

수치해석을 이용한 하천제방 배수통문의 안정성 평가 연구

Numerical Studies for the Safety Estimation of Box-Culvert in Levee

김진만* / 최봉혁** / 오세용*** / 김경민****

Kim, Jin Man / Choi, Bong Hyuck / Oh, Se Yong / Kim, Kyung Min

Abstract

In this study, 2-D seepage analysis is conducted for the evaluation of Box-Culvert installation, Cut-off Wall Length, permeability reduction of soil under the Box-Culvert effects on Levee Box-Culvert safety. The result of analysis it is obtained that the safety of seepage and slope stability of levee is declined by the installation of Box-Culvert. And also obtained that the piping from poor compaction and cavity around Box-Culvert is prevented by the Cut-off wall installation below breast wall and levee toe, so it is recommended that the Cut-off Wall below breast wall and levee toe must be installed. And the Cut-off Wall installed below levee center is considered when the safety of piping is declined for the whole levee section. On the other hand, for the realistic analysis it is recommended that the 3-D seepage analysis is more suitable for the safety evaluation of Box-Culvert installed levee when it is considered that the saturated field is dispersed to the ground.

keywords : levee, seepage analysis, cut-off wall, piping, slope stability

요 지

본 연구에서는 하천제방 배수통문의 안정성 평가를 위하여 배수통문 설치에 따른 영향, 차수공 길이에 의한 영향, 배수통문 하부지반 투수성 저하에 따른 영향 등을 평가하고자 2차원 침투해석을 수행하였다. 해석결과 배수통문 설치에 따라 하천제방의 침투 및 사면안정성이 저하되며, 흙벽 및 선단 하부에 설치되는 차수공은 배수통문 주변의 다짐 불량 및 공동에 의해 발생하는 파이핑을 방지할 수 있으므로, 배수통문 설계 시 반드시 설치가 요구되며, 중앙부 차수공의 경우 제체 전체의 침투해석을 통하여 파이핑에 대한 안정성이 떨어지는 경우 차수벽의 개념으로 설치가 유도되어야 할 것으로 평가되었다. 한편, 하천제방 배수통문과 같은 하천구조물이 설치된 제방의 안정성 평가는 2차원 침투해석의 경우 주변 지반으로의 침투에 의한 포화영역의 소산을 고려하지 못하므로 합리적인 침투해석을 위해서는 주변 지반으로의 침투를 평가할 수 있는 3차원 침투해석에 의해 평가되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하천제방, 침투해석, 차수공, 파이핑, 사면안정

- * 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원
Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(e-mail: jmkim@kict.re.kr)
- ** 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원
Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(e-mail: bhchoi@kict.re.kr)
- *** 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원
Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
- **** 한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원
Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

1. 서론

일반적으로 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 의해 하천제방의 안정성을 저하시키는 구조물로 여겨진다.

또한, 배수통문의 설계는 배수통문 자체의 구조적 안정성 평가는 물론 제방 전체 단면의 침투에 대한 안정성 평가가 수행되어야 하나, 현행 국내 배수통문의 설계는 구조적 안정성 및 기초 지반에 대한 설계가 주로 이루어지고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 2차원 침투해석을 이용하여 하천제방 배수통문의 안정성 평가를 수행하였다. 이때 하천제방 배수통문의 안정성 평가는 배수통문 설치 시의 영향 평가, 차수공 길이에 의한 영향 평가, 배수통문 하부지반 투수성 저하에 따른 영향 평가 등을 통하여 수행하였다.

2. 해석 개요

2.1 침투해석 적용 모델

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

이때, 침투에 대한 설계 외력은 강우(강우과형), 하천수(수위과형), 유역평균의 계획 강수량, 계획홍수량 및 계획홍수위 설정에 쓰인 복수의 홍수과형 등이 있다. 다만 국내에서는 강우 및 하천수 등의 외력을 고려할 때 계획홍수위만을 이용하여 설정한다.

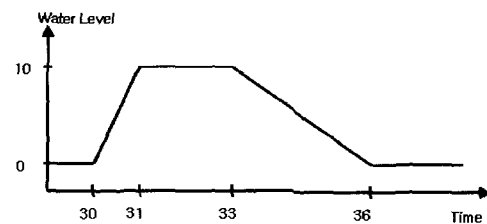
한편, 침투해석 방법은 홍수기간이 긴 미국, 유럽 등의 경우 고수위를 정상 수위 조건으로 하여, 정상 침투해석을 수행하고 있으며, 홍수 지속기간이 짧은 일본의 경우 집중호우와 같은 강우특성을 고려하여 시간에 따라 수위가 변화하는 수위과형 모델을 사용하는 비정상 수위 조건의 비정상 침투 해석을 적용하여 경제적 설계를 유도하고 있다(建設省, 2000).

