연안역의 육상 교량에 작용하는 고립파에 의한 지진해일파력의 평가법

김도삼¹ · 경갑수^{1*} · 이윤두² · 우경환²

¹한국해양대학교 건설공학과, ²한국해양대학교 토목환경공학과

Evaluating Method of Solitary Wave-Induced Tsunami Force Acting on an Onshore Bridge in Coastal Area

Do-Sam Kim¹, Kab-Soo Kyung^{1*}, Yoon-Doo Lee² and Kyung Hwan Woo²

¹Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

Abstract

In this study, the solitary wave-induced tsunami force acting on an onshore bridges in coastal area was numerically modelled by means of TWOPM-3D based on Navier-Stokes solver and VOF method which can track free surface effectively. The validity of numerical analysis was verified by comparing the experimental tsunami bore force acting on vertical wall and column structure. In particular, the characteristics of tsunami force with the changing tsunami intensity were surveyed through numerical experiments. The availability of 3-dimensional numerical analysis was reviewed through the comparison between the existing numerical results and design criteria for each drag force coefficient by applying Morison equation considering only drag force. As reasonable and high-precision estimation method of tsunami force, it was suggested to apply the estimation method taking drag and inertial force into consideration at the same time.

Keywords : onshore bridge, solitary waves, tsunami force, morison equation, drag force, inertia force, TWOPM-3D

1. 서 론

해저지진이나 해저화산 혹은 해저지반의 활동(sliding) 등에 의해 발생하는 지진해일은 연안에 가까워짐에 따라 천수, 굴절, 회절 및 쇄파 등에 의해 변형된다. 이는 경우에 따라 해안 저지대의 침수·범람에 의해 막대한 인명과 재산 상의 피해를 발생시키며, 특히 지진해일에 의한 항만, 도로, 교량 등과 같은 중요한 사회간접자본의 피해는 사회·경제활동에 심각한 피해를 초래한다. 대표적인 예로 2004년 12월 26일 발생한 규모 M9.1의 지진에 의한 인도양 지진해일은 약 23만명의 사상자를 발생시켰을 뿐만 아니라 인도네시아를 비롯한 스리랑카, 인도 및 말레이시아 등 주변국가에도 막대한

영향을 미쳤고, 약 140억 달러에 달하는 사상 최대의 재산 피해를 발생시킨 지진해일로 알려져 있다. 그리고 2010년 2월 27일 칠레에서 발생한 규모 M8.8의 지진은 1960년 이후 칠레에서 발생한 가장 큰 지진이었으며, 이로 인하여 약 700명 이상의 인명피해가 발생한 것으로 보고되고 있다. 또한, 2011년 3월 11일 발생한 일본에서 발생한 규모 M9.0의 동일본 대지진 및 지진해일로 2만 5천 여명의 인명 피해가 초래되었고, 10만 채의 가옥피해 및 저유 탱크 및 원자력 발전소의 폭발, 교량 및 공항할 것 없이 해당 지역의 모든 인프라에 회복 불능의 타격을 입혀 사회경제활동에 막대한 피해를 가져왔다.

여기서, 동일본 지진해일 시에는 주요 국도, 해안가 혹은 하천

* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4464; E-mail: kyungks@kmou.ac.kr

Received October 26 2015; Revised December 7 2015;

Accepted December 22 2015

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Photo 1 Bridges damaged by tsunami due to East Japan Earthquake

등에 설치된 많은 육상 교량이 유실되었고(Photo 1 참조), 이에 따라 시급한 인명복구 현장으로의 접근이 불가능하여 많은 인명손실이 초래되었을 뿐만 아니라 재해복구에도 많은 시간이 지체되었다는 점을 고려하면 지진해일 내습이 예상되는 육상 교량의 설계에 지진해일파력에 대한 대책이 반드시 강구될 필요가 있는 것으로 판단된다.

육상 교량에 작용하는 지진해일파력에 대한 연구는 2004년 인도양 지진해일 시에 다수의 교량이 유실되는 피해를 입은 이후 본격적으로 수행되기 시작하였다. 예로, Iemura 등(2005), Shoji와 Moriyama(2007) 등은 당시 교량의 피해 정도 및 교량의 안정성에 대해 Araki(2010a; 2010b) 등은 실험에 기초하여 교량에 작용하는 지진해일파력에 대해 Shoji 등(2009)은 지진해일파력의 분류에 대해 Shigihara 등(2010)은 지진해일파력과 교량의 안전율에 대해 각각 연구를 수행하였다. 특히, Shoji 등(2010)은 쇄파 단파의 작용 하에 교량에 작용하는 수평 및 연직방향의 지진해일파력과 항력계수에 대한 연구를 수행하였다.

