

시설물 위험도 평가기법 개선에 대한 제안

흙댐의 누수와 관련하여

조권상 kscho@ekr.or.kr 한국농어촌공사 기술안전품질원 진단조사부장

박태건 ptk@ekr.or.kr 한국농어촌공사 기술안전품질원 진단조사부 차장

1. 서론

현재 우리나라에 축조되어 있는 저수지를 포함한 댐 중에서 1960년 이전에 건설된 댐이 전체의 약 50%를 차지한다. 1960년대 이전에는 흙댐이 주류를 이루었으며, 기존 관개용 댐의 95% 이상이 흙댐으로 되어있다. 1900년대 전 세계적으로 발생한 주목할 만한 댐 붕괴 사례 중 제체 및 기초의 침투류 및 파이핑으로 붕괴한 비율은 50%를 차지한다.

2013년 4월 12일 경주 산대저수지(흙댐, 높이 12.5m, 총저수량 24.6만 m^3)의 제체가 붕괴되는 사고가 발생했다. 다행히 인적 피해는 없었고, 물적 피해가 일부 발생하여 불행 중 다행스러운 일이었다.

사고 직후 여러 전문가들이 붕괴 원인을 조사한 결과 제체와 복통 사이의 접촉부 누수가 지속돼 제체 내부에 유로가 형성되어 흙이 유실되고, 유로가 점차 확대되어 제체가 붕괴된 것으로 보고 있다.

흙댐은 제체를 구성하는 재료를 건설현장 주위에서 쉽게 구할 수 있기 때문에, 오랜 옛날부터 오늘날에 이르기까지 많이 축조되어 왔다. 축조 후 장기간이 경과하여 노후화된 댐의 제체가 각종 요인에 의해 파괴되는 경우 인적, 물적 피해가 크다. 따라

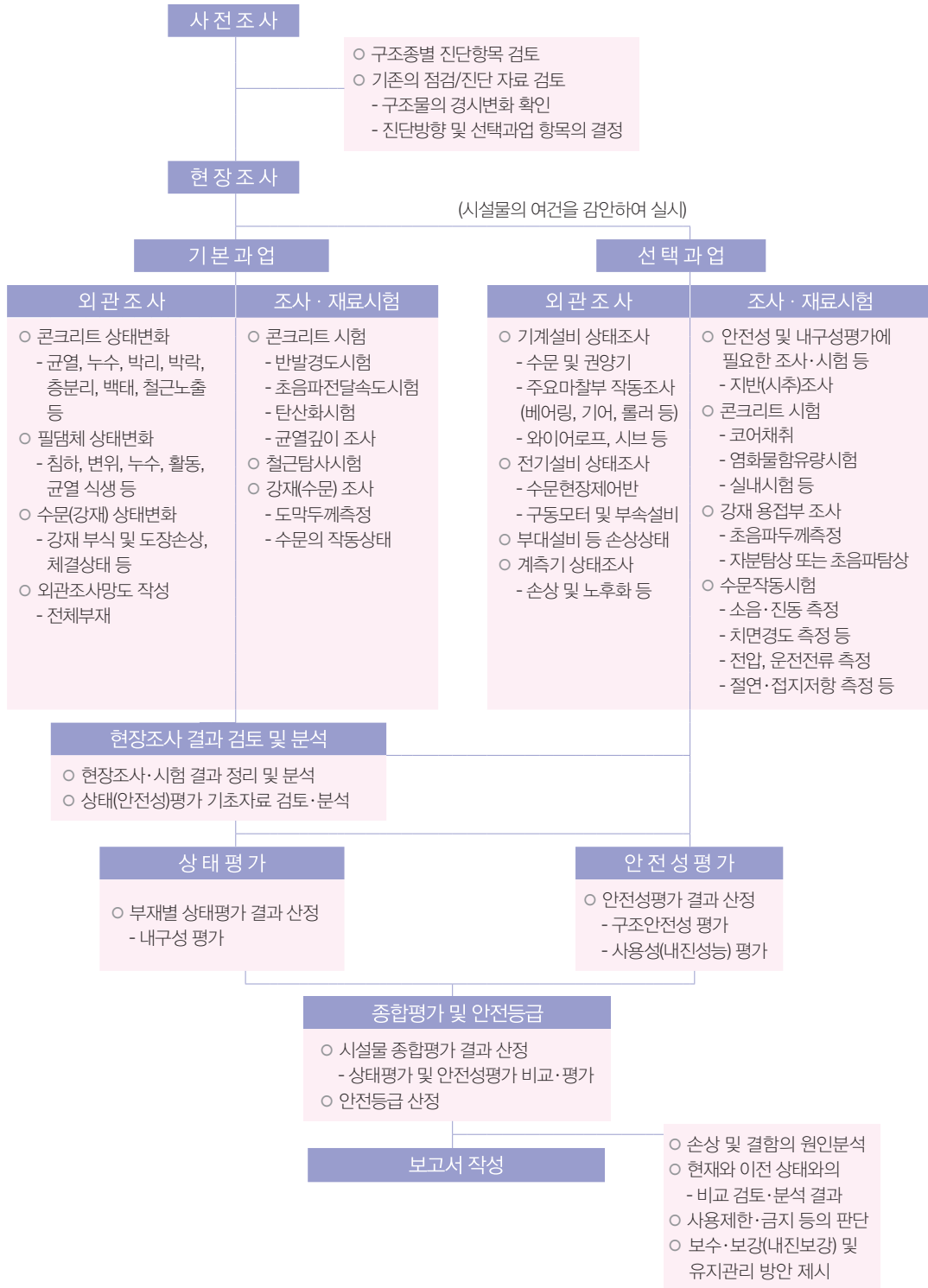
서 이들에 대한 적절하고 타당성 있는 유지관리를 위해서는 장기거동시의 특성 검토를 통한 제체의 종합적인 안정성 검토가 요망된다.

