

RESEARCH ARTICLE

## 지진시 항만 방파제의 내진보강 성능에 관한 해석적 검증

권이혁<sup>1</sup> · 서혁<sup>2</sup> · 김대현<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 토목공학과 박사과정, <sup>2</sup>조선대학교 토목공학과 박사후연구원, <sup>3</sup>조선대학교 토목공학과 교수

## Analytical Verification of Seismic Reinforcement Effect of Port Breakwater during Earthquake

Yihyuk Kwon<sup>1</sup> · Hyeok Seo<sup>2</sup> · Daehyeon Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduated Student, Department of Civil Engineering, Chosun University

<sup>2</sup>Postdoctoral Researcher, Department of Civil Engineering, Chosun University

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

### Abstract

As large-scale earthquakes have occurred in Korea and their aftermath continues to be felt, laws and regulations on seismic design have been emphasized, and in Korea, the seismic design standards have been newly revised after the Gyeongju earthquake. In the revised seismic design standards, a stability review for the destruction of the support activity of the breakwater was newly added. Therefore, in this study, we conducted a stability analysis on the seismic reinforcement method for the study site, and checked the ground acceleration of the subgrade and the displacement of the structure over time. As a result of the stability analysis, the safety factor increased by at least 0.5 and up to 1.7. As a result of the time history analysis, the displacement of the superstructure decreased by up to 290 mm and down to 12 mm in both the shallow and deep sections before and after reinforcement, and the ground acceleration decreased by up to 5.33 m/s and down to 0.31 m/s after reinforcement.

**Keywords:** post breakwater, numerical analysis, safety factor, soft ground, seismic design

### 초록

국내에 대규모 지진이 발생하고 그로인한 여파가 지속됨에 따라 내진설계에 대한 법령이 강조되어 국내의 경우 경주지진 이후 내진설계기준이 새롭게 개정되었다. 개정된 내진 설계기준에서는 방파제의 원호 활동파괴에 대한 안정성 검토가 새롭게 추가되었다. 이에 본 연구에서는 내진보강공법이 반영된 연구대 상지반에 대하여 원호활동 파괴에 대한 안정성 검토를 수행하였으며, 시간이력에 따른 하부지반의 지반 가속도와 구조물의 변위를 확인하고자 하였다. 원호활동 안정성 검토 결과, 안전율이 최소 0.5~최대 1.7 이상 증가하였다. 시간이력해석 결과, 얕은구간과 깊은구간에서 모두 보강전·후에 따른 상부구조물의 변위 값이 최대 290 mm~최소 12 mm까지 감소하였으며, 지반가속도의 경우 보강 후 최대 5.33 m/s~최소 0.31 m/s까지 감소하는 경향을 확인하였다.

 OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Daehyeon Kim  
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 19 October, 2023

Revised: 18 December, 2023

Accepted: 21 December, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**주요어:** 방파제, 수치해석, 안전율, 연약지반, 내진설계

## 서론

### 연구의 배경 및 목적

최근에는 대한민국도 지진의 안전지대라고 할 수 없을 정도로 많은 지진이 발생하였는데, 기상청에 따르면 가장 규모가 커던 지진은 2016년 9월 12일 경북 경주시 남서쪽 8.7 km에서 발생한 규모 5.8의 지진이다. 해안인근 지진의 경우 2021년 12월 14일 오후 5시 19분 제주 서귀포시 인근 해역에서 일어난 규모 4.9의 지진은 국내 기상관측이 시작된 이후 한반도에서 발생한 지진 중 11번째로 큰 규모이다. 2017년 11월 15일 경북 포항시 북구 북쪽 8 km 지역에서 일어난 규모 5.4의 지진이 그 뒤를 잇는다. 경주 지진규모인 4.9의 지진은 2013년 5월 백령도 남쪽 해역, 2013년 4월 전남 신안군 흑산면 북서쪽 해역, 그보다 앞서 2003년 3월 전남 신안군 흑산면 서북서쪽 해역, 1994년 7월 전남 신안군 흑산면 서북서쪽 해역 등에서 총 4차례 발생했다.

이와 같이 국내에 대규모 지진이 발생하고 그로인한 여파가 지속됨에 따라 내진설계에 대한 법령이 강조되어 국내의 경우 경주지진 이후 내진설계기준이 새롭게 개정되었다. 개정된 내진 설계기준에서는 방파제의 원호활동파괴에 대한 안정성 검토가 새롭게 추가되었다. 이에 본 연구에서는 내진보강공법이 반영된 연구대상지반에 대하여 원호활동 파괴에 대한 안정성 검토를 수행하였으며, 시간이력에 따른 하부지반의 지반가속도와 구조물의 변위를 확인하고자 하였다.

### 선행연구 분석

지진에 대한 연구의 시작은 지진 시 지반의 흔들림의 정도를 나타내는 것으로 시작되었다. 지진의 크기를 분류하기 위해서 처음으로 지표상에서 지진에 의해 흔들리는 정도를 인간이나, 물체가 감지한 정도에 따라 정수로 나타낸 진도를 사용하였다. Richter(1935)는 지진의 크기를 지진규모로 정의하였고, Gutenberg and Richter(1956)가 표면파 지진규모를 제안하였다. Kanamori(1977)는 지진의 모멘트 규모를 제안하였으며, Gutenberg and Richter(1956)는 지진의 세기를 표면파 규모를 이용하여 각각 지진규모에 따른 에너지를 구하는 식을 제안하였다. Ghalandarzadeh(1997)는 중력식 안벽구조물의 지진진동에 대한 파괴양상을 미끄러짐 파괴, 회전파괴, 전도파괴의 3가지 형태로 규정하고, 파괴는 한 가지 형태가 아닌 복합적인 형태로 일어나고 있음을 연구하였다. 세굴과 관련된 안정성에 관한 연구도 병행되어 왔으며, 사석 방파제의 제두부에서의 세굴특성은 Fredsoe and Sumer(1979)에 의해 실험적으로 연구된 바 있다.

국내의 경우 Son(2001)이 사석방파제의 합리적인 설계를 위해 안정성 평가 시 불확실한 요인으로 남아있는 방향성 효과를 분석하여 파괴모드별 안정성에 대한 연구를 수행하였고, Park et al.(2006)이 지반 및 구조물의 내진성능에 대한 다양한 고찰을 위하여 2차원 및 3차원 전응력 해석으로 변위와 응력을 분석하였으며, Lee(2006)는 국내외 적용사례 분석을 통한 심층혼합처리공법(Deep Cement Mixing, 이하 D.C.M)기초의 개량효과에 대해 연구를 수행하였다.

진동대실험을 이용한 해안지역의 연구로 Hwang(2005)은 진동대실험을 이용하여 Hachinohe지진파와 El Centro지진파의 2가지 설계 지진파를 이용하여 진동대 지반 최대 가속도에 0.3~0.9 g 까지 적용하여 콘크리트 댐의 구조적 안정성을 판단하였다. Jeon et al.(2010)은 여러 가지 토목구조물에 대하여 다양한 축소비율로 진동대 실험결과, 전산해석을 실시하여 1:50 이하인 상사단면이 실제 현장에서의 거동을 모사하는데, 더 높은 신뢰성을 제공하는 것으로 판단하였다.

