橋桁に対する津波作用力の差分格子 ボルツマン法による発生メカニズムの解明

中尾 尚史1・松田 良平2・赤松 克児3・蔦原 道久4・伊津野 和行5

 ¹正会員 独立行政法人土木研究所専門研究員 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
 E-mail: nakao55@pwri.go.jp
 ²正会員 (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング事業本部 (〒551-0023 大阪府大阪市大正区鶴町2丁目)
 E-mail: matsuda@nichizotech.co.jp
 ³神戸大学 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
 E-mail: akamatsu@s4.dion.ne.jp
 ⁴神戸大学名誉教授(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
 E-mail: tutahara@mech.kobe-u.ac.jp
 ⁵フェロー 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: izuno@se.ritsumei.ac.jp

本研究は、津波による橋梁の上部構造に生じる力の発生メカニズムを解明することを目的として、差分 格子ボルツマン法を用いた数値解析を行った.その結果、水と空気の二相流で解析を行うことで、実験で 観測された圧力分布の傾向と、流れの様子を再現できた.さらに、みぞ形断面をモデル化した解析を行い、 水路実験で鉛直方向の津波作用力が発生しなかった原因を検討した.その結果、模型内に空気があるため に、津波が模型に作用した直後の負圧が生じなかったため、下向きの力が作用しなかったことがわかった.

Key Words : Difference Lattice Boltzmann Method, bridge, flume test, hydrodynamic pressure

1. はじめに

2011年に東北地方で発生した地震に伴う津波により, 多くの橋梁構造物が流出する被害を受けた¹⁾. また,橋 桁が流出することにより,被災地への救援,復旧が遅れ るなどの2次的な被害も発生している. そのため,橋桁 への津波対策は,重要な課題となっている.

現在,水路実験^{例えば204}により,津波が橋桁に作用する ときのメカニズムの解明や,橋桁に作用する力,支承反 力,圧力の検討が行われている.また,粒子法⁹や差分 法⁹などによる水路実験の再現解析が試みられている.

津波が直接衝突する面,すなわち抗力方向である桁前 面の圧力については,実験の傾向を比較的よく再現でき る.しかし,津波流れの直角方向である揚力方向,例え ば桁下面の圧力は実験傾向の再現が難しく,とりわけ負 圧の再現が困難である.橋梁構造物の場合は,津波が作 用する耳桁,床版張り出し部底面および床版側面二つい ては,直接津波が作用するため,比較的精度良く再現で きる.一方,桁前縁側の角である下フランジから剥離す る流れによって桁下面に生じる負圧は表現するのは難し い.この問題を解決する方法の1つに,水と空気を考慮 する(二相流)方法での解析が考えられる.

格子ボルツマン法(LBM:Lattice Boltzmann Method)は、 流体を衝突と並進を繰り返す多数の粒子の集合体と捉 え、離散的な粒子の運動を統計力学的に処理することで 流体の運動を模擬する数値計算法ⁿであり、気液混合モ デルによる解析も行うことが可能である.津波が作用す る橋梁周囲は、空気と津波の混層流となるため、本手法 が橋梁構造物に作用する津波の解析に適用できるものと 考えた.

そこで本研究では、水路実験の再現計算を行うととも に、上部構造に津波が作用したときの津波作用力の発生 メカニズムを解明することを目的として、格子ボルツマ ン法に差分要素を加えた差分格子ボルツマン法を用いた 検討を行った.

2. 差分格子ボルツマン法の概要

本章では、計算で用いる差分格子ボルツマン法の概要 について述べる.まず始めに、基本となる格子ボルツマ ン法について述べ、その後に差分格子ボルツマン法の基 本的な内容について述べる.詳細については既往の論文 を参照されたい⁷⁹.

(1) 格子ボルツマン法

前述したように,格子ボルツマン法は,格子気体法か ら発展した数値計算法であり,流体を衝突と並進を繰り 返す多数の粒子の集合体と考え,それらの規則的な粒子 運動を計算することで,流体運動をシミュレートする手 法である⁹.そのため,差分法、有限要素法など流体の 運動方程式を何らかの方法で離散化して解く手法とは異 なる.

