

국내 하천 제방의 붕괴원인 및 대책



김진만

한국건설기술연구원
국토지반연구부 수석연구원
e-mail : 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 뿐 만 아니라 지반공학적인 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.

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, 말뚝 사용의 예외적 제한 등
- 파이핑 방지 관련 설계 및 대책공법의 보완

최근 외국의 제방설계는 기존 제방 설계의 문제점을 보완하고자 일반 구조물과 같이 수리학적 혹은 지반공학적인 안정성을 바탕으로 외력과 내력의 비교를 기본으로 하는 설계 방식에서의 전환을 추진하고 있다. 예로써 제방설계에 요구되는 수치해석은 기존의 정상침투/포화 해석에서 미국, 유럽 등 정상침투/포화불포화 해석으로, 일본의 경우 비정상침투/포화불포화 해석으로 전환되는 추세에 있다. 이러한 해석 모델은 현장의 포화조건과 가까운 모델을 선정함으로써 해석결과의 정확성을 유도하려는 것이다.

하천제방은 표준단면도로 설계가 필요 없는 구조물이 아

니라 교량이나 터널과 같이 경제성 및 안전성을 고려하여 더욱 더 숙련된 엔지니어의 경험이 요구되는 설계 분야이다.

본 고에서는 2007년 지반공학회에 제출된 “하천제방 안정성에 대한 지반공학적인 접근” 기술보고 자료를 기초로 하여 하천제방 현황, 붕괴원인, 문제점 및 그 대책방안 등을 제시하고자 하였다 (김진만, 2007).

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 홍수 피해가 큰 지역적 특성을 갖고 있다 (안시권, 2006).

예로써 국내 강수량은 연도별 750~1,680mm 정도로 큰 차이가 보이며, 계절별로도 여름철 강수 집중도가 62%를 보이고 있다. 반면에 외국 여름철 강수 집중도는 프랑스의 경우 40%, 일본의 경우 47% 등으로 우리나라에 비해 작다.

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

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

2.2 제방붕괴 유형

국내 제방붕괴 유형은 <그림 1> 및 <그림 2>에서 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, 지반공학적인 제체불안정 요소 억제, 구조물 유지관리 등과 관련된 정책대안 수립을 요구한다.

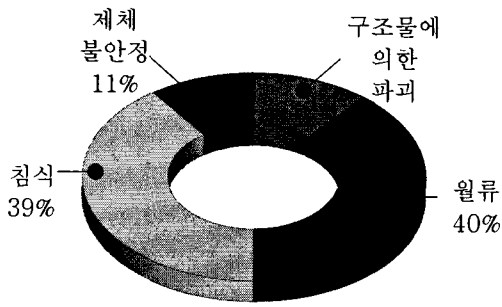
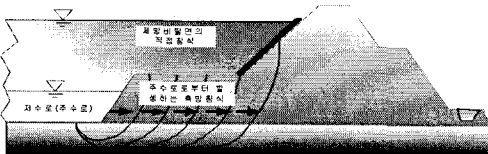


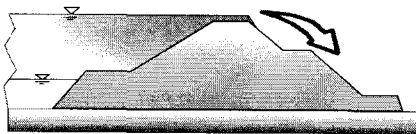
그림 1. 제방 피해 유형 (안시권, 2006)



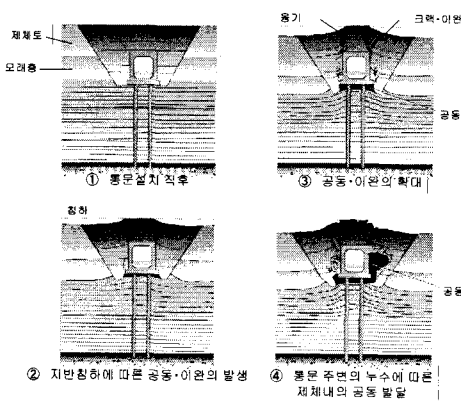
(a) 침투에 의한 제방붕괴



(b) 침식에 의한 제방붕괴



(c) 월류에 의한 제방붕괴



(d) 배수구조물에 의한 제방붕괴

그림 2. 하천제방의 주요 붕괴 원인 (건기연, 2004)

2.3 하천관리현황

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

수자원장기종합계획(2006~2020)에 의하면, 국내 하천 연장 및 등급별 개수현황은 <표 2>에서 보듯이 2004년 말 현재 개수가 필요한 연장의 경우 36,517km 이며, 약 78.45%인 28,622km가 개수된 상황이다. 수자원장기종합계획(1991~2001)에서는 본류와 지류를 일괄하는 치수사업 확대를 통해 2007년 까지 하천개수 100% 달성 계획을 추진 중에 있다(건설교통부/한국수자원공사, 2006).

