

# 동적원심모형 시험을 이용한 지진 시 방파제의 내진안정성 검토

## Seismic Stability Evaluation of the Breakwater Using Dynamic Centrifugal Model Test

김 영 준<sup>1</sup>      Kim, Young-Jun      장 동 인<sup>2</sup>      Jang, Dong-In  
곽 창 원<sup>3</sup>      Kawk, Chang-Won      박 인 준<sup>4</sup>      Park, Inn-Joon

### Abstract

Recently, as the occurrence of earthquakes with a magnitude of 5.0 or higher in Korea increases, many studies and interests in seismic design are increasing. A lot of damage was caused by the Pohang earthquake in 2017, and port facilities such as a breakwater were also damaged. This study analyzed the dynamic behavior of the upright breakwater, an external facility, based on a centrifugal model experiment. A series of centrifugal model test was conducted by three different seismic waves such as Pohang Earthquake Wave, Artificial Wave I, and II. As a result, the dynamic behavior of upright breakwater was analyzed. The review showed that acceleration amplification tends to be suppressed as breakwater foundation ground increases support and stiffness through DCM reinforcement and riprap replacement.

### 요 지

최근 국내에 리히터 규모 5.0 이상의 지진의 빈도수가 늘어남에 따라 지진피해가 늘어나면서 내진설계에 대한 많은 연구와 관심이 높아져 가고 있는 실정이다. 최근 발생한 포항지진에 의해 많은 피해가 발생하였고, 항만시설물 또한 피해가 발생하였다. 본 연구에서는 항만구조물 중 외곽시설인 직립식 방파제의 지진 시 발생하는 동적 거동을 원심모형실험을 통해 분석하였다. 이를 위하여 상사법칙을 적용한 직립식 방파제 모형에 포항지진파, 인공지진파 I, II의 총 세 가지 지진파를 적용하고, 지반에 대하여 DCM보강, 사석치환의 두 가지 방식의 보강을 한 경우를 고려하여 원심모형실험을 수행하였다. 그 결과 획득한 지진 시 직립식 방파제의 동적 거동에 대하여 가속도, 수평·수직 변위를 분석하여 내진안정성을 검토하였다. 검토 결과 방파제 기초지반이 DCM보강 및 사석치환을 통해 지지력 및 강성이 높아짐에 따라 가속도 증폭이 억제되는 경향을 나타내었다.

**Keywords :** Breakwater, Centrifuge test, Performance based design, Seismic coefficient

1 정회원, 한서대학교 건설공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Construction Engr., Hanseo Univ.)

2 정회원, 한서대학교 건설공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Dept. of Construction Engr., Hanseo Univ.)

3 정회원, 인하공업전문대학 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Construction and Environmental Engr., Inha Technical College)

4 정회원, 한서대학교 인프라시스템학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Infra System, Hanseo Univ., Tel: +82-41-660-1054, geotech@hanseo.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지진안전국가로 생각했던 우리나라에 최근 리히터 규모 5.0 이상의 지진발생 빈도수가 늘어남에 따라 지진으로 인한 피해가 발생이 증가하여 내진 안정성에 대한 연구와 관심이 높아져 가고 있다. 지진에 의한 구조물 피해는 단순히 시설물의 피해뿐만 아니라 주변 지역에 위치한 산업 시설물 등의 피해를 유발하여 사회 인프라적인 피해를 발생시킨다. 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 대한 기준의 강화 및 적용은 바람직한 현상이다. 따라서 구조물에 대하여 국내 내진설계기준에 입각한 내진설계 기법을 적용하여 안정성을 확보하여야 한다.

2017년 11월에 발생한 포항 지진은 리히터 규모 5.4로 우리나라에서 계측된 두 번째로 규모가 큰 지진으로 가장 많은 피해가 발생한 지진으로 기록되었다. 많은 피해 중 영일만항 내 항만구조물에도 피해를 입혀 금전적인 피해와 인프라적인 문제를 일으켰다(Lee, 2020).

본 연구에서는 원심모형실험 이용하여 직립식 방파제의 지진으로 인한 동적 거동을 분석하고자 한다. 원심모형실험은 상사비(scaling factor)를 적용하여 제작한 직립식 방파제 모형에 세 가지 지진파와 두 가지 보강된 연약지반에서의 지진 시 동적 거동을 분석하였다. 해당 실험에서 사용한 지진파는 실 지진파인 포항지진파와 붕괴방지 1등급 수준(0.154g)의 국내 표준스펙트럼매칭을 적용한 2종의 인공지진파를 사용하였고, 지반 조건은 DCM공법과 사석치환공법을 적용한 두가지 조건에서 진행하였다. 직립식 방파제 모형에 가진 시 가속도, 수평·수직 변위 계측을 통하여 지진 시 동적 거동을 분석하였다.

## 2. 원심모형시험(Centrifuge test)

### 2.1 원심모형시험기

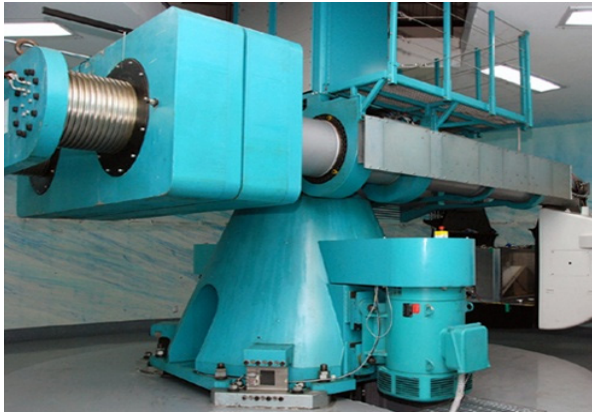
원심모형시험은 실제 구조물의 축소모형을 고속으로 회전시켜 인위적으로 원심력을 작용시킴으로써 실제 구조물에 상사비를 적용하여 축소된 모형구조물을 통해 실제 구조물의 거동을 분석하는 실험이다. 따라서 원심모형시험은 매우 현실적이고 신뢰성 높은 구조물 모델링이 가능한 실내시험이다. 특히 지반공학 문제에 있어서 모형실험에 작용되는 원심력으로 실제 현장의 지반 응력 상태를 구현할 수 있으며, 실험 중 계측된 결과는 신뢰성이 높으므로 많은 분야에서 널리 적용되고 있는 실험기법이다. 원심모형시험에서는 실제 구조물을 상사비를 이용하여 축소하므로 반드시 상사비에 대한 적절한 고려가 이루어져야 하며 상사비는 원심모형시험기의 성능, 동적거동, 경계조건 등과 밀접한 영향이 있다(Kim et al., 2012, 2013; Lee et al., 2013).

본 연구에서는 직립식 케이슨 방파제를 대상으로 축소모형을 제작하여 원심모형실험을 수행하였다. 실험은 원심가속도 40g에서 시행되었으며, 직립식 케이슨 방파제 모형을 포함하는 항만의 모형은 길이, 폭, 높이 490mm × 490mm × 600mm의 강체박스 내에 조성하였다. 해당 실험은 한국과학기술원의 Geo-Centrifuge 실험센터에서 진행하였고, 본 실험에 사용된 원심모형장치와 지진 발생 장치 제원은 Table 1과 같다(Nam, 2020).

