

국내 중력식 안벽의 수평지진계수 산정 방법에 대한 고찰

A Discussion on the Definitions of Seismic Coefficient for Gravity Quay Wall in Korea

이문교¹⁾ · 조성배²⁾ · 조형익³⁾ · 박헌준¹⁾ · 김동수^{1)*}

Lee, Moon Gyo¹⁾ · Jo, Seong Bae²⁾ · Cho, Hyung Ik³⁾ · Park, Heon Joon¹⁾ · Kim, Dong Soo^{1)*}

¹⁾KAIST 건설 및 환경공학과, ²⁾K-water 연구원, ³⁾한국지질자원연구원 지진연구센터

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, ²⁾K-water Institute, ³⁾Earthquake Research Center, KIGAM

/ A B S T R A C T /

Pseudo-static approach has been conventionally applied for the design of gravity quay walls. In this method, the decision to select an appropriate seismic coefficient (k_h) is an important one, since k_h is a key variable for computing an equivalent pseudo-static inertia force. Nonetheless, there is no unified standard for defining k_h . Likewise, port structure designers in Korea have a difficulty in choosing an appropriate k_h definition, as there are conflicts in how k_h is defined between the existing seismic code of port structures and the proposed new one. In this research, various seismic design codes for port structures were analyzed to compare the definitions of the seismic coefficient. The results were used for the proposing a unified seismic coefficient definition. Further, two dynamic centrifuge tests were performed with different wall heights (5 m, 15 m) to clarify the reference point of peak acceleration used in determination of k_h according to the wall height. Results from dynamic centrifuge experiments showed that correction factors for the peak ground acceleration considering both the wall height and allowable displacement are needed to calculate k_h .

Key words: Seismic Coefficient, Pseudo-Static Analysis, Quay Wall, Dynamic Centrifuge Test

1. 서론

1995년 지진 활동성이 매우 낮다고 알려진 일본 고베(Kobe)시와 한신 지역에서 발생한 대지진은 우리나라에 내진설계의 중요성에 대한 경각심을 일깨워 주는 계기가 되었다. 이에 정부는 [자연재해대책법](1996)을 개정하고 소관 부처에 내진설계기준을 설정하도록 하였으며, 1997년 건설교통부에서는 내진설계 상위 개념인 내진설계기준연구(II)[1]를 제정하여 여러 부처와 산하 기관에 각 시설물별 내진설계기준을 제정하도록 하였다. 1999년 해양수산부에서는 항만구조물에 관한 내진설계 기술기준인 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(이하 내진설계 표준서)[2]를 작성하였으며, 현재 항만구조물의 내진설계는 이를 바탕으로 수행되고 있다[3, 4].

[자연재해대책법](1996) 개정 이후 국내에서도 중소규모의 지진(M 3.0 이상)이 꾸준히 관측되면서 정부는 지진에 대한 국민의 안전을 도모하기 위해 [지진재해대책법](2008)을 제정하여 주요 시설물에 대한 내진대책

을 마련토록 법제화 하였다. 이에 내진설계가 미비한 기존 항만구조물 중 계류시설과 방파제의 내진성능 평가 및 보강을 위해 한국시설안전공단에서는 2012년에 기존 시설물(항만) 내진성능 평가요령(안)(이하 내진성능 평가요령)[5]을 발간하였다.

항만구조물은 크게 외곽시설, 계류시설, 부대시설로 이루어져 있다. 안벽은 대표적인 계류시설이며, 모든 항만구조물 중에서 가장 기본적이고 필수적인 구조물로서 내진설계 표준서[2]와 내진성능 평가요령[5]은 중력식 안벽의 내진설계를 대표 예제로 제공하고 있다. 중력식 안벽에 대한 내진 2등급 붕괴방지수준의 내진 설계와 내진 안정성 평가 상제 1 단계에서는 등가정적해석법이 사용되고 있다. 국내 등가정적해석법은 지진 하중을 하나의 상수 값을 갖는 관성력으로 변환해주는 Mononobe-Okabe 공식을 이용하고 있으며, 지진하중은 수평지진계수(이하 k_h)값에 결정적으로 좌우된다. 그러므로 적절한 k_h 산정은 등가정적해석에서 가장 중요하다고 할 수 있다. 그러나 관련연구 부족으로 현재까지 중력식 안벽의 내진설계에 이용되는 k_h 를 산정하는 통일된 기준은 없는 상황이며, 국내에서도 내진설계 표준서[2]와 내진성능 평가요령[5]의 k_h 산정방법이 상이하여 중력식 안벽의 내진설계 및 내진성능 평가 시 혼선을 빚고 있다.

*Corresponding author: Kim, Dong Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received October 4, 2016; Revised December 14, 2016; Accepted December 14, 2016)

이에 본 연구에서는 국내의 항만구조물 내진설계기준의 k_h 산정 현황을 분석하여 국내 k_h 산정 시 중력식 안벽의 높이 및 허용 변위량에 따른 최대지반가속도 선정 위치와 보정계수 세분화 등과 같은 개선방향을 제시하였다. 또한 기존 국내 k_h 산정 시 이용되는 최대지반가속도 및 보정계수를 평가하기 위해 동적원심모형실험을 수행하여 이를 분석하였다.

2. 국내 기준의 수평지진계수(k_h) 산정법

지진계수(Seismic coefficient)는 등가정적해석 수행 시 지진으로 인한 동적하중을 하나의 상수 값을 갖는 관성력, 즉 등가의 지진하중으로 변환하여 주기 위한 계수이다. 이는 수평지진계수(k_h)와 수직지진계수(k_v)로 나뉘는데 일반적으로 k_v 는 등가 지진하중 산정 시 결과에 영향을 주지 않는 값으로 간주하여 지진계수는 k_h 를 의미하고 있다.

k_h 는 중력식 안벽의 등가정적해석 시 아래 식 (1)과 식 (2)의 주동토압, 식 (3)의 안벽 전면에 작용하는 동수압, 식 (4)의 안벽 관성력 산정에 포함되어 해석 결과에 가장 중요한 계수로 작용하고 있다. 그러나 실제 지진하중과 등가지진하중 사이의 차이를 줄이기 위한 k_h 산정 시 고려해야 할 요소 등에 관한 연구가 미흡하여 현재까지 통일된 k_h 산정 기준이 없는 상황이다.

$$P_{AE} = 0.5\gamma H^2 K_{AE}(1 - k_v) \tag{1}$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta)\cos(i - \beta)}} \right]^2} \tag{2}$$

$$P_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H_w^2 \tag{3}$$

$$U_i = k_h \gamma_{ce} (H \times B) \tag{4}$$

여기서, γ 는 흙의 단위 중량, γ_w 는 물의 단위 중량, γ_{ce} 는 안벽과 채움재의 단위중량, H 는 안벽 벽체 높이, H_w 는 수위, B 는 안벽 벽체 너비, ϕ 는 뒤채움 지반의 내부 마찰각, δ 는 흙 벽체간의 마찰각, β 는 벽체의 수직 기울기, k_h 는 수평지진계수, k_v 는 수직 지진계수, $\theta = \tan^{-1}(k_h/(1 - k_v))$ 이다.

