



Comparative analysis of caisson sections of composite breakwaters evaluated by Level I reliability-based design method

Lee, Cheol-Eung^a · Park, Dong Heon^a · Kim, Sang Ug^{a*}

^aDepartment of Architectural, Civil, and Environmental Engineering, Kangwon National University

Paper number: 18-022

Received: 12 March 2018; Revised: 27 March 2018; Accepted: 27 March 2018

Abstract

A methodology has been presented for evaluating the partial safety factors on the sliding failure mode of vertical caissons of composite breakwaters and for determining the cross sections of those by Level I reliability-based design method. Especially, a mathematical model has been suggested for the sake of a consistency of code format as well as convenience of application in practical design, for which the uncertainties associated with buoyancy and its own weight can be taken into account straightforwardly. Furthermore, design criteria equation has been derived by considering accurately the effect of uplift pressure, so that the cross sections of caissons can be assessed which must be safe against the sliding failure. It has been found that cross sections estimated from partial safety factors proposed in this paper are in very good agreement with the results of Level II AFDA and Level III MCS under the same target probability of failure. However, partial safety factors of the Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan and Coastal Engineering Manual in USA tend to estimate much bigger or smaller cross sections in comparison to the present results. Finally, many reliability re-analyses have been performed in order to conform whether the stability level of cross section estimated by Level I reliability-based design method is satisfied with the target probability of failure of partial safety factors or not.

Keywords: Composite breakwater, Partial safety factor, Sliding failure mode, Level I reliability-based design method, Target probability of failure

Level I 신뢰성 기반 설계법에 의해 산정된 혼성제 케이슨 단면의 비교 분석

이철웅^a · 박동현^a · 김상욱^{a*}

^a강원대학교 공과대학 건축토목환경공학부

요 지

혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 부분안전계수 산정과 Level I 신뢰성 기반 설계법에 의한 단면 결정 과정을 자세히 제시하였다. 특히 본 연구에서는 형식의 일치성과 실무에서의 적용 편의성을 위하여 부력 및 자중과 직접적으로 관련된 수위 및 케이슨을 구성하는 재료의 불확실성을 고려할 수 있는 수학적 모형을 제시하였다. 또한 양압력에 대한 영향을 정확히 고려하여 활동에 대해 안전한 혼성제 직립 케이슨 단면을 산정할 수 있는 설계기준식을 유도하였다. 본 연구에서 제시한 부분안전계수를 가지고 Level I 신뢰성 기반 설계법에 의해 산정된 단면이 동일한 목표파괴확률에 대한 Level II AFDA의 결과 및 Level III MCS의 결과와 매우 잘 일치하였다. 그러나 미국 및 일본의 항만 설계기준에서 제시한 부분안전계수를 이용한 결과는 그 보다 훨씬 크거나 작은 단면을 산정하고 있다. 마지막으로 부분안전계수의 목표수준과 Level I 신뢰성 기반 설계법으로 결정된 단면의 안정성 수준에 대한 일치성 여부를 확인하기 위한 다각적인 신뢰성 재해석이 수행되었다.

핵심용어: 혼성제, 부분안전계수, 활동파괴모드, Level I 신뢰성 기반 설계법, 목표파괴확률

*Corresponding Author. Tel: +82-33-250-6233
E-mail: sukim70@kangwon.ac.kr (S. U. Kim)

1. 서론

혼성제는 해저 사석 마운드로부터 해수면 위까지 거치된 대형 직립 케이슨의 자중으로 파력과 같은 외력에 저항하는 항만 외곽 방파 시설물 중 하나이다. 또한 혼성제는 연성체인 경사제와는 달리 강성체 구조물이기 때문에 한번 피해가 발생하면 그 피해 규모가 상대적으로 크다. 최근 기후변화에 따른 해양환경이 과거의 그것과 상당히 다르게 나타나고 있다. 이는 파고 등과 같이 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 인자들의 불확실성이 크게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 현행의 결정론적 설계법에 의해서는 해양환경의 불확실성을 고려할 수 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 신뢰성 설계법이 결정론적 설계법의 대안으로 제시되고 있다. 신뢰성 설계법은 임의의 파괴모드에 포함된 모든 확률변수의 불확실성을 고려해서 구조물이 내용년수 동안에 파괴될 확률을 정량적으로 계산해서 해당 파괴모드에 대한 파괴확률이 목표 파괴확률 이하가 되도록 단면을 결정하는 설계법이다.

신뢰성 설계법은 해석 방법 및 수준에 따라 Level I, Level II, 그리고 Level III로 분류된다. Level I은 형식적으로는 현행의 결정론적 설계법과 동일하나, 부분안전계수(partial safety factor)를 사용한다는 점이 다르다. 부분안전계수는 확률변수의 불확실성과 파괴에 미치는 영향의 정도 그리고 목표수준에 따라 다르게 산정된다. 일본의 항만 구조물 설계기준(MLIT, 2009), 미국의 항만 구조물 설계기준(USACE, 2006) 등에 혼성제의 임의의 파괴모드에 대한 부분안전계수가 제시된 바 있다. 한편 Level II와 Level III는 주어진 단면에 대한 신뢰성 해석을 목적으로 개발되었으나 계산기의 발달로 반복계산이 수월해짐에 따라 설계에도 응용될 수 있는 기법이다. Lee (2002), Lee *et al.* (2009), Lee and Kwon (2009), Burcharth *et al.* (1994), Burcharth and Sorensen (1998), Kawai *et al.* (1997), Nagao *et al.* (1995, 1997, 1998), Oumeraci *et al.* (2000), Shimosako and Takahashi (2000), Takahashi *et al.* (2000), Takayama and Ikeda (1992), Yamamoto *et al.* (1990) 등 많은 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행하였다. 그러나 지금까지 수행된 대부분의 연구들은 주로 기초적인 사례 해석을 통하여 각 확률변수들의 통계적·확률적 특성과 파괴확률의 상관성 그리고 목표파괴확률을 설정하기 위한 개념들이 연구되었다. 비록 신뢰성 설계법의 효용성이 제시되긴 하였지만 제한적인 사례를 통한 해석이었다. 이상에서 살펴본 바와 같이 신뢰성 해석에 의한 안정성 검토 및 부분안전계수의 산정과 같은 많은 연구들이 수행되었음에도 불구하고, 실제 신뢰성 설계과정에서 주의해야 하는 문제들에 대한 연구는

거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 혼성제 케이슨의 활동에 대한 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계를 수행하는 전반적인 설계과정을 자세히 제시하였다. 특히 본 연구에서는 일본 및 미국의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수들의 적용성에 대한 중요한 문제점을 파악하고 해결하고자 한다. 이를 위해 먼저 혼성제 케이슨의 활동에 대한 다각적인 신뢰성 해석을 수행하여 각 확률변수에 대한 새로운 부분안전계수를 산정하였다. 또한 본 연구에서는 자중과 부력에 대한 불확실성을 케이슨을 구성하는 재료의 단위중량 변동성과 수위 변동성을 이용하여 자세히 고려할 수 있는 수학적 모형을 제시하고 혼성제 케이슨의 활동에 대해 목표수준 범위에서 안정한 케이슨 단면을 산정할 수 있는 Level I 신뢰성 설계를 위한 설계기준식을 유도하였다. 결정된 단면에 대한 검증을 위해 Level II AFDA (Approximate Full Distribution Approach)와 Level III MCS (Monte-Carlo Simulation) 설계법도 함께 적용하였으며, 부분안전계수를 산정하기 위하여 처음에 정한 목표수준과 Level I 신뢰성 설계법으로 결정된 단면의 안정성 수준에 대한 일치성 여부를 확인하기 위한 신뢰성 재해석이 다각적으로 수행되었다.

