

# 수치해석을 이용한 말뚝이 결합된 블록식방파제의 수평저항력에 관한 연구 A Study of Lateral Resistance of Block Breakwater Combined with Piles

이원효\* · 권순구\*\* · 김태형\*\*\*

Won-Hyo Lee\*, Soon-Goo Kwon\*\* and Tae-Hyung Kim\*\*\*

**요 지 :** 본 연구는 말뚝이 결합된 블록식방파제에 대하여 수평하중 재하에 따른 블록과 말뚝의 거동을 파악하기 위하여 FEM 3차원 수치해석을 실시하였다. 지반구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 향상시킨 Modified Mohr Coulomb 모델을 적용하였다. 말뚝이 블록에만 관입된 경우, 사석층( $H=4.29$  cm)까지 근입된 경우, 원지반속에 근입된 2H, 3H, 4H의 경우에 검토하였다. 실내모형실험 결과와 수치해석을 비교한 결과, 수평저항력·변위가 서로 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 말뚝의 근입깊이가 1H~2H까지는 말뚝이 회전거동을 보이고, 3H~4H의 경우에는 휨거동 양상을 보이는 것으로 해석되었다. 말뚝의 근입깊이가 3H 이상인 경우에는 말뚝이 휨거동을 보이므로 말뚝이 블록식방파제의 수평저항력에 크게 기여한다고 볼 수 있다. 본 연구 결과는 실제 크기 구조물 설계를 위한 다양한 수치 해석 시 자료로 활용이 있을 것이다.

**핵심용어 :** 말뚝결합 블록식방파제, 개량된 Mohr-Coulomb 모델, 수평저항력, 회전거동, 휨모멘트

**Abstract :** Three-dimensional FEM numerical analysis was performed to understand the behaviors of blocks and piles according to the horizontal load for the block breakwater combined with piles. The Modified Mohr-Coulomb model, the improved version of the Mohr-Coulomb model, was applied for the ground modeling. The cases when the pile is embedded only into the block, embedded to the riprap layer ( $H=4.29$  cm), and embedded to the ground down to 2H, 3H, and 4H were examined. The results of the laboratory model experiment and the numerical analysis showed similar horizontal resistance force-displacement behaviors. The pile showed rotational behavior up to the embedment depth of 1H~2H and bending behavior in the case of 3H~4H depth embedment. When the embedment depth of the pile is 3H or more, the pile shows a bending behavior, so it can be considered that the pile contributes significantly to the horizontal resistance of the block breakwater. The results of this study will be used for various numerical analyses for real-size structure design.

**Keywords :** block breakwater with piles, modified Mohr-Coulomb model, lateral resistance, rotational behavior, bending moment

## 1. 서 론

항만시설에는 수역시설, 외곽시설, 계류시설, 하역처리시설, 보관처리시설, 임항교통시설, 항만관리시설 등 많은 시설들이 있다. 외곽시설에는 방파제, 방사제, 파제제, 방조제, 도류제 등이 있으며 이 중에서도 방파제는 파도나 해일 따위를 막기 위하여 항만에 쌓아올린 둑으로 밖으로부터의 파를 막아 주는 역할을 하는 것으로 수심, 지반, 파랑의 특성에 따라 다양한 형상이 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2017).

방파제에 큰 파가 작용하는 경우 구조물의 활동이 쉽게 발생하는 경향이 있다. 외력에 대한 저항력을 높이기 위해서 구

조체의 크기를 증가시켜 중량을 키워 마찰력을 증가시키는 방법을 적용하고 있다. 다만 수심이 깊어지고, 외력이 증가하면 사석경사제를 적용할 경우 피복재의 중량한계, 공사비 등의 문제가 있어 직립제 및 혼성제 단면을 적용한다. 그래서 대형 케이슨공법이 현재 우리나라에서 가장 많이 적용되는 방파제 중 하나이다.

하지만 대형장비를 활용할 수 없는 경우나 소규모 방파제 구조물 공사에서는 다른 대안으로 블록식공법이 적용되고 있다. 블록식공법은 일반 대형의 케이슨공법보다 공사비가 저렴하고 소형장비로 시공이 가능한 장점이 있다. 그러나 케이슨처럼 대형화가 어려워 활동에 취약하다는 단점을 가지고 있

\*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

\*\*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(Master Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

\*\*\*한국해양대학교 물류·환경·도시인프라공학부 건설공학전공 교수(Corresponding author: Tae-Hyung Kim, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea. Tel: +82-51-410-4465, kth67399@kmou.ac.kr)

고(Ministry of Oceans and Fisheries, 2017; Hwang et al., 2018), 또한 블록상호간의 결합이 충분하지 못하므로 개별 요소의 활동 경향이 높고, 하부지반에 부등침하 발생 시 구조물 전체가 이완될 우려가 있는 약점도 가지고 있는 공법이다.

그래서 블록식공법의 단점을 보완하고 케이슨공법에 비하여 경제적인 설계가 가능한 말뚝이 결합된 블록식 공법에 대한 개발이 이루어졌다. 이 공법의 특징은 각각 분리된 블록들을 상하좌우로 수중에서 현장타설말뚝으로 결속시킴으로써 구조물을 일체화시켜 거대한 케이슨 구조물처럼 만든 것으로 안정성을 향상시킨 것이다. 또한 이 공법은 블록의 단면도 축소할 수 있어 경제적인 효과도 얻을 수 있다. 대항향에 실제 이 공법이 적용되었다(Kim et al., 2020).

최근에서 말뚝이 결합된 블록식공법의 수평저항력을 극대화시키기 위하여 말뚝을 블록내뿐만 아니라 지반내까지 관입시켜 그 효과를 검증하는 모형을 통한 실험적 연구가 진행되었다(Kang et al., 2021). 모형 실험결과 말뚝의 관입으로 인한 블록구조체의 수평저항력 증가를 명확하게 확인할 수 있었으며, 말뚝이 분담하는 수평저항력은 블록과 블록사이의 마찰력에 의해 영향을 받음을 확인하였다.

