

중력식 항만구조물의 사석마운드 지반반력 평가식의 일반화 Generalization of an Evaluation Formula for Bearing Pressures on the Rubble Mound of Gravity-Based Harbor Structures

박우선*
Woo-Sun Park*

요지 : 본 연구는 비정형 바닥판을 갖는 중력식 구조물의 사석마운드 지반반력을 대상으로 하였다. 구조물 바닥을 강체로 가정하고, 사석마운드는 압축에 대해서만 저항하는 바닥에 균일하게 분포하는 선형스프링으로 모형화하여 지반반력 산정식을 유도하였다. 바닥 형상이 사각형인 경우, 그 유도된 식이 설계에 사용되고 있는 식으로 변환됨을 보임으로써 유도 과정에 오류가 없음을 확인하였다. 또한, 비정형 바닥 형상이 사각형으로 수렴할 때의 지반반력의 거동과 그 수렴값을 살펴봄으로써 유도된 식의 타당성을 입증하였다. 실제 설계에서 사용되고 있는 방법의 적정성을 살펴보기 위하여 기 설계된 방파제 단면에 대한 단위 지반반력을 계산하고 설계서에 제시된 값과 비교하였다. 그 결과, 설계에 사용한 방법이 비안전측의 결과를 주었다는 것을 확인하였다. 특히, 극한 설계조건인 경우와 같이 연직하중의 편심이 큰 경우에 그 차이가 더 크게 나타났다.

핵심용어 : 항만, 중력식 구조물, 비정형 바닥판, 사석마운드, 지반반력, 허용지지력

Abstract : In this study, the bearing pressure on the rubble mound of a gravity-based harbor structure with an arbitrarily shaped bottom was targeted. Assuming that the bottom of the structure is a rigid body, the rubble mound was modeled as a linear spring uniformly distributed on the bottom that resists compression only, and the bearing pressure evaluation formula was derived. It was confirmed that there were no errors in the derivation process by showing that when the bottom was square, the derived equation was converted to the equation used in the design. In addition, the validity of the derived equation was proven by examining the behavior and convergence value of the bearing pressure when an arbitrarily shaped bottom converges into a square one. In order to examine the adequacy of the method used in the current design, the end bearing pressure for the pre-designed breakwater cross-section was calculated and compared with the values in the design document. As a result, it was shown that the method used for design was not appropriate as it gave unsafe results. In particular, the difference was larger when the eccentricity of the vertical load was large, such as in the case of extreme design conditions.

Keywords : harbor, gravity-based structure, arbitrarily shaped bottom, bearing pressure, allowable bearing capacity

1. 서 론

케이슨 공법은 우리나라 신항만 건설에 결정적으로 기여해 왔다. 특히, 대형 부유식 도크, 해상크레인 등의 등장이 큰 역할을 했다. 이로 인해 깊은 해역에 대형 케이슨을 이용한 방파제, 안벽 등의 건설이 용이해졌다. 최근, 인접 케이슨을 쇄석을 이용하여 인터로킹시켜 구조물의 안정성을 높인 새로운 공법인 「쇄석인터로킹을 활용한 오픈 셸 케이슨 공법(해양수산과학기술 제2017-08호, 제2022-0022호)」이 개발되면서 기후변화에 따른 이상파랑에의 대응이 큰 공사비 증가없이 가능해져 신항만 건설과 노후 항만 재개발에의 활용이 더욱 기

대되고 있다(Park et al., 2018, 2020).

항만에서의 케이슨 구조는 보다 다양한 형태로 진화해 가고 있다. 파를 막고, 배를 접안시키는 목적 외에 항내 정온도는 물론이고, 친수성에 심미성을 더하고, 경제성 제고는 물론이고 탄소중립에의 역할도 추가되고 있다. 이 과정 중에서 Fig. 1과 같이 케이슨 바닥판이 사각형이 아닌 비정형으로 설계되는 경우가 종종 있었다. 포항영일만 남방파제(1단계 1공구) 축조공사, 포항영일만 외곽시설 2-1단계 축조공사, 울산 신항 북방파제 제1공구 축조공사, 동해항 3단계 북방파제 제2공구 축조공사 등의 설계에서 그 예를 찾아볼 수 있다. 비정형 바닥은 경제적인 이유에서 채택되는 경우도 있고, 앞에

*한국해양과학기술원 해양공간개발·에너지연구부 책임연구원(Corresponding author: Principal Research Scientist, Ocean Space Development & Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385 Haeryangro, Youngdo, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3510, wspark@kiost.ac.kr)

