

필댐의 내부침식과 관련된 댐 상태의 정량화 및 적용성 평가

Quantification on Dam Condition Related to Internal Erosion of an Embankment Dam and its Applicability Evaluation

허 건¹ Heo, Gun

정 충 기² Chung, Choong-Ki

Abstract

The typical four conditions related to internal erosion were set from the results of the regular dam safety inspection for 17,500 dams, and a questionnaire survey was conducted for dam safety experts to quantify these four typical current dam conditions with scores between 0 and 10, respectively. In addition, we proposed ‘possible score range’ for each condition to minimize the decision limits for dam managers to quantify dam conditions while helping to quantify various dam conditions except 4 representative conditions. A case study based on ‘quantified score’ and ‘possible score range’ for each condition showed that this method consistently reflects the dangerousness of the dam and provides a reasonable probability of failure. This helps to overcome limitations of dam rating determination by weighted average, and it will help to evaluate dangerous dams as dangerous dams.

요 지

국내 농업용 댐 17,500여개의 안전점검 결과를 바탕으로 필댐에 나타나는 내부침식(internal erosion)과 관련된 대표적인 4가지 상태를 설정하였다. 이들 상태들을 정량화하기 위하여 댐 안전관리 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하고 각 상태들에 대한 정량화된 점수를 제시하였다. 또한 4가지 대표 상태 이외의 다양한 댐 상태의 정량화를 도와주면서 댐 관리자들의 댐 상태 정량화 결정에 제한을 최소화 하고자 각 상태별 ‘부여가능한 점수의 범위(possible score range)’를 제시하였다. 각 상태별 ‘정량화된 점수’와 ‘부여가능한 점수의 범위’를 바탕으로 Case Study를 실시하여 본 방법이 댐의 위험 정도를 일관성 있게 반영하고 합리적인 수준의 파괴확률 값을 제공함을 알 수 있었다. 이는 기존의 댐 안전관리 방법이 가지는 가중평균에 의한 댐 상태등급 결정의 한계점을 극복할 수 있게 도와주어 실제로 위험한 댐을 위험한 댐으로 인지할 수 있게 도와줄 것이다.

Keywords : Internal erosion, Dam current condition, Quantification, Questionnaire survey

1 정회원, 한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Cooperation, Tel: +82-31-400-1750 Fax: +82-31-400-1744, gun@ekr.or.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 한국에서는 경주의 산대저수지 붕괴(2013), 영천의 괴연저수지 붕괴(2014), 기장의 내덕저수지 붕괴(2014) 등 댐의 붕괴피해를 경험하고 있다. 이러한 댐 붕괴를 사전에 예측하고, 필요한 경우 대책을 수립하기 위하여 미국, 영국, 호주 등에서는 많은 수의 댐을 효율적으로 관리할 수 있는 위험도 해석(risk Analysis) 방법을 개발하여 안전관리를 수행 중이며, 한국에서도 많은 숫자의 노후 된 농업용저수지를 효율적으로 관리하고자 위험도 해석을 이용한 안전관리 방안 도입 또는 개발을 추진 중이다.

하지만 개별 댐에 대한 세부적인 위험도 해석을 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 위험도 해석을 해야 할 댐의 숫자가 많은 경우에는 개별 댐에 대한 세부적인 위험도 해석을 하기 이전에 많은 댐들의 위험도 해석 수행을 위한 우선순위를 결정한 후 위험도가 높은 댐부터 세부적인 위험도 해석을 수행하는 절차가 필요하다(Heo and Chung, 2016).

특히 내부침식(internal Erosion)으로 인한 흩댐의 붕괴는 월류(overtopping)와 더불어 가장 발생빈도가 높은 중요한 흩댐의 파괴형태 중의 하나이다(Table 1). 하지만 개별 댐들의 축재 재료, 제체의 규모, 형상 및 구성, 유지관리 이력 등 고유한 특성 차이로 내부침식으로 인한 댐의 파괴확률을 정량적으로 추정하는 것이 쉽지 않다(Scott, 2011).

이에 호주와 영국 등에서는 과거에 발생한 댐의 붕괴 또는 사고 발생 데이터의 빈도 해석에 의한 통계적인 방법(historic performance method)을 사용하여 많은 수의 댐 중에서 댐 위험도 해석 수행의 우선순위를 결정할 수 있는 방법을 제안하였다(Fell et al., 2008; Brown and

Gosden, 2004; Department for Environment Food and Rural Affairs, 2013). 하지만 이러한 통계적인 방법들은 미국, 호주, 영국 댐의 붕괴 또는 사고사례를 대상으로 하였기 때문에, 댐의 규모, 형식, 재료 및 관리 체계 등이 다를 뿐 아니라, 댐의 붕괴 및 사고 통계 데이터 등의 문서화가 충실하지 못한 경우에는 이 방법들을 적용하기 어렵다.

이에 Heo and Chung(2016)은 댐의 붕괴 및 사고사례 데이터를 활용한 빈도해석에 근거한 내부침식으로 인한 댐 파괴확률을 추정하는 방법 대신 이벤트 트리(event tree method)를 이용하여 내부침식으로 인한 댐 파괴확률의 정량화 방법을 제시하였다. 하지만 댐의 현재 상태를 정량화하는 것에 대한 명확한 기준이 제시되지 않아 여러 명의 댐 관리자들도 많은 수의 댐을 나누어 점검해야 하는 경우 댐의 상태가 유사한 경우라도 댐의 현재 상태 값을 다르게 판단할 수 있어 내부침식으로 인한 댐 파괴확률 값의 일관성 있는 결과를 얻기가 어려울 수도 있다.

