

## 태풍 파랑과 지진을 연계한 케이슨식 방파제의 동적거동

# Dynamic Behavior of Caisson Type Breakwater Considering Typhoon-induced Wave Loading Before and After Earthquakes

윤현수<sup>1</sup>, 노병진<sup>1</sup>, 윤성규<sup>2</sup>, 강기찬<sup>3\*</sup>

Hyeonsu Yun<sup>1</sup>, Byeongjin Roh<sup>1</sup>, Seong-Kyu Yun<sup>2</sup>, Gichun Kang<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Non-Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-Ro, Jinju 52828, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Research Professor, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-Ro, Jinju 52828, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-Ro, Jinju 52828, Republic of Korea

### ABSTRACT

Recently, the frequency and intensity of typhoon-induced wave loading are increasing due to changed marine environments such as climate change. In addition, frequent earthquakes are causing a lot of damage around the world, including in Japan, Chile, Haiti, China, and Indonesia. In Korea, damage from typhoons has also been increasing since the 2000s, and the frequency and intensity of earthquakes are also increasing. Korea is surrounded by sea on three sides, so typhoons can cause a lot of damage to coastal structures, and earthquakes also cause a lot of damage to coastal structures. As such, the frequency and intensity of typhoon-induced wave loading and earthquakes are increasing both domestically and internationally, but there is no research linking typhoons and earthquakes. Therefore, in this study, numerical analysis was performed for a total of four cases by linking typhoon waves and earthquakes to the caisson breakwater. Numerical analysis was performed by applying wave loads in Case 1 and seismic wave in Case 2, seismic wave after wave loads in Case 3, and wave loads after seismic wave in Case 4. As a result of the numerical analysis, it was confirmed that in Case 3 and Case 4, which linked a typhoon and earthquakes, the damage caused by each load increased compared to Case 1 and Case 2 because the load was applied while the existing ground strength was reduced. In addition, it was confirmed that the greatest damage occurred in Case 3, in which seismic wave were applied after the wave loads.

### 요 지

최근 기후변화 등 달라진 해양 환경으로 인해 태풍 파랑의 빈도 및 강도가 증가하고 있다. 뿐만 아니라 일본, 칠레, 아이티, 중국, 인도네시아 등 세계적으로 잦은 지진으로 인해 많은 피해가 발생하고 있다. 우리나라 역시 2000년대에 들어서 태풍에 의한 피해가 증가하고 있으며, 지진의 발생 빈도와 강도도 증가하고 있다. 우리나라는 삼면이 바다로 되어있어 태풍에 의해 해안구조물에 많은 피해가 발생할 수 있으며 지진 역시 해안구조물에 많은 피해를 야기시킨다. 이처럼 국내·외적으로 태풍 파랑과 지진의 빈도 및 강도가 증가하는 추세이나 태풍과 지진을 연계한 연구는 전무하다. 따라서, 본 연구에서는 케이슨식 방파제에 태풍 파랑과 지진을 연계하여 총 4가지 Case에 대해 수치해석을 수행하였다. Case 1은 파랑하중, Case 2는 지진파를 각각 적용하였고, Case 3은 파랑하중 이후 지진 발생, Case 4는 지진파 이후 파랑하중까지 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 태풍과 지진을 연계한 Case 3과 Case 4의 경우 기존에 지반의 강도가 저하된 상태에서 하중을 적용하여 각 하중에 의한 피해가 Case 1과 Case 2에 비해 증가한 것을 확인하였다. 또한, 파랑하중 이후 지진파를 적용한 Case 3에서 피해가 가장 큰 것을 확인하였다.

**Keywords** : Earthquakes, Wave loading, Caisson type breakwater, Excess pore water pressure, Effective stress path

Received 28 Feb. 2024, Revised 21 Mar. 2024, Accepted 23 Mar. 2024

\*Corresponding author

Tel: +82-55-772-1792; Fax: +82-55-772-1799

E-mail address: [gkang@gmu.ac.kr](mailto:gkang@gmu.ac.kr) (G. Kang)

# 1. 서론

최근 지구온난화로 인한 기후변화와 해양 환경의 변화로 태풍 파랑의 빈도 및 강도가 증가하고 있다. 국내의 경우 1990년대에는 3회의 태풍 피해가 발생하였지만 2000년대에 들어서는 2배에 달하는 6회의 태풍 피해가 발생하였다. 우리나라는 삼면이 바다로 되어있어 태풍으로 인해 많은 피해가 발생할 수 있다.

Chang et al.(1993)은 해안구조물을 설치할 때 지반 해석에 있어서 가장 중요한 문제점으로 파랑의 존재를 제기하였다. 해안구조물은 파랑에 의한 반복하중으로 인해 육상에서의 거동과는 상당히 다른 특징을 보이고, 파랑으로 인해 제체 지반에는 간극수압이 발생하며, 이로 인해 제체는 보다 쉽게 동적거동을 일으키며 현저한 지반 변형을 가져올 수 있다고 하였다.

대부분의 해안구조물은 태풍에 의한 파랑하중을 정적인 등분포하중으로 구조물에만 작용하는 것으로 가정한다. 하지만 실제로는 파랑의 반복적인 하중이 구조물 뿐만 아니라 해저지반에도 동시에 작용한다. 이로 인해 지반에 과잉간극수압이 발생하고 지반의 강도가 저하되어 구조물의 침하를 일으킨다(Kang et al., 2013).

또한, 전세계적으로 일본, 칠레, 아이티, 중국, 인도네시아 등에서 빈번히 발생하는 지진에 의해 막대한 피해가 발생하고 있다. 국내에서는 2016년 9월 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진과 2017년 11월 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진은 한반도의 지진관측 시작 이래 가장 강력한 규모의 지진으로 전국적으로 그 지진동이 전파되어 일부 지역에 피해를 입혔고 이후 다른 지역에서도 지진의 발생 빈도가 증가하고 있다. 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진은 구조물 붕괴와 도로 및 항만시설의 붕괴를 발생시켰으며 특히, 영

일만 항의 케이슨식 안벽에서 균열 및 침하를 야기시켰다.

이처럼 태풍과 지진 모두 해안구조물과 해저지반에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 그 강도와 빈도가 증가하는 가운데 이를 연계한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 태풍과 지진을 연계하여 수치해석을 수행하였고 그에 따른 케이슨식 방파제의 동적거동을 파악하였다.

## 2. 파랑하중 산정모델 및 수치해석 개요

### 2.1 파랑하중 산정모델

#### 2.1.1 3D-NIT

3D-NIT(Three-Dimensional Numerical Irregular wave Tank)의 수치파동수조는 Fig. 1에 보인 바와 같이 수치파동수조내의 양 끝단에서 파의 재반사 등 경계부 효과를 방지하기 위해 개경계(open boundary)처리기법으로 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 두고 해석영역내에 조파를 위한 조파소스를 적용하고 있다(Lee et al., 2012a, 2012b).

#### 2.1.2 기초방정식

3D-NIT는 자유표면해석모델에 VOF법을 적용하였고 난류해석에는 VOF법을, 난류모델에는  $k-\epsilon$ 모델을 각각 적용하였다. 기초방정식은 3차원비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속식 및 Navier-Stokes방정식을 PBM(Porous Body Model)에 근거하여 확장한 다음의 식 (1)~(4)로 주어진다(Kang et al., 2013).