2.1 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서

해양수산부에서 제공하는 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서[2]에서는 내진 2등급 붕괴방지수준의 중력식 안벽 설계 시 등가정적해석법을 사용하고 있다. 등가정적해석법에서의 설계지진가속도는 보통암 지반(S_B)에서의 지표면 자유장 운동으로 정의되고 있다.

일반적으로 중력식 안벽은 퇴적층이 발달된 연안에 설치된다. 그러므로 k_h 산정에는 보통암 지반에 대해 정의된 설계지진가속도가 아닌 암반위 기초가 설치되는 토사지반까지 증폭된 지진가속도를 활용해야 한다. 벽체의 높이가 10 m 이하인 안벽의 경우에는 기초지반까지 지진응답해석을 수행

하여 최대지반가속도(α_{max})를 결정하고, 10m 이상인 경우에는 안벽 뒤채움 지반을 포함한 지진응답해석을 수행하여 α_{max} 를 결정한다. 이후 k_h 는 식 (5)를 이용하여 계산한다.

$$k_h = \frac{1}{2} \frac{\alpha_{max}}{g} \tag{5}$$

추가적으로 안벽이 말뚝으로 지지되거나 변위가 억제되는 경우에는 식 (6)을 이용하여 k_h 를 계산한다.

$$k_h = \frac{\alpha_{max}}{g} \tag{6}$$

이처럼 내진설계 표준서[2]는 안벽의 변위 허용 유무에 따라 최대지반가속도에 적용하는 보정계수를 이원화하고 있으며, 안벽의 높이를 고려하여 지진응답해석 범위를 다르게 적용하고 있다.

2.2 기존 시설물(항만) 내진성능 평가요령(안)

한국시설안전공단에서 제공하는 기존 시설물(항만) 내진성능 평가요령(안)[5]에서는 중력식 안벽의 지진하중에 대한 구조적 안정성을 상세 1단계와 상세 2단계로 구분하여 평가하고 있다. 등가정적해석은 상세 1단계 평가에 이용되고 있으며, k_h 는 식 (7)과 같이 안벽 뒤채움 지반을 포함한 지진응답해석을 수행하여 얻어진 안벽 뒤채움에서의 최대지반가속도 평균으로 정의하고 있다.

$$k_h = \frac{a_{average}}{g} \tag{7}$$

여기서, $a_{average}$ 는 안벽 뒤채움에서의 최대지반가속도 평균이다.

내진성능 평가요령[5]은 내진설계 표준서[2]와 달리 구조물 내진등급 및 안벽의 높이에 대한 구분 없이 동일한 방법으로 k_h 를 산정하여 비교적 보수적일 수 있다(Fig. 1).

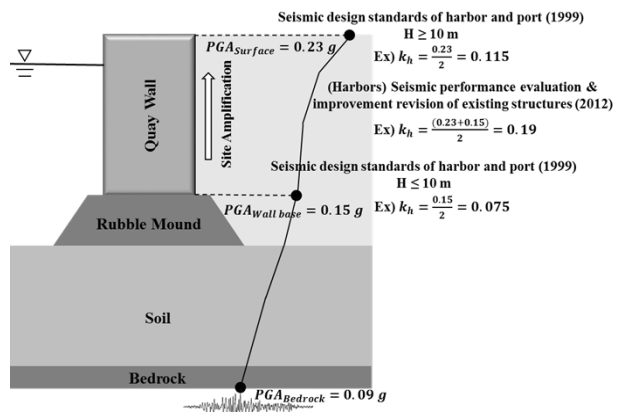


Fig. 1. Locations of reference peak ground acceleration used in seismic coefficient

3. 국외 기준의 수평지진계수(k_h) 산정법

3.1 Seismic Design Guidelines for Port Structures

국제해운협회(International Navigation Association)에서 제공하는 Seismic Design Guidelines for Port Structures[6]에서는 k_h 산정법으로 Noda et al.[7]이 액상화가 발생하지 않은 129개의 호안 중력식 안벽에 대한 실제 지진 시 거동사례를 역해석하여 제시한 결과를 소개하고 있다.

Fig. 2는 Noda et al.에 의해 수행된 역해석 결과를 보여준다. 화살표로 표시된 점들은 해석이 수행된 호안 중력식 안벽의 한계지진계수(Threshold seismic coefficient)값들을 나타낸다. 한계지진계수는 실제 지진이 발생한 항만에서 계측된 지진하중과 안벽의 조건을 이용하여 활동(Sliding), 전도(Overtuning), 지지력파괴(Bearing capacity failure)에 대한 등가정적 해석 결과 중 가장 먼저 힘의 평형이 깨지는 파괴모드에서 도출된 k_h 를 의미한다. 지진하중에 의해 파괴된 안벽에서 도출된 한계지진계수는 하한값을 의미하며, 상향의 화살표로 표기한다. 반대로 파괴가 일어나지 않은 안벽에서 도출된 한계지진계수는 상한값이며, 하향의 화살표로 나타낸다.