한편, 지진해일파력의 수치해석에서는 대부분이 고정도의 수치해석법으로 알려진 Navier-Stokes운동방정식과 VOF(Hirt and Nichols, 1981)법을 병용하는 수법 혹은 SPH(smoothed-particle hydrodynamics)법 등을 적용하고 있다. 이에 대한 연구 사례로 Arikawa 등(2005), Xiao와 Huang(2008), Shigihara 등(2010), Nakamura 등(2013), Tanabe 등(2013), Yim과 Azadbakht(2013), Bricker와 Nakayama(2014) 및 Xu(2015) 등의 다수를 들 수 있다. 이들의 대부분은 수치결과를 실험결과와 비교하여 수치해석의 유용성을 확인하고 있다.

이상의 수치해석에서는 단면 2차원적인 접근법을 사용하고 있기 때문에 구조물 끝단에서 회절현상과 전후 및 좌우로 배치된 구조물군의 영향 등과 같은 3차원적인 수위변동과

파력을 평가할 수 없다는 단점을 지닌다. 그리고 많은 연구는 단파에 의한 지진해일파력의 실험결과에 항력만을 고려한 Morison식을 적용하여 지진해일파력을 추정하고 있다. 또한, 수치해석의 경우는 파력의 시계열에 관한 실험치와의 비교로부터 수치해석의 타당성만이 주로 논의되고, Morison을 통한 지진해일파력의 추정은 검토되지 않고 있다.

본 연구에서는 지진해일파력의 산정에 저자들이 개발하여 유용성이 충분히 검증된 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원 혼상류 해석법 TWOPM-3D(3D one-field model for immiscible TWO-Phase flows)를 적용한다. 또한, 정밀한 계산을 수행하기 위하여 수면형의 추적에는 VOF법을, 이산 방정식에는 SMAC(simplified marker and cell; Amsden and Harlow, 1970)법을, 난류해석에는 LES(large eddy simulation; Smagorinsky, 1963)모델을 각각 적용한다.

육상 교량에 작용하는 지진해일파력의 수치해석에 본 연구에서와 같이 유체와 기체의 각 운동을 동시에 해석할 수 있는 3차원 혼상류 해석법을 적용한 경우는 없었다. 혼상류 해석법을 적용하는 경우는 쇄파과정 등에서 연행되는 공기 혼입에 따른 파력의 저감 등도 함께 평가할 수 있는 장점을 가지므로 전술한 다른 수치해석법보다 고정도 해석법으로 판단된다. TWOPM-3D에 대한 상세한 사항은 Lee 등(2011)을 참고하기 바란다.

이상으로부터 이 논문에서는 2004년 인도양 지진해일 시에 피해를 입은 인도네시아 Lueng Le Bridge(Shoji *et al.*, 2009)를 대상으로 고립파에 의한 지진해일파의 내습 시 작용파력을 TWOPM-3D로 수치해석을 실시하였다. 그리고 파력의 추정에는 항력만을 고려하는 기존의 방법과 달리 항력과 관성력을 동시에 고려하는 Morison식을 적용하였다. 이로부터 항력계수와 관성력계수를 추정하고, 결과를 기존의 설계기준과 비교·검토하였다. 이로부터 수치해석법의 적용성, 그리고 파력의 추정에서 항력계수와 관성력계수를 동시에 고려하는 Morison식의 적용성과 타당성을 논의한다.

2. 수치해석 이론

혼상유체의 흐름운동에서 경계면의 추적이 가능할 경우 서로 혼합되지 않는 혼상유체의 운동에 대해서 단일유체모델(one-field model for immiscible two-phase fluid)을 적용할 수 있다. 각 상의 유체가 국소 질량 중심과 함께 이동하는 것으로 가정하면 단일유체모델은 식 (1) 및 식 (2)~(4)와 같은 단일의 연속방정식 (1)과 Navier-Stokes 운동방정식 (2)~(4)에 의해 기술될 수 있다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{xx} + 2\hat{\nu} D_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{xy} + 2\hat{\nu} D_{xy}) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{xz} + 2\hat{\nu} D_{xz}) + \frac{F_s}{\hat{\rho}} - \frac{2\hat{\nu}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{yx} + 2\hat{\nu} D_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{yy} + 2\hat{\nu} D_{yy}) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{yz} + 2\hat{\nu} D_{yz}) + \frac{F_s}{\hat{\rho}} - \frac{2\hat{\nu}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{zx} + 2\hat{\nu} D_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{zy} + 2\hat{\nu} D_{zy}) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{zz} + 2\hat{\nu} D_{zz}) + \frac{F_s}{\hat{\rho}} - \frac{2\hat{\nu}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - g - \lambda w \end{aligned} \quad (4)$$

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t) / \delta_x & x = x_s \\ 0 & x \neq x_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, x, y, z 는 좌표, u, v, w 는 x, y, z 방향에 대한 각 유속 성분, p 는 압력, g 는 중력가속도, τ_{ij} 는 SGS(sub-grid scale)에서의 난류응력, D_{ij} 는 변위-응력에 대한 GS(grid scale)성분, F_s 는 표면장력에 의한 체적력, λ 는 부가감쇠영역에서의 감쇠계수, $\hat{\rho}$ 는 밀도, $\hat{\nu}$ 는 동점성계수로, 각각 기체 혹은 액체를 결정하는 공간 및 시간의 함수이다. q^* 는 조파소스(source)의 유량 밀도로, 조파소스가 위치하는 $x = x_s$ 이외의 영역에서는 0으로 주어진다. δ_x 는 $x = x_s$ 를 포함하는 x 방향의 격자 폭이다.