해안구조물의 침하에 대한 연구로는 Ahn and Park(2008)이 파랑하중을 받는 굴착치환 사석경사식 방파제의 침하량 산정과 설계 적용성에 대한 연구를 수행하였고, Kang(2009)은 진동대 실험을 통해 모형토조의 동적거동 특성의 결과를 강널말뚝 인발에 따른 진동 침하의 분석으로 진동의 적용 시간에 따른 지반의 침하량을 예측하였다. Lee(2009)는 파랑에 의한 직립방파제의 거동특성에 관하여 연구하였다.

Lee(2011)와 Kim(2012)은 진동대를 활용한 해안구조물의 기초지반기동과 내진안정성에 관한 연구를 수행한바 있고, Kim(2013)이 모형실험과 수치해석에 의한 방파제의 내진 성능평가에 대한 연구를 수행하였다. Seo(2013)와 Lim(2013), Jeong et al.(2014)이 파랑하중 및 지진규모에 따른 고려한 사석식 경사제와 방파제의 내진특성에 관한 연구를 진행하였으며, Kim(2018)는 원심모형실험과 진동대 실험을 통한 직립식 방파제의 내진안정성 검토에 대한 연구를 수행하였다.

최근에는 Choi(2019)가 직립식 방파제 성능기반 내진설계 개발을 위한 기초연구를 수행하였으며, Nam(2020)은 원심모형실험을 통한 방파제 내진안정성에 대한 연구를 수행하였는데 두 연구 모두 D.C.M 공법을 적용한 결과를 비교·분석하였다. Jeon(2020)은 유효응력을 고려한 동해석에 의한 직립식 방파제의 동적 거동특성에 대하여 분석하였고, 원심모형실험을 이용한 해안구조물 내진안정성에 대한 연구로는 Kim et al.(2022)은 동적원심모형 시험을 이용한 지진 시 방파제의 내진 안정성 검토에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같이 항만구조물의 내진설계에 대한 연구는 여러 분야에서 수행되었으나, 대부분의 수행된 연구는 “항만 및 어항 설계기준(MOF, 2019)”이 개정되기 이전에 연구한 내용으로, 본 연구에서는 개정된 내진설계 기준을 적용하여 연구하였다. 또한, 기존 저유동성 몰탈주입 공법 적용 후 그라우팅 확인방법으로 시추조사를 통한 회수율 80%를 이용하여 적용성을 확인하였으나, 현장여건, 현장상황 등으로 회수율이 불확실한 경우가 많아 문제점이 지속적으로 발생하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 저유동성 몰탈주입 공법 적용 후 그라우팅 확인방법으로 시추조사를 통한 회수율 및 개량체의 압축강도를 분석하였으며, 추가적으로 다운홀 테스트 및 토모그래피로 탄성계수를 확인하여 지반개량 후 연약지반의 보강 증대 효과를 확인하고자 하였다.

## 내진설계기준

1997년 건설교통부와 지진공학회에 의해 제정된 국내 상위개념 내진설계 성능 기준을 2005년 해양수산부에 의해 제정된 “항만 및 어항설계기준”에서 대부분 준용하였으며, 2018년도에 내진설계기준을 일원화하여 “항만 및 어항설계기준”을 개정하고 그 내용은 다음과 같다. 시설물의 내진등급은 시설물의 중요도에 따라서 내진 I 등급, 내진 II 등급 2가지 등급으로 분류된다. 또한 내진등급에 따른 내진 성능수준은 평균재현주기를 갖는 설계지진수준에 대하여 기능수행수준과 봉괴방지수준의 요구성능목표를 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.

항만시설물의 허용변위는 시설물의 운영측면이나, 안전측면이 모두 고려되어 결정되어야 하며, 허용변위량의 대소에 따라 건설비용 등에 큰 영향을 미칠 것이므로 신중하게 검토되어야 한다. 잔교 하부호안구조물의 경우 봉괴방지수준에서의 허용변위는 300 mm (수평방향), 기능수행수준에서의 허용변위는 100 mm (수평방향)로 허용변위를 두고 있다. 또한, 내진 II 등급시설물의 경우는 기본적으로 등가정적 해석법을 원칙으로 하였으므로 시설물의 변위검토는 하지 않으며, 내진 I 등급 시설물의 안전이나, 부재력 검토시 예외조항은 다음과 같다.

중력식 안벽, 널말뚝식 안벽 등이나, 직립식 혹은 혼성식 방파제와 같은 경우는 등가정적 해석법을 허용하며, 잔교식 안벽 등은 동적해석방법을 따른다. 봉괴방지수준 및 기능수행 수준에서의 상재하중(특히 운영하중)은 발생빈도가 상이하므로 달리 적용할 수 있다. 잔교식 안벽과 같이 지진발생 시 구조물이 강제운동으로 보기 어려운 경우는 내진 II 등급 시설물의 경우에도 시설물의 동적거동을 판단하여 설계진도를 결정하는 것이 바람직하다. 재료의 특성에 따른 해석방법을 감안할 때 콘크리트 구조물은 봉괴방지수준의 경우만 검토하여도 시설물의 안전이나, 부재력에 문제가 없는 경우가 발생 가능할 것으로 예상되므로, 기능수행수준에서의 검토를 생략 가능하도록 예외조항을 두었다. 강재시설물은 허용응력 설계법을 원칙으로 하고, 기능수행수준의 경우는 허용응력증가를 감안하며, 봉괴방지 수준은 연성계수를 적용하여 부재력을

검토한다.

## 수치해석

### 연구대상지역

본 연구에서는 항만 방파제 1개소에 대하여 자유동성몰탈주입공법(Compaction Grouting System, 이하 C.G.S)의 적용 전, 후에 대한 지반의 거동특성을 확인하고자 하였다. 해당 구조물에 대한 등가정적해석을 수행한 후에 복잡한 구조물에 대하여 인공지진 데이터를 활용한 시간이력해석법을 통하여 시간에 따른 지반의 비선형거동을 확인하고자 하였다. 구조물-지반의 상호작용이 필요한 비선형 유한요소해석인 시간이력해석법을 이용하여 보강효과를 확인하였다.

2가지 해석 모두 보강 전, 보강 후와 얕은구간, 깊구간으로 나누어 해석을 수행하였으며, 얕은구간의 경우 대표적인 단면으로 BH-3, 깊은구간의 경우 대표단면으로 BH-1로 분류하였다. 본 연구의 항만 방파제의 상부 구조물 형식은 사석경사제(마루높이 DL.(+) 5.20 m), 하부는 강제치환공법으로 적용하였으며, 하부에 연약 점토층(N값 4 이하)이 4~5 m 잔존하고 있었다. 내진에 취약한 ○○항 방파제의 경우 개정된 내진설계기준(KDS 64 17 00, 2018.03)에 의하여 안정성을 확보하도록 내진보강이 필요하였다. 지반조사 결과를 반영하여 기존 방파제 시설에 대하여 단면을 추정하였으며, 잔류침하층의 깊이에 따라 얕은 구간(BH-3) 및 깊은 구간(BH-1)으로 나누어 검토를 실시하였다.

Fig. 1은 보강 전 현장의 얕은구간과 깊은구간 단면도를 나타낸 것이다.