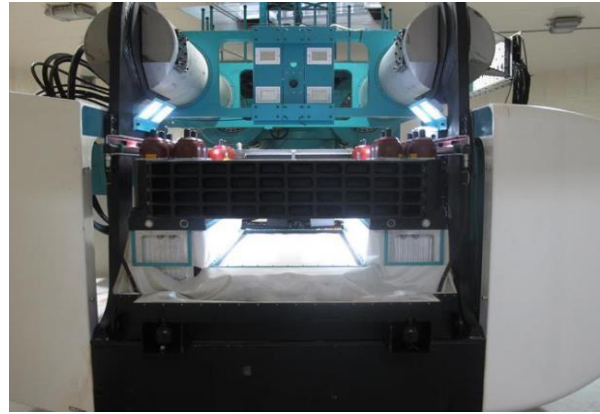
시험에 사용하는 모형 토조의 경계조건을 실제 지반 구조물의 경계조건과 최대한 부합시키기 위하여 실제 구조물의 형태와 거동 특성에 맞는 경계조건을 선택하여야 한다. 본 연구에서는 실제 2차원적인 평면변형률

Table 1. Specification for Centrifuge tester

Items	Actidyn system Q72-2 earthquake simulator
Vibration type	Electric control hydraulic system
Payload capacity	0.67 m (L) × 0.67 m (W) × 0.65 m (H)
Max. model weight	700 kg
Available centrifugal acceleration range	10 - 100 g
Max. seismic acceleration (w/o model)	40g
Max. seismic acceleration (with model)	20g
Max. displacement	6.5 mm
Max. velocity	1.0 m/s
Available load frequency range	40 - 300 Hz
Seismic duration time (Max. model weight and seismic acceleration)	Max. 1 sec



(a) Centrifuge tester



(b) Model assembly mounted on shaking table

Fig. 1. Overview of centrifugal model tester

조건에 가까운 방파제의 특성을 고려하여 3차원적 강체 거동의 영향이 적고 경계면에서의 마찰 및 간섭이 적은 연성토조인 ESB 벽체를 경계조건으로 설정하여 시험을 수행하였다.

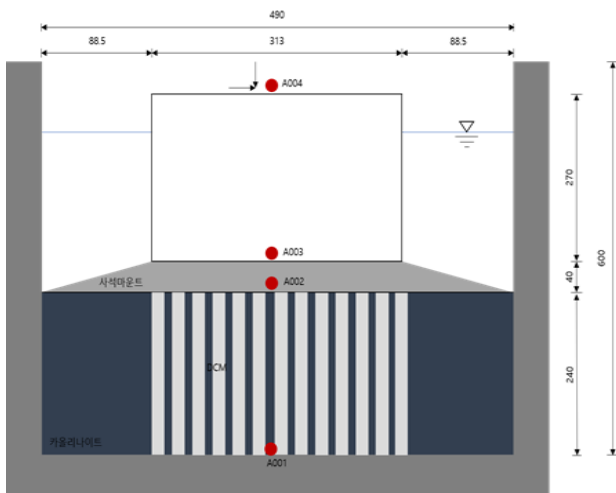
## 2.2 원심모형시험 모델링

카올리나이트를 이용하여 해상준설(연약지반)을 모사하였고 이 때 사용한 카올리 나이트의 물성치는 Tabel 2와 같다. 해수를 모사하기 위해 해수의 평균적인 염도 3.5%(100ml 기준)로 하였다. DCM보강과 사석 치환 두

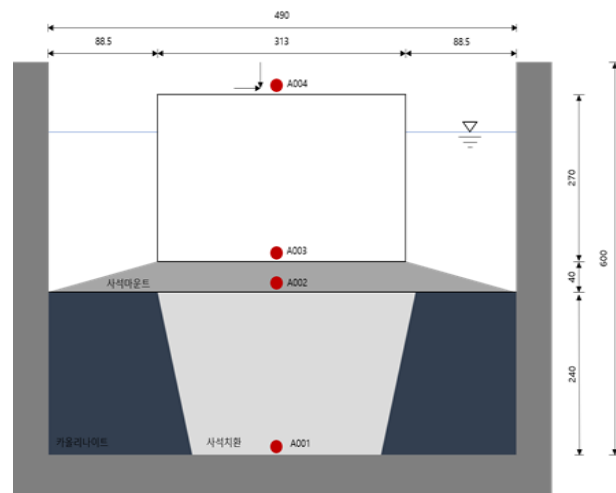
가지 경우로 모델링 하였다. 이때, 구조물 모형의 최상단부(A004), 최하단부(A003)와 보강지반과 기초사석층 사이(A002) 그리고 보강지반 하단부(A001)에 가속도계와 LDVT를 설치하여 계측하였다(Fig. 2).

## 2.3 입력지진파

본 실험에서 사용한 입력지진파는 국내 표준응답스펙트럼에 부합하는 붕괴방지 1등급 수준의 0.154g 인공지진파 2개와 2017년 11월 15일에 국내에 발생했던 포항지진파를 사용하였다.



(a) DCM improvement model



(b) Riprap replacement model

Fig. 2. Centrifugal models

Table 2. Kaolinite basic properties

Material name	Specific gravity	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index (%)	Pass through No. 200 (%)	Unified soil classification
Kaolinite	2.54	65.62	34.71	30.91	95.39	CH

포항지진파는 포항 지진 시 관측된 실지진파를 사용하였는데(Fig. 3의 (c) 참조), 해당 지진파는 M 5.4 포항 지진 시 진앙으로부터 9km 떨어진 위도 36.1929 °N, 경도 129.3708 °E에 위치한 PHA2(포항) 지진관측소에 기록된 N-S방향 지진파로서, 지진파를 계측한 지진계는 신선한 기반암층에 설치되어 있다(Han et al., 2014; Heo et al., 2018).

포항지진파는 역단층과 주향이동단층이 혼재한 단층 운동 양상을 보였으며, 최대지반가속도는 0.3739g로 관측되었다. 포항지진파의 주파수 대역은 저주파 에너지(0.1~5HZ)가 고주파 에너지(5~10HZ)보다 상대적으로

우세하여 학교, 아파트 등 고층건물에 피해 두드러지게 나타냈다(Korea Meteorological Administration, 2018).

