

경사입사 시 테트라포드로 피복된 경사제 상부구조물에 작용하는 파력 비교 실험 Experimental Comparison of the Wave Force on Crown Wall of Sloping Breakwater Armored with Tetrapods under Obliquely Incident Waves

오상호* · 이주연**
Sang-Ho Oh* and Jooyeon Lee**

요 지 : 테트라포드로 피복된 경사식방파제 상부구조물에 파가 경사 입사할 때의 파력 변화를 관찰하기 위한 수리 모형실험을 수행하였다. 입사파향은 0, 15, 30, 45° 4가지로 변화시켰으며 상부구조물 전면 및 하부면에 파압계를 부착하여 수평 및 연직파력을 측정하였다. 실험을 통해 입사각과 구조물 전면이 이루는 각도가 증가할수록 수평 및 연직 파력이 모두 감소함을 확인하였다. 실험자료 분석 결과로부터 입사파향에 대한 수평 및 연직 파력 감소율 산정식을 각각 제시하였다.

핵심용어 : 상부구조물, 파력, 수리모형실험, 경사입사파

Abstract : Physical experiments have been performed in a wave basin to investigate change of the wave loading on the crown wall under obliquely incident wave conditions. The measurement was carried out with wave incidence angle of 0, 15, 30 and 45°. The pressure transducers were placed on the front and bottom face of the crown wall to obtain horizontal and uplift force as well. It was found that both the horizontal and vertical force decreases with the incidence angle. Based on the analysis of the experimental data, a formula was suggested to estimate the reduction rate of horizontal and vertical forces under obliquely incident waves.

Keywords : crown wall, wave force, physical experiment, oblique waves

1. 서 론

경사식 방파제 상단에 설치되는 콘크리트 상부구조물은 마루높이를 낮게 유지하면서 피복되는 사석의 양을 줄일 수 있어 경제적이면서도 설계 및 시공 기술이 단순하여 대부분의 경사식 방파제 설계에 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 상부구조물 설계 시 작용하는 외력에 대한 안정성 검토가 충분히 이루어지지 않을 경우 구조물의 파손, 미끌림 등으로 이어질 수 있다. 이러한 측면에서 경사식 방파제 상부구조물에 작용하는 파압을 정확하게 평가하는 것은 설계 시 매우 중요하다.

현재까지 경사제 상부구조물 작용 파압 산정식에 대한 몇 가지 연구 결과들이 제안된 바 있다(Jensen, 1984; Bradbury et al., 1988; Pedersen, 1996; Martin et al., 1999). 그러나 이상의 파압 산정식에서는 파랑이 구조물에 직각으로 입사하는 경우만 다루고 있으며, 경사 입사 조건에 대해서는 별도의 산정 지침을 제시하고 있지 않다. 그러나 실제 설계에서는 주파향이 방파제의 법선과 경사를 이루는 경우가 발생하게 되는데, 이 경우 직각 입사 시 파압 산정식을 적용하게 되

면 과다설계가 될 가능성이 높아 경제성 측면에서 불리할 수 있다.

한편, 경사식 방파제에 파랑이 경사지게 입사하는 경우의 월파 및 소파블록 안정성에 관한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바 있다. Galland(1994)는 0~75°의 경사 입사 조건에서 4 가지 서로 다른 경사제 피복블록의 안정성 및 월파량을 평가하는 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 Galland (1994)는 경사입사 시의 결과에 대응되는 직각입사 시의 동등 파고(equivalent normal wave height)를 계산하는 방법을 제시하였다. 한편, Yu et al.(2002)의 연구는 이와는 다르게 Hudson의 안정계수 K_D 값을 기반으로 경사 입사 시 피복제 안정계수($K_{D, \theta}$) 산정식을 제안하였다. 보다 최근에 van Gent (2014)는 위 두 연구 결과 및 새로운 수리실험 결과를 통해 직각 입사 시 대비 경사 입사 조건에서 사석 피복제의 공칭 직경을 저감하여 평가할 수 있는 경험식을 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 피복제의 안정성 및 월파에 대해 초점을 맞추고 있으며 상부구조물 작용 파압에 관한 연구결과를 제시하고 있지 않다.

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

**한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 연구원(Corresponding author: Jooyeon Lee, Researcher, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3541, leeje@kiost.ac.kr)

이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 입사파향을 변화시키면서 경사제 상부구조물에 작용하는 파압을 계측하는 평면 수리모형실험을 수행하였으며, 분석 결과를 토대로 경사 입사 조건에서의 수평 및 연직 파력 감소율을 평가하는 경험식을 제안하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형

수리모형실험은 길이 33 m, 폭 30 m, 높이 1.2 m인 3차원 조파수조에서 수행되었으며, 본 연구에서는 실험 편의를 위해서 수조 길이 방향으로 32.5 m, 폭 방향으로 25 m 공간을 실험에 활용하였다. 파랑 생성을 위해 전기 서보 피스톤 방식으로 구동되는 일방향 조파기 4대를 사용하였으며 실험 영역을 둘러싼 모든 면에는 쇠석을 설치하여 반사와 발생을 억제하였다. 경사제 모형은 Fig. 1에 보인 것처럼 조파관으로부터 20 m 떨어진 지점에 설치하였고, 모형의 법선이 입사파향과 이루는 각도가 0°에서 45°까지 15° 간격으로 변화하도록 하였다. Fig. 2에는 서로 다른 입사파향별로 모형이 설치된 사진을 나타내었다.

