

● ● ● ● ● ● ● ●

연통시험에 의한 배수통문저면 공동평가기법



김진만 >>

한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원
jmkim@kict.re.kr

1. 머리말

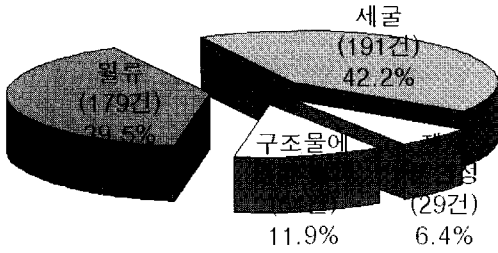
최근 국내 하천제방은 노후화 및 이상홍수로 인하여 홍수 시 제방붕괴로 인한 막대한 인명 및 재산피해를 야기하고 있다. 그 대표적인 예로 2002년 태풍 매미와 장기홍수로 인하여 전국적으로 270명이 사망하거나 실종되었고, 7,634동의 주택이 파손되고, 17,749ha의 농경지가 유실되는 등 6조 1,038억원이라는 막대한 인명 및 재산피해가 발생하였다. 또한, 2003년의 경우 태풍 매미로 인하여 140명의 인명 피해와 4조 7,810억원이라는 막대한 인명 및 재산 피해가 재발하였다.

하천구조물 관련 홍수 피해는 그림 1에서 보듯이 2002년 홍수피해 전체 453건 중 54건 발생이 발생되어 전체 제방붕괴의 12%에 해당하는 것으로 보고되어 졌다. 그 주요 원인은 말뚝 처리된 배수통문 저면 공동 발생에 따른 제방 붕괴에 의한 것으로서, 연통시험과 같은 특수 안전진단기법에 의한 조사를 필요로 하였다(건기연, 2004).

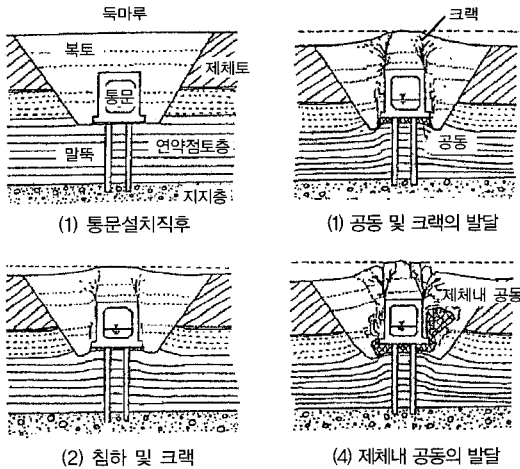
배수통문 구조물 붕괴는 그림 1 (c)에서 보듯이 연약지반상에 설치될 경우 말뚝으로 지지된 구조물 직상단 및 연약지반 측벽부 사이의 20년 이상의 장기간에 걸친 홍수 시 침투수 반복 및 부등침하 등으로 인한 미세 균열이 진전됨으로써 발생된다.

일본은 하천제방의 취약부인 배수통문의 문제점을 해결하고자 국가관리하천의 13,000 여 개의 배수통문을 조사 분석 후, 그 중 10%에 해당하는 노후 배수통문을 대상으로 연통시험과 같은 정밀안전진단기





(a) 제방붕괴 유형



(b) 제방붕괴 메카니즘

그림 1. 2002년도 제방붕괴 사례

술을 적용하여 치수안전도를 극대화하고 있다.

본 고에서는 일본 하천설계기준(2000)에 소개된 배수통문 저면 공동 평가에서 활용되고 있는 연통시험에 대한 원리, 평가 방법 및 국내 적용사례 등을 소개하고자 한다.

2. 국내외 배수통문 관련 현황

(1) 국내 현황

배수통문은 제방을 횡단하는 암거형식의 수로구조물로, 농업용수의 취득 또는 배수 등의 목적으로 설치된다. 또한, 배수통문은 연속적으로 시공되어야 하는 제방의 특성에 반하여 불연적인 단면을 제공함

으로써 제방의 취약부를 형성하고, 지반침하가 큰 지반에 말뚝기초로 지지된 통관 주변에 공동 및 상대적 지반침하(파이핑 발생 원인)에 의한 단차, 제방 폭의 감소(그림 2 참조) 등이 발생되기 때문에 하천제방 안전성을 저하시키는 구조물로 여겨진다.