그리고, 댐 축조역사의 증가에 따라 내구년한이 경과된 흙댐도 많이 존재하므로 재해의 대비차원에서 장기간의 침투수의 거동을 정확하게 파악할 필요가 있으나, 이들에 대한 연구가 미진한 실정이다. 따라서 금회 연구에서는 흙댐의 종합적인 안정성 평가를 위하여 기존의 흙댐의 누수 상태평가 항목 및 기준을 물리탐사(전기비저항 탐사) 및 시추조사(현장투수시험 및 표준관입시험) 결과와 융합하여 누수에 관한 효율적인 위험도 평가기법을 제시하고자 한다.

2. 농업생산기반시설 정밀안전진단의 절차

댐에 대한 안정성 평가는 일반적으로 정기적인 외관조사, 계측자료 분석과 시추조사를 위주로 제체에 대한 안전진단을 시행하여 왔다. (그림 1)은 농업생산기반시설 정밀안전진단의 흐름을 나타내고 있다.

그림 1. 농업생산기반시설 정밀안전진단 흐름도



3. 현황 및 문제점

시설물의 위험도를 평가하기 위하여 시설물의 결함 정도를 제시하는 상태 등급 평가의 적정성과 객관성 확보를 위하여 농업생산기반시설 안전진단실무지침에 의거 각 부재로부터 발견된 상태변화(결함, 손상, 열화)를 근거로 상태평가 기준에 따라 평가를 실시하고, 시설물의 전체 부재에 대한 외관 조사방도를 작성하여 부재별로 상세히 상태평가를 실

시하고 있는 것이 현재의 평가기법이다.

(표 1, 2)는 현재 적용하고 있는 필댐의 각 부재별 누수에 대한 상태평가 항목 및 기준을 나타낸 것으로 육안조사와 누수량 측정에 의해 제체 누수에 대한 위험도를 평가하고 있다.

이처럼, 필댐의 각 부재별로 누수에 대한 상태평가 내용이 단순하여 종합적으로 평가기준을 보완할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

표 1. 필댐(상류사면)의 상태평가 항목 및 기준

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
누수	중요 결함	1.0	a	5	○ 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○ 댐체를 통한 누수가 일정한 양호한 상태
			c	3	○ 댐체를 통한 누수가 크게 증가하지 않는 보통의 상태
			d	2	○ 댐체를 통한 초과누수로 저수지 수면에 거품 또는 소용돌이 현상이 시작되는 심각한 상태
			e	1	○ 댐체를 통한 초과누수로 저수지 수면에 거품 또는 소용돌이 현상, 저수지 수위의 저하, 함몰 등의 현상이 매우 심각한 상태

