Ecology and Resilient Infrastructure (2019) 6(4): 258-266
https://doi.org/10.17820/eri.2019.6.4.258

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

영상분석을 통한 바이오폴리머로 보강된 제방사면 안정성 해석

Assessment of Levee Slope Reinforced with Bio-polymer by Image Analysis

고동우[1] · 강준구[2]*

[1]경북대학교 건설방재공학부 겸임교수, [2]한국건설기술연구원 하천연구센터 연구위원

Dongwoo Ko[1] and Joongu Kang[2]*

[1]Adjunct Professor, School of Constructional Disaster Prevention, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
[2]Research Fellow, River Experiment Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 26 November 2019, revised 5 December 2019, accepted 9 December 2019, published online 31 December 2019

ABSTRACT: This study was conducted to apply natural river technologies to levees and examine the results. The new eco-friendly bio-polymer was applied, a combination of eco-friendly biopolymers and soil, to levee slope to enhance durability and eco-friendliness and to establish reinforcement measures against unstable levees due to overtopping. A semi-prototype levee of 1 m in height, 3 m in width, with a 1:2 slope and 5 m length, was constructed at the Andong River Experiment Center. The bio-soil mixed with the biopolymer and the soil at an appropriate ratio was treated with a 5 cm thickness on the surface of levee to perform the stability evaluation according to overtopping. Using the pixel-based analysis technique using the image analysis program, the breached area of levee slope was calculated over time. As a result, the time for complete decay occurs more than 12 times than that of ordinary soil levee. Therefore, when the new substance is applied to the surface of levee, the decay delay effect appears to be high.

KEYWORDS: Bio-polymer, Eco-friendly, Hydraulic experiment, Overtopping, River levee, Slope reinforcement

요 약: 이 연구는 자연에 기반을 둔 하천기술을 제방에 적용하여 그 효과를 평가하기 위해 수행되었다. 친환경 신소재 바이오폴리머를 제체 표면에 적용하여 내구성과 친환경성을 증진시킴과 동시에 월류에 대응하기 위한 제방의 보강 대책을 수립하고자 하였다. 안동하천연구센터에 현장토를 사용하여 높이 1 m, 마루 폭 3 m, 사면경사 1:2, 총 길이 5 m의 중규모 제방모형을 제작하였으며, 바이오폴리머와 흙을 적정 비율로 혼합한 바이오-소일 (bio-soil)을 제방 전면에 5 cm 두께로 도포하여 월류 발생에 대한 제방의 안정성 평가 실험을 수행하였다. 영상분석 프로그램을 이용한 픽셀기반 분석 기법을 적용하여 시간에 따른 제방사면의 붕괴면적을 산정하였으며 그 결과, 신소재 적용 제방의 경우 완전붕괴가 발생하는 시간은 일반 흙 제방에 비해 12배 이상 증가해서 붕괴지연효과가 상당히 높은 것으로 나타났다.

핵심어: 바이오폴리머, 친환경, 수리실험, 월류, 하천 제방, 사면 보강

1. 서 론

제방은 유수의 원활한 소통을 유지시키고 홍수로부터 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 주로 흙으로 축조된 구조물이다. 제방은 각 지역의 계획홍수위를 기준으로 통상적인 유수작용에 안전하도록 침투 혹은 세굴에 견딜 수 있는 구조로 설계되지만, 최근 이상기후에 따른 잦은 홍수와 제방의 노후로 인해 발생하는 제방

