

말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 말뚝 근입깊이에 따른 수평저항력 Lateral Resistance of Block Type Breakwater with Piles to Depth of Embedment

강기천* · 김준완** · 김태형*** · 이성철**** · 김지성*****

Gichun Kang*, Junwan Kim**, Tae-Hyung Kim***, Sungchul Lee**** and Jiseong Kim*****

요 지 : 본 연구는 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력을 실내모형시험을 통해 구하였다. 특히 말뚝의 근입깊이를 달리하여 말뚝의 수평저항력 및 휨모멘트의 변화 등을 분석하였다. 그 결과 0H 대비 1H, 2H, 3H, 4H에서의 수평저항력은 각각 1.83, 2.05, 2.47, 2.94배 커지는 효과가 나타났다. 사석층(H)까지 말뚝이 관입되었을 때의 수평저항력이 블록내에만 관입되어 있을 때 보다 1.83배 커지는 효과가 나타났다. 말뚝의 휨모멘트의 경우 후열에 배치된 말뚝이 전열보다 더 크게 나타났으며, 이는 수평하중을 받는 블록이 활동뿐만 아니라 전도가 동시에 발생함에 따라 나타난 결과라 볼 수 있다.

핵심어 : 수평저항력, 블록, 말뚝, 방파제

Abstract : This study conducted to obtain the lateral resistance of a block-type breakwater reinforced with piles through an model test. In particular, the changes in the lateral resistance and bending moment of the pile were analyzed by varying the depth of the pile. As a result, the lateral resistance at 1H, 2H, 3H, and 4H compared to 0H increased by 1.83, 2.05, 2.47, and 2.94 times, respectively. The lateral resistance when the pile was penetrated to the riprap layer (H) was 1.83 times greater than when the pile was penetrated only in the block. In the case of the bending moment of the piles, the piles arranged in the rear row appeared to be larger than the front row, which can be seen as a result of the sliding as well as the overturning of the block subjected to the lateral load.

Keywords : lateral resistance, block, pile, breakwater

1. 서 론

최근 항만물동량의 증가에 따라 항만시설들이 점차 대형화, 고급화, 첨단화되는 추세에 있고 우리나라의 경우 대형의 케이슨공법을 적용한 현장들이 많아지고 있다. 케이슨공법의 경우 보통 육상에서 제작 후 해상크레인을 사용하여 해양 인양 및 거치하는 방법을 주로 사용되고 있다. 케이슨공법은 케이슨제작을 위한 대규모 제작장 및 설비에 초기 투입비가 많이 들고, 대형장비에 의한 설치 및 운반이 요구되는 특징을 가지고 있다. 그래서 대형장비를 활용할 수 없는 경우나 소규모 구조물 공사에서는 다른 방안으로 블록식공법이 적용되고 있다.

블록식공법은 일반 대형의 케이슨공법보다 공사비가 저렴하고 소형장비로 시공이 가능한 장점을 가지고 있으나 대형

화가 어려워 활동에 취약하다는 단점을 가지고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2017; Hwang et al., 2018). 최근에는 블록식공법의 단점을 보완하고 케이슨공법에 비하여 경제적인 설계가 가능한 말뚝이 보강된 블록에 대한 관심이 증가하고 있다. 말뚝이 보강된 블록은 박스형케이슨과 블록식공법의 장점들을 융합한 공법으로서 각 블록을 수중에서 상하좌우로 결속하여 활동저항성이 우수하며, 짧은 공사기간과 다양한 형태의 구조물 시공이 가능하여 기존 블록식공법의 대체 공법으로 다양한 현장에 적용되고 있다. 하지만 말뚝이 보강된 블록식 공법은 블록의 일체화와 수평저항력의 증가를 위해 현장타설말뚝을 적용하고 있는데 이 공법에서 말뚝의 역할에 대한 연구는 매우 미비한 상황이다(Kim et al., 2020).

말뚝기초에 관한 연구는 과거 연직하중에 의한 연구에서 최근에는 수평하중을 받는 말뚝에 관한 연구들이 진행되고 있

*경상국립대학교 공과대학 토목공학과 부교수(Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University)

**국토안전관리원 안전진단본부 부장(Head of department, Safety Inspection Division, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety)

***한국해양대학교 건설공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

****한국해양대학교 토목환경공학과 박사수료(PhD Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

*****전주비전대학교 지적토목학과 조교수(Corresponding author: Jiseong Kim, Assistant professor, Cadastre & Civil Engineering, Vision College of Jeonju, 235 Cheonjam-ro, Wansan-gu, Jeonju, Jeollabuk-do 55069, Republic of Korea, Tel: +82-63-220-3885, Fax: +80-63-220-3889, kimjs@jvision.ac.kr)