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p \quad (1)$$

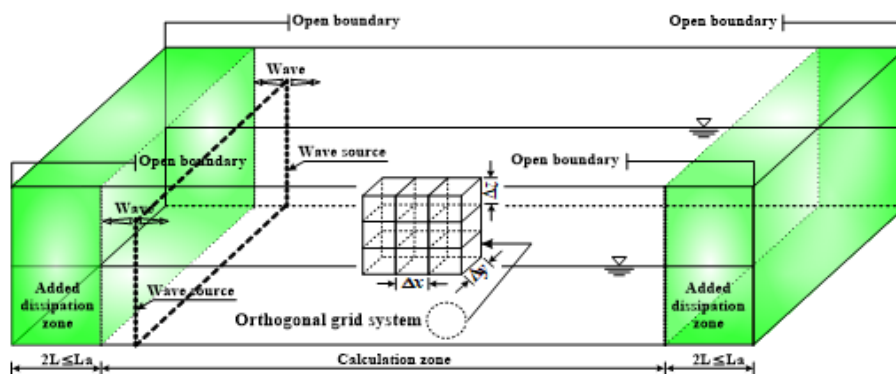


Fig. 1. Schematic diagram of the numerical wave tank used in the 3D-NIT model (Kang et al., 2013)

$$\begin{aligned} & \lambda_\nu \frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x \mu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y \nu \mu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w \mu}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( 2 \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left( \frac{\partial \mu}{\partial y} + \frac{\partial \nu}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ &- \gamma_\nu D_x \mu - R_x + \gamma_\nu S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_\nu \frac{\partial \nu}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x \mu \nu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y \nu \nu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w \nu}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( \frac{\partial \nu}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left( 2 \frac{\partial \nu}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial \nu}{\partial y} \right) \right\} \\ &- \gamma_\nu D_y \mu - R_y + \gamma_\nu S_\nu \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_\nu \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x \mu w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y \nu w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left( \frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial \nu}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \\ &- \gamma_\nu D_y w - R_z + \gamma_\nu S_s - \gamma_\nu g \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $t$  : 시간

$x, y, z$  : 수평방향좌표 및 연직방향좌표

$u, \nu, w$  :  $x, y, z$  방향 유속성분

$\rho$  : 유체밀도

$P$  : 압력

$\nu_e$  : 분자 동점성계수  $\nu$ 와 점성계수  $\nu_t$ 의 합

$g$  : 중력가속도

$\gamma_\nu$  : 체적공극율

$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$  :  $x, y, z$  방향의 면적공극율

$D_x, D_y, D_z$  : 경계에서 반사파의 제어를 위해 설치한 스폰지층에서의 에너지감쇠계수

$S_\rho, S_u, S_\nu, S_w$  : 해석영역내의 조파를 위한 소스항

$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$  : 구조물로부터 받는 관성력효과를 나타낸 파라미터

## 2.2 수치해석 개요

### 2.2.1 2차원 유효응력해석

본 연구는 2차원 유효응력해석을 채택하였으며, 지반의 액상화 현상을 분석하기 위해 FLIP(Finite element analysis program of Liquefaction Process)프로그램을 사용하였다. FLIP은 대표적인 지반 액상화 현상을 해석하는 프로그램으로, 기초 지반 및 항만과 해안 등 주요 기반 시설에 대해 지진으로 인해 발생된 액상화 현상으로 인해 받은 피해를 분석하기 위해 널리 쓰이고 있으며, 이를 바탕으로 수치해석을 수행하였다.

흙에 대한 유효응력모델은 다중전단메커니즘모델을 이용하였다. 이 모델의 원형고정경계는 Fig. 2와 같이 전단 변형영역과 무한개의 가상스프링 경계의 연결로 정의되는 이동절점으로 나타내고, 각 스프링은 다양한 방향을 가지는 실제 단순 전단메커니즘이라 할 수 있으며, 이를 통해 흙의 탄소성에 관한 응력-변형률 거동을 잘 모사할 수 있다(Iai et al., 1992a, 1992b).

### 2.2.2 3D-NIT 설계파

수치모형인 PARANS-II 모형과 TIWAM 모형을 통해 3D-NIT에 적용할 설계파를 산정하였다. 입사파 조건에서 파고는 Fig. 3에 나타난 OO항에서 관측된 유의파고 중 상위 1/3에 해당하는 파의 평균, 주기는 Fig. 4의 파고의 주기 중 상위 1/3에 해당하는 주기의 평균으로부터 결정하였

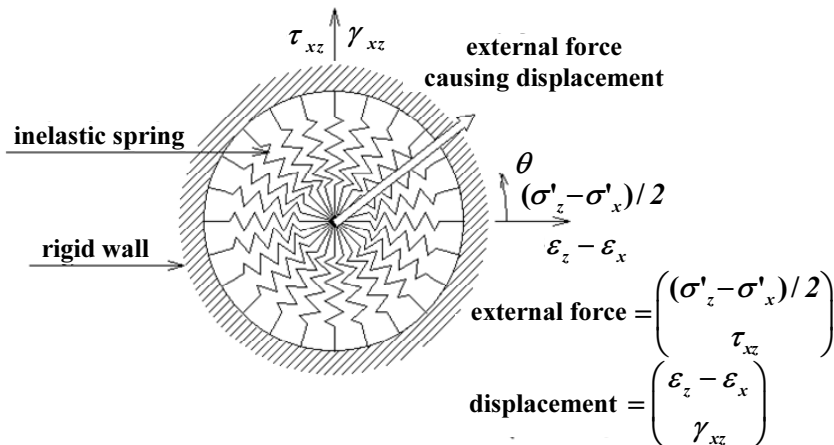


Fig. 2. Schematic diagram of multi-spring shear mechanism model (Towhata and Ishihara, 1985)

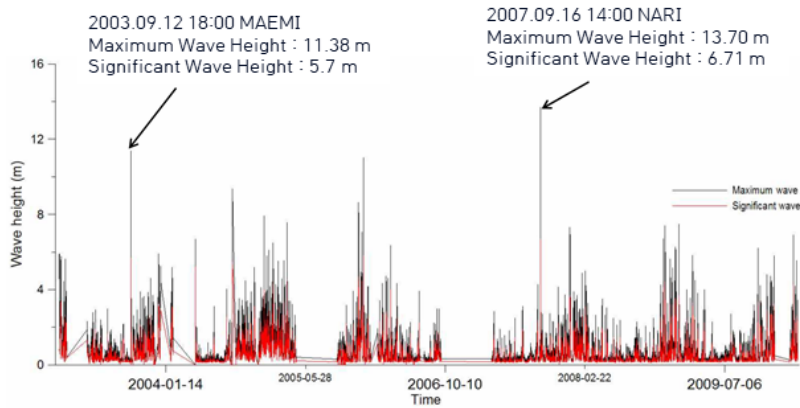


Figure 6.4 Wave height history : Maemi and Nari.

Fig. 3. Wave height history : Maemi and Nari (Kim, 2014)

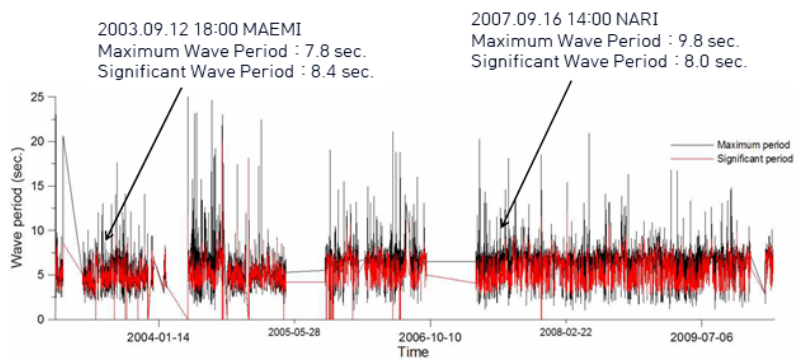


Figure 6.5 Wave period history : Maemi and Nari.

Fig. 4. Wave period history : Maemi and Nari (Kim, 2014)

Table 1. Design wave properties applied 3D-NIT

Wave height (m)	Wave period (m/s)	Wave direction
7	11.0	N

다. 산정된 설계파는 파고 7m, 주기 11.0m/s, 파향 N이며 Table 1에 나타내었다.

