

홍수시 월류를 고려한 콘크리트 가물막이댐의 파괴확률 산정

홍원표* · 송창근**†

Failure Probability Analysis of Concrete Cofferddam Considering the Overflow in Flood Season

Won Pyo Hong* · Chang Geun Song**†

†Corresponding Author

Chang Geun Song

Tel : +82-32-835-8291

E-mail : baybreeze119@inu.ac.kr

Received : July 27, 2020

Revised : September 21, 2020

Accepted : October 13, 2020

Abstract : In order to construct a dam, the diversion facility such as cofferdam and a diversion tunnel should be installed in advance. And size of a cofferdam depends on type of a main dam. According to the Korea Dam Design Standard, if the main dam is a concrete dam, design flood of the cofferdam is 1~2 years flood frequency. This means that overflow of the cofferdam occurs one time for 1 or 2 years, therefore, stability of the cofferdam should be secured against any overflow problem. In this study, failure probability analysis for the concrete cofferdam is performed considering the overflow. First of all, limit state function of the concrete cofferdam is defined for overturning, sliding and base pressure, and upstream water levels are set as El. 501 m, El. 503 m, El. 505 m, El. 507 m. Also, after literature investigation research, probabilistic characteristics of various random variables are determined, the failure probability of the concrete cofferdam is calculated using the Monte Carlo Simulation. As a result of the analysis, when the upstream water level rises, it means overflow, the failure probability increases rapidly. In particular, the failure probability is largest in case of flood loading condition. It is considered that the high upstream water level causes increase of the upstream water pressure and the uplift pressure on the foundation. In addition, among the overturning, the sliding and the base pressure, the overturning is the major cause for the cofferdam failure considering the overflow.

Key Words : cofferdam, limit state function, failure probability, Monte Carlo simulation, overflow

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

국내 건설업의 경우 2000년대 중반 이후 해외 건설시장에 활발하게 진출하고 있으며, 해외 댐 건설 또한 지속적으로 이루어지고 있다. 댐은 하천을 가로막는 구조물이기 때문에 시공과정에서 가물막이댐(cofferdam)이나 가배수터널(diversion tunnel)과 같은 임시 유수전환시설(diversion facility)이 먼저 설치되어야 한다. 가배수터널과 상류 및 하류 가물막이댐을 시공하여, 하천수를 가배수터널로 흘려보냄으로써, 상하류 가물막이댐 사이의 하천 공간에서 공사를 진행할 수 있는 환경이 만들어

진다. 유수전환시설은 임시구조물이지만 총공사비에서 차지하는 비중이 적지 않기 때문에 프로젝트의 경제성을 높이기 위하여 유수전환시설의 적절한 설계홍수량 결정 및 최적 설계는 중요하게 다루어져야 한다.

유수전환시설의 설계홍수량은 댐 지점에서 예상되는 홍수의 특성, 공사기간, 댐의 형식, 공사 중에 홍수로 인한 예상 피해액의 규모 등을 고려하여 결정된다. 한국 댐설계기준에서는 가물막이댐의 설계홍수량을 본댐의 형식에 따라 제시하고 있는데, 본댐이 흙댐(earthfill dam)인 경우 20~25년 빈도, 콘크리트 표면차수벽형 사력댐(Concrete Faced Rock Filldam; CFRD)의 경우 2~5년 빈

*인천대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Incheon National University)

**인천대학교 안전공학과 부교수 (Department of Safety Engineering, Incheon National University)

도, 콘크리트댐(Concrete gravity dam)의 경우 1~2년 빈도의 홍수량을 유수전환시설의 설계홍수량으로 제시하고 있다¹⁾. 또한, 가물막이댐 형식은 설계홍수량, 지형, 하천 경사, 하상퇴적물의 깊이와 종류, 시공기간 및 가물막이 재료 등을 고려하여 결정하는데, 특히 본댐 공사기간 동안 홍수 월류 빈도 및 안정성 확보 방안 등을 적극적으로 고려하여야 한다.

본댐이 콘크리트댐인 경우, 국내 댐설계기준에서는 가물막이댐의 설계홍수량을 1~2년 빈도로 설정한다. 따라서 가물막이댐의 홍수 월류빈도는 1~2년에 1번으로 예상되며, 풍수년에는 월류 횟수가 더 많아질 가능성도 있다. 따라서 본댐 형식이 콘크리트댐인 경우에는 가물막이댐의 설계에 있어 월류에 대한 안정성이 우선적으로 검토되어야 한다. 또한, 본댐 형식 결정 과정과 가물막이댐 형식 결정 과정이 유사하다는 것을 생각해볼 때, 본댐 형식과 가물막이댐 형식이 같을 가능성은 매우 높다고 할 수 있다.

본댐 공사기간 동안 가물막이댐의 월류를 허용하는 설계법을 적용했다는 것은, 공사 기간 동안의 본댐 상류에 수위 측정시설을 설치·운영하고, 경계수위·위험수위 설정과 홍수대피계획(emergency action plan)을 마련하여 공사 인력 및 장비의 안전을 확보할 수 있어야 한다. 또한, 홍수로 인한 월류 시에도 가물막이댐의 안정성이 확보되어야 하며, 월류 후에도 가물막이댐의 보수작업과 주변 정리작업이 용이하여 본댐 공사를 큰 지체 없이 재개할 수 있어야 한다. 가물막이댐이 심하게 파손되거나 붕괴되는 경우, 재건 기간이 추가로 소요되어 지체보상금(liquidated damage)이 발생할 가능성이 있기 때문이다.