이에 본 연구에서는 국내 농업용 댐의 현황을 고려하여, 현재의 댐 안전관리 조사 체계를 기반으로 필댐의 내부침식과 관련하여 댐에 나타나는 상태를 정량화하기 위하여 댐 안전관리 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문조사를 바탕으로 댐 상태별 ‘가장 적절한 값(most likely score)’과 ‘부여가능한 점수의 범위(possible score range)’를 제시하고 다양한 상태의 댐들에 대한 Case Study를 실시하여 전문가 설문조사 결과의 적용 성을 평가하였다.

2. 내부침식과 관련된 댐 상태의 정량화

2.1 내부침식과 관련된 댐 상태 정량화의 필요성

위험도 해석을 활용하여 많은 수의 댐을 관리하기 위해서는 각 댐들의 월류, 내부침식, 사면활동, 지진 등의 여러 파괴원인들에 의한 파괴확률을 구한 후 합산하여 댐 전체 파괴확률(probability of failure)을 구하여야 한다(Bureau of Reclamation and Corps of Engineers, 2012). Heo and Chung(2016)은 댐의 내부침식과 관련되어 ‘댐에 나타나는 상태’에 해당하는 ‘파괴확률’을 간단히 구하기 위하여 이벤트 트리를 활용하여 댐의 ‘현재 상태’와 ‘내부침식으로 인한 파괴확률’과의 상관그래프를 제시하였다.

Table 1. Overall Failure Statistics for Large Embankment Dams (Modified based on Foster et al., 2000)

Mode of failure	No. of failures	% failures
Overtopping and appurtenant	62	45.6
Piping-Internal Erosion	59	43.3
Slides	7	5.1
Earthquake-liquefaction	2	1.5
Unknown mode	8	5.9
Total no. of failures	136	-

Note : Totals do not necessarily sum to 100%, as some failures were classified as multiful modes of failure.

이벤트 트리를 이용하여 상관그래프를 제시한 이유는 댐의 상태와 내부침식으로 인한 상관그래프가 제시되면 많은 수의 댐에 대한 내부침식으로 인한 파괴확률을 비교적 간단하게 구할 수 있으나 문서화된 과거 댐 붕괴 사례 데이터가 충분하지 못한 국가들의 경우에는 댐의 붕괴 또는 사고의 발생빈도 해석에 의한 방법(historic performance method)으로 ‘댐의 상태’와 ‘내부침식으로 인한 파괴확률’과의 상관그래프를 제시할 수 없었기 때문이다.

Fig. 1의 상관그래프의 가로축에는 각 댐의 상태를 0에서 10점 사이의 점수(댐의 현재상태가 가장 양호한 경우를 0점, 댐의 상태가 긴급히 수위를 낮추어야 할 정도로 불량한 경우를 10점)로 나타내기 위하여 댐의 상태 점수(current condition score)를 제시하였고 세로축에는 내부침식으로 인한 연간파괴확률을 나타내었다.

영국의 환경식품농무부에서는 과거 영국에서 발생한 댐의 붕괴 또는 사고 발생빈도 해석에 의한 방법(historic performance method)을 토대로 댐의 ‘현재 상태’와 ‘내부침식으로 인한 파괴확률’과의 상관관계를 도출하였고, Heo and Chung(2016)은 이벤트 트리를 활용하여 댐의 최상의 상태와 최악의 상태에 대한 파괴확률을 각각 구하고 두 점을 연결하여 상관관계를 도출하였다(Fig. 1).

이와 같이 댐의 상태와 내부침식으로 인한 파괴확률 값의 상관그래프가 제시되면 댐의 내부침식과 관련된 댐의 상태에 대한 내부침식으로 인한 파괴확률을 쉽게 구할 수 있다. 하지만 댐의 내부침식과 관련된 댐의 상태를 정량화 하는 것에 대한 명확한 기준이 제시되지

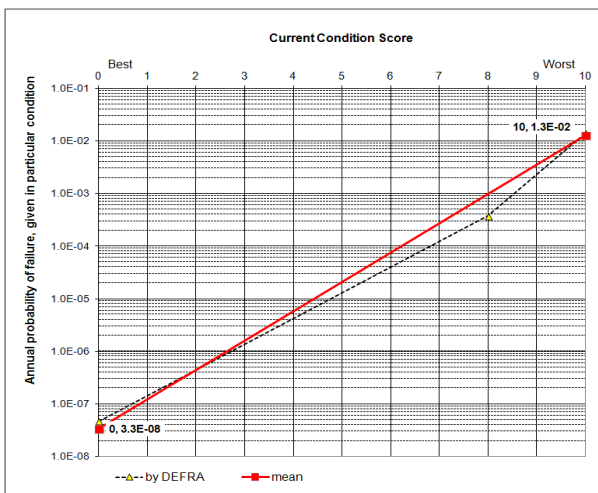


Fig. 1. Graph for plotting annual probability of failure vs. Current condition score (Heo and Chung, 2016)

않으면 여러 명의 댐 관리자들이 많은 수의 댐을 나누어 점검해야 하는 경우 동일한 댐 상태에 대하여도 댐의 상태점수가 상이하게 제시될 수 있으므로 일관성 있는 내부침식으로 인한 댐 파괴확률 값을 얻기가 어려울 수도 있다.

