

규칙과 작용시 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력: 여유고와 피복재 높이가 동일한 조건 Uplift Pressures Acting on the Crown Wall of Rubble Mound Structure under Monochromatic Wave Conditions: Case for the Same Level as the Freeboard and Armour Height

이종인*
Jong-In Lee*

요 지 : 국내에서는 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 산정하는 지침이 부재함에 따라 Goda의 양압력 산정법을 변형하여 사용하고 있다. 이러한 양압력 산정법은 명확하게 정립된 것이 아니며, 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 직접 산정할 수 있는 방안의 도출이 필요한 실정이다. 그러나 양압력의 크기 및 분포에 대한 검토는 제체사석의 투수성 및 균질성 등에 영향을 받기 때문에 상당히 어려운 실정이다. 본 연구에서는 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 검토하기 위해 규칙과를 적용한 2차원 수리모형실험을 수행한 후, 양압력에 영향을 미치는 주요 변수를 검토하였다. 그리고 실험결과를 이용하여 규칙과 조건에서 양압력을 산정할 수 있는 경험식을 도출하였다.

핵심용어 : 경사식구조물, 상치콘크리트, 양압력, 수리모형실험, 경험식

Abstract : In Korea, since there is no guidelines for calculating the uplift pressure acting on the concrete of rubble mound structure, a modified form of Goda's formula is used. The current design method by Goda's formula has not been clearly established. Therefore, it is necessary to develop a design guidelines to directly estimating the uplift pressure acting on the crown wall. The magnitude and distribution of the uplift pressure are quite difficult because they are affected by the permeability and homogeneity of the core stones. In this study, a two-dimensional hydraulic model experiment using regular waves was performed to examine the uplift pressure acting on the crown wall, and then the main variables affecting the uplift pressure were examined. Using the experimental results, an empirical formula was derived to calculate the uplift pressure under regular wave conditions.

Keywords : rubble mound structure, crown wall, uplift wave pressure, hydraulic model experiment, empirical formula

1. 서 론

수심이 상대적으로 낮은 조건의 경우에는 경계성 등의 이유로 인해 경사식구조물의 설계 및 건설이 선호되고 있으며, 제체 안정 확보에 필요한 다양한 설계기법들이 정립되어 있다. 국내 경사식구조물의 대부분에는 상치콘크리트가 설치되며, 상치콘크리트는 경계성 및 유지관리 측면에서 유리한 측면이 있다. 그러나 국내 항만 및 어항 설계기준·해설(MOF, 2020)에는 상치콘크리트의 안정성을 검토할 수 있는 지침이 부재한 실정이며, 전면 파압 및 양압력은 직립벽을 대상으로 한 Goda(1974, 2010)와 Takahashi et al.(1990)의 제안식을 사용하고 있는 실정이다. 특히, 양압력의 경우에 Goda의 산정식은 직립벽 저면이 정수면 아래에 위치할 때의 조건으로

서 상치콘크리트 하단이 대부분 정수면 상부에 위치하는 경우에도 적용이 가능한가에 대해서는 검증이 요구된다.

직각 입사조건에서 Goda(1974, 2010)가 제안한 직립벽에 작용하는 양압력(p_u) 산정식은 식(1)~식(3)이며, 식(1)에서 λ_3 는 양압력 보정계수로서 일반적으로 1.0이다. 상치콘크리트 외 해측 선단의 양압력은 식(1)로 산정하고, 내해측 끝부분에서는 양압력이 0인 삼각형 분포로 사용하고 있다.

$$p_u = \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho g H_D \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (2)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \text{ for } h' > 0 \quad (3)$$

*전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University, 77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea, Tel: +82-62-530-5431, jilee@jnu.ac.kr)

식(1)~식(3)에서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, H_D 는 설계계산에 사용되는 파고, L 은 파장이며, h 와 h' 은 각각 직립벽 전면의 수심과 직립벽 저면의 수심이다. 여기서, h' 은 직립벽의 저면이 정수면 아래에 위치하는 경우이다. 국내에서 경사식구조물의 상치콘크리트가 정수면 이상에 위치하는 경우의 양압력(p_u)은 식(1)에서 α_3 를 식(4)로 대체하여 산정하고 있다. 식(4)에서 η^* 는 정수면에서 파압이 0이 되는 지점까지의 높이이다.

$$\alpha_3 = 1 + \frac{h'}{\eta^*} \text{ for } h' \leq 0 \quad (4)$$

경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 파압에 대한 대표적인 연구로는 Pedersen(1996)의 연구를 들 수 있으며, 여러 후속 연구는 Pedersen의 연구성과를 기반으로 하고 있다. Pedersen의 연구는 상치콘크리트에 작용하는 수평파압을 위주로 검토하였고, 양압력에 대해서는 수평파압의 비로 간략하게 검토하였다. CEM(USACE, 2006)에서는 상치콘크리트 외해측 선단에 작용하는 양압력은 상치콘크리트 전면부의 최하단에 작용하는 수평파압을 적용하고, 상치콘크리트 내해측 양압력은 정수압을 적용하는 지수형 분포로 제시하고 있다. Nørgaard et al.(2013)은 Pedersen의 파압 제안식이 천해조건과 노출부 구간의 파압을 과대평가함을 지적하고, Pedersen이 제안한 식을 수정하였으며, 양압력은 Pedersen의 연구와 유사하게 분석하였다. Molines et al.(2018)은 평균월파랑에 기반한 상치콘크리트에 작용하는 파압 산정식을 제안하였으며, 양압력은 Pedersen의 연구를 기반으로 확장하여 제시하였으며, 선형분포를 기반으로 하였다. Han et al.(2022)은 너울(swell) 조건의 파랑을 대상으로 전면파압 및 양압력 계측을 위한 실험을 수행하였고, 양압력은 전면파압에 저감계수를 도입한 선형분포를 제안하였으며, 이는 Pedersen(1996)의

분석방법과 유사하다. Han et al.이 추천한 저감계수는 0.7이다.

국내 연구로서 Lee et al.(2022) 및 Lee(2024)에서도 상치콘크리트에 작용하는 수평파압을 위주로 실험적인 검토하였고, 양압력에 대해서는 수행하지 않았다.

