

콘크리트 중력댐의 균열거동에 관한 연구

A Study on the Crack Behaviour of the Concrete Gravity Dam

장 희 석*
Jang, Hee-Suk

손 병 락**
Son, Byung-Lak

김 희 성***
Kim, Hee-Sung

요 지

본 연구에서는 콘크리트 중력식 댐의 임계균열길이 계산되었으며 또한 복합균열의 균열선단에서 유효응력 확대계수의 변화량이 조사되었다. 작용하중으로는 댐 상부면에 작용하는 정수압과 댐의 균열면에 작용하는 수압 및 자중으로 구성된 정하중, 그리고 댐 주위에서 발파작업이 수행되는 경우에 고려될 수 있는 발파진동 및 동수압으로 구성된 동하중이 사용되었다. 균열이 발생한 위치와 방향 및 발파진동의 크기에 따라 임계균열길이 계산되었으며, 또한 복합균열의 형태 및 균열선단 간의 이격거리에 따른 유효응력 확대계수의 변화량이 검토되었다.

핵심용어 : 임계균열길이, 복합균열, 유효응력 확대계수, 발파

Abstract

This study is aimed to obtain the critical crack lengths of the concrete gravity dam and to investigate variation of the effective stress intensity factors at the crack tips of multiple cracks. Applied loads are dynamic load composed of blast vibration and hydrodynamic pressure which can be considered in case of the blast work at near construction site, in addition to static load composed of hydrostatic pressure, crack pressure, and gravity load of the dam.

The critical crack lengths were calculated according to the crack locations, directions, and magnitudes of blast vibration. Also variation of the effective stress intensity factors with respect to the multiple crack shapes and distances between the crack tips was investigated.

Keywords : critical crack length, multiple crack, effective stress intensity factor, blast

1. 서 론

콘크리트 중력댐에서 균열은 부적절한 설계 및 시공, 체적의 변화, 지진, 댐 기초지반의 불균등 침하 등의 여러 원인으로 인하여 발생될 수 있다¹⁾.

또한 열 응력에 의한 균열로서는 댐이 시공될 때의 수화열에 의한 균열과 댐이 완성된 후 태양열에 의한 팽창 및 수축작용의 반복으로 댐 하부면에 균열이 발생하는 경우 등이 있다²⁾. 이러한 균열에 의한 댐의 파괴는 대규모의 피해로 이어질 수 있으므로

* 정희원 · 부경대학교 토목공학과 교수
** (주) 재경종합기술공사
*** 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

콘크리트 댐의 균열에 대한 연구는 대단히 필요하다.

콘크리트 댐에 발생한 균열의 안전여부는 임계균열길이(critical crack length)의 개념으로 판단될 수 있는데, 본 연구에서 임계균열길이는 댐에 발생한 균열에 대하여 계산된 유효응력확대계수(Effective Stress Intensity Factor : K_{eff})가 댐의 파괴인성(Fracture Toughness)과 같게 될 때의 균열길이를 가리킨다.

콘크리트 중력댐의 임계균열길이에 관한 연구는 Ingraffea³⁾와 Lin⁴⁾ 등에 의하여 행해졌다. 이들은 댐 자중의 지배적인 영향으로 인하여 응력확대계수 K_I 이 음의 값을 갖게 되는 경우에는 이 값을 무시하고 K_{II} 값만으로 임계균열길이를 계산하기 때문에 이 계산결과들은 과대평가되는 경향이 있었다. 따라서 댐의 월류수위를 고려하여 양의 K_I 값을 유도하고 이들로부터 임계균열길이를 구하려는 시도가 장희석⁵⁾과 김종수⁶⁾ 등에 의해서 행해졌다.

본 연구에서는 콘크리트 중력식 댐의 임계균열길이 가 댐 상부면 균열의 위치와 방향에 따라서 구분하여 계산되었으며, 다수의 균열들로 형성된 복합균열이 발생한 경우에 복합균열선단에서 유효응력확대계수의 변화량이 조사되었다. 작용하중은 댐 상부면에 작용하는 정수압과 댐의 균열면에 작용하는 수압 및 자중으로 구성된 정하중, 그리고 댐 주위에 채석장이나 터널공사현장이 있는 상황에서 발파작업이 수행되는 경우에 고려될 수 있는 발파진동 및 동수압으로 구성된 동하중을 사용하였다.

균열전파이론에는 최대 원주방향 인장응력이론, 최대 에너지 해방률이론, 그리고 최소 변형에너지 밀도이론의 3가지가 있는데, 이 중에서 최대 원주방향 인장응력이론이 정확성과 사용에의 간단함 때문에 널리 이용되고 있다. 따라서 본 연구에서도 이 이론에 의하여 임계균열길이 및 복합균열의 균열선단에서 유효응력확대계수의 변화량이 계산되었다.

