

상대적으로 급한 경사 수심을 갖는 직립식 호안에서 충격파 조건에 대한 월파량 산정 수리실험

Physical Model Test for Wave Overtopping for Vertical Seawall with Relatively Steep Bottom Slope for the Impulsive Wave Condition

김영택* · 이종인**

Young-Taek Kim* and Jong-In Lee**

요 지 : 월파량은 항만구조물의 마루높이 산정 및 구조물 배후 시설물의 활용 등과 관련된 중요한 설계요소이다. 본 연구에서는 상대적으로 급한 전면 경사수심에 설치된 직립식 호안의 월파량 산정에 대한 수리실험을 수행하였다. 급한 경사면의 수심을 가지는 동해안의 대상 해역 2곳을 선정 후 각각을 단면수로에 재현하였다. 각각의 대상해역 별로 다양한 수심 및 파랑 조건에 대하여 월파량을 계측하였다. 특히 충격파 조건에 대한 월파량 산정결과를 기존 연구성과와 비교하였으며, 유사한 월파량 분포 경향이 나타나는 것을 알 수 있었다. 실험결과를 통해 직립식 구조물의 경우에는 전면 경사의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었으며, 향후 EurOtop 등의 적용시 이에 대한 검토가 필요할 것이다.

핵심용어 : 직립식 구조물, 수리실험, 월파량, 급한 경사 수심, 충격파조건

Abstract : Wave overtopping rate is one of the most important design parameters for coastal structures. In this study, the physical model tests for measuring the wave overtopping have been conducted with the foreshore slope in front of the seawall. The bottom seabed for the coastal road area was fabricated at the wave flume for two areas in the East sea areas. The wave overtopping rate was measured for various water depths and wave conditions in each coastal area. In particular, the impulsive wave conditions were compared with the previous research and the similar trends of wave overtopping was observed. It could be known that the effect of foreshore slope was significant and should be concerned for applying these formula like EurOtop.

Keywords : vertical structure, physical model test, wave overtopping, steep bottom slope, impulsive condition

1. 서 론

우리나라의 경우에 하절기 태풍에 의한 수위상승 및 고파랑 내습, 동절기 계절풍 등에 의한 고파랑 내습으로 인해 항만구조물 및 해안가 등에서 월파가 빈번하게 발생한다. 최근 국내에 내습한 태풍 마이삭(2020), 하이선(2020), 힌남노(2022) 등으로 인하여 해안가에 상당량의 월파가 발생하였고, 이로 인해 내측 시설물에 많은 피해가 발생하였다. 특히 해안가의 경우, 배후지에 민가 등의 시설이 위치하고 있어 월파 발생시 인명피해 및 재산피해가 발생할 수 있다. 일반적인 방파제 및 방파호안과 같은 구조물은 상대적으로 수심이 확보되는 구간에 설치되지만, 호안과 같은 시설물은 전면에서 급한 경사를 갖는 직립식 구조물이 많이 적용되고 있다. 이

와 같이 상대적으로 수심이 확보되는 구간에 설치된 직립식에 대한 월파량과 구조물 전면에서 상대적으로 급한 경사를 갖는 직립식 호안에서의 월파량에는 차이가 있을 것으로 생각된다.

국내의 경우, 항만구조물의 마루높이 설계를 위하여 설계 파고에 대한 상대적인 마루높이, 배후 부지 특성 및 이용성 등을 고려한 허용평균월파량을 적용하고 있으며(MOF, 2017), 현재까지도 월파량 산정을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 유럽의 경우, van der Meer et al.(2018)이 제시한 EurOtop을 중심으로 월파량 산정기준이 정리되고 있는 것으로 판단된다. EurOtop은 2007년 처음 제시되었으며 당시에는 상대적으로 심해조건에 대한 결과를 제시하였으나, 2018년 개정 시에는 연구성과(Altomare et al., 2016)를 추가하여 천해에

*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원(Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Corresponding author: Jong-In Lee, 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)

서도 적용할 수 있도록 제안식이 개선되었다. 또한 van der Meer and Bruce(2014)의 연구성과를 토대로 EurOtop의 충격과 조건에 대한 결과가 수정되었다. 최근 국내에서는 Kim et al.(2022)이 단면수리실험 및 OLAfoam을 이용한 수치실험으로 월파량을 산정하였고, 직립제를 대상으로 비충격과 조건의 결과를 비교하였다.

