

방파제의 성능기반 내진설계법

Seismic Performance-Based Design for Breakwater

김 영 준¹ Kim, Young-Jun

박 인 준² Park, Inn-Joon

Abstract

The 1995 Kobe earthquake caused a massive damage to the Port of Kobe. Therefore, it was pointed out that it was impossible to design port structures for Level II (Mw 6.5) earthquakes with quasi-static analysis and Allowable Stress Design methods. In Japan and the United States, where earthquakes are frequent, the most advanced design standards for port facilities are introduced and applied, and the existing seismic design standards have been converted to performance-based design. Since 1999, the Korean Port Seismic Design Act has established a definition of necessary facilities and seismic grades through research on facilities that require seismic design and their seismic grades. It has also established a performance-based seismic design method based on experimental verification. In the performance-based seismic design method of the breakwater proposed in this study, the acceleration time history on the surface of the original ground was subjected to a fast Fourier transform, followed by a filter processing that corrected the frequency characteristics corresponding to the maximum allowable displacement with respect to performance level of the breakwater and the filtered spectrum. The horizontal seismic coefficient for the equivalent static analysis considering the displacement was calculated by inversely transforming (i.e., subjected to an inverse fast Fourier transform) into the acceleration time history and obtaining the maximum acceleration value. In addition, experiments and numerical analysis were performed to verify the performance-based seismic design method of breakwaters suitable for domestic earthquake levels.

요 지

1995년 일본에서 발생한 고베지진으로 인하여 고베항에 대규모 피해가 발생하면서, 기존 내진설계 기준의 문제점이 제기됨에 따라 기존의 유사정적해석 및 허용응력 설계법으로는 Level II(규모 6.5) 수준의 지진에 대하여 항만 구조물 설계가 불가능한 사실이 지적되어 내진설계에 있어서 성능기반 설계법의 필요성이 대두되었다. 지진이 빈번한 일본 및 미국의 경우 항만시설에 대한 가장 선진화된 설계기준을 도입하여 적용하고 있으며, 기존 내진설계기준을 성능기반설계로 전환하였다. 1999년 이후 현재까지 국내 항만내진설계법은 내진설계가 필요한 시설과 이들의 내진등급에 대한 정의가 불명확한 점에 대해 연구를 통해 필요한 시설과 내진등급에 대한 정의를 확립하고 실험적 검증을 바탕으로 국내 실정에 부합한 성능기반 내진설계법을 확립하고 있는 단계이다. 본 연구에서 개발한 방파제의 성능기반 내진설계법은 원지반의 지표면에서의 가속도 시간이력을 고속 푸리에 변환(FFT) 후 방파제의 해당성능수준별 최대허용변위에 대응한 주파수 특성을 보정해주는 필터처리를 하였고, 필터 처리된 스펙트럼을 다시 가속도 시간이력으로 역변

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

2 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 2023년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

환(IFFT) 하여 가속도 최대값을 산정함으로써 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수를 산정하였다. 또한 국내 지진 수준에 맞는 방파제의 성능기반 내진설계법의 검증에 위해서 실험과 수치해석을 수행하였다.

Keywords : Breakwater, Performance based Seismic design, Performance level, Seismic coefficient

1. 서론

1995년 일본 효고현 남부 지진(고베지진)으로 인한 일본 고베항에 대규모 피해가 발생하면서 기존 내진설계(유사정적/허용응력 설계법) 기존의 문제점이 제기되었다. 기존의 유사정적해석 및 허용응력 설계법으로는 고베지진과 같은 Level II수준(강한 지진 운동, 진도 6.5이상)의 지진에 대하여 항만구조물 설계가 불가능한 사실이 지적되었으며, 이로 인하여 내진설계에 있어서 성능기반 설계법의 필요성이 대두되었다(Lee et al., 2018). 이를 계기로 일본을 중심으로 지진이 빈번한 나라에서 항만 내진설계를 지진 시 항만시설물의 요구 성능을 정의하고 성능 확보에 주안점을 주고 있다(Han et al., 2019). 지진이 빈번한 일본 및 미국의 경우 항만시설에 대해서 전 세계적으로 가장 선진화된 설계기준을 도입하여 적용하고 있으며, 2009년 기존 내진설계 기준을 ‘성능기반설계(performance-based design)’로 전환하였다. 국제항해협회(INA, 2001)에서는 구조물의 피해 관점과 기능적 피해 관점을 종합하여 내진 성능목표를 설정하고 그 수준에 맞는 성능기반 내진설계를 실시하도록 하고 있다. 반면에 국내 항만 내진설계 기준은 외국의 설계기준을 준용한 후 국내 실정에 맞는 검증작업이 이뤄지지 않았으며, 내진설계가 필요한 시설과 이들의 내진등급에 대한 정의가 불명확한 점에 대해 연구를 통해 필요한 시설과 내진등급에 대한 정의를 확립하고 실험적 검증을 바탕으로 국내 실정에 부합하는 성능기반 내진설계법을 확립하고 있는 단계이다.

항만 시설물 중 외곽시설인 방파제는 항내로 들어오는 파랑에너지를 반사시켜 항내 진입을 차단하는 용도로 설계되어 왔으며, 지진피해 시 비교적 복구가 용이한 구조형식으로 피해 시에도 항만 이용 등에 현저한 피해를 주지 않는 경우는 내진설계를 수행하지 않을 수 있다는 예외 조항과 적용 내진등급이 II등급이라는 사실에서 알 수 있듯 다른 항만 구조물에 비해 비중 있게 다루어진 것으로 보이지 않는다(Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 1997). 국내 지진 발생이 많

아짐에 따라 방파제의 내진설계에 대해서 내진 성능에 대한 검토가 보완되어야 한다. 이에 방파제도 국내 지진 수준에 맞는 성능기반 내진설계를 도입해야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 국내 지진 수준에 맞는 방파제의 성능기반 내진설계법을 개발하고 실험과 수치해석을 통해 검증작업을 수행하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 국외 성능기반 내진설계 기준

성능기반 내진설계는 1995년 이후에 발생한 다양한 지진피해 사례들을 연구하면서 새롭게 개발되었다. 성능기반 내진설계의 목적은 기존 내진 설계법들의 한계를 극복하기 위함이다. 즉 기존 내진설계는 설계 지진력에 저항할 수 있는 충분한 내력을 확보하도록 설계하는 것이나 한계점을 초과 시 구조물의 성능에 대한 예측이 불가능하다. 만일 내진 한계에 상응하는 내력을 확보하려면 지반운동의 규모가 클 경우 과도한 건설 또는 보강 비용이 발생할 것이고, 또한 설계 지반운동을 초과 시 구조물의 내진성능을 결정하기 어렵다.

