

월파에 의한 경사식구조물 배후면에 작용하는 낙하파압에 대한 실험적 연구: 비쇄파조건

Experimental Study for Downfall Pressure on the Floor behind Rubble-Mound Structure by Wave Overtopping: Non-Breaking Condition

이종인* · 문강일** · 김영일***

Jong-In Lee*, Gang Il Moon** and Young Il Kim***

요 지 : 파랑이 구조물과 만나게 되면 강한 쳐오름이 발생하게 되며, 이러한 쳐오름은 월파를 야기하게 된다. 월파에 의해 야기된 월파수괴에 의해 구조물 배후면에 강한 낙하파압이 작용하게 된다. 구조물 배후면의 포장체 등을 설계하기 위해서는 월파 등에 의한 낙하파압이 산정되어야 하지만 여전히 불명확한 부분이 있다. 본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 월파에 의한 낙하파압 계측을 위한 수리실험을 수행하였으며, 수리실험에서는 파랑조건, 여유고, 피복재 높이 및 파라펫의 유무에 따른 낙하파압의 변화를 계측하였다. 상치콘크리트에는 월파의 효과적인 저감을 위해 파라펫이 설치되기도 하지만, 파라펫 설치로 인해 배후면에 작용하는 낙하파압은 증가하는 것으로 검토되었다. 수행된 실험결과를 이용하여 경사식구조물의 상치콘크리트 배후면에 작용하는 최대 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

핵심용어 : 낙하파압, 쳐오름, 월파, 경사식구조물, 경험식

Abstract : The large uprush could be occurred when the waves hit the coastal structure and this uprush by wave could make the overtopping. The downfall of the wave overtopping water over the structure brought about the vertical impact loads. The vertical impact loads should be evaluated in order to design the pavement behind the crown wall however these loads were still unclear. In this study, the hydraulic model tests for the downfall impact loads by wave overtopping were performed and the various conditions were applied to the tests. The effect of the incident wave condition, the freeboard, the armour crest height and the height of the parapet were investigated. The test results showed that the parapet on the crown wall could reduce the wave overtopping however the inclusion of parapet could lead to the increased downfall wave pressures behind the crown wall. The empirical formulae were proposed for evaluating the maximum downfall pressures behind the crown wall of rubble mound structure.

Keywords : downfall pressure, uprush, overtopping, rubble-mound structure, empirical formula

1. 서 론

해안 및 항만구조물 중 대표적인 외곽시설은 방파제와 호안 등을 들 수 있으며, 경사식과 직립식으로 구분할 수 있다. 파랑하중에 대해 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 경사식구조물의 경우에는 피복재의 피해가 허용피해를 이하여야 하고, 상치콘크리트의 활동 등과 같은 피해가 발생하지 않아야 한다. 항만구조물 설계시 대부분의 안정성 검토 항목은 파랑하중의 직접적인 작용에 저항하도록 하고 있다. 그리고 해안 및 항만구조물의 경우에 파랑내습시 일정 수준의 월파를

허용하고 있으며, 호안구조물의 경우에는 구조물 마루높이를 허용평균월파랑 관점에서 결정하고 있다. 이와 같이 해안 및 항만구조물의 마루높이 산정시 요구되는 허용월파랑에 대한 연구는 대표적으로 EurOtop(2018)을 들 수 있으며, 월파랑을 산정하기 위한 다양한 경험식들이 국내외적으로 제시되고 있다. 또한 경사식구조물의 상치콘크리트의 안정성 확보를 위해 파랑 내습시 작용하는 파압/파력에 대한 여러 연구가 수행되고 있다(Pedersen, 1996; Nørgaard et al., 2013; Molines et al., 2018; Aniel-Quiroga et al., 2019). 이와 같이 직접적인 파랑작용에 대한 월파랑 산정 및 파압/파력 산정에 대한

*전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University)

**전남대학교 공과대학 해양토목공학과 학술연구교수(Research Professor, Dept. of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University)

***전남대학교 대학원 건축토목공학과 박사과정(Corresponding author: Young Il Kim, Ph.D. Course, Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University, 50, Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam 59626, Korea. Tel: +82-61-659-6957, oldboya01@nate.com)

연구는 활발하게 수행되고 있는 반면에 월파에 의해 발생하는 후속적인 현상에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. Chen et al.(2015)은 월파발생 후 월파수괴의 수평흐름에 의한 배후시설물에 작용하는 파력에 대한 연구를 수행하였으며, 최근 이와 관련된 연구가 진행되고 있다.

월파량 산정과 관련된 연구는 활발히 진행되어 왔고, 월파수괴가 배후시설물에 작용하는 파력에 대한 연구는 진행중인 반면에 배후면에 작용하는 파압, 즉 월파수괴에 의한 낙하파압(downfall wave pressure)에 대한 연구는 미미한 실정이다. Wolters et al.(2005)은 직립식방파제를 대상으로 규칙파를 적용하여 구조물에서 쳐오른 월파수괴가 배후면에 낙하할 때 작용하는 파압에 대해 실험적인 검토를 수행하였으나 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식을 제시하기에는 미흡하였다. 이는 규칙파를 적용한 한계에 기인하는 것으로 생각된다. 국내 연구로서 Ko et al.(2022)은 경사식 호안구조물을 대상으로 월파수괴에 의한 낙하파압을 계측하는 수리실험을 수행하고, 배후면에 작용하는 낙하파력을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. Ko et al.(2022)의 실험에서 낙하파압이 작용하는 배후면을 좁게 설정함으로 인해 배후면 전체에 작용하는 파력을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. 따라서 상치콘크리트로부터의 이격거리에 따른 낙하파압의 변화는 고려할 수 없다. 국내 설계지침에서 이러한 낙하파압을 고려한 배후면(예, 포장체 등)의 설계지침은 부재한 실정이다. 이는 낙하파압을 산정할 수 있는 방법이 없기 때문인 것으로 판단되며, 낙하파압을 산정할 수 있으면 배후면 설계시 필요한 설계기법 또한 정립될 것으로 기대된다.

