

연직구조물에 작용하는 고립파 파력 특성에 관한 실험 Laboratory Experiments for Solitary Wave Force on Vertical Structures

한 세 종* / 서 규 학** / 조 용 식***

Han, Sejong / Seo, Gyu-Hak / Cho, Yong-Sik

Abstract

In this study, a series of hydraulic experiments are conducted to measure wave pressure on vertical structures with incident solitary waves that well represent characteristics of tsunamis. The pressure transducers measure time histories of wave pressure according to wave height to see pressure distribution. The force of incident solitary wave is estimated from integrated pressure distributions and represented with square and cylindrical columns. Experimental measurements are compared with the predictions of existing empirical formulas frequently used to design of coastal structures.

keywords : laboratory experiments, solitary wave, Wave pressure, Tsunami force

요 지

본 연구는 고립파를 이용하여 수중에 설치된 연직구조물에 작용하는 지진해일 파력 측정 수리실험을 수행하였다. 다수의 파압계를 이용하여 구조물에 작용하는 파압분포를 측정하였고 측정된 파압분포를 통해 파력을 산출하였다. 측정된 실험결과를 바탕으로 해안구조물 설계에 사용되는 파압예측 경험식과 비교하였고 구조물 단면현상에 따라 파압분포의 차이를 분석하였다. 또한, 구조물 전·후면에서 파고측정을 통해 입사파와 투과파를 비교하였으며 구조물의 형상이 파고변화에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 수리실험, 고립파, 파압, 지진해일 파력

1. 서 론

2011년 3월 11일에 일어난 동일본 지진해일에 의해 막대한 인명피해 및 재산손실이 발생하여 최근 국내외에서는 지진해일의 피해규모예측과 방재대책 수립에 관심이 집중되고 있다. 특히, 지진해일 파력을 산정하는 연구는 구조물 파괴를 사전에 예측함으로써 지진해일에 의한 재산적 손실

을 최소화하고 지진해일이 발생 가능한 연안 지역에 대피 구조물 설계에 반영되기 때문에 매우 중요하다고 여겨지고 있다(FEMA, 2008). 특히, 고립파는 초기 파형이 변하지 않은 상태로 먼 거리를 전파하고 내륙에서 큰 치오름을 나타내기 때문에 이를 이용한 지진해일 관련연구가 진행되었으며, 지진해일 특성을 나타내는 가장 적절한 입사파로 평가되고 있다(Hall and Watts, 1953; Synolakis, 1987; Liu and Cho,

* 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: sjhan19@hanyang.ac.kr)
Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

** 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: seokh0919@hanmail.net)
Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

*** 교신저자, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr, Tel: 82-2-2220-0393)
Corresponding Author, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

1994). 이전에는 고립파를 이용해 처오름 높이를 예측하고 침수구역의 구조물 주변에서 침수심과 유속 등 다양한 변수를 계산하여 구조물에 작용하는 피해를 간접적으로 예측 하였으나, Yeh (1991)는 처오름으로만 지진해일 피해를 예측하는 것은 한계가 있고, 지형 조건과 내륙에서 구조물과의 상호작용 등 다양한 연구가 이루어져야 할 필요가 있음을 밝혔다. 이에, 최근에는 고립파와 구조물의 상호작용 관계를 분석하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

Cooker et al. (1997)은 고립파가 연직벽에 충돌할 때 발생하는 특성에 관한 연구를 수행하였다. Cooker et al. 은 연직벽 앞에서 고립파의 거동을 구체적으로 분석하였으며, 높은 파고의 고립파를 적용하여 다양한 분석을 시도하였다. Liu and Al-banaa (2004)는 RANS방정식을 이용한 수치해석과 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용한 수리실험을 통해 장애물 근처에서 처오름과 유속장을 측정하는 연구를 수행하였다. 이때, 장애물 길이를 변수로 하여 처오름높이와 파력변화를 분석하였으며, Cooker의 연구와 동일한 조건으로 연구를 수행하여 비교결과를 제시하였다.

최근에는 3차원 수치기법을 이용한 구조물 형상을 고려하는 연구가 진행되고 있다. Lee et al. (2011)은 투과성 구조물로 잘 알려져 있는 슬리트 케이슨에 작용하는 지진해일파압을 2차원 및 3차원 수치파동수로 이용하여 비교분석 하였다. 또한 단주기파랑에 의해 발생하는 파압분포를 측정하여 지진해일로 근사되는 고립파와 단파의 파압분포를 비교하여 도시하였다. Lee et al. (2011)이 수치해석을 통해 나타난 무차원 파압분포는 Tanimoto et al. (1984)이 제시한 지진해일파압분포와 비교하여 나타내었으며 비교적 균등한 파압분포를 나타내는 것을 확인하였다. Mo and Liu (2009), Mo et al. (2007)은 원해에 설치된 해양구조물에 주로 사용되는 원기둥에 작용하는 지진해일파력을 3차원 수치해석을 통해 나타내었다. Mo and Liu (2009)는 고립파를 이용하여 3개의 원기둥에 작용하는 동수압을 측정하는 연구를 수행하였으며 3개의 원기둥에 작용하는 파압

은 전반적으로 하나의 원기둥에 작용하는 파압분포보다 작게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 수리실험을 통해 측정된 고립파 동수압을 비교하였으나 실험결과와 다소 차이가 나타남을 확인하였다. Bisgard (2005)는 3차원 수리실험을 통해 실제 해안선과 비슷한 지형을 재현하여 원기둥에 작용하는 파압분포를 측정하였다. Bisgard (2005)는 원기둥에 작용하는 파압을 다양한 각도에서 동시에 측정하여 공간적인 파압분포와 측정위치에 따라 변화하는 파압에 대해 나타내었으며, 구조물에 작용하는 파압분포를 나타내었다.

