

I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討

Numerical Simulation Study of Tsunami Wave Force for I-girder bridge

坂本佳子*, 原田隆典**, 野中哲也***, 吉野廣一*, 鳥越卓志*

Yoshiko Sakamoto, Takanori Harada, Tetsuya Nonaka, Hiroichi Yoshino, Takashi Torigoe

*(株)地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎市大淀 3-5-18 南宮崎駅前ビル E 棟 3 階)

**工博, 宮崎大学教授, 工学部土木環境工学科 (〒889-2155 宮崎市学園木花台西 1-1)

***博 (工), (株)地震工学研究開発センター代表取締役

(〒880-0902 宮崎市大淀 3-5-18 南宮崎駅前ビル E 棟 3 階)

This paper examines the tsunami wave forces acting on the I-girder bridges using the two numerical simulation methods, because many I-girder bridges were washed away by the tsunami flow generated by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake. In this paper the effects of the forces due to the air confined between the I-girder and tsunami flow surface investigate using the one-phase flow analysis taken into account for the water only as well as the two-phase flow analysis considering the water and the air effects. It is found that the effects of the forces by the confined air on the I-girder bridges are significant.

Key Words: Two-phase flow analysis, tsunami forces, confined air effect, I-girder bridge

キーワード: 2相流解析, 津波波力, 空気の影響, I桁橋

1. はじめに

2011年3月11日にマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し, この地震に伴った津波により, 道路, ライフライン, 構造物などが被災した. 橋梁に対しては, I桁橋等の桁が流失するといった被害が多数見受けられた. 2004年に発生したスマトラ沖地震の津波によって橋梁に被害を受けたことから, 津波による橋梁への影響についての研究が精力的に行われるようになってきた^例 (例えば^{1)~6)}. 今回の東日本大震災により, さらに研究が進み, 橋梁の上部構造の流失メカニズム等が解明されつつある. これまで, 津波による橋梁の応答特性について実験を中心とした研究が盛んにされてきたが, 解析的検討も始まり, 今後さらに解析手法の精度向上が求められる. 著者らも3次元の流体解析ソフトを用いて再現解析を試みた^{7,8)}. しかし, 著者らが実施した解析の対象橋梁は, 小規模な床版橋であり, 多くの被災した道路橋の形状であるI桁橋ではなかった.

そこで, 本研究では, 一般的なI桁橋を対象にして, 津波波力が作用した場合の解析的検討を進めることにした. I桁橋の桁断面の形状から桁内に空気塊が発生すると予想されるが, これを直接表現したいため, 今回は水と空気の2相流解析も実施することにした. 具体的

は, この2相流解析ソフトと, 著者らがこれまで床版橋(空気塊ができない桁橋)を対象にして使用してきた1相流解析ソフトの2つの異なる解析ソフトを用いて, 津波の高さや波の形状を変化させた比較解析を行い, I桁周りにおける津波の作用力特性について検討した.

2. 解析条件

2.1 解析ソフト

本研究の2相流の条件としては, 水と空気の非混和流体の非圧縮性とする. 1相流解析ソフトとして前回と同じCADMAS-SURF/3D⁹⁾を, 2相流解析ソフトとしてOpenFOAM¹⁰⁾を用いることにした. このOpenFOAMには津波の造波機能がないため, 著者らがその機能を追加して解析を実施した.

基礎方程式は両ソフトとも同じであるが, 数値解析手法として, CADMAS-SURF/3Dでは差分法を, OpenFOAMでは有限体積法を採用している. 自由表面解析モデルとしては, 両ソフトともVOF法である. なお, CADMAS-SURF/3Dにおいては, 「空気圧計算モデル(PV=const)」として, 近似的に空気の領域を評価する方法が提示されているが, 本研究ではそのモデルは使用していない.