Fig. 3에는 실험 모형 단면도를 제시하였다. 사석마운드의

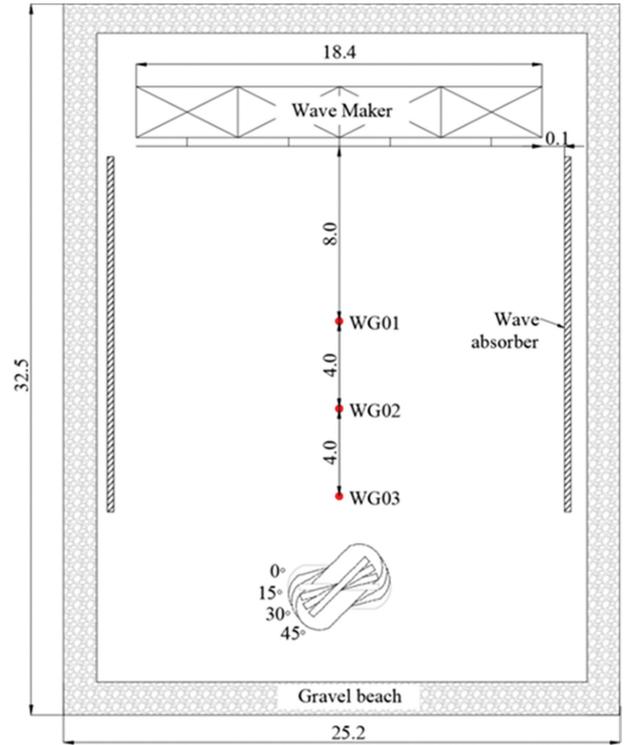


Fig. 1. Plan view of the wave basin with the setup of the break-water model (unit: m).

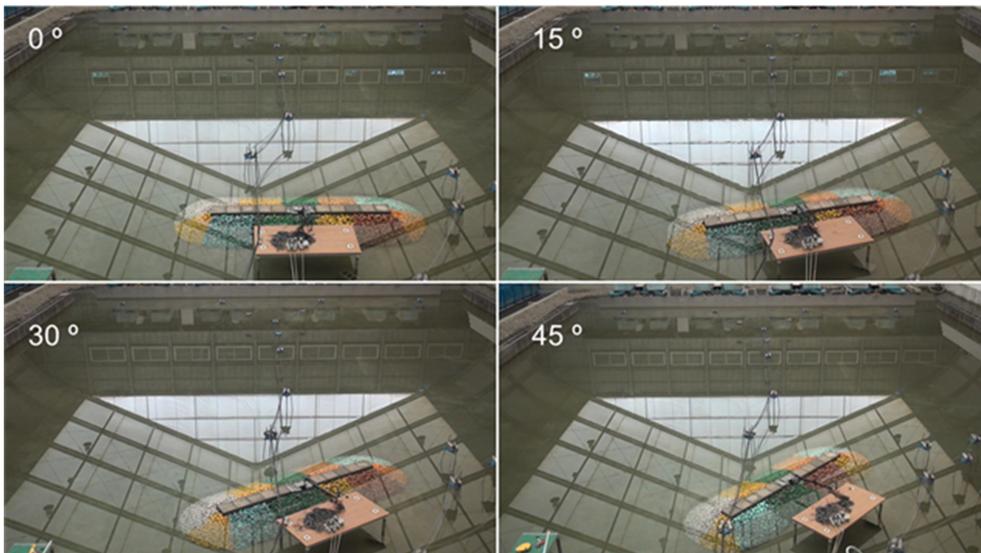


Fig. 2. Photographs of the model setup with different wave incidence angles.

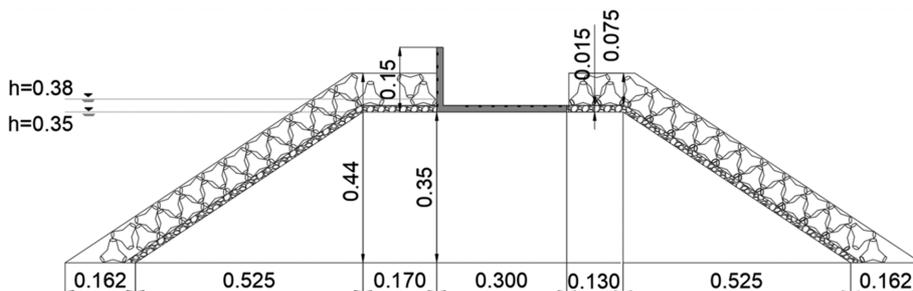


Fig. 3. Side view of the model (unit: m).

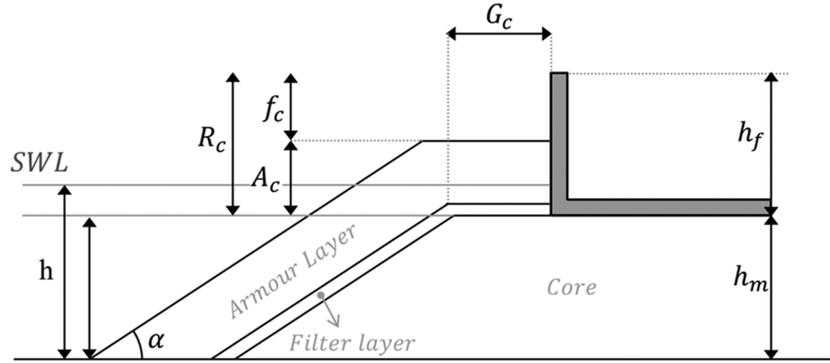


Fig. 4. Definition of geometrical parameters related to the breakwater model.

Table 1. Summary of the parameter values of the breakwater model

Parameter	Value	Unit
h_f	0.15	m
h_M	0.35	m
f_c	0.06	m
R_c	0.12, 0.15	m
A_c	0.06, 0.09	m
G_c	0.17	m
$\cot\alpha$	1.5	-

높이는 0.35 m이며 전면과 후면 경사는 모두 1:1.5로 평균 입경 1 g의 기초 사석(Core) 위에 12 g의 중간 사석 피복층(Filter layer)을 쌓고 150 g 테트라포드 2열(Armour layer)로 피복하였다. L자 형태의 상부구조물은 높이 0.15 m, 폭 0.3 m이며 투명 아크릴로 제작하여 경사제 위에 설치한 후 움직이지 않도록 고정하였다. Fig. 4에는 Table 1에 보인 변수들에 대한 정의를 나타내었고, Table 1에는 이 변수들의 값을 제시하였다.

한편, 방파제 연장 방향으로의 아크릴 모형 길이는 0.6 m였으며, 아크릴 모형과 동일한 높이와 폭을 갖는 길이 0.3 m 콘크리트 블록을 모형 양측으로 각각 5개씩 일렬로 배치하여, 총 방파제의 연장 방향 길이가 3.6 m가 되도록 실험을 구성하였다.

