

하천제방의 합리적인 설계 방안

A Study of alternative to rational design of Levee

김진만¹⁾, Jin-man Kim, 최봉혁²⁾, Bong-hyuck Choi

¹⁾한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원, Research Fellow, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

²⁾한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원, Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Causes of the levee collapse are directly or indirectly associated with geotechnical engineering as well as hydraulics. In this paper, literature survey and analysis were conducted to present the alternatives in geotechnical engineering issues for rational levee design. The alternatives include the reasonable river-bed soil utilization and precautions of numerical analysis and slope stability analysis, disruption type and improvement method of drainage facility

Keywords : levee, FEM, slope stability, drainage facility

1. 서 론

제방은 유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지(홍수로부터 보호대상인 하천 바깥의 농경지와 주거지)를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물이다(하천설계기준, 2005). 그러나, 최근 노후화 및 이상홍수로 인하여 하천 제방은 치수구조물로서 안정성이 떨어지고, 홍수 시 제방붕괴로 인한 많은 인명 및 재산피해를 야기하고 있는 실정이다.

이때, 국내 제방붕괴 유형은 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).

이러한 하천제방 붕괴 원인은 수공학적 원인 뿐 아니라 지반공학적 원인과 직·간접적으로 관련되어 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 하천설계기준은 2005년 이후 치수 구조물로서 제방분야 설계기준 개정과 관련하여 수공학 및 지반공학 관련 전문가가 공동 대안을 제시하였다는 점에서 큰 의의가 있다. 그럼에도 불구하고 국내 하천제방 관련 설계기준은 안정성 및 합리성에 있어서 미국, 일본, 유럽 등에 비해 매우 미흡한 수준으로 지속적인 관련 전문가들의 연구·보완이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 하천제방의 합리적인 설계에 있어서 지반공학과 관련된 합리적인 하상토 활용방안, 수치 해석 및 비탈면 안정성검토 시 유의사항, 배수통문 붕괴 유형 및 개선방안 등과 관련 문헌을 분석·정리하여 지반공학적 대안을 제시하고, 수공학분야의 공동 협력 필요성을 재인식시키고자 하였다.

2. 제방 안정성 제고를 지반공학적 대안

2.1 하상토 활용의 합리적 방안

하천설계기준(2009, 한국수자원학회)에서는 제체재료의 경우 일반적으로 흙을 사용하는 것으로 되어 있으며, 일반 도로의 경우와 달리 흙의 전단강도측면 뿐만 아니라 물의 침투방지를 고려한 투수특성을 충분히 고려하도록 되어 있다. 그러나, 설계기준에 적합한 양질의 성토재료는 실제 하천제방 시공 현장에서 구하기 힘들기 때문에 하상토의 합리적인 활용 방안이 요구된다.

한편, 국내 하상토 발생현황은 낙동강 수계의 경우 전체적으로 하천 분류를 따라 강사인 입경이 균등한 모래(SP)가 발생되며 물의 저류로 인한 퇴적특성이 우세한 지역에서 불연속적으로 점토나 실트계열의 세립한 하상토가 발생하는 경향을 보인다.

표 1. 에서는 낙동강 수계의 안동댐 하류~낙동강하구인 구간 총 22개소 하상토 조사구간 중 4개소 하상토 및 제방재료에 대한 입도분포시험 및 통류분류법 등에 의한 흙 분류 결과를 보여준다. 입도분석 결과에서 보듯이 4개소 낙동강 제방은 하상토와 유사한 공학적 특성을 보여 하상토를 이용하여 축조되었음을 알 수 있다.

그림 1. 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.

하상토 활용에 따른 안정대책은 입도조정기법의 경우 혼합토로서 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.

이때, 하상토(SP)에 화강풍화토를 혼합한 혼합토의 투수계수는 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 1×10^{-2} 에서 1×10^{-5} cm/sec 정도로 작아지는 경향을 보인다. 따라서, 하상토(SP)와 같은 강모래를 제방재료로 활용할 경우에는 현장배합시험에 의한 투수특성 평가를 통한 최소 혼합률을 결정하여 사용하여야 하며, 국내 하천설계기준(2005) 및 하천공사표준시방서(1999)에는 하상토 활용과 관련된 세부시행지침이 없어 현장토 활용에 장애 요인으로 나타나고 있는 실정으로 이에 대한 보완이 필요하다.

표 1. 낙동강 수계 하상토 및 제방재료 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

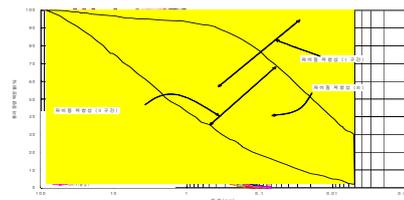


그림 1. 하상재료의 제체누수에 대한 저항성 분석

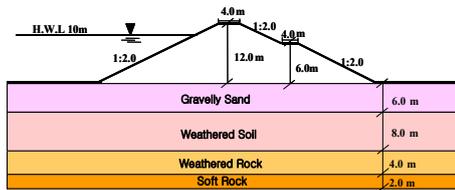
2.2 합리적인 침투해석 방안

하천제방의 침투해석은 설계 외력 및 제방 모델을 대상으로 수행하며, 해석결과는 파이핑 및 사면안정성평가에 이용되기 때문에 하천제방 안정성 평가에 있어서 중요한 부분이다. 본 논문에서는 침투해석에 영향을 미치는 인자 중 메쉬의 크기, 수위 조건 등 설계 실무 상의 문제점 도출 및 합리적 해결방안을 제시하고자 한다.

