

3차원구조물에 작용하는 파력의 수치계산 Numerical Simulation of Wave Forces on 3-D Structures

허동수¹, 김도삼², 배기성³

Dong-Soo Hur¹, Do-Sam Kim² and Ki-Seong Bae³

1. 서 론

방파제 등으로 대표되는 해역구조물의 내차설계에 가장 중요한 파력의 산정에는, 주로 수리모형실험 및 실험에 근거해 제안된 습田식 등의 파력공식이 이용되어 왔다. 하지만, 정도 높은 수리모형실험을 행하기 위해서는 많은 시간과 비용 및 노력이 필요하게 된다. 또한 최근의 구조물은 그 형상의 다양성이 증가하고 있고, 파력공식의 적용은, 대상조건에 따라서는 경험계수 등의 결정에서 정도면에서 반드시 충분하다고는 할 수 없다. 따라서 방파제 등의 파력산정에 수치계산의 적용이 가능하게 된다면 경제적인 면이나 시간적인 면에서 부담을 경감시킬 수 있을 뿐만 아니라 수리모형실험에서 할 수 없었던 다양한 검토가 가능하게 되는 등, 설계면에 있어서의 공헌도 상당히 커질 것이다.

이와 같은 배경하에서 지금까지 Navier-Stokes의 운동방정식을 이용한 파력산정이 많은 연구자에 의해 수행되어 왔다. van Gent et al.(1994)은 Berm식 방파제를 설치한 파동장에서의 수치계산을 행하여 방파제 내부의 압력의 계산치와 실험치와의 좋은 일치를 나타내고 있다. 혼성방파제에 작용하는 파력 및 압력의 계산에로서는 勝井 등(2000)과 Hsu et al.(2002)의 연구가 있다. 직립방파제에 작용하는 충격쇄파력의 수치계산은 渡辺 등(1999), 有川 등(2001)에 의해 수행되어 실험결과의 정도 높은 재현으로 그 타당성의 검증을 확인하고 있다. 또한, Hamzah 등(2000)은 해안제방에 작용하는 쓰나미의 파력에 대한 직접수치

시뮬레이션(NASA-VOF)을 실시하여 충격파압의 Peak치의 재현에는 튜닝이 필요하지만, 안정성의 검토에 중요한 파력에 관해서는 재현가능하다는 것을 나타내고 있다. 이러한 연구들은 대부분이 2차원구조물을 대상으로 하고 있지만, 정도면에서 본다면 내파설계의 실용화에 가까운 레벨까지 와 있다고 할 수 있을 것이다. 그러나, 방파제와 같은 반무한장을 가진 구조물이 아니라 원주라든지 잠제상의 표식으로 설치되고 있는 표식암(의암) 등의 구조물에 대해서는 3차원적으로 취급할 필요가 있다.

본 연구에서는 우선, 3차원의 직접수치해석기법을 제안한 뒤, 잠제상에 설치된 3차원구조물(대칭구조물과 비대칭구조물의 두가지 경우)에 작용하는 파력의 수리모형실험을 실시하여 실험치와 계산치와의 비교, 검토를 통하여 3차원 수치계산기법의 타당성과 유효성을 검증한다.

2. 수리모형실험

수치해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 본 실험에서 대상으로 한 3차원구조물은, 파의 진행방향에 대해서 대칭구조물과 비대칭구조물의 2종류이다. 실험은 日本 名古屋 대학의 2차원강제조파수조(길이 30m, 폭 0.7m, 높이 0.9m)에서 실시하였다.

