

블록식 방파제의 수평저항력 평가를 위한 실내모형실험 II : 보강형 싱글블럭의 반복수평 하중에 대한 저항

Small Scale Modelling Experiments for Evaluating Lateral Resistance of Block-Type Breakwater II: A Single Block Reinforced with Piles under Cyclic Lateral Loads

강기찬¹, 김지성^{2*}

Gichun Kang¹, Jiseong Kim^{2*}

¹Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-ro, Jinju, Gyeongsangnam-do 52828, Republic of Korea

²Member, Assistant Professor, Department of Cadastre & Civil Engineering, Vision College of Jeonju, 235 Cheonjam-ro, Wansan-gu, Jeonju, Jeollabuk-do 55069, Republic of Korea

ABSTRACT

In the case of harbor structures, it is important to understand the characteristics of structures that are subjected to repeated loads as they are structures that receive repetitive loads such as wave pressure as well as static loads. In this study, the lateral resistance according to the pile embedded depth of the block breakwater reinforced with piles by cyclic lateral loads was obtained through an model experiment. As the depth of embedment of the pile increased, the lateral resistance showed a tendency to increase. As the load was repeated, the gradient of the lateral resistance gradually appeared to be gentle. The bending moment of the rear pile was larger than that of the front pile. The bending moment of piles in the ground was similar to that when the pile head was free in the cohesionless of Broms (1964).

요 지

항만구조물의 경우 정적인 하중 뿐만 아니라 파압과 같이 반복적인 하중을 받는 구조물임에 따라 반복적인 하중을 받는 구조물의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구는 반복 수평하중에 의한 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 거동특성을 실내모형실험을 통해 구하였다. 말뚝의 근입 깊이가 깊어질수록 수평저항력이 증가하는 경향이 나타났으며, 하중이 반복될수록 수평저항력의 기울기는 점차 완만하게 나타났다. 휨모멘트는 후열말뚝이 전열말뚝보다 크게 나타났다. 지반내에서의 말뚝의 휨모멘트는 Broms(1964)의 사질토지반에서 말뚝두부 자유일 때와 유사하게 나타났다.

Keywords : Cyclic lateral loads, Block breakwater, Pile, Lateral resistance, Embedded depth

1. 서 론

최근 항만구조물들은 물동량은 증가 추세에 있으며, 이에 따라서 대형·고급·첨단화 되어가고 있다. 이에 따라서 다양한 공법들이 개발되고 있으며, 이중 국내에서는 케이

슨 공법을 이용한 구조물들이 증가하는 추세이다. 케이슨의 형태는 다양하며, 적용 현장에 따라서 육상에서 제작하여 해상 크레인을 이용한 현장시공이 이루어지고 있다. 이를 위하여 대규모 제작장과 설비를 갖추기 위한 투자가 이루어져야 하므로 비용 소요가 크며, 이를 설치하기 위한 넓은 제작장이 필요한 실정이다. 일부 현장의 규모가 작을 경우 이러한 장비와 자재 운반 등에 제약이 따르므로 대안으로써 블록식 공법이 많이 사용되고 있다. 블록식 공법은 기존 케이슨 공법에 비해 적은 공사비와 작은 장비를 활용

Received 22 Nov. 2021, Revised 6 Dec. 2021, Accepted 8 Dec. 2021

*Corresponding author

Tel: +82-63-220-3885; Fax: +82-63-220-3889

E-mail address: kimjs@jvisioin.ac.kr (J. Kim)

한다는 상대적 장점이 있으나, 외력에 의한 활동에 취약하고 구조물의 대형화를 하기에는 적합하지 않은 단점을 가지고 있다. 이러한 블록식 공법의 단점의 보완을 위해 말뚝이 보강된 조립식 블록 방파제가 개발되었으며, 일부 현장에서는 이 공법을 채택하여 구조물에 적용되고 있다 (Kim et al., 2020).

