

수치해석을 이용한 하천제방의 건전도 평가

River Embankment Integrity Evaluation using Numerical Analysis

변요셉¹⁾, Yo-Seph Byun, 정혁상¹⁾, Hyuk-Sang Jung, 김진만²⁾, Jin-Man Kim, 최봉혁³⁾, Bong-Hyuck Choi, 김경민⁴⁾, Kyung-Min Kim, 천병식⁵⁾, Byung-Sik Chun

¹⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph.D.Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원, Geotechnical Disaster and Environment Research Division., KICT

³⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 연구원, Geotechnical Disaster and Environment Research Division., KICT

⁴⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 Post-Doc., Geotechnical Disaster and Environment Research Division., KICT

⁵⁾ 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : An influence factors for soundness evaluation of river levee include resistibility and embankment for piping of ground consisting embankment in case piping, permeability coefficient of ground, height of embankment, the width of crest, material characteristics of embankment and foundation ground, shape of embankment slope, an influence for penetration of rainfall or river water in case slope stability. In this study, it was operated a feasibility investigation of existing design result, stability evaluation for permeability coefficient use and permeability coefficient change of foundation ground to investigate an influence in line with permeability coefficient change for result of river levee penetration analysis. The evaluation results of influence factors, the permeability coefficient used in design and it was evaluated influence in safety factor of piping. After the evaluation of influence factors, the permeability coefficient used in the design appears with the fact that differs in a design report about same soil, Accordingly, the stability investigation of embankment by application of literature data can affect stability evaluation results by change factors like a permeability coefficient, void ratio. It should be certainly used material properties by a test in soundness evaluation of river levee.

Keywords : River embankment, Integrity evaluation, Piping, Permeability coefficient

1. 서론

하천제방의 건전도 평가는 기초지반 및 제체의 침투압 상승에 따른 파이핑 및 제체 침윤면의 형성·발달에 의한 비탈면 활동 등 강우 및 하천수의 침투와 관련된 파이핑 및 비탈면 안정 해석을 수행하는 과정으로, 영향인자는 파이핑의 경우 제체를 구성하고 있는 지반의 파이핑에 대한 저항성과 제체, 기초를 구성하는 지반의 투수계수가 있으며, 제방의 높이, 뚝마루 폭 등 기하학적 요인이 있으며, 비탈면 안정성의 경우 제체 및 기초 지반의 재료적 특성, 제체 비탈면의 형상, 강우나 하천수의 침투에 따른 영향 등이 있다. 국내에서 수행된 제방과 관련된 연구는 이종태(2001)가 제방자체의 파괴양상을 실험을 통해서 모의하여 제방 단면의 기하학적 특성과 축조재료 및 다짐도가 미치는 영향에 대해서 연구하였고, 정

형식(1998)은 홍수 시 제방의 침윤선의 변화와 그에 따른 제체누수에 대한 연구를 통하여 설계 시 적용 인자들의 영향을 검토하였으며, 권교근 등(2006)은 우리나라 하천제방에 대한 내부 침식 파괴연구를 통해 균열 및 파이핑 저항등급을 소개하고, 유한요소해석을 통해 한계유속과 한계동수경사에 의한 현행 설계방법의 안정성 검토 결과를 비교하여 실효성을 판단하였다. 국외에서는 일본의 Yuichiro Fujita 등(1984)이 하천제방의 붕괴형상에 대하여 2차원 실험을 실시하여 제방붕괴의 양상에 대해 규명한 바 있으며, Takao Uno 등(1998)은 하천제방 안전성 평가를 위하여 제방붕괴사례를 조사하여 분석하여 제방의 안정성 검토를 위한 기초연구를 수행하였다. 그러나 아직까지 제방 붕괴부에 대한 파괴 특성을 명확하게 해석하기에는 어려움이 있고, 근본적인 문제를 밝혀 이에 대한 대책을 수립하기에는 기초자료가 부족한 형편이다.

본 연구에서는 실제 파이핑이 발생한 ○○강 하천제방사례에 적용하여, 침투해석을 실시하여 파이핑 발생 제방의 침투해석 결과에 대한 투수계수 변화에 따른 영향 검토를 위한 원설계결과 타당성 검토, 문헌자료 투수계수 사용에 따른 안정성 평가를 실시하여 합리적인 투수계수 적용에 대해 고찰하였다.