콘크리트 중력댐 혹은 아치댐에 대하여 최근의 파괴역학적인 접근은 이들의 해석을 보다 정확히 하기 위하여 2차원이 아닌 3차원의 범위에서 수행하려는 것이다.^{7),8)} 그러나 3차원으로 해석할 경우에 균열면의 선단에서 균열의 성장방향 및 성장량을 어떻게 합리적으로 나타낼 것인지 등에 대하여 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 연구는 2차원 선

형탄성 범위 내에서 행하였으며, 여러 다양한 수치 실험에 FRANC(FRacture ANalysis Code)2D⁹⁾가 활용되었다. FRANC2D는 유한요소법에 기초하여 응력확대계수를 계산하며, 모델 내에서 균열이 형성되면 균열선단에서는 자동적으로 삼각형특이요소가 사용된다. 응력확대계수는 변위상관법(displacement correlation method), 에너지해방률법 및 J-적분법에 의하여 계산되는데 본 연구에서는 변위상관법이 이용되었다.

2. 해석모델의 가정사항

본 연구에서 콘크리트 중력식 댐은 등방성의 재질을 갖는 것으로 그리고 댐의 기초지반은 기반암으로 가정되었다. 작용하중 중에서 균열면 내의 수압은 정수위에 해당하는 크기의 수압이 균열면 내에서 선형적으로 분포하는 것으로 가정하였다.

2.1 콘크리트 중력댐의 제원

그림 1에 본 연구에서 사용된 콘크리트 중력댐의 제원 및 기초지반의 경계조건이 주어져 있다. 댐의 높이는 31.6m, 저면길이는 24.432m이며, 콘크리트의 탄성계수는 $2.0 \times 10^6 \text{t/m}^2$ 이고 포아슨비는 0.2, 단위중량은 2.35t/m^3 로 가정되었다. 댐의 높이 치수를 댐의 기초지반 모델링에 이용하였으며, 기초지반에서 탄성계수 $5.15 \times 10^6 \text{t/m}^2$, 포아슨비 0.22, 단위중량 2.61t/m^3 의 값이 사용되었다. 댐 콘크리트의 파괴인성은 문헌^{1),3),11)}에 따르면 $1 \text{MPa}\sqrt{m}$ 및 $2 \text{MPa}\sqrt{m}$ 의 값들이 보고되고 있다. 본 연구에서는 이들 값 중에서 안전측으로 $1 \text{MPa}\sqrt{m}$ 의 값을 택하고 이를 단위 환산한 $K_{IC} = 100 \text{t/m}^{3/2}$ 값을 적용하였다.

균열의 발생위치는 구조물의 유한요소망과 관련지어 그림 2에서와 같이 임의의 5개 위치 A~E가 설정되었으며, 이들 각각의 위치에서 22.5° , 0° , -22.5° , -45° 및 -67.5° 의 5개 방향의 균열이 가정되었다.

댐에 작용하는 정수압계산을 위한 설계수위는 일반적으로 상시 만수위를 기준으로 하지만, 본 연구에서는 임의의 홍수위를 고려하는 것으로 하여 월류수위는 댐의 천단으로부터 -1m, 0m, 1m 및 2m 위에 있는 것으로 하였다.

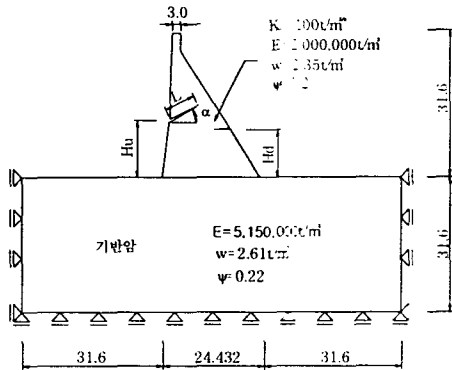


그림 1 콘크리트 중력댐 단면도 (길이 단위: m)

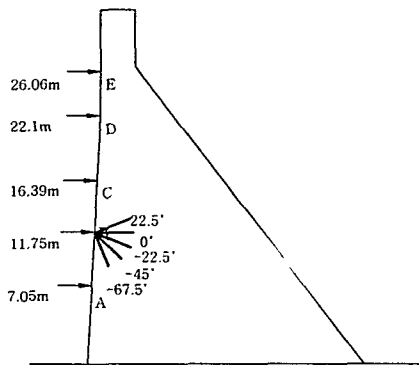


그림 2 균열의 발생위치 및 방향

2.2 발파진동의 적용

댐에 작용하는 발파진동은 수평진도 및 연직진도로부터 계산된 등가의 정하중으로 나타낼 수 있으며, 발파진동의 영향은 댐구조물 자체의 안전조사에 국한되는 경우에는 이 등가정하중을 댐의 무게중심점에 작용시켜 계산될 수가 있다. 그러나 본 연구와 같이 댐 상부면에 발생한 균열의 거동을 보다 정확히 분석하기 위해서는 이 하중을 분산하여 작용시키는 것이 필요한 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 댐을 높이 방향으로 6등분하고 이에 따라 계산된 등가정하중을 각 단면의 무게중심점에 작용시켰다. 여기서 발파진동에 의하여 발생하는 수평력은 댐 무게에 수평진도를 곱한 값으로 무게중심점에서 댐 하류면으로 작용하며, 연직력은 연직진도에 댐 무게를 곱한 값으로 무게중심점에서 상부로 작용하게 된다. 이 수평력과 연직력의 계산에 사용된

공식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{수평력} &= A_i K_h r_c \\ \text{연직력} &= A_i K_v r_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 A_i 는 댐의 분할된 단면적(m^2)이며, K_h 는 수평진도(g), K_v 는 연직진도(g), r_c 는 콘크리트 단위중량(t/m^3)이다.

