

콘크리트 중력식 댐의 동적 거동 특성 분석

The Analysis for Dynamic Behavior Characteristics of Concrete Gravity Dams

구민세* 박국동**
Koo, Min-Se Park Kuk-Dong

ABSTRACT

The purpose of this study is to suggest some references of maintenance and design of concrete gravity dams by analyzing dynamic characteristics in x, y, z directions.

It is considered as additional mass, soil interaction for numerical dynamic analysis for gravity concrete dams in Han River basin as some cases.

The result shows that the overflow structure can be possibly underestimated for the evaluation of the seismic performance using seismic intensity, modified seismic intensity methods.

A much more research is still necessary for the evaluation of comprehensive seismic performance of concrete gravity dam

1. 서론

댐 구조물이 역할을 다하기 위해서는 무엇보다 안전성 확보가 필수적이라 할 것이다. 이를 만족하기 위해서는 댐체의 안전성 뿐 만 아니라 댐체를 지지하는 기초에 대해서도 안전이 확보되어야 한다. 즉, 댐의 안전성은 댐체의 구조적 안전성과 함께 댐체와 기초암반의 접촉면에서 지진력을 포함한 외력과 자중에 대해서 전도, 활동, 지지력에 대하여 안전해야 한다.

현재 “댐설계기준”에서는 지진에 의한 동역학적인 거동특성이 잘 반영된 신뢰성이 있는 자료가 확보되어 있지 않은 경우에는 정역학적 설계방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 한다고 정의하고 있으나, 진도법은 댐체의 자중에 설계지진계수를 곱하여 구조물의 동적특성을 반영한다는 개념으로, 댐체를 상,하류 방향의 2차원 해석을 수행하여 이에 대해 안전하면 다른 방향에 대해서도 안전한 것으로 해석하는 방법으로 현재의 설계기준은 댐체의 고유치 특성을 반영한 댐체와 지반, 댐체와 상류 저류수의 상호작용을 고려한 해석에 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 한강수계에 위치한 대표적인 중력식 콘크리트 댐의 사례를 통하여 댐의 동적특성을 분석하고 그 결과를 댐의 설계 및 유지관리시 참고자료로 제시하고자 한다.

본 연구에 적용한 중력식 콘크리트 댐은 한강수계에 존재하는 댐 중에 댐의 형식, 용도, 높이에 따라 3가지 Types을 선정하여 분석하였으며, 한강수계 콘크리트 댐의 현황은 표 1.1과 같다.

한강수계는 춘천댐, 팔당댐, 의암댐, 청평댐, 화천댐이 위치한 북한강 수계와 충주댐이 위치한 남한강 수계로 이루어져 있으며, 총 유역면적은 $26,218.90 \text{ km}^2$, 유로 연장은 469.70 km 로 국내 최대 하천이며 전 국토 면적의 약 23% 를 차지하고 있다.

* 인하대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 박사과정

표 1.1 한강수계 중력식 콘크리트 댐 현황

댐 명칭	용도	길이 (m)	높이 (m)	설계 지진계수
춘천댐	발전용댐	453.0	40.0	0.05
팔당댐	발전용댐	575.0	29.0	-
의암댐	발전용댐	273.0	23.0	0.05
청평댐	발전용댐	407.0	31.0	0.05
화천댐	발전용댐	435.0	81.5	0.05
충주댐	다목적댐	447.0	97.5	0.05

2. 해석모델

콘크리트 댐의 거동해석에 있어서 유한요소법을 이용하여 신뢰할 수 있는 해석결과를 얻기 위하여 해석대상인 실제의 현장상태에 대하여 댐체의 기하학적 형상과 재료 특성, 경계조건, 하중, 지반의 특성을 고려하여 모델링 하였다.