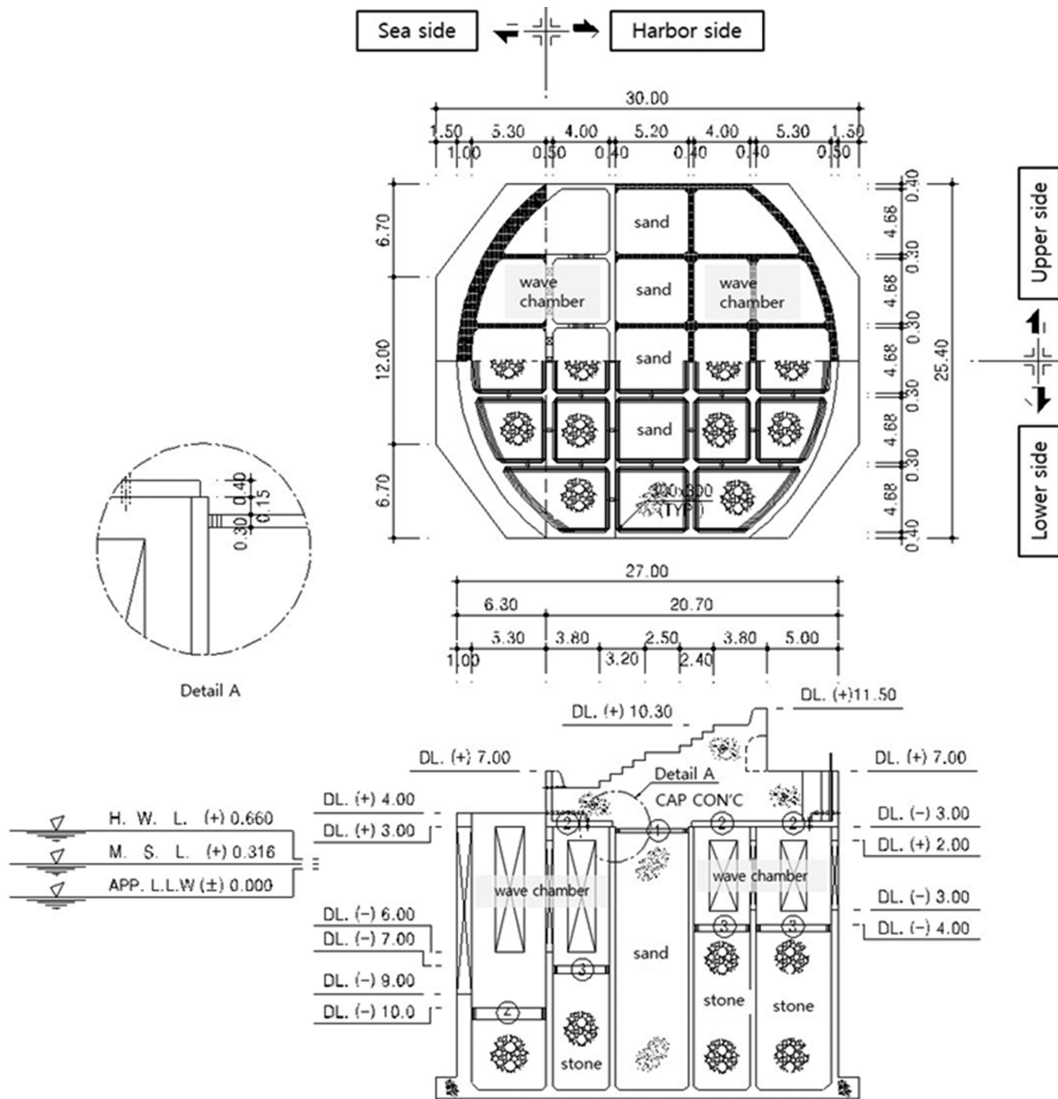


Fig. 1. Example of a caisson breakwater with an arbitrarily shaped bottom in the real design.

언급한 오픈 셀 케이슨 공법을 적용하는 경우와 같이 구조물의 내재적 안정성을 높이기 위한 방안의 일환으로 채택되는 경우도 있다(GS Construction Co. Consortium, 2022).

케이슨이 놓이는 사석마운드에 작용하는 지반반력은 허용 지지력(500 kN/m^2 또는 600 kN/m^2) 이내가 되도록 설계해야 한다. 수심이 깊어지면서 지반 허용지지력에 의해서 케이슨 폭이 정해지는 경우도 발생하고 있어 최근 케이슨 폭을 넓히지 않고 최대 지반반력을 저감시키는 방법에 대한 연구도 수행된 바 있다(Park and Lee, 2020). 케이슨 바닥이 사각형인 경우는 국가설계기준(MOF, 2023) 및 항만 서적(Goda, 2010) 등에 제시된 식을 이용하여 설계하중에 대한 지반반력을 계산할 수 있다. 그러나, 비정형인 경우는 적용할 식이 제시되어 있지 않아 설계시 지반반력의 산정에 어려움을 겪고 있다. Park et al.(2022)이 오픈 셀 케이슨 공법 관련 연구에서 시도한 바 있으나 설계시 사용할 만큼 충분하지 않았다.

현재, 항만구조물 설계에서는 등가의 사각형 바닥으로 가정하여 근사적으로 추정하고 있다. 추정된 결과가 안전적인

지 비안전적인지에 대한 판단없이 사용하고 있는 것은 Bishop 법에 의해 사석마운드를 포함한 지반의 안정성을 별도로 평가하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구는 이러한 설계상의 애로사항과 불합리한 점을 해결하기 위하여 수행되었다. 즉, 비정형 형상의 바닥을 갖는 중력식 항만구조물의 지반반력을 사각형 형상에 대한 것과 같은 수준으로 산정할 수 있는 방법에 대해서 연구하였다.

중력식 항만구조물의 경우와 같은 푸팅기초의 지반반력 산정문제는 1960년대 지반공학 기술자와 연구자들의 관심사 중 하나였다. 그동안 해석적인 방법, 수치적인 방법 등을 이용하여 편심 축하중을 받는 다양한 조건에서의 지반반력 추정 연구가 수행되어져 왔다(Czerniak, 1964; Wilson, 1997; Rodriguez-Gutierrez and Aristizabal-Ochoa, 2013a, 2013b; Huang et al., 2019). 본 연구에서는 해석적 방법을 이용하였으며, 기초구조와 지반 거동은 기본적으로 이들과 같이 가정하였다. 즉, 케이슨 바닥은 강체구조로 보고, 사석마운드는 케이슨 바닥면에 분포하여 압축에만 저항하는 균일한 탄성스프

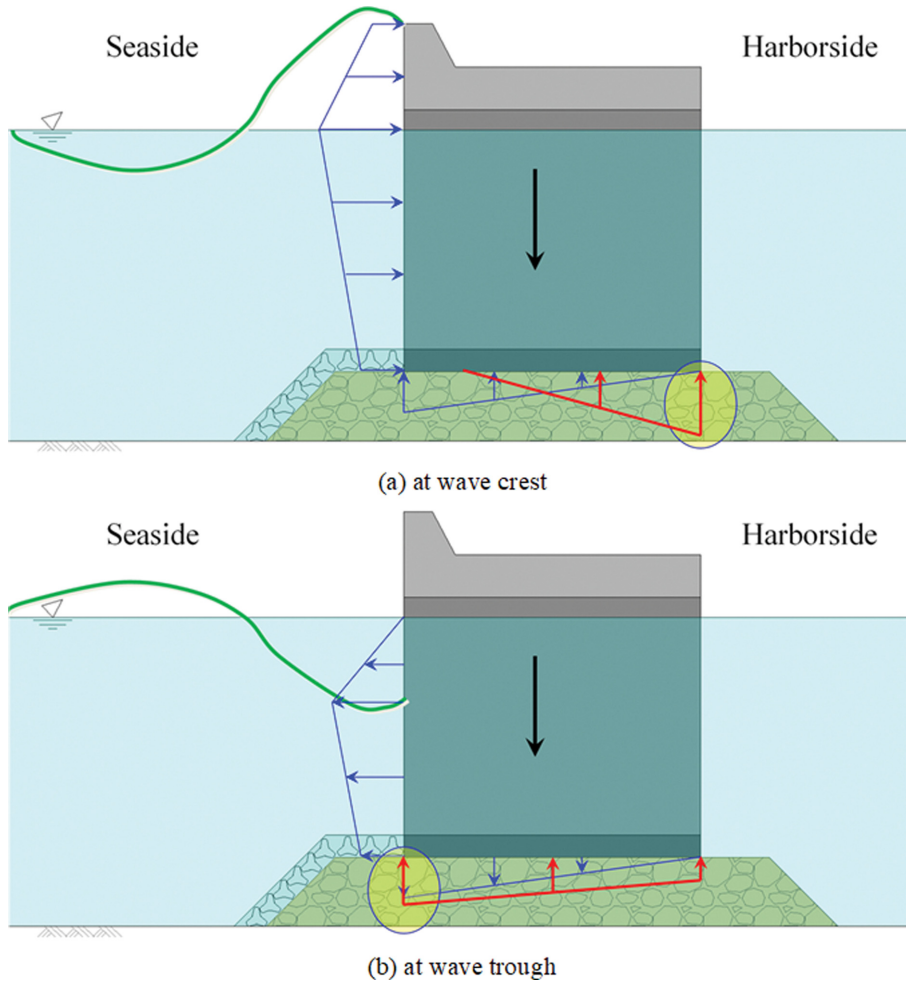


Fig. 2. Schematic diagram for bearing pressure distributions of the caisson breakwater (Park and Lee, 2020).

