

낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안(LMHW 호안)의 월파량에 대한 실험적 연구

Experimental Study for Overtopping Discharges of Sea Dike having Low Mound and High Wave Wall (LMHW)

정재상* · 윤재선*

Jae-Sang Jung* and Jae-Seon Yoon*

요 지 : 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안(LMHW 호안)의 월파량에 관해 검토하였다. 상치구조물의 형식은 직립식, Flare 식 및 Bullnose 식을 적용하였으며, 호안 전면 사면의 소파공은 테트라포드(2층적)와 아크로포드(1층적)를 적용하였다. 수리모형실험 결과는 EurOtop에서 제시하는 경사식 및 직립식 호안의 월파량 산정식과 비교하였다. LMHW 호안에 대해 경사식 호안의 월파량 산정식을 적용할 때 전면 소파공에 따른 조도영향계수(γ)로 EurOtop Manual에서 제시하는 계수를 적용할 경우 월파량이 과소평가 되었으나, 상치구조물 대비 마루높이 영향계수(γ_{AR})를 곱한 수정조도계수를 적용한 경우에는 실험결과와 비교적 일치하였다. Flare 및 Bullnose 상치의 효과를 검토하기 위해 EurOtop Manual에서 제시하는 직립구조물 상부에 설치된 반파공의 효과(Kortenhaus et al., 2003; Pearson et al., 2004a)와 매끄러운 사면에 설치된 반파공의 효과(Van Doorslaer et al., 2015)를 적용하였다. 검토 결과 매끄러운 사면에 설치된 반파공의 효과가 낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안에 보다 타당한 결과를 보였다.

핵심용어 : 월파량, 낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안, 수리모형실험, EurOtop Manual

Abstract : Overtopping discharge for sea dike having low mound and high wave wall (LMHW sea dike) is investigated with hydraulic experiments in this study. Vertical, Flare and Bullnose type wave walls are selected and Tetrapods (double layer) and Accropode (one layer) are adopted for armour layers of the front slope. The results of the hydraulic experiments are compared to the overtopping formulas for armoured rubble slopes and vertical sea dikes suggested by EurOtop Manual. Predicted overtopping discharges are underestimated as the roughness efficiency factors (γ) of armour blocks suggested by EurOtop are adopted when the overtopping formula for armoured rubble slopes sea dike is used. Meanwhile the predicted overtopping discharges agree well with the hydraulic experiments when the modified roughness efficiency factors redefined by multiplying efficiency factor of the heights of armoured crest berm and wave wall (γ_{AR}) are adopted. Return wall effects on a vertical wall (Kortenhaus et al., 2003; Pearson et al., 2004a) and the effects on a smooth dike slope (Van Doorslaer et al., 2015) in EurOtop Manual are investigated for Flare and Bullnose type wave walls. As a results of the comparison between experimental results and 2 formulas, return wall effect on a smooth dike was more valid for LMHW sea dike.

Keywords : overtopping discharge, sea dike having low mound and high wave wall, hydraulic experiments, EurOtop manual

1. 서 론

바다에서 발생하는 고파랑으로부터 해안선을 보호하기 위해 연안지역에 다양한 호안공을 설치하여 왔다. 호안공은 파랑으로부터 해안선을 보호하는 구조물이기 때문에 호안공의 설계 및 시공을 위해 정확한 월파량의 예측은 매우 중요하다. 유럽에서는 1997년 Hydralab이라는 수리모형실험 전문 연구기관

의 커뮤니티가 구축되었으며, Hydralab을 중심으로 CLASH 프로젝트(Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard Analysis on permissible wave overtopping - project)를 통해 여러 연구기관에서 수행한 10,000건 이상의 수리모형실험 Database를 구축하였다(Bruce et al., 2009). 그리고 이를 통해 2007년 다양한 형상을 갖는 호안의 처오름 높이 및 월파

*한국농어촌공사 농어촌연구원(Corresponding author: Jae-Sang Jung, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870 Hae-an-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 15634, Korea, Tel: +82-31-400-1878, Fax: +82-31-400-1612, fingon@ekr.or.kr)



Fig. 1. Example of sea dike having low mound and high wave wall (Sea dike of Hwa-am wharf in Ulsan).

량 예측 매뉴얼인 EurOtop을 발간하였다(Pullen et al., 2007; van der Meer et al., 2016).

본 연구에서는 수리모형실험을 수행하여 전면이 소파블록으로 피복되어 있고, 낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안(이하 LMHW(Low Mound High Wall) 호안으로 표기)의 월파량에 대해 연구하였다. 경사식 방파제나 호안에서 소파블록의 마운드 높이와 상치구조물의 천단고는 일반적으로 큰 차이가 나지 않게 설계한다. 하지만 국내에서는 2000년대 이후 부산신항 남컨테이너 터미널 준설토투기장 가호안, 울산 화암부두 등에 소파블록 마운드 높이가 상치구조물 천단고에 비해 낮은 LMHW호안이 적용된 바 있다(Hyundai Engineering and Construction, 2005; Hyundai Development Company, 2006, Fig. 1 참조). 이처럼 LMHW 호안을 설치하는 이유는 마운드 높이를 낮춤으로써 제체 사석의 규모를 감소시킬 수 있고, 제체 사석 마운드 폭 감소에 따라 하부에 연약지반이 있을 경우 연약지반 처리량 또한 감소시킬 수 있어 경제적인 설계가 가능하기 때문이다.

Molines and Medina(2015)에 따르면 EurOtop Manual(Pullen et al., 2007)에 수록된 결과의 기초가 되는 CLASH 프로젝트에서는 정수면에서부터 소파블록 마운드 상단까지의 높이(A_c)와 상치구조물의 여유고(R_c)가 같은 조건($A_c = R_c$)에서 수리모형실험을 수행하였다. 2016년 다시 발간된 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서는 $A_c/R_c = 0.42 \sim 0.79$

이고 소파블록 마운드 상단 높이와 호안 toe에서의 유의파고(H_{m0}) 비가 $A_c/H_{m0} = 0.71 \sim 1.89$ 인 조건에서 전면이 Cubipod로 피복된 경사식 호안에 대한 Smolka et al.(2009)의 실험 결과를 추가하여 월파량 예측식을 제시하였다(Fig. 2 참조). Mase et al.(2013)은 육지나 매우 얇은 바다에 설치된 직립 호안에 대해 수리모형실험을 수행하여 월파량 예측식을 제시하였다. 국내에서는 Kim et al.(2010)이 직립구조물에 대해 경사입사시 월파량 감소효과에 대해 연구한 사례가 있으며, Kim and Lee(2012)가 주기영향을 고려하여 직립구조물의 월파량을 산정한 사례가 있다. 하지만 이들은 직립구조물만 실험 대상으로 하였다. Oh(2016)에 의해 본 연구의 대상 호안과 유사한 호안 구조물을 대상으로 월파량 산정 실험 연구가 수행된 사례가 있으나, 소파블록 마운드가 수면 아래에 위치하는 직립 혼성제에 가까운 구조물이었다.