표 2. 필댐(하류사면)의 상태평가 항목 및 기준

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
누수	중요 결함	1.0	a	5	○ 댐체의 과도한 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	○ 댐체의 과도한 누수가 거의 없는 양호한 상태 (0.1 l/s 이하)
			c	3	○ 댐체의 과도한 누수의 징후가 시작되는 경미한 상태 (0.1 ~ 1.0 l/s)
			d	2	○ 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 평소 누수량보다 증가시 (1.0 l/s 이상)
			e	1	○ 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 누수의 온도변화가 심하고, 비강우시 누수량이 평소 누수량의 배 이상 증가시 (1.0 l/s 이상)

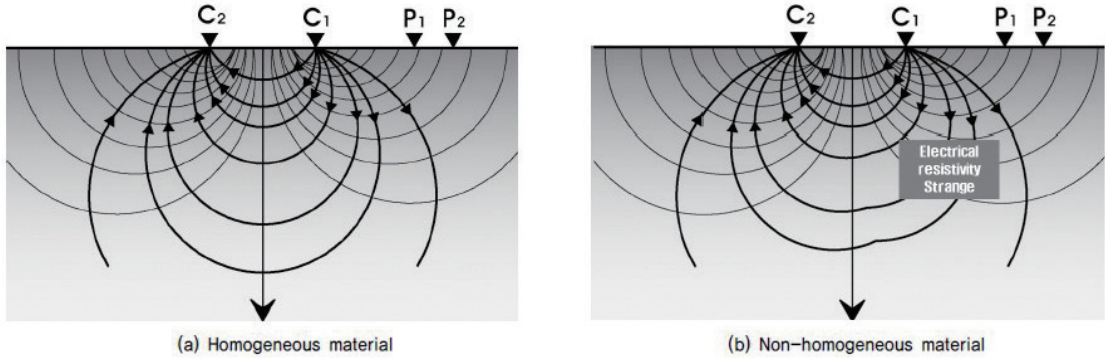


그림 2. Distribution of electrical current and equipotential (Kim, 1996)

4. 평가방법 개선에 대한 제안

4.1 물리탐사(전기비저항 탐사)결과를 응용한 평가기준 제안

1) 전기비저항 탐사의 개요

전류를 흐르지 못하게 하는 특성을 그 물체의 전기 저항(R)이라 하는데, 만약 도선에 전류를 흘려 보내주면 도선은 그 도선을 이루는 물체의 성질과 길이(L)에는 비례하고, 단면적(A)에는 반비례하는 (식 1)과 같은 전기 저항을 갖게 된다.

식 1

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

여기서, ρ 는 비례상수로서 물체의 모양, 크기에는 관계없는 물체 고유의 전기적 특성을 나타내는 것으로 이를 전기비저항(Resistivity)이라 하며, 단위는 ohm-m가 된다. 즉, 전기비저항이란 단위체적 물질이 갖는 저항이라고 정의할 수 있다.

2) 전기비저항 탐사의 종류

전기비저항 탐사에서는 (그림 2)에서와 같이 전류 주입을 위한 2개의 전극과 전위 측정을 위한 2개의 전위 전극을 사용하고 있으며, 전류 및 전위전극의 배치와 간격에 따라 (그림 3)과 같이 다양한 전극 배열을 사용할 수 있다. 2차원 전기비저항 탐사에서는 일반적으로 단극 배열, 단극-쌍극자 배열, 쌍극자 배열, 웨너 배열 및 슬럼프버저 배열 등이 널리 사용되나 우리나라에서는 쌍극자 배열이 가장 많이 사용되고 있다.

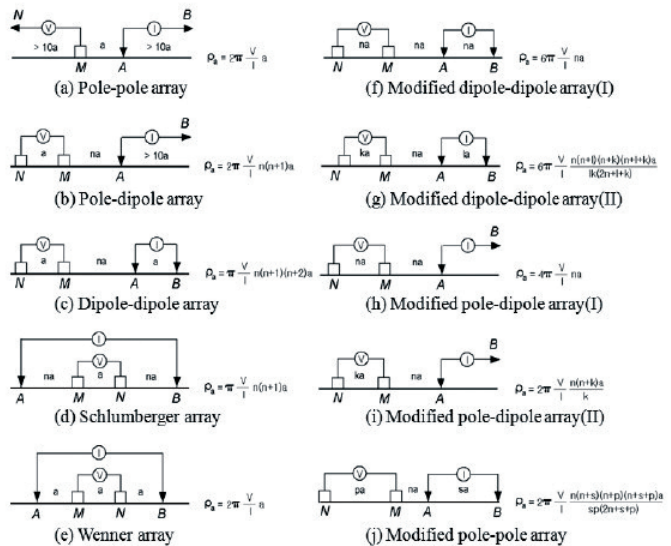


그림 3. Schematic view of the electrode arrays (Kim et al., 2001)