2.1 동수압의 모델링

댐의 지진응답은 물의 동수압력에 의해서 영향을 받게 되며 본 해석에서 동수압은 지진 발생시 유체가 댐체에 부가하여 댐체와 일체로 거동하는 것으로 가정한 Westerggard에 의한 동수압의 근사해를 적용하여 입력진동의 주기에 관계없이 댐체에 가해지는 부가질량의 개념을 도입하여 적용하였으며, 수위는 상시만수위까지로 하고 댐체 상류면의 각 절점에 추가하여 적용하였다.

2.2 지반의 모델링

지반의 모델링은 댐체가 지반에 완전 고정된 것으로 간주하는 고정경계 방법, 기초 암반부의 강성을 고려하여 spring으로 대처하여 해석하는 방법, Elastic half-space theory와 Lumped Parameter theory에 의한 해석결과를 근거로 진동모드별로 제안된 parameter 값을 적용한 방법을 이용하였다.

2.3 구조물의 모델링

중력식 콘크리트 댐은 크게 월류부와 비월류부로 구성되어 있다.

비월류부는 균일한 기초 위에 길이가 매우 긴 구조물로 가정하여 평면변형(plane strain)요소의 2차원 유한요소 해석을 실시하며, 월류부는 횡방향 이음부에 Joint grouting으로 댐을 일체화한 경우 이외는 횡방향 이음으로 분리된 독립된 쉐일레버 보의 집합체로 생각하여 3차원 유한요소 해석을 실시하는 것이 일반적이다.

본 해석에 적용한 중력식 콘크리트 댐은 한강수계에 존재하는 댐 중에서 댐의 형식, 용도, 높이에 따라 충주댐(Type-1), 춘천댐(Type-2), 팔당댐(Type-3)을 선정하였으며, 선정된 댐은 피어와 피어의 좌·우측에 여수로가 일체로 구성되어 있는 형태로서, 댐의 방향성은 상·하류방향(X방향), 댐축방향(Y방향), 연직방향(Z방향)으로 구분하여 해석하였으며, 해석을 위한 S/W는 범용프로그램인 MIDAS를 이용하였다.

표 2.1 구조물의 제원

구분	Type-1	Type-2	Type-3
댐 높이	97.5m	40.0m	29.0m
피어 높이	21.5m	17.0m	23.0m
웨어 높이	76.0m	23.0m	6.0m
저면 길이	90.0m	30.0m	45.0m
저면 폭	19.0m	15.0m	11.5m

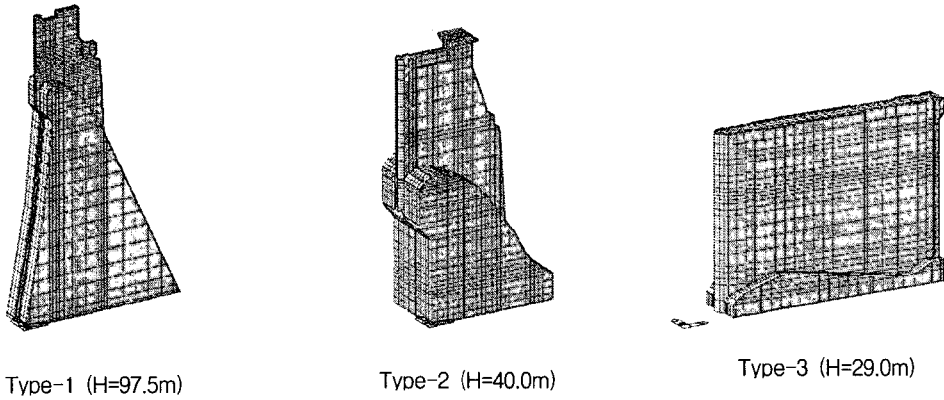


그림 2.2 구조물의 모델링

3. 해석결과

고유주기 또는 고유진동수는 구조물이 가지고 있는 고유한 특성으로 강성과 질량의 함수로 표현된다. 응답 스펙트럼 해석시 선형 다자유도 진동계의 지진응답은 각 진동모드를 중첩하여 계산하며, 다중모드 스펙트럼 해석결과는 해석모형에 대한 고유 진동모드의 수에 따라 달라지므로 주요모드의 포함여부와 적정 수준의 질량참여도 여부를 확인하여야 한다.