Fig. 1은 태풍 내습시 호안 배후면의 콘크리트 포장체 피해사례이다. 호안 배후면의 포장체 피해는 월파수괴에 의한 낙하파압, 양압력 및 포장체 하부의 침하 등 여러 요인으로 발생할 수 있다. Fig. 1에 제시된 피해사례는 호안 전면이 콘크리트계단으로 구성되어 있어 양압력의 작용이 크지 않았을 것으로 판단되고, 태풍 내습전에는 피해가 발생하지 않았기 때문에 월파수괴에 의한 낙하파압이 주된 원인으로 생각된다. 따라서 호안 인근의 시설물과 배후면 포장체 등은 월파수괴에 의한 낙하파압에 저항할 수 있도록 설계되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 테트라포드가 회복된 경사식구조물 배후면에 작용하는 월파수괴의 낙하파력을 계측하는 2차원 실험을 수행하였다. 수리실험은 주파수스펙트럼을 이용한 불규칙파를 적용하였으며, 상치콘크리트의 파라펫 유무 및 상대여유고 등을 변화시키며 낙하파력을 계측하였고, 계측된 파력은 파압으로 환산하였다. 또한 상치콘크리트로부터의 이격거리에 따른 파압의 변화도 검토하였다. 본 실험에서 계측된 자료를 바탕으로 경사식구조물 배후면에 작용하는 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

2.1 실험시설

본 실험은 전남대학교 해안항만실험센터 단면수로에서 수행되었다. 사용된 단면수로의 제원은 폭 2 m, 길이 100 m, 높이 3 m이며, 전기서보피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한 조파판 전면에 부착된 파고계를 이용하여 독취한 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어기가 가능하고 수로 양쪽 끝부분에는 소파시설이 설치되어 있다. 설치된 조파기의 성능은 최대파고 1.3 m, 재현 가능 주기 0.5 sec~10 sec이다. Fig. 2는 단면수로의 개념도이다. 본 실험에서 실험파 설정 및 실험시 입사파의 증폭 유무를 확인하기 위해 구조물 전면에 설치한 파고계는 용량식으로서 계측범위는 ± 0.7 m이다. 본 실험에 사용된 계측기는 파고계와 파력계이며, 파고계의 가능 독취율은 50 Hz이고, 파력계의 가능 독취율은 1 kHz이다.

2.2 실험조건

본 실험에 적용된 실험파는 Table 1에 제시되어 있다. 목표 실험파의 유의파주기(significant wave period, $(T_S)_{target}$) 및 유의파고(significant wave height, $(H_S)_{target}$)는 각각 $(T_S)_{target} = 2 \text{ sec} \sim 3.2 \text{ sec}$, $(H_S)_{target} = 0.2 \text{ m} \sim 0.3 \text{ m}$ 범위이며, 유의파주기는 $\Delta T_S = 0.4 \text{ sec}$ 간격, 유의파고는 $\Delta H_S = 0.02 \text{ m}$ 간격으로 설정하였다. 실험은 축척 1/25 개념으로 계획함으로 인해 원형상 목표 유의파주기는 $T_{S,target} = 10, 12, 14, 16 \text{ sec}$, 원형상 목표 유의파고는 $(H_S)_{target} = 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 \text{ m}$ 이다. 그



Fig. 1. Failure images of the pavement behind the seawall.

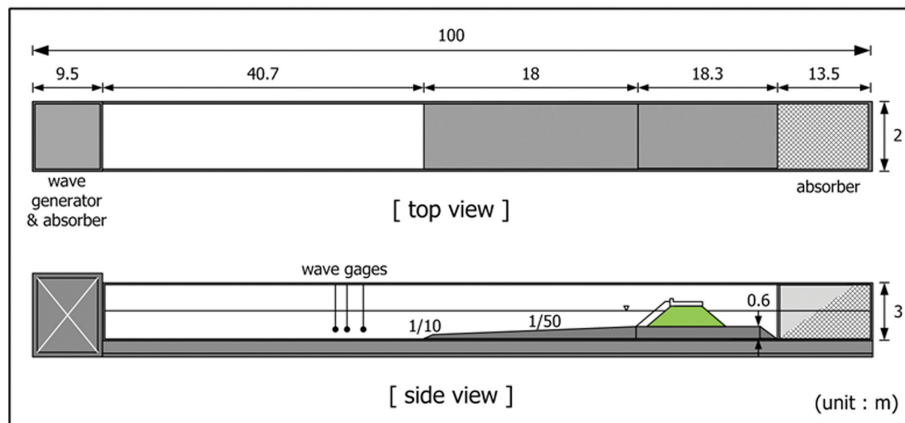


Fig. 2. Experimental facilities.

Table 1. Target wave conditions in the experiment

Significant wave period ($(T_S)_{target}$, sec)	Significant wave height ($(H_S)_{target}$, m)	Water depth at toe (d_t , m)	Remarks
2, 2.4, 2.8, 3.2	0.2, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.3	0.8	Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum

리고 본 실험에 적용된 실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 이용하여 설정하였으며, 비쇄파조건에 해당된다. 목표 유의파고와 유의파주기를 대상으로 실험파를 설정하더라도 동일한 제원을 가지는 파랑을 재현하기는 어렵다. 본 실험에서 설정된 실험파의 유의파고 및 유의파주기는 목표 제원과 약간의 차이가 있지만 스펙트럼과 파랑제원을 최대한 목표값에 근사하도록 설정하였다. 실험파의 유의파주기는 $T_S = 2 \sim 3.21$ sec, 유의파고는 $H_S = 0.21 \sim 0.37$ m 범위로 설정되었으며, 실험결과 분석시에는 목표 파랑제원이 아닌 실험파 설정시의 파랑제원을 이용하여 결과를 분석하였다. 그리고 실험파는 국토교통연구인프라운영원(KOCED, 2019)에서 제시한 설정방법을 이용하였다. 구조물이 설치되는 수심(d_t)은 $d_t = 0.8$ m로서 실험에 적용된 실험파의 쇄파가 발생하지 않는 수심조건이다.

본 실험은 경사식 호안구조물을 대상으로 하였으며, 호안상치콘크리트 배후면에 작용하는 월파수괴에 의한 낙하파압

을 산정하기 위한 실험으로서 유의파주기 기준 1,100파를 조파하고, 전반부 100파를 제외한 후반부 1,000파가 작용하는 시간 동안에 측정된 파력자료를 이용하여 분석한 후, 파압으로 환산하였다.

2.3 실험단면 및 제원

본 실험에 적용된 실험단면은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 d_t 는 구조물 선단(toe) 수심, R_c 는 여유고(freeboard), A_c 는 피복재 높이(armor block height), G_w 는 상치콘크리트 전면 피복재 어깨폭(armor crest berm width), A_T 는 주 피복층 두께(armor layer thickness), U_T 는 중간피복층 두께(underlayer thickness), C_w 는 상치콘크리트 폭(crown wall width), α 는 사면경사이다. 그리고 Fig. 3에서 P01~P20은 월파수괴의 낙하파력을 측정하기 위해 설치한 패널(panel)을 도시한 것이다.

본 실험에서 적용한 모형구조물의 기하학적 제원은 Table 2와 같다. Table 2에 제시되어 있는 바와 같이 R_c 와 A_c 를 서

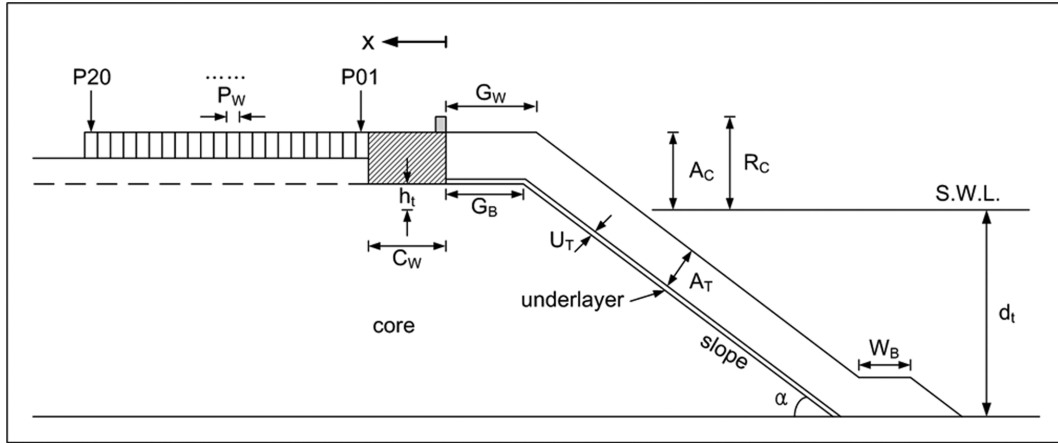


Fig. 3. Cross-section of model structure.