Noda et al.[7]은 Fig. 2의 결과를 이용하여 k_h 의 상한계(upper bound)를 최대지반가속도(a_{max}) 0.2 g를 기준으로 식 (8)과 식 (9)와 같이 제안하였으며, 이는 일본 Technical standards for Ports and Harbour Facilities in Japan(1999)[8]에 정의된 내진등급 Special Class 구조물 설계에 적용된다. 또한 도출된 한계지진계수의 평균을 식 (10)으로 제안하여 내진등급 B 이하의 구조물 설계에 적용한다.

$$k_h = \frac{a_{max}}{g} \quad a_{max} < 0.2g \quad (8)$$

$$k_h = \frac{1}{3} \left(\frac{a_{max}}{g} \right)^{1/3} \quad a_{max} > 0.2g \quad (9)$$

$$k_h = 0.6 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \quad (10)$$

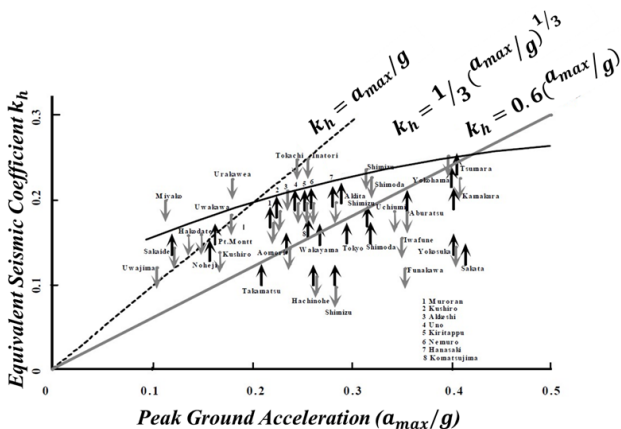


Fig. 2. Equivalent seismic coefficient for retaining walls at non-liquefied waterfront sites [7]

여기서, a_{max} 는 안벽 뒤채움 지표면에서의 최대지반가속도 값이다.

Noda et al.[7]이 제시한 방법은 대상 구조물의 내진등급 및 안벽 뒤채움 지표면 최대지반가속도(0.2 g)를 기준으로 보정계수를 다르게 적용하고 있으며, 안벽의 높이 및 허용 변위에 관한 내용은 언급되지 않았다.

3.2 EUROCODE 8

Eurocode 8 Part 5[9]에서 정의한 k_h 산정법은 국내 내진설계 표준서[2] 내용과 대부분 유사하다. 차이점은 Eurocode 8에서는 10 m 이상의 안벽에 대한 k_h 산정 시 a_{max} 는 안벽 뒤채움에서의 최대지반가속도 평균으로 정의되는 점과 식 (11)에서 보정계수를 정의하는 r 값이 Table 1과 같이 안벽의 허용 변위량에 따라 세분화 되었다는 점이다.

$$k_h = \frac{1}{r} \frac{a_{max}}{g} \quad (11)$$

여기서, a_{max} 는 안벽의 높이가 10 m 이하인 경우 안벽의 기초지반에서의 최대지반가속도, 안벽의 높이가 10 m 이상인 경우 안벽 뒤채움에서의 최대지반가속도 평균, r은 Table 1과 같다.

3.3 Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan

일본 해외 연안지역 개발 연구소(The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, OCDI)에서 제공하는 Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan[10]은 2007년 대대적인 개정작업을 거쳐 성능기반 내진설계 개념을 도입한 내진설계 표준서이다. 성능기반 내진설계의 체계는 시설물의 목적(Objective)과 그 목적 달성을 위해 요구되는 성능요구조건(Performance requirements), 성능요구조건을 충족하기 위한 성능 기준(Performance criteria) 그리고 성능 기준을 검증할 수 있는 성능검증(Performance verification)으로 이루어져 있다. 성능검증 방법으로는 적합성만 인정된다면 어떠한 방법이라도 사용할 수 있도록 하여 검증법에 자유도를 부여함으로써 새로운 기술의 발전을 도모하고 있다.

해당 표준서에서는 중력식 안벽에 보정 최대지반가속도(a_c) 적용 시 수평잔류변위가 목표치(허용 변위량)가 되게 하는 성능검증 지진계수(k_{hk})를 산정하고, 이 값을 등가정적해석에 대입하여 안정성 평가를 수행하고 있다.

Table 1. Values of factor r for the calculation of the horizontal seismic coefficient [9]

Type of wall	r
Free gravity walls that can accept a displacement up to $d_r = 300 \cdot a_{max}$ (mm)	2
Free gravity walls that can accept a displacement up to $d_r = 200 \cdot a_{max}$ (mm)	1.5
Flexural reinforced concrete walls, anchored or braced walls, reinforced concrete walls founded on vertical piles	1

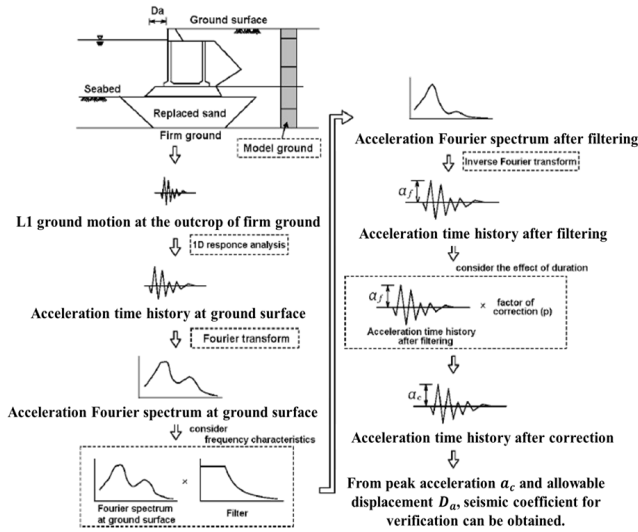


Fig. 3. Procedure for the evaluation of seismic coefficient [10]

a_c 산정과정은 Fig. 3에 도시하였다. 먼저 중력식 안벽에 레벨 1 설계지진(설계수명 동안 높은 확률로 일어나는 지진동)을 입력하여 1차원 지진 응답해석을 통해 안벽 뒤채움 지반 지표면에서의 가속도 시간이력을 산정한다. 획득한 가속도 시간이력을 푸리에 변환(FFT)하여 지표면에서의 가속도 스펙트럼을 결정하고, 이에 대해 필터 처리를 한다. 적용되는 필터는 중력식 안벽 상단의 수평진류변위가 목표치가 되게 하는 지진동을 구성하는 각 주파수 성분의 안벽 변형에 대한 기여도를 평가한 것이며 식 (12)을 통해 결정한다.

$$\begin{aligned}
 a(f) &= b & 0 < f \leq 1 \\
 a(f) &= \frac{b}{1 - \left(\frac{f-1}{1/0.34}\right)^2 + 6.8 \left(\frac{f-1}{1/0.34}\right)^i} & 1 \leq f \\
 b &= 1.05 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.23
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, H는 안벽 높이(m), H_R 은 기준 벽높이(15m), T_b 는 뒤채움 지표면의 초기 고유주기(s), T_{bR} 은 뒤채움 지표면의 기준 초기 고유주기(0.8 s), T_u 는 안벽의 기초 지반의 초기 고유주기(s), T_{uR} 은 안벽의 기초 지반의 기준 초기 고유주기(0.4 s), i는 허수단위이다.

