

경사식 호안 상부구조물 배후 포장체에 작용하는 파력에 대한 실험적 연구 Experimental Investigation of Wave Force on the Pavement behind Crown Wall of Rubble Mound Seawall

고행식* · 이주연** · 장세철*** · 오상호****

Haeng Sik Ko*, Jooyeon Lee**, Se-Chul Jang*** and Sang-Ho Oh****

요지 : 수리모형실험을 통해 경사식 호안 배후면 포장체 상부면에 작용하는 월파력과 하부면에 작용하는 양압력을 계측하고 설계에 활용 가능한 경험식을 제안하였다. 상부구조물의 파라펫, 수심, 상대여유고 및 소파블록 피복두께 조건을 다르게 실험을 수행하여 경사식 호안 상부구조물 및 배후 포장체에 작용하는 파력을 분석하였다. 이를 통해 월파에 의한 파력과 양압력에 영향을 미치는 주요 상관변수를 식별하고, 포장체에 작용하는 파력을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

핵심용어 : 경사식호안, 포장체, 월파력, 양압력, 수리모형실험

Abstract : Physical experiments were conducted to establish an empirical formula that predicts the wave force on the upside of the pavement behind crown wall of rubble mound seawall due to wave overtopping as well as the uplift force on the downside of the pavement. The experiments were performed by different conditions of the parapet, water depth, relative freeboard, and thickness of the armour layer. Then, the wave force on the upside and downside of the pavement behind the crown wall was analyzed. The parameters that affect the wave overtopping force and the uplift force were identified and empirical formulae were suggested for evaluating the forces on the pavement.

Keywords : rubble mound seawall, pavement, overtopping force, uplift pressure force, physical model experiment

1. 서 론

호안은 배후면이 육지와 연결된 부지로 이루어져 있으며, 해안침식 및 배후면 상부의 도로 및 건물의 침수피해를 방지하는 목적으로 건설되는 구조물이다. 우리나라 항만 및 어항 설계기준(Ministry of Oceans and Fisheries, 2017)에 제시된 것처럼 호안 설계 시에는 다양한 항목들에 대한 검토가 필요하지만, 특히 파랑에 대한 호안의 안정성 및 허용 월파기준을 만족시키는 것이 중요하다.

호안의 내파 안정성을 검토할 때 국내 설계기준에서는 Goda의 직립벽 파압공식(Goda, 2010)을 준용하는 실정이고, 미국 등 유럽 등지에서는 경사식 방파제에 대한 수리실험을 통해 도출된 공식(Jensen, 1984; Bradbury et al., 1988; Pedersen,

1996)을 적용하고 있다. 이러한 공식들의 세부사항 및 적용 방법에 대해서는 Oh et al.(2014)에 소개되어 있다. 그런데 이러한 공식들에서는 호안의 상부구조물에 작용하는 파력을 산정하는 방법은 제시하고 있지만, 호안 배후의 포장체에 대한 파력 산정 방법은 다루고 있지 않다.

호안 배후의 포장체에 작용하는 파력은 상부구조물에 작용하는 파력에 비해서 상대적으로 그 크기가 작지만 한편으로는 사람들의 생활 및 여러 활동이 이루어지는 공간이므로 설계 시 보다 중요하게 취급될 필요가 있다. 그러나 현재로서는 호안 배후면에 대한 설계 검토는 월파량 측면에서만 주로 수행되고 있으며 포장체에 직접 작용하는 파압에 대해서는 거의 고려되지 못하고 있다.

한편, 월파량의 경우 우리나라 설계지침에 의하면 단순

*한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 선임연구원(Senior Researcher, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

**한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 연구원(Researcher, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

***한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 책임기술원(Principal Research Specialist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

****창원대학교 스마트그린공학부 건설시스템공학전공 부교수(Corresponding author: Sang-Ho Oh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, School of Smart & Green Engineering, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro Uichang-gu Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51140, Korea. Tel: +82-55-213-3779, coast.oh@gmail.com)