2.2 계측기기 및 실험 방법

파고 계측은 Fig. 1에 나타난 것처럼 평면수조 내 3곳에서 이루어졌으며, 이 중 방파제 모형에 가장 가까운 곳에 위치한 WG3에서 계측된 자료를 이용하여 유의파고(H_s) 및 유의주기(T_s)를 평가하였다. 한편, 파압 계측은 Figs. 5와 6에 보인 것처럼 상부구조물 전면과 아랫면에 파압계를 부착하여 수행되었다. 파압계는 실험 모형에 매립하여 설치함으로써 파압계 표면이 모형 표면에서 돌출되지 않고 균일한 면을 이루도록 하였다. 테트라포드가 거치된 형태에 따라 상부구조물 전면 작용 파압이 달라질 수 있음을 고려하여 Fig. 5에 보인 것처럼 전면벽 파압 계측을 3개열에서 실시하고 각각의 높이별로 3개열의 평균값을 계산하여 최종적인 전면 파압으로 평가하였다. 상부구조물 수평 및 연직 파압을 계측하기 위해 사

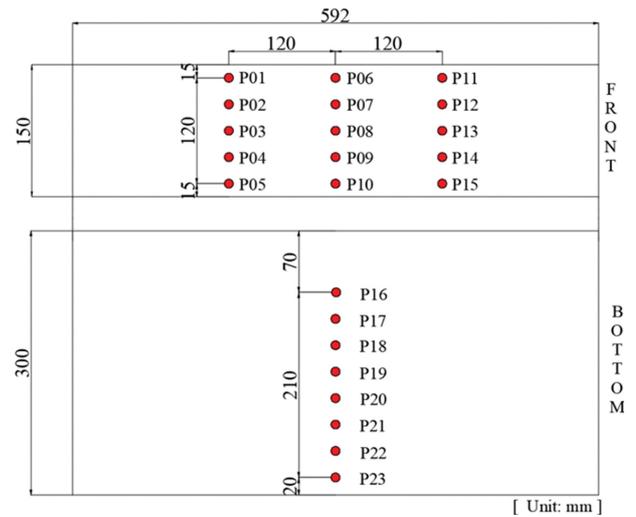


Fig. 5. Front and bottom views of the pressure gauges placed on the superstructure.

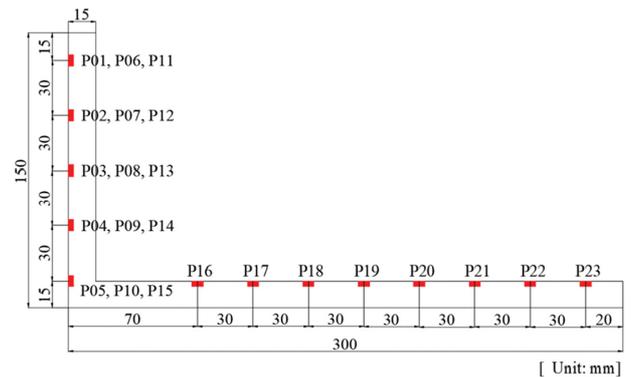


Fig. 6. Side view of pressure gauges placed on the superstructure.

용된 파압계의 개수는 23개였으며, 파압 및 파고 계측 자료는 800 Hz 간격으로 취득하였다.

Fig. 3에 보인 것처럼 수심(h)이 0.35 및 0.38 m인 두 가지 조건에서 계측이 이루어졌으며, 수심에 따라 Table 1에 보인 것처럼 R_c 및 A_c 의 값은 달라지게 되었다.

실험은 스펙트럼 침투증대계수 값이 $\gamma=2.0$ 인 JONSWAP 스펙트럼을 따르는 불규칙파로 구성하였으며, 각 실험파별로

Table 2. Wave parameters and non-dimensional quantities

Parameter	Range	Unit
h	0.35-0.38	m
H_s	0.08-0.1	m
T_s	1.0-2.0	s
ξ_m	2.3-6.8	-
R_s/H_s	1.38-3.24	-
H_s/A_c	0.67-1.45	-
H_s/L_0	0.01-0.08	-

1,200파에 해당하는 시간 동안 조파하였다. 실험파는 수심 35 cm일 때에는 $T_s = 1.0, 1.5, 2.0$ s의 3 가지 조건에 대해서 $H_s = 0.1$ m였으며, 수심 38 cm일 때에는 위 3 가지 주기에 대해서 $H_s = 0.08$ 과 0.1 m의 두 가지 조건으로 변화시켰다. 따라서 총 실험파의 개수는 9개였다. 한편, 입사파향(θ)은 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 4가지 조건으로 변화시켰다. Table 2에는 실험파 조건 및 주요 무차원계수의 값 또는 범위를 정리하여 제시하였다.

3. 실험 결과

3.1 수평 및 연직파력 시계열

Fig. 7에는 $T_s = 1.5$ s, $H_s = 10$ cm인 파가 직각으로 입사했을 때 측정된 수평 및 연직 파력의 시계열을 제시하였다. 여기서 F_A 는 전면벽의 좌측 옆에 설치된 파압계 P01~P05, F_B 는 가운데 옆에 설치된 파압계 P06~P10, F_C 는 우측 옆에 설치된 파압계 P11~P15로부터 측정된 파압을 상부구조물 전체 높이에 대하여 적분하여 계산된 수평 파력을 나타낸다. F_A, F_B, F_C 의 시계열을 보면 서로 매우 유사함을 알 수 있다. 그렇지만 위에서 언급된 것처럼 파압계 전면이 피복된 테트라

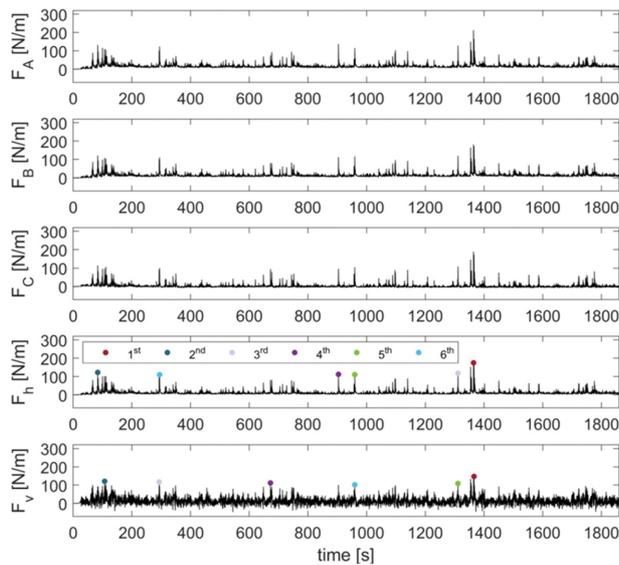


Fig. 7. An exemplary time series of the wave force on the crown wall ($T_s = 1.5$ s, $H_s = 10$ cm, $\theta = 0^\circ$).