***Corresponding author:** jgkang02@kict.re.kr, ORCID 0000-0001-8410-0399

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

붕괴로 막대한 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 일반적으로 홍수 발생 시 제방붕괴 원인은 크게 월류, 침식, 제체불안정 및 하천구조물에 의한 붕괴 등 4가지로 구분할 수 있다. 월류는 하도의 통수능 (conveyance)을 초과하는 홍수 유출이나 토사나 유목 등에 의해 통수능이 저하될 때 발생하며, 침식은 하천의 급경사 및 급격한 만곡부분에서 과대한 유속과 소류력 (tractive force)이 작용하여 제방 비탈면이나 하단부가 세굴됨으로써 발생한다. 제체불안정은 성토재료의 불량과 제체 및 지반 누수에 의한 파이핑 (piping) 등에 의한 것을 말하며, 하천 구조물에 의한 붕괴는 하천횡단구조물이 붕괴되면서 제방이 붕괴되는 경우나 제방과 이질 재료로 건설된 구조물 접촉면의 붕괴 등을 말한다 (Ko and Kang 2018). 따라서 이러한 붕괴에 대응하기 위해 제방 설계 시 국가에서 인증한 다양한 보강 공법들이 적용되고 있다. 제체 침투에 대한 보강공법은 제체 동수경사 저감 및 경사면 파괴 활동 안전성을 증가시키기 위한 단면확대공법, 강우나 하천수의 제체 내 침투를 방지·억제하기 위한 앞비탈면 피복공법 등이 있다. 또한, 기초 지반에 차수벽을 설치하여 침투파괴를 방지하는 차수공법 및 제외지쪽 고수부 표층을 불투수성 재료로 피복함으로써 침투유로의 연장을 통한 침투압을 저감하는 피복공법 등이 있다 (Korean Design Standard 2016).

제방붕괴에 따른 국내의 피해조사 결과에 따르면 전체 제방붕괴 사례 중 월류로 인한 붕괴가 약 40%로 가장 많은 비율을 차지하고 것으로 평가되었다 (Kim et al. 2015). 이러한 재해로 인한 배경으로 하천 제방 점검 및 강화 대책이 요구되면서 치수 관련 사업에 많은 예산이 투입되고 있으나, 축조 기술 및 제방붕괴 시 대응기술 부재로 인해 매년 동일한 피해와 복구가 반복되고 있는 실정이다. 월류의 경우 계획 홍수량을 초과하는 경우에 발생하기 때문에 중요시설이 있는 구간에 대해서는 월류 시 제방이 완전 붕괴되는 것을 방지하여 인명 및 재산을 보호할 수 있는 대책이 수립되어야 할 것이다. 이에 피해 경감을 위한 다양한 조건에서의 수리실험연구가 수행되어야 하며 보강공법 및 재료 등에 대한 성능을 평가하여 제방 보강기술을 향상시킬 필요가 있다.

지금까지 수행된 제방 연구동향을 살펴보면, 점성·비점성 재료 조건에서의 붕괴 메커니즘에 관한 연구 (Powledge et al. 1989, Chinnarasri et al. 2004, Zhu et al. 2006, Pickert et al. 2011, Schmocker and Hager 2011, Orendorff et al. 2013,) 및 실규모 조건에서의 제방 파괴 거동 분석 연구 (Zang et al. 2009, Thornton et al. 2012, Kurakami et al. 2013, Kakinuma and Shimizu 2014), 그리고 제방 내 보강공법 적용에 따른 붕괴지연효과 분석 연구 (Kim et al. 2006, Joo et al 2013, Caballero et al. 2016, Wang et al. 2017, Guyer 2017, Ko and Kang 2018) 등이 있다. 앞으로도 제방붕괴에 관한 실험연구는 반드시 필요하며, 다양한 실험데이터를 축적하는 것은 제방붕괴 모델링 개선 및 개발 등 미래의 연구 발전에도 매우 중요하다.

이 연구에서는 제방표면에 친환경 신소재 바이오폴리머를 도포하는 기술을 적용하여 친환경성을 높임과 동시에 월류에 따른 제방사면의 안정성을 확보하는 기술을 평가하고자 한다. 바이오폴리머는 고분자 화합물로써 이미 건설재료로 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다 (Chang and Cho 2012, Larson and Newman 2013, Chang et al. 2015, Chang et al. 2017, An et al. 2018). 이에 안동하천연구센터 (River Experiment Center, REC)에서는 공동연구기관인 카이스트 (Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST) 연구진이 개발한 바이오폴리머 소재 (KAIST 2011 and 2015)를 제방사면에 적용하여 영상분석 기법을 통한 시간에 따른 표면손실률을 산정하였으며, 향후 실규모 실험실증 연구에 반영하여 신소재 처리 제방의 안정성을 평가할 수 있는 방법을 확립하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 수리실험