또한, 수치해석모델은 포화 해석 및 포화·불포화 해석이 있으나 세계 각국의 경우 포화·불포화 해석으로 전환되는 추세에 있다. 이때 포화·불포화 모델은 지반의 포화·불포화 조건과 관련된 토질정수값을 제시하여야 하나, 현재 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 미미한 실정에 있다.

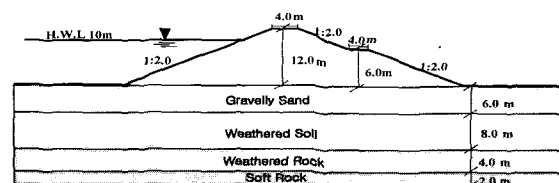
따라서 국내 하천제방의 안정성 평가는 일본과 강우 조건이 유사한 국내실정을 고려할 경우 침투류 계산시 비정상 포화·불포화 모델을 사용하여야 하나, 현재 국내의 기술수준 및 기타 여건을 고려해 볼 때 수위과형만을 고려한 비정상 포화해석을 채택하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 본 논문에서는 비정상 포화해석 모델을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 한편, 일반적으로 포화해석 모델은 포화·불포화 모델에 비해 보수적인 설계값을 제시하는 경향이 있다.

2.2 침투해석 개요

본 논문에서 수행된 침투해석은 약 4,000 여 개의 치밀한 4절점 평면요소로 이루어진 유한요소망을 이용하여, 스위스의 ZACE사에서 개발된 지반해석 전용 프로그램인 Z-SOIL 프로그램 사용하여 수행하였다. 한편, 경계조건으로는 기초 지반의 하부의 경우 수직 방향, 양 측면의 경우 수평 방향 변위를 구속하였으며, 제외 지 축의 최대수위는 최대홍수위(10m)로 간주하여 적용시켰다. 이때, 제체 및 기초 지반의 매쉬 크기는 한국건설기술연구원(2004)에 의해 수행된 기존 연구를 통하여 최적의 침투해석 매쉬 크기로 제시된 가로 0.5m, 세로 0.5m를 기준으로 설정하였으며, 비정상 침투해석에 사용된 수위과형은 Fig. 1(a)에서 보듯이 저수위 지속시간 30일, 평수위에서 1일에 걸쳐 최대수위에 도달한 후 2일의 지체시간을 거쳐 3일 동안에 평수위로 돌아오는 비정상 수위조건을 설정하였다.



(a) Condition of Abnormal Water Level



(b) Analysis Section

Fig. 1. A Section Applied to Infiltration Analysis

해석에 사용된 제체 및 기초 지반은 Drucker-Frager 모델을 이용하여 모델링하였으며, 해석에 사용

Table 1. Geological Stratum & Ground Physical Value Applied to Analysis

Material		Elastic Modulus (E, t/m ²)	Unit Weight (γ _t , t/m ³)	Void Ratio (e)	Permeability Coefficient (k, m/sec)	Cohesion (c, t/m ²)	Internal Friction Angle (φ, °)
Embankment	Sand(SP)	3,500	1.8	0.5	1×10 ⁻⁵	0.4	37
	Clayey Sand(SC)	2,000	1.75	0.48	1×10 ⁻⁶	4.5	20
Gravelly Sand		5,000	1.8	0.42	0.5×10 ⁻⁴	0.1	38
Weathered Soil		5,000	1.9	0.43	1×10 ⁻⁶	0.5	30
Weathered Rock		10,000	2.0	0.2	1×10 ⁻⁷	2.0	40
Soft Rock		15,000	2.2	0.1	1×10 ⁻⁸	10.0	45

된 각 지반의 지층구성 및 물성치를 보여주는 Fig. 1(b) 및 Table 1에서 보듯이 지반의 물성치는 기존의 조사 자료와 댐 설계에 활용되고 있는 자료를 통하여 대표적인 값을 사용하였다.

3. 침투해석 결과

3.1 배수통문 설치에 따른 영향

배수통문 설치에 따른 영향 평가는 동일한 제방 단면에 대해 배수통문이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 파이핑 및 사면 안정성을 비교하여 검토하였다.

해석결과 배수통문 설치 유무에 따른 기초지반의 파이핑에 대한 안정성은 배수통문이 없는 경우 2.23으로 댐설계기준(2001) 및 하천설계기준(2005)의 파이핑에 대한 기준 안전율 2.0에 대해 안정하나, 배수통문이 있는 경우 1.42로 불안정한 것으로 평가되었다 (Table 2

참조). 이때, 파이핑에 대한 안정성 평가는 한계동수정 사법에 의해 수행하였다.