일본의 성능기반 내진설계에서는 적절한 설계 지진 운동 수준을 결정하고 그에 상응하는 적절한 구조적 손상 정도를 정의한다. 설계를 위하여 통상 2개의 지진 운동 수준을 다음과 같이 정의한다.

Level 1은 구조물의 설계 수명 이내에 발생 가능한 지진운동 수준을 말하며, Level 2는 발생 가능성이 낮은 매우 심각한 수준의 강한 지진운동 수준을 말한다.

적절한 구조적 손상 정도는 구조물의 사용자 또는 소유자의 요구에 의해서 또는 Table 1과 같이 구조적, 기능적 손상 정도에 따라 결정된다. Table 1에 기술된 구조적 손상은 구조물의 기능을 완전히 복구시키기 위하여 필요한 작업량과 지진으로 인한 직접 손실을 기준으로 결정한다.

기능적 손상은 구조물의 사용성을 완전히 또는 부분적으로 복구시키기 위해 필요한 시간과 비용을 기준으로 결정한다.

Table 1. Acceptable level of damage in performance-based design (International Navigation Association, 2001)

Degree of damage	Structural	Operational
I : Serviceable	Minor or no damage	Little or no loss of serviceability
II : Repairable	Controlled damage	Short-term loss of serviceability
III : Near collapse	Extensive damage in near collapse	Long-term of complete loss of serviceability
IV : Collapse	Complete loss of structure	Complete loss of serviceability

Table 2. Performance grades S, A, B, and C (International Navigation Association, 2001)

Performance grade	Designed earthquake	
	Level 1	Level 2
S	I : Serviceable	I : Serviceable
A	I : Serviceable	II : Repairable
B	I : Serviceable	III : Near collapse
C	II : Repairable	IV : Collapse

Table 3. International seismic design

Design standards/ guidelines	Methodology		Damage Criteria		An interpretation procedure	
	Step 1 or Step 2 Interpretation	Performance Levels (Damage Level)	Breakwater: Displacement	Pile supported pier/peer: ductility/strain limit	Determination of seismic coefficient	Response spectrum
Japan (1997, 1999)	Step 2 : S Step 1 : A, B, C	L1/L2 Application	Displacement, strain	Displacement, coefficient of ductility	Horizontal seismic coefficient	Time History Analysis for L2 (Non-Application of Response Spectrum Analysis)
Spain (2000)	Step 2	L1/L2 Application	No regulations	Ductility factor	seismic coefficient =0.7	Response spectrum
Germany (1996)	Step 1	No regulations	No regulations	No regulations	No regulations	No regulations
United States Navy (1997)	Step 2	L1/L2 Application	Deformation limit	The limit of ductility (Pile)	N/A	Linear or non-linear dynamic analysis
American Society for Civil Engineering (1998)	Step 2	L1/L2 Application	Reflecting the unique characteristics of the site	The limit of ductility (Pile)	Horizontal seismic coefficient	simple method / Response Spectrum Analysis / Time History Analysis
Eurocode (1994)	Step 2	No regulations	No regulations	No regulations	Horizontal seismic coefficient	Response spectrum

설계 지진규모와 적절한 구조적 손상 정도가 결정되었다면 Table 2와 같이 지진에 대응하는 구조물의 적절한 성능 등급 S, A, B, C가 결정되어야 한다. 성능기반 내진 설계에서 구조물은 이러한 성능 등급을 만족시켜야 한다.

국제적으로 내진수준과 내진성능등급은 Table 3과 같이 정리한다.

3. 국내 성능기반 내진설계기준

3.1 항만 및 어항시설의 내진설계기준(해양수산부, 2019)

3.1.1 내진등급

항만시설의 내진등급은 I등급 및 II등급으로 구분하

고, 내진I등급은 시설물이 피해를 입으면 많은 인명과 재산상의 손실 및 심각한 환경오염을 줄 염려가 있는 시설물, 지진재해 복구에 중요한 역할을 담당하는 시설물(지진재해 복구용 시설물), 국방상 필요성에 의하여 분류된 시설물, 지진피해 발생 시 구조물의 복구가 곤란한 시설에 해당 등급으로 간주한다.

내진I등급으로 분류되지 않는 항만시설물은 내진II등급으로 간주하여 내진설계를 수행하는 것을 원칙으로 하고 있다. 단, 항만시설의 내진등급은 시설물의 용도, 구조, 규모 등에 따라서 일률적으로 적용될 성격이 아니며, 시설물의 사회적, 경제적 성격에 따라서도 변화될 수 있으므로 기능측면에서 등급을 구분하였다.

3.1.2 내진성능수준

항만시설의 설계성능수준은 ‘기능수행수준’과 ‘붕괴방지수준’으로 분류하고 있으며, Table 4에 규정한 평균 재현주기를 갖는 설계지반운동에 대하여 각 수준에서 요구하는 성능목표를 만족할 수 있도록 하고 있다.

‘기능수행수준’은 구조물에 심각한 구조적 손상이 발생하지 않고 지진 경과 후에도 구조물의 기능은 정상적으로 유지할 수 있는 성능수준이며, ‘붕괴방지수준’은 구조물에 제한적인 구조적 피해는 발생하나 긴급보수를 통해 단시간에 항만 구조물로서의 기능을 발휘할 수 있는 수준이다.

4. 국내실정에 맞는 방파제의 성능기반 내진설계 제안

본 연구에서 제안하는 성능기반 내진설계법(변위를

고려한 등가정적해석법)은 10m미만의 직립식 방파제에 적용하는 방법이다.