본 논문에서는 Kim et al.(2022)이 제시한 비충격과 조건의 결과에 대한 추가 분석과 다른 대상해역에서의 월파량 계측 결과를 분석하였다. 본 연구에 적용된 구조물은 구조물 전면에 충분한 수심이 확보되는 외곽시설이 아닌 해안도로와 같이 구조물 전면의 수심이 낮고 상대적으로 급한 경사를 갖는 해역에 설치된 직립식 호안이다. 따라서 낮은 수심 및 급한 경사로 인해 쇄파 등에 의한 영향을 받는 조건이다. 포항 및 부산 등 동해안에 위치한 해안도로 2곳을 대상지역으로 설정한 후 각각의 지역에 대한 수심형상을 실험수로 재현한 후 다양한 수심 및 파랑 조건을 적용하여 월파량 계측 실험을 수행하였다. 그리고 전면 경사의 영향을 고려한 비충격과와 충격과 조건에 대한 월파량을 비교하였다. 특히 본 논문에서는 충격과 조건에서의 직립제를 대상으로 한 월파량을 검토 및 분석하였다.

2. 수리 모형실험

2.1 실험장비

수리모형실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.0 m, 높이 2.0 m, 길이 56 m의 단면수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 그리고 단면수로의 폭 1.0 m는 폭 0.6 m와 폭 0.4 m로 분할되어 있으며, 분할된 수로에서 실험모형은 폭 0.6 m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다. 또한 흡수식 조파를 실시하여 구조물 및 조파기에서 재반사를 최소화하였다. Fig. 1에서 1번 파고계는 흡수식 조파, 2번과 3번 파고계는 반사계수 및 입사파 측정, 4번과

5번 파고계는 협수로에서 호안도로 위치에서의 입사파 계측에 이용되었다. 2번과 3번, 4번과 5번의 파고계 간격은 2점법을 적용하였으며, 입사파 주기 조건에 따라 적절하게 조절하였다. 실험에 적용된 조파시설 및 장치는 Kim et al.(2022)과 동일하다.

2.2 실험조건

수리모형실험을 위하여 대상해역 2곳에 대해 직립식 호안 전면 해역의 수심 측량을 실시하였다. 측량성과를 이용하여 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 실험수로 내의 가용한 범위 내에서 수심을 재현하였다. 실험에 적용된 측척은 1/10이며, Froude상사법칙을 적용하여 실험조건을 설정하였다.

대상해역 1(포항시 북구 지경리 해안)의 경우, Fig. 2와 같이 실험수심은 원형상으로 호안도로 기준선에서 전면 해역 약 200 m 범위까지 재현하였다. 실제 해역의 경우에는 호안 전면에 암반 지형과 자갈 사면이 존재하지만 수리실험에서는 고정상으로 재현하였다(Fig. 2(b) 참조). 실제 해역의 해저경사는 실험수로내 1/40 경사면과 거의 일치하며, 약최저저조위(App.LLW) DL(±)0.00 m에서 원형상 수심은 5.6 m에 해당한다(Fig. 2(c) 참조). 대상해역 1에 대한 조건은 Kim et al.(2022)과 동일하다.

대상해역 2(부산광역시 기장군 연화리 해안)의 경우, Fig. 3과 같이 실험수심은 원형상으로 호안도로 기준선에서 전면 해역 약 90 m 범위까지 재현하였고, 이후 수심은 수로경사면(경사 1/40)을 적용하였다. 이는 호안도로 전면 약 40 m 구간은 상대적으로 급한 경사면을 갖고 있으나 이후는 매우 완만한 경사면 형태의 지형을 갖고 있는 것으로 측량결과가 제시되었기 때문이다. 실험수로에서 이러한 조건을 모두 재현하는 것은 어려우므로 일부 구간은 현장 수심조건을 재현하고 그 이후 구간은 실험수로 내의 1/40 경사면과 연결하였다(Fig. 2(c) 참조). Fig. 3(b)를 살펴보면 대상해역 1과 마찬가지로 실제 해역에서는 호안 전면이 암반지형과 자갈 사면으로 구성되어 있지만 실험에서는 고정상으로 재현하였다. 약최저저조위(App.LLW) DL(±)0.00 m에서의 원형상 수심은