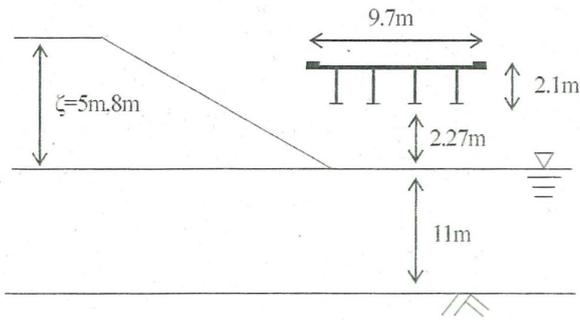


図-1 解析条件

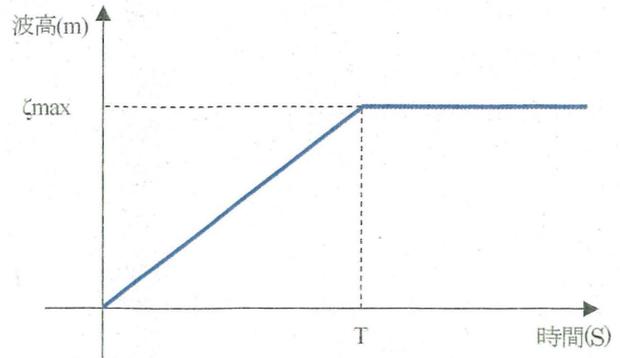


図-2 造波波形の定義

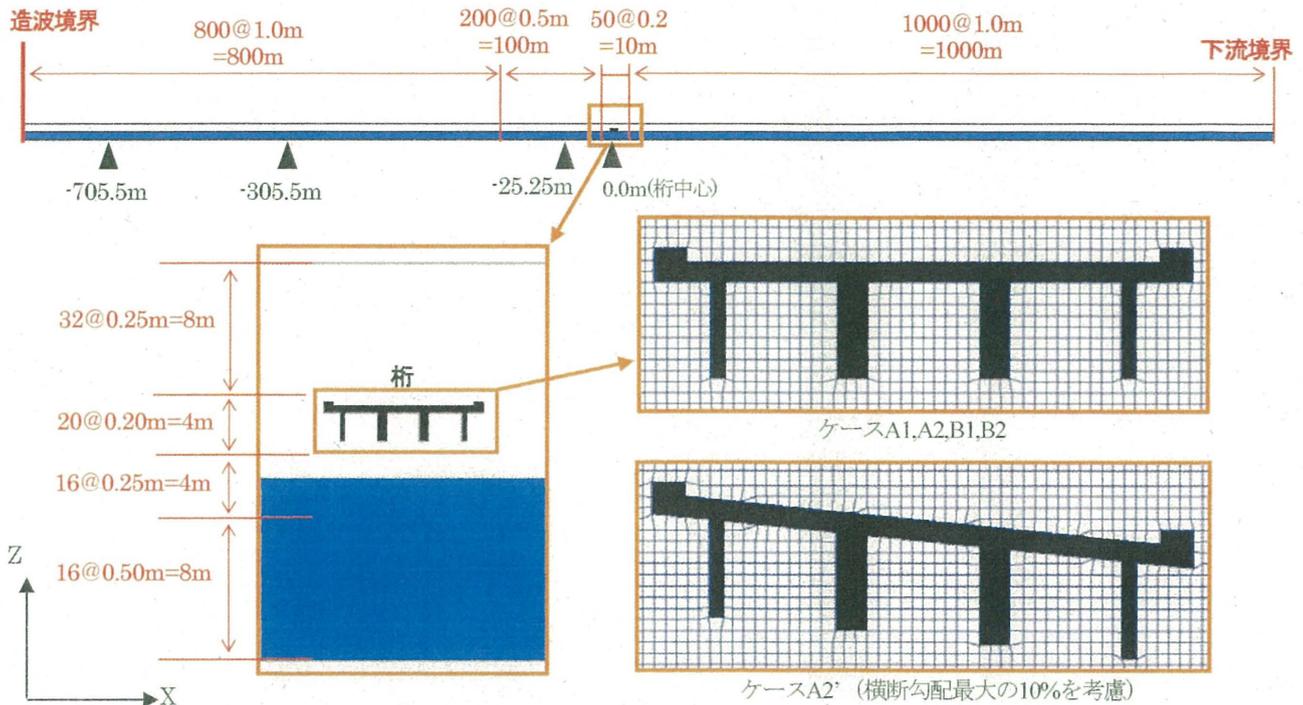


図-3 解析モデル

表-1 検討ケース

ケース名	ζ_{\max}	造波立上がり時間T
A1	5m	30s
A2		150s
B1	8m	30s
B2		150s

2.2 津波解析の条件

検討対象橋梁は、RC床版の単純I桁橋（橋長：34m）である。対象橋梁の桁だけをモデル化して、2種類の解析ソフトで解析を実施する。図-1に示すように、初期水位がある状態で、桁に段波状の津波を作用させる。初期水位については、後述する段波の波高を考慮して11mとし、一般的な河川を考えると深くなっている。また桁下空間が狭くなっているので、津波によりある程度浸水して水位が高くなった状況で、さらに津波が襲来したと考えてよい。

解析条件としては、津波高さや波の形状を変化させ、同じ条件で2種類の解析ソフトによる比較解析を行う。波の形状については、図-2に示すような段波とし、立ち上がり時間Tを2種類設定して、切り立った急な波と徐々に水位が上昇する波の2種類とした。なお、このような津波解析においては、河床の勾配を考慮する必要があるが、本研究では、波の特性と桁周りの挙動に着目したため、あえて地形形状の影響をなくし水平地形とした。

2.3 検討ケース

本研究では、表-1に示すように、波高と波の形を変えた4ケースを検討ケースとする。なお、設定した段波の流速については、波高と初期水位から決まる値となる。また、ケースA2の解析条件については、設計最大の横断勾配10%（床版中心軸回りに約5.7°回転させ、床版中心軸の高さは変えていない）を考慮した上部工形状のモデルによる解析ケースA2'を追加する。これについては、形状を正確に表現することができる有限体積法を用いたOpenFOAMのみで行う。

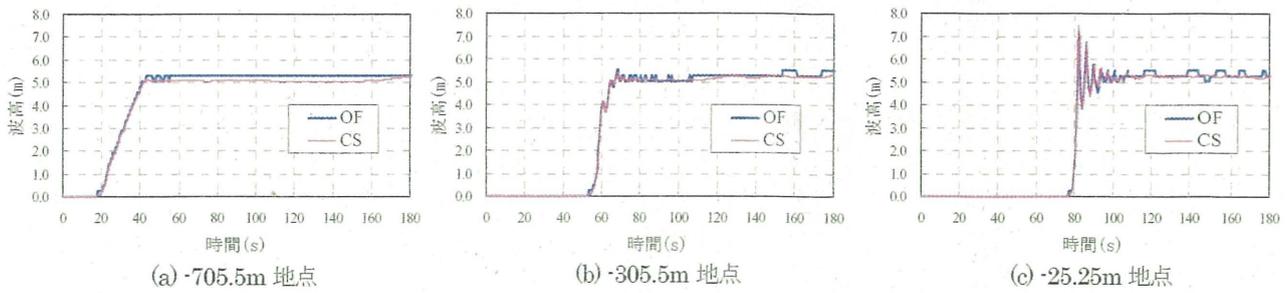
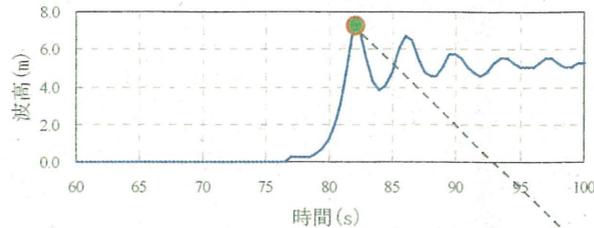


図-4 波高比較 (ケースA1)