포드의 형태에 따라 파압 계측값이 약간 차이가 있음을 확인할 수 있다. F_h 는 F_A, F_B, F_C 의 평균값으로서 본 연구에서는 이 값을 상부구조물 전면벽에 작용하는 수평 파력으로 평가하였다. 경사 입사 시에는 F_A, F_B, F_C 에서 측정된 파력의 상대적 위상차가 발생할 수 있다. 그러나 좌측 옆과 우측 옆에 설치된 파압계의 거리가 입사파 파장에 비해 크지 않은 편이고, F_B 를 기준으로 보면 평균값을 취하는 과정에서 위상차의 효과는 평활화된다고 볼 수 있다. 한편, F_v 는 상부구조물 하부에 설치된 8개의 파압계(P16~P24)로부터 적분하여 계산된 연직 파력을 의미한다. F_h 와 F_v 의 시계열 그림에서 ○ 기호로 표시된 곳은 파력 계측값이 큰 순서로 상위 6개에 해당하는 값에 해당하며, 1,200파를 조파한 점을 고려하면 상위 0.5% 이내의 파력($F_{0.5\%}$)에 해당한다고 할 수 있다. F_h 와 F_v 의 상위 6개 파력이 발생한 시간은 일부는 일치하고, 나머지

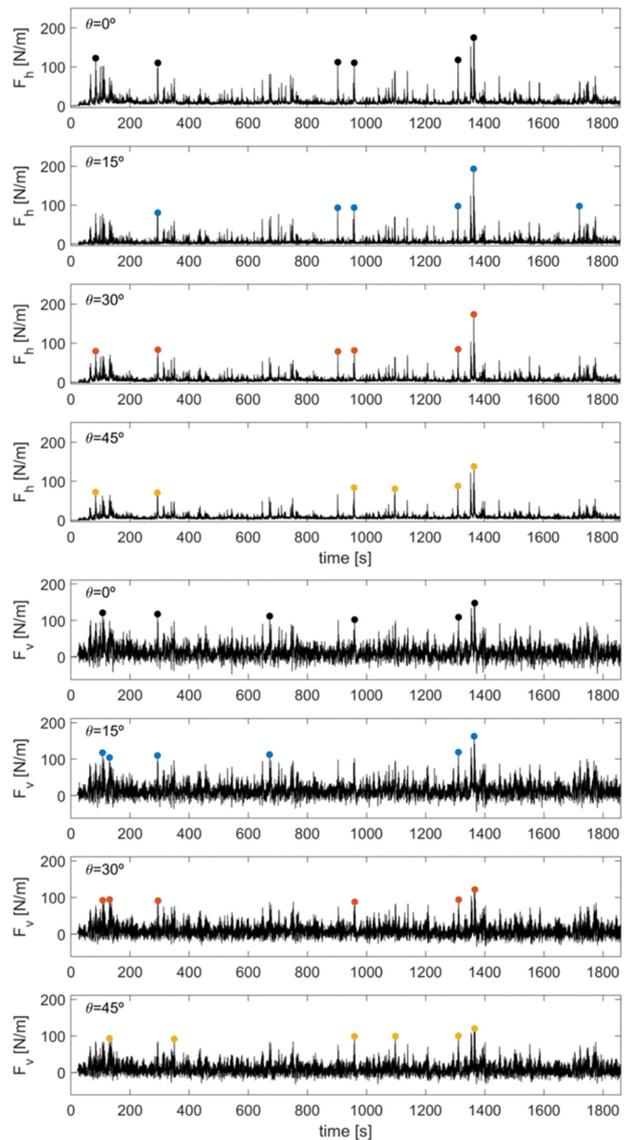


Fig. 8. An exemplary time series of the horizontal and vertical wave forces on the crown wall under different wave incident angles ($T_s = 1.5$ s, $H_s = 10$ cm).

는 일치하지 않았다.

Fig. 8에는 Fig. 7에 보인 과정을 통해 계산된 수평 및 연직 파력을 서로 다른 입사파향에 대하여 비교하여 나타내었다. Fig. 8과 마찬가지로 파력이 큰 순서로 상위 6개에 해당하는 계측값($F_{0.5\%}$)을 ○ 기호로 표시하였다. 대체로 입사각이 증가함에 따라 구조물 전면 및 아랫면에 작용하는 파력이 감소하는 경향이 나타남을 직관적으로 확인할 수 있다.

한편, 본 연구와 같은 불규칙파 실험에서는 경사제 사면을

타고 처오름이 발생하는 과정에서의 쇄파 발생 여부 및 테트라포드 피복 상태가 파압 계측값에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 1,200파에 해당하는 전체 조파시간 동안의 수평 및 연직 파력 최대값을 기준으로 입사파향에 따른 파력 감소율을 평가할 경우 상당한 통계적 불확실성이 개입될 수 있다. 실제로 Fig. 7과 8에서도 개별 실험 조건에서의 상위 6개 파력 값을 서로 비교해 보면 비슷한 경우도 있지만 때로는 제법 큰 차이를 보이기도 한다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는

