

신뢰성설계법 적용을 위한 항만시설의 하중저항계수 개발 연구 Development of Load and Resistance Factors for the Reliability based Design of Harbor Facilities

허정원* · 김동현** · 이화수*** · 안익성****

Jungwon Huh*, Dong-Hyawn Kim**, Hwa-Soo Lee*** and Ik-Seong Ahn****

요 지 : 본 연구에서는 확률론적 신뢰성해석법을 기반으로 중력식 항만구조물(케이슨식 혼성방파제 및 케이슨식 안벽)에 적용가능한 하중저항계수설계법(LRFD)을 개발하였다. 이를 위해 동·서·남해안 전 해역에 분포하는 대표적인 국내 실 설계 사례를 체계적으로 수집 분석하여, 구조물의 한계상태별 정량적 파괴확률 수준을 평가하였다. 기설계 구조물의 내재적 안전도 분석 결과와 국내외 설계기준의 신뢰성 지표 간 일관성을 종합적으로 고려하여 합리적인 목표신뢰성지수를 설정하였으며, 이를 기초로 일계신뢰도법(FORM) 및 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 기반의 코드보정(Code Calibration)을 수행하여 최적의 하중저항계수를 산정하였다. 제안된 하중저항계수를 적용할 경우 체제 안정 및 하부지반 설계 시 목표 신뢰성수준을 일관되게 만족하는 합리적 한계상태설계를 구현할 수 있으며, 이는 향후 국내 신뢰성기반 항만설계기준 개정을 위한 고도화된 기술적·학술적 표준으로 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 신뢰성설계, 방파제, 안벽, 목표신뢰성지수, 하중저항계수, 코드보정

Abstract : In this study, a Load and Resistance Factor Design (LRFD) method applicable to gravity-type port structures (caisson composite breakwaters and caisson-type quay walls) was developed based on probabilistic reliability analysis methods. To this end, representative domestic design cases distributed across all coastal areas of the East, West, and South coasts were systematically collected and analyzed to evaluate the quantitative failure probability levels for each limit state of the structures. A reasonable target reliability index was established by comprehensively considering the consistency between the results of intrinsic safety margin analyses of existing structures and the reliability indicators of domestic and international design codes. Based on this, code calibrations using the First Order Reliability Method (FORM) and Monte Carlo Simulation (MCS) were performed to determine the optimal load and resistance factors. Applying the proposed load and resistance factors enables the implementation of a rational limit-state design that consistently satisfies the target reliability levels in both structure stability and subgrade design; this is expected to contribute as an advanced technical and academic standard for future revisions to Korea's reliability-based port design codes.

Keywords : reliability based design, breakwater, quaywall, target reliability index, load resistance factor, code calibration

1. 서 론

신뢰성설계법은 재해에 대비한 구조물의 정량적 성능의 예측 및 관리, 효율적 생애주기 유지관리 측면에서 장점을 가지기 때문에 세계적으로 항만구조물 설계에 순차적으로 도입되어 왔다. 유럽에서는 PIANC가 부분안전계수법을 이용한 항만구조물 신뢰성설계법을 도입하였다(PIANC, 1992). Working group 28에서는 직립식 방파제에 대한 신뢰성설계법으로 부

분안전계수를 제안하였다(PIANC, 2003). 미국 공병단(US Army corps of engineers)에서는 항만구조물의 신뢰성설계법을 독자적으로 개발하지 않고 유럽의 연구결과를 그대로 채택하여 Coastal Engineering Manual(US Army corps of engineers, 2006)을 발표하였다. 아시아권에서는 중국이 먼저 신뢰성설계기준을 도입했으며 유럽과 달리 부분안전계수를 개별 하중 및 저항력에 적용하는 방식을 채택하였다(MTP, 2000). 일본은 2007년에 최초로 부분안전계수를 이용한 방파

*전남대학교 토목공학과 교수(Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University)

**군산대학교 해양건설공학과 교수(Corresponding author: Dong Hyawn Kim, Professor, Dept. of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, 558 Daehangro, Kunsan, Jeonbuk 54150 Korea, Tel: +82-63-469-1862, eastlite@kunsan.ac.kr)

*** (주)한국항만기술단 사장(President, Korea Port Eng. Co., Ltd.)

**** (주)항도엔지니어링 사장(President, Hangdo Eng. Co., Ltd.)

제 및 안벽 설계법을 도입하였으며 2018년에는 하중저항계수법으로 설계방법을 변경하였다(JPHA, 2007; JPHA, 2018). 우리나라에서는 항만구조물 신뢰성설계표준서(MLTMA, 2011) 연구를 통해 신뢰성설계법의 기반을 닦았다. 여기에서는 방파제 등에 대한 신뢰성해석법의 이론적 개발을 주로 다루었으며 실용적인 수준의 부분안전계수를 도출하지는 않았다. 그 후 다양한 설계사례를 이용한 코드보정방법으로 하중저항계수법을 개발함으로써 신뢰성설계법을 이용한 항만구조물 설계기준화의 기틀을 마련하였다(Kim, 2019, 2020; Kim and Huh, 2021; Doan et al., 2020, 2021; Huh et al., 2021; MOF, 2022). 여기에서는 다양한 방파제의 설계사례를 이용하여 하중저항계수를 도출하였으며 목표신뢰성지수를 특정하지 않고 다양한 목표신뢰성지수에 대한 하중저항계수를 제시하였다.

본 연구에서는 그동안의 연구방법론과 설계사례 분석을 발전시키고 목표신뢰성지수를 합리적으로 설정함으로써 하중저항계수법에 기반한 항만구조물 신뢰성설계법을 개발하였다. 구조형식으로는 혼성식 방파제(무공 및 유공)와 중력식 안벽체제의 활동, 전도, 지지력 및 원호활동 파괴모드를 다루었다. 2장에서는 하중저항계수 보정을 위한 신뢰성해석의 이론적 방법을 다루었으며 3장에서는 혼성식 방파제와 케이슨식 안벽의 실제 하중저항계수 산정과정을 보여준다. 각 구조형식별로 기존 구조물 설계사례를 다양하게 분석하여 하중저항계수를 보정하였다. 4장에서는 본 연구의 주요 결론을 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1 상부구조물

부분안전계수법에서는 모든 설계변수(X_i)에 안전계수(γ_{X_i})를 적용하지만 하중저항계수법에서는 하중값(S)과 저항값(R)에 각각 하중계수(γ_S)와 저항계수(γ_R)를 적용한다. 어떤 파괴모드에 대한 한계상태함수가 식(1)과 같다고 하자.

$$g(X) = R(X_1, X_2, \dots, X_n) - S(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

이를 하중저항계수법으로 설계할 때 해당 파괴모드는 식(2)와 같을 때 안정으로 판단한다.

$$\gamma_R R(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq \gamma_S S(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

하중계수(γ_S)와 저항계수(γ_R)는 부분안전계수(γ_{X_i})로 계산한 값과 하중저항계수로 구한 값이 같다는 조건으로부터 각각 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\gamma_S = \frac{S(\gamma_{X_1} X_1, \gamma_{X_2} X_2, \dots, \gamma_{X_n} X_n)}{S(X_1, X_2, \dots, X_n)} \quad (3)$$

$$\gamma_R = \frac{R(\gamma_{X_1} X_1, \gamma_{X_2} X_2, \dots, \gamma_{X_n} X_n)}{R(X_1, X_2, \dots, X_n)} \quad (4)$$