본 논문의 2장에서는 혼성제 직립케이슨의 활동파괴에 대한 신뢰성 해석에 대한 기본이론 및 신뢰성 해석결과를 기술하였으며, 3장에서는 2절에서 소개된 각 확률변수에 대한 부분안전계수를 산정하기 위한 과정 및 결과를 기술하였고, 4장에서는 최종적으로 혼성제 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 설계를 수행하고 그 결과를 비교분석하였으며, 논문의 작성 흐름을 보다 명료히 기술하기 위하여 각 장마다 이론과 수행결과를 각각 작성하여 제시하였다.

2. 활동파괴에 대한 신뢰성 해석

심해에서 내습하는 파랑에 의해 혼성제 직립 케이슨에 작용하는 파력의 분포 및 단면 제원을 Fig. 1(a)에 제시하였다. 결정론적 설계법에서 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성은 작용 파력 및 부력 그리고 자중의 관계로부터 다음 Eq. (1)과 같이 정의되는 안전율, F_S 를 이용하여 해석할 수 있다.

$$F_S = \frac{f(W - P_B - F_U)}{F_H} \quad (1)$$

여기서, f 는 케이슨과 사석 마운드 사이에서 발생하는 정지

차이가 있을 수 있으며 또한 기후변화에 따른 해양환경 변화와 밀접한 상관성을 갖는다. 따라서 이에 대한 불확실성을 고려하는 것도 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 일본의 항만 설계기준에 제시된 개념을 도입하여 다음 Eq. (4)로 부력을 산정하였다.

$$P_B = \omega_w (h'' + wl) B \tag{4}$$

여기서, h'' 는 평균해수면, $h'' + wl$ 은 삭망평균고조위를 의미하며, ω_w 는 해수의 단위중량이다.

위의 Eqs. (2)~(4)를 Eq. (1)에 대입하고 정리하면 안전율에 따른 결정론적 설계법으로 케이슨의 단면, B 를 산정할 수 있는 다음 Eq. (5)를 얻을 수 있다.

$$B = \frac{F_s F_H}{f[(\omega_{RC} C_{RC} + \omega_{NC} C_{NC} + \omega_{FM} C_{FM})(h' + h_c) - \omega_w (h'' + wl) - p_w/2]} \tag{5}$$

$H'_0 = 6.3$ m, $T_s = 11.4$ sec의 입사파랑에 대하여 $B_M = 8$ m, $t = 1.5$ m, $D = 3.0$ m, $h_c = 3.4$ m, $d = 5.6$ m, $h'' = 6.5$ m, $wl = 0.6$ m의 조건으로 혼성제가 건설될 경우, 비선형천수계수를 이용하여 Goda (2000)의 파랑변형 모형에서 산정된 혼성제 건설 위치에서의 유의파고와 최대파고는 각각 5.8 m와 8.1 m이다. 따라서 Eq. (2)에 정의된 수평파력과 양압력을 각각 산정할 수 있으며, 철근콘크리트, 무근콘크리트 그리고 속채움재

의 단위중량이 각각 $\omega_{RC} = 2.45$ t/m³, $\omega_{NC} = 2.30$ t/m³, $\omega_{FM} = 2.00$ t/m³이라면, Eq. (5)를 이용하여 결정론적 설계법에서 정의되는 안전율에 따른 케이슨의 단면을 산정할 수 있다.

Eq. (3)에서 제시된 케이슨을 구성하는 재료의 체적비에 따른 결과와 함께 Fig. 2에 제시하였다. 이 그림은 전체 케이슨의 체적 중 철근콘크리트가 차지하는 체적 비율이 40%일 때 속채움재의 체적 비율을 50%에서 60%까지 변화시키면서 계산한 결과이며, 안전율이 커짐에 따라 케이슨의 단면이 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 동일한 안전율에 대하여 속채움재의 비율이 높아짐에 따라 케이슨의 단면이 약간 커지는데, 이는 속채움재의 단위중량이 철근콘크리트의 단위중량보다 작기 때문이다. 즉, 이는 주어진 안전율을 만족하기 위해 필요한 전체 케이슨의 중량 중 단위중량이 작은 재료가 차지하는 비율이 커지면 그만큼 케이슨의 단면이 커진다는 것을 의미한다. 이상의 결과를 폭 넓게 확인하기 위하여 각각의 안전율에 대하여 각 재료가 차지하는 비율을 광범위하게 계산하였다. Table 1에는 안전율 1.2에 대하여 철근콘크리트와 속채움재의 비율을 각각 30%에서 70%까지 변화시키면서 산정한 케이슨의 단면 변화 결과를 제시하였다. Fig. 2와 동일하게 속채움재의 비율이 커짐에 따라 케이슨의 단면이 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 속채움재의 비율이 50% 또는 60%의 일반적인 경우에서의 단면 변화는 그리 크지 않음을 알 수 있다.

이상에서는 혼성제 케이슨의 활동에 대한 안정성을 결정론적 설계법으로 해석하였다. 따라서 이하에서는 각 확률변

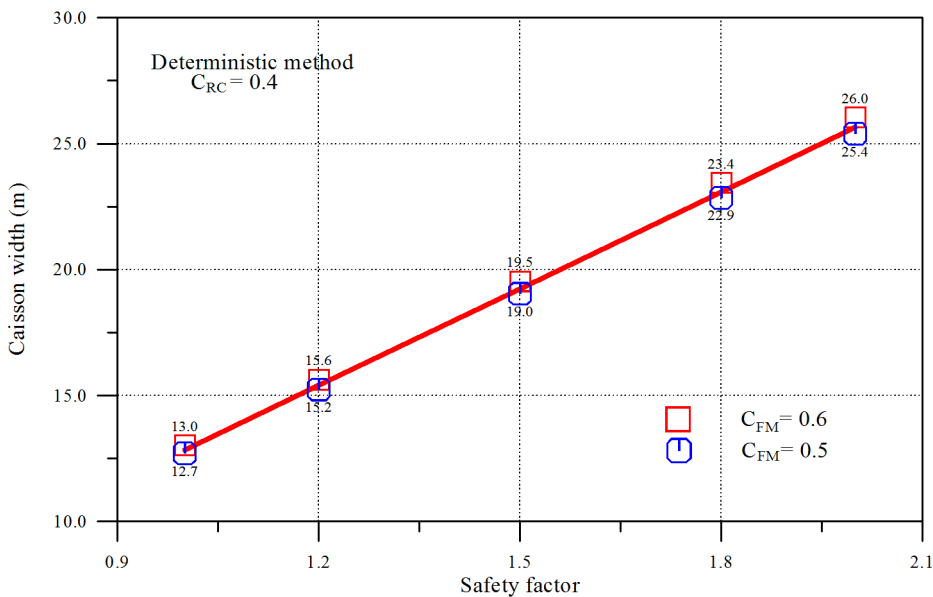


Fig. 2. Variation of caisson width to safety factors for two volume ratios of filling material