상대적인 마운드 높이는 소파블록 마운드 상단 높이와 toe에서의 유의파고비(A_c/H_{m0})로 정의할 수 있다. 즉, A_c/H_{m0} 가 비교적 작은 경우를 소파블록의 마운드 높이가 낮다고 할 수 있을 것이다. 반면 상대적인 상치구조물의 높이는 정수면에서부터 소파블록 마운드 상단까지의 높이(A_c)와 상치구조물의 여유고(R_c)의 비(A_c/R_c)로 정의할 수 있다. 즉, A_c/R_c 가 비교적 작은 경우, 다시 말해서 상치구조물의 여유고가 정수면에서 소파블록 마운드 상단까지의 높이보다 비교적 큰 경우 상치구조물의 높이가 높다고 할 수 있다. 본 연구에서 채택한 호안은 $A_c/H_{m0} = 0 \sim 0.81$, $A_c/R_c = 0 \sim 0.4$ 의 범위를 갖는다. 따라서, 본 연구의 호안은 Smolka et al.(2009)의 실험보다 소파블록 마운드 높이가 더 낮고, 상치구조물의 높이는 더욱 높은 경우로 볼 수 있다.

본 연구의 대상인 LMHW 호안은 경사식 호안과 직립 혼성제의 중간 형태로 볼 수 있다. 현재까지 이와 같은 구조물에 대해서는 어떠한 월파량 예측식이 적용되어야 하는지에 대해 구체적으로 연구된 사례가 없다. 본 연구에서는 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서 제시하는 소파블록으로 피복된 경사제의 월파량 산정식 및 직립제의 월파량 산정식에 의한 예측 결과와 수리모형실험 결과를 비교 분석하였다. 그리고, 전면에 피복된 소파블록의 효과와 상치구조물 형상에 따른 효과에 대해서도 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서 제시하는 경험식과 비교하여 그 적용성을 확인하였다.

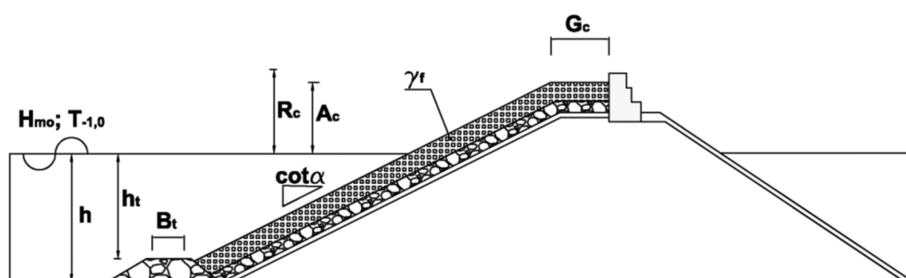


Fig. 2. Conventional mound breakwater cross-section (Molines and Medina, 2015).

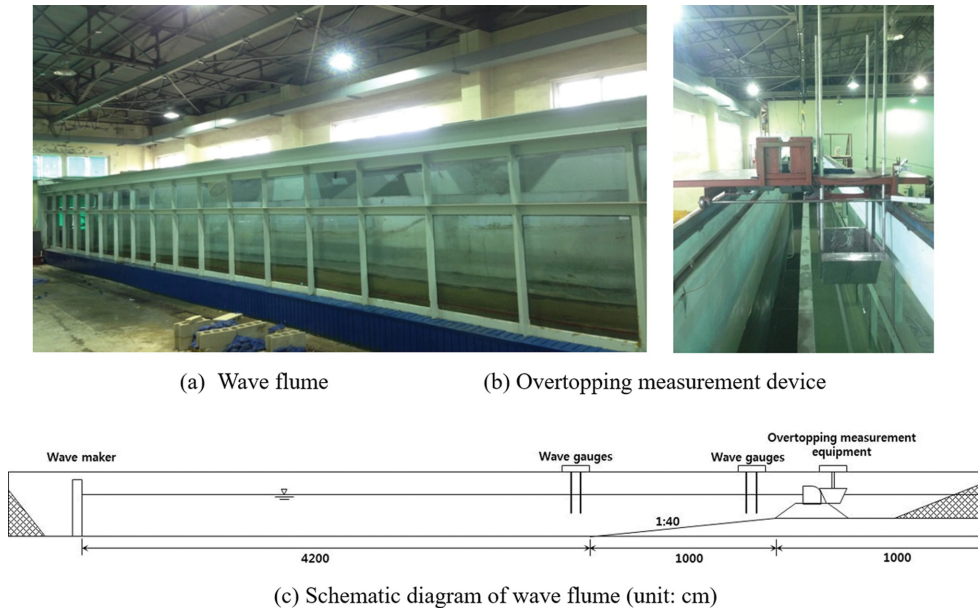


Fig. 3. Wave flume and schematic diagram for the experiments.

2. 수리모형실험

2.1 실험수로 구성

LMHW 호안의 월파량 산정 실험은 한국농어촌공사 농어촌연구원에 위치한 단면 조파수로에서 수행되었다. 조파수로의 길이는 66 m, 폭은 1.5 m이며, 수로 종방향으로 분리벽을 설치하여 0.75 m 폭의 두 개 수로로 분할하였다. 두 수로 중 하나의 수로에 구조물을 설치하고 다른 수로에서는 통과 입사파량을 계측하여 구조물에 내습하는 파량의 파고를 확인하였다. LMHW 호안 toe 끝부분에서 1:40의 경사구간이 10 m 존재하며, LMHW 호안은 전면 조파관에서 52 m 거리에 위치한다. 모형 구조물 배후에는 월파한 물을 담을 수 있는 수조와 유량계가 부착된 소형 펌프를 이용하여 월파량을 계측하였다. 실험수로 사진과 월파 측정장치 및 세부적인 구성은 Fig. 3과 같다.