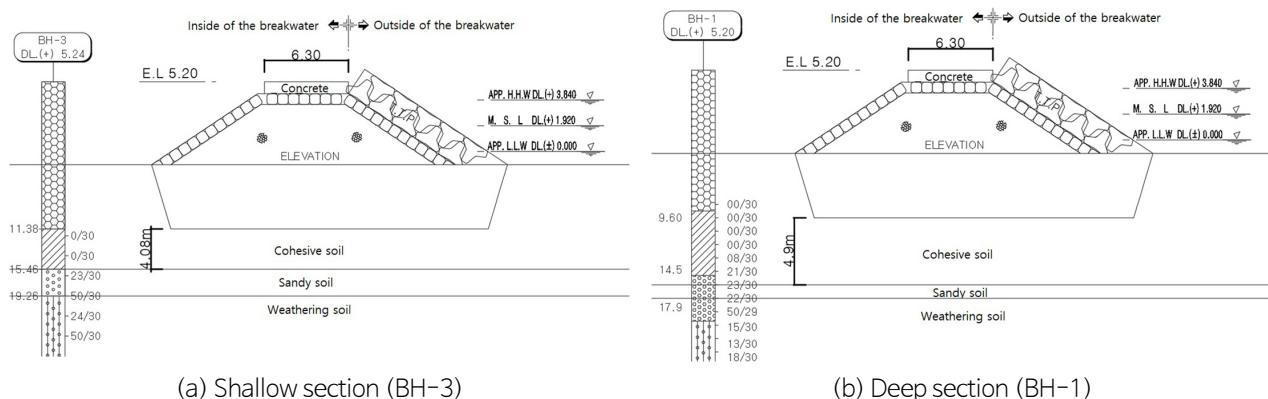


Fig. 1. Review section before reinforcement.

### 원호 활동 검토를 위한 입력데이터

해석에 사용된 지반정수는 다음 Tables 1~3과 같으며, 해석케이스는 보강 전과 보강 후로 나누어 16케이스의 경우로 검토를 수행하였다.

**Table 1.** Material properties value

Classification	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$\nu$	$A_{\max}$ (g)	$k_h$
Cover stone	18.0	10.0	-	40.0	0.30	0.227	0.114
Upper concrete	22.6	12.6	-	-	0.20		

**Table 2.** Ground properties value

Classification	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
Sand	N < 4	20.0	-
	4 ≤ N ≤ 10	20.0	28.4
Cohesive soil	16.5	2.717Z + 0.744	-
Weathering soil	20.0	20.0	30.0
Weathering rock	21.0	30.0	35.0

**Table 3.** Composite ground properties value

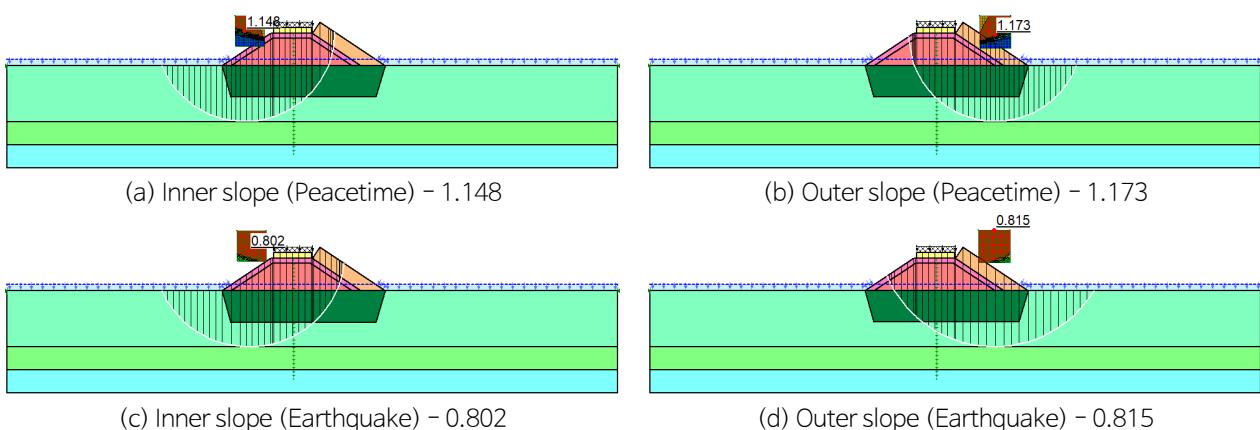
Classification	diameter (mm)	Distance (m)	Replacement ratio (%)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
Cover stone	-	1.5 × 1.5	100.0	20.0	240.0	-
Cohesive soil	800	1.5 × 1.5	22.3	16.5	178.4	-

### 항만 방파제 원호 활동 검토

추정된 단면을 기초로 내진성능평가를 실시한 결과는 다음과 같으며, 해석방법은 Bishop의 간편법을 적용하였다.

해석결과, 얕은 구간 및 깊은 구간에 대해 상시, 지진시, 내측, 외측에 대해 안정성이 확보되지 않는 것으로 검토되었다.

Figs. 2 and 3은 보강 전 방파제의 얕은구간과 깊은구간의 원호활동 검토 결과를 나타낸 것이다.

**Fig. 2.** Review of slope stability in shallow section before reinforcement.

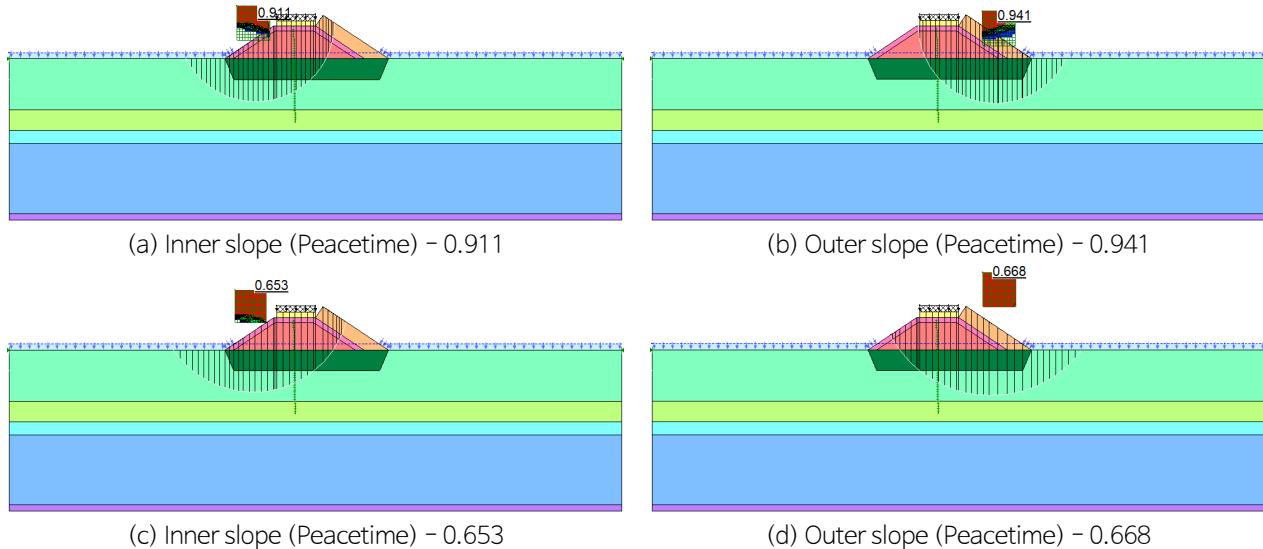


Fig. 3. Review of slope stability in deep section before reinforcement.

