한국해안 · 해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 32(1), pp. 11~16, Feb. 2020
https://doi.org/10.9765/KSCOE.2020.32.1.11

파랑하중에 대한 인터로킹 케이슨 방파제의 회전 안정성 평가식 제안
Proposal of Rotating Stability Assessment Formula for an Interlocking Caisson Breakwater Subjected to Wave Forces

박우선* · 원덕희** · 서지혜*** · 이병욱****
Woo-Sun Park*, Deokhee Won**, Jihye Seo*** and Byeong Wook Lee****

요 지 : 인터로킹 케이슨에 의한 장대화된 방파제의 회전 안정성에 대해서 연구하였다. 무한 방파제에 경사지게 입사하는 선형파에 대한 해석해를 이용하여 방파제 기준선 방향으로의 파압 위상차 효과를 고려하였으며, 설계파의 비선형 특성을 고려하기 위하여 설계 기준 Goda 파압식을 차용하였다. 방파제의 회전 안전율을 케이슨 자중에 의한 회전 마찰저항모멘트와 수평 및 수직 파력에 의한 작용 회전모멘트의 비로 정의하고 최소 안전율을 보이는 회전 중심점 위치와 최소 안전율에 대한 해석해를 제시하였다. 규칙파, 불규칙파 및 다방향 불규칙파 등 현행 항만구조물 설계에 사용되고 있는 모든 설계파 조건에 대해서 적용 가능하도록 각 조건에 대한 평가식을 제안하였다.

핵심용어 : 인터로킹 케이슨, 방파제, 안정성, 회전, 위상차

Abstract : The rotational stability of an interlocking caisson breakwater was studied. Using the analytical solution for the linear wave incident to the infinite breakwater, the phase difference effect of wave pressures in the direction of the breakwater baseline is considered, and Goda's wave pressure formula in the design code is adopted to consider the nonlinearity of the design wave. The rotational safety factor of the breakwater was defined as the ratio of the rotational frictional resistance moment due to caisson's own weight and the acting rotational moment due to the horizontal and vertical wave forces. An analytical solution for the rotational center point location and the minimum safety factor is presented. Stability assessment formula were proposed to be applicable to all design wave conditions used in current port and harbor structure design such as regular waves, irregular waves and multi-directional irregular waves.

Keywords : interlocking caisson, breakwater, stability, rotation, phase lag

1. 서 론

기후변화에 따른 설계파고 증대로 방파제 안정성 확보가 중요한 문제로 대두되고 있다. 이에 따른 기존 케이슨 방파제의 보강은 주로 전면부를 소파블록으로 피복하는 방향으로 이루어지고 있으며, 해역조건에 따라 새로운 케이슨을 전면에 설치하여 보강하는 방안도 검토되고 있다(Park et al., 2019). 이와는 별개로 케이슨 방파제의 안정성을 증대시키기 위한 방안의 하나로 독립되어 설치되는 케이슨을 인접 케이슨과 인터로킹시키려는 시도(SK E&C, 2018; Halla Corporation, 2018, 2019; Hyundai Dvp Company, 2009, 2011; Park et al., 2011)가 꾸준히 이어지고 있다. 케이슨을 인터로킹시키면 작용파압의 위상차에 의하여 방파제에 작용하는 최대파력이 저감되는 효과를 얻을 수 있어 같은 자중으로 높은 안정성을 얻을 수 있게 된다. 특히, 실제 해상에서 작용되는 파가 일방향 파가 아니고 다방향 파이고, 주파향이 방파제 법선과 기울어져도 직각으로 작용하는 것으로 설계되고 있어 방파제가 파괴되는 극한 상황에서는 인터로킹 효과에 의해 매우 우수한 안정성을 발휘한다.