Table 1. Caisson width by deterministic method for various volume ratios (unit: m)

C_{RC} \ C_{FM}	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
0.3	14.681	15.045	15.428	15.831	16.255
0.4	14.506	14.861	15.234	15.627	-
0.5	14.334	14.681	15.045	-	-
0.6	14.167	14.506	-	-	-
0.7	14.003	-	-	-	-

수의 부분안전계수를 산정하는데 필요한 자료를 얻기 위해 신뢰성 해석을 수행하였다. 이는 4절에서 언급할 부분안전계수를 이용한 혼성제 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 설계를 수행하기 위한 첫 번째 단계이다. 먼저 혼성제 케이슨의 활동에 대한 신뢰함수는 결정론적 설계법에서 사용하는 Eq. (1)을 이용하여 다음 Eq. (6)과 같이 수립할 수 있다.

$$Z_S = f(W - P_B - F_U) - F_H \quad (6)$$

Eq. (6)은 자중을 구성하는 재료의 불확실성, 해수면의 불확실성 그리고 파력 및 마찰계수의 불확실성 등 활동과 관련된 변수들을 모두 확률변수로 고려하기 위해 수립된 신뢰함수이다. Eq. (1)에서 안전율 $F_S = 1.0$ 일 때 $Z_S = 0.0$ 이다. 현행 결정론적 설계법에서는 안전율을 20% 할증시키고 있는데, 이는 각각의 확률변수들이 갖게 되는 불확실성이 위험한 방향으로 나타날 수 있는 가능성에 대한 우려를 반영한 것이다. 그러나 이론적으로는 외력이 저항력보다 커지는 순간에 활동이 시작된다. 따라서 Eq. (6)의 신뢰함수, $Z_S > 0$ 인 경우 직립 케이슨은 이론적으로 안정한 상태가 되고, $Z_S < 0$ 면 불안정한 상태, 즉 활동이 발생하는 파괴상태가 된다. 특히 신뢰성 해석에서 $Z_S = 0$ 을 만족하는 상태를 한계상태라 정의한다. 따라서 신뢰성 해석이란 관련 확률변수들의 불확실성을 이용하여 파괴상태가 발생하는 임의의 사건을 확률적으로 계산하는 문제가 발생되므로, 이와 같은 파괴확률을 계산하기 위해서는 각 확률변수들의 통계적 특성, 평균과 분산 그리고 분포특성에 대한 자료가 필요하다.

본 연구에서는 Eq. (6)의 신뢰함수를 Table 2에 제시된 일본의 항만 설계기준 자료를 이용하여 Level II AFDA로 해석하였다. 그러나 Table 2에는 케이슨을 구성하는 재료와 수위의 불확실성만 주어졌기 때문에, Eq. (6)으로 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 케이슨의 자중과 부력에 대한 통계적 특성을 산정할 수 있어야 한다. 따라서 Eqs. (3) and (4)를 이용

Table 2. Statistical properties and influence coefficients of random variables in reliability function (MLIT, 2009)

X_i	$b_{X_i} = \mu_{X_i}/X_k$	COV_{X_i}	α_{X_i}
f	1.060	0.150	0.689
F_H F_U	Mild slope	0.740	0.239
	Steep slope	0.825	0.251
wl	$r_{wl} = 1.5$	1.000	0.200
	$r_{wl} = 2.0, 2.5$	1.000	0.400
ω_{RC}	0.980	0.020	0.030
ω_{NC}	1.020	0.020	0.025
ω_{FM}	1.020	0.040	0.150

$b_{X_i} = \mu_{X_i}/X_k$ = Characteristic ratio

COV_{X_i} = Coefficient of variation

α_{X_i} = Influence coefficient on failure limit state

r_{wl} = H.H.W.L./H.W.L.

하여 자중과 부력에 대한 평균 μ_W, μ_{P_B} , 변동계수 COV_W, COV_{P_B} 그리고 특성비 b_W, b_{P_B} 를 산정할 수 있는 Eqs. (7) and (8)을 먼저 유도하였다.

$$\mu_W = (\mu_{\omega_{RC}} C_{RC} + \mu_{\omega_{NC}} C_{NC} + \mu_{\omega_{FM}} C_{FM})(h' + h_c) B \quad (7a)$$

$$COV_W = \frac{[(\sigma_{\omega_{RC}} C_{RC})^2 + (\sigma_{\omega_{NC}} C_{NC})^2 + (\sigma_{\omega_{FM}} C_{FM})^2]^{1/2}}{(\mu_{\omega_{RC}} C_{RC} + \mu_{\omega_{NC}} C_{NC} + \mu_{\omega_{FM}} C_{FM})} \quad (7b)$$

$$b_W = \frac{\omega_{RC} b_{RC} C_{RC} + \omega_{NC} b_{NC} C_{NC} + \omega_{FM} b_{FM} C_{FM}}{\omega_{RC} C_{RC} + \omega_{NC} C_{NC} + \omega_{FM} C_{FM}} \quad (7c)$$

$$\mu_{P_B} = \omega_w (h'' + \mu_{wl}) B \quad (8a)$$

$$COV_{P_B} = \frac{COV_{wl}}{1 + h''/\mu_{wl}} \quad (8b)$$

$$b_{P_B} = \frac{1 + wl b_{wl}/h''}{1 + wl/h''} \quad (8b)$$

여기서, $b_{X_i} = \mu_{X_i}/X_k$ 는 각 확률변수의 특성비이며, X_k 는 각 확률변수의 특성치로 본 연구에서는 일본 기준서에서 적용하듯이 Eq. (1)의 결정론적 설계법에서 적용하는 해당 변수의 값을 그 확률변수의 특성치로 이용하였다(Goda, 2010).

