

하천제방의 안전성 평가기법 연구

윤종렬¹⁾, 김진만²⁾, 최봉혁²⁾

¹⁾(주)삼보지오텍, jryoon@geotek.co.kr

²⁾한국건설기술연구원 지반연구부

A Study on Assessment Techniques of Levee Safety

Jong-Ryeol Yoon¹⁾, Jin-Man Kim²⁾, Bong-Hyuck Choi²⁾

¹⁾SamboGeotek Co.

²⁾Geotechnical Engineering Research Dept., KICT

요약 : 시트파일과 그라우팅 차수벽의 차수효과를 비교 판정하고 제방하부에서 발생하는 파이핑 현상을 감지하기 위하여 합천군의 덕인2제를 대상으로 갈수기와 우수기에 걸쳐 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 실시하였다. 자료의 해석결과 2차원이나 3차원탐사 모두 시트 파일과 일반 그라우팅 차수벽의 경계부나 육안으로 관찰된 파이핑 발생지점을 비교적 정확하게 탐지하였다. 또한 제방붕괴의 주요원인중 하나인 배수통문 배면의 공동을 조사하기 위하여 GPR탐사를 실시하였으나 구조물에 배근된 철근의 영향으로 만족할 만한 자료를 얻을 수 없었다. 배수통문 구조물의 특성상 여타 지구물리탐사법의 적용이 어려우므로 본 연구에서는 통문 하부 공동의 연결성을 평가할 수 있는 수리응답시험을 제안하였다.

주요어 : 제방, 세굴, 전기비저항탐사, 배수통문, GPR탐사, 수리응답시험

Abstract : 2-D and 3-D resistivity surveys were carried out at the Deok-In2 levee during the period of arid and rainy seasons to assess the waterproof effectiveness of sheet pile and grouting sections and detect the location of pipings. Inverted resistivity sections clearly indicated the boundaries of sheet pile and grouting sections and the locations of pipings observed at the ground surface. Besides, GPR survey was carried out to verify the rear cavity of culvert in levee which is thought to be the major cause of levee breakdown. But the quality of GPR data was very poor due to the steel reinforcements buried in the culvert. Because it is not easy to apply various geophysical surveys upon concrete structures, newly designed hydraulic response test was proposed to assess the continuity of rear cavity of culvert in this study.

Keywords : levee, piping, resistivity survey, culvert, GPR survey, hydraulic response test

1. 서론

최근 기상이변과 대형 태풍으로 인한 홍수가 빈발하고 제방의 노후화 등으로 인해 홍수 시 제방붕괴 사례가 증가하고 있다. 제방의 붕괴로 인한 인명 및 경제적 피해는 매우 심각한 것이므로 제방의 안전진단을 위한 효과적인 방법에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다. 1987년부터 2003년까지의 제방붕괴 유형을 분석한 자료에 의하면 제방파괴의 주원인으로는 월류와 침식이 40%와 39%로 대부분을 차지하며, 세굴현상(piping)으로 인한 제체 불안정이나 통문과 같은 구조물 접합부의 붕괴에 의한 제방 파괴도 각각 10%와 11%를 차지하고 있다(건설교통부, 2004). 이러한 제방파괴의 주요 원인인 월류와 침식은 제방 설계기준을 강화하여 예방이 어느 정도 가능하나, 세굴현상이나 배수통문 구조물 접합부의 붕괴에 의한 제방파괴는 세밀한 조사를 통해 파이핑의 분포양상과 규모, 구조물 배면 공동의 특성 등을 파악하여 보강책을 마련해야 한다. 이와 같은 제방의 안전진단을 위한 평가방법을 적용하기 위해서는 전국에 산재해 있는 제방의 양적인 측면을 고려할 때 신속성과 경제성이 우선적으로 고려되어야 한다.