코드보정을 위해 사용하는 설계사례가 여러 개일 때 각 사례마다 산정되는 하중계수와 저항계수는 서로 다르게 산정된다. 따라서 설계기준으로 확정하기 위해서는 각 사례에서 구한 하중저항계수를 최적화해서 단일값으로 제시해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 최적화 문제를 정식화한 후 최종 하중저항계수를 도출한다.

$$\min_{\gamma_R, \gamma_S} \text{Cost} = \sum_{i=1}^N [W_\beta \{\beta_T - \beta_i(\gamma_R, \gamma_S)\}^2 + W_\gamma \{(\gamma_{R_i} - \gamma_R)^2 + (\gamma_{S_i} - \gamma_S)^2\}] \quad (5)$$

$$\beta_i(\gamma_R, \gamma_S) > \beta_T \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

여기서, N 은 코드보정에 사용한 설계사례의 개수를 의미한다. W_β 와 W_γ 는 신뢰성지수와 하중저항계수의 가중치를 의미하며 경험적인 값을 적용한다. 본 연구에서는 각각 0.5를 적용하였다. 식(6)은 최종 하중저항계수(γ_R, γ_S)를 적용한 개별 설계사례의 신뢰성지수 $\beta(\gamma_R, \gamma_S)$ 가 목표신뢰성지수를 상회하도록 제약하기 위한 것이다. 코드보정 시 실무적으로 가장 어렵고 중요한 것은 목표신뢰성지수를 어떻게 설정하느냐의 문제이다. 목표신뢰성지수를 정하기 위한 이론적 방법은 다양하나 현실적으로 가능한 방법을 적용하여야 한다.

2.2 하부지반

이 연구에서 하부지반에 대해서는 현행설계법(Bishop의 간편법)에 따라 원호활동 및 편심경사하중 지지력의 검토 및 분석을 실시하여 레벨1 신뢰성설계법인 하중저항계수설계법에 기초한 하중저항계수를 제안하였다.

국내의 항만 및 어항 설계기준(KPHA, 2018)에서 방파제 및 안벽 등의 중력식 구조물 기초지반의 원호활동 및 편심·경사하중에 대한 지지력 검토는 분할법의 하나인 Bishop의 간편법을 이용한 원호활동 해석법에 의하여 산정하는 것을 표준으로 정의하고 있다(KDS 64 10 11, KDS 64 23 10, KDS 64 45 20). Bishop의 간편법에 의한 안정해석의 한계상태설계 검토식은 식(7)을 이용하여 계산한다. Bishop의 간편법에서는 하중계수 γ_S 와 저항계수 γ_R 를 설정한 후(일반적으로 $\gamma_S = \gamma_R = 1.00$), 식(7)을 만족하는 최소 조정계수 γ_m 을 반복 수렴계산을 통해 산정하고, 그 값이 조정계수의 표준 하한값보다 큰지 확인함으로써 안정성을 검토할 수 있다.

$$\frac{\gamma_m}{\gamma_R} \frac{\sum \{ (W + q) \sin \theta + a P_H / R \}}{\sum \left[\{ cs + (W' + q) \tan \phi \} \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi / (\gamma_m / \gamma_R)} \right]} \leq 1 \quad (7)$$

여기서, R 은 원호활동의 활동원 반경(m), c 는 점성토지반인 경우에는 비배수 전단강도, 사질토지반인 경우에는 배수 조건에서 겉보기 점착력(kN/m²), W' 은 단위길이당 분할면 유효 중량(흙의 중량, 수면 아래에서는 수중 단위체적 중량)(kN/m), q 는 분할면에 작용하는 상재하중(kN/m), θ 는 분할면 저

면이 수평면과 이루는 각($^\circ$), ϕ 는 점성토지반인 경우에는 0, 사질토지반인 경우에는 배수조건에서 내부마찰각($^\circ$), W 는 단위길이당 절편 전체 중량(흙과 물의 전체 중량)(kN/m), P_H 는 원호활동의 활동원 내 흙덩어리에 대한 단위길이당 수평하중(kN/m), a 는 P_H 의 작용점에서 원호활동의 활동원 중심까지의 팔 길이(m), s 는 분할편의 폭(m), γ_s 는 하중계수, γ_R 는 저항계수, γ_m 은 조정계수이다.

본 연구에서는 실제 국내 설계 사례를 바탕으로 현행 결정론적 안전율과 확률론적 신뢰성 수준을 비교·평가하여 합리적인 목표신뢰성지수와 목표과파확률을 설정하였다. 지층의 지반정수, 단위중량, 외력, 지진력 등의 불확실성을 고려해 평상시 원호활동 및 평상시, 지진시 편심·경사하중 지지력을 검토하는 과정은 가장 취약한 가상 파괴면을 찾아야 하는 암시적 한계상태의 복잡성을 내포하고 있다. 이러한 복잡한 수치 해석 알고리즘 문제를 해결하기 위해 아래에서 설명하는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation: MCS) 기반의 코드보정 절차(Fig. 1 참조)를 도입하였으며, 이를 통해 대상 지반의 불확실성을 체계적으로 반영한 하중저항계수를 최종 산정하여 제시하였다(Huh et al., 2021; Doan et al., 2020, 2021, 2022; Dang et al., 2023, 2024).

- (STEP 1) 콘크리트를 포함한 각 지층의 강도정수, 단위중량, 외력, 지진력 등의 불확실성을 반영하여 난수를 발생시킨 후 사면해석프로그램에 입력한다.
- (STEP 2) 충분히 많은 가상과파면을 발생시켜 그 중, 가장

불안한(저항모멘트/하중모멘트 비가 가장 작은) 가상과파면을 찾고, 이때의 저항모멘트와 하중모멘트를 분리하여 계산하여 저장한다.

- (STEP 3) (STEP 1)~(STEP 2)의 과정을 시뮬레이션 횟수만큼 반복하는 MCS를 수행한다.
- (STEP 4) MCS로부터 저장된 각 시뮬레이션별 안전율(저항모멘트/하중모멘트 비), 하중모멘트 및 저항모멘트를 안전율의 오름차순으로 정리하여 전체 시뮬레이션 회수(N) 대비 과파횟수(n ; 안전율 = 저항모멘트/하중모멘트 비가 1보다 작은 횟수)를 계산하여 과파확률을 계산하고, 이를 통해 등가의 신뢰성지수를 계산한다.
- (STEP 5) 계산된 제체 원호활동 및 지지력에 대한 과파확률이 목표과파확률과 상이할 경우, 공학적 판단을 이용하여 지반정수의 조합이나 사면의 형상 등을 변경하면서 산정된 과파확률이 목표과파확률과 같아지도록 한다.
- (STEP 6) 제체 원호활동 및 지지력에 대한 과파확률이 목표과파확률과 같아지는 경우의 저항모멘트와 작용모멘트의 값이 최확과파점(또는 설계점)(R_{LS} , Q_{LS})으로 정의되며, 아래 식(8)과 같이 저항모멘트와 작용모멘트의 공칭값(R_m , Q_n)으로 나누어 하중계수 및 저항계수를 산정한다.

$$\gamma_R = \frac{R_{LS}}{R_n}, \gamma_S = \frac{Q_{LS}}{Q_n} = \frac{S_{LS}}{S_n} \quad (8)$$

여기서, γ_R 은 저항계수이고, γ_S 는 하중계수이다.