### 입력지진파에 따른 시간이력 해석

시간이력해석법은 주로 구조물의 형상과 지반조건이 복잡한 경에 대하여 유사정적해석과 응답변위법에 의한 계산 결과를 확인하거나, 다층지반인 경우 다양한 지진해석을 위하여 사용한다. 시간이력해석법은 구조물 및 주변지반을 적절히 모델링하고 해석대상의 내부 또는 경계면에 시간이력 지진운동을 입력하여 지반 및 구조물의 거동 그리고 지보재에 발생하는 단면력 등을 동적으로 구하는 것이다.

사용 프로그램은 Midas사의 GTX NX를 사용하였으며, 지진파는 장주기파와 단주기파, 인공지진파를 사용하였다.

### 시간이력해석을 위한 입력데이터

시간이력해석법을 시행하고자 모델링의 동적 지반정수를 Table 4와 같이 나타내었다. 지진보강공사 시행전과 후에 실시한 S-PS검증 값을 활용하여 동탄성계수, 동프아송비, 전단탄성계수를 산정하였다. 모델링에서 가장 중요한 감쇠상수

Table 4. Dynamic property value for time history analysis

Classification	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$C_p$	$C_s$	Remarks
Cover stone	246,000	0.421	18	20	-	40	813.962	566.306	M-C
Cover stone replacement interval	268,000	0.418	20	21	240	-	895.088	622.402	M-C
Cohesive soil replacement interval	221,000	0.423	16.5	17.5	178	-	738.893	514.270	M-C
Cohesive soil	63,000	0.448	16.5	17.5	30	-	396.036	276.979	M-C
Sandy soil	371,000	0.414	18	20	-	28.4	998.418	693.743	M-C
Weathering soil	531,000	0.397	20.0	21	20	30.0	1,255.278	869.583	M-C
Weathering rock	1,259,000	0.364	21.0	22.0	30.0	35.0	1,967.677	1,355.752	M-C
bedrock	5,615,000	0.335	23.0	24.0	450	35.0	4,320.293	2,964.353	M-C

$C_p$ ,  $C_s$  및  $\lambda$ (체적탄성계수)는 이론식을 반영하였다.

Fig. 4는 입력지진파를 나타낸 것이다. 입력지진파는 대표적인 장주기파와 단주기파인 Ofunato파와 Hachinohe파를 사용하였으며, 그 외 인공지진파와 국내 발생지진파인 경주와 포항지진파를 사용하였다.

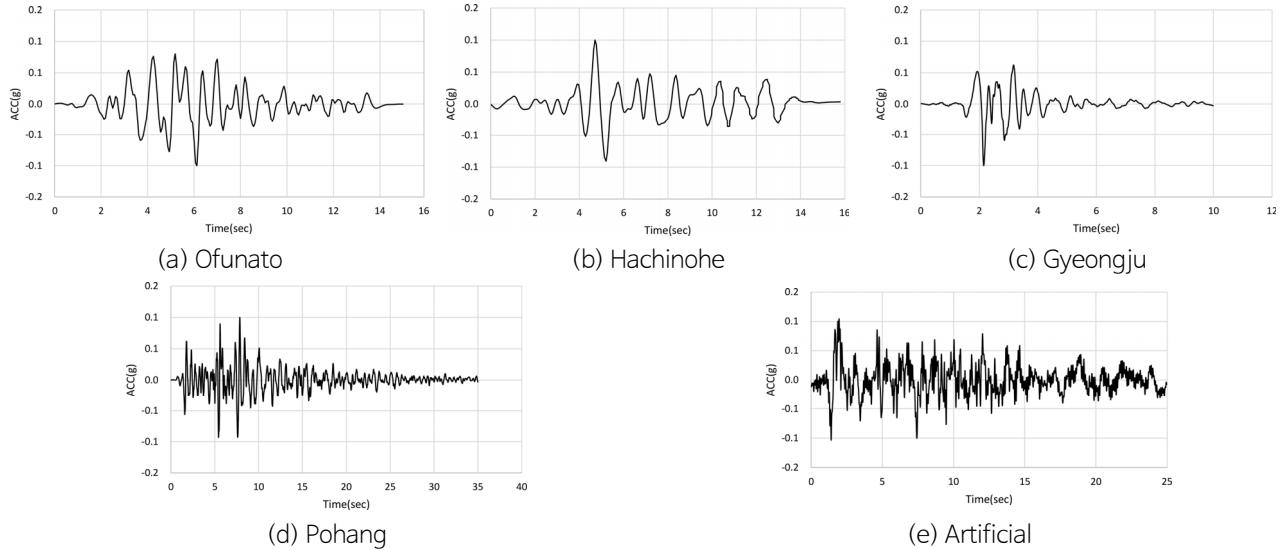


Fig. 4. Input seismic wave.

## 수치해석 결과

### C.G.S 공법 보강 후 단면 검토

Fig. 5는 C.G.S 공법 보강시 각 단면별 주입깊이와 주입량을 산정하기 위한 단면을 나타낸 것이다. 치환사석하부 연약 점토층 구간에 4.0~4.9 m의 주입재를 주입하고자 하였으며, 주입직경과 주입재의 배치는 다음과 같이 반영하였다.

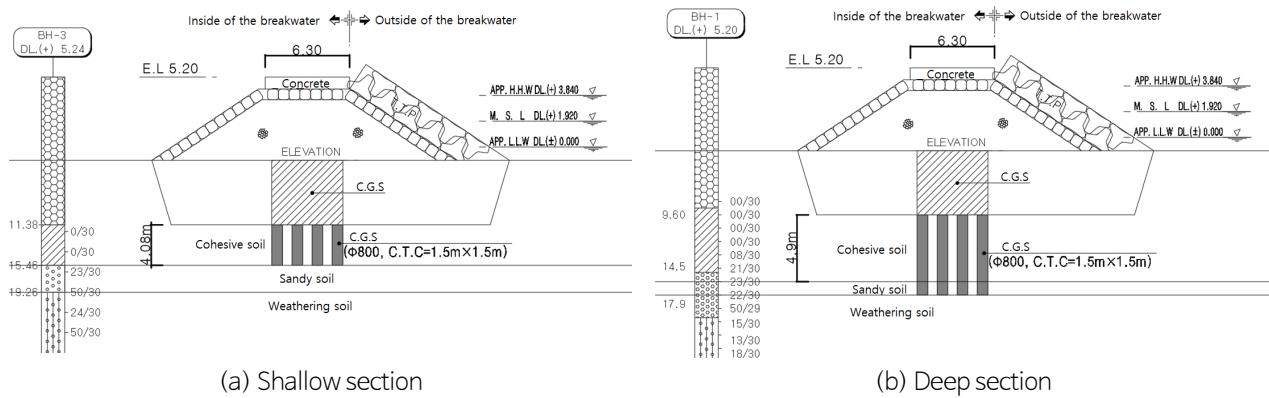
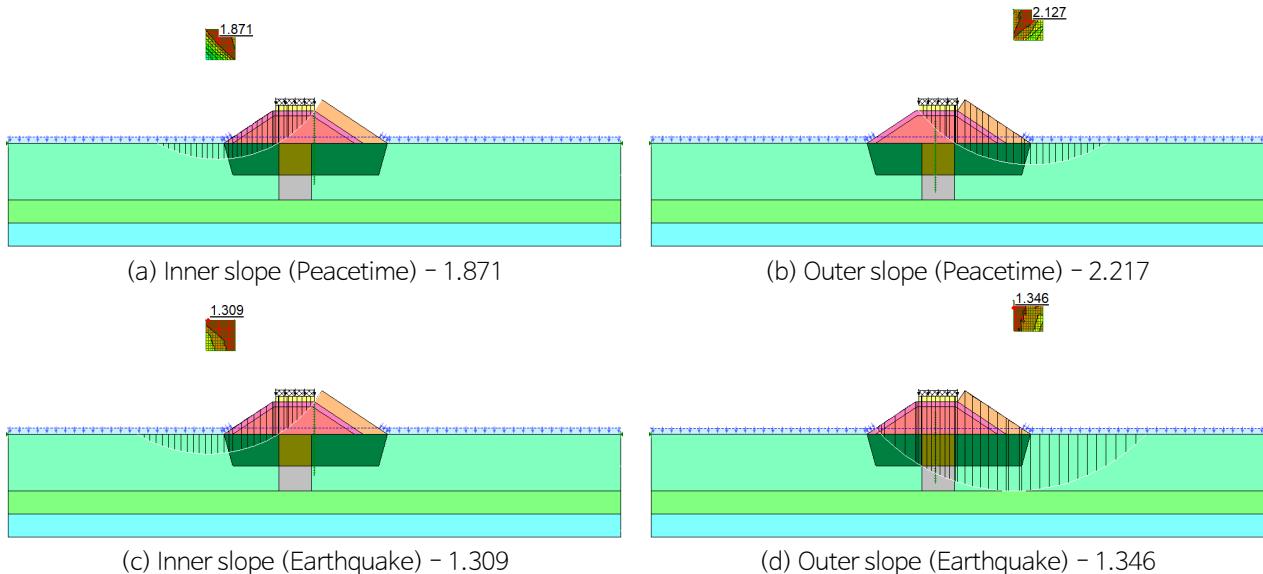


