



Determination of cross section of composite breakwaters with multiple failure modes and system reliability analysis

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

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

Paper number: 18-047

Received: 13 July 2018; Revised: 8 August 2018; Accepted: 8 August 2018

Abstract

The stabilities of sliding and overturning of caisson and bearing capacity of mound against eccentric and inclined loads, which possibly happen to a composite caisson breakwaters, have been analyzed by using the technique of multiple failure modes. In deterministic approach, mathematical functions have been first derived from the ultimate limit state equations. Using those functions, the minimum cross section of caisson can straightforwardly be evaluated. By taking a look into some various deterministic analyses, it has been found that the conflict between failure modes can be occurred, such that the stability of bearing capacity of mound decreased as the stability of sliding increased. Therefore, the multiple failure modes for the composite caisson breakwaters should be taken into account simultaneously even in the process of deterministically evaluating the design cross section of caisson. Meanwhile, the reliability analyses on multiple failure modes have been implemented to the cross section determined by the sliding failure mode. It has been shown that the system failure probabilities of the composite breakwater are very behaved differently according to the variation of incident waves. The failure probabilities of system tend also to increase as the crest freeboards of caisson are heightening. The similar behaviors are taken place in cases that the water depths above mound are deepening. Finally, the results of the first-order modal are quite coincided with those of the second-order modal in all conditions of numerical tests performed in this paper. However, the second-order modal have had higher accuracy than the first-order modal. This is mainly due to that some correlations between failure modes can be properly incorporated in the second-order modal. Nevertheless, the first-order modal can also be easily used only when one of failure probabilities among multiple failure modes is extremely larger than others.

Keywords: Multiple failure model, System reliability analysis, First-order modal, Second-order modal, Composite caisson breakwaters

다중 파괴모드에 의한 혼성제 케이슨의 단면 산정 및 제체에 대한 시스템 신뢰성 해석

이철응^a · 김상욱^a · 박동헌^{a*}

^a강원대학교 공과대학 건축토목환경공학부

요 지

혼성제 케이슨에서 발생 가능한 활동, 전도 그리고 편심 경사하중에 의한 마운드 지지력에 대한 안정성을 다중 파괴모드 개념으로 해석하였다. 먼저 결정론적 해석에서는 활동 및 전도 그리고 마운드 지지력에 대한 한계 상태방정식을 이용하여 최소 안전율을 만족하는 혼성제 케이슨의 최소 단면을 산정할 수 있는 식을 유도하였다. 입사조건 및 마루높이 그리고 설치수심에 따른 결정론적 해석 결과에 의하면 활동 파괴모드와 마운드 지지력 파괴모드 간 상충이 발생되었다. 따라서 혼성제 케이슨의 설계단면을 결정론적으로 산정하는 경우에도 활동뿐만 아니라 전도와 마운드 지지력에 대한 다중 파괴모드를 동시에 고려하여야 한다. 한편 확률론적 해석에서는 활동에 의하여 결정된 단면에 대하여 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석을 수행하였다. 혼성제 케이슨의 다중 파괴모드에 의한 제체의 시스템 파괴확률이 입사조건에 따라 매우 다르게 거동하는 것을 알 수 있었다. 또한 마루높이와 설치수심이 증가하여도 제체의 시스템 파괴확률이 증가하는 경향이 나타났다. 특히 시스템 신뢰성 해석의 일차 해석모형과 이차 해석모형의 결과들은 본 연구에서 수행된 조건들에서는 일치되는 거동 특성을 나타냈다. 그러나 파괴모드 사이의 상관성을 올바르게 고려할 수 있는 이차 해석모형의 결과가 더 높은 정도를 갖는다. 다만 파괴모드 사이에 파괴확률이 상대적으로 크게 차이 나는 경우에는 일차 해석모형도 간편하게 사용할 수 있다.

핵심용어: 다중 파괴모드, 시스템 신뢰성 해석, 일차 해석모형, 이차 해석모형, 혼성제 케이슨 방파제

*Corresponding Author. Tel: +82-33-250-6241

E-mail: dongheonpark@kangwon.ac.kr (D.-H. Park)

1. 서론

기후변화에 따른 해수면 상승으로 해양환경이 악화되어 가고 있는 가운데 혼성제 형식의 방파제를 심해에 건설해야 하는 경우가 자주 발생하고 있다. 또한 방파제 배후면의 활용도를 높이기 위해서나 증가되는 월파를 감소시키기 위하여 마루높이를 점점 더 높여 설계하는 경향이 있다. 일반적으로 혼성제는 활동(sliding)과 전도(overturning) 그리고 편심 경사하중에 의한 마운드 지지력(bearing capacity) 및 지반의 원호활동(slip circle)에 대하여 안전해야 한다. 지금까지는 활동을 주 파괴모드로 고려하여 혼성제 케이슨의 단면을 결정하고 다른 파괴모드인 전도와 마운드 지지력이나 지반 원호활동의 안정성을 확인하는 방법으로 설계하였다. 이와 같은 방법으로 설계할 때 수심이 깊어지거나 마루높이가 높아지면 자중이 증가하게 되어 더 큰 마운드 지지력이 요구된다. 이는 활동에 대한 안정성을 만족하는 단면이 편심하중에 따른 마운드 지지력이나 지반 원호활동의 안정성을 만족하지 않을 수 있다는 의미이다. 즉, 혼성제 케이슨의 주 파괴모드가 활동이 아니라 마운드 지지력이 될 수도 있다. 장래 대수심역에 방파제를 신규로 건설해야 하는 경우나, 해수면 상승으로 기존 혼성제의 마루높이를 불가피하게 높여야 하는 경우에 활동에 대한 파괴모드와 마운드 지지력에 대한 파괴모드가 서로 상충되는 경우가 나타날 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 혼성제에서 발생 가능한 파괴모드를 지금까지 사용했던 단일 파괴모드(single failure mode)가 아닌 다중 파괴모드(multiple failure modes)로 동시에 해석해야 한다.

Stuart (1958), Ditlevsen (1979) 등이 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석의 수학적 개념들을 제시하였지만 항만 구조물에 이를 적용한 사례는 드물다. CIAD (1985)와 Lee (2008)만이 경사제에 대한 다중 파괴모드를 확률론적으로 해석하였다. 그나마 CIAD (1985)는 수학적 모형이 아닌 파괴수형도(fault tree) 개념을 사용하였다. Lee (2008)가 처음으로 수학적 모형을 사용하여 경사제의 피복재 피해와 소단의 안정성 그리고 상치 콘크리트의 안전성에 대한 다중 파괴모드를 시스템 신뢰성 기법으로 해석하였다. 다른 접근 방법들과 해석 결과를 비교하여 만족스럽게 검증하였다. 따라서 본 연구에서 Lee (2008)가 사용한 수학적 모형을 이용하여 처음으로 혼성제 케이슨의 다중 파괴모드에 대한 결정론적 해석뿐만 아니라 확률론적 해석을 수행하고자 한다. 먼저 다중 파괴모드 개념을 이용하여 최소 안전율을 만족하는 혼성제 케이슨의 최소 단면을 현행의 결정론적으로 쉽게 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 장래 설계법으로 언급되고 있는 신뢰성

설계법의 적용을 위해 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석(system reliability analysis) 기법을 제시하였다. 최근 신뢰성 기반 설계법으로 개정된 일본의 항만 기준서(PHB, 2009)에도 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석의 필요성을 언급하고 있으나 아직 단일 파괴모드를 근간으로 하고 있지 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 설계를 도입하지 못하고 있다. 미국의 CEM (USACE, 2006)이나 유럽 PIANC (2001)에서도 이에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있으나 그 필요성은 언급되고 있다. 따라서 우리나라에서도 설계기준이 신뢰성 기반으로 개정될 때를 대비하여 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석에 대한 연구를 수행하여야 한다.