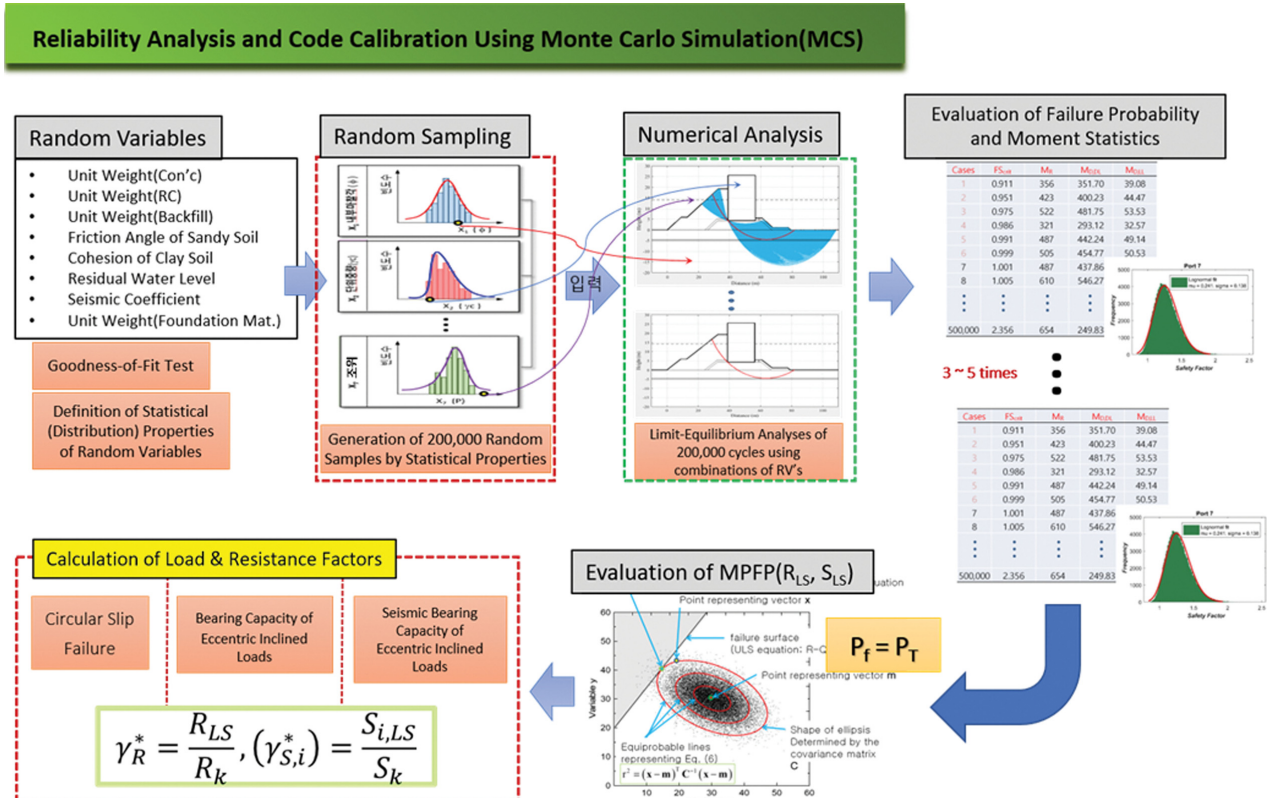


Fig. 1. Code calibration procedure for estimation of load and resistance factors.

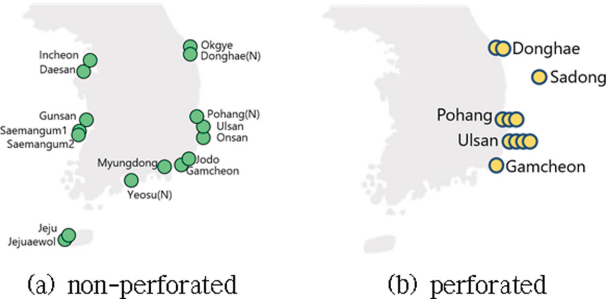


Fig. 2. Location of composite breakwater caisson.

3. 하중저항계수 보정

3.1 상부구조물

3.1.1 혼성식 방파제

이론적 배경에서 제안한 방법을 이용한 혼성식 방파제(무공 및 유공)에 대한 보정을 수행하였다. 각 형식별 하중저항계수 보정을 위해 수집한 기존 구조물의 위치는 Fig. 2와 같다.

혼성제의 활동 및 전도 파괴모드에 대하여 신뢰성해석을 수행하기 위해 정의한 한계상태함수는 각각 식(9) 및 (10)과 같다.

$$g_s = f_c (\sum W_i - B - U) - P \quad (9)$$

$$g_o = \sum x_i W_i - x_B B - x_U U - y_P P \quad (10)$$

여기서 f_c , W_i , B , U , P 는 각각 제체와 마운드 사이의 마찰 계수, 제체, 부력, 양력 및 파력이다. 또한, x_i 는 하중 i 의 작용거리이다. 신뢰성해석에 사용한 설계변수의 확률변동성은 Table 1과 같다(MOF, 2022). Table에서 Characteristic ratio (특성비)는 평균값에 대한 특성값의 비이며 coefficient of variation(변동계수)는 평균값에 대한 표준편차의 비이다. 제체의 무게에 사용한 첨자는 무근콘크리트(c), 철근콘크리트(rc) 및 채움석(f) 등이다. WL 은 항 위치에 따른(서해/남해/동해) 조위이며 G 는 고파압에 의한 파력의 불확실성을 나타내는 변수이다.

일계신뢰도법(Hasofer and Lind, 1974)으로 무공케이슨식 혼성제 제체의 신뢰성해석을 수행한 결과 Fig. 3과 같은 신뢰성지수를 구했다. 각 항마다 신뢰성지수의 편차가 컸으며 전도파괴모드의 신뢰성지수가 활동파괴모드보다 매우 크게 나타났다. 기존의 방파제 설계가 활동에 의해 지배되기 때문이

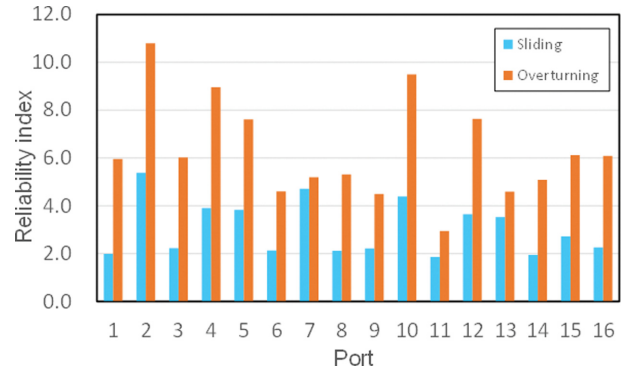


Fig. 3. Reliability indices of breakwaters.