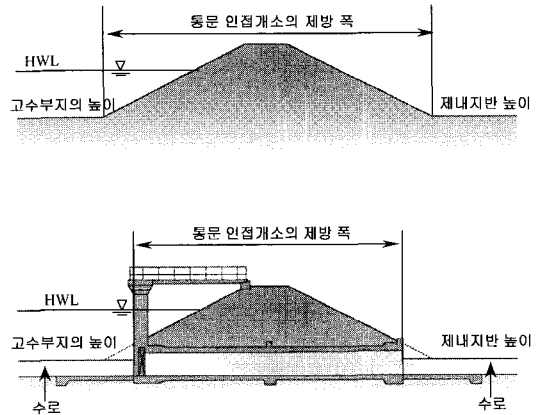


그림 2. 배수통문 설치 위치 및 제방 폭 감소

한편, 표 1에서는 한국수자원공사에서 운영하고 있는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)상의 국내 배수구조물 현황 및 준공 연도별 배수펌프장 세부 현황을 보여준다. 배수통문은 표 1에서 보듯이 1) 배수암거/용수암거/배수통문, 2) 배수통관/배수관/수로 배수관, 3) 취수/배수/갑문/배수관문/수문, 4) 도로배수 암거/관 5) 유출구/낙차공/취수정/방류구/잠관/수위표 등, 6) 취수통관/양수장취수관/취수관, 7) 양수장/배수장/펌프장/용수펌프장/배수펌프장/취수장/취수(장)시설 등으로 구분되어 34,559개소가 관리되고 있다.

특히 20년 이상 노후된 양수/용수/배수 펌프장과 관련된 배수통문은 년도가 확인된 932 개소 중 89%가 20년 이상된 구조물이다.

국내 배수통문 붕괴사례는 2002년에 발생한 황강 가천제, 신반천 광암제, 남강 백산제, 남강 봉산제 등이 대표적인 사례이다. 그 원인은 그림 3에서 보듯이 배수통문 저면 공동발생에 의한 파이핑 현상인 것으로 추정된다.

표 1. 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)상의 국내 배수구조물 현황

구조물 형식 관리청	I ^{*)}	II	III	IV	V	VI	VII
서울청	337	2,047	547	84	22	1	332
원주청	39	120	12	8	2	1	33
부산청	201	493	747		51	4	681
대전청	439	630	329		23	7	408
익산청	585	1,756	831		35	2	420
총 계	1,601	5,046	2,466	92	133	15	1,874

주) I: 배수암거/용수암거/배수통문 II: 배수통관/배수관/수로배수관
III: 취수/배수/갑문/배수관문/수문 IV: 도로배수 암거/관
V: 유출구/낙차공/취수정/방류구/잠관/수위표
VI: 취수통관/양수장취수관/취수관
VII: 양수장/배수장/펌프장/용수펌프장/배수펌프장/취수장/취수시설

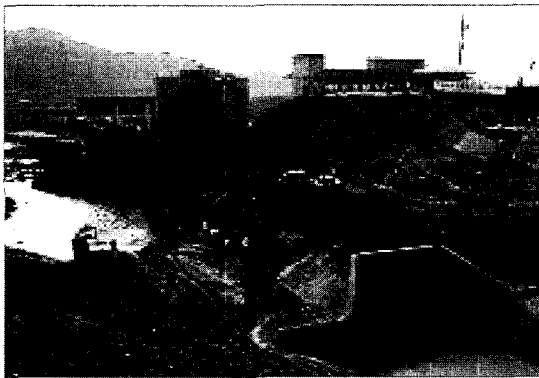


그림 3. 국내 배수통문 붕괴 사진

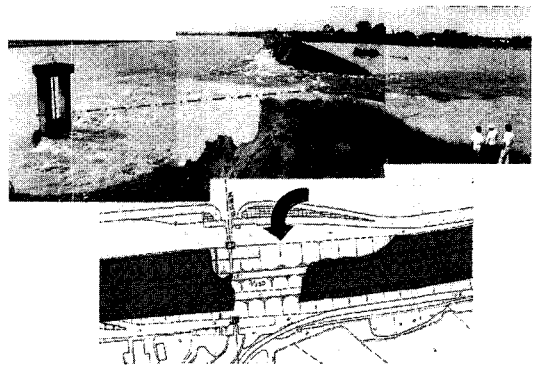


그림 4. 소패천(小貝川) 고수통관(高須通管) 파피 사례

(2) 일본 현황

일본의 경우 배수통문과 관련된 많은 제방 피해가 발생하였으며, 그 사례는 다음과 같다.