식 (12)를 살펴보면, 필터 산정 시 안벽의 높이, 안벽의 기초 지반 및 뒤채움 지표면의 고유주기에 대한 영향을 고려하는 것을 알 수 있다. 다음으로 필터 처리 후의 가속도 스펙트럼을 다시 푸리에 역변환(IFFT) 하여 가속도 최대값을(a_f)를 산정하고 지진동의 지속시간을 감안한 감소계수 P를 적용하여 지표면에서의 보정 최대지반가속도 a_c 를 산출한다. k_{hk} 는 앞서 획득한 a_c 와 허용 변위량을 식 (13)에 대입하여 산정한다.

$$k_{hk} = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r}\right)^{-0.55} \frac{a_c}{g} + 0.44 \quad (5 \text{ cm} < D_a < 20 \text{ cm}) \tag{13}$$

여기서, D_a 는 안벽 허용 변위량, D_r 은 기준 변위량(10 cm), a_c 는 보정 최대지반가속도이다.

일본 OCDI에서 제시하고 있는 성능검증 지진계수(k_{hk}) 방법은 성능기반 내진설계 개념이 반영되어 산정식에 허용 변위량에 대한 변수가 직접적으로 포함되어 있으며, 안벽의 높이에 따라 뒤채움 지표면 최대지반가속도 값을 보정해주고 있어 상기 방법들과 비교하여 가장 경제적이고 정확한 k_h 값을 도출하고 있다[10].

4. 국내 기준의 수평지진계수(k_h) 산정법 개선방향

상기와 같이 국내의 내진설계기준을 검토한 결과 중력식 안벽의 등가정적해석에 필요한 k_h 산정 시 중요한 고려 요소는 다음의 세 가지이다.

- 1) 최대지반가속도에 보정계수 적용
- 2) 안벽 높이의 영향 고려
- 3) 허용변위 고려

본 논문에서 언급한 각 기준이 k_h 산정 시 고려하고 있는 요소를 Table 2에 정리하였다. 상기 세 가지 요소가 k_h 에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 지진 시 최대지반가속도는 매우 짧은 시간 동안만 유지되므로 등가정적해석에 이용되는 k_h 는 최대지반가속도보다 작은 값에 상응해야 한다[11]. 본 논문에서 검토된 모든 설계기준에서는 최대지반가속도를 감해주는 보정계수를 적용하고 있다. 둘째, 안벽의 높이가 낮은 경우 k_h 산정 시 안벽 뒤채움 지반의 증폭을 고려한 최대지반가속도를 이용하면 과도한 결과를 초래할 수 있다. 국내 내진설계 표준서[2]와 Eurocode 8[9]에서는 10 m 이하의 안벽은 안벽 기초지반에서의 최대지반가속도를 이용하고 있으며, 일본의 OCDI기준[10]에서는 15 m를 기준으로 안벽 뒤채움 지반 지표면에서의 최대지반가속도에 안벽 높이에 대한 영향이 고려된 필터를 적용하여 증폭비를 수정한 값을 사용하고 있다. 안벽 높이에 따른 뒤채움 지반 증폭 고려 여부가 k_h 산정에 미치는 영향은 5장 동적원심모형실험을 통해 비교하였다. 그러나 안벽 높이의 영향이 발현되는 기준높이에 대한 설정 근거가 부족한 상황이며, 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 명확한 기준높이

Table 2. Comparison between seismic design codes

Code	R Factor*	Wall height	Allowable displ.
Seismic Design Standards of Harbor and Port [2]	○	○	○
Seismic Performance Evaluation & Improvement Revision of Existing Structures [5]	○	N/A	N/A
Seismic Design Guidelines for Port Structures [6]	○	N/A	N/A
EUROCODE8-5 [9]	○	○	○
Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan [10]	○	○	○

* reduction factor

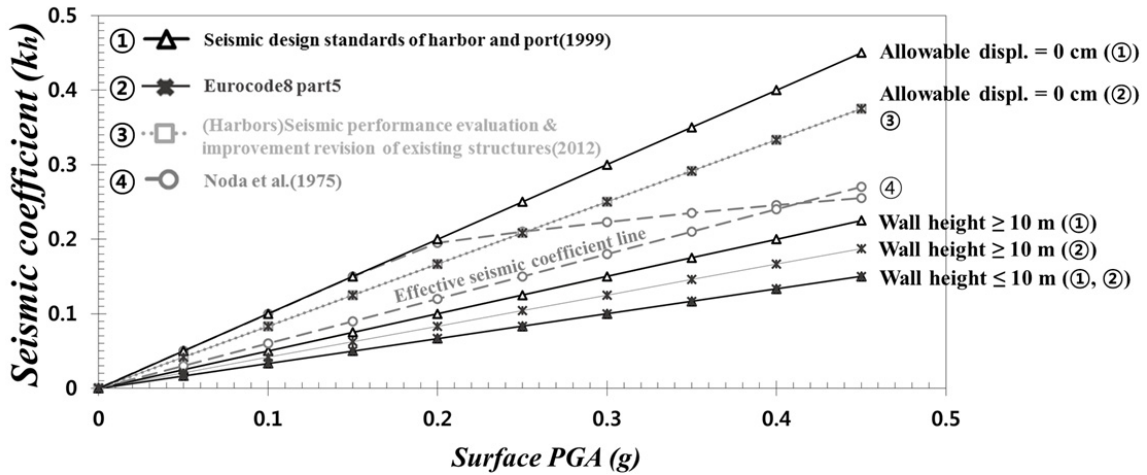


Fig. 4. Summary of various seismic coefficient definitions

를 정립할 필요가 있다. 셋째, 지진시안벽의 변위를 허용한 경우, 안벽에 작용하는 토압은 Mononobe-Okabe 공식에 의해 산정된 주동토압에 비해 감소할 수 있다[12, 13]. 국내 내진설계 표준서[2]와 Eurocode 8[9]에서는 허용 변위량에 따라 최대지반 가속도에 적용하는 보정계수를 다르게 하고 있으며, 일본의 OCDI 기준[10]에서는 k_{nk} 산정식에 허용 변위량 자체가 변수로 포함되어 고려되고 있다. 현재 국내에서는 내진 2등급 붕괴방지수준(허용 변위 30 cm)의 중력식 안벽 설계에 등가정적해석방법이 사용되고 있으므로 안벽의 허용 변위를 고려한 경제적인 k_h 산정이 필요하다고 판단된다.