수중에 설치된 구조물에 작용하는 파력을 산정하기 위해 다양한 연구가 수행되었으나, 지진해일 파압은 입사파 특성과 구조물 형상 또는 지형 등의 영향을 많이 받고 이론적인 해석이 매우 복잡하다. 그렇기 때문에, 수리모형실험을 통해 입사파의 파고 변화, 구조물의 형태 등과 같은 다양한 변수를 고려한 수리모형실험이 필요하다(Jeon et al., 2002). 따라서 본 연구는 수리실험을 통해 구조물에 작용하는 고립파의 파압분포를 측정하였고, 측정된 파압분포를 바탕으로 고립파가 전파 될 때 구조물에 발생시키는 수평파력을 구하였다. 또한, 구조물의 단면형상을 변형시켜 구조물의 단면형상에 따라 구조물에 발생하는 파력 차이를 입사파고와의 관계로 나타내었다.

2. 수리모형실험

2.1 수리실험제원

수리실험은 고립파 조파가 가능한 2차원 조파수조를 이용하여 수행하였다. 실험에 사용된 조파수조의 길이는 32.5 m, 폭은 0.6 m, 높이 1.1 m이며, 사용된 조파기는 서보 피스톤형의 조파기로 최대 작동범위가 ± 0.75 m로, 수심에 대한 입사파고의 비로 정의되는 상대파고(H/h)가 0.1에서 0.3까지 조파가 가능하다. 조파수조 한쪽 면은 유리로 되어 있어 파의 진행과 변화를 가시적으로 관측할 수 있도록 제작되었고, Fig. 1에 나타내었다.

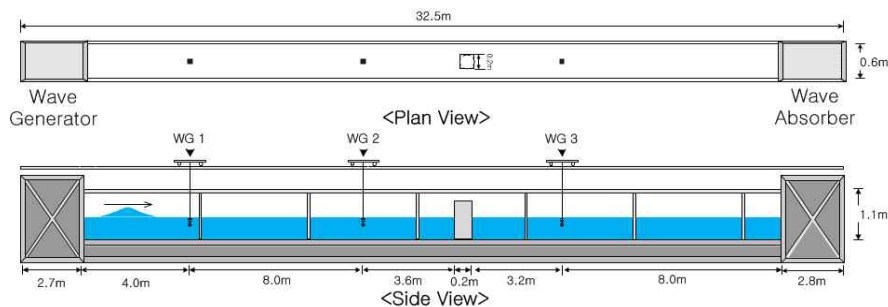


Fig. 1. Schematic Layout of Wave Flume and Experimental Set-up

구조물에 작용하는 파고 측정을 위해 조파기에서 생성된 고립파 파고와 구조물에 입사하는 파고 측정을 위해 전면 파고계(wave gage 1, 2)를 설치하였고 구조물 후면에서 파고변화를 측정하기 위하여 구조물 후면 파고계(wave gage 3)를 설치하였다. 파압측정을 위해 구조물에 별도로 파압계 설치부를 만들어 고정시켰다. 사용된 파압계는 와텍사에서 개발한 WT-P020 모델을 사용하였으며, Fig. 2에 나타난 것과 같이 4개의 파압계를 이용하여 동일한 파고조건에서 구조물 하단과 상단에서의 파압을 측정하였다. 파압계의 응답속도는 4.6 kHz로 순간적인 파도의 충격과 변화에도 데이터를 취득할 수 있으며, 본 실험에서는 안정적인 파압측정을 위해 파압 취득시간 간격은 60 Hz로 설정하였다.

파압측정을 위해 구조물은 마찰 영향이 없는 아크릴로 제작하였으며 파압계 측정선과 파압계가 외부 흐름을 방해하지 않도록 구조물 내부에 파압계를 설치하였다. 사각기둥 구조물은 폭과 너비가 모두 0.2m인 정사각형으로, 원기둥 구조물은 직경 0.2m로 각각 제작하였고, 구조물의 높이는 0.5m로 제작하여, 수면으로부터 충분한 높이를 확보하여 처음에 의해 발생하는 구조물 후면에서 파의 교란의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다.

2차원 수리실험을 통해 기둥구조물 관련 연구수행 할 때는 반드시 구조물 폭의 차폐효과(blockage effect)의 영향 고려해야한다. 기둥구조물의 경우 벽 구조물과 달리 구조물 주변으로 입사파가 통과하기 때문에 차폐효과를 최소화 시킬 수 있는 구조물의 폭 설정이 중요하다. Nouri et al. (2009)의 연구에서는 구조물의 폭을 변화시키고 주변 유속 측정을 통해 대상 구조물 폭(b)와 조파수로 폭(B)의 관계를 나타내는 구조물 폭 비 $\beta(=b/B)$ 가 0.4 이하까

지 안정적으로 실험을 할 수 있다고 밝혔다. 본 수리실험에서는 구조물 폭(b)만큼 좌우 폭을 확보하여 전파하는 고립파가 구조물을 통과할 때 받는 영향을 최소화 할 수 있도록 조파수로 폭 길이에 1/3에 해당하는 $\beta=0.33$ 으로 설정하여 수행하였고, 구조물 전·후면에 파고계를 설치하여 입사파고와 투과파고를 측정할 수 있도록 하였다.

