

대기온도의 변화에 의한 콘크리트 중력댐 하류면의 균열거동에 관한 연구

On the crack behaviour of the downstream surface of the concrete gravity dam by atmosphere temperature change

김 종 수* 장 희 석* 정 태 환**
Kim, Jong Soo Jang, Hee Suk Jeong, Tae Whan

ABSTRACT

Downstream surface of the concrete gravity dam receives thermal stress due to atmosphere temperature change. So in this paper, the behaviors of crack located in the downstream surface were investigated, when considering the temperature change.

1. 서론

콘크리트 중력댐에 있어서 온도균열은 댐 축조시 수화열에 의한 균열과 댐이 완성된 후 대기온도의 계절적인 변화에 따라 댐 하류면의 표면에 발생하는 균열을 고려할 수 있다. 댐과 같은 매스콘크리트 구조물에서 수화열에 의한 균열에 대하여는 그동안 많은 연구가 있어 왔다. 그러나 사용 도중에 있는 댐에 대하여 대기온도의 변화에 의하여 댐 하류면에 생긴 균열의 거동에 대한 연구는 미흡한 상태로 서, 미국 테네시주에 있는 Fontana댐 하류면에 생긴 균열에 대한 연구가 수행된 정도이며 최근에 일부 문헌이 보고되고 있다.

본 연구에서는 댐 하류면에 발생된 균열의 거동도 댐의 안전문제와 관련시켜 볼 때 역시 중요한 변수가 될 수 있을 것으로 판단되어, 댐 하류면에서 초기균열의 위치, 방향 및 수위의 변화에 따른 균열의 진전 가능성, 그리고 복합균열이 발생한 경우에 이들 균열선단에서 유효응력확대계수의 변화량 등을 조사하였다. 본 연구에서 FRANC(FRacture ANalysis Code)2D 프로그램이 수치해석에 사용되었다.

2. 댐 하류면 균열의 진전 가능성 분석

유효응력확대계수(K_{eff})는 균열선단에서의 응력확대계수 K_I 및 K_{II} 를 최대원주방향 인장응력

* 정희원, 부경대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 부경대학교 토목공학과 석사과정

($\sigma_{\theta_{max}}$)의 이론에 따라 다음 식에 대입하여 구할 수 있으며, 균열의 진전 여부는 이 값을 재료의 파괴인성치(K_{Ic})와 비교하여 판단한다.

$$K_{eff} = \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right]$$

2.1 균열의 위치 및 방향에 따른 유효응력확대계수

그림 1은 본 연구에서 사용된 콘크리트 중력댐의 제원을 나타내며, 댐의 파괴인성은 $100t/m^{3/2}$ 으로 하였다. 초기균열의 발생위치는 댐 하류면에 임의로 5개 위치 a(Hd=7.05m), b(Hd=11.75m), c(Hd=16.39m), d(Hd=22.1m), e(Hd=26.06m)를 택하였으며 각각의 위치에서 22.5° , 0° , -22.5° , -45° 및 -67.5° 의 5개 방향의 균열을 가정하였다.

완성 후 사용 중인 콘크리트 중력댐의 내부온도는 문헌에 의하면 $10^\circ C \sim 15^\circ C$ 정도인 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 대기온도가 댐 내부의 온도분포에 영향을 미칠 수 있는 범위를 댐 표면으로부터 1.5m의 두께로 가정하고, 이 두께를 삼등분하여 댐 내부온도와 대기온도와의 차이 값을 선형적으로 분포시켜 계산에 적용하였다.

표 1은 댐의 수위가 25.268m(만수위의 80%)이고, 초기균열길이가 1m일 때의 대기온도의 변화에 따른 유효응력확대계수를 나타내는데, 온도가 낮아질수록 모든 위치에서의 유효응력확대계수 값이 증가하는 경향이 있음을 보여준다. 따라서 중력식 콘크리트 댐 구조물에서 댐 하류면에 균열이 생긴 경우에 여름철보다는 온도가 낮은 겨울철에 균열진전이 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있다.

또한 K_{eff} 가 파괴인성($100t/m^{3/2}$)을 초과하는 경우는 대기온도가 $-10^\circ C$ 인 경우에 처음 나타나며, $0^\circ C$, $-10^\circ C$, $-20^\circ C$ 에서의 결과들을 서로 비교해 볼 때 거의 선형적으로 증가되어 있음을 알 수 있다. 따라서 $-10^\circ C$ 에서 계산된 값을 기준으로 하여 균열의 진전의 가능성을 분석해 볼 때, 댐의 하류면 b, c위치의 하향경사($-22.5^\circ \sim -67.5^\circ$)의 균열에서 균열진전 가능성이 우선적으로 높은 것을 알 수 있다.

