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・薦原 道久⁴・伊津野 和行⁵

¹正会員 (独)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非会員 神戸大学 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

⁴非会員 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.ritsumeai.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、水と空気の間で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、水理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 : Finite-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、復旧の遅れなどの2次的な被害も発生している。そのため、橋梁への津波対策は、重要な課題となっている。

現在、水理実験^(例えば2)6)により、津波が橋桁に作用するときの作用力発生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⁷⁾や格子法⁸⁾¹⁰⁾などによる水理実験の再現解析が試みられている。

著者らは粒子法による水理実験の再現計算を行っており¹¹⁾、長方形断面のような単純な断面モデルでは、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ことを示した。しかし、津波流れの直角方向である揚力、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ことも示している。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については、直接津波が作用するため、比較的精度良く実験結果を再現できる。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。

差分格子ボルツマン法(FDLBM: Finite-Difference 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であり、機械分野や音響分野などの解析にも使われている¹²⁾¹³⁾。この解析手法は、気液混合モデルによる二相流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、空気と水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、水理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¹⁴⁾¹⁶⁾。

(1) 格子ボルツマン法

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。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。

$$\frac{\partial f_i(t, \mathbf{r})}{\partial t} + c_{ia} \frac{\partial f_i(t, \mathbf{r})}{\partial r_a} = \Omega_i(f) \quad (1)$$

ここで、 f_i は粒子の分布関数、 C_{ia} は粒子速度で、添え字の i は粒子の持つ有限個の速度、 a は直角座標である。 f_i は時間 t と位置 $\mathbf{r}$ の関数である。右辺 Ω 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。一般には衝突項を単純化した方程式が用いられている。

$$\frac{\partial f_i(t, \mathbf{r})}{\partial t} + c_{ia} \frac{\partial f_i(t, \mathbf{r})}{\partial r_a} = -\frac{1}{\tau} (f_i(t, \mathbf{r}) - f_i^0(t, \mathbf{r})) \quad (2)$$

(2)式を離散化BGK方程式と呼ぶ。 f_i^0 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ななどの特徴がある。

(2) 差分格子ボルツマン法

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り、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。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。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_i(t, \mathbf{r})}{\partial t} + c_{ia} \frac{\partial f_i(t, \mathbf{r})}{\partial r_a} - \frac{Ac_{ia}}{\tau} \frac{\partial (f_i - f_i^0)}{\partial r_a} \\ & = -\frac{1}{\tau} [f_i(t, \mathbf{r}) - f_i^0(t, \mathbf{r})] \end{aligned} \quad (3)$$

式中の $\mathbf{r}$ は位置、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. 水理実験の再現解析

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理実験¹¹⁾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

解析対象とする水理実験は、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で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 F_x （流れの向きが正）、鉛直方向の津波外力 F_z （上向きが正）、流力モーメント M_y （時計回りを正）を計測した。 M_y 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。

実験では貯水高を200mmに設定したときの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。

図-1 実験装置

図-2 圧力の計測位置

図-3 解析モデル

なお、模型および圧力計の固有振動数以上の成分をカットするローパスフィルタをかけて波形を処理した。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。

図-4 長方形断面の解析モデル

(2) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。水理実験は2次元であったため、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、橋梁模型は以前水理実験で用いた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）。それ以外の範囲は空気（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流れの状態が概ね一致する様に、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 Δt は0.1にした。

解析は液相と気相の二相流での解析を行った。このとき気体と液体の密度比は800¹⁴⁾、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 PRECISION T7500

(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. 水理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（津波が作用してから0.3秒）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。しかし、解析では上昇した水が、若干後部方向に流れている。水理実験は橋軸直角方向が主な流れの2次元実験であるものの、模型に作用した津

