

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법



김진만

한국건설기술연구원 국토지반연구부
수석연구원 (jmkim@kict.re.kr)

1. 머리말

최근 하천제방은 노후화 및 이상홍수로 인하여 치수구조물로서 안정성이 떨어지고, 홍수 시 제방붕괴로 인한 인명 및 재산피해가 가중되어 왔었다.

하천제방 붕괴 원인은 분석 결과를 고찰하면 수공학적 원인 뿐만 아니라 지반공학적 원인과 직·간접적으로 관련되어 있음을 알 수 있다. 예로써 제체 불안정에 의한 파괴는 전통적으로 지반공학분야인 제체 및 기초지반의 침하, 침투, 사면안정 등과 관련된 설계 및 시공, 유지관리 등의 문제점들이 복합되어 발생된다.

이러한 관점에서 하천설계기준(2005)은 치수 구조물로서 제방분야 설계기준 개정과 관련하여 수공학 및 지반공학 관련 전문가가 공동 대안을 제시하였다는 점에서 큰 의의가 있다. 2005년도판 하천설계기준 개정 중 지반공학분야와 관련된 중요 내용은

다음과 같다.

- 입도분포특성, 투수특성 등을 고려한 제방재료 선정 기준 강화
- 하상토 활용의 제한적 권장
- 제방다짐관리 기준 강화:
 - 제방 구간 : 상대다짐도 90%로 상향 조정
 - 구조물 구간 : 상대다짐도 95%로 상향 조정
- 1:3 비탈면 경사 완화에 의한 제방안정성, 친수성, 장비 접근성 개선
- 배수통문 주변 제방재료 선정, 다짐규정 강화, 말뚝사용의 예외적 제한 등
- 파이핑 방지 관련 설계 및 대책공법의 보완

그럼에도 불구하고 국내 하천제방 관련 설계기준은 안정성 및 합리성에 있어서 미국, 일본, 유럽 등에 비해 매우 미흡한 수준으로 지속적인 관련 전문가들의 연구·보완이 요구된다.

표 1. 기간별 연평균 홍수 피해 (안시권, 2006)

기간	재산피해 (억원)	침수면적 (ha)	침수면적당 재산피해(백만원/ha)
1916~1969	718	91,874	0.8
1970~1989	3,018	90,428	3.3
1990~2004	14,202	56,529	25.1

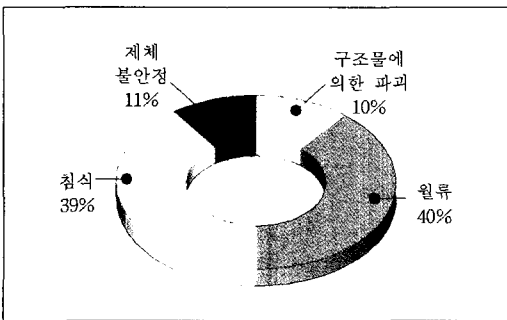


그림 1. 제방 피해 유형 (안시권, 2006)

한편, 하천제방의 설계는 대상 현장의 복잡한 수리·수문학 및 지반공학적 특성을 복합적으로 고려하여야 한다. 이때 지반공학분야는 하천제방과 관련하여 주로 현장여건을 고려한 합리적 제방재료 선정, 지반조사 및 지반정수의 도출, 홍수 및 강우특성을 고려한 제체 활동에 대한 안정, 강우 시 침윤면의 형성·발달에 따른 제체 누수에 대한 안정, 기초지반의 침투압 상승에 따른 파이핑에 대한 안정 및 방지대책, 배수통문과 같은 제방 횡단 구조물에 의한 제체 안정 및 평가·유지관리 등과 연계되어 맡은 바 역할을 수행한다.

최근 외국의 제방설계는 기존 제방 설계의 문제점을 보완하고자 일반 구조물과 같이 수리학적 혹은 지반공학적 안정성을 바탕으로 외력과 내력의 비교를 기본으로 하는 설계 방식에서의 전환을 추진하고 있다. 예로서 제방설계에 요구되는 수치해석은 기존의 정상침투/포화 해석에서 미국, 유럽 등 정상침투/

포화·불포화 해석으로, 일본의 경우 비정상침투/포화·불포화 해석으로 전환되는 추세에 있다. 이러한 해석 모델은 현장의 포화조건과 가까운 모델을 선정함으로써 해석결과의 정확성을 유도하려는 것이다.

이때 포화·불포화 모델은 지반의 포화·불포화 조건과 관련된 지반정수 값을 제시하여야 하나, 현재 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 미미한 실정에 있다. 이렇듯 하천제방은 표준단면도로 설계가 필요 없는 구조물이 아니라 교량이나 터널과 같이 경제성 및 안전성을 고려하여 더욱 더 숙련된 엔지니어의 경험이 요구되는 설계 분야이다.

본 고에서는 2006년 수자원학회에 제출된 “하천제방 안정성” 기술논단자료를 기초로 하여 하천제방 현황, 문제점 및 그 대책방안 등을 제시하고자 하였다(김진만, 2006).

2. 하천제방 현황

2.1 수해 현황

최근 국내 기상은 지구 온난화에 따른 기상이변 등으로 하루 100mm 이상의 집중호우 발생 빈도가 70년대 222회에서 90년대 325회 등으로 급박하게 변화하고 있는 중에 있다. 또한, 우리나라는 유럽 및 미주지역과 달리 여름철에 홍수량이 집중하는 특성이 있어 그에 따른 홍수피해가 큰 지역적 특성을 갖고 있다(안시권, 2006).

예로서 국내 강수량은 연도별 750~1,680mm 정도로 큰 차이가 보이며, 계절별로도 여름철 강수 집중도가 62%를 보이고 있다. 반면에 외국 여름철 강

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법

수 집중도는 프랑스의 경우 40%, 일본의 경우 47% 등으로 우리나라에 비해 작다.

최근 국내 수해피해는 표 1에서 보듯이 기상이변으로 70~80년대에 비해 재산피해의 경우 4.7배, 침수면적 당 재산피해의 경우 7.6배 등으로 급격히 증가하고 있다(안시권, 2006).

한편, 국내 제방붕괴 유형은 그림 1에서 보듯이 1987년~2003년까지의 통계자료에 의하면 조사건수 758건 중 월류 300건(39.6%), 침식 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%) 등인 것으로 보고하고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

이는 월류의 경우 홍수량 증가에 의한 것이므로, 하상토 사용에 따른 침식방지대책, 지반공학적 제체 불안정 요소 억제, 구조물 유지관리 등과 관련 정책 대안수립을 요구한다.

2.2 하천관리현황

하천과 관련된 중앙 정부조직은 건설교통부, 환경부, 행정자치부, 농림부 등 4개 부처이다. 이중 건설교통부는 이수·치수와 관련하여 다목적 댐과 광역상수도의 건설·관리, 공유수면관리, 홍수예보 및 수문관측, 지하수 관리, 국가하천 관리, 내륙 수운 및 운하의 건설·관리업무 등 하천 관련 주무 부처이다.

그 외 부처는 환경부의 경우 도시하수처리장 및 공단폐수처리장, 환경영향평가, 하천정화사업 등으로, 행정자치부의 경우 하천관리와 관련된 건교부 및 환경부 관련 각종 지방업무 지원 및 보완에 관한 총괄 등으로, 농림부의 경우 주로 농업과 관련된 관개용수의 개발 관리, 농업용 하구둑 관리, 간척지, 담수호의 개발 등으로 하천업무를 수행하고 있다.