Table 2. Geometric parameters of model structure

Case ID	R_C (m)	A_C (m)	G_W (m)	G_B (m)	C_W (m)	W_B (m)	h_t (m)	A_T (m)	U_T (m)	d_t (m)	$\cot\alpha$
C11	0.3										
C12	0.34	0.3	0.22	0.156	0.2	0.21	0.1	0.192	0.024	0.8	1.5
C13	0.38										

로 다르게 함으로써 $R_C/A_C = 1, 1.13$ 과 1.27 조건이 되도록 하였으며, 이는 호안 상치콘크리트를 피복재가 전체 피복하는 조건과 파라펫(parapet)이 설치됨에 따른 부분 피복 조건을 비교하기 위함이다. 본 실험은 1/25 축척으로 설계하였으며, 사용된 피복재는 테트라포드(Tetrapod)이다. 어깨폭(G_W)은 테트라포드가 2열 피복되는 조건으로서 $G_W/L_n = 2.37$ 이다. 여기서, $L_n (= V_{armor}^{1/3})$ 은 공칭길이이며, V_{armor} 는 사용된 피복재인 테트라포드의 체적이다. 중간피복층(underlayer)에는 Tripod를 설치하였다. 구조물 사면경사도 월파랑의 변화에 영향을 미치기 때문에 월파수피에 의한 낙하파압이 다르지만 본 실험에서는 $\cot\alpha = 1.5$ 로 고정하였다. 상치콘크리트 전면의 피복재 어깨폭 및 사면경사의 변화에 대해서는 추가적인 검토가 요구된다.

Fig. 4는 월파수피의 낙하파력을 계측하기 위해 상치콘크리트 후면에 설치되는 파력계의 배치 및 파력계측을 위한 패널(panel)을 도시한 것이다. 상치콘크리트 후면에 20개의 패널($P_L = 0.498$ m, $P_W = 0.099$ m)을 설치하였으며, 패널간 간격은 0.002 m를 두어 패널간의 접촉이 없도록 하였다. 각 패널에 2개의 파력계(load cell)를 설치하였으며, 전체 40대의 파력계가 활용되었다. Ko et al.(2022)은 파압계(pressure transducer)를 활용하여 월파수피의 낙하파압을 계측하였지만, 본 연구에서는 일정 면적을 가지는 패널에 작용하는 파력을 계측한 후, 파압으로 환산하였다. 이는 파봉선 방향(실험수로 폭 방향)으로 호안 상치콘크리트로부터의 월파수피가 동일하게 발생된다고 생각하기 어렵고, 이로 인해 상치콘크리트 후면의 동일 파봉선 방향 위치에서 파압이 동일하게 발생할 것으로 판단하기 어렵기 때문에 일정 면적에 작용하는 파력을

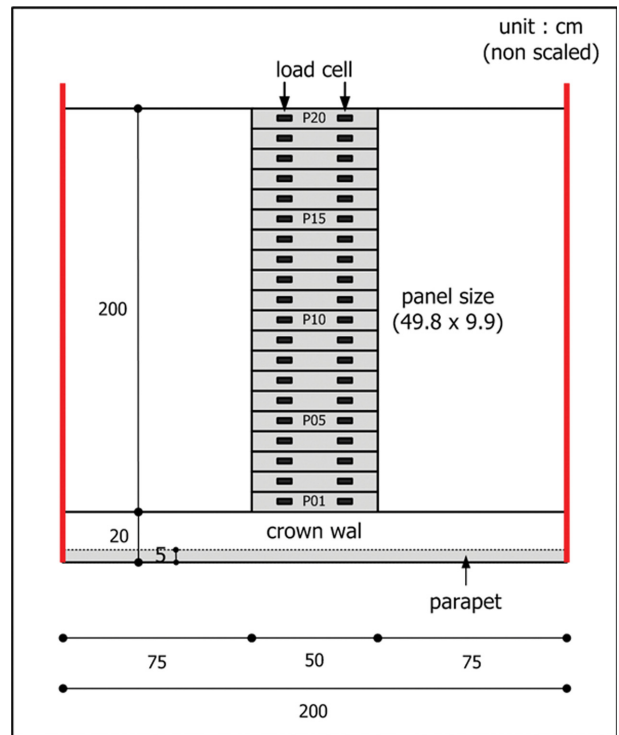


Fig. 4. Position of load cells and panels in the measuring area (plan view).

계측하였다. 파력계측은 상치콘크리트 후면으로부터 모형상 2 m를 계측하였으며, 파력계측을 위한 패널은 수로의 중앙부 구간에 설치하였다. 사용된 실험수로의 폭은 2 m로서 실험수로 벽면으로부터 각각 0.75 m 이격된 위치이다. 그리고 상치콘크리트 후면 2 m 구간(P01~P20)을 계측범위로 설정한 것

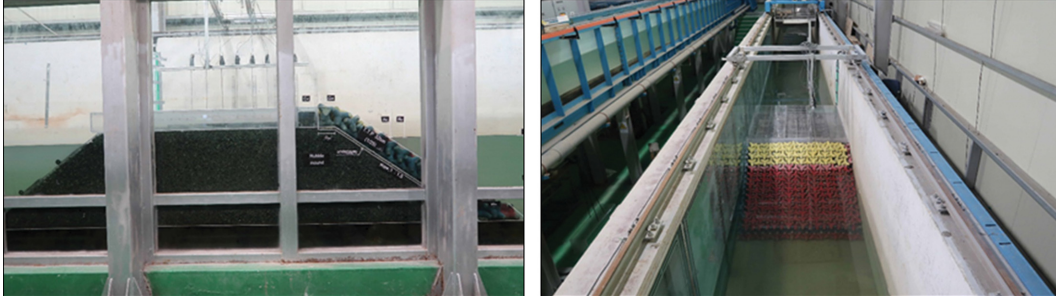


Fig. 5. Images of model structure setup.