2000년대 이후부터, 국제대댐회(ICOLD), 호주대댐회(ANCOLD), 미개척국(USBR), 미육군공병단(USACE), 영국, 대만 등에서 위험도 해석에 근거한 댐의 안정성 평가를 적극 권장하고 있다. 위험도에 기반한 댐 안정성 평가의 특징은 확률·통계학적 접근을 통하여 댐 붕괴 위험도를 평가함으로써 불확실한 미래의 상황에 대해 선제적 대응이 가능하다는 점이다.

위험도에 기반한 댐의 안정성 평가시, 위험도(risk)는 ‘파괴(failure)의 발생확률’과 ‘파괴로 인한 결과’의 곱으로 나타낸다²⁾. 즉, 댐의 위험도를 산정하기 위해서는 댐 파괴의 발생확률 산정이 필요하며, 이때, 미래의 불확실성은 파괴확률 산정 과정에서 확률적 변량으로 고려된다.

콘크리트 가물막이댐의 파괴확률을 산정하기 위하여 먼저, 파괴모드를 정의하고 이의 평가를 위한 파괴 기준을 마련하여야 한다.

Cho 등³⁾은 홍수시 콘크리트 중력식댐의 위험도 분석을 위하여 파괴모드 및 한계상태방정식을 설정하고, FORM(First Order Reliability Method)와 MCS(Monte Carlo Simulation)를 이용하여 파괴확률을 산정하였다. Kim 등⁴⁾은 수리·수문학적 변량간의 관계를 효과적으로 평가하고자 Bayesian network 기반의 댐 위험도 해석 기법을 개발하였다. Ha 등⁵⁾은 지반공학적 물성정보가 거의 없는 국내 중소규모 댐의 지진시 파괴확률을 산정하기 위하여, 댐높이-여유고울 평면에서 일정한 간격의 다수의 쌍곡선들로 표시되는 등지진파괴확률도(seismic failure probability contour)를 작성하였다. Lee 등⁶⁾은 댐의 붕괴를 가져올 수 있는 각 상황별 댐의 위험성을 결정하였으며, 위험성 저감 방안을 경제적 측면에서 비교·평가하였다.

Alla⁷⁾는 극한 상태에서 댐 안전도, 안정성, 조작신뢰성, 기능성의 유지에 있어 전도게이트(fusegate)의 역할을 분석하였으며, Merkel 등⁸⁾은 수리 매개변수의 불확실성을 고려하여 MCS 방법으로 제방의 위험도 산정에 대해 연구하였다. Mazzoleni 등⁹⁾은 제방의 안정성에 영향을 미치는 여러 불확실성 인자들을 MCS와 FORM을 통해 계산하여 위험확률을 추정하였다. Ranzi 등¹⁰⁾은 홍수 위험지수 산정을 위해선 불확실성의 원인을 고려한 확률론적 접근이 필요하다고 분석하였고, Hue 등¹¹⁾은 바람과 홍수의 불확실성을 고려한 댐 위험도 분석을 실시하고 다양한 확률분포를 활용한 홍수빈도해석과 풍속빈도 해석을 통해 댐의 월류 확률을 평가하였다. Kim 등¹²⁾은 구조물의 내진성능을 정량화하기 위하여 FORM 및 MCS를 적용하여 신뢰성해석을 수행하여, 지진 지속시간동안 파괴확률을 산정하였다.

가물막이댐은 본댐 공사를 위한 필수 구조물이며 월류를 허용하는 설계법을 적용한다. 그러나 본댐 공사가 끝나면 철거하는 임시구조물이기 때문에 이에 대한 위험도 평가 및 파괴확률에 대한 연구가 거의 수행되지 않았다. 또한, 월류를 허용하는 설계를 적용하기 때문에, 본댐의 안정성 검토 방법과는 다르게, 월류 수위에 따라 댐 기초에 발생하는 양압력의 크기와 분포를 고려하여 댐의 안정성 검토가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 가물막이댐 월류 시의 상류 수위 증가에 따른 상류 수압 증가, 양압력 분포 변화 등을 고려하여 콘크리트 가물막이댐의 파괴확률 분석을 수행하였다. 즉, 콘크리트 가물막이댐의 한계상태방정식을 정의하고, 안정성 검토를 위한 하중 조건을 결정하여, 월류 수위에 따른 가물막이댐 파괴확률을 MCS(Monte Carlo Simulation)를 이용하여 산정하였다. 또한 국내외 콘크리트 중력댐 관련 문헌조사를 통하여 다양한 변수들

(random variables)의 확률적 특성을 정의한 뒤, 이를 파괴확률 산정시 고려하였다.

2. 위험도 분석 이론과 한계상태방정식

2.1 댐 위험도 분석 기법

댐 위험도 분석은 위험요소구명(risk identification), 위험도 추정(risk estimation), 위험도 평가(risk assessment), 위험도 관리(risk management)의 과정을 통해 시스템 전반의 파괴확률과 파괴로 인한 인명 및 재산상의 손실을 추정하는 방법이다. 이 중 위험도 평가는 위험도 분석(risk analysis) 결과를 이용하여 위험도 사정(risk evaluation)을 수행하는 과정이며, 이의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 위험도 분석 기법에는 표준적 접근법(standard-based approach), 정성적 접근법(qualitative approach)과 정량적 접근법(quantitative approach)이 있다. 표준적 접근법은 댐 파괴 결과의 상대적 심각성, 예외적인 설계 하중을 고려하여 안전율 등을 이용하여 리스크에 대한 평가 결과를 나타내는 방법이다. 정성적 접근법은 표준적 접근법 보다는 명확한 분석이 가능하여, 댐 안전과 이의 파괴 결과를 고려하기 위하여 지수법(indexing) 및 순위 (ranking) 등을 이용하는 방법으로, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)가 대표적인 방법이다. 정량적 접근법은 신뢰성 해석기법(reliability analysis) 및 확률론적 방법(probabilistic analysis)에 의해 수행되며, 대표적으로 사건수 분석(Event Tree Analysis; ETA), 결함수 분석(Fault Tree Analysis; FTA), Monte Carlo Simulation(MCS), Bayesian Network 등이 있다¹³⁾.