표 2. 하천연장 및 등급별 개수 현황(건설교통부/한국수자원공사, 2006)

구분	지정 연장	요개수 연장	기개수연장	개수율(%)
국가 하천	2,981	3,114	2,997	96.2
지방 1급 하천	1,148	1,139	1,047	91.9
지방 2급 하천	25,684	32,264	24,579	76.2
합계	29,813	36,517	28,622	78.4

표 3. 하천 관련 중앙조직의 주요 업무 (국토연구원, 2004)

구분	관리업무	개발업무
건설교통부	- 하천관리	- 다목적 댐 건설
	- 홍수예보 및 수문관측	- 광역상수도 건설
	- 광역상수도 관리	- 내륙주운 건설
	- 다목적 댐 관리	
환경부	- 지하수 관리	
	- 수질관측 및 규제	- 도시하수처리시설 건설
	- 하천정화사업	- 공장폐수처리시설 건설
	- 지하상하수도 정비계획수립	- 오·폐수 처리시설
행정자치부	- 내수면 어업 관리	
	- 소하천 관리	- 지방상수도 건설
	- 재해대책	- 지방하수처리시설 건설
농림부	- 농업관련 관개용수 관리	- 농업 관개용수의 개발
	- 농업용 하구둑 관리	- 간척지, 담수호 개발

수자원장기종합계획(2006~2020)에 의하면, 국내 하천연장 및 등급별 개수현황은 표 2에서 보듯이 또한, 2003년 감사원 감사결과에 의하면, 국내 하천관리 실태는 하천이 있는 225개 시·군·구(제주도 및 일부 도서지역 제외) 중 하천 점·사용허가, 방재업무 등 하천관리 업무 담당자가 1명에 불과한 시·군·구가 51개(23%)나 되고 하천점검원이 전혀 없는 시·군·구가 51개(23%)에 이르는 등 하천

관리인력이 매우 부족한 실정이다(감사원, 2003). 또한, 하천점검원 1인당 하천관리연장은 평균 34.6km나 되고, 하천에 대한 안전점검을 실시하지 않은 시·군·구가 27개(12%)이며, 서울특별시를 제외한 시·도(관할 시·군·구)의 하천 1km당 연간 관리예산은 평균 4백만여 원에 불과한 실정이다(감사원, 2003).

한편, 표 3에서는 하천관련 중앙조직의 주요 업무를 보여준다. 표 3에서 보듯이 국가 하천유지관리체계는 5개 부처가 관련됨으로써 효율적인 하천 유지 관리에 대한 혼선이 다소 발생되고 있다.

예로써 본 사업과 관련된 배수펌프장은 건설교통부의 경우 설계 및 시공을 주관하여 준공함으로써 준공 후 5년 정도를 하자보수관계로 관련 지자체와 연계되어 있다. 또한, 이관된 배수펌프장은 도시지역 및 농림지역 구분하여 도시지역 전체 시설의 경우 지자체가, 농림지역의 경우 지자체가 토출수조를 제외한 배수암거 구조물을, 한국농촌공사(농림부)의 경우 배수펌프장 건축물 및 펌프 설비 등을 분할하여 관리하고 있다. 즉, 배수펌프장은 내수배제를 위한 간단한 기간 시설물임에도 불구하고 유지관리주체만도 건설교통부, 지자체, 한국농촌공사 등으로 분할되어 있음으로써 책임소재에 따른 관련 행정업무 수행 및 효율성 등에 많은 문제점이 있다.

한편, 배수펌프장은 농림지역에 설치될 경우 통상적으로 수도작 농사를 고려하여 주변 농경지에 일정 정도의 강우량을 담수하는 것을 고려하여 설계됨으로서 홍수 시 내수배제를 위한 처리 용량이 턱없이 부족한 실정에 있다. 이러한 국가 배수펌프장 운영 정책은 홍수 시 내수배제를 위한 홍수 방재차원측면에서 배수펌프장의 역할 한계를 규정짓고 있어, 홍수다발지역에 대한 합리적인 배수펌프장 설계 용량

의 개선에 대한 변화된 운용을 요구한다.

(1) 건설교통부 조직

하천 관련 건설교통부 중앙조직은 건교부 수자원국, 5개 지방청, 5개 홍수통제소가 있다. 하천유지관리업무는 주로 하천관리팀에 주로 담당하고 있다. 하천관리팀은 하천유량관리 업무, 하도정비 및 하천유지관리 업무, 하천구역 내 행위제한, 수문조사 및 하천정보화 업무 등을 담당하고 있다.

수자원국의 전체 인원은 직급별 정원의 경우 2·3급 1명, 4급 4명, 4·5급 2명, 5급 16명, 6급 15명, 7급 6명, 기능직 3명 등으로 2006년 현재 46명이며, 이중 하천관리팀은 정원이 10명이나 현 인원의 경우 13명이다.

한편, 국토지방청은 그림 2에서 보듯이 서울청, 원주청, 대전청, 익산청, 부산청 등이 있다. 각 지방청별 담당구역은 서울청의 경우 경기(서울, 인천), 대전청의 경우 충남·충북(대전), 익산청의 경우 전남·전북(광주), 부산청의 경우 경남·경북(부산, 대구, 울산), 원주청의 경우 강원지역 등이다. 2006년 현재, 5개 지방청 하천국은 전체 인원 80명이며, 청별로 서울청 15명, 부산청 22명, 익산청 18명, 대전청 14명, 원주청 11명 등이다.

한편, 건설교통부에서는 하천법 제12조에 국가하천은 건설교통부장관이 관리하고 지방1, 2급하천은 시·도지사가 관리하는 것으로 규정한 뒤 같은 법 제28조에서는 국가하천의 유지관리를 시·도지사에게 위임하는 것으로 규정하여 결국 모든 하천을 시·도지사가 유지·관리하도록 하였다. 그러나 시·도 등 지방자치단체는 하천관리 인력과 예산이 상당히 부족한 실정이다.

또한, 하천법 제15조와 같은 법 시행령 제8조의 규

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법

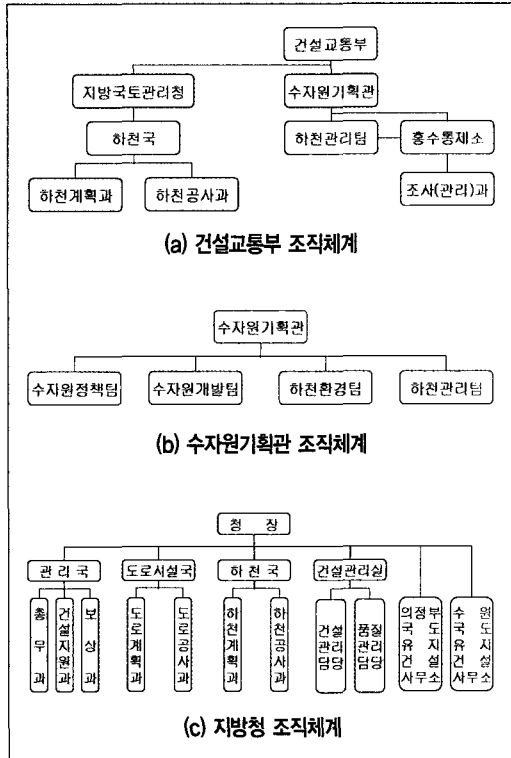


그림 2. 건설교통부 하천유지관리 조직체계 (국토연구원 2004)

정에 따르면 지방국토관리청은 매년 5월 말까지 제방·호안의 유지상태 등 관리상황을 점검하여 필요한 조치를 하도록 되어 있고, 건설교통부장관의 국가하천 관리상황 점검업무가 같은 법 시행령 제57조 제2항의 규정에 따라 지방국토관리청장에게 위임되어 있다. 그러나 각 지방국토관리청에서는 인력 등이 부족하여 적절한 점검을 하기 어려운 실정이다.