본 연구에서는 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력의 크기 및 분포를 검토하기 위해 규칙파를 적용한 2차원 수리실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 비쇄파조건에서 규칙파의 파고와 주기를 변경시키며 실험을 수행하였으며, 계측은 파압계를 이용하였다. 실험은 1:1.5 경사로 테트라포드가 2층 피복된 조건의 단면을 대상으로 하였다. 본 실험결과(exp.)는 현행 설계법(Goda)의 결과와 비교하였으며, 규칙파 조건에서 상치콘크리트에 작용하는 양압력 산정식을 제안하였다. 또한 양압력의 크기는 모형상 사용된 체제사석의 규격에 따라 달라질 수 있지만, 양압력의 분포형상과 양압력의 크기에 영향을 미치는 주요 변수는 무엇인가에 대한 검토도 본 실험의 목적 중의 하나이다.

2. 실험시설 및 실험조건

본 실험은 전남대학교 해안항만실험센터의 2차원 수로에서 수행되었으며, 사용된 실험시설 및 실험과 제원 등은 Lee(2024)에서 제시한 내용과 동일하다.

경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력 계측 실험에 적용된 단면은 Fig. 1과 같으며, 주 피복재로 테트라포드가 2층 피복되고, 중간피복층으로는 트라이포드가 1층 피복된 단면으로서 사면경사는 1:1.5이다. Fig. 1에서 G_W 는 피복재 상단 어깨폭으로서 $G_W/D_n = 2.37$ 이며, R_C 는 여유고, A_C 는 정수면으로부터의 피복재 상단고, S_W 는 상치콘크리트 폭이다. 여기서, D_n 은 피복재의 공칭길이($= V^{1/3}$)이며, V 는 피복

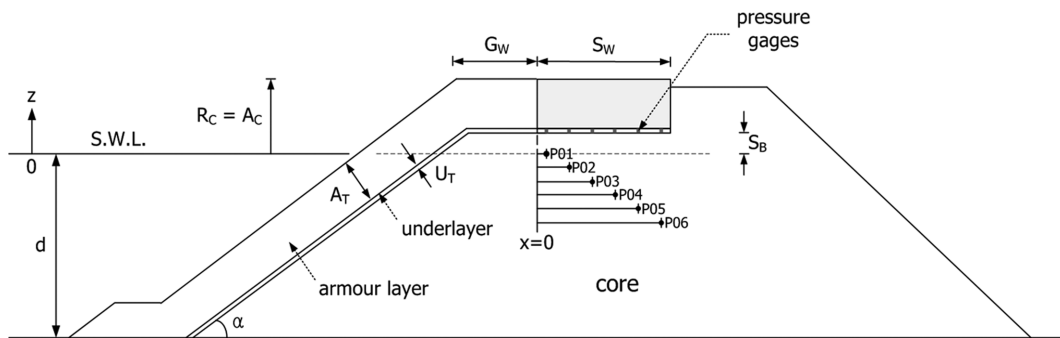


Fig. 1. Cross-section of model structure.

Table 1. Geometric parameters of model structure

R_C, A_C (cm)	G_W (cm)	S_B (cm)	S_W (cm)	A_T (cm)	U_T (cm)	Armour	Underlayer	Slope
21.7~34.0	22.0	0.0~12.3	165	19.2	2.5	Tetrapod 2 layers (1,840 g/ea)	Tripod 1 layer (136 g/ea)	1:1.5

재의 체적이다. 본 실험에 적용된 모형단면의 기하학적 재원을 정리한 것이 Table 1이다. 목표 파랑제원이 아닌 설정된(분석에 사용되는) 실험파의 파랑제원을 적용할 경우, $R_c/H = 0.36 \sim 1.15$, $S_B/H = 0.0 \sim 0.42$ 에 해당된다. 그리고 본 실험에서 상치콘크리트의 폭을 넓게 설정한 것은 양압력의 공간적인 분포를 파악하기 위한 것으로서 Goda의 양압력 분포인 선형분포의 적정성을 검토하기 위함이다.

Fig. 1에서 양압력 계측을 위해 설치된 6개의 파압계는 계

측용량이 0.5 kg/cm^2 으로서 상치콘크리트 바닥에 파압계의 두께에 해당하는 정도의 홈을 내어 매입하였으며, 파압계 검출부와 상치콘크리트 바닥이 거의 동일한 높이가 되도록 하였다. 그리고 파압계가 설치된 홈 외부에 직경이 매우 가는 그물망을 설치하여 제체사석과 파압계가 접촉되지 않도록 하였다. 파압계 설치위치는 상치콘크리트 항외측 선단($x = 0$)으로부터 $x = 5 \text{ cm}$ (P01), $x = 25 \text{ cm}$ (P02), $x = 45 \text{ cm}$ (P03), $x = 65 \text{ cm}$ (P04), $x = 85 \text{ cm}$ (P05), $x = 105 \text{ cm}$ (P06)이다.