Table 1. Similarity law of Iai (1989)

Scale Factor, $\lambda = 35.71$ Ratio of	Iai (1989)	Experiment	Reality
Vertical length	λ	1	35.71
Horizontal length	λ	1	35.71
Density	1	1	1
Stress and pressure	λ	1	35.71
Time	$\lambda^{3/4}$	1	14.61
Acceleration	1	1	1
EI of pile/width	$\lambda^{7/2}$	1	272,123
Displacement	$\lambda^{3/2}$	1	213.40
Strain	$\lambda^{1/2}$	1	5.98

다. 수평하중을 받는 말뚝의 경우 19세기 말부터 말뚝의 수평지지력에 관한 실험이 활발히 이루어지게 되었다. Chang (1937)은 지반을 후크의 법칙에 따른 탄성체로 가정하고 지반반력계수가 심도에 관계없이 일정하다고 가정하여 해석한 결과를 발표하였다. Matlock and Reese(1960)는 지표면에서 수평하중과 모멘트를 동시에 받는 단독말뚝에 발생하는 모멘트와 변위를 결정하는 일반적 해를 제안하였다. Broms(1964a, b)는 수평력을 받는 말뚝-지반계의 파괴형태를 고찰한 후 말뚝의 강성과 근입깊이 및 지반강성에 의해 말뚝을 분류하고, 점성토와 사질토로 나누어 말뚝의 극한 수평저항력을 구하는 방법을 제안하였다. Ooi and Duncan(1994)은 말뚝에 수평하중이 작용할 경우 Broms(1964a, b)가 제시한 기본적인 이론을 바탕으로 말뚝 두부의 변위 및 수평저항력을 산출할 수 있는 방법을 제시하였고, Vennalaganti and Endley(2001)는 서로 다른 형태를 가진 말뚝기초에서 수평하중에 의한 말뚝두부 변위와 모멘트를 산출하는 방법을 L-Pile을 활용하여 제안하였다. Bae et al.(2002, 2003)은 수평하중이 작용하는 단독말뚝에서 하중의 작용형태, 작용방향, 지반의 조건, 말뚝의 설치 조건 등을 달리하여 모형실험을 수행하였다. 그 결과 하중의 반복재하에 따른 말뚝 저항력의 감소효과 및 경사 말뚝의 경사각에 따른 저항력의 변화관계 등의 단독말뚝 거동특성을 제안하였다. 하지만 말뚝이 사석층과 지반에 근입되는 블록식공법의 경우 말뚝의 역할에 대한 연구는 수행된 사례가 없는 실정이다. 말뚝이 보강된 블록식공법은 블록-말뚝-지반간의 상호작용에 의하여 안정을 유지하는 구조체로 현재까지 우리가 접한 블록식이나 케이슨식과는 전혀 다른 거동 메커니즘을 가지고 있어 말뚝의 역할에 대한 이해는 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 블록에 말뚝의 근입깊이에 따른 수

Table 3. Physical properties of the ground

Property	Symbol	Value
Max. void ratio	e_{\max}	0.79
Min. void ratio	e_{\min}	0.58
Max. dry density	$r_{d\max}$ (kN/m ³)	15.78
Min. dry density	$r_{d\min}$ (kN/m ³)	13.92
Specific gravity	G_s	2.54

평저항에 대한 거동의 분석을 위해 실내모형실험을 수행하였다.

2. 실내모형시험

말뚝근입에 따른 블록의 수평저항력에 대한 연구를 위해 실내 모형실험을 수행하였고 현장조건을 모형실험으로 모사하기 위해 Table 1과 같이 Iai(1989)의 상사법칙의 제2 형태를 적용하여 1/35.71의 스케일로 축소하여 실험을 수행하였다. Iai(1989)의 상사법칙에 따라 모형실험에 사용될 재료들은 Table 2와 같이 결정하였다. 하지만 모형말뚝 재료의 한계로 인해 두께 및 휨강성 모두 상사관계를 만족시킬 순 없었다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 휨강성이 횡방향 지지거동에 지배적인 영향인자임을 감안하여 말뚝의 두께를 1.27 mm로 조절하여 휨강성의 상사관계를 만족도록 하였다.