링으로 모형화하였으며, 힘의 정적 평형식을 이용하여 해석적으로 비정형 형상 바닥의 지반반력 산정식을 유도해 내었다. 유도된 식은 사각형 형상에 대한 산정식을 포함하므로 이의 일반식으로 볼 수 있으며, 따라서, 모든 바닥면 형상에 대해서 유효하다. 유도된 식이 사각형 형상 바닥인 경우에는 기존 산정식으로 전환됨을 보임으로써 유도과정에 오류가 없음을 확인하였으며, 비정형 형상 바닥면이 사각형 형상으로 수렴해 갈 때의 지반반력의 거동과 최종 수렴값을 살펴봄으로써 유도된 식의 타당성을 입증하였다. 그리고, 실제 설계된 방파제를 선정하여 적용함으로써 현재 실무에서 사용되고 있는 근사적인 방법의 적정성에 대해서 살펴보았다.

2. 사석마운드 지반반력 산정식의 일반화

방파제 등 항만구조물의 상부구조물은 사석마운드에 의해 지탱되도록 설계된다. 사석마운드는 Fig. 2와 같이 하중을 받는 상부구조물을 지지하는 과정에서 지지력을 제공한다. 이 지지력, 즉 지반반력은 상부구조물의 자중을 포함하는 연직 하중 그리고 회전모멘트와 평형을 이루게 된다.

상부구조물의 바닥이 임의의 형상을 갖는 경우에 대한 지

반반력 산정식 개발을 위하여 Fig. 3과 같은 최대 폭, B , 최대 너비, W 인 비정형의 바닥면을 정의하였다. 좌표계는 구조물 법선 방향을 x 축, 구조물 기준선 방향을 y 축으로 하였다. 파력 등 주 외력은 $(-)$ x 축 방향으로 작용하는 것으로 하였다.

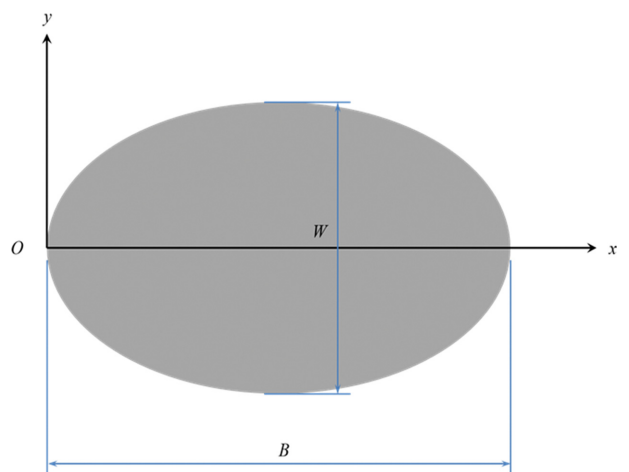


Fig. 3. Definition sketch for evaluating bearing pressure distributions on the rubble mound of a gravity-based harbor structure with arbitrarily shaped bottom.

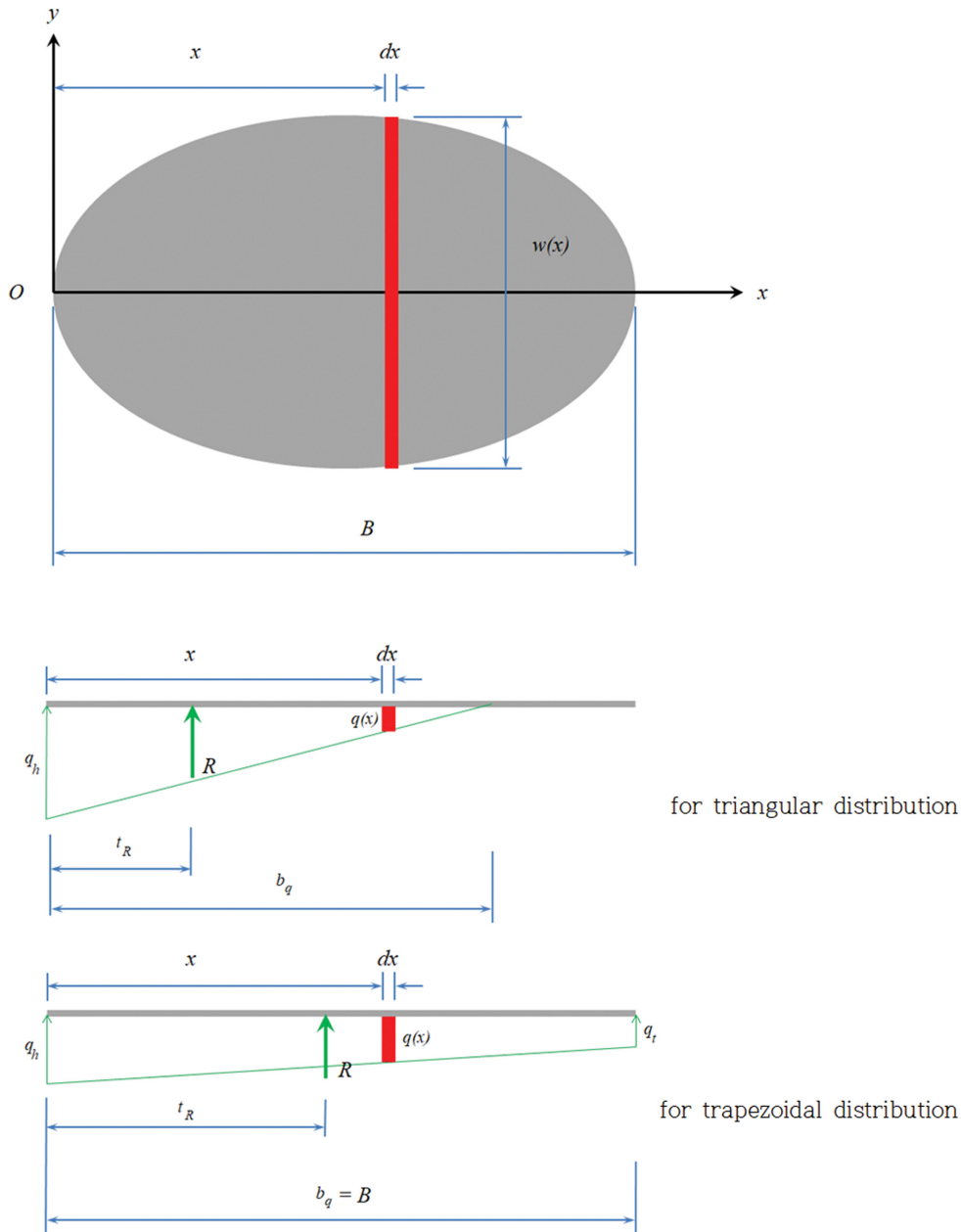


Fig. 4. Definition sketch for bearing pressure distributions on the rubble mound.