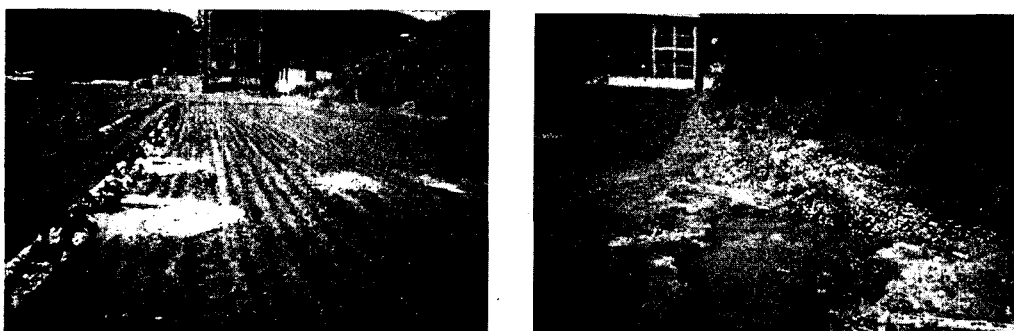
현재 국내에서는 제방의 누수부위를 탐지하거나 제체구조의 건전성을 평가하기 위하여 자연전위탐사나 전기비저항탐사, 지온탐사와 같은 물리탐사법이 다양하게 적용되고 있다(농업기반공사, 2001; 박삼규와 김희준, 1999; 송성호 외, 2000; 송성호 외, 2002; 정승환 외, 1992; 조진동 외, 1996). 본 연구에서는 여러 지구물리탐사법중 파이핑 현상과 관련된 제방의 안전진단에 가장 효과적이며 널리 적용되고 있는 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 갈수기와 우수기에 걸쳐 실시하여 그 자료를 비교 분석하였다.

또한 배수통문 구조물 접합부의 안전진단을 위하여 배면공동 조사를 위한 GPR탐사를 실시하였다. 그러나 대부분의 배수 구조물은 철근을 포함하고 있어 GPR탐사 자료의 신뢰성이 크게 떨어지며 콘크리트 구조물의 특성상 여타 물리탐사법의 적용이 거의 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 구조물 접합부 배면공동의 분포 및 연결성을 조사하기 위하여 수리응답시험을 제안하였다.

2. 전기비저항탐사

(1) 탐사개요

경남 합천군 청덕면 성태리 덕인2제를 대상으로 2004년 5월과 9월에 걸쳐 갈수기와 우수기로 나누어 전기비저항탐사를 실시하였다. 탐사 대상 제방인 덕인 2제는 원지반이 사질토로 이루어져 있으며, 널말뚝(sheet pile)과 그라우팅 구간으로 나뉘어 차수벽이 설치되어 있다. 그러나 갈수기에도 시트 파일 차수벽 구간의 파이핑 현상이 다수 육안으로 관찰되었으며, 우수기에는 파이핑 현상이 한층 심화된 상태였다(Fig. 1).



(a)

(b)

Fig. 1. Piping in the section of sheet pile: (a) arid season (b) rainy season.

비저항탐사 측선은 시트 파일과 그라우팅 차수벽 경계부를 중심으로 차수벽의 종류에 따른 차수효과를 비교할 수 있도록 경계부에서 1측선, 양쪽 차수벽 구간에서 각각 1측선, 법면을 따라 2측선 등 모두 5측선을 설정하였으며, 갈수기와 우수기에 걸쳐 동일 측선상에서 자료를 취득하여 강우에 따른 제방의 누수양상 변화를 비교하고자 하였다(Fig. 2, Table. 1). 또한 차수벽 경계부를 중심으로 3차원 비저항탐사를 실시하여 보다 정확한 비저항구조를 영상화 하고자 하였다.

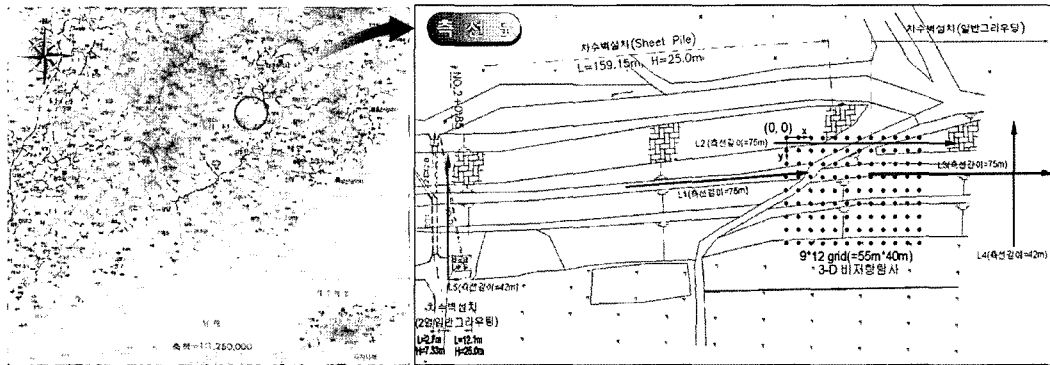


Fig. 2. Location map of resistivity survey.