Fig. 4에 국내의 내진설계기준에 제시된 산정법으로 k_h 를 계산한 결과를 지표면 최대지반가속도 수준에 따라 비교하였다. 국내 내진설계 표준서[2]와 Eurocode 8[9]의 10 m 이하 안벽에 대한 k_h 는 안벽 기초지반에서의 최대지반가속도가 사용되며, 이는 본 연구에서 수행한 동적원심모형실험에 사용된 건조사질토 10 m 깊이의 평균 가속도 증폭비(1.5)를 지표면 최대지반가속도에 나눠주어 산정하였다. 그림을 통해 안벽의 허용변위를 고려하고, 높이가 낮을수록 k_h 가 경제적으로 산출되는 것을 알 수 있다.

중력식 안벽에 대한 k_h 산정법과 관련하여 국내의 내진설계기준을 비교 분석한 결과 성능기반 내진설계 개념이 도입되지 않은 국내 실정을 반영하여 다음과 같은 개선 방향을 제시하였다.

- 최대지반 가속도에 보정계수 적용
 - ▶ 구조물 내진등급 및 성능수준에 맞는 명확한 허용 변위량 제시
 - ▶ 구조물의 허용 변위량에 따른 세분화된 보정계수 값 제시
- 안벽높이 영향 고려
 - ▶ 안벽 높이에 따라 최대지반가속도 선정 위치를 세분화 하여 제시
 - ▶ 안벽 높이의 영향이 발현되는 기준높이에 대한 설정근거 마련

현재 국내 중력식 안벽의 내진설계에 이용되는 내진설계 표준서[2]는 상기 내용을 부분적으로 포함하고 있어 비교적 경제적인 k_h 을 도출하고 있다. 하지만 내진성능 평가에 사용되고 있는 내진성능평가요령[5]의 상세 1 단계 평가 k_h 산정법은 안벽의 허용변위에 따른 보정계수를 적용하지 않아 내진설계 표준서[2] 방법으로 산정한 k_h 에 비해 보수적인 결과를 산출하고

있다. 이를 이용하여 기준에 건설된 중력식 안벽에 대한 내진성능 평가 시 결과가 ‘불안정’으로 도출될 가능성이 높아 현업에서 혼란을 겪고 있는 실정이다. 그러므로 두 기준의 차이에서 유발되는 부작용을 최소화하기 위하여 조속히 최대지반가속도 보정계수, 안벽 높이, 안벽 허용변위를 고려한 통일된 k_h 산정법이 제안되어야 할 것으로 판단된다.

최근 국내에서도 내진설계 선진국의 최신 항만 내진설계기준 및 연구동향에 따라 성능기반 내진설계 개념을 도입하기 위한 연구가 수행되고 있다. 국내 실정에 맞는 추가 연구를 통해 성능기반 내진설계에 필수적인 구조물의 목적, 성능요구조건, 성능 기준 등이 우선적으로 정립이 되면, 설계지진에 대한 대상 구조물 성능(허용 변위량)의 정확한 예측을 위해 OCDI[10]에서 제안하고 있는 성능검증 지진계수(k_{nk})와 같이 k_h 산정식에 허용 변위와 안벽 높이에 관한 변수가 직접 포함될 수 있는 방향으로 추후 연구가 진행되어야 할 것이다.

5. 동적원심모형실험을 통한 수평지진계수(k_h) 산정법 평가

국내 k_h 산정 시 이용되는 최대지반가속도의 선정위치와 적용 보정계수를 평가하기 위해 동적원심모형실험을 수행하였다. 평가방법은 다음과 같다. 활동과괴에 대한 안전율 1을 적용하여 k_h 를 0.13으로 설계한 중력식 안벽 모형이 지진하중에 의해 활동과괴가 일어나는 시점의 안벽 뒤채움 지반에서의 깊이 별 최대지반가속도를 획득하여 내진설계 표준서[2]와 내진성능 평가요령[5]에서 제시한 방법으로 k_h 를 구한 뒤 설계값(0.13)과 비교하였다.

본 실험은 KOCED CMI(Korea Construction Engineering Development Collaboratory Management Institute : 건설연구인프라운영원) 지오센터리 퓨지실험센터의 동적 원심모형시험기[14]를 이용하였다.

5.1 동적원심모형실험 설계

실험은 5 m, 15 m의 두 가지 높이를 가지는 중력식 안벽을 대상으로 하였으며, 두 안벽 모두 높이(H)에 대한 너비(B)의 비는 0.57이다. 안벽 모형

은 알루미늄(T-6061)으로 제작하였으며, k_h 를 0.13으로 설계하기 위하여 내진설계 표준서[2] 및 내진성능 평가요령[5]에 제시된 활동에 대한 안전율 평가 식에 안전율(1), k_h (0.13), 기타 실험조건을 대입하여 안벽의 무게를 도출하였고, 알루미늄의 두께 조절을 통해 무게를 만족하였다. 이를 바탕으로 높이 5 m, 15 m에 대해 각각 실험 목표 가속도 수준인 40 g, 60 g에 대한 상사비를 적용하여 축소 모델링 하였다.

활동과피에 대한 안전율 1을 적용하여 k_h 를 0.13으로 설계한 안벽 모델은 각 기준의 정의에 따라 다음의 경우에 활동이 발생해야 한다.

- 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서
 - ▶ 안벽구조물 기초지반 최대지반가속도 = $2 \cdot k_h$ (= 0.26 g) [5 m]
 - ▶ 안벽 뒤채움 지반 지표면 최대지반가속도 = $2 \cdot k_h$ (= 0.26 g) [15 m]
- 기존 시설물(항만) 내진성능 평가요령(안)
 - ▶ 안벽 뒤채움 지반 최대지반가속도 평균 = k_h (= 0.13 g) [5, 15 m]

Fig. 5는 동적원심모형실험 모형의 구조물 및 계측기 배치를 나타내고 있다. 실험용 토조로는 등가전단보 박스(Equivalent Shear beam Box, ESB)를 사용하였다[15]. 그림과 같이 안벽의 횡방향 변위 및 진도 발생 여부를 확인하기 위해 안벽 상하부에 변위계(Potentiometer)를 수평 방향으로 설치하였다. 안벽과 뒤채움 지반의 침하량을 계측하기 위해 변위계(Laser sensor) 2개를 추가로 설치하였으며, 뒤채움 지반의 침하 계측을 위해 설치한 변위계는 안벽에 근접하게 설치하였다. 뒤채움 지반의 깊이 별 최대지반가속도를 계측하기 위해 뒤채움 지반 표면으로부터 등 간격으로 5개의 가속도계를 매설 하였다.