지금까지 제시된 케이슨을 인터로킹시키는 방법중에서 최근 주목받고 있는 것은 해양수산신기술로 인증된 오픈 셀 케이슨 공법이다. 항만 분야의 신기술 진입장벽이 높아 실용화

*한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 책임연구원(Corresponding author: Woo-Sun Park, Principal Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385, Haeyang-ro, Youngdo-gu, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3510, Fax: +82-50-4212-9917, wspark@kiost.ac.kr)
**한국해양과학기술원 해양ICT융합센터 선임연구원(Senior Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)
***한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 무기계약직기술원(Fill-time Research Specialist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)
****한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 연수연구원(Post Doctoral Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

에는 이르지 못했지만, 해양수산부에서 시험시공을 지원하고 있고(MOF, 2018, 2019), 부산항 신항 서컨테이너부두 안벽에 처음으로 설계되어 시공을 앞두고 있어(SK E&C, 2018; Halla Corporation, 2018, 2019), 인터로킹 케이슨관련 기술의 빠른 확산이 기대되고 있는 상황이다.

현행 설계기준은 독립 케이슨 중심으로 되어 있어 케이슨을 인터로킹시켜 장대화한 경우에 그대로 적용하면 과도한 안전율을 갖게 된다. 즉, 방파제 기준선 방향으로 변하는 파압의 위상차를 고려할 수 없어 설계 파력이 크게 결정되고, 이에 따라 케이슨 안정중량이 필요이상 크게 산정된다. 따라서, 합리적인 설계를 위해서는 현행 설계기준의 단면 기준 설계법을 3차원적으로 변하는 파압의 효과를 고려할 수 있는 새로운 방파제의 안정성 평가방법의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 선행연구를 통하여 제시한 인터로킹 케이슨 방파제의 미끌림과 전도에 대한 안정성 평가식(Park et al., 2017; Park et al., 2018)에 이어 기존의 독립된 케이슨 방파제에서는 케이슨 길이가 짧아 할 필요가 없었던 연직 축 중심으로의 회전방향 미끌림 안정성을 평가할 수 있는 새로운 식에 대해서 연구하였다.

방파제에 경사지게 입사하는 파에 의한 파압의 위상차는 선형 중복파 이론에 기초하여 고려하였으며, 설계파의 비선형성을 적절히 고려하기 위하여 설계기준에서 적용하고 있는 파압의 연직방향 및 바닥면에 대한 단위 폭당 파압 분포는 Goda 파압식에 따르는 것으로 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 케이슨 전체가 일체 거동하는 것으로 가정하여 방파제 회전 안정성 평가식을 유도하였다.

2. 회전 안정성 평가식의 유도

2.1 회전 안전율의 정의

Fig. 1과 같이 인터로킹 케이슨에 의해 장대화된 방파제에 편심하중이 작용할 경우, t 시간에서의 연직축 중심으로의 회전에 대한 안전계수, S_F^t는 회전중심점, O_R에서의 회전 마찰저항모멘트(분자)와 편심하중에 의한 작용모멘트(분모)의 비로

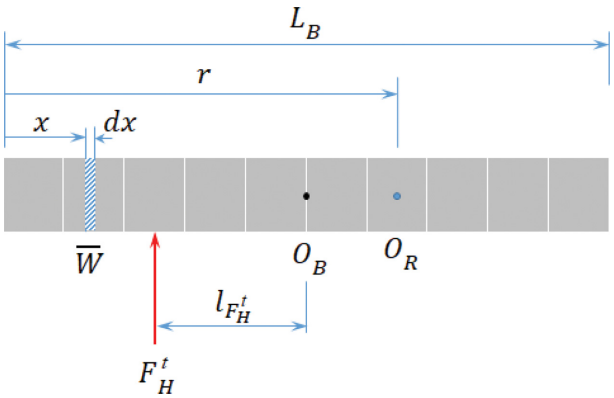

Fig. 1. Definition sketch for evaluating a rotational stability of an interlocking caisson breakwater.

정의할 수 있으며,

$$S_F^t = \frac{\int_0^{L_B} \mu \overline{W} |r - x| \mathrm{d}x}{F_H^t \left(r - \frac{L_B}{2} \right) + M_{O_B}^t} \tag{1}$$

이를 적분한 후 정리하면, 다음과 같이 단순화된다.

$$S_F^t = \frac{\mu \overline{W} \left(r^2 - L_B r + \frac{L_B^2}{2} \right)}{F_H^t \left(r - \frac{L_B}{2} + l_{F_H^t} \right)} \tag{2}$$

여기서,

μ = 케이슨과 사석간의 마찰계수(= 0.6)

$\overline{W}$ = 단위길이당 케이슨 방파제 유효무게(부력 제외)