본 연구는 기존 연구의 연장으로 모형실험결과를 이용하여 말뚝이 결합된 블록식방파제에 대하여 3차원수치해석을 실시하여 블록의 거동과 말뚝의 거동을 살펴보았다. 사용된 프로그램은 FEM(Finite Element Method)에 근거한 MIDAS/GTS를 이용하였다. 지반구성모델은 실트나 모래가 기초지반인 지반의 거동을 모사하기에 적합하고 탄소성모델과 비선형

모델의 조합으로 구성되며 Mohr-Coulomb모델과 Modified Mohr-Coulomb모델을 적용하였다(Chung et al., 2020). 본 연구 결과는 실제 크기 구조물 설계를 위한 해석 시 기초 자료로 활용이 있을 것으로 보인다.

## 2. 실내모형실험 방법 및 결과

말뚝의 지반내 근입에 따른 블록의 수평저항력에 대한 연구를 위해 실내모형실험을 Iai(1989)의 상사법칙의 제2형태를 적용하여 1/35.71의 스케일로 축소하여 실험을 수행하였다(Kim et al., 2020). Fig. 1은 모형실험의 모식도를 나타내고 있으며 실내모형실험을 위한 기타 장치로는 지반재료(모래), 사석, 변위계, 로드셀, 변형율계, 모형블록, 재하장치, 그리고 Data Logger 등이 사용되었다. 모형시험에 사용된 강체토조는 말뚝에 대한 강체토조의 간섭영향을 무시할 수 있는 크기(1,000 mm × 1,000 mm × 1,000 mm)의 형태로 제작된 강체토조를 사용하였다. 이때 토조와 말뚝사이의 간격은 최소 말뚝 직경의 13배 이상으로 하여 경계면 효과를 제거하였다(Bae et al., 2006).

모래는 사질토인 낙동강 유역의 합천사로, 기건 상태에서 #4번 체를 통과한 함수비는 0.08%를 사용하였다. 토조내 지반의 상대밀도를 조절하기 토조 내부 바닥에 밀도 측정 용기를 매설하여 모래를 포설한 후 토조 외부 저면에 설치된 진동모터로 2, 15, 90초의 진동을 주어 상대밀도를 측정하였다. 그 결과 측정된 모형지반의 상대밀도는 2초에서는 30%( $\rho_{\text{rel}}$ ),

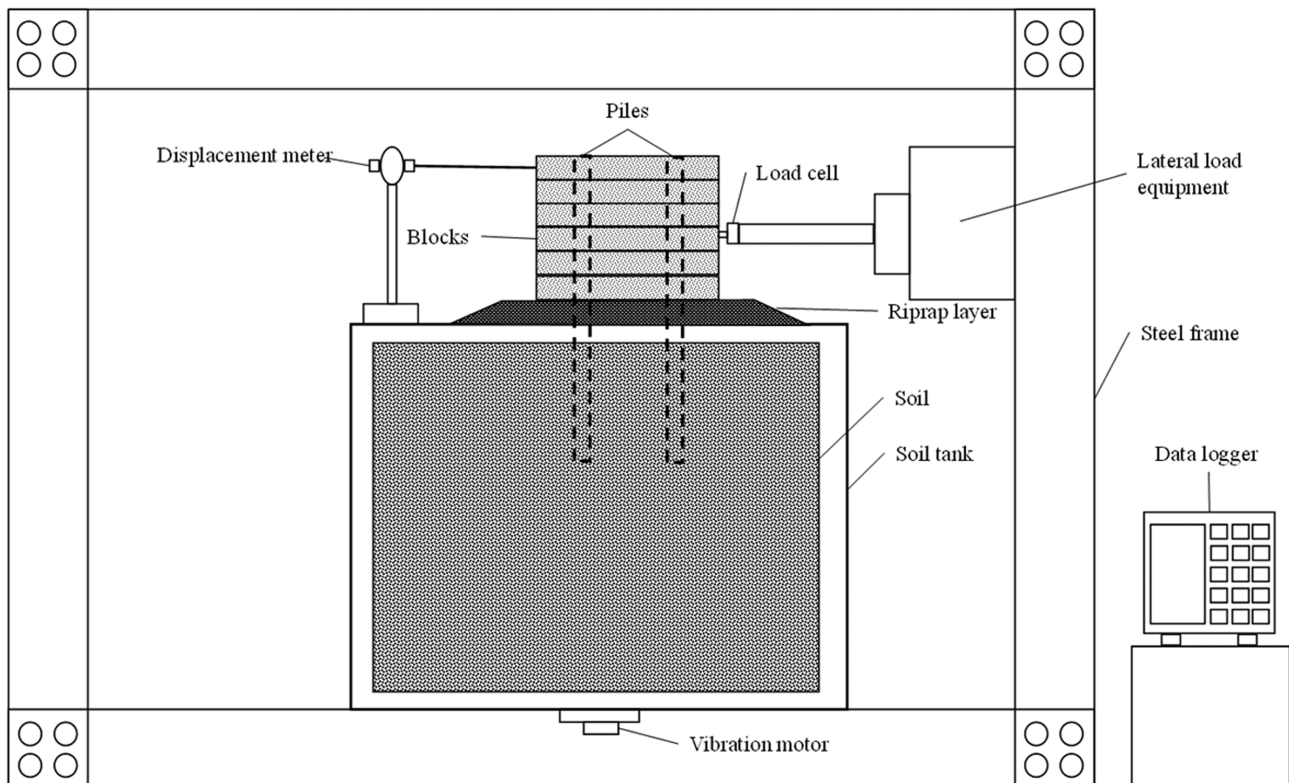


Fig. 1. Model test apparatus (Kim et al., 2020).