따라서 Eqs. (7) and (8)을 이용하면 일본의 항만 설계기준에 제시된 바와 같이 본 연구에서도 조위의 불확실성뿐만 아

나라 케이스를 구성하는 재료의 불확실성을 모두 고려할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 Eq. (3)의 개념을 도입하여 일본의 항만 설계기준에서 제시한 형식과 다르게 케이스를 구성하는 각 재료의 불확실성을 고려하면서 그 영향을 하나로 통합하여 실무에서 용이하게 사용할 수 있도록 하였다. Table 2의 마지막 열에 일본의 항만 설계기준에서 제시한 신뢰성 해석 결과를 제시하였는데 전체 변수 중 자중의 불확실성이 파괴에 미치는 영향이 약 2.4%로 제일 미약하다. 한편 일본의 항만 설계기준에 제시된 중요한 문제는 수평파력과 양압력의 영향 계수를 동일하게 고려한다는 것이다. 신뢰성 해석 이론에 의하면 $\sum \alpha_{X_i}^2 = 1.0$ 이 반드시 만족되어야 하는데 일본의 항만 설계 기준에 제시된 영향계수를 이용하면 $\sum \alpha_{X_i}^2 = 1.49$ 가 된다. 이는 양압력의 영향계수를 보수적으로 너무 크게 고려하고 있다. 이는 결국 단면을 과대설계하는 것이기 때문에 수평파력과 양압력의 영향계수를 정확하게 산정할 필요가 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 일본의 항만 설계기준에 내포된 문제점을 해결하고자 신뢰성 해석을 수행하였다. Table 2의 자료와 Eqs. (6)~(8)을 이용하여 조위의 불확실성뿐만 아니라 케이스를 구성하는 재료의 불확실성을 모두 고려하였다. Goda (2010)와 같이 모든 확률변수가 정규분포를 따른다는 가정 하에 Level II AFDA에 의하여 산정된 각 확률변수의 영향계수를 Fig. 3 and Table 3에 제시하였다. 이 결과는 결정론적 방법으로 설계된 가장 대표적인 단면의 케이스 체적비 $C_{RC} = 0.49$, $C_{FM} = 0.50$ 에 대해 Table 2에 제시된 하상 경사 및 수위변동 조건을 조합하여 모두 4가지에 대하여 수행된 결과를 나타

Table 3. Influence coefficients of random variables for various uncertainty conditions

X_i	α_{X_i}			
	Mild slope/ $r_{wl} = 1.5$	Steep slope/ $r_{wl} = 1.5$	Mild slope/ $r_{wl} = 2.0, 2.5$	Steep slope/ $r_{wl} = 2.0, 2.5$
f	0.727	0.662	0.725	0.660
F_H	-0.651	-0.708	-0.651	-0.707
F_U	-0.166	-0.198	-0.166	-0.198
P_B	-0.035	-0.036	-0.070	-0.071
W	0.137	0.140	0.137	0.140

낸 것이다.

Fig. 3을 보면 본 연구에서 산정한 마찰계수, 수평파력 그리고 고부력에 대한 영향계수는 일본의 항만 설계기준에서 제시한 결과와 약간 차이가 나지만 거동범위는 비교적 잘 일치하는 것으로 확인되었다. 또한 자중에 대한 영향계수도 비교적 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서 제시한 Eq. (3)의 개념이 올바르게 수립된 것임을 확인할 수 있다. 한편 앞에서 언급한 양압력에 대한 영향계수는 일본의 항만 설계기준에서 제시한 것과는 다르게 수평파력에 대한 영향계수보다 약 3.5배 이상 작게 나타나고 있다. 본 연구에서 산정된 각 확률변수의 영향계수의 제곱의 합은 $\sum \alpha_{X_i}^2 = 1.00$ 이다. 따라서 일본 항만 설계기준의 문제점을 해결함과 동시에 수위의 불확실성뿐만 아니라 케이스를 구성하는 재료의 불확실성을 모두 고려하면서 그 영향을 자중과 부력이라는 하나의 확률변수로 통합하여 나타낼 수 있다.

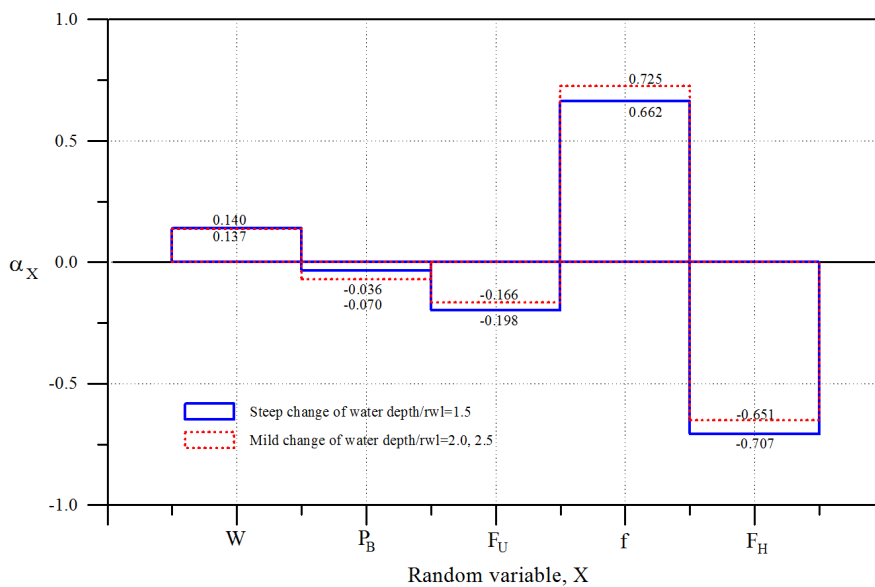


Fig. 3. Influence coefficients of random variables evaluated by the present study

3. 부분안전계수 산정 및 검증

2절에서 산정된 각 확률변수의 영향계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계법의 근간이 되는 부분안전계수를 산정하였다. 적용의 일치성을 위하여 각 확률변수의 부분안전계수는 하중 변수나 저항변수 모두 동일한 형식을 갖도록 하였으며, 본 연구에서는 다음 Eq. (9)를 이용하여 각 확률변수의 부분안전계수를 산정하였다(Lee, 2007, 2008; Goda, 2010).

$$\gamma_{X_i} = (1 - \alpha_{X_i} \beta_T COV_{X_i}) \frac{\mu_{X_i}}{X_k} \quad (9)$$

여기서, β_T 는 해당 파괴모드의 안정성에 대한 목표수준을 정의하는 목표신뢰도지수로 목표파괴확률, $(P_f)_T = 1 - \Phi(\beta_T)$ 이다. 본 연구에서는 Lee (2010) 및 Lee et al. (2012)와 일본의 항만 설계기준에 제시된 $\beta_T = 2.40$ 을 혼성제 케이슨의 활동에 대한 목표수준으로 사용하였다. 2절에서 제시된 각 확률변수의 불확실성 및 영향계수를 이용하여 Eq. (9)로부터 산정된 각 확률변수의 부분안전계수를 Fig. 4 and Table 4에 제시하였다. 특히 Table 4에는 일본의 항만 설계기준의 결과도 함께 제시하였는데, 본 연구에서 산정한 마찰계수 및 수평파력에 대한 부분안전계수가 일본의 항만설계기준에 제시된 결과와 매우 일치함을 알 수 있었다. 그러나 양력에 대한 부분안전계수는 일본 기준서에서는 양력의 부분안전계수를 수평파력에 대한 부분안전계수와 동일하게 정의하고 있으나 본 연구에서는

Table 4. Partial safety factors of random variables

(a) Partial safety factors of random variables for sliding failure mode in Japan technical standards (2009)

X_i		γ_{X_i}
f		0.79
F_H F_U	Mild slope	1.04
	Steep slope	1.17
wl	$r_{wl} = 1.5$	1.03
	$r_{wl} = 2.0, 2.5$	1.06
ω_{RC}		0.98
ω_{NC}		1.02
ω_{FM}		1.01

