

표면적분법을 이용한 양압력이 작용하는 중력식 콘크리트 댐의 균열해석

Crack Analysis of Concrete Gravity Dam subjected to Uplift Pressure using Surface Integral Method

진 치 섭*
Jin Chi-Sub

이 영 호**
Lee Young-Ho

엄 장 섭***
Eom Jang-Sub

김 태 완****
Kim Tae-Wan

ABSTRACT

The modeling on uplift pressure on the foundation of a dam on which it was constructed, and on the interface between the dam and foundation is a critical aspect in the analysis of concrete gravity dams. The evaluation of stress intensity factor at the crack tip of concrete gravity dam due to uplift pressure effect by surface integral method is performed in this study. The effects of body force, overtopping pressure and water pressure on the crack-face are also considered in this study.

1. 서 론

콘크리트 중력댐의 설계시 고려되는 양압력(uplift pressure)은 댐의 안정을 감소시키는 외력으로 작용한다. 또한 댐에 발생한 균열도 댐의 안정을 감소시키는 요인으로 작용하는 데, 양압력이 작용하는 댐의 파괴역학적인 거동을 연구하는 것은 댐 제체의 안정성 평가 및 댐의 유지관리에 유용한 자료로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 중력식 콘크리트 댐에서 댐 제체와 지반의 접촉 경계면에 발생한 균열에 대하여 정수압, 월류수압, 균열면에 작용하는 수압 및 양압력의 영향에 따른 댐의 파괴거동을 표면적분법(surface integral method)¹⁾을 이용한 선형탄성 파괴역학²⁾을 적용하여 해석하였다.

2. 표면적분법

응력확대계수를 구하기 위한 방법 중 본 연구에서 사용한 표면적분법은 균열면에 작용하는 수압을 간단히 고려할 수 있고, 또한 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 를 분리하여 계산할 수 있는 수치해법이다.

그림 1은 영역 Ω_1 와 영역 Ω_2 로 둘러싸인 균열선단을 나타낸다.

* 정회원, 부산대학교 토목공학과, 교수

** 정회원, 세일기술(주) 대리

*** 정회원, 창신대학 토목과, 부교수

**** 정회원, 부산대학교 토목공학과, 석사과정

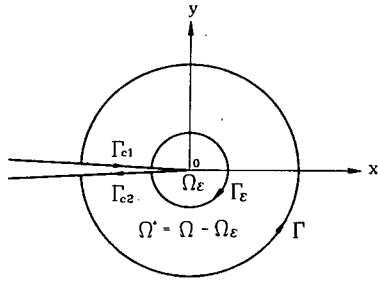


그림 1. 표면적분법의 경계 및 영역

여기서 폐경로 Γ^* 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Gamma^* = \Gamma + \Gamma_{C1} + \Gamma_e + \Gamma_{C2} \quad (1)$$

그림 1에 나타난 경로 Γ_e 에 대한 J 적분식은 식 (2)와 같다.

$$J = - \int_{\Gamma_e} (w dy - t_i u_{i,1} ds) \quad (2)$$

식 (2)에서 식 (1)로 주어진 경로에 대해 평활함수 ϕ 를 곱하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = - \int_{\Gamma^*} (w n_1 - t_i u_{i,1}) \phi ds \quad (3)$$

여기서 사용한 평활함수 ϕ 는 경로 Γ 와 영역 Ω 의측에서 0이고, 경로 Γ_e 와 영역 Ω_e 내에서 1의 값을 가지며, 경로 Γ 와 Γ_e 사이에는 ϕ 가 평활하다. 이를 종합하면 다음과 같은 평활함수 ϕ 를 정의할 수 있다.

$$\phi(r) = \begin{cases} 1 & ; \quad (r \leq R_i \text{ 일 때}) \\ -\frac{1}{(R_e - R_i)^2} r^2 + \frac{2R_i}{(R_e - R_i)^2} r + \frac{R_e(R_e - 2R_i)}{(R_e - R_i)^2} & ; \quad (R_i < r \leq R_e \text{ 일 때}) \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)에 Green 정리를 적용하여 J 적분식을 Ω^* 영역에 대한 면적 적분으로 표현하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = -\frac{1}{2} K_\alpha \phi(\underline{y}, \underline{u}^\alpha, \phi), \quad \alpha = I, II \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi(\underline{y}, \underline{u}^\alpha, \phi) = \int_{\Omega^*} [\{ \sigma_{22}(\underline{u}^\alpha) v_{i,2} - \sigma_{11}(\underline{y}) u_{i,1} \} \phi_{,1} - \{ \sigma_{21}(\underline{u}^\alpha) v_{i,1} + \sigma_{12}(\underline{y}) u_{i,1} \} \phi_{,2}] d\Omega \quad (6)$$