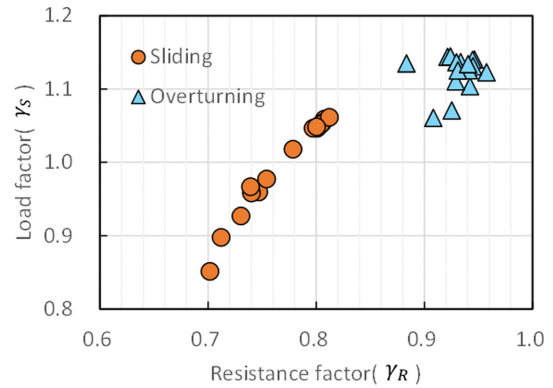


Fig. 4. Load and resistance factors of breakwaters.

다. 이론에서 제시한 식(3)과 (4)를 이용하여 목표신뢰성지수를 2.4로 설정한 후 개별 항별로 하중저항계수를 구한 결과가 Fig. 4이다. 항별로 신뢰성수준이 다르기 때문에 하중저항계수 또한 다르게 나타났다.

방법론의 검증에 위해 일본 항만설계기준(JPHA, 2018)의 혼성제 하중저항계수와 본 연구의 결과를 Table 2에서 비교하였다. 본 연구에서 사용한 방법에 일본 항만설계기준과 동일한 목표신뢰성지수를 적용해서 구한 하중저항계수를 비교하였다. 하중계수를 저항계수로 나눈 비율이 활동파괴모드에서는 약 0.8%, 전도파괴모드에서는 1.7% 차이가 발생하였다. 각 방법에서 적용한 설계사레가 차이가 있음을 감안할 때 매우 오차가 적다고 할 수 있다.

이렇게 다양한 하중저항계수를 기준화하기 위해서는 식(5)와 (6)의 최적화를 수행해서 단일 하중저항계수를 결정해야 한다. 여기에서 중요한 것은 목표신뢰성지수를 어떻게 결정할 것이냐의 문제이다. 이론적으로 볼 때 총생애주기비용을

Table 1. Characteristic ratios (CR) and coefficient of variation (COV)

Symbol	CR	COV	Symbol	CR	COV
f_c	1.06	0.15	WL	1.00	0.05/0.12/0.20
W_c	1.02	0.02	non-perforated	0.74	0.239
W_{rc}	0.98	0.02	perforated	0.799	0.223
W_f	1.02	0.04	-	-	-

Table 2. Comparison of load and resistance factors for breakwaters

Category	Sliding ($\beta_T = 2.257$)				Overturning ($\beta_T = 2.097$)			
	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	ratio	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	ratio
Japan	0.83	1.08	1.30	1.000	0.95	1.14	1.20	1.000
this study	0.79	1.02	1.29	0.992	0.92	1.12	1.22	1.017

Table 3. Final load and resistance factors for composite breakwater

Front wall type	P_f (%)	β_T	Sliding			Overturning		
			γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R
non-perforated	1.390	2.20	0.74	0.94	1.27	0.91	1.10	1.21
perforated	2.275	2.00	0.84	1.07	1.27	0.87	1.17	1.34

최적화하여 결정하는 것이 가장 합리적일 수 있으나 현실적으로 생애주기비용을 산정할 수 있는 기초자료가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 설계사례 방파제가 가지는 파괴확률의 평균값을 구하고 그에 상응하는 신뢰성지수를 구하여 적용하였다.

한편, 기존 방파제는 최근 턴키 등의 발주 방식으로 인해 지나치게 과다 설계된 측면이 있어 파괴확률이 극히 낮게 설계되는 사례가 빈번하다. 기존 방파제 설계사례를 그대로 이용하여 코드보정을 할 경우 하중저항계수가 지나치게 보수적으로 결정될 우려가 있다. 이를 완화하기 위하여 기존구조물의 설계를 다소 조정하여 안전율 1.2에 근접하게 조정된 후 코드보정을 수행하였다. 이런 과정을 거치는 이유는 지나치게 보수적인 결과를 해소함으로써 안전성과 경제성을 모두 확보할 수 있을 것으로 기대하기 때문이다. 무공식 혼성체와 유공식 혼성체의 경우 최종 확정된 목표신뢰성지수와 이를 통해 구한 하중저항계수를 Table 3에 정리하였다. 하중계수와 저항계수의 비율을 보면 1.21~1.34의 값을 갖고 있다. 결정론적 설계법에서 안전율을 1.2로 사용한 것과 비교하면 다소 안전측으로 변경된 것임을 알 수 있다.

3.1.2 케이슨식 안벽

혼성식 방파제와 동일한 방법을 이용하여 케이슨식 안벽의 활동, 전도 파괴모드에 대한 하중저항계수를 산정하였다. Fig.

**Fig. 5.** Location of caisson-type quay wall.

5와 같다. 서해, 남해, 동해에 고루 분포되도록 사례를 모았으며 사용된 설계사례의 총합은 23개이다.

케이슨식 안벽 활동 및 전도 파괴모드의 신뢰성해석을 위한 한계상태함수는 식(11) 및 (12)와 같다.

$$g_s = f_c (\sum W_i - B + E_v) - (k_h \sum W_i + E_h + D + R_w + S) \quad (11)$$

$$g_o = (\sum x_{w_i} W_i - x_B B + x_{E_v} E_v) - (k_h \sum y_{w_i} W_i + y_{E_h} E_h + y_D D + y_{R_w} R_w + y_S S) \quad (12)$$

여기서 E_v , E_h , D , R_w , S 및 k_h 는 각각 연직토압력, 수평토압력, 동수압력, 잔류수압력 및 수평지진계수이다. 각 설계변수의 확률변동성은 Table 4와 같다(MOF, 2022).

케이슨식 안벽에 대한 검증 또한 일본의 항만설계기준에서 제시한 하중저항계수와와의 비교를 통하여 Table 5에 제시하였다. 활동 파괴모드에서 하중계수/저항계수 비는 2.5%, 전도 파괴모드에서는 4.3% 차이가 발생하였다. 일본과 한국에서 사용한 설계사례의 차이를 감안하면 매우 작은 차이라고 판단된다.

케이슨식 안벽의 목표신뢰성지수를 정하기 위하여 기존 안벽의 평균 파괴확률에 상응하는 신뢰성지수를 구한 결과 평균시 활동은 2.543, 전도는 16.538로 매우 큰 값을 가진다. 따라서 설계사례의 23개 케이슨식 안벽의 안전율을 1.2(평상시) 및 1.1(지진시)로 조정하여 코드보정을 하였다. 본 연구에서는 이를 현행설계기준 신뢰성수준으로 명하였다. 그 결과 목표파괴확률과 목표신뢰성지수를 산정하였고 이에 따른 하중저항계수를 보정하였다. Table 6은 평상시 및 지진시 케이슨식 안벽의 하중저항계수를 보여준다. 하중저항계수비를 보면 1.2 및 1.1보다 약간 큰 값을 가지게 된다.