4.1 방파제의 성능기반 내진설계 절차

방파제의 성능기반 내진설계는 설계조건(내진등급, 내진성능수준)을 결정하고, 성능목표(허용변위, 안전율)를 결정한 후 내진성능을 검증하여 설계조건과 성능목표를 만족하는 구조물의 단면을 결정한다.

Fig. 1은 일본의 방파제 내진설계절차(Japanese Ministry of Transport, 2007)를 준용하여 국내실정에 맞게 수정한 내진설계절차 방법이다.

4.1.1 내진등급

방파제의 내진등급은 구조물의 중요도에 따라 ‘내진I등급’과 ‘내진II등급’으로 분류하며, 내진I등급은 지진

Table 4. Seismic design criteria for domestic ports and fishing ports

Seismic performance level	Seismic Class I	Seismic Class II
Performing Functions	Design earthquake reproduction cycle 100 Year	Design earthquake reproduction cycle 50 Year
Collapse Prevention	Design earthquake reproduction cycle 1000 Year	Design earthquake reproduction cycle 500 Year

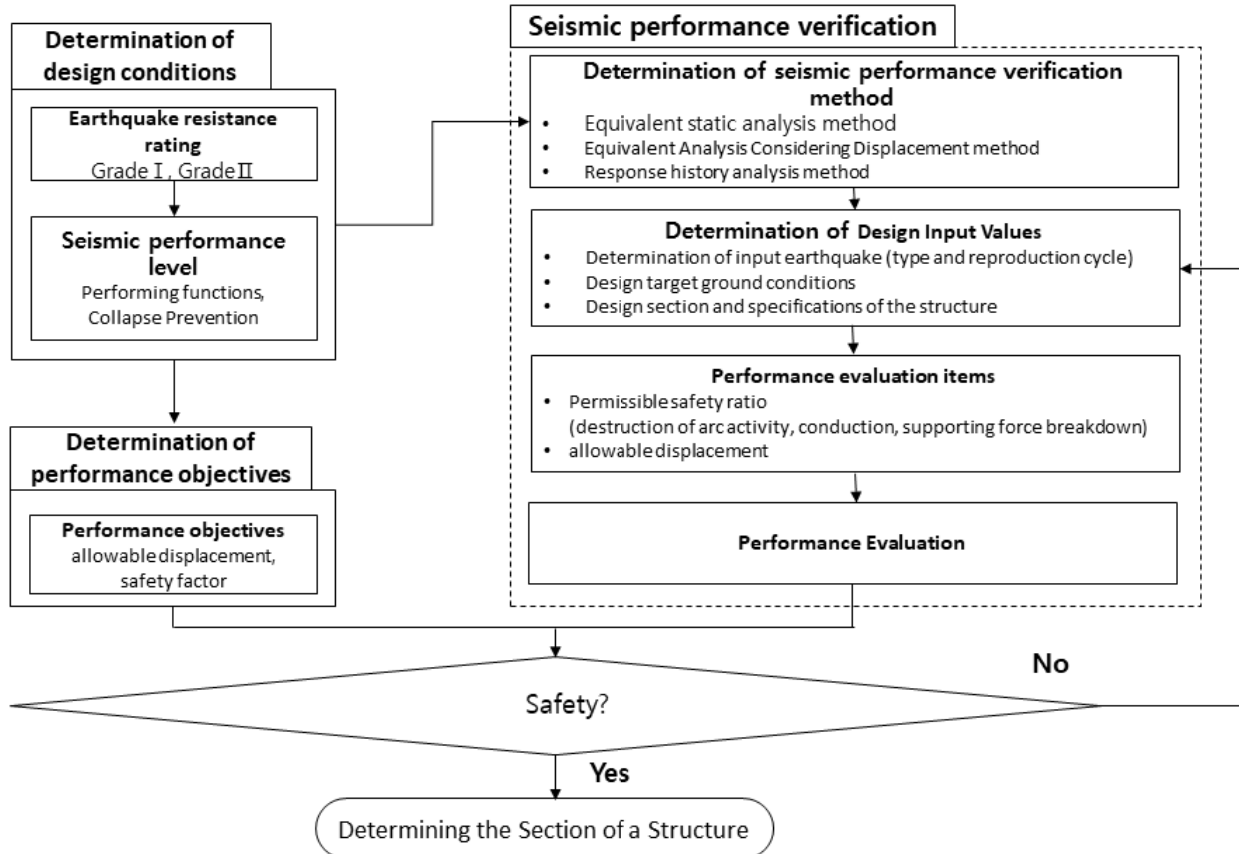


Fig. 1. Seismic design procedure based on performance of breakwater

시 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급을 말하며, 내진II 등급은 지진 시 재난이 크지 않거나 기능이 마비된다면 사회적으로 영향이 크지 않은 시설의 등급을 말한다.

4.1.2 내진성능수준

방파제의 내진성능수준은 ‘기능수행수준’과 ‘붕괴방지수준’으로 구분한다. ‘기능수행수준’은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 경미하여 그 구조물이나 시설물의 기능이 유지될 수 있는 성능수준을 말하며, ‘붕괴방지수준’은 설계지진하중 작용 구조물이나 시설물에 매우 큰 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명 피해를 최소화할 수 있는 성능수준을 말한다.

4.1.3 내진성능목표

내진등급 및 내진성능수준에 따라 결정된 설계지진하중이 방파제에 작용할 경우 내진성능 목표설정은 허용안전율 또는 최대 허용 변위량이다(Table 5).

4.1.4 내진설계

방파제의 내진성능목표 달성여부 검증법으로는 내진등급별 내진성능수준에 따른 등가정적해석법, 변위를 고려한 등가정적해석법과 응답이력해석 등이 있다(Table 6).

