橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算

鴫原良典1·藤間功司2·庄司学3

¹防衛大学校システム工学群建設環境工学科助教 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20) E-mail:shigi@nda.ac.jp ²防衛大学校システム工学群建設環境工学科教授 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20) E-mail:fujima@nda.ac.jp ³筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

橋梁に作用する津波波力の数値計算を実施し、2次元平面モデル(Staggered leap-frog法による浅水 理論式の数値解)と3次元モデル(VOF法によるNavier-Stokes式の数値解)の計算結果の違いについて比 較・検討した.その結果、3次元モデルは橋梁周りの流れを正確に再現でき、橋桁に作用する水平波力を 精度良く再現できることを確認した.一方で2次元平面モデルは流速の再現精度の低下により水平波力は 過小評価となる.さらに3次元モデルにおいて鉛直方向の空間格子長は桁厚よりも小さく設定する必要が あることがわかった.

Key Words : tsunami force, bridge, numerical simulation

1. はじめに

2004 年インド洋津波では沿岸の家屋などの構造 物とともに道路,鉄道,電力施設,上下水道などの 社会基盤構造物の被害が多く発生し,中でも海岸線 の近傍に位置する橋梁構造物は,津波による落橋や 橋台の洗屈等の様々なパターンの被害が生じた(幸 左ら,2007)¹⁾.橋梁構造物に作用する津波波力に ついてはインド洋津波以降,水理実験に基づいた研 究が数多く行われている(例えば荒木ら(2008)²⁾な ど)が,津波外力に対応する橋梁被害を定量的に予 測することは未だ困難であるといえる.その中で森 山(2009)³⁾は,河口や河川内に位置する橋梁構造物 に作用する津波波力に関する実験的研究として,力 学的な相似を考慮した上で橋梁に作用する津波波力 に関する模型実験を行い,橋梁が滑動する際の津波 波力に関する一定の知見を得ている.

一方で数値計算に関する研究としては、幸左ら (2007)が個別要素法で、五十嵐・後藤(2007)⁴⁾は粒 子法により橋梁の被災メカニズムの検討を行ってい るが、実務において津波による橋梁構造物の被害予 測を実施する場合、妥当な結果を得るための最適な 数値モデルの提案や、それに伴う空間格子長などの 計算条件の設定基準などの課題が残されている.

そこで本研究では,橋梁に作用する津波波力の 数値計算を実施し,実務上で多く使用される2次 元平面モデルと,近年研究開発が進められている3 次元モデルを利用して森山(2009)の水理実験の再 現計算を行い,橋梁に作用する津波波力の算定に おける各数値モデルの適応性について検討した.

2. 数値モデル

本研究では2次元平面モデルと3次元モデルの数 値計算を実施し,両者の再現性の比較を行った.2 次元平面計算には支配方程式に水深方向を積分し た浅水理論(非線形長波理論)を採用し, Staggered leap-frog差分法により数値解を求めた. また,3次元計算には3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)を使用した.これは支配方程式に Navier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて 拡張したものであり,自由表面解析モデルにVOF法 を採用している.詳細な計算方法については,前 者は後藤ら(1982)⁵⁾が,後者は有川ら(2007)⁶⁾が詳 しい.本研究は以下の説明において,浅水理論に 基づく計算を2次元平面モデル,Navier-Stokes方 程式に基づく計算を3次元モデルと称する.

3. 計算条件

(1)水理実験の概要

本研究では森山(2009)による橋梁構造物に作用 する段波津波の水理実験について再現計算を行っ た.森山(2009)は幅0.4m 長さ15m,高さ0.3mの矩 形断面水路を用い,ゲート急開方式により津波を 発生させ,勾配3/5の斜面に続く水路部分を河川と 見立てることで段波津波の河川遡上を模擬した. 図-1に実験装置の模式図を示す.津波はゲートか ら3m~4m 付近において巻き波状に砕け始め,橋桁 を設置するゲートから5.4m の位置においては砕波



図-1 実験装置の概要(森山, 2009), 単位はmm





段波となって橋桁に作用する.図中に示す位置で 背面の水位を計測し,さらに橋梁模型位置では3 分力計により波力(水平力,上揚力)を測定した.

実験条件として静水深 $h_0=2cm$, 4cm02 通りに対 し一様水深部と貯水部の水位差 h_1 を変化させること で津波高さを変化させ、橋桁の被害(水平方向移 動)がぎりぎり生じないケースから橋桁が大規模 な被害を被るケースまでの津波を発生させている. 本研究ではその中で橋桁移動が発生しない2ケー ス ($h_0=2cm$, $h_1=10.3cm$) と ($h_0=4cm$, $h_1=12.5cm$) について計算を実施した.

(2)計算領域および境界条件

計算領域は図-2 に示すような一様水深部の空間 とした.3次元モデルの場合は橋桁を不透過グリッ ドで表現しているため,桁下を通過するような流 れを表現することができる.一方で2次元平面モ デルの場合では地盤高は1価関数であるため桁下 の空間は表現できない.したがって津波波力は抗 力として評価することとし,橋桁を取り除いた状 態で通過波を計算した.各計算条件をまとめたも のを表-2 に示す.なお,3次元モデルによる計算 では MPI (Message Passing Interface)を利用し た 8CPUの並列計算を行っている.

境界条件としては、2次元平面モデル、3次元モ デルともに図中の左端(橋桁から 5.5mの位置)に おいて水理実験で測定された水位を強制入力し、

表-1 計算条件

計算モデル	格子間隔(cm)			CDU	封答吐明
	dx	dy	dz	CPU	訂昇时间
Navier-Storkes式 (3次元モデル)	2	2	2	8	40分
	1	1	1	8	3時間20分
	1	1	0.25	8	14時間35分
浅水理論 (2次元平面モデル)	1	1	_	1	4分
	2	2	_	1	1分

右端では自由透過とした.