Fig. 2. The view of the experiment according to the embedment depth of the pile (Kim et al., 2020).

15초에서는 50%(중간), 90초에서는 70%(조밀)를 얻을 수 있었다. 실험에서는 말뚝이 근입되는 지반이 해저면인 것을 감안하여 지반을 조밀한 상태에 맞춰 진행하였다(Kang et al., 2021).

실험케이스는 말뚝이 블록내에만 관입되어 있는 경우(0H), 사석층까지 관입되어 있는 경우(1H), 원지반까지 관입되어 있는 경우(2H~4H)로 총 5가지 케이스로 나누어 진행하였다. 여기서 H는 모형실험에 적용한 사석층 두께를 의미한다. Fig. 2는 실험 전경으로 말뚝은 블록의 앞과 뒤에 두 개를 근입시켰으며 수평하중 재하에 따른 변형을 측정하고 있는 모습이다. 블록의 층수는 6층(총 중량 103.20 kN)으로 하중 작용점은 Goda 과압(Goda, 1973)에 근거하여 산정된 합력점으로 본 연구에서는 전체 블록높이의 0.48배 위치에 작용시켰다. 단, 이 위치는 수심 및 구조물 높이에 따라 약간의 변동이 있을 수 있다.

Fig. 3은 말뚝 근입깊이에 따른 말뚝으로 보강된 블록의 수평저항력을 나타낸 것이다. 초기수평변위 1.0 mm에서는 탄성 거동을 보이고, 이후 비선형거동을 보인다. 말뚝 근입깊이가 깊어 짐에 따라 수평저항력은 증가하는 경향이 나타났으며, 말뚝 근입깊이가 깊어질수록 수평저항력 증가량은 조금씩 더 커짐을 알 수 있다. Fig. 3에서 말뚝의 변위가 10 mm일 때 말뚝 근입깊이에 따른 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력 및 말뚝의 하중분담율을 보면, 말뚝이 블록내에만 관입되어 있을때의 전체 수평저항력(블록 + 말뚝) 78.87 N 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

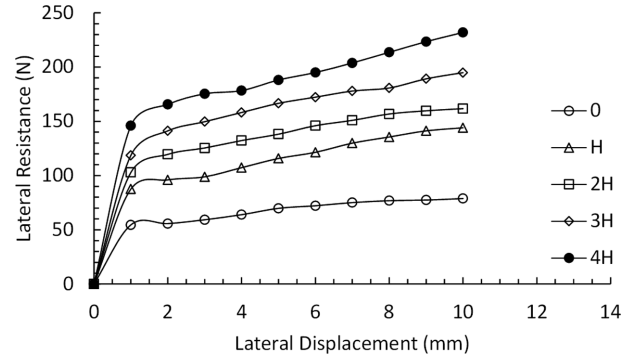


Fig. 3. Lateral resistance of single block according to pile depth (Kim et al., 2020).

위해 근입깊이가 0일 때의 저항력인 78.87 N을 차감한 후 근입깊이 H 값을 기준으로 하중비를 계산해본 결과 2H, 3H, 4H의 경우 각각 1.27, 1.89, 2.35배의 값을 나타냈다. 전체 하중에서 말뚝이 분담하는 하중의 값을 구하기 위해 수평하중분담율을 계산해본 결과 H, 2H, 3H, 4H에서 각각 45.25, 51.23, 59.53, 66.00%로 점차 증가하는 경향을 보였다(Kim et al., 2020).

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치해석에 사용된 프로그램

본 연구의 수치해석을 위하여 FEM(Finite Element Method)에 근거한 MIDAS/GTS를 이용하였다. 이 프로그램의 재료 모델 및 지반구성모델은 단계해석을 적용하는데 적합하며, 해석에 필요한 다양한 해석법을 제공한다.

#### 3.2 수치해석에 사용된 지반 물성치

수치해석에서 사용한 사석, 모래, 블록, 동관의 물성치는 각종 문헌자료와 실내실험결과를 이용하여 Table 1과 같이 적용하였다. 콘크리트블록과 말뚝은 문헌에 나와있는 콘크리트와 Copper의 일반적인 단위중량 및 탄성계수를 적용하였다. 사석층과 모래의 강도정수 중 내부마찰각은 Dunham식을 이용하여 모래의 경우,  $N = 30$ , 사석층의 경우,  $N = 50$ 으로 가정하여 계산하고, 문헌값과 비교하여  $\Phi = 30^\circ, 35^\circ$  적용하였다. 점착력의 경우 해석의 오류발생을 방지하기 위해 최소값인  $1.0 \text{ kN/m}^2$ 을 적용하였으며, 탄성계수는 실험결과와 비교하면서 값을 감소시켜 적용하였다. 지반구성모델은 실트나 모래가 기초지반인 지반의 거동을 모사하기에 적합하고 탄소성모

Table 1. Element properties applied to numerical analysis

Element	Unit weight ( $\text{kN/m}^3$ )	Cohesion ( $\text{kN/m}^2$ )	Friction angle ( $^\circ$ )	Elastic modulus ( $\text{kN/m}^2$ )	Poisson's ratio	Model
Rubble mound	20.0	1.0	35.0	1,400	0.30	Modified Mohr-Coulomb
Sand	18.0	1.0	30.0	4,000	0.30	Modified Mohr-Coulomb
Block	25.0	-	-	23,200,000	0.167	Elastic Model
Copper pipe (pile)	89.0	-	-	122,500,000	0.30	Elastic Model

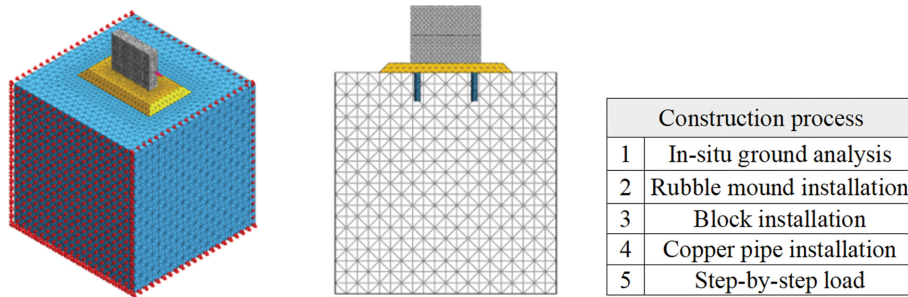


Fig. 4. Modeling used to numerical analysis.

