

파이핑에 의한 하천제방 붕괴 메카니즘 분석 및 대책공법 평가

김진만, 문인종*
한국건설기술연구원

Analysis of River Levee Failure Mechanism by Piping and Remediation Method Evaluation

Jin-Man Kim, In-Jong Moon*

Geotechnical Engineering Research Institute, KICT

요약 제체 내 누수와 관련이 있는 파이핑(piping) 현상은 제방 내에 큰 공동이나 수로를 만들어 제체의 붕괴 및 부등 침하를 일으키고 최종적으로 하천제방의 붕괴를 초래한다. 따라서 파이핑 현상에 의한 제방 붕괴에 적절하게 대응하고, 이에 대한 적절한 대책공법을 마련하기 위해서는 파이핑 현상에 의한 제방 붕괴 메카니즘을 분석할 필요가 있다. 이 연구에서는 축소 모형시험과 대형 모형시험을 수행하여 파이핑에 의한 제방 붕괴 형상 및 메카니즘을 분석하였으며, 침투압 시험을 수행하여 파이핑 대책공법으로 제안된 Hydraulic well의 침투압 분포 특성을 평가하였다. 연구 결과, 축소 모형시험을 통해 파이핑 안전율이 낮을수록 제방 붕괴 형상이 뚜렷하게 나타났으며, 대형 모형시험에서는 파이핑으로 인한 제방의 국부적인 손상 유형을 파악할 수 있었다. 또한 Hydraulic well의 침투압 시험을 통해 well의 중심 아래에서 파이핑 억제 효과가 가장 큰 것으로 평가되었다. 연구 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서 다양하고 연계성이 있는 모형시험 조건을 적용한 추가연구가 필요하지만, 이 연구는 파이핑에 의한 제방 붕괴 메카니즘 분석 및 대책공법 마련에 대한 기초 연구자료로 활용이 가능하다고 판단된다.

Abstract The presence of piping in a levee body allows water seepage to occur by producing a large cavity or water tunnel within it, ultimately resulting in the failure of the river levee and differential settlement. In order to properly cope with river levee failure due to piping and establish a proper remediation method for this problem, it is necessary to analyze the failure mechanism of the river levee due to piping. Therefore, this study analyzed the shape and mechanism of river levee failure due to piping through small-scale and large-scale models and evaluated the seepage pressure distribution characteristics in the hydraulic well, which has been suggested as a remediation method for piping. According to the results of this study, as the safety factor for the piping in the river levee decreased, the river levee failure shape was more clearly shown through the small-scale model test. In the large-scale model test, the type of local damage to the levee due to the piping was identified and the evaluation showed that the hydraulic well had the largest effect on the inhibition of piping below the center of the well. A follow-up study is needed to confirm the reliability of the results. However, it is thought that this study can be utilized as the baseline data for research into the piping-induced river levee failure mechanism and for the preparation of a remediation method.

Keywords : Piping, River levee, Remediation method, Failure mechanism, Model test, Hydraulic well

1. 서론

하천제방(river levee)은 제외지의 하천수 범람으로부터 제내지의 인명 및 재산 등을 보호하기 위해 설치된

수공구조물(hydraulic structure)이다. 우리나라의 경우 집중호우와 그로 인한 홍수의 발생이 여름철(6~9월)에 집중되며, 이러한 강우 특성은 하천수위의 급상승과 급강하를 일으킨다. 하천수위의 급변동(급상승 및 급강하)

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-B065985-04)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : In-Jong Moon (Senior Researcher)

Tel: +82-31-9100-761 email: mooninjong@kict.re.kr

Received January 31, 2017

Revised March 3, 2017

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

에 의한 하천수의 제방 침투는 제체 내 침윤선과 침투유속, 동수경사 등을 변화시켜 하천제방의 내구성에 큰 손상을 주게 된다[1]. 이러한 현상은 제체 및 지반 누수의 원인이며, 파이핑(piping)에 의한 제방 붕괴를 야기시킨다.