2.2 입사파 설정

고립파의 파장과 주기는 이론적으로 무한대이나 일반적으로 고립파를 생성하였을 때 최대파고의 5%가 되는 두 지점사이의 거리를 파장으로 간주한다(Goring, 1978). 그렇기 때문에 일반 파랑에 비해 상대적으로 주기가 긴 고립파를 이용하는 수리실험에서는 수심대파고비로 표시되는 상대파고(H/h)를 적용하여 고립파 파랑 특성을 분석하는 방법을 적용한다(Hsu et al., 2012; Huang and Dong, 2001). 본 실험에서의 수심은 조파기의 가동범위를 고려하여 최대파고를 얻을 수 있도록 수심 0.25m를 적용하였으며, 지진해일의 대부분은 먼 거리를 전파 할 때도 쇄파가 발생하지 않기 때문에(Synolakis, 1987), H/h 를 0.1~0.2의 범위로 설정하였다. 상세한 입사파 조건은 Table 1에 열거하였다. 조파기로부터 발생된 고립파는 구조물 전면에서 측정된 파고와 바닥마찰 등의 이유로 파고의 차이가 발생하기 때문에 구조물에 작용하는 입사파고는 구조물 전면 파고계(wave gage 2)를 이용하여 측정하였으며, 정확한 파고를 측정하기 위하여 구조물에 가장 근접하면서 구조물에 반사된 반사파 영향을 받지 않고 파의 형태가 명확하게 나타나는 위치에서 입사파를 선별할 수 있도록 다음에 나타난 Goring (1978)의 고립파 파장 산정식을 이용하여

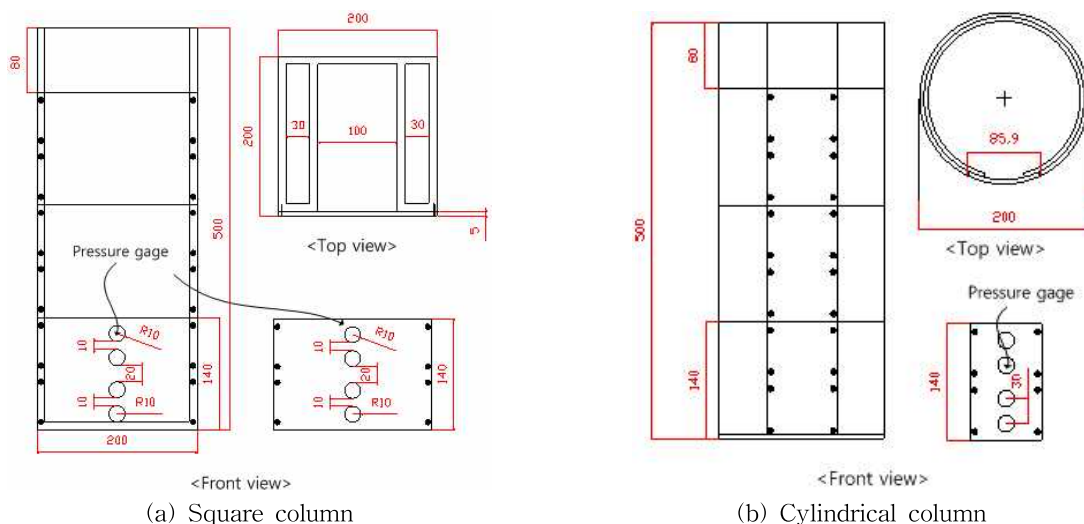


Fig. 2. Schematic Layout of Experiment Model (unit: mm)

Table 1. Condition of Incident Wave Heights

CASE	Water depth (m)	Wave height (m)	Wave length (m)	H/h
1	0.25	0.030	3.6	0.12
2		0.035	3.4	0.14
3		0.040	3.1	0.16
4		0.045	3.0	0.18
5		0.050	2.8	0.20

각 파고조건에 따라 파장을 산정하였다.

$$L = \frac{2}{\theta} \cosh^{-1} \left[\frac{1}{0.05} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, θ 는 파고 H 와 수심 h 의 관계를 이용한 계수로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta = \left[\frac{3H}{4h^3} \right]^{1/2} \quad (2)$$

주어진 식을 이용하여 고립파의 파장을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 가장 낮은 파고조건인 $H/h=0.12$ 일 때, 고립파의 파장이 3.6m로 가장 길게 나타는 것을 확인하였다. Fig. 3은 구조물 전면 파고계(wave gage 2)를 이용하여 측정된 자유수면 변위의 시계열 자료이며, 수리실험에서 입사파조건으로 사용하는 $H/h=0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20$ 를 나타내었다. 고립파의 형태를 취득하여 고립파 최대파고(H_{max})를 선별할 수 있도록 구조물로부터 한 파장 떨어진 위치에 파고계를 위치시켰고, 실험에서 사용한 모든 파고조건을 만족시킬 수 있는 위치로 구조물로부터 3.6

m 떨어진 곳에서 파고를 측정하였다. 입사파고는 자유수면 변위의 시계열자료 중 최대 높이를 고립파 입사파(H)로 설정하였고, 측정결과 쇄파가 발생하지 않고 안정적으로 구조물까지 전파되는 것을 알 수 있다.

3. 실험결과

3.1 고립파 파압분포 측정

본 절에서는 고립파를 이용하여 구조물에 작용하는 파압 측정하였다. 구조물에 작용하는 파압 중 최대파압을 이용하여 파압분포를 나타내었으며, 정수면 보다 높은 공기 중의 파압측정은 구조물에 발생하는 충격파압과 처오름에 의해 파압의 거동특성이 매번 변하기 때문에 낮은 파고($H/h=0.12$)에서도 동일한 위치에서 파압데이터를 취득하고, 모든 파고조건에 대해 동일하게 관측하여 비교할 수 있도록 각각 바닥으로부터 0.02 m, 0.05 m, 0.09 m, 0.12 m, 0.16 m, 0.19 m, 0.23 m, 0.26 m에서 수행하여 다양한 파고변화에 따라 변화하는 파압분포를 측정하였다. 실험을 통해 얻어진 파압은 $\rho g H$ 로 무차원화하여 나타내었으며, 파압측정 위치는 수심 h 에 대해 무차원화한 값인 z/h 로 나타내었다.