### 3. 원심모형시험 결과 및 분석

#### 3.1 DCM보강 모델

##### 3.1.1 인공지진파 I 결과 및 분석

DCM보강모델에 대하여 인공지진파 I을 가진했을 때 가속도, 수평, 수직 변위에 대해서 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

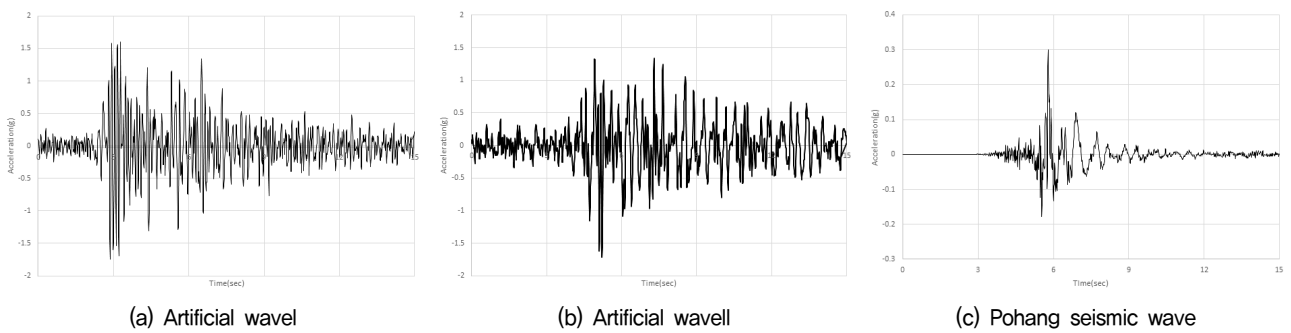


Fig. 3. Applied input seismic wave for Centrifuge tester

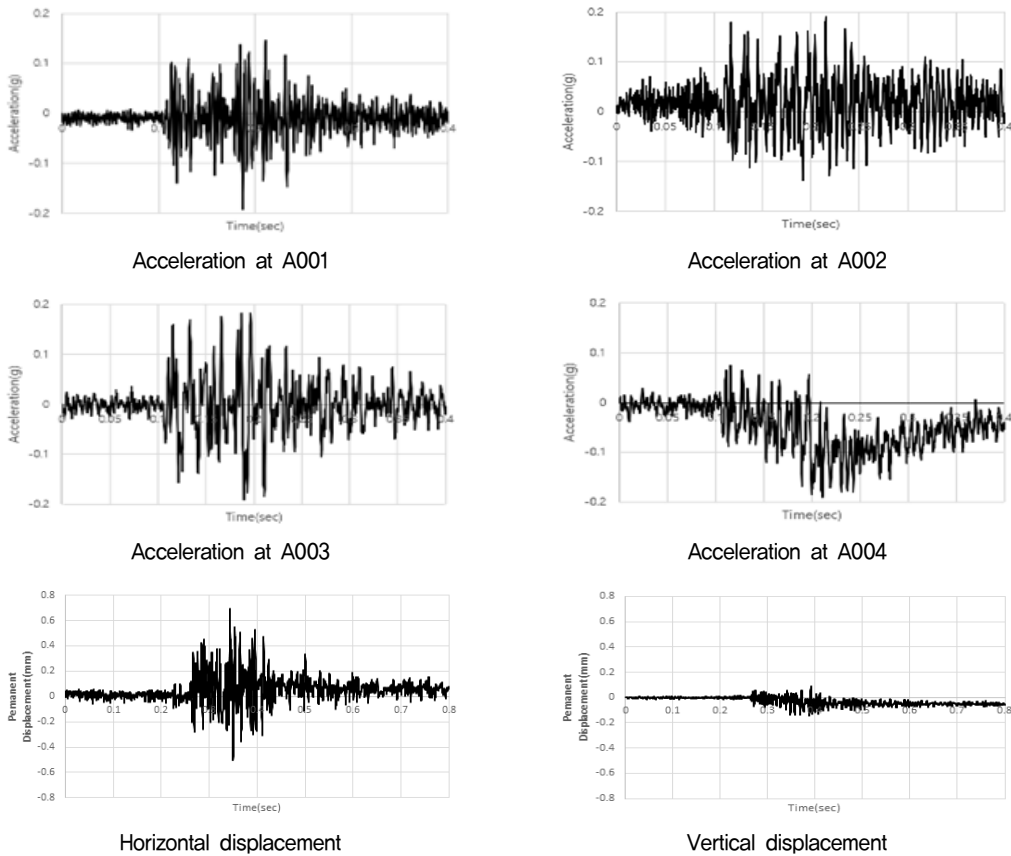


Fig. 4. Measurement data from DCM improvement model under Artificial wave I

인공지진파 I 적용 시 DCM보강 시 가속도는 지반 및 케이스 모두 하부지점 대비 상부지점에서 증폭되었다. 지반 하부(A001) 대비 상부지점(A002)에서 약 0.64%, 케이스 하부지점(A003) 대비 케이스 상부지점(A004)에서 약 0.31%가 증가하였다. 가속도 증폭은 케이스에서 보다 작게 발생하였는데 이는 케이스의 강성이 지반 대비 현저히 커 강체에 가까운 거동을 보이기 때문으로 판단된다. 지반 최대 수평 소성변위는 0.69mm, 연직 소성변위는 0.14mm로서 연직변위는 수평변위의 약 20% 수준으로 발생하였다.

### 3.1.2 인공지진파 II 결과 및 분석

DCM보강모델에 대하여 인공지진파 II를 가졌을 때 가속도, 수평, 수직 변위에 대해서 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다.

인공지진파 II 적용 시 DCM보강 시 가속도는 지반 및 케이스 모두 하부지점 대비 상부지점에서 증폭되었다. 지반 하부(A001) 대비 상부지점(A002)에서 약 6.48%, 케이스 하부지점(A003) 대비 케이스 상부지점(A004)에서 약 0.33%가 증가하였다. 가속도 증폭은 케이스에서 보다 작게 발생하였는데 이는 케이스의 강성이 지반 대비 현저히 커 강체에 가까운 거동을 보이기 때문으로

서 약 10.76%가 증가하였다. 가속도 증폭은 포항지진파 및 인공지진파 I을 적용한 결과 대비 약 10배 정도 크게 발생하였고, 이에 따라 케이스에서의 가속도 증폭이 누적되어 케이스 상단에서 큰 가속도 응답을 보였다. 지반 최대 수평 소성변위는 1.19mm, 연직 소성변위는 0.25mm로서 연직변위는 수평변위의 약 21% 수준으로 발생하였다.

### 3.1.3 포항지진파 결과 및 분석

DCM보강모델에 대하여 포항지진파를 가졌을 때 가속도, 수평, 수직 변위에 대해서 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

포항지진파 적용 시 DCM보강에서 가속도는 지반 및 케이스 모두 하부지점 대비 상부지점에서 증폭되었다. 지반 하부지점(A001) 대비 상부지점(A002)에서 약 0.45%, 케이스 하부지점(A003) 대비 케이스 상부지점(A004)에서 약 0.33%가 증가하였다. 가속도 증폭은 케이스에서 보다 작게 발생하였는데 이는 케이스의 강성이 지반 대비 현저히 커 강체에 가까운 거동을 보이기 때문으로