이에 본 연구에서는 댐 안전관리를 위하여 정기적으로 행해지는 ‘댐 안전점검의 결과’로부터 얻어지는 ‘내부 침식과 연관된 댐의 다양한 상태’들을 분석하여 내부침식과 관련하여 자주 나타나는 대표상태를 설정하고 설정된 대표상태를 전문가 설문을 통하여 0에서 10 점 사이의 점수로 정량화하였다.

또한 전문가 설문조사 시 획득한 각 상태별로 부여 가능한 최소점수와 최대점수를 활용하여 댐 상태별로 ‘부여가능한 점수의 범위’도 추가로 제시하였다.

2.2 내부침식과 관련된 댐의 대표상태 설정

댐의 안전점검은 댐 관리기관에 속한 시설관리자에 의하여 정기적으로 수행되며 대부분 육안으로 이루어진다. 댐 시설의 여러 부위 중 내부침식 현상이 육안으로 나타나는 부위는 대부분 제체의 하류부 사면이다.

이에 17,500여개 댐의 하류부 사면에 대한 안전점검 결과를 검토한 결과, 댐의 내부침식 현상과 연관되어 나타나는 가장 대표적이면서 다양한 내부침식의 진행 정도를 보여주는 댐의 상태들로 ‘누수(seepage)’, ‘토사를 동반한 누수(seepage carrying fines)’, ‘누수 많음(large amount of seepage)’, 그리고 ‘토사를 동반한 누수 많음(large amount of seepage carrying fines)’의 4가지로 분류하였다.

2.3 전문가 설문을 통한 댐 상태의 정량화 및 설문 수행의 가이드라인

필댐에서 나타나는 내부침식과 연관된 대표적인 4가지 상태에 대하여 댐 안전진단 전문가 36명을 대상으로 설문조사를 실시하여 내부침식과 연관된 4가지 댐의 상태를 정량화하였다. 설문 참여자로는 농업용 댐의 안전진단을 주된 업무로 하는 한국농어촌공사 기술안전품질원 시설진단부 직원(27명), 해당분야의 연구개발을 담당하는 농어촌연구원 시설방재팀 연구자(4명), 지반공학 전공 대학교수(2명), 댐 안전진단 전문 엔지니어링사 자문위원(3명)으로 다양한 댐 안전관리 전문가로 구성

되었다.

내부침식과 연관된 대표적인 4가지 댐 상태의 정량화를 위하여 가장 양호한 댐 상태를 0점, 수위를 긴급히 낮추어야 할 정도로 위급한 상태를 10점으로 정하고, 이들 4가지 상태의 정량화에 대한 설문수행을 돕기 위하여 가이드라인을 제시하였다. 다음은 설문조사 시 사용된 가이드라인이다.

- 1) 댐의 현재상태가 수위를 긴급히 낮추어야 할 정도로 위급한 최악의 상태를 10점, 최상의 상태를 0점으로 가정하고, 0점에서 10점 사이 범위 내에서 각 상태에 해당할 수 있는 점수를 부여한다.
 - 2) 점수부여의 순서는 다음의 두 단계를 따른다.
 - 1단계 : 먼저 댐의 상태에 해당하는 ‘가장 적절한 값 (most likely)’ 점수를 부여한 후
 - 2단계 : 각 상태에 대하여 부여할 수 있는 하한 값 (min)과 상한 값(max)을 각각 부여한다.
 - 3) 각 상태에 대한 점수는 중복되게 부여가 가능하며, 부여하는 점수는 정수 값으로 입력한다.
 - 4) ‘가장 적절한 값(most likely)’의 점수가 ‘하한 값 (min)’ 점수와 ‘상한 값(max)’ 점수의 중간 값일 필요는 없다.
- 설문조사에 사용된 양식은 Table 2와 같다.

2.4 이상치 제거(Outlier Removal)

설문조사의 결과 값 중에서 일부 전문가들이 부여한 값이 나머지 전문가들이 제시한 값들의 범위에서 상당히 벗어난 아주 작은 값이나 아주 큰 값이 제시된 경우는 이상치(Outlier)로 판단하고 이 값들을 제거한 후에 나머지 값들만을 산술평균하여 댐의 각 상태에 해당하는 점수로 결정하였다.

이상치 제거 방법으로는 관측된 데이터 중에서 이상치를 제거하는 방법으로 많이 사용하는 사분위수 계산 (Tukey’s test)에 의한 방법을 사용하였다. 사분위수는

데이터 표본을 낮은 순에서 높은 순으로 정렬한 후 4등분 했을 때 각 등위에 해당하는 값을 의미한다. 여기서 Q1(Lower quartile)은 첫 번째 분위수로 25번째 백분위수에 해당하며, Q3(Upper quartile)은 세 번째 분위수로 75번째 백분위수를 의미한다. IQR은 세 번째 분위수 Q3에 해당하는 값과 첫 번째 분위수 Q1에 해당하는 값의 차이를 나타낸 것이다.