(a) 津波作用直後（津波が作用してから0.3秒）の流況

(b) 津波越波時（津波が作用してから0.6秒）の流況

図-5 模型周辺の流況（左：実験，右：解析）

波は橋軸方向にも流れが生じるため、実際の流れは3次元性をもっている。また水槽から放出された津波も完全に水路方向のみの流れではなく、ある程度、水路幅方向にも流れの成分を持つものと考えられる。一方、今回の解析は完全な2次元解析モデルである。このことが、実験と解析とで剥離性状などに若干の違いが生じた原因の1つと考えられる。津波が模型上を越波したとき（津波が作用してから0.6秒）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理実験の流況を再現できている。

(2) 模型に生じる圧力

図-6は模型下面に生じる圧力の分布を示したものである。水理実験では、上下面のみ圧力を計測しているのので、ここでは上下面における圧力を比較した。図中のナンバーは、図-2で示した実験で計測した圧力の位置である。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。

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

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

(a) 津波作用後の0.3秒の圧力分布

(b) 津波作用後の0.6秒の圧力分布

図-6 模型下面に生じる圧力の分布

津波の伝播速度である。津波の伝播速度は、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、無次元速度を算出した。

図-6(a)は津波作用後0.3秒の模型下面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る。図より、No.02とNo.03で解析値と若干圧力係数に誤差がみられるが、模型前面部の負圧、模型後部の正圧の傾向はよく再現できている。図-6(b)は津波作用後0.6秒の模型下面に生じる圧力の分布である。圧力No.01は水理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、水理実験での圧力係数よりも大きい傾向になっている。図-7にこの時刻の模型周辺の流れのベクトル図を示した。水理実験では、模型は静止物体で考えていたために、解析においても模型は静止している条件とした。しかし、実際の実験模型は片持支持されており、完全に固定することができないため、津波作用時にある程度上下の動きが生じることとなる。実験および解析の双方とも、図に示したように模型前縁からの剥離が発生し、その近傍で負圧が生じているが、水理実験では模型の上下振動により、模型下面で発生する剥離領域が解析に比べて大きくなっている。このことが、実験での圧力が解析値に比べて小さくなった原因と考えられる。

図-8は模型上面に生じる圧力の分布を示したものである。ここでは、模型に作用した津波が模型上面に着水した時刻の圧力分布を示した。縦軸および横軸は先ほどと同様である。図より、実験では模型上面の全範囲に正圧が作用しているのに対し、解析では模型前部に負圧が発生している。模型下面では実験の流れを再現できているが、模型上面では流れの様子をうまく再現できていない。前述したように、水理実験では模型が上下に振動しているため、模型上面では模型前面での剥離領域が小さくな

り、圧力計の位置では負圧が検出されなかったものと考えられる。そのため、流れの影響以外にこのような模型の支持条件にも原因があると考えられる。

以上より、今回の解析では、模型の支持条件や流れの3次元性により、No.02やNo.03の圧力は水理実験の結果と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、著者が過去に実施した解析手法¹¹⁾では再現が困難であった模型下面の負圧を再現することが概ね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¹⁷⁾をモデル化し、みぞ形断面に生じる圧力の発生メカニズムについて検討する。みぞ形断面は図-9に示すように、長方形断面と異なり津波作用直後の大きな下向きの力が発生していない。長方形断面はこの大きな下向きの力の発生メカニズムを圧力計測実験により明らかにしているが、みぞ形断面では津波作用直後の下向きの力の発生メカニズムを明らかにしていないため、ここで検討を行った。

(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-10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。

図-7 模型周辺のベクトル図

図-8 模型上面に生じる圧力の分布 (模型上面に着水時)

図-9 水理実験で計測した鉛直方向に作用する力

図-10 長方形断面とみぞ形断面の解析モデル

図-11 津波が模型に作用した直後の流況および流線 (左: 流況, 右: 流線)

図-12 津波作用後の模型下面に生じる圧力の分布

(2) 模型周辺の流況

図-11は津波が作用した直後の模型周辺の流況および流線である。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ることがわかる。水のみ計算では、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、長方形断面では、模型下面および上面前縁からの剥離の様子がわかる。一方、みぞ形断面では、模型下面および上面前縁からの剥離以外に、桁間に空気による流れが生じていることがわかる。このことから、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ある。横軸は模型前面からの距離、縦軸は(4)式で算出した圧力係数である。