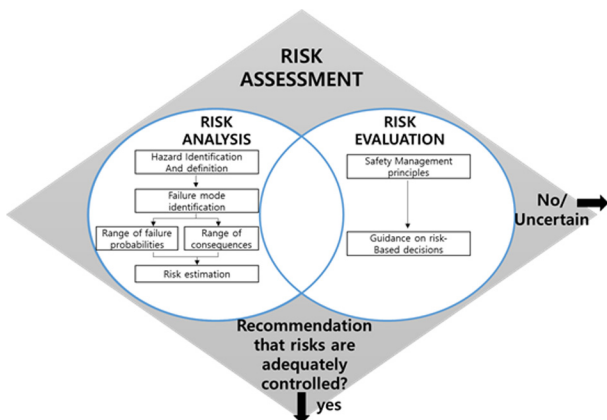


Fig. 1. Diagram of risk assessment process¹³⁾.

2.2 가물막이댐의 한계상태방정식

콘크리트 가물막이댐의 경우, 일반적인 콘크리트 중력식댐과 비슷한 방법으로 안정성 검토를 수행하기 때

문에, 이를 준용하여 한계상태방정식을 도출하였다. 국제대담회에서는 댐 파괴를 “댐의 일부 및 댐 기초가 붕괴 또는 이동되어 댐이 저수된 물을 계속 보유하지 못하고, 유출된 물이 하류의 인명과 재산에 위험을 가중시키는 것”이라 정의하고 있다. 콘크리트댐에서는 기초 지반의 전단파괴, 파이핑, 내부 침식 등의 기초 지반 문제가 댐 파괴원인의 50% 이상을 차지하였으며, 홍수로 인한 월류, 양압력 등이 그 뒤를 이었다¹⁴⁾. 국내외 댐설계 기준에서는 댐 안정성과 관련하여 전도(overtuming), 활동(sliding), 기초지지력(base pressure)을 검토하도록 규정하고 있으며¹⁵⁾, 이는 국제대담회에서 분석한 댐 파괴 모드와 동일하다고 볼 수 있다. 한계상태방정식은 단위 길이 당 댐에 작용하는 하중으로 인한 외력과 이에 저항하는 힘과의 관계로 표현된다.

전도에 대한 안정성 평가는 댐에 작용하는 모든 하중에 의한 합력의 편심거리를 이용한다. 정상 조건(usual condition)에서는 편심거리가 기초 너비의 중심의 기준 1/3안에, 이상 조건(unusual condition)에서는 1/2안에, 극한 조건(extreme condition)에서는 기초 너비 안에 위치하면 안정성이 확보된 것으로 간주한다. 본 연구에서는 전도에 대한 파괴 상태를 고려하기 때문에, 댐과 기초지반의 접점 중 하류 지점(toe)을 기준으로 댐의 전도 여부를 검토하여야 한다. 따라서 전도에 대한 한계상태방정식(f_o)은 외력으로 인한 전도모멘트(M_o)와 댐 자중 등에 의한 저항모멘트(M_r)를 이용하여 다음과 같이 정의하였고, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

$$f_o = \sum M_r - \sum M_o$$

- $f_o \geq 0$: 안정
- $f_o < 0$: 불안정(파괴)

활동에 대한 안정성 평가는 댐에 작용하는 하중으로 인하여 기초 지반에 발생하는 전단마찰력의 안전율을

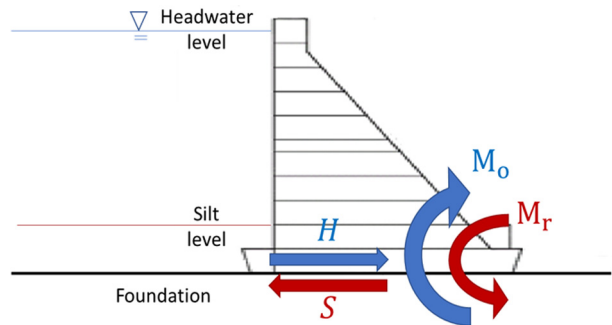


Fig. 2. Failures mode of overturning and sliding.

이용한다. 본 연구에서는 활동으로 인한 댐의 파괴(이동)를 고려하므로, 활동에 대한 한계상태방정식(f_s)을 다음과 같이 정의하였고, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

$$f_s = \sum H - S = \sum H - (N \tan \phi + cL)$$

- $f_s \geq 0$: 안정
- $f_s < 0$: 불안정(파괴)

여기서, H 는 수평력(kN), S 는 저항력의 합(kN), N 는 수직력(kN), ϕ 는 내부마찰각(°), c 는 점착력(kN/m²), L 은 댐과 기초지반의 접촉 길이(m)를 나타낸다.

기초지지력의 안정성 평가는 하중으로 인하여 발생하는 기초의 작용력과 기초의 허용지지력과의 안전율을 이용한다. 기초 지반의 파괴를 고려해야 하므로, 기초지지력에 대한 한계상태방정식(f_b)은 모든 수평력 및 수직력(양압력 포함)의 합력으로 부터 산정된 최대 기초 작용력(σ_{max})을 기초의 허용지지력(σ_a)과 비교하는 것으로 정의하였다.

$$f_b = \sigma_a - \sigma_{max}$$

- $f_b \geq 0$: 안정
- $f_b < 0$: 불안정(파괴)

3. 콘크리트 가물막이댐의 안정성 검토를 위한 하중조건

한계상태방정식을 이용한 가물막이댐의 안정성 검토를 수행하기 위해서는 댐의 자중, 상하류의 작용 수압 등 댐에 작용되는 하중을 산정하여야 한다.