Table 1. Details of 2-D resistivity survey line.

측선명	측선길이 (m)	전극간격 (m)	최대 전극분리계수	구 간
L1	75	3	11	시트 파일 구간
L2	75	3	11	시트 파일/그라우팅 경계부
L3	75	3	11	그라우팅 구간
L4	42	3	10	그라우팅 구간 법면
L5	42	3	10	시트 파일 구간 법면

(2) 탐사결과

자료의 해석결과 전체적인 비저항구조는 갈수기와 우수기 모두에서 대체로 유사한 양상을 보였으며, 우수기에는 접지상태의 개선으로 인해 신호대 잡음비가 높은 값을 보였다. 그러나 역산된 비저항값은 갈수기와 비교하여 감소하였다.

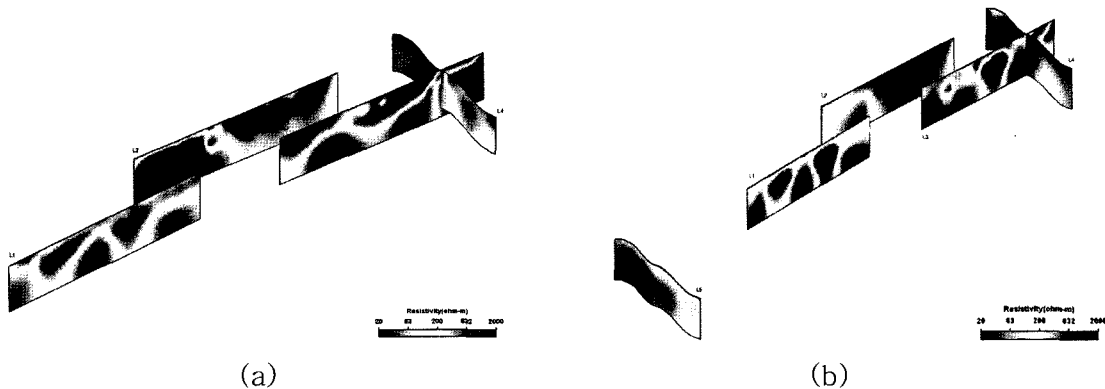


Fig. 3. Fence diagrams of 2-D resistivity survey:
(a) arid season (b) rainy season.

측선 L1과 L3의 저비저항대는 육안으로 관찰된 파이핑의 위치와 동일하며, 갈수기에 비해 우수기의 저비저항대 규모가 커지고 비저항값도 최대 50%까지 감소한 것으로 나타났다(Fig. 3). 또한 측선 L2의 경우 그라우팅과 시트 파일 차수벽 구간의 경계부를 정확히 감지할 수 있었으며, 시트 파일 구간의 비저항값이 높게 나타나 그라우팅 구간의 차수상태가 상대적으로 불량한 것으로 판단된다(Fig. 3).

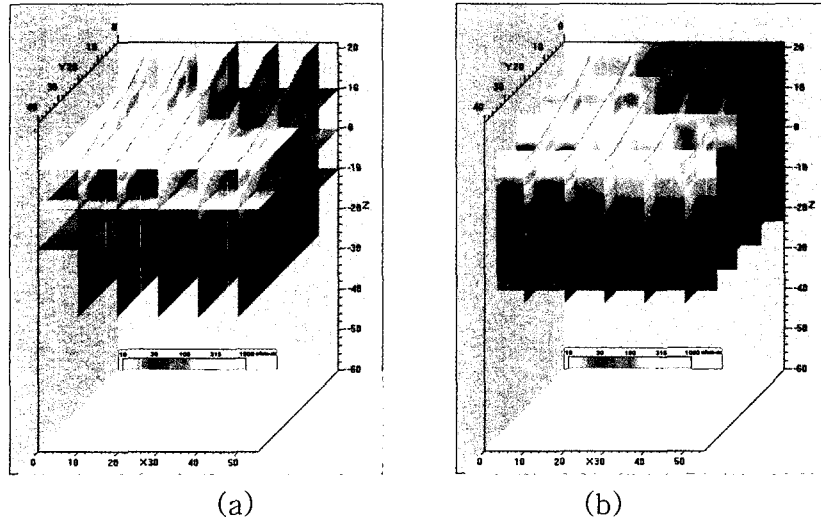


Fig. 4. Inverted sections of 3-D resistivity survey:
(a) xy-yz plane (b) xz-yz plane.

