

바이오폴리머 혼합토를 활용한 제방 통문 주위 내부침식 저항성 평가를 위한 모형실험

Model Experiment for Evaluating Internal Erosion Resistance Around Embankment Box-culvert Using Biopolymer Treated Soil

김민진¹⁾ · 문준호²⁾ · 김찬희³⁾ · 김영욱[†]

Minjin Kim · Junho Moon · Chanhee Kim · Younguk Kim

Received: November 5th, 2021; Revised: November 10th, 2021; Accepted: November 19th, 2021

ABSTRACT : River-side Embankment collapse involves various causes. The embankment collapse due to internal erosion around embedded structures reaches up to more than 10% in Korea. Many studies are being attempted to prevent from the collapse of the embankment rooted from overtopping and instability as well as internal erosion. One of them is the study on the application of biopolymers. The application of biopolymers to soils are divided into enhancing strength, vegetation and erosion resistance. This study investigated the effect of biopolymer treated soil on erosion resistance. The main goal of the study is to obtain basic data for real-scale experiments to verify the effectiveness of biopolymer treated soil embankment including a review of the collapse pattern in the model embankment with various test conditions. The optimized experimental conditions were selected by examining the erosion patterns according to each induction path with three compaction degree of the model embankment. As a result of the experiment, the internal erosion rate in the embankment to which the biopolymer treated soil was applied is greatly reduced, and it could be concluded that it might be applied to the actual embankment. However, in this study, the conclusion was drawn only within the scaled-down model embankment. In order to practically apply the biopolymer treated soil to the embankment, the study considering the scale effect would be needed.

Keywords : Embankment, Internal erosion, Biopolymer, Box-Culvert, Visualization

요 지 : 우리나라 제방 중 내부침식에 의한 붕괴는 약 10% 이상을 차지하고 있다. 내부침식 뿐만 아니라 월류, 제체 불안정 등으로 인한 제방의 붕괴를 사전에 방지하고 최소한의 피해를 위하여 다양한 연구들이 시도되고 있고, 그 중 하나가 바이오폴리머 적용에 관한 연구이다. 바이오폴리머의 적용 분야에는 강도, 식생, 내침식성으로 나뉘며 본 연구에서는 내침식성에 대한 내용을 다룰 것이다. 본 연구의 목적은 모형제방의 다짐도 및 내부침식 유도도에 따른 붕괴양상을 검토하고 적합한 조건을 선정하여 바이오폴리머 혼합토 제방의 효과를 검증하기 위한 실규모 실험 기초자료를 확보하는 것이다. 모형제방의 다짐도를 상, 중, 하로 나누어 각각의 유도도 조건에 따른 침식양상을 검토하여 가장 적합한 실험 조건을 선정하였으며, 바이오폴리머 혼합토 처리 유무에 따른 효과를 확인하였다. 실험결과, 바이오폴리머 혼합토를 적용한 제방에서의 내부침식률이 크게 감소하였으며, 실제 제방에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 스케일을 축소시킨 모형제방에 바이오폴리머 혼합토를 적용하여 실제 적용 가능한지 여부를 연구하였다. 따라서, 실제 현장적용성 평가를 위해서는 실규모 제방실험이 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 제방, 내부침식, 바이오폴리머, 배수통문, 가시화

1. 서 론

우리나라 하천설계기준(2019)에 명시되어 있는 제체 재료는 전단강도 및 투수특성을 만족하는 토사를 사용하는 것을 권장하고 있으며, 제체 재료로써 하상재료를 사용하는 것을 원칙적으로 금지하고 있다. 하지만 공학적 배경없이 하상재료를 자연상태의 하천을 따라 비교적 구하기 쉽고 하

천의 주변 재료나 하상재료를 이용하는 것이 경제적이기 때문에 하상재료로 축조되는 경우가 많아 설계 시 붕괴에 대한 안전을 확보하더라도 제방이 노후화되면서 침투나 누수에 의해 제방붕괴가 발생한다(Kwon & Han, 2006).