따라서 국가 하천유지관리체계는 통합관리 효율성과 예산중복투자 방지를 목적으로 중앙정부와 지자체의 역할분담 기준의 설정과 기술적 측면의 국내 노후 하천시설물 보수·보강을 위한 사전 안전진단 시스템, 보수·보강 우선순위 결정, 점검결과와 D/B 회를 통한 체계적 관리체계 운용 등과 관련된 국가

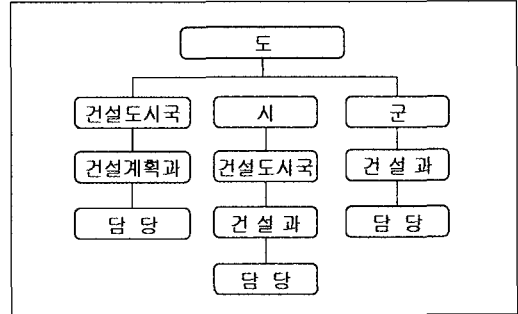


그림 3. 지방정부조직 하천유지관리 조직체계 (국토연구원 2004)

통합재해예방시스템 구축 등을 보완하여야 한다.

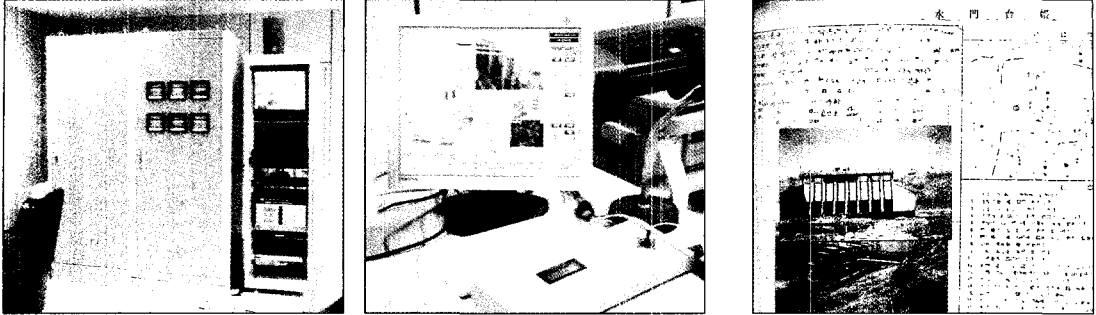
(2) 지방정부조직

지방정부조직은 그림 3에서 보듯이 광역지자체와 기초지자체로 구성되며, 광역지자체는 특별시·광역시·도, 기초지자체는 자치구·시·군으로 구성된다. 서울시나 광역시의 하천유지관련 업무는 건설(방재, 치수) 관련과 산하의 건설(방재, 하천, 재난)담당 등에서 담당하고 있다. 도에서는 건설도시국 산하의 건설계획과(방재치수과, 안전관리과, 재해재난관리과 등)에서 주로 담당하는데 담당인원수는 대략 4~7명 정도이다.

기초자치단체는 자치구의 경우 도시국(건설교통국, 건설도시국 등), 건설과(하수과, 지역관리과 등) 산하의 건설행정담당(재난관리담당, 하수담당 등)이, 시의 경우 건설도시국 산하 건설과(하수과 등)에서, 군의 경우 건설과 산하의 건설행정담당이나 방재담당 등이 하천관련 업무를 담당하고 있다.

지방정부조직의 하천구조물 관리는 광역지자체와 기초지자체 등에 의한 관리실태가 지방정부 재정상태에 따라 큰 차이를 보인다.

예로써 광역시인 서울시 동작구 ○○펌프장은 그



(a) 서울시 동작구 00펌프장

(b) 00군 배수통문 관리대장

그림 4. 지방정부조직 배수펌프장 관리 실태 및 관리대장

림 4 (a)에서 보듯이 배수펌프장의 홍수 시 수문개폐, 펌프설비의 가동, 상부조직보고 등이 인터넷을 통하여 모니터링 되고 있다. 반면에 기초지자체인 00군 배수펌프장은 1명뿐인 하천관리자에 의해 배수통문 관리대장과 부족한 인력으로 인한 형식적인 육안 점검만을 수행하는 실정에 있다(그림 4 (b) 참조).

따라서 중앙주무부서인 건설교통부는 국민의 삶의 질 향상을 위한 재해방지 주무 부서로서 기초지자체의 한계적 역량을 고려한 차별적 지원행정 및 통합관리 등을 유도하여야 한다. 즉, 국가하천 배수통문 사업과 같이 중앙부처로서 건설교통부는 관리절차표준, 관리자료표준(D/B자료 구축 및 무상배포, 관리자료의 중앙통합관리 등), 안정성 평가절차 표준, 수재해 주요 발생 중요 시설물의 안점점검 및 보수보강 수행 등의 직접적 지원을 도모하여야 한다.

분류를 따라 강사인 입경이 균등한 모래(SP)가 발생되며 또한, 하천 분류와 지천의 합류부, 자연습지, 하구언 등과 같이 물의 저류로 인한 퇴적특성이 우세한 지역에서 불연속적으로 점토나 실트계열의 세립한 하상토가 발생하는 경향을 보인다.

표 4에서는 낙동강 수계의 안동댐 하류~낙동강 하구언 구간 총 22개소 하상토 조사구간 중 4개소 하상토 및 제방재료에 대한 입도분포시험 및 통류분류법에 의한 흙 분류 결과를 보여준다. 한편, 그림 5에서는 사용된 하상토 채취 위치 및 현장 전경을 보여준다.

입도분석 결과에서 보듯이 4개소 낙동강 제방은 하상토와 유사한 공학적 특성을 보여 하상토를 이용하여 축조되었음을 알 수 있다.

국내 발생 강모래 하상토는 흙의 내부마찰각이 34° 이상으로서 하천설계기준 상 비탈면 경사 1:3

2. 제방 안정성 제고를 지반공학적 대안

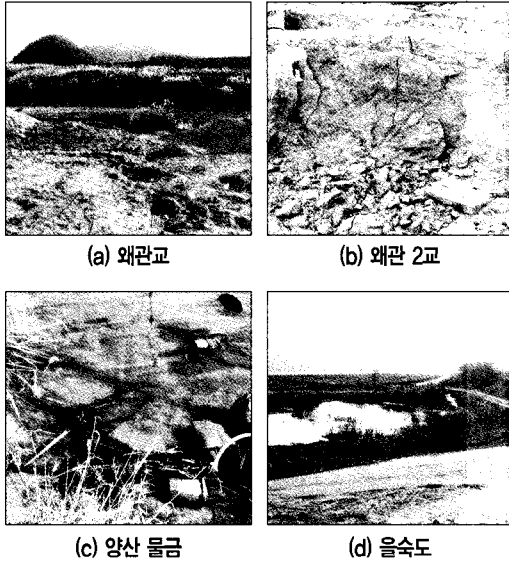
2.1 하상토 활용의 합리적 방안

낙동강 수계 하상토 발생 특성은 전체적으로 하천

표 4. 낙동강 수계 하상토 및 제방재료의 입도특성

구분	하상재료	제방 재료
입경 범위	0.074~25.4mm	0.074~19.1mm
C _u avg.	3.2	5.2
C _g avg.	1.3	1.0
통류분류	SP	SP

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법



(a) 왜관교

(b) 왜관 2교

(c) 양산 물금

(d) 을숙도

그림 5. 하상토 채취 위치 및 현장 전경

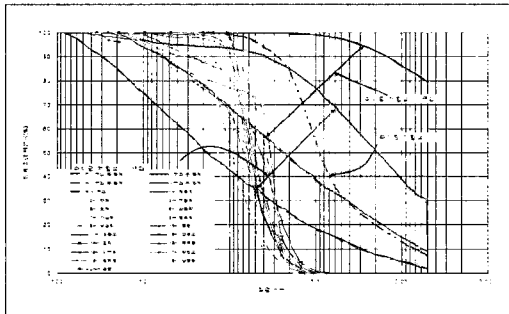


그림 6. NAVFAC 기준에 따른 국내 하상재료의 제체누수에 대한 저항성 분석

에 의한 자연안식각 18.4° 보다 크므로써 활동과 같은 강도측면의 안정성이 확보된 것으로 나타났으며, 특히 전단강도특성만을 비교해 볼 때 양질의 제방재료인 화강풍화토 보다 우수한 것으로 평가된다.

