

복합댐의 지진계수별 민감도 분석

Sensitivity analysis by seismograph of composition Dam

김재홍¹⁾, Jae-hong Kim, 오병현¹⁾, Byung-Hyun Oh, 홍원표²⁾, Won-Pho Hong, 전제성¹⁾, Je-Sung Jeon

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 연구원, Researcher, Kwater Dam Safety center

²⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

SYNOPSIS : Differ number of seismograph to the composition dam by recently frequent earthquake and analyzed responsiveness. Interest for dam inner place by increase of something wrong flood and inside and outside of the country earthquake appearance according to unusual change of weather is risen, on important urea in dam safety floodgate school register · by structural safety divide can .

Therefore, by PMP (PMF) of dam and increase of domestic earthquake occurrence, need research about earthquake resistant nature ability estimation of water resoruces facilities.

Because responsiveness analysis applies number 0.154 ~ 0.25 g of seismograph, seismic wave that use in analysis is being suitable in dynamic analysis of construction such as Rockfill dam from representative chapter cycle faction and recommend in domestic internal examination design workbook, and use results applied much Hachinohe wave onions in van abroad.

Key words : composition dam, sensitivity analysis, seismic wave

1. 서 론

최근 빈번한 지진으로 인하여 복합댐에 지진계수를 달리하여 민감도를 분석하였다. 기상이변에 따라 이상홍수 및 국내외 지진발생의 증가로 인하여 댐 안전에 대한 관심이 대두되고 있으며, 댐 안전성에 중요한 요소로 수문학적·구조적 안전성으로 나눌 수 있다. 따라서, 댐의 PMP(PMF) 및 국내 지진발생의 증가로 인하여 수자원시설물의 내진성능평가에 대한 연구가 필요하게 되었다.

민감도 분석에는 지진계수 0.154g ~ 0.25g를 적용하였고 해석에 사용한 지진파는 대표적인 장주기파로 Rockfill댐과 같은 구조물의 동적해석에 적합하며 국내의 내진설계 기준서에서 추천하고 있으며, 선진외국에서 사용실적이 많은 Hachinohe파를 적용하였다.

2. 민감도 분석에 사용한 모델

2.1 민감도 분석에 적용한 물성값

민감도 분석에 적용한 물성값은 사력댐 부분에 적용한 모델은 비선형 탄성해석 모델인 Duncan-Chang의 해석모델을 사용하였고, 기본이론에 의거하여 Hyperbolic 매개변수를 적용하였다. 또한 지진시에 적용한 축제재료의 물성값은 대형 삼축시험결과에 의한 겉보기 점착력을 고려한 물성값을 고려하여 해석을 수행하였다. 본 해석에서 복합댐에 대한 민감도 분석은 댐 전체에 대해서 정적해석과 3차원 유사정적해석을 실시하여 평가를 하였다.

표 1 민감도 해석에 적용한 물성값(유사정적해석)

항 목	포아송비	점착력 (t/m ²)	내부 마찰각 (φ)	단위체적 중량 (t/m ³)	탄성계수(E_i)			
					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

2.1.1. 해석 모델

본 해석모델은 지진시 댐의 접합부(Rockfill과 콘크리트)를 중심으로 모델링 범위를 제한하였으며, 해석모델링은 Z방향(좌우양단부) 경계조건에 구속을 부여하여 좌우 양단면에서는 댐 축방향 변위가 발생하지 않는 것으로 함으로써 댐의 양안부(Abutment)에 의한 댐체의 구속효과를 구현하였다.

또한, 댐의 저수에 의한 정수압은 댐의 배면부에 등분포하중으로 재하하였다. 본 민감도 분석에서 실시한 모델링은 그림 1과 같이 X방향으로 500m, Z방향으로 300m를 포함시켰으며, Y방향으로는 댐 바닥에서 35m 아래까지 모델링 하였다.

