

수공구조물에 대한 Risk Analysis 기법의 적용(I)



한 건 연 |

경북대 토목공학과 교수, 우리학회지 편집위원장
kshanj@knu.ac.kr



이 종 석 |

한국건설교통기술평가원 선임연구원
kicftfp@kistep.re.kr

1. 서 언

최근 이상기후 등에 의해서 댐, 저수지, 하천제방 등의 수공구조물이 과연 안전한가에 대한 논란이 계속되고 있으며, 이에 대한 위험도를 분석하고 그 결과를 정량적으로 제시하여야 할 필요성이 제기되고 있다.

댐 등의 수공구조물에 대한 위험도 분석이 처음 두드러지기 시작한 계기는 1978년 Teton 댐의 붕괴 이후 USBR (미국 개척국)에서 이를 평가하기 시작하면서 부터이다. 그후 FEMA, BC Hydro, Utah 대학교, 육군공병단, 원자력규제위원회, 국가과학아카데미, 엔지니어링 회사 등에서 이에 대한 연구를 시행하여 오고 있다.

이제까지 조사된 자료에 의하면 세계 전역에서의 댐 붕괴 자료로부터 예측된 댐의 붕괴확률은 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$, 미국의 경우는 $3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ 으로 추정되었다 (Baecher 등, 1980). 주요 댐의 붕괴만을 고려할 때, 미국에서 붕괴확률은 $0.8 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ 이고, 세계적으로는 $2 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ 으로 조사되었다(Mark와 Stuart-Alexander, 1977).

물론 이러한 추산치는 많은 불확실성을 내포하고 있으나 단지 세계적으로 댐 붕괴의 확률에 대한 전반적인 결론은 대략 $10^{-4} / \text{dam-year}$ 이다. 이 위험률은 인명의 희생 가능성이 높은 댐의 편익-비용 해석 및 기존 댐의 유지보수시의 비용 분담 등에서 중요한 자료가 될 수 있다 (Mark와 Stuart-Alexander, 1977; Rose, 1978).

본 학술강좌에서는 위험도 및 신뢰도 해석기법에 대한 수학적 배경 및 방법론에 관한 설명보다는 댐, 저수지 등의 수공구조물을 대상으로 신뢰도 분석에 관한 실제적인 적용을 중심으로 설명하고자 한다. 본 강좌의 구성은 Risk Analysis 방안, 수공구조물 안전에 대한 Risk Analysis의 3단계, 댐 하류부에 대한 Risk Analysis(모델링 결과에 대한 평가, 공공안전성 평가, 경제적 측면 평가, 사회적 측면 평가 등)을 설명하고자 한다. 또한, 댐 Risk Analysis의 적용 예, Risk Evaluation과 Risk Management 방안 등에 대해서 실제 댐을 대상으로 기술하고자 한다.

2. Risk Analysis 방안

수공구조물의 위험도에 대한 분석과정은 다양하게 제시될 수 있으나 우선 다음의 과정을 포함하는 것이 일반적이다.

- 통계학적 분석(부하조건 평가를 위한 매개변수)
- 위험도 분석(발생 가능한 불리한 결과의 감지 및 정량화)
- 의사 결정(시나리오 또는 입력요소가 결과에 미치는 영향을 평가)

그림 1은 댐, 저수지 등 수공구조물의 안전도 평가를 위한 개념의 정립 및 의사결정과정에서 적용될 수

있는 Risk Analysis, Risk Assessment, Risk Management의 관계를 도해적으로 나타낸 것이다. 이들 세가지 용어를 간단하게 설명하면 다음과 같다.

- Risk Analysis(위험도 분석) : 수공구조물에 대한 부하조건, 발생확률, 수공구조물 붕괴 모드, 수공구조물 붕괴 영향을 파악하고 이를 산정하는 과정
- Risk Assessment(위험도 평가) : 모든 의사

결정 요소(운영, 안전, 비용, 시간, 환경적인 영향, 위험도 해석의 결과 및 분석)의 관점에서 수공구조물의 안전도와 관련하여 가능한 활동 상황을 조사하는 과정

Risk Management(위험도 관리) : 수공구조물에 대한 완전한 목록과 수공구조물 안전 프로그램에 대해서 비용대비 위험도 저감 활동을 평가하는 과정