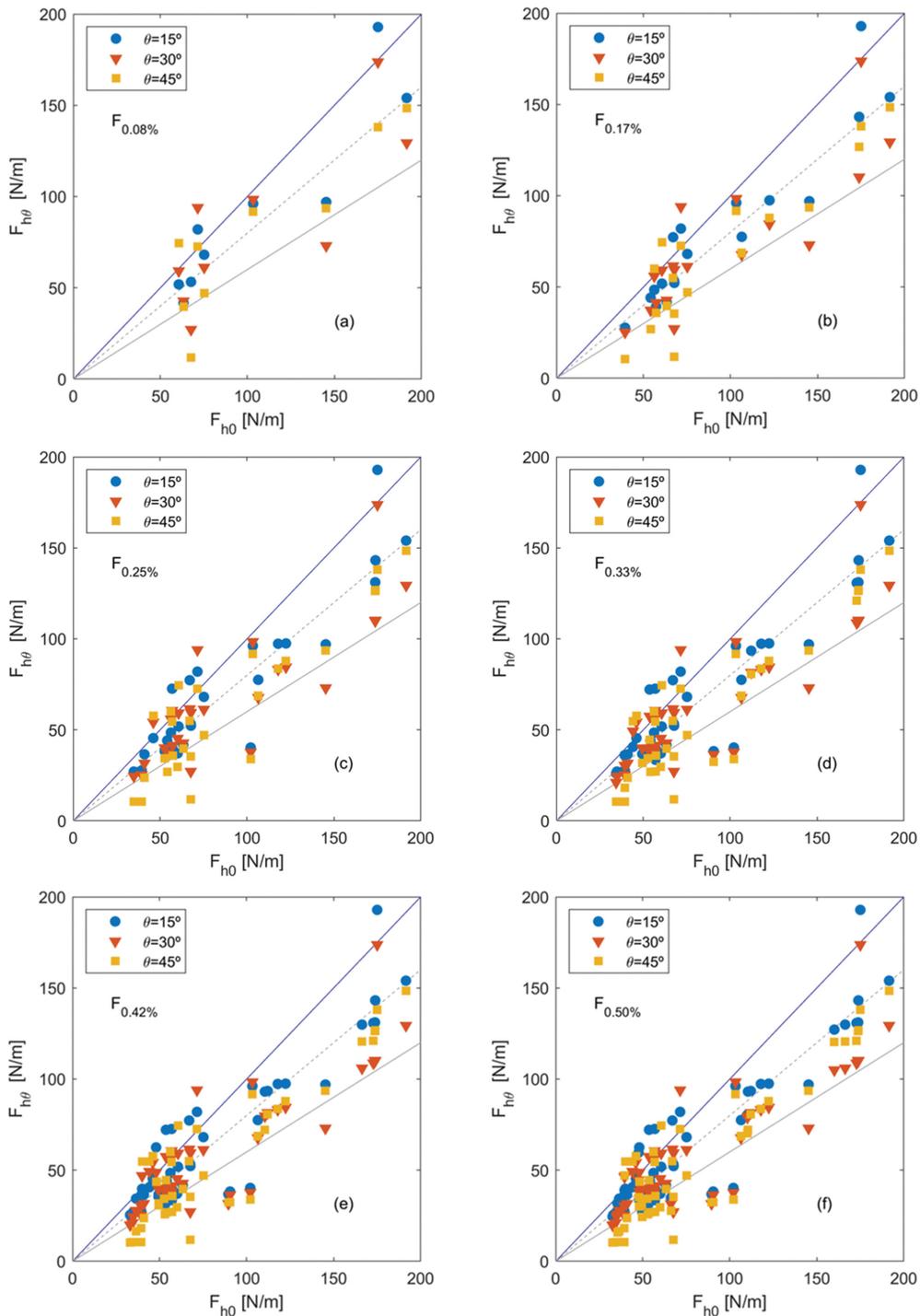


Fig. 9. Comparison of the horizontal force on the crown wall under oblique waves with normally incident waves.

입사파향에 따른 수평 및 연직 파력 감소율을 평가할 때 초과확률 0.5%에 해당하는 상위 6개 파력값의 데이터를 이용하여 분석을 수행하였다.

3.2 입사파향에 따른 계측 파력 비교

파력 감소율 산정에 앞서 상위 6개 계측 파력의 입사파향에 따른 변화 양상을 고찰하였다. Fig. 9에는 경사 입사 시 ($\theta = 15, 30, 45^\circ$)와 직각 입사 시($\theta = 0^\circ$)의 수평 파력을 비교

한 그래프를 제시하였다. Fig. 9(a)는 각 실험조건 별 최대파력 값을 제시한 그림이며, Fig. 9(b)에서 9(f)는 순차적으로 상위 2개까지부터 6개까지의 파력값을 누적하여 각각 제시한 그림이다. 각각의 그림에서 가로축은 직각 입사 시 수평 파력(F_{h0}), 세로축은 경사 입사 시 수평 파력($F_{h\theta}$)을 나타낸다. 직각 입사 시 대비 경사 입사 시 파력의 크기를 쉽게 비교할 수 있도록 $F_{h0}:F_{h\theta}$ 의 비율이 0.6, 0.8, 1.0을 나타내는 선을 각각 회색 실선, 회색 점선, 파란색 실선으로 도시하였다.