한국건설기술연구원 안동하천연구센터 (REC)는 최대 10 m^3/s 의 유량 방류가 가능한 3개의 수로 (A1, A2, A3)를 보유하고 있다 (Fig. 1). 일반 흙 제방과 신소재를 적용한 제방의 붕괴양상을 비교하기 위해 A3수로 하류구간에 총 길이 5 m, 높이 1 m, 마루 폭 3 m, 사면경사 1:2의 제방 모형을 제작하였다. 제체의 붕괴형상을 관찰하기 위해 카메라 (Sony FDR-AX700) 및 드론 (DJI MAVIC PRO)을 통해 실시간 촬영되었으며, 제내지측 사면붕괴부 정면에 카메라를 설치하여 영상분석을 통한 월류에 따른 바이오폴리머 처리 제방의 붕괴지연효과를 분석하였다 (Fig. 2).

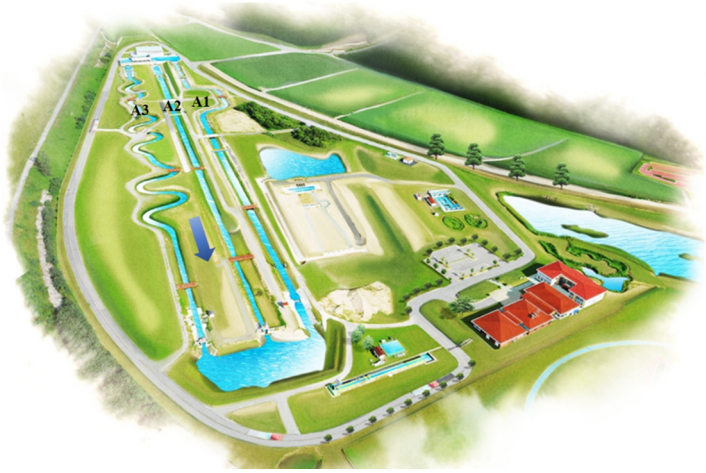


Fig. 1. View of River Experiment Center (REC).

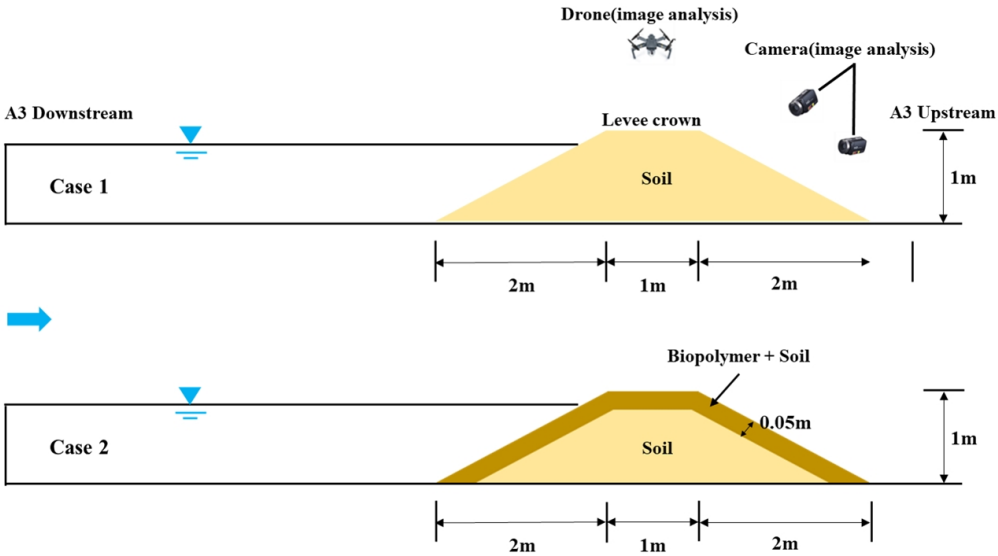


Fig. 2. Cross-section of levee and experimental conditions.