2.1 대칭구조물

수조내에 일정경사 1/30의 볼투과 목제사면을 설

1 경상대학교 토목환경공학부 조교수

2 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수

3 경상대학교 토목환경공학부 교수

치하고, 그 위에 천단폭 1m, 岸側과 沖側의 법면경사가 1/3인 잠제를 구축했다. 또한, 잠제의 沖側수심을 20cm, 천단수심을 4cm로 고정하였다(Fig. 1 참조). 구조물모형은 실제의 시공에 및 수치해석결과와의 비교를 고려하여, Fig. 2의 각추대와 직방체 2종류를 이용하였다. 먼저, 수조상단에 고정된 지지대에 3분력계를 달고, 그 아래에 구조물모형을 매달아서 파진행방향의 파력 F_x 와 연직방향 파력 F_z 를 측정하였다. 이 때, 잠제의 천단과 구조물 저면과의 거리는 2mm 정도가 되도록 하였고, 구조물 저면의 한 변이 파봉과 평행이 되도록 설치하였다. 또한, 전기용량식파고계와 전자유속계를 이용하여 구조물 주변에서의 수위변동과 유속도 동시에 측정하였다. 입사파는 규칙파로서, 주기는 3종류로 변화시켰다. 입사파고 H_i 는 쇄파발생의 유무와 쇄파발생 위치를 고려하여 4종류 변화시켰다.

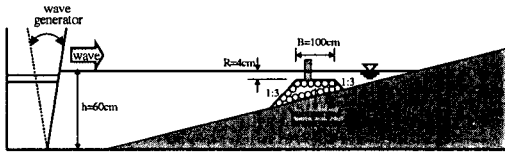


Fig. 1. Concept of wave flume for symmetric structure experiments.

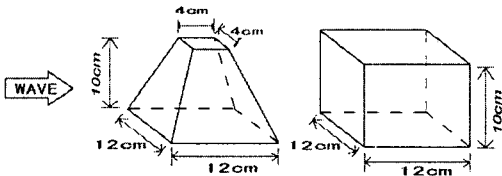


Fig. 2. Model Structures used in symmetric structure experiments

2.2 비대칭구조물

Fig. 3에 나타내는 것과 같이, 수조내에 천단폭 75cm, 岸側과 沖側의 법면경사가 각각 1/2와 1/3인 잠제를 자갈로 구축하고, 그 천단상에 비대칭구조물을 설치했다. 또한, 천단수심은 5cm로 고정하였다. 비대칭구조물로서는 Fig. 4에 나타내는 3종류의 형상을 이용했다. 이 구조물들을, 대칭구조물의 실험과 마찬가지로, 3분력계에 매달아서 파진행방향의 파력 F_x , 직각방향의 파력 F_y 와 연직방향의 파력 F_z 를 측정하였으며, 전기용량식파고계와 전자유속계를 이용하여 구조물 주변에서의 수위변동과 유속도 동시에 측정하였다. 발생파는 규칙파로서, 주기를 3종류 변화시키고, 각각의 주기에 대해 파고 H_i 를 몇 종류 변화

시켰다.

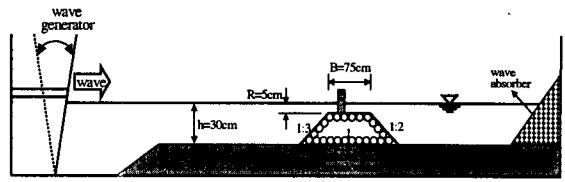


Fig. 3. Concept of wave flume for asymmetric structure experiments

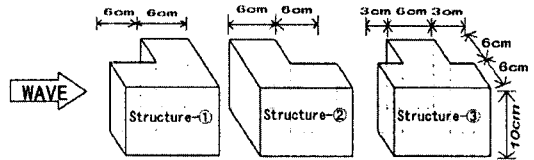


Fig. 4. Model Structures used in asymmetric structure experiments

3. 수치해석기법

본 연구에서는 범용성이 높을 뿐만 아니라 복잡한 자유수면의 취급이 가능한 VOF법과 투과성구조물에 의한 파변형에도 적용이 가능하도록 투수성의 영향을 고려할 수 있는 Porous Body Model(PBM)을 조합한 수치해석기법(Hur and Mizutani, 2003)을 이용한다.