### 2.2.3 해석단면 설정

해석단면은 OO항의 방파제에 대한 해석대표 단면을 Fig. 5와 같이 설정하였다. 대표단면에서 사석마운드의 폭은 72m, 높이는 6m, 경사 1:2, 케이슨의 폭은 24m, 높이 26m, 사석마운드 아래 16m 모래지반이 분포되며 그 아래 10m 풍화암이 분포되는 것으로 하였다.

Fig. 6은 해석결과 산정위치를 나타낸 것이다. 요소 1~30은 파랑하중의 산정위치, N1과 N2는 케이슨의 침하량과 수평변위 및 응답가속도 출력 위치, E1, E2, E3, E4는 지반 요소의 과잉간극수압 및 유효응력경로 출력 위치이다.

수치해석에 사용된 물성치는 Table 2에 나타낸 값으로

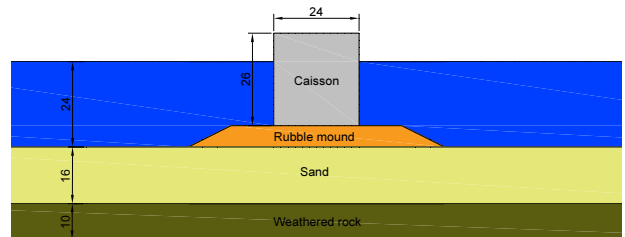


Fig. 5. Cross-section view of a breakwater for numerical analysis

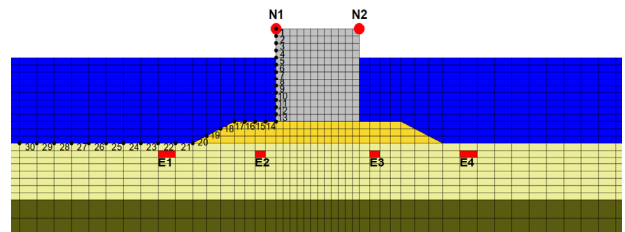


Fig. 6. Measure points of wave pressure(1~30), displacement and acceleration (N1, N2), excess pore water pressure ratio (E1, E2, E3, E4)

“OO항 방파제 축조실설계 용역보고서”를 근거하여 선정되었다.

Table 2. Soil parameters for analysis

Type	Unit weight $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio $\nu$	Elastic modulus E (kN/m <sup>2</sup> )	Cohesion C (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle $\Phi$ (°)
Sand	19.0	0.35	10,000	—	31
Weathered rock	25.0	0.22	3,900,000	—	30
Rubble mound	18.0	0.25	90,000	—	40
Concrete	23.0	0.25	25,000,000	—	—

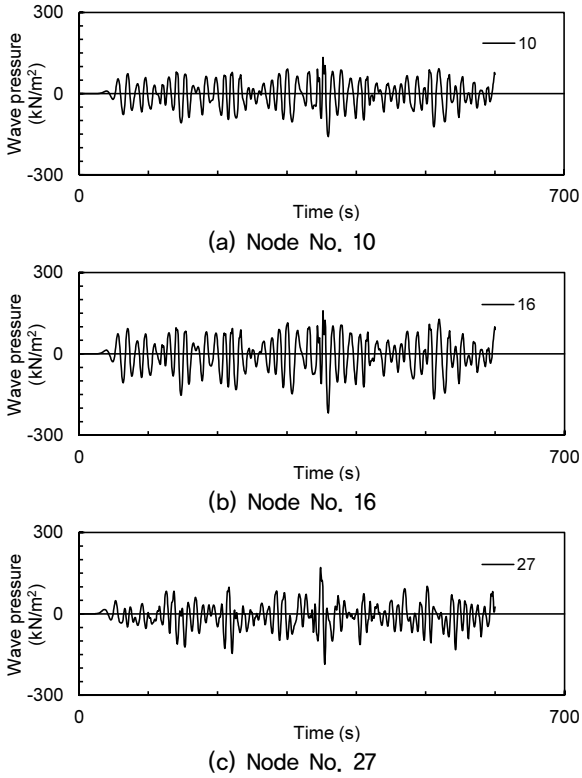


Fig. 7. Time history of wave pressure on the breakwater

### 3. 파랑하중 산정 및 적용 지진파

#### 3.1 파랑하중 산정

수치해석에 사용된 수치파동수조의 규모는 길이 1750m, 높이 60m이며, 전면과 후면 끝에는 약 500m 폭의 감쇠대 (sponge layer)를 설정하였다. 수평방향 격자간격  $\Delta x$ 는 방파제가 위치하는 구간에서는 0.5m로 그 외의 구간은 1.0m로 하였으며, 수직방향  $\Delta z$ 는 0.5m로 구성하였다. 수치계산에 사용된 계산시간은 수렴과 해석시간을 고려하여 자동으로  $\Delta t=0.01\sim 0.20$ 초로 하였다. 총 계산시간은 구조물까지의 도달시간과 태풍의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 600초로 설정하였다.

산정된 파랑하중은 요소 1~30에 해당되는 파랑하중으로 Fig. 7에 대표적으로 케이스 측면 요소 10, 사석마운드

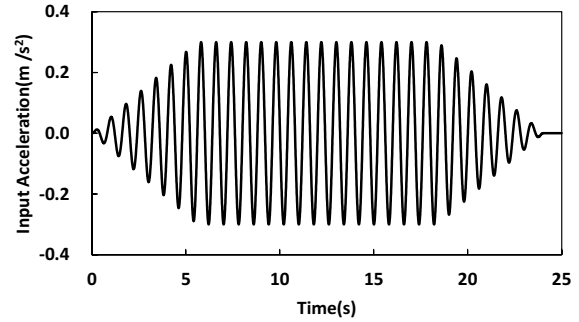


Fig. 8. Input seismic wave

상부요소 16, 그리고 해저지반 영역요소 27의 시간이력에 따른 파랑하중을 나타내었다.

#### 3.2 적용 지진파

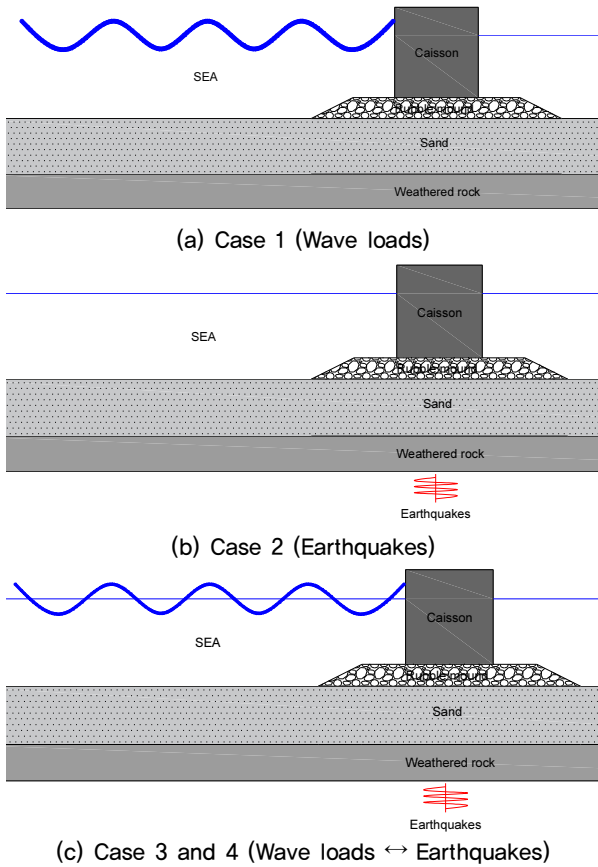
본 연구에서는 입력 지진파는 Fig. 8과 같다. 실제 지진파의 경우 지속시간과 진폭 등 파악하기 어려운 외부 특성이 포함되어 있다. 반면, Sin파의 경우 순수하게 지속시간과 진폭만을 고려할 수 있고 진동수의 영향 등을 배제할 수 있기 때문에 본 연구에서는 Sin파를 적용하였다. Sin파의 주파수는 1.25Hz, 주기는 0.8, 최대가속도는 0.3m/s<sup>2</sup>이다. 수치해석 시 지진파는 해석단면 바닥면 전체에 적용된다.