제방의 내부침식은 지반 속에서 유체가 흐르면서 토립자들이 점착성을 잃어 이탈하는 현상을 말한다. 제방의 침식 초기에는 작은 공극이 생성되지만 시간이 경과하면서 토립

1) Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

2) Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

3) Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University (Corresponding Author : yukim@mju.ac.kr)

자들이 점차 유실되어 공극이 크기가 점점 커지고 유속의 증가로 인해 지반 내 공극생성이 가속화된다고(Kim et al., 2020). 이러한 공극생성의 가속화로 인해 제방의 내부침식이 발생되고 더 나아가 파이핑 현상이 발생되어 제방이 붕괴에 이르게 된다. 내부침식 현상은 주로 배수통문 주변에서 발생하는데 제체와 구조물 사이의 접합부 이질화가 원인이다. 이러한 접합부 이질화는 제방과 구조물 사이에 내부침식에 의해 공극이 발생하며, 발생한 공극을 통해 침투가 급격히 증가하여 제방 붕괴가 발생한다. 구조물 주변 제방의 붕괴는 붕괴 요인 중 10% 이상 차지하고 있다(Lee et al., 2008). 이러한 내부침식을 억제하기 위해 바이오폴리머 적용에 관한 연구가 진행되고 있다.

바이오폴리머란 살아있는 생물체 및 미생물의 생체활동을 통해 생성되는 유기 고분자 화합물을 뜻한다(Cho et al., 2020). 배양 및 추출을 통해 인공적으로 생산할 수 있으며, 바이오폴리머 종류에 따라 흡과 혼합 시 다른 성질을 발휘하며 상용의 목적 및 경제성 그리고 시공성을 고려하여 알맞은 레시피를 개발하는 것이 중요하다. 바이오폴리머는 표면의 이온특성으로 인해 점토질 입자와 결합을 형성하거나, 단량체간 결합을 통해 직물형태의 매트릭스를 형성하여 흙의 강성과 강도를 증진시키는 역할을 한다(Chang et al., 2016). 인장강도에 대해서 우수성을 보일 뿐만 아니라 흙의 전단강도, 점착력, 내부마찰각, 침식 저항성 등을 증진시켜 투수계수를 감소시키는 효과가 있다. 바이오폴리머는 제방 보강재료로서 종류 및 혼합법에 따라 강도 증진, 식생 증진, 내침식성 증진 등이 있으며, 본 연구에서 적용하는 바이오폴리머는 주목적인 내침식성 증진의 효과가 있으며, 흙 입자 간의 점착력을 증대시킨다.

배수통문 주변 내부침식은 가시적으로 붕괴 양상을 파악하기 어렵다. 본 논문에서 바이오폴리머를 적용하여 내부침식 식물을 비교 분석하여 내부침식 저항성을 평가하고, 배수통문 주변 내부침식의 가시화를 함으로써 제방의 내부침식 붕괴 양상을 파악하여 바이오폴리머 도포위치를 판단할 수 있고, 바이오폴리머 혼합 제방의 내부침식 저항성을 평가할 수 있다.

2. 모형제방 축조재료

본 연구에서 사용한 제방의 모든 재료는 하상토:황토 = 7:3으로 통일하였으며, 체분석 시험 결과, 균등계수(C_u)는 2.34, 곡률계수(C_c)는 1.02이며, 통일분류법에서 SP(입도분포가 불량한 모래)로 분류되었다. 액성한계시험 결과 액성

한계는 27.05%이며 소성한계 17.21%로 분석되었다. 액성한계시험과 소성한계시험 결과로 얻어진 소성지수는 9.84이며, 본 연구에 사용한 제방의 재료는 제체누수에 대한 저항성이 II등급과 III등급 사이인 것으로 나타났다. 본 연구에 사용한 제방의 재료의 비중은 2.71이며, 실내 다짐시험 결과 최적함수비는 14.15%, 최대건조단위중량 1.86g/cm^3 로 분석되었다.