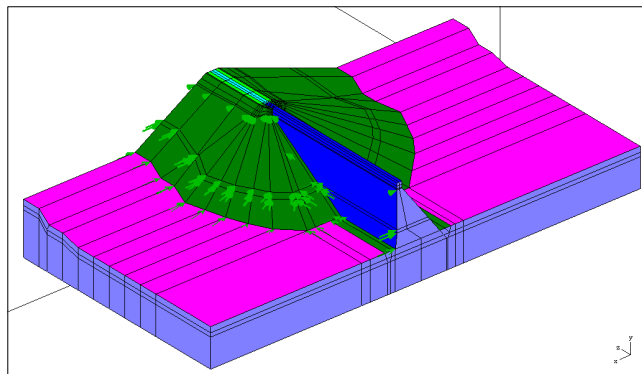


그림 1. 복합댐 민감도 해석 모델도

각 방향의 변위도에서 보듯이 Rockfill댐 부분에는 변위가 많이 발생하지만 콘크리트에서는 거의 대부분이 1.0cm이하의 변위를 나타내고 있다. 색분리도에서 보듯이 Rockfill댐 부분에 발생한 변위의 영향이 콘크리트 댐으로 과급되는 경향을 보이는데, 접합부에서는 그 영향이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 본 댐에 대한 정적해석결과 댐의 상단에서 발생한 변위는 다음과 같다.

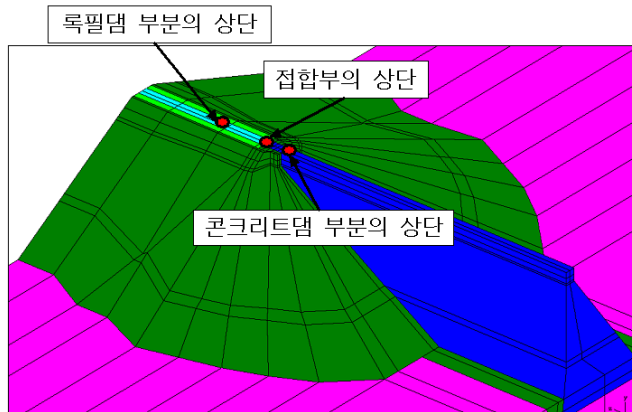


그림 2 변위추출 위치도

위 치	x방향 변위(cm)	y방향 변위(cm)	z방향 변위(cm)
Rockfill담 상단	-4.29	-17.25	5.32
접합부의 상단	-1.33	-3.10	-2.25
콘크리트담 상단	-0.78	-0.31	0.14

담 상단에서 발생한 변위는 Rockfill담 부분의 상단에서 가장 컸으며 콘크리트담 부분으로 갈수록 각 방향의 변위는 급격하게 작아지고 있다. 또한 이 결과로 미루어 담 축조재료의 차이로 인하여 담의 접합부에서 응력의 집중이 발생할 것임을 알 수 있다.

3. 유사정적해석

등가정적해석에 적용한 해석모델링은 정적해석시와 동일하며, 진도는 X방향으로 0.154g와 0.20g, 0.25g를 적용하였으며, 동수압은 Westergaad식을 이용하였다.

3.1 수평진도 0.154g를 적용한 해석결과

3.1.1 응력결과

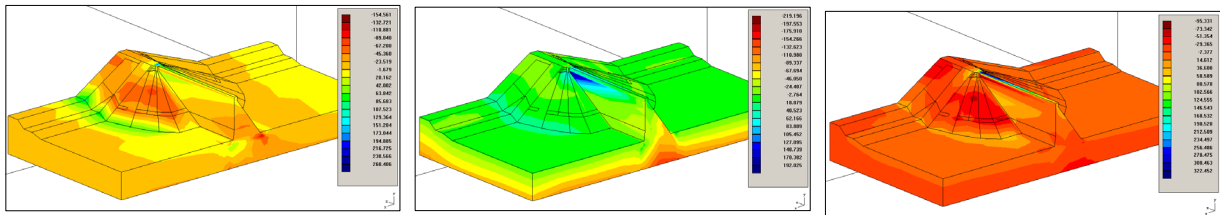


그림 3 X, Y, Z 방향 응력 분포도

지진관성력(0.154g)에 의해 전체적으로 각 방향의 응력이 평상시에 비하여 증가하는 것으로 나타났으며, Rockfill담 부분과 접합되는 부근의 콘크리트담 부분에서 Rockfill담 부분의 변형에 의하여 큰 인장 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이런 현상은 FEM에 의한 해석시 발생하는 불가피한 현상으로 FEM에 의한 해석방법이 연속체역학에 근거하고 있기 때문인데, 근래에 활발하게 적용되고 있는 접촉면요소(Joint element)의 도입으로 대처가 가능하나, 아직 3차원 FEM해석에 적용되고 있지는 않는 현실로 이 부분에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다.