먼저 제 2절에 혼성제 케이슨에서 발생 가능한 다중 파괴모드에 대한 수학적 모형을 제시하고 제 3절에 결정론적 설계법으로 혼성제 케이슨 단면을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 제 4절에서는 여러 조건에 대하여 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석뿐만 아니라 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석을 수행하였다. 시스템 신뢰성 해석 모형으로 두 가지 모형을 사용하였는데 하나는 일차 해석모형(first-order bounds/uni-modal)이고 다른 하나는 이차 해석모형(second-order bounds/bi-modal)이다. 마지막으로 제 5절에 결론을 언급하였다.

2. 혼성제 케이슨의 다중 파괴모드

혼성제는 모두 세 개의 다중 파괴모드에 대하여 안정하여야 한다. 활동과 전도 그리고 편심 경사하중에 대한 마운드 지지력 및 원호활동이다. 이들 다중 파괴모드에 대한 수학적 모형을 수립하기 위하여 Fig. 1에 혼성제 케이슨에 작용하는 파력과 단면을 나타냈다.

먼저 중력식 구조물인 혼성제의 활동에 대한 파괴모드를 안전여유(safety margin) 개념으로 표시하면 다음 Eq. (1)과 같은 한계 상태방정식이 정의된다.

$$Z_s = (W_e - F_U)f - S_F F_H \quad (1)$$

여기서, $W_e = W_a - W_w$, W_a 는 공기 중에서 케이슨의 무게, W_w 는 부력, f 는 마찰계수, S_F 는 안전계수(safety factor)이다. F_H 와 F_U 는 각각 파랑에 의하여 작용하는 수평파력과 양력으로 다음 Eq. (2)와 같이 충격쇄파압(impulsive breaking wave pressure)을 고려한 Goda 파압식을 이용하여 계산할 수 있다 (Goda, 2010; Tanimoto *et al.*, 1981).

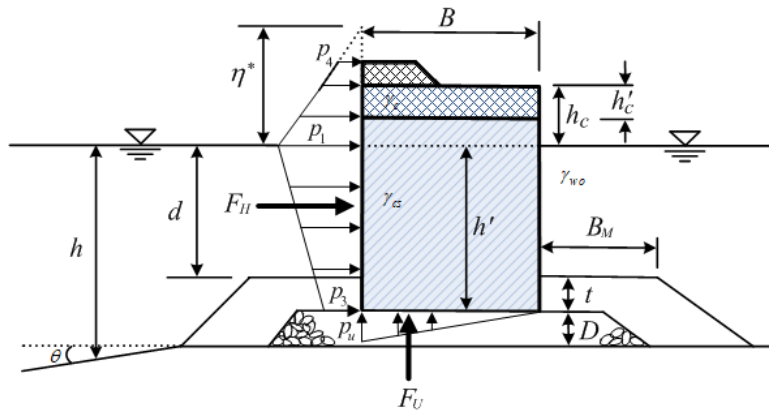


Fig. 1. Cross-section of caisson of composite breakwater

$$F_H = F_{H_1} + F_{H_2} \quad (2a)$$

$$F_{H_1} = \frac{1}{2}(p_1 + p_4)h_c^* \quad (2b)$$

$$F_{H_2} = \frac{1}{2}(p_1 + p_3)h' \quad (2c)$$

$$F_U = \frac{1}{2}p_u B \quad (2d)$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\phi)(\alpha_1 + \alpha^* \cos^2\phi)\rho g H_{\max} \quad (2e)$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos\phi)\alpha_1\alpha_3\rho g H_{\max} \quad (2f)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (2g)$$

$$p_4 = \begin{cases} p_1(1 - h_c/\eta^*) & : \eta^* > h_c \\ 0 & : \eta^* \leq h_c \end{cases} \quad (2h)$$

$$h_c^* = \min(\eta^*, h_c) \quad (2i)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\phi)H_{\max} \quad (2j)$$

여기서, α_1 , α_3 , α^* 는 파압계수이고, ϕ 는 방파제 벽면에 대한 수선과 파의 주파향이 이루는 각도이다. 특히 $\alpha^* = \max(\alpha_2, \alpha_f)$ 이며 $\alpha_f = \alpha_{IH} \alpha_{IB}$ 로 정의되는 충격쇄파계수이다. 또한 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, H_{\max} 는 방파제 설치위

치에서 입사파의 최대파이다.

다음으로 항측 케이슨의 바닥끝단에 대한 전도 파괴모드에 대한 한계 상태방정식은 다음 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$Z_O = \frac{1}{2} W_e B - \frac{1}{3} p_u B^2 - S_F(F_{H_1} l_1 + F_{H_2} l_2) \quad (3a)$$

$$l_1 = h' + \frac{(p_1 + 2p_4)}{3(p_1 + p_4)} h_c^* \quad (3b)$$

$$l_2 = \frac{(2p_1 + 2p_3)}{3(p_1 + p_3)} h' \quad (3c)$$

마지막으로 편심경사 하중에 의해 사석마운드에 작용하는 최대 마운드 지지력에 대한 파괴모드의 한계 상태방정식은 다음 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$Z_B = \sigma_{\max} - p_e \quad (4a)$$

$$p_e = \frac{4\sum V}{B} - \frac{6\sum M}{B^2} \quad (4b)$$

$$\sum V = W_e - F_U \quad (4c)$$

$$\sum M = \frac{1}{2} W_e B - \frac{1}{3} p_u B^2 - (F_{H_1} l_1 + F_{H_2} l_2) \quad (4d)$$

여기서, σ_{\max} 는 케이슨을 받치고 있는 사석 마운드의 허용지 지지력(allowable bearing capacity)이다.

3. 다중 파괴모드에 의한 결정론적 단면 산정

전 절에서 수립된 활동, 전도 그리고 마운드 지지력에 대한 한계 상태방정식에서 하중과 저항이 같다고 가정하면, 안전 여유가 0이 되고 수학적으로 현행의 결정론적 설계법인 허용 응력 설계법이 된다. 지금까지는 조건에 상관없이 활동 파괴 모드를 주 파괴모드라 생각하고 단면 폭 B 를 결정한다. 다른 파괴모드인 전도와 마운드 지지력에 대하여 안정성을 검토하였다. 이와 같은 접근법의 문제점을 확인하기 위하여 본 절에서는 먼저 결정론적 설계법으로 혼성제 케이슨의 최소 폭, B 를 여러 입사조건 및 설치조건에 따라 산정하였다. 이는 다중 파괴모드를 갖는 혼성제 케이슨의 경우 어떤 조건에서 어떤 파괴모드가 주 파괴모드가 되는지를 검토하기 위함이다.