2.2 실험을 위한 LMHW 호안 단면

본 연구에서 채택한 LMHW 호안의 형상은 Fig. 4에 도시하였다. 상치구조물의 형상은 일반적인 직립식, Flare 식 및 Bullnose 식이 적용되었다. 모형의 축척은 1:30이며, 호안의 전면경사($\tan\alpha$)는 1:1.5가 적용되었다. Fig. 3에서 R_c 는 호안의 여유고, h 는 호안 전면 toe에서의 수심, A_c 는 정수면에서 소파블록 마운드 상단까지의 높이, B_r 은 Bullnose 및 Flare 상치의 돌출 길이, h_r 은 돌출부의 연직방향 길이를 각각 나타낸다. Bullnose 식 상치구조물의 돌출길이(B_r)와 돌출부 연직방향 길이(h_r)는 각각 3.3 cm이다. Flare 식 상치구조물은 돌출길이 $B_r = 5.4$ cm, $h_r = 9.0$ cm가 적용되었다. 전면 소파블록으로는 테트라포드(Tetrapods, 2층적)와 아크로포드(Accropode, 1층적)가 각각 적용되었다.

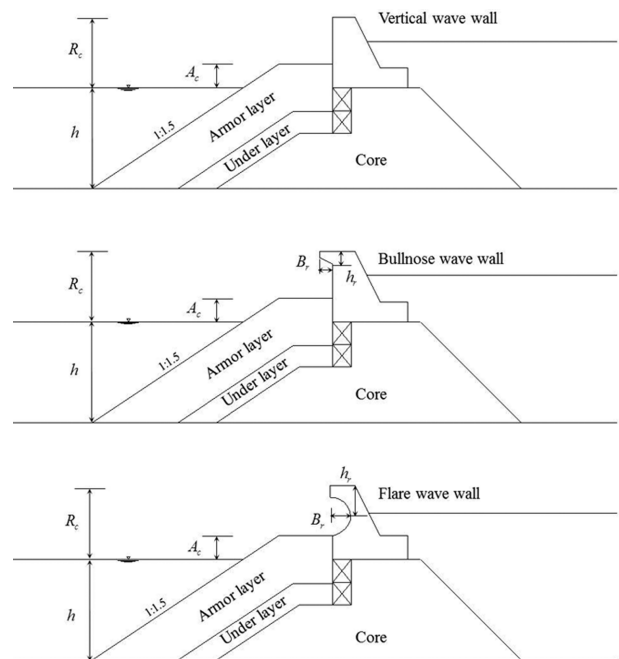


Fig. 4. Definition sketch of the three LMHW sea dikes and the variables.

2.3 계측장비 및 실험조건

불규칙파 조파를 위해 피스톤식 조파장치가 사용되었다. 파고계는 sampling time이 20 Hz인 용량식 파고계가 사용되었으며, 최대양수량이 0.15 m³/min인 수중펌프 3기 및 각 펌프에 부착된 유량계를 이용하여 월파량을 계측하였다. 불규칙파랑 조파를 위해 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Bretschneider, 1967; Mitsuyasu, 1970)을 활용하였다. 실험파랑의 세부적인 제원은 Table 1과 같다. 수리모형실험은 2가지 소파블록, 3가지 상치구조물 형상, 2개 수심조건, 9개 주기 및 파고 조건

으로 총 108개 case의 실험이 수행되었다. 그리고 총 500개의 파가 호안 모형에 도달하는 시간 동안 실험을 수행하였다.

3. LMHW 호안의 월파량 실험 결과 분석

3.1 월파량 실험 결과

일련의 수리모형실험을 통한 LMHW 호안에서 월파량 예측 결과는 Fig. 5와 같다. 그림에서 x 축은 상대여유고(relative freeboard)를 나타내며, y 축은 상대월파유량(relative overtopping discharge)을 나타낸다. 그림에서 실선은 직립 상치구조물의 월파유량의 추세선, 일점쇄선은 Bullnose 식 상치구조물의 추

Table 1. The conditions of random waves for the experiments

Water depth h (unit: cm)	Wave period for peak frequency T_p (unit: sec)	Significant wave height H_{m0} (unit: cm)
26.67	1.46	10.00
		11.67
		13.13
		15.00
	2.19	10.02
33.33	1.46	11.64
		13.29
		14.88
		16.67
	2.19	10.02
	1.46	11.78
		13.39
		15.10
		16.56
	2.19	10.13
	1.46	11.82
		13.25
		15.01
		16.72

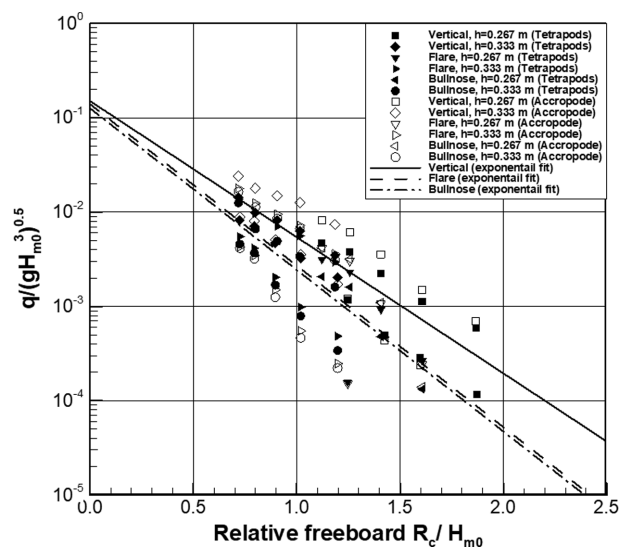
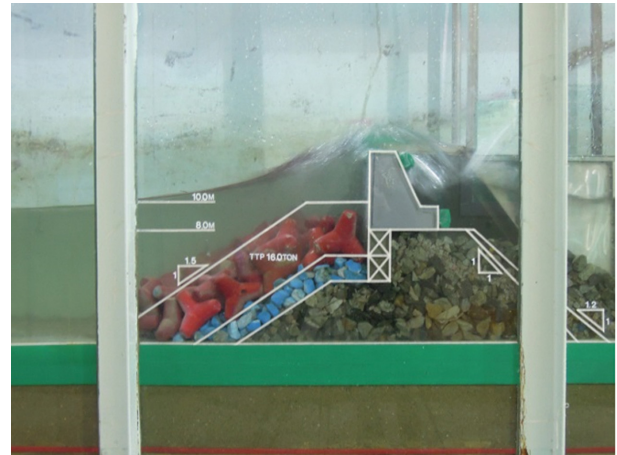
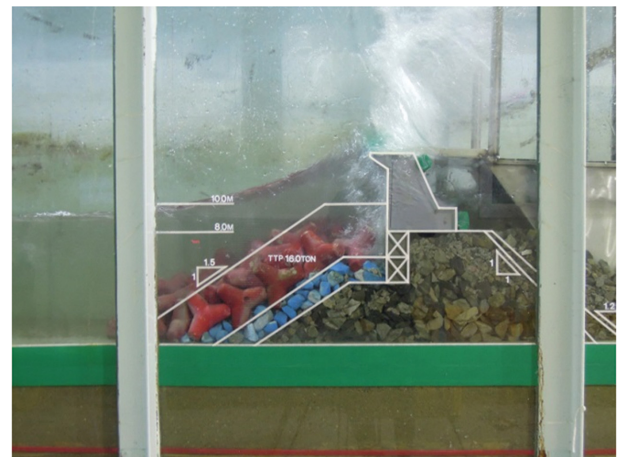