Fig. 1은 모형실험의 전경을 나타내고 있으며 실내모형시험을 위한 시험장치로는 모형토조, 모형말뚝, 지반재료(사질토), 사석, 변위계, 로드셀, 변형율계, 모형블록, 재하장치, 그리고 Data Logger 등으로 구성되어 있다. 모형시험에 사용된 강체 토조는 말뚝에 대한 강체 토조의 간섭영향을 무시할 수 있는 크기(1,000 mm × 1,000 mm × 1,000 mm)의 형태로 제작된 강체 토조를 사용하였다. 이때 토조와 말뚝사이의 간격은 최소 말뚝 직경의 13배 이상으로 Bae et al.(2006)의 말뚝과 벽체의 한계간격인 말뚝직경의 5배 이상보다 크게 구성되어 졌다.

지반모형 제작을 위한 재료로 낙동강 유역의 합천사를 이용하였고 기진 상태에서 #4번 체를 통과한 모래를 사용하였다. 지반재료의 함수비는 0.08%이며, 물리적 성질은 Table 3, 입도분포곡선은 Fig. 2와 같다. 지반조건은 조밀한 상태로 만들기 위해 Fig. 1의 하부에 장착되어 있는 진동모터(90초 가동)를 이용하여 상대밀도를 72%로 조성하였다.

실험에 사용된 말뚝은 동관으로 제작된 원형의 말뚝을 사용하였다. 모형과 제원은 Table 4와 같다. 이때 말뚝의 휨모

Table 2. Properties of materials to which Iai's similarity law is applied

Item	Prototype	Model
Pile diameter (mm)	1000	28.6
Block (width × length × height) (mm)	2,400 × 11,000 × 1,500	68.6 × 314.4 × 42.9
Height of rubble mound (mm)	1500	42.9
Density of con's block (kN/m ³)	24	24
Pile's flexural rigidity (MN·cm ²)	9.81E+6	12.4983

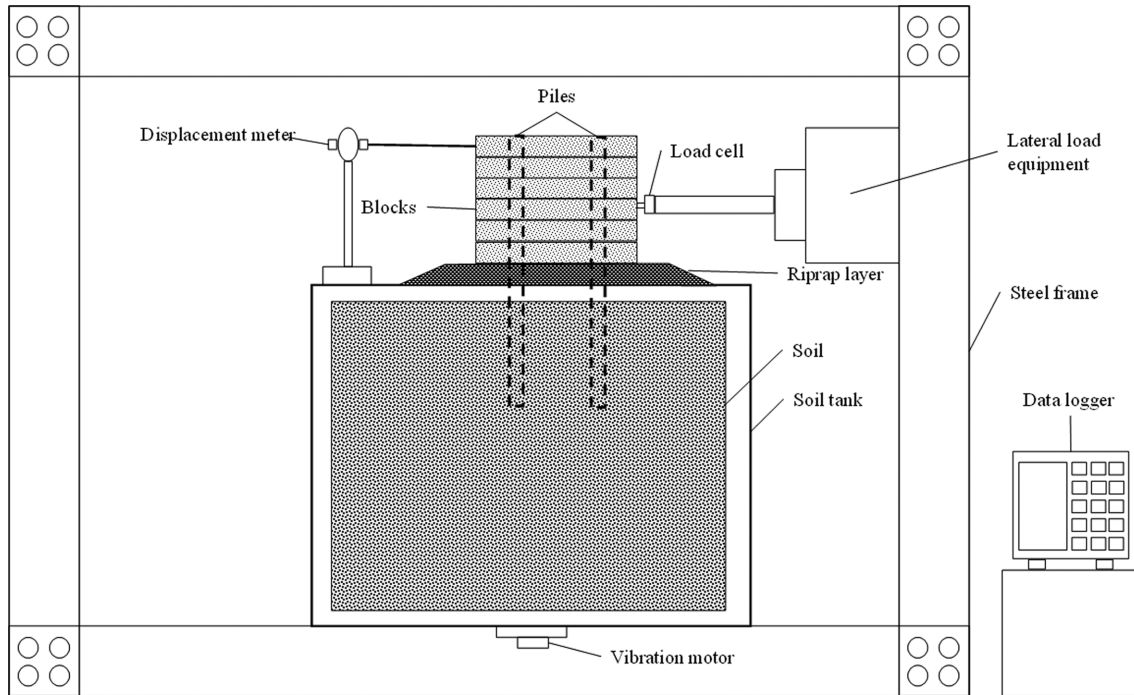


Fig. 1. Layout of model test apparatus.