2.2 실험조건 및 방법

제방 월류 흐름을 재현하기 위해 A1수로에서 3 m^3/s의 유량을 유하한 뒤 하류단 유출수조에서의 수위를 증가시킴으로써 A3수로 하류단 게이트를 통해 유량을 역으로 유입시켰다. 이는 홍수 시 제방붕괴로 인해 제내지로 흐름이 유입될 때 제외지 측의 하천 수량이 감소하지 않는 실제 현상을 재현하고자 A3수로 상류단에서의 저수량보다 상대적으로 방대한 유출수조 방면에서 역으로 흐름을 유도한 실험이다.

카이스트 (KAIST)로부터 제공받은 바이오폴리머와 흙 배합비 (바이오폴리머 1 g: 물 10 g: 흙 50 g)를 기반으로 제방표면 전 구간에 5 cm 두께로 신소재를 피복하였다. 약 3일의 양생기간을 거친 뒤 월류 흐름을 재현하여 신소재가 적용된 제방과 무보강 제체 (흙 제방)와의 붕괴지연효과를 비교·분석하였다. 실험의 시작은 월류 발생 시점으로 가정하였고, 월류 흐름에 의한 제체의 완전붕괴가 이뤄졌을 때 실험을 종료하였다.

2.3 제방모형 제작 및 신소재 도포

실험 제체에 사용된 재료는 제체누수의 저항성이 가

장 취약한 사질토(SW)로 선정하였으며, Fig. 3은 사용된 모래 시료의 입도분포곡선을 보여준다. 제체 재질 분석을 통한 최대 건조밀도는 1.85 g/cm^3 이고, 균등계수 및 곡률계수는 각각 5.2, 1.1이었다.

중장비를 사용하여 3 m 높이에서 모래를 낙사시켜 기본적인 제체지반을 조성하였으며 이후 0.2 m 간격으로 물다짐을 및 다짐판을 이용하여 균등한 다짐을 하였다 (Fig. 4). 다짐의 경우 실험자에 따라 오차가 발생할 수 있기 때문에 매회 동일한 방법으로 동일인이 실시하였다.

신소재 배합방법은 먼저 믹싱장비를 사용하여 분말형태로 처리된 바이오폴리머를 물과 희석하여 끈적끈적한 형태의 바이오폴리머 용액으로 만든 다음, 건설용 스테인레스 믹서기를 활용하여 흙과 혼합하였다. 이후 혼합이 완료된 바이오-소일을 제방표면에 도포하였다 (Fig. 5).

3. 픽셀 기반 영상분석 결과

촬영된 실험영상을 분석하여 시간 흐름에 따른 붕괴규모를 측정하였다. 제체 붕괴가 발생함에 따른 토사유출량을 산정하기에는 어려운 측면이 있어서 정량적인 분석이 가능한 제내지 측 제방사면을 분석 대상으로 선정하였다. 분석방법은 먼저 모션 그래픽 소프트웨어 (Adobe After Effects)를 사용하여 영상을 30초 단위로 캡쳐하여 보정한 뒤, 포토샵으로 자료를 업로드 하여 붕괴범위 지정을 위한 디지타이징 작업 (Digitizing method)을 수행하였다. 이 후 30초 단위로 붕괴규모를 산정하여 전체 대비 픽셀 개수 변화를 산정하여 표면손실률을 산정하였다 (Tables 1 and 2). Fig. 6은 흙 제방 조건에서 월류 발생 직후 30초 단위로 붕괴 규모를 산

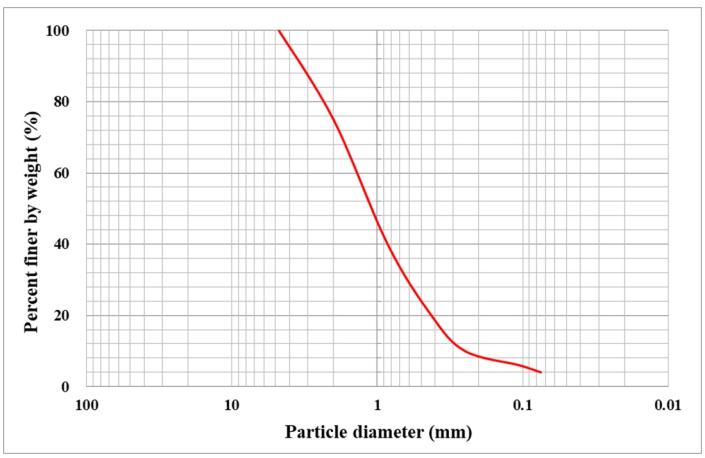


Fig. 3. Grain size distribution curve.