텔과 비선형모델의 조합으로 구성되며 Mohr-Coulomb 모델과 이를 향상시킨 Modified Mohr-Coulomb 모델을 비교 검토 후 안전측으로 생각해서 Modified Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

Modified Mohr Coulomb 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용함에 따라 실제보다 큰 변위가 발생하는 것을 해결하기 위하여 지반굴착 해석에 사용하고 있다(Chung et al., 2020). Modified Mohr-Coulomb 모델은 탄성-완전소성 거동을 보이는 Mohr-Coulomb 해석모델을 개선한 것으로 비선형 탄성 모델과 탄소성 모델을 조합하여 실토나 모래질 지반의 거동특성에 적합하도록 개발된 모델이다. 전단항복과 압축항복이 서로 영향을 미치지 않는 이중 경화(decoupled double hardening) 모델이다. 초기 편차응력에 의해 재료의 강성이 감소하고 축방향 변형이 발생하는 거동은 Hyperbolic (비선형탄성) 모델과 유사하나, 탄성이론보다는 소성이론에 가깝고 지반의 팽창각을 고려하며, 항복캡(yield cap)을 적용하는 부분에서 차이를 보인다(Abdel-Fattah et al., 2005; Chung et al., 2020).

### 3.3 지반 모델링

실내모형실험을 바탕으로 지반을 모델링하였으며, 3차원 해석은 Solid 성분을 이용하여 Geometry를 생성한 다음 Mesh를 생성하여 해석을 수행하였다. 강체토조부분은 구속조건을 Fix로 적용하여 실내모형실험과 동일한 조건을 모사하였다. 실험블럭저면과 사석층의 인터페이스 감소계수는 일반적인 문헌값인 0.5를 적용하였다. 수치해석모델링은 Fig. 4와 같이 실내모형실험과 동일한 시공 과정순으로 해석을 수행하였다; ① 원지반해석, ②사석층 설치, ③실험블럭설치, ④동관설치, ⑤ 단계별하중재하

### 3.4 수치해석결과

#### 3.4.1 말뚝근입깊이에 따른 수평저항력

말뚝의 근입깊이에 따른 말뚝으로 보강된 실내모형실험에 대하여 수치해석모델의 해석결과와 비교검토하였다. 실내모형실험의 경우에는 수평변위 1.0 mm를 기준으로 좌측은 탄성거동을 보이고, 우측부는 소성경화거동을 보이고 있다. Fig.

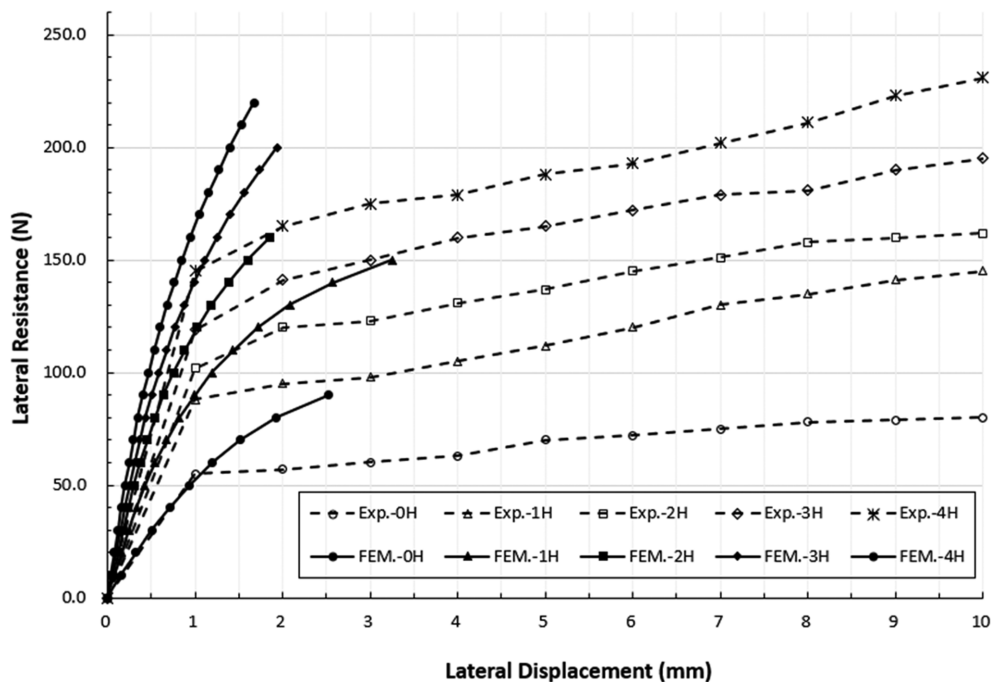


Fig. 5. Lateral resistance of single block according to pile depth (used Mohr-Coulomb model).