먼저 활동에 대한 파괴모드의 한계 상태방정식인 Eq. (1)을 정리하면 케이슨의 폭, B 를 결정할 수 있는 다음 Eq. (5)를 얻을 수 있다.

$$B = \frac{S_F F_H}{[(\gamma_{cs} - \gamma_w)h' + \gamma_{cs}(h_c - h_c') + \gamma_c h_c' - p_u/2]f} \quad (5)$$

Eq. (5)에서 $S_F = 1.2$ 인 경우가 현행 설계법의 활동에 대한 안전의 최소 기준이다. Fig. 1과 같이 정형화된 단면에 대하여 Tanimoto et al. (1976)과 Takahashi et al. (1994) 등이 Eq. (5)를 이용하여 여러 관련 변수에 따라 케이슨의 최소 폭을 산정하였다. 최근에 설계에서 자주 도입되고 있는 상치 콘크리트의 형상을 반파공이나 사면형으로 개량하는 경우에도 자중 산정 방법만 바꾸면 동일한 개념이 적용될 수 있다.

동일하게 전도에 대한 파괴모드의 한계 상태방정식인 Eq. (3a)를 정리하면, 다음 Eq. (6)과 같이 전도에 대해 안전한 케이슨의 폭을 결정론적으로 산정할 수 있는 식을 얻을 수 있다.

$$B = \sqrt{\frac{S_F(F_{H_1} l_1 + F_{H_2} l_2)}{[(\gamma_{cs} - \gamma_w)h' + \gamma_{cs}(h_c - h_c') + \gamma_c h_c']/2 - p_u/3}} \quad (6)$$

또한 편심 경사하중에 대한 마운드 지지력 파괴모드의 한계 상태방정식 Eq. (4a)를 정리하면, 마운드 지지력에 대해 안전한 케이슨의 최소 폭을 결정론적 방법으로 산정할 수 있는 다음 Eq. (7)을 얻을 수 있다.

$$B = \sqrt{\frac{6(F_{H_1} l_1 + F_{H_2} l_2)}{\sigma_{\max} - [(\gamma_{cs} - \gamma_w)h' + \gamma_{cs}(h_c - h_c') + \gamma_c h_c']}} \quad (7)$$

이상과 같이 활동, 전도 그리고 편심경사하중에 의한 마운드 지지력 파괴모드에 대하여 안전한 단면을 산정할 수 있는 식을 유도하였다. 따라서 위에서 수립된 Eqs. (5)~(7)을 동시에 적용하면 동일한 조건에서 다중 파괴모드에 대하여 만족되어야 하는 케이슨의 최소 폭을 결정론적으로 쉽게 산정할 수 있다. 따라서 단일 파괴모드로 해석하기 보다는 다중 파괴모드를 적용하여 케이슨의 폭을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 다중 파괴모드를 적용하여 입사파랑, 수심 그리고 마루높이의 변화에 따른 케이슨의 최소 폭의 거동특성을 해석하였다.

먼저 입사파랑, 환산심해파의 변화에 따른 해석 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2(a)를 위해 사용한 조건으로 $d = 11.0$ m, $D = 3.0$ m, $t = 1.5$ m, $\tan\theta = 1/100$, 안전율은 1.2, 사석 마운드의 최대 허용지지력 $\sigma_{\max} = 50$ t/m²을 적용하였다. 또한 마찰계수는 0.6, 단위중량으로 $\gamma_{cs} = 2.1$ t/m³, $\gamma_c = 2.3$ t/m³, $\gamma_w = 1.03$ t/m³을 사용하였다. 여기서, γ_{cs} 는 채움재를 포함하는 케이슨의 단위중량, γ_c 는 케이슨 상단의 콘크리트 덮개에 대한 단위중량, 그리고 γ_w 는 해수의 단위중량이다. 마루높이와 상치 콘크리트 두께는 각각 $h_c = 0.6$ Hs, $h_c' = 0.5$ m로 가정하였다. 마지막으로 입사파랑은 직각으로 입사하며, 주기는 Goda (2010)가 제시한 $T_s = 3.3 (H_o')^{0.65}$ 의 관계식을 적용하였다.

Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 전 입사조건 구간에 대하여 활동이 주 파괴모드가 되지 않고 있다. 오히려 입사파고가 약 6.0 m 보다 작은 구간과 9.5 m에서 12.0 m 사이 구간에서는 편심 경사하중에 의한 마운드 지지력이 주 파괴모드가 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 혼성제의 설치조건, 특히 수심과 입사파 조건에 따라 케이슨의 주 파괴모드는 달라질 수 있다. 이를 확인하기 위하여 동일조건에서 $d = 11.5$ m와 $d = 12.5$ m만 변화시켜 추가적으로 계산한 결과가 각각 Figs. 2(b) and 2(c)이다. 그림에서 알 수 있듯이 수심이 증가함에 따라 마운드 지지력이 주 파괴모드가 되는 영역이 점점 증가하고 있다. 특히 $d = 12.5$ m인 경우에는 전 영역에 대하여 활동이 아니라 마운드 지지력이 주 파괴모드가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 동일 입사조건에서도 일정 수심 이상에서는 마운드 지지력에 의한 파괴모드로 케이슨의 단면이 결정되어야 한다. 이는 파고에 의한 파력이 각각의 파괴모드에 미치는 영향이 다르기 때문이다. 특히 수심이 증가할수록 그 영향은 지지력에서 더 크게 나타난다.

한편 동일한 조건에서 마루높이를 변화시키면서 계산한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 환산심해파 조건은 $H_o' = 7.0$ m, $T_s = 11.0$ sec이고 $d = 12.5$ m이다. 주어진 입사파랑 조건에서

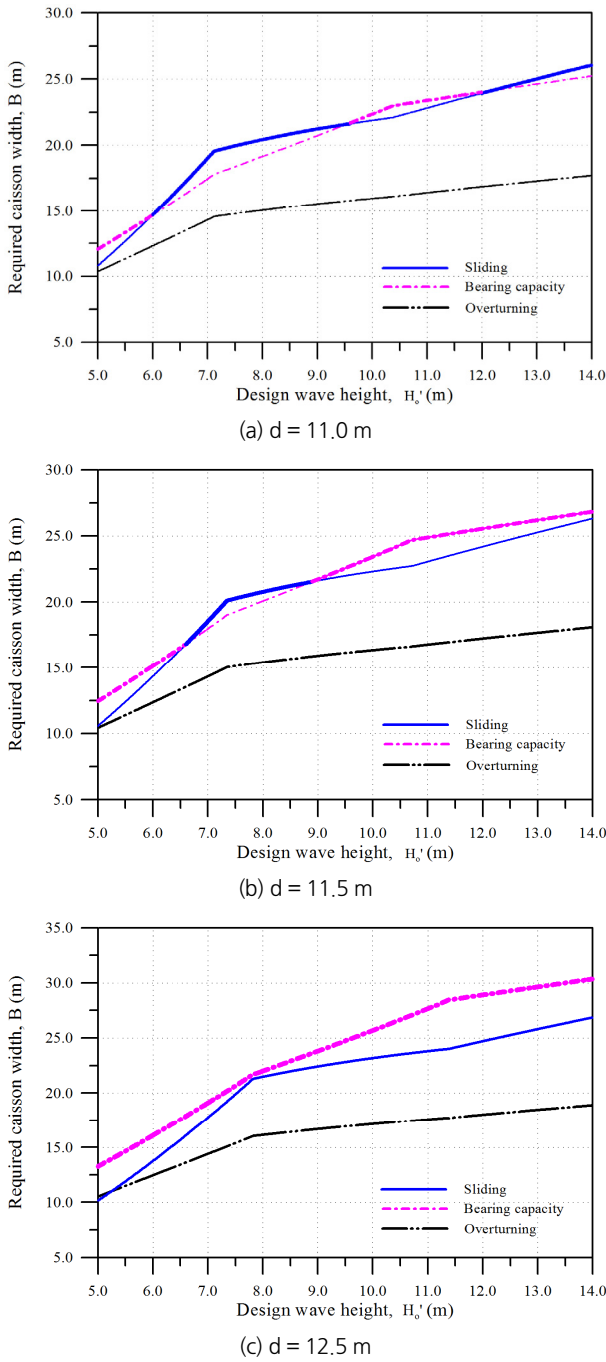


Fig. 2. Variation of the required caisson width with respect to design wave height