말뚝이 설치된 블록식 방파제는 박스형 케이슨 공법과 블록식 공법의 장점들을 지니고 있으며, 시공 특성상 블록간의 결속력이 우수하여 수중에서 활동저항성이 우수하다. 또한 공기가 짧으며, 블록식 공법의 장점인 다양한 형태의 구조물 시공이 가능하기 때문에 기존 블록식 공법을 대체하여 현장에서 적용되고 있는 실정이다. 말뚝으로 보강된 조립식 블록 방파제와 같이 말뚝이 지반에 근입되는 경우뿐만 아니라 상부구조물과 같이 일체화 되어 거동됨에 따라 기존의 수평하중을 받는 말뚝의 연구와는 다른 거동양상을 보인다. Kim et al.(2020)은 기존 블록식 공법보다 말뚝으로 보강된 블록구조체의 수평저항력이 증가됨을 확인하는 연구를 진행하였다. Kang et al.(2021)은 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 거동특성을 파악하기 위해 싱글블록 형태로 말뚝 근입깊이에 따른 블록식 방파제의 수평저항력에 대한 연구를 진행하였고, Kang and Kim(2021 under review)은 무리말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력에 대한 연구를 진행하였다. Kim et al.(2019)는 수치해석을 통해 보강된 항만 구조물들의 내진성능 향상 및 안정성, 시공성, 경제성을 분석한 연구를 진행하였

다. 하지만 해안 구조물인 방파제의 경우 정적인 하중 뿐만 아니라 반복적인 하중을 받는 구조물임에 따라 반복적인 하중을 받는 상태의 연구가 필요하다.

반복수평하중을 받는 연구는 Broms(1964)가 사질지반에 매설되어 있는 말뚝에 반복수평하중을 작용시켜 말뚝의 거동특성에 대한 연구를 진행하였다. Kim et al.(2017)은 해안구조물의 기초로 많이 활용되는 경사말뚝에 일방향 및 양방향 반복수평하중을 작용시켜 말뚝의 거동특성에 대한 연구를 진행하였다. 이렇듯 말뚝으로 보강된 블록식 방파제에 동적인 하중이 가해진 경우에 대한 연구는 진행이 되지 않은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 반복 수평하중을 받는 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 거동특성을 파악하기 위해 조밀한 지반에서 말뚝의 근입 깊이를 변화시켜 가며 실내모형 실험을 진행하였다.

2. 실내모형실험

반복 수평하중이 작용하는 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 거동특성을 파악하기 위해 실내 모형실험을 진행하였다. 실내 모형실험을 하기 위해서 먼저 Table 1과 같이 Iai(1989)의 상사법칙을 적용하였다. 상사법칙에 적용된 Scale Factor은 35.71로 결정하였다. 모형실험에 사용될 재료들은 Iai(1989)의 상사법칙에 따라 Table 2와 같이 결정하였다.

Table 1. Scaling law for the modelling experiments (Iai, 1989)

Quantity	Scale Factors for 1g tests, $\lambda=35.71$	Experiment	Reality
length	λ	1	35.71
Stress and pressure	1	1	35.71
EI of pile/width	λ	1	272,123
Displacement	$\lambda^3/4$	1	213,40
Time	1	1	14.61
Strain	$\lambda^7/2$	1	5.98
Acceleration	$\lambda^3/2$	1	1
Density	$\lambda^1/2$	1	1

Table 2. Material parameters used in the modelling tests

Item	Prototype	Model
Pile Diameter, mm	1,000	28.6
Bending Stiffness of Pile, MN·cm ²	9.81E+6	12,4983
Density of con's block, kN/m ³	24	24
Height of Riprap, mm	1,500	42.9
Block (width×length×height), mm	2,400 × 11,000 × 1,500	68.6 × 314.4 × 42.9