기초방정식은 3차원비압축성유체의 연속방정식(1)과 수정된 Navier-Stokes 운동방정식(2)-(4), 및 자유표면의 형상을 모의하기 위한 VOF함수 F 의 이류방정식(5)로 구성된다.

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial v}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial v}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - M_y - R_y$$

$$+ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zy}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \quad (3)$$

$$\gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial w}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g$$

$$- M_z - R_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right)$$

$$- \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y Fv)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z Fw)}{\partial z} = Fq^* \quad (5)$$

여기서,

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (6) \text{이며 조파}$$

를 위한 Source항이다.

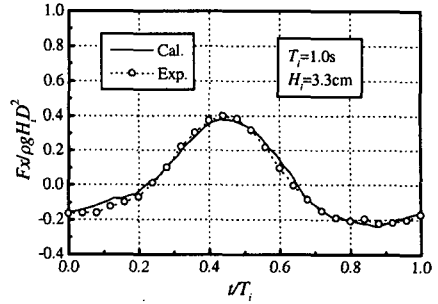
계산의 안정조건에는, 이류항으로부터 생기는 CFL조건과 확산항으로부터 생기는 확산불안정조건을 이용하였다. 수치해석기법의 세부사항에 대해서는 참고문헌(Hur and Mizutani, 2003)을 참고하기 바란다. 또한, 본 연구에서는 엇갈림 격자(Staggered Mesh)를 이용하여 상기의 지배방정식을 차분 근사하는 것에 의해 수치계산을 수행하였다.

4. 대칭구조물에 작용하는 파력

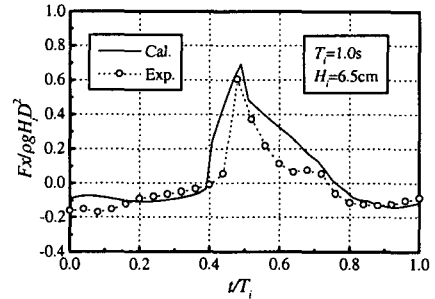
대칭구조물에 작용하는 파력의 계산에 이용한 계산격자의 크기는 x, y, z 방향에 각각 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$ 로 하였다. 또한, 파 진행방향의 파력 F_x 의 계산치는 구조물의 岸側과 沖側표면상에 작용하는 파력에 방향여현을 곱하여, 그 순간의 물수면 전체에 걸쳐서 적분한 값을 이용하였다.

4.1 직방체

Fig. 5는 잠제상의 직방체에 작용하는 파 진행방향의 파력 F_x 의 계산치와 실험치의 비교를 나타내며, Fig. 5(a)와 (b)는 각각 비쇄파 파력과 충격적인 쇄파력이 작용한 경우를 나타낸다. 먼저, Fig. 5(a)로부터, 비쇄파의 경우, F_x 의 계산치와 실험치는 상당히 고정도로 일치하고 있음을 알 수 있다. VOF법의 계산수법의 타당성은 지금까지 많은 연구자(for example, Petit et al., 1994; Kawasaki, 1999)에 의해 검증되어 왔지만, 3차원의 파동장에 있어서의 압력도 높은 정도로 재현가능하다는 것을 여기서 확인할 수 있다.



(a) Non-breaking



(b) Breaking

Fig. 5. Comparisons of time variations of wave forces between the experimental measurements and the numerical results for cubic body.

한편, Fig. 5(b)의 충격쇄파력의 시간변화에 대해서는, 파력이 저감하는 시간의 길이 등, 실험치와 계산치 사이에는 약간의 차이가 보이지만, 공학적으로 중요시 되는 쇄파파력의 Peak치에 착목하면 계산치와 실험치는 높은 일치도를 보이고 있다고 간주할 수 있다.