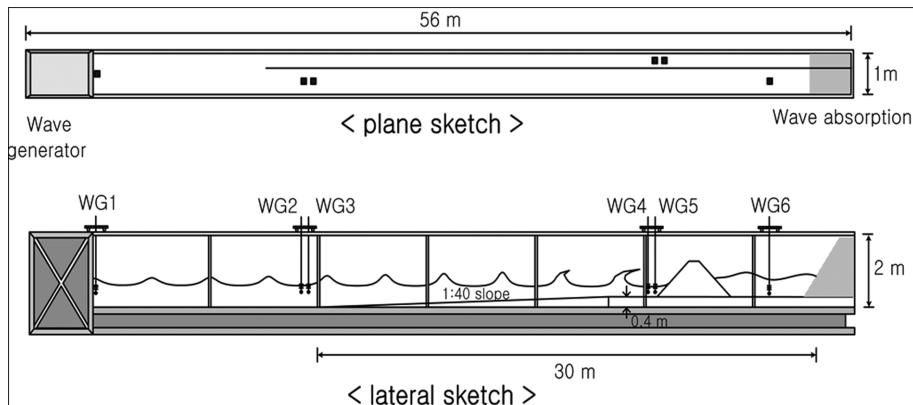
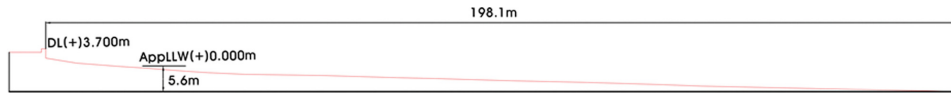


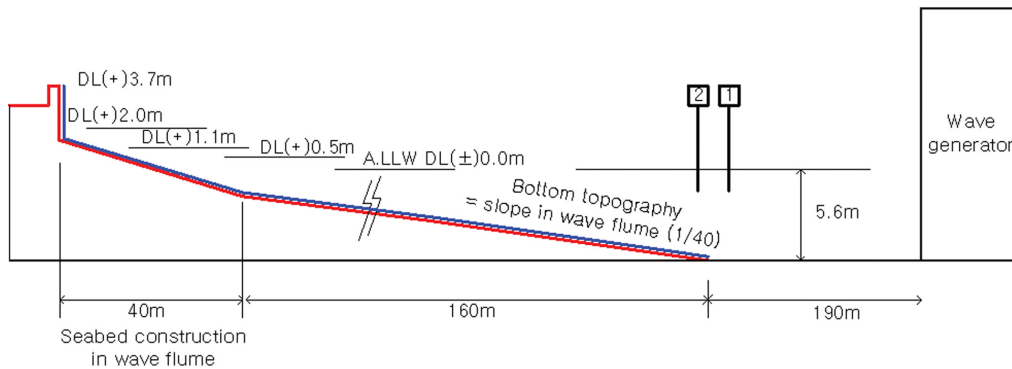
Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.



(a) sea bottom survey



(b) photo for site 1



(c) schematic sketch of seabed generation in wave flume



(d) photo for model seabed construction

Fig. 2. Sea bottom topography and photos for fabrication of seabed for test site 1.

6 m에 해당한다.

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용한 불규칙파를 적용하였으며, 적용된 수심, 조위 및 파랑 조건은 Table 1과 같다.

2.3 실험 방법

Table 1에 제시된 실험조건을 적용하여 실험파를 설정하였다. 실험파 설정을 위하여 Fig. 2(c)와 Fig. 3(c)와 같이 파고계를 설치하였다. 대상해역 1에 대한 실험의 경우, 실험수로