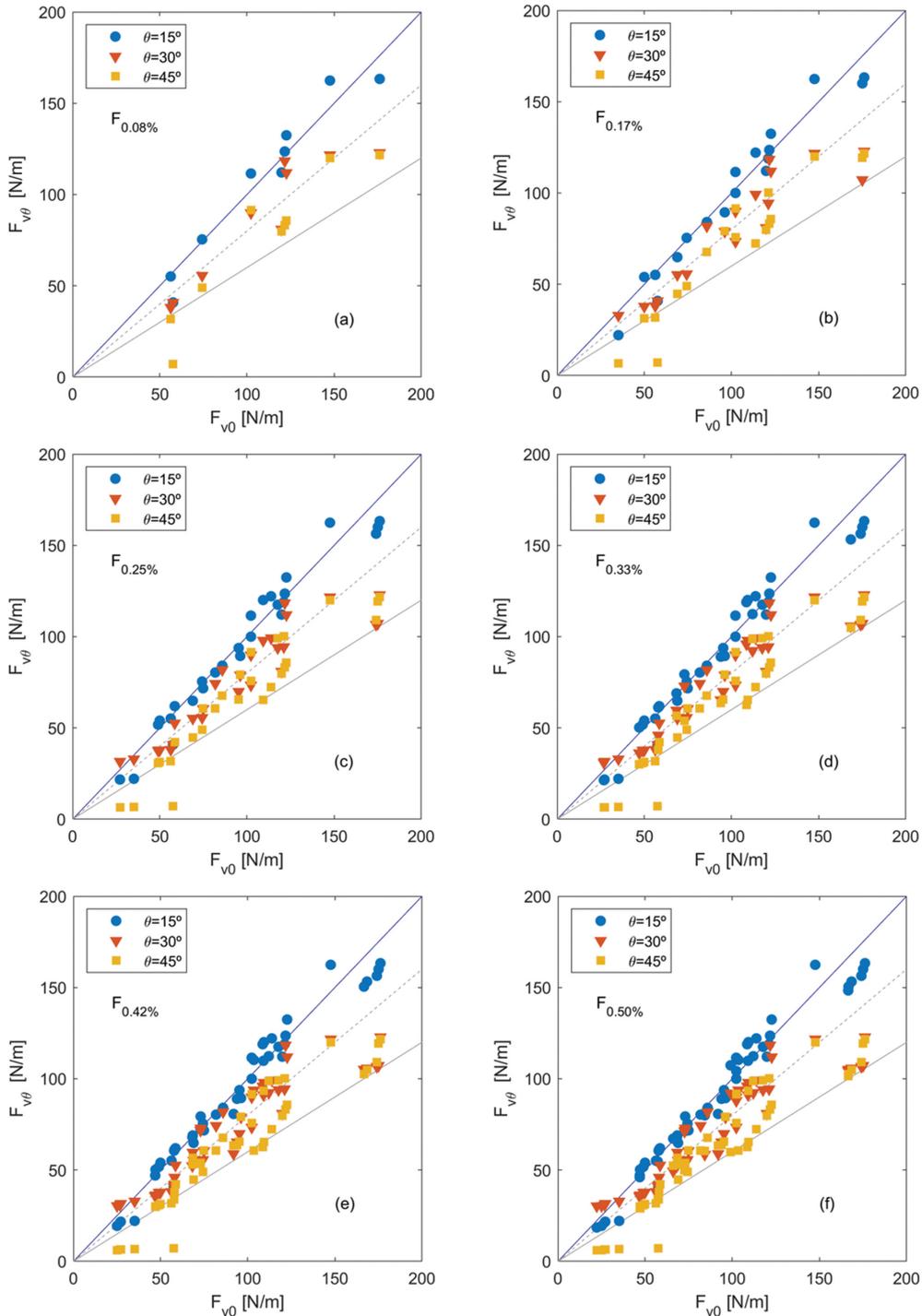


Fig. 10. Comparison of the vertical force on the crown wall under oblique waves with normally incident waves.

Fig. 9로부터 전반적으로 파랑의 입사각이 증가함에 따라 상대적으로 파력이 감소하는 경향이 나타남을 확인할 수 있다. 최대파력 값만이 표시된 Fig. 9(a)에서도 이러한 경향을 알 수 있지만 Fig. 9(b)~9(f)에 걸쳐서 순차적으로 상위 2개까지부터 6개까지의 파력값들이 중첩되어 표시됨에 따라 더욱 선명한 경향성을 파악할 수 있다. 다만 일부 계측 자료에서는 경사 입사 시의 수평 파력이 직각 입사 시에 비해서 근소하게 큰 경우도 관찰되었다.

Fig. 10에는 상부구조물 아랫면에 작용하는 연직 파력에 대한 결과를 Fig. 9와 유사한 형태로 제시하였다. Fig. 10(a)부터 10(f)까지 각각의 그림에서 가로축은 직각 입사 시 연직

파력(F_{v0}), 세로축은 경사 입사 시 연직 파력($F_{v\theta}$)을 나타낸다. 연직 파력의 경우 입사각이 증가함에 따라 파력이 감소하는 경향이 수평파력에 비해 더욱 뚜렷하게 나타나며, 자료의 분산(scattering)도 훨씬 적음을 확인할 수 있다. 또한 입사각이 15°인 경우에는 직각 입사 시의 연직파력 값과 거의 차이가 없었다.

Fig. 11에는 초과확률 0.5%에 해당하는 상위 6개까지의 누적 파력값에 대하여 경사 입사 시 계측값을 직각 입사 시 계측값으로 나눈 비율에 대한 그래프를 제시하였다. 즉, Fig. 11은 Fig. 9(f)와 Fig. 10(f)의 데이터를 무차원화하여 입사각별로 도시한 것이다. 그림에서 $R_{h\theta}$ 는 무차원 수평파력, $R_{v\theta}$ 는 무