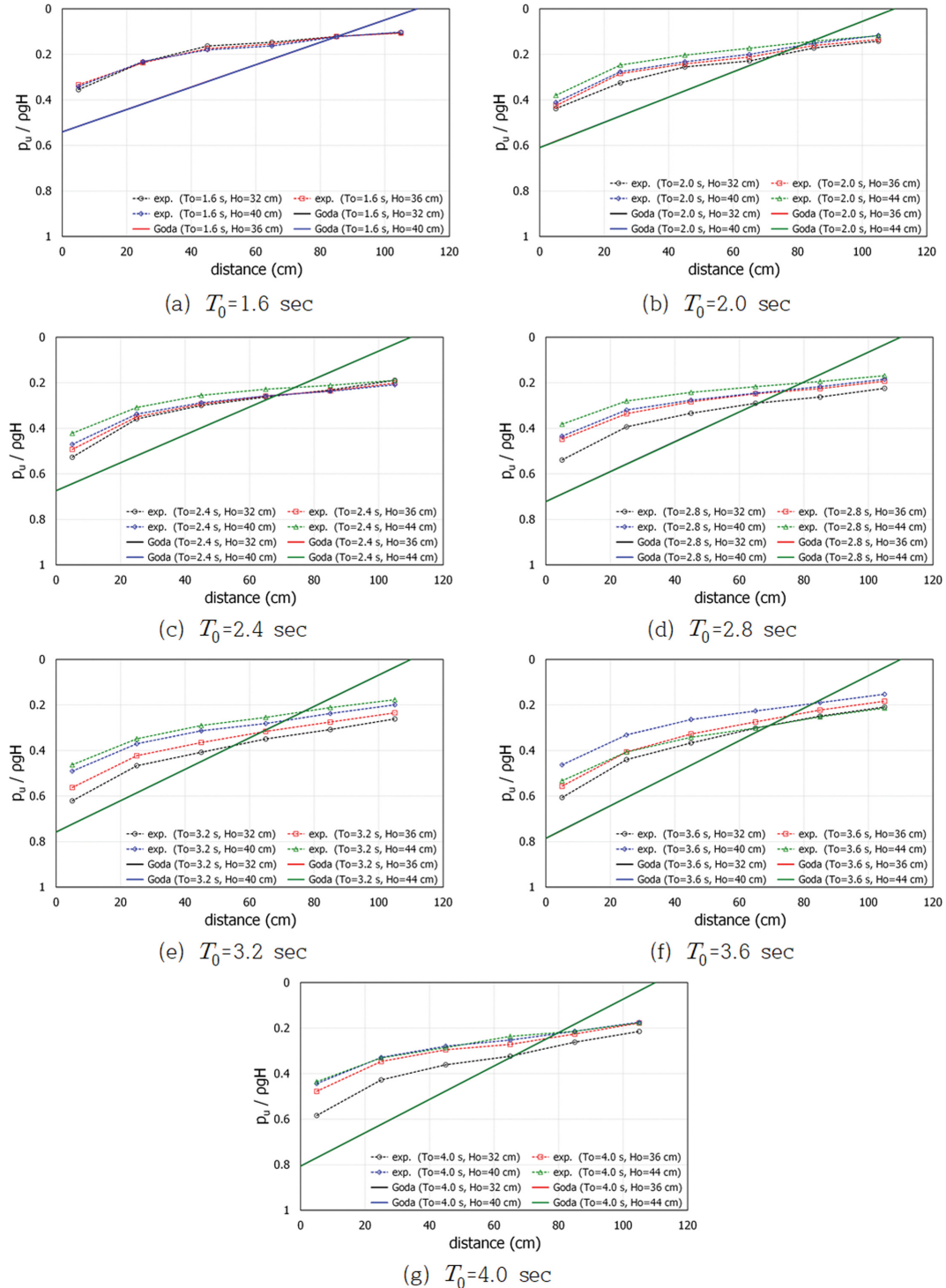


Fig. 2. Comparison of measured data and Goda's results for $S_B = 0.0 \text{ cm}$.

양압력 계측시 적용된 독취율(sampling rate)은 500 Hz이며, 계측된 원시자료(raw data)는 밴드패스 필터(bandpass filter)를 적용하여 노이즈 성분 등을 제거한 후 분석하였다.

3. 계측자료 분석

본 실험에서는 실험과 설정시와 동일한 시간대에 진행하는 5개의 파랑으로부터 양압력(p_u)을 계측한 후, 이를 평균하여

분석하였다. 분석된 양압력은 무차원 양압력($= p_u / \rho g H$)으로 환산하였으며, 여기서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도이고 H 는 설정된 실험파의 파고이다. 분석된 결과를 도식할 때, 종축은 무차원 양압력, 횡축은 무차원 거리(x/L_0)로 나타내었으며, 본 실험결과(exp.)와 현행 설계법(Goda)의 결과를 비교 도식하였다. 여기서, L_0 는 심해파장이다.

Figs. 2~4는 수행된 실험조건 중 일부를 도식한 것으로서 피복재 상단 어깨폭(G_W)이 $G_W = 22.0$ cm($G_W/D_n = 2.37$)인

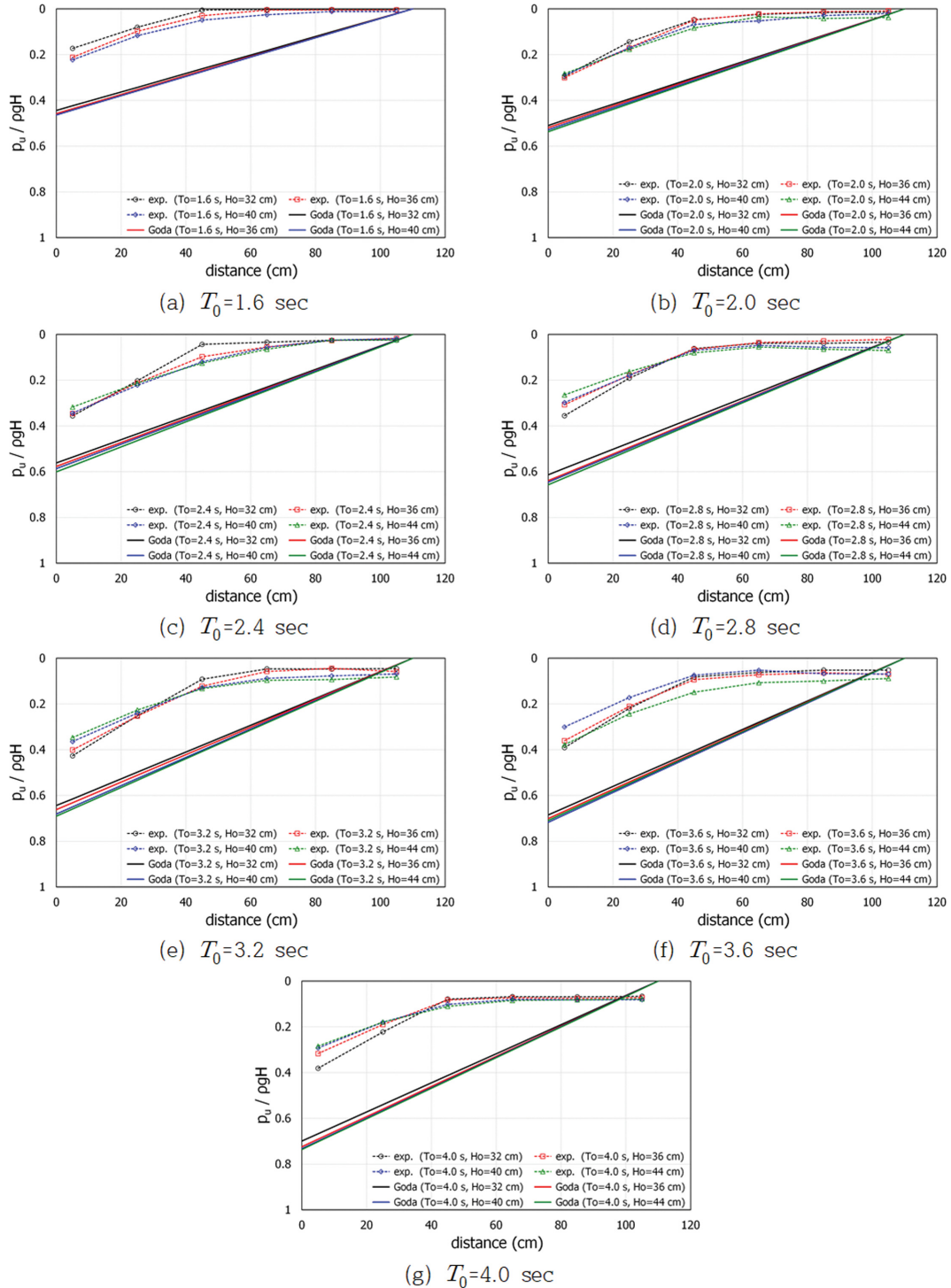


Fig. 3. Comparison of measured data and Goda's results for $S_B = 6.3$ cm.