Fig. 5. Overtopping discharges measured from hydraulic experiments.

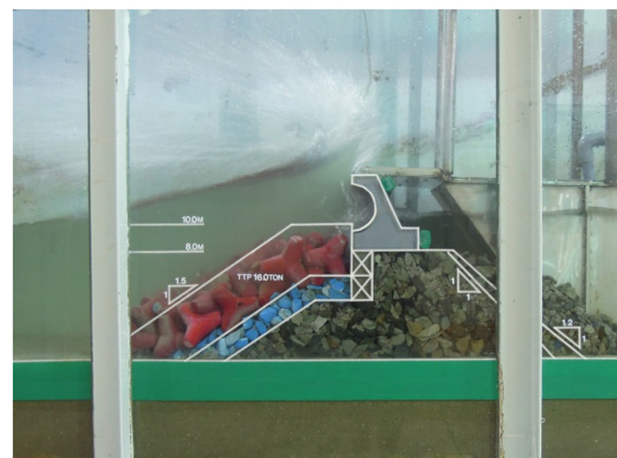
세선 그리고 파선은 Flare 식 상치구조물의 월파유량 추세선을 각각 나타낸다. 반파공(wave-return wall)이 적용된 Bullnose 및 Flare 식 상치구조물의 월파량은 직립식 상치구조물보다 각각 평균 70% 및 76% 수준으로 예측되었다. 본 연구에서 적용한 Bullnose 및 Flare 식 상치구조물은 각각 1개 단면에



(a) Vertical type



(b) Bullnose type



(c) Flare type

Fig. 6. Overtopping shapes according to wall types of LMHW sea dike ($h = 33.33$ cm, $H_{m0} = 16.72$ cm, $T_p = 2.19$ s).

대해서만 실험을 수행하였기 때문에 본 연구에서 계측된 월파유량이 Bullnose 및 Flare 식 상치구조물에 대한 월파유량의 대표값이 될 수는 없다. 하지만, 전반적으로 직립식 상치구조물에 비해 Bullnose 및 Flare 식 상치구조물을 적용한 경우 월파가 저감된다는 사실은 확인할 수 있다. 직립식, Bullnose 및 Flare 식 상치구조물의 월파 형상은 Fig. 6과 같으며, Bullnose 및 Flare 식 상치구조물에서는 입사파량의 일부는 상치구조물을 월류하지 못하고 다시 구조물 전면으로 반사되는 현상을 관측할 수 있다.

3.2 EurOtop에서 제시하는 월파량 산정식의 적용성 검토

LMHW 호안에 대한 월파량 산정식의 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 수행한 수리모형실험은 $\xi_{m-1,0}$ (surf similarity parameter)가 3.8 이상인 조건에서 수행하여 비쇄파 조건에 해당한다. 따라서, 수리모형실험 결과와 비교를 위해 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서 제시하는 소파블록으로 피복되고 비교적 경사가 급한 경사제의 월파량 산정식과 직립 호안의 월파량 산정식을 각각 적용하였다. 먼저 소파블록으로 피복된 경사제의 월파량 산정식은 다음과 같다 (van der Meer and Bruce, 2013).

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.09 \exp \left[- \left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_\beta \gamma} \right)^{1.3} \right] \quad (1)$$

여기서, q 는 단위폭당 월파유량, g 는 중력가속도를 나타내며, γ_f 는 조도영향계수(roughness influence factor), γ_β 는 파향영향계수(obliqueness influence factor), γ 는 반파공 영향계수를 각각 뜻한다. EurOtop Manual에서는 실험 평균값인 식(1)보다는 표준편차만큼 상향된 식(2)와 같은 월파량 산정식을 사용하는 것을 권장한다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.1035 \exp \left[- \left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_\beta \gamma} \right)^{1.3} \right] \quad (2)$$

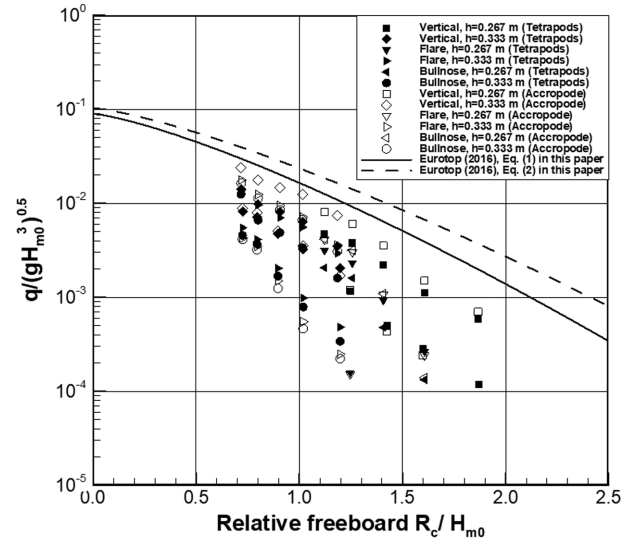
직립식 호안의 월파량 산정식은 식(3)과 같다(van der Meer and Bruce, 2013; van der Meer et al., 2016).