### 4. 수치해석 결과

수치해석은 Case 1~Case 4까지 수행하였으며, 각 Case에 적용한 하중에 대해 Fig. 9에 도식화하여 나타내었다. Case 1은 파랑하중, Case 2는 지진파를 적용하였으며, Case 3은 파랑하중 이후 지진이 발생한 경우를 모사하였고, Case 4는 지진 발생 태풍이 발생한 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

#### 4.1 Case 1(파랑하중)

Fig. 10은 파랑하중을 적용한 Case 1의 N1과 N2 지점



(a) Case 1 (Wave loads)

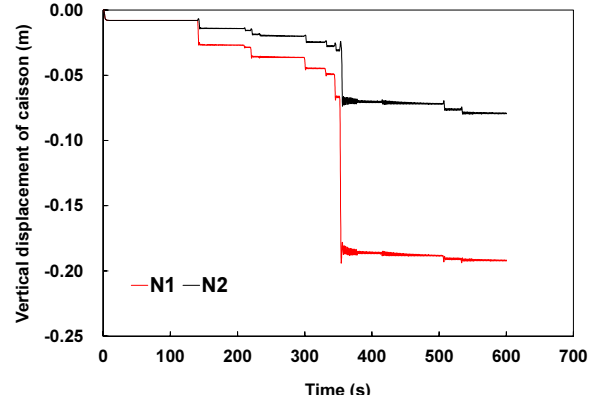
(b) Case 2 (Earthquakes)

(c) Case 3 and 4 (Wave loads ↔ Earthquakes)

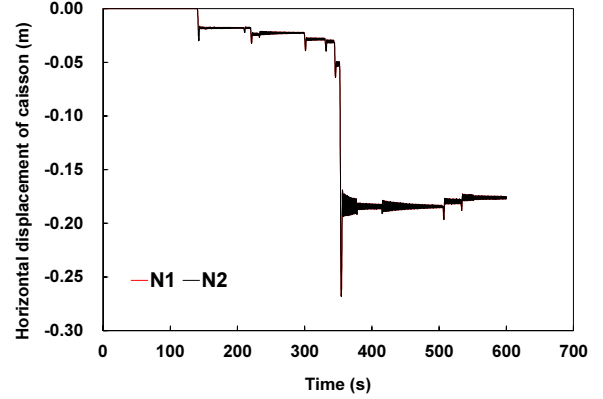
Fig. 9. Loads for analysis

에서 시간에 따른 변위 및 응답가속도를 그래프로 나타낸 것이다. 파랑하중이 작용함에 따라 침하량과 수평변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 7에서도 확인할 수 있듯이 파랑하중이 가장 크게 작용하는 340s~350s 시점에서 응답가속도가 가장 크게 나타났으며, 침하량과 수평변위 역시 동일한 시점에서 가장 크게 발생한다. N1의 침하량은 약 19cm, N2의 침하량은 약 8cm이다. 이는 지반의 과잉간극수압 증가에 따른 유효응력 감소로 인해 지반의 강도가 저하됨으로써 침하가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 파랑하중이 직접 작용하는 항외 측 지점인 N1에서 침하량이 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 수평변위는 N1과 N2 모두 약 18cm로 거의 동일하게 발생하였다.

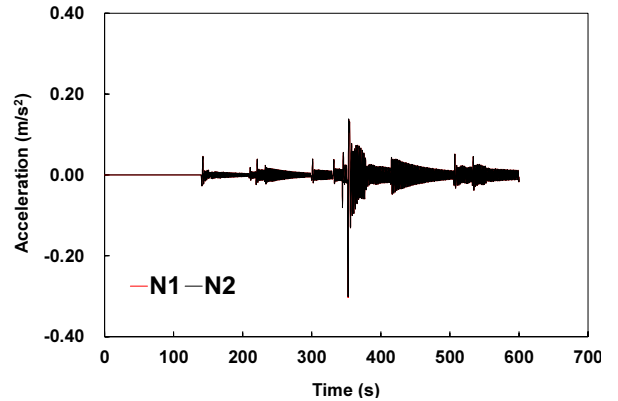
Fig. 11은 E1, E2, E3, E4 지점에서 시간에 따른 과잉간극수압비의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 과잉간극수압비란 과잉간극수압을 초기유효응력으로 나눈 값으로 1일 경우 지반의 액상화를 의미한다. 파랑하중이 작용함에 따라 과잉간극수압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 과잉간극수압비가 최대 약 0.52로 액상화 발생경향은 적지만 지반의 강도에 영향을 미칠 정도의 과잉간극수압이 발생하였다.



(a) Vertical displacement



(b) Horizontal displacement



(c) Acceleration

Fig. 10. Time history of caisson (Case 1)

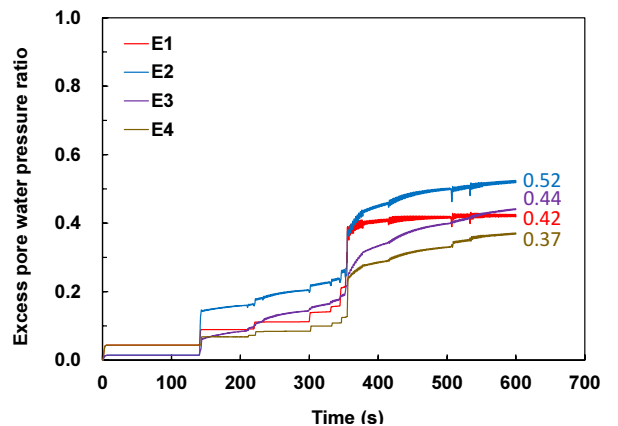
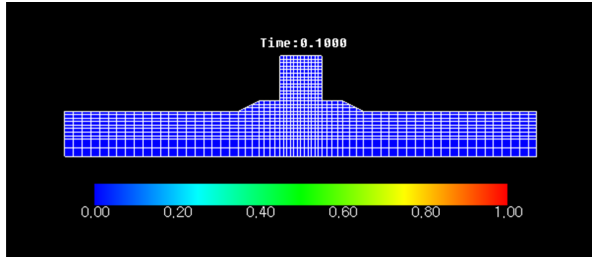
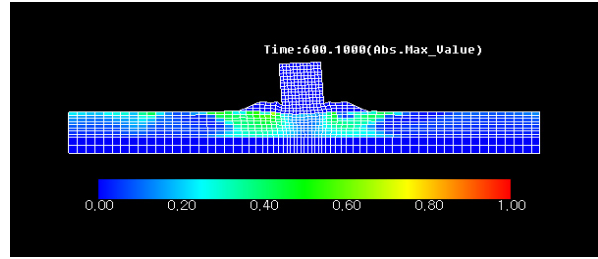


Fig. 11. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 1)



(a) Before wave loads for Case 1 (x10)



(b) After wave loads for Case 1 (x10)

Fig. 12. Distribution of excess pore water ratio and displacement (Case 1)