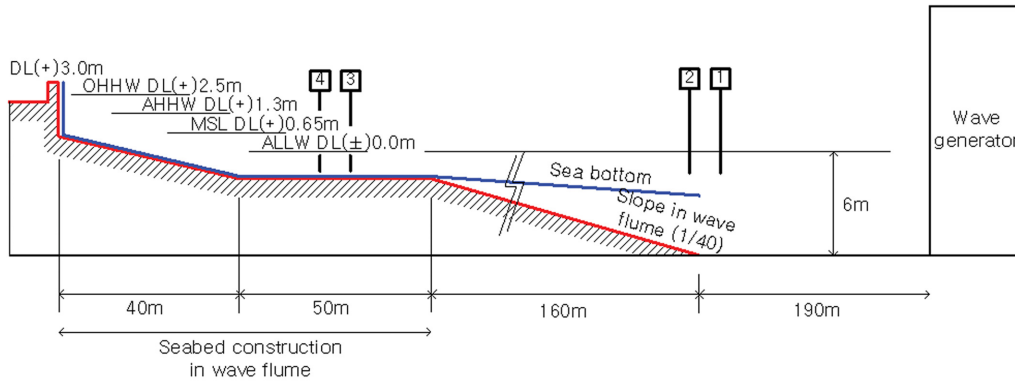
내의 수심과 실제 해역에서의 수심이 유사하기 때문에 수로 경사 시작 위치에 파고계를 설치(①, ②번 파고계)하여 실험파를 설정하였다(Fig. 2(c) 참조). 대상해역 2의 경우, 실제 해역은 구조물 전면에서 상대적으로 급한 경사를 갖고 이후 완만한 수심형태를 보이고 있다. 따라서 상대적으로 수심이 깊은 위치에 설치한 ①, ②번 파고계에서 실험파 스펙트럼을 설정하고, 실제 해역에 해당하는 위치한 파고계(③, ④번 파고계)에서 목표 파고가 재현되도록 하였다(Fig. 3(c) 참조). 파고 및 월파량은 입사파 주기 기준 500파를 연속조파한



(a) sea bottom survey



(b) photo for site 2



(c) schematic sketch of seabed generation in wave flume



(d) photo for model seabed construction

Fig. 3. Sea bottom topography and photos for fabrication of seabed for test site 1.

후 분석하였다. 월파량은 구조물 후면에서 계측하였으며, 단위시간당 단위폭당 평균 월파량(q , $m^3/s/m$)으로 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1 결과 분석 방법

EurOtop(van der Meer et al., 2018)에서는 직립식 구조물에 대해 세 가지 조건으로 구분하여 평균월파량 산정식을 제

시하고 있다. 첫 번째는 전빈(foreshore)의 영향이 없는 조건(식(1)), 즉 상대적으로 심해조건, 두 번째는 전면 경사의 영향이 있는 조건이지만 쇄파 등은 없는 조건(식(2)), 상대적으로 천해조건, 비충격파(non-impulsive) 조건, 쇄파 없이 월파만 발생하는 조건, 세 번째는 일부 쇄파가 발생하는 조건(식(3) 및 식(4), 충격파(impulsive) 조건)이다. 특히 충격파 조건에서 상대여유고 $RC/H_{mo} = 1.35$ 를 기준으로 식이 구분되어 있다. 식(3)과 식(4)는 van der Meer and Bruce(2014)에서

Table 1. Test conditions for physical model test

Test site	Prototype			Model (scale = 1/10)		
	Wave height (H_S , m)	Wave period (T_S , s)	Water level (DL(+), m)	Wave height (H_S , m)	Wave period (T_S , s)	Water level (DL(+), m)
Site 1	0.5	6.0	0	0.05	1.90	0
	1.0	8.0	0.5	0.10	2.52	0.05
	2.0	10.0	1.1	0.25	3.16	0.10
	3.0	12.2	2.0	0.30	3.86	0.15
		14			4.43	0.20
Site 2	0.5	6	0	0.05	1.9	0
	1	8	0.65	0.1	2.53	0.065
	1.5	10	1.3	0.15	3.16	0.13
	2	12	2.5	0.2	3.79	0.25
	2.5	14		0.25	4.43	

인용된 식이다.