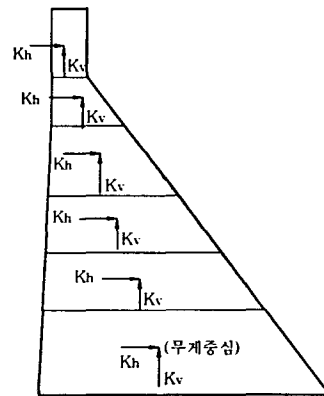


그림 3 발파진동의 적용을 위한 댐 분할도

2.3 동수압의 적용

발파진동으로 인한 동수압의 영향은 지진이 발생할 때의 동수압에 준하여 계산되었다. 댐 구조물의 안전계산을 행할 때에 동수압은 댐 천단으로부터 댐 높이의 3/5 위치에 집중하중으로 작용된다. 그러나 댐 상부면 균열들의 거동 분석에 있어서는 동수압을 집중하중 대신에 분포하중으로 작용시키는 것이 더욱 정확한 결과를 줄 것으로 판단되었다. 따라서 Westergaard의 동수압 공식¹⁰⁾에 따라 그림 4와 같은 포물선형태의 분포하중이 사용되었으며, 월류수위를 고려하는 경우에 동수압은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} p_d &= \frac{7}{8} w_0 K_h \sqrt{(H+h)y} \\ p_{d1} &= \frac{7}{8} w_0 K_h \sqrt{(H+h)h_0} \\ P_{d2} &= \frac{7}{8} w_0 K_h (H+h) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 각 기호는 다음과 같다.

- p_d : 월류수위 아래 임의의 깊이 y 에서의 동수압 (t/m^2)
- w_0 : 물의 단위중량 (t/m^3)
- H : 댐의 높이 (m)
- p_{d1} : 댐頂에서의 동수압 (t/m^2)
- h : 월류 수심 (m)
- p_{d2} : 댐 기초에서의 동수압 (t/m^2)
- K_h : 수평진도(g)

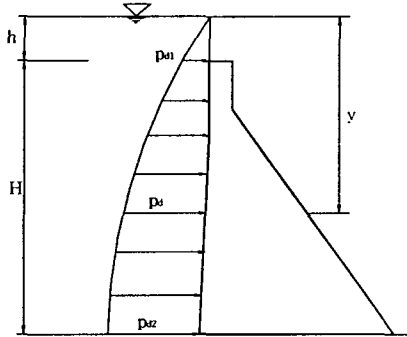


그림 4 월류수위가 고려된 경우의 동수압 분포

3. 임계균열길이의 계산

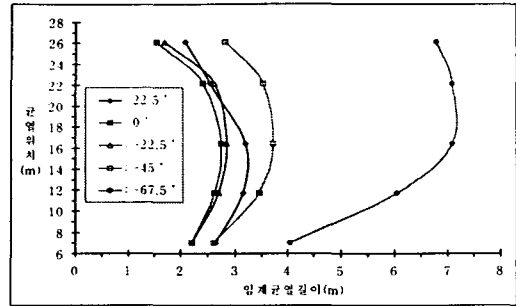
임의 길이의 균열선단에서 수치해석으로부터 얻어진 응력확대계수 K_I 및 K_{II} 를 최대 원주방향 인장응력이론에 따라 식 (3)^{4),12)}에 대입하여 균열 전파각도(θ) 및 유효응력확대계수(K_{eff})를 구한 후, 이 값을 댐 재료의 파괴인성 K_{IC} 와 비교하므로써 임계균열길이를 결정하였다.

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8}$$

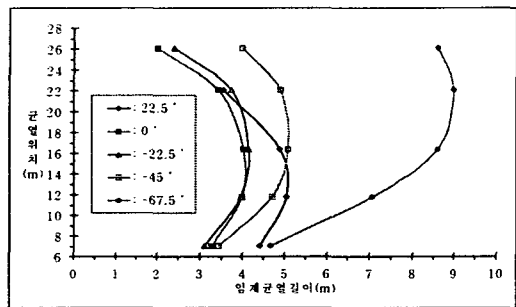
$$K_{eff} = \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (3)$$