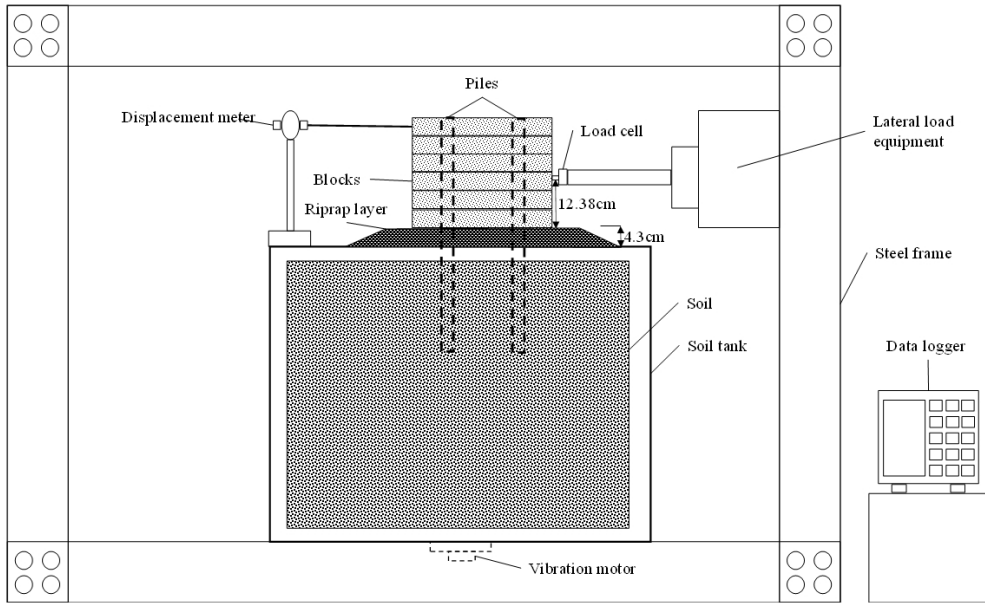


Fig. 1. Apparatus of model test

Table 3. Properties of the model ground

Property	Value
Max. void ratio	0.79
Min. void ratio	0.58
Max. dry density (kN/m ³)	15.78
Min. dry density (kN/m ³)	13.92
Specific gravity	2.54

Fig. 1은 모형실험의 모식도를 나타내고 있으며, 실험토주는 말뚝에 대한 토조의 간섭효과를 무시할 수 있는 크기 (1,000mm×1,000mm×1,000mm)의 강체를 사용하였다. 블록과 원지반 사이에는 사석층을 4.29cm 높이로 쌓았다.

지반재료는 낙동강 유역의 합천사를 이용하였다. 지반재료의 물리적 성질은 Table 3과 같고, 지반재료의 입도분

포곡선은 Fig. 2와 같다. 지반의 상대밀도를 조절하기 위해 토조 하부에 있는 진동모터를 이용하여 지반의 상대밀도를 72%로 균일하게 조성하여 실험하였다.

하중의 작용위치는 Fig. 3과 같이 Goda(1973)의 파압분포도를 이용하였다. 파압 분포도를 통해 파압의 작용 위치는 블록 하단에서 12.38cm 위치로 결정하였다(Kang et al., 2021).

실험에 사용된 블록은 Fig. 4(a)와 같이 말뚝이 관입될 부분에 플라스틱 관을 삽입 후 모르타르를 타설하여 Fig. 4(b)와 같이 총 6개를 제작하였다. 블록의 치수는 68.6mm×314.4mm×42.9mm이며, 블록 내 구멍의 직경은 28.8mm이다. 이때 말뚝과 블록 구멍 사이에 생기는 틈의 오차를 줄이기 위해 초기 실험 값에서 비정상적인 값을 제외한 이