- 장량(長良)천 승하(勝賀)통문('52년)
- 소패(小貝)천 고수(高須)통문('81년)
- 도송(島松)천 리(里)통문('81년)
- 소패(小貝)천 풍전(豊田)통문('86년)
- 학전(鶴田)천 배수(排水)통문('99년)

그 중 대표적인 사례는 1981년 8월 24일 새벽에 발생한 소패천 고수통관 붕괴로 그림 4와 같다. 그림 4에서 보듯이 소패천 제방 붕괴는 배수통문 주변의 침투에 의해 발생하였으며, 붕괴 후 원인 조사 결과

말뚝 기초의 사용에 따라 형성된 배수통문 주변 공동에 의해 파괴가 발생된 것으로 조사되었다.

일본 건설성에서는 대대적인 연동시험을 이용한 안전점검계획 수립과 동시에 1998년 '치수과장통달'을 통하여 말뚝기초를 금지, 유구조 배수통문에 의한 설계 기준 제안(국토개발기술연구센터, 1998) 등의 건설정책적 대안을 제시하였다.

한편, 일본은 이러한 배수통문의 붕괴원인에 의하여 전국 13,955 개소의 배수통문에 대한 대대적인 점검이 수행 되었다. 일본 배수통문 점검은 그림 5에서 보듯이 1차 진단(기초조사) 및 2차 진단(연동시험을 포함하는 세부조사)로 구분하여, 12,563 개소에 대해 수행된 1차 조사결과에 기초하여 1,219 개소의 2차 세부조사가 수행되었다.

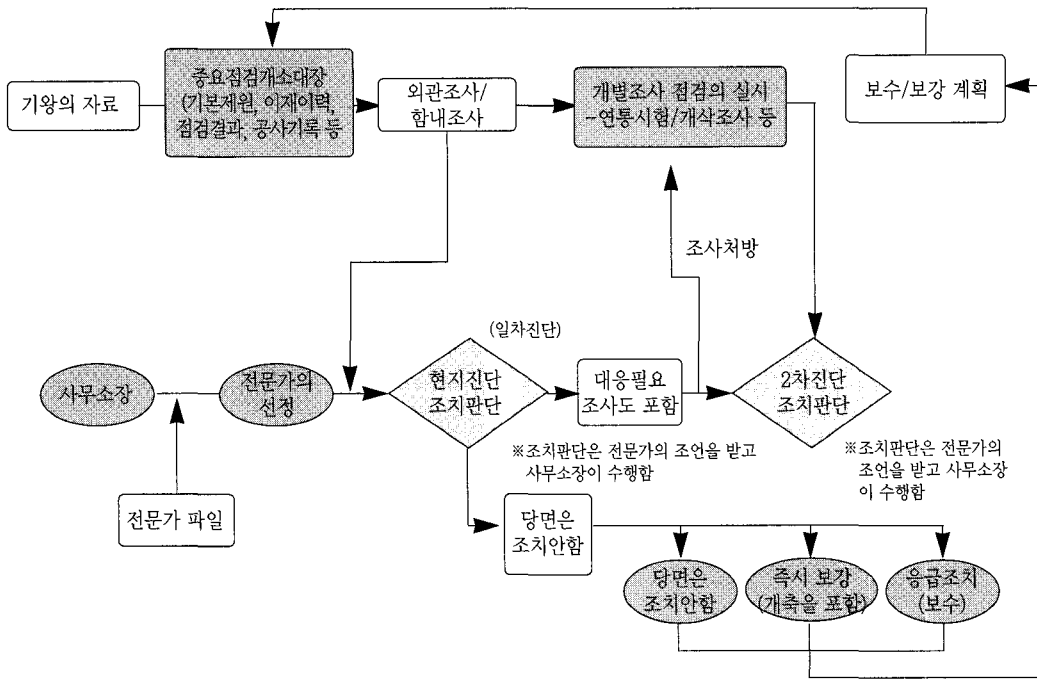


그림 5. 배수통문 점검조사 절차

그림 5에서는 일본의 배수통문 점검조사 절차도를 보여준다. 배수통문 점검 조사는 크게 1) 자료조사(기본 제원, 피재이력, 점검결과, 공사 기록 등), 2) 외관 조사에 의한 1차 진단, 3) 연통조사에 의한 2차 진단, 4) 보수/보강 대책 수립 등으로 구분될 수 있다.