기초 사석은 지진 시 안벽의 전도를 방지하고 활동과피관 유발되도록 지지력을 키우기 위해 건조 상태의 규사(silica sand)를 다짐하여 상대밀도 86%로 조밀하게 조성하였으며, 원형(prototype) 기준으로 두께 1.5 m의 두께를 가진다. 뒤채움 지반은 기초 사석보다 상대적으로 입경이 작은 규사를 안벽 높이까지 낙사(Air-pluviation)하여 상대밀도 80%로 조성하였다. 시료에 대한 기본 물성치는 Table 3과 같다.

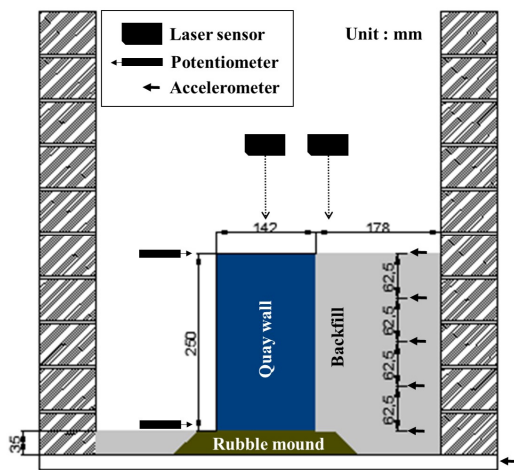


Fig. 5. Dynamic centrifuge test configure (15 m case)

Table 3. Silica sand properties

Property	Silica sand (Rubble mound)	Silica sand (Backfill)
USCS	SP	SP
$\rho_d, \max (g/cm^3)$	1.419	1.645
$\rho_d, \min (g/cm^3)$	1.287	1.244
Gs	2.65	2.65
Cc	0.98	1.11
Cu	1.54	1.96
PI	NP	NP
D50 (mm)	0.81	0.22

5.2 동적원심모형실험 결과 및 분석

본 실험에서는 안벽의 활동과피가 발생하는 시점을 확인하기 위해 단주기 특성을 지닌 Ofunato 지진파를 Table 4와 같은 순서로 약진부터 강진까지 단계별로 가진 하며 안벽의 횡방향 변위 및 안벽과 뒤채움 지반의 침하량을 관찰하였다. 기반암 입력가속도의 최대 진폭은 최대 0.336 g 수준까지 변화시켰으며 가속도 진폭 및 주파수 범위, 지속시간은 상사비를 고려하여 원심모형실험에 맞게 변환한 지진파를 입력 신호로 사용하였다. 이후 기술 되는 모든 결과의 단위는 원형(prototype)을 기준으로 표현하였다.

Fig. 6은 5 m 안벽에 대한 실험결과이다. 그림에서 (a), (b)는 내진설계 표준서[2]의 10 m이하의 안벽에 적용하는 k_h 산정식에 따라 안벽의 기초지반 최대지반가속도(Base PGA)가 증가함에 따른 안벽의 횡방향 변위량과 안벽 및 뒤채움 지반의 침하량을 각각 보여주고 있다. Fig. 6의 (c), (d)는 내진성능 평가요령[5]의 k_h 산정식에 따라 안벽의 뒤채움 지반 최대지반가속도의 평균(Average PGA)이 증가함에 따른 안벽의 횡방향 변위량과 안벽 및 뒤채움 지반의 침하량을 각각 나타내고 있다.

Table 4. Input ground motion

Input motion	Peak Acc. @ Bedrock [5 m](Proto)	Peak Acc. @ Bedrock [15 m](Proto)	Frequency Range		
			Model	Proto	
Ofunato	0.025	0.007	30 - 300	[5 m]	
	0.027	0.009		0.75-7.5	
	0.029	0.017			
	0.039	0.038			
	0.060	0.061			
	0.076	0.083			
	0.089	0.084			
	0.124	0.107			0.5-5
	0.155	0.162			
	0.193	0.191			
	0.240	0.203			
	0.257	0.218			
	0.279	0.264			
	0.311	0.264			
	0.330	0.336			