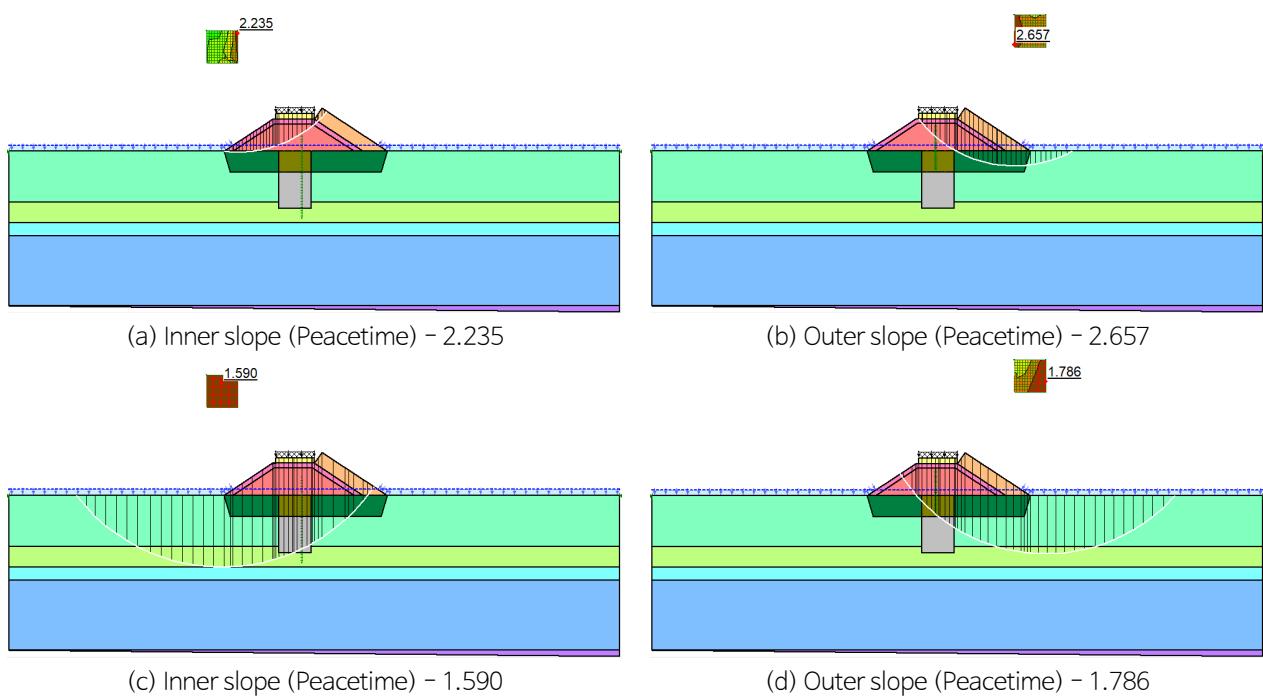
Fig. 5. Review section after reinforcement.

### 항만 방파제 원호 활동 검토 결과

Figs. 6 and 7은 해당 연구대상 시설에 대한 원호 활동 안정성 검토 결과를 나타낸 것이다. 방파제 구간의 원호활동 검토 결과, 얕은구간과 깊은구간 모두 안전율이 증가함을 확인하였다. 얕은구간의 경우 안전율이 최소 0.5~최대 1.0 이상 증가하였고, 깊은구간의 경우 안전율이 최소 0.9~최대 1.7 이상 증가하였다.



**Fig. 6.** Review of slope stability in shallow section after reinforcement.



**Fig. 7.** Review of slope stability in deep section after reinforcement.

Fig. 8은 지반보강재 주입 전, 후의 안전율을 검토 결과를 그래프화 한 것이다. 지반 보강 전에는 기준안전율을 확보하지 못하는 것으로 확인되었으며, 지반 보강 후 전체적으로 안전율이 증대된 것으로 확인되었다.

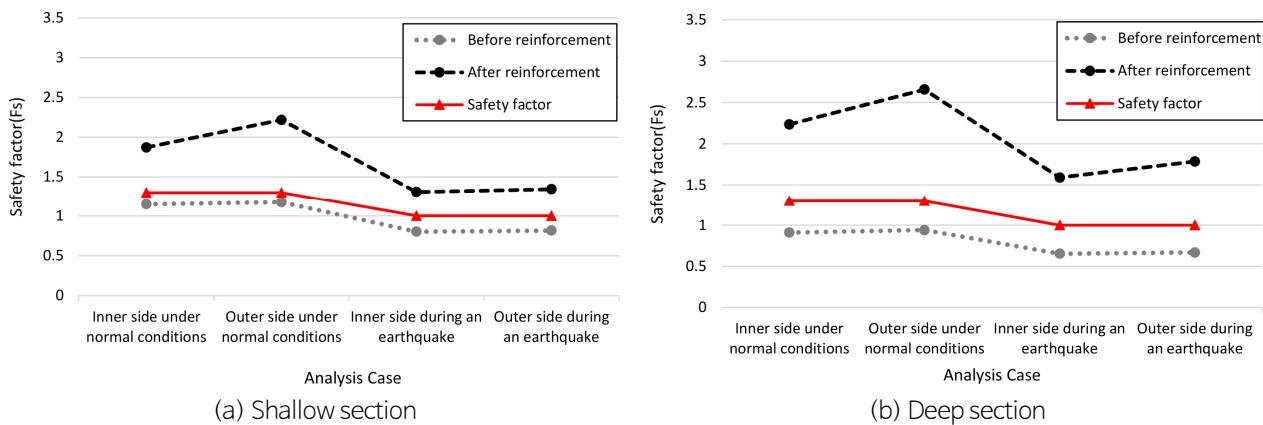


Fig. 8. Review of slope stability in deep section after reinforcement.