구 분	X방향응력	Y방향응력	Z방향응력	주응력	
				최대(σ_1)	최소(σ_3)
최대값(해석결과)	15.56	21.92	9.53	23.95	8.33

3.1.2 변위결과

각 방향의 변위 분포도에서 보듯이 지진관성력(0.154g) 적용시에 관성력을 적용한 X방향으로의 변위는 정적해석시에 비하여 크게 증가하였지만, Y방향 변위와 Z방향 변위는 거의 없는 것으로 나타났다.

또한, 대부분의 변위는 Rockfill담 부분에서 발생하였고, 콘크리트담 부분에서는 거의 변화가 없었다.

콘크리트담과 Rockfill담이 접합하는 부분에서는 콘크리트담이 Rockfill담의 변위를 구속하는 효과를 보이고 있으나, 콘크리트담의 상부에 놓여있는 사력담에서는 변위가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 유사정적해석에 의한 발생된 변위를 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

위치	X방향 변위(cm)	Y방향 변위(cm)	Z방향 변위(cm)
Rockfill댐 상단	-9.31	-17.32	5.45
접합부의 상단	-2.95	-3.04	-2.34
콘크리트댐 상단	-1.49	-0.20	0.20

댐 상단에서 발생한 변위는 Rockfill댐 부분의 상단에서 가장 크고, 콘크리트댐 부분으로 갈수록 각 방향의 변위는 작아지고 있다. 또한 이 결과로 미루어 댐 축조재료의 차이로 인하여 댐의 접합부에서 응력의 집중이 발생할 것임을 알 수 있다.

3.1.3 안전율 결과

콘크리트 댐에서는 안전율 FS = 2.0 ~ 3.0 정도의 범위에 있는 것으로 나타났다. Rockfill댐과 콘크리트댐의 접합부 경우 콘크리트 부분에서는 안전율 FS = 2.0이상 확보되고 있지만, 콘크리트댐 위 Rockfill댐 부분의 안전율이 FS = 1.0정도로 상대적으로 낮은 안전율을 나타내었다. 진도 0.154g를 적용하여 해석한 결과 전체적으로 FS = 1.2 이상의 안전율을 확보하고 있지만, 사력댐과 콘크리트 댐이 접하는 부분에서 다른 부분에 비해 상대적으로 낮은 안전율을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