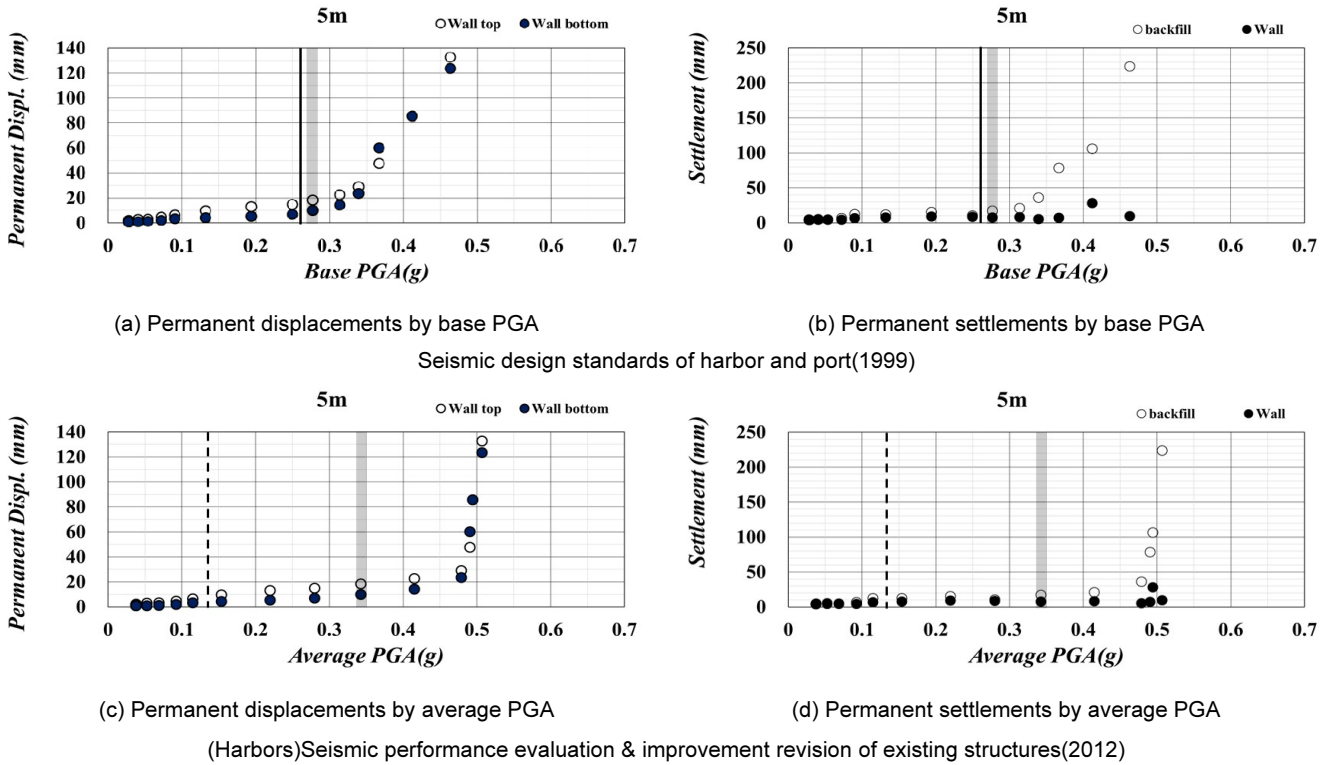


Fig. 6. Determination of starting point of sliding failure (Wall height : 5 m)

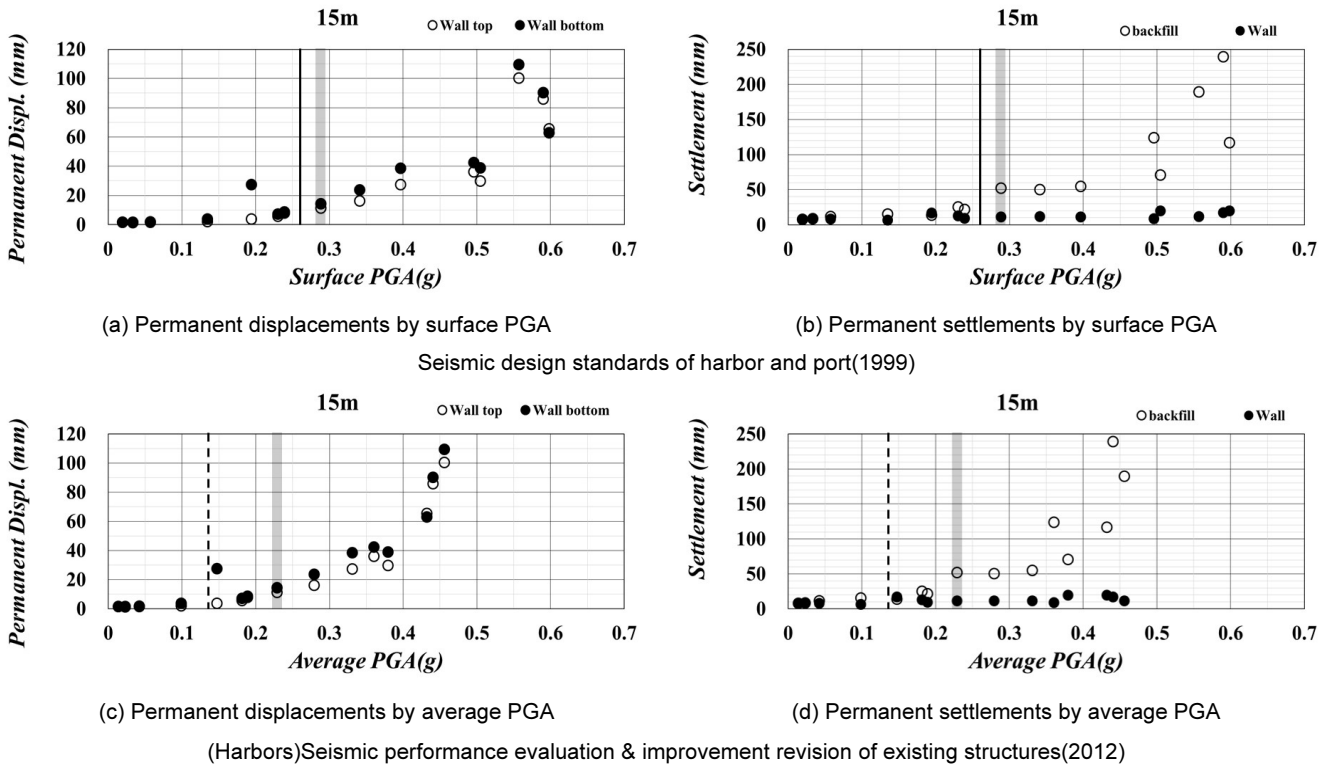


Fig. 7. Determination of starting point of sliding failure (Wall height : 15 m)

그림에서의 실선은 $k_h(0.13)$ 으로 설계된 5 m안벽의 내진설계 표준서 [2]에 따른 예상 활동 파괴 시점(Base PGA = $2k_h$, 0.260 g)을 의미하며, 파선은 내진성능 평가요령[5]에 따른 예상 활동 파괴 시점(Average PGA =

k_h , 0.13 g)을 나타낸다. 또한 계측을 통해 확인한 안벽의 활동 시작 구간을 음영으로 표시하였다. 안벽의 활동 시작점은 Mononobe-Okabe 방법의 가정사항에 근거하여, 횡방향 변위가 급증하기 시작하는 시점과 안벽과 뒤채

움 지반 사이의 상대 침하량이 유발되는 시점을 고려하여 선정하였다. 그 결과 5 m 안벽은 Base PGA = 0.280 g, Average PGA = 0.340 g에서 활동파괴가 일어났으며, 이는 각각 예상 활동파괴 시점과 0.02 g, 0.21 g 차이를 보이고 있다.

Fig. 7은 15 m 안벽에 대한 실험결과이며, (a), (b)는 내진설계 표준서[2]의 10 m 이상의 안벽에 적용하는 k_h 산정식에 따라 벽체 뒤채움 지반 지표면 최대지반가속도(Surface PGA)가 증가함에 따른 안벽의 횡방향 변위량과 안벽 및 뒤채움 지반의 침하량을 각각 나타내고 있다. Fig. 7의 (c), (d)는 내진성능 평가요령[5]의 k_h 산정식에 따라 안벽의 뒤채움 지반 최대지반가속도의 평균(Average PGA)이 증가함에 따른 안벽의 횡방향 변위량과 안벽 및 뒤채움 지반의 침하량을 보여주고 있다.