조건에서 상치콘크리트 하단고(S_B)에 따른 주기별 양압력에 대한 실험결과를 현행 설계법(Goda)의 결과를 비교한 것이다. Fig. 2는 $S_B = 0.0$ cm(SB000), Fig. 3은 $S_B = 6.3$ cm(SB063), Fig. 4는 $S_B = 12.3$ cm(SB123) 조건의 결과이다. $S_B = 0.0$ cm는 상치콘크리트 하단고가 정수면과 동일하다는 것을 의미한다.

Fig. 2는 $S_B = 0.0$ cm(SB000)인 실험결과(exp.)와 현행 설계법(Goda)에 의한 결과를 비교한 것으로서 전체적으로 상치

콘크리트 전면에서는 현행 설계법에 의한 무차원 양압력보다 작게 예측되었고, 후면에서는 크게 예측되었다. 현행 설계법에서는 상치콘크리트 전면에서의 양압력만 산정하고, 후면은 상치콘크리트 폭과는 관계 없이 양압력을 0으로 설정하기 때문이며, 본 실험결과로부터 상치콘크리트 후면에서 일정 수준의 양압력이 분포함을 알 수 있다. 그리고 입사파의 주기가 증가할수록 상치콘크리트 전면의 양압력이 증가하여 현행 설계법에 의한 결과에 보다 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

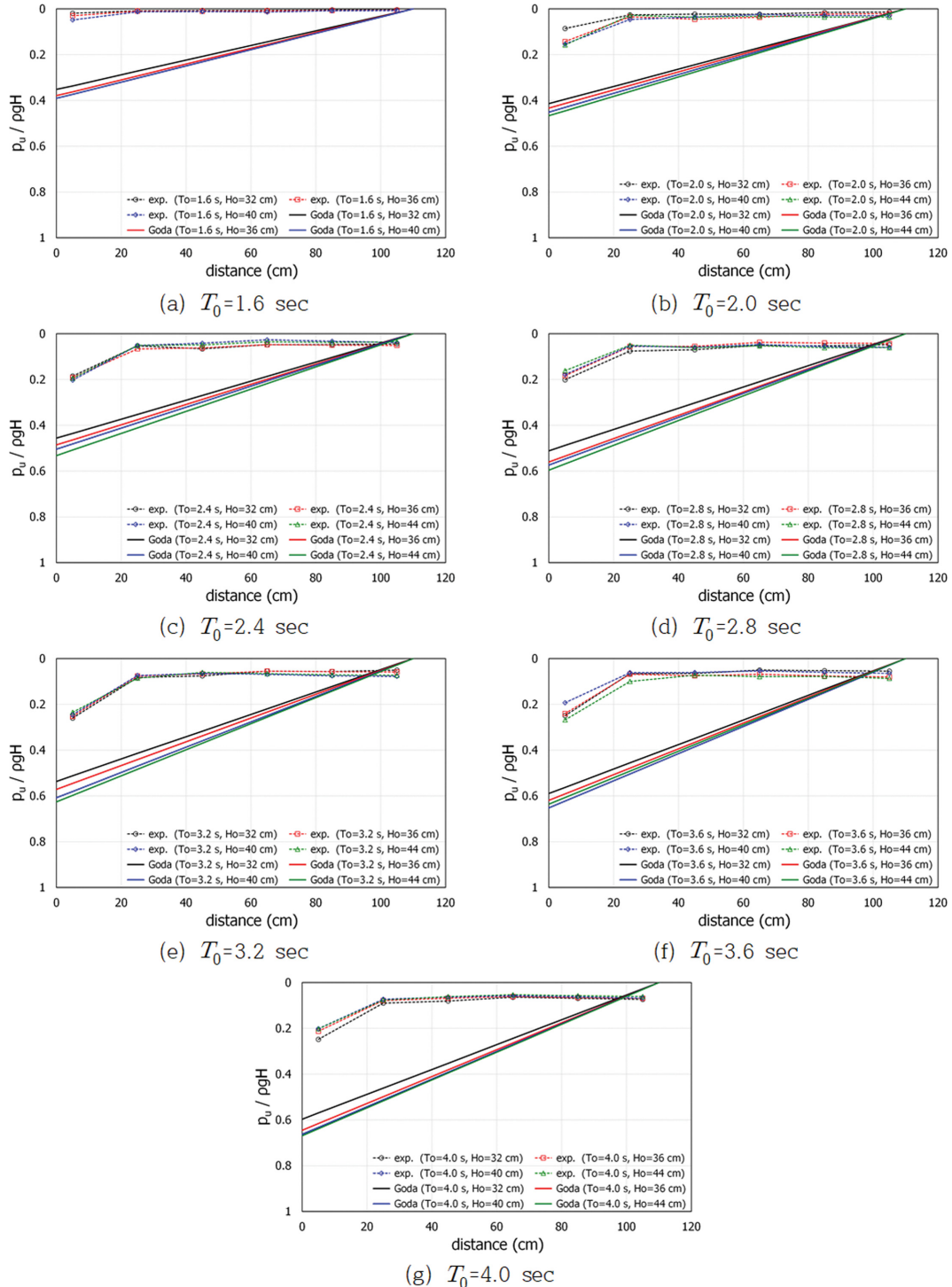


Fig. 4. Comparison of measured data and Goda's results for $S_B = 12.3$ cm.

즉, 양압력의 크기는 주기의 영향을 받음을 의미한다. 또한 주기가 짧은 경우에는 파고에 따른 무차원 양압력의 변화는 크지 않지만, 주기가 증가할수록 동일 주기에서 파고변화에 따른 무차원 양압력의 크기가 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 $S_B = 6.3$ cm(SB063)인 실험결과(exp.)와 현행 설계법(Goda)에 의한 결과를 비교한 것으로서 전반적인 경향은 $S_B = 0.0$ cm(SB000) 조건과 유사하지만 상치콘크리트 하단고가 증가함으로 인해 양압력의 크기는 전반적으로 감소하였으며, 입사파의 주기가 짧을 경우에는 상치콘크리트 후면의 양압력 크기 또한 0에 가까워 지는 것을 확인할 수 있다. 또한 동일 주기 조건에서 파고변화에 따른 무차원 양압력의 크기 변화도 $S_B = 0.0$ cm(SB000)에 비해 상대적으로 감소하였다.