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

또한, 2003년 감사원 감사결과에 의하면, 국내 하천 관리 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 하천관리인력이 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 3>에서는 하천관련 중앙조직의 주요 업무를 보여준다. <표 3>에서 보듯이 국가 하천유지관리체계는 5개 부처가 관련됨으로써 효율적인 하천 유지관리에 대한 혼선이 다소 발생되곤 한다.

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 운용정책은 홍수 시 내수배제를 위한 홍수 방재차원측면에서 배수펌프장의 역할 한계를 규정짓고 있어, 홍수다발지역에 대한 합리적인 배수펌프장 설계 용량의 개선에 대한 변화된 운용을 요구한다.

표 3. 하천 관련 중앙조직의 주요 업무 (국토연구원, 2004)

구분	관 리 업 무	개 발 업 무
건설 교통 부	- 하천관리 - 홍수예보 및 수문관측 - 광역상수도 관리 - 다목적 댐 관리 - 지하수 관리	- 다목적 댐 건설 - 광역상수도 건설 - 내륙주운 건설
환 경 부	- 수질관측 및 규제 - 하천정화사업 - 지하상하수도 정비계획 - 오·폐수 처리시설	- 도시하수처리시설 건설 - 공장폐수처리시설 건설
행 정 자 치 부	- 소하천 관리 - 재해대책 - 내수면 어업 관리	- 지방상수도 건설 - 지방하수처리시설 건설
농 림 부	- 농업관련 관개용수 관리 - 농업용 하구둑 관리	- 농업 관개용수의 개발 - 간척지, 담수호 개발

2. 제방 안정성 제고를 지반공학적 대안

2.1 하상토 활용의 합리적 방안

낙동강 수계 하상토 발생 특성은 전체적으로 하천 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 4>에서는 낙동강 수계의 안동댐 하류~낙동강 하구언 구간 총 22개소 하상토 조사구간 중 4개소 하상토 및 제방재료에 대한 입도분포시험 및 통류분류법 등에 의한 흙 분류 결과를 보여준다. 한편, <그림 5>에서는 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.

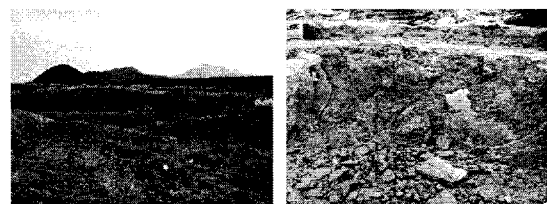
국내 발생 강모래 하상토는 흙의 내부마찰각이 34° 이상으로서 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로써 활동과 같은 강도측면의 안정성이 확보된 것으로 나타났으며, 특히 전단강도특성만을 비교해 볼 때 양질의 제방재료인 화강풍화토 보다 우수한 것으로 평가된다.

<그림 6>에서 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(공기진조공법, 트랜치굴착공법, 야적공법, 성토탈수공법, 강제건조공법), 입도조정기법(입도조정공법), 안정처리기법(시멘트안정처리공법, 석회안정처리공법)등 있다. 이중 많이 쓰이는 공법은 입도조정공법과 시멘트 안정처리공법이다.

표 4. 낙동강 수계 하상토 및 제방재료의 입도특성

구 분	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
통일분류	SP	SP



(a) 왜관교

(b) 왜관 2교



(c) 양산 물금

(d) 을숙도

그림 5. 하상토 채취 위치 및 현장 전경

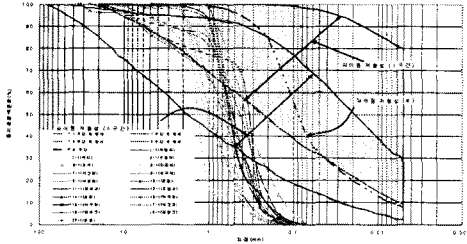


그림 6. NAVFAC 기준에 따른 국내 하상재료의 제체 높수에 대한 저항성 분석

일반적으로 하상토 활용기법은 입도조정기공법의 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 인자 중 메쉬의 크기, 고수위 지속시간, 시간 변화에 따른 수위 조건, 토질설계정수의 선정, 사면 안전율 적용 등 현장 설계의 문제점 도출 및 합리적 해결방안을 제시하고자 한다.