이때 연통시험은 그림 5에서 보듯이 배수통문의 안정성 평가 중요한 평가 기법으로서 일본 하천설계 기준(2000)에 반영되어 있다.

3. 연통시험

3.1 원리 및 시험방법

일반적으로 제체 침투는 토입자간 물의 침투로 인하여 매우 느린 특성이 있는 반면에, 공동이 있는 배수통문 저면은 물의 침투가 공동 내에서 제약이 없는 관계로 빠른 특성(연통된 상태)이 있다.

연통시험은 그림 6에서 보듯이 암거 내 콘크리트

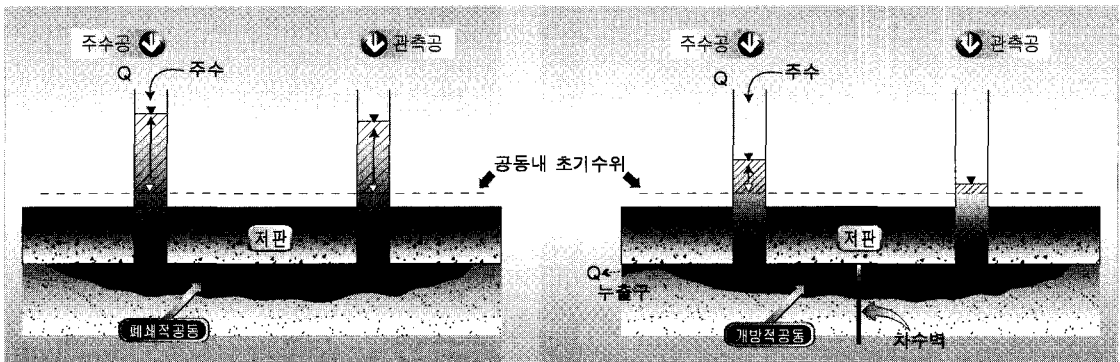


그림 6. 배수통문 점검조사 절차

저판을 여러 개소를 천공하여, 그 중의 1개소를 주수공으로 하여 나머지 공(관측공)의 시간에 따른 수위변화를 관측하는 것이다. 또한, 연통시험의 결과 분석은 주수공과 관측공의 수위변동량 및 주수에 의한 관측공의 수위가 변화할 때까지의 시간차(지체시간, time lag)로부터 공동의 상태를 정성적으로 판정한다.

일반적으로 배수통문은 침투유로를 길게 하기 위하여 널말뚝과 같은 차수벽을 설치하므로, 차수벽 작동 유·무가 안전성 판정에 중요한 요소로 작용한다.

따라서 연통시험 시 관측공은 원리상 2개 공이 있으면 실시가 가능하지만, 각 공의 수위변화량을 상세히 관측하기 위하여 반드시 차수벽을 사이에 두고 2개 공을 인접하여 설치하고, 총 4개 이상을 설치한다. 연통시험은 다음과 같은 순서로 수행된다.

- 암거의 콘크리트 저판을 코어드릴로 천공하여 주수공 및 관측공을 설치한다. 이때 관측용 파이프는 아크릴을 사용하며, 관측공과 콘크리트 저판 접촉면 사이에 수밀성이 확보되도록 한다(그림 7 참조).
- 예비시험은 주수공 수위가 1m 이하로 거의 일정해지는 안정된 주입상태가 될 때의 수위 및 주수량을 구하기 위해 수행된다. 이때 주수량은 일반적으로 모우터 펌프를 이용한 연속주수를 원칙으로 하지만 연속주수가 불가능할 경우 일정량을 주수한 후 수위저하를 측정하여 판정한 후 시험을 종료한다. 한편, 과량의 주수는 공동 형성을 촉진하므로 주의를 요한다.
- 예비시험 후 수위가 안정되면, 본 시험을 수행한다. 본 시험은 주수를 시작하여 주수공 및 관측공의 시간에 따른 수위를 1분 간격으로 측정하는 방법으로 수행된다. 그림 8은 연통시험 장면을 보여준다.
- 본 시험은 20분이 넘지 않는 범위 내에서 주수공 및 관측공 수위가 정상상태에 달했다고 판정한 시점에서 주수를 종료한다.
- 주수 정지 후 측정은 충분한 수위 저하가 발생할