津波作用直後は図-12より、長方形断面では前部(0～10付近)で負圧が発生している。図-11の流線より、模

図-13 津波着水時のみぞ形断面下面に生じる圧力の分布

型前縁から流れが剥離していると考えられ、この剥離による影響であると考えられる。模型前面に発生した負圧によって、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、下フランジ部に圧力が発生しているが、模型下面にはほとんど圧力は生じていない。図-11より、みぞ形断面でも前縁からの剥離が発生しているが、桁間に空気層があり、かつこの空気が模型内を出入りしている。そのために、模型下面に圧力がほとんど生じず、津波作用直後に下向きの力が作用しなかったといえる。

図-13および図-14は、津波着水時の模型下面に生じる圧力分布とそのときの橋梁周辺の流況である。0.85秒では図に示したように、模型下面に水が接していないため(図-14(a))、模型下面に生じる圧力は一定値である。0.87秒になると、盛り上がった水が模型下面後部に衝突することにより(図-14(b))、この部分に衝撃的な正圧が発生する。この時刻で、上向きの津波作用力が最大になると考えられる。その後、下フランジから剥離した流れの流速が増加することにより(図-14(c),(d))、模型下

図-14 津波着水時の流況およびベクトル図

面を流れる水の圧力が低下し、模型下面全体に負圧が発生している。

このように、みぞ形断面では長方形断面と異なり、模型下面に生じる圧力の変動が複雑になることがわかる。

5. 結論

本研究では、差分格子ボルツマン法を用いて、水理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。

- 1) 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。
- 2) 解析の場合、津波作用直後の飛び跳ねた水の流れや、津波が模型に着水しているときの流れが水理実験の結果と異なっている。水理実験では流れの3次元性が生じていることによるものと考えられる。
- 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

- 1) 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，渡邊 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.1_911-1_915，2013.
- 5) 庄司学，平木雄，江面嘉之，飯高稔，藤間功司，嶋原良典：橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）Vol. 68(2012) No. 4，p.1_1134-1_1144，2012.
- 6) 川崎祐磨，伊津野和行，生島直輝，山中拓也，四井早紀：津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70，No.1，pp.129-136，2014.
- 7) 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.
- 8) 監物希美, 丸山久一, 田中泰司: 3次元波動水槽による PCT 桁橋に作用する津波波力の分析, プレストレストコンクリート工学会第 22 回シンポジウム論文集, pp.49-52, 2013.
- 9) 原田隆典, 村上啓介, Indradi Wijatmiko, 坂本佳子, 野中哲也: 津波により桁が流出した床版橋の再現解析, 第 14 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.103-110, 2011.
- 10) 嶋原良典, 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.
- 11) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp.789-798, 2009.
- 12) 葛原道久, 栗田誠, 片岡武: 差分格子ボルツマン法による音波の直接計算, 日本機械学会論文集(B 論), 69 巻 680 号, pp.89-95, 2003.
- 13) 赤松克児, 田村明紀, 片岡武, 葛原道久: 差分格子ボルツマン法による有限振幅音波の伝播計算, 日本機械学会論文集 (B 編), 75 巻 752 号, pp.150-155, 2009.
- 14) 葛原道久, 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.
- 15) 葛原道久: 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.
- 16) 水谷聡, 葛原道久: 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.
- 17) 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.

(2014.11.14 受付, 2015.2.23 修正, 2015.3.10 受理)

MECHANISM OF TSUNAMI-INDUCED FORCE IN SUPERSTRUCTURE BY FINITE-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, Finite-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 corresponded with the flume test. In case of the channel-shaped model, the negative pressure at the bottom of the model immediately the tsunami acting was not generated because of the entrapped air in the model. Therefore, the downward tsunami-induced force was not generated.