(a) -25.25m 地点波高グラフ(OF)



(b) 82秒 -25.25m 地点付近のスナップショット(OF)

図-5 ソリトン分裂の現象 (ケースA1)

3. 解析モデル

本解析では、使用するソフトは3次元解析ソフトであるが、橋脚を含まない桁周りの挙動に着目するため、2次元解析モデルとした。解析空間のモデルを図-3に示す(図内の桁周りのメッシュ分割図はOpenFOAMの例であり、CADMAS-SURF/3Dもほぼ同様である)。1桁に対しても、同図に示すようにできるだけ簡略化する。桁のフランジとウェブを正確にモデル化すると、メッシュ数が膨大となるため、桁に対して下フランジ幅を板厚とした板構造とした。なお、モデル上の外桁の厚さが薄いのは、張出し部の床版下面の波力を正確に評価するため、外桁の板厚をフランジ幅の半分の板厚とした。

桁に作用させる波を安定させるため、造波境界と桁の間の距離を長くした。また、桁を通り過ぎた波の下流境界からの反射の影響を防ぐために下流側の境界の位置も桁から十分に遠くに設定した。

メッシュ分割については、桁回りの挙動が十分に表現できるように細かくメッシュ分割し、それ以外は1mメッシュサイズとした。このようにメッシュ分割した解析空間で、総メッシュ数は、約17万メッシュとなった。なお、後述するソリトン分裂が発生する箇所のメッシュサイズは、文献(11)を参考にして0.5m(または1m)とし、ソリトン分裂が表現できる分割(1波長を20分割以上)となっている。

4. 津波解析結果および考察

OpenFOAM(以下、「OF」という)とCADMAS-SURF/3D(以下、「CS」という)の解析結果を次に示す。

4.1 ケースA1

造波境界から桁までの各位置(図-3内の▲位置)における波高の時刻歴をOFとCSの結果を重ねて図-4に示す。この図から、OFとCSの結果がよい精度で一致しているのがわかる。造波境界においては、前述した図-2のような形をした段波($T=30s$)であるが、流速を図-2の波高になるようにある一定の比率で上げていくことになり、最初の波が遅いため後の波が追いつき、徐々に切り立った形の波(図-4(b))となる。桁に近づくにつれて、波先端部が短周期の複数の波に分裂し、波高が増加し、桁に当たる直前(桁中心位置から25.25m手前の位置)では、5m高さの津波が最大7.5m(同図(c))になっている。この現象は、浅瀬がつづく海岸や河川を津波が遡上する場合に起こるソリトン分裂である。橋梁の25.25m手前の位置で、最大波高を示した時点のスナップショットを図-5に示す。ここでは、OFの結果を示すが、CSでも同様の波高変化を示した。この図からも、ソリトン分裂が起きていることが確認できる。また、このソリトン分裂が起きたため、波高が増大し波の形状も変わり、橋梁に対して大きな影響を与えることになる。特に、