3. 실험

3.1 예비실험

3.1.1 모형제방 실험 제원

제체재료의 다짐도 및 유도로 조건에 따른 내부침식 양상을 파악하기 위하여 실험을 진행하였다. 다짐의 경우, 80% 이하, 80%~90%, 90% 이상으로 다짐을 실시하였다. 모형제방 제원으로는 제방 경사 1:2, 제방고 0.24m, 둑마루 0.24m, 제방저폭 1.2m, 제방폭 0.5m 단면으로 선정하였으며 배수통문의 부등침하를 방지하기 위하여 말뚝을 설치하고 기초지반 0.1m를 조성하였다. 말뚝 간격을 일정하게 조성하고 수직으로 관입하기 위해 Fig. 1과 같이 아크릴을 제작하여 말뚝을 타입하였다. 내부침식 유도로로 직경 검토 및 배수통문 주변 내부침식 양상을 파악하기 위해 Case 별 내부침식 유도로를 달리하여 실험을 실시하였다. Table 1은 Case 별 다짐도 및 내부침식 유도로의 조건을 나타내었다. 내부침식 유도로 조건에서 제방저폭 1/2의 위치는 앞비탈기슭 기준 제방의 중심(0.6m)까지 설치하였으며, 제방저폭 1/4의 위치



Fig. 1. Driving pile

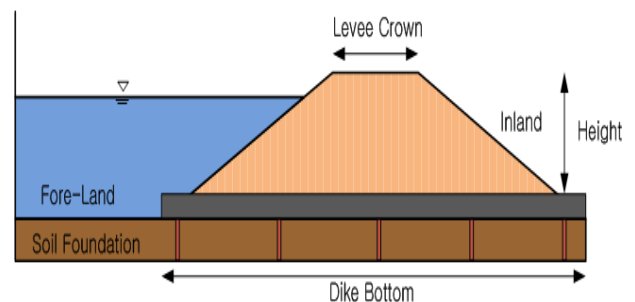


Fig. 2. Side view of model embankment

Table 1. Conditions for compaction and waterway

Case	Compaction	Material	Waterway
1	Lower	Mixed Soil	X
2	Lower		Dike bottom 1/2, Square 5cm
3	Middle		Dike bottom 1/2, Square 5cm
4	Middle		X
5	Upper		Dike bottom 1/2, Square 5cm, Fill bed material
6	Upper		X
7	Upper		Dike bottom 1/4, Square 5cm, Fill bed material
8	Upper		Dike bottom 1/2, Circle 29mm, Fill bed material

는 앞비탈기슭 기준 제방저쪽의 1/4지점(0.3m)에 설치하여 실험을 진행하였다.

3.1.2 실험 결과 및 분석

본 실험에서 말뚝 설치에 따른 다짐조건과 내부침식 유도로 조건의 제방 내부침식 양상과 시간을 검토하였다. 배



Fig. 3. Conditions for waterway (left : Case 1, right : Case 2)



Fig. 4. Conditions for waterway (left : Case 3, right : Case 4)



Fig. 5. Conditions for waterway (left : Case 5, right : Case 6)

수통문 주변 가시화 실험에서 배수통문과 아크릴 벽면이 완벽히 밀착되지 않아 통문 주변으로 물이 새어나가는 현상이 발생하였지만 모든 실험 조건을 동일하게 진행하였으며 침식양상에는 크게 변함이 없고 침식시간만 단축되기 때문에 실험에서 얻고자 하는 결과에는 크게 영향을 주지 않는다고 판단되었다.



Fig. 6. Conditions for waterway (left : Case 7, right : Case 8)



Fig. 7. Case 1



Fig. 8. Case 2



Fig. 9. Case 3



Fig. 10. Case 4

다짐도별 분석 결과, 다짐도 하(80%)와 중(80%~90%)에서는 내부침식이 일어나기 전 제외지측 사면과 독마루 부분이 침식되면서 제방이 붕괴되는 양상이 나타났다. 다짐도 상(90% 이상)에서는 제외지측 사면과 독마루에서는 침식이 일어나지 않고 통문 주변 부분에서 침식이 일어나는 양상을 보였다.