3차원 전기비저항탐사자료의 해석결과 전체적인 비저항구조는 2차원 탐사 결과와 큰 차이가 나지 않았다. 3차원 해석단면의 x 방향 20~25m를 기준으로 좌측의 비저항이 우측에 비하여 높게 나타나며 이러한 비저항 분포는 그 경계부가 심도가 증가할수록 오른쪽으로 치우쳐 나타나게 된다. 이는 2차원 비저항단면상에서 나타난 시트파일과 그라우팅 차수벽의 경계부 좌우측에서 나타난 비저항 분포와 수평적, 수직적으로 모두 유사한 결과이다(Fig. 4).

한편 2차원 비저항단면 L1과 L3에서 나타난 파이핑과 관련된 저비저항대는 3차원 단면상에서 시트파일 구간에서는 y 방향 20~40m, 그라우팅 구간에서는 y 방향 0~25m 사이에서 100 ohm-m 이하의 저비저항대로 나타난다. 또한 y=5m인 xz 평면의 비저항구조를 살펴보면 양쪽 구간의 비저항값이 뚜렷한 대비를 보인다. 이러한 저비저항대의 y, z 방향 분포로 판단할 때 파이핑 현상은 시트파일 구간에서는 제방내 차수벽 하부로 진행되는 반면에 그라우팅 구간에서는 차수벽 구간에서 진행되는 것으로 판단되며 이는 그라우팅 구간의 차수효과가 상대적으로 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 제방의 3차원 비저항구조를 xy 평면상에서 살펴보면 차수벽 경계의 좌측과 제내지 방향의 비저항값이 높은 분포를 보이나 심도가 증가함에 따라 전체적인 비저항값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 하부의 파이핑 현상이 광범위하게 진행되었다는 것을 암시한다고 할 수 있다.

3. 수리응답시험

(1) 기본원리

배수통문과 같은 제방 횡단 구조물에 인접해 발생하는 누수는 주로 저판 주변에 발생하는 공동이나 틈새 등이 확대되어 형성되는 유수 통로가 주원인이다. 특히 우리나라와 같은 경우에는 대부분의 배수통문이 말뚝기초로 처리되어 있으며, 이러한 경우 구조물과

제체 경계부 주변에 소규모 공동이 발생하는 경우가 대단히 많다. 본 연구에서 제안하는 수리응답시험은 배수 구조물의 저판 또는 저판 주변에 삭공을 한 후 수압의 전도를 관측하는 시험으로 관측된 수압 및 수위변화량, 반응시간 등을 분석하여 통문 저판에 존재하는 공동의 연속성을 조사할 수 있다(Fig. 5).

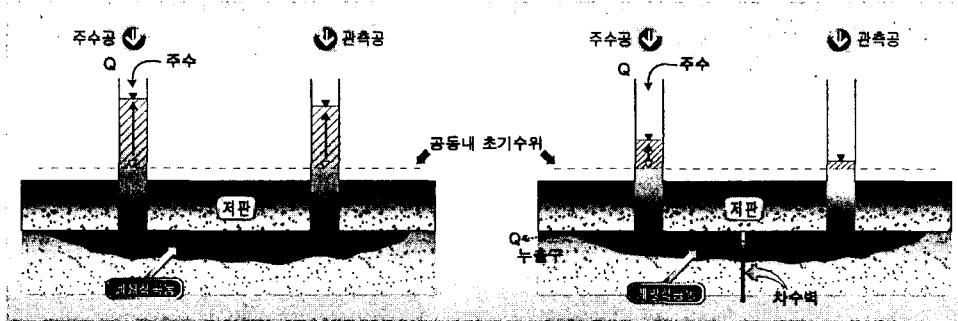


Fig. 5. Simplified drawing of hydraulic response test.

(2) 시험방법

시험대상 배수통문의 저판에 삭공을 한 후 초기 수위를 파악하고 주수공에 일정한 상승 수위를 유지한다. 이와 동시에 복수의 관측공에서도 초기 수위 및 수위 변화량을 시간별로 측정한다. 또한, 주수를 정지했을 때의 수위 회복과정을 중점적으로 측정한다. 한편 주입수압으로 인한 통문 하부 공동에서의 토사 이동이나 공동 벽면 붕괴 등을 방지하기 위해 주수시간 및 주수공의 수위상승을 제한하여 시험을 실시해야 한다. 이러한 과정을 복수의 시험공에 대하여 주수공과 측정공을 순차적으로 바꾸어 반복함으로써 측정 자료의 상반성(reciprocity)을 점검하고 자료의 신뢰도를 높일 수 있다. Fig. 6에 본 시험의 주요 장비인 주수장치 및 현장시험 장면이 나타나 있다.

