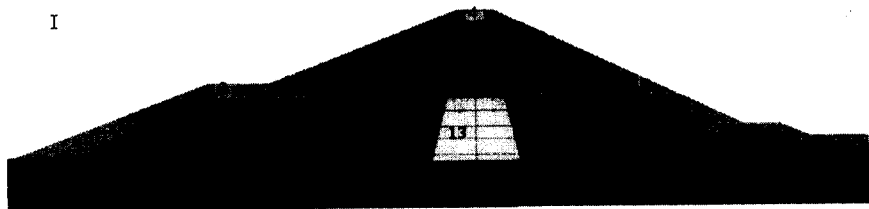


그림 2. 모델댐 재료별 구분

표 1. 모델댐 재료별 물성값

Num	단위체적중량	초기전단탄성계수	포아슨비
1	1.9	74,789	0.46
2	1.95	37,138	0.41
3	1.9	35,798	0.48
4	2.0	9,000	0.30
5	1.9	38,074	0.34
6	1.9	38,074	0.47
7	2.0	28,011	0.42
8	1.9	38,074	0.34
9	1.9	79,229	0.46
10	1.95	47,914	0.40
11	1.9	79,229	0.46
12	1.9	79,229	0.46
13	2.0	49,142	0.40
14	1.9	79,229	0.32
15	1.9	79,229	0.32
16	1.9	79,229	0.32

3.2 정적 FEM 해석

코퍼댐 및 본댐의 축조과정(12단계)에 따른 제체 응력-변위 해석 결과, 최대침하하는 제체 중앙 부분에서 31cm, 최대수평변위는 상하류사면 하부에서 3cm가 발생하며, 하류사면의 안전율은 2.4이다.

상시만수위 조건의 정수압 재하시(13단계) 댐체 정부에서의 수평변위는 2.71cm로 약 1.4cm가 증가하며, 수직변위는 10.4cm로 1cm 미만의 증가를 보인다.

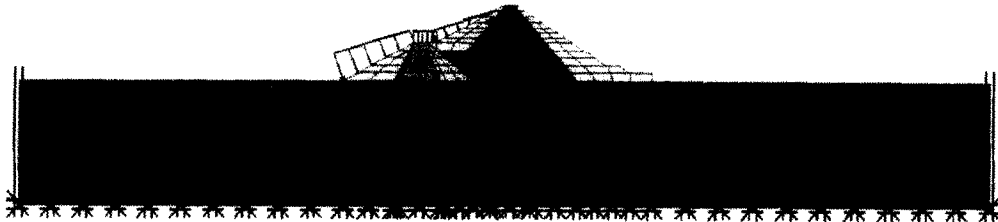


그림 3. 상시만수위시 모델링도

수압에 의해 제체 배면으로 발생하는 안전율이 낮은 영역은 발생하지 않고, 전체적으로 안전율이 낮은 영역도 감소하였다. 하류사면의 안전율이 낮은 영역에 대한 가상활동면의 안전율은 1.78로서 댐체 사면의 안정성을 유지하고 있다.

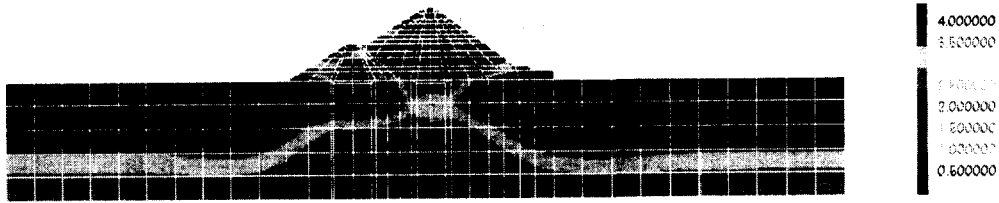


그림 4. 상시만수위시 안전율도

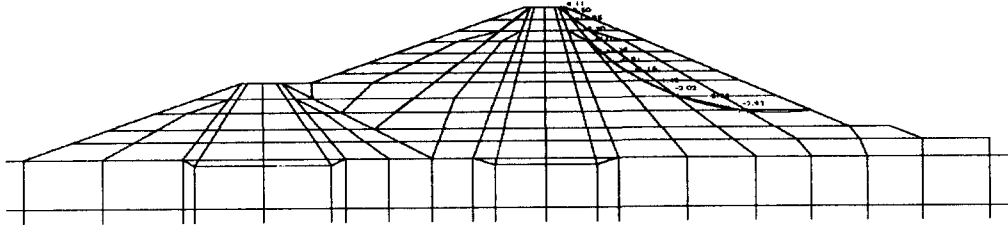


그림 5. 상시만수위시 가상활동면상의 점안전율

3.3 관성력을 적용한 등가정적 FEM 해석

3.3.1 해석 모델

본 해석모델은 정수압재하에 따른 제체변위후 수평진도 0.12g의 관성력을 적용한 해석이며, 마지막 단계에서만 수평진도의 효과를 고려하기 위하여 아래의 모델도와 같이 지반의 양측방을 수평방향으로 자유롭게 움직이게 하였고 수직방향으로만 구속하였다.