2. 국내 하천제방에 대한 검토

2.1 피해 발생 제방현황

파이핑 사례는 ○○강 본류에 위치한 A제, B제, C제를 대상으로 하였다. A제는 전 구간이 기성제 구간이나 제방축조 시기가 약 30년 이상으로 제체상태가 불량한 상태이다. A제는 제내지측에 제체 침투로 인한 비탈면붕괴 현상 및 제내지측 농경지 지반 표면에 마치 개미집과 같이 모래가 쌓여있는 Boiling현상이 관찰된 것으로 보고되어 침투수에 의한 기초지반 누수가 발생한 현장이다. B제는 1992년 축제가 완료된 제방으로 제체에 누수가 발생한 현장이고, C제 또한 제체 누수로 인한 사면붕괴 및 파이핑 발생 위험구간이다.

2.2 침투해석

본 연구에서 침투해석 시 2차원 침투해석 프로그램 SEEP/W(Geo-slope, 1998)을 사용하였다. SEEP/W는 모관흡수력에 따라 변화하는 체적함수비와 투수계수를 고려하여 시간에 따른 침투 현상을 해석하고 불포화토층의 수두와 수압의 분포를 계산할 수 있는 것이 장점이다.

침투해석 시 침투수가 집중되는 유출부 영역을 세분화하여 침투유속과 국소 동수경사를 평가한 후 실제 파이핑이 발생한 지점에 대해 한계동수경사에 의해 파이핑 안정 검토를 하였다. 안정성 여부는 댐설계기준(건설교통부, 2001)과 하천설계기준(건설교통부, 2005)과 동일한 NAVFAC(DM-7.1)의 최소안전율 2.0을 적용하여 판단하였다. 또한 침투해석 시 요소의 크기는 일본하천설계기준(건설성, 2000)에서는 분할요소의 최소 두께를 제방 높이의 1/10 이하로 적용하는 것을 제안하고 있는데, 이를 본 해석에 적용하였다. 경계조건은 제체의 밑바닥은 불투수층으로 가정하였고, 수위조건은 최대홍수위 정상침투 상태로 해석을 수행하였다. 한편, 제체의 기초지반의 투수계수 및 물성치는 원설계문헌 값을 근거로 하여 표 1과 같이 적용하여 해석을 수행하였다.

표 1. 영향인자 검토에 적용된 투수계수

구분		원설계 및 설계검토(역해석) (cm/sec)	문헌자료 (cm/sec)
A제	제체	실트질 모래(SM)	$1.75 \times E-03$
	기초지반	세립 모래섞인 실트질 점토(CL)	$2.60 \times E-04$
		실트섞인 세립 내지 중립 모래질 자갈(SM)	$2.60 \times E-04$
	기초하부지반	풍화토	$1.00 \times E-05$
		풍화암	$1.00 \times E-06$
			$1.00 \times E-06$

표 1. 영향인자 검토에 적용된 투수계수(계속)

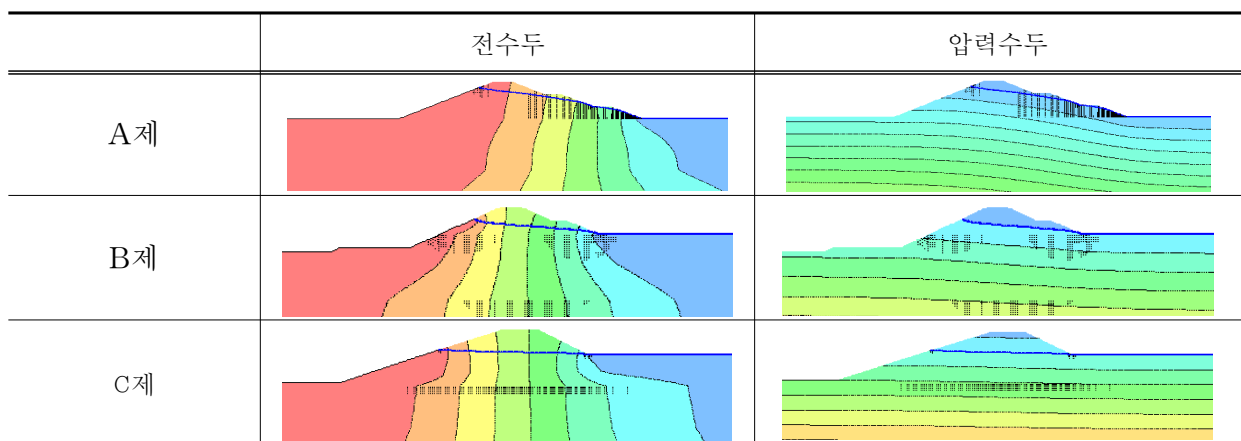
구분			원설계 및 설계검토(역해석) (cm/sec)	문헌자료 (cm/sec)
B제	제체	실트질모래(SM)	$6.15 \times E-04$	$1.00 \times E-04$
	기초지반	실트질모래(SM)	$6.02 \times E-03$	$1.00 \times E-04$
	기초하부지반	실트질모래(SM)	$6.02 \times E-03$	$1.00 \times E-04$
		실트질모래(SM)	$3.82 \times E-03$	
		모래질 자갈(GP)	$1.00 \times E-02$	
		모래질 자갈(GP)	$1.00 \times E-02$	
		모래질 자갈(GP)	$1.00 \times E-02$	
	연암	$1.00 \times E-07$		
C제	제체	실트질 모래(SM)	$1.50 \times E-05$	$1.00 \times E-04$
	기초지반	실트질 모래(SM)	$1.50 \times E-05$	$1.00 \times E-04$
	기초하부지반	실트(ML)	$3.00 \times E-06$	$1.00 \times E-04$
		실트질 모래(SM)	$1.00 \times E-04$	$1.00 \times E-04$
		실트(ML)	$3.00 \times E-06$	$1.00 \times E-04$
		저소성 점토(CL)	$1.00 \times E-06$	$1.00 \times E-07$
	연암	$1.00 \times E-07$	$1.00 \times E-07$	