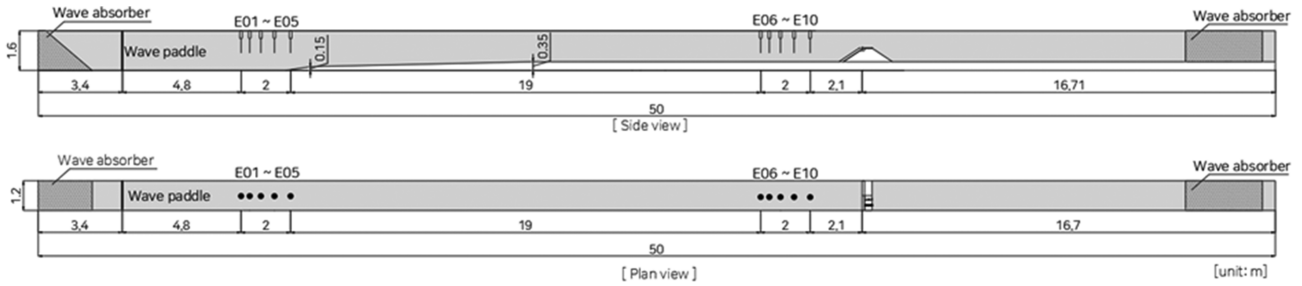


Fig. 1. Schematic diagram of the wave flume and experimental setup (unit: m).

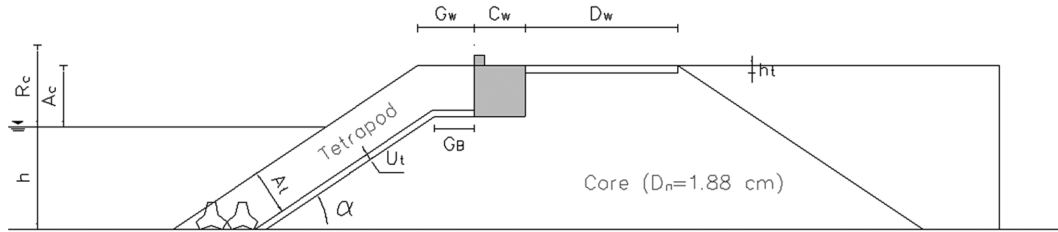


Fig. 2. Schematic diagram showing the geometrical parameters of the model.

한 형상의 상부구조물에 대해서는 Goda 도표(Goda et al., 1975)를 사용하며, 복잡한 단면인 경우에는 수리실험을 통해 유효파랑을 산정하게 된다. 다만, 최근에는 유럽에서 널리 사용되고 있는 설계지침인 EurOtop Manual (EurOtop, 2018)도 설계 현장에서 참고하는 사례가 많아지고 있다. Goda 도표나 EurOtop Manual은 호안 또는 방파제의 유효파랑에 초점을 두고 있기 때문에 호안 배후면 포장체에 작용하는 하중을 산정하는데 사용하기에는 무리가 있다. 게다가 배후면 포장체의 경우에는 제체를 투과한 파 혹은 흐름에 의한 양압력도 고려할 필요가 있으나, 현재까지 이와 관련된 연구는 거의 없는 것으로 파악된다.

이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 경사식 호안 배후면 포장체에 작용하는 유효파력과 양압력을 측정하는 수리실험을 수행하였다. 상부구조물 파라렛의 유무, 구조물 전면 수심, 상대여유고 및 소파블록 피복두께 조건을 변화시키면서 실험을 수행하여 포장체에 작용하는 파압을 계측하였다. 실험자료로부터 경사식 호안 및 배후면 포장체에 작용하는 최대파압 분포 패턴을 분석하고 파력에 영향을 미치는 주요한 인자를 식별해 내었다. 그리고 이러한 분석 결과를 토대로 경사식 호안 배후면 포장체에 상부면에 작용하는 유효파력과 하부면에 작용하는 양압력에 대한 경험식을 제안하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 실험모형

실험은 한국해양과학기술원 수리실험동의 길이 50 m, 너비 1.2 m, 높이 1.6 m인 2차원 단면 조파수조에서 수행하였다. 조파수조 상류부에는 파를 생성하면서 동시에 반사파를 능동적으로 흡수하는 기능이 통합된 피스톤식 조파기가 장착되어 있

고, 하류부에는 반사파를 수동적으로 제어하는 다공성 소파 구조물이 놓여있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 조파수조의 상류부로부터 10~20 m 구간에서 저면경사가 존재하는데, 이는 외해에서 입사하는 파랑이 수심이 얕은 연안으로 진행하면서 발생하는 천수 또는 쇄파 등의 물리적인 파랑변화를 고려하기 위함이다. 한편, 경사식 호안은 조파수조 상류부로부터 33.3 m 떨어진 곳에 설치하였다.

Fig. 2는 경사식 호안 모형과 매개변수에 대한 정의를 보여준다. 사석으로 구성된 마운드 위에 아크릴 재질의 상부구조물과 포장체 배후면이 설치되었고, 사석 마운드의 전면 경사는 1:1.5였으며, 마운드 전사면은 평균 중량 30 g의 사석층 및 중량 250 g의 테트라포드로 피복되었다.