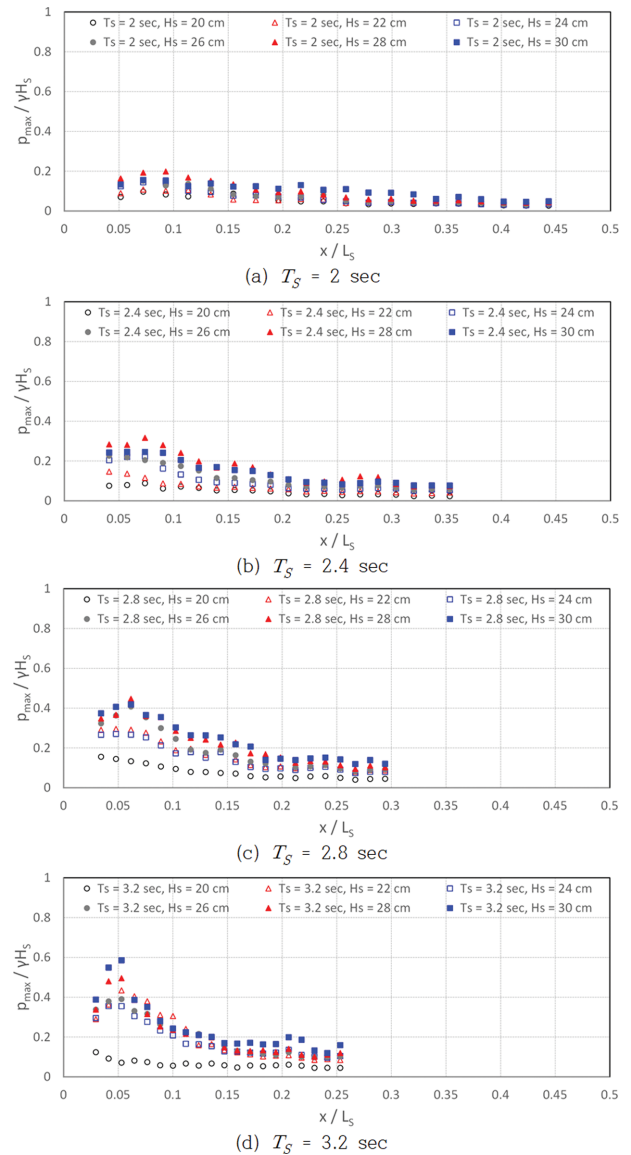
은 월파수괴의 진행에 따른 파압의 변화를 검토하기 위한 것이다. Fig. 5는 모형설치 장면이다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 계측된 파력 중 최대파력을 최대파압(p_{max})으로 환산한 후, 결과분석에 활용하였다. 분석된 낙하파압(p_{max})은 γH_S 로 무차원화하여 최대 낙하파압($p_{max}/\gamma H_S$)을 종축에 도시하였으며, 여기서 γ 는 유체의 단위중량, H_S 는 실험파 설정시의 유의파고이다. 그리고 횡축은 상치콘크리트 선단으로부터의 거리(x)를 목표 유의파주기의 파장(L_S)로 나눈 상대거리(x/L_S)로 나타내었다. 즉, 전술한 바와 같이 설정된 실험파의 유의파주기가 목표 유의파주기와 거의 유사하므로 결과를 도시할 때 편의를 위해 목표 유의파주기를 이용한 상대거리를 활용하였다.

Figs. 6~8은 각각 C11($R_C/A_C = 1$), C12($R_C/A_C = 1.13$) 및 C13($R_C/A_C = 1.27$) 실험안 조건에서 계측된 무차원 낙하파압을 도시한 것이다. Fig. 6은 C11 실험안의 계측결과로서 전체적으로 입사파의 유의파주기가 증가할수록 월파수괴에 의한 낙하파압이 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 유의파주기 조건에서 유의파고가 증가할수록 낙하파압이 증가하는 경향을 보인다. C11의 경우에 최대 낙하파압은 $x/L_S < 0.1$ 구간에서 발생하며, 무차원 최대 낙하파압은 $p_{max}/\gamma H_S \approx 0.6$ 으로 나타났다. Fig. 7은 C12 실험안의 계측결과로서 유의파주기와 유의파고가 증가할수록 낙하파압이 증가하는 경향은 C11과 동일하다. C12의 경우에 최대 낙하파압은 $x/L_S < 0.8$ 구간에서 발생하며, 무차원 최대 낙하파압은 $p_{max}/\gamma H_S \approx 1.2$ 로 나타났다. Fig. 8은 C13 실험안의 계측결과로서 유의파주기와 유의파고가 증가할수록 낙하파압이 증가하는 경향은 C11과 동일하다. C13의 경우에 최대 낙하파압은 $x/L_S < 0.8$ 구간에서 발생하며, 무차원 최대 낙하파압은 $p_{max}/\gamma H_S \approx 2$ 로 나타났다. C11~C13 결과를 살펴보면 최대 낙하파압은 상치콘크리트 후면 인근($x/L_S < 0.1$)에서 발생되고, 그 이후에서는 파압이 지수적으로 감소하는 것으로 나타났다.

$R_C/A_C > 1$ 인 조건은 월파를 저감하기 위해 상치콘크리트 전면에 파라펫을 설치한 경우로서 평균월파량의 저감에는 효과가 있을 수 있으나, 월파수괴에 의한 최대 낙하파압이 증가


 Fig. 6. Measured maximum pressure distribution for case C11 ($R_C/A_C = 1$).

하는 영향을 미치게 된다. 이러한 현상은 내습파가 파라펫에 의해 처오른 후 낙하하기 때문에 최대 낙하파압이 증가하는 것으로서 Ko et al.(2022)의 실험결과와 동일한 경향이다. 즉, 파라펫 설치의 월파를 저감시키는 효과는 있지만 파의 처오름을 증가시켜 배후면에 작용하는 낙하파압을 증가시키는 현

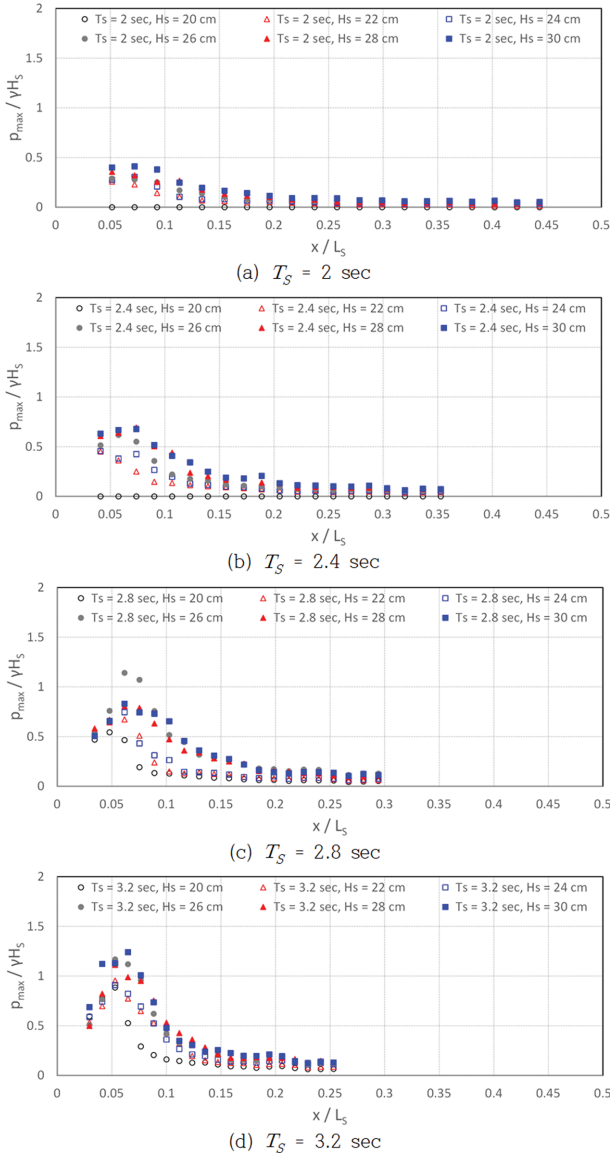


Fig. 7. Measured maximum pressure distribution for case C12 ($R_c/A_c = 1.13$).