Lower inner fence : $Q1 - 1.5 \times IQR$, Upper inner fence : $Q3 + 1.5 \times IQR$

where, Q1 : Lower quartile (the median of the lower half of a set of data.)

Q3 : Upper quartile (the median of the upper half of a set of data.)

IQR : Interquartile Range (IQR = Q3 - Q1)

상기의 식에서 lower inner fence보다 낮은 값이거나 upper inner fence보다 높은 값을 이상치로 판단한다.

2.5 전문가 설문조사 결과

댐의 상태를 0점과 10점 사이의 점수로 정량화하기 위하여 댐 안전진단 전문가를 대상으로 실시한 설문조사 결과를 정리하였다. 전문가를 대상으로 실시한 댐의 상태에 대한 설문결과 값들 중 이상치 값의 유무를 검토한 결과, ‘누수(seepage)’ 상태에 대한 설문응답 결과 중 최솟값 2점과 최댓값 5점은 모두 이상치 판단기준의 상하한 값 범위인 -1.0과 7.0이내에 속하므로 해당 상태에 대한 설문결과 값 중 이상치는 없는 것으로 나타났고, ‘누수 많음(large amount of seepage)’ 상태에 대한 설문응답 결과 중 이상치 판단기준 범위인 4.13과 9.13을 벗어나는 3점과 4점은 각각 이상치로 판단되었다. 이와 동일한 방법으로 ‘토사 동반 누수(seepage carrying fines)’ 상태의 경우에는 8점과 9점, ‘토사 동반 누수 많음(large

Table 2. Questionnaire form

Current conditions	Scores (Best condition 0, Worst condition 10)		
	Min (0~10)	Most likely (0~10)	Max (0~10)
1. Seepage			
2. Large amount of seepage			
3. Seepage carrying fines			
4. Large amount of seepage carrying fines			

amount of seepage carrying fines)’ 상태의 경우에는 5점과 6점이 각각 이상치로 판단되었다(Table 3).

Table 3에서는 이상치를 포함한 산술평균 결과를 나타내었고, Table 4에서는 이상치로 판단된 값들은 제거한 후, 나머지 값들만을 산술평균하여 댐의 각 상태에 해당하는 ‘가장 적절한 값’을 나타내었다.

2.6 댐 상태별 부여가능 점수범위(Possible Score Range)의 결정

상기와 같이 댐의 각 상태에 대한 평균값이 제시되어도, 개별 댐의 상태가 상기에서 제시한 4가지 대표 상태에는 속하지만 그 상태의 정도에 차이가 있거나, 4가지 이외의 현상이 나타나는 경우에는 댐 상태를 점수로 정량화하기는 쉽지 않을 수도 있다. 따라서 각 상태에 해당하는 특정 점수만을 제시하는 것 보다 각 상태별로 ‘부여가능한 점수의 범위’를 제시하여 댐 현재 상태를 정량화하는 것을 도움 필요가 있다.

하지만 댐의 특정 상태에 대하여 부여가능한 점수의 범위를 제시하는 것은 현장 댐 관리자에게 댐 상태의 정량화에 도움을 주기도 하지만 동시에 댐 관리자의 댐 점수 결정의 폭을 제한할 수도 있으므로 부여가능 점수의 범위를 ‘1차 범위’와 ‘2차 범위’ 두 가지로 제시하였다.

여기서 ‘1차 범위’는 일반적인 경우의 댐 상태에 적용 가능한 범위로서 설문에 참여한 전문가들이 각각의 상태들에 부여한 하한 값들과 상한 값들의 평균값을 ‘1차 범위’의 경계 값으로 제시하였고, ‘2차 범위’는 일반적이지 않은 댐 상태에 대한 댐 관리자의 주관적 결정의 폭을 최소한으로 제한하기 위한 것으로서 전문가들이 각각의 상태에 부여한 하한 값들 중 가장 낮은 값과 상한 값들 중 가장 높은 값을 ‘2차 범위’의 경계로 설정하여 일반적이지 않은 경우의 댐 상태에 대한 점수부여 시 댐 관리자들의 의견이 가능한 제한받지 않도록 하였다(Table 5).

Table 3. Results before removal of outliers

Current condition	Mean	Min.	Max.	Mode	Var.	SD.	Upper/Lower limit	
							Lower fence	Upper fence
1. Seepage	3.2	2	5	3	1.1	1.1	-1.0	7.0
2. Large amount of seepage	6.8	3	9	7	1.8	1.3	4.1	9.1
3. Seepage carrying fines	5.5	3	9	5	1.7	1.3	3.5	7.5
4. Large amount of seepage carrying fines	8.3	5	10	9	1.1	1.0	6.5	10.5

Table 4. Results after removal of outliers

Current condition	Mean	Min.	Max.	Mode	Var.	SD.	Upper/Lower limit	
							Lower fence	Upper fence
1. Seepage	3.2	2	5	3	1.1	1.1	0.9	5.9
2. Large amount of seepage	6.8	6	8	7	0.6	0.8	4.5	8.5
3. Seepage carrying fines	5.3	4	7	5	1.3	1.1	3.5	7.5
4. Large amount of seepage carrying fines	8.4	7	10	9	0.6	0.8	6.5	10.5