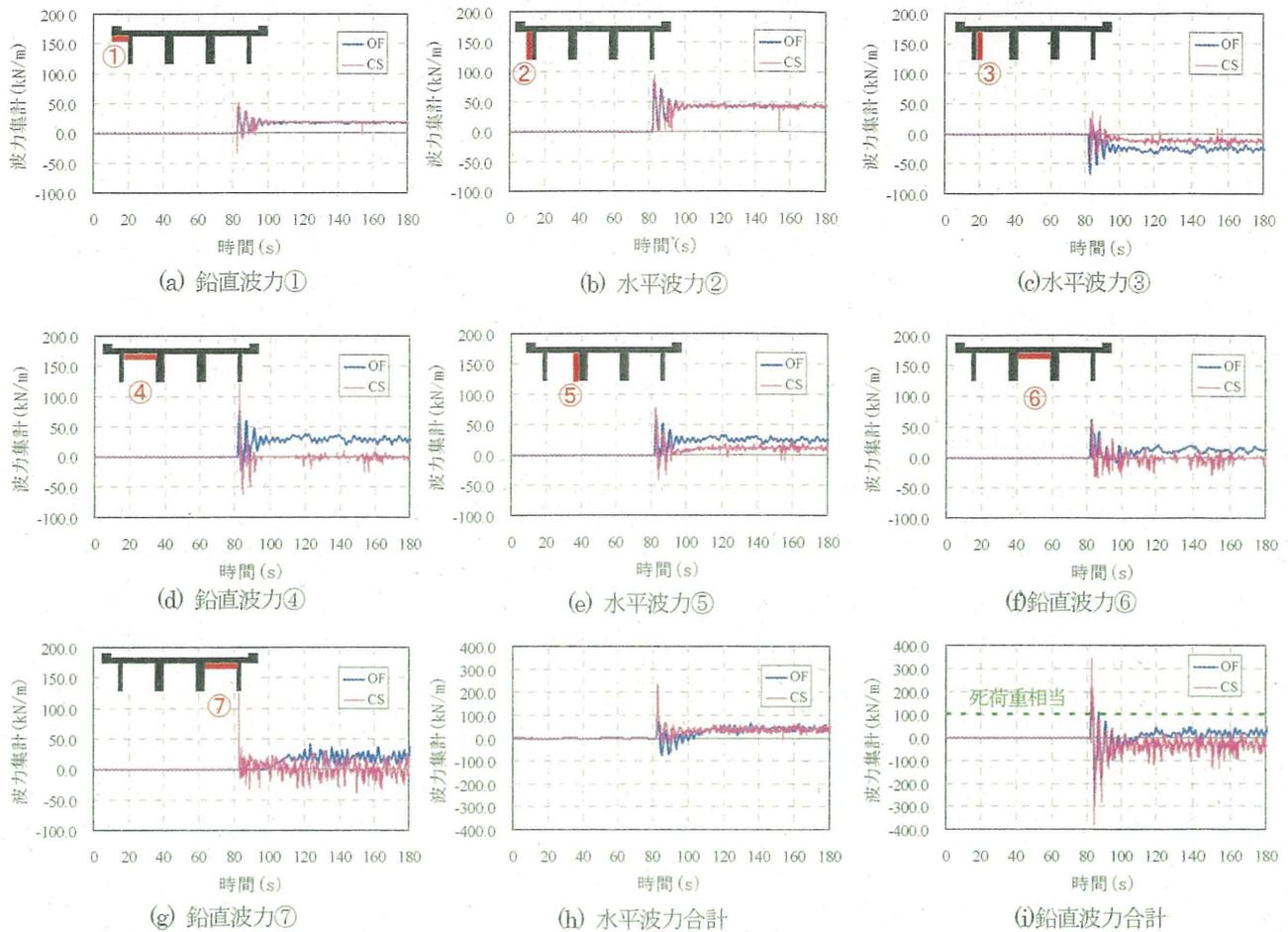


図-6 波力比較 (ケースAI)

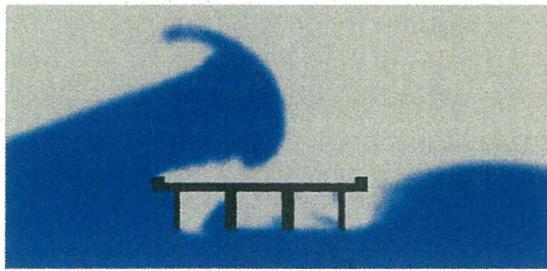
波の形状がやや切り立った形に変わったことによる影響が大きいと思われる。

このような波を作用させた場合に桁周りに発生する波力の時刻歴を図-6(a)~(i)に示す。なお、グラフの縦軸の波力は、各領域全体において積分した値となっている。急な波が桁に当たるこのケース AI では、水平波力の合計 (同図(h))、鉛直波力合計 (同図(i)) において、波が衝突した瞬間に衝撃的な大きな波力が生じている。衝突した瞬間以外の波力値を比較すると、水平波力合計と鉛直波力合計の差は大きくない。

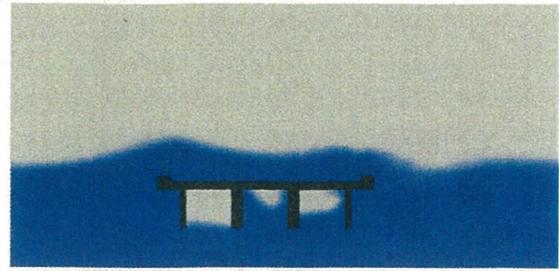
また、直接波が当たる領域①および② (同図(a)(b)) においては、CS と OF の解析結果はよく一致している。これに対して、床版下面と外桁で囲まれた領域③~⑦ (同図(c)~(g)) については、空気塊の影響により、CS と OF で差が生じている。CS は1相流として解析しているため、水が桁に当たらない限り波力は発生しない。一方 OF では、2相流として解析しているため、空気を通して床版下面④に圧力が発生する。④においては、OF と CS がほぼ同じ時刻 83.5 秒で最大波力を示すが、そのときのスナップショット、および波が桁の上をある程度通過した状態 (100 秒後) のときのスナップショットをそれぞれ図-7に示す。これらの図から、OF では桁内の空間に空気塊が存在するが、CS ではほとんどない状

態であることがわかる。OF ではある程度桁が水に浸かった 100 秒後の状態 (図-7(b)) でも、桁内には空気塊が存在している。④において前述したように CS である程度の波力を示すのは、図-7(c)(d)からわかるように桁内ほぼ全体に水が入っているからである。桁内 (空気塊部分) 以外の桁周囲の挙動については、最大水平波力を示す 83.5 秒後、およびある程度水が桁を越流する 100 秒後で、概ね両者は一致している。特に非線形性の強い最大水平波力時では、波の形もよく一致している。

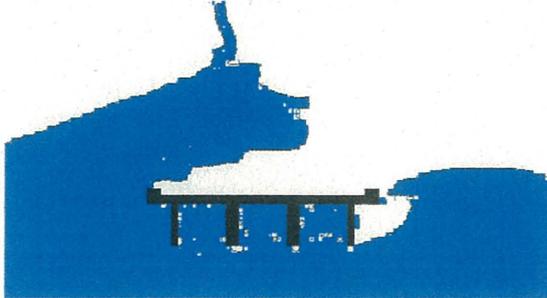
解析結果において水と空気の挙動に差が生じるため、鉛直方向の波力を合計した図-6(i)においても差が出てくる。ただし、桁周囲全体を合計しているため、その差は小さく見える。参考までに、桁重量 (橋長 34m で 3400kN) に相当する波力 (桁を浮かせる揚力) 値も図内に示している。最初に波が桁に当たった瞬間に、その波力以上になり桁を浮上らせることが想像できる。また、桁の形状 (桁内の空間も含めた体積) から静水時と仮定した場合の浮力を計算すると、約 170kN/m となるが、最初に波が衝突した瞬間は鉛直波力合計が静水時の浮力よりも大きくなっている。ただし、その後は、鉛直波力合計がこれよりも小さい状態が続くことになる。これは、床版上面に水がかぶるようになって下向きに押し付ける力が発生し、桁内にも多少水が浸水するため、静水時



(a) OF : 84 秒



(b) OF : 100 秒



(c) CS : 84 秒



(d) CS : 100 秒

図-7 スナップショット (ケースA1)