3. 수치해석 결과

3.1 수치해석의 검증

3.1.1 Matsutomi(1991)의 실험 결과와 비교·검토

Matsutomi(1991)는 상·하류측에 큰 수위차를 갖는 수조 내 게이트를 급속히 개방하여 이 때 발생하는 단파(bore)가 하류측의 연직벽면에 미치는 파력을 측정하였다. 실험에 사용된 수조의 크기는 길이 11m, 폭 0.3m, 높이 0.5m인 직사각형 수조이며, 단파를 발생시키기 위하여 상류측에서 하류측으로 5m인 지점에 게이트를 설치하였다. 본 연구의

Fig. 1 Comparison of experimental results (Matutomi, 1991) and numerical ones of this study for the bore force acting on the vertical revetment

3차원 수치파동수조도 실험조건과 동일하게 구성되었으며, 실험과 수치해석 모두 게이트의 상류 수심은 $h_1=40\text{cm}$ 이고, 하류 수심은 $h_0=2, 4, 8\text{cm}$ 로 각각 변화되었다.

Fig. 1은 실험결과(Matsutomi, 1991)와 본 수치해석 결과를 비교한 것이다. 그림에는 파압계와 분력계로 각각 독립적으로 측정된 두 실험결과가 함께 제시되어 있다. 그림에서 시간의 원점은 단파가 전파되어 연직 벽에 충돌하는 시점을 나타낸다. 그림으로부터 시간의 경과에 따라 두 해석에 의한 파력은 증가되고, 이러한 과정에서 두 결과가 매우 잘 일치된다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 시간의 후반부에서는 본 수치해석 결과가 상대적으로 작은 값을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 이는 본 수치해석 이론에 저면 상에서 마찰이 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.2 Arnason의 실험결과와 비교·검토

Arnason(2005)은 상·하류에서 큰 수위차를 갖는 게이트의 급속개방에 의해 발생된 단파가 주상구조물에 작용되는 경우의 3차원 파력을 측정하였다. 실험에 사용된 수조크기는 길이 160cm, 폭 61cm, 높이 75cm인 직사각형 수조이다. 게이트는 상류측에서 하류측으로 40cm의 거리에 설치되었고, 주상구조물은 한 변의 길이가 12cm인 정사각형 단면을 가지며, 높이는 수조와 동일하다. 본 연구에서 적용된 3차원 수치파동수로 및 주상구조물은 실험조건과 동일하지만, 수조 높이는

Fig. 2 Setup of vertical cylindrical pile and water levels in higher and lower water tank to generate bore

Fig. 3 Comparison of experimental results of Arnason (2005) and numerical ones of this study for the bore force acting on the vertical cylindrical pile

80cm로 적용되었다. Fig. 2에 본 수치해석에 사용된 3차원 수치파동수로 및 구조물의 설치 위치 등을 나타낸다.

Fig. 3은 사각형 단면의 주상구조물에서 단파에 의한 수평 파력의 시간변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 Arnason (2005)의 실험에서 측정된 값에 비하여 작은 값을 나타내며, 단파 파력이 주상구조물에 작용하는 순간부터 위상차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 수리실험에서 게이트의 급속개방에 소요되는 시간에 따른 위상차에 기인한 결과이다. 따라서 이러한 위상차를 고려하지 않고 실험결과를 좌측으로 위상이동시키면 두 결과는 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 그리고, $t=1.5$ s 근방에서 (-) (진행파의 반대방향)의 파력이 나타나는 것은 전파된 단파가 수조 연직벽면에서 반사되어 구조물의 배후 면에 작용한 결과이다. 여기서, 단파의 최대파력 및 최소파력에서 실험치

Fig. 4 Comparison of experimental results of Arnason (2005) and numerical ones of this study for the horizontal velocity of a bore