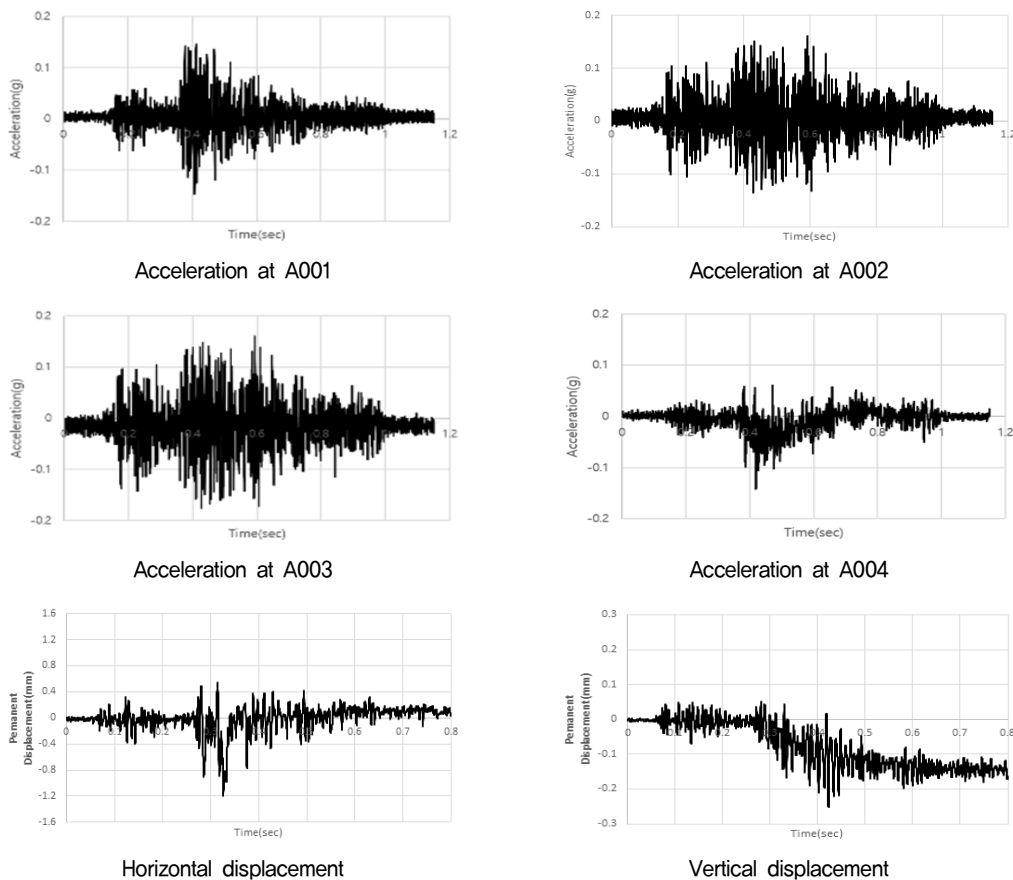


Fig. 5. Measurement data from DCM improvement model under Artificial wave II

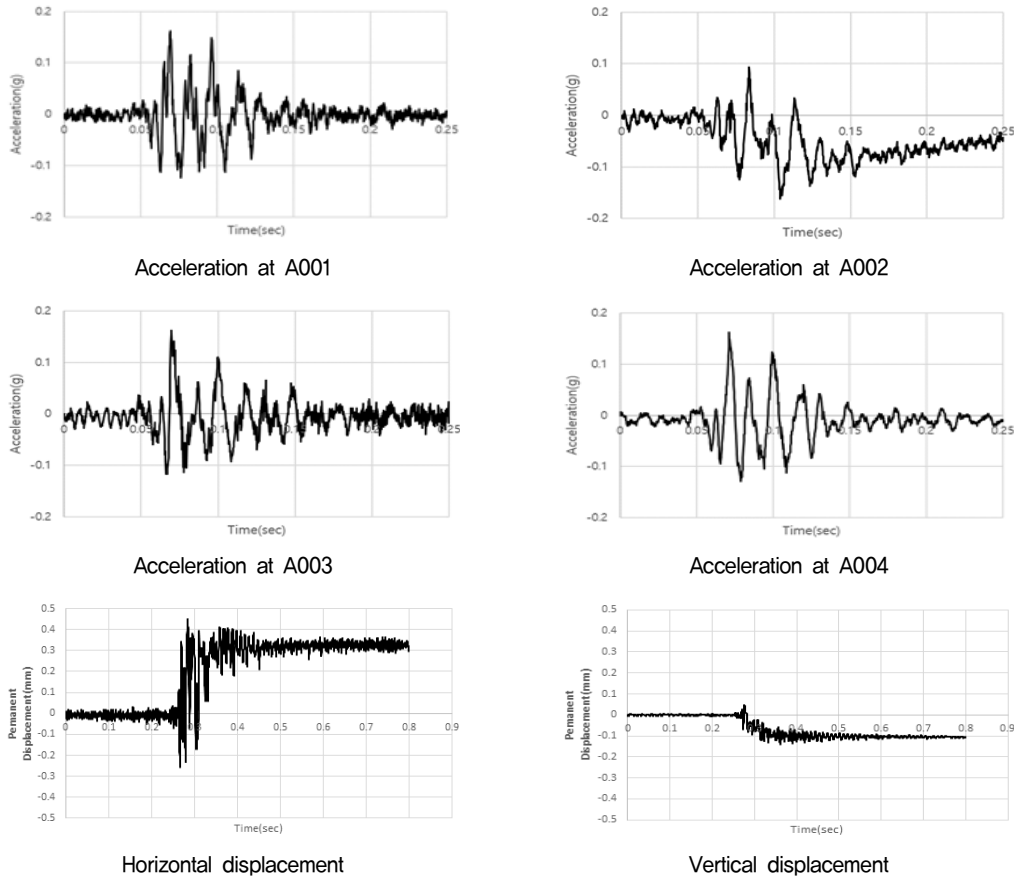


Fig. 6. Measurement data from DCM improvement model under Pohang seismic wave

판단된다. 지반 최대 수평 소성변위는 0.45mm, 연직 소성변위는 0.14mm로서 연직변위는 수평변위의 약 33% 수준으로 발생했다.

### 3.2 사석치환 모델

#### 3.2.1 인공지진파 I 결과 및 분석

사석치환모델에 대하여 인공지진파 I을 가진했을 때 가속도, 수평, 수직 변위에 대해서 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다.

인공지진파 I 적용 시 사석치환에서 가속도는 지반 및 케이슨 모두 하부지점 대비 상부지점에서 증폭되었다. 지반 하부지점(A001) 대비 상부지점(A002)에서 약 0.76%, 케이슨 하부지점(A003) 대비 상부지점(A004)에서 약 0.93%가 증가하였다. 케이슨에서의 가속도 증폭이 누적되어 케이슨 상단에서 지반보다 큰 가속도 증폭을 보였다. 지반의 최대 수평 소성변위는 0.91mm, 연직 소성변위는 0.16mm로서 연직변위는 수평변위의 약 16% 수준으로 발생하였다.

#### 3.2.2 인공지진파 II 결과 및 분석

사석치환모델에 대하여 인공지진파 II를 가진했을 때 가속도, 수평, 수직 변위에 대해서 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다.