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

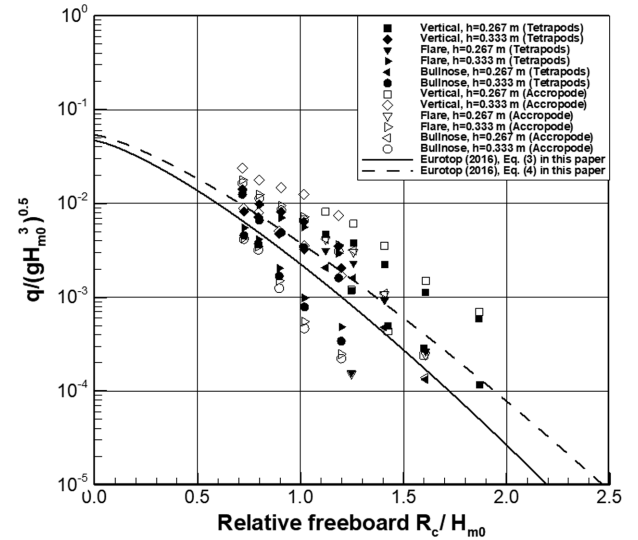
표준편차만큼 상향된 직립식 호안의 월파량 산정식은 식(4)와 같다(van der Meer and Bruce, 2013; van der Meer et al., 2016).

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.054 \exp \left[- \left(2.12 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.3} \right] \quad (4)$$

식(1)~(4)에서 제시된 월파량 산정식과 수리모형실험과 비교 결과는 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)는 소파블록으로 피복된 경사제의 월파량 산정식과 수리모형실험 결과를 비교한 그림이며, Fig. 7(b)는 직립식 호안의 월파량 산정식과 수리



(a) Formula of overtopping rates for armoured rubble slopes walls ($\gamma_f = 1$)



(b) Formula of overtopping rates for vertical walls

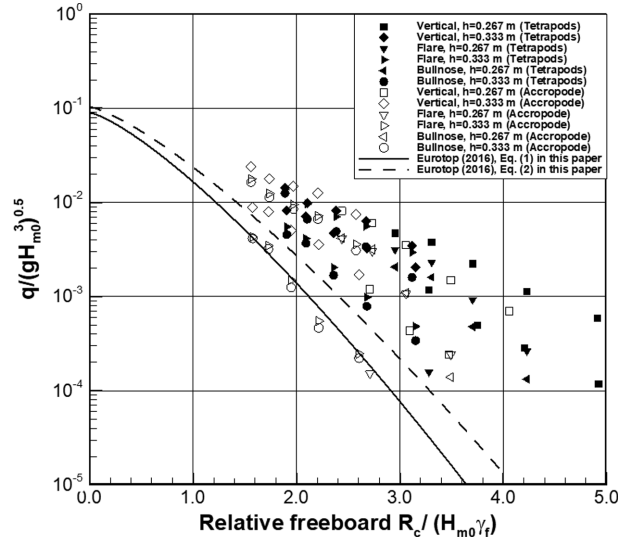
Fig. 7. Comparison of overtopping discharges between hydraulic experiments and formulas of overtopping rates for armoured rubble slopes walls and vertical walls.

모형실험 결과를 비교한 그림이다. Fig. 7(a)에서 소파블록으로 피복된 경사제의 월파량 산정식은 조도영향계수(γ_f) 및 파향영향계수(γ_β)는 각각 1이 적용되었다. 따라서, 소파블록의 조도영향이 고려되지 않은 경사제의 월파량 산정식의 계산 결과는 수리모형실험 결과보다 크게 나타났다. 반면 직립식 호안의 월파량 산정식의 결과는 수리모형실험 결과와 유사한 경향을 나타낸다.

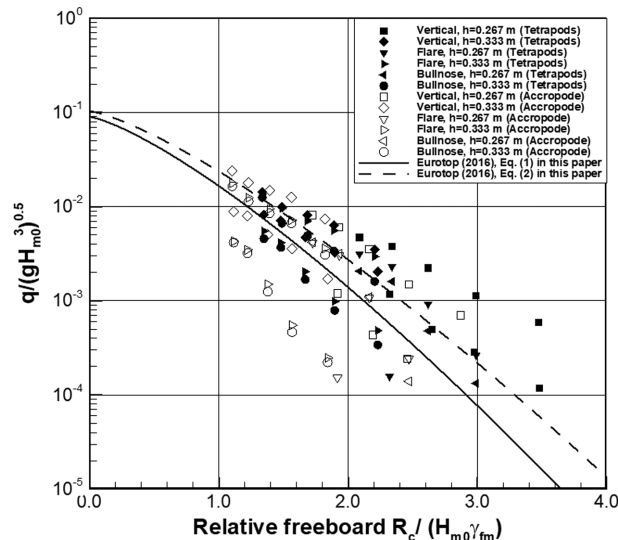
소파블록으로 피복된 경사제의 월파량 산정식을 적용할 경우 소파블록의 조도영향을 고려해야 한다. 소파블록의 종류에 따른 조도영향계수는 많은 연구자들에 의해 다양한 값들이 제시되어 있는데, 이는 Table 2와 같다(Molines and Medina, 2015). 본 연구에서는 소파블록 종류에 따른 조도영향계수로 1:1.5 경사를 기준으로 EurOtop Manual(van der Meer et al.,

Table 2. Roughness factors (γ_f) of Tetrapods and Accropode given in the literatures

Type of armour	Coeveld et al. (2015)	Pearson et al. (2004b)	Bruce et al. (2006)	Bruce et al. (2009)	EurOtop (2016)
Tetrapods (2 layers)	0.40	0.38	0.38	0.38	0.38
Accropode (1 layer)	0.49	0.46	0.46	0.46	0.46



(a) Overtopping discharges considering armour layer effects



(b) Overtopping discharges considering modified armour layer effects

Fig. 8. Comparison of overtopping discharges between hydraulic experiments and formulas of overtopping rate for armoured rubble slopes walls with armour layer effects.

2016)이 제시한 $\gamma_f = 0.38$ (Tetrapods)과 $\gamma_f = 0.46$ (Accropode)을 적용하였다. 테트라포드와 아크로포드의 조도영향계수를 적용한 결과는 Fig. 8(a)와 같으며, 산정식의 결과는 실험결과보다 작게 계산되었다. 1장에서 설명한 바와 같이 EurOtop Manual에서 제시한 소파블록 조도계수는 $A_c/R_c = 1$ 인 조건에서 실험한 결과이다. 즉, 소파블록 마운드의 높이가 낮고 상치 구조물의 높이가 높은 LMHW 호안에 Eurotop Manual (van der Meer et al., 2016)에서 제시한 조도영향계수를 그

대로 적용하면 실제 월파량보다 과소평가가 될 수 있다는 점을 시사한다. 따라서, 본 연구에서는 LMHW 호안을 위해 상치구조물 대비 마루 높이의 영향계수(γ_{AR})를 도입하여 다음과 같이 수정된 조도영향계수를 제시한다.

$$\gamma_{fm} = \gamma_f \cdot \gamma_{AR} \quad (5)$$

여기서, $\gamma_{AR} = (h + A_c)/(h + R_c)$ 이다.