Table 5. Results of possible score ranges

Current condition	Minimum		Maximum		Most likely	1 st range (possible score range)	2 nd range (Extended possible score range)	DEFRA proposed (Maximum value presented only)
	Lowest	Mean	Mean	Highest				
1. Seepage	1.0	2.2	4.6	7.0	3.2	2 - 5	(1 - 7)	-
2. Large amount of seepage	2.0	5.2	8.2	10.0	6.8	5 - 9	(2 - 10)	6
3. Seepage carrying fines	1.0	3.7	6.8	9.0	5.3	3 - 7	(1 - 9)	10
4. Large amount of seepage carrying fines	5.0	6.9	9.5	10.0	8.4	6 - 10	(5 - 10)	10

3. 댐 상태의 정량화 결과의 적용성 평가 및 논의

이상에서 제안한 ‘댐 상태별 가장 적절한 값’과 ‘부여 가능 점수의 범위’를 활용하여 다양한 상태의 댐들에 대한 Case study를 실시하고 전문가 설문조사 결과의 적용성을 평가하였다. 아울러 본 연구에서 제안하는 방법의 장점 및 적용의 한계를 논의하였다.

3.1 Case Study를 통한 적용성 평가

‘댐 상태별 가장 적절한 값’과 ‘부여가능 점수의 범위’를 활용하여 다양한 상태의 댐들에 대한 Case study를 실시하였다.

Case study를 통하여 평가하고자 하는 두 가지 사항은 다음과 같다.

- (1) 본 글에서 제시한 절차와 방법에 따른 결과가 실제로 위험한 댐을 위험하다고 평가하고 안전한 댐은 안전하다고 일관성 있게 평가하는가? 라는 점과
- (2) 위험도 해석에서 하나의 댐의 파괴확률은 여러 파괴원인들에 의한 파괴확률 값들의 합으로 산정되므로, 본 연구에서 제시되는 ‘내부침식으로 인한 댐 파괴확률 값’이 ‘월류, 지진 등의 다른 파괴원인들에 의한 파괴확률 값’들과 합산되는 것이 충분히 합리적인 수준인가? 이다.

첫 번째로 본 연구에서 제시한 절차와 방법에 따른 결과의 일관성에 대한 검증을 위하여 댐의 상태를 정량화한 댐 상태 점수(0점~10점)와 하류사면에 대한

안전점검의 등급(A, B, C, D, E) 결과와의 상관성을 분석하였다. 이는 댐 하류사면의 안전등급의 결과가 댐 내부침식에 대한 시설관리자의 의견이 가장 직접적으로 반영되어있기 때문이다. 아울러 이러한 일관성에 대한 검증은 결과 값들의 상대적 적절성에 대한 검증이기도 하다.

그리고 이러한 방법의 결과가 다른 파괴원인들에 의한 파괴확률 값들과 합칠 수 있는 정도의 합리적인 수준의 값, 즉 결과 값들의 절대적 수준에 대한 적절성 검증을 위하여 실제로 붕괴가 발생되었거나, 긴급하게 수위를 낮춘 경험을 가진 댐들을 대상으로 파괴확률 값의 절대적 규모를 검토하였다.

3.1.1 Case study 결과

파괴확률의 절대적 규모에 대한 검증과 현재 상태에 대하여 부여된 파괴확률 값들의 일관성 검증을 위하여 내부침식과 관련된 현상을 보이는 31개소 댐을 대상으로 case study를 실시하였다.

31개소 댐을 대상으로 ‘개별 댐의 전체 안전등급 결과(overall rating)’, ‘개별 댐의 제체 하류측 사면부의 안전 등급 결과(downstream rating)’, 그리고 ‘내부침식과 관련된 댐 상태에 대한 설명(description)’에 대한 자료를 각각 수집하였으며 내부침식과 관련된 댐 상태에 대한 설명을 앞서 제시한 4가지 대표상태 중의 하나로 분류하여 Table 6에 나타내었다.

31개 댐에 대한 내부침식과 관련된 댐 상태는 ‘누수’ 20개소, ‘토사 동반 누수’ 6개소, ‘누수 많음’ 5개소로 분류되었고, 하류측 사면에 대한 안전등급의 결과는 B

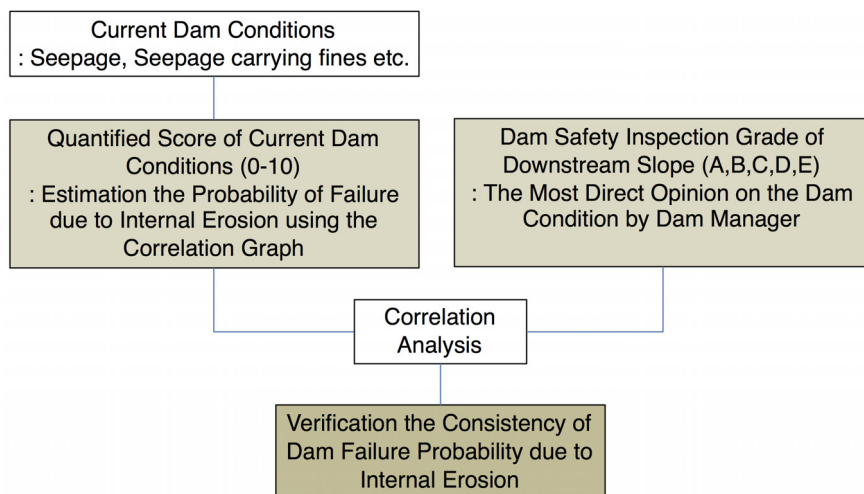


Fig. 2. Correlation Analysis for Verifying Consistency of Failure Probability Estimation Due to Internal Erosion