Table 4. Characteristic ratios (CR) and coefficient of variation (COV)

Symbol	CR	COV	Symbol	CR	COV
f_c	1.06	0.15	RWL	1.00	0.05
W_c	1.02	0.02	E_v/E_h	1.00	0.12
W_{rc}	0.98	0.02	k_h	1.00	0.10
W_f	1.02	0.04	-	-	-

Table 5. Comparison of load and resistance factor for quay wall

Category	Sliding ($\beta_T = 1.3225$)				Overturning ($\beta_T = 2.6874$)			
	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	ratio	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	ratio
Japan	0.87	1.06	1.218	1.000	0.99	1.23	1.242	1.000
this study	0.85	1.01	1.188	0.975	0.96	1.14	1.188	0.957

Table 6. Final load and resistance factors for caisson-type quay wall

load	failure mode	P_f (%)	β_T	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R
normal	sliding	7.678	1.43	0.84	1.02	1.214
	overturning	0.076	3.17	0.90	1.15	1.278
earthquake	sliding	16.676	0.97	0.93	1.03	1.108
	overturning	3.585	1.80	0.91	1.06	1.165

Table 7. Characteristic ratios (CR) and coefficient of variation (COV) for breakwaters

Symbol	CR	COV	Symbol	CR	COV
Caisson	γ_c	1.02	Soil	c	0.10; 0.15; 0.25
	γ_{rc}	0.98		$\tan\phi$	0.10
	γ_f	1.02		γ_{rubble}	0.03
WL	1.00	0.05/0.12/0.20	Sub-soil	γ_{sand}	0.03
non-perforated	G	0.74		γ_{clay}	0.02
perforated		0.799		γ_{rock}	0.02
k_h	1.00	0.10	-	-	-

3.2 하부지반

3.2.1 혼성식 방파제

2.2절에서 기술한 방법을 이용하여 무공 및 유공 혼성제 하부지반의 원호활동과 지지력에 대한 코드보정을 수행하였다. 신뢰성해석과 코드보정에 사용된 16개의 무공케이슨식 혼성제와 12개의 유공케이슨식 혼성제 설계사례 구조물의 위치는 이전 Fig. 2와 같다.

혼성식 방파제의 단면은 다양한 하부 지층과 상부공 층으로 나뉘며 각 층에 대해서 점착력, 마찰각, 단위중량 등에 대하여 불확실성을 가지는 확률변수로 취급해야 하며, 이에 대한 변동성은 지역 또는 지층분할 등의 여러 원인에 따라 달라지기 때문에 이를 객관적으로 정량화하기는 어렵다. 또한 상치 콘크리트 상부에 작용하는 재하량과 지진 해석시 적용하는 지진계수에 대해서도 불확실성을 가지는 변수로 보고 이에 대한 특성비와 변동계수 등의 통계특성을 결정해야 한다. 이 연구에서 적용한 확률변수의 통계특성은 선행연구(MLTMA, 2011; Kim and Huh, 2021; Huh et al., 2021; Doan et al., 2020, 2021, 2022; Dang et al., 2023, 2024)와 참고문헌(Park et al., 2008; Kwak et al., 2006, 2008; Huh et al., 2010; Kwak et al., 2010)의 값을 준용하였으며 Table 7과 같이 선정하였다. Table에서 Characteristic ratio(특성비)는 평균값에 대한 특성값의 비이며 coefficient of variation(변동계수)은 평균값에 대한 표준편차의 비이다. 여기서 WL 은 항위치에 따른(서해/남해/동해) 조위, G 는 고다과압에 의한 파

력, c 는 지반의 점착력(점성토 지반의 경우 비배수전단강도, 사질토 지반의 경우 배수조건의 겉보기 점착력(kN/m^2)), $\tan\phi$ 는 지반의 마찰각(여기서 ϕ 는 유효응력에 기초한 겉보기 전단저항각($^\circ$)), 그리고 γ_{rubble} , γ_{sand} , γ_{clay} 및 γ_{rock} 은 기초지반재료로 해저면 상부 소파공과 근고공, 해저면 사질토, 해저면 점토 및 암반의 단위중량에 대한 불확실성을 나타내는 변수이다.

각 항별 단면의 설계자료를 이용하여 무공케이슨식 혼성제의 파압시 원호활동, 파압시 및 지진시 편심·경사하중 지지력에 대하여 결정론적 해석과 신뢰성해석을 수행한 결과를 Fig. 6에 대표적으로 나타내었다. 음함수형태의 한계상태함수를 갖는 특성으로 인해 신뢰성해석은 Level III 방법인 Monte Carlo Simulation을 이용하였고 확률변수인 지반정수, 단위중량, 외력 등의 불확실성은 Table 7의 값을 적용하였다.

파압시 원호활동의 평균 안전율은 설계기준인 1.3을 상회하는 1.815로 분석되어 실제 구조물의 파괴확률이 매우 낮고 (평균 신뢰성지수 $\beta = 6.09$) 상당히 보수적으로 설계되었음을 확인하였다. 반면 파압시 편심·경사하중 지지력의 평균 안전율은 1.240으로 상대적으로 낮게 나타나 구조물 설계 시 가장 주의해야 할 지배적인 파괴모드로 분석되었다. 이로 인해 파압시 지지력의 신뢰성지수 역시 세 가지 검토 조건 중 가장 낮게 산정(평균 신뢰성지수 $\beta = 2.78$)되어 상대적으로 가장 높은 파괴확률을 보이는 파괴모드로 평가된다. 한편 무공케이슨식 혼성제의 지진 시 편심·경사하중 지지력은 평균 안전율이 2.122로 가장 높게 나타나 지진시 혼성식 방파제의 안

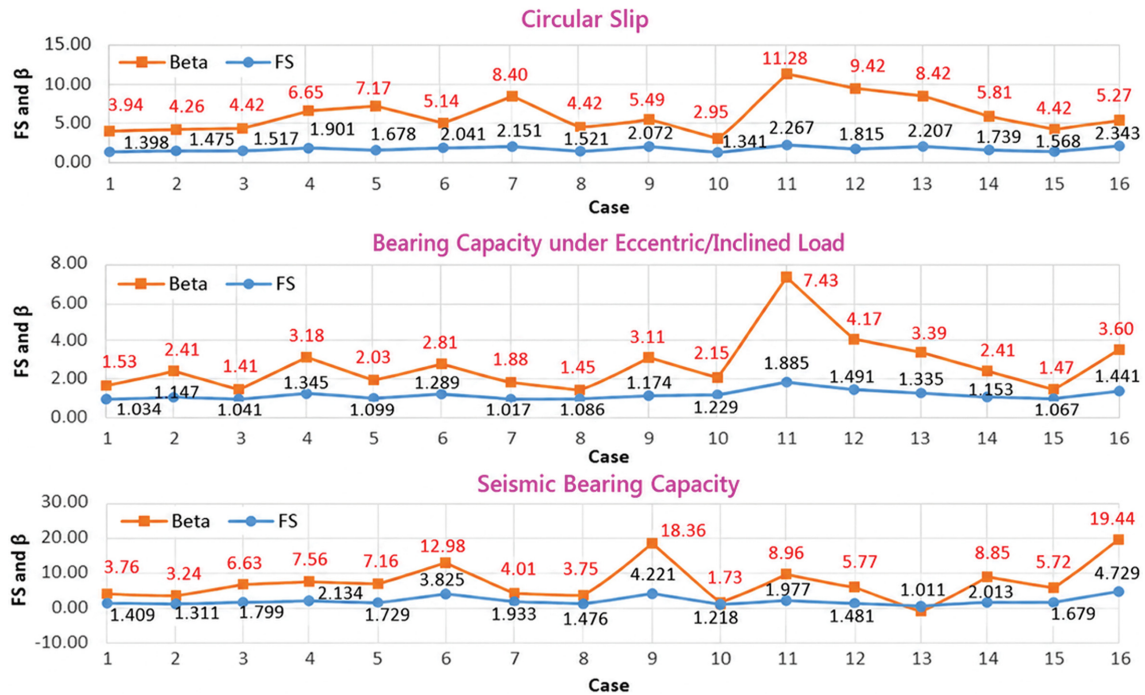


Fig. 6. Reliability analysis results of non-perforated caisson breakwaters.