格子ボルツマン法はボルツマン方程式の速度空間を次 式のように有限個の離散速度で表す.

$$\frac{\partial f_i(t, \mathbf{x})}{\partial t} + c_{i\alpha} \frac{\partial f_i(t, \mathbf{x})}{\partial x_{\alpha}} = \Omega_i(f) \qquad (1)$$

ここで、fitt粒子の分布関数で添え字のitt粒子の持つ有限個の速度、att直角座標である。fit時間tと位置 xの 関数である。右辺は衝突を表す項で、一般には分布関数 fの非線形の関数である。一般には衝突項を簡単化した 方程式が用いられている。

$$\frac{\partial f_i(t,\mathbf{x})}{\partial t} + c_{i\alpha} \frac{\partial f_i(t,\mathbf{x})}{\partial x_{\alpha}} = -\frac{1}{\tau} \Big(f_i(t,\mathbf{x}) - f_i^0(t,\mathbf{x}) \Big)$$

(2)式を離散化BGK方程式と呼ぶ. f[®]は局所平衡分布関数, τは緩和時間係数であり,衝突により局所平衡分布関数 に近づく時間の尺度である.

格子ボルツマン法は, 計算のアルゴリズムがシンプ ルであるため,並列計算に適している.また様々な流体 (混相流,体積力の働く流体,層流・乱流,圧縮性・非 圧縮性流体)を統一のアルゴリズムによって計算可能, 式の離散化にともなう数値誤差が発生しないことなどの

(2) 差分格子ボルツマン法

特徴がある.

格子ボルツマン法は、実際の計算において大きな流速 (マッハ数)の流れの計算が困難であり、また高いレイ ノルズ数の流れにも論理的には可能であるが、計算が不 安定になりやすいなどの難点がある. 差分格子ボルツマ ン法は、これらの問題を解決した手法である. 差分格子 ボルツマン法は、格子ボルツマン法に差分スキームを導 入し、計算格子と離散的粒子速度を独立に扱えるように した手法である⁷⁹. 差分格子ボルツマン法は,複雑な 形状の境界に対しても境界適合座標などを用いて精度よ く計算することが可能であり,差分法における多くの手 法が活用できる.また,高いマッハ数の流れが計算可能 になっているなどの特徴がある.差分格子ボルツマン法 の基礎方程式は次式で表される.

$$\frac{\partial f_{i}(t,\mathbf{r})}{\partial t} + c_{i\alpha} \frac{\partial f_{i}(t,\mathbf{r})}{\partial x_{\alpha}} - \frac{Ac_{i\alpha}}{\tau} \frac{\partial (f_{i} - f_{i}^{0})}{\partial r_{\alpha}} = -\frac{1}{\tau} \Big[f_{i}(t,\mathbf{r}) - f_{i}^{0}(t,\mathbf{r}) \Big]$$
(3)

式中の左辺第3項は負の粘性を表す項であり(ただし A>0, A:数値粘性修正係数),高レイノルズ数の流れ に対して時間ステップを大きくとることで,計算を高速 化できる.

3. 水路実験の再現解析

本章では、前章で示した差分格子ボルツマン法を用い て、著者らがこれまでに実施した水路実験¹⁰の再現解析 を行い、模型周辺の流れの様子や、模型に生じる圧力に ついて比較検討した.

(1) 検証する実験装置

解析対象とする水路実験は,著者らがこれまでに実施 した長さ6000mm (水路長さ4000mm,水槽長さ 2000mm),水路幅200mm,水路幅600mmの実験装置 (図-1)によるもので、模型の縮尺は1/100スケールを想 定している.

本実験装置は貯水槽に一定量の水をため、ゲートを引 き上げることにより津波とみなしたゲート急開流れを発 生させた.なお本研究ではこの流れを津波と表現する. 貯水槽と水路の間にゲートを設けた.またゲートから 3000mm下流に実験模型を設置した.