와의 차이는 바닥마찰을 고려할 수 없는 본 해석법의 한계일 수도 있지만, 계산에서 시간스텝 및 공간스텝 등도 수치해석 결과에 영향을 미치므로 향후 다각도적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 게이트에서 하류측으로 35.4cm, 저면 위로 2.6cm인 지점에서 수평유속을 측정했으므로, 단파가 전파되어 측정점을 통과하는 순간을 시간의 원점으로 나타내었다. 수치해석 결과는 Arnason(2005)의 실험치와 유사한 값을 나타내며, 시간의 경과에 따른 값의 변화과정도 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이상에서 연직벽체 및 정사각형 단면을 갖는 연직 주상 구조물에 대한 기존의 정밀한 실험결과와 본 수치해석 결과를 비교·검토하였다. 본 수치이론은 저면 상의 마찰을 고려할 수 없는 관계로 실험치와의 차이가 인정되지만, 전반적으로는 실험치와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 다음에 수행되는 고립파 작용 하의 육상 교량에 작용하는 파력의 수치해석 결과도 그 신뢰성이 매우 높을 것으로 판단된다.

3.2 육상 교량과 고립파의 제원

연안역의 육상 교량에 작용하는 고립파에 의한 지진해일 파력의 특성을 평가하기 위하여 2004년 인도양 지진해일 시 인도네시아에서 실제로 약 4m 가량 이동된 Lueng Ie Bridge를 대상으로 하였다. 수치해석에서는 Fig. 5와 같이 길이 790cm, 폭 36cm의 3차원 수치조파 수조를 적용하였으며, 고립파의 천수변형으로부터 큰 파고를 얻기 위하여 1:3의 경사면을 설치하였다. 이 때, 수심과 고립파의 파고는

Table 1 Water depths and solitary wave heights

h_1 (cm)	h_0 (cm)	h_c (cm)	H_i (cm)							
			on the water depth h_i				on the water depth h_0			
60	3	6	4.02	4.98	6.0	7.2	7.2	10.1	11.4	13.5

Fig. 5 Definition sketch of 3-dimensional numerical wave tank in order to estimate tsunami forces acting on the bridge

Table 1과 같다.

적용된 모형교량은 Fig. 6과 같이 하부에 높이 4cm를 갖는 3개의 거더가 부착되었으며, 각 제원은 실제교량을 1:54로 축적된 값으로 Table 2와 같다.

Table 2 Sizes of plate and girder in model bridge

B(cm)	L(cm)	T(cm)	D(cm)	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)
36	19	3	3.7	3	4

이 때, $H_1/h_1=0.067$ ($H_1=4.02\text{cm}$)인 경우를 제외한 $H_1/h_1=0.083, 0.10, 0.12$ ($H_1=4.98\text{cm}, 6.0\text{cm}, 7.2\text{cm}$)의 경우는 모두 고립파가 교량을 월류하였다.

측정요소는 교량에 작용하는 수평 및 연직방향의 파력이고, Morison식에 의한 파력의 추정에서는 교량이 존재하지 않을 때 교량의 위치에서 수위변동, 유속 및 가속도이며, 가속도는 유속의 Fourier변환으로부터 추정되었다.

Fig. 6 Definition sketch of model bridge

3.3 지진해일파력의 산정과 Morison식에 의한 추정

Fig. 7은 상판과 거더를 포함한 교량 전체에 작용하는 지진해일파의 수평 및 연직방향의 파력을 나타낸다. 여기서 수평파력은 지진해일파의 진행방향이, 연직파력은 연직 상방이 각각 (+)이다. 수평파력의 경우 모든 CASE에서 지진해일파가 구조물에 도달하는 순간 최대 파력을 나타내며, 이후 완만하게 감소함을 알 수 있다.

연직파력에서 CASE 1($H_1=4.02\text{cm}$)의 경우는 지진해일파가 교량을 월류하지 않은 경우로, 이 때의 작용파력은 지진해일파가 교량에 도달하는 순간 최대치를 나타내지 않고 점차 증가하다가 약 0.2~0.3sec가 지난 후 최대치를 나타내고, 이후 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 한편, 지진해일파가 교량을 월류하는 CASE 2($H_1=4.98\text{cm}$), 3($H_1=6.0\text{cm}$) 및 4($H_1=7.2\text{cm}$)의 경우 연직파력은 CASE 1과 동일하게 지진해일파가 교량에 도달한 후 0.2~0.3sec 가량 지난 뒤에 최대치를 가진다. 이 후 점차 감소하다가 교량을 월류한 지진해일파에 의한 하향력이 상향력보다 상대적으로 커지면서 (-)의 파력을 나타낸다. 이 때, (-)파력은 CASE 4에서 -15N으로 가장 큰 값을 나타낸다. 그리고, H_1/h_1 이 클수록 지진해일파의 전파 속도가 빠르기 때문에 구조물에 도달하는 시간이 빠르고, 또한 큰 수평 및 연직파력을 나타낸다.