실험모델에서 상부구조물의 폭(C_w)은 0.10 m, 배후면 포장체의 폭(D_w)은 0.30 m, 체체사석의 어깨폭(G_b)은 0.078 m, 중간피복층 높이(U_f)는 0.012 m, 배후면 포장체 두께(h_f)는 0.015 m, 사면경사는 1:1.5로 변함이 없었다. 한편, 수심(h), 정수면에서 피복재 상단까지 높이(A_c), 피복재 어깨폭(G_w), 여유고(R_c), 피복층의 두께(A_f)는 Table 1과 같이 다양하게 설정하였다. 이러한 실험 조건에서 상대여유고(R_c/H_s)는 0.7~2.4 범위의 값을 가지게 된다.

2.2 계측기기 및 실험 방법

과고계는 조파관 근처(E01~E05)와 경사식 호안 구조물 전면(E06~E10)에 각각 5개씩 설치하여 외해 파랑과 구조물에 입사하는 파랑을 계측하였다. 계측된 파랑 자료로부터 Lykke Andersen et al.(2017)의 방법을 이용하여 경사식 호안에 입사하는 파랑을 분리해 내어 자료 분석에 이용하였다. 첨두중대계수(γ)가 3.3인 JONSWAP 스펙트럼을 따르는 불규칙파를 생성하였고, 조파된 파의 총 개수(N)는 1000개로 설정하였다.

Table 1. Geometrical parameters of the test models

Case ID	Tetrapod layer	h [m]	A_c [m]	R_c [m]	G_W [m]	A_t [m]
D40L02C01	2	0.40	0.15	0.15	0.11	0.089
D40L02C02				0.19		
D45L02C01				0.10		
D45L02C02				0.14		
D20L02C01	2	0.20	0.12	0.12		
D20L02C02				0.16		
D25L02C01				0.07		
D25L02C02				0.11		
D40L04C01	4	0.40	0.15	0.15	0.22	0.178
D45L04C01				0.10		
D20L04C01				0.12		
D25L04C01				0.07		

Table 2. Incident wave conditions

T_s [s]	H_s [m]			
1.4	0.08	0.10	0.12*	0.14*
1.8				
2.2				

* only when $h = 0.40$ and 0.45 m

유의파 주기(T_s)는 1.4~2.2 s 범위에서 0.4 s 간격으로 달리하였고, 유의파고(H_s)는 수심(h)이 0.20 m, 0.25 m에서는 각 주기별로 0.08 m 및 0.10 m의 두 조건으로, 수심(h)이 0.40 m 및 0.45 m에서는 0.08 m~0.14 m 범위내에서 0.02 m 간격으로 변화시켰다. Table 2에 실험과 조건을 정리하여 제시하였다.

경사식 호안 상부구조물의 형태는 파라펫의 유무에 따라 2가지 종류로 구분되는데, 상부구조물 전면에는 파라펫 유무에 따라 3대 혹은 5대의 파압계를 설치하였다. 또한, 상부구조물 저면에도 1대의 파압계를 설치하였다. 한편, 호안 배후면 포장체 상부판에는 월파 압력 계측을 위한 파압계 6대를, 하부판에는 양압력 계측을 위한 파압계 6대를 각각 설치하였으며(Fig. 3 참조), 파압 계측자료의 독취 시간간격은 200 Hz 였다.

3. 상부구조물에 작용하는 수평파력 비교

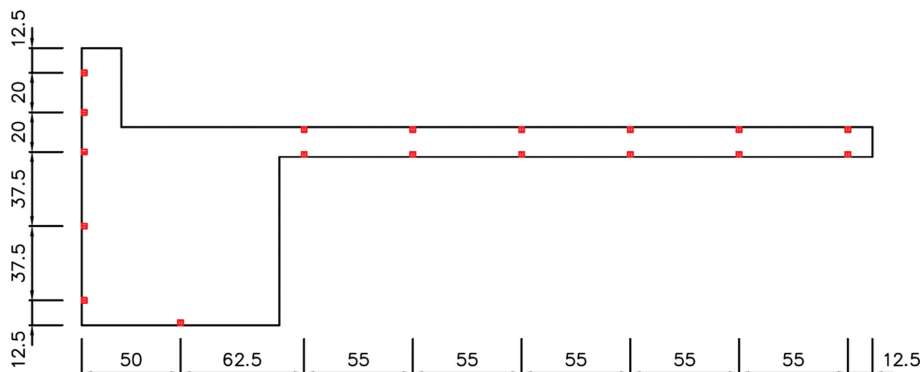
Pederson(1996)은 입사파의 0.1%를 초과하는 가상 처오름 높이에 근거하여 경사제 상부구조물 작용하는 수평 파력에 대한 식을 노출부($F_{hu, 0.1\%}$)와 피복부($F_{hl, 0.1\%}$)에 대해 나누어 다음과 같이 제안하였다.