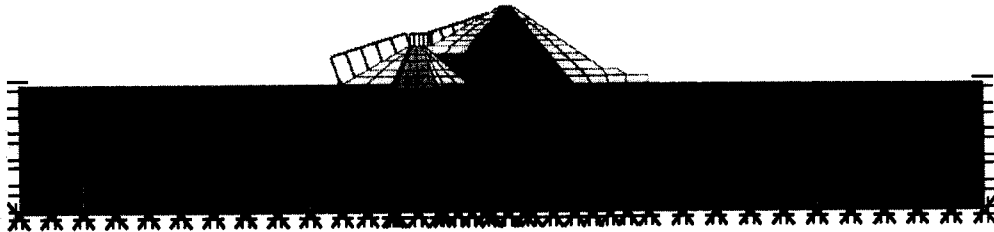


그림 6. 관성력을 고려할 경우의 경계조건도

3.3.2 수평진도 0.12g를 재하한 경우

수평진도를 적용한 지진시의 거동 경향은 정적인 상태와 거의 유사하게 나타나고 있으며, 수평 방향 변위 발생 크기로 볼 때는 제체 전면에서는 정적인 상태보다 두배 정도 더 크게 발생하였으며 배면에서는 40%정도 감소하였다. 수직방향의 변위는 정적인 경우와 크게 다르지 않다.

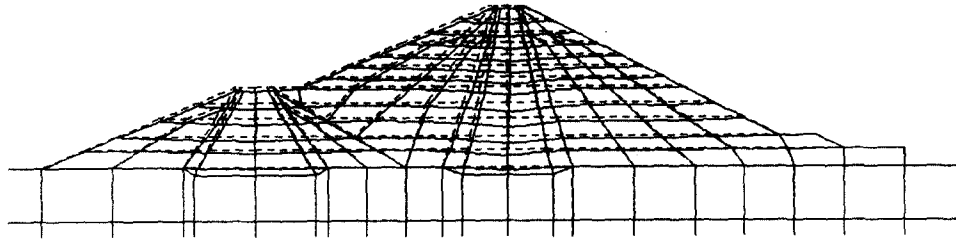


그림 7. 수평진도 0.12g 적용시 변위형상

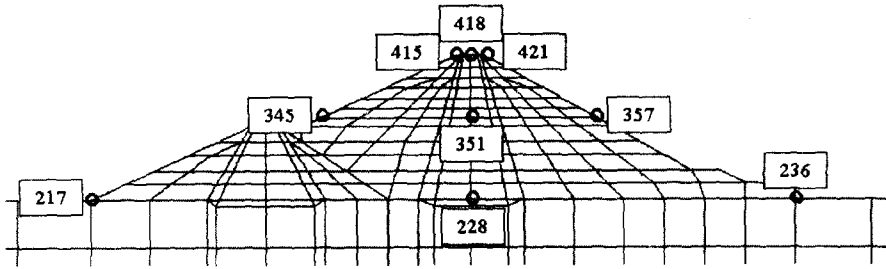


그림 8. 수평진도 0.12g일 때의 변위 표시 대상 절점 위치도

표 2. 절점별 변위값

구분		X방향변위 (cm)	Y방향변위
절점번호	415	(+)12.45	(-)10.56
	418	(+)10.87	(-)11.93
	421	(+)9.34	(-)8.60
	345	(+)7.00	(-)8.01
	351	(+)12.35	(-)32.70
	357	(+)11.74	(-)6.84
	217	(+)0.20	(-)0.08
	228	(+)1.21	(-)10.80
	236	(+)0.12	(-)0.04

등가정적 해석시의 안전율 현황은 그림 9와 같으며, 코아와 필터부분에 안전율이 낮은 영역이 일부 나타나고 있으나 좌우의 사력존에 의해 구속되고 있으며, 하류사면의 안전율이 낮은 영역을 근거로 가상활동면에 대한 안전율은 그림 10에서와 같이 1.5임을 알 수 있다.