(3) 津波波力の計算方法

本研究では2次元平面モデルと3次元モデルの 比較のため,水平波力の比較を行う.波力の計算 方法として,2平面次元モデルの場合は橋梁位置で の通過波の水位と流速を算出し抗力として以下の 式で求めた.

$$F = \frac{\rho}{2} C_d B L h_i u_i^2 \tag{1}$$

ここで F は橋桁に作用する水平波力, ρ は水の密度, C_d は抗力係数,B は桁幅,L は桁長, h_i は通過 波の水深, u_i は通過波の流速,である.また,抗 力係数は森山(2009)の実験結果から C_d =0.96 とした.

また,3次元モデルでの津波波力は橋梁において 受圧面に相当する領域に含まれるグリッドを指定 し,圧力の面積積分値を出力することにより受圧 面に作用する全圧力を津波波力として算定した.

4. 計算結果および考察

(1)2 次元平面モデルと 3 次元モデルの再現性の比 較

3 次元モデルの結果として、図-3 に津波が橋梁 に作用する瞬間における実験(図中左列)と計算 (同右列)の空間波形を示す.ここでは鉛直空間格 子 dz=0.25cm の場合である.津波先端はまず桁下を 通過し、その後桁前面に衝突して打ち上がり、そし て越流していくが、これらの挙動を数値計算により 良好に再現できていることがわかる.

2次元平面モデルと3次元モデルによる津波段波 の再現性を検証するため、図-4 で波力の時系列を 比較した.この図から、3次元モデルは最大波力と 到達時刻ともに実験に良く一致しているが、2次元 平面モデルでは最大波力は実験値の約半分程度であ り、位相にも大きなずれが見られる.この理由とし て図-5に示す橋梁模型を取り除いた状態での通過



図-3 橋梁に作用する瞬間における空間波形の 比較(3次元モデル)



図-4 波力の時系列分布

波の水位および流速の時系列分布を比較する. なお, 水位と流速は図-1 の橋梁前面側の波高計と流速計 の位置で出力している. 水位に関しては両者とも実 験値よりも過大となっているが,流速については 2 次元平面モデルが過小評価となっている. 抗力が流 速の自乗に比例することを考慮すると 2 次元平面モ デルの津波波力が過小評価となったのは,津波段波 の流速の再現性が原因であると考えられる.

(2)3 次元モデルにおける設定空間格子長の計算結 果への影響

図-6は3次元モデルでの空間格子を変化させた 場合の計算結果の比較である.図より,空間格子 が細かくなるに従い実験の波形に近づいているこ とがわかる.ただし,最大波力のみに注目すると dz=1cm でも十分精度のよい結果が得られている. dz=2cm は桁厚と等しい大きさであり,以上の結果





図-6 空間格子間隔の影響 (h₀=2.0cm)

から少なくとも格子長は桁厚よりも小さく設定し鉛 直方向の圧力分布を考慮しなければならないといえ るが、今後様々なケースについて詳細に調べ、橋梁 に作用する津波計算を実施する場合での格子間隔の 設定条件を明らかにする必要がある.

5. 結論

本研究では橋梁に作用する津波波力の数値計算を実施し、浅水理論式に基づく2次元平面モデルとN-S 式に基づく3次元モデルの計算結果の違いについて 比較・検討した.その結果、3次元モデルは橋梁周 りの越琉を再現でき、また、橋桁に作用する水平波 力を精度良く再現できることが確認できた.2次元 平面モデルは流速の再現精度の低下により水平波力 を過小評価することがわかった.さらに、鉛直方向 の空間格子長は桁厚よりも小さく設定する必要があ るといえるが,詳細な格子間隔の条件は今後明らか にする必要がある.

参考文献

- 幸左賢二,内田悟史,運上茂樹,庄司学:スマトラ地 震の津波による橋梁被害分析,土木学会地震工学論文 集,Vol.29,pp.895-901,2007.
- 2) 荒木進歩,中島悠,出ロー郎,伊東禎和:河口付近の 橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究,海岸 工学論文集第54巻, pp.866-870, 2007.
- 3) 森山哲雄:橋梁構造物に作用する津波荷重評価,筑波 大学大学院修士論文, pp. 30-70, 2009.
- 4) 五十嵐洋行,後藤仁志:津波氾濫による橋桁被災過程の数値シミュレーション,海岸工学論文集,第54巻, pp.211-215,2007.
- 5) 後藤智明,小川由信:Leap-frog法を用いた津波の数値 計算法,東北大学工学部土木工学科,1982.
- 有川太郎、山田文則、秋山実:3次元数値波動水槽に おける津波波力に関する適用性の検討、海岸工学論文 集,第52巻、pp.46-50,2005.

NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI FORCE ACTING ON THE BRIDGE

Yoshinori SHIGIHARA, Kouji FUJIMA and Gaku SHOJI

Numerical simulation of tsunami wave force to act on a bridge was carried out, and it was compared about a difference of a calculation result of two-dimensional horizontal models (shallow water equation) and threedimensional model (Navier-Stokes equation by Volume of Fluid). As a result, three-dimensional model could reproduce a flow of the bridge circumference precisely, and that precision could calculate wave force to act on a bridge girder well was confirmed. On the other hand, as for two-dimensional horizontal models, wave force becomes underestimate because reproduction precision of flow velocity is low. Furthermore, in three-dimensional models, the grid size of vertical direction should be set smaller than thickness of a bridge girder.