는 마루높이가 약 3.0 m 보다 작으면 활동이 주 파괴모드가 되나, 그것보다 큰 경우는 마운드 지지력이 주 파괴모드가 되는 것을 쉽게 알 수 있다. 본 계산 조건하에서는 혼성제 설치 위치에서의 설계유의파고 6.44 m 임을 감안하면 $h_c = 0.6 H_s$ 를 기준으로 주 파괴모드가 달라진다는 의미이다. 따라서

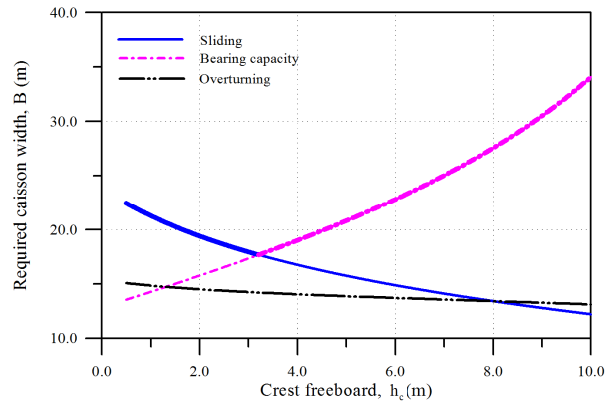


Fig. 3. Variation of the required caisson width with respect to crest freeboard

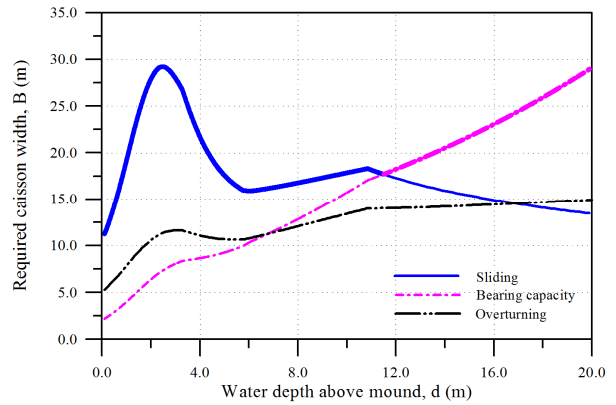


Fig. 4. Variation of the required caisson width with respect to water depth

활동을 주 파괴모드로 고려하여 케이슨의 폭을 결정한 다음, 단순히 마루높이만 높이는 것은 다른 파괴모드로부터 오는 위험성을 간과할 수 있기 때문에 다중 파괴모드로 해석하여 단면을 결정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 마루높이가 증가하면 파력을 크게 받아 단면이 커질 것으로 예상할 수 있는데 본 해석조건에서는 파력의 증가보다 마루높이의 증가에 따른 자중 증가가 더 크게 나타나고 있다.

마지막으로 마운드 위의 수심변화에 따른 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 동일한 환산심해파에 대하여 마루높이 $h_c = 0.6 H_s$ 를 가정하였다. 활동에 의한 단일 파괴모드에 의한 결과는 마운드 위의 수심이 작은 영역, $d \approx 1.0 \sim 4.0$ m 에서 충격쇄파력에 의한 효과가 나타나는 등 Goda (2010)의 결과와 동일하다. 그러나 다중 파괴모드를 고려하게 되면 약 $d = 11.5$ m를 기준으로 주 파괴모드가 달라진다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 $d = 11.5$ m 보다 수심이 작은 경우는 활동을 주 파괴모드로 고려하여 케이슨의 폭을 결정할 수

있으나 그것보다 수심이 증가하게 되면 편심 경사하중에 의한 마운드 지지력을 주 파괴모드로 고려하여 케이스의 폭을 결정하여야 한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 최소 안전율을 만족하는 혼성제 케이스의 단면을 결정론적으로 산정하는 경우에도 활동뿐만 아니라 전도와 편심 경사하중에 따른 마운드 지지력에 대한 다중 파괴모드를 동시에 고려하여야 한다. 이는 설치수심, 마루높이 그리고 입사파랑 조건에 따라 주 파괴모드가 달라지기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 시행착오 없이 최소 안전율을 만족하는 혼성제 케이스의 단면을 결정론적으로 산정할 수 있다.

4. 시스템 신뢰성 해석

시스템 신뢰성 해석은 하나의 구조물에 여러 개의 다중 파괴모드가 존재할 때 각 파괴모드 간 상관관계를 고려하여 파괴확률을 계산하는 개념으로 일차 해석모형(first-order/unimodal)과 이차 해석모형(second-order/bi-modal)으로 구분된다(Ditlevsen, 1979). 일차 해석모형은 파괴모드들이 일정 크기의 상관성을 갖는다고 가정하여 해석하는 근사적 방법이고, 이차 해석모형은 상관계수를 정량적으로 산정하여 그 영향을 시스템의 파괴확률 산정에 고려하는 방법이다. 따라서 일차 해석모형은 수학적으로 단순하지만 결과의 정도가 낮고, 이차 해석모형은 복잡하지만 정도가 높다고 할 수 있다. 두 해석모형 모두 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석 결과를 이용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석을 수행하였으며, 이 결과를 이용하여 시스템 신뢰성 해석의 일차 해석모형과 이차 해석모형을 혼성제의 다중 파괴모드에 적용하였다.

임의의 구조물에 존재하는 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석 모형을 수학적으로 정의하기 위한 개념도를 Fig. 5에 제시하였다(Ang and Tang, 1984). Fig. 5에서 한계 상태방정식을 구성하는 확률변수들로 이루어진 공간에 k 개의 다중 파괴모드가 존재한다고 가정하면, 구조물의 파괴확률은 Eq. (8)과 같이 정의된다(Lee, 2008).

$$P_f = 1 - [g_1(\vec{X}) > 0] \cap [g_2(\vec{X}) > 0] \cap \dots \cap [g_k(\vec{X}) > 0] \quad (8)$$

여기서, $g_i(\vec{X}) = Z_i$ 인 단일 파괴모드의 한계 상태방정식이다. Eq. (8)을 수학적으로 해석하기란 불가능하다. 따라서 근사적으로 파괴확률의 상한(upper bound)과 하한(lower bound)

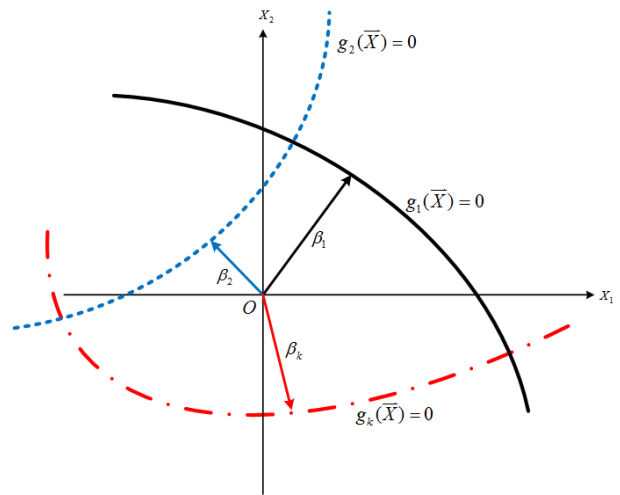


Fig. 5. Definition sketch of multiple failure modes

을 계산할 수 있는 해석법을 Ditlevsen (1979)과 Ang and Tang (1984)이 제안하였다.