### 시간이력해석 결과

지반조건과 사용하중(지진파)를 설정하고 프로그램을 사용하여 모델링을 실시하였다. 모델링은 지반을 유한요소로 나누어서 요소화 하였고, 소일모델의 경우 Mohr-Coulomb모델을 적용하였으며, 각 지반별로 damping 값을 주어서 지반에서 지진하중이 발생하였을 때 움직임을 확인하였다.

경계요소는 스프링 탄성계수를 사용하여 점성경계를 적용하였다. 점성경계는 반무한적으로 확산하는 지반을 유한지반으로서 모델화하는 경우에 지반모델 경계에서 반사파를 흡수시키기 위해 설치하는 경계처리 방법중의 하나로 수치해석시 모든 지반의 유한요소 경계율을 스프링으로 가정하고 감쇠상수를 이용하여 스프링을 생성하였다. 지반의 거동에 따라서 등대, 방파제 등의 움직임을 확인하였고 각 주요 지점별로 변위, 가속도 등의 시간이력 그래프를 생성하여 비교하였다.

### 시간이력해석에 따른 지반가속도 분석 결과

Fig. 9의 경우 얇은구간에서 인공지진파 발생시 지반의 가속도 변화 양상을 확인한 것이다. 해석케이스가 많아 대표적인 해석 단면으로 나타내었고, 그 외 모든 해석단면에 대하여 동일한 방법으로 검토를 수행하였다. 해석의 경우 보강 전, 보강 후, 전체 개체 간주, 보강 후 개별구조물 간주로 나누어 해석을 수행하였으며, 시간이력해석에 따른 지반가속도 분석 결과, 보강 후 지반가속도가 모든 케이스에서 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 지반가속도의 경우 지반의 강성에 반비례하며, 지반의 강성이 증대될수록 감소하는 경향을 나타낸다.

Table 5는 시간이력해석에 따른 모든 구간에 대한 가속도 증폭결과를 나타낸 것이고, Fig. 10은 각 가속도 증폭결과를 그래프화 한 것이다. 장주기파, 단주기파, 인공지진파의 경우 전체적으로 감소하는 경향을 보이나, 그 값이 미미하며, 실지 진파인 경주와 포항지진파의 경우 지반가속도가 최소 7.8%~최대 32.3% 이상 감소하는 경향을 보였다.

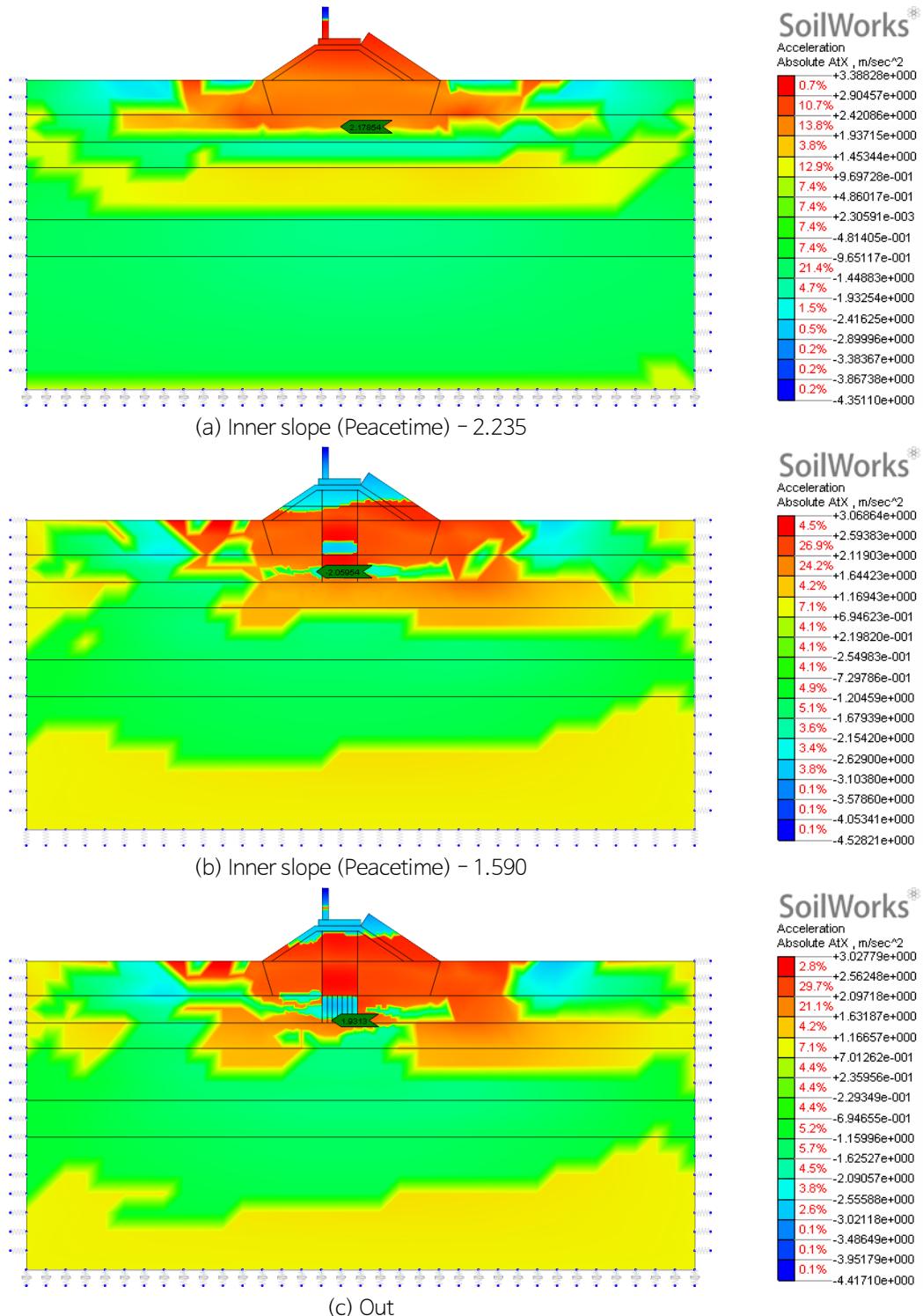
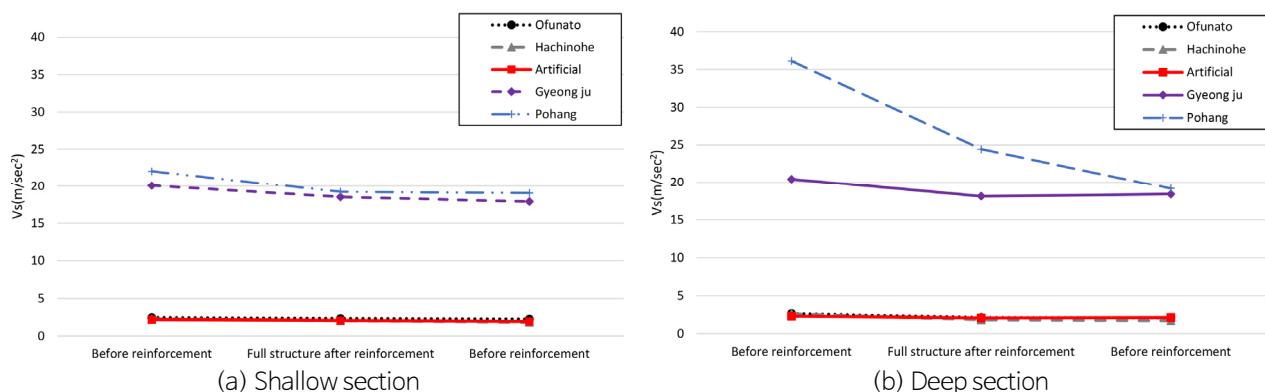


Fig. 9. Review of slope stability in deep section after reinforcement.