또한, 배수통문 설치에 따른 포화영역의 변화는 수위 상승 시 통문의 설치 유무에 큰 영향을 받지 않는 것으로 평가되었으나, 수위 하강 시 통문 설치에 따른 제체 하부 불투수층의 존재로 포화영역의 소산정도가 통문이 없는 경우에 비해 떨어지는 것으로 평가되어, 수위 급강하 시 제방 제외지 사면안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며, 침투해석결과를 바탕으로 사면안정해석 전용 프로그램인 STABL5M을 이용하여 수행한 사면안정해석 결과, 통문이 설치되지 않은 경우 1.27로 나타났으며, 통문이 설치된 경우 1.04로 통문이 설치되지 않은 경우에 비해 약 0.23정도 작게 나타났다(Fig. 3 및 Table 2 참조).

따라서, 배수통문을 설치할 경우 반드시 파이핑에 대한 검토가 이루어져야 하며, 필요 시 차수공의 설치 등 파이핑 방지 대책을 마련하여야 할 것으로 판단된다.

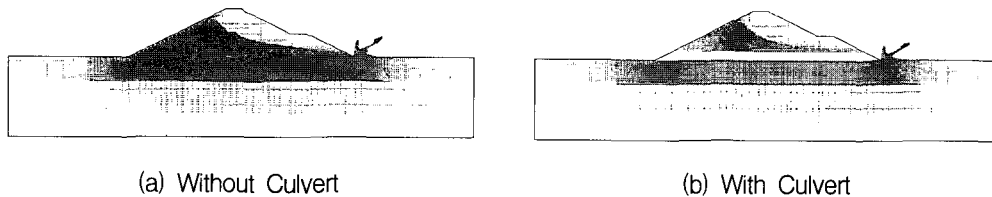


Fig. 2. A Infiltration Analysis Results by Culvert Installation Existence

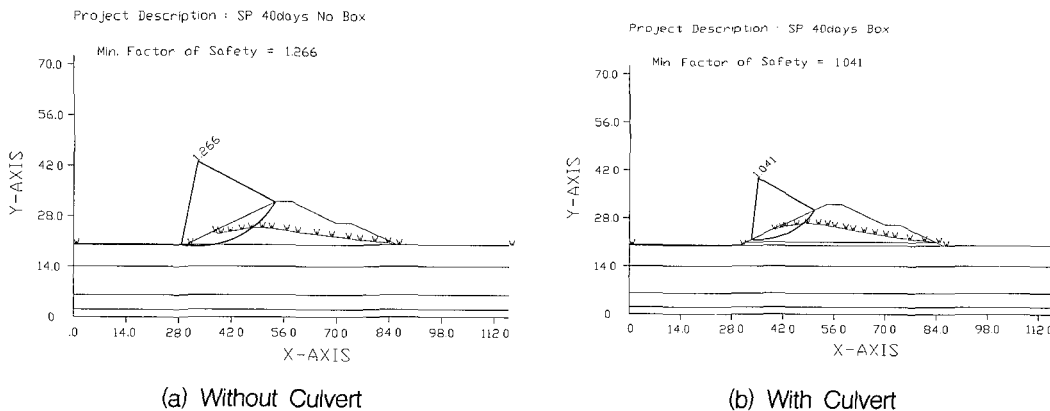


Fig. 3. Slope Stability Evaluation Results by Culvert Installation Existence

Table 2. Safety Examination Evaluation Results by Culvert Installation Existence

	FS _{spiping} for below the 1 levee toe	FS _{sliding} for river-side slope at water-level sudden drop
Without culvert installation	2.23	1.27
With culvert installation	1.42	1.04

한편, 본 침투해석 결과에 따른 배수통문 설치에 따른 영향은 배수통문이 설치된 단면에 국한된 것으로 주변 지반으로의 침투에 의한 포화영역의 소산을 고려한다면 제방의 전체적인 안정성에 미치는 영향은 본 해석 결과에 비해 작을 것으로 판단된다. 따라서, 배수통문이 설치된 제방의 안정성 평가는 주변 지반으로의 침투를 평가할 수 있는 3차원 침투해석에 의해 평가되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 차수공 설치에 따른 영향

차수공 설치에 따른 영향 평가 시 차수공의 설치 위치는 Fig. 4에서 보듯이 설치된 배수통문의 중앙 상부 및 하부, 흠벽 설치 지점 하부, 통문 선단 하부에 설치하였다. 이때, 중앙 차수공의 길이는 상부의 경우 1.0m, 하부의 경우 3.0m, 4.0m, 5.0m, 5.5m, 6.0m로 변화하며 차수공 길이의 영향을 평가하였다.