Fig. 4는 $S_B = 12.3$ cm(SB123)인 실험결과(exp.)와 현행 설계법(Goda)에 의한 결과를 비교한 것으로서 상치콘크리트 하단고가 보다 높아짐으로 인해 양압력의 크기가 상당히 감소하였고, 동일 주기 조건에서 파고변화에 따른 무차원 양압력의 변화도 거의 발생하지 않았다. 전체적으로 현행 설계법에 의한 양압력이 본 실험결과보다 상당히 크게 산정됨을 확인할 수 있다.

규칙파를 적용한 양압력 실험결과에 의하면 전체적으로 주기가 증가할수록 무차원 양압력은 증가하고, 상치콘크리트 하단고(S_B)가 높아질수록 감소하는 경향을 보였다. 상치콘크리

트 전면에서 큰 양압력이 발생하고, 후면으로 갈수록 감소하며, 동일한 주기 조건에서 파고에 따른 무차원 양압력의 변화는 상치콘크리트 하단고가 정수면에 인접할때는 차이를 보이지만 상치콘크리트 하단고가 높아질수록 파고변화에 따른 차이는 크지 않았다. 그리고 본 실험에서 계측된 양압력보다 현행 설계법에 의한 양압력이 전체적으로 크게 산정되었다. 현행 설계법에 의한 양압력 분포는 선형이지만, 본 실험결과에 따른 양압력 분포는 지수분포를 보였다.

본 논문에서는 $S_B = 0.0$ cm(SB000), $S_B = 3.3$ cm(SB033), $S_B = 6.3$ cm(SB063), $S_B = 9.3$ cm(SB093) 및 $S_B = 12.3$ cm(SB123) 조건의 양압력 계측 실험결과를 이용하여 규칙파 작용시 양압력을 산정할 수 있는 경험식을 도출하고자 한다.

4. 결과 분석

본 실험에서는 상치콘크리트 전면 전체가 테트라포드로 피복된 경우에 대해 규칙파를 적용한 양압력 계측실험을 수행하였고, 분석된 결과를 이용하여 상치콘크리트 하부에 작용하는 양압력을 산정할 수 있는 경험식을 제시하고자 한다. Figs. 2~4에 나타난 바와 같이 무차원 양압력은 상치콘크리트 하단고가 증가할수록 감소하고, 전면에서 후면으로 갈수록 감소하는 경향을 보이며, 입사파의 파고 및 주기에 따라 그 크기가 변함을 확인할 수 있었다.

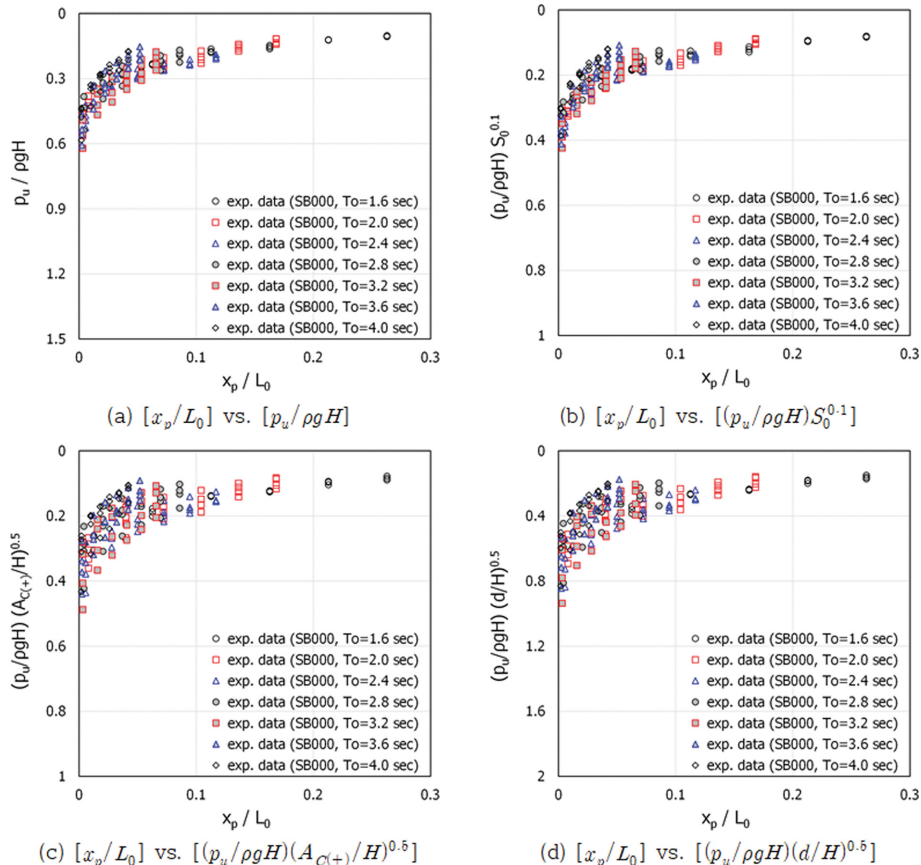


Fig. 5. Relationship between dimensionless uplift pressure and dimensionless parameters for $S_B = 0.0$ cm.