**Table 5.** Results of ground acceleration analysis based on time history analysis

Classification	Before reinforcement (m/sec <sup>2</sup> )	Consideration as a reinforced whole after reinforcement (m/sec <sup>2</sup> )	Consideration as individual structures after reinforcement (m/sec <sup>2</sup> )	Decrease rate (%)
Shallow section	Ofunato	2.456	2.328	2.241 -5.2
	Hachinohe	2.268	2.033	1.852 -10.4
	Artificial	2.178	2.059	1.931 -5.5
	Gyng ju	20.063	18.506	17.878 -7.8
	Pohang	22.023	19.206	19.045 -12.8
Deep section	Ofunato	2.643	2.112	2.074 -20.1
	Hachinohe	2.595	1.823	1.7 -29.7
	Artificial	2.29	2.064	2.113 -9.9
	Gyng ju	20.433	18.114	18.39 -11.3
	Pohang	36.125	24.439	19.163 -32.3

**Fig. 10.** Results of ground acceleration analysis based on time history analysis.

### 시간이력해석에 따른 구조물의 변위 분석 결과

Fig. 11은 얇은구간에서 인공지진파 발생시 상부 구조물의 변위를 나타낸 것으로, 지반가속도와 같이 해석케이스가 많아 대표적인 해석 단면으로 나타내었고, 그 외 모든 해석단면에 대하여 동일한 방법으로 검토를 수행하였다. 본 연구에서는 보강 전, 보강 후, 전체 개체 간주, 보강 후 개별구조물 간주로 나누어 해석을 수행하였으며, 시간이력해석에 따른 변위 분석결과, 보강 후 해당 구물의 변위가 모든 케이스에서 전체적으로 감소하는 경향을 보였다.

Table 6은 시간이력해석에 따른 모든 구간에 대한 변위결과를 나타낸 것이고, Fig. 12는 각 구간에서의 변위 결과를 그려포화 한 것이다. 장주기파, 단주기파, 인공지진파의 경우 전체적으로 감소하는 경향을 보이나, 그 값이 미미하며, 실지진 파인 경주와 포항지진파의 경우 변위가 최소 20.0%~최대 35.2% 이상 감소하는 경향을 보였다.

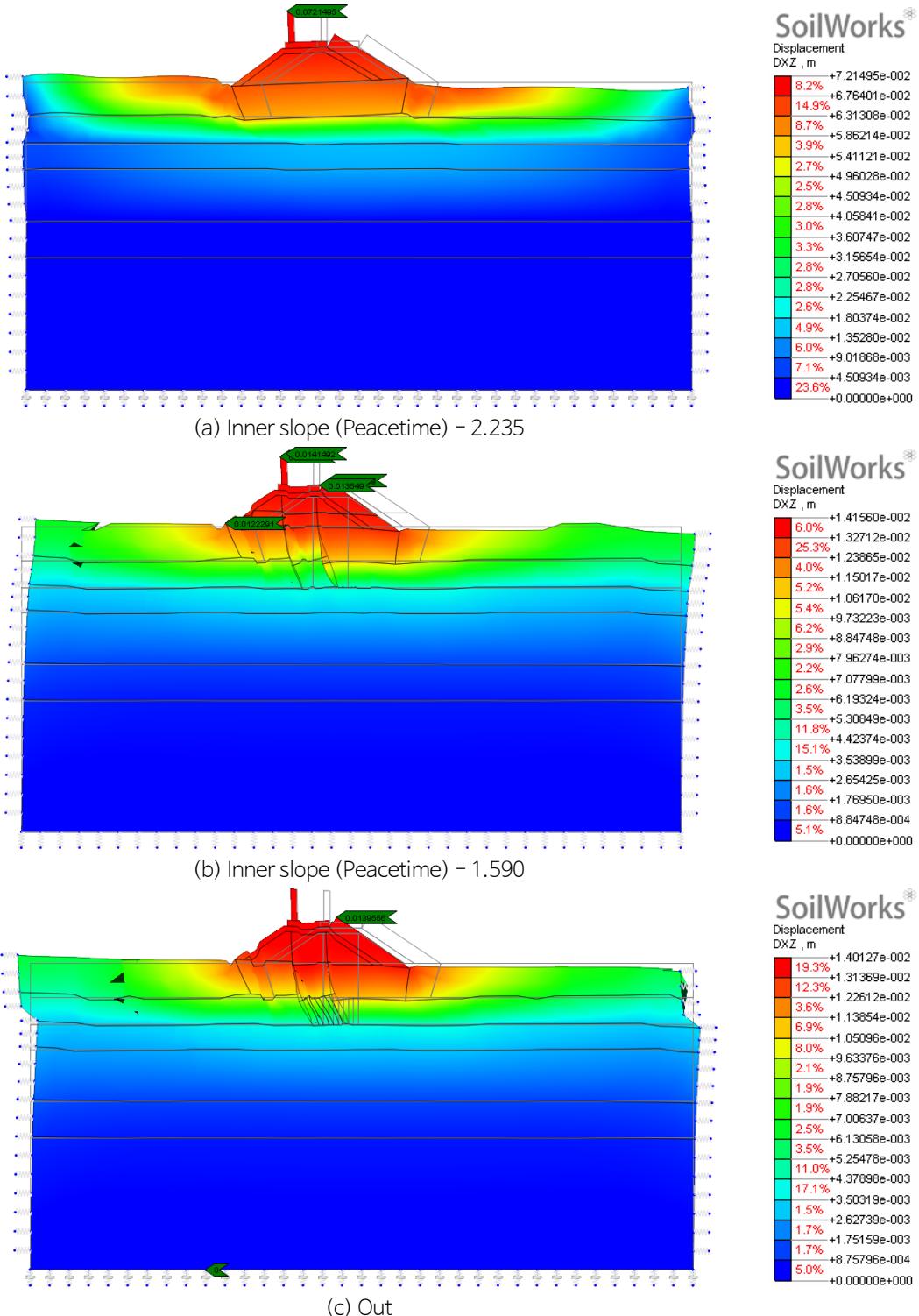
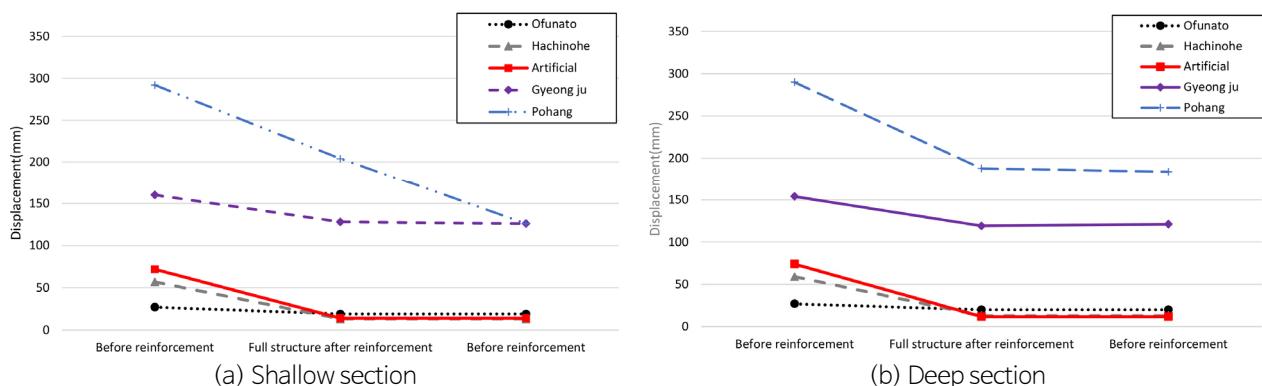


Fig. 11. Review of slope stability in deep section after reinforcement.