그림 6에서 보듯이 국내 발생 하상토는 입경이 균등한 모래(SP)로 평가되어, 하천설계기준 및 NAVFAC 매뉴얼(1986) 상 부적절한 제방재료로서 하상토 활용에 따른 안정대책을 반드시 수립하여야 한다.

한편, 하상토 활용에 따른 안정대책공법은 크게 함수비 조정 기법(공기건조공법, 트랜치굴착공법, 야적공법, 성토탈수공법, 강제건조공법), 입도조정 기법(입도조정공법), 안정처리기법(시멘트안정처리공법, 석회안정처리공법)등 있다. 이중 많이 쓰이는 공법은 입도조정공법과 시멘트 안정처리공법이다.

일반적으로 하상토 활용기법은 입도조정공법의 경우 혼합토로서 화강풍화토 혼합과 같이 강모래와 같은 조립토에서, 시멘트 안정처리공법의 경우 소성이 작은 실트질(ML)이나 소성이 작은 점토(CL) 등과 같은 세립토에서 투수계수 저하 및 전단강도 증진 등을 목적으로 사용된다.

하상토(SP)에 화강풍화토를 혼합한 혼합토의 투수계수는 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 1×10^{-2} 에서 1×10^{-5} cm/sec 정도로 작아지는 경향을 보인다. 하상토(SP)와 같은 강모래를 제방재료로 활용할 경우에는 현장배합시험에 의한 투수특성 평가를 통한 최소 혼합률을 결정하여 사용하여야 한다.

국내 하천설계기준(2005) 및 하천공사표준시방서(1999)에는 하상토 활용과 관련된 세부시행지침이 없어 현장토 활용에 장애 요인으로 나타나고 있는 실정에 있다.

2.2 합리적인 수치해석 및 설계정수 선정 방안

하천제방 및 배수통문의 침투해석은 설정된 설계 외력 및 제방 모델을 대상으로 수행하며, 해석결과로부터 안정성 조사 항목별 수치를 산출하여 안정성을 평가하기 때문에 하천제방 안정성 평가에 있어서 중요한 부분을 차지한다.

본 고에서는 침투 및 활동해석에 영향을 미치는

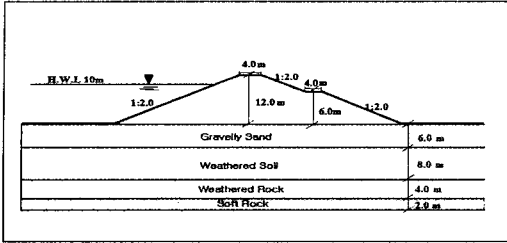


그림 7. 침투 해석에 사용된 단면

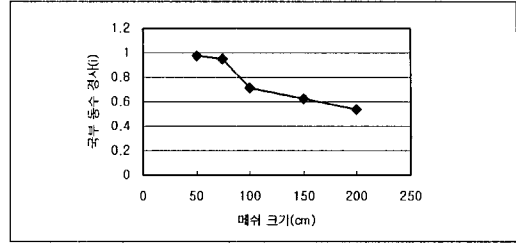


그림 8. 메쉬 크기에 따른 해석 결과

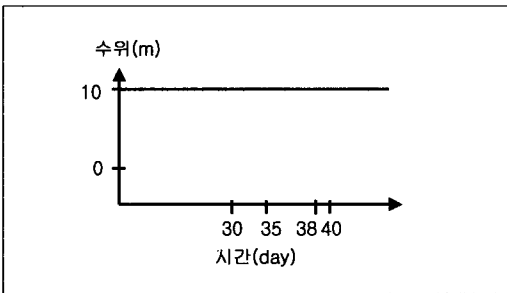


그림 9. 정상 수위 조건

인자 중 메쉬의 크기, 고수위 지속시간, 시간 변화에 따른 수위 조건, 토질설계점수의 선정, 사면 안전을 적용 등 현장 설계의 문제점 도출 및 합리적 해결방안을 제시하고자 한다.

한편, 침투해석은 그림 7과 같은 해석단면에 대해 약 4,000여 개의 치밀한 4절점 평면요소로 이루어진 유한요소망을 이용하여, 스위스의 ZACE사에서 개발된 지반해석 전용 프로그램인 Z-SOIL 프로그램 사용하여 수행하였다(한국건설기술연구원, 2004).

(1) 메쉬 크기에 대한 고려

그림 8은 메쉬 크기에 따른 침투해석 결과를 보여 준다. 국부동수경사(°)는 그림 8에서 보듯이 메쉬 크기가 작아질 경우 증가하며, 제체 높이(12m)의 약 1/10인 100cm에서 75cm 사이에 급격히 증가하고, 제체 높이의 약 1/20 정도인 메쉬 크기 0.5m~75cm에서 변화폭이 감소하는 것으로 나타났다.

국내 현장 설계자들은 메쉬크기에 대한 영향을 고려하지 않고 임의의 메쉬 분할을 함으로서 침투안정성을 과소 평가하는 경향이 있다. 따라서 수치해석은 침투해석 시 메쉬 크기를 제체높이의 1/10 이하 또는 0.5m 이하로 설정하여야 한다.

(2) 정상수위 고수위 지속시간의 고려

그림 9는 설계실무에서 수위파형에 대한 정보가 없을 경우 댐 설계와 동일한 방법으로 적용되는 정상수위조건을 보여준다(댐설계기준, 2001). 본 수위파형은 정상수위지속시간을 무한히 하여 설계하면 과다 설계값이 제시되는 반면에 지속시간을 조정할 경우 과소 설계를 유발할 수 있다.

그림 10에서 보듯이 정상수위조건에 의한 고수위 지속시간은 제체내 침윤면 형상 및 크기가 고려 시간대 별로 변화됨으로 합리적 지속시간을 고려하여야 한다. 분석결과, 침윤선은 입경이 균등한 모래(SP)일 경우 9일 이상, 투수성이 작은 점토질 모래(SC)인 경우 20일 이상인 것으로 나타났다.

(3) 수위파형에 대한 고려

그림 11은 현장 수위관측 데이터를 이용하여 비정상 수위조건을 보여준다. 본 수위파형은 적절한 산정이 이루어졌을 경우 경제적 설계를 유도할 수 있다. 반면에 본 수위파형을 고려한 설계는 홍수파형 뿐만 아니라 강