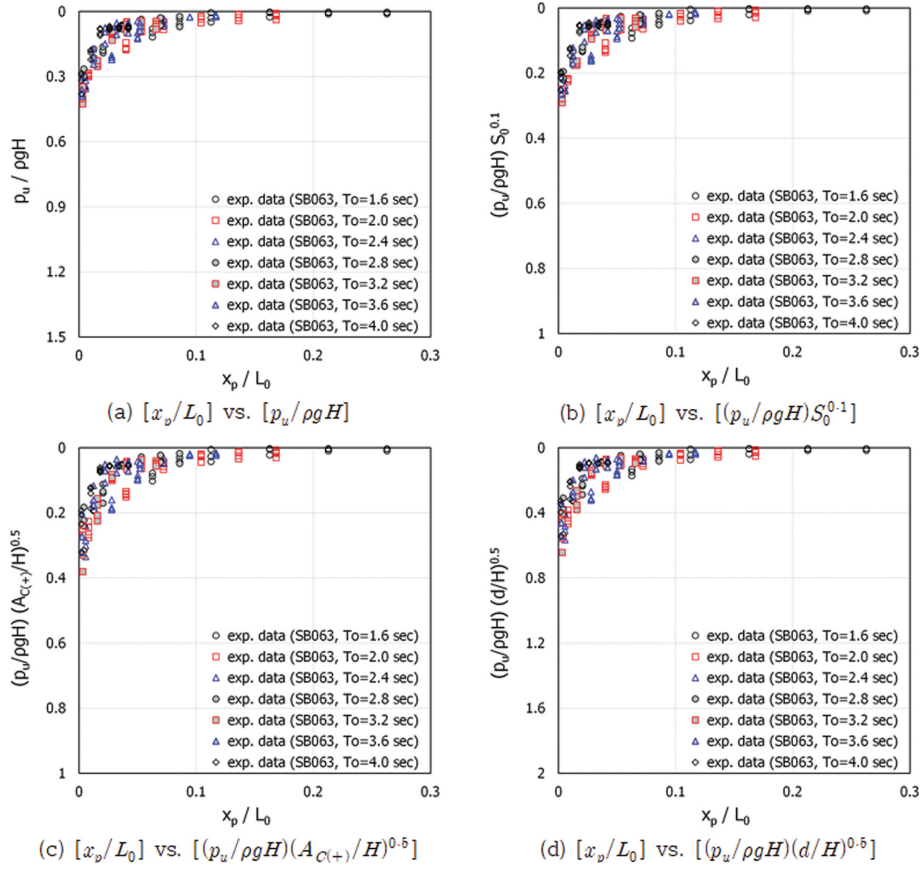


Fig. 6. Relationship between dimensionless uplift pressure and dimensionless parameters for $S_B = 6.3$ cm.

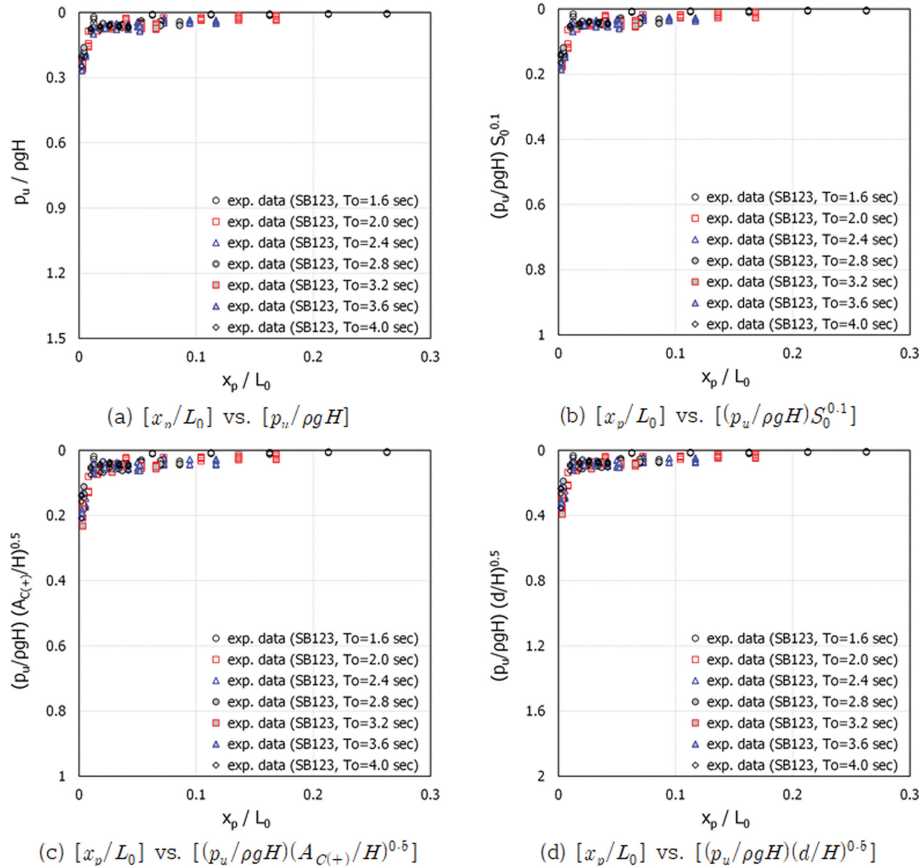


Fig. 7. Relationship between dimensionless uplift pressure and dimensionless parameters for $S_B = 12.3$ cm.

Figs. 5~7은 양압력을 산정할 수 있는 경험식을 도출함에 앞서 양압력의 분포에 영향을 미치는 무차원 변수를 확인하기 위해 상대 거리(x_p/L_0)에 따른 무차원 양압력($p_u/\rho gH$), 파형경사($S_0 = H/L_0$), 상대 피복재 상단고($A_{C(+)}/H$) 및 상대수심(d/H)의 영향을 도식한 것이다.

Fig. 5는 $S_B = 0.0$ cm(SB000) 조건의 결과로서 무차원 양압력은 검토한 무차원 변수들 중 상대 피복재 상단고($A_{C(+)}/H$) 및 상대수심(d/H)의 영향은 크지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 및 Fig. 7을 살펴보면 상치콘크리트 하단고(S_B)가 증가할수록 양압력은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 상치콘크리트 하단이 정수면에 있는 경우와는 달리 하단고가 높아질수록 후면부의 양압력은 0에 가까워진다. 즉, 상치콘크리트 하단고(S_B)가 증가할수록 상치콘크리트 전면부에 상대적으로 큰 양압력이 작용하고, 후면으로 갈수록 양압력이 급속히 작아진다. 그리고 전체적으로 상치콘크리트 하단고(S_B)가 증가할수록 양압력의 분산 또한 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 상치콘크리트 하단고(S_B)에 따른 무차원 양압력을 비교 도식한 것으로서 양압력의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 상치콘크리트 하단고임을 확인할 수 있다. 따라서 상치콘크리트 하단고(S_B)의 영향을 고려한 무차원 양압력 산정식을 도출할 필요가 있다. 그리고 본 실험결과로부터 분석된 무차원 양압력은 상치콘크리트 하단고(S_B)가 정수면에 위치하는 경우와 정수면 상부에 위치하는 경우의 크기가 명확한 차이를 보였다.