일반적으로 방파제의 내진설계에서 수평방향의 하중이 추가됨에 따른 사면의 안정성을 검토해야 하며 특히 활동에 대해 안전해야 한다. 등가정적해석에 기초한 활동의 안정성 검토는 가정된 파괴형상의 도심에 재하한 설계지진하중에 대한 안전율(F_s) 산정을 통해 수행한다 (Fig. 2).

$$F_s = m \times a = \frac{W}{g} \times a = k_h \times W \quad (1)$$

여기서, W 는 파괴면 상부의 토괴중량, g 는 중력가속도, $k_h = 0.5 \frac{a_{max}}{g}$ 는 수평지진계수, a_{max} 는 지표면 최대가속도

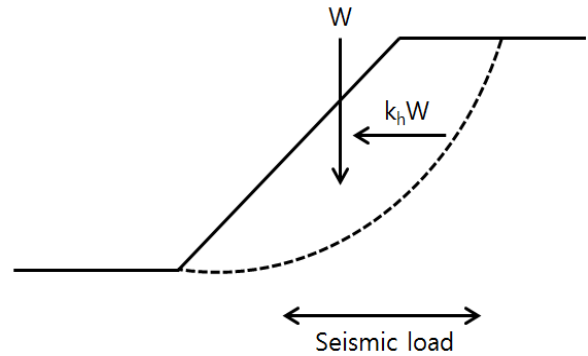


Fig. 2. Equivalent static analysis method

Table 5. Seismic performance levels and objectives of seismic performance by seismic class

Seismic performance level	Earthquake resistance rating	Design earthquake reproduction cycle (Year)	Set earthquake resistance performance targets
Performing Functions	Seismic Class I	100	Permissible safety rate (activity breakdown)
	Seismic Class II	50	
Collapse Prevention	Seismic Class I	1,000	Maximum allowable Displacement : 30cm
	Seismic Class II	500	Acceptable safety factor (Activity, Conduction, Support)

Table 6. Seismic performance verification method by seismic performance level of breakwater

Seismic performance level	Earthquake resistance rating	Design earthquake reproduction cycle (Year)	Seismic performance target verification method		
Performing Functions	Seismic Class I	100	Sloping ceremony		
	Seismic Class II	50	Upright form		
Collapse Prevention	Seismic Class I	1,000	Sloping ceremony		
			Upright form	10m or more	Response history analysis method
				Less than 10m	Equivalent Analysis Considering Displacement
	Seismic Class II	500	Sloping ceremony		
			Upright form	10m or more	Response history analysis method
				Less than 10m	Equivalent Analysis Considering Displacement

4.2 변위를 고려한 등가정적해석을 수행하기 위해서는 수평지진계수(k_{hk})를 산정

변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수 산정은 Fig. 3과 같은 순서로 수행하여 도출한다.

4.2.1 수평지진계수 k_{hk} 산정 개요

기반암에서의 설계지진 가속도 시간이력에 대해 지반조건을 고려한 1차원 지진응답해석을 수행하여 방파제의 기초지반 지표면(원지반의 지표면)에서의 가속도 시간이력을 산정한다. 산정된 가속도 시간이력을 고속푸리에 변환(FFT) 후 방파제의 해당성능수준별 최대허용변위에 대응한 주파수 특성을 보정해주는 필터 처리를 한다. 필터 처리된 스펙트럼을 다시 가속도 시간이력

으로 역변환(IFFT)하여 가속도 최대값 ($a^{f_{max}}$)를 구한다. 끝으로 $a^{f_{max}}$ 을 이용하여 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수(k_{hk})를 구한다.

4.2.2 지반조건인 설정

내진해석용 수평 지진력(진도)의 산정에 있어서는 해당지점의 지반특성을 적절히 반영할 수 있도록 지반조건을 설정할 필요가 있다. 지반증폭해석을 수행할 경우 지반의 단위중량과 같은 정적물성 및 전단파속도, 감쇠비 등의 동적물성을 파악하여 적용하여야 한다. 또한 지반은 변형률 수준에 따라 전단강도가 변화하는 비선형 거동을 보이므로 이를 고려하여 정규화 전단탄성계수 감소특성 및 감쇠비 증가특성을 지반증폭해석에 반영하여야 한다.