정성에는 큰 문제가 없는 것으로 확인(평균 신뢰성지수 $\beta = 7.29$)되었다.

이 연구에서는 코드보정에 적용하는 목표안전성수준을 현행 설계기준의 최소 안전율 이상이며 필요시 추가 여유도를 고려한 값으로 선정하여 목표안전율을 설정하는 개념을 사용하였다. 혼성식 방파제의 하중저항계수 산정 시에 고려한 설계사례에서는 기초지반의 구성이 혼합토인 경우 및 DCM에 의해 지반보강된 경우를 포함하고 있으며, 이러한 지반구성은 근본적으로 안벽의 경우와 차이가 나며 하중저항계수 적용 시에도 이에 해당하는 기초지반에 대하여 적용할 수 있다.

코드보정에는 파압시 원호활동, 파압시 편심·경사하중 지지력 및 지진 시 편심·경사하중 지지력의 세 파괴모드를 고려하였다. 이 연구의 분석결과 및 과거 설계 관행 등에 근거하여 무공 및 유공케이슨식 혼성제의 세 파괴모드(한계상태)에 대해 아래 값과 같은 목표신뢰성지수 및 대응 목표파괴확률을 최종적인 하중저항계수 산정에 적용하였다.

- 파압시 원호활동(무공케이슨식 혼성제): $\beta_T = 3.00$, $p_{fr} = 1.350 \times 10^{-3}$
- 파압시 원호활동(유공케이슨식 혼성제): $\beta_T = 3.20$, $p_{fr} = 6.871 \times 10^{-4}$
- 파압시 편심·경사하중 지지력(무공 및 유공): $\beta_T = 2.00$, $p_{fr} = 2.275 \times 10^{-2}$
- 지진시 편심·경사하중 지지력(무공 및 유공): $\beta_T = 1.00$, $p_{fr} = 1.587 \times 10^{-1}$

혼성식 방파제 하부지반의 원호활동과 지지력 파괴모드에 대한 코드보정에 적용된 한계상태설계 기준식은 식(13)~(15)

로 정의할 수 있다.

$$\gamma_R R_k \geq \gamma_m \gamma_S S_k \quad (13)$$

$$R_d = \gamma_R R_k \quad (14)$$

$$S_d = \gamma_S S_k \quad (15)$$

여기서, γ_R : 저항계수

γ_S : 하중계수

γ_m : 조정계수(특별히 제시되지 않으면 1.00)

R_d : 저항 항의 설계값

S_d : 하중 항의 설계값

R_k : 저항 항의 특성값

S_k : 하중 항의 특성값

국내 항만 및 어항설계기준에서 적용하는 Bishop의 간편법의 경우에는 식(7)을 이용하여 저항과 하중의 특성값을 각기 아래 식(16)~(18)로 결정할 수 있다.

$$R_k = \sum \left[\frac{\{cs + (W' + q)\tan\phi\}\sec\theta}{1 + \tan\theta\tan\phi / F_f} \right] \quad (16)$$

$$S_k = \sum \left\{ (W + q)\sin\theta + \frac{1}{R} P_H a \right\} \quad (17)$$

$$F_f = \frac{R_k(F_f)}{S_k} \quad (18)$$

여기서, F_f 는 저항항과 하중항의 비를 나타내는 반복 수치 계산용 보조파라미터(γ_m/γ_R)이다.

Table 8. Load and resistance factors for the non-perforated caisson composite breakwater

Load condition	Failure Mode	P_{fi} (%)	β_T	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R
Wave	Circular Slip Failure	0.135	3.00	0.81	1.09	1.346
	Bearing Capacity Under Eccentric Loads	2.275	2.00	0.99	1.08	1.091
Earthquake	Bearing Capacity Under Eccentric Loads	15.870	1.00	0.96	1.07	1.115

Table 9. Load and resistance factors for the perforated caisson composite breakwater

Load condition	Failure Mode	P_{fi} (%)	β_T	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R
Wave	Circular Slip Failure	0.069	3.20	0.78	1.05	1.346
	Bearing Capacity Under Eccentric Loads	2.275	2.00	0.96	1.05	1.094
Earthquake	Bearing Capacity Under Eccentric Loads	15.870	1.00	0.98	1.07	1.092

Table 10. Characteristic ratios (CR) and coefficient of variation (COV)

Symbol	CR	COV	Symbol	CR	COV
Caisson	γ_c	1.02	Soil	c	0.10; 0.15; 0.25
	γ_{rc}	0.98		$\tan\phi$	0.10
	γ_f	1.02	Sub-soil	γ_{rubble}	0.03
WL	1.00	0.05/0.12/0.20		γ_{sand}	0.03
RWL	1.00	0.05		γ_{clay}	0.02
k_h	1.00	0.10		γ_{rock}	0.02

케이슨식 혼성제(무공 및 유공)의 현행 설계기준에 따른 신뢰성수준, 안전성 및 경제성을 종합적으로 고려하여 상기 결정된 목표신뢰성지수를 이용하여 파압시 원호활동, 파압시 및 지진시 편심·경사하중 지지력 한계상태에 대하여 코드보정을 통하여 결정된 최종적인 하중저항계수를 Table 8 및 9와 같이 제시하였다. 현행 설계기준의 안전율(파압시 원호활동: 1.3, 파압시 편심·경사하중 지지력: 1.0, 지진시 편심·경사하중 지지력: 1.0)과 비교하면 하중저항계수비가 기존의 안전율과 유사하거나 조금 더 보수적인 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 케이슨식 안벽

혼성식 방파제와 유사하게 2.2절에서 기술한 방법을 적용한 중력식 안벽 하부지반의 원호활동과 지지력에 대한 코드보정을 수행하였으며, 이 과정에 사용된 총 23개의 설계사례의 위치는 이전 Fig. 5에 나타내었으며 서해, 남해 및 동해에 고루 분포하고 있다. 또한 신뢰성해석과 코드보정에서 적용한 확률변수의 통계특성도 선행연구와 참고문헌(Park et al., 2008; Huh et al., 2007; Kwak et al., 2010; Doan et al., 2020, 2021, 2022; Dang et al., 2023, 2024)의 값을 적용하였으며 Table 10과 같이 선정하였다. 여기서 제시된 대부분의 확률변수에 대한 설명은 이전 3.2.1에서 기술하였으며, 추

가 변수인 RWL 은 잔류수위에 대한 불확실성을 나타내는 변수이다.