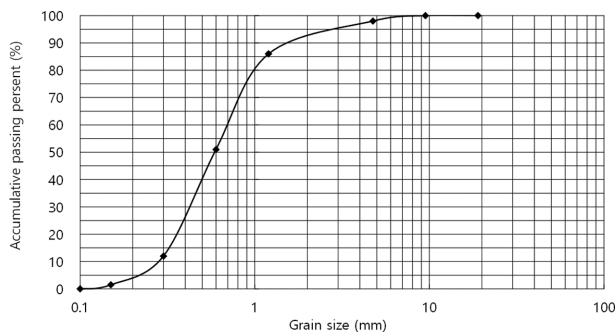


Fig. 2. Particle size distribution for experiment.

멘트를 측정하기 위해 총 7개의 스트레인 게이지를 Fig. 3과 같이 말뚝에 부착하였다.

본 연구에 사용된 말뚝의 장단을 판별하기 위해 Broms (1965)가 제안한 말뚝분류법을 이용하였다. Table 5에서 지반의 상대밀도 값을 이용하여 지반변형성능 계수(n_h) 값을 정

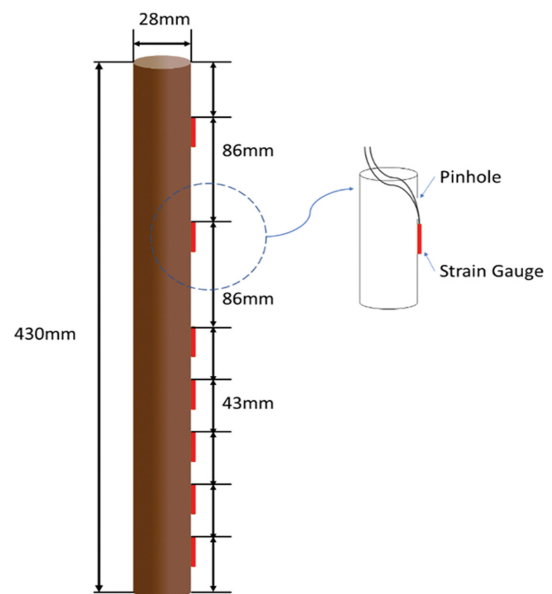


Fig. 3. Model pile with strain gauges.

Table 4. Characteristics of model pile

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. Average values of n_h by Broms (1965)

Soil type		n_t (N/cm ³)
Dry or moist sand	Loose	0.764~2.156
	Medium	5.39~6.84
	Dense	14.7~17.64

Table 6. Distinction of pile length by Broms (1965)

Description	Sand
Short pile	$\eta L < 2$
Medium pile	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$
Long pile	$\eta L > 4.0$

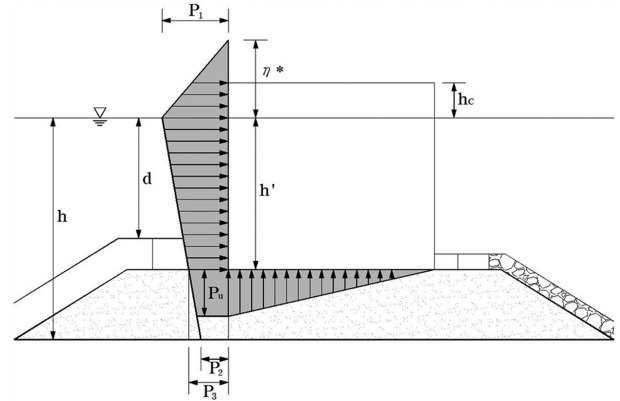
하고 그 값을 식(1)에 대입하여 특성 값(η)을 구한다. 구해진 특성 값을 말뚝의 길이(L)에 곱하여 Table 6, 7과 같이 말뚝의 장단을 판별하였다.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (1)$$

실험에 사용된 블록은 68.6 mm × 314.4 mm × 42.9 mm이며, 블록에 말뚝이 전열과 후열에 각각 한 개씩 삽입될 수 있도록 천공을 하여 Fig. 4와 같이 제작하였다. 블록 천공구의 지름은 29 mm이며, 이때 말뚝과 블록 천공구 사이 생기는 틈의 오차를 해결하기 위해 초기 하중-변위 실험에서 비정상적으로 생기는 값(변위 0.1~0.2 mm)을 제외한 이후 값을 실험에 적용 하였다.

해양구조물의 기초 시공시 원지반에 비해 마찰계수가 높고 지반의 평탄화 작업을 용이하게 하기 위해 사석층을 두고 있다. 이때 사석층의 높이는 1~2 m 높이로 시공 되는데 본 연구에서는 Table 1에서와 같이 Prototype의 사석층의 높이를 1.5 m로 두었고 이를 상사법칙에 따라 42.9 mm의 model 사이즈로 변환하여 사석층의 높이(H)를 정의하였다.