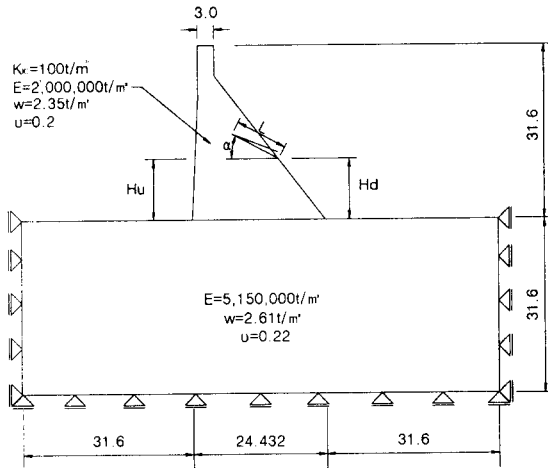


그림 1. 콘크리트 중력댐 (길이단위:m)

2.2 수위의 변화에 따른 유효응력확대계수

표 2는 대기온도 $-10^\circ C$ 에서 수위 변화에 따른 유효응력확대계수 값을 나타내고 있다.

이 표로부터 수위가 낮아질수록 전체적으로 유효응력확대계수가 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 균열을 닫히려는 정수압의 감소에 인한 것으로 판단된다. 따라서 하류면에 균열을 가진 콘크리트 중력댐에 있어서 동절기에 수위의 감소는 균열의 진전 가능성을 증대시켜 댐의 안정에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 대기온도변화에 따른 유효응력확대계수
(수위 : 25.268m)

균열 위치	균열 방향 (°)	대기온도					
		-20℃	-10℃	0℃	10℃	20℃	30℃
a (Hd=7.05m)	22.5	105.3	67.9	30.4	2.3	-	-
	0	169.0	106.6	44.3	-	-	-
	-22.5	108.6	58.7	8.9	-	-	-
	-45	107.3	56.8	6.4	-	-	-
	-67.5	92.3	49.9	7.5	3.7	-	-
b (Hd=11.75m)	22.5	88.7	58.2	27.7	2.3	-	-
	0	139.4	89.4	39.4	-	-	-
	-22.5	184.7	118.0	51.2	-	-	-
	-45	188.7	120.0	51.3	-	-	-
	-67.5	185.1	120.0	55.0	3.7	-	-
c (Hd=16.39m)	22.5	75.5	51.1	26.7	2.3	-	-
	0	106.9	70.6	34.4	-	-	-
	-22.5	155.6	103.2	50.7	-	-	-
	-45	163.6	108.3	52.9	-	-	-
	-67.5	174.6	117.6	60.6	3.7	-	-
d (Hd=22.1m)	22.5	90.2	63.4	36.5	9.6	-	-
	0	126.7	88.4	50.1	11.7	-	-
	-22.5	93.6	64.1	34.6	5.1	-	-
	-45	107.5	74.2	40.8	7.6	-	-
	-67.5	122.1	85.3	48.5	11.9	-	-
e (Hd=26.06m)	22.5	-	-	-	-	-	-
	0	-	-	-	-	-	-
	-22.5	-	-	-	-	-	-
	-45	29.5	14.8	-	-	-	-
	-67.5	85.9	58.6	31.3	-	-	-

* (-) 표시는 K_i이 負 값을 가진 경우를 의미함

표 2. 수위변화에 따른 유효응력확대계수
(대기온도 : -10℃)

균열 위치	균열 방향 (°)	수 위			
		31.6m (100%)	25.268m (80%)	18.674m (60%)	12.91m (40%)
a (Hd=7.05m)	22.5	45.6	67.9	81.0	86.4
	0	64.2	106.6	131.9	142.3
	-22.5	3.4	58.7	92.3	106.6
	-45	-	56.8	92.0	107.6
	-67.5	4.4	49.9	78.3	91.0
b (Hd=11.75m)	22.5	34.7	58.2	69.6	75.7
	0	43.3	89.4	112.2	118.7
	-22.5	55.9	118.0	149.3	159.9
	-45	56.2	120.0	153.4	164.3
	-67.5	68.6	120.0	147.7	157.2
c (Hd=16.39m)	22.5	28.5	51.1	58.2	58.6
	0	26.0	70.6	85.4	86.6
	-22.5	42.4	103.2	124.8	127.2
	-45	44.6	108.3	132.5	136.0
	-67.5	65.8	117.6	138.5	142.0
d (Hd=22.1m)	22.5	42.5	63.4	64.3	64.0
	0	47.4	88.4	90.9	90.7
	-22.5	8.6	64.1	69.0	68.6
	-45	15.6	74.2	81.1	80.6
	-67.5	37.9	85.3	92.1	91.6
e (Hd=26.06m)	22.5	-	-	-	-
	0	-	-	-	-
	-22.5	-	-	-	-
	-45	-	14.8	14.8	14.7
	-67.5	15.2	58.6	58.5	58.5