3) 지반별 전기비저항 범위

암석이나 토양 등 지하 매질의 전기비저항은 기본적으로 암종과 암상에 가장 크게 지배되나 지하수, 공극수, 공극률, 물 포화도, 점토 함유량, 풍화 및 변질정도, 온도 등에 지배된다. 따라서 지하 매질의 전기비저항 구조를 규명함으로써 해당 지역 하부의 암상과 기타 수리지질학적 정보를 추정할 수 있다. (표 3)은 지반별 전기비저항 범위를 나타내고 있다.

4) 상태평가 항목 및 기준안(전기비저항 탐사결과 이용)

최근 들어 댐의 누수대 규명을 위한 조사기법 중 제체의 손상을 최소화 할 수 있는 물리탐사기법에 대한 연구가 증가추세에 있다. 특히, 정밀안전진단 시 누수구간 탐지에 효과적인 물리탐사 방법으로서 전기비저항 탐사의 활용도는 매우 높은 것으로 보고되었으며, 현재까지는 주로 댐이나 제체의 마루

에서 댐축과 평행한 측선을 설치하여 2차원 전기비저항 탐사를 주로 수행하고 있다.

(표 4)는 물리탐사(전기비저항 탐사)를 수행하여 나온 결과를 응용하여 정립한 상태평가 항목 및 기준을 나타낸 것이다. (표 4)의 내용을 추가로 평가 기준에 반영하여 세분화되고 정확한 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 현장투수시험결과를 응용한 평가기준 제안

지반의 투수성 파악을 목적으로 시추조사와 병행하여 현장투수시험을 시행하는데, 시험방법은 시험구간 상부까지 케이싱을 타입 후 천공에 의해 시험구간을 확보하였으며, 시험구간을 포함해 케이싱 상부까지 주수 후 시간에 따른 수위 강하량을 측정해 현장투수계수를 산정하는 변수위법과 암반구간에 대해서는 패커를 이용한 압력주수법으로 시행한다.

표 4. 댐의 상태평가 항목 및 기준안(전기비저항값)

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가내용
전기비저항 값	중요결함	1.0	a	5	○ 댐체의 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	○ 전기비저항 탐사 결과 황색 또는 적색 계열로 표시되는 구간 ○ 자연상태의 습도를 유지 또는 기초지반 및 지하수위 상부의 건조한 구간(건조습윤대), 양호한 상태
			c	3	○ 전기비저항 탐사 결과 초록색 계열로 표시되는 구간 ○ 포화대의 확장 등으로 인한 누수 취약부로 발달될 가능성이 높은 구간(습윤대), 경미한 상태
			d	2	○ 전기비저항 탐사 결과 청색 계열로 표시되는 구간 ○ 침투수에 의해 포화 상태이거나 누수 취약부가 형성되어 있을 가능성이 큰 구간(포화대), 심각한 상태
			e	1	○ 전기비저항 탐사 결과 청색 계열로 표시되는 구간 ○ 침투수에 의해 포화 상태이거나 누수 취약부가 형성되어 있을 가능성이 매우 큰 구간(포화대), 매우 심각한 상태

표 5. 필름의 상태평가 항목 및 기준안(현장투수계수 : K)

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
현장 투수 계수 (K)	중요 결함	1.0	a	5	○ 불투수성존의 현장투수계수(K)가 $1 \times 10^6 \text{cm/s}$ 미만인 경우
			b	4	○ 불투수성존의 현장투수계수(K)가 $1 \times 10^6 \text{cm/s}$ 이상, $1 \times 10^5 \text{cm/s}$ 이상미만인 경우
			c	3	○ 불투수성존의 현장투수계수(K)가 $1 \times 10^5 \text{cm/s}$ 이상, $1 \times 10^4 \text{cm/s}$ 미만인 경우
			d	2	○ 불투수성존의 현장투수계수(K)가 $1 \times 10^4 \text{cm/s}$ 이상, $1 \times 10^3 \text{cm/s}$ 미만인 경우
			e	1	○ 불투수성존의 현장투수계수(K)가 $1 \times 10^3 \text{cm/s}$ 이상인 경우