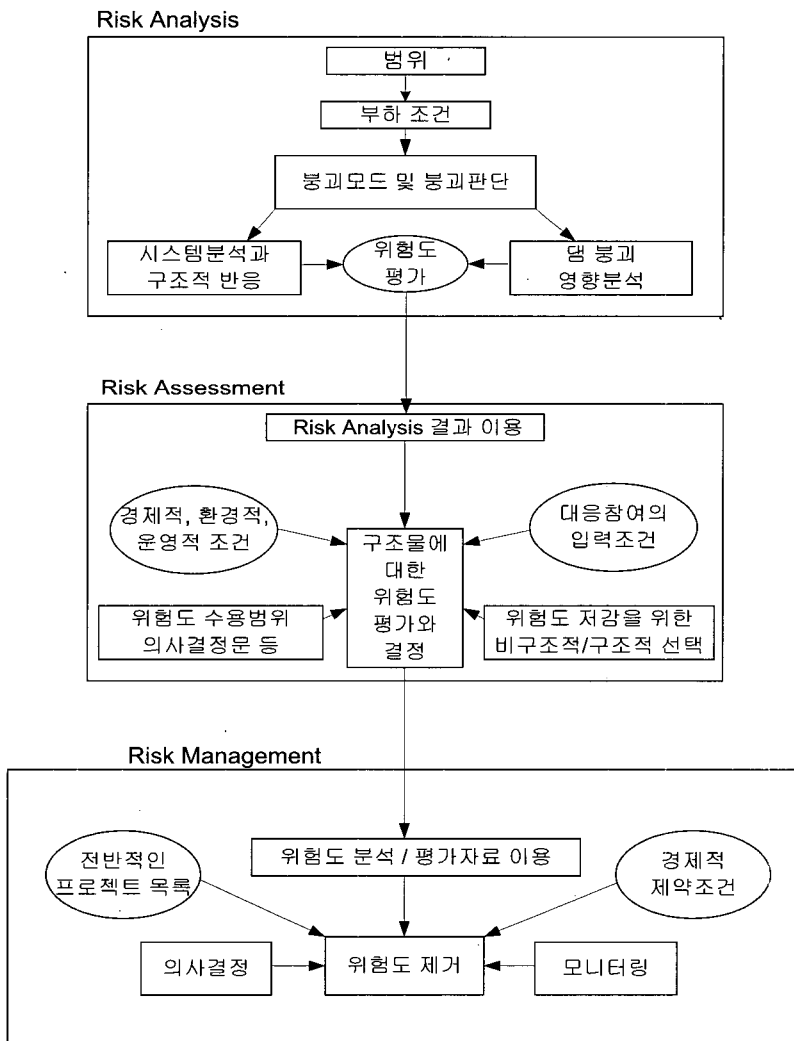


그림 1. 수공구조물 안전에 관한 분석 및 의사결정과정

3. 수공구조물 안전에 대한 Risk Analysis

댐 안전에 관련된 위험도 평가를 위한 주요 요소를 검토하고, 이를 위해서 위험도 분석을 위한 3단계의 주요 요소 등에 대해서 살펴보고자 한다. 앞에서도 언급한 바와 같이 댐에 대한 위험도 분석의 정량적인 과정은 댐 붕괴를 야기할 수 있는 부하조건, 발생확률, 부하가 주어졌을 때 댐이 어떤 양상으로 붕괴될 것인지에 관한 확률, 댐 붕괴가 발생하였을 때 어떤 불리한 결과가 발생할 수 있을 것인가에 대한 확률 등으로 구분할 수 있다. 이를 체계적으로 분석하기 위해서는 모든 부하조건, 모든 붕괴모드, 붕괴후 발생 가능한 모든 시나리오에 대한 평가가 확립되어야 한다.

그림 2는 제방붕괴와 관련된 Influence Diagram을 나타낸 것이다. 그림과 같은 Influence Diagram을 기반으로 Event Tree 또는 Fault Tree를 구성하여 해석함으로써 원인별 발생확률을 정량적으로 산정

하기 위한 기초자료로 활용하게 된다.

3.1 1단계 분석 : 부하조건, 붕괴모드, 붕괴후 영향에 관한 분석

위험도 분석의 범위와 목적이 정해진 후에 어떤 확실적인 평가작업에 앞서 신뢰도 분석에 있어서 첫 번째로 선결되어야 할 사항은 부하조건, 붕괴모드 및 붕괴시나리오를 확립하는 것이다.