한편, 침투해석은 <그림 7>과 같은 해석단면에 대해 약 4,000 여 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 8>은 메쉬 크기에 따른 침투해석 결과를 보여준다. 국부동수경사(i)는 <그림 8>에서 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 감

소하는 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.

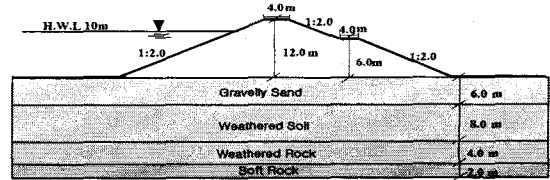


그림 7. 침투해석에 사용된 단면

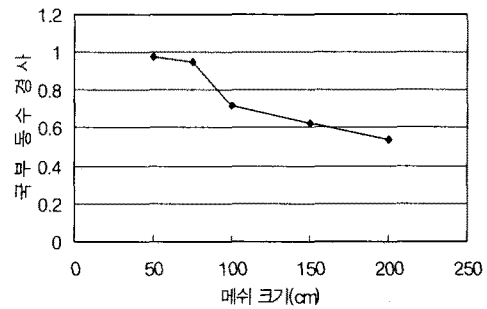


그림 8. 메쉬 크기에 따른 해석 결과

(2) 정상수위 고수위 지속시간의 고려

<그림 9>는 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 10>에서 보듯이 정상수위조건에 의한 고수위 지속시간은 제체내 침윤면 형상 및 크기가 고려 시간대별로 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.

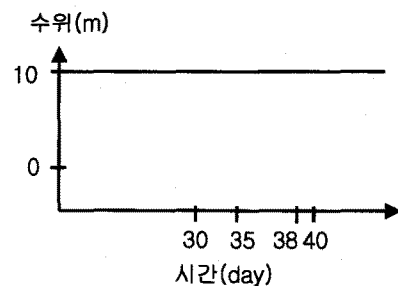


그림 9. 정상수위조건

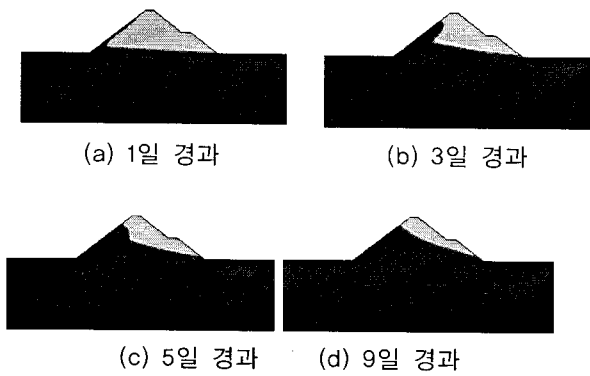


그림 10. 고수위지속시간에 따른 침투해석 결과

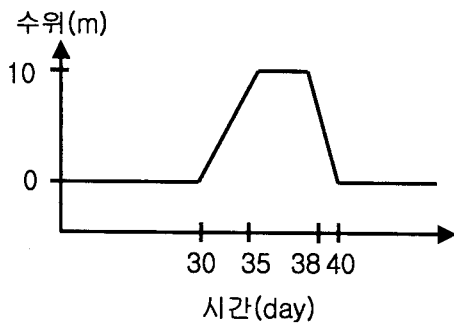


그림 11. 비정상수위조건

(3) 수위파형에 대한 고려

<그림 11>은 현장 수위관측 데이터를 이용하여 비정상수위조건을 보여준다. 본 수위파형은 적절한 산정이 이루어졌을 경우 경제적 설계를 유도할 수 있다. 반면에 본 수위파형을 고려한 설계는 홍수파형 뿐만 아니라 강우특성을 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 5>에서 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, 다짐관리 취약성, 구조물 주변 다짐관리기준 및 다짐장비 선정의 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 90%, 노상의 경우 95%로 관리하여 일본 하천설계기준이 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.