표 6. 세립토의 컨시스턴시

N치	컨시스턴시	일축압축강도 (kgf/cm ²)	비고
0~2	대단히 연약(very soft)	0.25 이하	손으로 누르면 손가락 사이로 흙이 빠져 나옴
2~4	연약(soft)	0.25~0.5	엄지손가락이 쉽게 관입
4~8	보통(medium)	0.5~1.0	엄지손가락이 힘들게 관입
8~15	단단함(stiff)	1.0~2.0	엄지손가락이 매우 힘들게 관입
15~30	대단히 단단함(very stiff)	2.0~4.0	엄지손가락의 손톱으로 쉽게 자국이 남
30이상	견고(hard)	4.0	엄지손가락의 손톱으로 힘들게 자국이 남

(표 5)는 현장투수시험을 수행하여 나온 결과를 응용하여 정립한 상태평가항목 및 기준을 나타낸 것으로서, 불투수성존의 토질은 투수계수(K)가 이 하인 재료이어야 한다. 따라서 안전성 검토를 수행한 여러 댐들의 투수계수(K)와 침투수량과의 상관 관계를 검토하여 (표 4)의 내용을 도출하였다.

(표 5)의 내용을 추가로 평가기준에 반영하여 세분화되고 정확한 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 표준관입시험결과를 응용한 평가기준 제안

제체 구성체의 조성물 물리적인 특성을 파악하기 위해 표준관입시험을 실시한다. 시험방법은 KS F 2307에 규정에 따라 시행하고 중량 63.5kg의 해머를 76cm 높이에서 자유 낙하시켜 교란되지 않은 지층을 샘플러가 30cm관입하는데 소요되는 타격횟수를 표시한다. 타격깊이는 예비타, 본타로 구분하고 본타는 다시 전타와 후타로 나누어 각각 15cm를 기준으로 총 45cm로 한다. 타격횟수인 N(관입저항)치는 구간 별로 아래 (표 6)과 같다.

표 7. 필댐의 상태평가 항목 및 기준안(N치)

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
N치 (관입 저항값)	중요 결함	1.0	a	5	○ 표준관입시험에 의한N치가 15~30인 경우, 대단히 단단한 상태(very stiff)
			b	4	○ 표준관입시험에 의한N치가 8~15인 경우, 단단한 상태(stiff)
			c	3	○ 표준관입시험에 의한N치가 4~8인 경우, 보통 상태(medium)
			d	2	○ 표준관입시험에 의한N치가 2~4인 경우, 연약한 상태(soft)
			e	1	○ 표준관입시험에 의한N치가 0~2인 경우, 대단히 연약한 상태(very soft)

(표 7)은 표준관입시험을 실시하여 나온 N치를 응용하여 정립한 상태평가항목 및 기준을 나타낸 것이다. 시추주상도 결과에서 중심코어층에서의 평균 N치를 확인하여 (표 7)의 평가 기준과 비교하여 적합한 평가점수를 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

국내에 산재되어 있는 수리시설물인 저수지 및 제방은 대부분 노후화되어 누수의 위험을 안고 있다. 누수는 인명과 재산에 막대한 피해를 주는 제체의 파괴로 이어질 수 있으며, 이를 방지하기 위해서는 체계적인 정밀안전진단과 이에 근거한 유지보수가 적기에 이루어져야 한다. 노후화된 저수지의 누수현상을 조기에 발견하여 자연재해를 사전에 예방하고, 수리시설물의 보수 및 보강대책을 조기에 수립함으로써 개보수 공사비를 절감하는 유지관리 체계가 절실히 요구되고 있다.

그리고 제체 누수에 관한 정밀한 평가를 위하여 다음과 같이 몇가지의 제안을 하며 결론으로 마무리 짓고자 한다.