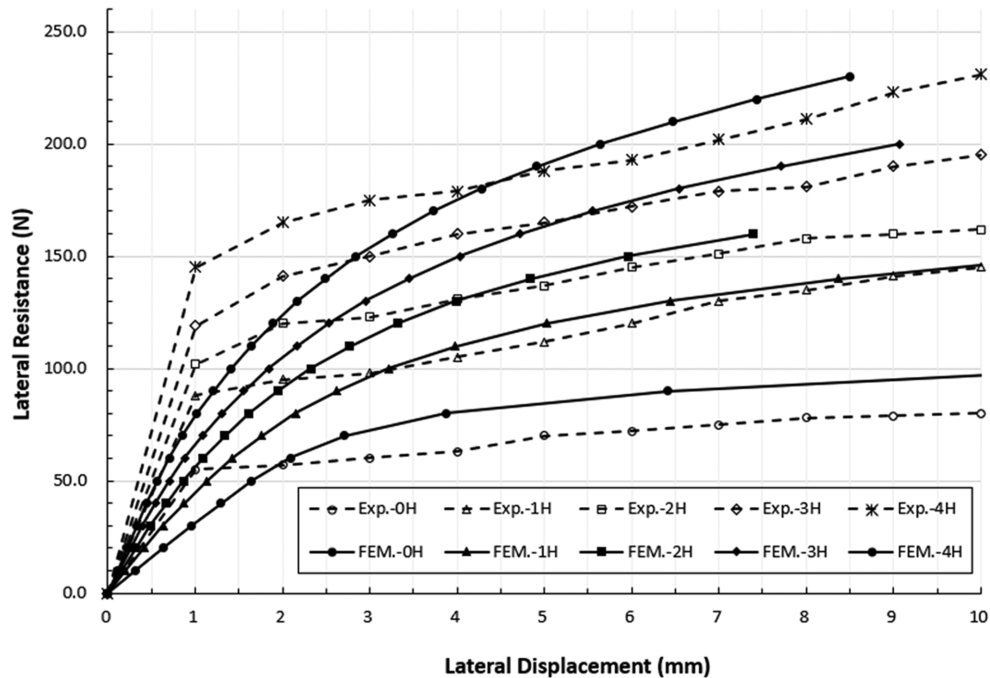


Fig. 6. Lateral resistance of single block according to pile depth (used Modified Mohr-Coulomb model).

5에서 보는 바와 같이, 지반구성모델을 Mohr-Coulomb 모델을 적용한 경우에는 수평변위 1.0 mm의 탄성영역에서는 실험 내모형시험과 유사하나, 이후 소성경화구간의 거동은 거의 나타나지 않아, 실험 내모형시험을 모사하는데 한계가 있었다. 따라서, Fig. 6에서 보는 바와 같이, 탄성-소성경화거동을 모사하기 위해 지반구성모델을 Mohr-Coulomb 모델을 적용하지 않고 비선형거동이 가능한 Modified Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 그 결과 블록에만 관입된 0H, 사석층(4.29 cm)까지 관입된 1H, 사석높이만큼 원지반속에 관입된 2H 그리고, 3H, 4H 깊이에 대하여 소성경화구간에서도 수평저항력-변위 그래프가 실험 내모형시험결과와 유사한 거동을 보이는 것으로 해석되었다. 본 결과를 바탕으로 사석과 모래층에 대하여 Modified Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 해석을 실시하

였다.

Table 2은 Fig. 7에서 실험 내모형시험 및 수치해석결과 실험 블록의 변위가 10 mm일 때 말뚝 근입깊이에 따른 말뚝으로 보강된 블록식 방파제의 수평저항력을 나타낸 것으로 수평저항력 하중비(실험 내모형시험기준)는 0.99~1.27배로 수치해석결과와 신뢰성이 높은 것으로 판단되었다.

### 3.4.2 말뚝근입깊이에 따른 휨모멘트

블록과 지반내에 관입된 말뚝의 거동양상을 파악하기 위해 실험 내모형시험과 동일하게 말뚝(동관 : copper pipe element)의 변형율값을 통해 휨모멘트를 계산하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이(좌측 : 휨모멘트도, 우측 : 변형율 contour와 deformed shape), 지반내 말뚝부의 최대휨모멘트는 사석층과 강체토조

Table 2. Lateral resistance at 10mm displacement of single block with pile according to pile embedment depth

Embedment depth of pile		0H	1H (1.5D)	2H (3.0D)	3H (4.5D)	4H (6.0D)
Lateral Resistance (N)	Experiment	78.87	144.05	161.72	194.88	231.96
	FEM	100.0	150.0	160.0	200.0	230.0
Lateral Resistance Ratio (Ref. Experiment)		1.27	1.04	0.99	1.03	0.99

Table 3. Bending moment according to pile embedment depth

Embedment depth		1H (1.5D)	2H (3.0D)	3H (4.5D)	4H (6.0D)
Bending Moment (N.cm)	Front Pile	8.827	36.569	72.562	78.852
	Rear Pile	35.668	106.375	160.577	205.476
Bending Moment Ratio* (Ref. 1H)	Front Pile	1.00	4.14	8.22	8.93
	Rear Pile	1.00	2.98	4.50	5.76

\* Expressed as a bending moment ratio based on 1H and the actual bending moment is greater for the rear pile than for the front one.