3.1 균열의 위치 및 방향에 따른 임계균열길이

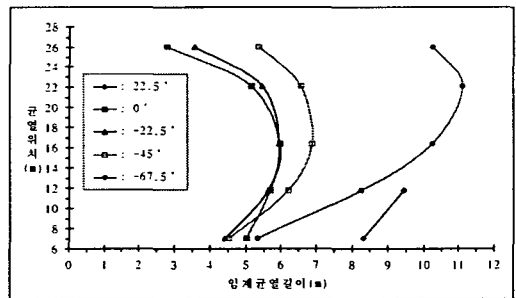
균열이 발생한 것으로 가정된 각각의 균열위치에서 5개의 균열방향에 대하여 임계균열길이가 추정되었다. 계산에서 발파진동의 크기는 댐 주위에 위



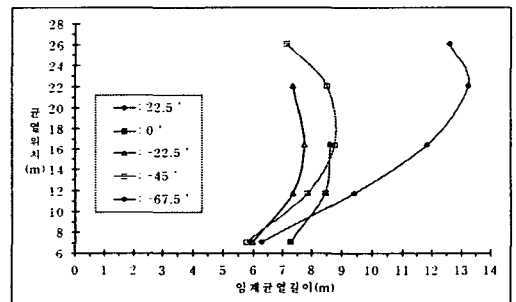
(a) 월류수위 2m



(b) 월류수위 1m



(c) 월류수위 0m



(d) 월류수위 -1m

그림 5 월류수위에 따른 균열 위치 및 방향별 임계균열길이

치한 채석장에서 발파작업을 할 때에 실측된 수평진도 $K_h=0.042g$ 와 연직진도 $K_v=0.023g$ 가 사용되었다.

그림 5에 각각의 월류수위에 대하여 균열 위치 및 방향별로 임계균열길이를 나타내었다. 이 그림은 임계균열길이가 0° 및 -22.5° 방향에서 다른 방향의 균열보다 상대적으로 더 짧고, 또한 댐의 위와 아랫 부분의 값이 중앙부분보다 더 짧음을 보여준다. 여기서 댐의 임계균열길이가 짧다는 것은 상대적으로 더 위험한 상태가 됨을 의미한다.

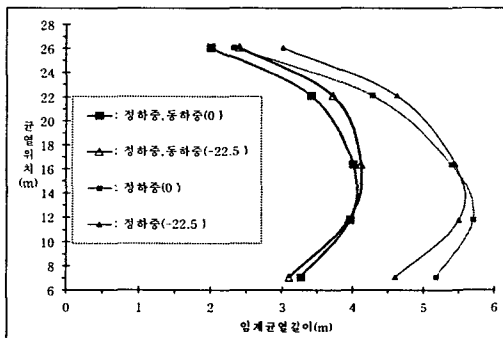
3.2 하중조합의 영향

그림 6은 정하중만 작용하는 경우와 정하중과 동하중이 동시에 작용하는 경우에 0° 및 -22.5° 방향의 균열에서 계산된 임계균열길이를 비교한 결과이다. 정하중만 작용하는 경우보다 정하중과 동하중이

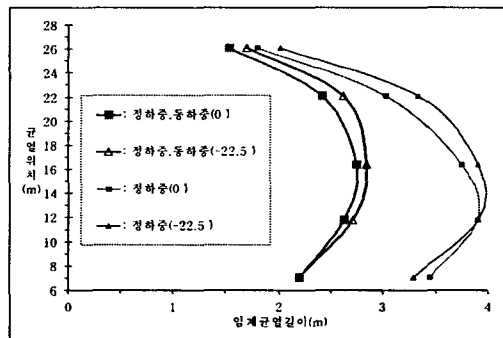
동시에 작용하는 경우에 동하중 영향으로 인하여 임계균열길이가 짧아지는데 특히 댐의 아래 부분에서 더 짧아지는 경향을 보여준다.

3.3 댐 기초지반의 모델링의 영향

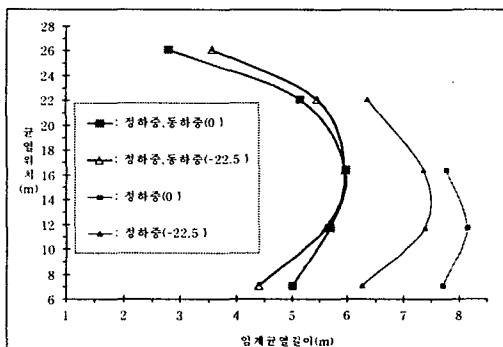
기존의 연구⁵⁾에는 댐의 저면이 고정지점으로 가정되어 댐의 기초지반의 영향이 포함되지 않았으나, 본 연구에서는 기초지반의 영향을 고려해보기 위하여 기초지반도 댐과 함께 모델링되었다. 그림 7은 0° 및 -22.5° 방향의 균열에 대한 계산 결과이다. 그림 7에 의하면 댐의 윗 부분에 위치한 균열들에서는 K_{eff} 값에 큰 차이가 없으나 아랫 부분에 위치한 균열들에서는 댐의 기초지반을 무시한 경우에 임계균열길이가 다소 짧아지는 것을 보여준다. 따라서 댐 거동의 정확한 분석을 위하여는 댐의 기초지반도 모델링에 함께 포함되는 것이 필요함을 알 수 있다.