- 전빈의 영향이 없는 직립식 구조물 평균 월파량 산정식:
비충격파 조건

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.047 \exp\left[-\left(2.35 \frac{R_C}{H_{m0}}\right)^{1.3}\right] \quad (1)$$

- 전빈의 영향을 고려한 직립식 구조물 평균 월파량 산정식:
비충격파 조건

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.05 \exp\left(-2.78 \frac{R_C}{H_{m0}}\right) \quad (2)$$

- 전빈의 영향을 고려한 직립식 구조물 평균 월파량 산정식:
충격파 조건

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.011 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s_{m-1,0}}\right)^{0.5} \exp\left(-2.2 \frac{R_C}{H_{m0}}\right) \quad (3)$$

$0 < R_C/H_{m0} < 1.35$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0014 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s_{m-1,0}}\right)^{0.5} \exp\left(\frac{R_C}{H_{m0}}\right)^{-3} \quad (4)$$

$R_C/H_{m0} \geq 1.35$

충격파와 비충격파 조건의 구분은 다음과 같다.

$$\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} > 0.23 : \text{비충격파 조건} \quad (5)$$

$$\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} \leq 0.23 : \text{충격파 조건}$$

수리모형실험 결과분석에서 입사파고는 유의파고(H_S)로 분석하였다. Fig. 2의 대상해역 1의 경우에는 1번과 2번 파고계 위치, Fig. 3의 대상해역 2의 경우에는 3번과 4번 파고계 위치에서 입반사분리를 통하여 H_S 를 분석하였다. 반면 식(3)~식(7)의 EurOtop에 제시된 유의파고는 스펙트럼으로부터 분석된 유의파고(H_{m0})로서 수치해석을 통해 계산된 설계파의 의

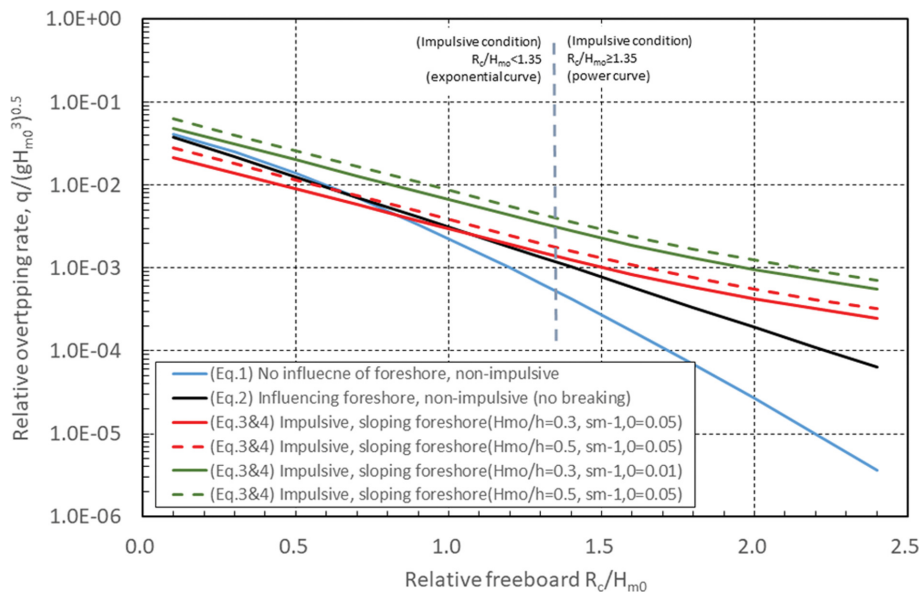


Fig. 4. Comparison of relative wave overtopping rate (EurOtop) according to the influence of the foreshore for impulsive and non-impulsive condition (van der Meer and Bruce, 2014).

미로 적용되고 있다. 상대적으로 심해에서는 H_{m0} 와 H_S 가 거의 동일하지만, 천해에서는 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 그렇지만 이러한 차이로 인해 월파량도 차이가 발생한다는 실험결과는 아직 충분하지 않은 것으로 판단된다(van der Meer et al., 2018). 이에 따라 본 연구에서는 H_{m0} 와 H_S 를 구분하지 않고 동일한 값으로 적용하였다. 또한 식(5)~식(7)에서 파장 $L_{m-1,0}$ 은 심해파장을 의미하며($L_{m-1,0} = \frac{T_{m-1,0}^2}{2\pi}$), 파형경사는 s 로 정의된다.

