

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760370

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Study on design method of washed-away prevention system to tsunami

研究代表者

中尾 尚史(Nakao, Hisashi)

独立行政法人土木研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50514171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、津波による上部構造の流出を防止するシステムを開発することを目的として、水路実験や数値解析により検討を行った。

その結果、津波外力軽減を目的としたサイドプレートを用いた場合、サイドプレートを45°の勾配を付けると、津波外力を軽減させる効果があることがわかった。また、サイドプレートと津波作用側の主桁の間隔をある程度開けることも津波外力軽減に効果があることがわかった。数値解析では差分格子ボルツマン法を用いた水路実験の再現解析を行った。その結果、空気と水(二相流)を考慮することで、再現が困難であった長方形断面底面に発生する負圧(模型前面からの剥離で発生)を再現することができた。

研究成果の概要(英文)：This study discusses the washed-away prevention system of the superstructure through a series of flume test and analysis.

In the flume tests, 1/150-scaled models of the superstructure with four-girders section were employed with/without the vertical, 45 degree and 60 degree side plate. Test results showed that the 45 degree side plate effectively reduced the tsunami-induced horizontal and vertical forces and rotate clockwise moment.

In this study, Finite-Difference Lattice Boltzmann Method was employed for the numerical analysis. The results showed that 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.

研究分野：構造工学，耐震工学，流体工学

キーワード：津波 橋梁 流出防止システム サイドプレート 差分格子ボルツマン法

1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では津波により多くの橋梁が流出する被害を受けた。橋梁の流出はライフラインの寸断となり被害者の救援やその後の地域の人々の生活に支障をもたらす。被災地の復興や復旧に遅れが生じる2次的な被害も受けている。被災地への復興、復旧を迅速に行うためには橋梁が流出しないように対策を行い、橋梁の機能を維持できるようにする必要がある。昨今、海外においても地震・津波による大規模な災害が多発していることもあり、日本だけでなく、沿岸部に位置する国においては重要な課題となっている。

津波によって橋梁が流出しないようにするには、橋梁を強固に固定する方法以外に、津波により橋梁に作用する流体力が小さくなるように橋梁の断面形状を改善したり、橋桁と橋脚をケーブルなどで連結して橋桁の流出を防止する方法がある。そのためには津波により橋梁に作用する3分力（水平方向の流体力、鉛直方向の流体力、流力モーメント（回転力））を同時に考慮する以外に、どのように津波が橋梁に作用して（流体力の作用メカニズム）、何故津波により橋梁が流出したのか、それらを各種橋梁において検討する必要があるが、3分力を同時に検討された研究例は少ない。

これまでに基本的な橋梁断面（長方形断面や台形断面など）や実橋梁を縮尺した断面を用いて、津波が発生したときの橋梁に作用する流体力に関して研究を行っている。橋梁に作用する流体力と津波の高さや津波の進行速度との関係などを把握している。この知見を基にすることで津波により橋梁に作用する流体力を低減するように橋桁を補強改善する装置を検討することができる。

また前述の落橋防止ケーブルに関する研究も行っており、各種の落橋防止ケーブルの仕組みと機能について熟知している。この落橋防止ケーブルを津波による走行方向に直角の力が橋桁に作用しても十分に機能を維持できるように改善すれば、地震による桁落下に加え、津波による桁流出を防止する装置を設計することができる。

2. 研究の目的

本研究では橋梁の流出防止システムを開発するために、以下を明らかにする。

①津波により橋梁に作用する流体力：津波の高さを変えて実験により計測し、津波の高さと流体力の関係を橋梁ごとに分類して明らかにする。②流体力の発生メカニズム：橋梁に作用する流体力や圧力、橋梁周辺の流れの映像から、時刻ごとに分析して、流体力の発生メカニズムを明らかにする。③流体力を低減させる方法：津波が作用したとき、橋梁に作用する流体力が小さくなる断面を実験により明らかにし、さらに流体力を小さくするための補強板を橋梁に取り付ける方法も数