**Table 6.** Displacement analysis results of a structure based on time history analysis

Classification		Before reinforcement (mm)	Full structure after reinforcement (mm)	Individual structures after reinforcement (mm)	Decrease rate (%)
Shallow section	Ofunato	27	19	19	-29.6
	Hachinohe	57	13	13	-77.2
	Artificial	72	14	14	-80.6
	Gyng ju	160	128	126	-20.0
	Pohang	292	204	126	-30.1
Deep section	Ofunato	27	20	20	-25.9
	Hachinohe	59	13	13	-78.0
	Artificial	74	12	12	-83.8
	Gyng ju	154	119	121	-22.7
	Pohang	290	188	184	-35.2

**Fig. 12.** Displacement analysis results of a structure based on time history analysis.

## 결론

본 연구에서는 기존 항만 방파제 구조물에 대하여 개정된 내진설계기준을 반영하고자 연약지반개량공법 중 하나인 C.G.S 공법 적용 후 구조물의 원호활동파괴에 대한 안정성을 확인하고자 하였고, 추가로 시간이력해석에 따른 하부지반의 지반가속도와 상부 구조물의 변위를 확인하고자 하였다.

원호활동에 대한 안정성 검토의 경우 보강 전과 후, 주입공법의 깊이에 따라 나누어 해석을 수행하였으며, 각각의 검토 안전율은 기준안전율에 따라 분석을 수행하고자 하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 등가정적해석을 통한 방파제의 원호활동파괴 검토 결과, 얕은구간 내측 및 외측에서 안전율이 최소 0.5~최대 1.0 이상 증가하였고, 깊은구간의 경우 최소 0.9~최대 1.7 이상 증가하였다. 이는 C.G.S 공법 적용을 통한 내진설계의 보강을 통해 기준안전율 이상을 만족한 것으로 판단된다.
- (2) 시간이력해석 결과, 얕은구간과 깊은구간에서 모두 보강전 · 후에 따른 상부구조물의 변위 값이 최대 290 mm~최소 12 mm까지 감소하였으며, 이것은 유사정적해석에서 안전율 개념이 아닌 변위를 기준으로 내진보강 결과를 평

가하는 방법도 검토되어야 할 것으로 판단된다. 현재 변위에 대한 내진보강 기준은 없는 상태이므로 보다 많은 연구 결과를 축적하여 정량적인 변위 정도값을 제시한다면 동적해석인 시간이력해석으로 내진보강 변위를 설정할 수 있는 기초자료가 될 것으로 판단된다.

- (3) 시간이력해석 결과, 보강구간의 지반가속도는 얕은구간과 깊은구간의 보강 전·후의 최대 5.33 m/s~최소 0.31 m/s까지 감소하는 경향을 확인하였다. 지반가속도의 경우 지반의 강성이 증대됨에 따라 감소하는 것이 일반적인 경향으로, 본 연구를 통해 추후 해안구조물에 대한 내진보강에 대한 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- Ahn, I.S., Park, S.K., 2008, Study on assessment of displacement by wave force for rubble mound breakwater and its application to design, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 20(4), 413-420 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.K., 2019, Preliminary study on the development of a performance based design platform of vertical breakwater against seismic activity, Doctoral Thesis, University of Seoul, 1-46 (in Korean with English abstract).
- Fredsoe, J., Sumer, B.M., 1979, Scour at the round head of a rubble-mound breakwater, Coastal Engineering, 29, 231-262.
- Ghalandarzadeh, A., 1997, Shaking table tests on seismic displacement on water-front structures, Ph.D. Thesis, University of Tokyo.
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration, Bulletin of the Seismological Society of America, 46(2), 105-145.
- Hwang, S.C., 2005, A study on the dynamic behavior of concrete dam by shaking table tests, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 15(7), 806-812 (in Korean with English abstract).
- Jeon, N.S., Oh, M.S., Choi, M.J., Im, H.D., 2010, A study on size effect of model test by 1g shaking table test and one-dimensional ground response analysis, Proceedings of the KGS Spring National Conference 2010, Seongnam, 755-758.
- Jeon, S.C., 2020, A study on dynamic behaviour of composite breakwaters based on dynamic analysis considering effective stresses, Master's Thesis, Kangwon University, 1-78 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.H., Lee, K.Y., Lim, C.K., 2014, A study on the breakwater characteristics considering seismic magnitude, Journal of the Korean Geosynthetics Society, 13(1), 71-83 (in Korean with English abstract).
- Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes, Journal of Geophysical Research, 82, 2981-2987.
- Kang, H.H., 2009, Dynamic characteristic of coastal dredged soil through shaking table test, Master's Thesis, Incheon University, 1-62 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.H., 2012, The seismic stability of breakwater armor blocks by shaking table test, Master's Thesis, Suwon University, 1-61 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.H., 2018, The investigation of aseismic stability of upright breakwater by centrifugal model test and shaking table test, Master's Thesis, Hanseo University, 1-66 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.J., 2013, Estimation of aseismic performance of breakwaters by model tests and numerical analysis, Doctoral Thesis, Suwon University, 1-176 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.J., Jang, D.I., Gwak, C.W., Park, I.J., 2022, Seismic stability evaluation of the breakwater using dynamic centrifugal model test, Journal of the Korean Geotechnical Society, 37(6), 39-50 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., 2006, A study on the stability of deep cement mixing foundation using table test, Master Thesis, ChungAng University, 1-70 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.G., 2009, Behavioral characteristics of vertical breakwater by wave action, Doctoral Thesis, Kookmin University,

- 1-354 (in Korean with English abstract).
- Lee, W.H., 2011, Behavior of sea dike and foundation soil under earthquake loading by using shaking table, Master's Thesis, Incheon University, 1-67 (in Korean with English abstract).
- Lim, C.K., 2013, Stability analysis of the structure of breakwater in seismic magnitude, Doctoral Thesis, Pukyong University, 1-143 (in Korean with English abstract).
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2019, Seismic design standard (KDS 64 17 00), 1-83.
- Nam, S.H., 2020, The examination of aseismic stability of breakwater by centrifugal model test, Master's Thesis, Hanseo University, 1-87 (in Korean with English abstract).
- Park, I.J., Kim, S.W., Jang, W.H., Kim, H.T., Yoo, C.H., 2006, Evaluation of aseismic performance for reservoir dams in Korea, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 7(6), 89-100 (in Korean with English abstract).
- Richter, C.F., 1935, An instrumental earthquake magnitude scale, Bulletin of the Seismological Society of America, 25, 1-32.
- Seo, J.H., 2013, A study on the aseismicity characteristic of rubble mound breakwater considering wave loads, Master's Thesis, Suwon University, 1-78 (in Korean with English abstract).
- Son, B.G., 2001, The stability of rubble mound structures under the multi-directional irregular waves, Doctoral Thesis, Pukyong University, 1-188 (in Korean with English abstract).