한편, 효율적인 차수공 설치 위치 및 방법 분석을 위한 침투해석은 흠벽 하부와 중앙부에 차수공이 설치된 경우, 흠벽 하부와 선단부 하부에 차수공을 설치한 경우에 대해 평가하였다. 이때, 흠벽 하부와 중앙부에 차수공이 설치된 경우 흠벽 하부 차수공 길이는 1.0m로 고정하고 중앙 하부 차수공의 길이를 변화하여 침투해석을 수행하였으며, 흠벽 하부와 선단부 하부에 차수공이 설치된 경우 차수공의 길이를 각각 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m, 3.5m, 4.0m로 변화하여 흠벽 및 선단부 차수공 길이에 대한 평가를 수행하였다.

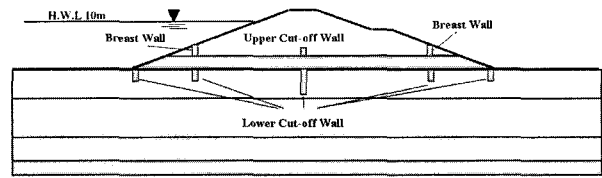


Fig. 4. A Installation Location of Cut-off Wall

3.2.1 중앙 차수공 길이 변화에 따른 영향

Fig. 5는 최대수위 2일 지속시인 33일의 해석결과인 중앙 하부 차수공 길이 변화에 따른 유속벡터를 보여준다. Fig. 5에서 보듯이 중앙 하부 차수공 길이의 영향은 차수공이 제체 하부 자갈 모래층 내에 있게 되는 하부 차수공 길이가 3.0m, 4.0m, 5.0m, 5.5m인 경우, 차수효과가 서서히 증가하며, 차수공이 자갈 모래층을 통과하여 풍화토층에 도달하는 6.0m의 경우 차수효과가 급격히 증가하는 것으로 평가되었다.

한편, Table 3은 중앙 하부 차수공 길이 변화에 따른 제체 선단부 하부의 파이핑에 대한 안전율을 보여준다. Table 3에서 보듯이 제체 선단부 하부의 파이핑에 안정성은 하부 차수공이 상대적으로 투수계수가 작아 침투에 대해 안정한 지층인 풍화토 층에 도달하는 길이 6.0m에서 안정한 것으로 평가되었으며, 6.0m 이하인 경우 불안정한 것으로 평가되었다. 따라서, 차수공을 설치할 경우에는 상대적으로 침투에 대한 안정성이 확보되는 지층에까지 설치되어야 할 것으로 평가되었다.

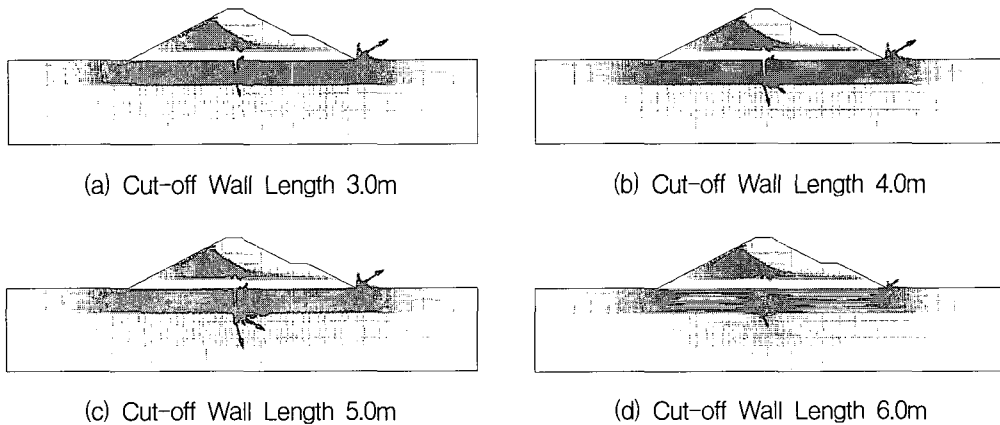


Fig. 5. Velocity Vector by Variation of Cut-off Wall Length beneath of Center

Table 3. Safety Ratio about Piping by Change of Lower Part Cut-off Wall Length installed culvert center (Standard Safety Ratio : 2.0)

Condition		Safety Ratio	Stability
Without culvert		2.23	O.K.
With culvert		1.42	N.G.
Length of lower part cut-off wall	3.0m	1.49	N.G.
	4.0m	1.55	N.G.
	5.0m	1.68	N.G.
	5.5m	1.82	N.G.
	6.0m	3.82	O.K.

따라서, 중앙 하부 차수공은 배수통문 설치 시 표준도 개념으로 설치되는 차수공의 역할보다는 제체 전체의 침투에 대한 안정성 향상을 위한 차수벽의 개념으로 설계 되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.2 흉벽 및 흉벽 하부 차수공의 영향

흉벽 및 흉벽 하부 차수공에 의한 영향은 흉벽이 설치되지 않은 경우와 흉벽 및 흉벽 하부 차수공이 설치된 경우를 중앙 하부 차수공 길이 변화에 따른 파이핑에 대한 안전율을 비교하여 검토하였다. 이때, 흉벽의 경우 1.5m, 흉벽 하부 차수공의 경우 1.0m 길이로 차수공 설치 위치를 보여주는 Fig. 4에서 보듯이 유입부와 유출부에 각각 1개소 씩 설치하였다.