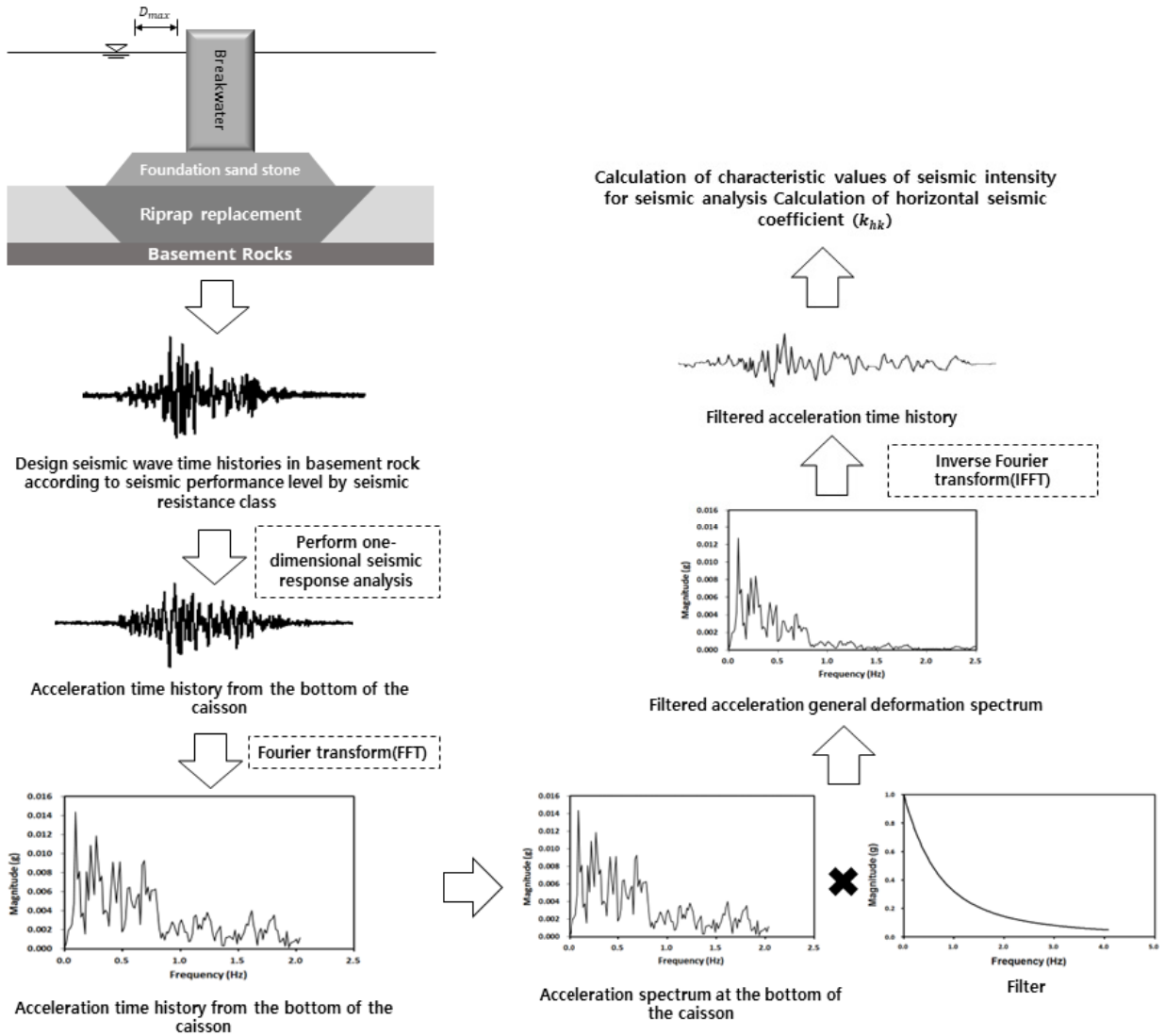


Fig. 3. Procedure for calculating horizontal seismic coefficient for equivalent analysis considering displacement

4.2.3 최대 변형량의 결정

방파제의 내진해석용 수평 지진력(진도)의 산정 시에는 지진동의 주파수 특성이나 반복 작용의 영향으로 인한 변형의 누적 과정이 안벽 등과 다르기때문에 안벽과 같은 잔류 변형량을 사용할 수 없다. 이런 이유로 지진동 중에서 어떤 하나의 지진파가 작용한 경우의 주파수 특성을 반영한 흙 구조물(방파제)의 변형량의 최대치를 최대 변형량으로 정의해 임의의 주파수에서도 일정한 최대 변형량이 얻어지도록 필터를 산정한다. 최대 변형량 D_{max} 와 잔류 변형량의 목표치 D_{res-t} 에는 식 (2)와 같은 관계가 있어 잔류 변형량이 결정되면 최대 변형량을 산정할 수 있다(Japanese Ministry of Transport, 2007).

$$D_{max} = \frac{D_{res-t}}{0.87R_{acc} + 0.44} \quad (2)$$

$$R_{acc} = \frac{|acc_{max} + acc_{min}|}{\max(acc_{max}, |acc_{min}|)} \quad (3)$$

여기서, D_{max} : 최대 변형량(cm)

D_{res-t} : 잔류변형량의 목표치($D_{res-t} = 30cm$: 최대허용변위량)

acc_{max}, acc_{min} : 기초지반 지표면의 가속도 시 각이력의 최대가속도 및 최소가속도 (cm/s^2)

4.2.4 필터의 설정

방파제의 내진성능평가에 이용되는 지진동의 주파수 특성 및 변형량을 고려한 필터는 식 (2)에서 산정된 최대 변형량을 이용해 식 (4)에서 산정할 수 있다.

이 필터는 지반조건 및 수심이 다른 안벽 모델을 이

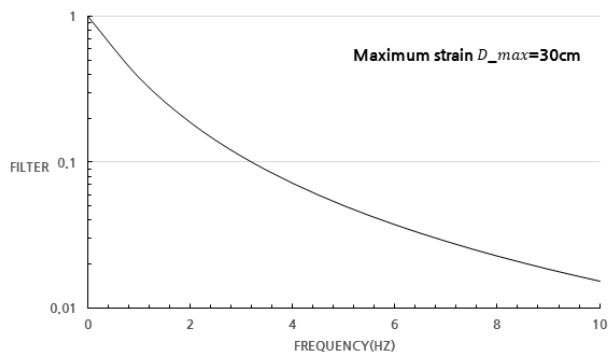


Fig. 4. Filter for calculating horizontal seismic force (seismic) for seismic analysis

용해 복수의 정현파에 대해 실시한 I자유도계의 지진 응답해석결과에서 목표로 하는 방파제 케이슨의 최대 변형량과 케이슨 바닥면에서의 입력 가속도 최대치의 관계를 구한 것으로서 지진파를 구성하는 각 주파수가 방파제의 변형에 대한 기여를 평가한 것이다(Japanese Ministry of Transport, 2007).

Fig. 4는 최대허용변위량이 $D_{res-t} = 30cm$ 인 경우의 필터의 형상을 나타낸다.

$$F = \frac{1}{af^2 + bf + 1} \quad (4)$$

$$a = 0.0178D_{max} - 0.0035$$

$$b = 0.0095D_{max} + 0.8174$$

여기서, F : 내진해석용 수평지진력(진도) 산출용 필터

f : 주파수(Hz)

a, b : 계수

D_{max} : 최대 변형량(cm)

4.2.5 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진 계수(k_{hk}) 설정

방파제의 성능검증에 이용되는 내진해석용 수평지진 계수는 식 (5)를 통해 산정이 가능하다.

$$k_{hk} = a^{f_{max}}/g \quad (5)$$

여기서, k_{hk} : 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수

$a^{f_{max}}$: 필터처리 후의 기초지반 지표면에서의 가속도 최대값(cm/s^2)

g : 중력가속도(cm/s^2)

단, 경사식 방파제(즉시복구 내진II등급) 경우 k_{hk} 는 필터식을 사용하지 않고 산정된 기초지반 지표면의 a_{max} 의 1/2를 사용할 수 도 있다.

직립식 방파제(붕괴방지 내진II등급)의 활동, 전도 및 지반지지력에 대한 검토는 산출된 수평지진계수(k_{hk})를 “항만 및 어항설계기준·해설(KDS 64 45 20 : 2017)” 4.6.1 직립부의 안정계산에 수평지진력(진도)으로 대입하여 검토한다. 또한 동수압은 “항만 및 어항설계기준·

해설 내진편(KDS 64 45 20 : 2019)” 4.1.6 지진시의 동수압식을 사용할 수 있다.