표 5. 국내 및 일본 다짐관련 기준

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

(5) 사면해석 시 기준 안전율 적용 오류

<표 6>은 하천설계기준(2005)상의 제체 상태에 따른 사면 안전율을 보여준다. <표 6>에서 보듯이 사면활동 해석은 침투에 따른 간극수압 변화, 제체내 인장균열 발생유무 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 독마루부에 균열이 발생되어 강우시 균열면에 물이 포화되면서 발생되어 사면안정을 저해하는 요인이다.

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

표 6. 제체 상태에 따른 안전율

제체 상태	간극수압상태	안전율
인장균열 불고려 시	간극수압 고려	2.0 이상
	간극수압 불 고려	1.4 이상
인장균열 불고려 시	간극수압 고려	1.8 이상
	간극수압 불 고려	1.3 이상

3. 배수통문 통합관리시스템 구축 방안

3.1 배수통문 현황

배수통문은 제방을 횡단하는 암거형식의 수로구조물로, 농업용수의 취득 또는 배수 등의 목적으로 설치된다. 또

한, 배수통문은 연속적으로 시공되어야 하는 제방의 특성에 반하여 불연적인 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 2> (d)에서 보듯이 말뚝 처리된 배수통문 저면 공동 발생에 따른 제방 붕괴에 의한 것으로서, 일본에서 개발된 연통시험과 같은 특수안전진단기법에 의한 조사를 필요로 한다.

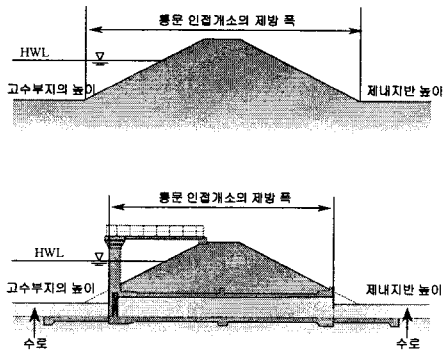


그림 12. 통문 설치 위치 제방 폭 감소

한편, <표 7>에서는 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.

표 7. 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)상의 국내 배수구조물 현황

구조물 형식 관리청	구분						
	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

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

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 13>과 같이 말뚝으로 기초 처리된 배수통문에서 많이 발생된다. 붕괴 원인은 신설 및 보축 또는 장기연약지반침하 등에 따른 체제 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 시공관리 등이다.

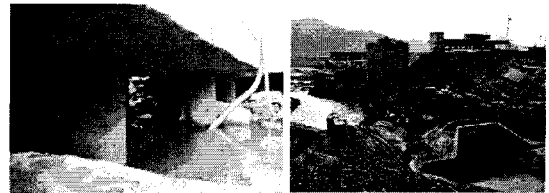


그림 13. 말뚝기초에 의한 붕괴 사례

(2) 보축에 따른 배수암거 붕괴

본 사례는 정밀 안전진단 없이 기존 구조물 위에 보축 설계함으로써 기존 배수암거의 노후화 및 성토하중 변화에 따른 붕괴 유형이다. 이때 배수통문은 <그림 14>에서 보듯이 횡균열 발생과 상대하중의 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 15>과 같이 체제 및 기초 변형에 따른 변형이 허용변형(20mm) 보다 크게 발생할 경우 손상된다.

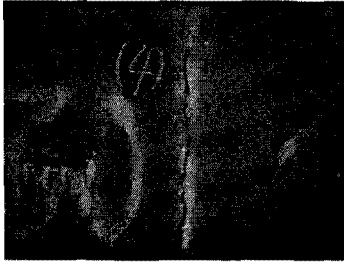


그림 14. 보축에 의한 횡방향 균열 사례

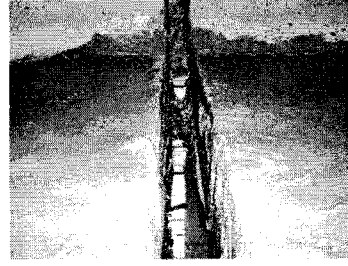


그림 15 신축 이음부 균열 사례

손상된 신축이음부는 특히 강제 배수시 내수 및 외수에 의한 토사 유실 경로가 되어 제체 함몰 및 또는 공동 발생시킨다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 <그림 16>과 같은 가요성 재료에 의한 신축이음부 강화, 배수통문 중단설계시 지중온도를 고려한 신축이음부의 배제, 강제배수/자연배수의 이원화 등이다.