3.2 수평진도 0.20g를 적용한 해석결과

3.2.1 응력결과

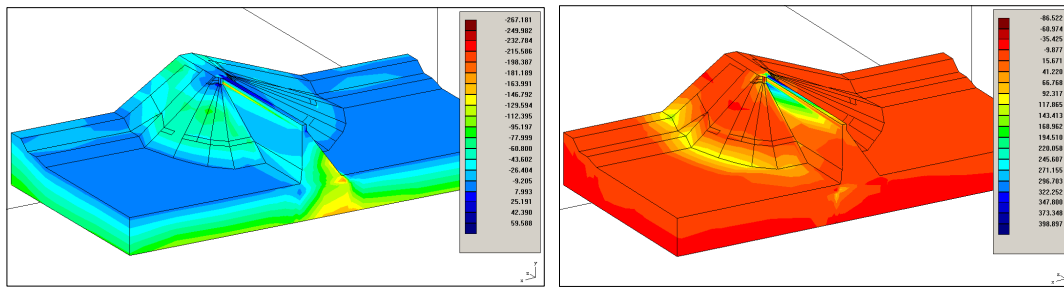


그림 4 최대 주응력(σ_1), 최소 주응력(σ_3) 분포도

지진관성력 0.20g의 적용에 의해 전체적으로 각 방향의 응력이 평상시 혹은 0.154g의 지진관성력을 적용한 경우에 비하여 증가하는 것으로 나타났다. Rockfill댐 부분과 접합되는 부근의 콘크리트댐 부분에서 Rockfill댐 부분의 변형에 의하여 큰 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이런 현상은 FEM에 의한 해석시 발생하는 것으로 해석방법이 연속체 역학에 근거하고 있기 때문인데, 근래에 활발하게 적용되고있는 접촉면요소(Joint element)의 도입으로 대처가 가능하나, 아직 3차원 FEM해석에 적용되고 있지는 않다. 본 댐의 등가정적해석에서 발생한 각 방향 응력의 최대값과 최소값을 이용한 안정성평가 결과는 다음과 같다.

구 분	X방향응력	Y방향응력	Z방향응력	주응력	
				최대(σ_1)	최소(σ_3)
최대값(해석결과)	15.53	22.21	8.91	26.72	8.65

3.2.2 변위결과

각 방향의 변위도에서 보듯이 수평진도 0.154g를 적용한 경우와 거의 비슷한 변위증가 경향을 보이고 있는데, Rockfill댐 부분의 변위 증가량이 크고, 콘크리트댐 부분의 변위증가는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 수평진도 0.154g를 적용한 경우에 비하여 전체적으로 변위가 약 15% 정도 증가한 것으로 나타났다. 발생한 변위 추출 위치는 0.154g를 적용하여 평가한 위치와 동일하며, 등가정적해석(지진 관성력 0.20g 적용)에 의해 댐 상단에서 발생한 변위는 다음과 같다.

위치	X방향 변위(cm)	Y방향 변위(cm)	Z방향 변위(cm)
Rockfill댐 상단	-10.79	-17.32	5.48
접합부의 상단	-3.44	-3.00	-2.37
콘크리트댐 상단	-1.71	-0.17	0.22

댐 상단에서 발생한 변위는 Rockfill댐 부분의 상단에서 가장 크고, 콘크리트댐 부분으로 갈수록 각 방향의 변위는 작아지고 있다. 또한 이 결과로 미루어 댐 축조재료의 차이로 인하여 댐의 접합부에서 응력의 집중이 발생할 것임을 알 수 있다.

3.2.3 안전을 결과

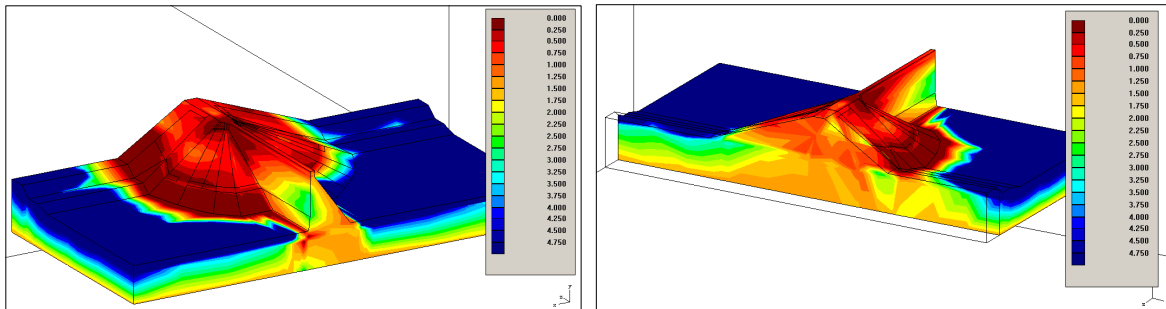


그림 5 댐체 안전율 분포도 및 내부의 안전율 분포도

이상과 같이 댐에 0.20g의 지진관성력을 적용한 경우, 댐 체체의 안전율은 수평진도 0.154g를 적용한 경우에 비하여 다소 낮은 안전율 분포를 나타내고 있다. Rockfill댐 부분의 상단에서 안전율이 FS = 1.0 보다 작아지는 경우도 있어 Rockfill댐과 콘크리트댐이 접합되는 부분의 Rockfill댐의 상부에서 국소적인 파괴가 일어날 가능성을 보이고 있는 것으로 판단된다.