3. 해석결과 및 분석

3.1 원 설계결과의 타당성 평가

A제의 경우 안전율이 원설계시 2.43에서 설계검토 결과 2.11로 떨어지나 허용안전율 2.0 이상으로 안정한 것으로 검토되었고, B제의 경우 원설계시 안전율이 4.00로 안정한 것으로 나타났으며, 설계검토 결과 4.35로 증가하고 허용안전율 2.0 이상으로 안정한 것으로 검토되었다. 또한 C제의 경우는 원설계시 안전율이 1.68로 불안정한 것으로 나타났으나, 설계검토 결과 1.18로 감소하고 허용안전율 2.0 이하로 불안정한 것으로 검토되었다. 따라서 원설계 자료를 이용한 재해석 결과 수치적 차이는 발생하지만 안정성 검토결과는 타당한 것으로 판단되었다. 표 2는 파이핑이 발생한 제체단면의 수두검토도를 보여주고 있다.

표 2. 원 설계검토 침투해석에 따른 수두검토도



3.2 문헌자료 투수계수 사용에 따른 안전성 평가

해석 단면의 지반 물성 실험 자료가 전혀 없을 경우에 대한 문헌값 사용에 따른 영향 평가를 위하여 제체 및 기초지반의 투수계수를 미국공병단(NAVFAC) 기준과 기존 하천제방 설계자료 등 문헌값만을

적용하여 파이핑 안전성 검토를 실시한 결과, 검토제방의 기초지반 투수계수 및 침투유속과 동수경사의 관계는 그림 1에서 보듯이 A제와 유사하게 침투유속은 기초지반 투수계수에 비례하고, 동수경사는 투수계수와 침투유속에 반비례하는 것으로 평가되었다. 한편, 투수계수와 침투유속의 비례관계는 그림 2에서 보는 바와 같이 투수계수의 증가에 비해 침투유속의 증가가 상대적으로 작게 나타났다. 각 투수계수 별 동수경사는 Darcy의 법칙에 따라 투수계수가 증가할 경우 상대적으로 작은 침투유속의 영향에 의해 오히려 감소하는 것으로 평가되었다. 따라서 문헌자료의 적용 시 안전율에 큰 영향을 주는 것으로 나타나 하천제방의 건전도 평가 시에는 반드시 실험에 의한 물성치를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