댐의 안정과 응력 검토에 영향을 미치는 중요한 하중으로는 사하중(dead load), 상류 수압(headwater pressure) 및 하류 수압(tailwater pressure), 양압력(uplift), 온도변화(temperature change), 상류 토사압력(silt pressure), 빙압(ice pressure), 풍압(wind pressure), 지진력(seismic force) 등이 있다¹⁵⁾.

가물막이댐의 특성상 댐 높이가 낮고 상류 저수량이 작기 때문에 풍압은 일반적으로 고려하지 않으며, 시공시에 온도변화에 따른 응력 발생을 방지하기 위하여 콘크리트 블록타설(15~20 m) 방법을 준용하므로, 온도변화에 대해서도 일반적으로 고려하지 않는다. 또한, 가물막이의 하류는 작업공간이기 때문에, 하류 수압도 고려하지 않기로 한다. 마지막으로, 빙압은 높은 고산지나 극한지처럼 특수한 환경에서 고려하므로, 금회 검토에

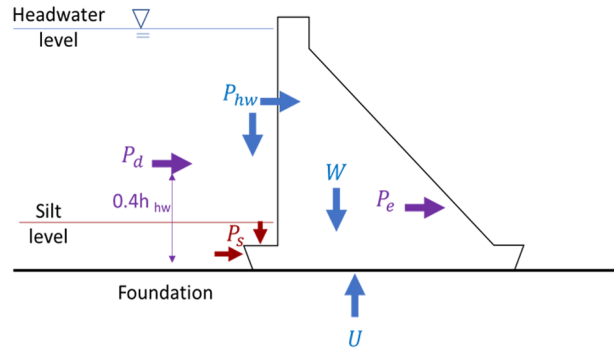


Fig. 3. Loadings for weir stability analysis.

서는 제외하기로 한다.

사하중(W), 상류수압(P_{hw}), 양압력(U), 상류 토사압력(P_s), 지진력(P_e, P_d)을 Fig. 3에 나타내었으며, 이의 상세 계산식은 아래와 같다.

1) 사하중(W , kN/m)

$$W = \gamma_c h_c l_c$$

여기서, γ_c 는 콘크리트의 단위중량(kN/m³)이며, h_c 는 콘크리트의 높이(m), l_c 는 콘크리트의 길이(m)이다.

2) 상류수압(P_{hw} , kN/m)

상류수압은 댐체 전면부에 작용되는 수평력(P_{hw_h})과 댐체 상류 하단 돌출부에 작용하는 수직력(P_{hw_v})으로 구분된다.

$$P_{hw_h} = \frac{1}{2} \gamma_w h_{hw_1}^2$$

$$P_{hw_v} = \gamma_w h_{hw_2} l_{hw_2}$$

여기서, γ_w 는 물의 단위중량(kN/m³), h_{hw_1} 는 상류 수심(m), h_{hw_2}, l_{hw_2} 은 댐체 하단 돌출부까지의 수심(m)과 그 길이(m)이다.

3) 상류 퇴적 토사압력(P_s , kN/m)

상류 퇴적 토사압력은 공사기간 동안 상류에 퇴적되는 토사로 인한 압력을 고려하는 것으로, 댐체 전면부에 작용되는 수평력(P_{s_h})과 댐체 상류 하단 돌출부에 작용하는 수직력(P_{s_v})으로 구분된다.

$$P_{s_h} = C_s \frac{1}{2} \gamma_s h_{s_1}^2, \quad C_s = 1 - \sin \phi_s$$

$$P_{s_v} = \gamma_s h_{s_2} l_{s_2}$$

여기서, C_s 는 토압계수, ϕ_s 는 토사의 내부마찰각(°),

γ_s 는 토사의 단위중량(kN/m^3)이며, h_{s_1} 은 토사의 퇴적 높이(m), h_{s_2} , l_{s_2} 은 댐체 하단 돌출부까지의 퇴적 높이(m)와 그 길이(m)이다.

4) 지진력 ($P_e, P_d, \text{kN/m}$)

지진력은 댐 자체의 지진력으로 인한 하중과 상부 저류된 하천수로 인한 하중으로 구분된다¹⁵⁾.

$$P_e = M \times a_x = \frac{W}{g} \times \alpha \times g = W \times \alpha$$

여기서, M 은 댐의 질량(kg/m), a_x 은 수평지진가속도(horizontal earthquake acceleration), α 는 지진계수(seismic coefficient)이다.

$$P_d = \frac{7}{12} \gamma_w K_h h_{hw_1}^2, \quad y = 0.4 h_{hw_1}$$

여기서, K_h 는 수평지진계수(horizontal seismic coefficient)이며, y 는 이의 작용 위치(m)이다.

5) 양압력 (U, kN)

설계적인 측면에서 콘크리트 가물막이댐과 일반적인 콘크리트 중력식댐의 가장 큰 차이는, 가물막이댐의 경우는 설계홍수량을 비교적 작게 결정하기 때문에 월류가 발생되며, 이를 설계에 반영해야 한다는 것이다. 즉, 가물막이댐 설계 시 댐 상류에 월류 수심이 발생되어 이로 인하여 추가적인 상류 수압이 발생하는 것과, 월류 수심이 증가하여 댐 기초 상류부에 압축력이 0인 구간이 발생하는 경우, 이 구간에서의 양압력이 상류 수압과 같아진다는 것을 고려하여야 한다. 이러한 부분은 한계상태방정식 적용 전에 하중 조건에서 다루어져야 한다.