Fig. 8은 CASE 2에서 수위변동의 시간변화를 나타낸 것으로, 고립파 조파 후 $t=8.533\text{sec}$ (Fig. 8(a))와 $t=9.149\text{sec}$ (Fig. 8(b))에서 교량 주변에서 수위변동의 상황을 나타낸다. Fig. 8(a)에서는 고립파가 모델교량의 전방을 월류하는 상황을 나타내며, 후방에서는 상판 아래에 수면이 존재하고, 상판 하의 거더 사이에 공기가 존재한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 고립파가 모델교량을 통과한 뒤 구조물 주변에서 수위변동을 나타낸다.

Fig. 7 Time variation of horizontal and vertical tsunami forces acting on the bridge

Fig. 8 Snapshots of fluctuation of simulated tsunami water level

육상 교량에 작용하는 지진해일파력을 Morison식으로 추정하기 위해서는 구조물이 존재하지 않을 때 구조물의 중앙 위치에서 수위 및 유속의 시간변동을 산정하여야 한다. 지진해일파력의 추정은 고립파가 교량을 월류하지 않는 CASE 1을 제외한 CASE 2, 3 및 4에 대해 실시되었으며, 각 CASE에서 산정된 수위변동 η , 수평 및 연직유속 u_i 및 v_i 를 Fig. 9에 나타내었다. 그림으로부터 수위변동 및 유속 모두

지진해일파가 구조물에 도달하는 순간 최대치를 나타내며, 이후 완만하게 감소함을 알 수 있다. H_i/h_i 가 커질수록 수위는 커지나 수위변화에 따른 유속의 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 판단되며, 연직유속은 수평유속에 비해 매우 작은 값을 나타낸다. 따라서, 본 연구에서 지진해일파력의 추정은 수평파력만을 대상으로 하였다.

Fig. 9 Time variation of the simulated water levels and velocities at the position in the absence of the bridge

3.3.1 항력만을 고려한 지진해일파력의 추정 및 실험결과에 의한 설계기준과의 비교

식 (6)은 Morison식에서 항력성분에 해당하는 최대파력으로, 본 연구에서 항력성분만을 고려하여 최대지진해일파력을 추정하는 경우에는 다음의 식을 적용하였다.

$$F_{D1} = \frac{1}{2} \rho C_{D1} B (h_i u_i^2)_{\max} \quad (6)$$

여기서, C_{D1} 는 항력계수, u_i 는 수평유속, h_i 는 침수심, ρ 는 유체의 밀도, B 는 흐름방향으로 구조물의 투영 폭, $\max$ 는 최대치이다. 최대침수심 h_{imax} 와 최대수평유속 u_{imax} 은 구조물이 존재하지 않는 경우에 산정된 값을 적용하며, 일반적으로 $(h_i u_i^2)_{\max} \neq h_{imax} u_{imax}^2$ 이다. Fujima 등(2009)은 $(h_i u_i^2)_{\max}$ 을 적용하는 방법과 현장조사에서 $h_i u_i^2$ 의 시간 이력을 추정하기 어려운 것에 착안하여 지진해일파력의 추정에서 $h_{imax} u_{imax}^2$ 을 적용하는 방법을 제시하였으나, 본 연구에서는

Fig. 10 Estimated drag coefficients

Fig. 11 Comparison between the estimated maximum tsunami forces by Morison eq. considering drag force only and the numerical ones

$(h_i u_i^2)_{\max}$ 의 경우만을 적용한다. 그리고 항력계수에 대하여 FEMA-CCM(2005), Yeh(2006, 2007) 등은 사각형 구조물의 경우에 $C_{D1}=2.0$, 원주 구조물의 경우에 $C_{D1}=1.2$ 를 적용할 것을 제안하고 있다. 반면, 우리나라 도로교 설계기준(2008)에서는 플레이트 거더교의 항력계수를 다음의 식 (7)과 같이 제시하고 있고, 이 식에 의하면 본 연구의 모형 교량은 $C_{D1}=1.82$ 의 값을 나타낸다.

$$C_{D1} = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/T) & 1 \leq B/T \leq 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/T \end{cases} \quad (7)$$

여기서, B 는 교량의 폭, T 는 거더를 포함한 교량의 전체 높이이다.

Fig. 10은 수치해석에 의한 최대수평파력 F_{Mmax} 과 $(h_i u_i^2)_{\max}$ 를 식 (6)에 적용하여 산정된 항력계수 C_{D1} 와 침수율 h_{imax}/h_c 의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 침수율은 교량의 위치에서의 침수심고 h_{imax} 와 바닥에서 모형교량까지의 거리 h_c 의 비를 나타낸다. 그림으로부터 침수율이 커질수록 항력계수가 감소하는 것을 알 수 있고, 산정된 C_{D1} 은 CASE 2, 3 및 4에서 각각 1.40, 1.05, 1.02이고, C_{D1} 의 평균치는 1.16이며, H_i/h_1 의 값에 따라 차이를