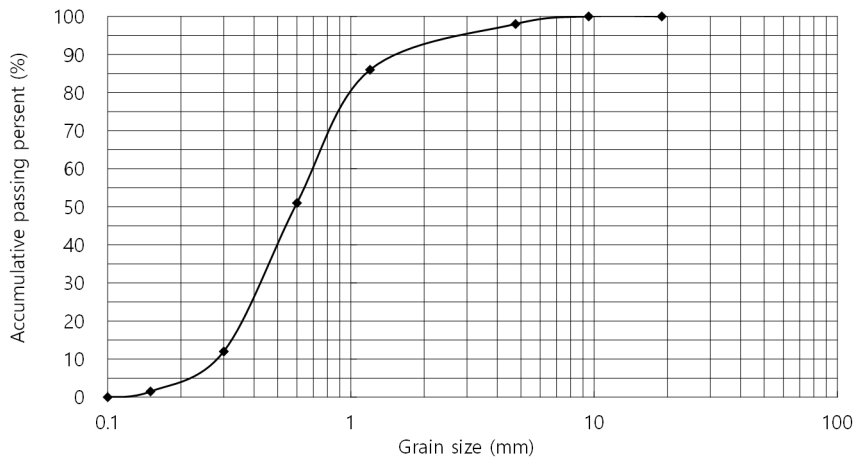


Fig. 2. Particle size distribution

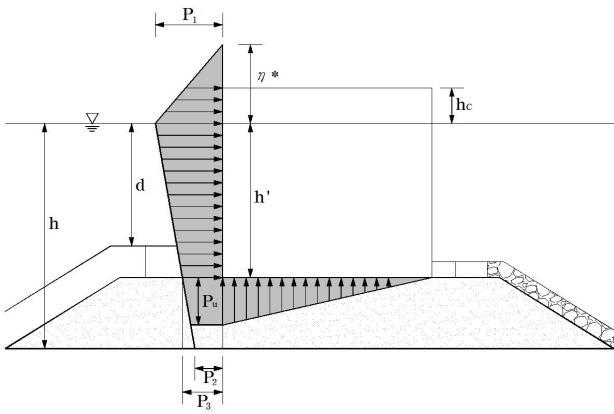


Fig. 3. Wave-induced pressure distributions (Goda, 1973)



(a) Making block



(b) Blocks

Fig. 4. Model block

후의 값을 적용하였다.

실험에 사용된 말뚝의 제원은 Table 4와 같으며 동관으로 제작된 원형 말뚝을 사용하였다. 말뚝의 휨모멘트는 Fig. 5와 같이 말뚝에 부착된 7개의 스트레인 게이지를 통해 측정하였다.

휨모멘트(M)는 Rollins et al.(1998)이 제안한 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

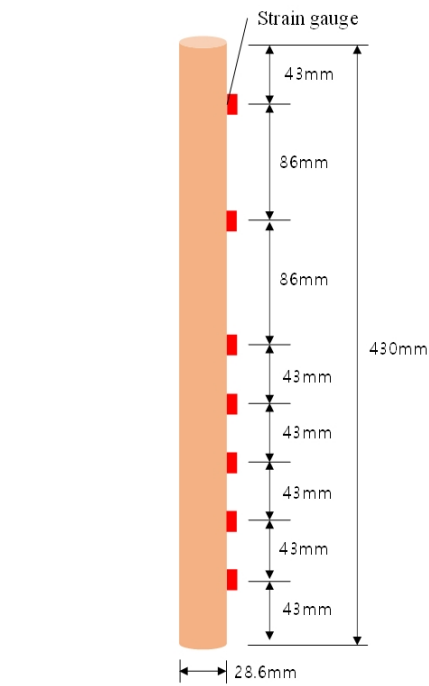


Fig. 5. Model pile

$$M = \frac{E \cdot I \cdot \epsilon}{d} \quad (1)$$

여기서, E : 탄성계수

I : 단면2차모멘트

ϵ : 압축변형률

d : 모형말뚝의 반경

본 연구에 사용된 말뚝은 Broms(1965)가 제안한 말뚝 분류법을 이용하여 장단을 판별하였다. 지반의 상대밀도를 적용하여 지반변형성능 계수(n_h) 값을 산출하고 이를 식 (2)에 대입하여 특성 값(η)을 구한다. 지반변형성능 계수(n_h)는 Broms(1965)가 모래지반에서 지반이 조밀한 상태일 때 14.7~17.64의 값을 가진다고 하였으며 본 연구에서는 중간 값인 16.17값을 사용하였다.

말뚝 길이(L)을 특성 값에 곱하여 최종적으로 Table 5와 같이 본 연구에 사용된 말뚝의 장단을 판별하였다.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (2)$$

Table 4. Properties of pile used in the modelling tests

Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	E (MN/mm ²)	I (cm ⁴)	EI (MN·cm ²)
430	28.6	1.27	12.25	1.02027	12.4983

Table 5. Results of pile distribution

Pile embedment depth	Relative (%)	Pile length(L) (cm)	η	ηL	Result
1H	72	30.03	0.06643	1.9949	Short pile
2H		34.32		2.2799	Medium pile
3H		38.61		2.5649	Medium pile
4H		42.9		2.8498	Medium pile

Table 6. Test cases

No	Pile embedment depth	Pile position	Load	Number of Blocks
1	1H	Inside the block and riprap	Cyclic load	6
2	2H	Inside the block, riprap and natural ground		
3	3H			
4	4H			