値解析により明らかにする。

・流出防止ケーブルの必要性能：津波により橋桁が移動したとき、ケーブルにより桁流出を防止する装置を検討する。そして、最も有効なケーブルの取り付け方や、必要なケーブルの耐力を数値解析により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) サイドプレートを用いた津波作用力軽減対策

図1のような水路実験装置（右図、全長6m）を用いて津波による3分力（水平方向の津波外力 F_x 、鉛直方向の津波外力 F_z 、流力モーメント M_y ）および津波高と津波の進行速度の測定をした。同時にハイスピードカメラにより橋梁周辺の流れを撮影した。実験で使用する模型は、4主桁断面を用いて実験を行った。

サイドプレートは、垂直、 60° 、 45° 、それぞれ高さを5mm（模型高の1/4）と10mm（模型高の1/2）にしたものを製作した。また、主桁から、5mm、10mm、15mm離れた位置に設置し、津波外力の軽減効果を検討した。

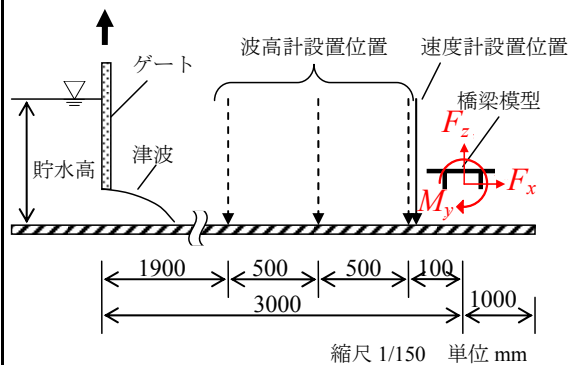


図1 実験水路

(2) 津波により上部構造に作用する力の評価

(1)で使用した実験装置および4主桁断面模型を用いて、上部構造の桁下高や初期水深、津波高を変更させて上部構造に作用する力を計測した。そして、これらのパラメータと津波外力との関係について検討した。

(3) 差分格子ボルツマン法による水路実験の再現解析

現在、粒子法や格子法などによる水路実験の再現解析が試みられている。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。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、水理実験の再現計算を行うために、差分格子ボルツマン法を用いた検討を行った。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。解析は二相流 (液相, 気相) で行い、は全て無次元量で解析を行った。

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。

4. 研究成果

(1) サイドプレートを用いた津波作用力軽減対策

本実験の範囲内ではあるが、図 2 に示すように、サイドプレートを用いなかった場合に比べて、サイドプレートを用いたものが、水平方向の津波作用力や鉛直上向きの津波作用力、時計回りの流力モーメントを小さくすることができた。また、サイドプレートの高さを 10mm (模型高の 1/2) すると、一部を除き、津波による流体力を軽減する効果があることがわかった。さらに、サイドプレートの位置を主桁から離す方が流体力軽減に効果があることがわかった。しかし、垂直のサイドプレートの場合、水平方向の流体力が増加する傾向にあることもわかった。

今後はこの結果を基に、数値流体解析による分析および津波に最適なサイドプレートの形状を検討する予定である。

(2) 津波により上部構造に作用する力の評価

桁下を変化させた場合の津波外力の作用メカニズムを検討するために、初期水深を 0mm, 20mm, 40mm にし、桁下を 10mm~60mm に変化させた場合の橋桁に作用する津波外力を計測した。その結果、桁下高を大きくすると、津波外力は小さくなることがわかり、初期水深が小さくなると、津波外力は大きくなることもわかった。また、初期水深が高く、発生させた津波が小さいときは、外力は増加減少を繰り返すこともわかった。