나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 본 연구에서 산정된 C_{D1} 를 적용하여 추정된 최대지진해일파력 F_{D1max} 와 수치해석치 F_{Mmax} 의 비를 나타낸 것이며, 우리나라 도로교설계기준에 의해 추정된 값도 병기한다. 결과에 따르면 CASE 2를 제외한 CASE 3, 4에서는 산정된 C_{D1} 에 의해 추정된 F_{D1max} 는 수치해석치 F_{Mmax} 를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

다음으로 쇄파 단파의 작용 하에 본 연구와 동일한 모델 교량에 작용하는 유체력을 실험적으로 검토하여 Morison 식으로부터 항력계수를 산정한 Shoji 등(2010)의 실험 결과와 비교하면 썰기파형의 쇄파 단파에서는 단파고(수위차)에 따라 $C_{D1}=2.03, 1.86, 1.06, 1.90, 2.09, 2.03$, 권파형의 쇄파 단파에서는 $C_{D1}=1.53, 1.77, 1.50, 2.17, 1.96, 2.16$ 의 값을 각각 얻고 있다. 여기서, 썰기파형의 쇄파 단파 전체에서 평균치는 $C_{D1}=1.83$, 권파형의 쇄파 단파 전체에서 평균치는 $C_{D1}=1.85$ 의 값을 각각 제시하고 있다. 이상의 실험치는 전술한 본 수치해석으로부터 추정된 평균치 $C_{D1}=1.16$ 보다 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 근본적으로 실험에서는 지진해일로 단파를, 반면에 본 연구에서는 고립파를 적용하였기 때문이며, 쇄파 단파의 경우가 단파 전면 및 구조물과의 상호작용으로 와류 등이 현저하게 발생되기 때문에 큰 항력계수를 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 교량표면에서의 마찰을 수치적으로 고려할 수 없기 때문에 마찰항력의 성분이 포함되지 않은 것도 하나의 원인으로 고려될 수 있다. 이러한 차이 등을 고려하면 본 연구로부터 추정되는 항력계수가 합리적인 값을 나타내는 것으로 판단되지만, 보다 정확한 값을 산정하기 위해서는 고립파 작용에 대한 정밀한 수리실험을 수행할 필요가 있다. 그리고 우리나라 도로교설계기준 $C_{D1}=1.82$ 보다도 본 연구의 값이 작은 것은 전술한 바와 같이 우리나라 도로교설계기준도 단파실험에 근거하여 추정되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.3.2 항력 및 관성력을 동시에 고려한 지진해일파력의 추정

항력과 관성력을 동시에 고려한 지진해일파력의 추정에 Morison이 제안한 다음의 식 (8)을 적용하였다.

$$\begin{cases} F_{D2} = C_{D2}f_D + C_M f_I \\ f_D = \frac{1}{2} \rho A(h_i) u_i^2 \\ f_I = \rho V(h_i) \frac{du_i}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, F_{D2} 는 Morison식에 의한 추정파력, C_{D2} 는 항력 계수, C_M 은 관성력계수, $A(h_i)$ 는 흐름방향으로 구조물의 투영면적으로 h_i 의 함수, $V(h_i)$ 는 구조물의 배수체적으로 h_i 의 함수, du_i/dt 는 가속도, f_D 는 항력, f_I 는 관성력이다.

항력계수와 관성력계수는 추정치와 관측치(수치해석에 의한 결과)와의 사이에 주어지는 다음의 관계 식 (9)와 같은 최소자승법으로부터 산정되었다. 그리고 수치해석으로 얻어진 유속의 시간이력을 Fourier변환하여 가속도의 시간이력을 산정하였다.

$$\varepsilon^2 = \sum F_M^2 (F_{D2} - F_M)^2 \quad (9)$$

여기서, F_M 은 수치해석에 의한 측정파력을 나타낸다. 그리고 최소자승법의 최소화 과정인 식 (9)의 $\partial \varepsilon^2 / \partial C_{D2} = 0$ 및 $\partial \varepsilon^2 / \partial C_M = 0$ 으로부터 식 (8)을 적용하여 항력계수와 관성력 계수를 산정하면 식 (10) 및 (11)과 같이 주어질 수 있다.

$$C_{D2} = \frac{\sum (F_M^3 f_D) \sum (F_M^2 f_I^2) - \sum (F_M^3 f_I) \sum (F_M^2 f_D f_I)}{\sum (F_M^2 f_D^2) \sum (F_M^2 f_I^2) - [\sum (F_M^2 f_D f_I)]^2} \quad (10)$$

$$C_M = \frac{\sum (F_M^3 f_I) \sum (F_M^2 f_D^2) - \sum (F_M^3 f_D) \sum (F_M^2 f_D f_I)}{\sum (F_M^2 f_I^2) \sum (F_M^2 f_D^2) - [\sum (F_M^2 f_D f_I)]^2} \quad (11)$$