하천제방의 파이핑과 관련된 제방 안정성에 대한 연구는 국내외에서 다수 진행된 바 있다. 국외에서는 Kohno et al.(1987)[2]이 수치해석과 실험적 연구를 수행하여 하천제방의 파이핑에 의한 제방 붕괴 방지대책 및 기법을 제안하였다. Uno et al.(1988)[3]는 하천제방 안정성 평가를 위해 제방 붕괴사례를 조사 및 분석하여 제방 안정성 검토를 위한 기초 연구를 수행하였다. Ozkan(2003)[4]은 미육군 침투해석 방법(U.S. Army Corps seepage analysis method)와 SEEP2D 수치해석 프로그램을 사용하여 하천제방의 파이핑에 대해 연구를 수행하였다. Chu-Agor et al.(2008)[5]은 제방안정성에 대한 실내모형실험을 수행한 사례로서 실내모형실험결과와 수치해석의 모의값을 이용하여 제방의 안정성 변화를 비교 및 분석하였다.

국내에서는 Kang(2003)[6]이 제방 안정성을 수치해석 모형으로 검토하였으며, Kwon & Han(2006)[7]은 우리나라 하천제방에 대한 내부 침식 파괴연구를 통해 균열 및 파이핑 저항등급을 소개하였다. Kang et al.(2014)[1]은 2차원 지하수 침투모형을 이용하여 제방의 파이핑 현상을 분석하였으며, 제방 형상과 홍수과형에 따른 침투현상을 모의하여 제방 안정성을 평가하였다. Kim et al.(2014)[8]은 수치해석을 이용하여 개별 수위과형의 변화에 따른 하천제방의 파이핑 및 활동에 대한 제방의 건전도 평가를 수행한 바 있다.

전술한 파이핑과 관련된 제방 안정성에 대한 국내외 연구동향을 종합해보면, 실내모형실험과 수치해석을 통한 제방의 파이핑 안정성을 평가한 연구 사례가 대부분이다. 하지만 제방의 붕괴 유형과 붕괴 형상에 따른 대책공법을 개발하기 위해서는 파이핑에 의한 제방 붕괴 형상 및 메카니즘을 분석할 필요가 있는데, 이에 대한 연구는 문헌조사를 한 결과 아직 국내에서 진행된 바 없는 것으로 판단된다.

따라서 이 연구에서는 축소 및 대형 모형시험을 통해 파이핑에 의한 제방 붕괴 형상 및 메카니즘을 분석하고자 하고, 파이핑 대책공법으로 제시된 Hydraulic well의 침투압 분포 특성을 평가하고자 한다.

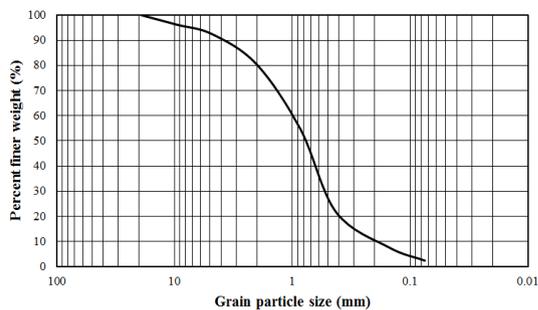
2. 축소 모형시험

2.1 축소 모형시험에 사용된 흙 및 수로

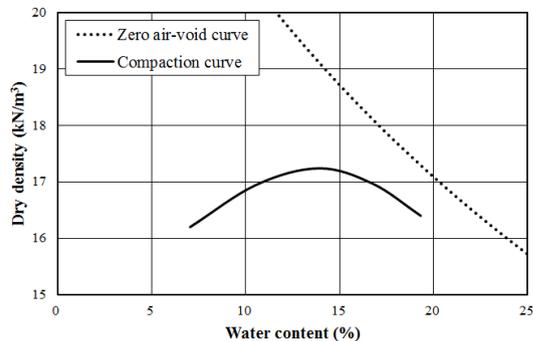
축소 모형시험에서는 하천제방특성을 고려하여 안동지역 부근 낙동강 하상토인 모래를 사용하였으며, 이 모래의 물성값 및 역학적 특성값은 Tabel 1과 같다. KWRA(2009)[9]에 따르면 통일분류법에 근거하여 최대입경이 100mm 이하인 입도가 균등한 하상모래(SP)의 사용을 금지하고 있으나, 안정성이 확보되는 것을 확인한다면 사용이 가능하다. Fig. 1은 축소 모형시험에 사용된 모래의 입도분포곡선 및 A다짐에 의한 다짐곡선을 나타낸다.