5. 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수(k_{hk}) 산정 검증

다수의 진동대실험(Kim et al., 2022) 및 원심모형실험(Kim et al., 2021)을 통하여 도출된 데이터와 수치해석을 통해 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수(k_{hk}) 산정에 대한 검증작업을 수행하였다(Table 7).

5.1 지반조건에 따른 등가정적해석을 위한 수평지진계수의 비교

다양한 지반조건에서 국내 현 기준인 “항만 및 어항시설의 내진성능기준(2019)”에서의 수평지진계수와 본 연구를 통해 도출된 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수의 비교를 통해 검증을 하였다.

5.1.1 지반조건

수평지진계수 비교를 위해 Table 8과 같이 “내진설계일반(KDS 17 00 00)”에서 분류하고 있는 지반(S_2, S_3, S_4, S_5)에 대해서 지반응답해석을 수행하였다(Fig. 5).

5.2.2 입력지진파

수평지진계수 비교를 위해 경주지진(2016), 포항지진(2017), 인공지진파 2종류를 사용하였다(Fig. 6). 경주지진은 진앙지(35.76°N, 129.19°E), 포항지진은 진앙지(36.11°N, 129.37°E)에서 측정된 실지진파를 사용하였다. 2종류의 인공지진파는 붕괴방지 1등급(0.154g)에 표준스펙트럼매칭을 적용한 지진파이다.

5.2.3 수평지진계수 산정

기존 내진설계 기준인 “항만 및 어항시설의 내진성능기준(2019)”에서 제시하는 수평지진계수(Table 9~12(a))와 본 연구를 통해 제안한 최대허용변위(30cm)를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수(Table 9~12(b))값을 산정하여 비교하였다(Table 9~12, Fig. 7).

도출된 수평 지진 계수값을 비교하면 본 연구에서 제안한 수평 지진 계수값이 현 설계기준에서 제시하는 수평 지진계수보다 적은 값으로 산출되었다. 인공지진파 1의 경우 평균적으로 약 22% 정도 감소하였고, 인공지진파 2의 경우 약 62% 정도의 감소율을 보였다. 그리고 경주지진과 포항지진의 경우 약 7%와 51% 정도 감소하였다. 이러한 결과를 봤을 때 기존의 방파제의 내진설계 기준에서 적용하는 수평지진계수(k_h) 보다 본 연구에서 최대허용변위(30cm)를 제안함으로써 설정되는 필터를 통해 산출되는 수평지진계수(k_{hk})가 작은값으로 산출됨

Table 7. Types of vibration band experiments and centrifugal model experiments conducted

Test name	Ground conditions	Input seismic wave	Breakwater type	Note
Vibration band experiment	Soft ground (DCM improvement)	Hachinohe, Ofunato, artificial earthquake waves	Upright breakwater (Less than 10m) Inclined breakwater (13m, 8m)	Conducting experiments based on the presence or absence of ground reinforcement
Centrifuge Tester	Sandy ground	Hachinohe, Ofunato, artificial earthquake waves	Upright breakwater	
	Soft ground (DCM improvement, riprap replacement)	Pohang earthquake wave, artificial earthquake waves		

Table 8. Ground conditions (S_2, S_3, S_4, S_5)

Types of ground	The name of the ground	Classification criteria	
		Depth of bedrock, H (m)	Average shear wave velocity of soil layer V_s -soil (m/s)
S1	Rock-bottom	Less than 1m	
S2	Shallow and hard ground	Less than 1m~20m	260 More than
S3	Shallow and fragile ground		260 Less than
S4	Deep and hard ground	More than 20m	180 More than
S5	Deep and fragile ground		180 Less than
S6	Ground requiring characteristic evaluation and seismic response analysis of bookkeeping interaction		