Kim et al.(2022)은 비충격파 조건에 대한 결과를 EurOtop과 비교하였으며, 본 논문에서는 충격파 조건을 함께 도시하여 비교하였다. 비충격파 조건의 경우에는 주기의 영향을 고려하지 않고 있지만, 충격파 조건의 경우에는 주기와 수심의 영향을 고려하고 있다. van der Meer and Bruce(2014)가 검토한 조건과 유사한 조건을 비교하였으며, 충격파 조건의 경우에 상대파고(H_{m0}/h)와 파형경사($s_{m-1,0}$) 값에 따라 무차원 월파량이 달라질 수 있다. 전체적으로 상대여유고 값에 따른 차이는 있으나 충격파 조건의 월파량이 비충격파 보다는 많게 나타나는 것을 알 수 있다(Fig. 4 참조).

3.2 결과 분석

Kim et al.(2022)의 실험조건은 비충격파 조건이며, 비충격파 조건에서 전면 경사의 영향을 나타내는 식(1) 및 식(2)와 OLAFoam을 이용한 수치해석의 결과와 비교하였다(Fig. 5 참조). Kim et al.(2022)에서 언급하였듯이 수리모형실험과 OLAFoam 결과를 비교하면 상대적으로 OLAFoam의 결과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 수치와 수리모형 실험의 결과 차이는 입력 파랑 설정 조건, 지형 적용 범위 및 실험시간 등에 따라 발생할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 OLAFoam 및 수리모형실험 결과에 있어 동일 상대여유고(R_c/H_S)

$H_S = R$) 조건에서도 월파량의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 EurOtop에서 제시한 원시데이터(raw data)에서도 나타나는 현상이다. Kim et al.(2022)의 실험조건, 즉 비충격파 조건에 대한 평균월파량은 식(6)과 같이 제시할 수 있다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_S^3}} = 0.01 \exp\left(-2.0 \frac{R_c}{H_S}\right) \quad (6)$$

Fig. 3의 대상영역 2에 대하여 월파가 발생한 실험조건을 분석해 보면, 일부 비충격파 조건이 포함되지만 충격파 조건이 대부분을 차지하며 본 연구에서는 충격파 조건에 대한 결과를 분석하였다. 결과분석은 EurOtop에서 제시한 식(3)과 식(4)를 이용하였다. Table 1의 대상영역 2에 대한 실험조건 중 월파가 발생하는 조건을 분석하였으며, 이때 상대파고(H_S/h)는 $H_S/h = 0.17 \sim 0.86$ 범위, 파형경사(s)는 $s = 0.004 \sim 0.055$ 범위이다(Fig. 6 참조). van der Meer and Bruce(2014)의 H_S/h 및 s 조건은 $H_S/h = 0.3, 0.5, 0.9$ 및 $s = 0.01$ 과 0.05 로서 본 실험조건의 대부분은 van der Meer and Bruce(2014)의 범위 포함되는 것을 알 수 있다. 결과분석은 EurOtop과 동일하게 $R_c/H_S = 1.35$ 를 기준으로 구분하였다. 실험결과의 자료 개수가 부족한 것으로 보이지만 전반적인 월파량 분포경향은 EurOtop과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다(Fig. 7 참조). 상대여유고($R_c/H_S = R$)가 작은 조건($R_c/H_S < 1.35$)에서는 실험자료의 분산이 작은 것으로 나타났으나($R^2 = 0.97$), 상대여유고가 큰 조건 ($R_c/H_S \geq 1.35$)에서는 실험자료의 분산이 상대적으로 크게 나타났다($R^2 = 0.65$). 본 실험을 통해 도출된 전면 해저경사의 영향을 고려한 충격파 조건에서의 월파량 산정식은 식(7) 및 식(8)과 같다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_S^3}} = 0.051 \left(\frac{H_S}{h \cdot s_{m-1,0}}\right)^{0.5} \exp\left(-2.8 \frac{R_c}{H_S}\right) \quad (7)$$