말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력 측정을 위한 실험순서는 Fig. 1과 같이 토조내 모래 포설 후 사석층을

**Fig. 5.** Goda's wave pressure distribution (Goda, 1973).

4.29 cm(H) 쌓고 말뚝 6단 설치 후 말뚝을 일정 깊이까지 근 입한다. 이후 지반의 밀도를 조밀한 상태로 만들기 위해 진동다짐을 실시한 후 수평재하 장치로 하중을 1 mm/min 속도로 가하면서 블록 상단의 변위가 1 cm 발생할 때 까지 실험을 진행한다.

이때 하중(파압)의 작용위치를 결정하기 위해 Fig. 5와 같이 Goda(1989)의 파압분포도를 적용하였다. Fig. 5에서 방파제에 작용하는 파압은 정수면의 높이에서 최대치 P1, 정수면상의 높이에서 영, 저면에서 P2가 되는 직선분포로 나타낼 수 있고, 이러한 파압의 분포도를 통해 최종적으로 파압의 작용점 위치를 결정하였으며, 본 연구에서는 전체 블록 높이의 0.48배 위치를 하중(파압)의 작용점으로 결정하였다.

또한 수평변위는 GAI Consultant Inc.(1982)에서 제안한 말뚝의 회전각이 2°가 되는 기준을 적용하였다. 그 결과 1 cm의 값을 적용하였다.

Table 7. Result of pile distribution

Pile embedment depth	Relative	Pile length (L) (cm)	η	ηL	Result
0	Dense	25.74	0.06643	1.7099	Short pile
1H		30.03		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

**Fig. 4.** Model blocks.

Table 8. Type of experiments

NO	Pile embedment depth	NO	Pile embedment depth
1	0H	4	3H
2	1H	5	4H
3	2H	H : Heigh of riprap layer	

실험 케이스는 Table 8과 같이 말뚝이 블록내에만 관입되어 있는 경우(0H), 사석층까지 관입되어 있는 경우(1H), 원지반까지 관입되어 있는 경우(2H-4H)로 총 5가지 케이스로 나누어 진행하였다.

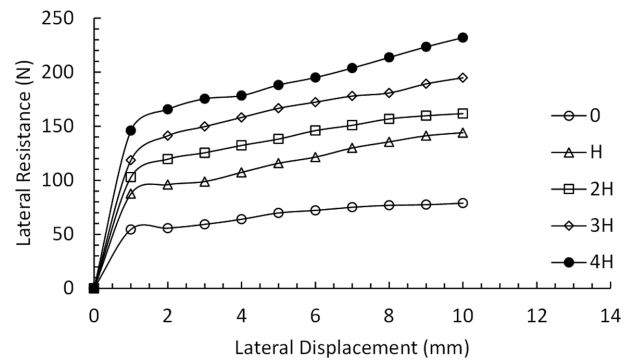
3. 실내시험 결과 및 고찰

3.1 수평저항력

말뚝의 근입 깊이에 따른 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력을 산정하기 위해 말뚝깊이는 블록에만 관입된 0H, 사석층(4.29 cm)까지 관입된 H, 사석높이 만큼 원지반속에 관입된 2H 그리고, 3H, 4H 깊이에 대해서 모형시험을 수행하였고 말뚝은 블록의 앞과 뒤에 두 개를 근입시켰다. 블록의 층수는 6층(총 중량 103.20 kN) 하중 작용점은 전체 블록높이의 0.48배 위치에 작용시켰다.

Fig. 7은 말뚝 근입 깊이에 따른 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력을 나타낸 것이다. 말뚝 근입 깊이가 깊어짐에 따라 수평저항력은 증가하는 경향이 나타났으며, 말뚝 근입깊이가 깊어질수록 증가량은 조금씩 커짐을 알 수 있다.

Table 9는 Fig. 7에서 말뚝의 변위가 10 mm 일 때 말뚝 근입깊이에 따른 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력 및 말뚝의 하중분담율을 나타낸 표이다. 말뚝이 블록내에만 관입되어 있을때의 전체 수평저항력(블록+말뚝) 78.87N 값을 기준으로 사석층(H)까지 관입 되었을 때의 하중 증가비는 1.83배, 2H까지 관입 되었을 때의 값은 2.05배, 3H까지 관입 되었을 때의 값은 2.47배, 4H까지 관입 되었을 때의 값은 2.94배로 나타났다. 또한, 말뚝 자체만의 저항력을 산정하기 위해 근입깊이가 0일 때의 저항력인 78.87N을 차감한 후 근입깊이 H 값을 기준으로 하중비를 계산해본 결과 2H, 3H, 4H의 경우 각각 1.27, 1.89, 2.35배의 값을 나타내었다. 전체 하중에서 말뚝이 분담하는 하중의 값을 구하기 위해 수평하

**Fig. 6.** The view of the experiment according to the embedment depth of the pile.**Fig. 7.** Lateral resistance of single block according to pile depth.