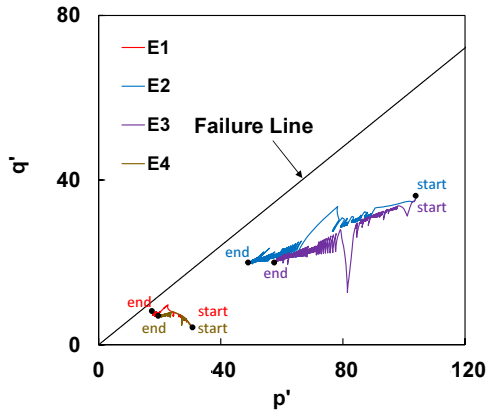


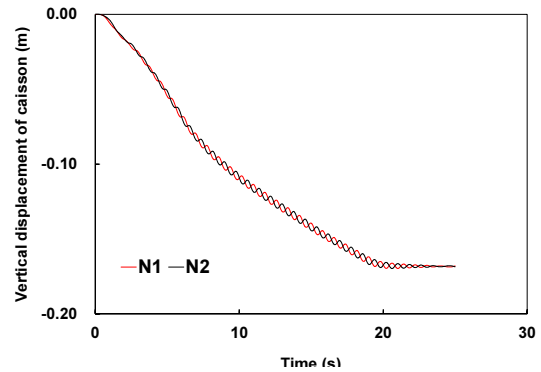
Fig. 13. Effective stress path in elements (Case 1)

Fig. 12는 Case 1의 전체적인 과잉간극수압비의 분포 및 변위를 나타낸 그림이다. 변위가 잘 나타나도록 스케일을 10배로 하였다. 파랑하중이 작용하는 항외측 지점인 N1의 침하량이 더 크게 발생하여 케이슨이 항외측 쪽으로 기울었으며, 과잉간극수압비의 분포와 크기 역시 항외측 지반에서 더 크게 발생하였다.

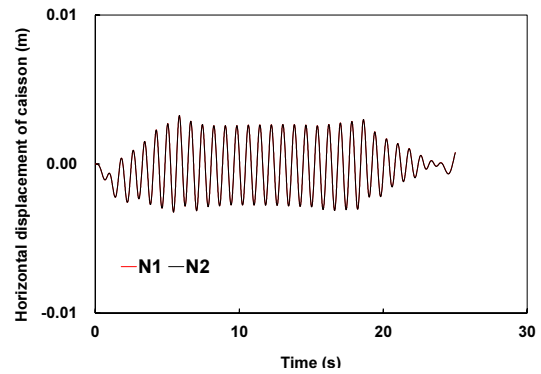
Fig. 13은 E1, E2, E3, E4 지점에서 유효응력경로를 나타낸 그래프로 유효응력경로가 파괴포락선에 근접할수록 지반의 강도저하를 의미한다. 4개의 지점 모두 과잉간극수압의 증가에 의해 유효응력이 감소하여 파괴포락선에 근접하며 지반의 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 Case 2(지진파)

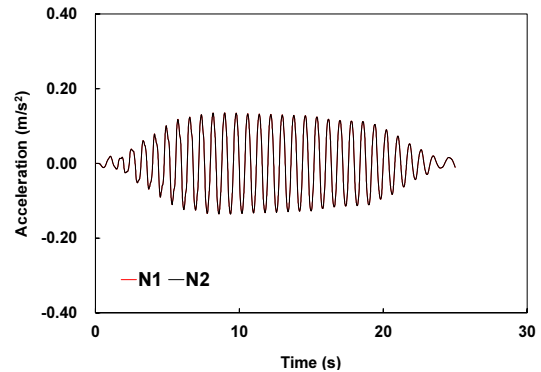
Fig. 14는 지진파를 적용한 Case 2의 변위 및 응답가속도를 그래프로 나타낸 것이다. 응답가속도와 수평변위의 그래프에서 N1과 N2지점의 그래프 형상이 거의 동일하게 나타나는데 이는 수치해석 단면이 대칭이고 주기와 진폭 등이 일정한 Sin파의 특성에 의한 것으로 판단된다. 침하량의 그래프 역시 위상은 반대이나 그래프의 형상은 거의 동일하며 지진파가 작용함에 따라 케이슨이 침하를 일으키는 것을 확인할 수 있다. 다만 본 연구에서는 N1과 N2



(a) Vertical displacement



(b) Horizontal displacement



(c) Acceleration

Fig. 14. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 2)

지점에서 침하량이 거의 동일하지만 이는 지진파의 주거나 진폭 등이 달라질 경우 다른 거동을 보일 것으로 판단된다. N1과 N2의 침하량은 약 17cm이고 수평변위는 거의 발생하지 않았다.

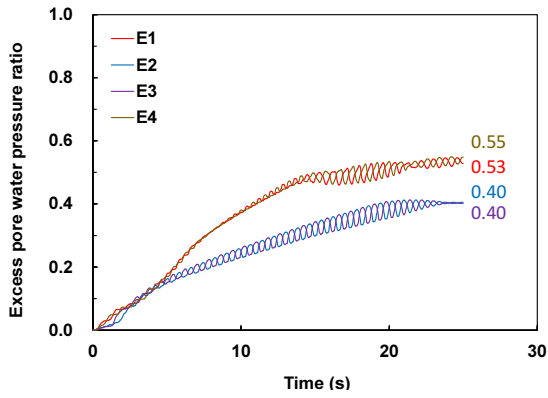


Fig. 15. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 2)

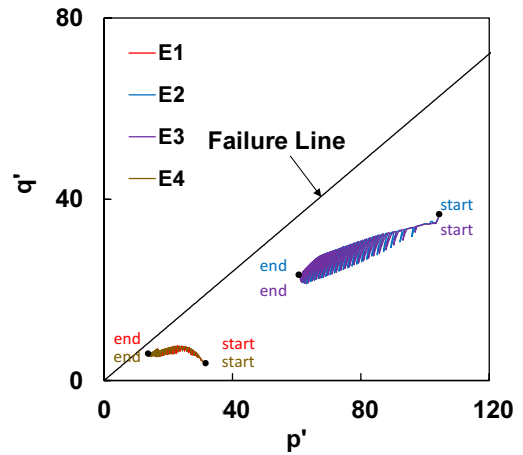


Fig. 17. Effective stress path in elements (Case 2)

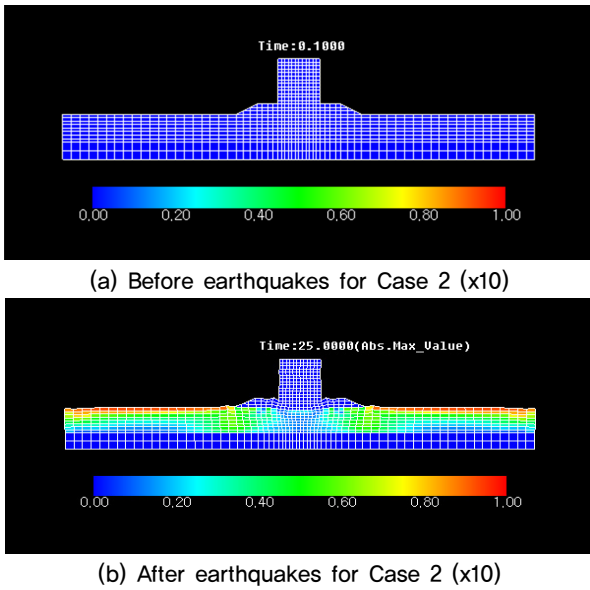


Fig. 16. Distribution of excess pore water ratio and displacement (Case 2)

Fig. 15는 Case 2의 과잉간극수압비의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 대칭되는 지점인 E1과 E4, E2와 E3 지점에서 그래프의 형상이 거의 유사하며, 이는 앞서 언급했듯이 단면이 대칭이고 Sin파의 특성에 의한 것으로 판단된다. 과잉간극수압비는 최대 약 0.55로 액상화 발생 경향이 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 Case 2의 전체적인 과잉간극수압비의 분포 및 변위를 나타낸 그림이다. 변위가 잘 나타나도록 스케일을 10배로 하였다. 과잉간극수압비의 분포와 크기가 좌우 대칭으로 발생하였고 수평변위는 거의 발생하지 않고 침하만 발생한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17은 Case 2의 유효응력경로를 나타낸 그래프이다. 과잉간극수압비의 그래프와 마찬가지로 대칭되는 지점에서 그래프의 형상이 거의 유사하고 4개의 지점 모두 과잉간극수압의 증가에 따라 파괴포락선에 근접한다.