해석결과 흉벽 및 흉벽 하부 차수공 설치에 의한 영향에 따른 포화영역의 변화는 Fig. 6에서 보듯이 전체적인 포화영역은 거의 차이가 없으나, 흉벽 및 흉벽 하부 차수공이 설치된 경우 설치된 흉벽 배면에서 저류현상에 의해 포화영역이 다소 증가하고, 흉벽 전면의 경우 포화되지 않는 것으로 나타났다.

한편, Table 4는 흉벽 및 흉벽 하부 차수공이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 중앙 하부 차수공 길이

변화에 따른 제체 선단 하부의 파이핑에 대한 안전율 변화를 보여준다. Table 4에서 보듯이 파이핑에 대한 안전율은 중앙 차수공만 설치된 경우에 비해 흉벽 및 흉벽 하부 차수공이 설치된 경우 안정성이 약 0.02정도로 다소 증가하였으나, 전체적으로 제체 선단 하부의 파이핑에 안정성은 중앙 하부 차수공이 상대적으로 투수계수가 작아 침투에 대해 안정한 지층인 풍화토 층에 도달하는 길이 6.0m에서 안정한 것으로 평가되었으며, 6.0m 이하인 경우 불안정한 것으로 평가되었다.

따라서, 흉벽 및 흉벽 하부 차수공의 설치는 전체적인 파이핑의 안정성에 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

이러한 영향은 이전의 해석 결과와 마찬가지로 통문이 설치된 위치에서의 국부적인 것으로 제방의 전체적인 안정성에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단되나, 흉벽의 설치는 국부적으로 흉벽 설치 전면 제체의 누수에 대한 안정성을 향상시킬 것으로 판단된다. 또한, 흉벽 배면의 저류현상은 본 침투해석 결과에 의하면 무시할 정도이나, 저류현상이 크게 발생할 경우 이에 대한 대책을 수립하여야 할 것으로 판단된다.

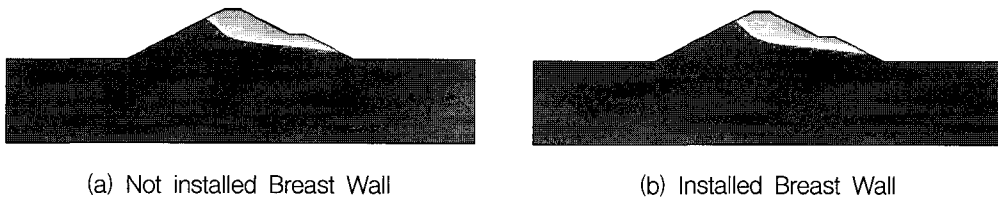


Fig. 6. Saturated Field by H.W.L. Lasted 2 days

Table 4. Safety Ratio about Piping by Change of Lower Part Length of Cut-off Wall

Condition	Length of lower part cut-off wall	Safety Ratio	Stability	Standard Safety Ratio
With breast and lower cut-off wall	4.0m	1.55	N.G.	2.0
	5.0m	1.68	N.G.	
	5.5m	1.82	N.G.	
	6.0m	3.82	O.K.	
Without breast and lower cut-off wall	4.0m	1.57	N.G.	
	5.0m	1.70	N.G.	
	5.5m	1.84	N.G.	
	6.0m	3.84	O.K.	

3.2.3 흠벽 하부 및 선단부 차수공 길이의 영향

Fig. 7은 최대수위 2일 지속시인 33일의 흠벽 하부 및 선단부 차수공 길이 변화에 따른 유속벡터를 보여준다. Fig. 7에서 보듯이 흠벽 하부 및 선단부 차수공 길이의 영향은 차수공 길이 증가에 따라 서서히 차수효과가 서서히 증가하는 것으로 평가되었다.

한편, Table 5는 흠벽 및 선단 하부 차수공 길이 변화에 따른 파이핑에 대한 안전율을 보여준다. Table 5에서 보듯이 전체적인 파이핑에 대한 안전율은 기준안전율인 2.0을 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 차수공 길이에 비례하여 안정성이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 파이핑에 대한 안정성은 중앙 차수공을 설치한 경우에 비해 크게 평가되었다.