먼저 파괴모드들이 양의 상관성을 갖는다고 가정하고 Bayes 정리를 이용하면 다음 Eq. (9)와 같은 일차 해석모형을 수립할 수 있다(Ang and Tang, 1984).

$$\max (P_{f_i}) \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{f_i}) \quad (9)$$

여기서, $P_{f_i} = [g_i(\vec{X}) \leq 0]$ 로 i 번째 단일 파괴모드의 파괴확률이다. Eq. (9)에서 좌우변의 등호는 각각 완전상관과 독립인 경우를 의미한다.

이상에서 설명한 일차 해석모형에서는 각 파괴모드간의 상관성을 정량적으로 고려할 수 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 이차 해석모형이 개발되었다. 이차 해석모형은 각 파괴가 발생하는 사상을 분해하여 해석하는 개념으로 파괴확률은 Eq. (10)과 같이 정의할 수 있다(Ditlevsen, 1979).

$$P_f = [g_1(\vec{X}) \leq 0] \cup \{ [g_2(\vec{X}) \leq 0] \cap [g_1(\vec{X}) > 0] \} \cup \dots \cup \{ [g_k(\vec{X}) \leq 0] \cap ([g_1(\vec{X}) > 0] \cap \dots \cap [g_{k-1}(\vec{X}) > 0]) \} \quad (10)$$

Eq. (10)을 드모르간의 법칙과 집합론을 이용하여 정리하면 Eq. (11)을 얻을 수 있다(Ditlevsen, 1979).

$$P_{f_i} + \max \left[\sum_{i=2}^k \left\{ P_{f_i} - \sum_{j=1}^{i-1} (P_{f_i} P_{f_j})_L \right\}; 0 \right] \tag{11a}$$

$$\leq P_f \leq \sum_{i=1}^k P_{f_i} - \sum_{i=2}^k \max_{j < i} \{ (P_{f_i} P_{f_j})_U \}$$

$$(P_{f_i} P_{f_j})_L = P(A) + P(B) \tag{11b}$$

$$(P_{f_i} P_{f_j})_U = \max [P(A), P(B)] \tag{11c}$$

$$P(A) = \Phi(-\beta_i) \Phi \left(-\frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \tag{11d}$$

$$P(B) = \Phi(-\beta_j) \Phi \left(-\frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \tag{11e}$$

여기서, $\Phi(x)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수이고 β_i 는 한계 상태함수 $g_i(\vec{X})$ 의 신뢰지수이다. 원점에서 파괴점까지의 최단거리로 정의되는 신뢰지수는 FORM (First Order Reliability Analysis)를 이용하여 산정하였다. 또한 ρ_{ij} 는 i 번째 파괴모드와 j 번째 파괴모드 간의 상관계수로서 각각의 파괴모드에 대한 파괴점에서의 방향여현(direction cosine) α 를 이용하면 다음 Eq. (12)로 부터 쉽게 계산할 수 있다.

$$\rho_{ij} = \sum_{m=1}^n \alpha_{im} \alpha_{jm} \tag{12}$$

여기서, n 은 한계 상태함수 $g_i(\vec{X})$ 와 $g_j(\vec{X})$ 사이에서 중복되는 확률변수의 개수이다. 이상에 시스템 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 수학적 모형을 수립하였다. 본 연구에서는 2절에서 수립된 활동, 전도 그리고 편심 경사하중에 따른 마운드 지지력에 대한 3개의 한계 상태방정식을 이용하여 혼성제 케이스

Table 1. Statistical properties of random variable used in single reliability analysis (Goda, 2010)

Variable	μ/X_i	COV	Distribution
f	1.06	0.15	Normal
W_e	1.02	0.02	Normal
F_U	0.77	0.24	Normal
F_{H_1}	0.77	0.24	Normal
F_{H_2}	0.77	0.24	Normal
σ_{max}	1.00	0.10	Normal

의 다중 파괴모드를 해석하였다. 앞에서 언급하였듯이 시스템 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석이 먼저 수행되어야 한다. 본 연구에서는 3절에 제시된 결정론적 단면을 기준으로 해석하였다. 지금까지 실무에서 활용되는 단면 산정 방법에 따라 활동을 주 파괴모드로 생각하여 각각의 조건에서 활동 파괴모드에 의하여 결정된 단면을 기준으로 전도와 마운드 지지력에 대하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 각 확률변수의 통계적 특성을 Table 1에 제시하였다. Goda (2010)가 제시한 바와 같이 심해 파 추정에서부터 파랑변형 과정 그리고 파압 산정식의 불확실성 등을 모두 고려하여 산정된 것이다. 다만 허용 마운드 지지력의 변동계수는 임의로 가정하였다.

먼저 Fig. 6에 입사파랑의 변화에 따른 활동, 전도, 그리고 마운드 지지력에 대한 단일 신뢰성 해석 결과를 제시하였다. Fig. 2(c)의 조건에서 활동을 주 파괴모드로 고려하여 산정된 케이스의 단면에 대한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 주어진 수심조건에서 모든 입사파랑에 대하여 활동의 신뢰지수는 약 2.0 이상으로 일정하고, 전도는 그보다 훨씬 크게 거동하고 있다. 그러나 편심 경사하중에 따른 마운드 지지력에 대한 신뢰지수는 그보다 훨씬 작다. 이는 혼성제 케이스가 활동에 대하여 안정하여도 마운드 지지력에 의하여 파괴될 가능성이 높다는 것을 의미이다. 즉, 혼성제 케이스가 활동에 대하여 안전하면 전도에 대하여도 안전하지만, 수심 및 입사조건에 따라 마운드 지지력에 대하여는 불안전할 수 있다.

앞의 시스템 신뢰성 해석에 대한 수학적 모형에서 볼 수 있듯이 각각의 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석 결과를 이용하면 혼성제 케이스의 다중 파괴모드에 대한 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있다. 먼저 Eq. (9)의 일차 해석모형에 의하여 산정된 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 파괴확률이 상당히 크며, 입사조건에 따라 다르게 거동하는

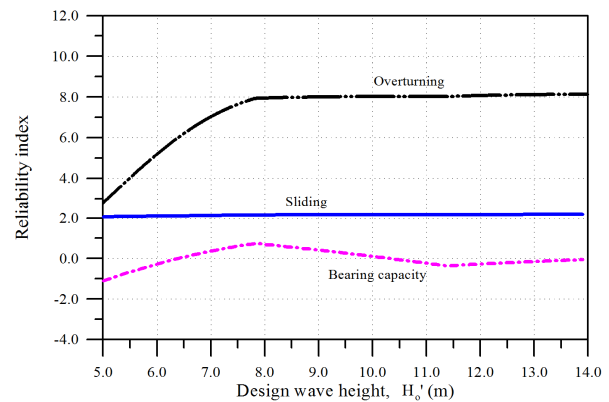


Fig. 6. Variation of reliability index with respect to design wave height

것을 알 수 있다. 특히 본 계산조건에서는 활동이나 전도에 의한 파괴확률보다 마운드 지지력에 의한 파괴확률이 상대적으로 커서 혼성제 케이스의 다중 파괴모드에 대한 시스템 파괴확률을 지배하고 있다.