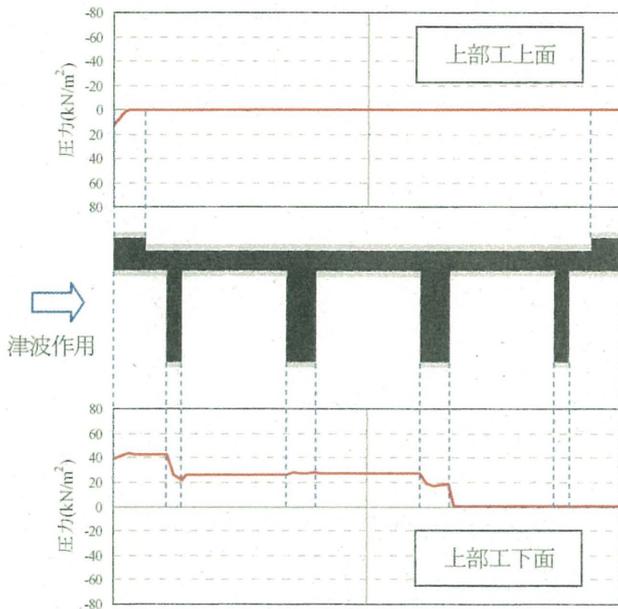
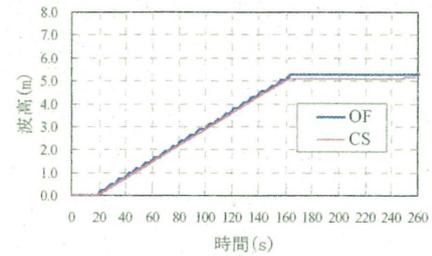


図-8 鉛直方向圧力分布図 : 83.5秒 (ケースA1,OF)

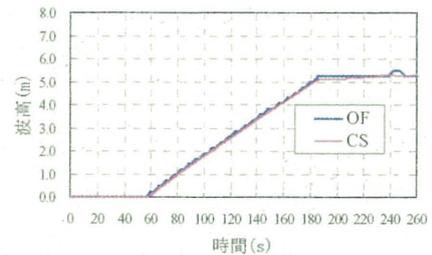
の浮力より小さくなったと思われる。

一方、水平方向の波力合計 (図-6(h)) の力 (抗力) については、水が桁に当たってから 110 秒くらいまでの間で差が発生し、OF の波力が振動するという特長を示す。これは、同図(c)(e)において、OF の波力が振動していることが原因である。スナップショット図-7(a)から桁内③④⑤空間に 1/3 程度の水が入り、これが激しく移動することにより、③⑤の波力が振動したと思われる。同じ床版下面でも⑥⑦の領域 (図-6(f)(g)) になると、OF の方もさらに水が入るようになり、水の比率が大きくなった分、④の領域 (図-6(d)) と比較して CS と OF の差が縮まったといえる。

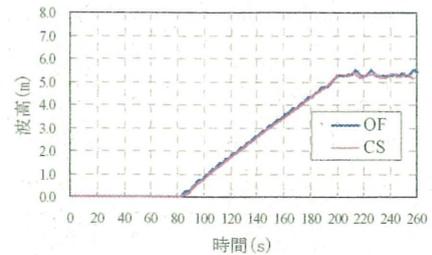
前述の OF の鉛直波力合計の時刻歴において、83.5 秒



(a) -705.5m 地点



(b) -305.5m 地点



(c) -25.25m 地点

図-9 波高比較 (ケースA2)

で浮上らせる最大の波力が発生した。そのときの床版上下面の幅員方向の波圧分布を示すと、図-8 のようになる。この図から、床版上面で波圧がほぼゼロとなり、床版下面 (下フランジも含む) においては、波が最初に当たる床版張り出し部の波圧が大きくなっていることが

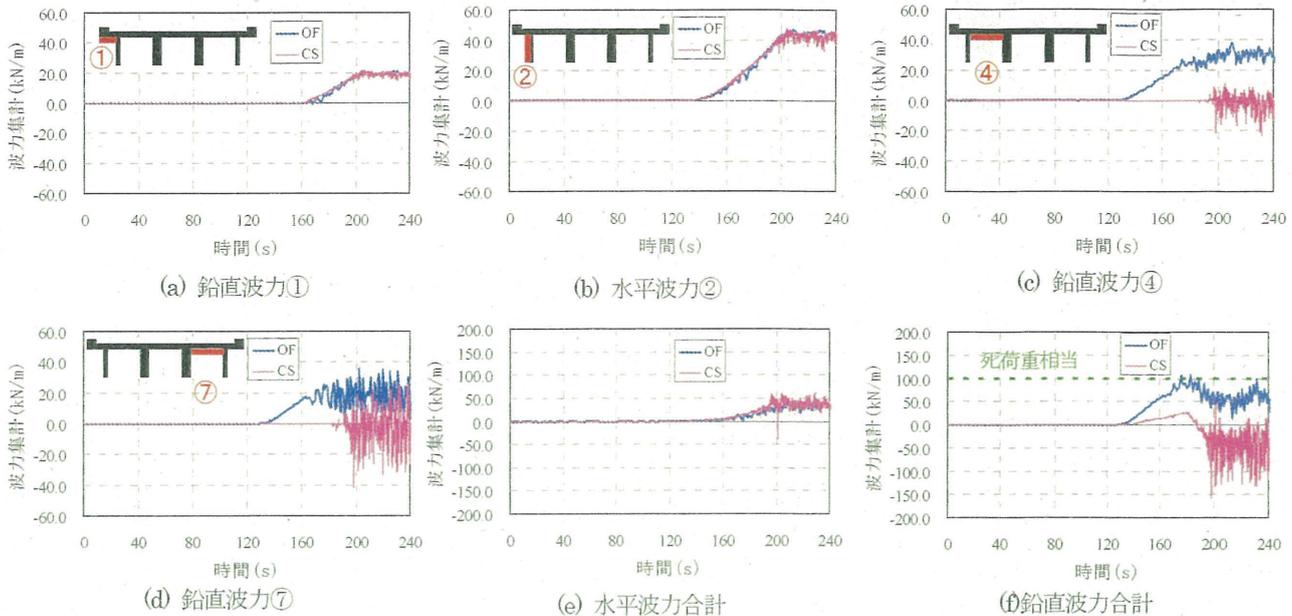


図-10 波力比較 (ケースA2)