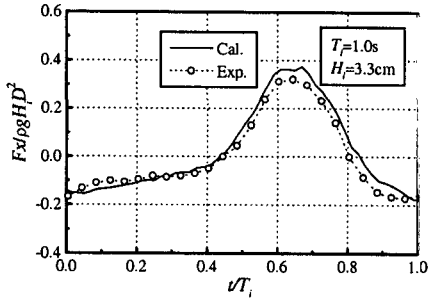
4.2 각추대

본 계산의 직교격자에 있어서는 각추대와 같이 연직으로 경사를 가진 형상을 그대로 취급할 수 없기 때문에, 여기서는 가장 간단한 방법으로서 계단상의 구조물로 근사하여 계산을 수행하였다.

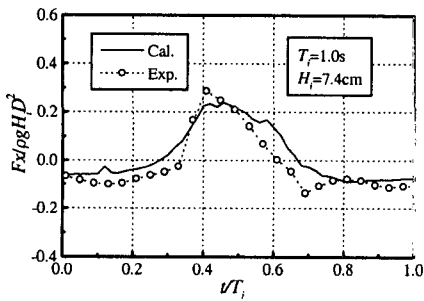
Fig. 6은 각추대에 대한 수평방향의 파력 F_x 의 계산치와 실험치의 비교를 나타낸다. 또한, Fig. 6(a)는 비쇄파의 경우의 파력, (b)는 쇄파력이 작용하는 경우의 파력의 시간변화에 각각 대응하고 있다.

Fig. 6(a)의 비쇄파의 경우, 직방체의 경우와 비교하면 정도는 약간 감소하지만 계산치는 실험치를 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 6(b)의 경우를 보면 계산치는 실험치의 Peak치를 약간 과

소평가하고 있기는 하지만, 실험에서 측정한 파력의 전반적인 시간변화를 충분히 재현하고 있다고 판단된다.



(a) Non-breaking



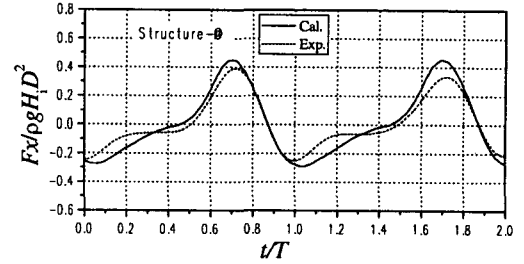
(b) Breaking

Fig. 6. Comparisons of time variations of wave forces between the experimental measurements and the numerical results for truncated pyramid.

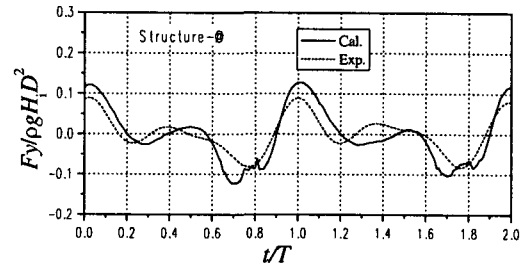
5. 비대칭구조물에 작용하는 파력

비대칭구조물에 대한 계산에는 부등 간격격자를 이용하였다. 즉, 구조물의 영향이 적은 영역의 격자간격은 x, y, z 방향에 각각 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$, 구조물 주변에서는 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 가 되도록 서서히 격자간격을 변화시켰다. 또한, 파 진행방향의 파력 F_x , 직각방향의 파력 F_y 와 연직방향의 파력 F_z 의 계산치는, 대칭구조물의 경우와 마찬가지로, 구조물 표면에 작용하는 작용파력에 방향여현을 곱하여, 그 순간의 물수면 전체에 걸친 적분값으로 구하였다.