$$F_{h, 0.1\%} = F_{hu, 0.1\%} + F_{hl, 0.1\%} = a \sqrt{\frac{L_{mo}}{G_W}} b p_m y_{eff} + \frac{1}{2} a \sqrt{\frac{L_{mo}}{G_W}} V p_m h_{prot} \quad (1)$$

여기서, G_W 는 피복재 어깨폭이고 L_{mo} 는 스펙트럼 평균주기로부터 구한 심해파 조건의 파장이다. p_m 는 초과확률 0.1%에 대응되는 처오름높이($R_{u, 0.1\%}$)로부터 계산된 수평파압으로 다음과 같이 계산된다.

$$p_m = \rho g (R_{u, 0.1\%} - A_c) \quad (2)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도이다. y_{eff} 는 수평파압 계산에 사용되는 노출부 영향고로서 처오름높이 켤레 두께(y)의 절반값과 $R_c - A_c$ 값 중에 최소값을 사용한다. V 는 Pedersen(1996) 식에 의해 정의되는 형상파라미터, h_{prot} 는 피복부로 덮여진 상부구조물의 연직거리에 해당한다. 그리고

**Fig. 3.** Positions of pressure transducers on the superstructure and the pavement (unit: mm).

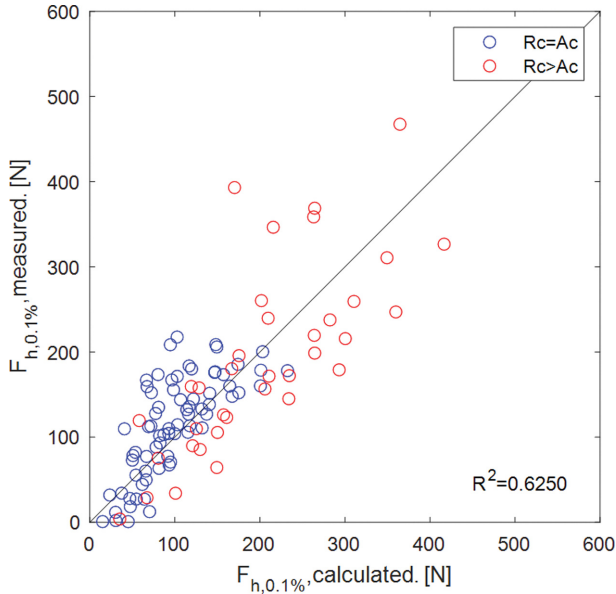


Fig. 4. Comparison of horizontal wave forces between the present measurement and the formula by Nørgaard et al. (2013).

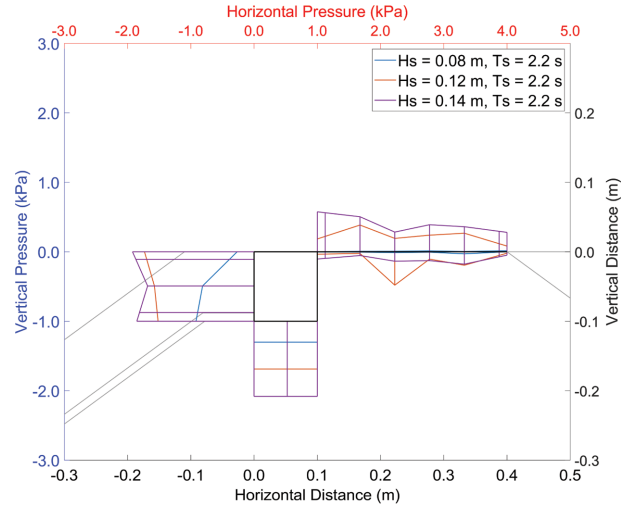
a 와 b 는 경험적인 계수로 Pedersen(1996)은 0.21과 1.6을 제안하였고, Nørgaard et al.(2013)은 천수영향을 고려하여 $R_c - A_c > 0$ 인 경우에 대해서 0.21과 1.0의 수정된 계수를 제안하였다. 본 연구에서는 천수영향을 고려한 Nørgaard et al.(2013)이 제안한 경험적인 계수를 이용하여 경사식 호안 상부구조물에 작용하는 수평파력의 실험결과를 상부구조물이 완전 피복된 경우($R_c = A_c$)와 부분 피복이 된 경우($R_c > A_c$)에 대해서 구분하여 Fig. 4에 나타내었다. 전체 데이터에 대한 결정계수는 0.63으로 파압 계측 결과인 점을 고려하면 상관관계가 비교적 높음을 알 수 있었다.