わかる。このような波圧分布で波圧値が大きくなると、時計回りに桁が回転し浮上がることが予想される。

4.2 ケースA2

造波境界から桁までの代表的な位置における波高の時刻歴を図-9に示す。本ケースにおいても、OFとCSの結果がよい精度で一致している。造波境界では、前述した図-2のような形をした段波であるが、流速を図-2の波高になるようにある一定の比率で上げていくため、ケースA1と同様に最初の波が遅く後の波が追いつき、徐々に時間軸方向に圧縮された波(図-9の(a)→(b)→(c))となる。しかし、ケースA1と異なり、桁に近づいてもソリトン分裂がほとんど起こらず、同じ形を保ちながら設定した波高に達す時間150秒が約120秒と多少縮まり(図-9(c))、高さはわずかに増加して約5.5mとなった。本ケースにおける波は、徐々に水位が上昇するような波形となる。東日本大震災における東北地方の河川近辺の津波襲来においては、多くのビデオ映像から、このような波形に近いものも多くあったと思われる。

このような波を作用させた場合に桁周りに発生する波力の時刻歴を図-10(a)~(f)に示す。

緩やかな波が桁に当たるこのケースA2では、水平波力の合計(同図(e))、鉛直波力合計(同図(f))において、前述のケースA1とは異なり波が衝突した瞬間の衝撃的な大きな波力が生じていない。また、OFについて比較すると鉛直波力合計の方が水平波力合計より大きい結果となっている。

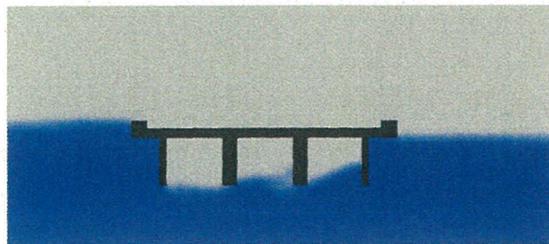
直接波が当たる領域①および②においては、同図(a),(b)から、ケースA1と異なり、大きく振動せず徐々に波力が増加する傾向を示している。また、両者の結果はほぼ一致していることもわかる。

床版下面④(同図(c))においては、OFとCSで大きく異なっている。前述の図-6(d)のCSの結果と異なり、CSの波力が約190秒まではゼロになっている。これは、水が床版下面④に達していないからである。床版下面⑦(同図(d))についても同様である。

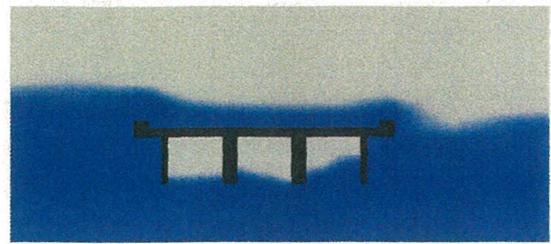
④においてCSの波力がゼロの180秒と波力が発生し大きく振動する240秒のときのCSとOFのスナップショットを図-11に示す。この図からわかるように、OFでは常に桁内に空気の塊が存在する。前述のソリトン分裂が起きた波形の結果(図-7(a)(b))と比較して、その空気領域は大きくなっている。一方、CSにおいては、180秒では多少空気が存在するが、240秒では桁内はすべて水で満たされた。前述の図-10(c)(d)の床版下面④⑦でCSの波力が最初でゼロになったのは、図-11(c)に示したように桁内の床版下面部で空気(水が当たらない部分)が多少存在し、それにより波力が発生しなかったからである。

解析結果において水と空気の挙動に差が生じるため、鉛直方向の波力を合計した図-10(f)においても差が出てくる。OFが常に正の波力(浮上る方向の力で大きさが死荷重に近い力)が発生するが、CSでは初めに多少の正の波力が発生した後、負の波力になって、傾向が大きく異なる。前述のケースA1の鉛直方向合計(図-6(i))と比較しても、傾向は大きく異なっている。またケースA2の鉛直波力合計についてもケースA1と同様に静水時浮力約170kN/mより小さくなっているが、これもケースA1と同様に、床版上面に水がかぶるようになって下向きに押し付ける力が発生することと、桁内にも多少水が浸水することが、静水時の浮力より小さくしていると思われる。

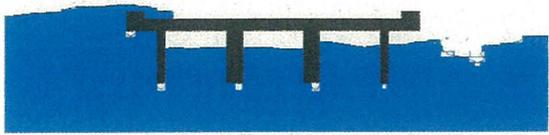
一方、水平方向の波力合計(図-10(e))については、



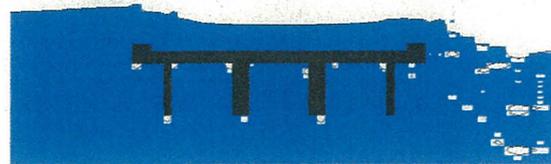
(a) OF : 180 秒



(b) OF : 240 秒



(c) CS : 180 秒



(d) CS : 240 秒

図-11 スナップショット (ケースA2)

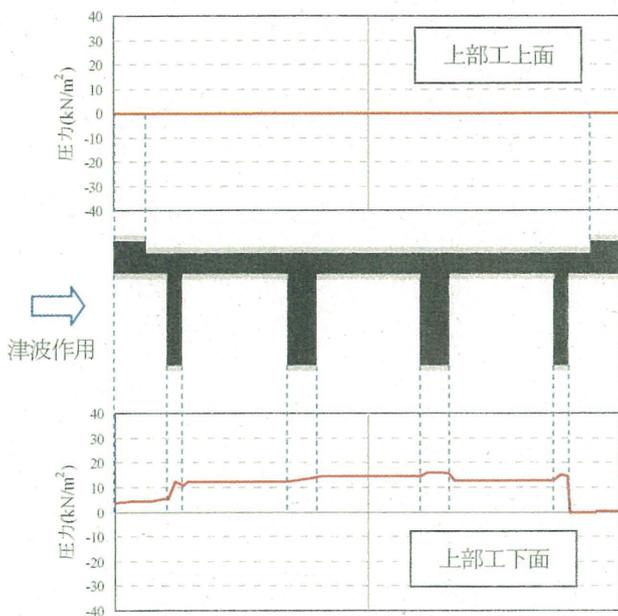


図-12 鉛直方向圧力分布図 : 176.5秒 (ケースA2)