상을 초래하게 되며, 동일한 마루높이 조건인 경우에 피복재가 상치콘크리트 마루높이까지 피복된 경우보다 더 큰 낙하파압이 작용하게 됨을 의미한다. 또한 유의파주기 및 유의파고가 증가할수록 낙하파압이 증가하는 경향도 Ko et al.(2022)의 연구결과와 동일하다.

4. 실험결과 분석

3절에서는 상치콘크리트 마루높이(R_c)와 피복재 높이(A_c)에 따른 낙하파압 예측결과를 비교하였으며, 본 절에서는 파라펫 설치에 따른 낙하파압의 증폭 정도와 최대 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식을 도출하고자 한다.

Fig. 9는 유사한 상대여유고(relative crest height, R_c/H_s) 조건에서 파라펫 높이와 피복재 상단고의 비(R_c/A_c)에 따른 최대 낙하파압을 유의파주기별로 비교한 것이다. 전술한 바

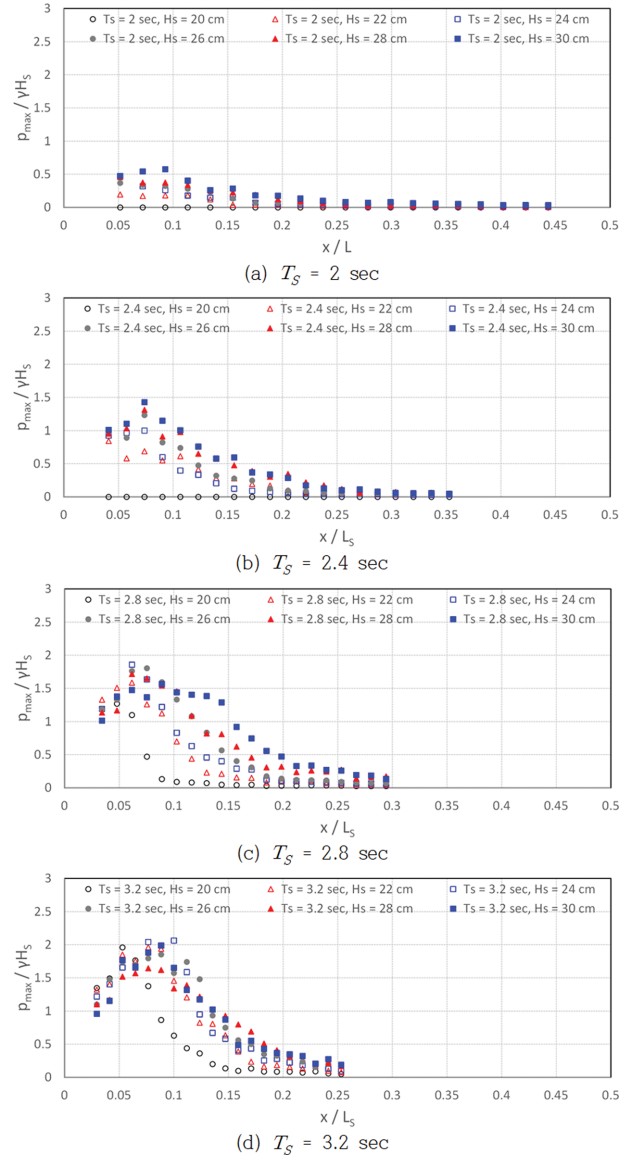


Fig. 8. Measured maximum pressure distribution for case C13 ($R_c/A_c = 1.27$).

와 같이 파압분석시에는 목표 유의파고가 아닌 실험과 설정시의 유의파고를 사용하였기 때문에 동일한 상대여유고 조건으로 비교하기 어려워 유사한 범위의 상대여유고 조건의 결과를 비교하였다. 전체적으로 유사한 상대여유고 조건에서 파라펫의 높이가 증가함에 따라 무차원 낙하파압이 증가하고, 최대 낙하파압이 발생하는 위치는 상치콘크리트로부터 조금씩 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 파라펫 높이의 증가에 따른 최대 낙하파압의 증폭 정도는 유의파주기가 길어질수록 크게 나타났다. Fig. 9(a)는 $T_s = 2$ sec이고 $R_c/H_s = 1.26 \sim 1.28$ 범위의 조건을 비교한 것으로서 $R_c/A_c = 1$ 인 조건에 비해 $R_c/A_c = 1.13$ 조건은 최대 낙하파압이 평균적으로 약 1.7배, $R_c/A_c = 1.27$ 조건은 약 3.1배 증가하였다. 이러한 최대 낙하파압의 증폭은 $R_c/A_c = 1.13$ 의 경우에 $x/L_s < 0.1$ 구간, $R_c/A_c = 1.27$ 의 경우에 $x/L_s < 0.2$ 구간에서 대부분 발생하였다. Fig. 9(b)는 $T_s = 2.4$ sec이고 $R_c/H_s = 1.23 \sim 1.27$ 범위의