여기서, 흠벽 및 선단 하부 차수공 설치 시 차수공 길이에 무관하게 선단 직하부의 파이핑에 대한 안정성은 충분히 확보되지만, 안전율은 차수공 길이에 반비례하는 것으로 나타났다. 그 원인은 차수공 길이가 짧을 경우 차수공을 넘어가는 월류수량이 많고, 차수공 길이가 길 경우 차수공 배면에 저류현상이 발생하여 파이핑에 대한 안전율을 감소시키기 때문으로, 전체적인 안정성에 있어서는 무시할 수 있을 것으로 판단되나, 차수공 길이가 길어질 경우 저류현상에 의한 양압력에 대한

검토가 추가적으로 필요할 것으로 평가되었다.

또한, 차수공이 설치된 경우 선단 주변 지반의 파이핑에 대한 안정성은 통문이 설치된 경우에 비해 오히려 감소하는 것으로 평가되었다. 이러한 경향이 발생하는 원인은 선단 하부에 차수공을 설치하지 않았을 경우 선단 하부에서 침투수가 제일 크게 발생하지만, 차수공 설치에 따라 선단 하부에서의 침투가 억제되고 주변 지반으로 침투가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 선단 하부에 차수공을 설치할 경우에는 기존 파이핑에 대해 불안정한 지점 외에도 주변 지반에 대해서도 파이핑에 대한 안정성 검토를 수행하여야 한다.

일본의 경우 유구조 통문 설계의 입문에서 이와 같은 차수공의 길이를 최소 2.0m로 제안하고 있으며, 차수공의 길이는 차수공 사이의 거리의 절반을 넘지 않도록 하고 있다(國土開發 技術研究 Center, 1998). 본 해석결과에서도 차수공의 길이가 1.5m 이상 되었을 때 선단부로부터 1.5m 지점까지의 파이핑에 대한 안전율이 통문이 설치된 경우의 안전율에 근접하는 것으로 평가되었다. 따라서, 선단 하부에 설치되는 차수공의 경우 국부적인 파이핑 및 양압력에 대한 안정성 확보 차원에서 일본의 경우와 마찬가지로 2.0m 이상이 타당할 것으로 판단된다.

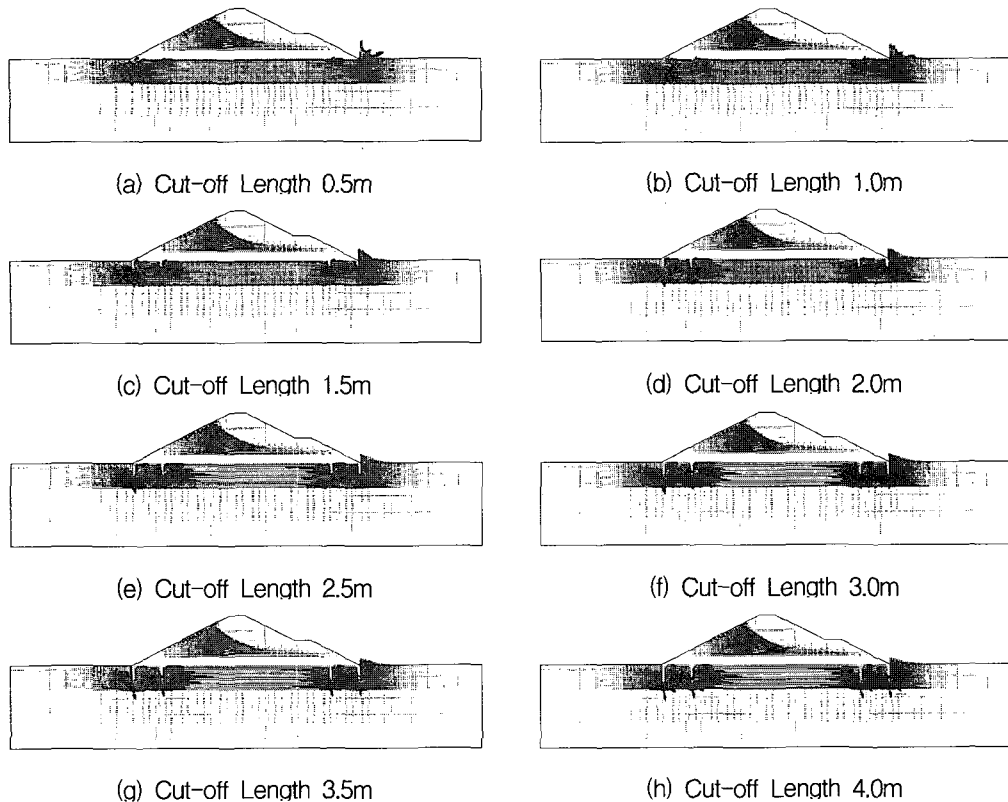
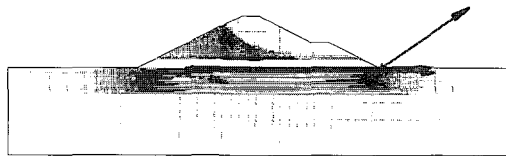