3.3 수평진도 0.25g를 적용한 해석결과

3.3.1 응력결과

지진관성력 0.25g의 적용에 의해 전체적으로 각 방향의 응력이 평상시 혹은 0.154g, 0.20g의 지진관성력은 적용한 경우에 비하여 증가하는 것으로 나타났다. Rockfill댐 부분과 접합되는 부근의 콘크리트댐 부분에서 Rockfill댐 부분의 변형에 의하여 큰 인장응력이 발생하는 것으로 나타났는데, 근래에 활발하게 적용되고 있는 접촉면요소(Joint element)의 도입으로 대처가 가능하나, 아직 3차원 FEM해석에 적용되고 있지는 않다. 본 댐의 등가정적해석에서 발생한 각 방향 응력의 최대값과 최소값을 이용한 안정성평가 결과는 다음과 같다.

구 분(kg/cm ³)	x방향응력	y방향응력	z방향응력	주응력	
				최대(σ_1)	최소(σ_3)
최대값(해석결과)	15.63	23.57	8.19	28.81	8.99

3.3.2 변위결과

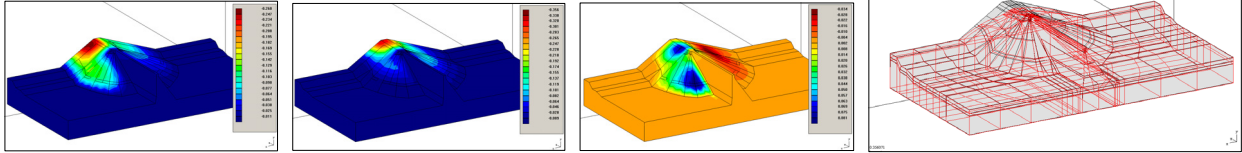


그림 5 X, Y, Z방향 변위 분포도

각 방향의 변위도에서 보듯이 수평진도 0.154g, 0.20g를 적용한 경우와 거의 비슷한 변위증가 경향을 보이고 있는데, Rockfill담 부분의 변위 증가량이 크고, 콘크리트담 부분의 변위증가는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 수평진도 0.20g 를 적용한 경우에 비하여 전체적으로 변위가 약 15% 정도 증가한 것으로 나타났다. 본 댐에 대한 등가정적해석결과 댐의 상단에서 발생한 변위는 다음과 같다.

위치	x방향 변위(cm)	y방향 변위(cm)	z방향 변위(cm)
Rockfill담 상단	-12.42	-17.34	5.51
접합부의 상단	-3.96	-2.97	-2.39
콘크리트담 상단	-1.94	-0.13	0.23

댐 상단에서 발생한 변위는 Rockfill담 부분의 상단에서 가장 크고, 콘크리트담 부분으로 갈수록 각 방향의 변위는 급격하게 작아지고 있다. 또한 이 결과로 미루어 댐 축조재료의 차이로 인하여 댐의 접합부에서 응력의 집중이 발생할 것임을 알 수 있다.

3.3.3 안전을 결과

이상과 같이 댐에 0.25g의 지진관성력을 적용한 경우, 댐 체체의 안전율은 수평진도 0.154g를 적용한 경우에 비하여 매우 낮은 안전율 분포를 나타내고 있다. Rockfill담 부분의 상단에서 안전율 FS = 1.0 보다 작은 영역이 크게 증가하고 있어 Rockfill담과 콘크리트담이 접합되는 부분에서 부분적으로 사면활동이 일어날 가능성을 보이고 있으나, 댐체 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

4. 민감도 분석 결과

민감도 분석 결과 지진계수 0.154g~0.25g를 적용하여 유사정적해석(진도법)으로 응력 및 변위, 안전율에 대한 결과를 비교해 보면 다음과 같다. 발생응력의 경우 X, Y, Z방향에 대한 응력과 최대·최소 주응력에 대한 결과는 모두 안정한 결과를 보이고 있다.