대표적으로 연직구조물에 작용하는 파압을 산정하는 Goda (1985)가 제시한 파압산정식이 있다. Goda파압식은 국내외에서 방파제와 같은 외곽구조물 파력산정에 많이 이용되고 있다. Goda파압식은 중복파 혹은 쇄파에 관계 없는 모든 조건에 적용이 가능하고, 최대파고를 적용하여 파력을 산정한다. 또한, 다른 형태의 연직구조물에도 적용이 가능하며 다양한 입사파에도 적용할 수 있기 때문에 수중에 설치된 연직구조물의 파압산정에 적합하다고 평가 받고 있다(Takahashi, 1996). Goda파압식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2\beta) \rho g H \quad (3)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh 2\pi h/L} \quad (4)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (5)$$

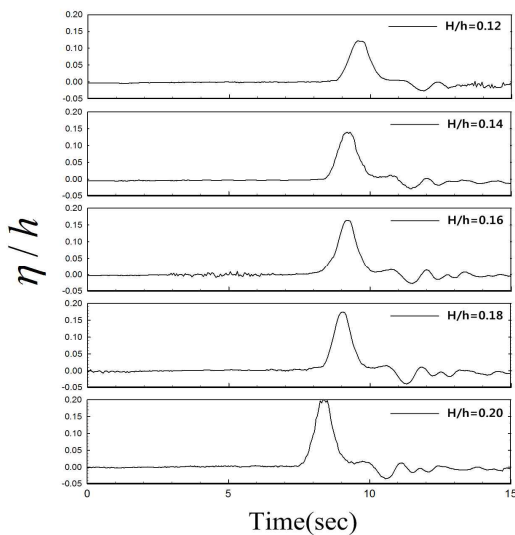


Fig. 3. Measurements of Incident Wave Heights (WG 2)

여기서, p_1 은 정수면 위치에서의 파압, p_2 , 바닥면에서의 전면파압강도, p_3 는 경사마운드위에서의 파압강도를 의미한다. 파압분포 형태는 p_1, p_2, p_3 에 의해 결정되고, 파압강도를 결정하는 H 는 입사파고, β 는 입사파의 입사각, L 은 파장, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 은 각각 파압산정계수를 의미한다. 고립파 파압산정을 위해 입사파의 파장(L)은 무한히 길다고 적용하였을 때($h/L_0 \rightarrow 0$), $1/(\cosh 2\pi h/L)$ 은 1에 수렴하기 때문에 바닥면에서의 전면파압강도 p_1 과 p_2 는 같으며, Goda (1985)는 계수 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 구하기 위해 Eqs. (4), (5) and (6)과 같은 식을 제시하였으며, 계수 산정도를 통해 쉽게 구할 수 있도록 하였다.

$$a_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (6)$$

$$a_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\} \quad (7)$$

$$a_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad (8)$$

여기서, h_b 는 방파제의 벽면에서 $5H_{1/3}$ 먼 바다 지점의 수심을 의미한다. h' 는 직립부 저면에서 정수면까지의 높이를 의미하고, d 는 마운드위의 수심을 의미한다. 경사나 마

운드를 두지 않고 수리실험을 수행하였기 때문에 실험조건을 반영하면, 전면파압강도 p_1, p_2, p_3 는 모두 같고, p_1 의 값에 의해 결정됨을 알 수 있다.

$$\eta^* = 1.5H_{\max} \quad (9)$$

$$p_1 = 1.1\rho gH \quad (10)$$

여기서, η^* 는 연직벽에서 최대치오름, p_1 은 정수면상에서 파압을 의미한다. Eqs. (9) and (10)의 결과는 국내 Ministry of Oceans and Fisheries (2005)의 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 지진해일 파력산정식과 동일한 것을 확인할 수 있다. 또한, 일반파랑의 경우 Goda파압분포는 바닥면에서 파압이 정수면 근처에서의 파압보다 작은 파압분포를 나타내지만 고립파 파압분포는 주기를 무한대로 가정하여 계산하기 때문에 구조물 바닥면에 작용하는 파압과 정수면 근처 작용하는 파압의 차이가 없는 직선 파압분포를 나타낸다. 이러한 파압분포 형태는 Tanimoto et al. (1984)이 제시한 지진해일 파압분포와 동일하게 직선형태의 파압분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 지진해일로 파압분포는 직선분포로 나타나고, Goda파압식에 계산된 고립파 파압분포 형태 역시 주기의 영향으로 인해 직선분포를 나타내는 것으로 판단된다.