Fig. 7. Velocity Vector by Variation of Cut-off Wall Length beneath of Center

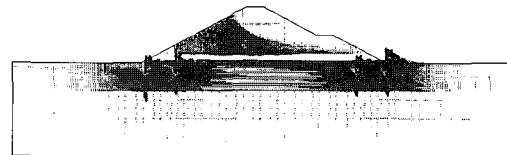
Table 5. Safety Ratio about Piping by Change of Lower Part Length of Cut-off Wall and Breast Wall

Distance ¹⁾	Without culvert	With culvert	Length of Cut-off wall Installed at Toe and Breast wall							
			0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m
0.0m	2.23	1.42	382.9	286.8	238.7	208.5	187.3	171.4	158.7	148.0
0.5m	6.78	3.15	2.46	3.09	3.81	4.47	5.11	5.76	6.45	7.21
1.0m	8.77	4.60	3.69	3.78	4.25	4.82	5.42	6.06	6.76	7.54
1.5m	10.83	5.95	4.90	4.75	4.97	5.38	5.91	6.50	7.19	7.98
2.0m	13.02	7.35	6.16	5.83	5.87	6.14	6.57	7.11	7.76	8.56
2.5m	15.40	8.84	7.49	7.02	6.91	7.06	7.39	7.87	8.50	9.29
3.0m	18.01	10.45	8.94	8.32	8.09	8.13	8.38	8.81	9.40	10.20
3.5m	20.90	12.22	10.52	9.76	9.42	9.36	9.53	9.91	10.48	11.28
4.0m	24.13	14.19	12.27	11.37	10.90	10.75	10.85	11.18	11.74	12.56
4.5m	27.75	16.38	14.21	13.15	12.57	12.33	12.36	12.66	13.21	14.06
5.0m	31.80	18.84	16.39	15.16	14.44	14.11	14.08	14.34	14.90	15.79
5.5m	36.38	21.60	18.83	17.41	16.55	16.12	16.04	16.27	16.83	17.78
6.0m	41.53	24.71	21.57	19.94	18.94	18.40	18.25	18.46	19.05	20.06

1) distance from levee toe.



(a) Installation of Culvert



(b) Installation of Lower Part of Breast Wall and Levee End Cut-off Wall

Fig. 8. Structural Shape of Culvert

3.2.4 통문 주변 지반의 투수성 저하에 따른 영향

일반적으로 구조물 주변 지반은 1.0ton 롤러에 의해 다짐이 수행되기 때문에 다른 지역에 비해 다짐이 불량한 것으로 평가되고 있다. 일본 건설성의 하천제방설계지침(2000)에서는 상대다짐도를 85%에서 90%로 강화시 흙의 투수특성이 향상(조립토의 경우 $1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$, 세립토의 경우 $0.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 등)되는 것으로 평가하고 있다. 또한 배수통문의 경우 말뚝 기초 처리 시 기초 지반의 침하에 의해 통문 주변에 공동이 형성되어 침투유로의 역할을 하기 때문에 이에 대한 적절한 검토가 필요하다.

본 절에서는 이러한 배수통문 주변의 다짐 불량 및 공동에 대한 검토를 위하여 통문 상부와 하부 50cm 구간의 지반의 투수계수를 $1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 작게 적용하여 침투에 대한 안정성 평가를 수행하였다. 이때, 기타 해석 조건은 이전의 해석과 동일하며, 해석단면은 통문이 설치되어 있는 경우와 2.0m길이의 흙벽 및 선단 하부 차수공이 설치된 경우에 대해 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 통문 주변 지반 투수성 저하에 따른 유속백

터를 보여준다. Fig. 8에서 보듯이 차수공이 없이 배수통문이 설치되었을 경우 선단부에서의 침투유속이 대단히 크게 평가되었으며, 파이핑에 대한 최소 안전율은 0.22로 기준안전율 2.0에 크게 못 미치는 매우 불안정한 상태로 평가되었다. 한편, 흙벽 및 선단 하부에 2.0m 길이의 차수공을 설치한 경우 침투유속이 크게 감소하고, 파이핑에 대한 최소안전율도 3.42로 안정한 것으로 평가되었다.