가물막이댐에서 고려하는 양압력을 살펴보면, 댐기초 지반의 간극수압으로 인해 댐체 기초부에 발생하는 상향력이다. 댐 기초 상류지점(heel)에는 상류 수압만큼의 양압력이 발생되며, 댐 기초 하류지점(toe)에는 하류 수압만큼의 양압력이 발생된다. 따라서 댐 기초에서 양압력의 수두경사선(hydraulic gradient)은 상·하류 양압력을 연결하면 얻어진다. 이 수두경사선, 즉, 압력분포선(pressure distribution line)은 배수시설, 또는 커튼 그라우팅(curtain grouting) 등의 지하수의 배수 또는 차수시설이 설치되는 경우, 이의 작용효과를 고려하여 결정된다. 일반적으로 가물막이시설은 본댐 공사를 위하여 단기간에 사용되는 것을 고려하므로, 댐체 내 갤러리(drainage galley)가 없는 것이 일반적이기 때문에, 양압력의 수두경사선은 Fig. 4와 같이 직선으로 분포된다고 볼 수 있다. 여기서 상류 수위가 높아져 월류가 발생하는 경우, 전도모멘트가 높아지면서 댐 기초 상류에 압축력이 0인

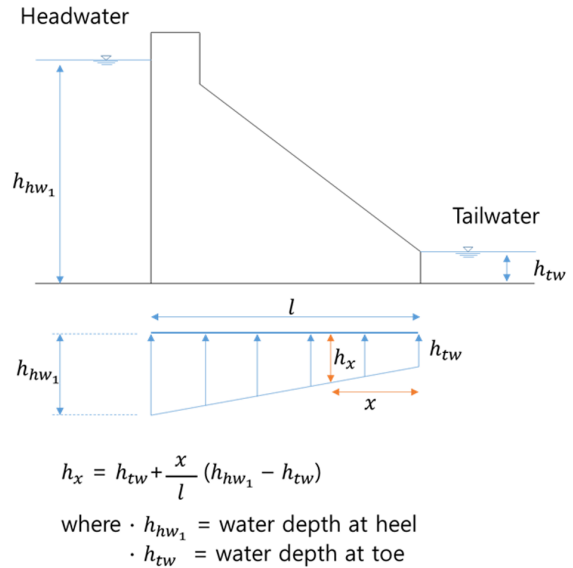


Fig. 4. Uplift distribution without zero compression zone.

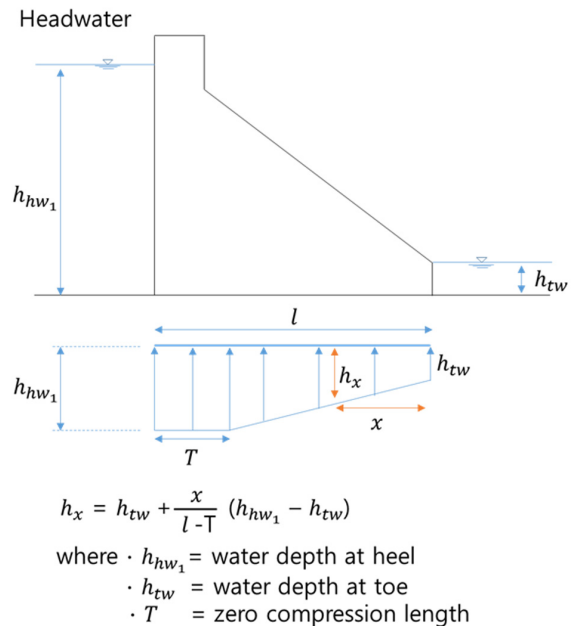


Fig. 5. Uplift distribution with zero compression zone.

지점이 나타나게 된다. 또한, 월류 수위가 더 높아지는 경우 압축력이 0인 지점이 하류로 이동하게 되고, 압축력이 0인 구간은 상류 수압이 양압력으로 작용한다고 생각해야하며, 이를 Fig. 5에 나타내었다¹⁵⁾.

일반적으로 본댐의 형식 결정 과정과 가물막이댐의 형식 결정 과정이 유사하므로 본 연구에서는 콘크리트 가물막이댐의 안정성을 검토하기 위한 하중 조건으로 일반적인 콘크리트댐의 안정성 검토 시의 하중 조건을 이용하였다. 일반적인 콘크리트 중력식댐은 하중조건을 정상 조건(usual condition), 이상 조건(unusual condition),

Table 1. Loading conditions of concrete gravity dam

Loading conditions	Headwater	Tailwater	Uplift	Silt	Ice	Earthquake
1) Unusual loading condition (construction)	X	X	X	X	X	X
2) Usual loading condition (normal operating)	Normal operating level	minimum	O	O if applicable	O if applicable	X
3) Unusual loading condition (flooding discharge)	Standard project flood	O	O	O if applicable	X	X
4) Extreme loading condition (construction with operational basis earthquake)	X	X	X	X	X	OBE ¹⁾
5) Unusual loading condition (normal operating with operational basis earthquake)	Normal operating level	minimum	at pre earthquake level	O if applicable	X	OBE
6) Extreme loading condition (normal operating with maximum credible earthquake)	Normal operating level	minimum	at pre earthquake level	O if applicable	X	MCE ²⁾
7) Extreme loading condition	PMF ³⁾	Flood elevation	O	O if applicable	X	X

¹⁾ OBE : Operational Basis Earthquake
²⁾ MCE : Maximum Credible Earthquake
³⁾ PMF : Probable Maximum Flood

극한 조건(extreme condition)으로 제시하고 있으며, 이를 Table 1에 나타내었다. 콘크리트 가물막이댐에서는 Table 1의 하중 조건 중, 극한 조건을 제외한 1)~5) 조건을 이용하였다.