$0.25 < R_c/H_S < 1.35$

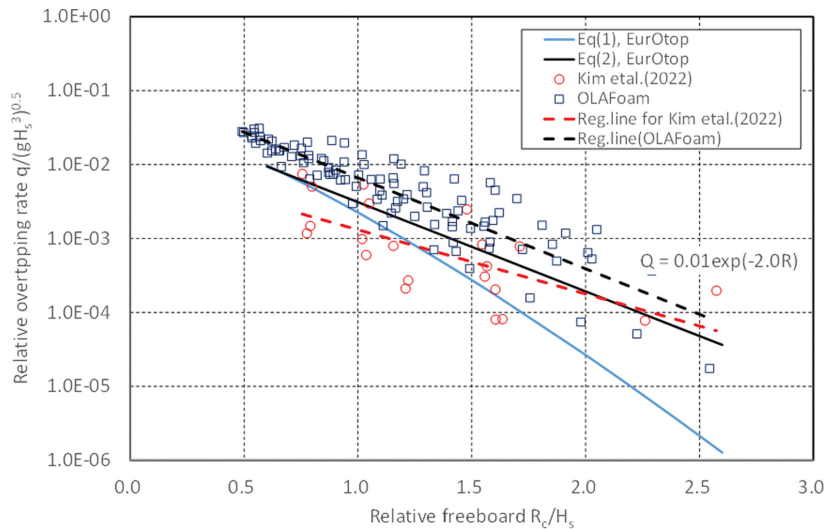


Fig. 5. Comparison of relative wave overtopping rate (EurOtop) according to the influence of the foreshore for non-impulsive conditions (Kim et al., 2022).

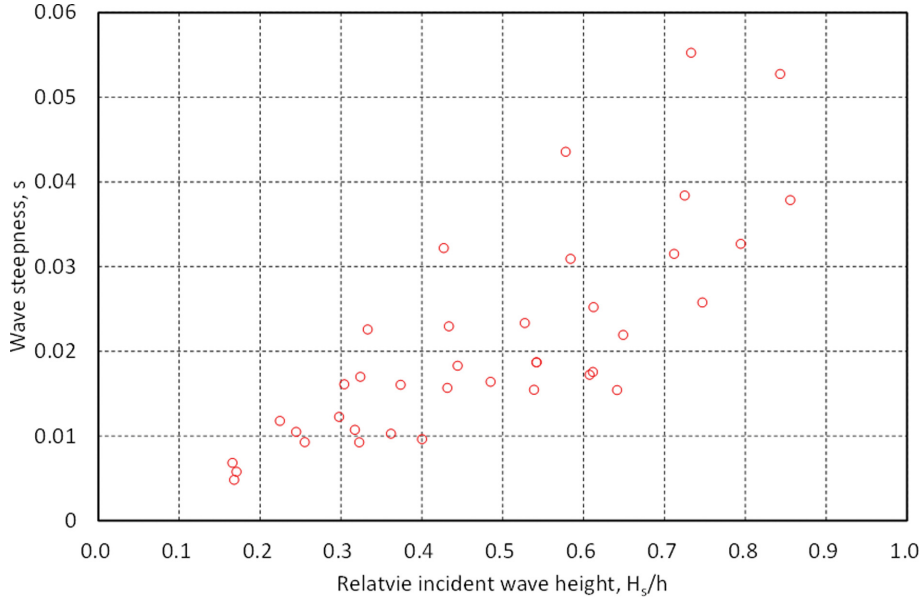


Fig. 6. Test range for impulsive wave in this study (site 2, impulsive condition).