* H: Height of riprap layer

실험방법은 강사장치를 이용하여 모래를 일정한 밀도로 조성, 모래지반 위에 사석층을 2.49cm 성토, 사석층 위에 블록 설치, ① 강사장치를 이용하여 모래 포설, ② 토조 위에 각목을 이용하여 사석층이 들어갈 4.29cm의 여유공간을 확보, ③ 블록을 각목 위에 설치, ④ 블록에 뚫려 있는 구멍을 통해 말뚝을 근입, ⑤ 사석을 모래와 블록 사이에 채운 후 각목 제거, ⑥ 토조 하부에 부착된 진동기를 90초 가동하여 상대밀도를 72%로 조성, ⑦ 반복하중을 가하기 위해 수평하중을 목표변위까지 블록 중단에 가함(목표 변위는 3mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm), ⑧ 1차 목표 변위 3mm까지 수평하중을 가한 뒤 하중을 천천히 제거하여 수평하중이 0이 될 때까지 하중을 제거 ⑨ 2차 목표 변위인 6mm까지 하중을 다시 가하고 하중을 제거 ⑩ 목표 변위들 마다 하중을 가하고 제거하는 과정을 반복하여 최종 목표 변위 15mm까지 실험 진행.

실험 종류는 Table 6과 같이 사석층까지 말뚝이 관입된(1H), 원지반까지 말뚝이 관입된(2H~4H)로 총 4가지 형태로 실험을 진행하였다.

3. 실내모형실험 결과 및 고찰

3.1 반복수평하중에 대한 수평저항력

반복 수평하중에 대한 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력을 측정하기 위해 말뚝의 근입깊이를 1H~4H까지 변화시켜가며 실험을 진행하였다.

말뚝이 설치된 블록식 방파제의 허용수평변위 값은 블

록의 결합과 수평저항력 증가를 위해 삽입한 말뚝의 영향을 받기에 말뚝의 허용변위값을 적용시킬 수 있다. Davidson (1982)은 허용변위를 식 (3)와 같이 제안하였다. 말뚝의 두부 2° 회전 시 말뚝에 작용하는 하중을 극한수평저항력으로 정의하였다.

$$\theta = \frac{360^\circ \times \delta}{2\pi \times (h_p + h_0)} \quad (3)$$

여기서, δ : 말뚝 두부의 변위, mm

θ : 말뚝 두부의 회전각, °

h_p : 회전절점의 깊이, mm

h_0 : 지표에서 말뚝 두부까지의 거리, mm

이를 이용하여 6단 블록에 말뚝의 근입깊이(17.2cm)를 적용하면 회전각 2°의 말뚝 두부 변위는 9.8mm이나, 본 실험은 반복적인 하중을 주어 변위를 누적시켜 반복 시 값을 측정하므로 시험 목적상 1회 변위를 3mm로 적용하여 5회의 반복 수평하중을 적용 시 발생 변위인 15mm를 최대 허용변위로 결정하였다.

Fig. 6은 말뚝 근입 깊이에 따른 모형블록의 수평저항력을 나타낸 것이다. 말뚝 근입 깊이가 깊어지고 반복수평하중 단계가 증가함에 따라 수평저항력도 증가하였다. 말뚝의 탄성회복은 1H에서는 최대 1.0mm, 4H에서는 최대 2.5mm까지 변위가 회복됨에 따라 근입 깊이가 깊을수록 크게 회복됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 말뚝의 근입깊이에 따른 반복하중단계별 최대

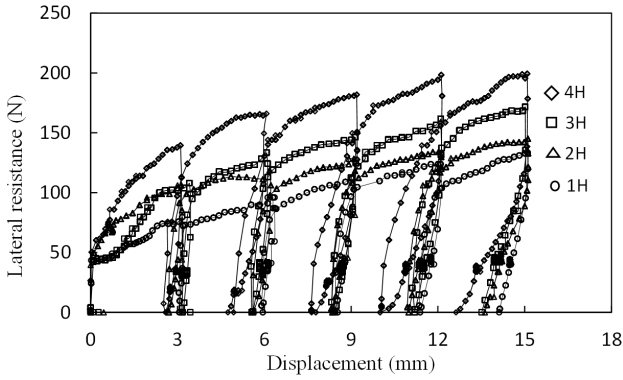


Fig. 6. Lateral resistance according to the cyclic loads and the pile embedded depth