Fig. 4. Construction of levee model.

Fig. 5. Mixing and covering the new substance on levee.

Table 1. Estimation of loss rate of levee surface over time (Case 1)

Time (min)	Number of pixel	Area of surface (mm^2)	Loss of pixel	Loss of area (mm^2)	Loss rate (%)
0:00	105,000	6,708,210	-	-	-
0:30			48,062	3,071,162	45.77
1:00			90,508	5,783,461	86.19
1:30			98,183	6,273,894	93.50
2:00			105,000	6,708,210	100.00

Table 2. Estimation of loss rate of levee surface over time (Case 2)

Time (min)	Number of pixel	Area of surface (mm^2)	Loss of pixel	Loss of area (mm^2)	Loss rate (%)
0:00	105,000	6,708,210	-	-	-
6:30			3,014	192,526	2.87
8:30			4,379	279,732	4.17
10:30			6,552	418,592	6.24
12:30			7,844	501,103	7.47
14:30			7,907	505,128	7.53
16:30			10,626	678,871	10.12
18:30			25,337	1,618,691	24.13
20:30			62,307	3,980,652	59.34
22:30			97,598	6,235,281	92.95
24:30			105,000	6,708,210	100.00

정하는 과정을 보여주며, Fig. 7은 신소재 처리 제방 조건에서 월류 발생 후 파괴가 일어난 시점부터 4분 단위로 붕괴 규모를 산정하는 과정을 보여준다.

흙 제방 (Case 1)의 경우, 30초 후에 이미 45% 이상의 표면 손실이 발생하였고 손실이 발생된 부분을 중심으로 붕괴가 수직적으로 발생하거나 붕괴 폭이 빠르게 증가하여 60초 후에는 85 % 이상의 표면 손실이 발생하였다. 완전붕괴는 약 120초 후에 사면을 비롯한 제체의 모든 부분이 월류 흐름에 의해 파괴된 것으로 나타났다.