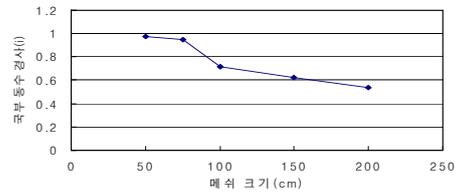
(1) 메쉬 크기에 대한 고려

그림 2. (b)는 메쉬 크기에 따른 침투해석 결과를 보여준다. 국부동수경사(i)는 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 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



(a) 침투해석에 사용된 단면



(b) 메쉬 크기에 따른 해석 결과

그림 2. 침투해석 단면 및 메쉬 크기 효과

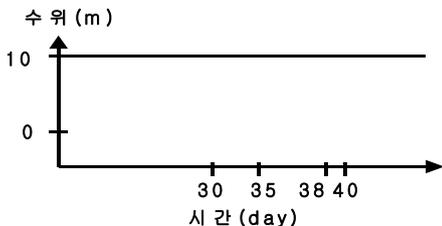
(2) 침투해석 수위조건의 영향

그림 3. (a)는 설계실무에서 수위과형에 대한 정보가 없을 경우 댐 설계와 동일한 방법으로 적용되는 정상수위 조건을 보여준다(뎀설계기준, 2001). 본 수위과형은 정상수위지속시간을 무한히 하여 설계하면 과다 설계값이 제시되는 반면에 지속시간을 조정할 경우 과소 설계를 유발할 수 있다.

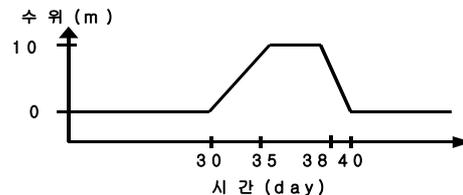
정상수위조건에 의한 고수위 지속시간은 제체내 침윤면 형상 및 크기가 고려 시간대 별로 변화됨으로 합리적 지속시간을 고려하여야 한다. 분석결과, 침윤선은 입경이 균등한 모래(SP)일 경우 9일 이상, 투수성이 작은 점토질 모래(SC)인 경우 20일 이상인 것으로 나타났다.

한편, 그림 3. (b)는 현장 수위관측 데이터를 이용하여 비정상수위조건을 보여준다. 본 수위과형은 적절한 산정이 이루어졌을 경우 경제적 설계를 유도할 수 있다. 반면에 본 수위과형을 고려한 설계는 홍수과형 뿐만 아니라 장우특성을 반드시 함께 고려하여 반영하여야 한다.

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



(a) 정상수위조건



(b) 비정상수위조건

그림 3. 정상수위 및 비정상수위조건

2.3 합리적인 비탈면 안정성해석 방안

(1) 비탈면 안정성해석 시 기준 안전율 적용 오류

표 2.는 하천설계기준 상의 제체 상태에 따른 비탈면 안전율을 보여준다. 표 2.에서 보듯이 비탈면활동 해석은 침투에 따른 간극수압 변화, 제체내 인장균열 발생 유·무 등을 고려하도록 되어 있다. 하천설계기준은 비탈면활동 해석시 적정의 최소 안전율로서 인장균열 및 간극수압을 고려하여 1.3을 제안하고 있으나 현장설계에서는 인장균열을

표 2. 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

고려하지 않으면서도 1.3을 적용하는 사례들이 종종 있다.

인장균열은 제체내 독마루부에 균열이 발생되어 강우 시 균열면에 물이 포화되면서 발생되어 사면안정을 저해하는 요인이다. 따라서, 설계시 제체 침투해석만을 고려했다면, 사면활동에 관한 안전율은 반드시 1.4를 적용해야 한다.

(2) 제방 설계 시 도로 관련 토질설계정수의 준용

하천설계기준은 하천제방 다짐과 관련하여 2002년판의 경우 상대다짐도 85%로, 2005년 이후 90%로 실시하도록 되어있다. 이때, 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.

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 하천설계기준은 2005년 개정 이후 다짐기준을 상향 조정함으로써 도로설계정수를 사용할 수 있는 기틀을 제시하였다.