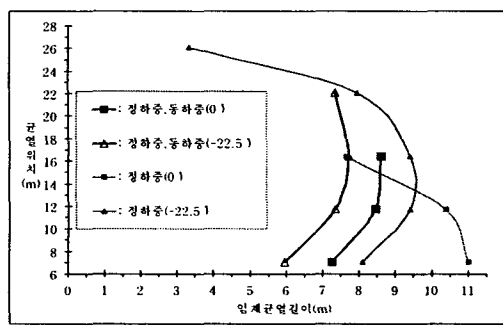
(a) 월류수위 2m



(b) 월류수위 1m

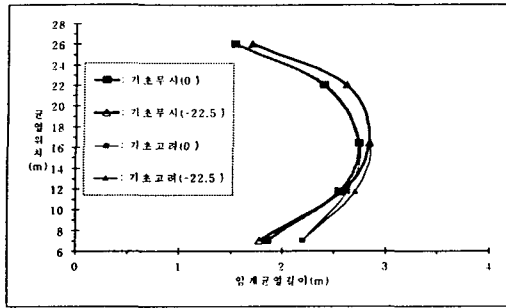


(c) 월류수위 0m

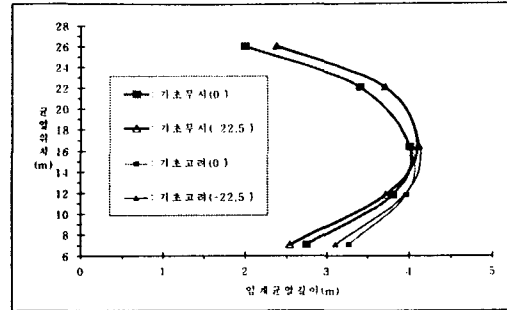


(d) 월류수위 -1m

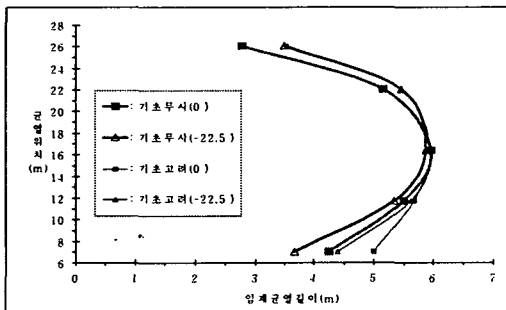
그림 6 하중조합에 따른 임계균열길이



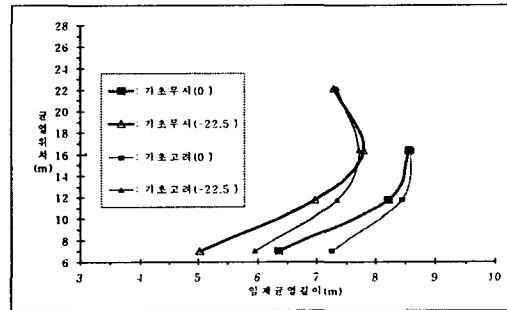
(a) 월류수위 2m



(b) 월류수위 1m



(c) 월류수위 0m



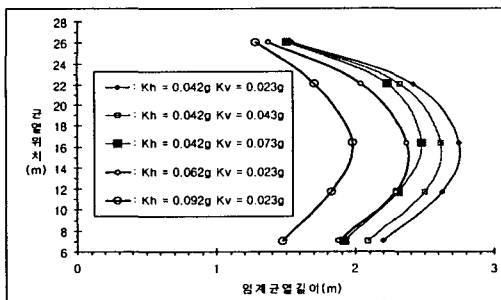
(d) 월류수위 -1m

그림 7 댐 기초지반의 모델링에 따른 임계균열길이

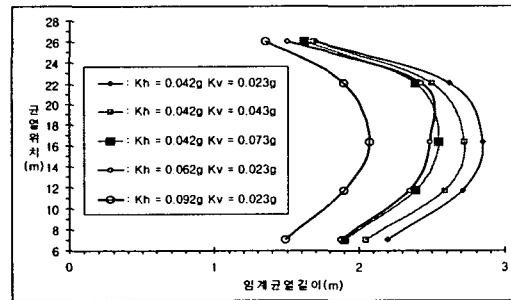
3.4 발파진동의 크기에 따른 임계균열길이

댐에 인접한 건설공사장의 발파로 인하여 댐에 미치는 발파진동은 발파위치와 댐 구조물과의 방향 등에 따라서 수평진도와 연직진도의 값에 차이가 나게 된다. 따라서 이들 영향을 분석하기 위하여 3.1에서 임계균열길이의 계산에 적용된 발파진동 값을 기준

진도로 택하고 발파진동의 크기 변화에 대한 임계균열길이를 계산하여 보았다. 그림 8은 댐의 월류수위가 2m인 조건에서 기준진도(수평진도 $K_h=0.042g$, 연직진도 $K_v=0.023g$)를 사용한 경우에 계산된 임계균열길이, 수평진도 $K_h=0.042g$ 를 유지한 가운데 연직진도를 $K_v=0.043g$ 과 $K_v=0.073g$ 의 두 단계로 변화시킨 경우, 그리고 연직진도 $K_v=0.023g$ 를



(a) 균열방향 0°



(b) 균열방향 -22.5°

그림 8 발파하중의 크기 변화에 따른 임계균열길이

유지한 가운데 수평진도를 $K_h=0.062g$ 와 $K_h=0.092g$ 의 두 단계로 변화시킨 경우에 계산된 임계균열길이를 보여준다. 여기서는 0° 와 -22.5° 방향의 균열에 대한 임계균열길이 만을 나타내었는데, 연직진도보다 수평진도가 증가한 경우에 임계균열길이가 더 짧아졌음을 보여준다.