F_H^t = 임의시간 t에서의 연직 파력이 고려된 방파제 작용 수평파력

$M_{O_B}^t$ = 임의시간 t에서의 방파제 중앙에서의 연직축에 대한 파력에 의한 회전 모멘트(= $F_H^t l_{F_H^t}$)

$l_{F_H^t}$ = $\frac{L_B}{2} - x_{F_H^t}$

$x_{F_H^t}$ = 방파제 작용 수평파력, F_H^t 작용점의 x 좌표

L_B = 방파제의 길이

시간 t에서의 장대형 방파제의 회전에 대한 안정성은 식(1)의 S_F^t의 최소값으로 판단할 수 있다. 즉, 1보다 작으면 불안정하고 1보다 크면 안정한 것으로 볼 수 있다.

식(2)의 안전계수의 최소값은 r에 대한 미분을 실시한 후, 분자가 0이 되는 조건을 이용하여 최소가 되는 위치 r을 구하면 결정할 수 있다. 즉,

$$\mu \overline{W} (2r - L_B) \left\{ F_H^t \left(r - \frac{L_B}{2} \right) + M_{O_B}^t \right\} - \mu \overline{W} \left(r^2 - L_B r + \frac{L_B^2}{2} \right) F_H^t = 0 \tag{3}$$

이를 정리하면,

$$r^2 - \left(L_B - \frac{2M_{O_B}^t}{F_H^t} \right) r - L_B \frac{M_o}{F_H^t} = 0 \tag{4}$$

가 되고, 이차방정식의 근의 공식을 이용하면, r은 다음과 같이 구해진다.

$$r = \frac{L_B - \frac{2M_{O_B}^t}{F_H^t} \pm \sqrt{L_B^2 + 4\left(\frac{M_{O_B}^t}{F_H^t} \right)^2}}{2} \tag{5}$$

여기서, 분자의 제곱근의 값이 (+)일 때는 F_H^t 작용점이 방파제 중앙점의 좌측에 있을 때로 시계방향으로 회전하는 경우에 해당한다. 즉,

$$r = \frac{L_B - \frac{2M'_{O_B}}{F'_H} + \sqrt{L_B^2 + 4\left(\frac{M'_{O_B}}{F'_H}\right)^2}}{2} \tag{6}$$

이를 정리하면,

$$r = \frac{L_B}{2}\left[1 - 2\frac{l_{F'_H}}{2} + \sqrt{1 + 4\left(\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right)^2}\right] \tag{7}$$

가 되고 이를 식(2)에 넣어서 정리하면 최소 안전계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$S'_F = \frac{\mu \overline{W} L_B}{F'_H}\left[\sqrt{1 + 4\left(\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right)^2} - 2\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right] \tag{8}$$

여기서, $l_{F'_H}$는 양의 값이다.

분자의 제곱근의 값이 (–)일 때는 F'_H 작용점이 방파제 중앙점의 우측에 있을 때로 반시계방향으로 회전하는 경우에 해당한다. 즉,

$$r = \frac{L_B - \frac{2M'_{O_B}}{F'_H} - \sqrt{L_B^2 + 4\left(\frac{M'_{O_B}}{F'_H}\right)^2}}{2} \tag{9}$$

이를 정리하면,

$$r = \frac{L_B}{2}\left[1 - 2\frac{l_{F'_H}}{L_B} - \sqrt{1 + 4\left(\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right)^2}\right] \tag{10}$$

가 되고 이를 식(2)에 넣어서 정리하면 최소 안전계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$S'_F = \frac{\mu \overline{W} L_B}{F'_H}\left[\sqrt{1 + 4\left(\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right)^2} + 2\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right] \tag{11}$$

여기서, $l_{F'_H}$는 음의 값이다.