본 연구에서는 동수압의 모델링과 지반의 모델링에 따라 다음과 같이 6가지 경우로 분류하여 해석을 실시하였다.

Case-1은 동수압에 의한 부가질량의 효과는 고려하지 않았으며, 지반은 댐체에 완전 고정된 것으로 간주하는 고정경계 방법을 적용하였다.

Case-2는 동수압에 의한 부가질량의 효과는 고려하지 않았으며, 지반은 기초 암반부의 강성을 고려하여 spring으로 대체하여 적용하였다.

Case-3은 동수압에 의한 부가질량의 효과는 고려하지 않았으며, 지반은 Elastic half-space theory와 Lumped Parameter theory에 의한 해석결과를 근거로 진동모드별로 제안된 parameter 값을 적용하였다.

Case-4는 동수압에 의한 부가질량의 효과를 고려하였으며, 지반은 댐체에 완전 고정된 것으로 간주하는 고정경계 방법을 적용하였다.

Case-5는 동수압에 의한 부가질량의 효과를 고려하였으며, 지반은 기초 암반부의 강성을 고려하여 spring으로 대체하여 적용하였다.

Case-6은 동수압에 의한 부가질량의 효과를 고려하였으며, 지반은 Elastic half-space theory와 Lumped Parameter theory에 의한 해석결과를 근거로 진동모드별로 제안된 parameter 값을 적용하였다.

표 3.1 Type-1의 고유진동수 (x축방향, 상하류방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	4.6832 (1.00)	3.7303 (0.80)	3.7298 (0.80)	4.1016 (0.88)	3.4388 (0.73)	3.3981 (0.73)
2	9.6182 (1.00)	7.7196 (0.80)	7.5984 (0.79)	8.7625 (0.91)	7.3715 (0.77)	7.3150 (0.76)
3	16.0187 (1.00)	12.9666 (0.81)	12.5622 (0.78)	14.0828 (0.88)	12.1897 (0.76)	12.0191 (0.75)
4	22.9956 (1.00)	19.2959 (0.84)	19.0011 (0.83)	18.4771 (0.80)	16.5287 (0.72)	16.3559 (0.71)
5	23.3849 (1.00)	21.0686 (0.90)	20.6992 (0.89)	22.7432 (0.97)	18.6566 (0.80)	18.3291 (0.78)

표 3.2 Type-1의 질량참여율 (x축방향, 상하류방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	41.73	59.64	63.52	46.91	61.41	65.71
2	28.11	29.22	25.18	26.01	28.68	27.69
3	10.81	6.67	6.10	8.63	5.93	3.91
4	3.94	1.12	0.85	2.48	0.78	0.13
5	1.01	0.15	0.08	2.92	1.29	0.08
Total	85.60	96.80	95.73	86.95	98.09	97.52

표 3.3 Type-1의 고유진동수 (y축방향, 댐축방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	3.1340 (1.00)	3.1340 (1.00)	3.1338 (1.00)	3.1938 (1.02)	3.1938 (1.02)	3.1911 (1.02)
2	9.5276 (1.00)	9.5276 (1.00)	9.5212 (1.00)	10.1424 (1.06)	10.1424 (1.06)	10.1094 (1.06)
3	16.6728 (1.00)	16.6728 (1.00)	16.5499 (0.99)	17.7671 (1.07)	17.8821 (1.07)	17.7599 (1.07)
4	19.1146 (1.00)	19.1147 (1.00)	19.1140 (1.00)	23.5632 (1.23)	22.8262 (1.19)	22.4811 (1.18)
5	21.6463 (1.00)	21.6471 (1.00)	21.5991 (1.00)	24.0504 (1.11)	22.9769 (1.06)	22.8884 (1.06)