5.1 통합적인 댐 안전관리의 개념 도입 필요

사면의 조사와 평가, 보강대책, 계측 및 모니터링의 일련의 사이클을 통합적인 안전관리 개념을 도입하여 관리하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

5.2 누수탐지에 효과적인 다양한 물리탐사기법의 발전

1) 누수탐지에 널리 사용되고 있는 2차원 전기비저항 탐사법은 매우 효과적인 방법임에는 틀림없다. 그러나 제체의 기하학적 3차원 구조에 기인한 지형효과 및 제체를 구성하고 있는 물성대비로 인하여 해석상에 왜곡된 결과로 해석을 어렵게 할 수 있는 요인이 있을 수 있으므로 보다 효과적으로 해석하기 위해서는 3차원 탐사 또는 모니터링 기법 등으로 발전되어야 한다.

2) 실제로 필댐을 통과하는 침투 경로를 세밀하게 재현하고 누수현상에 대한 취약성 조사 및 평가기법에 관한 연구의 필요성이 요구되고 있다.

5.3 댐 안전도 평가를 위한 물리탐사기법의 표준화·규정화

선진 외국의 경우 댐의 안전도 평가 기법 중 물리탐사 기법들은 어느 정도 규정화 되어 관리되고 있는 실정이나 국내의 경우는 전기비저항 탐사 이외

에 뚜렷한 규정화가 되어 있지 않아 지구물리탐사의 신뢰성을 저하시키고 있으며, 품질관리도 전혀 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 우선적으로 물리탐사기법들의 표준화가 이루어져야 할 것이라고 판단된다.

5.4 전기비저항 모니터링 계측결과의 응용

노후화된 저수지를 대상으로 전기비저항 등 계측 시스템을 활용하여 주기적으로 측정한 결과를 비교 분석하여, 제체의 누수현상 및 진행 상태를 응용하여 필댐의 상태평가 항목 및 기준으로 정립하여야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5.5 제체 내부 균열 상태평가 항목 및 기준 신설 검토

하류사면의 누수 발견시 누수량을 확인하여 1.0L/sec 이상인 경우에는 시 추공내 영상촬영장치(BIPS : Borehole Image Processing System)를 이용하여 제체 내부의 균열 상태를 직접 영상(Image)으로 확인하여 현장 조사 자료에 대한 신뢰도를 높일 수 있다.

또한, 시추공내 영상촬영에 의하여 분석된 균열의 방향성 및 발달 상태를 종합하여 누수와 연관된 제체 내부 균열에 관한 상태평가 항목 및 기준 신설을 검토하여야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 농림부(2002), 농업생산기반정비사업계획설계기준
2. 한국농어촌공사(2011), 농업생산기반정비사업 조사·설계 실무요령 -제1편 농어촌용수
3. 한국지반공학회(2010), 사면안정-지반공학시리즈
4. 한국농어촌공사(2010), 농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침
5. 박영목, 우문정, 이영휘(2004), 흙댐의 장기침투영향에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제24권, 제2C호
6. DeWayne Campbell(2013), "Lessons Learned From Past Dam Incidents", AGENDASafety Evaluation of Existing dams International Technical Seminar and Study Tour, Bureau of Reclamation, pp.4
7. 박동순(2013), 사면안정의 최신 연구동향과 시사점-2013 ASCE Geo-Congress 발표 내용을 중심으로, 한국지반공학회지, Vol.29, No.4
8. 김기석, 김정호, 박삼규, 임희대, 조인기(2007), 댐 안정성 검토를 위한 물리탐사 기법의 최근 기술 동향, 한국지반공학회 fall National Conference
9. 안종필, 박상범, 류덕찬(2002), 필댐의 안정성 검토에 관한 연구, 대한토목학회 학술대회, Vol.2002, No.11[2002]
10. 박삼규, 김재홍(2013), 취약대가 존재하는 제방의 누수 탐지를 위한 전기비저항 탐사의 적용성 연구, 한국지반환경공학회 논문집, Vol.14, No.4[2013]
11. Kim, J. H.(1996), Dipro for windows version 4.0 manual, HeeSong-Geotech, DaeJeon, pp. 21~40 (in Korean)
12. Kim, J. H., Lee M. J., Song, Y. H, and Chung, S. H.(2001), A study on the modified electrode arrays in two-dimensional resistivity survey, Geophysics and Geophysical Exploration, Vol. 4, No 3, pp. 59~69 (in Korean)
13. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. F. and Keys, D. A.(1976), Applied geophysics. cambridge university press. UK, 860 p.