인공지진파 II 적용 시 사석치환에서 가속도는 지반 및 케이슨 모두 하부지점 대비 상부지점에서 증폭되었다. 지반 하부지점(A001) 대비 상부지점(A002)에서 약 20.34%, 케이슨 하부지점(A003) 대비 상부지점(A004)에서 약 13.62%가 증가하였다. 가속도 증폭은 포항지진파 및 인공지진파 I을 적용한 결과 대비 약 10배 이상 크게 발생하였고 이에 따라 케이슨에서의 가속도 증폭이 누적되어 케이슨 상단에서 큰 가속도 응답을 보였다. 지반의 최대 수평 소성변위는 1.82mm, 연직 소성변위는 0.27mm로서 연직변위는 수평변위의 약 15% 수준으로 발생하였다.

#### 3.2.3 포항지진파 결과 및 분석

사석치환모델에 대하여 포항지진파를 가진했을 때 가속도, 수평, 수직 변위에 대해서 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

포항지진파 적용 시 사석치환에서 가속도는 지반 및

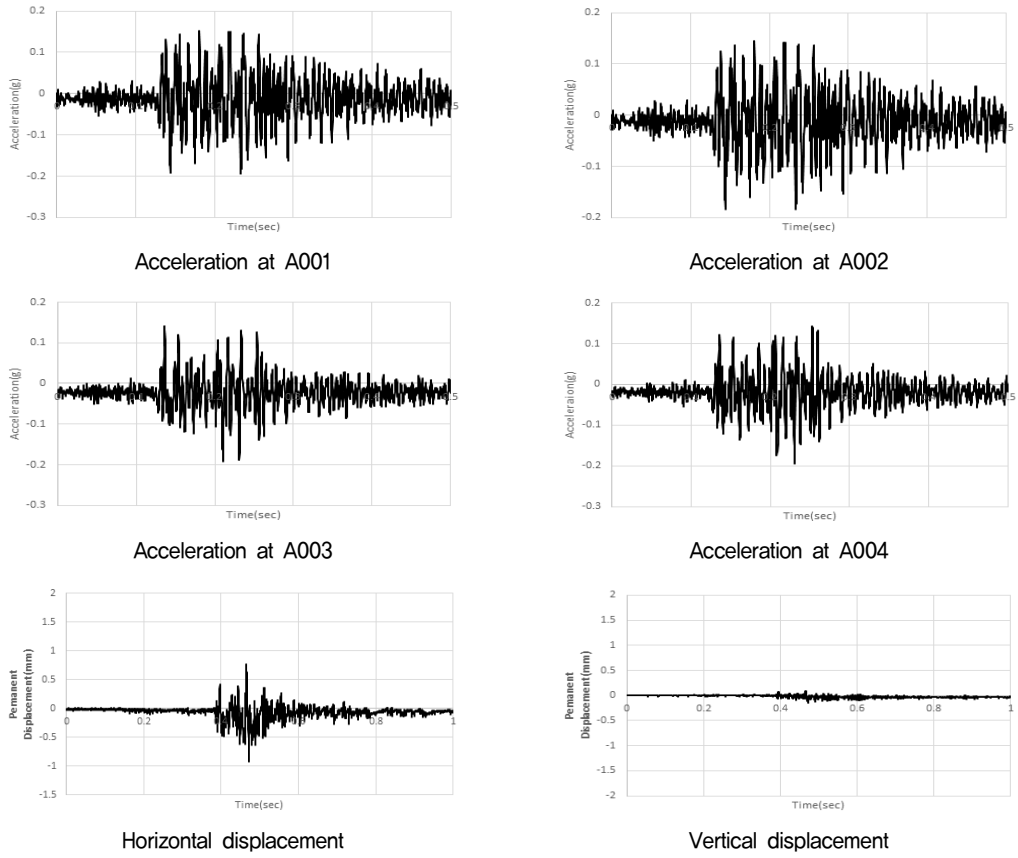


Fig. 7. Measurement data from riprap replacement model under Artificial wave I

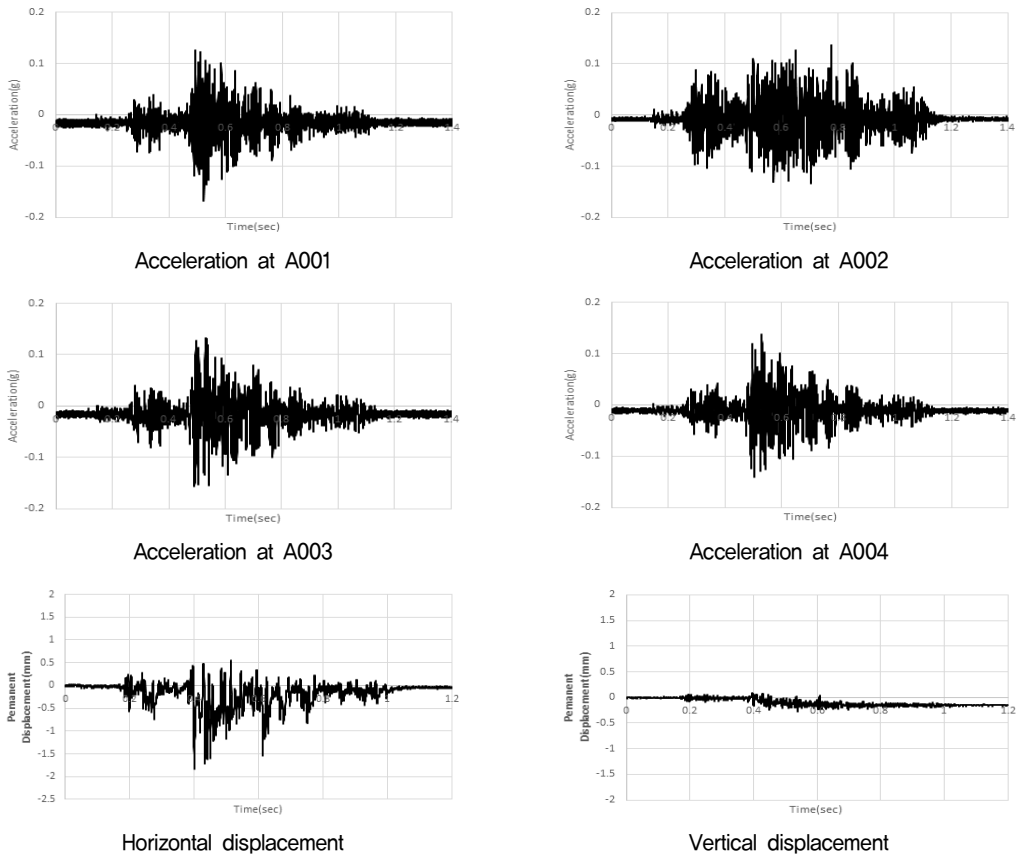


Fig. 8. Measurement data from riprap replacement model under Artificial wave II

케이슨 모두 하부지점 대비 상부지점에서 증폭되었다. 지반 하부지점(A001) 대비 상부지점(A002)에서 약 0.25%, 케이슨 하부지점(A003) 대비 상부지점(A004)에서 약 0.60% 가 증가하였다. 케이슨에서의 가속도 증폭이 누적되어 케이슨 상단에서 지반보다 큰 가속도 증폭을 보

였다. 지반의 최대 수평 소성변위는 1.64 mm, 연직 소성 변위는 0.40mm로서 연직변위는 수평변위의 약 24% 수준으로 발생하였다.