4. 복합균열선단의 유효응력확대계수

복합균열이 발생했을 때 복합균열 상호간의 작용으로 인한 유효응력확대계수의 변화량이 조사되었으며, 이 때 월류수위는 2m인 경우로 한정하였다. 세 가지 형태의 균열조합에 대하여 단일균열 때의 K_{eff} 와 복합균열 때의 K_{eff} 사이의 변화량이 비교 및 분석되었다.

4.1 복합균열의 조합

4.1.1 수평복합균열

담 상부면의 높이 $H_u=7.05m, 11.75m, 16.39m$ 의 세 곳에서 수평방향 ($\alpha=0^\circ$)으로 균열길이가 각각 $L=2.5m, 3m, 3m$ 인 단일균열들과 담 하부면의 동일높이 $H_d=11.75m$ 에서 수평방향으로 균열길이가 $L=1m, 2m, 3m$ 인 3개의 단일균열을 가정하고 이들을 서로 조합하여 여러 개의 수평복합균열을 형성하였다. 담 상부면에서의 단일균열들의 길이는 균열선단에서의 유효응력확대계수가 $100t/m^{3/2}$ 부근의 값을 갖게 하는 범위에서 정하여졌으며, 담

하부면의 균열은 임의로 그 길이를 정하였다. 이들 조합은 그림 9와 같으며 담 상부면에서의 균열은 위치에 따라 A($H_u=7.05m$), B($H_u=11.75m$), C($H_u=16.39m$)로 표시하였다. 이 그림에서 담의 기초지반 경계는 표현이 생략되어 있으며, 담 하부면의 동일 위치에 있는 균열 D1, D2, D3는 균열 길이가 각각 1m, 2m, 3m이다. 이 그림에서 균열 조합 1은 복합균열의 조합에 사용될 단일균열 A, B, C를 나타낸다.

4.1.2 경사복합균열 I

담 상부면의 위치 $H_u=7.05m, 11.75m, 16.39m$ 에서 균열의 경사방향이 각각 $\alpha=22.5^\circ, 0^\circ, -22.5^\circ$ 이고 균열길이가 $L=3m, 3m, 3m$ 인 단일균열들과 담 하부면의 동일높이 $H_d=11.75m$ 에서 수평방향으로 길이가 $L=1m, 2m, 3m$ 인 3개의 단일균열을 만들고, 이들을 서로 조합하여 여러 개의 경사복합균열을 형성하였다. 담 상부면에서의 단일균열들의 길이는 균열선단에서의 K_{eff} 가 $100t/m^{3/2}$ 부근의 값을 갖게 하는 범위에서 정하여졌으며, 담 하부면에서의 균열길이는 임의로 정하였다. 경사복합균열은 11개의 조합이 고려되었으며 그림 10은 이들 조합을 보여준다. 담 상부면에서의 균열은 위치와 방향에 따라 a($H_u=7.05m, \alpha=22.5^\circ$), b($H_u=11.75m, \alpha=0^\circ$), c($H_u=16.39m, \alpha=-22.5^\circ$)로 나타내었고, 담 하부면의 균열은 수평복합균열에서와 같이 D1, D2, D3로 표시하였다.