수평저항력을 나타낸 그림이다. 최대 수평저항력은 Fig. 6에서 측정된 근입깊이별 블록의 수평변위 3mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm에서 최대 값들을 추출하여 나타내었다. 반복된 하중 작용으로 인해 말뚝 주변 지반은 느슨한 상태와 조밀한 상태가 반복된다. 또한 반복하중으로 인해 말뚝의 최종변형 발생 전까지 처음보다 느슨해진 상태의 지반 다짐효과가 발생한다. 느슨한 지반상태에서 말뚝의 위치가 원점으로 돌아오지 못한 상태에서 반복하중이 작용할수록 수평저항력 그래프의 기울기는 점차 완만해짐을 알 수 있다.

3.2 말뚝 근입깊이에 따른 말뚝 위치별 휨모멘트

본 연구에서는 말뚝이 블록의 전·후면에 각각 하나씩 근입되어 있다. 따라서 말뚝의 근입깊이에 따른 말뚝 위치별 휨모멘트 값을 Fig. 8과 같이 전열 말뚝과 후열 말뚝으

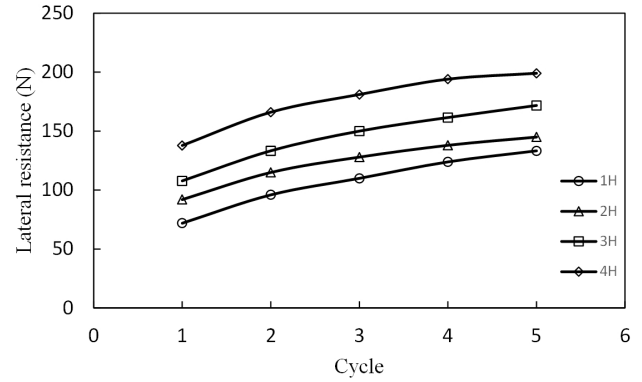


Fig. 7. Maximum lateral resistance for each cyclic loads

로 나타내었다. y축은 말뚝의 근입깊이를 말뚝의 직경(D) 28.6mm으로 나누어 무차원으로 나타내었다.

전체적으로 후열 말뚝이 전열말뚝보다 휨모멘트가 크게 나타났는데 이는 Kang and Kim(2021 under review)에서 실험한 결과와 같이 블록 상단의 변위가 블록 하단의 변위보다 크게 나타나 반복수평하중에 의해 블록이 전도되는 현상이 나타난 것으로 판단되며, 이를 통해 블록 후면에 더 큰 하중이 작용함에 따라 후열 말뚝의 휨모멘트 값이 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 8에서 말뚝 근입깊이가 2H~4H일때 지반내에서의 최대 휨모멘트 위치는 1.5D에서 나타났다. 이를 Broms(1964)가 제안한 사질토지반에서 말뚝두부 자유일 때 짧은말뚝에서의 최대 휨모멘트 위치와 비교하기 위해 Broms(1964)의 최대휨모멘트 발생 위치(D_y) 식 (4)를 이용하였다.

$$D_y = \sqrt{\frac{2Q_u}{3K_p \gamma B}} = \frac{l}{\sqrt{3\left(1 + \frac{h}{l}\right)}} \quad (4)$$