4. 최대파압 분포

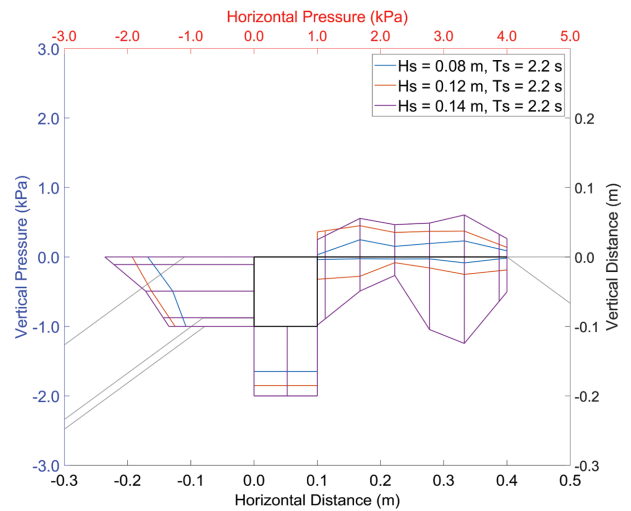
계측된 시계열 파압분포로부터 최대값을 추출하여 경사식 호안 및 배후면 포장체에 작용하는 파압분포를 그래프로 나타내고 실험 조건을 구성하는 여러 매개변수들과의 연관성을 살펴보았다. 그리고 이를 통해서 경사식 호안 배후 포장체에 작용하는 월파력과 양압력의 경험식을 도출해 내고자 하였다.

Fig. 5에는 수심이 서로 다른 경우 입사파의 유의파고 증가에 따른 최대 파압분포 영향을 비교하는 그래프를 나타내었다. 유의파고 증가에 따라서 호안 전면벽에 작용하는 최대 수평파압은 커지며, 호안 배후면 포장체에 작용하는 월파압과 양압 또한 커짐을 확인할 수 있다. 한편, 유의파고는 동일하면서 수심이 더 깊을 경우 수평파압, 양압 및 월파압이 더 커지는 경향이 나타났다. 특히, Fig. 5(a)에서 유의파고가 가장 작은 조건에서는 호안 배후면 포장체에 작용하는 월파압과 양압은 거의 계측되지 않았다.

Fig. 6에는 파라펫 설치 유무에 따라 경사식 호안 상부구



(a) $h=0.40$ m



(b) $h=0.45$ m

Fig. 5. Comparison of the maximum wave pressure distribution with $T_s = 2.2$ s according to increase of the significant wave height for different water depths (blue: $H_s = 0.08$ m; orange: $H_s = 0.12$ m; purple: $H_s = 0.14$ m).

조물 및 배후면에 작용하는 최대파압 분포를 비교하여 나타내었다. 파라펫 설치 시 호안 배후면에 작용하는 월파압이 감소함을 확인할 수 있다. 다만, 호안 전면부에 작용하는 최대 수평파압은 파라펫 구간에 추가적으로 작용하게 되므로 파라펫 전면부 전체에 걸쳐 분포되는 형태로 나타남을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 7에는 파라펫이 설치되어 있는 조건에서 수심이 가장 깊고 주기도 가장 긴 경우에 대한 결과를 나타내었다. Fig. 5(b)와 비교했을 때 수평파압과 양압은 다소 증가하는 반면, 월파압은 극단적으로 매우 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이것은 파가 파라펫에 강하게 부딪친 후 높이 솟구쳐 올라서 배후면에 자유낙하하기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 8에는 소파블록이 4층적으로 피복된 경우의 최대파압