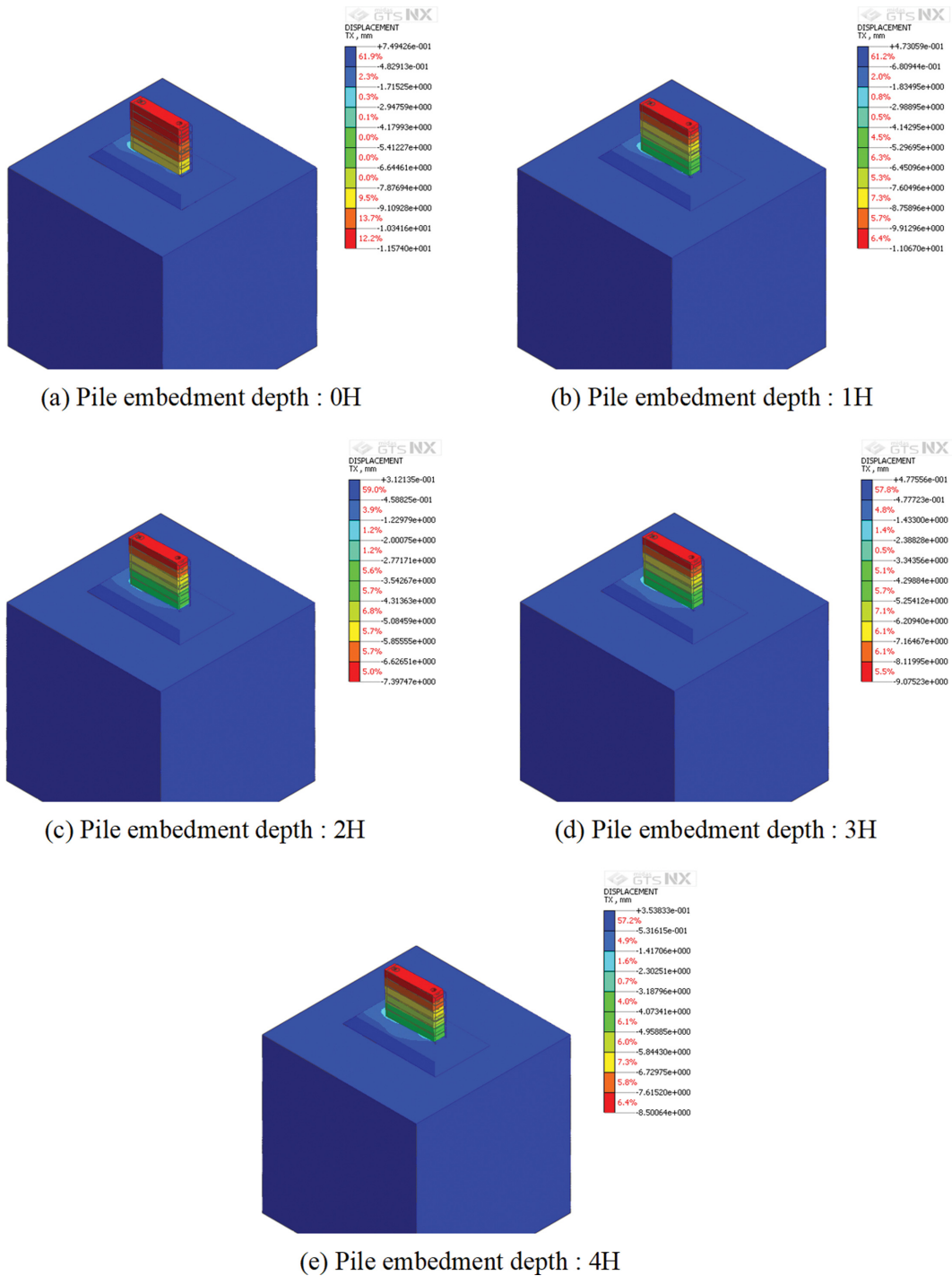


Fig. 7. Results of lateral displacement shown by numerical analysis.

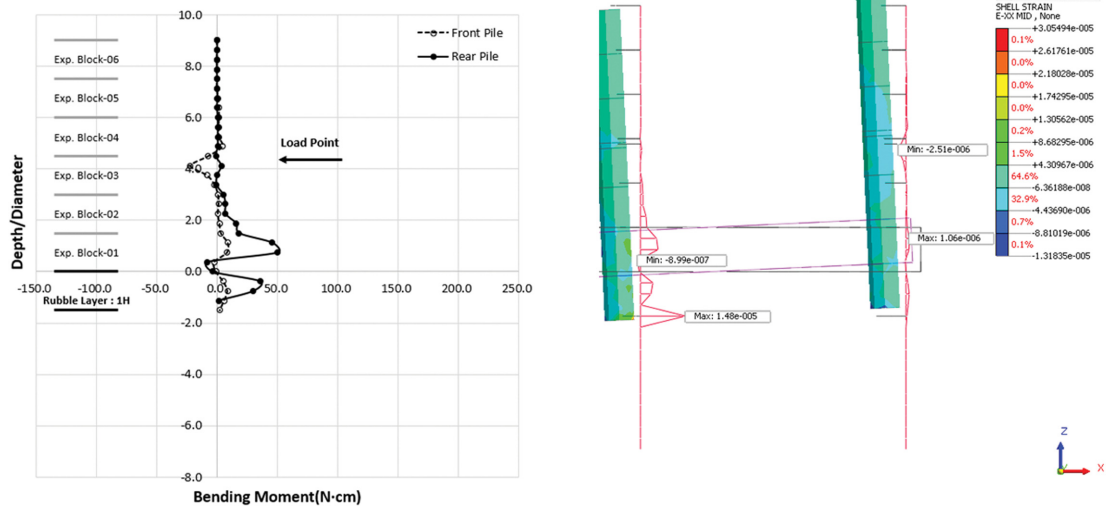
내 모래층의 경계면에서 가장 크게 발생하였다. 말뚝의 근입 깊이가 1H~2H까지는 휨모멘트에서도 짧은 말뚝인 회전거동을 보이며, 변형율 contour 상에서도 변형율이 크게 나타나지 않고 있다. 3H~4H의 경우에는 휨모멘트가 일반 중간말뚝의 거동과 같은 휨거동 양상을 보이고 있으며, 변형율 Contour에서도 확연하게 나타나고 있다. 특히, 말뚝의 근입 깊이가 4H인 경우에는 중간말뚝의 휨거동 형상을 보이고 있다.