この結果より、今後は津波外力の評価方法を検討する予定である。

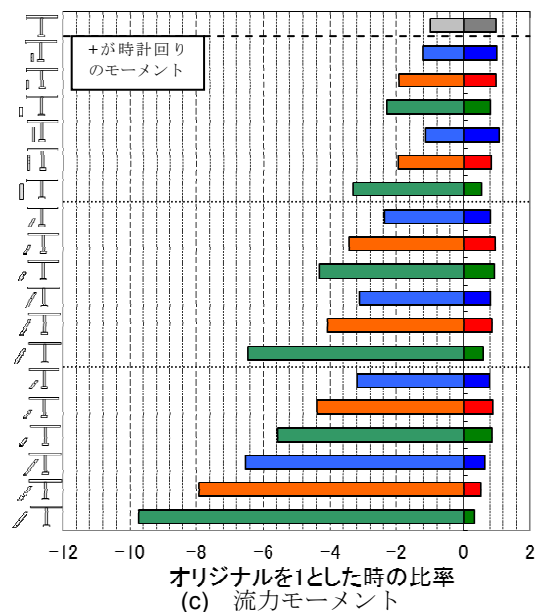
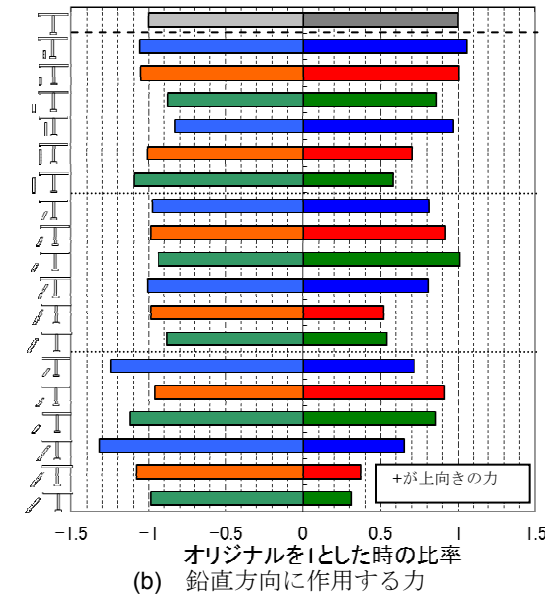
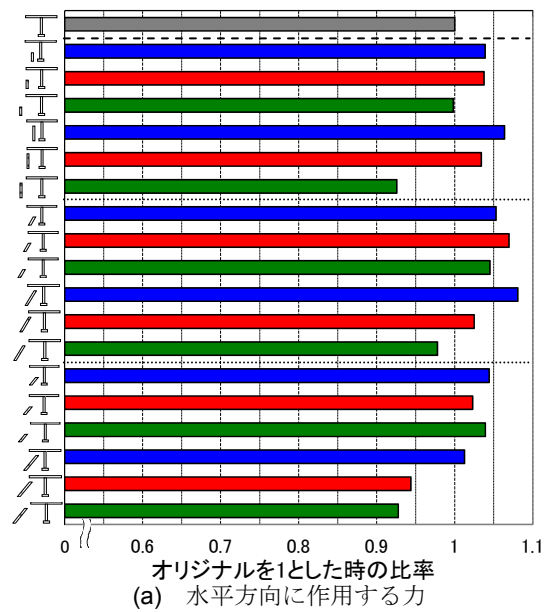


図 2 サイドプレート設置による津波外力の比 (図中上から: オリジナル断面, 垂直サイドプレート, サイドプレート 60°, サイドプレート 45°)

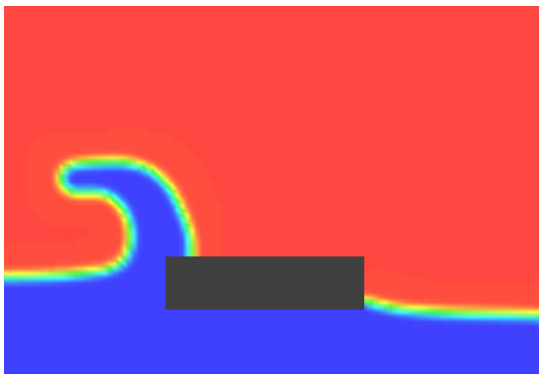
(3) 差分格子ボルツマン法による水路実験の再現解析

① 模型周辺の流れの様子 (流況)