신소재 처리 제방 (Case 2)의 경우, 월류 시작 후 360

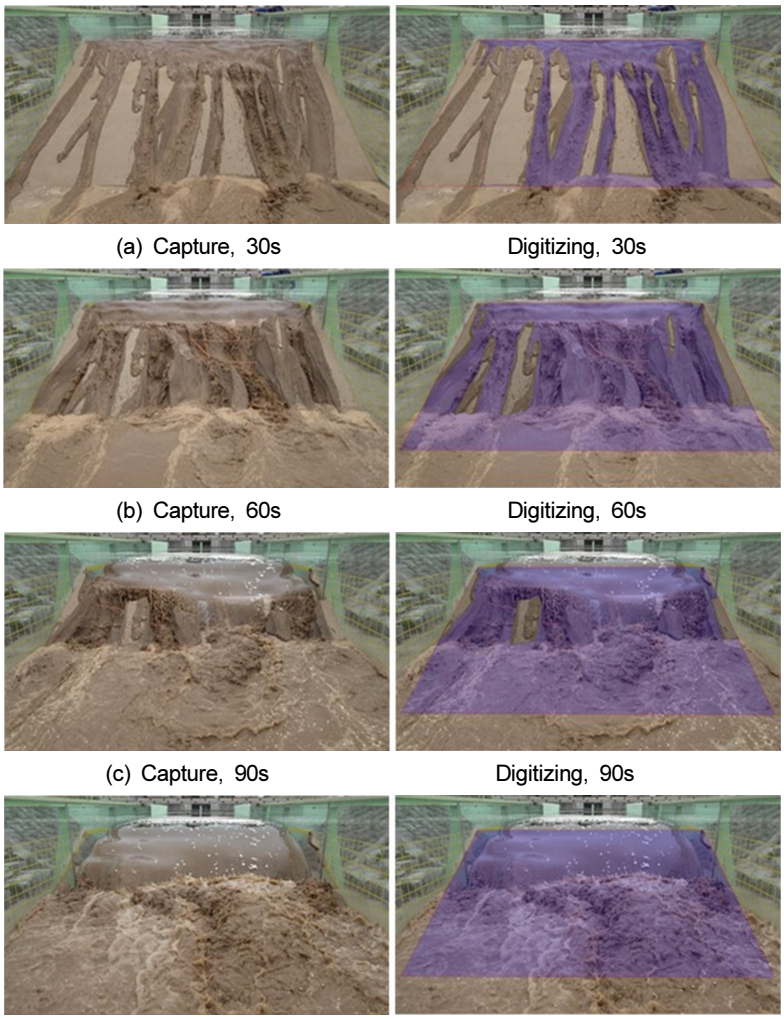


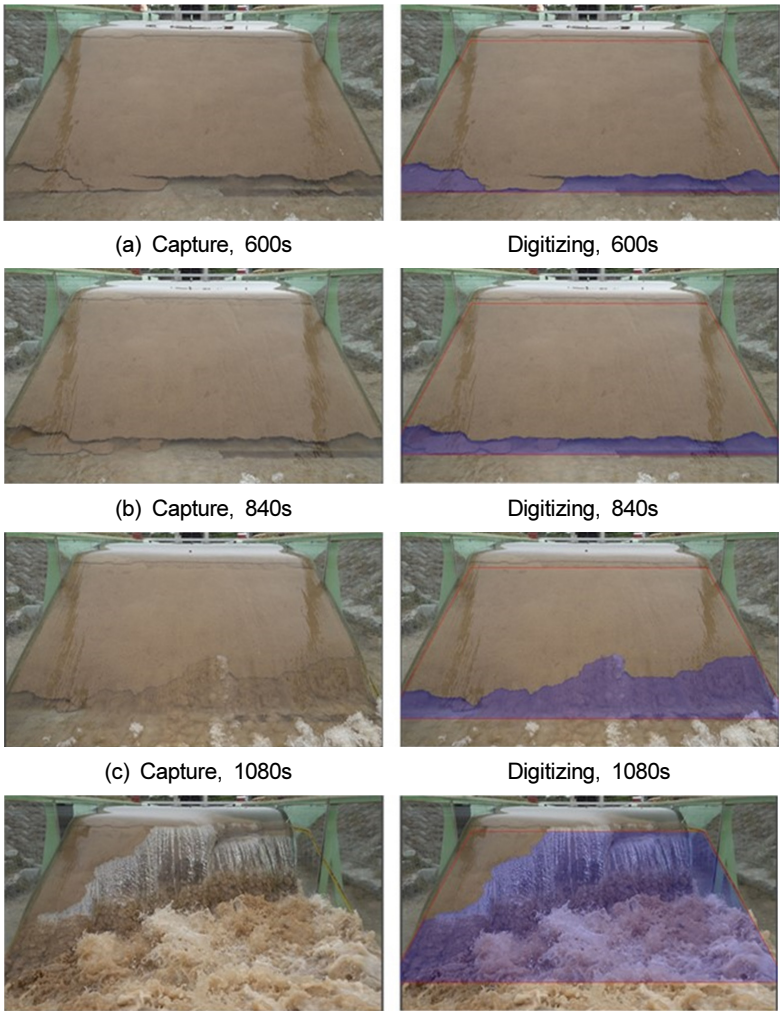
Fig. 6. Analysis of breaching rate (Case 1).

초가 지났음에도 사면에서의 손실은 발생하지 않았으며 390초가 지나서야 제방 끝단(toe)에서 붕괴가 관측되기 시작하였다. 이후 제방 끝단에서 수직방향으로 붕괴 영역이 점차 증가하였지만 960초가 지난 시점에서도 10% 이내의 표면손실률을 보이면서 붕괴의 진행이 상당히 더딘 것으로 나타났다. 1,230초가 지나서야 50% 이상의 표면손실률이 나타났으며, 이후 120초 사이에 붕괴 범위가 크게 증가하면서 90% 이상의 표면손실률에 도달하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 영상분석 기법을 제방붕괴실험에 적용하여 흙 제방과 바이오폴리머 처리 제방의 월류 발생에 따른 붕괴지연효과를 정성·정량적으로 평가하였다. 결론적으로 제방표면에 바이오폴리머를 적용할 경우 완전붕괴가 발생하는 시간은 무보강 제체에 비해 12배 이상 증가해서 붕괴지연효과가 상당히 높은 것으로 나타났다(Fig. 8). 흙 제방의 표면에 신소재를 적용할 시 무보강 조건에 비해 상당한 붕괴지연효과가 있는 것으로 판단되며, 또한 신소재 처리 이후 양생 과정에서 균열 발생을 최소화할 수 있다면 월류 흐름 및 유속에 대한 대응이 좀 더 우수할 것으로 판단된다.