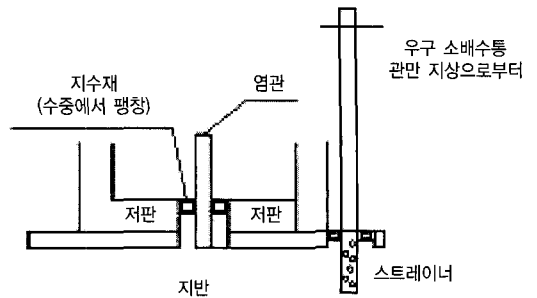


그림 7. 관측공 설치도



그림 8. 연통시험 장면

때까지 지속하여 수행한다.

일본 연통시험 점검요령은 시험결과로부터 공동의 유·무, 규모 등을 수위변동량 및 지체시간 등에 착안하여 판정하고 있다.

3.2 적용사례

中山修 등(1999)은 “통분주변제방의 누수위험도조사를 위한 연통시험법의 적용 예”에서 제방의 잠재적인 누수위험개소로서 주목받고 있는 배수통문의 누수

및 붕괴 원인을 분석하고 현장에서의 누수 위험도 검토를 위하여 연통시험법의 현장 적용 평가를 수행하였다.

中山修 등(1999)에 따르면, 배수통문은 제방을 암거형식으로 횡단하는 구조물로서 말뚝지지의 기초형식을 채용하고 있는 사례가 많으며, 말뚝기초를 사용하는 배수통문의 경우 주변 지반 침하에 의한 상대적 변형에 따라 저판 아래에 공동이 발생하여, 수차례의 홍수를 거쳐 공동이 발달함에 따라 누수 및 붕괴에 이르게 되는 것으로 보고하였다. 또한, 본 논문은 홍수 시 누수경로의 경우 다양한 경로가 있는데, “통문 저면을 따라 형성된 물의 흐름 차단을 위해 설치된 차수벽조차도 측면을 따라 누수경로가 존재한다”고 보고하였다.

연통시험은 통문을 따라 발생한 공동의 유무 혹은 연속성을 물의 흐름이나 수압의 전달을 통하여 확인하는 실험으로, 하천제방 배수통문의 누수위험도를 평가하는 것이다.

그림 9에서는 中山修 등(1999)이 연통시험의 현장 적용성 평가를 위해 수행한 대상 배수통문의 기초구조 및 관측공 배치도를 보여준다. 말뚝기초는 길이 42m의 강관말뚝으로, N치 50이상의 모래층에 지지되어 있다. 연통시험용 관측공은 차수벽을 사이에 두고 5개소에 설치하였다.

외관 관찰에 의하면, 본 통문은 부등침하로 인한 통문 주변지반의 상대적인 변형이 현저하게 발생하였으며, 통문 본체와 하천이 맞닿는 접합부에서 18cm의 단차를 보여 저판 밑에 공동이 발생하고 있을 것이라 추정되었다.

연통시험 결과는 천공 및 저면 관측공(No.1~No.5)의 분석에 의하여 과거 보강한 평균 17cm 정도

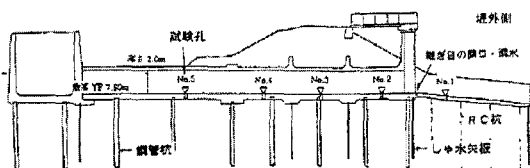


그림 9. 연통 관측공 배치도

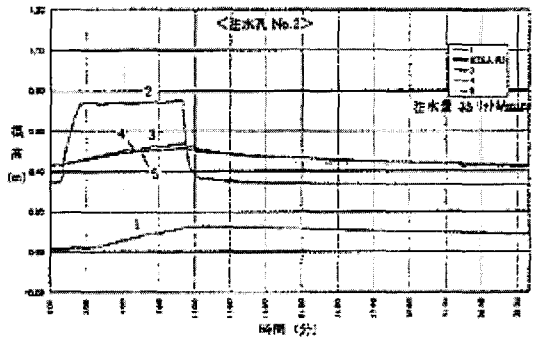


그림 10. 개별 관측공의 수위-시간 관계 곡선

의 그라우트 충전층 및 No.1을 제외한 모든 실험공에서 저면 하부에 최대 3.5cm의 공동이 확인되었다.