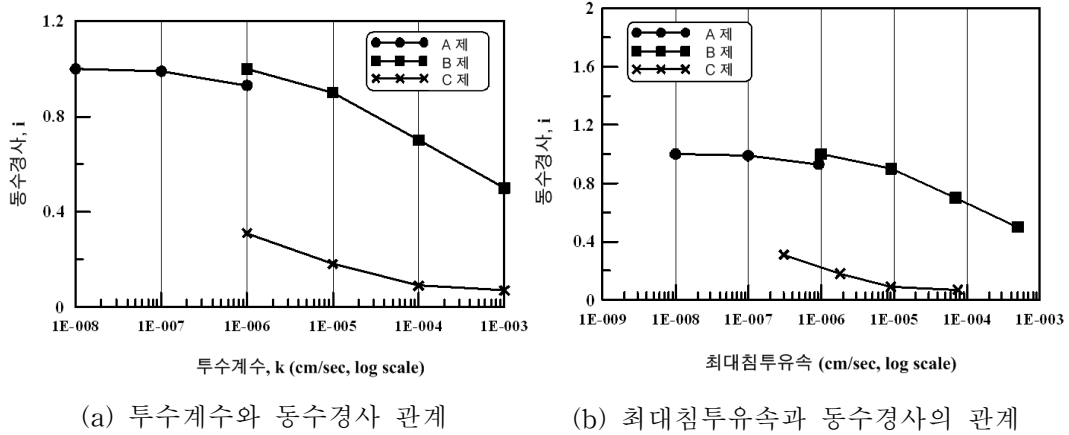


그림 1. 기초지반 투수계수 및 침투유속과 동수경사의 관계

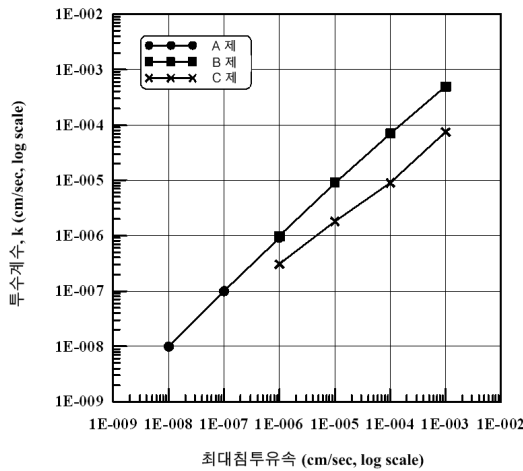


그림 2. 투수계수와 최대침투유속의 관계

4. 결론

원설계결과와 타당성 검토, 문헌자료에 의한 물성치 사용에 따른 안정성 평가를 통하여, 합리적인 투수계수 적용에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 원설계 타당성 검토 결과는 분석대상 3개 현장의 경우 원설계 자료를 이용한 재해석 결과, 원설계 자료를 이용한 재해석 결과 수치적 차이는 발생하지만 안정성 검토결과는 타당한 것으로 판단되었다.
- (2) 문헌자료에 제체 및 기초지반 물성치 적용에 의한 안전성 검토 결과 A제, B제의 경우 원설계에서 기준안전율 2.0을 만족하나 문헌자료 적용에 의한 검토 결과 기준안전율 2.0을 만족하지 못하는 것으로 나

타났다. C제의 경우 원설계에서 기준안전율 2.0을 만족하지 못하나 문헌자료 적용에 의한 검토 결과 기준 안전율 2.0을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 문헌자료의 적용 시 안전율에 큰 영향을 주는 것으로 나타나 하천제방의 건전도 평가 시에는 반드시 실험에 의한 물성치를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

(3) 영향인자 평가 결과 설계 시 사용되는 투수계수는 동일한 토질에 대해서도 설계문헌에 따라 상이한 것으로 나타났으며, 검토 결과 파이핑 안전율에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 따라서, 문헌자료의 적용에 의한 제방의 안정성 검토는 투수계수, 간극비 등 여러 가지 변화인자에 의해 안정성 평가결과를 좌우할 수 있는 사항으로 하천제방의 건전도 평가 시에는 반드시 실험에 의한 물성치를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), 댐설계기준, 한국수자원학회, pp.135-142.
2. 건설교통부(2005), 댐설계기준, 한국수자원학회 pp.130-137.
3. 건설성 하천국(2000), 일본하천제방설계지침, 제3고, pp.221-245
4. 권교근, 한상현(2006), “우리나라 하천제방에 대한 내부 침식 파괴연구”, 대한토목학회 논문집, Vol.26, No.1C, pp.32-42.
5. 이종태, 이상태(2001), “하천제방 붕괴 양상의 실험적 연구(II)-축조재료 및 다짐도의 영향”, 한국수자원학회 논문집, Vol.34 No.2, pp.155-167.
6. 정형식, 이승호(1998), “제방형태에 따른 제체사면의 안정검토에 관한 연구”, 한국지반공학회 98사면안정 학술발표회 논문집, pp.147-160
7. Geo-slope(1998a) *User's Guide for SEEP/W, version 5*, Geo-slope International Ltd, Canada, pp.187-204.
8. NAVFAC(1982), “Foundation & Earth Structures”, Design Manual 7.2, pp.38-43.
9. Takao Uno, Hisayoshi Morisugi, Toshio Sugii and Yuji Nakano (1988), “Stability evaluation of river levees on the basis of actual levee breachings”, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers* Vol.3-10 No.400, pp.161-170.
10. Yuichiro Fujita, Takashi Tamura and Yoshio Muramoto(1984), “Experiments on enlarging process of river bank breaches”, *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, Vol.27, B-2, pp.369-392.