図3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、実際の流れは 3 次元性をもっている。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。



(a) 実験で得られた流況



(b) 解析で得られた流況

図3 模型周辺の流況
(津波が作用してから 0.3 秒)

② 橋梁に生じる圧力の分布

図4は模型下面に生じる圧力の分布を示したものである。ここでは模型下面に生じる圧力を比較した。図中のナンバーは、別途実施した水路実験で計測した圧力の位置である。比較するにあたって、得られた圧力を水の密度と津波速度の 2 乗の積で割ることで無次元にした値 (圧力係数 C_p) で表した。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結果が得られた。

以上のことから、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。しかし、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ため、今後は 3 次元性を考慮した解析を行う必要がある。また、大規模解析に対応できるように、OpenMP を用いた並列解析も行う必要があると考えられる。

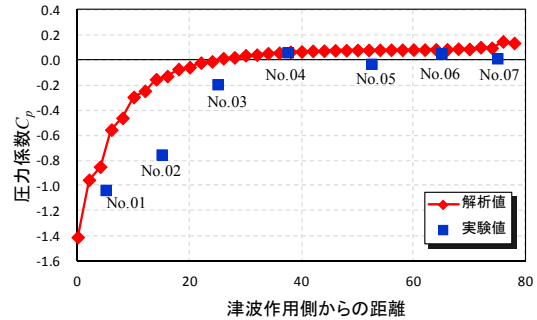


図4 模型下面に生じる圧力の分布
(津波が作用してから 0.3 秒)

参考文献

- ① 中尾尚史, 糸永航, 野坂克義, 伊津野和行, 小林紘士: 矩形断面桁に作用する津波の圧力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68/4, I_1145-I_1150, 2012.
- ② 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.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 中尾尚史, 松田良平, 赤松克児, 葛原道久, 伊津野和行: 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, 第 34 回地震工学論文集, 2015. (査読有, 掲載決定)
- ② 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈 順一: フェアリングを設置した橋梁上部構造の津波の作用による挙動メカニズム, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. 110-120, 2014. (査読有)
- ③ 中尾尚史, 糸永航, 野坂克義, 伊津野和行, 小林紘士: 4 主桁橋に作用する津波外力の発生メカニズムの解明と津波外力低減対策に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 3, pp. 572-585, 2013. (査読有)
- ④ 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一: 上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol369, No.4 (地震工学論文集第 32 巻), I_42- I_54, 2013. (査読有)

〔学会発表〕（計 5 件）

- ①中尾尚史, 松田良平, 赤松克児, 葛原道久, 伊津野和行：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, 土木学会第 34 回地震工学研究発表会, 2014 年 10 月 9 日, まちなかキャンパス長岡（新潟県長岡市）
- ②中尾尚史, 炭村透, 星隈順一：橋に影響を与える津波の作用状態とその評価方法, 平成 26 年度土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.1037-1038, 2014 年 9 月 6 日, 大阪大学（大阪府豊中市）
- ③中尾尚史, 炭村透, 星隈順一：水路実験結果に基づく橋桁に作用する津波の状態と橋の挙動, 第 17 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.119-126, 2014 年 7 月 1 日, 土木会館（東京都新宿区）
- ④中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一：津波速度の違いが上部構造の挙動に与える影響に関する実験的研究, 第 16 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.421-428, 2013 年 7 月 17 日, 土木会館（東京都新宿区）
- ⑤中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一：上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響, 第 32 回地震工学研究発表会講演論文集, Paper No.246, 11pages (CD-ROM), 2012 年 10 月 27 日, 東京大学生産技術研究所（東京都目黒区）