식 (5)로부터 각 모드에 대한 함수 ϕ 를 고려하면 식 (7)과 같은 응력확대계수를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$K_\alpha = -\frac{E^*}{2} \phi^\alpha = -\frac{E^*}{2} \phi(\underline{y}, \underline{u}^\alpha, \phi), \quad \alpha = I, II \quad (7)$$

윗 식에서 E^* 값은 다음과 같다.

$$E^* = \begin{cases} E & : \text{평면응력상태} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & : \text{평면변형율상태} \end{cases}$$

균열면의 수압과 물체력을 고려하는 경우, 식 (7)을 다음 식과 같이 새로운 항을 추가시켜 나

타낼 수 있다.

$$K_I = -\frac{1}{2}E^*\phi(y, u^I, \phi) - \frac{1}{2}E^*\psi(f, u^I, \phi) - \frac{1}{2}E^*\int_{\Gamma} p u_{z,1}^I \phi dx \quad (8)$$

$$K_{II} = -\frac{1}{2}E^*\phi(y, u^{II}, \phi) - \frac{1}{2}E^*\psi(f, u^{II}, \phi) \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)의 두 번째 항은 물체력(자중)을 고려한 항이며, 식 (8)의 세 번째 항은 균열면에 작용하는 수압을 고려하는데 따른 항을 나타낸다.

3. 구조물 적용 및 해석

3.1 해석 예

본 연구에서는 정수압, 월류수압, 균열면에 작용하는 수압 및 양압력의 작용에 따른 콘크리트 중력댐의 파괴거동을 파악하기 위해, 그림 2와 같이 높이(H)가 31.6m, 기초의 폭(B)이 24.4m이고 댐의 저면과 지반 경계면에 일정 길이(a)의 균열을 갖는 중력식 콘크리트 댐을 모델링하였다. 모델링은 8절점 등매개변수요소(isoparametric element)를 사용하였으며 전체 유한요소 모델은 1,315개의 절점과 398개의 요소로 구성하였고 재료 물성치는 표 1과 같이 적용하였다. 본 댐의 파괴인성치 K_{Ic} 는 Ingraffea³⁾가 제안한 $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} (= 109 \text{ tonf/m}^{3/2})$ 를 사용하였다.

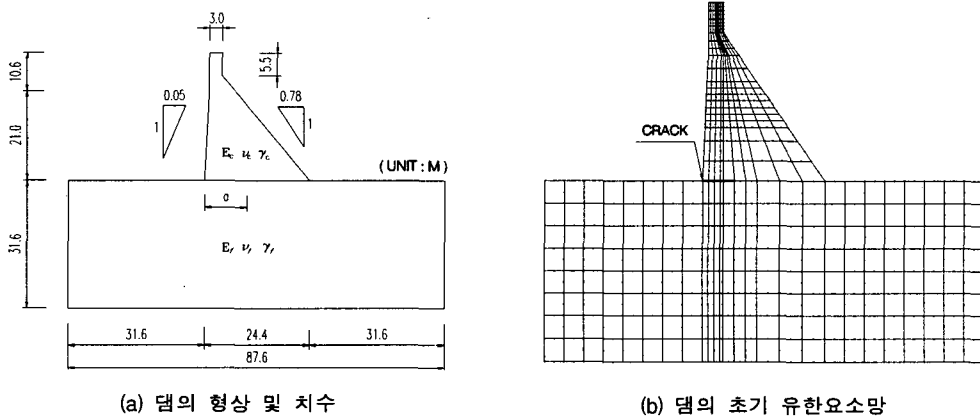


그림 2. 댐의 기하학적 형상

표 1. 재료 물성치

구 분	$E_c(\text{tonf/m}^2)$	$E_f(\text{tonf/m}^2)$	ν_c	ν_f	$\gamma_c(\text{tonf/m}^3)$	$\gamma_f(\text{tonf/m}^3)$
$E_c/E_f = 0.75$	2,000,000	2,670,000	0.2	0.2	2.35	1.92
$E_c/E_f = 1.00$	2,000,000	2,000,000	0.2	0.2	2.35	1.92
$E_c/E_f = 1.25$	2,000,000	1,600,000	0.2	0.2	2.35	1.92

본 연구의 해석에 사용된 양압력 분포 형상에 따른 모델링 종류 및 양압력 하중형태를 표 2와 그림 4에 각각 나타내었다.