(1) 부하조건

댐과 기초부 및 부속시설(여수로, 방수로 등)에 작용하는 부하조건은 다음과 같은 외력조건으로부터 야기된다.

- 정상조건하에서의 저수지 상황
- 홍수기 조건하에서의 저수지 상황
- 지진발생 조건
- 기타 자연재해 및 특수조건(토석류, 산사태, 눈사태 등)

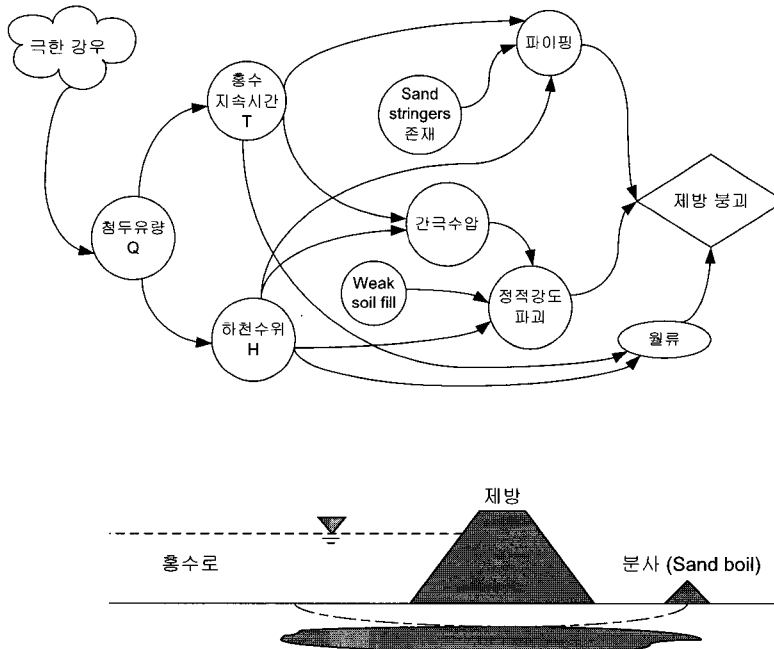


그림 2. 제방 위험도 분석을 위한 Influence Diagram

넓은 의미에서 볼때 원인이 되는 부하조건은 다음의 영역까지도 포함될 수 있겠다.

- 운영과정(기계의 작동오류, 인간에 의한 오류 등)
- 내부적인 과정(모래자갈 등 골재의 알카리 반응, 부식, 금속의 피로)
- 사회적인 영향(전쟁, 테러 등)

위험도 분석에서의 기본원리는 댐 붕괴를 야기할 수 있는 시초가 되는 조건으로부터 최대 부하를 일으키는 조건(예를 들어, 지진의 경우 MCE 조건: Maximum Credible Earthquake)에 까지 고려하여 분석을 실시하여야 한다.

(2) 붕괴모드 조건

댐, 기초, 부속구조물이 주어진 부하조건 및 원인 조건하에서 어떻게 붕괴될 것인지의 조건을 다음과 같이 시스템적으로 접근하여 해석하여야 한다.

- 댐 안전도 검토가 필요한바, 이는 기초적인 댐별 입력자료의 형태가 요구됨
- 댐 붕괴에 대한 과거 기록을 조사하고, 당시의 붕괴모드를 분석하여 활용함(이 경우 과거의 신뢰도 분석의 경험과 원인조건과 붕괴모드에 관한 체크리스트가 잠재적인 붕괴모드를 판별하는데 도움이 됨)
- 앞서 기술한 바와 같이 주어진 부하조건하에서 프로젝트의 모든 과정에 대해서 내용을 파악하고 있는 관련자 그룹에서 문제를 이야기하고 질문을 제기하기 위한 구조가 붕괴모드를 판별하는데 사용되어야 함

(3) 붕괴시나리오

붕괴 시나리오를 판별하기 위해서는 다음사항이 요구된다.