Table 1. Soil properties used in small-scale model test

Specific gravity	Characteristics						
	Strength		Compaction		Particle Composition		
G_s	c (kPa)	ϕ ($^{\circ}$)	γ_{dmax} (kN/m ³)	OMC (%)	C_g	C_u	USCS
2.67	1.6	38.2	17.24	13.9	0.9	3.6	SP



(a)



(b)

Fig. 1. Grain size distribution curve and compaction curve
(a) Grain size distribution curve
(b) Compaction curve-A compaction

Fig. 2는 축소 모형시험에 사용된 모형수로이다. 모형 수로는 아크릴 소재이며 제원은 1.5m(수로폭)×1.5m(수로높이)×20m(수로길이)이다. 이 모형수로에 토출량이 1m³/sec인 펌프를 사용하였다.



Fig. 2. Channel used for small-scale model test

2.2 축소 모형시험 방법 및 조건

축소 모형시험은 Fig. 3에서 보듯이 낙동강 하상모래를 이용하여 1) 20mm 이하 모래선별을 위한 체가름 작업, 2) 30mm PVC 파이프를 제방 하단에 거치하여 인공 유로를 형성한 뒤, 모래를 낙하고 80cm에서 낙사시켜 제체지반 조성, 3) 조성된 제체지반에 물다짐 수행, 4) 조성된 제방에 대해 현장단위중량시험을 수행하여 단위 중량 및 함수비 측정, 5) 제방 및 지반 제체 마무리, 6) 파이핑 붕괴 유도 등의 순서로 수행하였다. 현장단위중량시험을 수행한 결과 모형제방의 전체단위중량은 16.30kN/m³, 함수비는 20.02%로 측정되었다.



Fig. 3. Procedure of small-scale model test
(a)Sieving (b)Creating levee body (c)Water binding (d)Measurement unit weight and water content (e)Finishing of creating levee body (f)Conducting small-scale model test

Fig. 4은 축소 모형시험에 사용된 모형제방 단면도이다. 모형제방 단면을 결정하기 위해서는 둑마루폭, 제내외지 경사, 제방고 등을 결정해야 하는데, 본 연구는 둑마루폭, 비탈경사 등에 따른 제방붕괴특성에 관한 Lee(1999)[10]의 연구내용 중 관련 상사 법칙을 인용하였고, 모형제방 단면의 경우 월류 제방붕괴특성에 관한 Kim et al.(2015)[11]의 연구내용을 참조하여 모형제방 단면을 Fig. 4(둑마루폭 0.4m, 제내외지 경사 1:2.0, 제방고 0.7m)와 같이 결정하였다.

또한 파이핑 유도 방법은 Beek et al.(2012)[12]의 연구내용을 참조하였으며, 인공유로의 길이(L)는 0.20, 0.55m, 0.90m 등 총 3가지 조건으로 설정하였다.

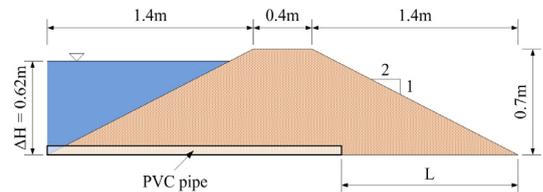


Fig. 4. Section of small-scale model levee

2.3 축소 모형시험 결과

축소 모형시험은 파이핑에 의한 제방 붕괴 메커니즘 및 원형의 붕괴형상을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 시간경과(Δt)에 따른 원형 형상을 세굴폭(w) 및 세굴높이(h)의 비, 즉 파이핑 형상비(w/h)를 자체적으로 정의하여 연구결과를 정량적으로 평가하였다.

한편, 축소 모형시험은 제외지층 하천수위(ΔH)는 0.62m이고 인공유로 조성을 위해 매설된 PVC 파이프를 제내지층 기슭에서 각각 0.20m, 0.55m, 0.90m 등으로 이격시켰기 때문에 동수경사(i , $\Delta H/L$) 조건은 각각 3.1, 1.1, 0.7 등의 3가지 조건이 된다.