Table 6. Case Study results for Consistency Verification

Name of dam	Overall Rating	D.S. Rating	Current Dam Condition	Classified Condition	Most likely score	Possible score range	Scores
dam1	C	C	Seepage on the right side of the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam2	B	C	Small amount of seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam3	C	C	Small amount of seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam4	C	D	Large amount of seepage around conduit	Large amount of seepage	6.76	5-9	8
dam5	C	D	Wet zone on the left side of conduit	Large amount of seepage	6.76	5-9	7
dam6	C	B	Seepage on the right side of the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam7	B	B	Seepage on the left side of the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam8	C	C	Small amount of seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam9	C	C	Seepage around conduit (suspected fine-grain run-off)	Seepage carrying fines	5.30	3-7	5
dam10	C	C	Seepage on the left side of the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam11	C	C	Small seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam12	C	C	Seepage on the downstream slope and around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam13	B	E	Seepage across the middle part of the embankment	Large amount of seepage	6.76	5-9	9
dam14	C	D	Seepage carrying fines	Seepage carrying fines	5.30	3-7	6
dam15	C	C	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam16	D	D	Seepage, Erosion dam crest, Partial Settlement	Seepage carrying fines	5.30	3-7	5
dam17	C	C	Seepage around conduit, Wet area on the downstream	Large amount of seepage	3.19	2-5	7
dam18	C	C	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam19	B	C	Seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam20	C	C	Seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam21	B	B	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam22	B	B	Small amount of seepage on the downstream slope	Seepage	3.19	2-5	3
dam23	A	B	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam24	B	B	Seepage carrying fines around conduit	Seepage carrying fines	5.40	3-7	5
dam25	C	C	Seepage on the downstream, Partial settlement of dam crest	Seepage carrying fines	3.19	2-5	5
dam26	B	B	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam27	C	D	Seepage carrying fines around conduit	Seepage carrying fines	5.30	3-7	6
dam28	B	B	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam29	B	B	Wet area on the downstream	Seepage	3.19	2-5	4
dam30	C	C	Seepage around conduit	Seepage	3.19	2-5	3
dam31	C	D	Large amount of seepage around conduit	Large amount of seepage (2013 collapsed)	5.30(2003) 6.76(2012)	3-7 5-9	9

Note : A (Best condition), B (Minor defects in auxiliary members), C (Minor defects in major members or extensive defects in auxiliary members), D (Conditions requiring urgent repair and reinforcement due to defects in major members), E (Conditions requiring immediate prohibition of use of facilities due to serious defects in major members)

등급 9개소, C등급 15개소, D등급 6개소와 E등급 1개소로 조사되었다.

이들 각 댐의 상태를 댐 상태별 ‘가장 적절한 값’ 및

‘부여가능 점수 범위’를 활용하여 각 댐의 상태에 대한 점수를 부여하였다. 부여된 점수는 댐의 상태에 따라 3점에서 9점의 범위를 보였다.

3.1.2 Case study를 통한 적용성 평가

먼저 본 글에서 제시한 방법이 댐의 실제 위험정도를 일관성 있게 반영하는지를 검증하기 위하여 각 ‘댐의 상태에 대하여 부여한 점수’와, 댐 내부침식과 직접적인 연관이 있는 ‘하류측사면의 안전등급 결과’를 비교하였다(Table 7).

댐 하류측 사면의 B, C등급 간의 댐 상태의 차이를 구분하기 어려워 B, C등급을 하나의 등급으로 구분한 평균, D등급의 댐 상태점수 평균, E등급의 댐 상태점수 평균을 댐 상태별 정량화된 점수의 평균과 각각 비교하였다. 비교 결과 B, C등급 그룹 댐의 상태점수 평균(3.60), D등급 그룹 댐의 상태점수 평균(6.03), E등급 그룹 댐의 상태점수 평균(6.76) 순으로 증가하여 본 글에서 제시한 방법이 댐의 실제 위험 정도를 일관성 있게 반영함을 보여주었다.

두 번째로, 이러한 방법의 결과가 다른 파괴모드에 의한 파괴확률 값들과 합산되어질 수 있는 정도의 합리적인 수준의 값, 즉 결과 값들의 절대적 수준에 대한 적절성 검증을 위하여 실제로 붕괴가 발생되었거나, 긴급하게 수위를 낮춘 경험을 가진 댐들을 대상으로 파괴확률 값들을 검토하였다.

Case study 대상 댐 31개소 중에서 13번 댐과 31번 댐은 각각 많은 누수의 발생으로 긴급히 수위를 낮춘 경우와 복통 주변을 통한 내부침식 발생으로 붕괴를 경험한 댐이다. 이들 댐의 내부침식으로 인한 파괴확률 추정 값은 $4.0 \times 10E-3/year$ 으로 댐 실제의 노후 또는 위험 정도를 잘 반영하여 주고 있다.