사석마운드의 지반반력은 Fig. 4에 보인 바와 같이 사다리꼴 또는 삼각형 분포로 나타낼 수 있다. 이와 같이 지반반력을 선형분포하는 것으로 표시할 수 있는 것은 중력식 구조물은 바닥판 강성이 커 강체 거동하는 것으로 볼 수 있기 때문이다.

삼각형 분포의 경우는 회전축에서의 최대 단부 지반반력, q_h 와 지반반력 분포 폭, b_q 가 미지의 변수가 되며, 사다리꼴 분포의 경우는 양단에서의 단부 지반반력, q_h 와 q_t 가 미지수의 변수가 된다. 이 미지의 변수(각 2개)는 다음의 연직 힘에 대한 평형식과 회전중심축에 대한 모멘트 평형식으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$\int_0^B q(x) \cdot w(x) dx = R \quad (\text{연직 힘의 평형식}) \quad (1)$$

$$\int_0^B q(x) \cdot w(x) \cdot x dx = R \cdot t_R \quad (\text{모멘트 평형식}) \quad (2)$$

여기서, R 은 연직방향 지반반력의 합력, t_R 은 회전중심축인 y 축으로 부터 지반반력의 합력의 작용위치까지의 거리이다. $q(x)$ 는 분포 지반반력으로 다음과 같이 표현된다.

• 삼각형 분포일 때($t_R \leq t'_R$) :

$$q(x) = q_h \left(1 - \frac{x}{b_q}\right) \quad x \leq b_q \quad (3a)$$

$$q(x) = 0 \quad x > b_q \quad (3b)$$

• 사다리꼴 분포일 때($t_R > t'_R$) :

$$q(x) = q_h \left(1 - \frac{x}{B}\right) + q_t \frac{x}{B} \quad (4)$$

여기서, t'_R 은 지반반력의 합력이 R 이고 $b_q = B$ 일 때의 R 의 작용위치까지의 거리로 다음 식과 같이 표현되며,

$$t'_R = \frac{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) w(x) x dx}{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) w(x) dx} \quad (5a)$$

이를 적분하여 정리하면, 바닥면의 단면 특성치로 표시된다. 즉,

$$t'_R = \frac{S_y^B - \frac{I_y^B}{B}}{A^B - \frac{S_y^B}{B}} \quad (5b)$$

여기서, A^B , S_y^B , I_y^B 는 각각 바닥면의 면적, y 축에 대한 단면 1차모멘트, 단면 2차모멘트로 다음과 같이 적분식으로 표시된다.

$$A^B = \int_0^B w(x) dx \quad (6)$$

$$S_y^B = \int_0^B w(x) \cdot x dx \quad (7)$$

$$I_y^B = \int_0^B w(x) \cdot x^2 dx \quad (8)$$

2.1 지반반력이 삼각형 분포일 경우

지반반력이 삼각형 분포일 때($t_R \leq t'_R$), 식(3a)와 (3b)를 식(1)과 식(2)에 대입시켜 정리하면, q_h 와 b_q 에 관한 2개의 식을 얻을 수 있다. 즉, 식(1)에 식(3a)와 식(3b)를 대입하고,

$$\int_0^{b_q} q_h \left(1 - \frac{x}{b_q}\right) \cdot w(x) dx = R \quad (9a)$$

q_h 에 대해서 정리하면 다음과 같이 되고,

$$q_h = \frac{R}{\int_0^{b_q} \left(1 - \frac{x}{b_q}\right) \cdot w(x) dx} \quad (9b)$$

분자에 대한 적분을 수행하여 다시 한번 정리하면 q_h 는 지반반력이 발생하는 바닥면의 단면 특성치로 표시된다. 즉,

$$q_h = \frac{R}{A^{b_q} - \frac{S_y^{b_q}}{b_q}} \quad (9c)$$

이는 다시 다음과 같이 평균 지반반력(R/A^{b_q})과 무차원 변수의 곱으로 표시할 수 있다.

$$q_h = \frac{R}{A^{b_q}} \frac{1}{1 - \frac{S_y^{b_q}}{A^{b_q} b_q}} \quad (9d)$$

그리고, 식(2)에 식(3a)와 식(3b)를 대입하고,

$$\int_0^{b_q} q_h \left(1 - \frac{x}{b_q}\right) \cdot w(x) \cdot x dx = R \cdot t_R \quad (10a)$$

정리하면, q_h 는 다음과 같이 구해지며,

$$q_h = \frac{R \cdot t_R}{\int_0^{b_q} \left(1 - \frac{x}{b_q}\right) \cdot w(x) \cdot x dx} \quad (10b)$$

위의 경우와 같이 분자에 대한 적분을 수행하여 다시 한번 정리하면 q_h 는 지반반력이 발생하는 바닥면의 단면 특성치로 정리된다. 즉,

$$q_h = \frac{R \cdot t_R}{S_y^{b_q} - \frac{I_y^{b_q}}{b_q}} \quad (10c)$$

앞에서와 같이 이는 다음과 같이 평균 지반반력(R/A^{b_q})과 무차원 변수의 곱으로 표시할 수 있다.

$$q_h = \frac{R}{A^{b_q}} \frac{\frac{t_R}{b_q}}{\frac{S_y^{b_q}}{A^{b_q} b_q} - \frac{I_y^{b_q}}{A^{b_q} b_q^2}} \quad (10d)$$

여기서, A^{b_q} , $S_y^{b_q}$, $I_y^{b_q}$ 는 각각 지반반력이 발생하는 바닥면의 면적, y 축에 대한 단면 1차모멘트, 단면 2차모멘트이다. 즉,

$$A^{b_q} = \int_0^{b_q} w(x) dx \quad (11)$$

$$S_y^{b_q} = \int_0^{b_q} w(x) \cdot x dx \quad (12)$$

$$I_y^{b_q} = \int_0^{b_q} w(x) \cdot x^2 dx \quad (13)$$

식(9d)와 식(10d)로 부터 반복계산을 통하면 q_h 와 b_q 를 결정할 수 있다.