표 2. 양압력 분포 형상 구분

구분	설명
Model N	양압력이 작용하지 않는 경우
Model A	균열면을 포함한 댐 저면 전체에 작용하는 삼각형 분포하중
Model B	균열면에만 작용하는 삼각형 분포하중
Model C	균열면을 포함한 댐 저면 전체에 작용하는 사다리형 분포하중
Model D	균열면에만 작용하는 사다리형 분포하중

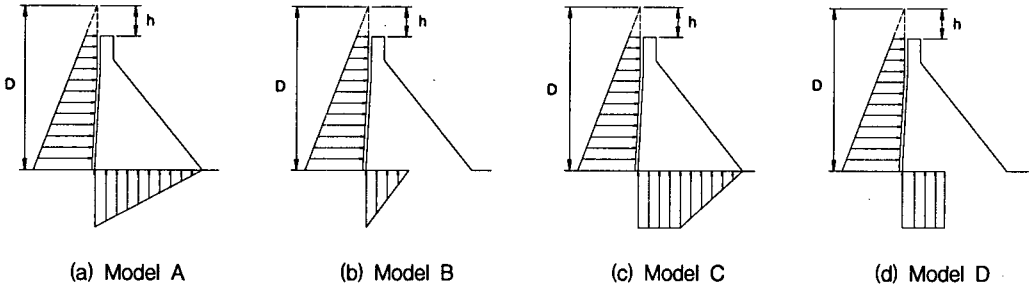


그림 3. 양압력 분포 형상(h는 월류수심)

3.2 해석 결과 및 고찰

양압력의 작용에 따른 응력확대계수 K_I 와 균열진전각 θ 를 댐 저면(B)에 대한 균열길이(a)의 균열비($\alpha = a/B$)에 대하여 살펴보면, 두 값은 양압력이 작용하지 않았을 때(Model N)보다 작게 나타났다.

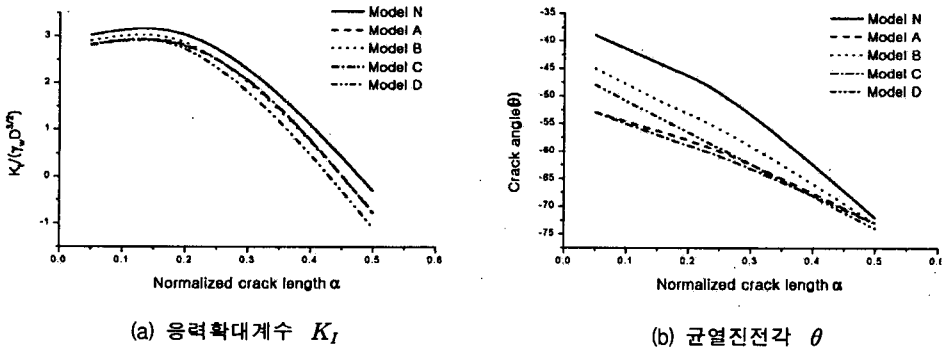
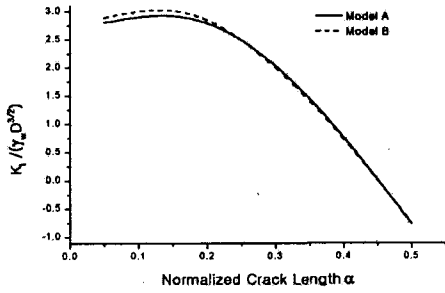


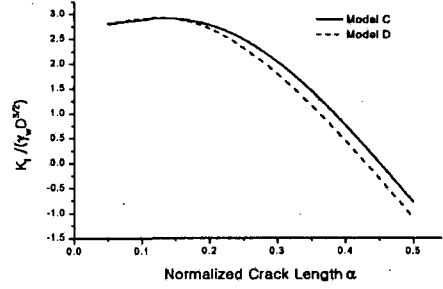
그림 4. 균열길이 비(α)의 변화에 따른 응력확대계수 K_I 와 균열진전각(θ)

균열면을 포함한 댐 저면 전체에 양압력이 작용하는 경우(Model A와 Model C)에서 양압력의 분포형상은 K_I 의 변화에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타난 반면, 균열면에만 양압력이 작용하는 경우(Model B와 Model D)는 양압력의 분포 형상에 따라 K_I 가 변화하였다. 균열면을 포함한 댐 저면 전체에 양압력이 작용하는 경우(Model A와 Model C)는 균열면에만 양압력이 작용하는 경우(Model B와 Model D)에 비해 K_I 의 차이가 미소하게 나타났다(그림 5). 또한 E_c/E_f 비의 변화에 따른 K_I 은 균열비(α)에 대해 E_c/E_f 비가 커짐에 따라 감소하다가 균열비(α)가 점차 증가함에 따라 K_I 도 증가하

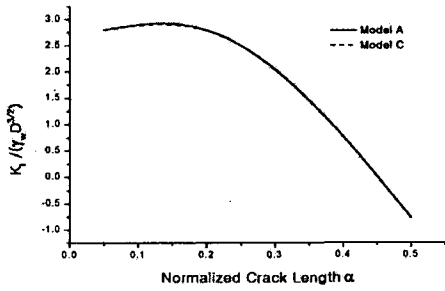
는 것으로 나타났다(그림 6).