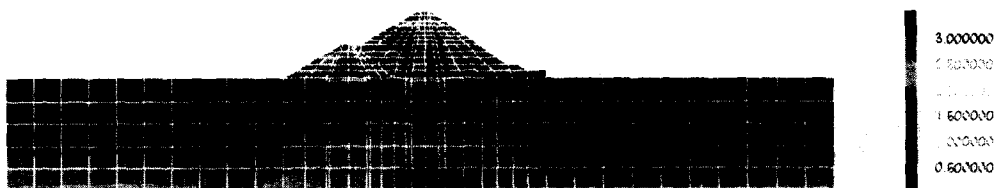


그림 9. 등가정적 FEM 해석시 안전율도

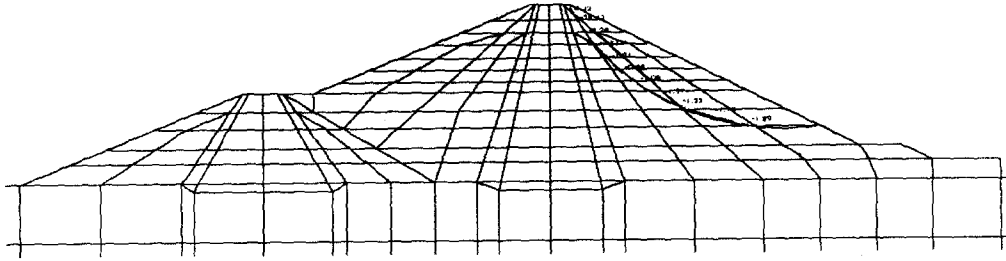


그림 10. 수평진도 0.12g일 때의 가상활동면상의 점안전을

3.4 지진동을 적용한 지진응답 FEM해석

3.4.1 해석 모델

본 모델댐의 동적 지진응답 해석은 AFIMEX-SAMBA 프로그램을 이용하였으며, 해석 모델의 총 절점수는 541개이고 총 요소수는 527개이다. 댐 기초지반의 좌우양단을 전달경계로 정의하고 기반암의 저면을 고정으로 하였다. 또한 지진동은 기반암 저면의 좌측에 입사하는 것으로 하였으며 지진동의 크기는 0.12g의 경우를 사용하였다. 해석에 사용한 지진동은 1968년 TOKACHI Earthquake HACHINOHE N-S파이며, 실제 원파형(최대가속도 232.671 gal, Peak 5.38 sec) 은<그림11>과 같으나, 적용 지진동의 크기를 조정하여 사용하였다.