사각 5cm는 배수통문 대비 면적비가 크기 때문에 적합하지 않으며 배수통문 저면부에 원형 29mm 유도로를 활용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

내부침식 시간 분석 결과, Case 1과 Case 2의 두 제방 붕괴시간은 8분으로 내부침식 유도로 형태와 관계없이 동일하였다. 또한 Case 3과 Case 4도 마찬가지로 13분으로 붕괴시간이 동일하였다. Case 7과 Case 8을 비교해 보았을 때, Case 7은 내부침식 유도로를 제방저쪽 1/4 지점에 설치하였지만 제방저쪽 1/2 지점에 설치한 30분에 붕괴된 Case 8 보다 더 큰 내부침식 유도로를 적용하여 붕괴시간이 17분으로 더 빨리 붕괴가 되었다. 내부침식 유도로를 적용하지 않은 Case 6은 붕괴시간이 60분으로 가장 오래걸렸다.

Table 2. Embankment failure time

Case	Embankment failure time (min)
1	8
2	8
3	13
4	13
5	13
6	60
7	17
8	30

종합하면, Case 8이 실험하기에 가장 적합하며 실험 조건을 다짐도 상(90% 이상), 유도로는 원형 29mm로 제방의 양끝단에 설치하는 것이 가장 이상적인 실험 방법인 것으로 판단된다.

3.2 바이오폴리머 적용 제방의 내부침식 저항성 평가

앞선 실험에서 검토한 조건을 적용하여 가시화 실험 및 내부침식 저항성 평가를 진행하였다. 하천설계기준(2019)에 따라 w/o 바이오폴리머 제방과 w/ 바이오폴리머 제방의 다짐 재현성을 위해 다짐 90% 이상으로 다짐을 실시하였다. 시간 경과에 따른 내부침식률 비교 실험을 수행하기 위해 Table 3과 같이 제방 경사 1:2, 제방고 0.24m, 독마루 0.24m, 제방 저쪽 1.2m, 제방폭 0.5m 단면으로 선정하였다.

w/ 바이오폴리머 제방의 바이오폴리머의 양은 혼합토(하

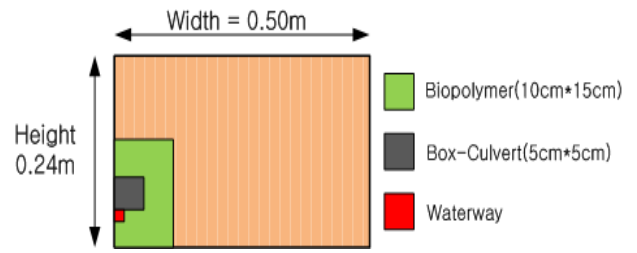


Fig. 11. Location of biopolymer

Table 3. Experimental specification

Height	Embankment crown	Width	Dike bottom	Box-culvert	Waterway
0.24m	0.24m	0.5m	1.2m	0.05*0.05m	0.8cm

상토 70%, 황토 30%)의 무게의 1%로 배합하여 Fig. 11과 같이 배수통문 두께만큼 주변을 바이오폴리머로 도포하였다.

바이오폴리머를 적용한 제방의 시간에 따른 내부침식률 비교 실험의 과정은 ① 제방 축조 후 일정한 수위 상승을 위해 동일한 유량 주입, ② 만수위 유지, ③ 만수위 유지 후, 내부침식 유도로 동시 제거, ④ 배수통문 내부침식 가시화를 통해 내부침식률 측정 등과 같이 총 4단계로 수행하였다.

w/o 바이오폴리머 제방과 w/ 바이오폴리머 제방을 축조하고 Fig. 12와 같이 배수통문 주변을 가시화할 수 있게 배수통문을 아크릴 벽면에 부착하여 내부침식률 비교 실험을 시행하였다. Fig. 12~15와 같이 영상을 분석하여 Internal Erosion Rate(배수통문 하부 사다리꼴 면적대비 침식률)를 계산하였고