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법

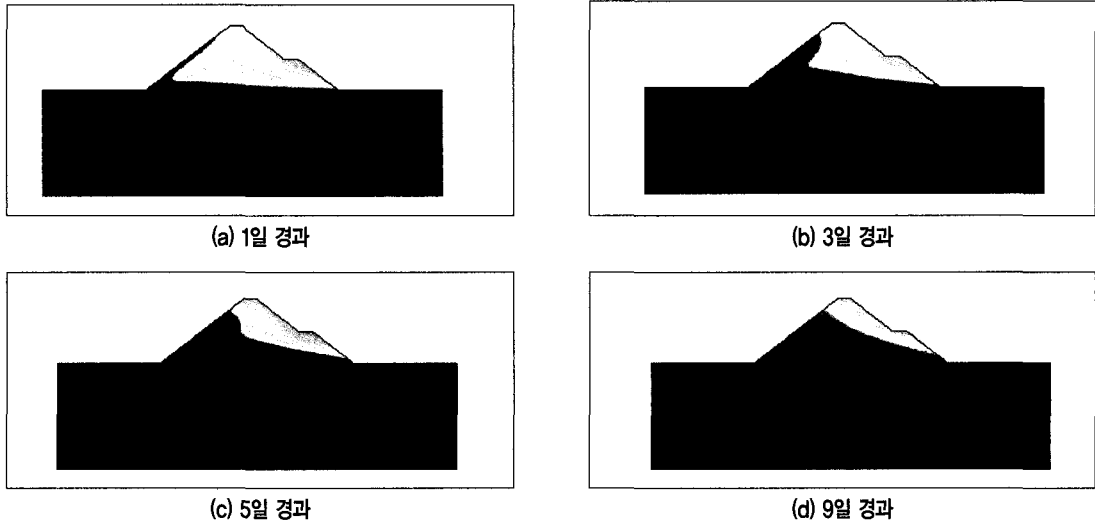


그림 10. 고수위 지속 시간에 따른 침투 해석 결과

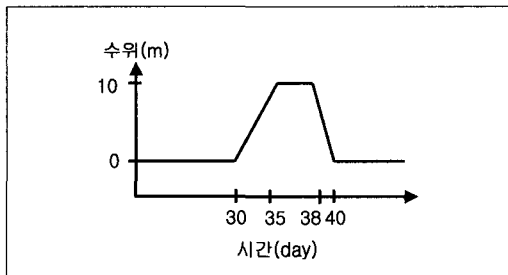


그림 11. 비정상 수위 조건

우특성을 반드시 함께 고려하여 반영하여야 한다.

하천설계기준은 이러한 수위설계파형에 대한 합리적 대안을 제시하지 못하고 있다. 일본에서는 집중호우와 같은 강우특성을 고려하여 시간에 따라 수위가 변화하는 수위파형 모델을 사용하는 비정상 수위 조건의 비정상 침투 해석을 적용하여 경제적 설계를 유도하고 있다(日本建設省, 2000).

(4) 제방 설계 시 도로 관련 토질설계정수의 준용

하천설계기준은 표 5에서 보듯이 하천제방 다짐과 관련하여 2002년판의 경우 상대다짐도 85%로, 2005년판의 경우 90%로 실시하도록 되어있다.

하천설계기준(2002) 상대다짐도 85%는 다짐장비를 사용하지 않는 관계로 다짐된 제체의 역학적 불안정성, 다짐관리의 취약성, 구조물 주변 다짐관리기준 및 다짐장비선정의 부재 등의 문제점이 있어 보완되었다.

한편, 일본 하천설계기준(2000)은 상대다짐도를 85%에서 90%로 강화시키면 흙의 투수특성이 조립토의 경우 $1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$, 세립토의 경우 $0.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 등으로 제체 침투저항성 강화되고, 흙의 전단강도특성의 경우 세립토에서 점착력 1t/m^2 , 조립토에서 내부마찰각이 10° 정도를 개선시키는 효과가 있는 것으로 보고하고 있다.

지금까지 국내 하천제방의 설계는 설계 시 토질정수의 채택에서 도로설계기준을 많이 준용하였다. 도로설계기준은 기본적으로 다짐도가 노체의 경우

표 5. 국내 및 일본 다짐관련 기준

기준	항목	상대 다짐도	다짐 높이
하천설계기준 (2002)		85%	30cm
하천설계기준 (2005)		90% (구조물 95%)	20cm~30cm
일본 하천설계기준		90% 이상	30cm

표 6. 제체 상태에 따른 안전율

제체 상태	간극수압상태	안전율
인장균열 불고려 시	간극수압 고려	2.0 이상
	간극수압 불 고려	
인장균열 불고려 시	간극수압 고려	1.8 이상
	간극수압 불 고려	1.3 이상

90%, 노상의 경우 95%로 관리하여 일본 하천설계 기준이 제기된 설계상의 문제점, 즉 다짐도 변화에 따른 토질설계정수 변화를 고려하지 못하는 문제점이 있다. 그러나 하천설계기준(2005)은 다짐기준을 상향 조정함으로써 도로설계정수를 사용할 수 있는 기틀을 제시하였다.

(5) 사면해석 시 기준 안전율 적용 오류

표 6은 하천설계기준(2005)상의 제체 상태에 따른 사면 안전율을 보여준다. 표 6에서 보듯이 사면활동 해석은 침투에 따른 간극수압 변화, 제체내 인장균열 발생유·무 등을 고려하도록 되어 있다. 하천설계기준(2005)은 사면활동 해석시 적정의 최소 안전율로서 인장균열 및 간극수압을 고려하여 1.3을 제안하고 있으나 현장설계에서는 인장균열을 고려하지 않으면서도 1.3을 적용하는 사례들이 종종 있다.

인장균열은 제체내 둑마루부에 균열이 발생되어 강우 시 균열면에 물이 포화되면서 발생되어 사면안정을 저해하는 요인이다.

따라서 설계시 제체 침투해석만을 고려했다면, 사면활동에 관한 안전율은 반드시 1.4를 적용해야 한다.

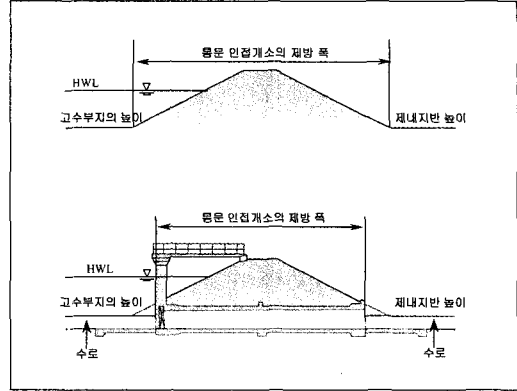


그림 12. 통문 설치 위치 제방 폭 감소

3. 배수통문 통합관리시스템 구축 방안

3.1 배수통문 현황

배수통문은 제방을 횡단하는 암거형식의 수로구조물로, 농업용수의 취득 또는 배수 등의 목적으로 설치된다. 또한, 배수통문은 연속적으로 시공되어야 하는 제방의 특성에 반하여 불연속적인 단면을 제공함으로써 제방의 취약부를 형성하고, 지반침하가 큰 지반에 말뚝기초로 지지된 통관 주변에 공동 및 상대적 지반침하(파이핑 발생 원인)에 의한 단차, 제방 폭의 감소(그림 12 참조) 등이 발생되기 때문에 하천제방 안전성을 저하시키는 구조물로 여겨진다.

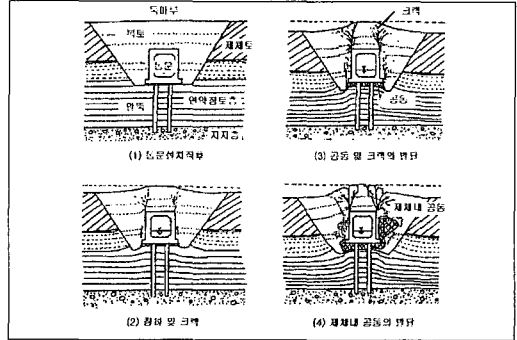
하천구조물 관련 홍수 피해는 2002년 홍수피해 전체 453건 중 54건 발생이 발생되어 전체 제방붕괴의 12%에 해당하는 것으로 보고되어 졌다. 그 주요 원인은 그림 13에서 보듯이 말뚝 처리된 배수통문 저면 공동 발생에 따른 제방 붕괴에 의한 것으로서, 일본에서 개발된 연통시험과 같은 특수안전진단기법에 의한 조사를 필요로 하였다.

배수통문 구조물 붕괴는 그림 13에서 보듯이 연약

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법



(a) 배수통문 붕괴 사례



(b) 제방붕괴 메카니즘

그림 13. 2002년도 국내 제방붕괴 사례

지반상에 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 13,000여 개의 배수통문을 조사 분석 후, 그 중 10%에 해당하는 노후 배수통문을 대상으로 연통실험과 같은 정밀안전진단기술을 적용하여 치수안전도를 극대화하고 있는 실정이다.

한편, 표 7에서는 한국수자원공사에서 운영하고 있는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)상의 국내 배수구조물 현황 및 준공 연도별 배수펌프장

세부 현황을 보여준다. 배수통문은 <표 7>에서 보듯이 1) 배수암거/용수암거/배수통문, 2) 배수통관/배수관/수로배수관, 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.