표 3.4 Type-1의 질량참여율 (y축방향, 댐축방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	60.96	60.62	62.74	67.47	68.21	70.10
2	14.89	14.73	15.92	17.77	17.90	19.01
3	2.81	2.83	2.55	4.82	3.40	1.08
4	8.43	8.50	7.88	5.12	4.94	5.01
5	4.21	3.97	4.12	0.30	0.31	0.09
Total	91.29	90.65	93.21	95.48	94.75	95.29

표 3.5 Type-1의 고유진동수 (z축방향, 연직방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	10.7846 (1.00)	8.3512 (0.77)	8.2989 (0.77)	11.4991 (1.07)	9.4744 (0.88)	9.4311 (0.87)
2	16.0188 (1.00)	12.9666 (0.81)	12.6922 (0.79)	14.0828 (0.88)	12.1897 (0.76)	12.1224 (0.76)
3	22.9956 (1.00)	18.6212 (0.81)	18.6100 (0.81)	22.7432 (0.99)	18.6566 (0.81)	18.4990 (0.80)
4	23.3849 (1.00)	19.2959 (0.83)	18.9879 (0.81)	23.5630 (1.01)	19.9393 (0.85)	19.5884 (0.84)
5	25.8004 (1.00)	21.0686 (0.82)	19.9981 (0.78)	25.9506 (1.01)	22.8262 (0.88)	21.4783 (0.83)

표 3.6 Type-1의 질량참여율 (z축방향, 연직방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	61.40	71.22	69.35	62.42	80.57	75.69
2	0.92	0.95	2.97	0.24	0.22	0.35
3	3.89	4.98	7.41	3.63	4.53	7.12
4	8.05	2.72	1.59	1.28	0.05	0.10
5	0.73	0.88	0.55	0.51	0.01	0.02
Total	74.99	80.75	81.87	68.08	85.38	83.28

표 3.7 Type-2의 고유진동수 (x축방향, 상하류방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	9.8172 (1.00)	7.5796 (0.77)	7.4888 (0.76)	8.0470 (0.82)	6.1330 (0.62)	6.1290 (0.62)
2	22.2852 (1.00)	17.0811 (0.77)	16.5889 (0.74)	18.5155 (0.83)	14.3603 (0.64)	14.1948 (0.64)
3	25.9264 (1.00)	19.4014 (0.75)	19.3811 (0.75)	24.0264 (0.93)	18.2551 (0.70)	17.9247 (0.69)
4	40.6168 (1.00)	31.2131 (0.77)	31.1886 (0.77)	29.6533 (0.73)	25.7863 (0.63)	24.9661 (0.61)
5	43.4383 (1.00)	37.6404 (0.87)	36.1980 (0.83)	34.0254 (0.78)	30.6494 (0.71)	30.5008 (0.70)

표 3.8 Type-2의 질량참여율 (x축방향, 상하류방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	33.28	50.33	56.91	40.50	56.58	59.44
2	26.47	36.04	32.10	28.44	34.18	33.11
3	9.34	4.69	2.09	5.04	2.40	1.89
4	11.39	6.81	6.11	4.36	4.27	3.09
5	0.37	0.15	0.21	4.51	0.30	0.02
Total	80.85	98.02	97.42	82.85	97.73	97.55

표 3.9 Type-2의 고유진동수 (y축방향, 댐축방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	3.7211 (1.00)	3.7203 (1.00)	3.7195 (1.00)	3.2816 (0.88)	3.2808 (0.88)	3.2790 (0.88)
2	15.9062 (1.00)	15.8951 (1.00)	15.8801 (1.00)	13.9441 (0.88)	13.9342 (0.88)	13.8998 (0.87)
3	23.6065 (1.00)	23.6025 (1.00)	23.6011 (1.00)	17.9611 (0.76)	17.9578 (0.76)	17.9008 (0.76)
4	26.9366 (1.00)	26.9350 (1.00)	26.9342 (1.00)	20.2707 (0.75)	20.2695 (0.75)	20.2994 (0.75)
5	31.5916 (1.00)	31.5556 (1.00)	31.4490 (1.00)	27.9289 (0.88)	27.9104 (0.88)	27.9002 (0.88)