식(5)와 같이 수정된 조도영향계수를 적용한 결과는 Fig. 8(b)와 같으며, 소파블록으로 피복된 경사제의 월파량 산정식은 수리모형실험 결과와 상당히 일치하는 결과를 보였다. Fig. 7(b)의 직립식 호안의 평균 월파량 산정식(식(3))과 실험결과와의 표준편차는 0.00281이며, Fig. 8(b)의 소파블록으로 피복된 경사제의 평균 월파량 산정식(식(1))과 실험결과와의 표준편차는 0.00287로 두 식 모두 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 상치구조물 형상에 따른 월파량

4.1 직립구조물 상부의 반파공 형상을 고려한 월파량 산정식 적용

상치구조물 형상(Bullnose 식, Flare 식)에 따른 월파량 감소효과는 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서 제시하는 직립구조물 상부의 반파공 형상을 고려한 월파량 산정식과 실험결과를 먼저 비교하여 분석하였다. Oh(2016)는 직립혼성체 형식의 호안을 대상으로 EurOtop Manual에서 제시하는 상치구조물 형상을 반영한 월파량 산정식과 실험결과를 비교하였으며, 월파유량이 작은 조건에서는 EurOtop Manual에서 제시하는 월파량 산정식과 실험결과가 일치하지 않는다는 결과를 제시하였다. 본 연구에서도 Oh(2016)의 연구와 같이 EurOtop Manual에서 제시하는 상치구조물 형상을 반영한 월파량 산정식과 LMHW 호안에서의 실험결과와 비교 분석하였다.

상치 전면에 돌출부가 있는 형상의 반파 구조물의 월파 저감효과는 Kortenhaus et al.(2003) 및 Pearson et al.(2004a)의 연구 결과가 EurOtop Manual(Pullen et al., 2007; van der Meer et al., 2016)에 수록되었다. EurOtop Manual에서 반파 구조물의 월파 저감 효과는 다음 식과 같이 정의되는 계수 k_{bn} 으로 정의 한다.

$$k_{bn} = \frac{q_{with_bullnose}}{q_{without_bullnose}} \quad (6)$$

월파 저감 효과를 나타내는 계수 k_{bn} 은 여유고 및 유의파

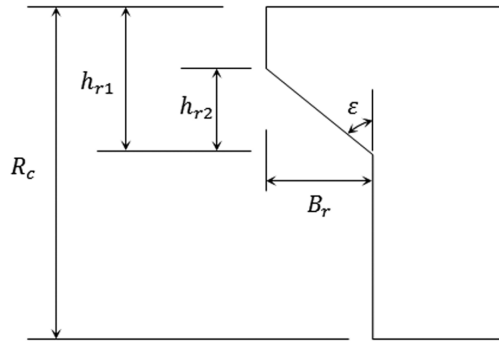
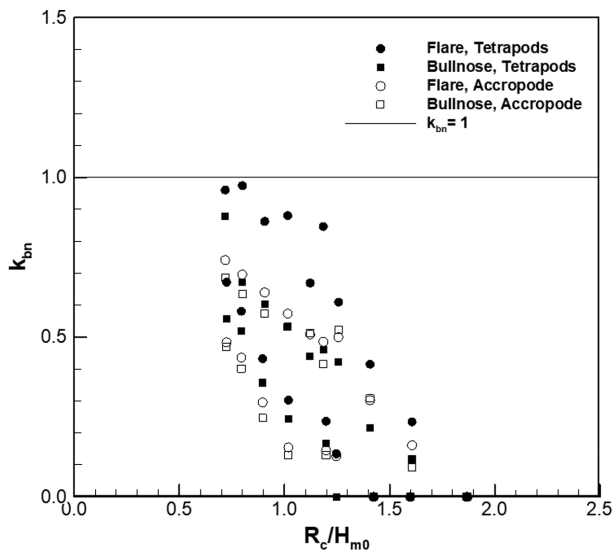
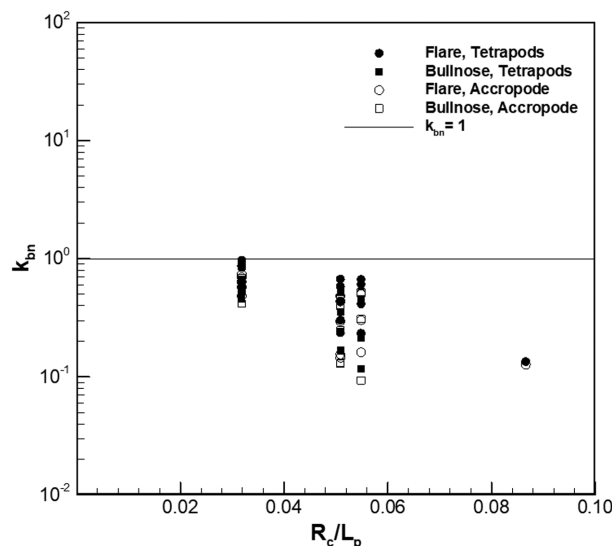


Fig. 9. Definition sketch for heights of wave return wall.



(a) The measured overtopping discharge coefficients as R_c/H_{m0}



(b) The measured overtopping discharge coefficients as R_c/L_p

Fig. 10. The measured overtopping discharge coefficients for Bullnose and Flare wave walls.

고(R_c/H_{m0})의 비에 따라 3가지로 나누어 계산하는데, 관련된 식은 EurOtop Manual을 참고할 수 있다. 본 연구에서 반파

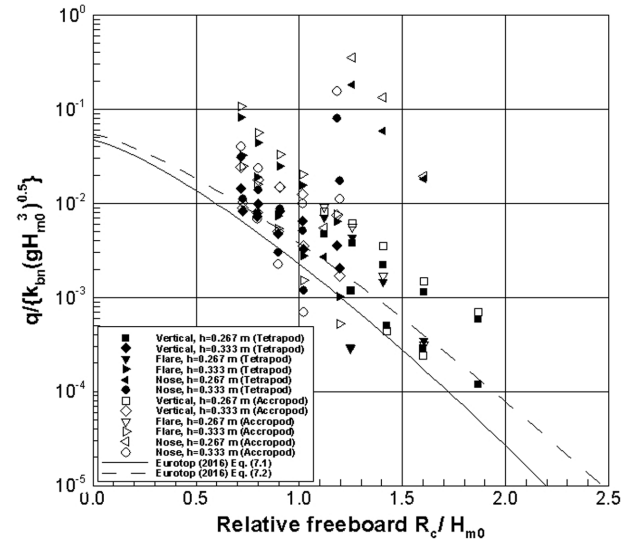


Fig. 11. Comparison of overtopping discharges between hydraulic experiments and formula of overtopping rate for armoured rubble slopes walls with armour layer effects and wave wall shape effects of vertical wall with h_{r1} .