표 7. 국가 수자원관리 종합 정보시스템(WAMIS)상의 국내 배수 구조물 현황

구조물형식 관리청	I 주)	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

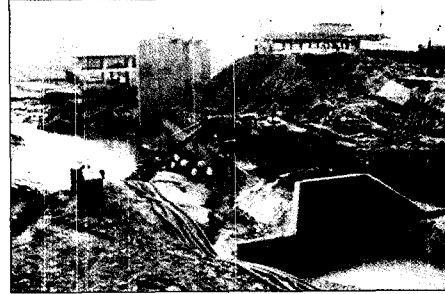


그림 14. 말뚝기초에 의한 붕괴 사례

3.2 배수통문 붕괴유형 및 개선 방안

하천제방에 설치된 배수통문은 말뚝기초 사용에 따른 배수통문 주변 공동 발생, 배수통문 설치에 따른 제방 폭 감소, 배수통문 구조물 주변 다짐 불량에 따른 누수 위험성 등에 의한 하천제방 안정성을 저하시키는 구조물로 여겨진다.

국내 배수통문 관련 붕괴유형 및 개선방안은 다음과 같다.

(1) 말뚝기초에 의한 통문 하부 공동 및 유로 발생

본 붕괴유형은 그림 14와 같이 말뚝으로 기초 처리된 배수통문에서 많이 발생된다. 붕괴 원인은 신

설 및 보축 또는 장기연약지반침하 등에 따른 제체 토사 하중으로 인한 하부 연약지반에 침하가 발생하여 홍수 시 파이핑에 의한 암거저부의 공동 발생이다. 대표적인 붕괴 제방은 백산제, 광암제, 봉산제 등이 있다.

본 파괴 유형에 대한 지반공학적 개선방안은 배수통문의 종단 설계 의무화, 약액주입공법 사용에 따른 말뚝 사용 억제, 말뚝사용 시 엄격한 설계 및 시공 관리 등이다.

(2) 보축에 따른 배수암거 붕괴

본 사례는 정밀 안전진단 없이 기존 구조물 위에 보축 설계함으로써 기존 배수암거의 노후화 및 성토 하중 변화에 따른 붕괴 유형이다. 이때 배수통문은

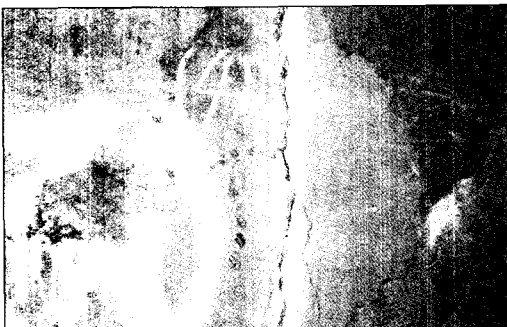


그림 15. 보축에 의한 횡방향 균열 사례



그림 16. 신축 이음부 균열 사례

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법

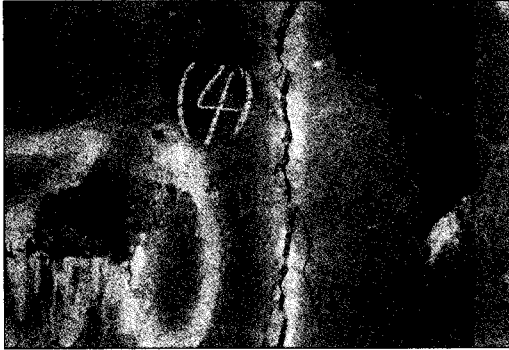


그림 15. 보축에 의한 횡방향 균열 사례

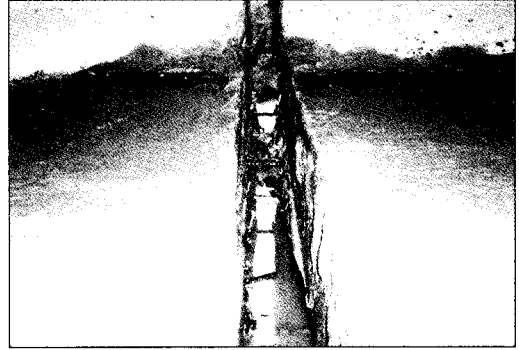


그림 16. 신축 이음부 균열 사례

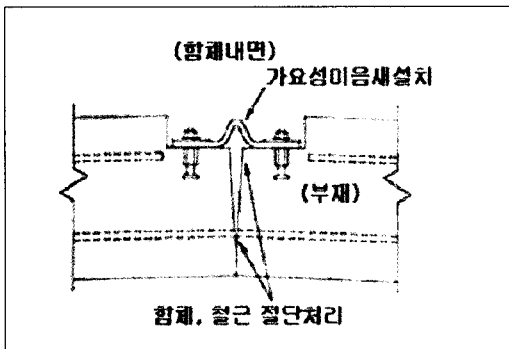


그림 17. 가요성 재료에 신축이음 사례



그림 18. 말뚝 속채움 모래의 포설 사례

그림 15에서 보듯이 횡균열 발생과 상재하중의 증가에 따른 PC 말뚝기초의 지지력 부족으로 지반침하가 동시 발생된다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 선행 안전진단 및 배수통문의 종단 설계 의무화 등이다.

(3) 신축이음부에 의한 암거의 파괴

신축이음부는 온도응력변화에 따른 콘크리트 균열 및 수축에 대한 유동성 확보와 물의 유입 방지(지수판)를 목적으로 설치된다. 신축이음부는 그림 16과 같이 제체 및 기초 변형에 따른 변형이 허용변형(20mm)보다 크게 발생할 경우 손상된다.

손상된 신축이음부는 특히 강제 배수시 내수 및

외수에 의한 토사 유실 경로가 되어 제체 함몰 및 포는 공동을 발생시킨다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 그림 17과 같은 가요성 재료에 의한 신축이음부 강화, 배수통문 종단설계 시 지중온도를 고려한 신축이음부의 배제, 강제배수/자연배수의 이원화 등이다.

(4) 말뚝 항타용 모래채움재에 따른 암거의 파괴

배수통문 시공은 연약지반 상 지하수위 또는 관측 수위 부분에서 시공이 이루어지며, 이때 말뚝 항타를 위한 항타기(약 20ton)와 같은 중장비를 동원한다. 또한, 말뚝시공은 시공특성상 장비 주행성 확보

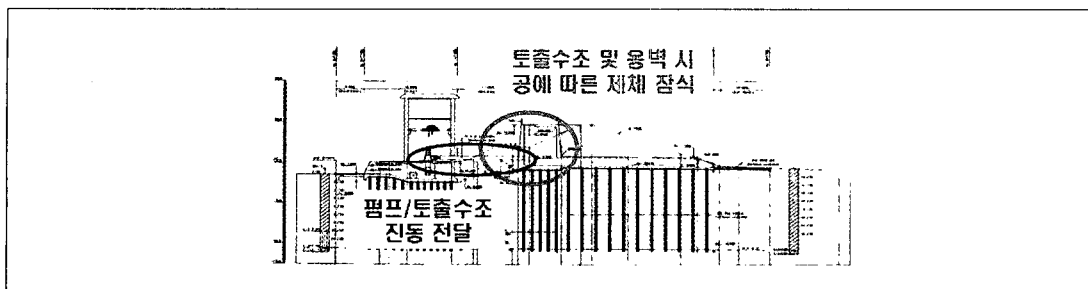


그림 19. 현행 배수펌프장 단면도

를 위한 지반보강용 사석 포설과 말뚝시공 완료의 강관 말뚝 내 빈 공동을 속채움 하기 위한 모래 채움 과정을 포함하고 있다. 이러한 사석포설 및 모래 속 채움은 그림 18에서 보듯이 시공완료 후 잘 처리하지 않을 경우 포설된 사석 및 모래층을 통한 누수가 발생되어 제방 붕괴를 야기 시킨다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정 간소화, 정밀시공유도 등을 꼽을 수 있다.