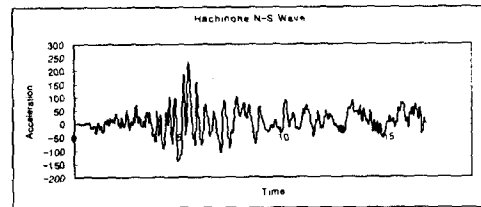


그림 11. Hachinohe N-S 파



그림 12. 동적해석의 모델링도

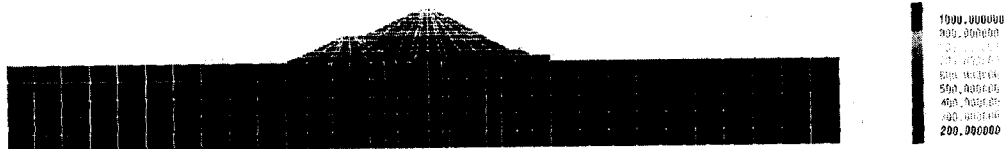


그림 13. 지진동 0.12g 일 때 x 방향 가속도

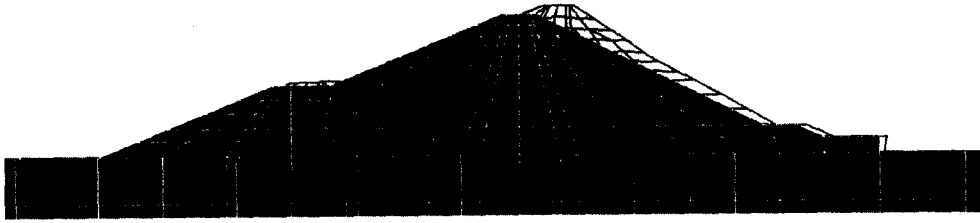


그림 14. 지진동 0.12g 일 때 변위형상

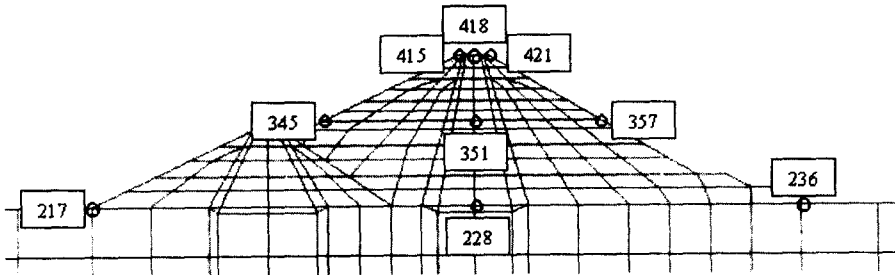


그림 15. 지진동 0.12g일 때의 변위 표시 대상 절점 위치도

표 3. 절점별 최대 변위값

구분	X방향 최대변위(cm)	최대변위 발생시간(sec)	Y방향 최대변위(cm)	최대변위 발생시간(sec)	
절점 번호	415	(-)14.26	6.64	(+)3.00	11.70
	418	(-)14.26	6.63	(+)3.30	11.71
	421	(-)14.40	6.63	(+)3.03	11.73
	345	(-)6.18	6.62	(+)1.31	7.30
	351	(-)7.80	6.64	(+)2.33	11.72
	357	(+)6.68	7.22	(-)1.02	7.25
	217	(-)1.71	8.74	(-)0.17	7.64
	228	(-)2.26	8.77	(+)0.54	12.38
236	(-)1.75	8.74	(+)0.15	7.55	

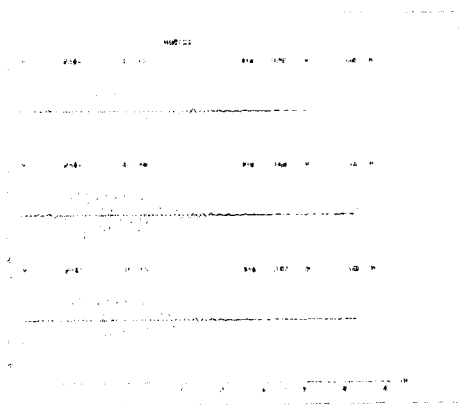


그림 16. 시간에 따른 x 방향 응답변위도

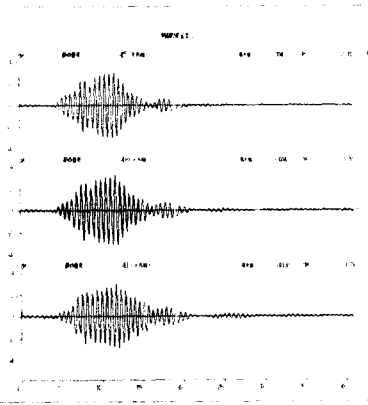


그림 17. 시간에 따른 y 방향 응답변위도

표 4. 정적과 등가정적FEM해석에 의한
댐마루부의 변위결과(cm)

구분	정상시		지진시 (진도법)	
	시공직후	만수위시	0.12g	
415	X방향	1.33	2.71	12.44
	Y방향	-8.32	-8.65	-10.56
418	X방향	-0.18	1.21	10.87
	Y방향	-10.44	-10.48	-11.93
421	X방향	-1.57	-0.18	9.34
	Y방향	-8.05	-7.84	-8.60

표 5. 등적 FEM해석에 의한
댐마루부의 변위결과(cm)

구분	0.12g	
415	X방향	-14.26
	Y방향	3.00
418	X방향	-14.46
	Y방향	3.30
421	X방향	-14.40
	Y방향	3.03

등적 FEM의 해석결과와 등가정적FEM해석에 의한 해석결과 발생한 변위의 크기가 거의 유사한 값을 보이고 있으며, 두 경우 모두 댐의 탄성거동 범위 이내이므로 본 해석에 적용된 경우의 지진력(0.12g)에 대해서는 안정한 것으로 나타났다.

4. 결 론

댐축조와 담수로 인한 상시만수위시의 정적조건의 댐사면 안전율은 1.7 이상을 보여 안전한 결과를 나타내고 있고, '93년 댐시설기준에 따라 수평진도 0.12g를 적용한 경우에는 안전율이 1.5 이상을 나타내고 있어 본 해석의 모델댐은 '93년 댐시설기준의 지진하중(0.12g)에 대하여 등가정적해석 방법으로는 안정하고, 실제 지진파를 이용한 지진응답해석에서도 안정한 결과를 보이고 있다. 보다 정밀한 댐 내진안정성 평가를 위해서는 지진규모, 지진파특성, 기초지반과 댐 축조재료의 동특성치 등의 다양한 조건에 대한 동역학적 해석결과의 비교분석이 필요하겠다.

참고문헌

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, 황성춘(2000), "수평진도법에 의한 지진시의 사면안정해석에 관하여", 한국지진공학회
6. 일본土木學會(1989), 動的解析と耐震設計(地震動・動的物性) Vol. 1
7. USBR(1989), Design Standards : Embankment Dams, No.13. Seismic Design and Analysis
8. Norihisa Matsumoto et al, "Dynamic Analysis of a Rockfill Dam", Technical Memorandum of PWRI No. 2637, May, 1988
9. Kokusho, T.(1987), "In-situ dynamic soil properties and their evaluations", Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineerings, Vol. 2