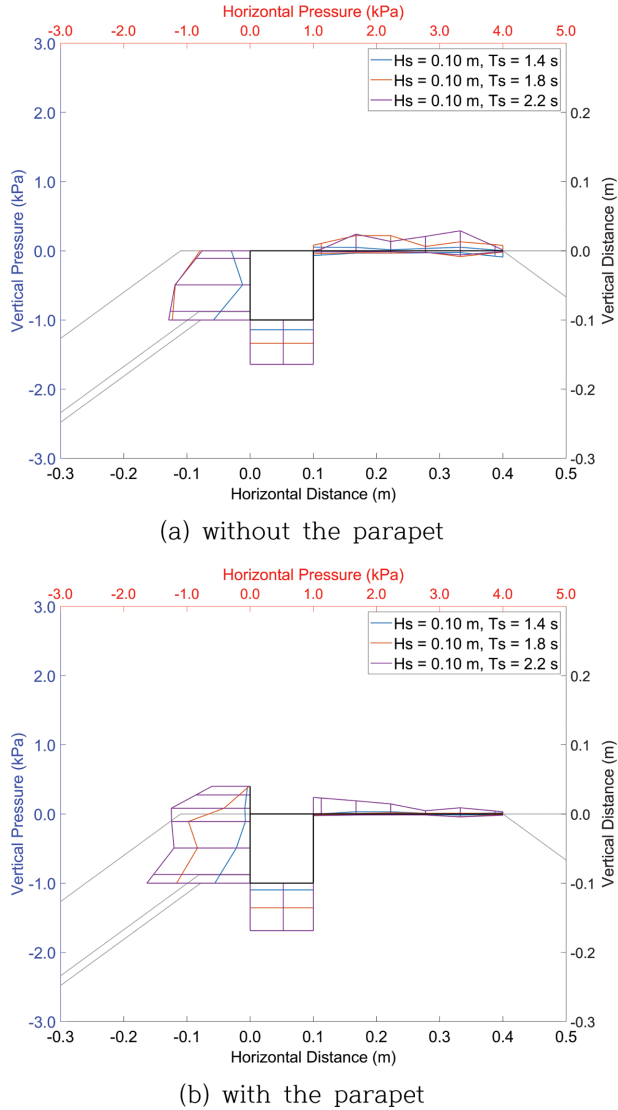


Fig. 6. Comparison of the maximum wave pressure distribution with and without installation of the parapet when $h = 0.40$ m and $H_s = 0.10$ m (blue: $T_s = 1.4$ s; orange: $T_s = 1.8$ s; purple: $T_s = 2.2$ s).

분포도를 나타내었다. 소파블록이 2층적으로 피복된 경우의 결과인 Fig. 5(b)에 비해서 호안 상부구조물 및 배후면에 작용하는 수평파압, 양압, 월파압이 모두 전반적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 특히 호안 배후면에 작용하는 양압은 월파압에 비해서 상대적으로 더 크게 감소하였다.

5. 경험식 제안

5.1 호안 배후면 포장체에 작용하는 월파력

호안 배후면 포장체에 작용하는 월파압은 최대파압분포도를 통해서 고찰한 것처럼 입사파 조건에 따라 크게 달라진다. 특히 파라렛이 설치된 경우에는 파압이 저감되기도 하고, 또 경우에 따라서는 파라렛 높이보다 훨씬 높이 월파수가 튀어 올랐다가 낙하하면서 포장체에 큰 파압을 작용시키기도 하였다.

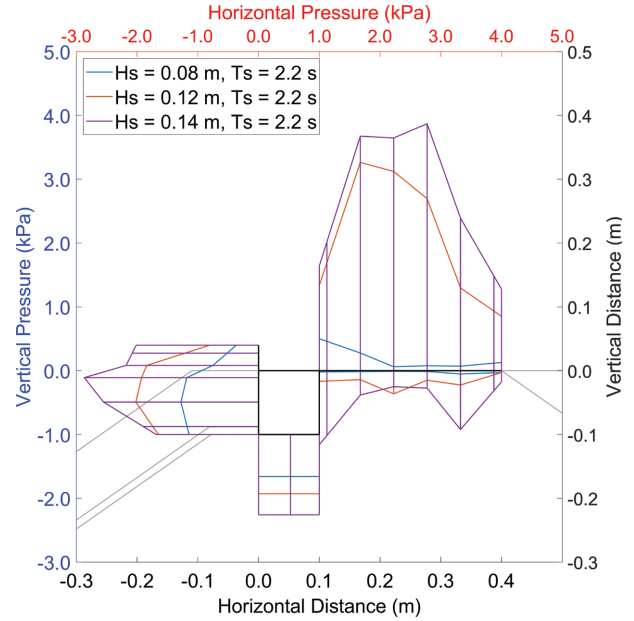


Fig. 7. An example of extremely large wave pressure on the pavement when $h = 0.45$ m (blue: $H_s = 0.08$ m; orange: $H_s = 0.12$ m; purple: $H_s = 0.14$ m).