수치해석에 의해 측정된 수평파력, 침수심, 유속 및 가속도의 각 시계열 값을 식 (8)에 적용하고, 식 (10)과 (11)의 과정을 통하여 추정된 항력계수와 관성력계수를 Table 3에 나타내었으며, 4개의 CASE에 대한 평균항력계수 및 평균관성력 계수는 각각 0.44, 0.17로 추정된다. 이의 결과를 적용하여 산정된 추정파력과 수치해석에 의한 파력의 시간이력을 Fig. 12에 나타낸다. 그림으로부터 고립파의 CASE 2, 3 및 4 모두에서 두 결과의 시간이력이 잘 일치하며, 또한 최대치도 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 11과 12에서 추정된 최대지진해일파력을 나타낸 것으로, 각각의 추정법과 우리나라 도로교설계기준 및 수치해석치를 동시에 비교·검토한다. Fig. 13을 통하여 CASE 2를 제외한 나머지 결과에서 설계기준 $C_{D1}=1.82$ 에 의해 추정된 지진해일파력에 비해 항력만을 고려한 추정법이 보다 수치해석치에 가까우며, 그리고 항력만을 고려한 방법에 비해 항력과 관성력을 동시에 고려한 추정법이 수치해석치에

Table 3 Estimated drag and inertia coefficients

C_{D2}, C_M	C_{D2}	C_M	C_{D2}, C_M	C_{D2}	C_M
CASE 2	0.46	0.16	CASE 3	0.41	0.14
CASE 4	0.45	0.22	Average	0.44	0.17

Fig. 12 Time variation of the computed and estimated tsunami forces in the bridge

Fig. 13 Comparison of computed and estimated wave forces acting on the bridge

더욱 가까운 것을 알 수 있다. 여기서, 지진해일파력의 추정에 항력과 관성력을 동시에 고려한 추정법이 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

4. 맺음말

본 연구에서는 연안역의 육상 교량에 작용하는 지진해일 파력을 수치적으로 검토하였다. 지진해일파고의 변화에 따른 작용 파력 특성을 검토하기 위하여 고정도 혼상류 수치해석법인 TWOPM-3D를 적용하여 침수심과 유속의 시간변화를 산정하고, 이를 이용하여 Morison식으로부터 지진해일파력을 추정한 결과치 및 기존의 설계기준치 등과 비교·분석하였다. 이로부터 수평파력은 지진해일파가 구조물에 도달하는 순간 최대치를 나타낸 이후 완만하게 감소되는 것을 알 수 있었고, 또한 항력과 관성력을 동시에 고려한 추정법이 항력만을 고려한 추정법보다 지진해일 파력을 보다 고정도로 재현하므로 지진해일 파력의 평가에 항력 및 관성력을 동시에 고려한 추정법이 적합한 것 등의 중요한 사실을 알 수 있었다.

이상의 결과들은 수치해석으로부터 추정된 결과에 기초하여 산정된 파력계수의 특성을 논의한 것으로, 보다 정확한 파력 계수를 추정하기 위해서는 수리시험을 병행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부/한국해양과학기술진흥원의 연구과제(PJT200538)로 수행된 연구임.

References

- Amsden, A.A., Harlow, F.H. (1970) The SMAC Method : A Numerical Technique for Calculating Incompressible Fluid Flow. Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4370, Los Alamos, N.M.
- Araki, S., Ishino, K., Degochi, I. (2010a) Characteristics of Tsunami Fluid Force Acting on Girder Bridge, *Proceedings of 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, pp.775 ~779.
- Araki, S., Sakahita, Y., Deguchi, I. (2010b) Characteristics of Horizontal and Vertical Tsunami Force Acting on Bridge Beam, 66(1), pp.796~800.
- Arikawa, T., Ikebe, M., Yamada, F., Shimosako, K., Imamura, F. (2005) Large Model Test of