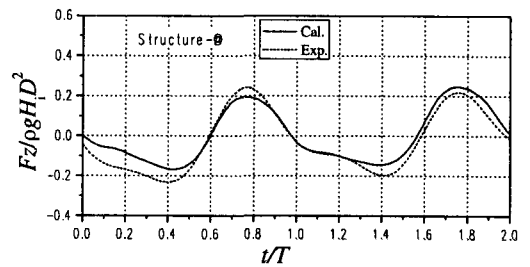
Fig. 7은 Structure-① (Fig. 4 참조)에 작용하는 파력의 계산치와 실험치의 비교를 나타내고 있으며, Fig. 7(a)는 파 진행방향의 파력 F_x , (b)는 직각방향의 파력 F_y 와 (c)는 연직방향의 파력 F_z 를 각각 나타낸다. 또한, 그림중의 실선은 계산치를, 점선은 실험치를 나타낸다.



(a) Inline wave forces F_x



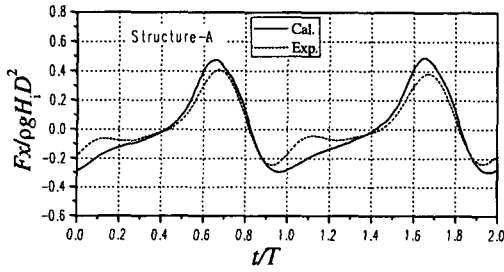
(b) Transverse wave forces F_y



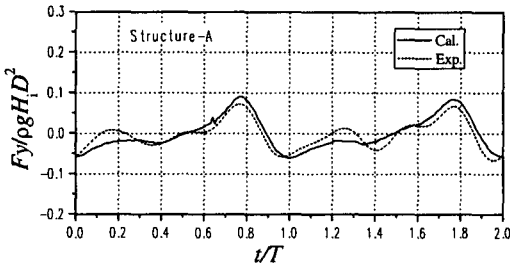
(c) Uplift wave forces F_z

Fig. 7. Comparisons of time variations of wave forces between the experimental measurements and the numerical results for Structure-①.

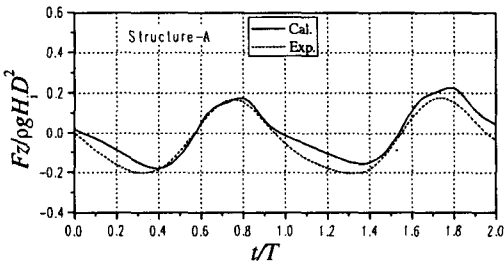
Fig. 7(a)와 (c)를 보면 F_x 와 F_z 의 계산치와 실험치의 시간변화가 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 7(b)의 직각방향파력 F_y 의 시간변화의 경우는, 한 주기에 두개의 Peak를 가진 규칙적인 시간변화의 양력이 작용한다. 이것은 구조물의 비대칭성으로 인하여 작용파의 正流時와 反流時에 각각 비대칭적인 와의 흐름이 생성되어, 비대칭압력장이 형성되기 때문이라고 판단된다. 또한, 계산치는 두개의 Peak를 가진 실험치의 시간파형을 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) In-line wave forces F_x