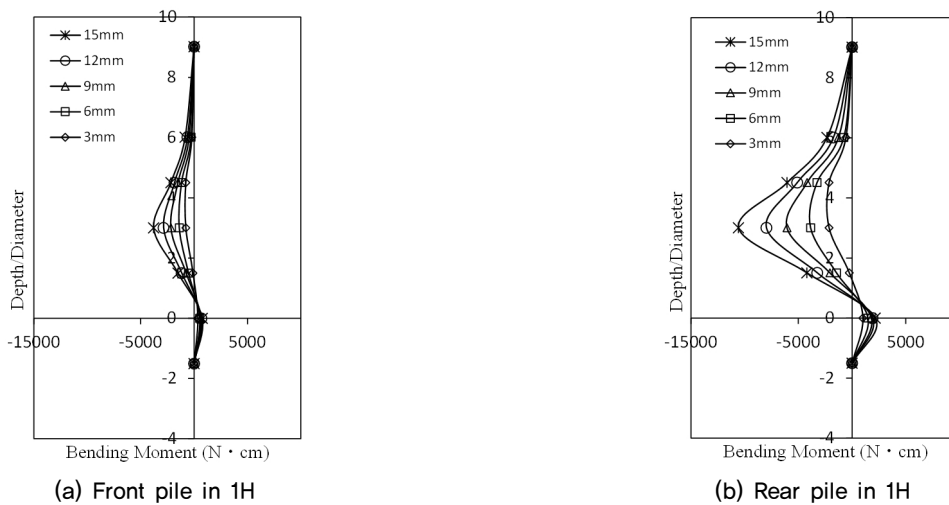
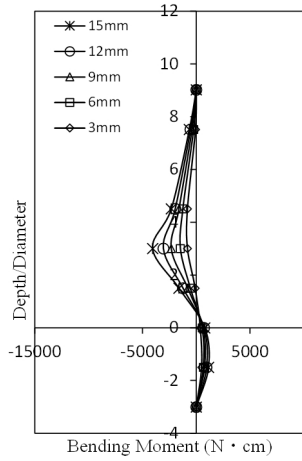
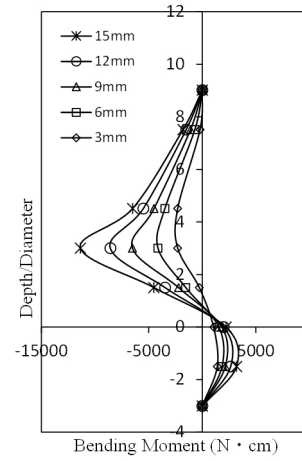


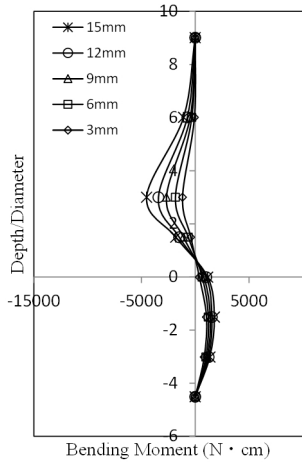
Fig. 8. Bending moment according to the pile position and the embedded depth



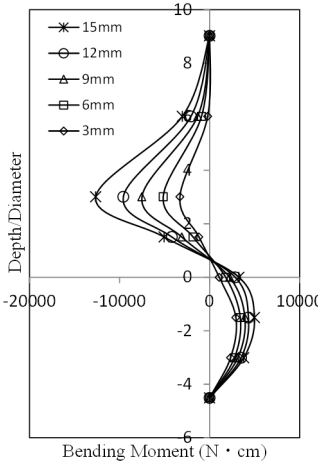
(c) Front pile in 2H



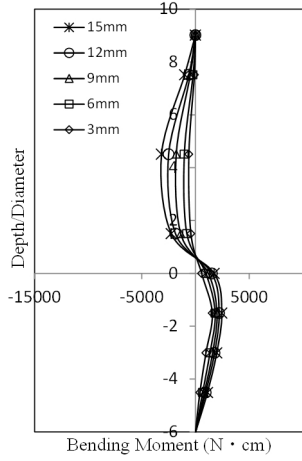
(d) Rear pile in 2H



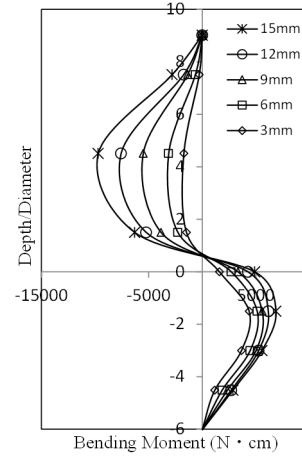
(e) Front pile in 3H



(f) Rear pile in 3H



(g) Front pile in 4H



(h) Rear pile in 4H

Fig. 8. Bending moment according to the pile position and the embedded depth (continued)

여기서, Q_u : 수평하중
 K_p : 수동토압
 γ : 지반의 단위중량
 B : 말뚝 폭
 l : 말뚝의 근입 깊이

h : 지표면에서 하중 작용점까지의 거리

Table 7은 실험 결과와 Broms(1964)가 제안한 식으로 계산된 최대 휨모멘트 발생위치를 비교한 표이다. 1H의 경우 지반내 말뚝에 센서가 없는 상황이라 비교하지 못하였