2.2 지반반력이 사다리꼴 분포일 경우

지반반력이 사다리꼴 분포일 때($t_R \geq t'_R$), 식(4)를 식(1)과 식(2)에 대입시켜 정리하면, q_h 와 q_t 에 관한 2개의 식을 얻을 수 있다. 즉, 식(1)에 식(4)를 대입하고,

$$\int_0^B \left[q_h \left(1 - \frac{x}{B}\right) + q_t \frac{x}{B} \right] \cdot w(x) dx = R \quad (14a)$$

q_h 와 q_t 로 분리하여 정리하면,

$$q_h \int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) dx + q_t \int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) dx = R \quad (14b)$$

가 되며, 식(2)에 식(4)를 대입하고,

$$\int_0^B \left[q_h \left(1 - \frac{x}{B}\right) + q_t \frac{x}{B} \right] \cdot w(x) \cdot x dx = R \cdot t_R \quad (15a)$$

앞에서와 같이 q_h 와 q_t 로 분리하여 정리하면,

$$q_h \int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \cdot x \, dx + q_t \int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \cdot x \, dx = R \cdot t_R \quad (15b)$$

가 된다. 식(14b)와 식(15b), 두 식으로부터 q_h 와 q_t 를 구할 수 있다. 즉, 식(14b)를 q_t 에 대해 정리하고 이를 식(15b)에 대입한 후 q_h 에 대해서 정리하면 다음과 같이 된다.

$$q_h = \frac{R \left(\frac{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \cdot x \, dx}{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \, dx} - t_R \right)}{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \, dx \left[\frac{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \cdot x \, dx}{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \, dx} - \frac{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \cdot x \, dx}{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \, dx} \right]} \quad (16a)$$

적분을 수행하여 정리하면, q_h 는 지반반력이 발생하는 바닥면의 단면 특성치로 정리된다. 즉,

$$q_h = R \frac{\frac{I_y^B}{S_y^B} - t_R}{\left(A^B - \frac{S_y^B}{B}\right) \left(\frac{I_y^B}{S_y^B} - \frac{S_y^B - \frac{I_y^B}{B}}{A^B - \frac{S_y^B}{B}}\right)} \quad (16b)$$

이는 삼각형 분포의 경우와 같이, 평균 지반반력(R/A^B)과 무차원 변수의 곱으로 표시할 수 있다. 즉,

$$q_h = \frac{R}{A^B} \frac{\frac{I_y^B}{BS_y^B} - \frac{t_R}{B}}{\frac{I_y^B}{BS_y^B} - \frac{S_y^B}{BA^B}} \quad (16c)$$

또, 식(14b)를 q_h 에 대해 정리하고 이를 식(15b)에 대입한 후 q_t 에 대해서 정리하면 다음과 같이 된다.

$$q_t = \frac{R \left(t_R - \frac{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \cdot x \, dx}{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \, dx} \right)}{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \, dx \left[\frac{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \cdot x \, dx}{\int_0^B \frac{x}{B} \cdot w(x) \, dx} - \frac{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \cdot x \, dx}{\int_0^B \left(1 - \frac{x}{B}\right) \cdot w(x) \, dx} \right]} \quad (17a)$$

적분을 수행하여 정리하면, q_t 는 지반반력이 발생하는 바닥면의 단면 특성치로 정리된다. 즉,

$$q_t = R \frac{t_R - \frac{S_y^B - \frac{I_y^B}{B}}{A^B - \frac{S_y^B}{B}}}{\frac{S_y^B}{B} \left(\frac{I_y^B}{S_y^B} - \frac{S_y^B - \frac{I_y^B}{B}}{A^B - \frac{S_y^B}{B}}\right)} \quad (17b)$$

이를 평균 지반반력(R/A^B)과 무차원 변수의 곱으로 표시하면 다음과 같이 정리된다.

$$q_t = \frac{R}{A^B} \frac{\frac{BA^B}{S_y^B} \frac{\frac{t_R}{B} - \frac{\frac{S_y^B}{BA^B} - \frac{I_y^B}{B^2 A^B}}{1 - \frac{S_y^B}{BA^B}}}{\frac{I_y^B}{BS_y^B} - \frac{\frac{S_y^B}{BA^B} - \frac{I_y^B}{B^2 A^B}}{1 - \frac{S_y^B}{BA^B}}}}{\frac{I_y^B}{BS_y^B} - \frac{\frac{S_y^B}{BA^B} - \frac{I_y^B}{B^2 A^B}}{1 - \frac{S_y^B}{BA^B}}} \quad (17c)$$

2.3 유도 과정의 타당성 검토

유도된 지반반력 산정식(식(9d), (10d), 식(16c), 식(17c))이 오류없이 잘 유도된 것인지를 확인하기 위하여 해석해가 있는 사각형 바닥인 경우에 적용하였다.

바닥이 사각형일 경우,

$$A^B = BW \quad (18)$$

$$S_y^B = \frac{B^2 W}{2} \quad (19)$$

$$I_y^B = \frac{B^3 W}{3} \quad (20)$$

가 되고, 이를 식(5b)에 대입하여 t'_R 을 결정하면,

$$t'_B = \frac{\frac{B^2 W}{2} - \frac{B^3 W}{3}}{\frac{B^2 W}{2} - \frac{2}{B} BW} \quad (21a)$$

가 되고, 정리하면,

$$t'_R = \frac{B}{3} \quad (21b)$$

가 된다.

바닥면 지반반력 분포가 삼각형일 경우($t_R \leq t'_R$),

$$b_q = 3t_R \quad (22)$$

가 되며,

$$A^{b_q} = \int_0^{b_q} w(x) \, dx = W \int_0^{b_q} dx = Wb_q = 3Wt_R \quad (23)$$

$$S_y^{b_q} = \int_0^{b_q} w(x) \cdot x \, dx = W \int_0^{b_q} x \, dx = W \frac{b_q^2}{2} = \frac{9}{2} Wt_R^2 \quad (24)$$

$$I_y^{b_q} = \int_0^{b_q} w(x) \cdot x^2 \, dx = W \int_0^{b_q} x^2 \, dx = W \frac{b_q^3}{3} = 9Wt_R^3 \quad (25)$$

가 된다. 이를 식(9d)와 식(10d)에 대입하여 정리하면,

$$q_h = \frac{R}{A^{b_q}} \frac{1}{1 - \frac{S_y^{b_q}}{A^{b_q} b_q}} = \frac{R}{3Wt_R} \frac{1}{1 - \frac{9Wt_R^2}{9Wt_R^2}} = \frac{2R}{3Wt_R} \quad (26a)$$

$$q_h = \frac{R}{A^{b_q}} \frac{\frac{t_R}{b_q}}{\frac{S_y^{b_q}}{A^{b_q} b_q} - \frac{I_y^{b_q}}{A^{b_q} b_q^2}} = \frac{R}{3Wt_R} \frac{\frac{t_R}{3t_R}}{\frac{2}{9Wt_R^2} - \frac{9Wt_R^3}{27Wt_R^3}} = \frac{2R}{3Wt_R} \quad (26b)$$

가 된다. 두 식에 의한 q_h 가 같고, 변환된 q_h 계산식이 실제 설계에서 사용되고 있는 q_h 와 같다(MOF, 2023; Goda, 2010).