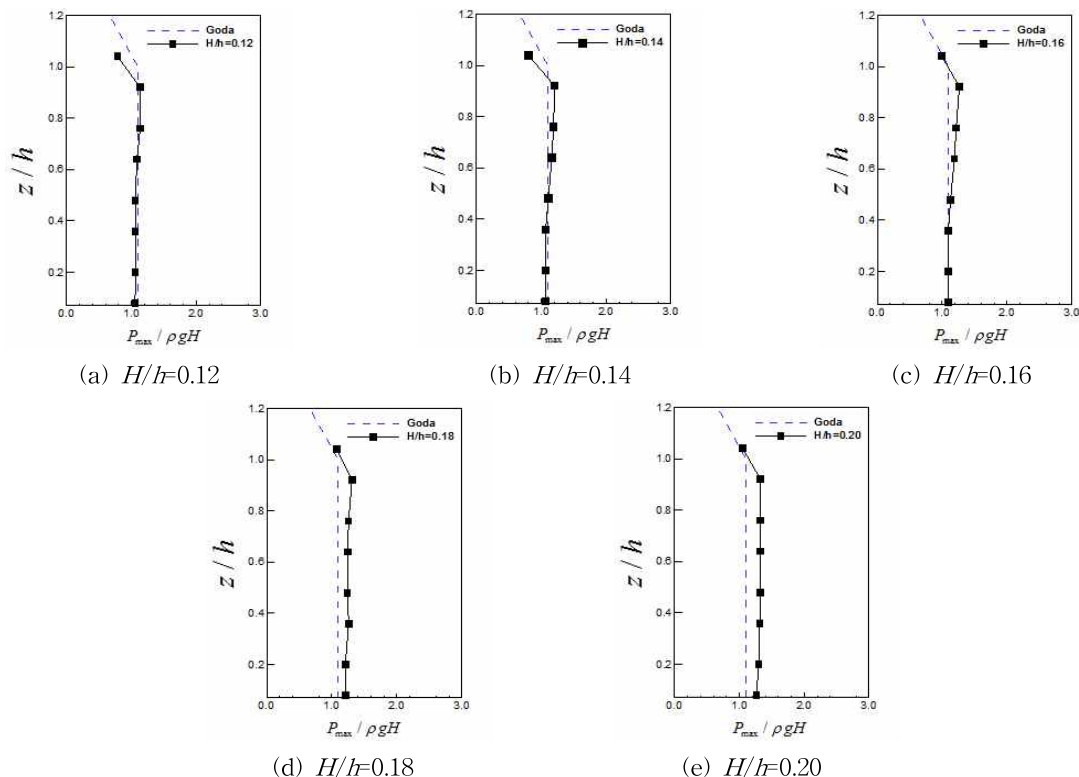


Fig. 4. Pressure Distribution of Solitary Wave on Square Structures

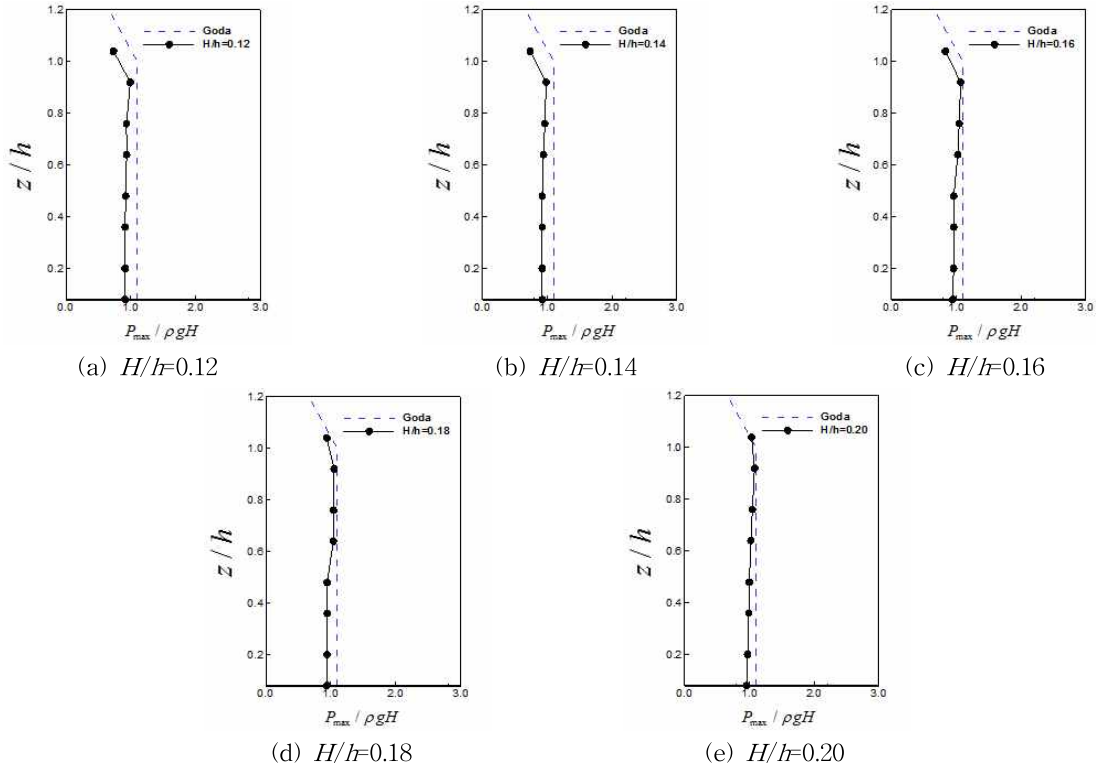


Fig. 5. Pressure Distribution of Solitary Wave on Cylindrical Structures

Figs. 4 and 5는 각각 사각기둥과 원기둥에 작용하는 파압분포를 측정하여 나타낸 것으로 무차원 작용파압을 깊이 증가에 따라 나타내었다. 결과의 비교를 위해 고립파의 조건을 적용한 Goda파압식을 이용하여 계산된 파압분포를 비교하여 도시하였다. 실험을 통해 측정된 파압분포는 Goda파압식에 의한 파압분포와 비슷하게 직선에 가까운 분포를 나타내나 z/h 가 클 때(수면과 가까운 위치)의 작용파압이 z/h 가 작을 때의 작용파압보다 크게 나타났다. 이는 파압측정위치가 수면과 가까워질수록 동수압 및 충격파압의 영향이 커지는 것을 나타내고, 수리실험에서도 H/h 가 커짐에 따라 동수압과 충격파압에 의한 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 원기둥에 작용하는 파압분포를 나타낸 그림이다. 원기둥에 작용하는 파압분포는 사각기둥에 비해 작게 나타났다. 원기둥에 작용하는 파압분포는 사각기둥에 비해 동수력 및 충격력의 영향을 적게 받아 비교적 직선 형태에 가까운 파압분포를 보인다. H/h 가 커짐에 따라 파압분포도 점점 커지나 사각기둥에 비해 파압분포 변화가 크게 나타나지 않는 것으로 나타났다.