(b) Partial safety factors of random variables for various uncertainty conditions

X_i	γ_{X_i}			
	Mild slope/ $r_{wl} = 1.5$	Steep slope/ $r_{wl} = 1.5$	Mild slope/ $r_{wl} = 2.0, 2.5$	Steep slope/ $r_{wl} = 2.0, 2.5$
f	0.785	0.809	0.786	0.810
F_H	1.041	1.174	1.041	1.174
F_U	0.810	0.923	0.810	0.923
P_B	1.001	1.001	1.006	1.006
W	0.991	0.991	0.991	0.991

다르게 산정되어야 하는데, 이는 Table 3이나 Fig. 4에서 확인된 바와 같이 파괴에 미치는 영향 정도가 다르기 때문이다. 따라서 일본 기준서는 실제 설정된 목표수준 $\beta_T = 2.40$ 보다 더

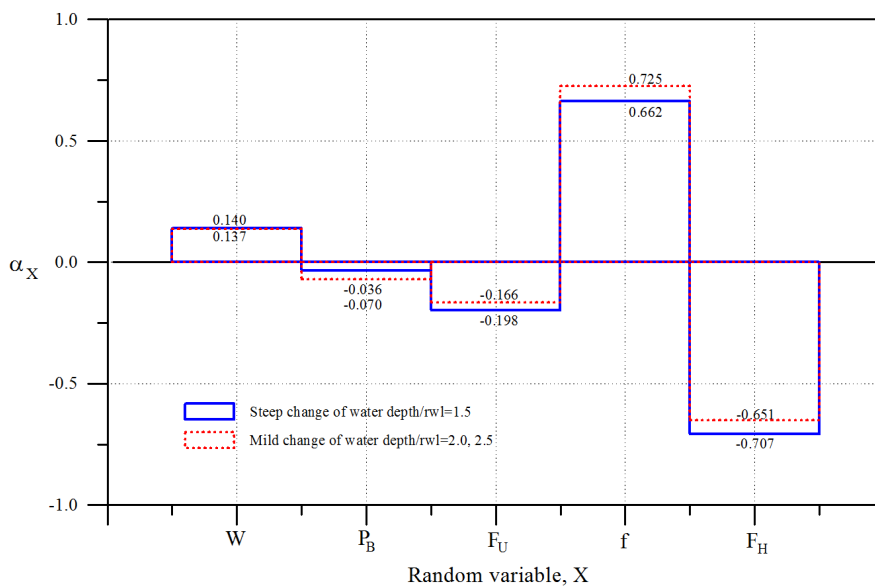


Fig. 4. Partial safety factors of random variables evaluated in this study

보수적으로 부분안전계수를 제시하고 있다.

일본의 항만 설계기준에서는 이를 세분화하여 각각의 확률변수에 대한 부분안전계수를 제시하고 있으나, 본 연구에서는 형식의 일치성과 실무에서의 적용 편의성을 위하여 수위변동과 케이슨 재료의 불확실성을 부력 및 자중의 부분안전계수로 통합하여 산정하였다. 이는 본 연구의 결과와 일본의 부분안전계수를 직접 단순 비교할 수 없다는 의미이다. 이를 위해 본 연구에서는 다음 절에서 설명할 설계기준식의 설계값 (design value)이 동일해야 된다는 조건을 이용하여 다음 Eqs. (10) and (11)을 유도하였다.

$$\gamma_W = \frac{\omega_{RC}\gamma_{RC}C_{RC} + \omega_{NC}\gamma_{NC}C_{NC} + \omega_{FM}\gamma_{FM}C_{FM}}{\omega_{RC}C_{RC} + \omega_{NC}C_{NC} + \omega_{FM}C_{FM}} \quad (10)$$

$$\gamma_{P_b} = \frac{1 + w_l \gamma_{wl}/h''}{1 + w_l/h''} \quad (11)$$

따라서 Eqs. (10) and (11)에 일본의 항만 설계기준에서 제시한 Table 4(a)의 각 확률변수에 대한 부분안전계수를 대입하여 정리하면 $\gamma_W = 0.994$ 그리고 $r_{wl} = 2.0, 2.5$ 인 경우의 $\gamma_{P_b} = 1.005$; $r_{wl} = 1.5$ 인 경우의 $\gamma_{P_b} = 1.003$ 이다. 이 결과는 본 연구에서 산정된 $\gamma_W = 0.991$ 과 $r_{wl} = 2.0, 2.5$ 의 $\gamma_{P_b} = 1.006$ 그리고 $r_{wl} = 1.5$ 의 $\gamma_{P_b} = 1.001$ 과 거의 일치하는 결과이다. 그러나 양압력에 대한 부분안전계수만 매우 다른 결과를 나타내고 있는데, 이는 앞에서 언급하였듯이 일본의 항만 설계기준에서는 양압력에 대한 영향계수를 실제 파괴모드에서 얻어지는 것보다 크게 고려하였기 때문이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 제시된 혼성제 케이슨의 활동에 대한 부분안전계수 산정 결과는 일본의 항만 설계기준에서 제시된 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있었으며, 본 연구를 통하여 일본의 항만 설계기준에 제시된 양압력에 대한 문제점도 해결할 수 있었다. 또한 수위변동이나 케이슨 재료의 불확실성에 따른 부분안전계수를 형식의 일치성 차원에서 부력 및 자중의 부분안전계수로 나타내어

실무에서의 적용 편의성을 도모하였다. 다음의 4장에서는 본 연구에서 제시한 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계를 수행함으로써 본 연구에서 산정된 케이슨의 단면과 일본 및 미국의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하여 산정된 단면을 비교 및 분석하였다.

4. 부분안전계수를 이용한 신뢰성 설계

본 절에서는 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계를 수행하는 과정을 자세히 설명하기 위하여 $\beta_T = 2.4$ 와 같이 임의의 목표수준을 가지고 산정된 부분안전계수만을 이용하여 신뢰성 설계법으로 설계된 단면이 실제 그 목표수준을 만족하는지에 대한 검증을 수행하였다. 먼저 Eq. (6)을 이용하여 설계저항이 설계하중보다 최소한 커야 된다는 개념 하에 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 설계를 수행하기 위한 설계기준식을 다음 Eq. (12)와 같이 수립하였다.

$$f_d (W_d - P_{B_d} - F_{U_d}) \geq F_{H_d} \quad (12)$$

여기서, 각 확률변수의 설계값은 $X_d = \gamma_X X_k$ 이다. 따라서 각각의 설계값을 Eq. (12)에 대입하고 Eqs. (2)~(4)를 이용하여 정리하면, 목표수준 범위에서 안정한 케이슨의 단면을 산정할 수 있는 다음 Eq. (13)을 얻을 수 있다.

$$B \geq \frac{\gamma_{F_H} F_H}{\gamma_f f \{ (\omega_{RC} C_{RC} + \omega_{NC} C_{NC} + \omega_{FM} C_{FM}) (h' + h_c) \gamma_W - \omega_w (h'' + w_l) \gamma_{P_b} - \gamma_{F_b} P_d / 2 \}} \quad (13)$$