바닥면 지반반력 분포가 사다리꼴일 경우($t_R \geq t'_R$), 식(18)~(20)을 식(16c)와 식(17c)에 대입하여 정리하면,

$$q_h = \frac{R}{A^B} \frac{\frac{I_y^B}{BS_y^B} - \frac{t_R}{B}}{\frac{BS_y^B}{A^B B} - \frac{I_y^B}{A^B B^2}} = \frac{R}{BW} \frac{\frac{B^3 W}{3} - \frac{t_R}{B}}{\frac{B^3 W}{2} - \frac{B^2 W}{2}} = \frac{2R}{BW} \left(2 - 3\frac{t_R}{B}\right) \quad (27)$$

$$q_t = \frac{R}{A^B} \frac{\frac{t_R}{B} \cdot \frac{A^B B}{S_y^B}}{\frac{I_y^B}{BS_y^B} - \frac{I_y^B}{A^B B^2}} = \frac{R}{BW} \frac{\frac{t_R}{B} \cdot \frac{B^2 W}{2} - \frac{B^3 W}{3}}{\frac{B^2 W}{2} - \frac{B^3 W}{3}} = \frac{2R}{BW} \left(\frac{3t_R}{B} - 1\right) \quad (28)$$

로 정리된다. 이 식(27)과 (28)의 q_h 와 q_t 계산식은 실제 설계에서 사용되고 있는 q_h 와 q_t 계산식과 같다(MOF, 2023; Goda, 2010).

3. 일반화된 지반반력 산정식의 적용

유도된 산정식이 사각형인 경우 설계기준 등에서 제시된 식

으로 변환이 되는 것을 보인 것만으로 비정형 바닥면의 경우에 합리적인 값을 준다는 것으로 확정적으로 이야기할 수는 없다. 따라서, 이를 확인하기 위하여 Fig. 5와 같은 사각형 바닥면 양단에 돌출부가 부가된 비정형 바닥면을 해석으로 상정하고 돌출부의 두께, t 를 0~ $B/2$ 까지 변화시키며 해석을 실시하였다. t 가 0 또는 $B/2$ 가 되면 사각형 바닥이 되므로, 유도된 식이 맞는 결과를 준다면 t 가 0으로 가까워질수록 $B \times W (= 30 \text{ m} \times 15.4 \text{ m})$ 사각형 바닥면에 대한 결과로 접근하게 될 것이고, $B/2 (= 15 \text{ m})$ 로 근접하면 $B \times W (= 30 \text{ m} \times 25.4 \text{ m})$ 사각형 바닥면에 대한 결과로 수렴하게 된다. 하중케이스는 편심이 큰 $R = 156,325 \text{ kN}$, $t_R = 9.8 \text{ m}$ 인 경우와 편심이 작은 $R = 152,140 \text{ kN}$, $t_R = 13.48 \text{ m}$ 인 두 케이스를 선정하였다. 해석 예의 바닥면 최대 폭과 너비 그리고 하중케이스는 현실성을 유지하기 위하여 실제 설계에서의 값을 참조하여 결정하였다.

유도된 식에 의해 계산된 최대 단부 지반반력을 Fig. 6에 돌출부 두께 t 의 변화에 따라 도시하였다. 결과를 보면 두 하중 케이스 모두 완만히 변화하고 있고, t 가 0 그리고 $B/2 (= 15 \text{ m})$ 로 접근하면서 특정값으로 수렴함을 알 수 있다. 즉, $t_R = 9.8 \text{ m}$ 인 하중케이스는 690.54 kN/m^2 과 418.67 kN/m^2 , 그리고 $t_R = 13.48 \text{ m}$ 인 하중케이스는 429.42 kN/m^2 과 260.36 kN/m^2 으로 수렴했는데, 이 값들은 각각 $B \times W (= 30 \text{ m} \times 15.4 \text{ m})$ 사각형 바닥면 및 $B \times W (= 30 \text{ m} \times 25.4 \text{ m})$ 사각형 바닥면에 대한 단부 지반반력에 해당한다. t 의 변화에 따라 점프하거나 단절되는 특이점 없이 연속적으로 변화하고, 비정형 형상이 사각형으로 변화할 때 사각형에 대한 값으로 수렴되는 것으로 볼 때 유도된 식은 타당한 결과를 주고 있다고 할 수 있다.

앞에서 유도된 산정식을 실 설계에 채택되었던 케이스에 적용하여(Fig. 7 참조), 설계현장에서 사용하고 있는 방법의 타당성에 대해서 살펴보았다. 설계서에 제시된 하중조건과 단

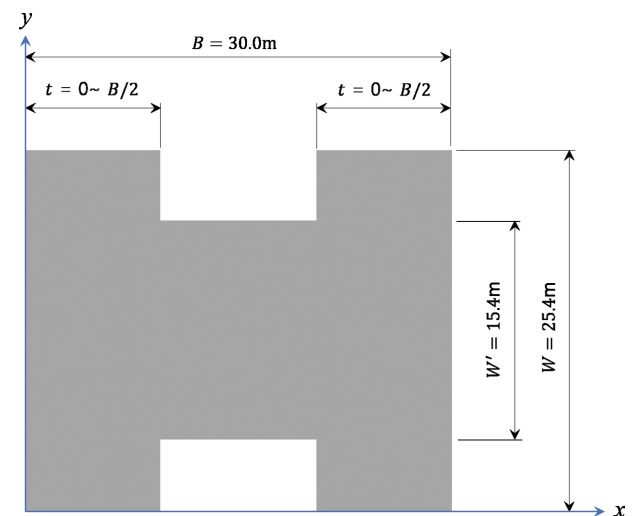
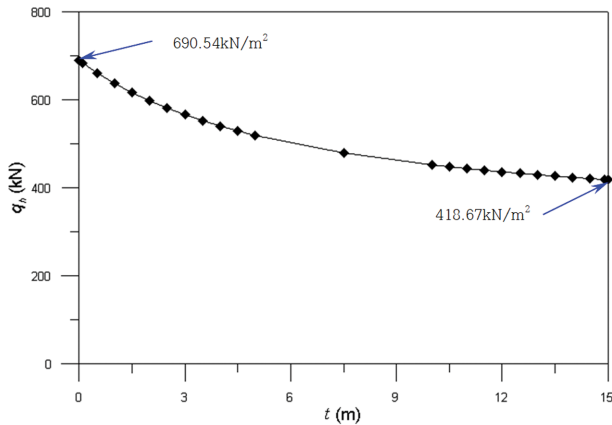
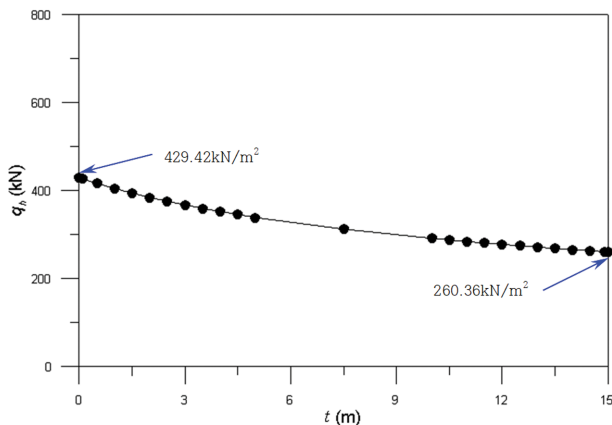


Fig. 5. The bottom shape of the structure selected to demonstrate the feasibility of the proposed formula.