표 3.10 Type-2의 질량참여율 (y축방향, 댐축방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	54.92	56.70	57.91	58.10	58.14	60.01
2	20.71	21.29	21.35	27.34	27.34	29.16
3	1.49	1.52	1.30	1.06	1.09	0.79
4	0.34	0.36	0.44	0.95	0.97	0.88
5	6.24	6.43	7.09	5.29	5.30	6.02
Total	83.70	86.29	88.09	92.74	92.83	96.86

표 3.11 Type-2의 고유진동수 (z축방향, 연직방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	25.9264 (1.00)	19.4014 (0.75)	19.2881 (0.74)	24.0264 (0.93)	18.2551 (0.70)	18.2488 (0.70)
2	43.4383 (1.00)	31.2131 (0.72)	30.1109 (0.69)	34.0254 (0.78)	25.7863 (0.59)	25.6999 (0.59)
3	47.2217 (1.00)	37.6404 (0.80)	37.6002 (0.80)	39.3938 (0.83)	30.6494 (0.65)	30.6009 (0.65)
4	50.4867 (1.00)	42.5741 (0.84)	42.6001 (0.84)	41.2922 (0.82)	36.6491 (0.73)	36.1472 (0.72)
5	52.7506 (1.00)	50.5954 (0.96)	49.9199 (0.95)	43.5782 (0.83)	39.4331 (0.75)	39.4210 (0.75)

표 3.12 Type-2의 질량참여율 (z축방향, 연직방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	57.68	78.64	80.01	66.09	76.48	78.91
2	8.90	5.68	4.97	4.04	5.69	5.17
3	19.06	7.10	8.03	6.91	2.20	1.90
4	0.10	1.09	0.97	0.13	3.27	2.99
5	0.10	1.08	1.00	3.36	0.04	0.12
Total	85.84	93.59	94.98	80.53	87.68	89.09

표 3.13 Type-3의 고유진동수 (x축방향, 상하류방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	14.4454 (1.00)	9.7277 (0.67)	9.7110 (0.67)	12.7128 (0.88)	8.5577 (0.59)	8.5501 (0.59)
2	31.1083 (1.00)	22.0179 (0.71)	21.5890 (0.69)	28.8523 (0.93)	20.7323 (0.67)	20.5519 (0.66)
3	31.6613 (1.00)	29.9528 (0.95)	29.0231 (0.92)	30.7029 (0.97)	28.3089 (0.89)	28.1112 (0.89)
4	42.4831 (1.00)	39.1180 (0.92)	38.9918 (0.92)	35.4371 (0.83)	30.6759 (0.72)	29.9919 (0.71)
5	44.4991 (1.00)	39.8087 (0.89)	39.5022 (0.89)	42.4234 (0.95)	37.7611 (0.85)	37.3132 (0.84)

표 3.14 Type-3의 질량참여율 (x축방향, 상하류방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	61.01	72.58	73.91	66.69	77.10	79.01
2	13.76	23.53	22.58	5.93	19.64	18.22
3	2.95	0.01	0.18	5.04	0.30	0.29
4	0.07	0.12	0.31	2.33	0.37	0.30
5	1.37	1.36	0.60	0.99	0.67	0.47
Total	79.16	97.60	97.58	80.98	98.08	98.29