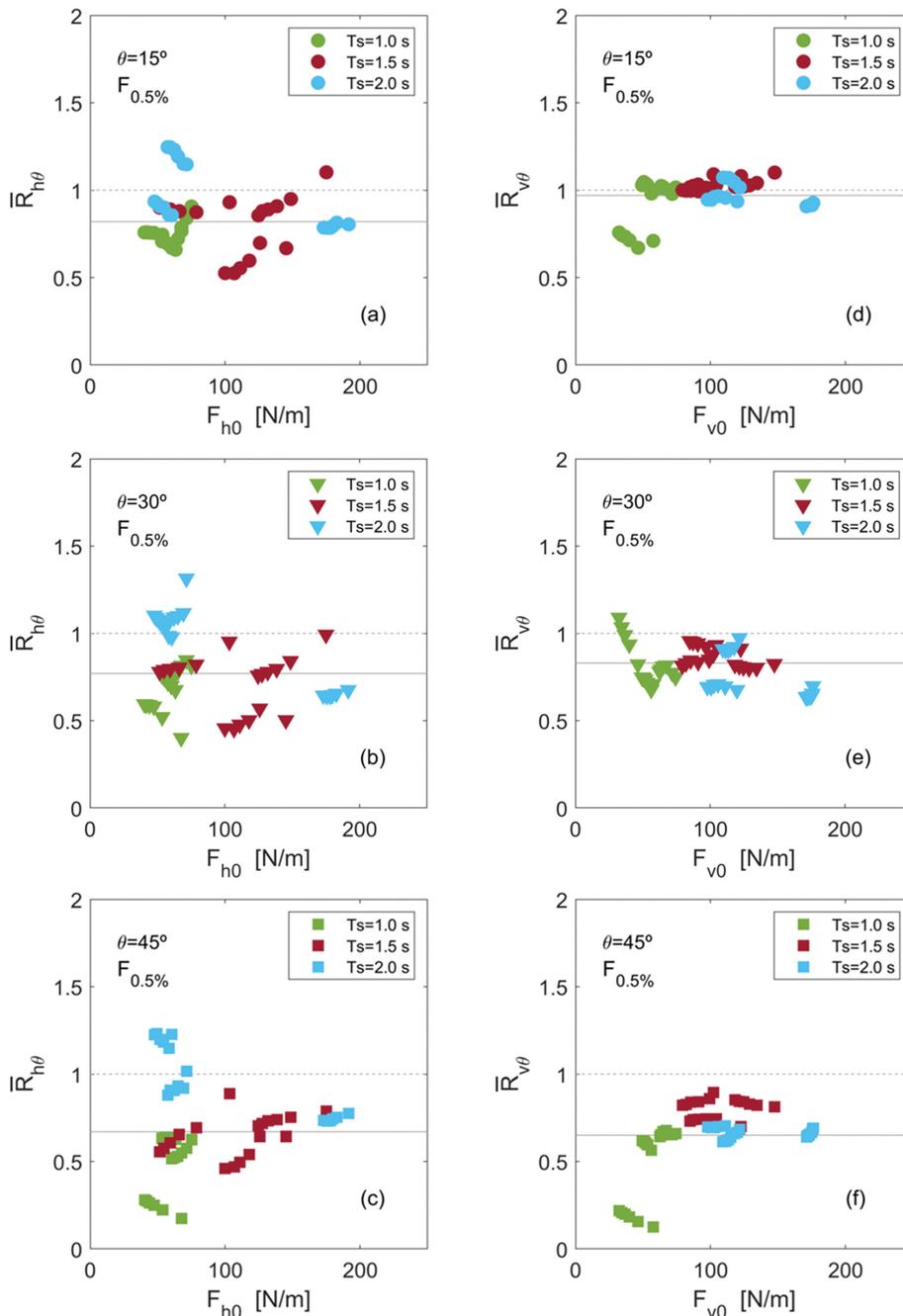


Fig. 11. Values of the horizontal and vertical wave force under oblique waves normalized by those under normally incident waves.

Table 3. The mean reduction rate of horizontal force on the crown wall with different wave incidence angle and exceedance probability

θ	$\bar{R}_{h\theta}$					
	$F_{0.08\%}$	$F_{0.17\%}$	$F_{0.25\%}$	$F_{0.33\%}$	$F_{0.42\%}$	$F_{0.50\%}$
15°	0.87	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82
30°	0.81	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77
45°	0.75	0.70	0.69	0.68	0.67	0.67

Table 4. The mean reduction rate of vertical force on the crown wall with different wave incidence angle and exceedance probability

θ	$\bar{R}_{v\theta}$					
	$F_{0.08\%}$	$F_{0.17\%}$	$F_{0.25\%}$	$F_{0.33\%}$	$F_{0.42\%}$	$F_{0.50\%}$
15°	0.98	0.96	0.97	0.98	0.97	0.97
30°	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82	0.83
45°	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65

차원 연직파력을 의미하며 회색으로 표시된 수평 실선은 그 평균값($\bar{R}_{h\theta}$, $\bar{R}_{v\theta}$)을 나타낸다. 즉, $\bar{R}_{h\theta}$ 및 $\bar{R}_{v\theta}$ 은 직각입사 시 대비 경사입사 시의 수평 및 연직파력의 평균 감소율에 해당한다. Fig. 9와 10에서도 입사각이 증가함에 따라 수평 및 연직파력이 감소하는 경향을 알 수 있었지만 Fig. 11을 통해서 이러한 경향을 더욱 분명하게 파악할 수 있으며 $\bar{R}_{h\theta}$ 및 $\bar{R}_{v\theta}$ 을 구하여 파력 감소율을 정량적으로 평가하는 것이 가능하다.

3.3 수평 및 연직 파력 감소율 산정

Fig. 11이 Fig. 9(f) 및 Fig. 10(f)와 대응되는 것처럼 Fig. 9(a)~(e) 및 Fig. 10(a)~(e)에 대응되는 무차원 수평파력($R_{h\theta}$)과 연직파력($R_{v\theta}$)을 유사하게 계산할 수 있으며, 각각의 경우에 대하여 그 평균값($\bar{R}_{h\theta}$ 및 $\bar{R}_{v\theta}$)을 계산함으로써 초과확률에 따른 파력 감소율을 개별적으로 산정하는 것이 가능하다.

Table 3과 4에는 이러한 계산을 통해서 구해진 수평 및 연직파력 감소율을 표로 정리하여 나타내었다. 평균값 계산에

사용된 데이터 수가 많아짐에 따라서, 즉 초과확률이 커짐에 따라서($F_{0.08\%} \rightarrow F_{0.50\%}$), $\bar{R}_{h\theta}$ 및 $\bar{R}_{v\theta}$ 의 값이 일정하게 수렴해 감을 확인할 수 있다. 한편, 수평파력 감소율은 최대파력 값만을 사용하여 계산된 경우($F_{0.08\%}$)에 비해서 상위 6개까지의 파력값의 무차원 파력 비 평균을 사용한 경우($F_{0.50\%}$)에 더 커짐을 확인할 수 있다. 즉, $F_{0.08\%}$ 조건에서는 입사각이 15°일 때 13%, 30°일 때 19%, 45°일 때 25%의 감소율을 보이지만, 초과확률이 증가함에 따라 감소율이 커져서 $F_{0.50\%}$ 조건에서는 감소율이 18%, 23%, 33%로 수렴하였다. 반면에 연직파력 감소율은 $F_{0.08\%}$ 조건에서 입사각이 15°일 때 2%, 30°일 때 21%, 45°일 때 36%였고, $F_{0.50\%}$ 조건에서는 3%, 17%, 35%로 차이가 크지 않았다.