KWRA(2009)[9]에 따르면 제방의 파이핑 해석 시 안전율(i_{cr}/i) 기준은 2.0 이상이 되도록 요구하고 있으며, 이때 한계동수경사 i_{cr} 은 현장단위중량시험의 결과(γ_t , w)와 흙의 물성값(G_s)을 이용하여 역계산한 결과 0.85임을 확인하였다. 따라서 본 축소 모형시험은 $i_{cr} = 0.85$ 일 때 설정된 동수경사 조건에 따라 파이핑 안전율은 각각 0.27($i = 3.1$), 0.77($i = 1.1$), 1.21($i = 0.7$)이 되며, 파이핑 안전율이 변화될 때 파이핑에 의한 세굴되어지는 붕괴형상 및 원형 크기를 제시하게 된다.

Fig. 5는 축소 모형시험 전경이다. 그림을 통해

$F_s = 0.27$, $F_s = 0.77$ 의 경우 인공유료 주위로 파이핑 원형형상이 뚜렷하고 나타나는 것을 확인할 수 있고, $F_s = 1.21$ 의 경우 파이핑 원형형상이 나타나지 않고 제방 하부가 전체적으로 고르게 파괴되는 형상을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 Table 2는 축소 모형시험의 결과(시간경과에 따른 파이핑 형상비)를 각각 그림과 표로 정리한 것이다. $F_s = 0.77$ 의 경우 200초에서 파이핑 형상비가 2.3, 600초에서 1.5, 1,000초에서 1.2, 1,400초에서 1.1로 나타났고, $F_s = 0.27$ 의 경우 200초에서 1.8, 600초에서 1.5, 1,000초에서 1.1, 1,400초에서 1.0으로 나타났다. 전체적으로 파이핑 원형형상 진전속도가 초기에 빠르다가 600초 이후에 완만한 특성을 보인다. 이러한 파이핑 메카니즘 특성은 동수경사와 체체체료의 공학적 특성에 기인하여 발생하는 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

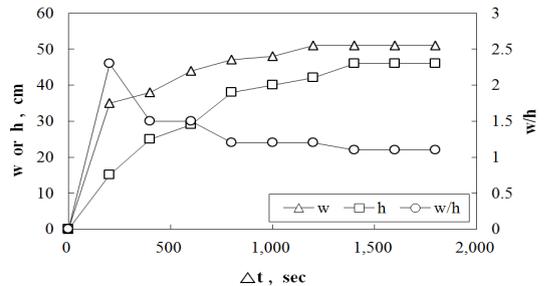


(d)

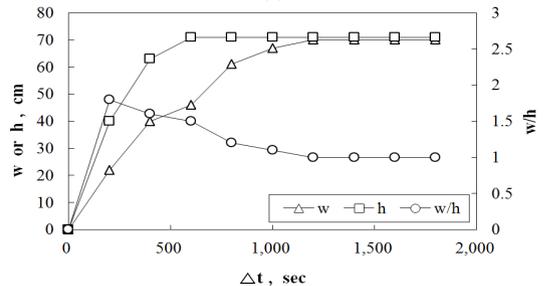
Fig. 5. Panorama of small-scale model test
(a)Before small-scale model test
(b) $F_s = 1.21$ ($i = 0.7$) (c) $F_s = 0.77$ ($i = 1.1$)
(d) $F_s = 0.27$ ($i = 3.1$)

Table 2. Result of small-scale model test

Δt (sec)	$F_s = 0.77$			$F_s = 0.27$		
	w (cm)	h (cm)	w/h	w (cm)	h (cm)	w/h
200	35	15	2.3	22	40	1.8
400	38	25	1.5	40	63	1.6
600	44	29	1.5	46	71	1.5
800	47	38	1.2	61	71	1.2
1,000	48	40	1.2	67	71	1.1
1,200	51	42	1.2	70	71	1.0
1,400	51	46	1.1	70	71	1.0
1,600	51	46	1.1	70	71	1.0
1,800	51	46	1.1	70	71	1.0



(a)



(b)

Fig. 6. Result of small-scale model test
(a) $F_s = 1.7$ ($i = 1.1$) (b) $F_s = 4.8$ ($i = 3.1$)

3. 대형 모형시험

3.1 대형 모형시험에 사용된 흙 및 수로

대형 모형시험에 사용된 흙은 축소 모형시험과 같이 안동지역 부근 낙동강 하상토인 모래를 사용하였으며, Fig. 7은 대형 모형시험에 사용된 수로이다. 수로의 제원은 3.0m(하단폭)×4.0m(수로폭)×2.0m(수로높이)×600m(수로길이)이며, 대형 모형시험은 한국건설기술연구원 안동하천 실험센터에 위치한 직선수로의 일부구간에서 수행하였다.