식(7)과 (10)을 통합 정리하면, 시간 t에서의 회전중심점의 위치는 다음과 같이 표현되며,

$$r - \frac{L_B}{2} = \frac{L_B}{2}\left[\sqrt{1 + 4\left(\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right)^2} - 2\left|\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right|\right] \tag{12}$$

식(8)과 (11)을 통합 정리하면, 최소 안전계수는 다음과 같이 표현된다.

$$S'_F = \frac{\mu \overline{W} L_B}{F'_H}\left[\sqrt{1 + 4\left(\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right)^2} - 2\left|\frac{l_{F'_H}}{L_B}\right|\right] \tag{13}$$

수평파력, F'_H의 작용점 $l_{F'_H}$는 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

$$l_{F'_H} = \frac{M'_{O_B}}{F'_H} \tag{14}$$

여기서, M'_{O_B}는 임의의 시간 t에서의 설계파에 의한 방파제 중심점에서의 연직 파력이 고려된 회전 모멘트이다. 따라서, F'_H와 M'_{O_B}만 결정하면 시간 t에서의 회전안정성을 평가할 수 있고, 설계파 작용시 방파제 회전안정성은 설계파가 작용하는 시간 동안 식(13)에 의해 주어지는 안전율 중 가장 작은 값을 기준으로 평가할 수 있다.

2.2 F'_H와 M'_{O_B}의 결정

본 연구에서는 설계파조건에서의 F'_H와 M'_{O_B}를 해석적으로 결정하기 위하여 Fig. 2와 같이 무한 방파제에 경사로 입사하는 선형파에 대한 해석해와 설계기준의 Goda 파압식을 이용하였다. 즉, 방파제 기준선 방향의 파압의 위상차는 선형파 이론에 의한 해석해를 이용하여 고려하였고, 설계파의 비선형성은 Goda 파압식을 이용하여 반영하였다(Park et al., 2017).

2.2.1 선형 F'_H와 M'_{O_B}의 결정

무한 방파제에 경사로 입사하는 선형파에 대한 해석해를 이용하면 길이 L_B이고 반사율이 K_R인 방파제 법선에 θ각도로 경사지게 입사하는 파랑의 복소수 동압력, $\overline{P}$는 아래와 같이 복소수 속도포텐셜로, Φ로 표시할 수 있으며,

$$\overline{P} = i\omega\rho\Phi \tag{15}$$

여기서,

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega}\phi(x, y)\frac{\cosh k(z + h)}{\cosh kh} \tag{16}$$

그리고,

$$\phi(x, y) = [e^{iky\cos\theta} + K_R e^{-iky\cos\theta}]e^{ikx\sin\theta} \tag{17}$$

ρ = 파동장 유체의 밀도
g = 중력가속도
H = 파고
ω = 파의 각속도
k = 파수
h = 수심
$i = \sqrt{-1}$

케이슨에 작용하는 파압에 의한 복소수 수평파력 $\overline{F}_H$는 동압력 $\overline{P}$를 작용면적 A에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}\overline{F}_H &= -\int_A i\omega\rho\Phi\, dA \\ &= -i\omega\rho\int_0^{L_B}\int_{-h}^{0}\Phi\, dz\, dx\end{aligned} \tag{18}$$

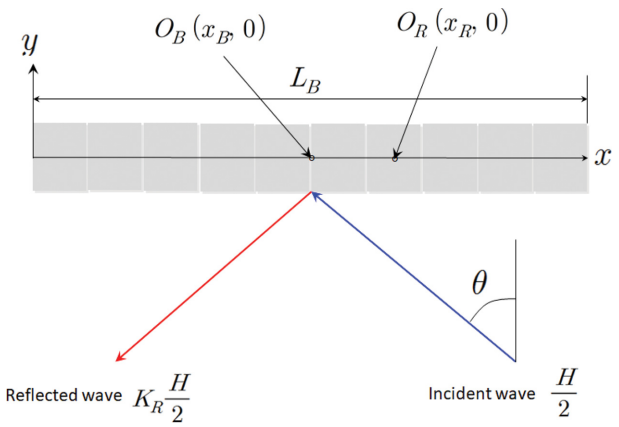

Fig. 2. Definition sketch for evaluating hydrodynamic forces and rotational moment of an interlocking caisson breakwater.