3.2 구조물에 작용하는 파력산정

측정된 파압분포를 바탕으로 구조물에 작용하는 하중

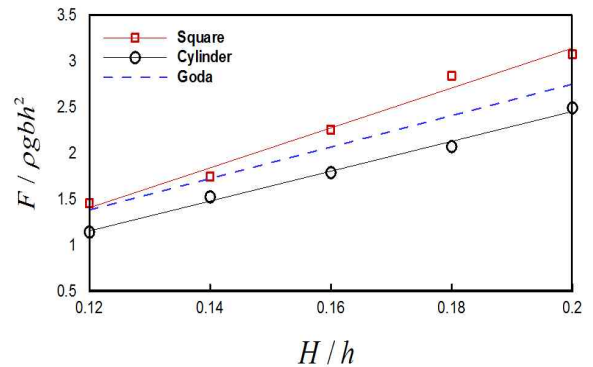


Fig. 6. Comparison of Solitary Wave Force on Vertical Structures

을 산정하였다. 이때 계산된 파력은 고립파가 구조물을 지나갈 때 발생하는 수평하중을 나타낸다. 구조물에 작용하는 파압분포를 이용하여 고립파에 의한 구조물 파력을 산출하였고 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 이때 작용하는 파력은 $\rho g b h^2$ 로 무차원화하여 비교하였으며, b 는 구조물의 폭을 의미한다. 사각기둥과 원기둥 모두 입사파 방향에 대해 투영단면으로 계산하고자 폭을 동일하게 0.2m로 적용하였다. 구조물에 작용하는 하중은 원기둥과 사각기둥의 비교를 위해 구조물에 작용하는 최대파압분포를 적분하여 나타내었다. 지진해일 파력추정을 위해 사용되는

대표적인 식으로 Morison 식이 있으나, Morison 식은 침수심 h_i 와 유속 u_i 을 이용하여 구조물에 작용하는 파력을 추정하는 식으로 내륙구조물에 적합한 형태를 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서 사용된 수중에 설치된 기둥에 작용하는 파력을 산정하기에는 다소 어려움이 있어 제시하지 않았다.

계산결과, 사각기둥에 발생하는 고립파 파력은 H/h 가 0.12일 때는 Goda파압식의 결과와 큰 차이가 나지 않지만 H/h 가 점점 커질수록 무차원 파력의 차이도 커지는 경향을 나타내었다. Table 2에서는 $\alpha = F/\rho g b h^2$ 의 값을 계산하여 Goda식에 계산된 계수(α_{goda})와 실험에 의한 계수(α_{exp})를 각각 나타내었고, 두 계수의 관계를 이용하여 상대계수(Relative factors)에 나타내었다. Table 2에 나타내어진 상대계수를 통해 Goda파압식에 의한 고립파 파력 추정이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 구조물에 의한 에너지 감소

고립파가 전파 할 때에 구조물 전·후면에서 발생하는 파고변화를 측정하였다. 고립파가 구조물을 통과할 때 파의 교란이 발생하므로 정확한 파고의 측정위치를 선정할 필요가 있다. Fig. 7은 구조물 후면에서 발생하는 파고변화를 0.2m 간격으로 측정하여 파고의 교란이 발생하지 않는 안정적인 위치를 측정하여 나타내었다. Fig. 7은 구조물 전면에서의 입사파고(H_i)와 구조물 후면에서의 투과파고(H_t)의 관계로 나타내었으며, 구조물을 통과한 파가 안정되는 지점을 나타내었다. 측정결과, H/h 가 0.12일 때 사각구조물을 지나고 3.2m 이후로부터 안정되는 반면 원형기둥을 통과한 고립파는 2.0m 이후로 안정되었으며 H/h 가 0.20일 때는 낮은 H/h 인 0.12보다 더 가까운 위치에서 파고가 안정되는 것을 확인할 수 있다. 파고가 안정된 이

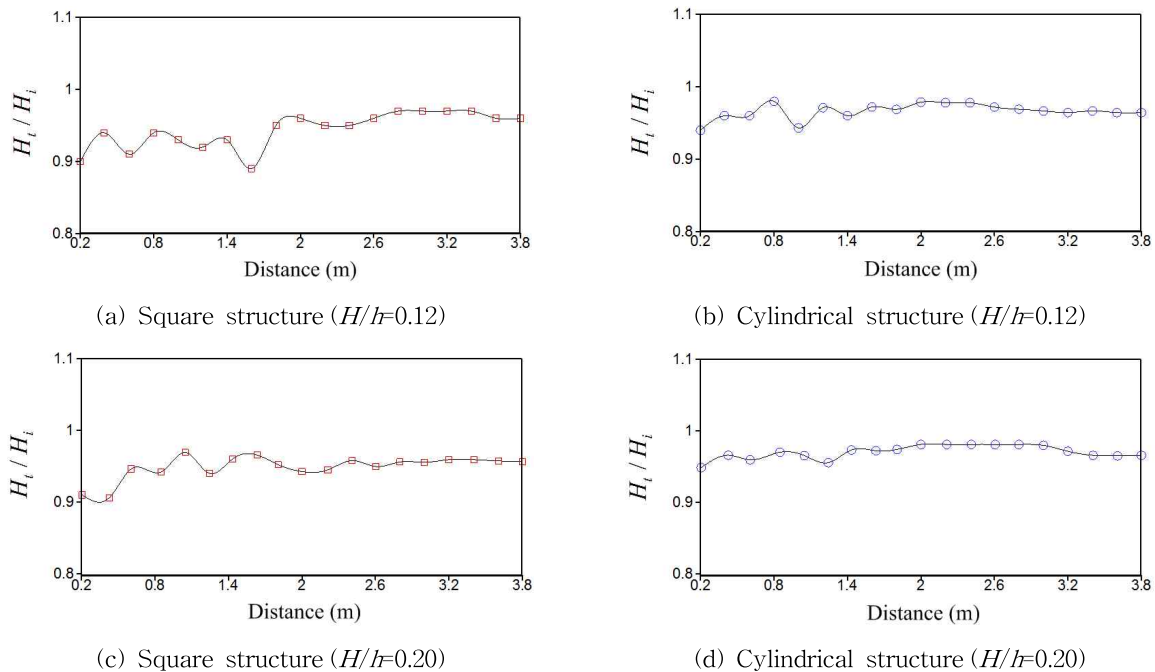
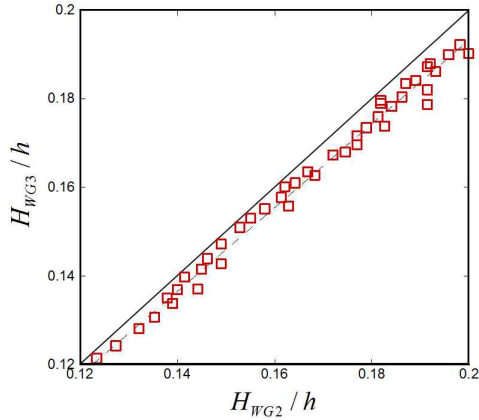