(a) Load case of $R = 156,325 \text{ kN}$, $t_R = 9.8\text{m}$



(b) Load case of $R = 152,140 \text{ kN}$, $t_R = 13.48\text{m}$

Fig. 6. Behaviors of an end bearing pressure, q_h according to t change.

부 지지력을 발휘하여 요약하면 Table 1과 같다. 설계에서 사용한 지지력 산정 방법은 정확히 알 수는 없었으나 제시된 식으로 볼 때, 등가의 사각형 바닥면을 정하고 설계기준에 제시된 식을 이용하여 근사적으로 계산한 것으로 판단된다.

Table 2에 본 연구에서 제안한 지반반력 산정식에 의해 계

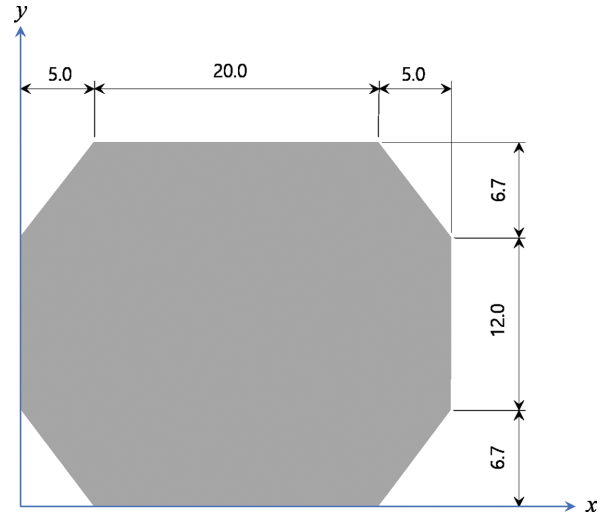


Fig. 7. The bottom shape of the designed caisson in the basic design document.

산 결과와 설계서의 값을 비교 제시하였다. 설계서에 제시된 값이 모든 하중 케이스에서 작고, 작용하중의 편심이 클수록 그 차이가 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, 하중케이스 4인 경우는 설계시 계산값이 20% 가까이 작았다. 안전측의 값을 주지 못했다는 것은 이 설계에 적용한 방법이 적정하지 못하다는 것을 의미하는 것이다. 다행스러운 것은 정확한 단부 지반반력이 한계지지력(600 kN/m²) 내에 있어 설계한 구조물의 사석마운드가 안정하다고 판정한 것은 유효하다는 것이다. 아무튼 간에 이상의 결과로 볼 때 현 설계에서 채택하고 있는 방법은 비안전측의 결과를 줄수 있으므로 사용해서는 안 되는 방법이다.

유도된 산정식을 최근 관심을 받고 있는 오픈 셀 케이슨에 적용해 보았다. 해석에 사용된 오픈 셀 케이슨의 바닥면 제원은 Fig. 8과 같다. 최대 폭 30 m, 최대 너비 25.4 m로 앞의 실제 설계된 방파제 바닥면과 동일하게 유지하였으며, 바닥면의 순수 면적은 562 m²로 설계 케이슨 바닥면적 695 m²보다 19.1%

Table 1. Bearing pressures underneath the heel and toe for 16 load cases presented in the basic design document

Load Case	R (kN)	t_R (m)	q_h (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	Remarks
1	149,179	13.48	278.39	150.82	
2	152,140	13.48	283.98	153.86	
3	115,191	7.51	408.42	0.0	
4	118,143	7.63	414.89	0.0	
5	134,489	9.00	420.48	0.0	
6	137,441	9.07	427.05	0.0	
7	153,366	9.75	447.15	0.0	
8	156,325	9.80	453.63	0.0	
9	169,301	17.53	123.07	364.10	
10	172,262	17.53	125.22	370.47	
11	174,439	17.57	124.83	377.14	
12	177,391	17.57	126.99	383.51	
13	144,580	16.42	150.33	265.74	
14	147,541	16.44	152.48	272.02	
15	149,179	10.73	393.81	35.50	
16	150,659	10.65	401.16	32.46	

Table 2. Comparison of bearing pressures given by the basic design document and proposed formula

Load Case	by basic design document		by proposed formula		Remarks
	q_h (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_h (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	
1	278.39	150.82	289.99	139.31	
2	283.98	153.86	295.74	142.07	
3	408.42	0.0	503.85	0.0	
4	414.89	0.0	506.98	0.0	
5	420.48	0.0	474.05	0.0	
6	427.05	0.0	480.05	0.0	
7	447.15	0.0	491.93	0.0	
8	453.63	0.0	498.39	0.0	
9	123.07	364.10	101.28	385.92	
10	125.22	370.47	103.05	392.66	
11	124.83	377.14	102.04	399.95	
12	126.99	383.51	103.77	406.71	
13	150.33	265.74	139.82	276.24	
14	152.48	272.02	141.70	282.88	
15	393.81	35.50	426.29	3.00	
16	401.16	32.46	434.53	0.00	

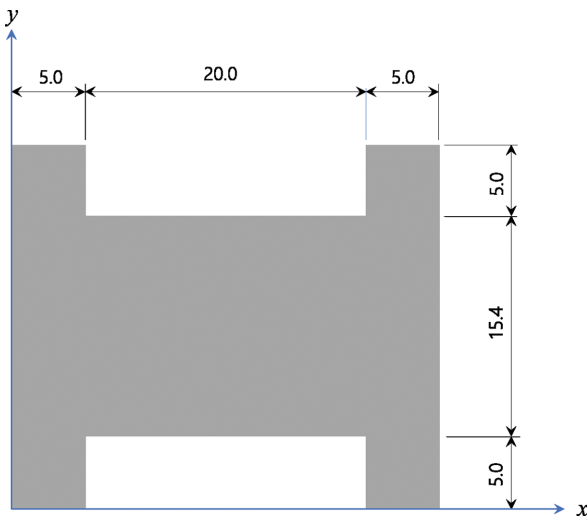


Fig. 8. The bottom shape of the open cell caisson.