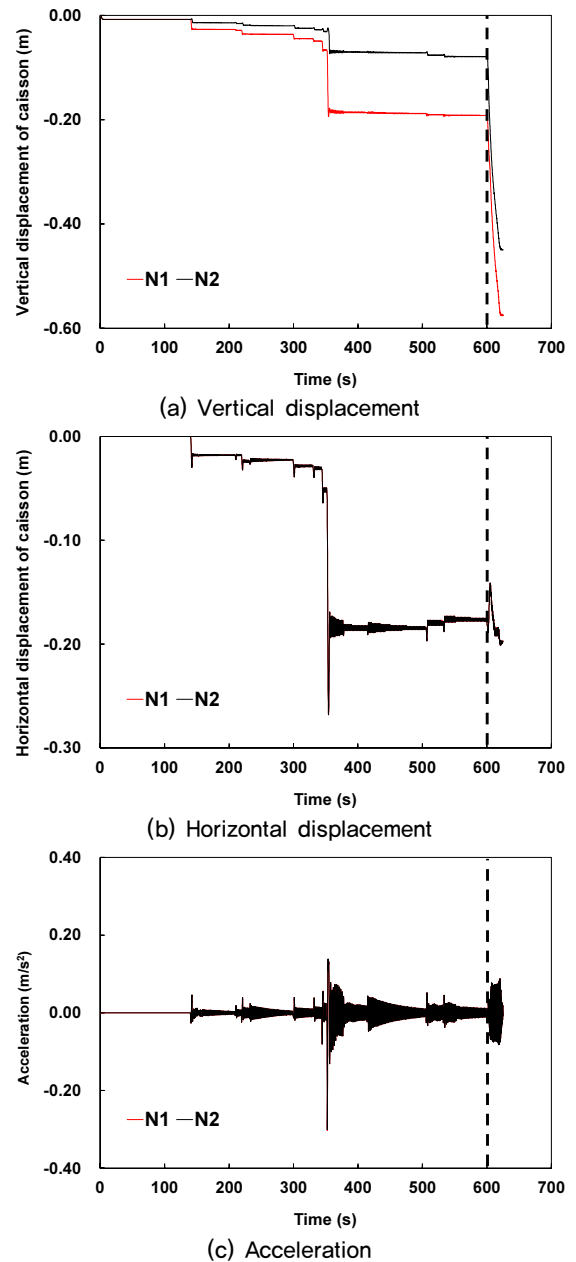
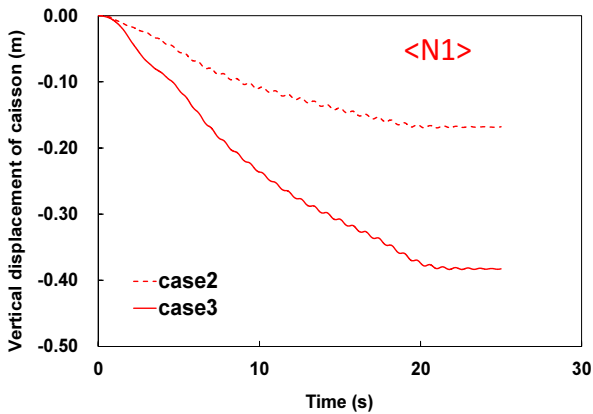


Fig. 18. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 3)

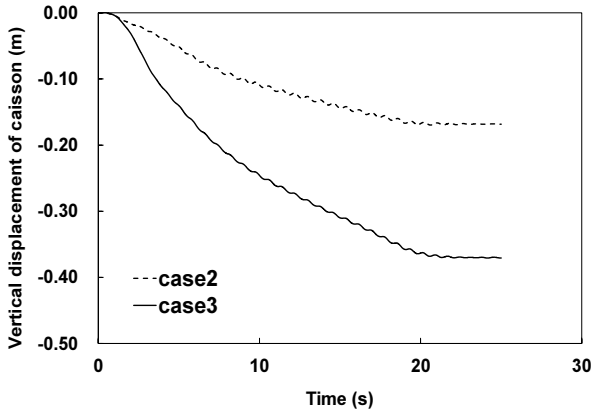


### 4.3 Case 3(파랑하중→지진파)

Fig. 18은 파랑하중 이후 지진파를 적용한 Case 3의 변위 및 응답가속도를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 점선은 파랑하중이 끝나고 지진파가 시작되는 시점이다. N1은 약 57cm, N2는 약 45cm 침하하였다. 수평변위는 약 20cm 발생하였다.



(a) Vertical displacement of N1



(b) Vertical displacement of N1

Fig. 19. Comparison of vertical displacement of caisson (Case 2 and Case 3)

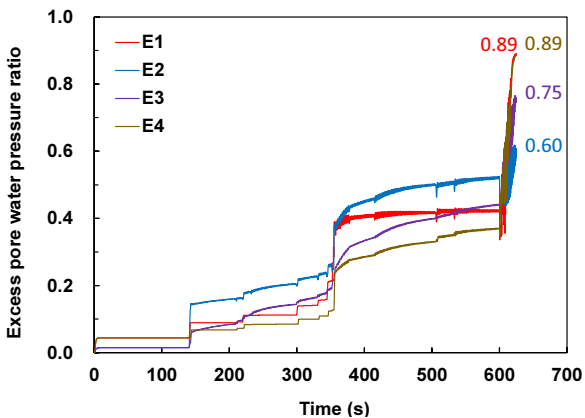
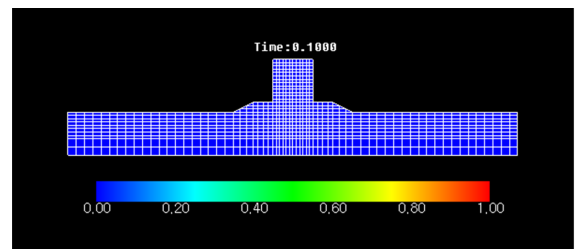


Fig. 20. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 3)

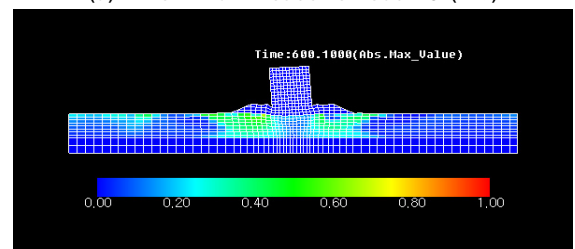
Fig. 19는 Case 2에서 지진파에 의한 침하량과 Case 3에서 파랑하중 이후 지반의 강도가 저하된 상태에서 지진파를 작용하였을 때 발생한 침하량을 비교한 것이다. Case 3의 경우 이미 파랑하중으로 인해 지반의 강도가 저하된 상태에서 지진파를 작용하였기 때문에 침하량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 지진파에 의한 침하량은 N1이 Case 2에서 17cm, Case 3에서 38cm이고, N2는 Case 2에서 17cm, Case 3에서 37cm로 N1과 N2 모두 약 2.2배 증가하였다.

Fig. 20은 Case 3의 과잉간극수압비의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. E1과 E4 지점의 과잉간극수압비가 0.89로 거의 액상화에 근접한 것을 확인할 수 있다. E2와 E3 지점 역시 0.75, 0.60으로 Case 1과 Case 2에 비해 증가하였다.