이 연구에서는 결정론적 해석 결과값에 기초하여 목표안전율을 선정하고, 선정된 목표안전율 값으로 조정된 설계단면의 신뢰성분석을 통하여 코드보정을 위한 목표파괴확률(또는 목표신뢰성지수)을 결정하였다. 즉, 코드보정에 적용하는 목표안전성수준은 현행 설계기준의 최소안전율 이상이며 필요시에 추가 여유도를 고려한 값으로 목표안전율을 설정하는 개념이다. 또한 검토된 설계 단면은 기초지반 구성이 대부분 사질토층 지배지반에 해당하며, 이는 케이슨식 안벽의 설계에서 고려되는 전형적인 지반조건이다. 따라서 여기서 제안하는 하중·저항계수는 사질토층이 지배적인 지반조건에 대해서 적용하는 것으로 제한한다. 기초지반의 구성이 점성토 지배지반이거나 원호활동면 또는 파괴면에 얹지 않은 점성토 지층을 포함하는 경우에는 기존의 안전율 설계법을 적용하는 것으로 제시하였다.

코드보정에는 평상시 원호활동, 평상시 편심경사하중 지지력 및 지진시 편심경사하중 지지력의 세 파괴모드를 고려하였다. 이 연구의 분석결과 및 과거 설계 관행 등에 근거하여 세 파괴모드(한계상태)에 대해 아래 값과 같은 목표조정안전율, 목표신뢰성지수 및 대응 목표파괴확률을 최종적인 하중저항계수 산정에 적용하였다.

Table 11. Load and resistance factors for the caisson quay wall

Load condition	Failure Mode	P_{fr} (%)	β_T	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R
Normal	Circular Slip Failure	0.097	3.10	0.76	1.00	1.316
	Bearing Capacity Under Eccentric Loads	0.440	2.62	0.83	1.00	1.205
Earthquake	Bearing Capacity Under Eccentric Loads	11.500	1.20	0.96	1.00	1.042

Table 12. Comparison of the load and resistance factors for the caisson quaywall (Circular Slip Failure only)

Category	Japan				This study				
	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	γ_m	γ_R	γ_S	γ_S/γ_R	γ_m	ratio
Sandy Soil Layer	0.83	1.01	1.217	1.00	0.76	1.00	1.316	1.0	1.081
COV of Cohesion, $V_c < 0.1$	0.86	1.05	1.221	1.00					1.078
COV of Cohesion, $V_c = 0.1\sim 0.15$	0.85	1.04	1.224	1.00					1.075
COV of Cohesion, $V_c = 0.15\sim 0.25$	0.80	1.02	1.275	1.00					1.032
COV of Cohesion, $V_c > 0.25$	1.00	1.00	1.000	1.30					1.012
Target reliability index	$\beta_T = 2.30$				$\beta_T = 3.10$				
Design data used to the code calibration	Ground conditions consisting of mixed layers (clay layer + sandy soil layer) and layers dominated by sandy soil in quay walls and breakwaters				Quay wall (Ground conditions dominated by sandy soil layers)				
Performance evaluation equation	Modified Fellenius Method (on average 7.6% and up to 13.2% more conservative than Bishop's Simplified Method)				Bishop's Simplified Method				

- 평상시 원호활동: $FS_T = 1.30$, $\beta_T = 3.10$, $p_{fr} = 9.7 \times 10^{-4}$
- 평상시 편심·경사하중 지지력: $FS_T = 1.20$, $\beta_T = 2.62$, $p_{fr} = 4.40 \times 10^{-3}$
- 지진시 편심·경사하중 지지력: $FS_T = 1.05$, $\beta_T = 1.20$, $p_{fr} = 1.15 \times 10^{-1}$

또한 혼성식 방파제와 동일하게 안벽 하부지반의 원호활동과 지지력 파괴모드에 대한 코드보정에 적용된 한계상태설계기준식도 이전 식(11)~(15)를 이용하였으며, 국내설계기준에서 적용하고 있는 Bishop의 간편법의 경우 식(7)을 이용하여 저항과 하중의 특성값도 각기 이전 식(16)~(18)로 결정하였다. 케이슨식 안벽에 대해서 현행 설계기준에 따른 신뢰성수준, 안전성 및 경제성을 종합적으로 고려하여 결정한 목표신뢰성지수를 이용하여 평상시 원호활동, 평상시 및 지진시 편심·경사하중 지지력 한계상태에 대하여 코드보정을 통하여 결정된 최종적인 하중저항계수를 Table 11과 같이 제시하였다. 현행 설계기준의 안전율(평상시 원호활동: 1.3, 평상시 편심·경사하중 지지력: 1.2, 지진시 편심·경사하중 지지력: 1.0) 비교하면 하중저항계수비가 기존의 안전율과 유사하거나 조금 더

보수적인 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이 연구에서 코드보정을 통하여 산정한 하중저항계수를 국외 설계기준 값과 비교하였다(Table 12 참조). 현재 항만구조물(방파제 및 안벽의 기초에 대해 공통적용) 설계에 대하여 하중저항계수설계법을 적용하고 있는 외국의 대표적 설계기준에 일본항만설계기준(JPHA, 2018)이 있으며, 일본에서는 평상시 및 지진시 편심·경사하중 지지력에 대해서는 기존 허용응력설계법의 안전율 개념을 적용하고 있으므로, 평상시 원호활동에 대해서만 하중저항계수를 비교할 수 있다. 양국 기준의 개발 조건 차이로 인해 간접적인 비교만 가능했으며, 정량적 분석을 위해 일본 기준의 하중저항계수비를 1.0으로 정규화했을 때 본 연구의 결과는 약 1.2%에서 8.1%의 미미한 편차를 나타냈다. 결과적으로 두 기준 간의 차이가 상대적으로 크지 않아 본 연구에서 산정된 계수의 타당성이 높음을 확인하였다.

이러한 수치적 차이가 발생한 첫 번째 원인은 일본 기준의 경우 다양한 연안구조물(안벽, 방파제, 호안)을 통합한 광범위한 자료를 사용했기 때문이다. 이에 따라 사질토뿐만 아니라 혼합층 지반기초의 영향이 반영되었고, 이는 목표신뢰성지수 설정의 차이로 이어졌다. 두 번째 원인은 양국 설계

기준이 표준으로 채택하고 있는 원호활동 설계검토식의 알고리즘적 차이에 기인한다. 일본은 원호활동에 대한 설계검토식이 Bishop법에 비해 안전율이 다소 낮게 산출되는 수정 펠레니우스법을 표준으로 적용하고 있는 상황이다. 반면 본 연구는 국내 항만 및 어항 설계기준(KPHA, 2018)의 표준인 Bishop의 간편법을 사용함에 따라 해석적인 차이가 발생하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 외곽시설 혼성식 방파제(무공 및 유공식)와 케이슨식 안벽에 대하여 신뢰성설계법 적용을 위한 하중저항계수를 산정하고 제시하였다. 제시된 하중저항계수는 혼성식 방파제 및 케이슨식 안벽의 기존 설계사례를 분석하여 개발하였으며 파괴모드별 목표신뢰성지수를 만족시키도록 하였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 하중저항계수를 이용하여 혼성식 방파제 및 케이슨식 안벽을 설계할 경우 각 구조형식별, 파괴모드별 목표신뢰성지수 이상의 신뢰성을 확보하는 설계를 할 수 있다.