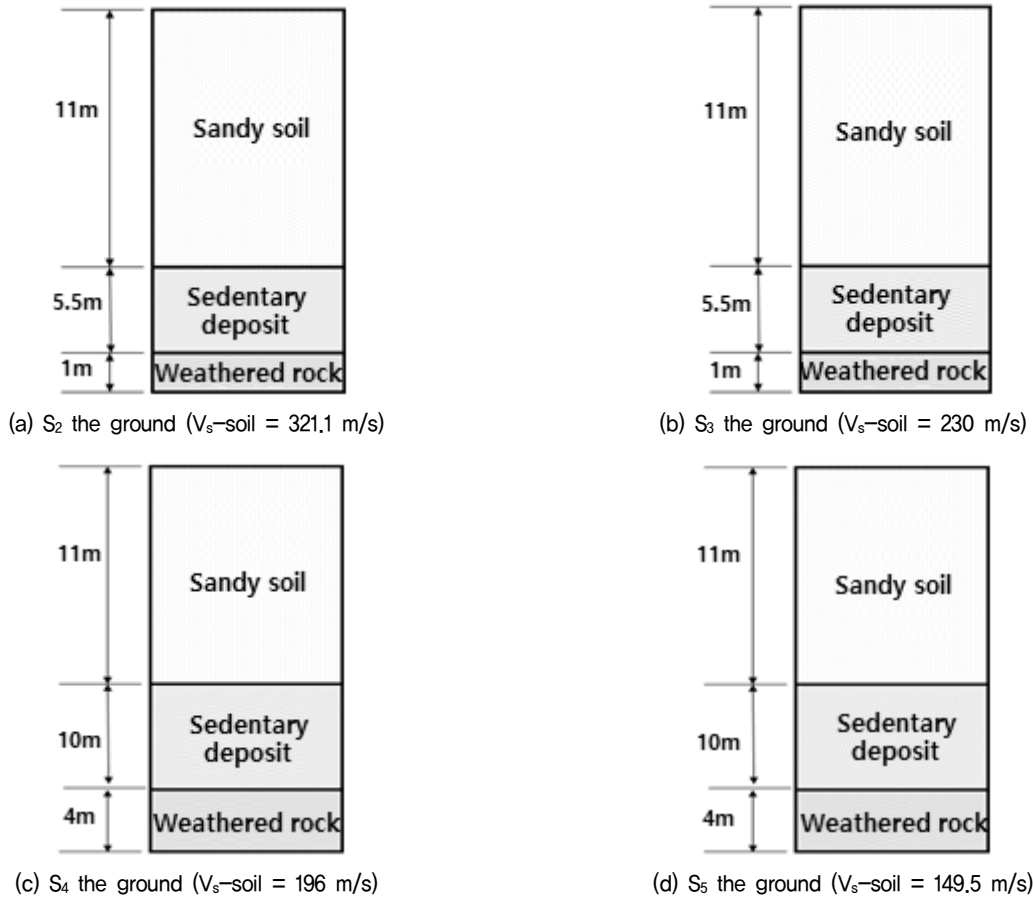


Fig. 5. Interpretation of geo-reaction answers section

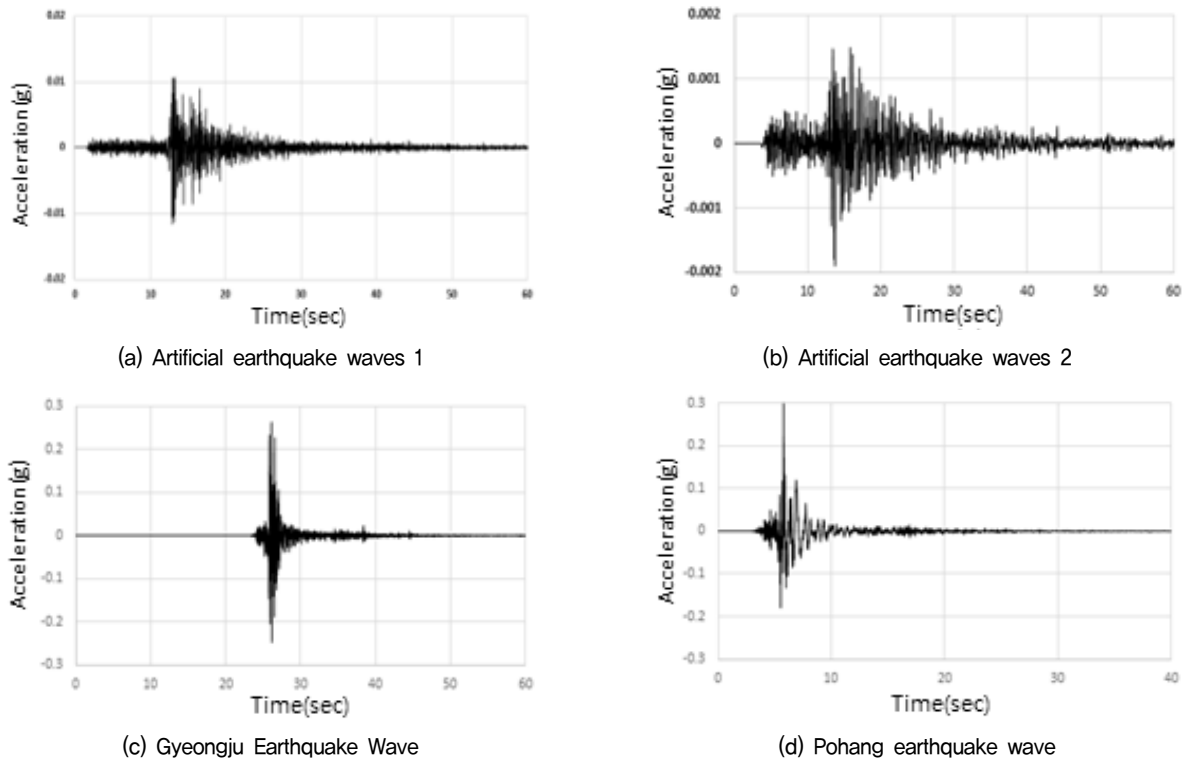


Fig. 6. Input seismic acceleration time history

Table 9. Comparison of horizontal seismic coefficients under S₂ ground conditions

Earthquake waves	Classification	(a) $k_h = 0.5 \frac{a_{max}}{g}$	(b) $k_{hk} = \frac{a_{max}^f}{g}$
Artificial earthquake waves 1		0.026	0.014
Artificial earthquake waves 2		0.048	0.011
Gyeongju Earthquake Wave		0.052	0.050
Pohang earthquake wave		0.090	0.037

Table 10. Comparison of horizontal seismic coefficients under S₃ ground conditions

Earthquake waves	Classification	(a) $k_h = 0.5 \frac{a_{max}}{g}$	(b) $k_{hk} = \frac{a_{max}^f}{g}$
Artificial earthquake waves 1		0.031	0.027
Artificial earthquake waves 2		0.060	0.021
Gyeongju Earthquake Wave		0.062	0.053
Pohang earthquake wave		0.107	0.042

Table 11. Comparison of horizontal seismic coefficients under S₄ ground conditions

Earthquake waves	Classification	(a) $k_h = 0.5 \frac{a_{max}}{g}$	(b) $k_{hk} = \frac{a_{max}^f}{g}$
Artificial earthquake waves 1		0.035	0.031
Artificial earthquake waves 2		0.056	0.023
Gyeongju Earthquake Wave		0.062	0.057
Pohang earthquake wave		0.109	0.059

Table 12. Comparison of horizontal seismic coefficients under S₅ ground conditions

Earthquake waves	Classification	(a) $k_h = 0.5 \frac{a_{max}}{g}$	(b) $k_{hk} = \frac{a_{max}^f}{g}$
Artificial earthquake waves 1		0.042	0.034
Artificial earthquake waves 2		0.065	0.033
Gyeongju Earthquake Wave		0.071	0.068
Pohang earthquake wave		0.119	0.073