Fig. 7. Channel used for large-scale model test

3.2 대형 모형시험 방법 및 조건

대형 모형시험은 Fig. 8에서 보듯이 낙동강 하상모래를 이용하여 1) 20mm 이하 모래선별을 위한 체가름 작업, 2) 제방고 확인을 위한 1차 측량, 3) 50mm PVC 파이프를 제방 하단에 거치하여 인공유로를 형성한 뒤, 모래를 낙하고 약 80cm에서 낙사시켜 체체지반 조성, 4) 조성된 체체지반에 다짐 수행, 5) 조성된 지반의 제방 및 지반 체체 체체 마무리, 6) 파이핑 붕괴 유도 등의 순서로 수행하였다.



Fig. 8. Procedure of large-scale model test
(a)Sievin (b)1st surveying (c)Creating levee body (d)Compaction (e)2nd surveying (f)Finishing of creating levee body

Fig. 9는 조성된 제방의 단면도이며, 제방 단면 및 파이핑 유도 방법은 Beek et al.(2012)[10]의 연구결과를 참조하였다. 대형 모형시험의 제방은 제방고 1.0m, 독마루폭 2.5m, 사면경사 1:2.0 등으로서 소하천설계기준(2012)을 만족하도록 하였다. 이때 독마루폭의 경우 제방이 침윤선에 의해 체체누수가 발생하지 않아야 하므로 사전에 정상침투해석을 수행하여 침윤선이 제방 하단부 소단에 도달하지 않는 최소 독마루폭인 2.5m로 설정하였다.

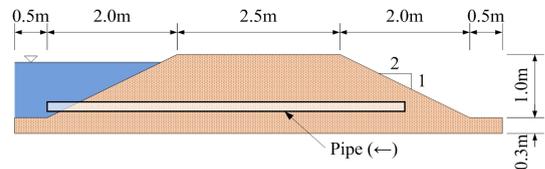


Fig. 9. Section of large-scale model levee

3.3 대형 모형시험 결과

대형 모형시험은 실규모에 가까운 제방에서 파이핑에 의한 제방 붕괴 메커니즘 및 형상을 분석하기 위해 수행하였으며, Fig. 10과 같이 나타났다.

그림에서 보듯이 파이핑에 의한 제방 붕괴는 침투압(하천수위)에 의해 파이프 전면부에서 체체세굴이 진전되면서 1) 세굴에 의한 깊은 골의 형성, 2) 골이 깊어지고 측벽부 측면기울기가 급해지면서 활동 발생, 3) 발생된 활동에 의한 흙이 파이프 전면을 덮은 후 덮혀진 성토 흙을 침투압이 다시 세굴시키는 등 1) ~ 3)의 반복으로 제방 붕괴가 확대되는 특성을 보인다. 이러한 특성에 기인하여 파이핑 제방 붕괴는 파이핑 발생지점 종단면을 따라 제방 기슭면에서 하천방향으로 기초부 세굴이 길게 발생하는 특성을 나타낸다.

대형 모형시험은 축소 모형시험과 달리 시험여건의

제약, 파이핑 유도 방법의 어려움 등으로 실제 제방이 붕괴에 이르지 못하였다. 이로 인해 대형 모형시험을 통해서 제방 붕괴 메카니즘 및 형상을 정량적으로 비교, 분석하기 어렵지만, 육안으로 단계별 국부적인 제방 손상 유형을 파악할 수 있었다.

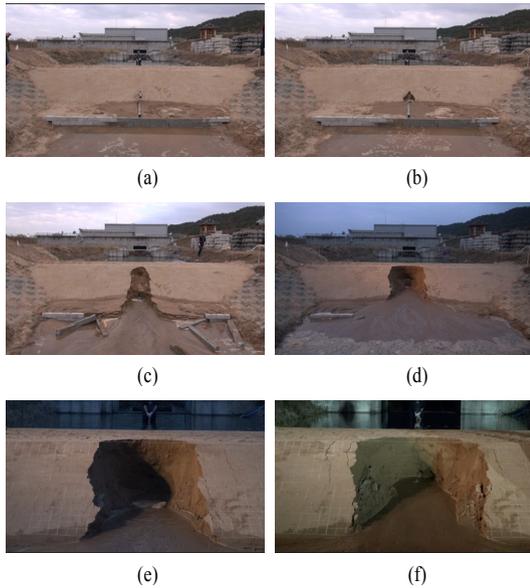


Fig. 10. Result of large-scale model test
 (a)Inducing piping (b)Scour occurrence
 (c)Activity occurrence in side wall 1
 (d)Activity occurrence in side wall 2
 (e)Levee failure by ping 1
 (f)Levee failure by ping 2