- 댐, 기초부 및 부속구조물에 대한 가능한 붕괴 특성
- 다양한 가능한 붕괴 조건에 기인한 홍수발생 양상
- 다양한 경보의 가능성
- 다양한 홍수조건에 대한 위험 노출정도

각 붕괴모드에 대해서 위의 시나리오에 대한 과정이 수행되어야 한다. 앞에서 설명한 세가지 과정이 동시에 수행될때 이 과정을 “붕괴모드와 결과분석”을 의미한다. 역설적으로 신뢰도 분석에 있어서의 이 과정은 어떤 확률이론의 개념이 포함되어 있지 않음에도 불구하고 전 과정을 통해서 가장 중요한 역할을 하게 된다.

3.2 2단계 분석 : 부하, 반응, 붕괴 시나리오 발생 확률의 평가

위험도 분석의 판단단계에서 생성된 정보에 기초로 하여 신뢰도 분석이 각 단계 및 사상에 대한 이해를 반영할 수 있도록 각 부하조건과 붕괴모드가 구체적인 논리도(Event tree, Fault tree 또는 이것들의 조합)에 의해 개발될 수 있고, 이를 통해서 각 경우에 대해 가능한 구조물 붕괴 시나리오를 이끌어낼 수 있다. 그림 3은 댐 붕괴 신뢰도해석에 필요한 Event Tree의 작성 예를 나타내고 있다.

그리고 난후 각 사상에 대한 발생확률이 논리도 형태로 제시되게 된다. 발생확률은 다음과 같은 방법에 의해서 부여할 수 있다.

- 구체적인 확률분석
- 정식의 추론기법을 사용한 전문가의 판단에 의함
- 비공식적인 추론기법을 사용하여 분석팀과 기술전문가의 판단에 의함

댐의 부하, 댐의 반응 및 결과와 결과된 매개변수(즉, 댐 붕괴의 감지, 붕괴시간, 경보시간, 대피시간) 등 전 과정과 관련되어 불확실한 사상에 대한 신뢰도 분석에 있어서 발생확률의 부여는 매우 어렵고 가장 의문시되는 위험도 분석과정이다.

(1) 상세한 확률분석 과정

상세한 확률분석과정은 상대빈도 자료와 통계이론을 적용하여 댐에 대한 반응 확률을 계산하는 것이다. 정밀한 빈도분석 방법의 적용은 댐 반응 확률을

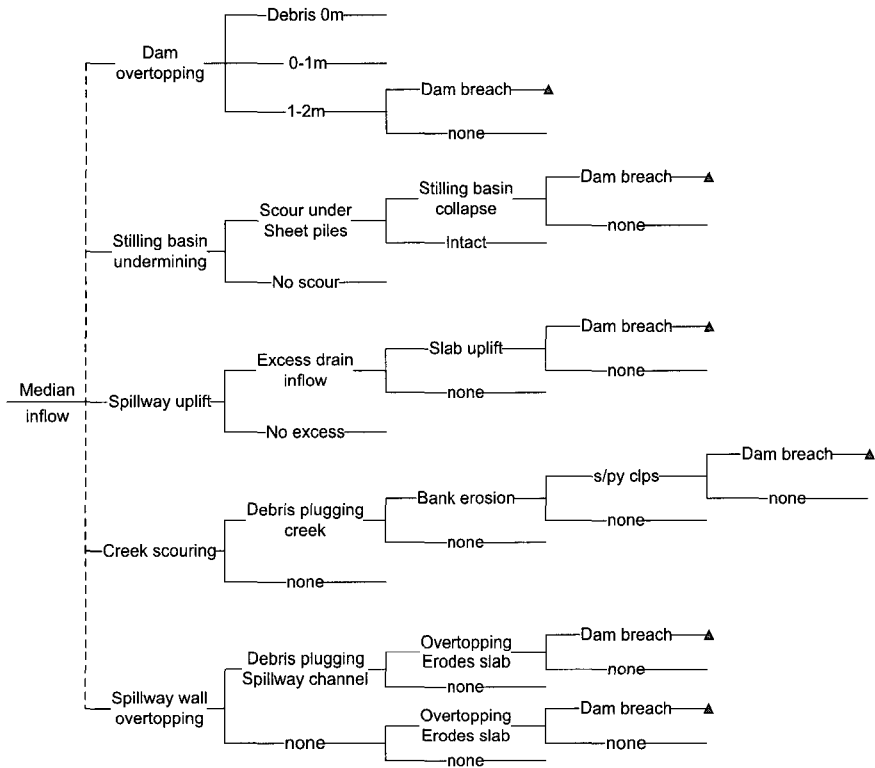


그림 3. 댐 붕괴 위험도 분석을 위한 Event Tree

평가하기 위해 제한되는데, 이는 댐의 가능한 붕괴모드가 통계학적으로 유효한 표본으로 요구되는 모집단의 특성을 제공하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 이러한 통계학을 대신하여 상세한 확률분석과정은 확률모델이나 모델 개발자의 공학적 판단을 연계하여 개발된 공학적 문제에 대한 알고리즘에 의해 이루어진다.