상부 케이슨의 활동 및 전도 파괴모드에 대한 연구에서는 기존 설계사례의 신뢰성분석, 적정 목표신뢰성지수 확정, 개별 방파제의 하중저항계수 산정, 최적화를 통한 최종 하중저항계수 산정 등의 절차에 따라 수행하였다. 이 방법론은 일본 항만설계기준의 목표신뢰성지수를 적용하여 구한 값과 일본의 하중저항계수를 비교함으로써 검증하였다. 하중저항계수는 목표신뢰성지수의 함수이므로 어떻게 합리적으로 그 값을 정하느냐가 매우 중요하다. 본 연구에서 제시한 방법은 기존 설계기준이 가지고 있을 것으로 추정되는 신뢰성 수준을 간접적으로 구하고 이에 근거하여 하중저항계수 보정 최적화에 사용하였다.

하부지반의 파괴모드에 대해서도 국내 실제 설계 사례를 기반으로 현행 결정론적 안전율의 신뢰성 수준을 평가하고, 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 기반의 코드보정을 통해 하중저항계수설계법(LRFD) 체계를 구축하였다. 케이슨식 혼성체(무공 및 유공) 하부지반의 과압 및 지진시 원호활동 및 지지력 한계상태와 케이슨식 안벽의 평상시 및 지진시 원호활동 및 지지력 한계상태에 대해 산정된 최종 하중저항계수와 하중/저항 계수비는 현행 안전율 체계와 유사하거나 조금 보수적인 안전측 값을 나타내어 높은 설계적 연속성을 확보하였다. 이러한 하중저항계수설계법은 지반정수와 외력의 무작위적 불확실성을 체계적으로 수용한 결과로, 국내 항만구조물의 확률론적 안전성 최적화를 위한 실무적 기반을 제공한다. 동일한 해석 메커니즘을 전국 23개 케이슨식 안벽 사례로 확장하여 평상시, 지진시 원호활동 및 지지력 한계상태에 대한 하중저항계수를 정립하고, 이를 일본 항만설계기준(2018)과 비교하여 정량적 타당성을 검증하였다. 일본기준 대비 1.2~8.1%의 상대적 차이는 양국의 표준해석법(Bishop의 간편법 대 수

정펠레니우스법)간 알고리즘 및 수집 자료의 특성 차이에 기인한 것으로 본 제안 계수의 높은 적용성과 타당성을 방증한다. 이 연구성과는 항만구조물 기초지반 설계의 신뢰도를 정량적으로 고도화하였으며, 향후 국가 항만설계기준 개정을 위한 핵심 학술표준으로 기여할 것이다.

References

- Doan, N.S., Huh, J., Mac, V.H., Kim, D. and Kwak, K. (2020). Probabilistic risk evaluation for overall stability of composite caisson breakwaters in Korea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 148.
- Doan, N.S., Huh, J., Mac, V. H., Kim, D.H. and Kwak, K. (2021). Calibration of load and resistance factors for breakwater foundations under the earthquake loading. *Sustainability*, 13(4), 1730.
- Doan, N.S., Dang, P.V., Huh, J., Mac, V.H. and Haldar, A. (2022). Efficient approach for calibration of load and resistance factors in the limit state design of a breakwater foundation. *Ocean Engineering*, 251, 111170.
- Dang, P.V., Huh, J., Doan, N.S. and Kwak, K. (2023). Influence of spatial variability of soil strength on load and resistance factors calibration for the design of breakwater foundation. *Ocean Engineering*, 268, 113441.
- Dang, P.V., Mac, V.H., Huh, J., Kwak, K. and Park, J.H. (2024). Response surface method-based efficient approach for the load and resistance factors calibration of breakwater foundation considering soil spatial variability. *Applied Ocean Research*, 151, 104160.
- Huh, J., Doan, N.S., Mac, V.H., Dang, V.P. and Kim, D.H. (2021). Calibration of load and resistance factors for breakwater foundation design (application on different types of superstructures). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33(6), 287-292 (in Korean).
- Huh, J., Haldar, A., Kwak, K. and Park, J.-H. (2010). Realistic risk assessment of axially loaded pile-soil system using a hybrid reliability method. *Georisk*, 4(3), 118-126.
- Japan Port and Harbour Association (JPHA) (2007). *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.
- Japan Port and Harbour Association (JPHA) (2018). *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.
- Kim, D.H. (2019). Load & resistance factors calibration for limit state design of non-perforated caisson breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(6), 351-355 (in Korean).
- Kim, D.H. (2020). Load & resistance factors calibration for sliding and overturning limit state design of perforated caisson breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(6), 458-464 (in Korean).
- Kim, D.H. and Huh, J. (2021). Load & resistance factors calibra-

- tion for front covered caisson breakwater. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 33(6), 458-464 (in Korean).
 - Korea Port and Harbour Association (KPHA) (2018). Design Standard for Port and Harbor. Korea Port and Harbor Association, Seoul, Korea, Certified Ministry of Oceans and Fisheries in Korea (in Korean).
 - Kwak, K., Park, J.H., Choi, Y. and Huh, J. (2006). Evaluation of the resistance bias factors to develop LRFD for driven steel pipe piles. KSCE Journal, 26, 343-350.
 - Kwak, K., Huh, J., Kim, K.J., Park, J.H. and Lee, J. (2008). Target reliability indices of static design methods for driven steel pipe piles in Korea. KSCE Journal, 28, 19-29.
 - Kwak, K., Kim, K.J., Huh, J., Lee J.H. and Park, J.-H. (2010). Reliability based calibration of resistance factors for static bearing capacity of driven steel pipe piles. Canadian Geotechnical Journal, 47(5), 528-538.
 - Hasofer, A.M. and Lind, N. (1974). An exact and invariant first order reliability format. J. of Engrg. Mech. Div., ASCE, 100(1), 111-121.
 - Ministry of Transport of the PRC (MTP) (2000). Technical Code for Port Engineering.
 - Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2011). Standards for Reliability based Design of Harbor Structures (in Korean).
 - Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2022). Technical Development of Safe Harbor against Disaster (in Korean).
 - Park, J.H., Huh, J., Kim, M.M. and Kwak, K. (2008). Resistance factors of driven steel pipe piles for LRFD design in Korea. KSCE Journal, 28, 367-377 (in Korean).
 - PIANC. (1992). Analysis of rubble mound breakwaters. Working Group 12.
 - PIANC. (2003). Breakwaters with vertical and inclined concrete walls. Working Group 28.
 - US Army Corps of Engineers (2006). Coastal Engineering Manual. Washington, DC.
-

Received 16 July, 2026

Revised 29 July, 2026

Accepted 2 August, 2026