중분담율을 계산해본 결과 H, 2H, 3H, 4H에서 각각 45.25, 51.23, 59.53, 66.00%로 점차 증가하는 경향을 보였다.

3.2 휨모멘트

블록과 지반내에 관입된 말뚝의 거동양상을 파악하기 위해 말뚝에 부착한 변형율계 값을 통해 휨모멘트를 계산하였다. 계산식은 Rollins et al.(1998)이 제안한 식(2)를 이용하였다.

$$M = \frac{E \cdot I \cdot \varepsilon}{d} \quad (2)$$

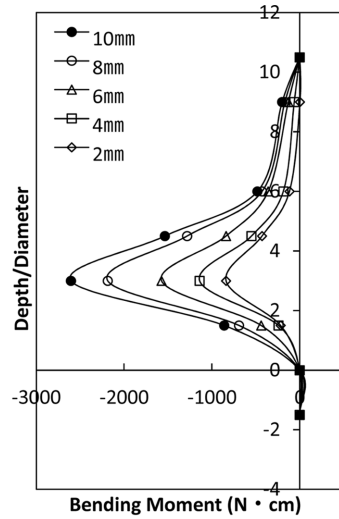
여기서, ε : 압축변형률

d : 모형말뚝의 반경

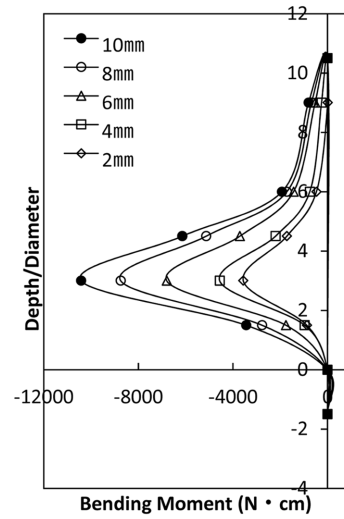
Table 9. Lateral resistance of single block and load sharing ratio of pile according to pile embedment depth

Pile embedment depth	0H	1H	2H	3H	4H
Total lateral resistance (N) (A)	78.87	144.05	161.72	194.88	231.96
Load increase rate	1	1.83	2.05	2.47	2.94
Pile's lateral resistance (N) (B)	0	65.18	82.85	116.01	153.10
Load increase rate	-	1	1.27	1.89	2.35
Pile's load sharing ratio (%) (C = B/A)	-	45.25	51.23	59.53	66.00
Sharing ratio each pile (C/Pile number)	-	22.63	25.62	29.77	33.00

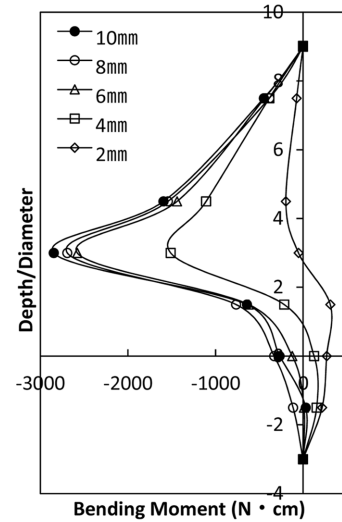
※ 말뚝 1개당 분담율은 블록에 관입된 말뚝의 총 개수에서 말뚝의 총 분담율을 균등하게 나눈 값이다.