両者の結果はほぼ一致した。

OF の鉛直方向の波力において、最大波力を示した時刻 176.5 秒のときの床版上下面の波圧分布を、図-12 に示す。この図から、床版上面の波圧がゼロ、床版下面が幅員方向に対してほぼ一定の値を示していることがわかる。このような波圧分布では、桁が回転せず、そのまま上方へ浮くような挙動を示す。ただし、水平方向の波力も発生しているので、真上には浮かない。前述のケース A1 で桁が回転しながら流れるのに対して、本ケースでは回転せず並行移動しながら桁が流れると予想される。以上の OF の結果から、桁が浮上ることになるが、徐々に水位が上昇する本ケースにおいては桁内の空気塊ができない (空気を逃がす) 構造にすることができれば、CS の結果に近づくことになり、桁が浮上らない対策のひとつになると思われる。

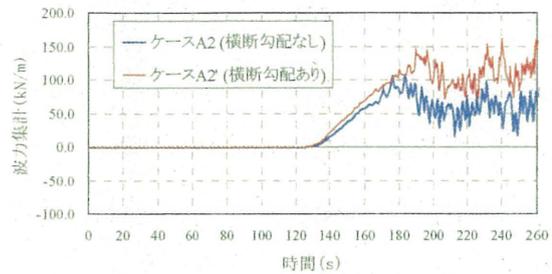
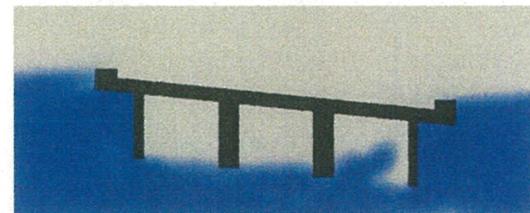
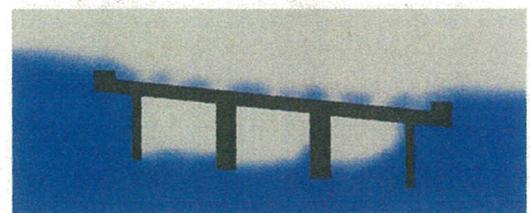


図-13 ケースA2とケースA2' 鉛直波力合計比較 (OF)



(a) OF : 190 秒



(b) OF : 240 秒

図-14 スナップショット (ケースA2' .OF)

4.3 ケースA2'

前述のケース A2 では、常に桁内に空気の塊が存在し続けたため、本ケースでは上部工の横断勾配の影響により、空気塊の挙動がどのように変化するかを OF の解析により検討した。ケース A2 とケース A2' の鉛直波力合計の比較を図-13 に示す。同図よりケース A2' の方が大きくなっている。上部工に波がかかる前の、A2' についての鉛直波力極大時刻 190 秒と水が上部工の上にある程流れた状態 (240 秒後) におけるスナップショットを図-14 に示す。同図(a)より勢いよく桁下面で水が跳ね上が

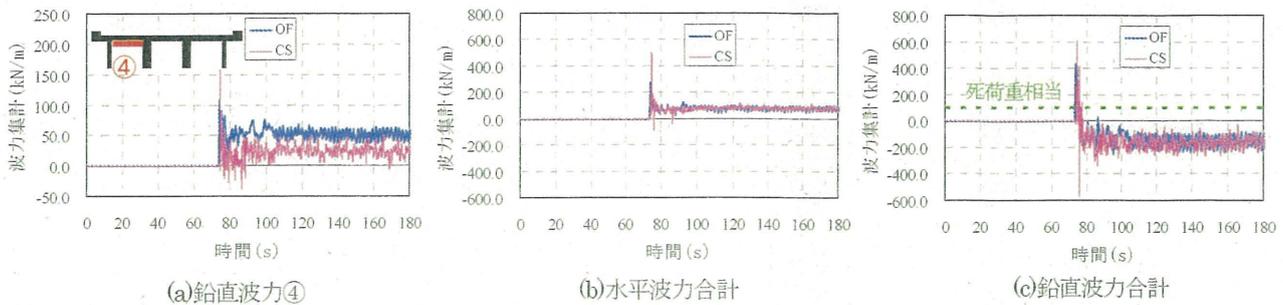


図-15 波力比較 (ケースB1)

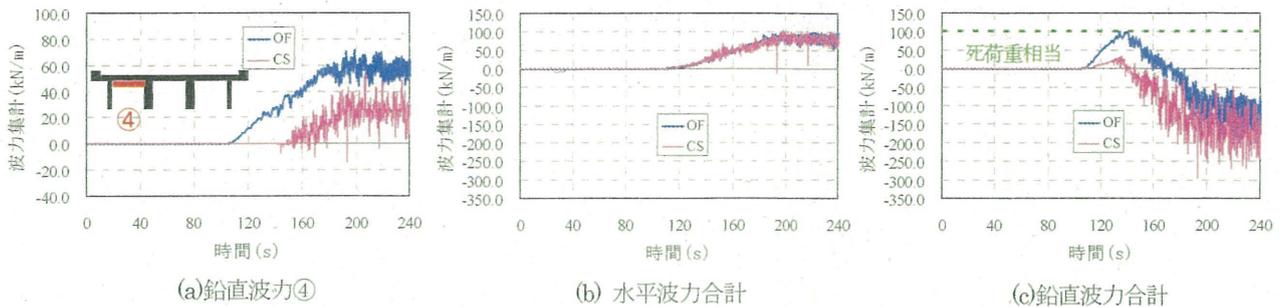


図-16 波力比較 (ケースB2)