구조물을 특성화 하는 변수의 정의는 Fig. 9와 같다.

수리모형실험에서 반파공 및 직립식 상치구조물의 월파량 비교를 통해 Bullnose 및 Flare 식 상치구조물의 k_{bn} 값을 계측하였으며, 그 값은 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)에서 x축은 R_c/H_{m0} 이며, 그 결과는 Kortenhaus et al.(2003) 및 Pearson et al.(2004a)의 결과와 유사하게 월파유량계수는 R_c/H_{m0} 가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 파랑의 주기에 따른 반파공의 효과를 보기 위해 Fig. 10(b)에 R_c/L_p 에 따른 월파유량계수를 도식하였다. 여기서, L_p 는 불규칙파랑의 침두 주파수 (peak frequency)에 해당하는 파랑의 파장(wave length)을 뜻한다. Fig. 10(b)에서 R_c/L_p 가 작을수록, 즉 파장이 길수록 k_{bn} 이 1.0 근처까지 증가함을 볼 수 있다.

수리모형실험을 통해 계측된 결과와 예측식에 의한 결과 비교를 위해 k_{bn} 은 반파공의 높이(h_r)로 Fig. 9의 h_r 을 적용하여 계산하였다. 예측식은 직립구조물에 대한 월파량 예측식인 식(3) 및 (4)를 사용하였다. 비교 결과는 Fig. 11과 같으며, 예측된 값이 실험을 통해 계측된 값보다 매우 과소 산정됨을 확인할 수 있다. 즉, 상부에 반파공이 설치된 LMHW 호안의 월파량 산정을 위해 Kortenhaus et al.(2003) 및 Pearson et al.(2004a)에 의해 제시된 직립구조물 상부의 반파공 효과를 적용하는 것은 적절하지 못함을 알 수 있다. 이는 LMHW 호안을 구성하는 경사제의 영향을 무시할 수 없기 때문인 것으로 사료된다.

4.2 경사식 호안에서 반파공 형상을 고려한 월파량 산정식 적용

상치구조물 형상(Bullnose 식, Flare 식)에 따른 월파량 감소효과에 대해 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서 제시하는 경사식 호안 상부의 반파공 영향을 고려한 월

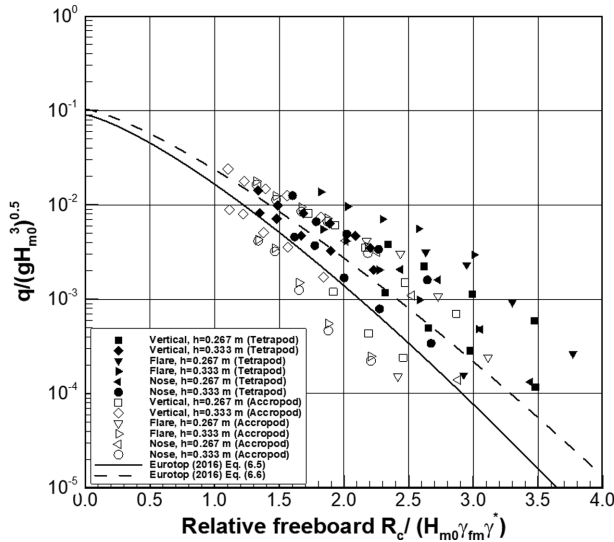


Fig. 12. Comparison of overtopping discharges between hydraulic experiments and formula of overtopping rate for armoured rubble slopes walls with armour layer effects and wave wall shape effects on a slope or promenade.

파랑 산정식과 실험결과를 비교하여 분석하였다. EurOtop Manual에서 매끄러운 경사호안에 평평한 소단 및 Bullnose 식 상치가 있는 경우 γ^* 는 다음 식과 같다(Van Doorslaer et al., 2015; van der Meer et al., 2016).

$$\gamma^* = 1.0353 \gamma_{prom} \gamma_v \gamma_{bn} \quad (7)$$

여기서, γ_{prom} 는 매끄러운 경사호안 상부에 평평한 소단이 있는 경우의 영향 계수이며, γ_v 는 완만한 호안경사에 수직벽이 존재하는 경우의 영향계수, 그리고 γ_{bn} 은 bullnose 식 상치 형상에 따른 영향 계수를 각각 뜻한다. 전술한 각각의 영향계수를 구하는 방법은 EurOtop Manual 5.4절에 참고할 수 있으며, 본 연구에서 γ^* 는 0.36에서 0.58의 범위를 갖는다. 월파량 예측식으로는 경사식 호안의 예측식인 식(1) 및 (2)를 사용하였으며, 수정조도영향계수를 적용하였다. 예측식과 수리모형실험 결과를 비교한 그림은 Fig. 12와 같으며, 전반적으로 Fig. 11에 비해 실험 결과와 더욱 일치하였다. 하지만, Flare 식 상치 형상은 예측식이 실험결과에 비해 다소 과소 산정하는 결과를 보였다. Flare 상치의 B_r 이 커지면 형태적으로도 Bullnose 상치와 많이 달라지게 되며, 기존 연구에서 Bullnose를 대상으로 했던 수리모형실험에서 적용한 반파공 돌출 각도(ϵ , Fig. 9 참조)의 범위를 벗어나게 된다. 이와 같은 원인으로 Flare 상치의 월파량이 예측과 상이하게 나타난 것으로 판단된다. 즉, LMHW 호안에 설치된 반파공의 영향을 검토하기 위해서는 Kortenhaus et al.(2003) 및 Pearson et al.(2004a)에 의해 제시된 직립구조물 상부에 설치된 반파공 효과보다는 Van Doorslaer et al.(2015)에 의해 제시된 매끄러운 호안 상부에 설치된 반파공의 효과를 적용하는 것이 더욱 타당한 결과를 보였다. 이처럼 Van Doorslaer et al.