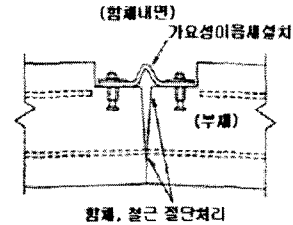


그림 16. 가요성 재료에 신축이음 사례

(4) 말뚝 항타용 모래채움재에 따른 암거의 파괴

배수통문 시공은 연약지반 상 지하수위 또는 관측수위 부분에서 시공이 이루어지며, 이때 말뚝 항타를 위한 항타기(약 20ton)와 같은 중장비를 동원한다. 또한, 말뚝시공은 시공특성상 장비 주행성 확보를 위한 지반보강용 사석 포설과 말뚝시공 완료의 강관 말뚝 내 빈 공동을 속채움 하기 위한 모래 채움 과정을 포함하고 있다. 이러한 사석포설 및 모래 속채움은 <그림 17>에서 보듯이 시공 완료 후 잘 처리하지 않을 경우 포설된 사석 및 모래층을 통한 누수가 발생되어 제방 붕괴를 야기 시킨다.

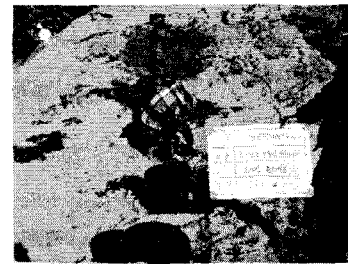


그림 17. 말뚝 속채움 모래의 포설 사례

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 배수통문 주변 성토 재료 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 18>과 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.

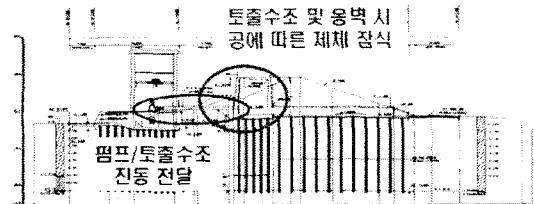


그림 18. 현행 배수펌프장 단면도

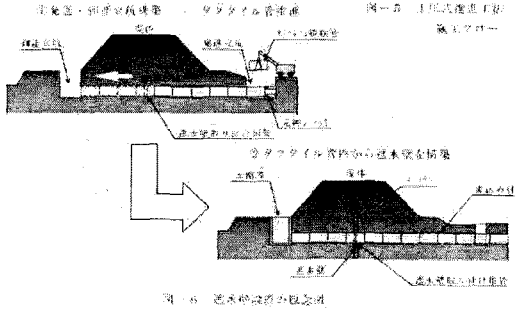
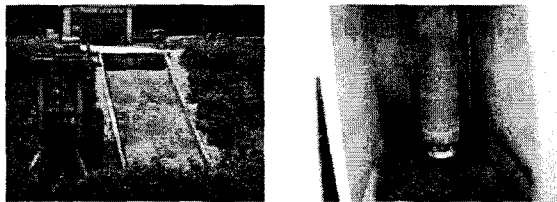
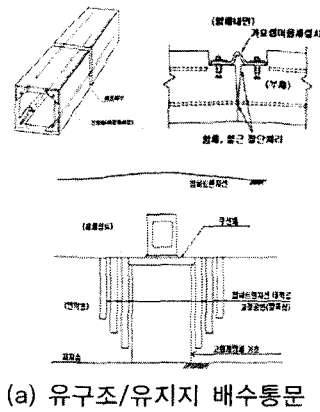
대표적인 붕괴 사례는 광암제 등을 들 수 있으며, 개선 방안으로는 1)펌프/토출수조 연결부의 이격이나 흡진재 설치 의무화, 2)토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등이 있다.

(6) 국내 배수통문 개선방안

위에서 언급된 붕괴 유형별 개선방안으로는 1) 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정, 2)배수통문의 중단설계 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 성토 재료 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 19>에서 보듯이 유구조/유지지 배수통문, 마이크로터널링 기법을 이용한 배수통문, 제체 비탈면 횡단 배수통문 등을 들 수 있다(國土開發 技術研究 Center, 1998).



(a) 유구조/유지지 배수통문

(b) 제체 비탈면 횡단 배수통문

(c) 일본 마이크로터널링 기법에 의한 배수통문

그림 19. 신개념 배수통문 개요도

그러나 제안된 신개념 배수통문은 유구조/유지지 배수통문 및 마이크로터널링 기법을 이용한 배수통문의 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.