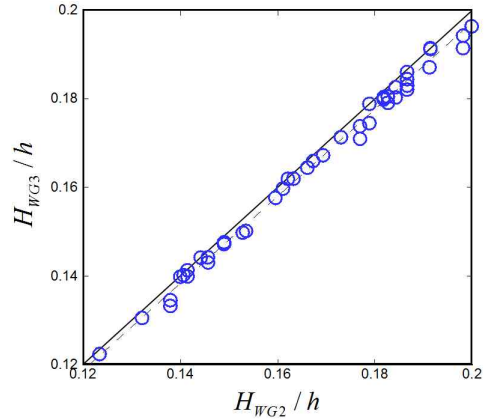
Fig. 7. Measurement of Wave Height according to Distance of Wave Gage from Structures

Table 2. Estimation of Solitary Wave Force Coefficients using Non-dimensional Wave Force

H/h	Goda (α_{goda})	Experiment (α_{exp})		Relative Factors ($\alpha_{exp}/\alpha_{goda}$)	
		Square	Cylinder	Square	Cylinder
0.12	1.42	1.46	1.14	1.03	0.78
0.14	1.64	1.74	1.52	1.06	0.87
0.16	2.04	2.26	1.79	1.11	0.79
0.18	2.34	2.83	2.07	1.21	0.73
0.20	2.52	3.08	2.49	1.22	0.81



(a) Square structure



(b) Cylindrical structure

Fig. 8. Change of Wave Heights according to Structures

후로 Figs. 8(a) and 8(d)에서는 각각 3.6 m, 3.2 m 이후로 파고가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있으며 이는 구조물을 통과한 파가 일정구간 안정되어 전파되다 바닥마찰 및 에너지 손실에 의해 감소하는 것으로 보인다. 구조물에 의해 발생하는 에너지손실을 측정하기 위해 구조물 후면으로 투과한 파고가 비교적 안정되는 위치와 파고의 감소영향이 발생하기 위한 최적의 위치를 3.2m로 설정하였고, 구조물 후면으로부터 3.2m에서 투과파고(H_t)를 측정하였다.

Goda and Suzuki (1976)에 의하면 투과계수 K_t 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (11)$$

여기서, H_i 와 H_t 은 각각 입사파와 투과파의 파고를 나타내며, 이를 이용하여 감쇠계수 K_L 와 파랑에너지 감쇠계수 E_L 를 유도할 수 있다.

$$K_L = \sqrt{1 - K_r^2 - K_t^2} \quad (12)$$

$$E_L = \frac{E_t}{E_i} \quad (13)$$

여기서, E_i 는 입사파의 에너지, E_t 는 투과파의 에너지를 의미한다. 이를 통해, 구조물에 의해 감소되는 파랑에너지 감쇠계수는 E_L 은 $(H_t/H_i)^2$ 에 비례하고 구조물이 받는 에너지는 $E_s = 1 - E_L$ 으로 나타낼 수 있다.

Fig. 8은 구조물 전면에서 측정된 파고(H_{WG2}/h)와 구조물 후면(H_{WG3}/h)에서 측정된 파고를 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 8에서 점선으로 표시된 선은 측정된 파고 데이터를 선형회귀분석을 통해 나타낸 것으로 선형회귀선의 기울기가 1에 가까워질수록 구조물에 의한 파고감소는 발생하지 않은 것을 의미한다. 측정결과 사각기둥과

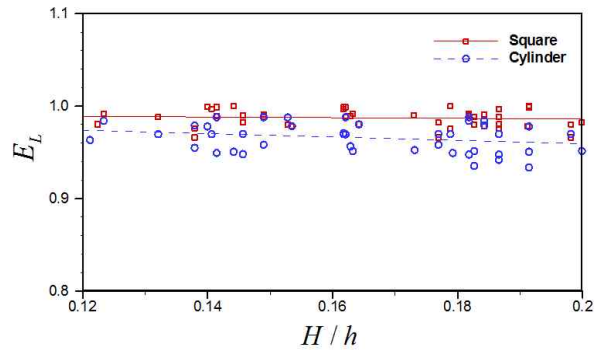


Fig. 9. Comparison of Energy Loss Coefficients by Structures

원기둥모두 상대파고 H/h 가 낮을 때보다 클 때 에너지 감소가 크게 나타났고, 원형기둥보다 사각기둥이 전반적으로 고립파의 에너지 감소가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 9에 나타난 에너지 손실계수 E_L 에서 더 명확하게 알 수 있으며, 파고가 커지면서 에너지 손실도 모두 커지지만 원형기둥에 의한 에너지 손실은 H/h 가 작을 때와 큰 차이가 발생하지 않으나 사각기둥의 경우는 H/h 가 커질수록 에너지 손실도 점점 커지는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 고립파를 이용하여 수중에 설치되어있는 구조물에 작용하는 파압분포를 측정하였다. 또한, 다양한 해안구조물 설계에서 사용되는 Goda파압식에 고립파의 조건을 반영하여 지진해일의 파력을 추정하였고 수리 실험결과와 비교하였다. 측정결과 Goda파압분포와 비교하였을 때 구조물에 바닥면에서 작용파압과 수면에 근접