(2015)의 식이 보다 타당한 이유는 그들이 수행한 연구의 대상 호안의 형상이 직립호안 상부에 반파공이 설치된 경우보다 본 연구의 대상인 LMHW 호안과 기하학적으로 매우 유사하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수리모형실험을 통해 낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안(LMHW 호안)의 월파량에 관해 검토하였다. 수리모형실험은 한국농어촌공사 농어촌 연구원의 단면조파수로에서 수행하였다. 상치구조물의 형식은 직립식, Flare 식 및 Bullnose 식을 적용하였으며, 호안 전면 사면의 소파공은 테트라포드(2층적)와 아크로포드(1층적)를 적용하였다. 입사파랑은 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용한 불규칙파랑을 적용하였다.

수리모형실험 결과는 EurOtop Manual(van der Meer et al., 2016)에서 제시하는 경사식 및 직립식 호안의 월파량 산정식과 비교하였다. 실험 결과 LMHW 호안의 경우 EurOtop Manual의 경사식 호안 월파량 산정식과 직립식 호안의 월파량 산정식 모두 월파량을 비교적 정확하게 예측하였다. 그리고, 경사식 호안의 월파량 산정식에서 소파블록의 조도영향계수(γ)로 EurOtop에서 제시하는 계수를 적용할 경우 월파량이 과소평가 되었으나, 상치구조물 대비 피복재 마루높이 높이의 영향계수(γ_{AR})를 곱한 수정조도영향계수를 적용할 경우에는 실험결과와 비교적 일치하였다.

반파공(wave return wall)이 적용된 Flare 및 Bullnose 식 상치구조물의 월파량 감소효과를 검토하였다. Kortenhaus et al.(2003) 및 Pearson et al.(2004a)에 의해 제시된 직립구조물 상부에 설치된 반파공 효과와 Van Doorslaer et al.(2015)에 의해 제시된 매끄러운 호안 상부에 설치된 반파공의 효과를 각각 적용하여 수리모형실험 결과와 비교하였다. 비교 결과 Van Doorslaer et al.(2015)에 의해 제시된 식이 더욱 타당한 결과를 보였다. 즉, 소파공 마운드 높이가 낮은 LMHW 호안에 반파공이 적용된 경우에는 수정조도영향계수를 적용한 경사식 호안의 월파량 산정식과 Van Doorslaer et al.(2015)이 제시한 반파공 효과를 적용하는 것이 가장 타당함을 확인하였다. 하지만 본 연구에서 적용한 것과 같이 곡면의 곡률이 비교적 큰 Flare 식 상치 형식은 기존의 반파공 식(Bullnose 식)을 적용할 경우 실험결과보다 월파량이 과소 산정되었다. 따라서, 향후 곡면의 곡률이 비교적 큰 Flare 식 상치에 대한 월파 영향계수에 대한 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(19CTAP-C151982-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bretschneider, C.L. (1968). Significant waves and wave spectrum. Ocean Industry, Feb, 40-46.
- Bruce, T., van der Meer, J.W., Franco, L. and Pearson, J.M. (2006). A comparison of overtopping performance of different rubble mound breakwater armour. Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Engineering, 5, 4567-4579.
- Bruce, T., van der Meer, J.W., Franco, L. and Pearson, J.M. (2009). Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. Coastal Engineering, 56(2), 166-179.
- Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A. and Pozueta, B. (2005). Neural Network, Manual NN_Overtopping 2.0, CLASH: Workpackage 8, <http://nn-overtopping.deltares.nl/>.
- Hyundai Engineering and Construction (2005). Design report of construction of temporary sea dike for storage of dredging soil on southern container terminal of Busan new port (in Korean).
- Hyundai Development Company (2006). Design report of construction for extension of quay wall on Hwa-am wharf in Ulsan (in Korean).
- Kim, Y.-T., Lee, J.-I., Cho, Y.-S. and Ha, T.-M. (2010). Wave overtopping reduction coefficient of vertical wall for obliquely incident waves. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(3), 149-155 (in Korean).
- Kim, Y.-T. and Lee J.-I. (2012). Wave overtopping formula for vertical structure including effects of wave period: Non-breaking conditions. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(3), 228-234 (in Korean).
- Kortenhaus, A., Pearson, J., Bruce, T., Allsop, N.W.H. and van der Meer, J.W. (2003). Influence of parapets and recurves on wave overtopping and wave loading of complex vertical walls. Proc. Coastal Structures 2013, 369-381.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T.S. and Reis, M.T. (2013). Wave runoff and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 139(5), 346-357.
- Mitsuyasu, H. (1970). On the growth of spectrum of wind-generated waves (2)-spectral shape of wind waves at finite fetch. Proc. Japanese Conf. Coastal Engineering, 1-7 (in Japanese).
- Molines, J. and Medina, J.R. (2015). Calibration of overtopping roughness factors for concrete armor units in non-breaking conditions using CLASH database. Coastal Engineering, 96, 62-70.
- Oh, S.-H. (2016). Analysis of the effect of reducing wave overtopping by wave return walls. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 28(1), 1-6 (in Korean).
- Pearson, J., Bruce, T., Allsop, W., Kortenhaus, A. and van der Meer, J. (2004a). Effectiveness of recurve walls in reducing wave overtopping on sea walls and breakwaters. Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Engineering, 4404-4416.
- Pearson, J., Bruce, T., Franco, L., van der Meer, J., Falzacappa, M. and Molino, R. (2004b). Report on additional tests, part B: Standard tests for roughness factors, CLASH SP4 report, University of Edinburgh, UK.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. and van der Meer, J.W. (2007). EurOtop. Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment Manual.
- Smolka, E., Zarranz, G. and Medina, J.R. (2009). Estudio experimental del rebase de un dique en talud de cubipodos. Libro de las X Jornadas Españolas de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria-Adif Congresos, 803-809 (in Spanish).
- van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., De Rouck, J., Katenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2016). EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures.
- van der Meer, J. and Bruce, T. (2014). New physical insights and design formulas on wave overtopping at sloping and vertical structures. Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering, 140(6), doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000221](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000221).
- Van Doorslaer, K., De Rouck, J., Audenaert, S. and Duquet, V. (2015). Crest modifications to reduce wave overtopping of non-breaking waves over a smooth dike slope. Coastal Engineering, 101, 69-88.

Received 14 October, 2019

Revised 14 November, 2019

Accepted 16 November, 2019