4. Hydraulic well 침투압 시험

4.1 파이핑 대책 공법

일본 마쓰야마 하천국도사무소(2011)[13]는 홍수 시 제방 뒷소단이나 뒷비탈기슭 부근에 체체누수 및 파이핑이 발생할 경우 누수방지대책으로서 월륜공법을 제안하고 있다(Fig. 11 참고). 이 공법은 현장 누수상태에 따라 흙포대, 배수파이프, 시트 등을 이용하여 반경 1.2m ~ 2.0m 크기의 well을 구축한 뒤 공급된 물에 의한 수압으로 침투압을 저감시키는 원리이다. 이때 well은 파이핑 분출수에 의한 용출 물결이 보이지 않도록 수위를 유도해야 한다. 그러나 이 공법은 흙포대를 이용한 수작업에 의해 구축되기 때문에 소요시간 및 인력이 많이 필요한 단점이 있다.

이러한 월륜공법의 단점을 개선하기 위해 Fig. 12와 같이 Hydraulic well을 개발 및 제작하였으며, 이 연구에서는 Hydraulic well의 침투압 시험을 수행하여 지반 내 침투압 분포 특성을 평가하고자 하였다.



Fig. 11. Panorama of piping remediation method



Fig. 12. Hydraulic well

4.2 침투압 시험 방법 및 조건

Hydraulic well의 제원은 0.8m(높이)×0.5m(직경)×10mm(두께)의 원통형 구조로 아크릴을 이용하여 제작하였으며, 10cm 간격의 밸브를 설치하여 well 내부의 동일한 수위 유지가 가능하도록 하였다. 침투압 시험에 사용된 흙, 수로 및 제방 단면은 4절 대형 모형시험과 동일하다.

침투압 시험은 Fig. 13에서 보듯이 1) 20mm 이하 모래선별을 위한 체가름 작업, 2) 모래를 낙하고 약 80cm에서 낙사시켜 체체지반 조성, 3) 조성된 체체지반에 다짐 및 간극수압계 매설, 4) Hydraulic well 설치 및 지반포화, 5) 수위변화(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70cm)에 따른 간극수압 계측 등의 순서로 수행하였다.

한편, 간극수압계는 Fig. 14에서 보듯이 총 6개의 간극수압계를 센터라인 직하 매설깊이 5cm(ch1), 15cm(ch2), 25cm(ch3) 등 3개, 센터라인 이격거리 35cm에서 매설깊이 5cm(ch4), 15cm(ch5) 등 2개, 센터라인 이격거리 45cm에서 매설깊이 5cm(ch6) 등으로 각각 설치하였다.

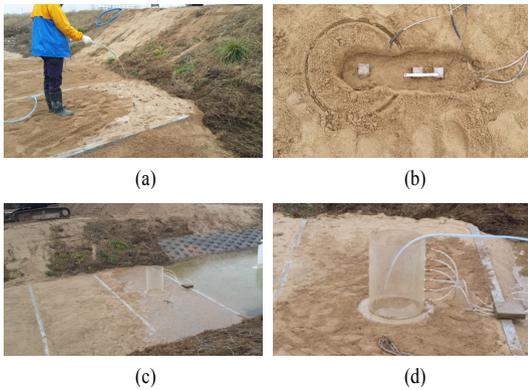


Fig. 13. Procedure of seepage pressure test
 (a)Water binding
 (b)Installation of pore pressure gauge
 (c)Installation of hydraulic well
 (d)Conducting seepage pressure test