한 위치에서 작용파압이 차이가 발생하지 않는 직선형태의 파압분포를 나타내었고, 구조물의 형상에 따라 사각기둥에서는 Goda식에 비해 파압이 크게 나타났으며 원기둥에서는 작은 파압분포가 형성되는 것을 확인하였다. 또한, 수리모형실험을 통해 구해진 파압분포를 적분하여 구조물에 작용하는 파력을 산정하였다. 사각기둥의 경우 H/h 가 0.12에서는 Goda파압식과 실험결과가 일치하지만 H/h 가 0.2에 근접할수록 Goda파압식보다 점진적으로 큰 차이가 발생하는 것을 확인하였고, 원형기둥의 경우 전반적으로 Goda파압식에 비해 20% 정도 작은 결과를 나타내었다. 구조물 전·후면에서 파고측정을 통해 구조물에 의한 에너지 감소영향을 분석한 결과, 원형기둥이 사각기둥에 비해 에너지감소가 적으며 입사파 투과율이 높게 나타나는 것을 확인하였다.

Goda가 제시한 파압식은 현재 Ministry of Oceans and Fisheries (2005)에서 외곽구조물 설계지침으로 활용되고 다양한 해안구조물 설계에 필요한 외력조건을 산정할 때 사용된다. 본 연구에서는 고립파를 입사파로 정하여 수리실험을 수행하였으며, 단면형상을 고려하지 않는 Goda파압식에 감소계수를 도입하여 원형기둥에 작용하는 파력 추정이 가능하다. 그러나 Goda파압식과 실험결과를 비교해본 결과 Goda파압식만으로 다양한 입사파 특성을 반영한 외력을 산정하기에는 다소 어려움 있고, 다양한 입사파조건을 만족시킬 수 있는 파압산정식이 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 지원 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 2단계 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응체계 구축)의 연구비지원으로 수행되었습니다.

References

- Bisgard, C. (2005). *Breaking and non-breaking solitary wave impact pressures on a cylinder over a 3-D bathymetry*. M.S. Thesis, Oregon State University, USA.
- Cooker, M.J., Weidman, P.D., and Bale, D.S. (1997). "Reflection of a high-amplitude solitary wave at a vertical wall." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 141-158.
- FEMA (2008). *Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis*. FEMA P646 Report, Federal Emergency Management Agency.
- Goda, Y. (1985). *Random seas and design of maritime structures*. University of Tokyo Press.
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1976). "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments." *Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering*, Vol. 1, pp. 825-845.
- Goring, D.G. (1978). *Tsunamis—the propagation of long waves onto a shelf* Rep. No. KH-R-38, W.M. Keck Laboratory of Hydrodynamics and Water Resources, California Institute of Technology, USA.
- Hall, J.V., and Watts, J.W. (1953). *Laboratory Investigation of the Vertical Rise of Solitary Waves on Impermeable Slopes*. Washington, D.C.: U.S. Army, Coastal Engineering Research Center.
- Hsu, H.-C., Chen, Y.-Y., and Hwung, H.-H. (2012). "Experimental study of the particle paths in solitary water waves." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 370, pp. 1629-1637.
- Huang, C.-J., and Dong, C.-M. (2001). "On the interaction of a solitary wave and a submerged dike." *Coastal Engineering*, Vol. 43, pp. 265-286.
- Jeon, C.H., Lee, B.H., and Cho, Y.-S. (2002). "Characteristics of solitary waves acting on slopes." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 779-786.
- Lee, K.H., Choi, H.S., Kim, C.H., Kim, D.S., and Cho, S. (2011). "The study on the wave pressure of the tsunami acting on the permeable structure." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 1, pp. 79-92.
- Liu, P.L.-F., and Al-banaa, K. (2004). "Solitary wave runup and force on a vertical barrier." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 505, pp. 225-233.
- Liu, P.L.-F., and Cho, Y.-S. (1994). "Integral equation model for wave propagation with bottom frictions." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 120, No. 6, pp. 594-608.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2005). *Harbor and Fishery Design Criteria*, pp. 186-187.
- Mo, W., and Liu, P.L.-F. (2009). "Three dimensional

- numerical simulations for non-breaking solitary wave interacting with a group of slender vertical cylinders.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1 pp. 20–28.
- Mo, W., Irschik, K., Oumeraci, H., and Liu, P.L.-F. (2007). “A 3D numerical model for computing non-breaking wave forces on slender piles.” *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 58, pp. 19–30.
- Nouri, Y., Nistor, I., and Palermo, D. (2010). “Experimental investigation of tsunami impact on free standing structures.” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 52, No. 1, pp. 43–70.
- Synolakis, C.E. (1987). “The run-up of solitary waves.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 18, pp. 523–545.
- Takahashi, S. (1996). *Design of vertical breakwaters*. Port and Harbour Research Institute, Japan
- Tanimoto, K., Tsuruya, K., and Nakano, S. (1984). “Tsunami force of Nihonkai-Chubu Earthquake in 1983 and cause of revetment damage.” *Proceedings of the 31st Japanese Conference on Coastal Engineering*, JSCE.
- Yeh, H. (1991). “Tsunami bore run up.” *Natural Hazards*, Vol. 4, pp. 209–220.

paper number : 14-059

Received : 8 July 2014

Revised : 2 October 2014 / 16 October 2014

Accepted : 16 October 2014