그림 10에서는 No.2공(주수공)에 주수할 경우 개별 관측공의 수위 변화를 보여준다. 개별 관측공 수위는 그림 10에서 보듯이 그 크기가 작지만, 거의 지체시간 없이 반응하고 있으며, 관측공 No.3, 4, 5는 거의 같은 수위변화를 보이고 있다.

시험결과로부터, No.3과 No.4 사이의 차수벽은 차수기능을 다하지 못하고, No.1과 No.2 및 No.2와 No.3 사이의 차수벽은 차수 기능이 저하되고 있는 것이라고 판단되었다. 본 배수통문은 저면 밑 공동과 차수벽 측면을 통한 유로가 연속되어 있으므로, 조속한 누수 대책이 필요하여 조치하였다.

中山修 등(1999)은 연통시험이 배수통문 하부 공동 유무 및 유로의 연속성 등의 확인에 유효한 방법이며, 향후 측정 및 해석수법, 평가수법의 확립과 모니터링에의 이용방법의 개발을 통하여 통문 주변 제방의 누수 위험도 조사법으로서 표준적인 방법이 될 수 있을 것이라 평가하였다.

4. 맺음말

최근 들어 국내 치수사업은 제방 개수, 댐, 수문, 배수펌프장, 우수지 등의 각종 하천관리시설 건설이 주된 사업이었으나, 관련 시설정비 및 그 수가 증대에 따른 유지관리비용이 증가하여 가까운 장래에

공공투자액의 대부분을 차지할 것이라는 예상들이 나오고 있다.

국가하천 배수펌프장 배수통문 안전관리시스템 구축은 중앙 정부 및 지방자치단체의 관련 시설의 유지관리비용을 최소화하면서 치수사업 효율성을 극대화하는 방안 수립이 중요하다.

또한, 지반공학분야와 관련된 제방붕괴는 광암제, 백산제, 가현제 등 전제 제방 피해의 20.5%에 해당하는 큰 문제 요인으로 대두되고 있다. 특히 배수통문 분야는 하천제방과 관련된 수자원분야, 주변지반의 파이핑, 다짐, 침하와 관련된 지반분야, 배수박스 설계와 관련된 구조분야 등 토목 전반에 관련된 요소 기술의 집합적 성격을 가지고 있다. 국내 배수통문 관련 피해는 기술적 측면에서 이러한 토목기술의 모든 분야가 관련되어 있으면서도 구조물이 단순하다는 이유로, 관련 분야에 대한 공동연구가 추진되지 않아 붕괴에 따른 피해가 다소 확대되지 않았나 하는 안타까움이 있다.

일본은 이미 제방 및 배수통문과 관련하여 시설물 개요, 위치, 공학적 특성, 피해이력, 토질특성 등의 데이터 베이스를 정립해 놓은 실정에 있으며 또한, 배수통문 관련 최대 취약점인 배수통문 주변 공동을 탐지

할 수 있는 유비쿼터스 시스템을 이용한 안전관리시스템, 연통시험과 지반침하를 고려한 유구조/유지배수통문 시스템 등을 제안해 놓은 실정에 있다.

국내에서도 이러한 연구추세와 관련하여 연통시스템과 같은 탐사기술의 개발, 제방관련 국가 시설물 관리를 위한 안전관리시스템 및 D/B 구축, 연약지반 상 합리적 암거설계기술 등이 수자원, 지반, 구조분야의 공동 연구로 하루빨리 정착되어 국민들의 삶의 질을 향상시키기를 기대한다.

참고문헌

- 한국건설기술연구원(2004), “하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서”, pp.32-74.
- 日本 建設省(2000), 河川堤防設計指針.
- 國土開發 技術研究 Center (1998). 柔構造 通門 設計의 入門.
- 中山修 등(1999), “통문주변 제방의 누수위험도조사를 위한 연통시험법의 적용 예”, 제34회 일본지반공학회 연구발표회, pp. 167-168.