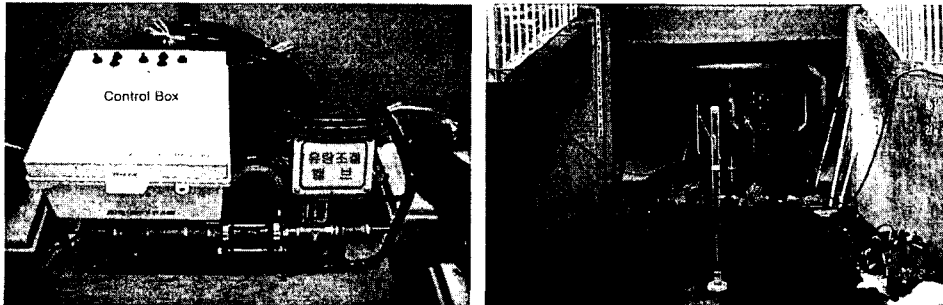


Fig. 6. The equipments and the scene of hydraulic response field test.

4. 결론

합천 덕인2제를 대상으로 갈수기와 우수기에 걸쳐 시트파일과 그라우팅 차수벽의 차수효과를 비교 판정하고 제방하부에서 발생하는 파이핑 현상을 효과적으로 감지하기 위하여 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 실시하였다.

자료의 해석결과 2차원이나 3차원탐사 모두 시트 파일과 일반 그라우팅 차수벽의 경계부나 육안으로 관찰된 파이핑 발생지점을 비교적 정확하게 탐지하였다. 그러나, 본 연구에서는 전극 간격을 3m나 5m로 설정한 결과 개개의 파이핑이 단면상에서 독립적으로 분해되어 나타나지 않고 하나의 저비저항대 형태로 중첩되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이처럼 전기비저항탐사를 비롯한 모든 물리탐사법은 분해능과 가탐심도가 서로 tradeoff 관계에 있으므로 탐지하고자 하는 제방의 규모나 누수 예상 심도 등 여러 가지를 신중히

고려하여 최적의 조건으로 탐사를 하였을 때 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 또한 본 연구에서는 제방붕괴의 주요원인중 하나인 배수통문 배면의 공동을 조사하기 위하여 특별히 고안된 수리응답시험을 제안하였다. 이 방법은 저렴한 비용과 빠른 시간내에 통문하부 공동의 연속성을 조사할 수 있으며 현재까지 일본 국토기술연구원(JICE)의 주도아래 일본 전역의 주요 하천 제방 배수통문 구조물의 안전성 평가에 적용되고 있다. 특히 우리나라에서는 배수통문 구조물이 대부분 말뚝기초 형식으로 처리되어 압밀침하에 의한 내부와 외부 토체 경계 및 저판 하부에서 공동이 형성되고 점차 이완되어 시간이 지남에 따라 체체의 불안전성이 급속히 증가하는 경우가 많다. 따라서 하천 제방 및 배수통문 관련 설계기준의 개선을 위한 연구 및 수리응답시험의 도입이 현재 활발하게 추진되고 있다.

참고문헌

- 건설교통부, 2004, 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서.
- 농업기반공사, 2001, SP탐사를 이용한 저수지 및 방조제 누수지점 탐지 기법 연구.
- 박삼규, 김희준, 1999, 지온탐사에 의한 저수지 제방의 누수조사, 자원환경지질, 32, no.2.
- 송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항 탐사의 적용, 자원환경지질, 33, no.5
- 송성호, 장의웅, 김진호, 김진성, 김진춘, 2002, 전기비저항 수직탐사를 이용한 저수지 그라우팅 구간 평가, 지질공학, 12, no.1.
- 이명중, 김정호, 송윤호, 정승환, 2000, 2차원 및 3차원 전기비저항 탐사를 이용한 제당 누수 조사, 농업현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회.
- 정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅, 1992, 전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지, 지질공학, 2, no.1.
- 조진동, 정현기, 정승환, 김정호, 1996, 방조제 누수부위 확인을 위한 SP/VLF 탐사법의 적용성, 자원환경지질, 29, no.3.