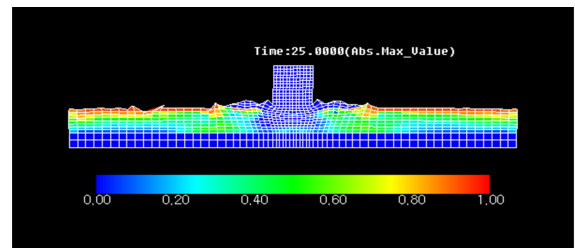
Fig. 21은 Case 3의 전체적인 과잉간극수압비의 분포 및 변위를 나타낸 그림이며 스케일은 10배로 나타내었다. 다만, Fig. 20(c)는 파랑하중 이후 지진파에 의한 과잉간극수압비의 분포 및 변위만을 나타내는 그림으로 경향성만을 나타낸다. Case 1과 Case 2의 결과와 태풍과 지진을 연계하였을 때 달리 항외측 해저지반에서 변형이 일어난 것을 확인할 수 있다.



(a) Before wave loads for Case 3 (x10)



(b) After wave loads for Case 3 (x10)



(c) After earthquakes for Case 3 (x10)

Fig. 21. Distribution of excess pore water ratio and displacement (Case 3)

Fig. 22는 Case 3의 유효응력경로를 나타낸 그래프이다. E1, E2, E3, E4 지점 모두 Case 1과 Case 2에 비해 파괴포락선에 근접하며, 특히 과잉간극수압비가 0.89인 E1과 E4 지점의 유효응력경로는 상당히 근접한 것을 확인할 수 있다.

#### 4.4 Case 4(지진파→파랑하중)

Fig. 23은 지진파 이후 파랑하중 까지 적용한 Case 4의 변위 및 응답가속도를 그래프로 나타낸 것이다. 점선은 지진파가 끝나고 파랑하중이 시작되는 시점이다. N1의 침하량은 약 48cm, N2는 약 34cm이다. Case 3에 비해 침하량이 적게 발생하였다. 이는 Case 3과 Case 4의 응답가속도를 확인하였을 때 파랑하중이 가장 크게 작용하는 시점을 제외하면 지진파에 의한 응답이 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있으며, 지진파 이후 작은 파랑하중에는 지반이 어느정도 저항하는 것으로 보이며 이로 인해 Case 3에 비해 Case4에서 침하량이 적게 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 24는 Case 1에서 파랑하중에 의한 침하량과 Case 4에서 지진파 이후 지반의 강도가 저하된 상태에서 파랑하중을 작용하였을 때 발생한 침하량을 비교한 것이다. Case 3과 마찬가지로 이미 지반의 강도가 저하된 상태에서 하중을 작용하였기 때문에 침하량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 파랑하중에 의한 침하량은 N1이 Case 1에서 19cm, Case 4에서 31cm로 약 1.6배 증가하였고 N2는 Case 1에서 8cm, Case 4에서 17cm로 약 2.1배 증가하였다.

Fig. 25는 Case 4의 과잉간극수압비의 그래프를 나타낸 것이다. Case 1과 Case 2에 비해 과잉간극수압비 많이 발생하였지만 Case 3보다는 적게 발생하였으며, 최대 약 0.64로 액상화 발생 경향이 크진 않다. 앞서 언급했듯이 지진파 이후에 작은 파랑하중에는 지반이 어느정도 저항하며 그로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 26은 Case 4의 전체적인 과잉간극수압비의 분포 및 변위를 나타낸 그림이며, Fig. 25(c)는 지진파 이후 파랑하중에 의한 과잉간극수압비의 분포 및 변위만을 나타내는 그림으로 경향성만을 나타낸다. Case 4의 경우 항외측 해저지반의 변형이 다소 크게 발생하여 원스케일로 나타내었다. Case3과 마찬가지로 해저지반의 변형을 확인할 수 있다.

Fig. 27은 Case 4의 유효응력경로를 나타낸 그래프이다. Case 1과 Case 2에 비해서는 파괴포락선에 근접하였지만 Case 3에 비해서는 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다.

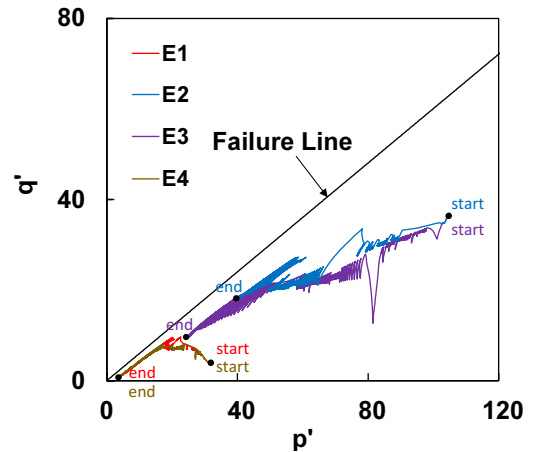
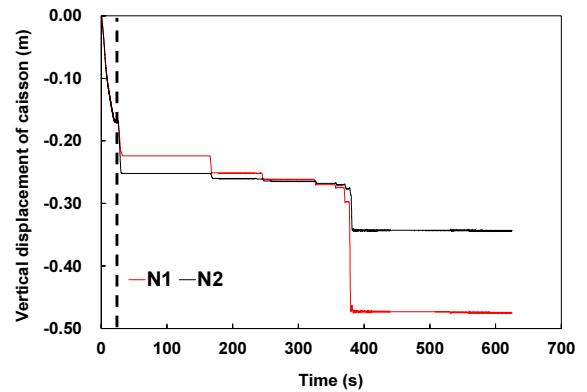
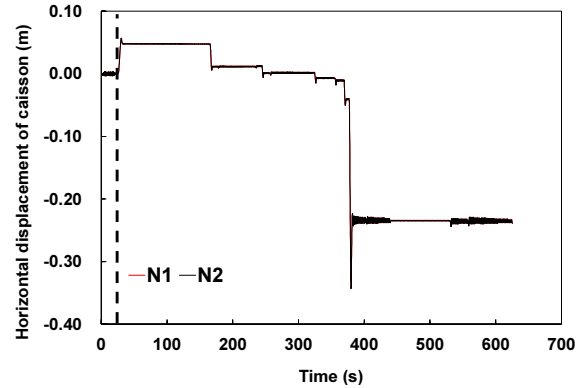


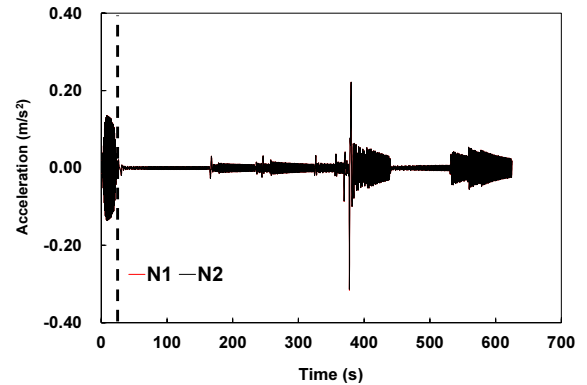
Fig. 22. Effective stress path in elements (Case 3)