4. 콘크리트 가물막이댐의 파괴확률 산정

4.1 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)

몬테카를로 시뮬레이션은 간단히 정의하면 예측, 추정, 리스크 분석에 적용할 수 있는 난수 생성기이며, 이의 분석 과정을 Fig. 6에 나타내었다. 즉, 불확실한 변수에 대해 사전에 정의된 확률분포에서 랜덤하게 반복적으로 값을 추출하고, 이렇게 선택된 값을 모델에 적용하

는 과정, 혹은 모델이 가질 수 있는 여러 시나리오에 대한 계산 작업을 수행하여 여러 결과값을 산정하는 것을 말한다. 이 시나리오를 모델에 반영하여 계산을 통해 결과값이 생성되기 때문에 각 시나리오 별로 예측값(forecast)이 정해진다. 예측값이란 분석자가 관심을 갖는 중요한 변수로 모델에서 중요한 결과값으로 사용자가 정의한 사건이다¹⁶⁾. 본 연구에서는 변수로 전도, 활동, 기초지지력에 대한 안정성 평가를 위한 한계상태방정식에 영향을 미치는 콘크리트 하중, 토사의 하중 및 마찰 각 등을 재료의 물성치로 설정하였으며, 예측값은 한계상태방정식을 이용하여 가물막이댐의 안정성 검토를 수행한 후에 나타나는 파괴확률로 정의하였다. 가물막이댐의 파괴 확률 산정을 위해 본 연구에서 적용한 연구

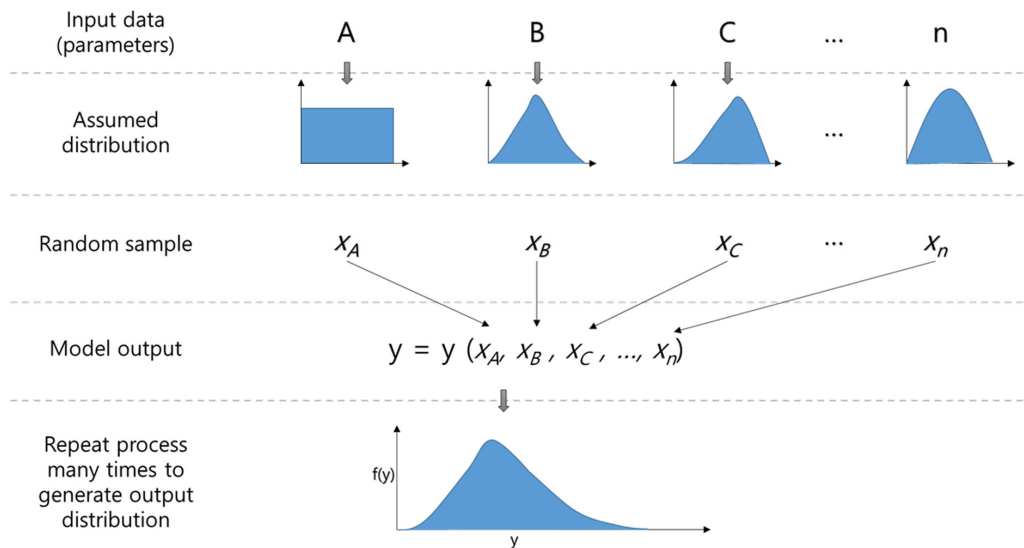


Fig. 6. Analysis process of Monte Carlo Simulation.

1. Selection of input variables ($x_a, x_b, x_c \dots x_n$)

: Major input data of limit state function for overturning, sliding and foundation bearing

2. Identify probability for input variables

: Determination of probability distribution type through literature review

3. Sampling from probability density function

: Random number generation of random variables

4. Performing simulation runs

: Failure probability calculation

Fig. 7. Procedures for acquiring failure probability of concrete cofferdam using Monte Carlo Simulation.

절차를 요약하여 Fig. 7에 나타내었다.

4.2 가물막이 댐 제원 및 설계홍수량

댐 마루고(crest level) El. 503.0 m, 상시만수위(normal operation level) El.502.1 m, 여유고(free board) 0.9 m인 해

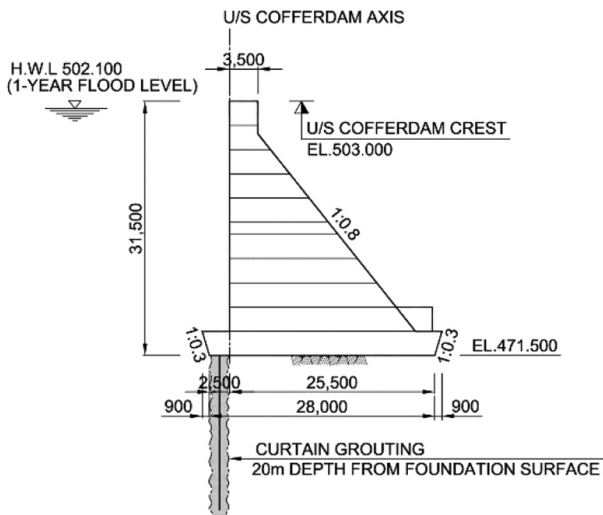


Fig. 8. Section of concrete cofferdam.