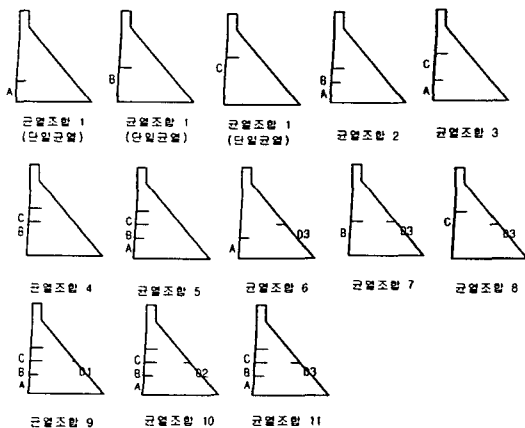


그림 9 수평복합균열의 조합형태

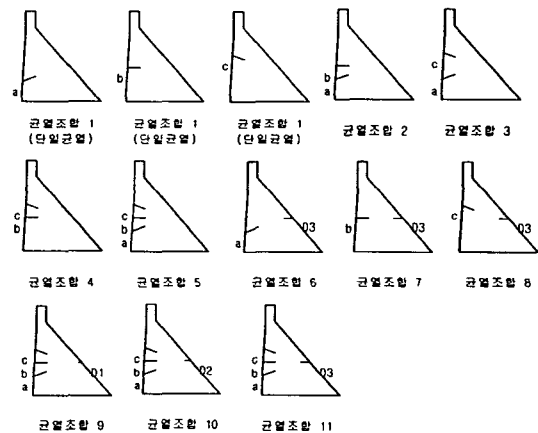


그림 10 경사복합균열 I의 조합형태

4.1.3 경사복합균열 II

댐 상부면의 위치 $H_u=7.05m, 11.75m, 16.39m$ 에서 균열의 경사방향이 각각 $\alpha=-22.5^\circ, 0^\circ, 22.5^\circ$ 이고 균열길이가 $L=2.5m, 3m, 3.5m$ 인 단일균열들과 댐 하부면의 동일높이 $H_d=11.75m$ 에서 수평방향으로 길이가 $L=1m, 2m, 3m$ 인 3개의 단일균열을 만들고 이들을 서로 조합하여 여러개의 경사복합균열을 형성하였다. 댐 상부면에서의 단일균열들의 길이는 균열선단에서의 K_{eff} 가 $100t/m^{3/2}$ 부근의 값을 갖게 하는 범위에서 정하여졌으며, 댐 하부면에서의 균열길이는 임의로 정하였다. 11개의 조합이 고려되었으며 그림 11이 이들을 보여준다. 댐 상부면에서의 균열은 위치와 방향에 따라 a($H_u=7.05m, \alpha=-22.5^\circ$), b($H_u=11.75m, \alpha=0^\circ$), c($H_u=16.39m, \alpha=22.5^\circ$)로 나타내었고 댐 하부면의 균열은 D1, D2, D3로 표시하였다.

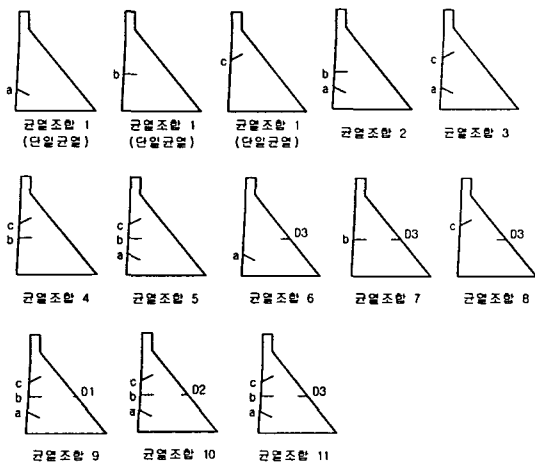


그림 11 경사복합균열 II의 조합형태

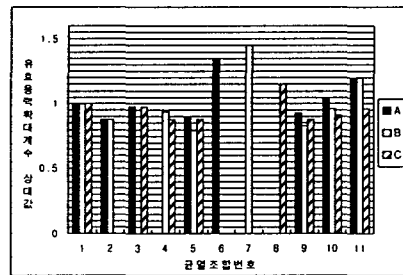
4.2 계산결과와 분석

3가지 형태의 복합균열 조합에 대하여 수치해석으로부터 얻어진 결과는 그림 12에 막대그래프로 표시되었다. 이들 그림에서 균열조합 1의 경우에 얻어진 단일균열의 K_{eff} 값들을 기준값 1로 하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

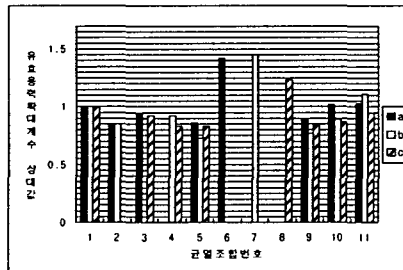
1) 댐 상부면에 복합균열이 발생하여 있는 균열 조합 2, 3, 4, 5의 경우에 각각의 균열에서 얻어진 K_{eff} 값들을 균열조합 1의 경우에 얻어진 값들과 비

교하면 복합균열에서 얻어진 값들이 더 작다. 또한 댐 하부면의 균열 D3를 고려한 균열조합 6, 7, 8과 균열조합 11의 결과를 비교하더라도 복합균열 때의 K_{eff} 값이 작아진다. 이러한 결과들은 단일균열 때에 각각의 균열선단에서 생긴 높은 응력들이 복합균열 때에는 균열 상호간의 응력재분배효과로 인하여 감소된 때문에 생긴 것이라고 판단된다.