Fig. 7에서의 실선은 $k_h(0.13)$ 으로 설계된 15 m 안벽의 내진설계 표준서[2]에 따른 예상 활동파괴 시점(Surface PGA = $2 k_h$, 0.260 g)을 의미하며, 파선과 음영은 Fig. 6과 의미하는 바가 같다. 비교 결과 15 m 안벽은 Surface PGA = 0.290 g, Average PGA = 0.230 g에서 활동파괴가 일어났으며, 이는 각각 예상 활동파괴 시점과 0.03 g, 0.10 g의 차이를 도출하고 있다.

본 연구에서 수행한 동적원심모형실험 결과를 통해 내진설계 표준서[2]의 k_h 산정법은 5 m와 15 m 실험결과 모두 예측과 계측이 유사함을 확인하였다. 반면 내진성능 평가요령[5]의 k_h 산정 방법은 5 m와 15 m 실험결과 모두 예측과 계측의 차가 컸으며, 특히 5 m 안벽 실험결과에서의 두 값의 차이가 15 m 실험결과에 비해 2배가량 더 큰 차이를 나타내고 있다. 그러므로 안벽의 높이에 따라 k_h 산정에 활용되는 최대지반가속도의 선정 위치를 합리적으로 고려해야 할 것으로 판단된다.

중력식 안벽은 항만구조물로서 지진 시 벽체전면과 배면에 작용하는 정적수압 및 벽체 전면에 작용하는 동적수압에 대한 추가적인 고려가 필요하다[13]. 하지만 중력식 안벽에 대한 내진설계 및 안정성 검토는 뒤채움 지반이 건조사질토인 중력식 옹벽을 대상으로 제안된 Mononobe-Okabe 공식을 공통적으로 적용하고 있으므로 정확한 k_h 검증에 대해 본 연구에서는 건조사질토 조건에서의 실험을 수행하였다[16]. 또한 현재 국내 항만구조물 설계기준 상에는 내진 안정성 평가 시 Ofunato, Hachinohe 그리고 인공지진파에 대한 검토를 요구하고 있으나 본 실험에서는 단주기적 국내 지진 특성을 고려하여 Ofunato에 대한 검증만이 수행되었다. 이에, 향후 지진 시 수압이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위한 포화지반 조건에서의 실험과 입력지진파의 주파수 성분에 따른 구조물의 영향을 검증하기 위해 Hachinohe 및 인공지진파를 이용한 추가적인 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 서로 상이한 내진설계 표준서[2]와 내진성능 평가요령[5]의 k_h 산정법에 대한 일원화된 개선방향을 제시하기 위해 국내의 항만 내진설계기준을 비교 분석하였다. 문헌연구를 바탕으로 k_h 산정 시 최대지반가속도 보정계수, 안벽 높이, 안벽 허용변위가 고려 되어야함을 제시하였으며, 내진설계 표준서[2]는 상기 내용을 부분적으로 포함하고 있는 반면 내진성능평가요령[5]의 k_h 산정법은 안벽의 허용변위에 따른 보정계수를 적

용하지 않아 주로 2등급 붕괴방지수준(허용변위 30 cm)인 중력식 안벽에 대한 내진 안정성 평가 시 보수적인 결과를 초래할 수 있음을 확인하였다. 이를 확인하기 위해 동적원심모형실험을 통해 국내 두 기준의 비교 검증을 실시하였다. 실험 결과, 산정된 k_h 는 내진설계 표준서[2]와 유사하였고 내진성능 평가요령[5]과는 다소 차이가 있음을 확인하였다. 내진설계 표준서[2]와 내진성능 평가요령[5] 두 기준의 차이에서 발생하는 부작용을 최소화 하기 위해 조속히 최대지반가속도 보정계수, 안벽 높이, 안벽 허용변위를 고려한 통일된 k_h 산정법이 제안되어야 할 것으로 판단된다. 더불어 향후 국내 항만 내진설계기준에 성능기반 내진설계 개념을 도입하기 위해 설계 지진에 대한 대상 구조물의 성능(허용 변위량)을 정확하게 예측할 수 있는 k_h 산정법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원(항만 및 어항설계기준 고도화를 위한 성능기반 내진설계 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Ministry of Construction and Transportation, Research of Seismic Design Criteria (II), Earthquake Engineering Society of Korea, c1997.
2. Ministry of Oceans and Fisheries, Seismic Design Standards of Harbor and Port, Earthquake Engineering Society of Korea, c1999.
3. Seo HY, Park KS, Kim IH, Kim DS, A discussion on the improvement of seismic design criteria of infrastructures, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2014;18(5):231-240.
4. Jo SB, Ha JG, Lee JS, Kim DS, A Discussion on the Improvement of Pseudo-Static Seismic Design Criteria of Retaining Wall in Domestic, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2015; 19(2):45-53.
5. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Seismic Performance evaluation & improvement revision of existing structures (Harbors), Korea Infrastructures Safety and Technology Corporation, c2012.
6. International Navigation Association, Seismic Design Guidelines for Port Structures, c2001.
7. Noda S, Uwabe T, Chiba T, Relation between seismic coefficient and ground acceleration for gravity quay wall, Report of Port and Harbour Research Institute, 1975;14(4):67-111.
8. Ministry of Transport, Technical standards for Ports and Harbour Facilities in Japan, c1999 translated version of 港灣の施設物の技術上の基準同解説(日本港湾協會, 1999)
9. Comite Europeen de Normalisation, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 5: Foundations, Retaining Structures, geotechnical Aspects, CEN, Brussels, c2004.
10. Overseas Coastal Area Development institute of japan, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, c2009.

11. Kramer, Steven L, Geotechnical Earthquake Engineering, Pearson Education India, 1996;466-505.
12. Jo SB, Ha JG, Yoo MT, Choo YW, Kim DS, Seismic behavior of an inverted T-shape flexible retaining wall via dynamic centrifuge tests, Bulletin of earthquake engineering, 2014;12(2):961-980.
13. Kim SR, Jang IS, Chung CK, Kim MM, Evaluation of Seismic Displacements of Quay Walls, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005;25:451-459.
14. Kim DS, Kim NR, Choo YW, Cho GC, A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea, KSCE Journal of Civil Engineering, 2013;17(1):77-84.
15. Lee SH, Choo YW, Kim DS, Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013;44:102-114.
16. Zeng X, Seismic Response of Gravity Quay Walls, I: centrifuge modeling, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998; 124(5):406-417.