Table 2. Selected random variables

Variables	Unit	Probability function	Mean	Standard deviation
1) Concrete unit weight (γ_c)	ton/m ³	Normal	2.226	0.226
2) Allowable support force of dam foundation (σ_a)	MPa	Normal	5	0.4
3) Friction angle of soil (foundation) (ϕ_f)	°	Normal	45	7.2
4) Adhesion force of soil (c)	MPa	Log normal	1.77	1.24
5) Height of deposit soil (h_s)	m	Uniform	487.4	7.03
6) Deposit soil unit weight (γ_s)	ton/m ³	Normal	2.0	0.2
7) Friction coefficient of deposit soil (ϕ_s)	°	Normal	30	2.4

외 현장의 콘크리트 가물막이댐의 파괴확률을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 산정하였다. 콘크리트 가물막이댐의 단면을 Fig. 8에 나타내었으며, 이의 설계홍수량은 1년 빈도인 1,761 m³/s로 계획되어서 1년에 약 1회의 월류가 예상된다.

4.3 파괴확률 산정

한계상태방정식에 영향을 미치는 하중 또는 재료의 주요 매개변수^{3,17-20})를 독립 확률변수로 선정하고 이의 확률분포형과 확률값(평균, 표준편차)을 Table 2에 나타내었다. 파괴확률 산정에는 정량적 위험도 해석 방법 중 MCS를 이용하였다. 콘크리트 가물막이댐의 안정성 검토 계산서를 Excel 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 여기에 Excel Macro를 이용하여 MCS 분석을 수행하였다.

가물막이댐은 본댐 공사기간 동안 사용되는 임시구조물이며, 프로젝트 별로 상이하지만 일반적으로 약 3년 ~ 5년 사용된다. 따라서 Table 1의 콘크리트댐 안정성 검토를 위한 하중 조합 조건 중, 극한조건인 6번째 조건(PMF의 상황을 고려)과 7번째 조건(MCE 상황을 고려)은 제외하기로 한다. 따라서 Table 1의 1) ~ 5)의 5가지 하중 조합 조건을 이용하였다.

상류 수위 조건은 댐고가 El. 503.0 m임을 고려하여, El. 501.0 m, El. 503.0 m, El. 505.0 m, El. 507.0 m로 설정하였다. 이때의 상류수압 및 양압력 분포 등을 하중 조합 조건에 반영하였고, 무작위(random)로 변화시킨 확률변수(Table 2)를 고려하였다.

산정된 하중을 이용하여 한계상태방정식을 검토하였으며, 각 월류 수위 조건별 50만회의 시뮬레이션을 수행하였다. 월류 수위 조건별 콘크리트 가물막이댐의 파괴확률을, 전도(overturning), 활동(sliding), 지반 지지력(base pressure)의 세 가지 파괴모드와 전도, 활동, 지반 지지력 중 한번이라도 파괴가 일어나는 경우(failure probability)의 4가지 항목으로 결과를 정리하여, Fig. 9에 나타내었다.

Table 3. Failure probability results by loading condition

Loading conditions	Failure mode	El. 501 m	El. 503	El. 505	El. 507	El. 509
1	Overtuning stability	0	0	0	0	0
	Sliding stability	0	0	0	0	0
	Base pressure	0	0	0	0	0
2	Overtuning stability	0	0	0	0	0
	Sliding stability	0	0	0	0	0
	Base pressure	0	0	4.0E-06	4.0E-06	4.0E-06
3	Overtuning stability	8.0E-06	8.0E-06	1.2E-03	4.3E-03	1.0E-02
	Sliding stability	0	0	7.4E-04	3.1E-03	7.6E-03
	Base pressure	4.0E-06	4.0E-06	6.6E-04	2.8E-03	6.9E-03
4	Overtuning stability	0	0	0	0	0
	Sliding stability	0	0	0	0	0
	Base pressure	0	0	0	0	0
5	Overtuning stability	6.1E-04	6.1E-04	2.8E-05	4.4E-05	6.8E-05
	Sliding stability	4.9E-04	4.9E-04	8.0E-05	0	0
	Base pressure	3.5E-04	3.5E-04	2.0E-06	1.2E-05	2.0E-05

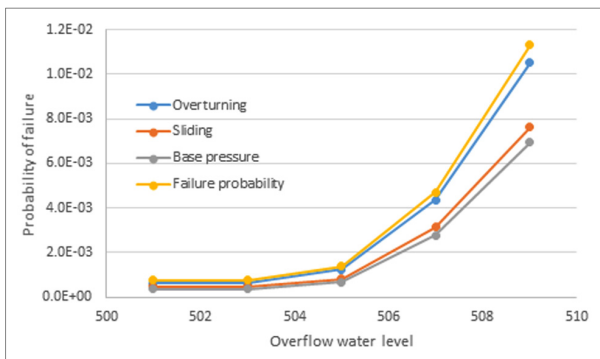


Fig. 9. Failure probability by overflow water level.

Fig. 9에서 콘크리트 가물막이댐의 월류 수심이 증가할수록(El. 505 m, El. 507 m) 파괴확률이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전도, 활동, 지반 지지력 중에서 전도에 대한 파괴확률이 높게 나타났으며, 따라서 전도가 주요한 파괴 요인임을 알 수 있다. 하중조건에 따른 파괴확률(파괴횟수/시뮬레이션 횟수)을 Table 3에 나타내었다. 파괴확률이 가장 높게 나타나는 하중 조건은 가물막이댐 월류 전에는 하중조건 5번이었으며, 월류 후에는 하중조건 3번이었다. 하중 조건 3번은 홍수시를 고려한 경우이며, 월류가 발생할 정도로 상류 수위가 높아졌기 때문에 이로 인한 상류수압 및 양압력 증가로 인하여 파괴확률이 가장 높게 나타난 것으로 사료된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 공사기간 동안 월류를 허용하는 콘크리트 가물막이댐을 대상으로 파괴확률 분석을 수행하였

다. 가물막이댐의 파괴모드와 한계상태방정식을 정의하고, 4가지의 상류 수위 조건(El. 501.0 m, El. 503.0 m, El. 505.0 m, El. 507.0 m)을 설정하였고, 이때의 상류 수압 증가와 양압력 분포 변화를 고려하였다. 또한, 댐 안정성 검토를 위한 하중 조건 중, 극한상황을 제외한 5가지 하중 조건 하에서 Monte Carlo Simulation을 이용하여 파괴확률을 분석하였다. 이때, 한계상태방정식에 영향을 미치는 하중 및 재료의 매개변수 중 주요한 확률 변수를 선정하고, 이의 확률적 특성을 고려하였다.