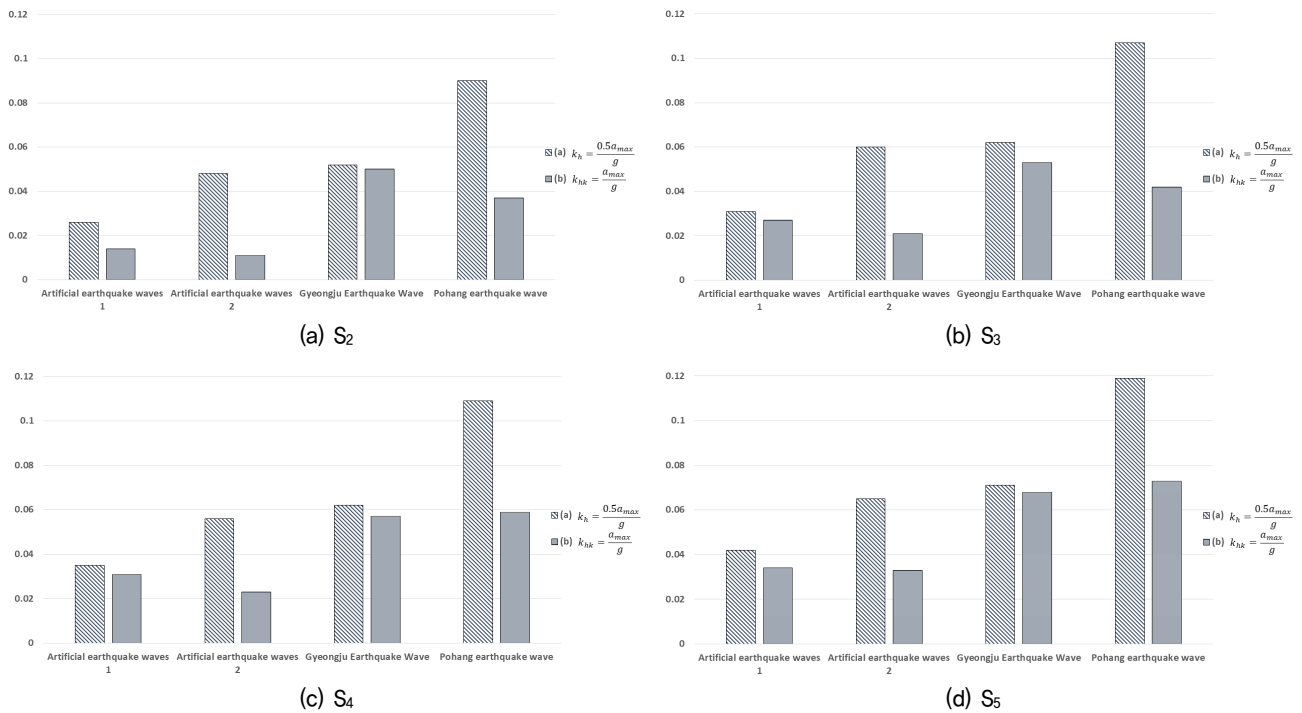


Fig. 7. Comparison of horizontal seismic coefficients under S₂~S₅ ground conditions

에 따라 설계 시 기존방식보다 경제적으로 더 좋다고 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구에서 국내 수준에 맞는 방파제의 성능기반 내진설계법(변위를 고려한 등가정적해석법)을 제안하고 모형실험(진동대실험, 원심모형실험)과 수치해석을 통해 해당 내진설계법을 검증하고 현재 국내 내진해석법과 비교하였다. 제안된 방파제의 성능기반 내진설계는 변위를 고려한 등가정적해석법으로 기초지반에서의 가속도 시간이력에 대해 고속 푸리에 변환(FFT) 과정을 수행한 후 방파제의 해당성능수준별 최대허용변위에 대한 지진 주파수 특성과 변형량을 보정해주는 필터처리를 수행한다. 필터처리가 된 가속도스펙트럼에 대해 고속 푸리에 역변환(IFFT)를 수행하여 가속도 최대값(a_{max}^f)을 도출하고 도출된 최대가속도를 가지고 변위를 고려한 등가정적해석을 위한 수평지진계수(k_{hk})를 산정하는 방식이다.

변위를 고려한 등가정적해석은 기존 등가정적해석보다 수평 지진계수 값이 낮게 산출됨에 따라 과도한 설계를 줄일 수 있어 경제적으로 좋다고 볼 수 있다. 이처럼 국내 지진 수준에 맞게 제안된 방파제의 성능기반 내진설계법에 대해 앞으로 지속적인 조사와 실내 실험 및 수치해석 등을 통하여 더 많은 검증작업을 수행함으로써 신뢰성을 높일 필요성이 있다.

감사의 글

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

참고문헌 (References)

1. CCEN, Brussels (2004), "Comite Europeen de Normalisation. Eurocode 8 Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 5: Foundations, Retaining Structures. geotechnical Aspects".
2. Han, I.S., Ahn, J.K., Park, D.H, and Kwon, O. (2019), "Estimation of Permanent Displacement of Gravity Quay Wall Considering Failure Surface under Seismic Loading", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.4, pp.15-26.
3. International Navigation Association (2001), "Seismic Design Guidelines for Port Structures".
4. Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport (1997), "Study on the Design Guideline of Seismic Capacity II".
5. Kim, Y.J., Jang, D.I., Kawk, C.W., and Park, I.J. (2021), "Seismic Stability Evaluation of the Breakwater Using Dynamic Centrifugal Model Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.6, pp.39-50.
6. Kim, Y.J. and Park, I.J. (2022), "Analysis on the Dynamic Behavior of Breakwater with the DCM Method Using the Shaking Table Test", *JOURNAL of THE KOREAN GEOENVIRONMENTAL SOCIETY*, Vol.23, No.5, pp.25-32.
7. Lee, J.S., Park, T.J., Lee, M.G., and Kim, D.S. (2018), "Verification of the Numerical Analysis on Caisson Quay Wall Behavior Under Seismic Loading Using Centrifuge Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.11, pp.57-70.
8. Ministry of Oceans and Fisheries (2019), "Design Standards and Explanation of Port and Fishing Port Earthquake".
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018), "Korean Design Standard - Seismic Design Standards (KDS 17 00 00)".
10. Theoverseascoastalare Developmentinstitute of Japan (2009), "Technical Standards and Commentaries for Port and Barbour Facilities in Japan".

Received : November 18th, 2022

Revised : December 8th, 2022

Accepted : December 8th, 2022