식(16)과 (17)을 식(18)에 대입하고, x 및 z 방향으로 적분을 수행한 후 정리하면 다음과 같이 단순화된다.

$$\overline{F}_H = -i\rho g\frac{H}{2}(1+K_R)hL_B\cdot\frac{\tanh kh}{kh}\cdot e^{ik\frac{L_B}{2}\sin\theta}\cdot\gamma_d \tag{19}$$

여기서,

$$\gamma_d = \frac{\sin\frac{kL_B\sin\theta}{2}}{\frac{kL_B\sin\theta}{2}} \tag{20}$$

γ_d는 파력 평활화계수로 알려져 있으며(Takahashi and Shimosako, 1990; Burcharth and Liu, 1999), 케이슨에 작용하는 파력을 파압의 위상을 고려하지 않고 산정한 최대파력(방파제에 직각으로 입사하는 파에 의한 최대파력)으로 나눈 것으로 정의된다.

케이슨의 바닥에 작용하는 양압력에 의한 복소수 연직파력 $\overline{F}_V$는 바닥면에서의 복소수 동압력, $\overline{P}$를 작용면적, A에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 Goda 파압식에서와 같이 방파제 폭(W_B) 방향으로의 동압력분포를 선형적으로 감소하여 방파제 끝단에서는 0으로 되는 삼각형 분포로 가정하여 연직파력을 구하였다. 즉,

$$\begin{aligned}\overline{F}_V &= -\int_A i\omega\rho\Phi\,dA\\ &= -i\omega\rho\int_0^{L_B}\Phi|_{z=-h}\frac{W_B}{2}dx\end{aligned} \tag{21}$$

식(16)과 (17)을 식(21)에 대입하고, x 방향에 대해 적분을 수행한 후 정리하면 식(19)의 $\overline{F}_H$와 유사한 형태로 단순화된다.

$$\overline{F}_V = -i\rho g\frac{H}{2}(1+K_R)\frac{W_B}{2}L_B\cdot\frac{1}{\cosh kh}\cdot e^{ik\frac{L_B}{2}\sin\theta}\cdot\gamma_d \tag{22}$$

식(13)의 시간 t에서의 연직파력이 고려된 수평파력 F_H'는 다음과 같이 식(19)의 $\overline{F}_H$와 식(22)의 $\overline{F}_V$로부터 구할 수 있다.

$$F_H' = |\overline{F}_H|\cos(\omega t-\phi_{\overline{F}_H}) + \mu|\overline{F}_V|\cos(\omega t-\phi_{\overline{F}_V}) \tag{23}$$

여기서,

$$\phi_{\overline{F}_H} = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{Im}(\overline{F}_H)}{\mathrm{Re}(\overline{F}_H)}\right]$$

$$\phi_{\overline{F}_V} = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{Im}(\overline{F}_V)}{\mathrm{Re}(\overline{F}_V)}\right]$$

그리고,

Im[·] = 괄호안의 허수값

Re[·] = 괄호안의 실수값

방파제 중심, O_B에 대한 수평파압에 의한 복소수 회전 모멘트, $\overline{M}_{O_B}^{F_H}$는 동압력, $\overline{P}$에 팔 길이를 곱하여 작용면적, A에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}\overline{M}_{O_B}^{F_H} &= -\int_A i\omega\rho\Phi\left(x-\frac{L_B}{2}\right)dA\\ &= -i\omega\rho\int_0^{L_B}\int_{-h}^{0}\Phi\left(x-\frac{L_B}{2}\right)dz\,dx\end{aligned} \tag{24}$$

식(16)과 (17)을 식(24)에 대입하고, x 및 z 방향으로 적분을 수행한 후 정리하면 다음과 같이 단순화된다.

$$\overline{M}_{O_B}^{F_H} = -i\rho g\frac{H}{2}(1+K_R)\frac{\tanh kh}{kh}h\frac{L_B^2}{2}ie^{ik\frac{L_B}{2}\sin\theta}\cdot\Gamma_d \tag{25}$$

여기서,

$$\Gamma_d = \left[\frac{\sin\left(k\frac{L_B}{2}\sin\theta\right)}{\left(k\frac{L_B}{2}\sin\theta\right)^2} - \frac{\cos\left(k\frac{L_B}{2}\sin\theta\right)}{k\frac{L_B}{2}\sin\theta}\right] \tag{26}$$