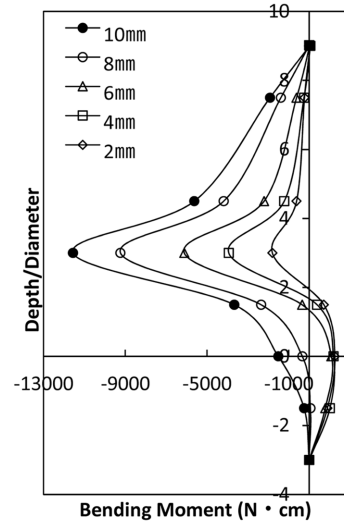
(a) Embedment depth 1H, Front



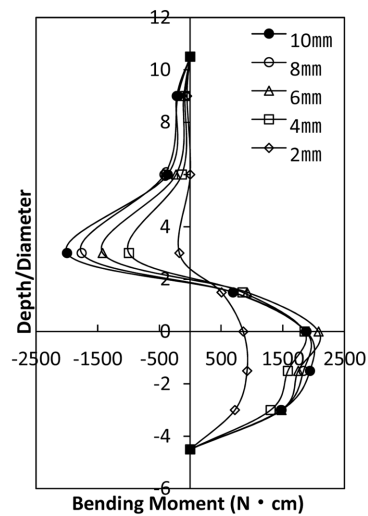
(b) Embedment depth 1H, Rear



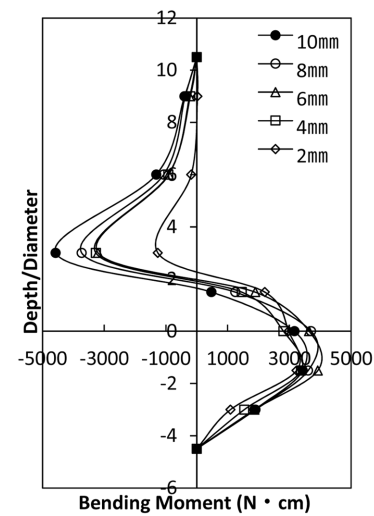
(c) Embedment depth 2H, Front



(d) Embedment depth 2H, Rear



(e) Embedment depth 3H, Front

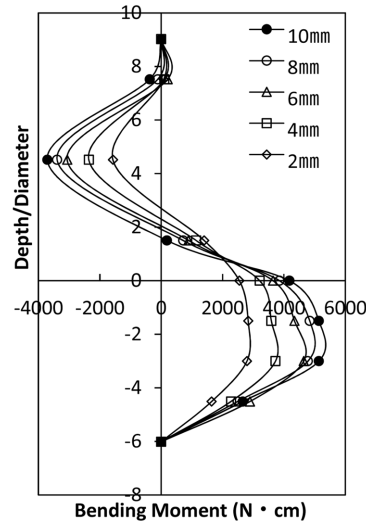


(f) Embedment depth 3H, Rear

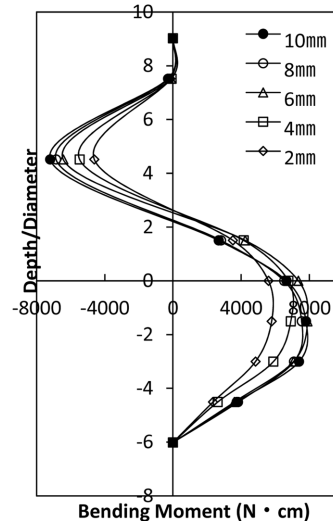
Fig. 8. Bending moment according to pile depth.

Fig. 8은 말뚝의 근입깊이에 따른 휨모멘트를 나타낸 것이다. 말뚝의 근입깊이는 무차원으로 나타내기 위해 말뚝의 근

입깊이에 말뚝의 직경 $D(2.86 \text{ cm})$ 를 나누어 나타내었다. 전열과 후열 말뚝의 휨모멘트 값을 비교하면 상대적으로 후



(g) Embedment depth 4H, Front



(h) Embedment depth 4H, Rear

Fig. 8. Continued.

열 말뚝의 휨모멘트 값이 크게 나타났다. 통상적으로 직렬배열말뚝의 경우 전열의 휨모멘트 값이 크게 나타나지만 본 실험에서와 같이 후열에서의 휨모멘트가 크게 나타난 이유는 우선 두 말뚝사이의 거리가 8.7D로 멀게 배치되어 있고 또한 블록에 수평하중이 가해지면서 활동뿐만 아니라 전도가 동시에 발생함에 따라 뒷열에 배열된 말뚝이 상대적으로 더 큰 휨모멘트가 발생된 것으로 사료된다.

일반적으로 최대휨모멘트의 발생 위치는 상부구조물, 사석층, 또는 사석층 및 지반, 블록과 블록 경계면 등 경계면 위치에서 또는 하중작용점에서 최대휨모멘트가 발생하는 경우가 많다. 본 연구의 경우, 블록내에서 최대 휨모멘트 발생 위치는 1H, 2H, 3H에서 말뚝직경의 3배 위치에서 나타났으며, 근입깊이가 가장 큰 4H에서는 말뚝직경의 4.5배 위치에서 최대 휨모멘트가 발생하였다. 3H, 4H의 경우 지반에서의 최대 휨모멘트는 말뚝직경의 1.5배 위치(사석층과 지반의 경계면)에서 나타남을 알 수 있다. 특히 4H의 경우 레르보에서의 휨모멘트도와 같이 하중작용점과, 지반내 회전절점 위치에서 휨모멘트가 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 말뚝 근입깊이에 따른 수평저항력 및 휨모멘트를 알아보기 위해 실내모형실험을 진행하였고, 그 결과는 아래와 같다.