3.2 제안 방법의 장점 및 적용의 한계

3.2.1 제안 방법의 장점

본 연구를 통하여 내부침식과 관련된 댐 상태를 일관성 있게 정량화하는 방법을 제안하고 Case study를 통하

여 방법의 적용성을 평가하였다. 이는 Heo and Chung (2016)이 제시한 댐의 상태와 내부침식으로 인한 파괴확률간의 상관그래프를 활용함으로 많은 수의 댐에 대한 내부침식으로 인한 상대적인 파괴확률을 일관성 있고 비교적 간단하게 정량화가 가능하게 도와준다.

또한 본 연구를 통하여 내부침식으로 인한 파괴확률을 간단하게 정량화가 가능함으로 월류나 지진으로 인한 파괴확률들과 합산하여 댐의 전체 파괴확률 산정이 가능하다. 이 과정에서 각 파괴원인들에 의한 파괴확률 값은 전체 파괴확률 값 산정에서 절대적인 값의 규모를 가지므로 기존의 등급제에 의한 댐 안전관리 방법이 가지는 댐 시설의 부위별 가중평균에 의한 댐 안전관리의 한계점을 극복할 수 있게 된다.

예를 들어, 앞의 Case study에 사용된 dam 31에 대하여 기존의 안전관리 방법을 적용한 경우를 살펴보면 댐 하류사면의 안전등급은 D등급이지만 나머지 부위의 안전등급이 양호하여 댐 전체의 등급은 C등급으로 분류되었다. 이는 기존의 안전관리 방법이 위험한 부위의 규모가 작은 경우에는 댐의 실제 위험 정도를 충분히 반영하지 못하는 경우를 보여준다. 하지만 위험도 해석 방법을 활용한 댐 안전관리 방법에 의하면 내부침식에 의한 파괴확률 값은 $4.0 \times 10E-3/year$ 으로 다른 파괴원인들에 의한 파괴확률들과 합산 시에도 절대적으로 높은 파괴확률 값의 규모를 가지므로 실제로 위험한 댐을 실제로 위험한 댐으로 인지할 수 있게 됨을 보여 준다.

3.2.2 적용의 한계

앞 절에서 제시한 정량적 파괴확률 산정방법의 적용성을 검토하기 위하여 각각의 댐을 대상으로 제안 방법을 적용한 결과, 각각의 댐들의 내부침식으로 인한 상대적 파괴확률 값을 적절히 반영함을 보여주었다. 하지만 댐 상태에 대한 점수 부여 시, 부여가능한 점수의 범위가 넓어 동일한 상태에 대한 내부침식으로 인한 댐 파괴

Table 7. Comparison of the Safety rating of the downstream slope and Current dam condition score

D.S. rating	No. of dams	Current Dam Condition (Score)	Score averaged
B, C	24 (B 9, C 15)	20 Seepage (3.19) 3 Seepage carrying fines (5.30) 1 Large amount of seepage (6.76)	3.60 = $(3.19 \times 20 + 5.3 \times 3 + 6.76 \times 1) / 24$
D	6	3 Seepage carrying fines (5.30) 3 Large amount of seepage (6.76)	6.03 = $(5.3 \times 3 + 6.76 \times 3) / 6$
E	1	1 Large amount of seepage (6.76)	6.76
Total	31	-	-

확률 값의 차이도 크게 나타났다.

예를 들면, Dam 31의 경우 실제 붕괴를 경험한 저수지이지만 2012년의 점검결과에 의한 부여가능한 점수의 범위는 최소 5점에서 최대 9점으로, 이를 파괴확률 값으로 환산하면 $2 \times 10^{-5}/\text{year}$ 에서 $4 \times 10^{-3}/\text{year}$ 까지로 두 값의 차이가 최대 200배정도로서 댐 상태에 대한 점수 결정에 따라 파괴확률 값은 상당한 차이가 발생할 수 있음을 보여준다. 이는 댐 상태에 대한 점수 부여 시, 댐의 상태에 적합한 점수를 부여하기 위한 별도의 세부기준이 요구됨을 보여준다.

또한 본 연구의 case study에서는 Heo and Chung (2016)이 제시한 ‘댐의 상태’와 ‘내부침식으로 인한 파괴확률’간의 상관그래프를 활용하여 댐의 내부침식으로 인한 파괴확률을 산정하여 본 연구 결과의 적용성을 검토하였다. 연구결과와 적용성 검토결과 본 상관그래프에는 댐의 각 상태에 대한 상대적인 파괴확률 값을 적절히 제시하고 있지만 당초 상관그래프를 작성 시 댐의 최고상태(best condition)와 최악의 상태(worst condition) 두 고정점(anchor point)에 대하여만 파괴확률을 산정하여 연결함으로 상관그래프가 직선으로 연결되어 ‘댐의 상태’와 ‘파괴확률’간의 선형관계를 보여주었다. 하지만 두 고정점 사이의 ‘댐 상태’와 ‘파괴확률’간의 상관관계가 선형관계를 가지는지에 대한 추가적인 검토가 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 내부침식과 관련된 댐의 여러 상태들에 대한 정량화의 일관성을 돕기 위하여 전문가 설문문을 통하여 댐 내부침식과 관련된 대표적인 4가지 상태에 대한 ‘가장 적절한 점수(most likely score)’와 각 상태에 ‘부여가능한 점수의 범위(possible score range)’를 제시하였으며, 제시된 결과를 이용하여 Case study를 통한 본 연구방법의 적용성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 17,500여개 농업용 댐의 하류부 사면에 대한 안전 점검 결과를 검토한 결과, 댐의 내부침식 현상과 연관되어 나타나는 가장 대표적인 댐의 상태로는 ‘누수(seepage)’, ‘토사를 동반한 누수(seepage carrying fines)’, ‘누수 많음(large amount of seepage)’, 그리고 ‘토사를 동반한 누수 많음(large amount of seepage

carrying fines)’의 4가지로 분류되었다.