표 3.15 Type-3의 고유진동수 (y축방향, 댐축방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	3.7014 (1.00)	3.2464 (0.88)	3.2198 (0.87)	3.5575 (0.96)	3.1229 (0.84)	3.0999 (0.84)
2	20.2072 (1.00)	18.4990 (0.92)	18.4013 (0.91)	16.2423 (0.80)	15.3955 (0.76)	15.2101 (0.75)
3	22.8656 (1.00)	21.6470 (0.95)	20.5586 (0.90)	20.8087 (0.91)	19.1695 (0.84)	19.0010 (0.83)
4	23.6207 (1.00)	23.4985 (0.99)	23.2709 (0.99)	21.9213 (0.93)	21.6019 (0.91)	21.5002 (0.91)
5	30.9786 (1.00)	29.9357 (0.97)	29.1877 (0.94)	27.1889 (0.88)	26.1446 (0.84)	25.9985 (0.84)

표 3.16 Type-3의 질량참여율 (y축방향, 댐축방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	68.02	67.72	70.05	65.96	66.40	72.19
2	20.90	18.72	15.78	15.77	15.56	14.99
3	0.46	0.98	0.70	7.02	4.79	3.85
4	0.43	0.21	0.19	0.14	0.40	0.37
5	0.43	0.30	0.27	0.52	0.57	0.60
Total	90.25	87.91	86.99	89.41	87.70	92.00

표 3.17 Type-3의 고유진동수 (z축방향, 연직방향)

단위 (Hz)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	27.8798 (1.00)	19.7578 (0.71)	19.7557 (0.71)	27.7770 (1.00)	19.5212 (0.70)	19.5200 (0.70)
2	31.1083 (1.00)	22.0179 (0.71)	21.9997 (0.71)	28.8523 (0.93)	20.7323 (0.67)	20.7010 (0.67)
3	31.6613 (1.00)	29.9528 (0.95)	29.9376 (0.95)	30.7029 (0.97)	28.3089 (0.89)	28.1900 (0.89)
4	42.4831 (1.00)	39.1180 (0.92)	39.0067 (0.92)	35.4371 (0.83)	30.6759 (0.72)	30.6004 (0.72)
5	54.0936 (1.00)	39.8087 (0.74)	39.7665 (0.74)	52.0934 (0.96)	37.7611 (0.70)	37.4937 (0.69)

표 3.18 Type-3의 질량참여율 (z축방향, 연직방향)

mode	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6
1	72.05	93.28	95.01	65.13	93.63	95.37
2	2.99	0.56	0.33	0.57	0.10	0.21
3	1.45	0.08	0.04	7.17	0.19	0.39
4	0.04	0.07	0.04	0.03	0.01	0.05
5	0.01	0.01	0.01	0.11	0.08	0.02
Total	76.54	94.00	95.43	73.01	94.01	96.04

4. 분석

중력식 콘크리트 댐은 큰 자중에 의하여 외부하중을 지지하는 매시브한(massive) 구조물이고 보통암 이상의 견고한 지반에 위치하여 교량 또는 건축구조물에 비하여 비교적 짧은 고유주기 특성을 가지고 있으며 댐 축방향은 상대적으로 작은 단면강성으로 인하여 해석대상 댐의 동적 특성에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

한편, 지반의 경계조건의 변화에 따른 고유진동수의 변화율을 분석한 결과 Type-1은 고정경계 방법보다 약 77%~100% 사이의 변화를 보이며, Type-2는 70%~100%, Type-3는 67%~99% 사이의 변화를 보이고 있다. 이는 본 해석에 적용한 지반의 물성 값이 보통암 이상의 견고한 지반에 위치하여 변화율이 비교적 작게 계산됨을 알 수 있다.

상하류방향의 고유진동수는 Type-3 > Type-2 > Type-1의 순으로 발생하며, 댐축방향의 고유진동수는 Type-2 > Type-3 > Type-1의 순으로 발생하고, 연직방향의 고유진동수는 Type-3 > Type-2 > Type-1의 순으로 발생한다. 이는 구조물의 형상과 지반 물성의 변화가 주요한 변수로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Anil K. Chopra, Dynamics of structures, Prentice Hall, 1995
2. Gregory Fenve, Anil K. Chopra, Simplified Analysis for Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dams,
3. Steven L. Kramer, Geotechnical Earthquake Engineering, Pretice Hall, 1996