Eq. (13)을 이용하여 산정한 혼성제 케이슨의 활동에 대해 안정한 최소 케이슨의 단면을 Table 5에 제시하였다. 일본의 항만 설계기준에 제시된 Table 4(a)의 부분안전계수를 이용하여 산정된 결과도 함께 제시하였는데, 이 값은 Eqs. (10) and (11)을 Eq. (13)에 대입하여 산정하였다. 표에서 알 수 있듯이

Table 5. Comparison of caisson widths determined by Level I reliability design method

Item	Present			Japan standard (2009)		
	B (m)	β	P_f	B (m)	β	P_f
Mild slope/ $r_{wl} = 1.5$	15.698	2.402	0.00861	16.920	2.650	0.00403
Mild slope/ $r_{wl} = 2.0, 2.5$	15.717	2.402	0.00861	16.945	2.650	0.00403
Steep slope/ $r_{wl} = 1.5$	18.151	2.402	0.00861	19.728	2.668	0.00382
Steep slope/ $r_{wl} = 2.0, 2.5$	18.173	2.402	0.00861	19.759	2.668	0.00382

일본의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하여 산정된 단면이 본 연구에서 제시된 부분안전계수를 이용하여 산정된 단면보다 크게 산정되었다.

산정된 결과를 더욱 상세히 검증하기 위하여 Level II AFDA 설계법과 Level III MCS 설계법으로 동일한 조건에 대하여 설계를 수행하여 그 결과를 Figs. 5 and 6에 제시하였다. 이 결과는 동일한 입사조건과 불확실성에 대하여 혼성제 케이슨의 단면 폭을 임의로 변화시키면서 Level II AFDA 법과 Level III MCS 법으로 파괴확률을 계산하고 그 결과를 Table 5의 결과와 비교한 것이다.

Figs. 5 and 6으로부터 먼저 Level II AFDA 결과와 Level III MCS 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히 주어진 목표파괴확률 $\beta_T = 2.4$, $(P_f)_T = 0.0087$ 에 해당하는 케이슨

의 단면이 Table 5에 제시된 본 연구의 결과와 정확하게 일치하고 있으나, 일본의 항만 설계기준의 결과는 그보다 훨씬 큰 단면을 산정하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 목표파괴확률 $\beta_T = 2.4$ 에 대한 부분안전계수를 산정하여 제안하였지만 부분안전계수만을 가지고 Level I의 신뢰성으로 설계하면 그보다 훨씬 큰 안정성을 가지는 과대 단면이 산정된다는 것을 의미한다. 따라서 일본의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수는 목표수준과의 일치성이 결여된 값이라 판단되며, 그에 반해 본 연구의 결과는 Table 5에서 알 수 있듯이 목표수준과의 일치성이 잘 만족되고 있다는 점을 제시할 수 있다. Level I 신뢰성 설계법에서의 부분안전계수는 단면의 규모를 결정하게 되며 이는 바로 경제성과 직결되기 때문에 부분안전계수 산정을 위한 목표수준의

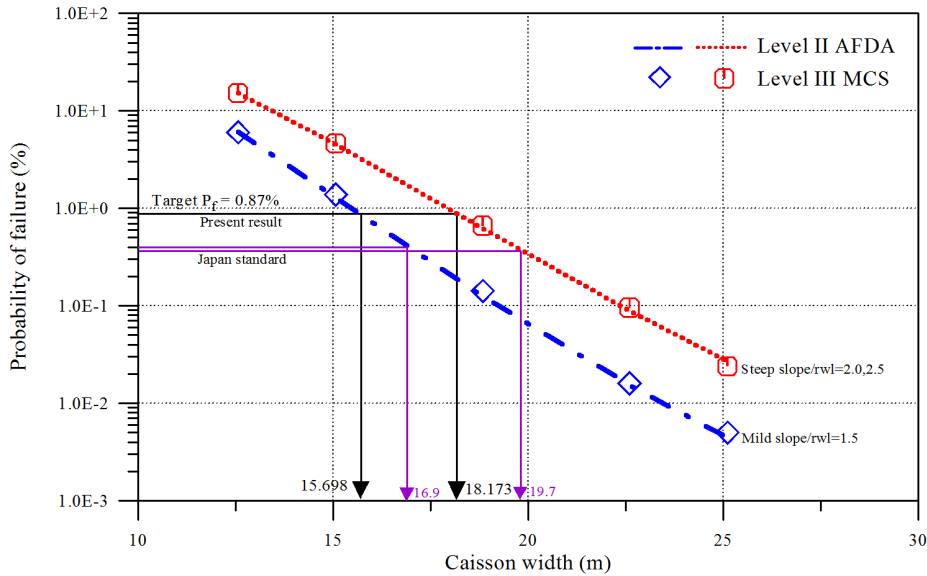


Fig. 5. Caisson width with respect to failure probability evaluated in this study

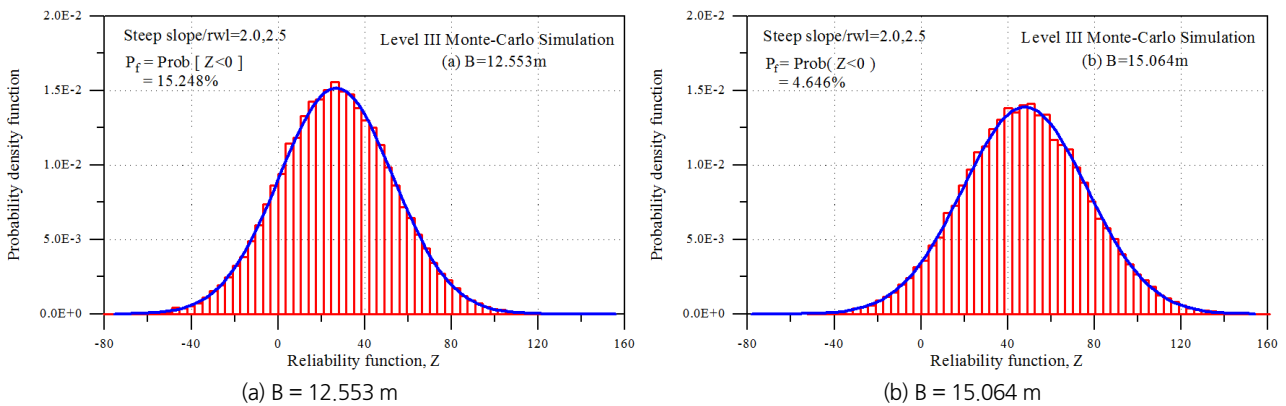


Fig. 6. PDF of reliability function generated by Monte-Carlo simulation

부여가 매우 중요한 문제임이 제시될 수 있다.