実験では模型に6分力計ロードセル(AMTI社製MC3A-X-100)を設置し、3分力すなわち水平方向の津波外力Fx (流れの向きが正),鉛直方向の津波外力Fz(上向きが 正),流力モーメントMy(時計回りを正)を計測した. Myは断面の図心を通る軸(y軸)回りにとってある.模 型は幅が80mm,高さが20mmの長方形断面を用いた. 本研究では津波外力のうち鉛直方向成分および流力モー メントに着目して圧力を調べるため、図-2に示す模型の 上面および下面に圧力計を設置した.図中のナンバーは 圧力計の番号である.

実験では津波外力と圧力および水位を同時に計測した. またサンプリング間隔は0.01秒として60秒間計測した.

(2)



なお, 圧力計の固有振動数成分および圧力計の固有振 動数成分の影響は波形処理によりカットした.またハイ スピードカメラを設置し,模型周辺の流れの様子を撮影 した.

(2) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す.図に示すとおり,解析モデルは水路実験の12縮尺でモデル化した.水路実験は2次元試験であったため,解析においても2次元モデルを採用し,幅1600メッシュ,高さ110メッシュ(格子点数177711)で作成した.なお,解析は全て無次元量で解析を行っている.図に示すように,水柱(液相)は高さ100メッシュ、幅1000メッシュでモデル化し,橋梁模型は以前水路実験で用いたB/D=4の長方形断面を高さ10メッシュ,幅40メッシュでモデル化した(図-4).それ以外の範囲は気相でモデル化した.四方の境界は,上下面および左面は壁条件,右面は流出条件にした.

本研究では、津波の速度および津波衝突時の構造物周 囲の流れに着目した解析を行った. そのため、解析では 実験で得られた津波速度を一致させるように、水柱の先 端-模型先端間のメッシュ数を調整し、本研究では300 に設定した. また、時間刻み<u>4</u>は0.1にした.

解析は液相と気相の2相流での解析を行った.このと き気体と液体の密度比は*mL/mG=800*⁷,数値粘性修正係 数*A*は0.5に設定した. なお本解析では, DELL PRECISIONT7500 (CPU INTEL XEON X5677(3.46GHz)×2 (CPU1つあたり4coreで合計8CPU), MEM 128GB)を用い, 並列化解析 (ただしOpenMPのような積極的な並列化指 定はしていない) を行ったところ, 解析速度は約 40000step/日であった.

4. 水路実験の再現解析結果

(1) 模型周辺の流れの様子

図-5は、津波作用直後と津波越波時の橋梁周辺の流況 を示したものである.図の青色が水(液相),赤色は空 気(気相)である.

図-5(a)で示した津波作用直後の流況は、模型に津波が 衝突した直後の水の上昇を再現できている. 解析では上 昇した水が、若干後部方向に流れているが、これは粘性 が高いことで実験とレイノルズ数が異なっている、表面





(a) 津波作用直後の流況





(b) 津波越波時の流況 図-5 模型周辺の流況(左:実験,右:解析)

張力が強く働いているためであると考えられる.津波が 模型上を越波したときの流況を図-5(b)に示す.図より, 越波している波の様子などを解析は水路実験の流況を再 現できている.

(2) 模型に生じる圧力

図-6,図-7は模型上下面に生じる圧力の分布を示した ものである.水路実験では、上下面のみ圧力を計測して いるので、ここでは上下面における圧力を比較した.

比較するにあたって、両者を次式に示すように無次元 量で表した.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} \tag{4}$$

ここで、 C_p は圧力係数、pは圧力、 p_∞ は大気圧(解析では1/3、実験ではゲージ圧を計測しているため0)、 ρ は密度であり、実験では水の密度(1000kg/m³)、解析では気体と液体の密度比から800で計算した.また、Uは津波速度である.津波速度は、実験では2本の水位計を通過する時間を水位計間の距離で割り算出した.解析では、実験における水位計の位置を、津波が通過するステップ数× Δt で割り無次元の速度を算出した.