작게 설정하였다. 동일한 하중케이스에 대하여 지반반력을 계산하고, Table 3에 함께 제시하였다. 결과를 비교해 보면, 케이슨 바닥면적이 작아졌음에도 불구하고 최대 단부 지반반력이 크게 증가하지 않고, 편심이 심한 하중케이스 3과 4에서는 오픈 셀 케이슨의 경우가 오히려 작은 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 지반반력이 큰 단부 쪽의 바닥면적이 오픈 셀 케이슨의 경우가 더 큰 것에 기인한 것이다. 일부 설계자들이 우려했던 바닥면적 감소로 인한 단부 지반반력이 크게 발현되는 현상은 찾아 볼 수 없다. 면적이 줄고, 큰 지반반력을 담당하는 부분의 부재가 얇아지면 단부 지반반력이 급격히 증가한다는 우려는 지반반력에 대한 이해부족과 그동안 사용해 왔던 방법이 잘못된 결과를 주어서 발생한 것으로 생각된다.

오픈 셀 케이슨 공법을 적용하는 경우, 케이슨 사이에 채워지는 쇄석의 수평력에 의한 전도모멘트 분담으로 최대 지반반력이 감소되므로(Park et al., 2022, 2023), 지반반력 산

Table 3. Comparison of bearing pressures between designed and open cell caissons

Load Case	Designed caisson		Open cell caisson		Remarks
	q_h (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_h (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	
1	289.99	139.31	332.76	198.04	
2	295.74	142.07	339.36	201.97	
3	503.85	0.0	469.84	0.00	
4	506.98	0.0	476.11	0.00	
5	474.05	0.0	478.98	0.00	
6	480.05	0.0	486.63	2.40	
7	491.93	0.0	512.04	33.65	
8	498.39	0.0	519.59	36.62	
9	101.28	385.92	173.95	428.44	
10	103.05	392.66	176.99	435.93	
11	102.04	399.95	177.16	443.51	
12	103.77	406.71	180.15	451.02	
13	139.82	276.24	196.23	318.20	
14	141.70	282.88	199.37	325.60	
15	426.29	3.00	454.63	76.17	
16	434.53	0.00	462.72	73.34	

정시 이의 영향을 적절히 고려하여야 합리적인 값을 산정할 수 있다. 설계기준에서 속채움도압을 정지도압으로 계산하도록 제시하고 있으므로 이에 의한 마찰저항력을 고려하면 어느 정도 합리적인 값을 추정할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 중력식 항만구조물의 지반반력에 대해서 살펴보았다. 비정형 바닥인 경우의 지반반력을 산정할 수 있는 식을 유도하여 제시하였으며, 유도된 식을 이용하여 실제 설계된 항만구조물에 적용하여 설계시 사용한 방법의 타당성을 검토하였다. 또한, 최근 관심을 받고 있는 오픈 셀 케이슨에 적용하여 그 지반반력의 특성을 살펴보았다. 연구를 통하여 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 임의형상의 바닥에 대한 단부 지반반력을 산정할 수 있는 식을 유도하여 제시하였다. 제안된 식의 단부 지반반력은 지반반력이 발생하는 바닥면의 면적, 단면1차모멘트, 단면2차모멘트로 표현되며, 지반반력이 삼각형 분포일 경우는 반복 계산이 필요하다.

2. 유도된 산정식이 기존 사각형 바닥에 대한 식으로 변환됨을 보임으로써 유도과정에 오류가 없음을 증명하였으며, 비정형 바닥면이 사각형 바닥면으로 접근하는 경우에 대한 계산을 통하여 지반반력 변화가 특이점 없이 연속적으로 변화하고, 사각형 바닥면으로 접근할 때 지반반력이 사각형 바닥에 대한 지반반력으로 수렴하는 것을 보임으로써 유도된 산정식의 타당성을 입증하였다.

3. 실제 설계된 비정형 바닥면을 갖는 구조물에 적용하여 설계값과 비교한 결과, 비교한 모든 하중케이스에서 실제 설계에 사용한 방법이 비안전측의 결과를 줌을 확인하였다. 특히, 편심이 클 수록 차이가 증가하는 경향을 보였다.

4. 유도된 산정식을 인터로킹 케이슨으로 관심을 받고 있는 오픈 셀 케이슨에 적용하여 지반반력의 특성을 살펴본 결과, 일부 설계자의 우려와는 달리 바닥 면적이 감소하고 오픈 셀을 구성하는 단부 쪽이 얇아도 지반반력이 급격히 증가하는 현상은 발생하지 않았다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 적립금사업 “쇄석기동 체결형 콘크리트 블록 공법 성능평가(PKA0045)”와 주요사업 “해양에너지 및 항만-해양구조물 고도화 기술개발(PEA0131)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Czerniak, E. (1964). How to calculate footing soil bearing by computer. *Hydrocarbon Processing*, 43.

Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*, 3rd ed., *Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 33*, World Scientific.

GS Construction Co. Consortium, (2022). *Basic design report for constructing berthing facilities of the Saemangeum new port*. GS Construction Co. Consortium (in Korean).

Huang, H.W., Zhou, T., Mehta, N., Sawab, J. and Mo, Y.L. (2019). An analytical and design solution for arbitrary shape rigid spread footings subjected to biaxial loading. *Procds. of the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Taipei, Taiwan.

MOF (2023). *KC CODE KDS 64 14 20 : 2023*. <https://kpcs.portcals.go.kr/kc/selectKcDtlVw.do>.

Park, W.-S. and Lee, B.W. (2020). Consideration on ways to reduce a edge pressure at bottom plate of caisson breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(5), 331-339 (in Korean).

Park, W.-S., Seo, J. and Lee, B.W. (2022). A way to evaluate maximum edge bearing pressures of open cell caissons. *Proceeding of Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Jeju ICC*, 104 (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*, 85(sp1), 1236-1240.

Park, W.-S., Won, D., Seo, J. and Lee, B.W. (2020). Proposal of rotating stability assessment formula for an interlocking caisson breakwater subjected to wave forces. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(1), 11-16 (in Korean).

Park, W.-S., Jang, S.-C. and Gwon, C.-H. (2023). Evaluation of end bearing capacity of a block-typed structure with crushed stone columns by model experiments. *Proceeding of Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Busan BEXCO*, 75 (in Korean).

Rodriguez-Gutierrez, J.A. and Aristizabal-Ochoa, J.D. (2013a). Rigid spread footings resting on soil subjected to axial load and biaxial bending, I: Simplified analytical method. *Int. Journal of Geomechanics*, 10.1061/(ASCE) GM. 1943-5622.0000218, 13, 109-119.

Rodriguez-Gutierrez, J.A. and Aristizabal-Ochoa, J.D. (2013b). Rigid spread footings resting on soil subjected to axial load and biaxial bending, II: Design aids. *Int. Journal of Geomechanics*, 10.1061/(ASCE) GM. 1943-5622.0000210, 13, 120-131.

Wilson, K.E. (1997). Bearing pressures for rectangular footings with biaxial uplift. *Journal of Bridge Engineering*, 2(1), 27-33.

Received 7 December, 2023

Revised 20 December, 2023

Accepted 20 December, 2023