(5) 배수펌프진동 및 토출수조 구조에 의한 통문 하부 공동 및 유로 발생

본 붕괴유형은 말뚝으로 기초 처리된 배수통문에서 많이 발생하는 경우로서, 그림 19와 같이 현장 시공 시 유입된 모래나 다짐이 안 된 세립토(실트, 점토)가 제체 내 매설된 토출수조와 연결된 배수펌프 진동에 의해 동다짐 되어 통문 하부에 공동이 형성되면서 발생된다.

대표적인 붕괴 사례는 광암제 등을 들 수 있으며, 개선방안으로는 1)펌프/토출수조 연결부의 이격이나 흡진재 설치 의무화, 2)토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등이 있다.

(6) 국내 배수통문 개선방안

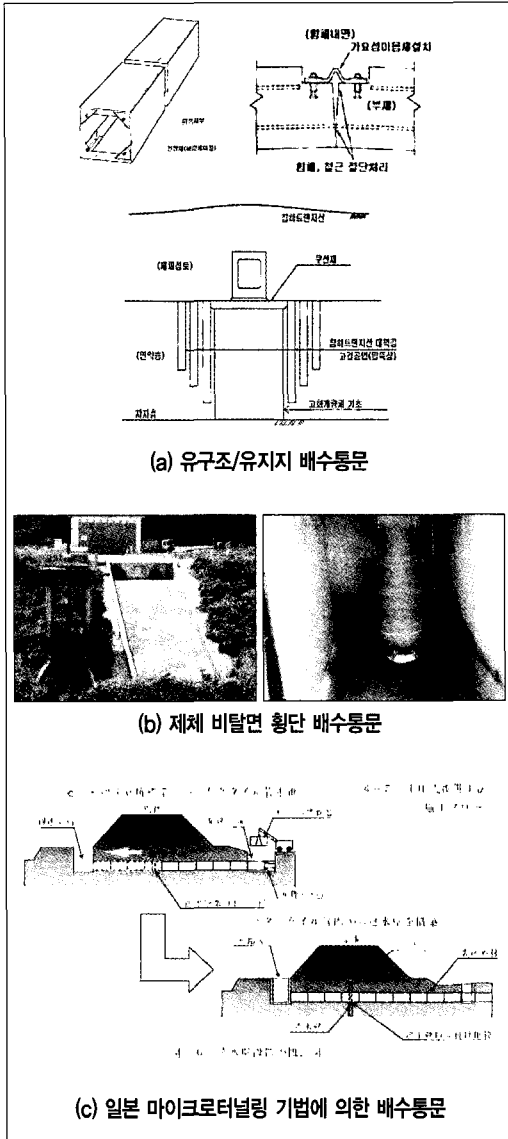
위에서 언급된 붕괴 유형별 개선방안으로는 1) 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정, 2)배수통문의 종단 설계 의무화, 3)말뚝 사용 억제, 4)보축 시 기존 배수통문의 안전진단 수행, 5) 가요성 재료에 의한 신축이음부 강화, 6) 자연배수/강제배수의 이원화, 7) 펌프/토출수조 연결부의 이격이나 흡진재 설치 의무화, 8) 토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등을 들 수 있다.

특히 현행 하천설계기준(2005)은 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정, 말뚝 사용 억제, 토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등의 경우 개정을 통하여 반영하고 있다. 향후 보완되지 않은 개선방안은 전문가들의 의견 수렴을 거쳐 하천설계기준에 반영되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 일본 및 네덜란드 등지에서는 신개념 통문을 제안하여 말뚝 처리된 연약지반 상 배수통문의 내부토체 및 외부토체의 상대적 침하에 따른 공동 발생을 억제하려는 방안들이 강구되고 있다. 그 대표적인 사례는 그림 20에서 보듯이 유구조/유지배수통문, 마이크로터널링 기법을 이용한 배수통문, 제체 비탈면 횡단 배수통문 등을 들 수 있다(國土開發技術研究 Center, 1998).

그러나 제안된 신개념 배수통문은 유구조/유지배수통문 및 마이크로터널링 기법을 이용한 배수통

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법



(a) 유구조/유지구조 배수통문

(b) 제체 비탈면 횡단 배수통문

(c) 일본 마이크로터널링 기법에 의한 배수통문

그림 20. 신개념 배수통문 개요도

문의 경우 경제성 및 국내 관련 제작 기술의 미비로 인한 도입 및 시행의 어려움 등이 있는 반면에 제체 비탈면 횡단 배수통문의 경우 국내 및 외국의 적용 사례도 있어 적용의 어려움이 없어 향후 심화연구를

통한 적용이 기대된다.

3.3 유비쿼터스 기반 안전관리시스템 구축

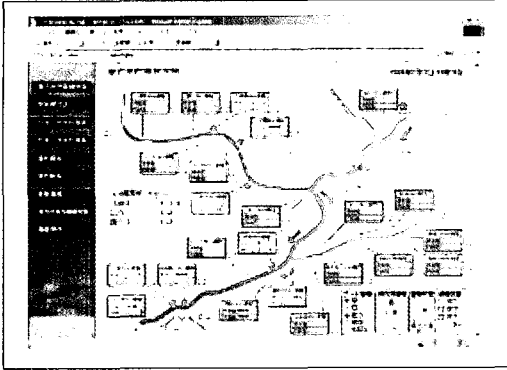
최근 들어 국내 치수사업은 제방 개수, 댐, 수문, 배수펌프장, 유수지 등의 각종 하천관리시설 건설이 주된 사업이었으나, 관련 시설정비 및 그 수가 증대함에 따른 유지관리비용이 증가하여 가까운 장래에 공공투자액의 대부분을 차지할 것이라는 예상들이 나오고 있다.

또한, 수자원장기종합계획 (2006~2020)에서는 『4.2 기술연구개발 사업의 추진계획수립』편에서 유비쿼터스 기반의 홍수재해지역 모니터링 기술 개발과 홍수재해 규모의 정량적 평가기법 등을 행정자치부(소방방재청) 및 지방자치단체 등에서 활용 가능하도록 협의하여 계획을 추진하도록 되어 있다.

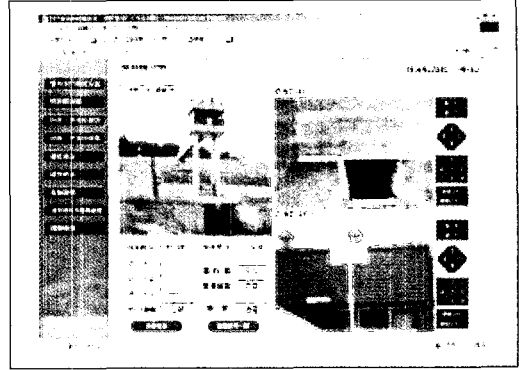
따라서 국가하천 배수펌프장 배수통문 안전관리시스템 구축은 중앙 정부 및 지방자치단체의 관련 시설의 유지관리비용을 최소화하면서 치수사업 효율성을 극대화하는 방안수립이 중요하다.

본 절에서는 유지관리 최소화 방안 사례로서 일본 이와테 하천국도사무소 『수문 정보수집시스템』을 소개하고자 한다.

일본은 『수문 정보수집시스템』을 이용하여 홍수 재해지역에 유비쿼터스 기반의 하천관리시스템을 도입하여 유지관리비용을 최소화한 안전관리시스템을 운영하고 있다. 일본 키타가미강은 이와테현과 미야기현을 흐르는 본류하천으로, 유역면적 10,150km², 유로연장 249km의 토호쿠 지역 최대 1급 하천이다. 본 하천은 이와테현과 미야기현 경계선 부근에 있는 협착부에 의한 홍수 시 수위상승에 따른 이와테현 홍수피해를 자주 유발시킨다.