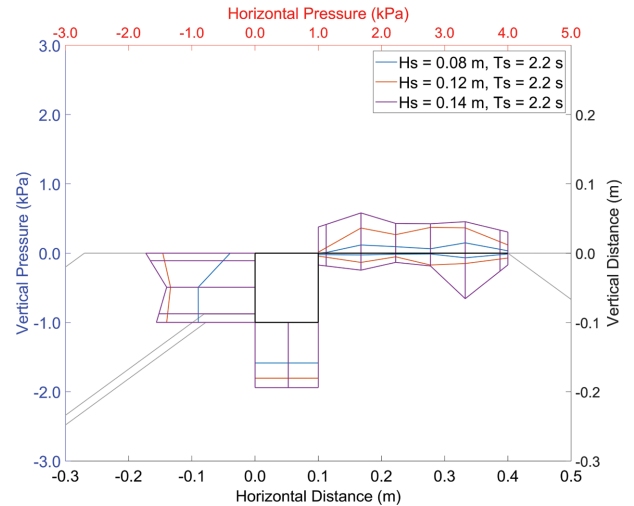


Fig. 8. The maximum wave pressure distribution with installation of four layers of Tetrapods when $h = 0.45$ m (blue: $H_s = 0.08$ m; orange: $H_s = 0.12$ m; purple: $H_s = 0.14$ m).

이러한 점을 고려하여 다양한 무차원화 파라미터를 도입하여 정량화를 시도하였으며, Fig. 9에 나타난 것처럼 R_c , G_W/L_{mo} 및 H_s/h 를 주요인자로 설정하였을 때 비교적 일관된 경향성을 나타내는 것을 확인하였다. Fig. 9에서 $R_c/A_c = 1$ 인 조건은 파라렛이 설치되지 않은 경우에 해당하며, $R_c/A_c > 1$ 인 조건은 파라렛이 설치된 경우이다. Fig. 9에 나타난 실선은 이 두 그룹의 데이터를 각각 지수함수 형태로 회귀분석하여 가장 좋은 결과를 나타내었을 때의 추세선이다. 식(3)에는 회귀 분석 결과로부터 얻은 경험식을 각각 제시하였으며, 두 식 중에서는 파라렛이 설치된 경우의 경험식의 상관계수가 상대적으로 더 높게 나타났다.

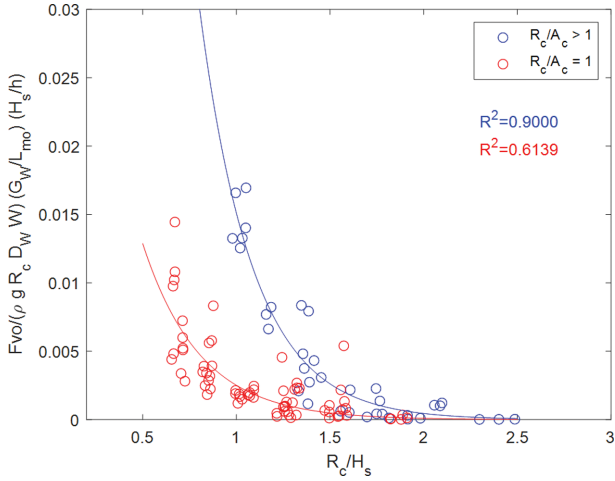


Fig. 9. Relationship between the non-dimensional overtopping forces and R_c/H_s for the data obtained in the present experiment (solid line: exponential curve fitting).

$$F_{vo} = 0.5024 \rho g R_c D_w W \cdot \exp \left\{ -3.504 \frac{R_c}{H_s} \right\} \frac{L_{mo}}{G_w} \frac{h}{H_s}, \text{ if } R_c/A_c > 1 \quad (3)$$

$$F_{vo} = 0.0659 \rho g R_c D_w W \cdot \exp \left\{ -3.266 \frac{R_c}{H_s} \right\} \frac{L_{mo}}{G_w} \frac{h}{H_s}, \text{ if } R_c/A_c = 1$$

여기서 W 는 구조물의 단위폭을 나타내고, D_w 는 배후면 포장체 길이이다. 단, 본 실험 데이터의 범위는 $0.073 \leq D_w/L_{mo} \leq 0.199$ 이므로, 이 범위에 한정하여 식(3)을 적용하는 것이 바람직하다.