콘크리트 가물막이댐의 파괴확률은, 월류가 발생하여 상류 수위가 상승할수록 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 홍수 발생시를 고려한 하중조건(3번)에서 파괴확률이 높게 나타났고, 이는 월류 수위로 인하여 상류 수압 및 양압력이 증가되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 전도, 활동, 지반 지지력 중에서 전도에 의한 파괴확률이 높게 나타나 전도가 주요한 파괴 요인임을 알 수 있었다.

홍수위가 증가하여 가물막이댐을 통해 월류가 발생하면 상류 가물막이댐과 하류 가물막이댐 사이의 공사 작업공간에 저류가 발생한다. 이는 결국 상류 가물막이댐의 하류 수위가 증가하게 되는 것을 의미하여 상류 가물막이댐의 안정성이 높아지는 효과가 있다. 따라서 상류 가물막이댐의 안정성이 가장 낮은 상황은 월류 수위가 급격히 상승하여 상하류 수위차가 최대가 되는 경우이다. 이러한 점을 고려하여 가물막이댐의 파괴확률 산정에 대한 추가적인 연구가 수행된다면 보다 실질적인 가물막이댐 월류시의 파괴확률을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 20DPIW-C153746-02).

References

- 1) Dam Design Standard, Korea Water Resources Association, 2011.
- 2) ANCOLD Guidelines on Dam Safety Management, Austallian National Committee on Large Dams, 2003.
- 3) S. J. Cho, S. W. Shin, S. H. Sim and J. Y. Lim, "Failure Probability Assessment for Risk Analysis of Concrete Dam Under Flood", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 6, pp. 58-66, 2016.
- 4) J. Y. Kim, J. G. Kim, B. H. Choi and H. H. Kwon, "A Development of Hydrologic Dam Risk Analysis Model Using Bayesian Network(BN)", Journal of the Korea Water Resource Associate, Vol. 48, No. 10, pp. 781-791, 2015.
- 5) I. S. Ha, S. G. Lee, N. R. Kim and J. Y. Lim, "A Proposal of Seismic Failure Probability Estimation Chart of the Korean Small and Medium Sized Earthfill Dams", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 18, No. 3, pp. 31-38, 2017.
- 6) J. S. Lee, "Application of Risk Analysis for Dam Safety Assessment", Journal of the Korea Water Resource Associate, Vol. 35, No. 6, pp. 651-664, 2002.
- 7) A. A. Alla, "The Role of Fusegates in Dam Safety", International Journal on Hydropower and Dams, Issue 6, 1996.
- 8) U. Merkel, and B. Westrich, "PC-River - Probabilistic Reliability Analysis for River Dikes", 4th International Symposium on Flood Defence, pp. 110-116, 2008.
- 9) M. Mazzoleni, B. Bacchi, S. Barontini, G. Di Baldassarre, M. Pilotti and R. Ranzi, "Flooding Hazard Mapping in Floodplain Areas Affected by Piping Breaches in the Po River, Italy", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 19, No. 4, 2014.
- 10) R. Ranzi, B. Barontini, M. Mazzoleni, M. Ferri and B. Bacchi, "Levee Breaches and 'Geotechnical Uncertainty' in Flood Risk Mapping", Proc., Int. Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) Conf., Madrid, Spain, 2012.
- 11) Y. C. Hue, Y. K. Tung and J. T. Kuo, "Evaluation of Dam Overtopping Probability Induced by Flood and Wind", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 25, No. 1, pp. 35-45, 2012.
- 12) S. M. Kim and S. Y. Ok, "Dynamic Response based Reliability Analysis of Structure with Passive Damper - Part I: Assessment of Member Failure Probability", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 4, pp. 90-96, 2016.
- 13) ICOLD Bulletin 130 : Risk Assessment in Dam Safety Management, International Commission on Large Dam, Paris, 2003.
- 14) ICOLD Bulletin 99 : Dam failure - Statistical Analysis, International Commission on Large Dam, Paris, 1995.
- 15) EM 1110-2-2200 Gravity Dam Design, US Army Corps of Engineers, 1995.
- 16) K. H. Min, Risk Analysis and Decision Making, Eretec, 2018.
- 17) L. Altarejos-Garcia, I. Escuder-Bueno, A. Serrano-Lombillo and M. G. de Membrilera-Ortuno, "Methodology for Estimating the Probability of Failure by Sliding in Concrete Gravity Dams in the Context of Risk Analysis", Structural Safety, Vol. 36-37, pp. 1-13, 2012.
- 18) C. Bernstone, M. Westberg and J. Jeppsson, "Structural Assessment of a Concrete Dam Based on Uplift Pressure Monitoring", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, pp. 133-142, 2009.
- 19) L. Peyras, P. Royet, L. Deroo, R. Albert, J. Becue, S. Aigouy, E. Bourdarot, D. Loudiere and J. Kovarik, "French Recommendations for Limit-State Analytical Review of Gravity Dam Stability", European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 12, pp. 1137-1164, 2008.
- 20) ACI 214R-02, Evaluation of Strength Test Results of Concrete, American Concrete Institute, USA, 2002.