본 실험에서 적용한 전체 상치콘크리트 하단고 조건을 포괄하는 경험식을 도출하고자 하였으나, 전체 하단고를 포함할 경우에 실험결과와 경험식의 상관도가 낮아지는 경향을 보였다. 따라서 상치콘크리트 하단이 정수면 인근에 위치하는 경우(SB^* , $0 \text{ m} \leq S_B < 1 \text{ m}$)와 상부에 위치하는 경우(SB^{**} , $S_B > 1 \text{ m}$)로 구분하여 경험식을 도출하였다. Fig. 9는 무차원 양압력 분석결과를 도식한 것으로서 실험결과에 의한 결과(regression line)와 실험결과에 0.1σ 또는 0.2σ 를 더한 제

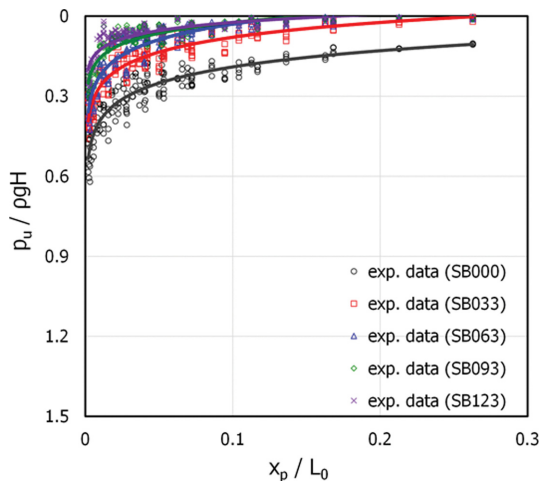


Fig. 8. Dimensionless uplift pressure distribution according to the bottom height of crown wall.

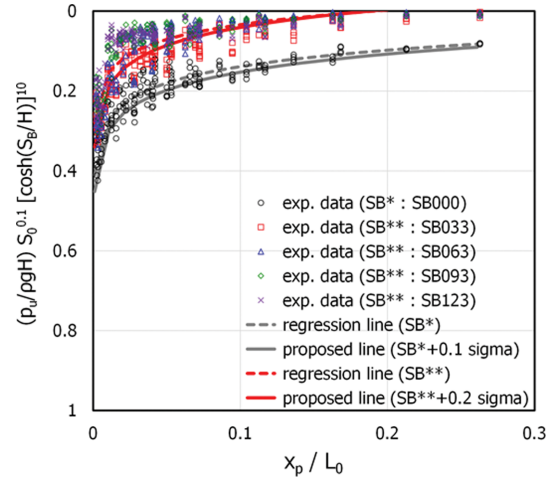


Fig. 9. Results of dimensionless uplift pressure acting on crown wall.

안식의 결과(proposed line)가 도식되어 있으며, σ 는 무차원 양압력 실험결과의 표준편차이다. Fig. 9에 도식된 무차원 양압력 산정식은 다음과 같으며, SB^* ($0 \text{ m} \leq S_B < 1 \text{ m}$)와 SB^{**} ($S_B > 1 \text{ m}$) 조건의 경험식에 대한 결정계수(R^2)는 각각 $R^2 = 0.83$ 및 $R^2 = 0.72$ 로 나타났다.

■ 무차원 양압력 산정식($0 \text{ m} \leq S_B < 1 \text{ m}$ 조건)

• 실험결과 회귀식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_0^{0.1} = -0.059 \ln \left[\frac{x_p}{L_0}\right] + 0.003 \quad (5)$$

• 실험결과 + 0.1σ 제안식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_0^{0.1} = -0.065 \ln \left[\frac{x_p}{L_0}\right] + 0.003 \quad (6)$$

■ 무차원 양압력 산정식($S_B > 1 \text{ m}$ 조건)

• 실험결과 회귀식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_0^{0.1} \left[\cosh\left(\frac{S_B}{H}\right)\right]^{10} = -0.053 \ln \left[\frac{x_p}{L_0}\right] - 0.088 \quad (7)$$

• 실험결과 + 0.2σ 제안식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_0^{0.1} \left[\cosh\left(\frac{S_B}{H}\right)\right]^{10} = -0.065 \ln \left[\frac{x_p}{L_0}\right] - 0.109 \quad (8)$$

■ 양압력 산정 회귀식 및 제안식의 적용범위

$$A_{C(+)}/H = 0.36 \sim 1.15, S_B/H = 0 \sim 0.42, \xi = 2.19 \sim 5.30, \\ d/H = 1.31 \sim 2.72, L_0/G_W = 18.16 \sim 113.51$$

Fig. 10과 Fig. 11은 본 실험에서 계측된 양압력 결과와 제안식의 결과를 비교한 것이다. Fig. 10은 SB^* ($0 \text{ m} \leq S_B < 1 \text{ m}$) 조건의 결과를 비교한 것으로서 전반적으로 계측결과와 제안식의 결과가 잘 일치하고 있으며, 실험결과에 0.1σ 를 더한 제

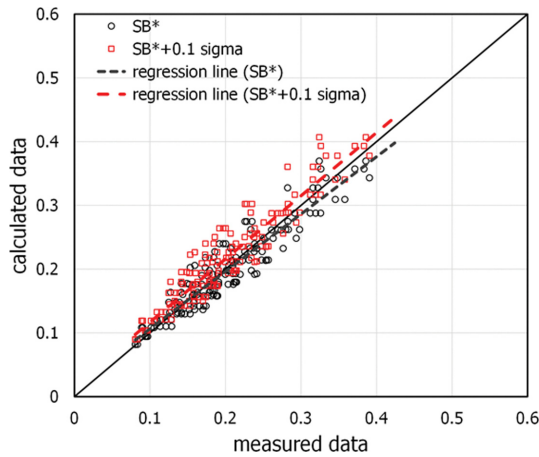


Fig. 10. Comparison of measured and calculated data for SB*.

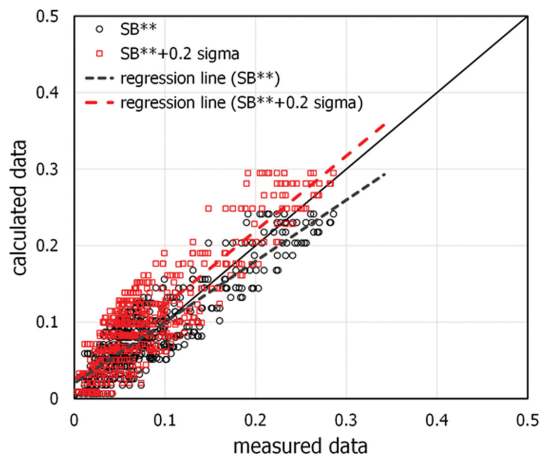


Fig. 11. Comparison of measured and calculated data for SB**.