방파제 중심, O_B에 대한 연직파압에 의한 마찰저항력 변화에 대한 복소수 회전 모멘트, $\overline{M}_{O_B}^{F_V}$는 복소수 양압력, $\overline{P}$에 마찰계수, μ와 팔 길이를 곱하여 작용면적, A에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}\overline{M}_{O_B}^{F_V} &= -\mu\int_A i\omega\rho\Phi\left(x-\frac{L_B}{2}\right)dA\\ &= -i\omega\rho\mu\int_0^{L_B}\Phi|_{z=-h}\frac{W_B}{2}\left(x-\frac{L_B}{2}\right)dx\end{aligned} \tag{27}$$

식(16)과 (17)을 식(27)에 대입하고, x 방향에 대해 적분을 수행한 후 정리하면 식(25)의 $\overline{M}_{O_B}^{F_H}$와 유사한 형태로 단순화된다.

$$\overline{M}_{O_B}^{F_V} = -i\rho g\mu\frac{H}{2}(1+K_R)\frac{1}{\cosh kh}\frac{W_B}{2}\frac{L_B^2}{2}ie^{ik\frac{L_B}{2}\sin\theta}\cdot\Gamma_d \tag{28}$$

식(14)의 임의의 시간 t에서의 연직파력이 고려된 회전 모멘트 M_{O_B}'는 다음과 같이 식(25)의 $\overline{M}_{O_B}^{F_H}$와 식(28)의 $\overline{M}_{O_B}^{F_V}$로

부터 구할 수 있다.

$$M'_{O_B} = \left|\overline{M}_{O_B}^{F_H}\right|\cos(\omega t - \phi_{\overline{M}_{O_B}^{F_H}}) + \overline{M}_{O_B}^{F_V}\cos(\omega t - \phi_{\overline{M}_{O_B}^{F_V}}) \quad (29)$$

여기서,

$$\phi_{\overline{M}_{O_B}^{F_H}} = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{Im}(\overline{M}_{O_B}^{F_H})}{\mathrm{Re}(\overline{M}_{O_B}^{F_H})}\right]$$

$$\phi_{\overline{M}_{O_B}^{F_V}} = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{Im}(\overline{M}_{O_B}^{F_V})}{\mathrm{Re}(\overline{M}_{O_B}^{F_V})}\right]$$

2.2.2 설계파 조건에서의 F'_H와 M'_{O_B}의 결정

식(23)과 (29)는 선형파 이론에 기초한 파력과 회전 모멘트로, 파고가 높아 비선형성이 큰 설계파 조건과는 상당한 차이를 보일 수 있어 그대로 설계에 적용하기는 어렵다. 따라서, 설계에 적용하기 위해서 현행 설계기준에서 제시하고 있는 Goda 파압식을 이용하여 설계파력과 설계모멘트를 재 정의하였다. 즉, 식(23)과 (29)의 최대 파력, $|\overline{F}_H|$와 $|\overline{F}_V|$, 최대 회전 모멘트 $\overline{M}_{O_B}^{F_H}$와 $\overline{M}_{O_B}^{F_V}$를 Goda 파압을 방파제 전 작용면적 A에 대해 적분한 파력 및 모멘트로 대체하여 다음과 같이 정의하였다.

$$F'_H = F_H^D\cos(\omega t - \phi_{\overline{F}_H}) + \mu F_V^D\cos(\omega t - \phi_{\overline{F}_V}) \quad (30a)$$

$$M'_{O_B} = M_H^D\cos(\omega t - \phi_{\overline{M}_{O_B}^{F_H}}) + \mu M_V^D\cos(\omega t - \phi_{\overline{M}_{O_B}^{F_V}}) \quad (30b)$$

여기서, F_H^D와 F_V^D는 방파제에 작용하는 최대파력, M_H^D와 M_V^D는 방파제 중심에서의 최대 회전모멘트를 나타내며, 이는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$F_H^D = F_H^G\cdot\gamma_j^H \quad (31a)$$

$$F_V^D = F_V^G\cdot\gamma_j^V \quad (31b)$$

$$M_H^D = F_H^G\cdot\frac{L_B}{2}\cdot\Gamma_j^H \quad (31c)$$

$$M_V^D = F_V^G\cdot\frac{L_B}{2}\cdot\Gamma_j^V \quad (31d)$$

여기서, F_H^G와 F_V^G는 Goda 파압식을 적용하여 작용면적 A에 대해서 적분한 Goda 파력을 의미한다. γ_j^H와 γ_j^V는 파력 평활화 계수이고, Γ_j^H와 Γ_j^V는 모멘트 영향계수로 각각 적용 설계파 종류에 따라 다음과 같이 주어진다.