図-5(a)は津波作用直後の模型下面に生じる圧力の分布





図-7 模型に生じる圧力の分布

を示したものである.縦軸は圧力係数,横軸は模型前面 からの距離であり、数値は水路実験における圧力計測番 号である.図より、解析では模型前面部の負圧、模型後 部の正圧の傾向は再現できている.しかし、水路実験の 結果とは大きな差が生じている.この原因としては、先 ほど示した、粘性が大きいことに加え、格子間隔が模型 の大きさに対して粗いことなどが考えられる.図-6(b)は 津波通過時の模型下面に生じる圧力の分布である.圧力 計測位置の1-3は水路実験の圧力分布とよく一致してい る.しかしこれ以降の圧力計測位置では、水路実験での 圧力係数よりも小さくなっている.

図-7は模型上面に生じる圧力の分布を示したものであ る.縦軸および横軸は先ほどと同様である.上昇した津 波が模型上面に着水した直後の圧力分布を図-7(a)に示す. 図より、計測した位置での圧力の傾向は.解析および実 験共にあっており、模型後部(圧力計測位置6)付近で の圧力係数の増加など傾向は両者とも得られている.津 波通過時(図-7(b))も同様に、模型前面の圧力は水路実 験と傾向が異なる.しかし、模型後部(圧力計測位置5-7)では、傾向および圧力係数はほぼ一致する.

以上より、今回の解析では、格子間隔の粗さや粘性が 高いために、実験結果を完全に一致はしていないが、差 分格子ボルツマン法を用いることで、長方形断面で再現 することが困難であった、模型下面の負圧を再現するこ



とが可能であることがわかった.

5. みぞ形断面の津波作用メカニズム

本章では、差分格子ボルツマン法を用いて、著者ら が過去に行ったみぞ形断面¹⁰をモデル化し、そのメカニ ズムについて検討する.みぞ形断面は図-8に示すように、 長方形断面と異なり津波作用直後の下向きの力が発生し ていない.長方形断面はこの下向きの力の原因を圧力計 測実験により原因を解明しているが、みぞ形断面では津 波作用直後の下向きの力が発生する原因を解明していな いため、ここではこの原因についても検討する.

(1) 解析概要

全体のモデルおよび模型の設置位置は図-3で示した解 析モデルと同じである.模型設置位置にみぞ形断面は図 -9に示すように,前章で作成した長方形断面のモデルの 下面を開けたモデルを作成した.その他の解析条件は, 前章で示した内容と同じである.

(2) 模型周辺の流況

図-10は津波が作用した直後の模型周辺の流況である. 図より、津波が作用することで、みぞ形断面では桁間に 空気層ができていることがわかる.水のみの計算ではこ の場合、桁間に水が入り込んでしまい、空気層が生じな い場合が多いが、本解析では、空気層を表現できている. また、図-11に模型集周辺の流線を示す.図より、長方 形断面では、模型下面および上面前部からの剥離の様子



(a) みぞ形断面



(b) 長方形断面図-10 津波が模型に着水したときの模型周辺の流況



(a) みぞ形断面



(b) 長方形断面 図-11 津波が模型に着水したときの模型周辺の流況線

がわかる.一方,みぞ形断面では,模型下面および上面 前部からの剥離以外に,桁間に空気による流が生じてい ることがわかる.このことからも,みぞ形断面では桁間 に空気層が表現できているといえる.

(3) 模型下面に生じる圧力

図-12は模型下面に生じる圧力の分布を示したもので



図-12 津波作用後の模型下面に生じる圧力の分布

ある. 横軸は模型前面からの距離, 縦軸は(4)式で求め た圧力係数である. また,みぞ形断面では,下フランジ にも圧力が生じるが,その圧力はほぼ0であったために, ここでは示していない.