Fig. 12에는 $F_{0.08\%}$ 및 $F_{0.50\%}$ 조건에서의 $\bar{R}_{h\theta}$ 와 $\bar{R}_{v\theta}$ 값을 각각 그래프로 나타내었다. 위에서 언급한 것처럼 $\bar{R}_{h\theta}$ 값은 두 조건에 따라 약간 차이가 있지만 $\bar{R}_{v\theta}$ 값은 차이가 거의 없음을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 또한 수평파력의 경우에는 입사각이 증가함에 따라 거의 선형적으로 비례하여 파력이 저감되는 반면, 연직파력의 경우에는 입사각이 15°일 때까지는 직각 입사 시와 큰 차이가 없다가 그 이후부터 파력이 급격하게 저감됨을 알 수 있다.

$$\bar{R}_{h\theta} = 1 - 0.0055\theta \quad \text{for } F_{0.08\%} \quad 0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (1)$$

$$\bar{R}_{h\theta} = 1 - 0.0074\theta \quad \text{for } F_{0.50\%} \quad 0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (2)$$

$$\bar{R}_{v\theta} = \begin{cases} 1 & 0^\circ < \theta \leq 15^\circ \\ 1.18 - 0.012\theta & 15^\circ < \theta \leq 45^\circ \end{cases} \quad (3)$$

이러한 점을 고려하여 입사각에 따라 상부구조물에 작용하는 $\bar{R}_{h\theta}$ 및 $\bar{R}_{v\theta}$ 의 회귀직선을 Fig. 12에 보인 것처럼 구할 수 있으며, 그 식을 식(1)~(3)에 나타내었다. 수평파력의 경우에는 $F_{0.08\%}$ 및 $F_{0.50\%}$ 조건에 따라 회귀곡선의 기울기, 즉 파력 저감율이 달라지게 되므로 식(1)과 (2)로 구분하여 제시하였다. 이처럼 초과확률에 따라 입사각에 따른 수평파력 저감율이 다르지만 설계 시에는 일반적으로 재현빈도가 극히 낮은 설계파 조건에 대하여 외력을 산정하게 되므로 식(1)을 사

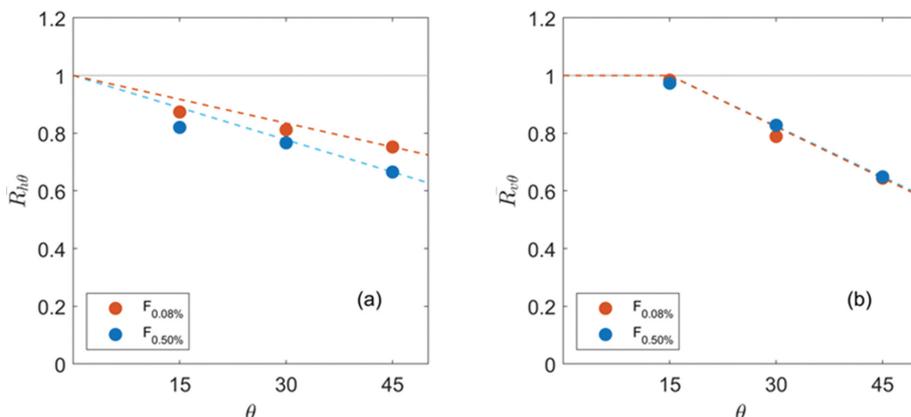


Fig. 12. Influence of oblique waves on the horizontal and vertical force.

용하는 것이 바람직할 것이다. 수평파력 저감율 측면에서도 저감율의 기울기가 더 완만하기 때문에 파력을 더 보수적으로 산정하게 된다. 다만, 재현빈도가 통상적인 조건보다 상대적으로 높다면 Table 3 및 Fig. 12의 결과를 토대로 저감율을 식(1)보다 더 크게 평가하는 것도 가능할 것이다. 한편, 연직파력 저감율은 Table 4 및 Fig. 12에 보인 것처럼 초과확률에 따른 변화가 크지 않으므로 설계 시 식(3)을 보편적으로 적용해도 좋을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 입사파향이 상부구조물에 작용하는 수평 및 연직 파력에 미치는 영향을 평가하기 위해 평면 수리모형실험을 수행하였다. 계측 자료를 분석한 결과 상부구조물에 작용하는 파의 입사각(θ)이 증가할수록 계측되는 수평 및 연직 파력이 감소하는 경향이 나타났다. 초과확률 0.08%~0.50%에 해당하는 파력 계측값을 토대로 입사각에 따른 파력 저감율을 비교한 결과, 수평파력은 초과확률이 낮을수록 저감율이 완만한 반면, 연직파력은 초과확률에 따른 차이가 거의 없었다. 또한, 자료 분석 결과를 토대로 입사각에 따른 수평 및 연직 파력 저감율을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였으며, 현업 설계에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 단, 현재 실험에 적용된 조건이 모든 경사 입사파 조건에서 경사제 상치콘크리트에 작용하는 파력 평가에 사용되기에는 한계가 있으므로 본 연구에서 수행된 실험 파라미터 범위 내에서 경험식을 적용하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원 R&D 과제 “기후변화대응 항만설계기준 개선 방안연구(PM60660)” 및 “재해안전항만 구축 기술개발(PM60720)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Jensen, O.J. (1984). A monograph on rubble mound breakwaters, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Bradbury, A., Allsop, W. and Stephens, R.V. (1988). Hydraulics performance of breakwater crown walls, SR146, HR Wallingford, UK.
- Pedersen, J. (1996). Wave forces and overtopping on crown walls of rubble mound breakwaters: an experimental study, Ph.D Thesis, Aalborg University, Denmark.
- Martin, F.L., Losada, M.A. and Medina, R. (1999). Wave loads on rubble mound breakwater crown walls. *Coastal Engineering*, 37(2), 149-174.
- Galland, J.-C. (1994). Rubble mound breakwater stability under oblique waves: an experimental study. *Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering*, 1061-1074.
- van Gent, M.R.A. (2003). Oblique wave attack on rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 88, 43-54.
- Yu, Y.-X., Liu, S.-X. and Zhu, C.-H. (2002). Stability of armour units on rubble mound breakwater under multi-directional waves. *Coastal Engineering Journal*, 44(2), 179-201.

Received 28 April, 2020

Revised 9 June, 2020

Accepted 9 June, 2020