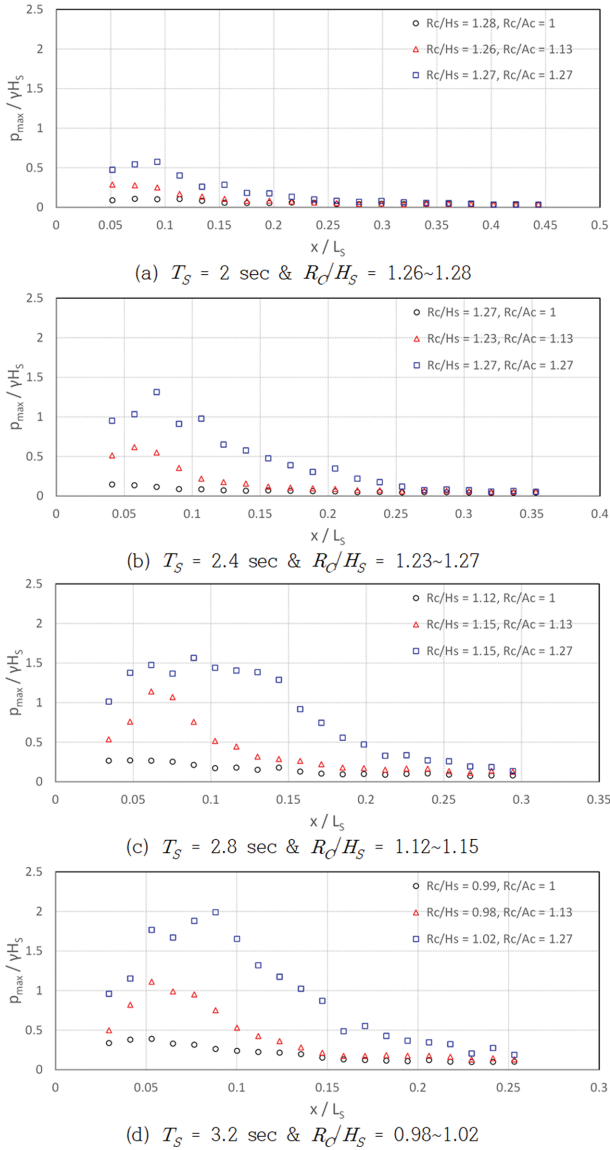


Fig. 9. Comparison of the maximum pressure distribution according to increase of the crown wall height under same armour level.

조건을 비교한 것으로서 $R_c/A_c = 1$ 인 조건에 비해 $R_c/A_c = 1.13$ 조건은 최대 낙하파압이 평균적으로 약 2.6배, $R_c/A_c = 1.27$ 조건은 약 6.4배 증가하였다. 이러한 최대 낙하파압의 증폭은 $R_c/A_c = 1.13$ 의 경우에 $x/L_s < 0.15$ 구간, $R_c/A_c = 1.27$ 의 경우에 $x/L_s < 0.25$ 구간에서 대부분 발생하였다. Fig. 9(c)는 $T_s = 2.8$ sec이고 $R_c/H_s = 1.12 \sim 1.15$ 범위의 조건을 비교한 것으로서 $R_c/A_c = 1$ 인 조건에 비해 $R_c/A_c = 1.13$ 조건은 최대 낙하파압이 평균적으로 약 2.6배, $R_c/A_c = 1.27$ 조건은 약 5.6배 증가하였다. 이러한 최대 낙하파압의 증폭은 $R_c/A_c = 1.13$ 의 경우에 $x/L_s < 0.2$ 구간, $R_c/A_c = 1.27$ 의 경우에 $x/L_s < 0.3$ 구간에서 대부분 발생하였다. 유의파주기가 $T_s = 2.4$ sec인 Fig. 9(b)와 $T_s = 2.8$ sec인 Fig. 9(c)를 비교해보면 최대 낙하파압의 증폭비는 유사하거나 Fig. 9(c)가 작게 나타났다. 이는 Fig. 9(c)의 경우가 Fig. 9(b)보다 유의파주기는

길어졌지만 상대여유고가 낮아 초오름이 감소함으로 인해 증폭비가 작게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 9(d)는 $T_s = 3.2$ sec이고 $R_c/H_s = 0.98 \sim 1.02$ 범위의 조건을 비교한 것으로서 $R_c/A_c = 1$ 인 조건에 비해 $R_c/A_c = 1.13$ 조건은 최대 낙하파압이 평균적으로 약 2.1배, $R_c/A_c = 1.27$ 조건은 약 4.6배 증가하였다. 이러한 최대 낙하파압의 증폭은 $R_c/A_c = 1.13$ 의 경우에 $x/L_s < 0.15$ 구간, $R_c/A_c = 1.27$ 의 경우에 $x/L_s < 0.3$ 구간에서 대부분 발생하였다. 이 또한 상대여유고가 낮아짐으로 인해 최대 낙하파압의 증폭비는 감소하였으며, 이러한 원인은 Fig. 9(c)에서 설명한 바와 같다. Fig. 9로부터 상대여유고(R_c/H_s)가 높을수록 R_c/A_c 의 증가에 따른 최대 낙하파압 증폭이 큼을 알 수 있다.

항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2017)에 의하면 구조물의 마루높이(R_c)는 유의파고의 0.6배에서 1.25배 범위, 즉, $R_c = (0.6 \sim 1.25)H_s$ 범위로 설계하는 것을 제안하고 있다. 그러나 대부분의 구조물 마루높이는 $R_c/H_s \geq 0.8$ 로 설계하고 있으며, 특히 호안 구조물의 경우에는 허용월파랑 이하가 되도록 하여야 하기 때문에 $R_c/H_s \geq 1$ 로 설계하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 수행된 실험조건 중 $R_c/H_s = 0.8 \sim 1.25$ 범위에 포함되는 최대 낙하파압 계측자료를 이용하여 월파수파에 의한 최대 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식을 도출하고자 한다.

Fig. 10은 각각의 실험안(C11, C12, C13)을 대상으로 실험에서 계측된 $R_c/H_s = 0.8 \sim 1.25$ 범위의 최대 낙하파압(p_{max})을 γH_s 로 무차원한 결과를 도시한 것이다. 각 실험안별로 $R_c/H_s = 0.8 \sim 1.25$ 범위에 포함되는 계측결과 전체를 도시한 것으로서 최대 낙하파압이 발생하는 위치는 실험안별로 차이가 있지만, 동일 실험안에서는 유사하게 나타났다. C11의 경우에 $x/L_s \approx 0.05$, C12의 경우에 $x/L_s \approx 0.07$, C13의 경우에 $x/L_s \approx 0.09$ 구간에서 최대 낙하파압이 발생하였다. 그러나 전체적으로 계측자료의 분산이 크기 때문에 경험식의 도출을 위해서는 추가적인 변수를 도입할 필요가 있다.

Fig. 10에 도시된 낙하파압 계측자료의 분산을 저감시키기 위해 다양한 무차원변수를 도입하여 검토하였다. 여러 무차원변수에 대한 검토 결과, 무차원 파압($p_{max}/\gamma H_s$), 상대여유고(R_c/H_s), 상대피복재높이(A_c/H_s) 및 파형경사(H_s/L_s)가 가장 적절한 것으로 검토되었다. 즉, 상치콘크리트 선단으로부터의 상대거리(x/L_s)에 따른 무차원 최대 낙하파압(p_{max}^*)은 다음과 같은 함수로 제시하고자 한다.

$$p_{max}^* = f(p_{max}/\gamma H_s, R_c/H_s, A_c/H_s, H_s/L_s, x/L_s) \quad (1)$$

Fig. 10을 살펴보면 최대 낙하파압은 상치콘크리트로부터 일정 거리 이격된 위치에서 발생되고, 상치콘크리트와 최대 낙하파압이 발생하는 위치의 사이는 낙하파압이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이러한 경향을 반영하기 위해서는 최대 낙하파압이 발생하는 위치를 기준으로 전후는 작은 파압이 산정되도록 하여야 한다. 그러나 상치콘크리트 선단으로부터 최