▪ 규칙파의 경우($j = r$)

$$\gamma_r^H = \gamma_d \quad (32a)$$

$$\gamma_r^V = \gamma_d \quad (32b)$$

$$\Gamma_r^H = \Gamma_d \quad (32c)$$

$$\Gamma_r^V = \Gamma_d \quad (32d)$$

▪ 일방향 불규칙파의 경우($j = i$)

$$\gamma_i^H = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\gamma_d\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (33a)$$

$$\gamma_i^V = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\gamma_d\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (33b)$$

$$\Gamma_i^H = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\Gamma_d\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (33c)$$

$$\Gamma_i^V = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\Gamma_d\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (33d)$$

▪ 다방향 불규칙파의 경우($j = m$)

$$\gamma_m^H = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\right)^2\int_{-\pi}^{\pi}\gamma_d^2 S_\eta(\omega,\,\theta)d\theta\,d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (34a)$$

$$\gamma_m^V = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\right)^2\int_{-\pi}^{\pi}\gamma_d^2 S_\eta(\omega,\,\theta)d\theta\,d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (34b)$$

$$\Gamma_m^H = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\right)^2\int_{-\pi}^{\pi}\Gamma_d^2 S_\eta(\omega,\,\theta)d\theta\,d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{\tanh kh}{kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (34c)$$

$$\Gamma_m^V = \sqrt{\frac{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\right)^2\int_{-\pi}^{\pi}\Gamma_d^2 S_\eta(\omega,\,\theta)d\theta\,d\omega}{\int_0^\infty\left(\frac{1}{\cosh kh}\right)^2 S_\eta(\omega)d\omega}} \quad (34d)$$

여기서, $S_\eta(\omega)$와 $S_\eta(\omega,\,\theta)$는 각각 일방향 및 다방향 불규칙 설계파에 대한 스펙트럼을 나타낸다. 위 식에서 일방향 및 다방향 불규칙파에 대한 파력 평활화 계수와 모멘트 영향계수는 방파제에 일방향 및 다방향 불규칙파가 입사할 때와 일방향 불규칙파가 방파제 법선방향으로 입사할 때의 최대 기대값에 대한 비로 정의하여 구한 것이다.

2.3 회전 안정성 평가식

일반적으로 방파제는 생애주기 동안의 예상되는 설계파에 대한 안전계수가 허용 안전율보다 크면 안전, 작으면 불안전으로 평가할 수 있다. 따라서, 인터로킹 케이슨에 의한 장대화된 방파제의 회전 안정성은 식(13)에 제시된 안전계수를 이

용하여 평가할 수 있다. 즉,

$$F_S \le \min_{T_d}\left\{\frac{\mu \overline{W} L_B}{F_H'}\left[\sqrt{1+4\left(\frac{l_{F_H'}}{L_B}\right)^2}-2\left|\frac{l_{F_H'}}{L_B}\right|\right]\right\} \tag{35}$$

여기서, F_S = 방파제의 회전에 대한 설계 허용 안전율

$\min_{T_d}\{\cdot\}$ = 설계파의 작용시간 T_d 동안 괄호 안 값의 최소치

F_H' = 식(30a)에 의해 산정

$l_{F_H'}$ = 식(30a)의 F_H'와 (30b)의 M_{O_B}'를 식(14)에 대입하여 산정

현 시점에서 방파제의 회전에 대한 설계 허용 안전율, F_S를 얼마로 하는 것이 최적인지는 판단하기 어려우나, 현행 설계기준에서 케이슨의 미끌림 안전율의 경우 1.2를 적용하고 있고, 방파제 회전은 회전 방향의 미끌림으로 볼 수 있어 1.2를 사용하는 것이 합리적일 것이라는 판단하에 1.2를 사용할 것을 제안한다.