따라서, 흙벽 및 선단 하부에 설치되는 차수공은 배수통문 주변의 다짐 불량 및 공동에 의해 발생하는 파이핑을 방지할 수 있으므로, 배수통문 설계 시 반드시 설치가 요구되며, 중앙부 차수공의 경우 체체 전체의 침투해석을 통하여 파이핑에 대한 안정성이 떨어지는 경우 차수벽의 개념으로 설치가 유도되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 하천제방에 설치된 배수통문에 대한 2차원 침투해석을 통하여 배수통문 설치 유무에 따른

파이핑 및 사면안정성을 평가, 배수통문에 설치된 차수공에 의한 영향 평가, 배수통문 하부지반 투수성 저하에 따른 영향 평가 등을 수행하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 하천제방의 안정성은 배수통문 설치 시 다음과 같이 급격히 떨어지는 것으로 평가되었다.
 - (i) 기초지반의 파이핑에 대한 안정성은 배수통문이 없는 경우 2.23으로 안정하나, 배수통문이 있는 경우 1.42로 불안정한 것으로 평가됨.
 - (ii) 통문 설치 유무에 따른 침투해석결과를 바탕으로 수행한 수위 급강하 시에 대한 사면안정해석 결과 통문이 설치되지 않은 경우 1.27로 나타났으며, 통문이 설치된 경우 1.04로 통문이 설치되지 않은 경우에 비해 약 0.2정도 작게 평가됨.
2. 침투해석의 영향인자 분석은 매쉬의 크기, 고수위 지속시간, 시간 변화에 따른 수위 조건, 배수통문 설치 등에 따른 침투해석 결과의 변화를 분석하였으며, 분석결과는 다음과 같다.
 - (i) 중앙 하부 차수공 길이 변화에 따른 제체 선단부 하부의 파이핑에 대한 안전율은 하부 차수공이 상대적으로 투수계수가 작아 침투에 대해 안정한 지층인 풍화토 층에 도달하는 길이 6.0m에서 안정한 것으로 평가되었으며, 6.0m 이하인 경우 불안정한 것으로 평가되었다.
 - (ii) 흙벽 및 흙벽 하부 차수공이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 중앙 하부 차수공 길이 변화에 따른 제체 선단부 하부의 파이핑에 대한 안전율은 중앙 차수공만 설치된 경우에 비해 흙벽 및 흙벽 하부 차수공이 설치된 경우 안정성이 약 0.02정도로 다소 증가하였으나, 전체적으로 제체 선단 하부의 파이핑에 안정성은 중앙 하부 차수공이 상대적으로 투수계수가 작아 침투에 대해 안정한 지층인 풍화토 층에 도달하는 길이 6.0m에서 안정한 것으로 평가되었으며, 6.0m 이하인 경우 불안정한 것으로 평가되었다. 따라서, 흙벽 및 흙벽 하부 차수공의 설치는 전체적인 파이핑의 안정성에 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다.
 - (iii) 흙벽 및 선단 하부 차수공 길이 변화에 따른 파이핑은 기준안전율 2.0을 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 해석결과 차수공 길이가 1.5m 이상 되었을 때 선단부로부터 1.5m 지점까지의 파이핑에 대한 안전율이 통문이 설치된 경우의 안전율에 근접하는 것으로 평가되어, 선단 하부에

설치되는 차수공의 경우 국부적인 파이핑 및 양압력에 대한 안정성 확보 차원에서 일본의 경우와 마찬가지로 2.0m 이상이 타당할 것으로 판단된다.

- (iv) 통문 주변 지반 투수성 저하에 따른 파이핑에 대한 최소 안전율은 0.22로 기준안전율 2.0에 크게 못 미치는 매우 불안정한 상태로 평가되었으며, 흙벽 및 선단 하부에 2.0m 길이의 차수공을 설치한 경우 침투유속이 크게 감소하고, 파이핑에 대한 최소안전율도 3.42로 안정한 것으로 평가됨.
 - (v) 따라서, 흙벽 및 선단 하부에 설치되는 차수공은 배수통문 주변의 다짐 불량 및 공동에 의해 발생하는 파이핑을 방지할 수 있으므로, 배수통문 설계 시 반드시 설치가 요구되며, 중앙부 차수공의 경우 제체 전체의 침투해석을 통하여 파이핑에 대한 안정성이 떨어지는 경우 차수벽의 개념으로 설치가 유도되어야 할 것으로 판단된다.
3. 한편, 본 연구를 통하여 얻어진 해석 결과는 주변 지반으로의 침투를 고려하지 않은 2차원 침투해석에 의한 결과로, 주변 지반으로의 침투에 의한 포화영역의 소산을 고려한다면 제방의 전체적인 안정성에 미치는 영향은 본 해석결과에 비해 작을 것으로 판단된다. 따라서, 배수통문 등 하천 구조물이 설치된 제방의 안정성 평가는 주변 지반으로의 침투를 평가할 수 있는 3차원 침투해석에 의해 평가되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 '03건설기술기반구축사업으로 수행된 "하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 개발"의 연구 내용을 요약한 것으로 본 연구를 가능케한 건설교통부에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부 (2001). **댐설계기준**.
- 한국건설기술연구원 (2004). **하천제방 관련 선진기술 개발**, 건설교통부.
- 한국수자원학회 (2002). **하천설계기준**.
- 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**.

(논문번호:05-137/접수:2005.10.26/심사완료:2006.04.21)