이 연구는 기존에 수행했던 실험 (Ko and Kang 2018)에서 부족했던 부분을 보완하여 바이오폴리머 5 cm 두께 도포에 따른 제방의 안정성을 평가하기 위해



(a) Capture, 600s Digitizing, 600s

(b) Capture, 840s Digitizing, 840s

(c) Capture, 1080s Digitizing, 1080s

(d) Capture, 1320s Digitizing, 1320s

Fig. 7. Analysis of breaching rate (Case 2).

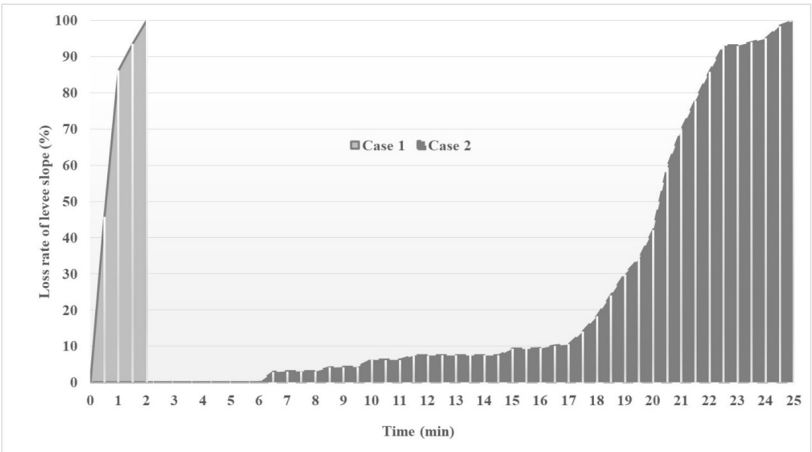


Fig. 8. Comparison of loss rate according to experimental conditions.

추가적으로 진행한 실험연구이다. 단, 단일 케이스만으로 실험군과 비교군의 12배 시간 지연 결과가 제방성능을 평가함에 있어서 일반화될 수 없으므로 이러한 정량적 평가는 다소 한계가 있다. 향후 추가실험을 통한 붕괴지연시간의 평균값을 도출하여 타당한 결과를 도출할 예정이며, 또한 실제 현장과 유사한 가상홍수 재현 및 축척효과 (scale effect)를 최소화하기 위한 실규모 실험실증 연구영역으로 확대하여 하천제방의 노후화 및 세굴 발생 등과 같은 문제점을 보완하는 대책을 제시하기 위해 지속적인 실험검증 연구를 수행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (19AWMP-B114119-04)에 의해 수행되었습니다.

References

An, J.H., Jeong, H.S. and Kim, E.S. 2018. Effects of the β-Glucan- and Xanthan gum-based Biopolymer on the Performance of Plants Inhabiting in the Riverbank. Ecology and Resilient Infrastructure, 5: 180-188 (in Korean).

Caballero, S., Acharya, R., Banerjee, A., Bheemasetti, T.V., Puppala, A., Patil, U. 2016. Sustainable Slope Stabilization Using Biopolymer-Reinforced Soil. In Geo-Chicago; ASCE Library: Reston, VA, USA.

Chang, I.H. and Cho, G.C. 2012. Strengthening of Korean residual soil with b-1,3/1,6-glucan biopolymer. Construction and Building Materials. 30: 30-35.

Chang, I.H., Im, J.Y., Lee, S.W. and Cho, G.C. 2017. Strength durability of gellan gum biopolymer-treated Korean sand with cyclic wetting and drying. Construction and Building Materials, 143: 210-221.