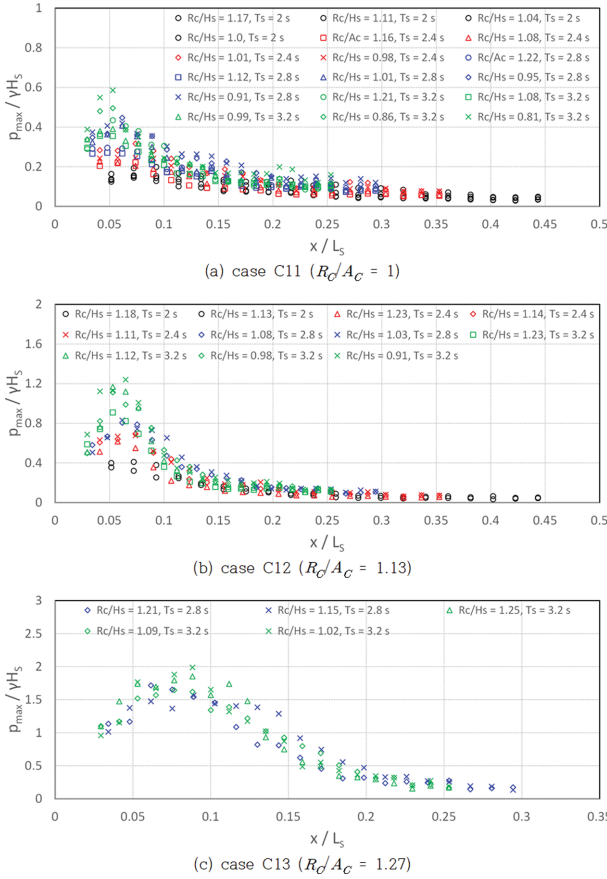


Fig. 10. Maximum pressure distribution for the test cases.

대 낙하파압이 발생하는 위치는 $x/L_s < 0.1$ 이고, 상치콘크리트가 일정 구간에 설치되기 때문에 상치콘크리트로부터 최대 낙하파압이 발생하는 위치까지는 동일한 낙하파압을 적용하고, 그 이후에는 감소하도록 하는 것이 타당하다고 판단하여 식(1)의 무차원 변수를 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

Fig. 11은 본 연구에서 계측된 월파수피에 의한 최대 낙하파압을 식(1)의 변수를 이용하여 무차원화하고, 상치콘크리트 선단으로부터의 거리에 따른 분포를 각각의 실험안별로 도식한 것이다. 추가적인 무차원 변수를 도입함으로써 Fig. 10 보다는 계측결과의 분산이 감소하였음을 알 수 있다. 무차원화된 낙하파압 계측자료의 회귀분석은 최대 낙하파압이 발생하는 위치부터의 자료를 이용하였다. 이는 전술한 바와 같이 상치콘크리트로부터 최대 낙하파압이 발생하는 구간까지는 최대 낙하파압을 적용하기 위함이다. 전체적으로 최대 낙하파압이 발생한 이후에는 지수적인 감소형태를 보이며, 식(2)와 같은 형태로 월파수피에 의한 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식을 제안하고자 한다. 식(2)에서 p_{max}^* 는 상치콘크리트로부터의 거리에 따른 무차원 최대 낙하파압이며, 계수 a 와 b 는 각각의 단면조건에 따른 경험계수이다.

$$p_{max}^* = (p_{max}/\gamma H_s)(R_c/H_s)(A_c/H_s)(H_s/L_s) = a(x/L_s)^b \quad (2)$$

Fig. 11(a)는 C11 실험안($R_c/A_c = 1$)에 대한 실험결과와 회

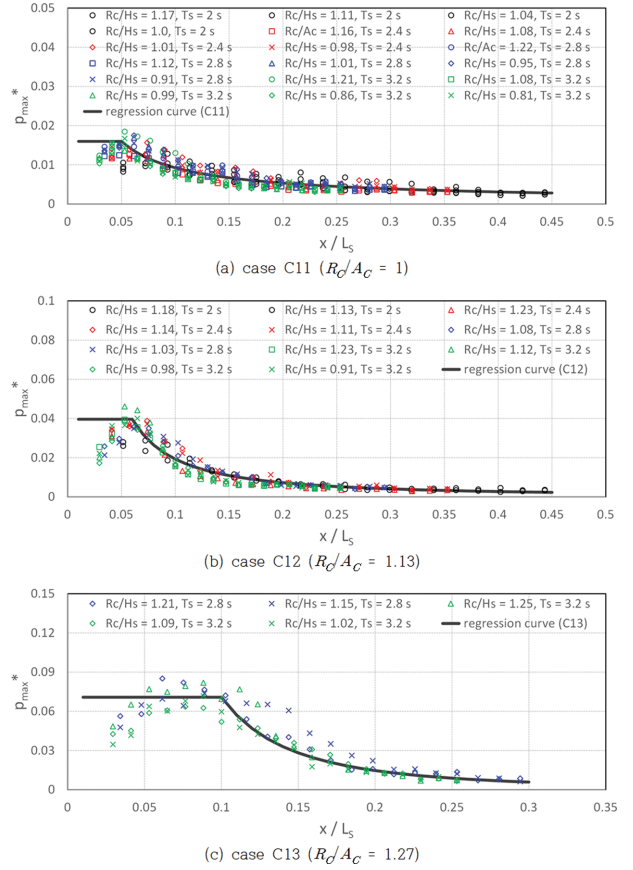


Fig. 11. Relationship between the non-dimensional maximum down-fall pressures (p_{max}^*) and the relative distance (x/L_s) for the present experiment (solid line: regression curve fitting).

귀분석 결과를 도식한 것이다. 최대 낙하파압은 $x/L_s \approx 0.05$ 에서 발생하며, 그 이후부터는 지수적으로 감소하는 경향을 보인다. $x/L_s \geq 0.05$ 의 실험자료를 이용하여 회귀식을 도출하였으며, 회귀식으로부터 도출된 식(2)의 a 와 b 및 적용범위는 식(3)과 같다. $x/L_s \geq 0.05$ 의 실험자료 대상으로 산정된 회귀식의 상관계수(R^2)는 $R^2 = 0.84$ 이다. $x/L_s \leq 0.05$ 구간은 $x/L_s \approx 0.05$ 에서의 무차원 최대 낙하파압을 적용하였다.

$$p_{max}^* = 0.00150(x/L_s)^{-0.79} \quad \text{for } R_c/A_c = 1 \text{ and } x/L_s \geq 0.05 \quad (3)$$

$$p_{max}^* = 0.016 \quad \text{for } R_c/A_c = 1 \text{ and } x/L_s \leq 0.05$$

Fig. 11(b)는 C12 실험안($R_c/A_c = 1.13$)에 대한 실험결과와 회귀분석 결과를 도식한 것이다. 최대 낙하파압은 $x/L_s \approx 0.06$ 에서 발생하며, 그 이후부터는 지수적으로 감소하는 경향을 보인다. $x/L_s \geq 0.06$ 의 실험자료를 이용하여 회귀식을 도출하였으며, 회귀식으로부터 도출된 식(2)의 a 와 b 및 적용범위는 식(4)와 같다. $x/L_s \geq 0.06$ 의 실험자료 대상으로 산정된 회귀식의 상관계수(R^2)는 $R^2 = 0.91$ 이다. $x/L_s \leq 0.06$ 구간은 $x/L_s \approx 0.06$ 에서의 무차원 최대 낙하파압을 적용하였다.