구 분	x방향 응력	y방향 응력	z방향 응력	주응력		
				최대(σ_1)	최소(σ_3)	
최대값	해석결과(0.154g)	15.56	21.92	9.53	23.95	8.33
	해석결과(0.2g)	15.53	22.21	8.91	26.72	8.65

구 분		x방향 응력	y방향 응력	z방향 응력	주응력	
					최대(σ_1)	최소(σ_3)
최대값	해석결과(0.25g)	15.63	23.57	8.19	28.81	8.99
	허용압축강도	61.75	61.75	61.75	61.75	61.75
	판정	OK	OK	OK	OK	OK

해석결과, 변위는 Rockfill댐, 접합부, 콘크리트댐의 상단으로 나누어서 각 방향(X,Y,Z)에 따라 지진계 수별로 보면 지진계수가 증가할수록 변위 역시 증가한 경향을 보이고 있으며, Rockfill댐의 변위가 지진 계수에 대한 변위비율로 볼 때 상대적으로 크게 나타나고 있다.

위치	X방향 변위(cm)			Y방향 변위(cm)			Z방향 변위(cm)		
	0.154g	0.2g	0.25g	0.154g	0.2g	0.25g	0.154g	0.2g	0.25g
Rockfill댐 상단	-9.31	-10.79	-12.42	-17.32	-17.32	-17.34	5.45	5.48	5.51
접합부의 상단	-2.95	-3.44	-3.96	-3.04	-3.00	-2.97	-2.34	-2.37	-2.39
콘크리트댐 상단	-1.49	-1.71	-1.94	-0.20	-0.17	-0.13	0.20	0.22	0.23

유사정적해석(진도법)에 대한 결과는 지진계수 0.154g~0.25g까지의 변화에 따라 응력과 변위의 경향을 분석하였으며, 댐 전체에 대한 안정성 검토 및 지진응답해석에 따른 결과는 현재 진행중이다. 본 해석에 적용한 물성값과 결과를 볼 때 댐체의 안정성에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

해석 결과 발생 최대변위(상시만수위시)는 댐체 상부에서 약 5.4mm로 나타나고 있으며, 댐체에 발생하는 응력은 상시만수위시 최대 발생 가능한 응력의 하중조건을 고려하여 내진 안전도 평가를 실시하였다.

또한 피어부 상단에서 X방향, Y방향 모두 최대 응답가속도를 보이고 있으며, 하단부에서 상단으로 갈수록 가속도가 증폭하는 것을 알 수 있다. 댐체 상부의 증폭현상은 입력가속도 0.154g에 대하여 X방향은 약 1.3배 정도 증폭하는 결과를 나타내었다.

본 연구대상댐의 3차원 모델에 대한 내진안전도 평가는 정적해석결과와 동적해석에 대한 결과를 합산한 것으로 발생응력의 최대값에 대한 결과이다. 해석결과에서 나타난 발생 인장응력에 대한 검토결과 주로 피어부 상부(트리니언 앵커부)와 댐체 뒷굽과 피어부와 월류부가 접하는 부분에 응력이 집중되는 것을 알 수 있다. 이 때 최대발생 인장응력은 댐체 뒷굽에서 13.4kg/cm², 피어부 상부(트리니언 앵커부)에서 약 8.0kg/cm² 정도 발생하고 있다. 그러나, 댐체 뒷굽에서 발생된 응력은 경계조건의 영향으로 판단되고, 피어부 상부에서 발생된 응력으로 볼 때 댐체의 안전성에는 큰 영향이 없는 것으로 보인다

참고문헌

1. 한국수자원공사(2001), “수자원시설물의 내진성능평가 연구”,
2. 오병현·김재홍(2007), “복합댐의 담수에 따른 거동분석에 관한 연구” 한국지반공학, 2007년 가을 정기학술발표회
3. 오병현·김재홍(2007), “복합댐의 접합부의 거동 분석에 관한 연구” 한국구조물진단유지관리공학회, 제 2008년 3호