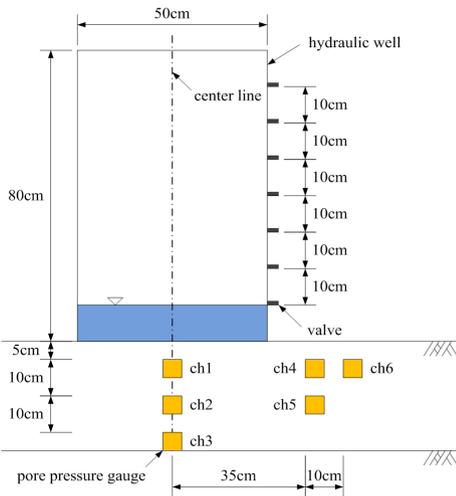


Fig. 14. Location of pore pressure gauge

4.3 침투압 시험 결과

이 연구에서는 1m 미만의 수압이 재하되는 월류공법의 시공성 개선 및 침투압 분포 특성을 분석하고자 아크릴 형태의 Hydraulic well을 제작하여 수두 차에 따른 Hydraulic well 직하 및 측벽부의 지반 내 침투압 분포 특성을 파악하였다.

Table 3은 Hydraulic well의 수위가 10cm~70cm으로 변화할 때 지중 내 침투압 결과를 정리한 표이다. Hydraulic well 직하의 경우(수위 70cm) 지표 밑 5cm(ch1)는 88.15%, 지표 밑 15cm(ch2)는 62.73%, 지표 밑 25cm(ch3)는 62.52%의 침투압 감소효과가 나타났고, 측벽부의 경우 이격거리 35cm에서 지표 밑 5cm(ch4)는 25.49%, 지표

밑 15cm(ch5)는 28.64%, 이격거리 45cm에서 지표 밑 5cm(ch6)는 27.31%의 침투압 감소효과가 나타났다. 이러한 경향은 유선이 길어질수록(해당 위치에서 등수두선 간격 수가 클수록) 토층깊이에 관계없이 큰 수두손실이 나타나는 유선망 흐름 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

또한, Hydraulic well은 수위가 70cm인 경우 직하에서 62.52%~88.15% 정도로 침투압 감소효과가 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

Table 3. Result of seepage pressure test

water level (cm)		ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6
10	pressure (kPa)	0.90	0.48	1.23	0.43	0.70	0.29
	reduction (%)	89.79	48.45	122.81	43.14	69.72	29.03
20	pressure (kPa)	1.71	1.11	1.76	0.55	0.85	0.57
	reduction (%)	85.30	55.48	88.04	27.60	42.38	28.30
30	pressure (kPa)	2.57	1.79	2.27	0.78	0.94	0.87
	reduction (%)	85.81	59.79	75.67	26.04	31.37	29.14
40	pressure (kPa)	3.48	2.45	2.82	1.08	1.15	1.16
	reduction (%)	87.07	61.30	70.46	27.12	28.66	29.00
50	pressure (kPa)	4.37	3.09	3.36	1.39	1.57	1.46
	reduction (%)	87.46	61.85	67.23	27.88	31.32	29.26
60	pressure (kPa)	5.36	3.82	3.95	1.65	1.92	1.72
	reduction (%)	89.25	63.72	65.81	27.52	31.92	28.73
70	pressure (kPa)	6.17	4.39	4.38	1.78	2.00	1.91
	reduction (%)	88.15	62.73	62.52	25.49	28.64	27.31

5. 결론

이 연구에서는 축소 및 대형 모형시험을 통해 파이핑에 의한 제방 붕괴 형상 및 메커니즘을 분석하였으며, 침투압 시험을 수행하여 파이핑 대책공법으로 제시된 Hydraulic well의 지반 내 침투압 분포 특성을 평가하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축소 모형시험을 통해 파이핑 안전율이 낮은 경우 ($F_s = 0.27, 0.77$) 파이핑 원형형상이 뚜렷하지

만, 파이핑 안전율이 높은 경우($F_s = 1.21$) 파이핑 원형형상은 나타나지 않고 제방 하부가 전체적으로 고르게 파괴되는 양상을 보인다. 또한 시간에 따른 파이핑 형상비를 비교한 결과, 파이핑 메카니즘 특성은 동수경사와 체체재료의 공학적 특성에 기인하여 발생하는 것으로 판단된다.