한편 서론에서 언급된 바와 같이 미국의 항만 설계기준에서도 혼성제 케이슨의 활동에 대한 부분안전계수를 제시하였다. 그러나 Lee and Kwon (2009)에서 언급된 바와 같이 본 연구나 일본의 형식과는 달리 실제 신뢰성 설계를 위해서는 복잡한 과정을 거쳐야 하는 어려움을 내포하고 있다. 이는 파력의 부분안전계수를 직접 제시하지 않고 간접적으로 파고의 부분안전계수를 사용하기 때문이다. 본 연구에서는 미국의 항만 설계기준에서 제시된 부분안전계수와 다음 Eq. (14)의 설계기준식을 이용하여 신뢰성 설계를 수행하였다.

$$\frac{f}{\gamma_Z} (F_G - U_V F_U) \geq U_H F_H \tag{14}$$

여기서, γ_Z 는 마찰계수의 부분안전계수, $F_G = W - P_B$, U_V 와 U_H 는 양압력 및 수평파력에 대한 편의계수로 각각 0.77과 0.90이다. Eq. (14)를 적용할 때 특히 주의할 점은 파력 F_U 와 F_H 를 산정할 때 현행의 결정론적 설계법과 다르게 최대파고 H_s 를 사용한다는 점이다. 따라서 미국의 항만 설계 기준에서는 Table 6에 제시된 바와 같이 두 개의 부분안전계수, 파고에 대한 부분안전계수 γ_H 와 마찰계수에 대한 부분안전계수 γ_Z 를 가지고 설계한다.

본 연구에서는 앞에서 해석한 제반조건과 유사하다고 판단되는 경우에 대하여 적용하기 위하여 Table 6에 제시된 바와 같이 목표파괴확률 (P_f)_T = 1%에 해당하는 파고의 불확실성의 정도(σ'_{FH_s})에 따른 두 종류의 부분안전계수를 가지고 신뢰성 설계를 수행하였으며, 결정론적 설계법으로 산정한 결

과를 함께 Table 7에 제시하였다. 특히 Table 7에는 신뢰성 설계에 의해 결정된 각각의 케이슨 단면이 실제 갖게 되는 파괴확률도 함께 제시하였다. Level II AFDA 법으로 파괴확률을 산정하였는데 이는 목표파괴확률과 실제 결정된 단면의 파괴확률이 일치 하는지를 확인하기 위함이다. 또한 Table 7의 단면산정 조건이 천해로 수심변화나 수위변동이 심해보다는 클 것이라고 판단했기 때문에 파력과 수위변동이 각각 급경사 (steep slope)이며 $r_{wt} = 2.0, 2.5$ 인 불확실성 조건에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다.

Table 7에서 알 수 있듯이 동일한 목표파괴수준 1%에 대하여 제시된 부분안전계수로 설계된 단면임에도 불구하고 실제 파괴확률은 목표수준과는 커다란 차이를 보이고 있는데, 실제 파괴확률이 목표수준보다 10배 이상 큰 경우에서부터 4배 이상 작은 경우까지 커다란 차이를 보이고 있다. 특히 현행 결정론적 설계법에서 정의하는 허용안전율 1.2 조차 만족되지 못하는 경우도 발생되고 있음을 알 수 있어, 이와 같은 일치성 결여는 설계 시 안정성 문제를 발생시킬 수 있음이 제시될 수 있다. 따라서 미국의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하는 Level I 신뢰성 설계는 일본이나 본 연구에서 제시한 방법에 비하여 그 적용성도 복잡할 뿐만 아니라 어떤 경우는 목표수준도 만족하지 못함을 알 수 있었다.

마지막으로 Tables 5 and 7의 결과를 이용하여 이상의 신뢰성 설계 결과를 종합적으로 비교하기 위한 해석이 수행되었다. Fig. 7은 미국 및 일본 그리고 본 연구에서 제시한 부분안전계수를 가지고 Level I 신뢰성 설계에 의하여 산정된 케이슨 단면의 목표파괴확률과의 일치성을 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 일본의 경우는 신뢰성 설계법으로

Table 6. Partial safety factors of CEM (2006) for various uncertainty conditions

$(P_f)_T$	Design with model tests				Design without model tests			
	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$		$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_H	γ_Z	γ_H	γ_Z	γ_H	γ_Z	γ_H	γ_Z
0.01	1.2	1.6	1.3	1.6	1.3	1.9	1.4	1.9

Table 7. Caisson widths by Level I reliability design method with partial safety factors of CEM

Method	Deterministic method	CEM (2006)'s method			
		Design with model tests		Design without model tests	
		$\sigma'_{FH_s} = 0.05$	$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$	$\sigma'_{FH_s} = 0.2$
B (m)	15.064	13.358	15.231	18.086	20.520
F_S	1.20	1.06	1.21	1.44	1.63
β	1.69	1.25	1.72	2.35	2.79
P_f (%)	4.543	10.623	4.264	0.932	0.265

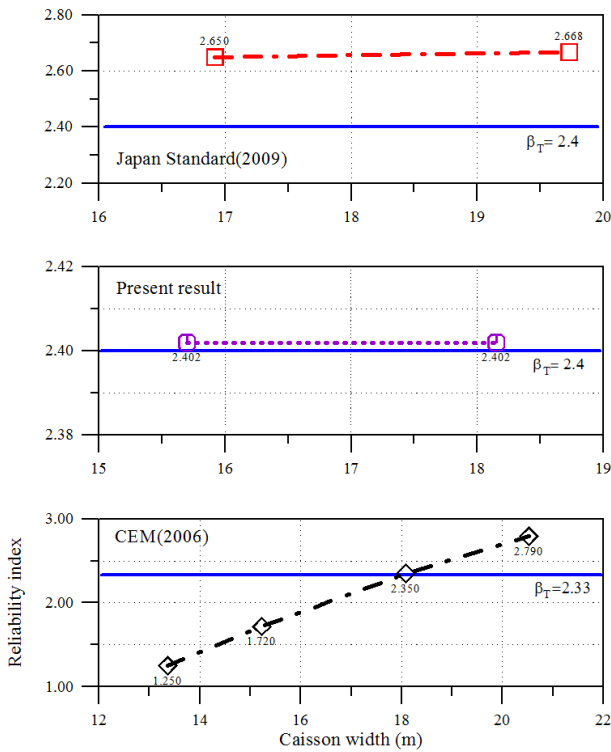


Fig. 7. Variation of reliability index of caisson section by Level I reliability design method

설계된 실제 단면들이 모두 목표파괴확률을 초과하고 있다. 이는 일본의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하여 신뢰성 설계를 수행하게 되면 실제 단면은 과다 설계된다는 것을 의미한다. 반면 미국의 결과는 반 이상이 목표파괴확률을 아래 위치하고 있다. 이는 미국의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하여 신뢰성 설계를 수행하게 되면 실제 단면은 상당히 과소 설계될 수 있다는 것을 의미한다. 한편 본 연구의 결과는 모두 목표파괴확률과 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 Level I 신뢰성 설계시 본 연구에서 제시된 부분안전계수를 이용하면 일본이나 미국의 항만 설계기준에서 제시된 부분안전계수를 이용하는 것보다 목표파괴확률과 일치하는 최적의 단면을 설계할 수 있음을 제시할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 먼저 혼성제 케이슨의 활동에 대한 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계를 수행하는 전반적인 설계과정을 자세히 제시하였으며, 특히 일본 및 미국의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수들의 적용성을 자세히 해석하였다. 이를 위해 먼저 혼성제 케이슨의 활동에 대한 다각적