図より,長方形断面では前部で負圧が発生している. 図-11(b)で示したように,模型前部からの剥離による影響であると考えられる.この負圧によって,津波作用直後に模型に下向きの力が生じたと考えられる.一方,みぞ形断面では,模型下面にはほとんど圧力は生じていない.図-11(a)より,みぞ形断面でも前部からの剥離が発生しているが,桁間に空気層があり,かつこの空気が圧縮および引っ張りを受けていなかったために,模型下面に圧力がほとんど生じなかったと考えられる.従って,津波作用直後に下向きの力が作用しなかったといえる.

5. 結論

本研究では、差分格子ボルツマン法を用いて、水路実験の再現計算を行いつつ、上部構造に津波が作用したときの作用メカニズムを検討した.本解析の範囲内であるが、得られた知見は以下のとおりである.

- 差分格子ボルツマン法を用いることで、長方形断面 で再現することが困難であった、模型下面の負圧を 再現することが可能である。
- 解析では、津波作用直後の飛び跳ねた水や圧力係数 は水路実験の結果と異なっている.これは粘性が高 いことで実験とレイノルズ数が異なっていることや、 表面張力が強く働いているためであると考えられる. また、格子間隔が粗いことが原因であると考えられる。
- 3) 液相と気相を考慮した二相流解析を行うことで、み ぞ形断面の桁間に生じる空気層を再現できる.
- 4) 長方形断面と異なりみぞ形断面では津波作用直後に 模型下面に負圧が発生しない.これは桁下部の空気 層によるものである.従って、津波作用直後の下向 きの力が作用しなかったと考えられる.

謝辞:本研究の実施にあたっては、科学研究費補助金 (基盤研究(B)(24760370))「津波に対する橋桁の流出 防止システムの設計に関する研究(研究代表者:中尾尚 史)」による補助を得たことを付記する.

参考文献

- 平成 23 年(2011年)東北地方太平洋沖地震 土木施 設災害調査速報,国総研資料第 646 号,土研資料第 4202号,2011.
- 2) 二井伸一,幸左賢二,庄司学,木村吉郎:津波形状 の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検 討,構造工学論文集,Vol.56A, pp. 474-485, 2010.
- 3) 張広鋒,中尾尚史,星隈順一:津波の影響を受ける 橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関す る水路実験,第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計 に関するシンポジウム講演論文集,pp.97-102,2012.
- 4) 有川 太郎, 渡邉 政博, 窪田 幸一郎: 津波による橋梁
 の安定性に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, p.I_911-I_915, 2013.
- 5) 田邊将一,浅井光輝,中尾尚史,伊津野和行:3次元 粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精

度検証,構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.

- 6) 鴫原良典,藤間功司,庄司学:橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.65, No.1(地震工学論文集第 30巻), pp.899-904, 2009.
- 高原道久,渡利實,棚橋隆彦,矢部孝:CFD 最前線 (機械工学最前線),共立出版,2007.
- 高原道久:格子ボルツマン法の基礎と応用、日本機 械学会論文集(B編),77巻784号,pp.149-160, 2011.
- 水谷聡, 蔦原道久: 差分格子ボルツマン法における 数値粘性の影響, 日本機械学会論文集(B編), 72 巻 723 号, pp.72-77, 2005.
- 10) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士:橋梁基本断面に 作用する流体力と流速・波高の関係に関する基礎的 検討,構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.564-575, 2010.

MECHANISM OF TSUNAMI-INDUCED FORCE IN SUPERSTRUCTURE BY DIFFERENCE LATTICE BOLTZMANN METHOD

Hisashi NAKAO, Ryohei MATSUDA, Katsuji AKAMATSU, Mitihisa TSUTAHARA and Kazuyuki IZUNO

This paper focused on the tsunami-induced force generation mechanism at the superstructure. In this study, Difference Lattice Boltzmann Method was employed for the numerical analysis. The results were as follows. The analysis of the two-phase flow with water and air, the tendency of the hydrodynamic pressure distribution and flow regime at the result of the numerical analysis were matched as the flume test. In case of the channel model, the hydrodynamic pressure at the bottom of model was not generated the negative pressure because the air trap was generated in the model. Therefore, the downward tsunami-induced force was not generated.