Fig. 12. w/o biopolymer (0min)



Fig. 13. w/o biopolymer (4min)



Fig. 14. w/o biopolymer (13min 40sec)

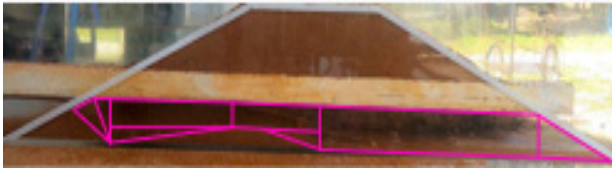


Fig. 15. w/o biopolymer (end)



Fig. 16. w/ biopolymer (end)



Fig. 17. Front view (left : w/o Biopolymer, right : w/ Biopolymer)

Table 4. Internal erosion rate over time

Time (sec)	w/o Biopolymer internal erosion rate (%)	w/ Biopolymer internal erosion rate (%)
0	0	0
20	21	0
90	27	0
240	29	0
820	38	2
840	54	2
855	68	2
875	76	2
900	93	2
920	100	2

Table 4에 시간 경과별 실험 결과를 나타내었다.

w/o 바이오폴리머 제방의 파괴 양상은 내부침식 유도로를 제거한 뒤, 제내지 측 배수통문 주변부로부터 먼저 붕괴가 발생하였으며 점점 제내지 측에서 제외지 측으로 침식되는 양상이 나타났다. Fig. 18을 보면 13분 40초 기점에서 15분 29초까지 내부침식률이 제방 하부 면적대비 30%에서 100%까지 급격하게 증가하였다.

w/o 바이오폴리머 제방은 내부침식 유도로를 제거한 뒤 붕괴가 빠르게 일어난 반면 w/ 바이오폴리머 제방은 내부침식률이 거의 없었으며 제내지 측 배수통문 주변 약간의 침식만 발생한 것으로 나타났다.

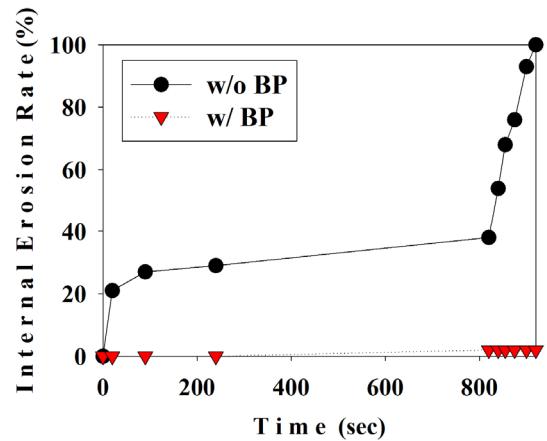


Fig. 18. Internal erosion rate over time

3.3 배수통문 위치에 따른 모형실험

다짐도는 앞서 실험한 결과를 바탕으로 상 90%로 실시하였고 배수통문을 중앙에 배치하여 실제 제방을 모사하였다. 모형제방의 내부침식 유도도 직경 검토 및 배수통문 주변 내부침식 양상을 파악하기 위해 Case 별 내부침식 유도로를 달리하여 실시하였고, 제체재료를 혼합토와 하상토로 분류하여 제체재료에 따른 내부침식 또한 비교분석 하였다. Table 5는 Case 별 다짐도 및 내부침식 유도도의 조건, 제체재료를 나타내었다.