인 신뢰성 해석을 수행하여 각 확률변수에 대한 새로운 부분안전계수를 산정하였다. 특히 본 연구에서는 혼성제 케이슨의 활동파괴에 미치는 부력이나 자중의 영향이 상대적으로 수평파력이나 양압력의 영향보다 작음에도 불구하고 일본의 항만 설계기준에 복잡하게 제시된 관련 부분안전계수를 단순화시킬 수 있는 방법을 제시하고 형식의 일치성과 실무에서의 적용 편의성을 위하여 수위의 불확실성과 케이슨을 구성하는 재료의 불확실성을 부력 및 자중의 부분안전계수로 통합하여 산정할 수 있는 수학적 모형을 제시하였다. 특히 본 연구에서는 양압력에 대한 정확한 부분안전계수를 새롭게 산정하여 그 영향을 과다 고려하는 일본 항만 설계기준의 문제점을 해결하였으며, 목표수준 범위 내에서 Level I 신뢰성 설계를 수행하여 혼성제 케이슨의 활동에 대해 안정한 단면을 산정할 수 있는 설계기준식을 유도하였고 Level I 신뢰성 설계법으로 결정된 케이슨의 단면에 대한 검증에 위해 Level II AFDA와 Level III MCS 설계법을 함께 적용하였다.

미국 및 일본의 항만 설계기준에서 제시한 부분안전계수를 이용한 결과는 그보다 훨씬 크거나 작은 단면을 산정하고 있는 반면, 본 연구에서 제시한 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계를 수행한 결과, 산정된 단면이 동일한 목표파괴확률에 대한 Level II AFDA의 결과 및 Level III MCS의 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서는 부분안전계수를 산정하기 위하여 처음에 설정한 목표수준과 Level I 신뢰성 설계로 결정된 단면의 안정성 수준에 대한 일치성 여부를 확인하기 위한 다각적인 신뢰성 재해석이 수행되었다. 일본의 경우는 신뢰성 설계법으로 설계된 실제 단면들이 모두 목표파괴확률을 초과함을 알 수 있었는데, 이는 일본의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하여 신뢰성 설계를 수행하게 되면 실제 단면이 과다 설계된다는 것을 의미한다. 반면 미국에서 제시된 부분안전계수를 이용하면 산정된 단면의 반 이상이 목표파괴확률을 만족하지 못함을 알 수 있었으며, 이는 미국의 항만 설계기준에 제시된 부분안전계수를 이용하여 신뢰성 설계를 수행하게 되면 실제 단면은 상당히 과소 설계될 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 일본 및 미국의 항만 설계기준의 적용 결과와 달리 본 연구에서 제시된 부분안전계수로 산정된 단면은 모두 목표파괴확률과 매우 잘 일치하고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 Level I 신뢰성 설계시 본 연구에서 제시된 부분안전계수를 이용하면 일본이나 미국의 항만설계기준에서 제시된 부분안전계수를 이용하는 것보다 목표수준과 일치하는 최적의 단면을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 한국해양수산기술진흥원 지원과제인 “항만 및 어항설계기준 고도화를 위한 성능기반 내진설계 기술 개발의 신뢰성설계 기반 항만설계기준(안) 개발” 과제의 일부임을 밝히며, 해양수산부 및 한국해양수산진흥원의 지원에 감사드립니다.

References

- Burcharth, H. F., and Sorensen, D. (1998). “Design of vertical wall caisson breakwaters using partial safety factor.” *Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2138-2151.
- Burcharth, H. F., Sorensen, D., and Christiani, E. (1994). “On the evaluation of failure probability of monolithic vertical wall breakwaters.” *Proceedings of the International Workshop on Wave Barriers in Deepwaters*, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, pp. 458-469.
- Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. University of Tokyo Press, Tokyo.
- Kawai, H., Takayama, T., Suzuki, Y., and Hiraishi, T. (1997). *Failure probability of breakwater caisson for tidal level variation*, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 36, No. 4, pp. 4-41. (in Japanese)
- Lee, C.-E. (2002). “Probability of failure on sliding of monolithic vertical caisson of composite breakwaters.” *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 14, No. 2, pp. 95-107.
- Lee, C.-E. (2007). “Evaluation of partial safety factors for armor units of coastal structures.” *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 336-344.
- Lee, C.-E. (2008). “Reliability analysis and evaluation of partial safety factors.” *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 355-362.
- Lee, C.-E. (2010). “Evaluation of target failure level on sliding mode of vertical breakwaters using safety factors.” *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 112-119.
- Lee, C.-E., and Kwon, H. J. (2009). “Reliability analysis and evaluation of partial safety factors and for random wave overtopping.” *KSCSE Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 7-14.
- Lee, C.-E., Kim, S.-W., Park, D. H., and Suh, K.-D. (2012). “Target reliability of caisson sliding of vertical breakwater based on safety factors.” *Coastal Engineering*, Vol. 60, pp. 167-173.
- Lee, C.-E., Park, D. H., Kwon, H. J., and Lee, S. Y. (2009). “Evaluation of partial safety factors on sliding of monolithic vertical caisson of composite breakwaters.” *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 267-277.
- Ministry of Land, Infrastructures, Transport and Tourism (MLIT) (2009). *Technical Standard and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Ports and Harbours Bureau in MLIT, Japan.
- Nagao, T., Kadowaki, Y., and Terauchi, K. (1995). *Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method (1st report: Study on the safety against sliding)*. Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 34, No. 5, pp. 40-70. (in Japanese)
- Nagao, T., Kadowaki, Y., Tsuchida, T., and Terauchi, K. (1997). *Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method (2nd report: Study on the safety against foundation failure)*. Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 36, No. 5, pp. 26-56. (in Japanese)
- Nagao, T., Okubo, N., Kawasaki, S., and Hayashi, Y. (1998). *Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method (3rd report: Concluding the applicability of reliability based design method)*. Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 37, No. 2, pp. 132-176. (in Japanese)
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A., Allsop, N. W. H., de Groot, M. B., Crouch, R. S., and Vrijling, J. K. (2000). “Probabilistic design of caisson breakwaters and sea walls - Present statues and perspectives.” *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1664-1677.
- Shimosako, K., and Takahashi, S. (2000). “Application of expected sliding distance method for composite breakwaters design.” *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1885-1898.
- Takahashi, S., Shimosako, K., Kimura, K., and Suzuki, K. (2000). “Typical failures of composite breakwaters in Japan.” *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1899-1910.
- Takayama, T., and Ikeda, N. (1992). *Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design*. Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 31, No. 5, pp. 3-32.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2006). *Coastal Engineering Manual*. Coastal Engineering Research Center in USACE, Washington D.C., USA.
- Yamamoto, M., Mizumura, K., Endo, T., and Shiraiishi, N. (1990). “Reliability analysis of composite breakwaters protected with armor blocks.” *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1403-1416.