- Tsunami Force on a Revetment and on a Land Structure, *Proc. Coastal Eng., JSCE*, 52, pp.746~750.
- Arnason, H.** (2005) Interactions Between an Incident Bore and a Free-Standing Coastal Structure, Doctoral Dissertation, University of Washington.
- Bricker, J., Nakayama, A.** (2014) Contribution of Trapped Air, Deck Superelevation and Nearby Structures to Bridge Deck Failure during a Tsunami, *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 140(5), 05014002.
- FEMA-CCM** (2005) Coastal construction manual. FEMA 55 Report, Edition 3, FEMA, USA.
- Fujii, N., Ohmori, M., Ikeya, T., Inagaki, S.** (2006) Evaluation of Tsunami Wave Force Acting on Oil Storage Tanks and Predictive Method for Tsunami Damages, *J. Coastal Eng., JSCE*, 53, pp.271~275.
- Fujima, K., Achmad, F., Shigihara, Y., Mizutani, N.** (2009) Estimation of Tsunami force Acting on Rectangular Structures, *J. Disaster Res.*, 4(6), pp.404~409.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D.** (1981) Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *J. Comput. Phys.*, 287, pp.299~316.
- Iemura, H., Pradono, M.H., Takahashi, Y.** (2005) Report on the Tsunami Damage of Bridges in Banda Aceh and Some Possible Countermeasures, *Proceedings of 28th Earthquake Engineering Symposium*, JSCE.
- Korea Society of Civil Engineering, Korea Bridge Design & Engineering Research Center** (2008) *Bridge Design Criteria of (Korean edition)*, Kimoon-dang, Korea, p.1008.
- Lee, K.H., Ha, S.W., Lee, K.S., Kim, D.S.** (2011) Numerical Analysis for Three-Dimensional Tsunami Force Acting on Multi-onshore Structures, *J. Korean Soc. Civil Eng., KSCE*, 31(2B), pp.175~185.
- Matsutomi, H.** (1991) An Experimental Study on Pressure and Total Force due to Bore, *Proc. of Coastal Eng., JSCE*, 36, pp.626~630.
- Nakamura, T., Mizutani, N., Ren, X.** (2013) Numerical Analysis of Tsunami-Induced Wave Force acting on a Bridge Deck and its Effects on the Motion of the Bridge Deck, *J. Japan Soc. Civil Eng.*, A1, 69(4) (Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 32), I 20-I 30.
- Shigihara, Y., Fujima, K., Kosa, K.** (2010) Reevaluation of Tsunami Force acted on the Bridges of the Neighborhood of Banda Aceh in the 2004 Indian Ocean Tsunami, 66(1), pp.231~235.
- Shoji, G., Hiraki, Y., Fujima, K., Shigihara, Y.** (2010) Experimental study on fluid force acting on a bridge deck subjected to plunging breaker bores and surging breaker bores. (in Japanese)
- Shoji, G., Moriyama, T.** (2007) Evaluation of the Structural Fragility of a Bridge Structure Subjected to a Tsunami Wave Load, *J. Nat. Disaster Sci.*, 29(2), pp.73~81.
- Shoji, G., Moriyama, T., Fujima, K., Shigihara, Y., Kasahara, K.** (2009) Experimental Study Associated with a Breaking Tsunami Wave Load acting onto a Single Span Bridge Deck, *J. Struct. Eng., JSCE*, 55A, pp.460~470.
- Smagorinsky, J.** (1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equations, *Mon. Weath. Rev.*, 91(3), pp.99~164.
- Tanabe, S., Asai, M., Sonoda, Y.** (2013) Numerical Evaluation of Fluid Force acted on Bridge Girders During Tsunami by using Particle Method. APCOM & ISCM.
- Xiao, H., Huang, W.** (2008) Numerical Modeling of Wave Runup and Forces on an Idealized Beachfront House, *Ocean Eng.*, 35, pp.106~116.
- Xu, G.** (2015) Investigating Wave Forces on Coastal Bridge Deck, Ph.D thesis, Louisiana State University.
- Yeh, H.** (2006) Maximum Fluid Forces in the Tsunami Runup Zone, *J. Waterw. Port. Coastal & Ocean Eng, ASCE*, 132(6), pp.496~500.
- Yeh, H.** (2007) Design Tsunami Forces for Onshore Structures, *J. Disaster Res.*, 2(6), pp.1~6.
- Yim, S.C., Azadbakht, M.** (2013) Tsunami Forces on Selected California Coastal Bridges, Final Report Submitted to the California Department of Transportation (Caltrans) under Contract No. 65A0384.

요 지

본 연구에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 TWOPM-3D와 자유수면을 효과적으로 추적할 수 있는 VOF법을 결합한 수치해석법으로 연안역의 육상 교량에 작용하는 고립파에 의한 지진해일파력을 수치적으로 검토하였으며, 연직벽체와 연직 주상구조물에 작용하는 단파파력에 관한 기존의 실험치와 비교·검토하여 본 수치해석의 타당성을 검증하였다. 실제로 피해를 입은 교량에 대해 지진해일파고의 변화에 따른 파력의 특성을 수치실험을 통하여 조사하였으며, 육상 교량에 작용하는 지진해일파력의 추정에 항력 성분만을 고려한 Morison식으로부터 얻어진 항력계수의 결과와 설계기준과의 비교로부터 본 3차원 수치해석의 유용성을 논의하였다. 또한, 지진해일파력을 보다 고정도로 추정할 수 있는 합리적인 방법으로 항력과 관성력을 동시에 고려한 Morison식의 적용을 제안하였다.

핵심용어 : 육상 교량, 고립파, 지진해일파력, 항력, 관성력, Morison방정식, TWOPM-3D