Chang, I.H., Im, J.Y., Prasidhi, A.K. and Cho, G.C. 2015. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. Construction and Building Materials, 74: 65-72.

Chinnarasri, C., Jirakitlerd, S. and Wongwises, S. 2004. Embankment dam breach and its outflow characteristics. Journal of Civil Engineering and Environmental Systems, 21: 247-264.

Guyer, J.P. 2017. An Introduction to Soil Cement for Protection of Levees; CreateSpace Independent Publishing Platform: Scotts Valley, CA, USA.

Joo, Y.H., Yeo, C.G. and Lee, S.O. 2013. Retardation Effect on the Breach of the Earth Filled Embankment Using the Stiffener during Overtopping. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33: 1377-1387 (in Korean).

Kakinuma, T. and Shimizu, Y. 2014. Large-Scale Experiment and Numerical Modeling of a Riverine Levee Breach. Journal of Hydraulic Engineering, 140.

Kim, J.M., Cho, W.B., Choi, B.H. and Oh, E.H. 2015. Model tests for deriving failure parameter during levee overflow. Journal of Korean Geosynthetics Society, 14: 11-21. (in Korean)

Kim, Y.S., Jeong, W.S., Seok, T.R. and Im, A.S. 2006. Strength Characteristics of Cemented Sand of Nak-dong River. Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 7: 43-52.

Ko, D.W. and Kang, J.G. 2018. Analysis of Breach Mitigation Effect on Levee made with New Substance by Overtopping. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 19: 1-8 (in Korean).

Ko, D.W. and Kang, J.G. 2018. Experimental studies on the stability assessment of a levee using reinforced soil based on a biopolymer. Water, 10: 1059.

Korea Advanced Institute of Science and Technology. 2011. METHOD OF STABILIZATION IN SOIL USING BIO-POLYMER. No: 1020110033093.

Korea Advanced Institute of Science and Technology. 2015. SOIL BUILDING MATERIAL USING BIOPOLY-MER. No: 1020150056859.

Korean Design Standard, KDS 51 60 05: 2016 (in Korean).

Kurakami, Y., Nihei, Y., Yada, K., Yamazaki, T., Yamaguchi, S., Kawabe, S., Kikuchi, Y. and Tatsuoka, F. 2013. Reinforcing Technology of River Levee for Increasing Resistance against Overflow Erosion. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 69: 1219-1224. (in Japanese)

Larson, S. and Newman, J.K. 2013. Biopolymer as an alternative to petroleum based polymers to control soil erosion: Lowa Army Ammunition Plant. COST& PERFORMANCE REPORT. Project: ER-200920. US.

Orendorff, B., AI-Riffai, M., Nistor, L. and Rennie, C. D. 2013. Breach outflow characteristics of non-cohesive embankment dams subject to blast. Canadian Journal of Civil Engineering, 40: 243-253.

Pickert, G., Weitbrecht, V. and Bieberstein, A. 2011. Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion. Journal of Hydraulic Research, 49: 143-156.

Powledge, G., Ralston, D., Miller, P., Chen, Y., Clopper, P. and Temple, D. 1989. Mechanics of overflow erosion on embankments. II: Hydraulic and design considerations. Journal of Hydraulic Engineering, 115: 1056-1075.

Schmocker, L. and Hager, W. H. 2011. Plane dike-breach due to overtopping: Effects of sediment, dike height and discharge. Journal of Hydraulic Research, 50: 576-586.

Thornton, C., Hughes, S. and Scholl, B. 2012. Full-Scale Testing of Levee Resiliency During Wave Overtopping. Sixth International Conference on Scour and Erosion,

1215-1222.

Wang, Z., Zhao, B. and Royal, A.C.D. 2017. Investigation of Erosion of Cement-Bentonite via Piping. Advances in Materials Science and Engineering.

Zhang, J., Li, Y., Xuan, G., Wang, X. and Li, J. 2009. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength. Science in China Series E: Technological Sciences, 52: 3024－3029.

Zhu, Y., Visser, P. and Vrijling, J. 2006. Laboratory observations of embankment breaching. International Conference on Hydroscience and Engineering.