Table 7. Position of maximum bending moment (unit : cm)

Pile embedded depth	2H	3H	4H
Model test	4,29		
Broms (1964)	3,81	5,20	6,41

다. 본 연구에서 계측 센서가 촘촘히 붙어 있지 않는 상황에서 근입깊이별 최대 휨모멘트 발생위치를 정확히 산정하기는 어렵지만 Broms(1964)의 제안식과 비교한 결과 말뚝 근입깊이가 2H일 때 사석층 하단부위 즉 사석층과 원지반 경계에서 약간 위쪽에서 발생하는 것으로 계산되었으며, 3H의 경우 사석층과 원지반의 경계면에서 약간 아래쪽에서 발생하는 것으로 계산되었다. 4H인 경우 말뚝직경의 2.2배 위치에서 발생하는 것으로 계산되었다. 본 연구에서 센서의 위치는 사석층 표면에서부터 말뚝직경의 1.5배(사석층과 원지반의 경계면), 3배, 4.5배 위치하고 있어 정확한 위치를 확인하기는 어렵지만 지반내에서의 휨모멘트의 경향은 Broms(1964)의 사질토지반에서 말뚝두부 자유일때 짧은말뚝에서의 휨모멘트도와 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 반복 수평하중에 의한 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 거동 특성을 파악하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 말뚝 근입 깊이가 깊어질 수록 수평저항력이 증가하는 경향이 나타났다. 말뚝의 탄성회복은 1H에서는 최대 1.0mm, 4H에서는 최대 2.5mm까지 변위가 회복됨에 따라 근입 깊이가 깊을수록 크게 회복되었다.
- (2) 반복하중이 작용함에 따라 수평저항력 기울기는 점차 완만하게 나타났는데 이는 반복하중으로 인해 말뚝 주변지반이 느슨한 상태가 되어 말뚝이 처음 위치로 돌아오지 못했기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.
- (3) 지반내에서 말뚝의 휨모멘트 양상은 Broms(1964)의 사질토지반에서 말뚝두부 자유일때 짧은말뚝에서의 휨모멘트도와 유사하게 나타났으며 최대 휨모멘트 발생 위치는 사석층과 원지반의 경계면 부근에서 발생됨을 알 수 있었다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2020 R111A3067248). The authors acknowledge Mr. Jiseung Lee for his supports conducting modeling experiments with us.

References

1. Broms, B. B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.90, No.SM3:123-156.
2. Broms, B. B. (1965), "Design of Laterally Loaded Piles", *Proc. ASCE*, Vol.91, No.SM 3, pp.79-99.
3. Davidson, H. L., Cass, P. G., Khilji, K. H. and Mcquade, P. V. (1982), "Laterally loaded drilled pier research", Report EL 2197, EPRI, pp.324.
4. Goda, Y. (1973), "Study on design wave pressure on breakwater", Report of port and Harbor Res. Inst., Vol.12, No.3, pp.31-69.
5. Iai, S. (1989). "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", *Soil and Foundations*, Vol.29, No.1, pp.105-118.
6. Kang, G., Kim, J., Kim, T. H., Lee, S. and Kim, J. (2021), "Lateral Resistance of Block Type Breakwater with Piles to Depth of Embdement", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.33, No.2, pp.65-72.
7. Kim, B. I., Kang, H. H., Kim, H. J. and Han, S. J., (2019), "The Study on Improvement Methods for the Seismic Performance of Port Structures", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.18, No.4, pp.151-165.
8. Kim, J., Noh, J. and Kang, G. (2017), "Behaviour Characteristics of Single Pile under Dynamic Lateral Loads", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.9, pp.49-60.
9. Kim, T. H., Kim, J., Choi, J. S. and Kang, G. (2020), "Evaluation of Lateral Resistance for Tie-cell Wave-dissipating Block by Model Experiments", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.36, No.12, pp.87-97.
10. Rollins, K. M., Peterson, K. T., and Weaver, T. J. (1998), "Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay", *Journal of Geotechnical and Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.124, No.6, pp.468-478.