* (-) 표시는 K_i이 負 값을 가진 경우를 의미함

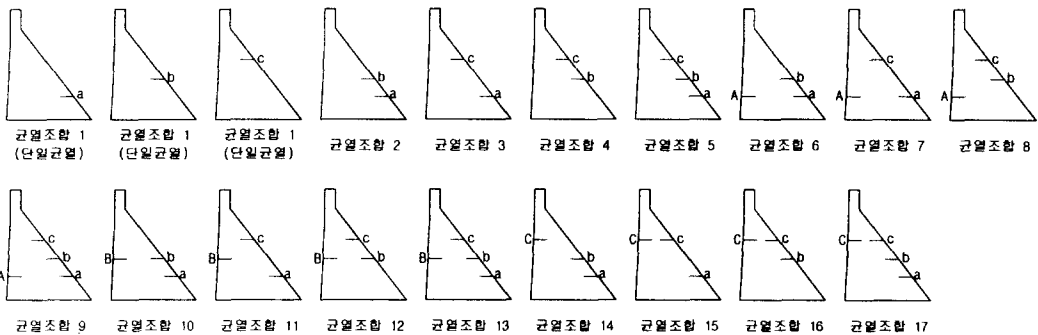


그림 2. 복합균열 조합 번호

3. 복합균열의 거동분석

댐 상류면의 높이 $H_u=7.05m, 11.75m, 16.39m$ 의 세 곳에서 수평방향($\alpha=0^\circ$)으로 균열길이가 각각 $L=1.0m$ 의 단일균열 A, B, C와 댐 하류면의 높이 $H_d=7.05m, 11.75m, 16.39m$ 에서 수평방향($\alpha=0^\circ$)으로 $L=1.0m$ 의 단일균열 a, b, c를 가정하고 이들을 서로 조합하여 여러개의 복합균열을 형성하여 보았다. 그림 2는 균열조합을 나타낸 것이며 댐의 기초부분은 지면상의 제약으로 생략되어 있다. 균열조합 1은 복합균열의 조합에 사용될 댐 하류면의 단일균열 a, b, c를 가리킨다. 복합균열은 모두 17개의 조합이 고려되었으며 균열 a, b, c에 대하여 단일균열 및 복합균열 때의 유효응력확대계수 변화량을 복합균열 거동의 분석에 사용하였다.

표 3. 복합균열조합에 따른 유효응력확대계수 ($t/m^{3/2}$)

균열 조합 위치	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
a	106.6 (1.00)	22.7 (0.21)	100.7 (0.94)	.	19.1 (0.18)	22.8 (0.21)	100.5 (0.94)	.	19.5 (0.18)	22.5 (0.21)	100.5 (0.94)	.	19.1 (0.18)	22.6 (0.21)	100.5 (0.94)	.	19.0 (0.18)
b	89.91 (1.00)	58.64 (0.66)	.	13.3 (0.15)	- (0.00)	58.9 (0.66)	.	13.5 (0.15)	- (0.00)	58.0 (0.65)	.	13.7 (0.15)	- (0.00)	58.0 (0.65)	.	13.0 (0.15)	- (0.00)
c	70.61 (1.00)	.	68.7 (0.97)	46.2 (0.66)	45.1 (0.64)	.	68.6 (0.97)	46.4 (0.66)	45.5 (0.64)	.	68.7 (0.97)	47.0 (0.67)	46.1 (0.65)	.	67.3 (0.95)	45.2 (0.64)	44.1 (0.62)

* ()내의 수치는 균열조합 1의 경우의 결과치를 1.0으로 둔 경우의 상대값임.

복합균열의 거동에 대하여 수치해석으로부터 얻어진 결과는 표 3에 나타내었으며, 단일균열 때 얻어진 K_{eff} 값을 기준으로 택하여 이 결과를 분석해 보면 다음과 같다.

- 1) 댐 하류면 균열에 있어서 단일균열(균열조합1)일 때보다 복합균열(균열조합2~17)일 때의 유효응력확대계수 값이 작아진 것을 알 수 있다. 이는 단일균열 때에 균열선단에서 생긴 높은 응력들이 복합균열일 때는 주위의 균열 상호간에 응력분산효과를 받게 되어 응력감소를 가져온 때문이라고 판단된다.
- 2) 균열사이의 이격거리가 가까운 균열조합 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16의 경우와 상대적으로 먼 균열조합 3, 7, 11, 15의 경우의 결과치들을 서로 비교해보면 전자의 경우에 K_{eff} 값이 더 작은 것을 알 수 있다. 이는 위의 1)에서 설명된 응력분산효과가 균열들 사이의 거리에 따라 영향을 받는 것을 나타낸다.
- 3) 복합균열에 있어서 댐 상류면의 균열위치는 하류면의 균열 a, b, c의 K_{eff} 변화량에 별 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

- 1) 콘크리트 중력댐에서 댐 하류면에 균열이 생긴 경우에 하절기보다는 동절기에 균열진전이 발생하기 쉽고, 댐의 중앙부 부근의 하향경사 방향의 균열에서 균열진전 가능성이 높음을 알 수 있었다.
- 2) 동절기에 댐의 수위가 낮아질수록 유효응력확대계수가 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었다.
- 3) 댐의 상, 하류면에 복합균열이 발생한 경우에 균열상호간에 응력분산효과를 일으켜서 유효응력확대계수 값의 감소를 가져올 수 있음을 알 수 있었다.