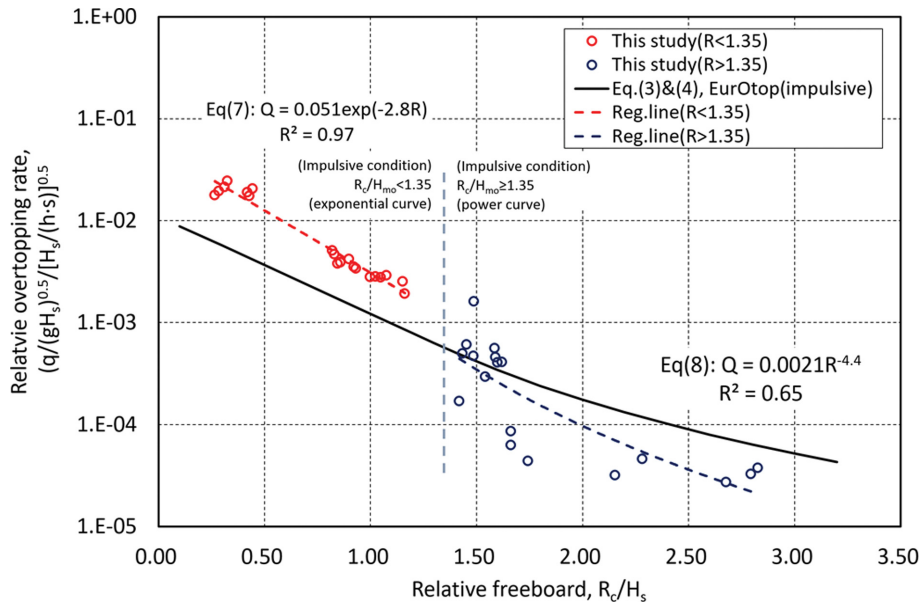


Fig. 7. Test results for impulsive wave condition in this study for site 2.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.0021 \left(\frac{H_s}{h \cdot s^{m-1, 0}} \right)^{0.5} \exp \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^{-4.4} \quad (8)$$

$1.35 \leq R_c/H_s \leq 2.8$

3.3 결과 고찰

본 논문과 Kim et al.(2022)의 결과를 비교해 보면, 대상해역 1에 대한 실험결과인 Kim et al.(2022)의 경우에는 비충격파 조건이며, 본 연구 대상지인 대상해역 2에 대한 결과는 충격파 조건에 해당한다. 이는 유사한 조위 및 파랑 조건이라도 구조물 전면경사 및 수심의 차이 때문으로 판단된다. 동일 실험축척 및 유사한 실험범위를 갖는 실험수로 영역에서

대상해역 1의 경우에는 실제 완만한 경사의 해역수심이 실험수로내 1:40 경사면과 거의 유사한 반면, 대상해역 2의 경우에는 구조물 전면은 상대적으로 급한 경사이고 외해쪽은 거의 일정수심에 가까워 쇄파 등이 더 쉽게 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

본 실험결과를 통하여 월파량 산정식 기준을 제시하는 것은 쉽지 않을 것으로 판단되지만, 기존 연구성과(EurOtop)와 유사한 월파량 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 국내 호안 등 유사한 형태를 갖는 시설에 대한 추가적인 실험 및 연구를 통해 월파량을 산정할 수 있는 기준을 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 해안도로와 같은 호안구조물을 대상으로 파랑 내습시 수리모형실험을 통하여 월파량을 계측하고 기존 연구성과와 비교하였다. 특히 대상해역 호안구조물 전면의 수심을 실험수로에 제작하여 보다 더 정확한 월파량이 계측될 수 있도록 하였다. 그리고 수리모형실험 결과는 직립식 구조물에 대한 월파량 산정식(EurOtop)과 비교하였다. 특히 전면 경사의 영향에 따른 평균월파량을 비교하였으며, 금번 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) EurOtop의 적용에 있어 전면 경사의 영향에 따른 월파량의 차이는 크게 나타났으며, 구조물 설계시 이에 대하여 유의해야 한다.

(2) 전면 경사의 영향을 고려한 충격과 조건에 대한 월파량을 기존 결과인 EurOtop과 같은 형태로 분석하였고 결과를 비교하였다. 상대여유고에 따른 월파량의 경향이 유사하게 나타났으며, 결과분석시 상대여유고에 따라 지수함수와 거듭제곱 함수로 구분하여 경험식을 제안하였다.

(3) EurOtop(van der Meer et al., 2018)의 직립체에 대한 월파량 산정식과 금번 대상 구조물에 대한 월파량 계측 결과를 비교하였다. 금번 대상해역과 유사한 형태 및 수심 등을 갖는 지형을 대상으로 추가적인 연구 및 실험을 통해 정도 높은 월파량 산정식 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 '23년 해안항만수리실험 묶음사업 및 해양수산과학기술진흥원의 연구과제(과제번호: 2022-60)로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T. and Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236-257.
- Kim, Y.T., Choi, H.J. and Lee, H.G. (2022). Hydraulic and Numerical Tests on Wave Overtopping for Vertical Seawall with Relatively Shallow and Steep Sloped Water Depth. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 34(6), 258-265 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2017). Design standard of harbor and fishery ports.
- van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2018). EurOtop, Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application (www.overtopping-manual.com).
- van der Meer, J.W. and Bruce T. (2014). New physical insights and design formulas on wave overtopping at sloping and vertical structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, ASCE, 140(6). 04014025.

Received 14 April, 2023

Revised 20 April, 2023

Accepted 21 April, 2023