(2) 전문가의 추론 과정

전문가의 추론과정은 전문가 판단에 대한 신뢰도에 의존하는 것으로서 그렇게 함으로써 발생가능 확률은 발생사상에 대한 전문가의 확인이나 신뢰에 의존하게 된다. 이 경우 확률을 구하기 위해서 모든 종류의 이용가능한 정보가 인정될 수 있는데 상대빈도자료, 구조물에 대한 공학적인 해석, 댐 기능수행에 관한 과거 발생사례와 통계학적 정보, 평가자의 경험 등을 포함하게 된다.

3.3 3단계 분석 : 위험도의 계산과 결과의 제시

댐 안전도 분석의 목적을 위한 위험도는 붕괴 가능성과 결과의 크기의 곱으로 표시된다. 두가지 유형의 결과가 고려될 수 있는데 인명피해와 재산피해가 그것이다. 각 경우와 관련된 위험도가 산정되어야 하고, 각각 그결과가 제시되어야 한다.

(1) 위험도의 계산

위험도의 실질적인 계산은 직관적인 과정으로서 event tree 상의 각각의 유일한 경로를 통해서 곱해지고, 그것들을 합산함으로써 얻게된다. 이 과정을 통해서 어겨되는 전체 위험도는 다음과 같은 것들이다. ① 산정된 연간 인명손실율(예를 들면, 인명손실 = 0.0003/년) ② 산정된 연간 경제적인 손실액(예를 들면, 위험비용 = 4억 5,000만원/년). 이와 같은 전

반적인 결과는 댐 지점의 전체 붕괴위험도의 합계를 고려하여 허용가능한 위험도 또는 위험도 허용 판단 기준치 등을 결정하는데 매우 유용하게 된다.

구체적으로 위험도 분석과정에서 다음과 같은 정보를 획득하고 제시하는 것은 매우 유용하다.

- ① 각 결과 수준별로 산정된 붕괴 가능성
- ② 각각의 부하조건(정적부하조건, 수문학적 부하조건, 지진부하조건 등)에 대한 붕괴 가능성과 붕괴 위험도의 산정
- ③ 지진과 수문학적 부하범위에 대한 붕괴 가능성과 붕괴 위험도의 산정
- ④ 위험도는 부하, 구조적 반응 및 결과로 나타나는 확률에 대해서 상한치와 하한치를 사용하여 산정함
- ⑤ 만일 위험도 경감을 위한 대안이 고려되고, 이러한 대책을 고려한 위험도분석이 이루어지고 난다면, 이상의 계산과정은 각각의 대안에 대해서 모두 계산되어야 한다.

(2) 해석결과의 제시

위험도 해석 결과의 사용은 위험도 평가에 대한 입력자료를 제공하는데 활용하게 된다. 이 해석결과의 제시에서는 다음 사항이 포함되어야 한다.

- 표준적인 실행에 대하여 어떤 변동을 포함하는 위험도 분석을 위해 사용된 기본과정의 검토
- 검토결과로부터 나타나게 되는 중요하고 기초적인 사항에 대한 새로운 이해와 생각의 변화
- 자료의 부족 또는 전통적인 분석과정에 기인하여 이루어진 어떤 중요한 가정
- 상대적인 위험도(앞에서 언급한 항목 ②,③,④ 내용)와 전체위험도(항목 ①의 내용)의 제시
- 확률 평가범위에 대한 결과의 민감도 분석 결과의 제시
- 대안의 개선과정에 기인한 상대적인 위험도 경감의 제시

이상에서 제시한 위험도 분석과정에 대한 실제적인 적용 예는 계속되는 강좌에서 제시될 것이다. 🍷

(다음호에 계속됨)