1. 말뚝 근입깊이에 따른 수평저항력 값은 0H, 1H, 2H, 3H, 4H에서 각각 78.87, 144.05, 161.72, 194.88, 231.96N으로 나타났으며 말뚝이 블록내에만 근입(0H)되어 있을 때의 값과 비교하여 하중 증가비로 나타내면 1H, 2H, 3H, 4H에서의 하중 증가비는 각각 1.83, 2.05, 2.47, 2.94로 나타났다. 즉 말뚝이 사석층까지만 근입되어 있어도 수평저항력이 1.83

배 정도 커지는 효과가 나타났다.

2. 순수하게 말뚝이 분담하는 저항력을 구하기 위해 말뚝이 블록내에만 근입되었을 때의 수평저항력인 78.87N을 고려한 결과, 근입 깊이 H값을 기준으로 2H, 3H, 4H의 경우 수평저항력 값이 각각 1.27배, 1.89배, 2.35배의 값이 나타났다.

3. 말뚝의 근입깊이 1H, 2H, 3H, 4H에서의 말뚝의 하중분담률은 각각 45.25%, 51.23%, 59.53%, 66.00%의 값으로 나타났다.

4. 말뚝의 휨모멘트의 경우 상대적으로 후열에 배치된 말뚝의 휨모멘트 값이 크게 나타났다. 이는 블록에 수평하중이 가해지면서 활동뿐만 아니라 전도가 동시에 발생함에 따라 더 큰 휨모멘트가 발생됨을 알 수 있다.

5. 블록내에서의 최대 휨모멘트의 발생 위치는 1H, 2H, 3H에서는 말뚝직경의 3배 위치에서 나타났으며, 4H에서는 말뚝직경의 4.5배 위치에서 나타났다.

6. 또한 근입깊이가 3H, 4H인 경우 사석층과 지반경계면에서 최대 휨모멘트가 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 제주특별자치도의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bae, J.S., Kim, T.Y. and Kim, S.H. (2002). Behaviour characteristics of rafter piles under lateral loads. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 22(4-C), 393-402 (in Korean).
- Bae, J.S., Kim, S.H., Son, B.R. and Yu, E.-H. (2003). Proposal of a method for determining the allowable horizontal bearing capacity of a single pile by a horizontal load, ERI. Gyeongsang

- National University, 19, 35-41 (in Korean).
- Bae, J.S., Kwon, M.J. and Kim, S.H. (2006). The study of group piles under lateral soil movement in sand by model test. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 22(10), 165-172.
- Broms, B.B. (1964a). Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90(SM2), 27-63.
- Broms, B.B. (1964b). Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90(SM3), 123-156.
- Broms, B.B. (1965). Design of laterally loaded piles. *Proc. ASCE*, 91(SM 3), 79-99.
- Chang, Y.L. (1937). Lateral Pile-loading tests. *Trans. ASCE*, 91, 272-278.
- GAI Consultant Inc. (1982). Laterally Loaded Drilled Pier Research Vol.2, Research documentation GAI Report EL-2197, Research project 1280-1, California.
- Goda, Y. (1973). Study on design wave pressure on breakwater. *Report of Port and Harbor Res. Inst.*, 12(3), 31-69.
- Hwang, W.K., Kim, T.H., Kim, D.S., Oh, M. and Park, J.Y. (2018). Effect of wave-induced seepage on the stability of the rubble mound breakwater. *Journal of Korean Geotechnical Engineering*, 34(3), 13-27.
- Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1 g gravitational field. *Soil and Foundations*, 29(1), 105-118.
- 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*, 36(12), 87-97.
- Matlock, H. and Reese, L.C. (1960). Generalized solutions for laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 86(SM5), 63-91.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2017). Port and fishing port Korea design standard (KDS 64 00 00).
- Ooi, P.S.K. and Duncan, J.M. (1994). Lateral and analysis of group of piles and drilled shafts. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(6), 1034-1050.
- 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*, 124(6), 468-478.
- Vennalaganti, K.M. and Endley, S.N. (2001). Lateral Loads on Piles and Piers, *Computer Method and Advances in Geomechanics*, Desai et al., Balkema, Rotterdam, 1501-1505.

Received 9 March, 2021

1st Revised 29 March, 2021

2nd Revised 1 April, 2021

Accepted 2 April, 2021