$$p_{max}^* = 0.00075(x/L_s)^{-1.41} \quad \text{for } R_c/A_c = 1.13 \text{ and } x/L_s \geq 0.06 \quad (4)$$

$$p_{max}^* = 0.016 \quad \text{for } R_c/A_c = 1.13 \text{ and } x/L_s \leq 0.06$$

Fig. 11(c)는 C13 실험안($R_c/A_c = 1.27$)에 대한 실험결과와 회귀분석 결과를 도시한 것이다. C11과 C12 실험안에 비해 무차원 낙하파압의 분산도가 상대적으로 높으며, 이는 파라펫의 높이가 높음으로 인해 월파수괴의 처오름이 증가한 후 낙하함에 따라 배후면에서의 낙하 후 변동성이 크기 때문으로 판단된다. 최대 낙하파압이 발생하는 구간이 $0.05 \leq x/L_s \leq 0.1$ 로 나타났으나 $x/L_s \geq 0.1$ 의 실험자료를 이용하여 회귀식을 도출하였으며, 회귀식으로부터 도출된 식(2)의 a 와 b 및 적용범위는 식(5)와 같다. $x/L_s \geq 0.1$ 의 실험자료 대상으로 산정된 회귀식의 상관관계수(R^2)는 $R^2 = 0.91$ 이다. $x/L_s \leq 0.1$ 구간은 $x/L_s \approx 0.1$ 에서의 무차원 최대 낙하파압을 적용하였다.

$$\begin{aligned} p_{max}^* &= 0.00038(x/L_s)^{-2.27} & \text{for } R_c/A_c = 1.27 \text{ and } x/L_s \geq 0.1 & (5) \\ p_{max}^* &= 0.071 & \text{for } R_c/A_c = 1.27 \text{ and } x/L_s \leq 0.1 \end{aligned}$$

Fig. 11을 살펴보면, 본 실험조건내에서 파라펫의 높이가 증가(R_c/A_c 가 증가)함에 따라 최대 낙하파압이 증가하고, 최대 낙하파압이 발생한 지점 이후의 낙하파압은 파라펫의 높이가 증가할수록 급격히 감소하는 경향을 보인다. 즉, 월파저감을 위해 설치되는 파라펫은 월파저감에는 효과적일 수 있지만 배후면의 낙하파압을 증가시키는 방향으로 작용하게 된다. 최대 낙하파압 발생지점 이후에는 상치콘크리트로부터 멀어질수록 낙하파압은 감소하는 것으로 나타났다.

Ko et al.(2022)은 본 연구와 유사한 실험을 수행하여 최대 낙하파력을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. Ko et al. (2022)이 수행한 실험에서 낙하파압을 계측한 구간이 상대적으로 좁음으로 인해 계측된 낙하파압 전체를 평균하여 배후면 전체에 작용하는 최대 낙하파력 산정식을 제안하였다. 따라서 상치콘크리트로부터의 이격거리에 따른 낙하파압의 변화와 감소현상을 고려하기는 어렵다. 본 연구에서는 이격거리에 따른 낙하파력의 변화를 고려할 수 있도록 한 것이 큰 차이점이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 3에 도시된 경사식구조물 상치콘크리트 높이(R_c)와 피복재 높이(A_c)의 비(R_c/A_c)를 $R_c/A_c = 1, 1.13$ 및 1.27 조건을 적용하여 낙하파압 실험을 수행하고 최대파압산정식을 제안하였다. 따라서 본 연구의 제안식은 $R_c/A_c = 1 \sim 1.27$ 범위의 조건에 적용하는 것이 타당하고, 실험범위내이지만 실험조건에 부합되지 않는 R_c/A_c 조건의 경우에는 제안식으로 계산된 파압을 보간하여 적용할 수 있다(예, $R_c/A_c = 1.05$ 의 경우에 $R_c/A_c = 1$ 과 $R_c/A_c = 1.13$ 의 파압을 보간하여 적용). 그러나 실험조건 범위를 벗어나는 경우에는 별도의 수리실험을 수행하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 상치콘크리트 선단으로부터 월파된 월파수괴가 낙하하면서 배후면에 작용하는 최대 낙하파압을 산정할 수 있는 실험을 수행하고, 경험

식을 제안하였다. 일반적으로 월파저감을 위해 설치되는 파라펫은 평균 월파량의 저감에는 효과가 있을 수 있으나 처오름을 증가시킴에 따라 월파수괴에 의한 낙하파압은 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 경사식구조물을 대상으로 제안한 월파수괴에 의한 최대 낙하파압 산정 경험식은 상치콘크리트 높이와 피복재 높이의 비 및 상치콘크리트 선단으로부터의 이격거리에 따른 영향을 고려할 수 있다. 월파수괴의 낙하파압에 대한 배후면의 설계기법은 정립되어 있지 않지만, 낙하파압을 산정할 수 있는 경험식이 제안됨에 따라 설계기법의 정립도 기대할 수 있다.

본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 월파수괴가 배후면에 낙하할 때 작용하는 파압을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. 향후 경사식구조물 전면에 피복되는 피복재의 어께폭 변화에 따른 낙하파압과 직립식구조물을 대상으로 한 낙하파압에 대한 연구도 필요하며, 이에 대해서는 추후 결과를 제시하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20180323)으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Aniel-Quiroga, Í., Vidal, C., Lara, J.L. and González, M. (2019). Pressures on a rubble-mound breakwater crown-wall for tsunami impact. *Coastal Engineering*, 152, 543-558.
- Chen, X., Hofland, B., Altomare, C., Suzuki, T. and Uijttewaalt, W. (2015). Forces on a vertical wall on a dike crest due to overtopping flow. *Coastal Engineering*, 95, 103522.
- EurOtop (2018). Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and related Structures. Second Edition.
- Ko, H.S., Lee, J.Y., Jang, S.C. and Oh, S.H. (2022). Experimental investigation of wave force on the pavement behind crown wall of rubble mound seawall. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 34(1), 19-25 (in Korean).
- KOCED (2019). Wave setting up technique for physical model test of harbor and coastal engineering field, SPS-F KOCED 0004-7382:2019 (www.standard.go.kr) (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2017). Design Standards for Harbours and Fishing Ports in Korean (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*, 80, 137-147.
- Pedersen, J. (1996). Wave forces and overtopping on crown walls

of rubble mound breakwaters. Ph.D. thesis, Series paper 12, ISBN 0909-4296 Hydraulics & Coastal Engineering Lab., Dept. of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.

Wolters, G, Müller, G, Bruce, T. and Obhrai, C. (2005). Large-scale experiments on wave downfall pressures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Maritime Engineering, 158, 137-145.

Received 15 March, 2022

Revised 6 April, 2022

Accepted 6 April, 2022