2가지의 보강의 측점 최대가속도, 최대 수직, 수평 변위를 Table 3과 같이 정리하였다.

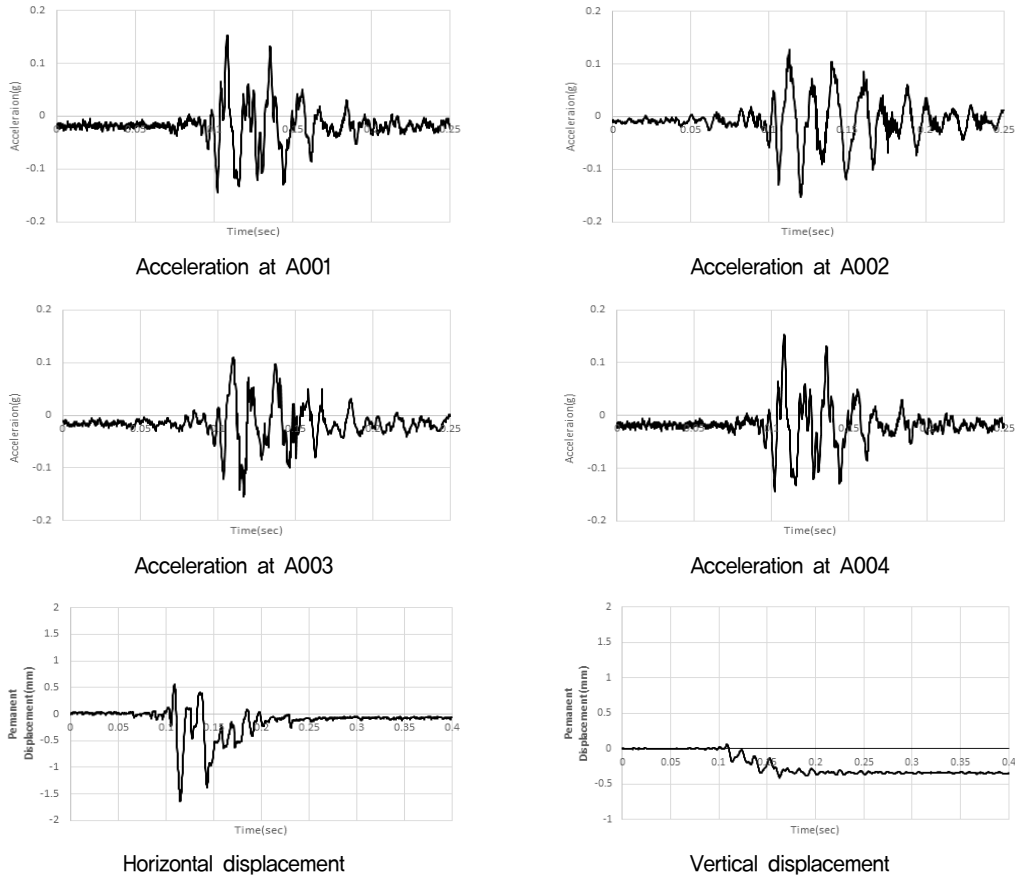


Fig. 9. Measurement data from riprap replacement model under Pohang seismic wave

Table 3. Max. Accelerations, Max. Vertical displacements and Max. Horizontal displacements at Measurement points (case-1: DCM improvement model, case-2: riprap replacement model)

Artificial wave I						
Case	A001 (g)	A002 (g)	A003 (g)	A004 (g)	Vertical displacement (mm)	Horizontal displacement (mm)
Case-1	0.191	0.192	0.190	0.191	0.138	0.691
Case-2	0.190	0.192	0.192	0.194	0.145	0.910
Artificial wave II						
Case	A001 (g)	A002 (g)	A003 (g)	A004 (g)	Vertical displacement (mm)	Horizontal displacement (mm)
Case-1	0.137	0.146	0.145	0.161	0.251	1.191
Case-2	0.139	0.168	0.136	0.155	0.272	1.821
Pohang seismic wave						
Case	A001 (g)	A002 (g)	A003 (g)	A004 (g)	Vertical displacement (mm)	Horizontal displacement (mm)
Case-1	0.161	0.162	0.161	0.162	0.138	0.448
Case-2	0.152	0.153	0.153	0.153	0.400	1.639



### 3.3 수평지진계수 산정

DCM보강 및 사석치환으로 보강한 지반상단지점(A002)과 직립식 방파제 구조물의 최상부지점(A004)의 최대 가속도를 이용하여 증폭비( $\Delta$ )를 산정하여 지표면과 항만구조물 간의 가속도 증폭비(Amplification ratio)를 통하여 수평지진계수( $k_h$ )를 산정하였다. 이때 증폭비가 -값이면 감쇠, +값이면 증폭이다.

$$\Delta = \frac{A004_{\max} - A002_{\max}}{A002_{\max}} \times 100 \quad (1)$$

지진파별 계측지점의 증폭비 산정결과는 Table 4와 같다.

원심모형실험을 통해서 산정한 증폭비는 DCM보강 및 사석치환의 경우 대부분 1% 내외의 증폭비를 보였으나 인공지진파 II 경우 최대 9.7%의 증폭비를 보였다.

또한 인공지진파 I, II 적용 시 증폭비가 감쇠하는 경향을 보여 지표면에서의 가속도 증폭이 구조물에서 일부 억제되고 있는 것으로 판단된다. 이는 DCM보강 및 사석치환으로 인하여 방파제 기초지반의 지지력 및 강성이 개선될 경우 기초지반에서 직립식 방파제 상부까지의 가속도 증폭이 억제되고 있는 것으로 판단된다. 현행 방파제의 내진I등급 내진설계 시 인명피해가 예상되거나 항만 및 어항 운영상 막대한 지장을 초래하는 경우 방파제에 작용하는 지진력을  $A_{\max}$ 를 적용하고 있다. 그러므로 수평지진계수는( $k_{hk}$ )는 지표면 최대가속도 값을 그대로 적용하는 것이 보강지반에서 보수적인 설계가 될 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.4 지진파별 수평·수직 변위 분석