5.2 호안 배후면 포장체에 작용하는 양압력

호안 배후면 포장체에 작용하는 양압력에 대해서도 유사한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 단, 이 경우에는 수면으로부터 배후면 포장체 바닥면의 높이($A_c - h_t$), G_w/L_{mo} , H_s/h 를 주요인자로 고려하여 무차원화 분석을 실시하였다. Fig. 10에는 지수함수를 이용한 회귀분석을 통해 얻

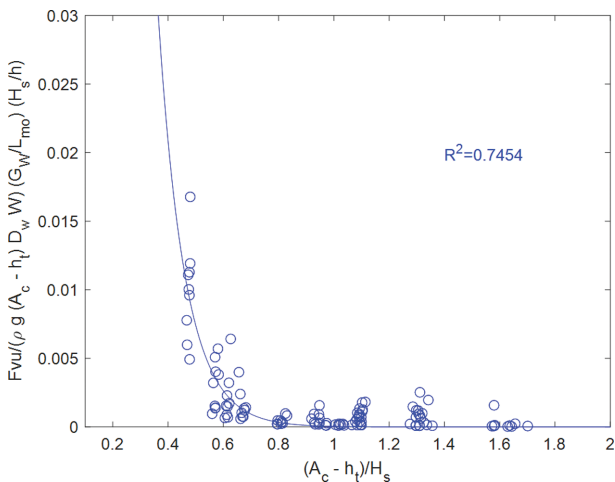


Fig. 10. Relationship between the non-dimensional uplifting forces and $(A_c - h_t)/H_s$ for the data obtained in the present measurement (solid line: exponential curve fitting).

은 최적의 추세선을 함께 나타내었으며, 이 추세선을 나타내는 경험식은 식(4)에 제시하였다. 단, 양압력의 경우에는 상치콘크리트 하단 높이에 따라서 달라질 수 있기 때문에 본 실험과 유사한 단면 형상에 대해서 적용하는 것이 바람직하다.

$$F_{vu} = 1.297 \rho g (A_c - h_t) D_w W \cdot \exp \left\{ -10.33 \frac{A_c - h_t}{H_s} \right\} \frac{L_{mo}}{G_w} \frac{h}{H_s} \quad (4)$$

6. 결 론

본 연구에서는 2차원 수리모형실험을 통하여 경사식 호안 배후면 포장체에 작용하는 월파력과 양압력을 계측하고 실험 자료에 대한 분석을 수행하였다. 취득된 데이터의 검증에 위해 경사식 호안 상부구조물에 작용하는 수평파력을 Nørgaard et al.(2013)의 제안식과 비교하여 높은 상관관계를 확인함으로써 본 실험 데이터의 정확성을 검증하였다. 실험자료 분석을 통해 유의파고 및 유의파주기가 커질 경우 호안 배후면 포장체에 작용하는 월파압과 양압이 유의미하게 증가함을 확인하였다. 파압에 영향을 미치는 인자들에 대한 무차원화 분석을 통해 월파력과 양압력을 예측하는 경험식을 제안하였으며, 향후 경사식 호안 배후면 포장체 설계 및 해석에 활용 가능할 것으로 기대된다. 다만, 이 경험식은 본 실험에서의 단면 및 파랑 조건에서 크게 벗어나지 않는 조건에 대해 적용하는 것이 바람직하며, 체제사석의 공극률에 따른 영향 등을 검토하기 위한 추가적인 연구도 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원(KIMST)의 “재해안전항만 구축 기술개발(PM62370)” 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bradbury, A.P., Allsop, N.W.H. and Stephens, R.V. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls. Rep. SR146, HR Wallingford, UK.
- EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related Structures. Second Edition.
- Goda, Y. (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific Publishing Co., Singapore.
- Goda, Y., Kishira, Y. and Kamiyama, Y. (1975). Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves. Technical Report of Port and Airport Research Institute, 14(4), 3-44.
- Jensen, O.J. (1984). A monograph on rubble mound breakwaters. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Lykke Andersen, T., Eldrup, M.R. and Frigaard, P. (2017). Estimation of incident and reflected components in highly nonlinear

- regular waves. *Coastal Engineering*, 117, 51-64.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2017). Design Standards for Harbours and Fishing ports in Korea (in Korean).
- 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.
- Oh, S.-H., Oh, Y.M., Yeo, B.-G. and Han, T.-Y. (2014). A case study of comparing formulae for estimating horizontal wave force on crown wall of sloping breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, 1(1), 28-35 (in Korean).
- Pedersen, J. (1996). Wave forces and overtopping on crown walls of rubble mound breakwaters: an experimental study. Ph.D Thesis, Aalborg University. Denmark.
-
- Received 6 January, 2022
Revised 20 February, 2022
Accepted 21 February, 2022