제체재료별 분석 결과, Case 9는 제체누수 저항성이 낮은



Fig. 19. Case 9

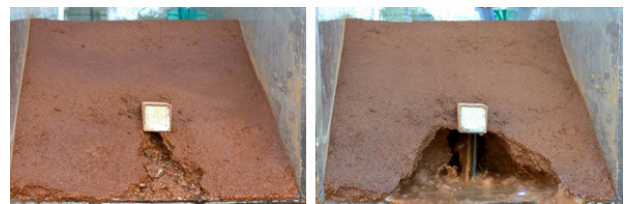


Fig. 20. Case 10



Fig. 21. Case 11

Table 5. Conditions for material and waterway

Case	Compaction	Material	Waterway
9	Upper	Bed material	X
10	Upper	Mixed soil	Circle 8mm
11	Upper	Biopolymer treated soil	Circle 8mm

하상토로 침투가 빠르게 일어나 15분만에 붕괴가 발생하였고, 부등침하를 방지하기 위해 말뚝을 타입하였지만 하상토가 말뚝을 지지해주지 못해 부등침하가 발생하였다. Case 11은 하상토 제방과는 다르게 침식이 일어나고 붕괴되는 시간까지 120분이 걸렸으며, Case 12 바이오폴리머를 적용한 모형 제방은 유도로 제거 초기에 약간의 침식이 발생하였지만 그 이후로 침식이 발생하지 않았다.

4. 결 론

본 연구의 목표는 바이오폴리머를 실제 제방에 적용하기 위한 기초자료 확보를 위한 것이다. 모형제방의 다짐도 및 내부침식 유도로에 따른 내부침식 양상을 검토하고 적합한 조건을 선정하여 바이오폴리머 혼합토 제방의 효과를 검증하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 다짐도에 따른 침식양상은 상(90% 이상), 중(80~90%), 하(80% 이하) 각각 다르게 나타났다. 다짐도 하에서는 만수위 유지 전 제외지 쪽에서 침식이 일어나 실험양상을 제대로 파악할 수 없었으며, 다짐도 중 역시 제외지 침식이 발생하고 만수위 유지 시 독마루까지 침식되어 정확한 침식양상을 파악할 수 없었다. 다짐도 상에서는 상기 2 Case와는 다르게 만수위가 유지될 때까지 침식이 발생되지 않았다.
- (2) 본 연구에서는 제시된 12 Case 외에 10회 이상의 실험을 더 진행하였다. 내부침식을 고려한 제방붕괴 실험은 인위적인 내부침식 유도로가 필수적인 요소이며 유도로 직경에 따라 침식 및 붕괴시간이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 통문 구조물 내부침식 실험을 위해서는

말뚝과 인위적인 유도로가 필수적인 요소로 판단되며 이 부분에 대해서는 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

- (3) 본 연구의 최종 목표인 바이오폴리머(1%) 혼합토의 효과는 실험을 통해 검증할 수 있었다. w/o 바이오폴리머 제방은 침식되어 붕괴에 이른 반면 w/ 바이오폴리머 제방은 침식이 일어나지 않아 붕괴에 이르지 않았다. 따라서, 통문 주위의 내부침식을 저항하기 위하여 바이오폴리머를 적용한 기술이 큰 효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 물관리 연구사업(과제번호:21AWMP-B160248-06)에 의해 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

References

1. 하천설계기준 (2019), Korea Water Resources Association, pp. 496-544.
2. Chang, I. H., Cho, G. C. and Park, J. W. (2016), "New geotechnical engineering practices using microbial biopolymers", Proceedings of the KSCE Conference, KSCE, pp. 202~203 (In Korean).
3. Cho, G. C., Kwon, Y. M., Lee I. H. and Woo, H. S. (2020), "A new levee construction material using biopolymer", THE MAGAZINE OF THE KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Vol. 69, No. 5, pp. 42~50 (In Korean).
4. Kwon, K. K. and Han, S. H. (2006), "River embankment stability against hydraulic piping failure in Korea", KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Vol. 26, No. 1, pp. 33~42 (In Korean).
5. Kim, J. W., Jung, Y. J. and Shin, H. S. (2020), "Experimental study on internal erosion of fine particles", KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Vol. 2020, No. 10, pp. 1578~1579 (In Korean).
6. Lee, I. J., Lee, E. T., Kang, J. H., Kim, D. M. and Chang, K. T. (2008), "Suitability examination of flex sensor and FBG sensor for levee safety management", Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 41, No. 11, pp. 1135~1142 (In Korean).