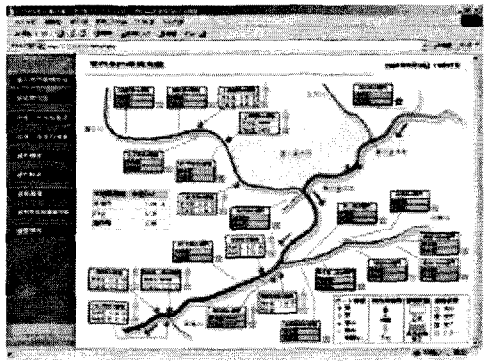
따라서 국가하천 배수펌프장 배수통문 안전관리시스템 구축은 중앙 정부 및 지방자치단체의 관련 시설의 유지관리비용을 최소화하면서 치수사업 효율성을 극대화하는 방안 수립이 중요하다.

한편, 일본은 『수문 정보수집시스템』을 이용하여 홍수재해지역에 유비쿼터스 기반의 하천관리시스템을 도입하여 유지관리비용을 최소화한 안전관리시스템을 운영하고 있다.

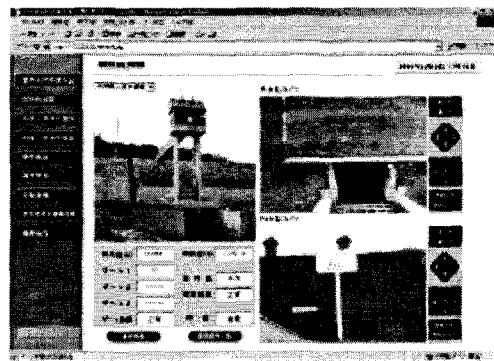
일본 키타가미강은 이와테현과 미야기현을 흐르는 본류하천으로, 유역면적 10,150km², 유로연장 249km의 토호쿠 지역 최대 1급 하천이다. 본 하천은 이와테현과 미야기현 경계선 부근에 있는 협착부에 의한 홍수 시 수위 상승에 따른 이와테현 홍수피해를 자주 유발시킨다.

일본 정부는 이에 대한 대책으로 오랫동안 본류 지류에 댐, 제방, 통문 및 통관 등의 건설, 이와테현 남부 이치노세키 충적평야의 유수지로의 개수 등 홍수피해경감을 위한 대책을 수립하였다.

<그림 20>은 『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 감시제어설비 등이 하천 유역에 매설된 광섬유 네트워크를 매개로 하여 접속된다.



(a) 수문 현황도



(b) 개별 수문 조작 정보

그림 20. 『통문·통관의 운용, 관리시스템』 메인 Web 화면 정보

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 이는 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 탐지할 수 있는 유비쿼터스 시스템을 이용한 안전관리시스템, 연통시험과 지반침하를 고려한 유구조/유지배 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 암거설계 기술 등이 수자원, 지반, 구조분야의 공동 연구로 하루빨리 정착되어 국민들의 삶의 질을 향상시키기를 기대한다.

참고문헌

- 김진만(2007), “하천제방 및 배수통문 관리에 대한 지반공학 적 접근 방법”, 한국지반공학회, 한국지반공학회지, vol.23, No.5, pp.7~24.
- 한국건설기술연구원 (2004), 하천제방 관련 선진기술 개발, 건설교통부.
- 안시권 (2006), '06 수해방지 대책 업무 추진 방향, 한국하천협회, 하천과 문화 Vol.2, No.2, pp. 75~82.
- 건설교통부/한국수자원공사 (2006), 수자원장기종합계획 (2006~2020), pp. 566~567.
- 감사원 (2003), 자연재해 대비실태 감사결과, pp169~171.
- 국도연구원 (2004), 하천의 유지관리방안 연구, pp III29~III33, 건설교통부
- 건설교통부 (2001), 댐설계기준
- 한국건설기술연구원 (2005), 하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 연구, 건설교통부.
- 한국수자원학회 (2002), 하천설계기준.
- 한국수자원학회 (2005), 하천설계기준.
- 한국수자원학회 (1999), 하천공사표준시방서
- 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.
- NAVFAC 매뉴얼 (1986), Foundation & Earth Structures.
- Noriyuki Tsukada et al. (2005), Construction of Management System for Sluice Structures, 日本無線技報 No.47, pp. 75~79.