- (2) 이들 4가지 상태에 대하여 댐 안전진단 전문가들을 대상으로 설문을 실시하여 0점(가장 양호한 댐 상태)에서 10점(수위를 긴급히 낮추어야 할 정도로 위급한 상태) 사이 범위 내에서 각 상태에 해당할 수 있는 점수를 부여하도록 하였다. 각 상태에 부여된 점수 중에서 이상치(Outlier)로 판단된 값들을 제거한 나머지를 산술평균하여 ‘누수(seepage)’ 상태에 대한 점수는 3.19, ‘토사를 동반한 누수(seepage carrying fines)’ 상태에 대한 점수는 5.30, ‘누수 많음(large amount of seepage)’ 상태에 대한 점수는 6.76, 그리고 ‘토사를 동반한 누수 많음(large amount of seepage carrying fines)’ 상태의 점수는 8.40으로 댐의 각 상태에 해당하는 ‘가장 적절한 값’을 제시하였다.
- (3) 본 연구의 적용성을 평가하기 위해 댐 내부침식과 직접적인 연관이 있는 ‘하류측 사면의 안전등급 결과’와 본 연구에서 제시한 ‘댐 상태별 점수’를 비교하였다. 하류측 사면의 상태등급과 해당 댐들의 상태점수의 평균을 비교한 결과, B, C등급 그룹 댐의 상태점수 평균(3.60), D등급 그룹 댐의 상태점수 평균(6.03), E등급 그룹 댐의 상태점수 평균(6.76) 순으로 증가하여 본 연구에서 제시한 방법이 댐의 실제 위험 정도를 일관성 있게 반영함이 확인되었다.
- (4) 또한 본 연구에서 제시하는 내부침식으로 인한 파괴확률의 값이 다른 파괴모드에 의한 파괴확률 값들과 합산되어질 수 있는 정도의 합리적인 수준의 절대적인 값을 제공하는지 검증은 위하여 실제로 붕괴가 발생되었거나 긴급하게 수위를 낮춘 경험을 가진 댐들을 대상으로 추정된 파괴확률 값이 $4.0 \times 10^{-3}/\text{year}$ 으로 산정되어 댐 실제의 노후 또는 위험 정도를 잘 반영함이 확인되었다.

본 연구에서 제안한 방법을 통해 여러 명의 댐 관리자들이 많은 수의 댐을 나누어 점검해야 하는 경우에도 댐의 상태점수가 일관성 있게 제시되고, 내부침식과 관련된 댐 상태에 대한 파괴확률 값을 합리적 수준에서 정량화가 가능함을 확인하였다. 하지만 본 연구결과에서 제시하는 부여가능 점수의 범위가 넓어 이를 보완할 수 있는 댐의 상태에 적합한 점수를 부여하기 위한 별도의 세부기준이 추가되고, 기존의 선형관계로 제시된 댐 현재상태와 내부침식으로 인한 파괴확률값의 상관성이 보다 세부적으로 검토, 제시되면 많은 수의 댐에 대한

내부침식으로 인한 파괴확률을 간단하고 보다 신뢰성 있게 정량적으로 추정이 가능할 것이며 이는 효율적인 댐 안전관리를 도울 것이다.

참고문헌 (References)

1. Brown, A.J. and Gosden, J.D. (2004), "Interim Guide to Quantitative Risk Assessment for UK Reservoirs", pp35-43 and Appendix C, pp.124-126.
2. Bureau of Reclamation and Corps of Engineers (2012), "Chapter 26: Internal Erosion", *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*. Draft, U.S. Bureau of Reclamation and Corps of Engineers, Denver, CO.
3. Department for Environment Food and Rural Affairs (2013), "Guide to risk assessment for reservoir safety management", Volume 2.
4. Foster, M., Fell, R., and Spannagle, M. (2000), "A Method for Assessing the Relative Likelihood of Failure of Embankment Dams by Piping", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, No.5, pp.1031-1033.
5. Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G., and Vroman, N. (2008), "A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping", URS Australia Pty Ltd. Sydney, Australia. [Prepared for the US Bureau of Reclamation]
6. Heo, G. and Chung, C.K. (2016), "Quantification on the probability of dam failure due to internal erosion using event tree analysis", *Proc., 84th ICOLD Annual Meeting 2016*, Johannesburg, S. Africa.
7. Scott, G.A. (2011), "The Practical Application of Risk Assessment to Dam Safety", Georisk 2011, pp.129-168.

Received : October 15th, 2018

Revised : April 2nd, 2019

Accepted : April 2nd, 2019