Table 3은 전열 및 후열말뚝의 휨모멘트에 대하여 1H를 기준으로 휨모멘트비를 표현한 것으로 전열말뚝보다 후열말뚝

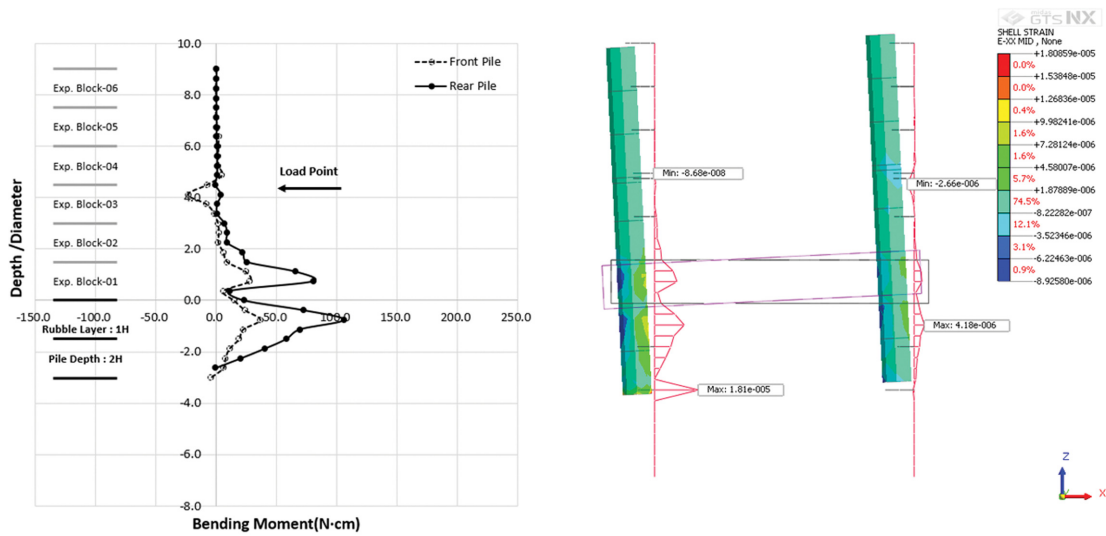
에서 휨모멘트가 크게 발생하였다. 전열말뚝의 경우 1H를 기준으로 2H는 4.14배, 3H는 8.22배, 4H는 8.93배 휨모멘트가 발생하였으며, 후열말뚝의 경우 1H를 기준으로 2H는 2.98배, 3H는 4.50배, 4H는 5.76배 휨모멘트가 발생하였다.

Fig. 9은 전열말뚝과 후열말뚝의 휨모멘트를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 전열말뚝보다 후열말뚝에서 휨모멘트가 크게 발생하고 수평저항력도 큰 것으로 나타났다. 전열말뚝의 경우는 3H 이후 수렴되는 양상을 보이고, 후열말뚝의 경우에는 2H를 기준으로 휨모멘트가 Bilinear 형상을

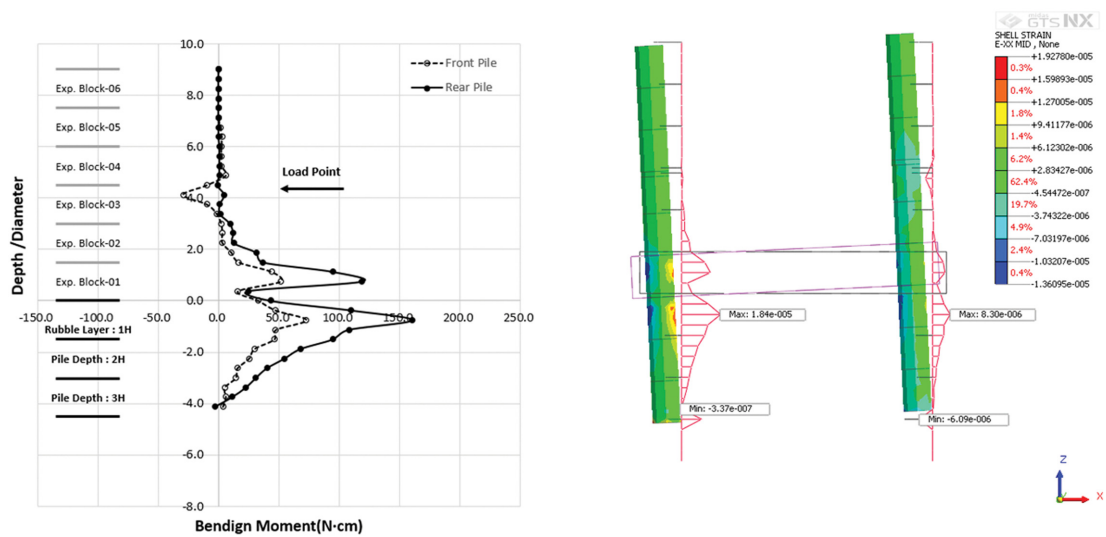




(a) Pile embedment depth : 1H



(b) Pile embedment depth : 2H



(c) Pile embedment depth : 3H

Fig. 8. Bending moment and strain according to pile embedment depths used to numerical analysis (Left: Bending moment diagram, Right: Strain contour + deformed shape).