일차 해석모형은 각 파괴모드간의 상관성을 고려할 수 없다. 이에 대한 영향을 살펴보기 위하여 이차 해석모형을 이용하여 시스템 신뢰성 해석을 수행하였다. 이를 위해서는 Eq. (12)를 이용하여 먼저 각 파괴모드간의 상관계수를 산정해야 한다. Fig. 8에 혼성제 케이스의 활동, 전도 그리고 마운드 지지력에 대한 파괴모드간의 상관계수를 산정하여 제시하였다. 혼성제 케이스에 존재하는 다중 파괴모드에 대한 상관계수를 정량적으로 산정한 것은 처음이다. 그림에서 볼 수 있듯이 활동 파괴모드와 전도 파괴모드, 활동과 마운드 지지력 그리고 전도와 마운드 지지력 파괴모드의 상관계수가 모두 양의 값을 갖는다. 또한 입사파고가 커짐에 따라 각 파괴모드간의 상관계수가 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 활동과 전도의 상관성

이 가장 크고, 활동과 마운드 지지력에 대한 상관성이 가장 작게 나타나고 있다. 이 결과를 가지고 혼성제 케이스의 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 본 논문에서 수행된 계산조건에서 전체적인 거동특성은 일차 해석모형의 결과와 동일하나 상한치와 하한치의 차이가 줄어들었다. 그 차이는 무시할 수 있는 정도여서 혼성제 케이스의 경우 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석은 간편한 일차 해석모형으로도 수행할 수 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 어느 파괴모드의 파괴확률이 다른 파괴모드들의 파괴확률보다 상대적으로 클 때만 가능하다고 판단된다. 즉, 어느 파괴모드가 지배적이어서 상대적으로 다른 파괴모드의 영향이 작은 경우에만 가능하다.

다음으로 혼성제 케이스의 마루높이 변화에 따른 해석 결과를 Figs. 10~13에 제시하였다. Fig. 3에서 활동에 의하여 결정된 단면에 대한 해석 결과이다. 먼저 Fig. 10은 단일 파괴모드에 대한 결과로서 활동에 대한 신뢰지수는 거의 일정하나

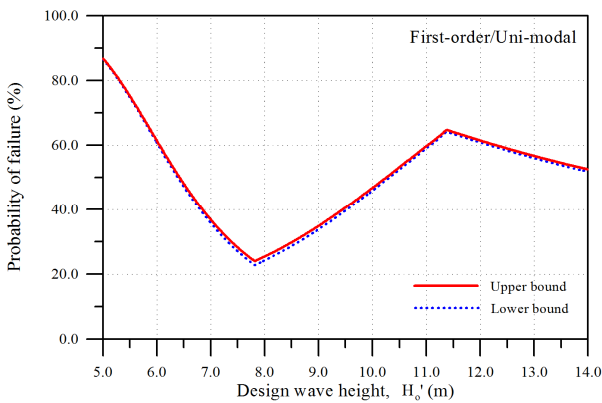


Fig. 7. Results of system reliability analysis by first-order/uni-modal with respect to design wave height

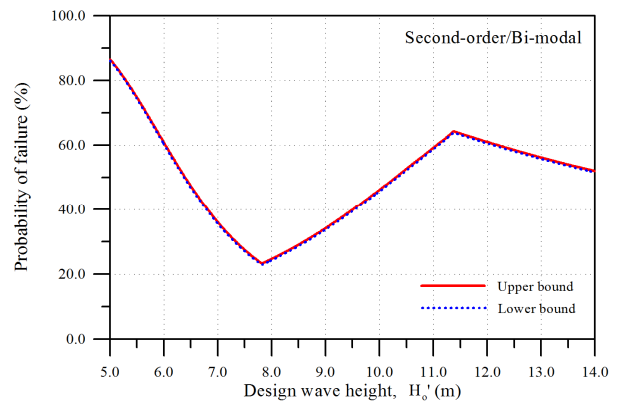


Fig. 9. Results of system reliability analysis by second-order/bi-modal with respect to design wave height

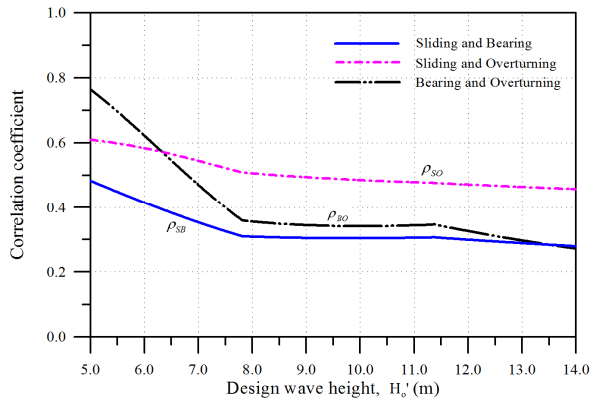


Fig. 8. Variation of correlation coefficient with respect to design wave height

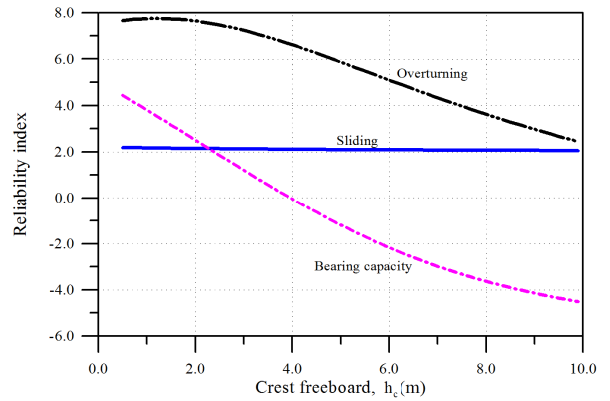


Fig. 10. Variation of reliability index with respect to crest freeboard

전도와 마운드 지지력에 대한 신뢰지수는 마루높이가 증가함에 따라 감소하고 있다. 따라서 마루높이가 일정 이상으로 높아지게 되면 혼성제 케이슨의 주 파괴모드는 마운드 지지력이 된다. Fig. 11은 일차 해석모형에 의한 시스템 신뢰성 해석 결과

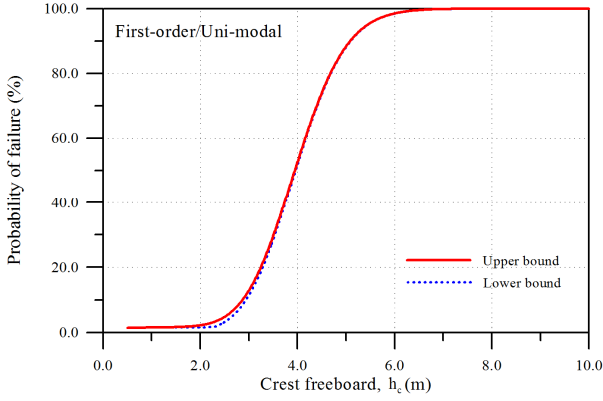


Fig. 11. Results of system reliability analysis by first-order/uni-modal with respect to crest freeboard