- (2) 대형 모형시험에서는 실제 제방이 붕괴에 이르지 못하였고, 제방 붕괴 메카니즘 및 형상을 정량적으로 비교, 분석하지 못하였다. 하지만 육안으로 단계별 국부적인 제방 손상 유형 및 제방의 기초부 세굴 특성을 파악하였다.
- (3) 파이핑 대책공법으로 제시된 Hydraulic well의 침투압 시험을 수행하였다. 침투압 시험을 통해 수위 70cm에서 Hydraulic well 직하의 경우 지표 밑 5cm는 88.15%, 지표 밑 15cm는 62.73%, 지표 밑 25cm는 62.52%의 침투압 감소효과가 있고, 측벽부의 경우 이격거리 35cm에서 지표 밑 5cm는 25.49%, 지표 밑 15cm는 28.64%, 이격거리 45cm에서 지표 밑 5cm는 27.31%의 침투압 감소효과가 있는 것으로 평가되었다. 이를 통해 Hydraulic well은 well의 직하에서 파이핑 억제효과가 가장 큰 것으로 판단된다.
- (4) 이 연구는 파이핑에 의한 제방 붕괴 메카니즘 분석 및 대책공법 마련에 대한 기초 연구자료로 활용이 가능하다고 판단되며, 연구 결과의 신뢰성을 높이고 각 모형시험 결과의 직, 간접적인 비교 및 분석을 위해서 다양하고 연계성 있는 시험 조건을 적용한 추가연구가 필요하다고 판단된다.

under River Levees”, Ph D. dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA, 2003.

- [5] M. L. Chu-Agor, G. V. Wilson, G. A. Fox, “Numerical Modeling of Bank Instability by Seepage Erosion Undercutting of Layered Streambanks”, *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 13, no. 12, pp. 1133-1145, 2008.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:12\(1133\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:12(1133))
- [6] M. S. Kang, “A Study on The Stability of Levees in Nakdong River Considering Basin Characteristics”, Master thesis, Yonsei University, Seoul, Korea, 2003.
- [7] K. K. Kwon and S. H. Han, “River Embankment Stability against Hydraulic Piping Failure in Korea”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 26, no. 1C, pp. 33-42, 2006.
- [8] J. M. Kim, J. S. Kim, E. H. Oh, W. B. Cho, “Numerical Analysis in Hydrograph Determination for Cohesive Soil Levee”, *Journal of Korea Society of Engineering Geology*, vol. 30, no. 4, pp. 81-92, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2014.1.81>
- [9] KWRA(Korea Water Resources Association). River Design Standard, *MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)*, Korea, 2009.
- [10] S. T. Lee, “An Experimental Study on the Cross Section Characteristics of River Levees and their Collapses Phase”, Ph.D. Dissertation, Kyonggi University, Kyonggi, Korea, 1999.
- [11] J. M. Kim, W. B. Cho, B. H. Choi, E. H. Oh, “Model Tests for Deriving Failure Parameter during Levee Overflow”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, vol. 14, no. 2, pp. 11-21, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2015.14.1.011>
- [12] V. M. van Beek, H. T. J. de Bruijn, J. G. Knoeff, A. Bezuijen, U. Forster, “Levee Failure due to Piping: A Full-scale Experiment”, *International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Zurich, 2012.
- [13] Matsuyama River National Highway Office. Flood Prevention Handbook, *Shikoku Regional Development Bureau*, Japan, 2011.

References

- [1] T. U. Kang, H. U. An, G. M. Lee, K. S. Jung, “Levee Stability Assessment Depending on Levee Shape and Flood Wave”, *Journal of Korea Water Resources Association*, vol. 47, no. 4, pp. 307-319, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.4.307>
- [2] I. Kohno, M. Nishigaki, Y. Takeshita, “Levee Failure Caused by Seepage and Preventive Measures”, *Natural Disaster Science*, vol. 9, no. 2, pp. 55-76, 1987.
- [3] T. Uno, H. Morisugi, T. Sugii, Y. Nakano, “Stability Evaluation of River Levees on the Basis of Actual Levee Breachings”, *Japan Society of Civil Engineers*, vol. 400, no. 3-10, pp. 161-170, 1988.
- [4] S. Ozkan, “Analytical Study on Flood Induced Seepage

김진만(Jin-Man Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 경희대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1990년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구원

<관심분야>

토질 및 기초, 하천제방, 보강토 옹벽

문 인 종(In-Jong Moon)

[정회원]



- 2012년 2월 : 명지대학교 공과대학 토목환경공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 명지대학교 공과대학 토목환경공학화 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원

<관심분야>

토질 및 기초, 하천제방, 옹벽