안식의 결과가 약간 보수적인 양압력이 산정됨을 알 수 있다. Fig. 11은 SB** ($S_B > 1$ m) 조건의 결과를 비교한 것으로서 SB* 조건에 비해 분산이 증가하였다. 이는 여러 조건의 상치콘크리트 하단고 실험결과를 하나의 식으로 통합함으로 인해 발생하는 현상으로서 상치콘크리트 하단고가 높아질수록 양압력이 급격히 감소하기 때문이다. 그리고 실험결과에 0.2σ 를 더한 제안식의 결과가 보다 보수적인 양압력이 산정됨을 알 수 있다.

5. 결 론

현행 항만 및 어항 설계기준-해설(MOF, 2020)에는 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 산정할 수 있는 지침이 정립되어 있지 않아 직립식구조물에 작용하는 Goda의 파압 산정식(Goda, 1974, 2010)에서의 양압력 산정식을 일부 변형하여 사용하고 있는 실정으로서 설계지침으로 명확하게 정립되어 있지 않다. 또한 설계지침의 부재로 인해 Goda의 양압력 산정식을 변형하여 사용하고 있는 실정이지만 직립식구조물 하단고가 수면상부에 있을 때도 적용 가능한가에 대한 의문은 남아 있다. 따라서 경사식구조물의 상치콘크리

트에 작용하는 양압력을 직접 산정할 수 있는 경험식 등의 도출이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 규칙파를 적용하여 검토하였다. 적용된 경사식구조물은 테트라포드가 2층 피복되고, 피복재 상단고와 마루높이가 동일한 조건이다. 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 산정하기 위해 2차원 수리모형실험을 수행하였으며, 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 상치콘크리트 하단고가 정수면에 위치하는 경우에 가장 크게 나타났고, 하단고가 증가할수록 양압력은 크게 감소하였다. 현행 설계법과는 달리 상치콘크리트 후면부에서도 양압력이 일정 수준 작용하였다. 또한 현행 설계법에서 적용하고 있는 양압력의 선형분포에 비해 지수형태의 분포를 보임을 확인하였다.

(2) 양압력의 변화는 상치콘크리트 하단고가 가장 중요한 변수임을 확인하였고, 입사파의 주기도 일정 수준 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

(3) 양압력을 산정할 수 있는 경험식은 상치콘크리트 하단이 정수면 인근에 위치하는 경우와 상부에 위치하는 경우로 구분하여 제안하였다. 이는 제안식에 의한 양압력 산정결과의 정확성을 다소 높이하고자 하는 취지로서 본 실험으로부터 도출된 양압력 산정 제안식은 다음과 같다.

- 무차원 양압력 산정식($0 \text{ m} \leq S_B < 1 \text{ m}$ 조건)

- 실험결과 회귀식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_{0.1}^{0.1} = -0.059 \ln\left[\frac{x_p}{L_0}\right] + 0.003$$

- 실험결과 + 0.1σ 제안식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_{0.1}^{0.1} = -0.065 \ln\left[\frac{x_p}{L_0}\right] + 0.003$$

- 무차원 양압력 산정식($S_B > 1 \text{ m}$ 조건)

- 실험결과 회귀식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_{0.1}^{0.1} \left[\cosh\left(\frac{S_B}{H}\right)\right]^{10} = -0.053 \ln\left[\frac{x_p}{L_0}\right] - 0.088$$

- 실험결과 + 0.2σ 제안식

$$\left(\frac{p_u}{\rho g H}\right) S_{0.1}^{0.1} \left[\cosh\left(\frac{S_B}{H}\right)\right]^{10} = -0.065 \ln\left[\frac{x_p}{L_0}\right] - 0.109$$

- 양압력 산정 회귀식 및 제안식의 적용범위

$$A_{C(+)} / H = 0.36 \sim 1.15, S_B / H = 0 \sim 0.42, \xi = 2.19 \sim 5.30, d / H = 1.31 \sim 2.72, L_0 / G_w = 18.16 \sim 113.51$$

본 연구에서는 규칙파를 적용하여 경사식구조물의 상치콘크리트에 작용하는 양압력에 대한 수리모형실험을 수행하고,

양압력 산정식을 제안하였다. 본 실험결과는 마루높이와 피복재 상단고가 동일한 조건으로서 추후 마루높이가 피복재 상단고보다 높은 조건에 대한 검토도 필요하다. 또한 본 논문에서는 규칙파를 적용하여 상치콘크리트에 작용하는 양압력 산정을 위한 경험식을 제안하였으나, 실제 해역에서는 불규칙파가 작용하기 때문에 실무적인 적용 측면에서는 다소 미흡한 실정이지만, 상치콘크리트에 작용하는 양압력을 산정할 수 있는 경험식의 도출 가능성은 확인하였다. 향후 불규칙파를 적용한 양압력 산정 제안식의 도출이 필요하며, 이에 대해서는 추후 결과를 발표할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 한국에너지기술평가원의 연구비 지원(과제번호: 20224B10200040)을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Goda, Y. (1974). New wave pressure formulae for composite breakwaters. Proceedings of the 14th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1702-1720.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. World Scientific, Singapore.
- Han, X., Jiang, Y. and Dong, S. (2022). Wave forces on crown wall of rubble mound breakwater under swell waves. Ocean Engineering, 259, 111911.
- Lee, J.-I. (2024). Horizontal wave pressures acting on the crown wall of rubble mound structure under monochromatic wave conditions : Case for the same level as the freeboard and armour height. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 36(6), 241-250 (in Korean).
- Lee, J.-I., Lee, G.Y. and Kim, Y.-T. (2021). Horizontal wave pressures on the crown wall of rubble mound breakwater under non-breaking condition. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 33(6), 321-332 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020). Design Standard of Harbor and Fishery Ports (in Korean).
- Molines, J., Herrera, M.P. and Medina, J.R. (2018). Estimations of wave forces on crown walls based on wave overtopping rates. Coastal Engineering, 132, 50-62.
- Nørgaard, J.Q.H., Andersen, T.L. and Burcharth, H.F. (2013). Wave loads on rubble mound breakwater crown walls in deep and shallow water wave conditions. Coastal Engineering, 37, 149-174.
- Pedersen, J. (1996). Wave forces and overtopping on crown walls of rubble mound breakwaters. Ph.D. thesis, Series paper 12, Hydraulics & Coastal Engineering Lab., Dept. of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K. (1990). Wave and block forces on a caisson covered with wave dissipating blocks. Report: Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, 3-34.
- USACE (2006). Coastal Engineering Manual. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Received 4 December, 2024

Revised 19 December, 2024

Accepted 19 December, 2024