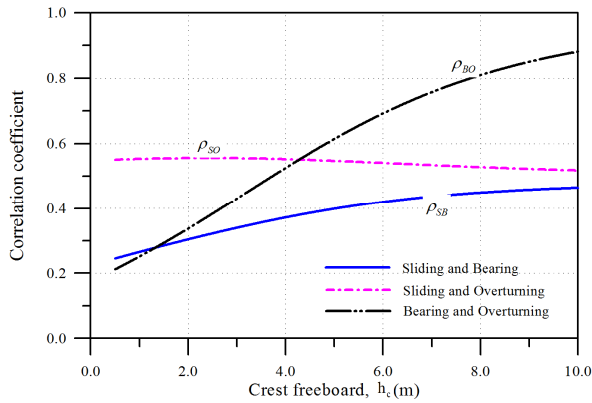


Fig. 12. Variation of correlation coefficient with respect to crest freeboard

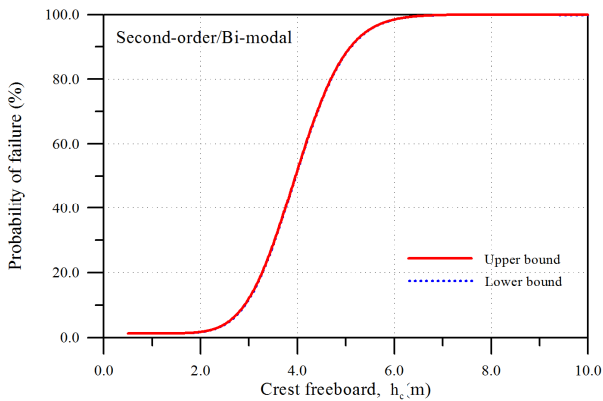


Fig. 13. Results of system reliability analysis by second-order/bi-modal with respect to crest freeboard

이다. 그림에서 볼 수 있듯이 케이슨의 마루높이가 대략 2.5 m 보다 높아지면 파괴확률이 크게 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 마운드 지지력의 안전성이 크게 낮아지기 때문이다. 본 계산 조건에서 2.5 m는 대략 설계 유의파고의 40%에 해당되는 값이다. 또한 Fig. 12는 상관계수를 나타낸 것인데 마루높이가 높아짐에 따라 활동과 마운드 지지력의 상관성이 점점 커지는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 13은 이차 해석모형에 의한 시스템 신뢰성 해석 결과이다. 전반적인 거동 특성이 일차 해석모형 보다 현저히 작게 나타남을 쉽게 확인할 수 있다.

마지막으로 사석 마운드 위의 수심 변화에 따른 해석 결과를 Figs. 14~17에 제시하였다. Fig. 4에서 활동에 의하여 결정된 단면에 대한 해석 결과이다. 먼저 Fig. 14는 활동, 전도 그리고 마운드 지지력에 대한 단일 파괴모드에 대한 해석 결과이다. 수심이 약 19.0 m 이상인 경우를 제외하고는 앞의 계산 결과들과 마찬가지로 활동에 대하여 안전한 단면은 전도에 대하

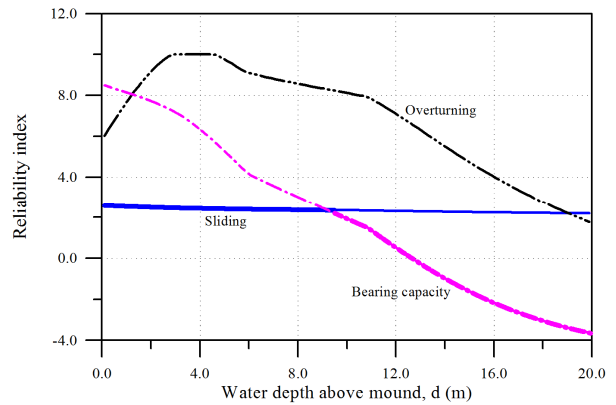


Fig. 14. Variation of reliability index with respect to water depths above mound

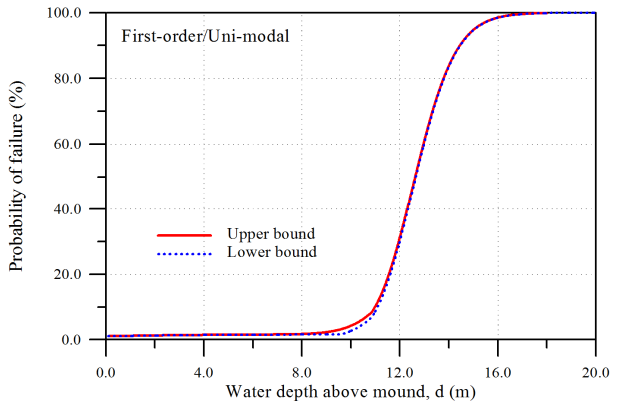


Fig. 15. Results of system reliability analysis by first-order/uni-modal with respect to water depths above mound

여도 안전하다. 그러나 마운드 지지력의 경우는 혼성제 케이슨의 설치 수심조건에 따라 다르게 나타난다. 특히 사석 마운드 위의 수심이 약 10.0 m 이상이 되면 마운드 지지력에 대한 안전성이 활동에 대한 안전성보다 급격하게 감소하는 경향으로 나타나고 있다.

한편 Fig. 15는 일차 해석모형에 의하여 산정된 혼성제 케이슨의 시스템 신뢰성 해석 결과이다. 사석 마운드 위의 수심이 약 10.0 m 이상이 되면 파괴확률이 급격하게 증가한다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 마운드 지지력에 의한 영향이다. 또한 Fig. 16은 상관계수를 나타낸 것인데 전반적으로 수심이 증가함에 따라 모든 파괴모드간의 상관성이 점점 커지는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 17은 이차 해석모형에 의한 혼성제 케이슨의 시스템 신뢰성 해석 결과이다. 전체적인 거동특성이 일차 해석모형과 동일하고 상한치와 하한치의 차이가 줄어들었다는 점은 앞의 결과와 비슷하다. 그러나 일차 해석모형의 결과에서 나타나지 않는 전도의 영향이 이차 해석모형

의 결과에서 나타나고 있다. Fig. 14를 보면 수심이 약 19.0 m 이상에서 전도에 의한 파괴확률이 활동에 의한 파괴확률보다 커지고 있는데 이에 따른 영향이 이차 해석모형의 결과에서 조금씩 나타나고 있다.

5. 결론

혼성제 형식의 방파제에서 발생 가능한 파괴모드, 즉, 활동 및 전도 그리고 편심 경사하중에 의한 마운드 지지력을 지금까지와는 다르게 단일 파괴모드가 아닌 다중 파괴모드 개념으로 해석하였다. 결정론적으로 해석하는 방법뿐만 아니라 확률론적으로 해석하는 방법을 제시하였다. 먼저 결정론적으로 해석하는 방법에서는 다중 파괴모드를 이용하여 혼성제 케이슨의 최소 단면을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 확률론적으로 해석하는 방법에서는 불확실성을 고려하여 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석뿐만 아니라 다중 파괴모드에 대한 시스템 신뢰성 해석을 수행하였다. 시스템 신뢰성 해석에서는 모두 두 가지 모형을 사용하였는데 일차 해석모형과 이차 해석모형이다. 일차 해석모형은 파괴모드들이 일정 크기의 상관성을 갖는다고 가정하여 해석하는 근사적 방법이고 이차 해석모형은 파괴모드간의 상관계수를 정량적으로 산정하여 시스템의 파괴확률을 보다 정확하게 계산하는 방법이다.