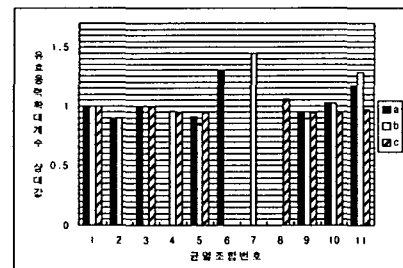
2) 댐 하부면에 균열이 없는 균열조합 5와 댐 하부면에 D1, D2, D3균열을 각각 추가로 갖는 균열 조합 9, 10, 11의 결과를 비교하면 균열길이가 짧은 D1균열(균열길이 1m)은 댐 상부면의 균열에 큰 영향을 주지 않으나, D2와 D3균열(균열길이



(a) 수평복합균열



(b) 경사복합균열 I



(c) 경사복합균열 II

그림 12 복합균열에 대한 유효응력확대계수

2m와 3m)은 K_{eff} 값에 큰 차이를 나타낸다. 따라서 댐 하부면에 발생한 균열의 길이는 댐 상부면 균열의 K_{eff} 값 변화에 중요한 변수가 된다.

3) 수평복합균열 및 경사복합균열 I과 II의 결과들을 함께 비교하면 K_{eff} 값들은 경사복합균열 II, 수평복합균열, 경사복합균열 I의 순서로 크기가 정리되어, 경사복합균열 I의 경우에 균열들이 상대적으로 더 안정된 상태를 보여준다. 이로써 응력재분배의 효과는 균열선단에서의 이격거리에 영향을 받는 것으로 판단된다.

5. 결 론

1) 균열의 위치와 방향에 따른 임계균열길이를 계산하여 분석한 결과, 수평 및 수평에 대해 약간 하향경사방향($0^\circ \sim 22.5^\circ$)인 균열에서 임계균열길이 상대적으로 짧아졌으며, 또한 댐의 위와 아랫 부분에 위치한 균열의 임계균열길이 중앙부분에 위치한 균열보다 더 짧았다.

2) 정하중과 동하중이 동시에 작용하는 경우와 정하중만 작용하는 경우의 임계균열길이를 비교하면, 정하중과 동하중이 동시에 작용하는 경우에 동하중의 영향으로 임계균열길이 짧게 되는데 특히 댐의 아래쪽에서 더욱 짧아졌다.

3) 댐의 기초지반이 모델링에 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 대하여 임계균열길이를 분석한 결과, 댐의 윗 부분에 위치한 균열에서는 차이가 없었으나 아랫 부분에 위치한 균열에 대해서는 댐의 기초지반이 무시된 경우에 더 짧은 임계균열길이 계산되었다. 따라서 댐 거동의 정확한 분석을 위하여는 댐의 기초지반도 모델링에 포함되는 것이 필요함을 알 수 있었다.

4) 임계균열길이에 대하여 수평진도와 연직진도의 영향을 분석한 결과, 연직진도가 증가하는 경우보다 수평진도가 증가하는 경우에 임계균열길이 더 짧아졌다.

5) 복합균열이 발생하면 균열 상호간의 응력재분배효과로 인하여 유효응력확대계수 값의 감소가 생겼으며 이 효과는 균열선단에서의 이격거리에 지배를 받았다.

참 고 문 헌

1. Linsbauer, H.N., "Application of the Methods of Fracture Mechanics for the Analysis of Cracking in Concrete Gravity Dams", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, No.1/2/3, 1990, pp.541~551
2. Irobe, M. and Peng, S.Y., "Finite Element Analysis of Thermal Crack in Gravity Dam caused by Annually Oscillating Environmental Temperature", *Third International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, IA-FraMCoS, 1998. 10, pp.1605~1614
3. Ingraffea, A.R., "Case Studies of Simulation of Fracture in Concrete Dams", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.35, No.1/2/3, 1990, pp.553~564
4. Lin, S.S., "Case Studies of Cracking of Concrete Dams - A Linear Elastic Approach", M.S. Thesis, Cornell University, 1988, p.116
5. 장희석, "균열면에 수압을 받는 중력식 콘크리트 댐의 파괴거동에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집 제9권 제4호, 1996.12, pp.189~198
6. 김종수, 장희석, 손병락, 장태영, "발파진동을 받는 콘크리트 중력댐의 한계균열길이 및 복합균열의 거동에 관한 연구", 1998년도 학술발표회 논문집(I), 대한토목학회, 1998.10, pp.281~284
7. Martha, L.F., Llorca, J., Ingraffea, A.R., and Elices, M., "Numerical Simulation of Crack Initiation and Propagation in an Arch Dam", *Dam Engineering*, Vol. 2, Issue 3, 1991, pp.193~213
8. Feng, L.M., Pekau, O.A., and Zhang, C.H., "Cracking Analysis of Arch Dams by 3D Boundary Element Method", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No.6, 1996, pp.691~699

9. Wawryzynek, P.A. and Ingraffea, A.R., "FRANC2D. A two-dimensional crack propagation simulator. Version 2.7 User's Guide", 1995, p.59
10. 천병식, 오재응, "지반진동 이론과 실제", 건설 연구사, 서울, 1987, p.419
11. Saouma, V.E., Bruhwiler, E., and Boggs, H.L., "A review of fracture mechanics applied to concrete dams", *Dam Engineering*, Vol.1, Issue 1, 1990, pp.41~57
12. Erodogan, F. and Sih, G.C., "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear", *ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol.85, 1963, pp.519~527

(접수일자 : 1999. 3. 2)