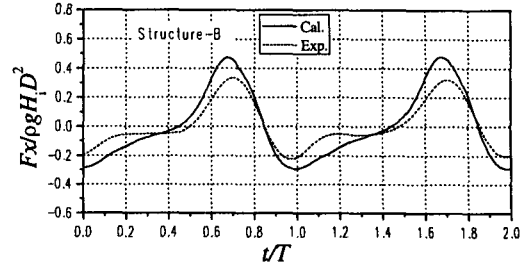


(b) Transverse wave forces F_y

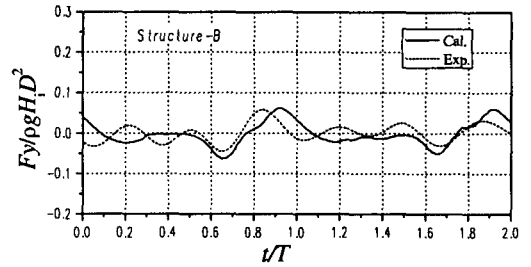


(c) Uplift wave forces F_z

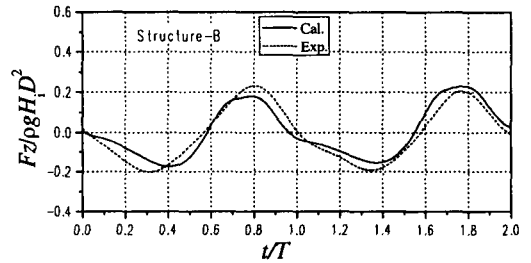
Fig. 8. Comparisons of time variations of wave forces between the experimental measurements and the numerical results for Structure-②.



(a) In-line wave forces F_x



(b) Transverse wave forces F_y



(c) Uplift wave forces F_z

Fig. 9. Comparisons of time variations of wave forces between the experimental measurements and the numerical results for Structure-③.

6. 결 론

Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 Structure-②와 Structure-③ (Fig. 4 참조)에 작용하는 파력의 시간파형을 나타낸다. 양 그림으로부터 알 수 있듯이, Structure-①의 경우와 마찬가지로, 계산치는 Structure-②와 Structure-③에 작용하는 3성분 파력()의 시간파형의 전반적인 경향을 좋은 정도로 재현하고 있다고 판단된다.

본 연구에서는 파의 진행방향에 대하여 대칭성과 비대칭성을 가지는 3차원구조물에 작용하는 파력 및 양력의 수리모형실험을 수행함과 동시에, 그러한 파력과 양력의 산정에 제안한 3차원 직접수치시물레이션을 이용함으로써 수치모델의 적용성 및 재현성의 검토를 수행하였다. 그 결과, 직접수치시물레이션에 의해 얻어진 계산파력의 시계열은 대칭구조물에 작용하는 파 진행방향의 파력뿐만 아니라 비대칭구조물에 작용하는 파 진행방향의 파력과 직각방향의 파

력 및 연직방향파력의 실험치를 높은 정도로 재현하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

금후의 과제로서, 3차원 직접수치시뮬레이션의 정도를 더욱 높여 감과 더불어 다양한 해안·항만구조물로의 적용을 검토하여 보다 범용성이 높은 수치모델로서 향상시켜 갈 예정이다.

감사의 글

본 연구의 수행을 위한 日本 名古屋대학 해안연구실의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Hamzah, M.A., 間瀬 肇, 高山知司, 藤木男 (2000). 海岸堤防に作用する津波力の実験と数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47卷, 371-375.
- 有川太郎, 磯部雅彦, 高橋重雄 (2001). VOF法を用いた衝撃砕波圧の計算と適用性, 海岸工学論文集, 第48卷, 831-835.
- 藤井直樹ほか (2000). ケーソン防波堤の越波・波力算定への数値波動水路の適用, 海岸工学論文集, 第47卷, 706-710.
- 渡辺靖憲ほか (1999). 衝撃砕波力の数値計算, 海洋開発論文集, 第15卷, 375-380.
- Hsu, T.-J., Sakakiyama, T. and Liu, P.L.-F. (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater, Coastal Eng., 46, 25-50.
- Hur, D.-S. and Mizutani, N. (2003). Numerical estimation of the wave forces acting on a three dimensional body on submerged breakwater, Coastal Eng., 47, 329-345.
- Kawasaki, K. (1999). Numerical simulation of breaking and post-breaking wave deformation process around a submerged breakwater, Coastal Eng. Journal, 41, 201-223.
- Petit, H.A.H., Tonjes, P., van Gent, M.R.A. and van den Bosch, P. (1994). Numerical simulation and validation of plunging breakers using 2D Navier-Stokes model, Proc. 24th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 511-524.
- van Gent, M.R.A., Tonjes, P., Petit, H.A.H. and van den Bosch, P. (1994). Wave action on and in permeable structures, Proc. 24th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1739-1753.