먼저 입사조건 및 마루높이 그리고 설치수심에 따라 결정론적 설계법으로 혼성제 케이슨의 최소 폭을 산정하였다. 안전 여유 개념으로 표현된 활동 및 전도 그리고 마운드 지지력에 대한 한계 상태방정식을 이용하여 케이슨의 표준단면을 산정할 수 있는 식을 유도하였다. 해석 결과에 의하면 활동에 의한 안전성이 증가하면 마운드 지지력에 대한 안전성이 감소하는 등 파괴모드간 상충이 발생되었다. 입사조건 및 마루높이 그리고 설치수심에 따라 케이슨의 파괴를 결정짓는 주 파괴모드가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 최소 안전율을 만족하는 혼성제 케이슨의 단면을 결정론적으로 산정하는 경우에도 활동뿐만 아니라 전도와 편심 경사하중에 따른 마운드 지지력에 대한 다중 파괴모드를 동시에 고려하여야 한다.

한편 불확실성을 고려한 신뢰성 해석에서는 활동을 주 파괴모드로 생각하여 결정된 단면에 대하여 전도와 마운드 지지력을 함께 해석하였다. 결정론적 해석과 동일하게 입사조건 및 마루높이 그리고 설치수심의 변화에 따라 신뢰성 해석을 수행하였다. 각각의 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석이 먼저 수행되었다. 먼저 입사조건 변화에 대하여 활동 및 전도 파괴모드에 대한 신뢰지수는 약 2.0 이상으로 안전하나 마운드

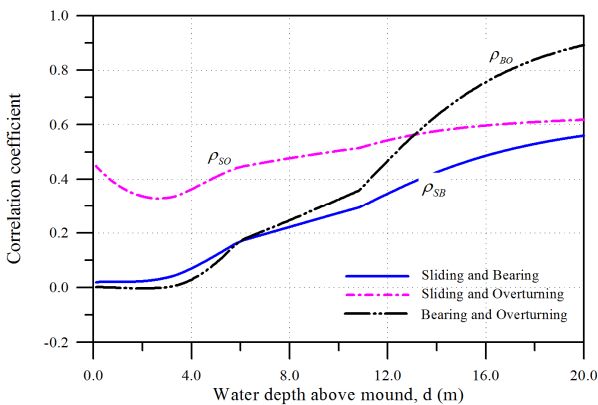


Fig. 16. Variation of correlation coefficient with respect to water depths above mound

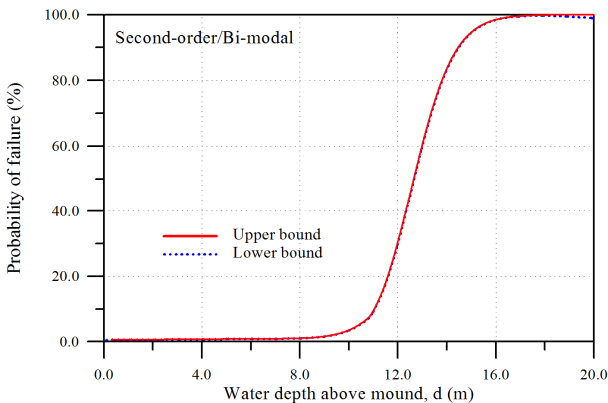


Fig. 17. Results of system reliability analysis by second-order/bi-modal with respect to water depths above mound

지지력에 대한 신뢰지수는 그보다 훨씬 작게 나타났다. 이는 혼성제 케이슨이 활동 및 전도에 대하여 안정하여도 마운드 지지력에 의하여 파괴될 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과를 정량적으로 확인하기 위하여 시스템 신뢰성 해석을 수행하였다.

혼성제 케이슨의 다중 파괴모드에 의한 제체의 시스템 파괴 확률이 입사조건에 따라 다르게 거동하는 것을 알 수 있었다. 또한 단면을 일정하게 유지하면서 마루높이를 증가시키면 전도와 마운드 지지력에 대한 신뢰지수는 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 마루높이가 설계 유의파고의 40%보다 높은 경우, 마운드 지지력에 대한 신뢰지수는 급격히 감소하고 이에 따라 다중 파괴모드에 의한 혼성제 케이슨 제체의 시스템 파괴확률은 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 동일 입사조건에서 설치수심이 증가하는 경우에서도 유사하게 나타났다. 입사파고 조건에 따라 약간씩 다르지만 일정 수심 이상에서는 활동에 의한 파괴 보다는 마운드 지지력에 의한 파괴 위험성이 더 높아질 수 있다.

마지막으로 다중 파괴모드에 따른 혼성제 케이슨의 제체에 대한 시스템 신뢰성 해석에서 일차 해석모형과 이차 해석모형의 결과들은 거의 모든 조건에서 거의 일치되는 거동 특성을 나타냈다. 그러나 수학적으로 좀 더 복잡하지만 파괴모드간의 상관성을 정량적으로 고려할 수 있는 이차 해석모형의 결과가 더 높은 정도를 나타내는 것으로 확인되었다. 다만 파괴모드 사이에 파괴확률이 상대적으로 크게 차이 나는 경우에는 일차 해석모형을 간편하게 사용할 수 있다.

본 연구에서는 케이슨의 상치콘크리트의 형상을 반파공 등과 같이 일부만을 개량하여 마루높이를 증고하는 경우와 편심 경사하중에 따른 지반의 원호활동에 대하여는 고려하지 않았다. 따라서 이에 대한 연구가 앞으로 더 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호 520170170)와 해양수산과학기술진흥원의 지원(과제번호 20180323)으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

- Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*. John-Wiley & Sons, N.Y.
- CIAD (1985). *Computer aided evaluation of the reliability of a breakwater design*. Construction Industry Research and Information Association, Special Pub. 83.
- Ditlevsen, O. (1979). "Narrow reliability bounds for structural systems." *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 7, No. 4, pp. 453-472.
- Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific Publishing Co., Singapore.
- Lee, C.-E. (2008). Reliability analysis of multiole failure modes of rubble-mound breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 20, No. 2, pp. 137-147 (in Korean).
- PIANC (2001). *Breakwaters with vertical and inclined concrete walls*. Identification and evaluation of design tools, Report for PTCII WG28.
- Ports and Harbours Bureau (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), National Institute for Land and Infrastructure Management, and Port and Airport Research Institute (2009). *Technical standards and complementaries for port and harbour facilities in Japan*. Overseas Coastal Area Development Institute of Japan.
- Stuart, A. J. (1958). "Equally correlated variates and structural reliability." *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 20, pp. 373-378.
- Takahashi, S., Tanimoto, K., and Shimosako, K. (1994). "A proposal of impulsive pressure coefficient for the design of composite breakwaters." *Proceedings International Conference of Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction*, Yokosuka, Japan, pp. 489-504.
- Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S., and Goda, Y. (1976). "An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters." *Proceedings 23rd Japanese Conference on Coastal Engineering*, pp. 11-16 (in Japanese).
- Tanimoto, K., Takahashi, S., and Kitatani, T. (1981). "Experimental study of impact breaking wave forces on a vertical-wall caisson of composite breakwater." *Report of Port and Harbour Research Institute*, Vol. 20, No. 2, pp. 3-39 (in Japanese).
- U.S. Army Corps of Engineers (2006). *Coastal Engineering Manual*. Washington, DC.