(a) Vertical displacement

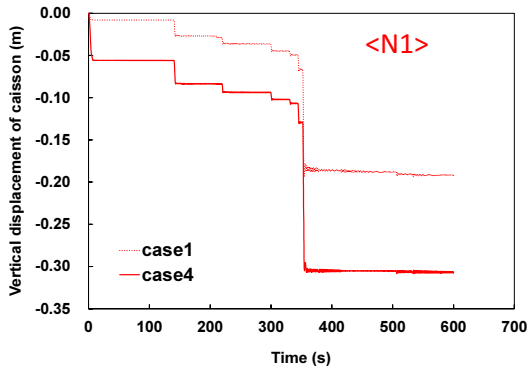


(b) Horizontal displacement

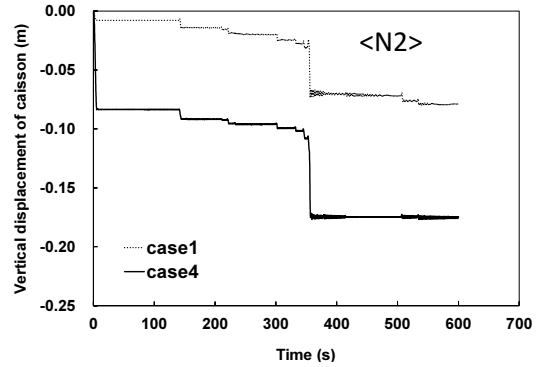


(c) Acceleration

Fig. 23. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 4)



(a) Vertical displacement of N1



(b) Vertical displacement of N1

Fig. 24. Comparison of vertical displacement of caisson (Case 1 and Case 4)

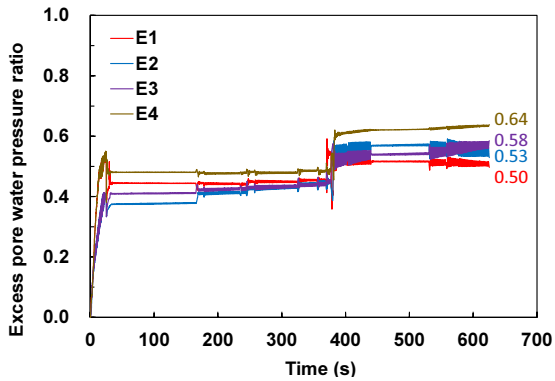


Fig. 25. Excess pore water pressure ratio in elements (Case 4)

## 5. 결론

본 연구에서는 케이슨식 방파제에 대해 태풍과 지진을 연계하여 총 4가지 Case에 대해 수치해석을 수행하여 구조물 및 해저지반의 동적거동을 파악하고 비교해 보았다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 파랑하중과 지진파를 적용하였을 때 과잉간극수압이 증가하고 이로 인해 지반의 유효응력이 감소되어 유효응력경로가 파괴포락선에 근접하며 지반의 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있다.
- (2) Case 3(파랑하중→지진파)에서 파랑하중으로 인해 지반의 강도가 저하된 상태에서 지진파를 적용하였을 때 지진파에 의한 침하량은 N1이 38cm, N2가 37cm로 Case 2(지진파)의 침하량(17cm)에 비해 N1과 N2 모두 약 2.2배 증가하였다.
- (3) Case 4(지진파→파랑하중)에서 지진파로 인해 지반의 강도가 저하된 상태에서 파랑하중을 적용하였을 때 파랑하중에 의한 침하량은 N1이 31cm, N2가 17cm이고 Case 1에서 파랑하중에 의한 침하량은 N1이 19cm,

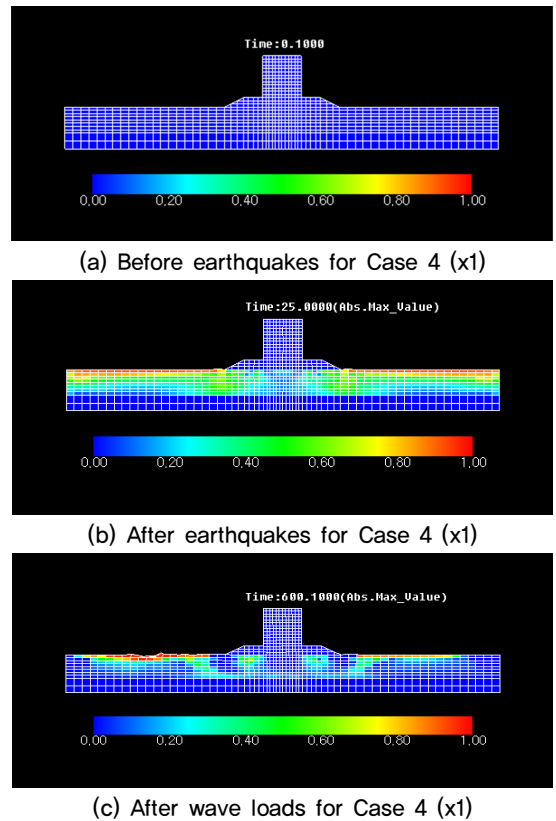


Fig. 26. Distribution of excess pore water ratio and displacement (Case 4)

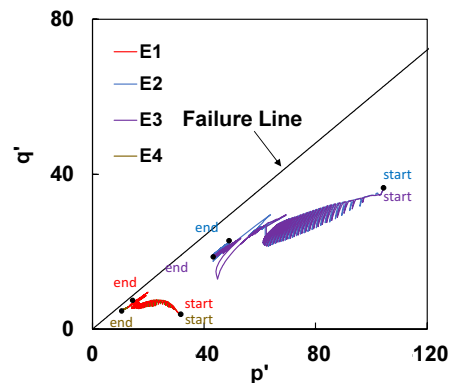


Fig. 27. Effective stress path in elements (Case 4)

N2가 8cm로 각각 1.6배, 2.1배 증가하였다.

- (4) Case 3(파랑하중→지진파)에서 피해가 가장 컸으며, 이는 Case 3에서 과잉간극수압이 가장 크게 발생하였으며, 그에 따른 지반의 강도 저하에 의한 것으로 판단된다.
- (5) Case 4(지진파→파랑하중)는 Case 3에 비해 피해가 다소 적게 발생하였으며 이는 지진파 이후 작은 파랑하중에는 지반이 어느 정도 저항하는 것으로 판단된다.
- (6) 파랑하중과 지진파를 연계할 경우 과잉간극수압이 발생하여 지반의 강도가 저하된 상태에서 추가적으로 하중이 가해져 단일하중을 가한 Case에 비해 각 하중에 대한 피해가 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 파랑하중 이후 지진이 발생하였을 때 피해가 가장 컸지만 이는 파랑하중과 지진파의 강도에 따라 달라질 것으로 보이며, 향후 파랑하중과 지진파의 강도를 다양하게 적용하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 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-2020R111A 3067248).

### References

1. Chang, B. W., Do, D. H. and Song, C. S. (1993), "Evaluation Wave-Induced Liquefaction in Seabed", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.9, No.4, pp.17-26.
2. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992a), "Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations", *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.32, No.2, pp.1-15.
3. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992b), "Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, Soils and Foundations", *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.32, No.2, pp.16-20.
4. Kang, G. C., Yun, S. K., Kim, T. H. and Kim, D. S. (2013), "Numerical Analysis on Settlement Behavior of Seabed Sand-Coastal Structure Subjected to Wave Loads", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.25, No.1, pp.20-27.
5. Kim, I. S. (2014), "Settlement of Breakwater constructed on Sand ground due to wave-load induced by Storm Surge in Jeju harbo", *Cheju Natuinal University*, doctoral thesis.
6. Lee, K. H., Beom, S. S., Kim, D. S., Park, J. B. and An, S. W. (2012a), "A Study on the Control of Short-period Waves by Resonator", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.24, No.1, pp.36-47.
7. Lee, K. H., Park, J. H. and Kim, D. S. (2012b), "Numerical simulation of irregular airflow within wave power converter using OWC by action of 3-dimensional irregular waves", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.24, No.3, pp.189-202.
8. Towhata, I. and Ishihara, K. (1985), "Modeling soil behavior under principal stress axes rotation", *Proceeding of the Fifth Inema-tional Conference on Numerical Method in Geomechanics*, Vol.1, pp.523-530.