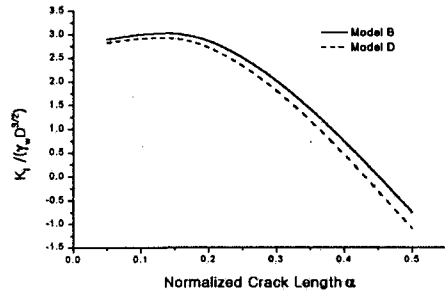
(a) Model A & Model B



(b) Model C & Model D

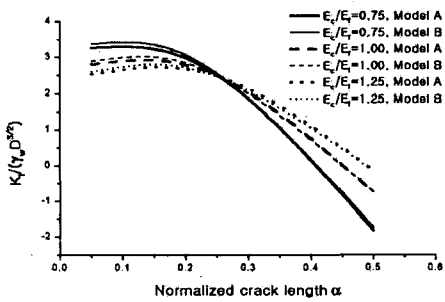


(c) Model A & Model C

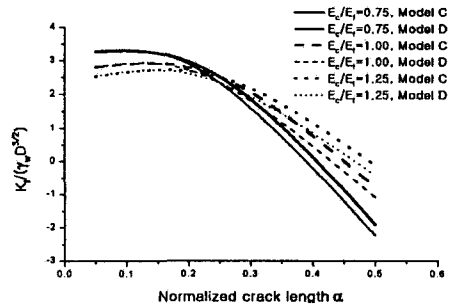


(d) Model B & Model D

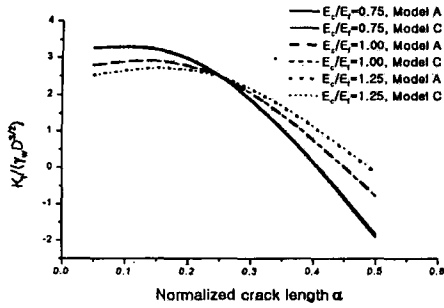
그림 5. 균열길이 비(α)에 따른 응력확대계수 K_I 값의 비교($E_c/E_f = 1.00$)



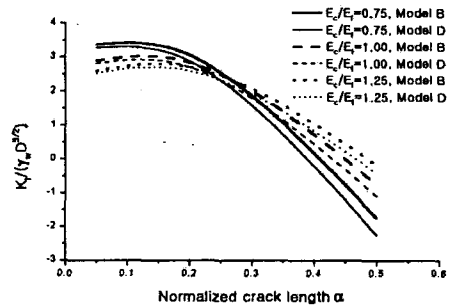
(a) Model A & Model B



(b) Model C & Model D



(c) Model A & Model C



(d) Model B & Model D

그림 6. 각 Model의 균열길이 비(α)에 따른 응력확대계수 K_I 값의 비교

4. 결 론

정수압, 월류수압, 균열면에 작용하는 수압 및 양압력의 작용에 따른 콘크리트 중력댐의 균열해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 콘크리트 중력댐에 작용하는 양압력의 영향을 고려할 경우, 균열비(α)의 증가에 따른 응력확대계수 K_I 은 양압력이 작용하지 않을 때 보다 감소하는 것으로 나타났다.
2. 비균열면에 작용하는 양압력에 의한 응력확대계수의 변화는 균열면에만 양압력이 작용하는 경우에 비해 미소하므로 균열면에만 양압력이 작용하는 것으로 계산하여도 유효한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
3. 양압력의 작용에 따른 K_I 의 변화는 균열비(α)가 증가함에 따라 E_c/E_f 비에 대하여 민감한 변화를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 진치섭, 최현태, 이홍주, "균열면의 압력을 고려한 응력확대계수 결정에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집 제 7 권 제 3 호, pp. 175-186, 1995
2. Plizzari G. A. "LEFM Application to Concrete Gravity Dams", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 8, pp. 808-815, 1997
3. Ingraffea A. R. "Case Studies of Simulation of Fracture in Concrete Dams", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35 No. 1/2/3, pp. 553-564, 1990
4. Plizzari. G. A. "On The Influence of Uplift Pressure in Concrete Gravity Dams", Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol. 59, No. 3, pp. 253-267, 1988
5. Raymond R. Dewey, Ronald W. Reich, and Victor E. Saouma, "Uplift Modeling for Fracture Mechanics Analysis of Concrete Dams", Journal of Structural Division, Vol. 120, No. 10, pp. 3025-3044, 1994