(a) 수문 현황도



(b) 개별 수문 조작 정보

그림 21. 『통문·통관의 운용, 관리시스템』 메인 Web 화면 정보

일본 정부는 이에 대한 대책으로 오랫동안 분류 지류에 댐, 제방, 통문 및 통관 등의 건설, 이와테현 남부 이치노세키 총적평야의 우수지로의 개수 등 홍수피해경감을 위한 대책을 수립하였다. 또한, 기타가미강 관할 이와테 하천국도사무소는 『통문·통관의 운용, 관리시스템』을 채용하여 이치노세키 출장소에 『수문 정보수집시스템』을 설치하였다. 이때 수문 정보처리장치 및 감시장치 등은 기타가미강과 그 지류인 사테츠강, 반이강 등의 전 23개소 통문 및 통관에 설치되었다.

한편, 조사결과, 일본 통문 및 통관 피해는 다음과 같은 수문 운용상의 문제점들에 의해 발생되었다.

- 수문조작이 야간에 발생하여 관리자에 대한 연락 지연으로 수문조작 타이밍을 놓친 경우
- 홍수 범람에 의한 관리자가 통문 및 통관에 접근하지 못한 경우
- 현장에 도착했을 경우 수문 조작타이밍을 놓쳐 수문을 닫지 못한 경우
- 수문조작 정보를 공유하지 못함으로써 다른 관리자가 종료현장에 중복 투입되는 경우

따라서 전술된 문제점을 극복하고자 일본에서는 1) 수위정보수집의 실시간화, 2) 수문조작의 원격화, 3) 수문조작 정보의 공유화, 4) 관리자 상호간 연락 강화 등을 위한 유비쿼터스 시스템을 활용한 『통문·통관의 운용, 관리시스템』을 도입하였다.

그림 21은 『통문·통관의 운용, 관리시스템』 메인 Web 화면상의 관내 수문 현황도 및 개별 수문 조작 정보 등을 보여준다. 본 시스템은 현장에 설치된 여러 대의 모니터링 설비와 관리소에 설치된 감시제어 설비 등이 하천유역에 매설된 광섬유 네트워크를 매개로 하여 접속된다.

본 시스템 모니터링 설비는 “자동계측장치”와 “수동입력계측장치” 등 2가지 종류가 있다. 자동계측장치는 1) 제어처리부, 2) 수위계 변환기, 3) 수문 제어용 “릴레이반”, 4) 백업전원 “무정전 전원장치(UPS)”, 5) “광 스위칭 허브” 등의 네트워크기기, 6) 낙뢰로부터 장치를 보호하는 “내낙뢰 트랜스”, 7) 수문 개폐시 현장주변에 주의를 촉구하는 “스피커” 및 “경보장치” 등으로 구성된다.

반면에 수동입력계측장치는 수동조작이 필요한 통문 및 통관을 대상으로 설치되었기 때문에 현장에

하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학적 접근 방법

도착한 관리자가 내외수위 및 수문 상태 등을 관리소로 통지하는 “터치패널식 입력부” 만을 갖춘 것이다.

또한, 관리소의 감시제어설비는 각 계측장비로부터 내외수위나 수문 상태정보를 실시간으로 수집·축적하여 본 장치에 접속된 클라이언트 단말PC를 이용한 수문 제어를 실현시킨다. 본 설비는 1) 감시와 제어처리 전반을 담당하는 “처리서버”, 2) 수집한 정보를 축적하고 관리하는 “데이터베이스(이하 DB) 서버”, 3) 각종 DB 정보 및 제어지령을 수집서버로 전송하는 “Web서버”, 4) 관리자 휴대전화에 대해 자동으로 음성지시를 하는 “통지서버”, 5) 정확한 시각 교정을 위한 “GPS 수신장치” 및 “NTP 서버”, 6) 네트워크 접속에 필요한 “L3스위치” 및 “광성단합” 등이 장착된다. 또한 처리 서버, DB 서버, Web 서버 등 37가지 서버는 각각 2대, 총 6대 장착하여 1대의 서버가 정지해도 운용에 지장을 초래하지 않는 이중구조로 되어 있다. 본 시스템에는 주로 “감시”, “제어”, “정보 제공”, “조작요원 통보”의 4개 기능이 있으며 각 기능은 다음과 같이 정리할 수 있다.

본 시스템은 내외수위나 수문 상태 등의 실시간 정보와 더불어 관리자 도착정보 및 기기 이상 고장 정보 등을 지도상에 일괄표시하고 있어 정보의 일원화가 가능하며, 관리자 및 출장소 직원 등의 상황을 간단히 파악할 수 있다.

1) 감시기능

관리소에서는 통문이나 통관의 내외수위나 수문 상태를 실시간으로 파악할 수 있다. 또한 모니터링 설비 뿐만 아니라 수문 조작반이나 카메라 등의 기기상태도 감시할 수 있다. 카메라 시스템은 카메라 컨트롤에 의해 통문 및 통관의 자체상태나 주변상황을 영상으로 감시할 수 있다.

2) 제어기능

관리자는 제어권한이 주어진 단말 PC의 조작화면에서 수문을 조작할 수 있다. 특히 조작화면은 현지의 수문 조작반과 동일 순서로 조작할 수 있는 구조로, 단말 PC의 마우스 조작을 통해 손쉽게 수문 개폐 조작을 할 수 있다.

3) 정보제공기능

감시제어설비는 접속된 클라이언트 단말 PC로부터 (1)의 정보나 영상을 간단히 열람할 수 있다. 또한 관리소내의 인터넷상에 있는 단말 PC에서도 열람할 수 있어 정보의 공유가 확대되어 긴급 시 발생할 우려가 있는 정보의 뒤섞임을 방지하는데 도움이 된다.

4) 관리자 통보기능

수집한 정보를 미리 설정한 조건으로 판정하여 “출동”, “대기”, “수문 열림”, “수문 닫힘”, “전화연락”, “귀가” 등의 지시를 조작요원의 휴대전화로 자동 통지할 수 있다.

4. 맺음말

최근 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 요소기술의 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 않았으나 하는안타까움이 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 탐지할 수 있는 유비쿼터스 시스템을 이용한 안전관리 시스템, 연통시험과 지반침하를 고려한 유구조/유지 지 배수통문 시스템 등을 제안해 놓은 실정에 있다.

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

참고문헌

1. 김진만 (2006), 하천제방 안정성(지반공학적 측면), 한국수자원학회, 물과 미래 Vol392, No.5, pp. 20~27.
2. 안시권 (2006), '06 수해방지 대책 업무 추진 방향, 한국하천협회, 하천과 문화 Vol.2, No.2, pp. 75~82.

3. 건설교통부/한국수자원공사 (2006), 수자원장기종합계획 (2006~2020), pp. 566~567.
4. 감사원 (2003), 자연재해 대비실태 감사결과, pp169~171.
5. 국토연구원 (2004), 하천의 유지관리방안 연구, pp III 29~III 33, 건설교통부
6. 건설교통부 (2001), 댐설계기준
7. 한국건설기술연구원 (2004), 하천제방 관련 선진기술 개발, 건설교통부.
8. 한국건설기술연구원 (2005), 하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 연구, 건설교통부.
9. 한국수자원학회 (2002), 하천설계기준.
10. 한국수자원학회 (2005), 하천설계기준.
11. 한국수자원학회 (1999), 하천공사표준시방서
12. 日本 建設省 (2000). 河川堤防設計指針.
13. 國土開發 技術研究 Center (1998). 柔構造 通門 設計의 入門.
14. NAVFAC 매뉴얼 (1986), Foundation & Earth Structures.
15. Noriyuki Tsukada et al. (2005), Construction of 16. Management System for Sluice Structures, 日本無線技報 No.47, pp. 75~79.