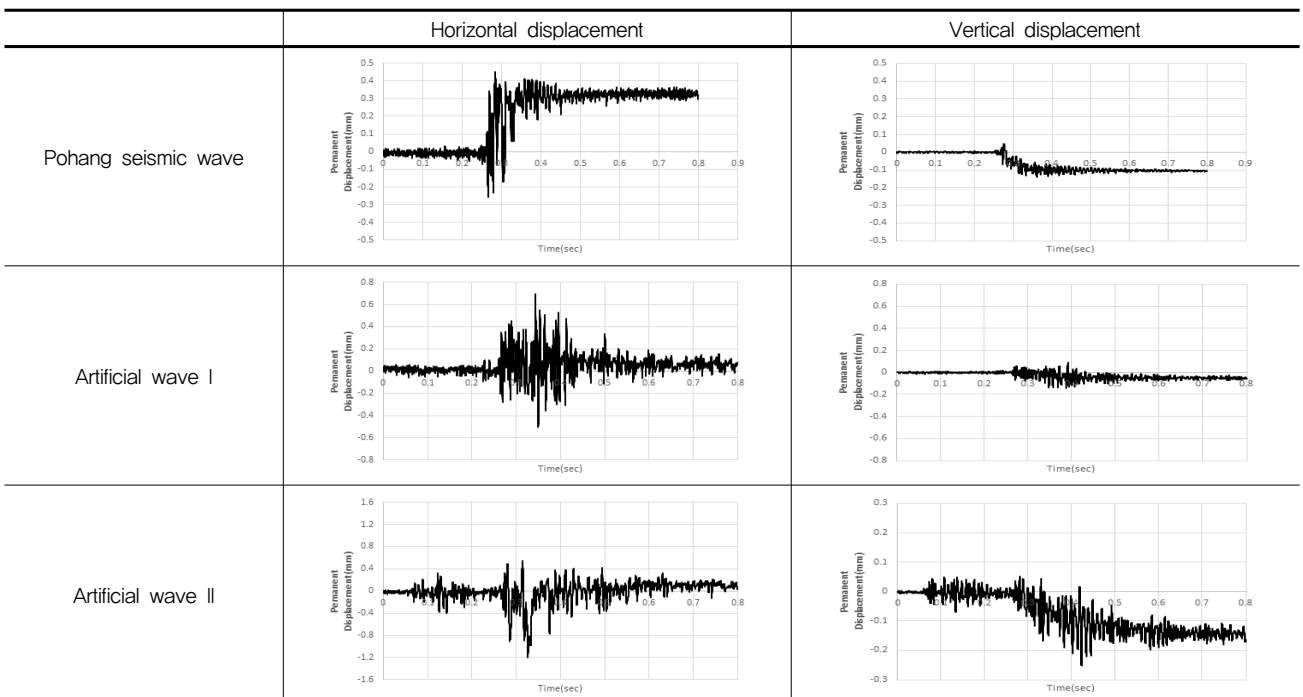
직립식 방파제모형의 최상단에서 지진파별 최대 수평 및 수직변위를 계측한 결과 DCM보강을 적용한 경

Table 4. Amplification ratio at measurement points with respect to seismic waves

Unit (%)

	Case-1 (DCM improvement model)	Case-2 (Riprap replacement model)
Pohang seismic wave	0.006 (Amplification)	0.247 (Amplification)
Artificial wave I	0.678 (Attenuation)	1.260 (Amplification)
Artificial wave II	9.751 (Amplification)	7.77 (Attenuation)

Table 5. Horizontal & Vertical displacement for DCM improvement model



우 사석치환을 적용한 경우보다 포항지진파 적용 시 수평변위는 최대 72.6%, 수직변위는 최대 65.5% 감소하는 경향을 나타내었다(Tabel 6). 이는 DCM보강이 사석

치환에 비하여 지진에 의한 동적 변위를 효과적 억제하고 있기 때문으로 판단된다. 사석치환의 경우 치환된 하부지반이 동적하중에 의하여 순간적인 사석입자들의

Table 6. Horizontal & Vertical displacement for riprap replacement model

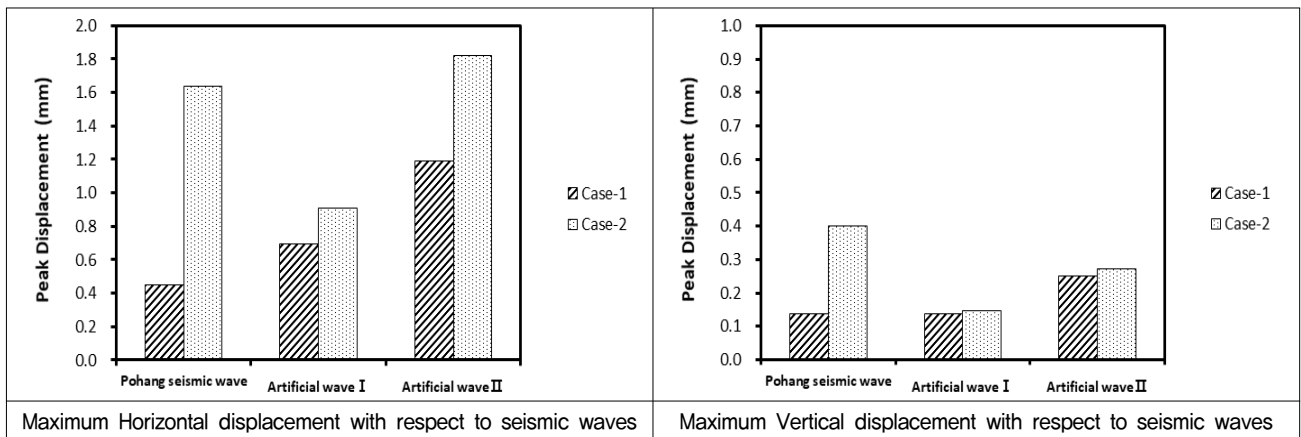
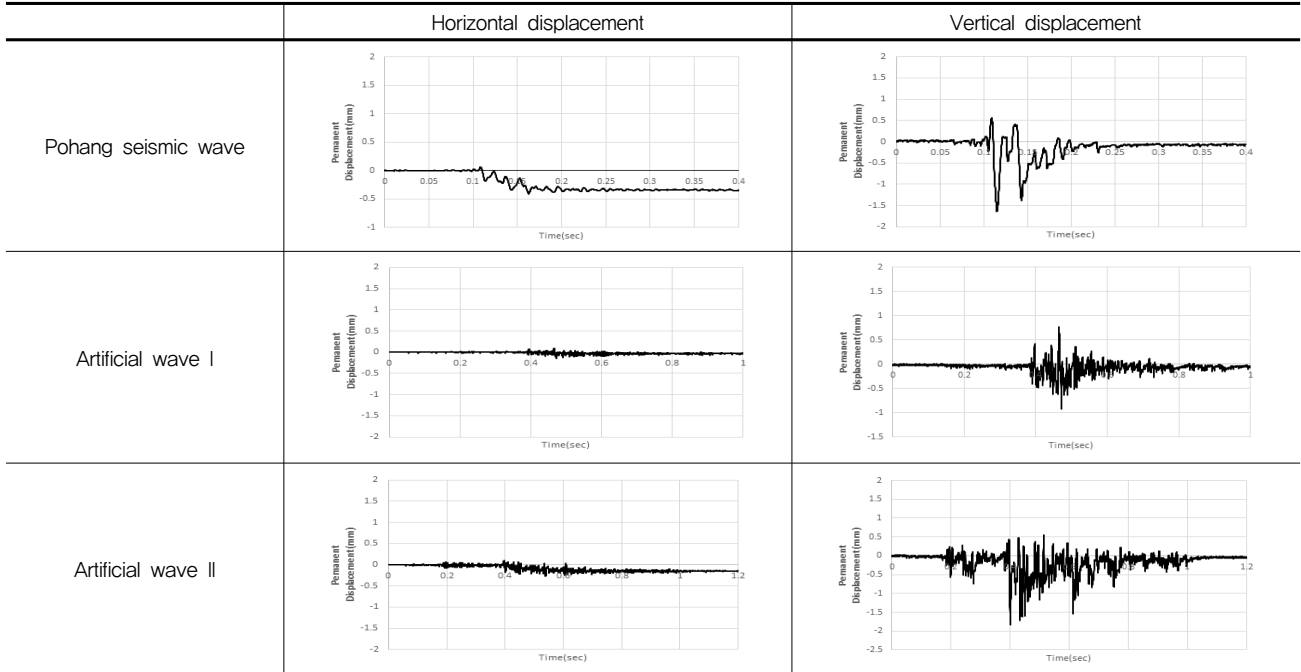