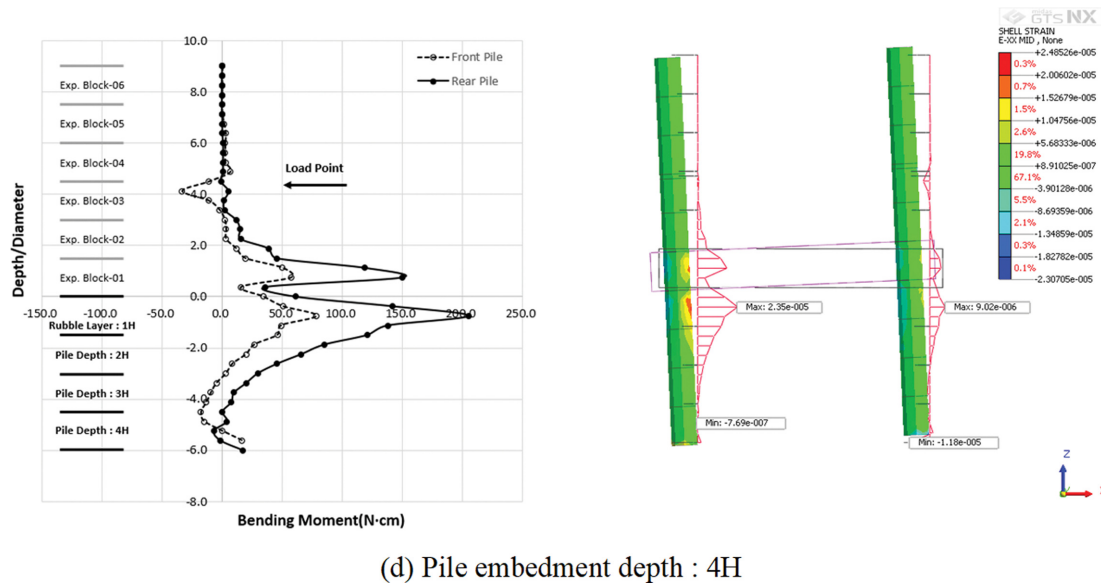


Fig. 8. Continued.

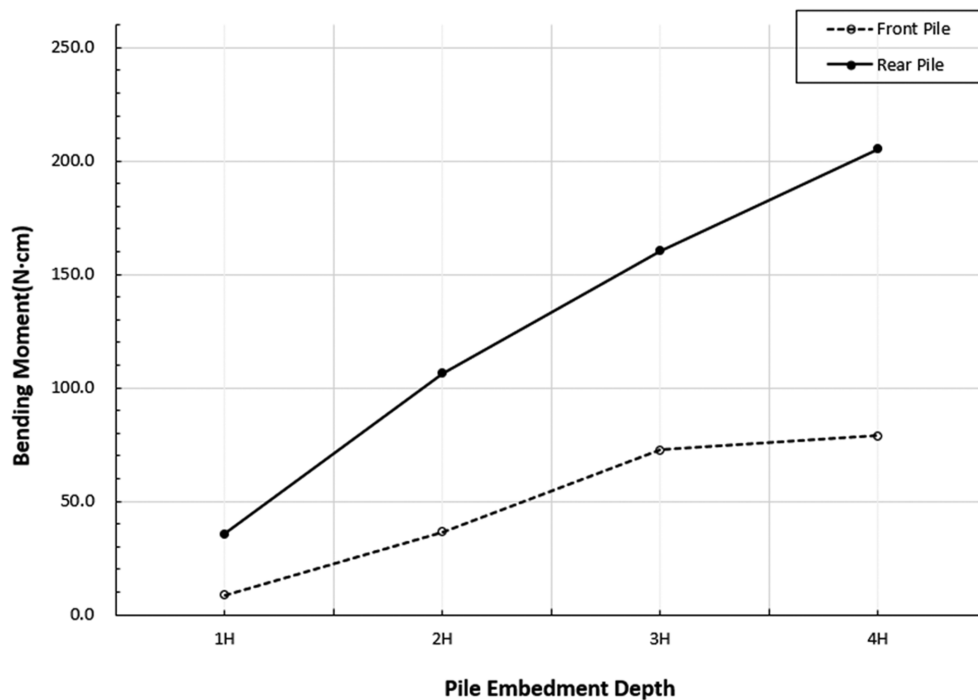


Fig. 9. Comparison of bending moment according to pile embedment depth (Front and rear piles).

나타내고 있다. 따라서 말뚝의 근입깊이가 3H 이상인 경우에는 말뚝이 휨거동양상을 보이므로 말뚝이 블록식방파제의 수평저항력에 크게 기여하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 기존 연구의 연장으로 모형실험결과를 이용하여 말뚝이 결합된 블록식방파제에 대하여 3차원수치해석을 실시하여 블록의 거동과 말뚝의 거동을 살펴보았다. 본 연구 결과는 실제 크기 구조물 설계를 위한 다양한 수치해석 시 자

료로 활용이 있을 것이다.

수치해석 결과 말뚝이 블록에만 관입된 0H, 사석층(4.29 cm)까지 근입된 1H, 사석높이만큼 원지반속에 근입된 2H 그리고, 3H, 4H 깊이에 대하여 소성경화구간에서도 수평저항력-변위 그래프가 실내모형실험결과와 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

말뚝의 근입깊이가 1H(1.5D)~2H(3.0D)까지는 말뚝이 짧은 말뚝에서 보이는 회전거동을 보이고, 3H(4.5D)~4H(6.0D)의 경우에는 일반 중간말뚝의 거동과 같은 휨거동 양상을 보이는 것으로 해석되었다. 말뚝의 근입깊이가 3H 이상인 경우



에는 말뚝이 휨거동양상이 뚜렷하므로 말뚝이 블록식방파제의 수평저항력에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

## References

- Abdel-Fattah, T.T., Abdel-Rahman, A.M. and Hodhod, H.A. (2005). Applicability of elastoplastic modelling for simulating tunnel excavation in lightly overconsolidated clay. *Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, B.H.V.Topping (Editor), Scotland, 657-658.
- 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 (in Korean).
- Chung, J.S., Shin, Y.W., Kim, M.H., Kook, Y.M., Jeong, K.Y., Kim, P.S. and Lee, S.H. (2020). A study on the displacement behavior according to the analysis model of ground excavation, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 19(4), 27-32 (in Korean).
- 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 Society*, 34(4), 13-27 (in Korean).
- Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soil and Foundations*, 29(1), 105-118.
- Kang, G., Kim, J., Kim, T.H., Lee, S. and Kim, J. (2021). Lateral resistance of block type breakwater with piles to depth of embedment. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33(2), 65-72 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries. (2017). Port and fishing port Korea design standard (KDS 64 00 00).

---

Received 14 July, 2022

1<sup>st</sup> Revised 5 August, 2022

2<sup>nd</sup> Revised 19 August, 2022

Accepted 19 August, 2022