3. 결 론

본 연구에서는 인터로킹 케이슨에 의한 장대형 방파제의 연직축 중심으로의 회전 안정성을 평가하는 방법에 대해서 연구하였다. 방파제의 회전 안전율을 케이슨 자중에 의한 회전마찰저항모멘트와 수평 및 수직 파력에 의한 작용 회전모멘트의 비로 정의하고 최소 안전율을 보이는 회전 중심점 위치와 최소 안전율에 대한 해석해를 도출해 새로운 회전 안정성 평가식을 제시하였다.

설계파에 의한 수평 및 수직 파력 결정시, 방파제 기준선 방향으로의 파압의 위상차를 고려하기 위하여 선형파이론에 의한 해석해를 이용하였으며, 파압의 비선형을 고려하기 위하여 설계기준의 Goda 파압식으로 이용하였다. 케이슨 자중에 영향을 주는 케이슨 바닥면에 작용하는 동수압에 의한 수직파력은 등가의 수평 파력(= μ × 바닥면의 파력)으로 변환시켜 적용하였다. 규칙파, 불규칙파 및 다방향 불규칙파의 설계조건에 대하여 각각 평가식을 제안함으로써 현행 항만구조물 설계에 사용되고 있는 모든 설계파 조건에 대해서 적용 가능하도록 하였다.

본 연구에서 제시된 식은 선형파 이론과 설계기준에 제시된 파압식을 근간으로 하고 있어 어느 정도 타당성은 있을 것으로 판단하고 있지만 완벽한 식이라고는 할 수 없다. 따라서, 제시된 식을 실제 설계에 적용하기 위해서는 적용의 한계에 대한 평가와 제시한 허용안전율, 1.2의 타당성에 대한 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 '채움재를 이용한 인터로킹 케이슨 방파제 설계기술 개발(PM60450)'과 '해양에너지 및 항만·해양구조물 실용화 기술개발(PE99831)' 사업의 일환으로 수행되었음을 밝힌다. 첫 번째 사업을 통해서 주된 연구가 수행되어졌으며, 두 번째 사업을 통하여 도출된 연구결과가 정리, 보완되어 논문화되었다.

References

Burcharth, H.F. and Liu, Z. (1999). Force Reduction of Shore-crested Non-breaking Waves on Caissons. Final Report of MAST III/PROVERBS, Volume IIa, CH.4.3.

Halla Corporation. (2018). Report of Basic Design of West Container Terminal of New Port in Busan Port (Stage 2-6). BPA (in Korean).

Halla Corporation. (2019). Report of Working Design of West Container Terminal of New Port in Busan Port (Stage 2-6). BPA (in Korean).

Hyndai Dvp. Company. (2009). Report of Alternative-design of Counter Facilities Construction at Yeongil Bay Port in Pohang (Stage 2-1) (in Korean).

Hyndai Dvp. Company. (2011). Report of Basic Design of South-Breakwater at Yeongil Bay Port in Pohang (Stage 1 on Zone 1) (in Korean).

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). (2018). Recruitment of Construction Technology for Test Application in Oceans and Fisheries Field (in Korean).

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). (2019). Recruitment of Construction Technology for Test Application in Oceans and Fisheries Field (in Korean).

Park, S.H., Park, W.-S. and Kim, H.S. (2011). Evaluation of Structural Behavior for Interlocking Breakwater. Proc. KAOSTS '11 Conf., 1915-1918.

Park, W.-S., Lee, B.W. and Jang, S.-C. (2019). Influence of the Parapet Location to Wave Forces Acting on a Caisson Breakwater. APAC 2019, 965-970.

Park, W.-S., Seo, J. and Won, D. (2017). Proposal of sliding stability assessment formulas for an interlocking caisson breakwater under wave forces. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 29(2), 77-82 (in Korean).

Park, W.-S., Seo, J., Won, D. and Lee, B.W. (2018). Stability assessment formulas for an interlocking caisson breakwater under oblique wave conditions. Journal of Coastal Research (SI), 85(2), 1236-1240.

SK E&C. (2018). Report of Basic Design of West Container Terminal of New Port in Busan Port (Stage 2-6). BPA (in Korean).

Takahashi, S. and Shimosako, K. (1990). Reduction of Wave Force on a Long Caisson of Vertical Breakwater and its Stability. Technical Notes No. 685, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan (in Japanese).

Received 28 November, 2019
Revised 7 January, 2020
Accepted 29 January, 2020