Fig. 10. Maximum Horizontal & Vertical displacement with respect to seismic waves (case-1: DCM improvement model, case-2: riprap replacement model)

Table 7. Tendency to decrease maximum displacement by seismic wave

	Test case	Pohang seismic wave		Artificial wave I		Artificial wave II	
		Case-1	Case-2	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2
Horizontal displacement	Case-1	0.448	72.6% reduction compared to Case-1	0.692	23.9% reduction compared to Case-1	1.191	34.6% reduction compared to Case-1
	Case-2	1.639	-	0.910	-	1.821	-
Vertical displacement	Case-1	0.138	65.5% reduction compared to Case-1	0.138	4.8% reduction compared to Case-1	0.251	7.6% reduction compared to Case-1
	Case-2	0.400	-	0.145	-	0.272	-

미끌림과 이동으로 인해 간극이 채워지면서 수평 및 수직변위가 증가하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 세가지의 지진파와 두가지의 보강된 연약지반에서의 상사법칙을 적용한 직립식 방파제의 지진 시 안정성 평가 및 비교 검토를 수행하였다. 각 조건에서 발생하는 지점의 가속도 및 수직, 수평변위를 원심모형실험을 통하여 분석하였다. 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 원심모형실험을 통하여 가진 시 직립식 방파제 모형의 최상단에서 발생하는 지진파별 최대수평·수직 변위를 계측하였다. DCM보강 경우 최대 수평 변위 1.191mm, 최대 수직 변위 0.251mm로 최대 수평·수직 변위는 인공지진파 II를 가진한 경우 가장 크게 발생하였으며, 사석치환의 경우 최대 수평 변위 1.821mm로 인공지진파 II, 최대 수직 변위는 포항지진파를 가진한 경우에 각각 가장 크게 발생하였다. 이를 바탕으로 두 실험 모두 수평, 수직 변위는 방파제 허용변위 기준인 300mm보다 낮게 산정되어 허용변위 조건을 만족하므로 안정한 것으로 판단된다.
- (2) 최대가속도 측정결과 DCM보강의 경우 최대 지진가속도( $a_{max}$ )는 0.192g로 인공지진파 I을 가진하였을 때 가장 크게 발생하였고, 사석치환의 경우도 동일하게 최대 지진가속도( $a_{max}$ )는 0.194g로 인공지진파 I가진하였을 때 가장 크게 발생하였다.
- (3) 직립식 방파제 모형의 최상단부 최대가속도에 대한 구조물 최대 응답가속도인 증폭비를 산정한 결과 DCM보강 및 사석치환의 대부분의 경우가 1% 내외의 증폭비를 보였으나, 인공지진파 II 적용 시 대폭 증가한 최대 9.7%의 증폭비를 보였다(Tabel 3). 또한 인공지진파 I, II 적용 시 증폭비가 감소하는 경향을 보여 지표면에서의 가속도 증폭이 구조물에서 일부 억제되고 있는 것으로 판단된다. 이는 DCM보강 및 사석치환으로 인하여 방파제 기초지반의 지지력 및 강성이 개선될 경우 기초지반에서 방파제 상부까지의 가속도 증폭이 억제되고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 본 시험은 2차원적 평면변형률 조건에 가까운 방파제 구조물에 대하여 연성토조인 ESB를 적용하여 실

제와 근접한 조건을 모사하였다. 그러나 ESB 자체의 고유응답특성을 완벽히 통제할 수 없다는 한계가 있다. 또한 점성유체 이용의 어려움에 따른 간극수압 및 유체거동의 현실적 모사 한계 및 연약지반의 원심중력장 내 압밀과 지반 변형 제어가 곤란한 점 또한 원심모형시험의 한계라 볼 수 있다. 그러나 본 시험에서는 보강 전, 후에 대하여 최대한 동일한 시험조건을 유지함으로써 지진 시 거동을 비교 분석하여 내진성능 변화를 정량적으로 평가하여 시험의 제한사항들을 현실적으로 통제하였다.

본 연구에서는 연약지반 및 보강 지반에서 방파제의 내진 안정성 검토를 목적으로 동적 원심모형실험을 수행하였으며, 본 연구결과를 직립식 방파제의 내진 안정성 평가 방법에 대한 참고 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 향후 항만 구조물에 대한 내진설계 및 안정성 평가 시 다양한 단면별, 지진파 등 DB 구축 등의 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(항만 및 어항설계기준 고도화를 위한 성능기반 내진설계기술 개발).

#### 참고문헌 (References)

1. Han, S.M., Park, E.H., Ham I.K., Park, S.C, Jeon, Y.S., Jo, E.Y., and Lee, C.W. (2014), "Technical Report for the Observation Environment of the Korean Meteorological Administration Seismic Observatory", *National Institute of Meteorological Sciences, NIMR-TN-2014-007*, pp.54.
2. Heo, T.M., Kim, J.H., Kim, J.K., and Lee, J.H. (2018), "Response Spectra of 2017 Pohang Earthquake and Comparison with Korean Standard Design Spectra", *Journal of the Korea Earthquake Engineering Association*, Vol.22, No.3, pp.129-137.
3. Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W., and Cho, G.C. (2012), "A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, pp.77-84.
4. Kim, D.S., Lee, S.H., Choo, Y.W. and Perdriat, J. (2013), "Self-Balanced Earthquake Simulator on Centrifuge and Dynamic Performance Verification", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, pp.651-661.
5. Korea Meteorological Administration (2018), "Pohang earthquake analysis report".
6. Lee, H.J. (2020), "Effect of input motion on the permanent dis-

placement of the gravity quay wall”, Master’s thesis at wonkwang university Graduate School, Jeollabuk-do, Korea.

7. Lee, S.H., Choo, Y.W., and Kim, D.S. (2013), “Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.44, pp.102-114.
8. Nam, S.H. (2020), “The examination of aseismic stability of breakwater

by centrifugal model test”, Master’s thesis at Hanseo University Graduate School of Civil Engineering.

Received : May 28<sup>th</sup>, 2021

Revised : June 14<sup>th</sup>, 2021

Accepted : June 14<sup>th</sup>, 2021