(3) 비탈면 안정계산 시 합리적인 수위조건 적용 필요

비탈면 안정계산 시 고려되는 침윤선 변화에 따른 간극수압은 완공 직후에 있어서의 흙속의 응력변화로 발생하는 간극수압을 초기조건으로 하며, 현장여건 및 수위조건을 고려하여 1) 계획홍수위 시 강우강도 및 홍수 발생 이전 상황을 고려한 합리적인 수위조건이 없는 경우 정상 침투류에 의한 간극수압, 2) 계획홍수위 시 합리적인 수위 파형이 있는 경우 비정상 침투류에 의한 간극수압, 3) 수위 급강하 시 비정상 침투류에 의한 간극수압 등을 고려하여 적용한다.

(4) 교통하중의 적용 방안

기존 하천설계기준의 경우 교통하중에 대한 언급이 없는 실정이다. 그러나, 최근 하천제방은 도로제방으로 빈번히 활용되고 있는 실정으로 이에 대한 합리적인 적용방안 요구된다. 구조물기초설계기준(2009)는 하천제방에 대한 교통하중 기준에 대해 제방의 사용용도에 따른 상시 교통량 등을 예상하여 다음 표 3.과 같이 적용하도록 제시하고 있다.

표 3. 사용용도에 따른 적재하중(구조물 기초 설계기준 해설, 2009)

주 사용용도	적재하중 (kN/m ²)	참고 문헌
도로/간선농도	12.70	○ 도로설계기준(2005)
농도	10.00	○ 농업생산기반정비사업계획설계기준(1996)

2.4 배수통문 붕괴유형 및 개선 방안

일반적으로 배수통문은 하천제방을 관통하여 설치되는 구조물로서, 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 붕괴유형은 1) 말뚝기초에 의한 통문 하부 공동 및 유로 발생, 2) 보축에 따른 배수암거 붕괴, 3) 신축이음부에 의한 암거의 파괴, 4) 말뚝 향타용 모래채움재에 따른 암거의 파괴, 5) 배수펌프진동 및 토출수조 구조에 의한 통문 하부 공동 및 유로 발생 등이 있는 것으로 알려져 있다.

위에서 언급된 붕괴 유형별 개선방안으로는 1) 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정, 2) 배수통문의 중단 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 제

체 밖으로의 설치 위치 변경 등을 들 수 있다.

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

3. 맺음말

최근 지반공학분야와 관련된 제방붕괴는 광암제, 백산제, 가현제 등 전제 제방 피해의 20.5%에 해당하는 큰 문제 요인으로 대두되고 있다.

국내 하천설계는 하천별로 고성도 제방에 의한 안정성 평가, 전석 및 모래층에 의한 기초지반의 파이핑, 연약지반개량 수평배수제 누수특성, 하상토 활용, 구조물 접합부 다짐 등에서 많은 문제점을 가지고 있다. 더욱 안타까운 점은 설계자들이 제방을 너무 단순한 구조물로만 인식하고 있고, 하천설계기준의 표준단면도만을 고집하여 개선된 설계방법들을 제시하고 있지 않다는 것이다.

또한, 설계자들은 도로설계 개념과 제방설계의 차이를 명확하게 인식하지 않고 설계하는 경향이 있다. 예로써 도로에서는 GW, SW계열의 흙이 다짐도 좋고, 강도도 좋아 선호하는 재료이나, 제방의 경우 CL, SC, SM 계열의 재료가 양질의 성토재로 우선시 하고 있다. 즉 제방은 강도적 측면만을 강조하는 도로와 달리 누수방지를 최대 목적으로 투수저항성을 우선시 한다는 것이다. 따라서 국내 제방 관련 피해는 설계적 측면에서 이러한 국내 현장여건의 미반영과 설계자의 이해 부족들이 합쳐져 가중되었다고 생각한다.

국내 제방설계는 토목기술의 모든 분야가 관련되어 있으면서도 구조물이 단순하다는 이유로, 지반, 수자원, 구조분야들의 공동연구 및 공동대책이 실행되고 있지 않다. 반면에 선진 외국은 제방 및 배수통문과 관련하여 유지관리시스템, 헤저드모델, 통합관리시스템, 비파괴 누수모니터링시스템 등을 운용 발전시키고 있다. 국내에서도 이러한 연구추세와 관련하여 연통시스템과 같은 탐사기술의 개발, 제방관련 국가 시설물 관리를 위한 D/B 구축, 연약지반 상 합리적 암거설계기술 등이 수자원, 지반, 구조분야의 공동 연구로 하루빨리 정착되어 국민들의 삶의 질을 향상시키기를 기대한다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2001), 댐설계기준
2. 한국건설기술연구원 (2004), 하천제방 관련 선진기술 개발, 건설교통부
3. 한국건설기술연구원 (2005), 하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 연구, 건설교통부
4. 한국수자원학회 (2002), 하천설계기준
5. 한국수자원학회 (2005), 하천설계기준
6. 한국수자원학회 (1999), 하천공사표준시방서
7. 日本 建設省 (2000). 河川堤防設計指針
8. 國土開發 技術研究 Center (1998). 柔構造 通門 設計의 入門
9. NAVFAC 매뉴얼 (1986), Foundation & Earth Structures