っている様子がみられ、このような桁形状の違いによる桁下面の流速ベクトルの変化の影響で A2'の方が波力が大きくなったと思われる。200 秒以降については、図-14(b)に示すように津波上流側に向かって上がっている横断勾配の影響で床版上面の水が流れ難くなり、下向きの圧力を生じさせる水が A2'の方が少ないことも上向きの鉛直波力合計を大きくしている理由と思われる。また、空気塊は A2'でも存在し続け、桁内に進入する水の量の大きな変化は確認できなかった。

4.4 ケースB1

本ケースは、前述の急な波のケース A1 に対して波高を 5m から 8m へ変更した場合の解析結果である。このような波を作用させた場合に桁周りに発生する波力の時刻歴を図-15(a)~(c)に示す。床版下面④ (同図(a))については、前述のケースと同様に空気塊の影響により、CS と OF で差が生じている。OF では桁が水に浸かった状態でも、桁内には空気塊が存在しているが、CS では桁内に水が満たされその水の存在により、ある程度の波力を示す。

このように水と空気塊の挙動に差が生じ、鉛直方向の波力を合計した図-15(c)においても差が出てくるが、桁周囲全体を合計しているため、その差は小さくなった。また、前述した作用波高が低いケース A1 と比較して、最初の瞬間的な最大波力は大きくなり、CS においても死荷重の約 4 倍もの力が発生している。

一方、水平方向の波力合計 (図-15(b)) については、OF と CS はよく一致している。また、前述のケース A1 と比較して作用させる波高が高くなった分、波力も増大した。

4.5 ケースB2

本ケースは、前述の緩やかな波のケース A2 に対して波高を 5m から 8m へ変更した場合の解析結果である。このような波を作用させた場合に桁周りに発生する波力の時刻歴を図-16(a)~(c)に示す。床版下面④ (同図(a))については、前述のケースと同様に空気塊の影響により、CS と OF で差が生じ、ケース B1 よりその差は拡大した。

鉛直方向の波力を合計した図-16(c)においても差が明確になり、ケース B1 より、さらに差が拡大した。前述の図-10(f)の結果と傾向が異なり、本ケースでは OF の結果も途中から負の波力 (沈む方向の力) が発生している。これは、床版上面に載る水が増大し、揚力より押し付ける力が大きくなったからである。また、水平方向の波力合計 (図-16(b)) については、前述のケースと同様に OF と CS はよく一致している。

5. まとめ

本研究では、I 桁橋を対象にして、1 相流解析ソフトと 2 相流解析ソフトを用いて、津波波力が作用した場合の比較解析を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1)津波を造波させて桁橋に作用させたが、波が桁に当たる直前でソリトン分裂している現象が両解析ソフトで確認できた。
- 2)床版下面と外桁で囲まれた部分 (空気塊ができる部分) の鉛直方向の波力においては、水と空気が評価できる OF と水しか評価できない CS では大きな差が生じた。CS では水が当たらないと波力が発生せず、OF では空気を介して波力が発生する。このこ

とから、空気塊を評価する必要がある I 桁橋等については、2 相流解析する必要がある。

- 3) 波が直接当たる部分の波力および水平方向の波力合計の時刻歴では、OF と CS ではほとんど一致する。したがって、空気塊ができない構造（例えば、床版橋）においては、1 相流解析でも対応できるといえる。
- 4) 桁に波が当たった時点および波が桁を大きく越流する時点でも、床版下面の空気塊は完全にはなくならなかった。この空気塊の以外の桁周りの挙動については、OF と CS は一致する。
- 5) 設計最大の横断勾配 10% を考慮したモデルでも、桁内に空気塊は存在し続けた。鉛直波力は勾配を設定したモデルの方が、大きな値となった。
- 6) 波の形として、急な波（切り立った波でソリトン分裂が起きる波）と緩やかな波（徐々に水位が上昇するような波）の 2 種類で解析した結果、急な波では桁が回転するような浮上りを、緩やかな波では回転せずそのまま浮上ることが予想できた。
- 7) 津波高さが高くなると桁を越流する高さが高くなり、その分だけ鉛直方向の波力が負になって、浮上り難くなることを確認できた。

今後の研究課題

本研究では、2 つの異なる解析ソフト、OpenFOAM と CADMAS-SURF/3D を用いて、津波の高さや波の形状を変化させた比較解析を行い、I 桁周りにおける津波の作用力特性について検討した。しかし、実際にそのような特性になるかの検証や計算精度までは言及していない。著者らはこれまで空気塊ができない床版橋を対象にした水理模型実験を実施してきているので、今後は、空気塊ができる桁を対象とした同様な実験を行い、実験結果との比較により本研究の結論に対して検証していきたい。また、既に、他の研究機関等で実施されている水理模型実験結果もあるので、それとの比較検証も実施したいと考えている。

参考文献

- 1) 荒木進歩, 坂下友里, 出口一郎: 橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性, 土木学会論文集 B2, Vol.66, No.1, pp. 796-800, 2010.
- 2) H.Iemura, T.Yasuda, M.H.Pradono, and T.Tada: Experiments of Tsunami Force Acting on Bridge Models, 土木学会地震工学論文集, pp. 28-30, 2007.
- 3) 二井伸一, 幸左賢二, 宮原健太, 庄司学: 波高と桁高をパラメータとした津波橋梁被害の個別要素法解析, 第 12 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. 69-74, 2009.
- 4) 中尾尚史, 村上晋平, 伊津野和行, 小林紘士: 少数主桁橋に作用する津波作用時における流体力の特性に関する実験的研究, 第 13 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. 103-108, 2010.
- 5) 二井伸一, 幸左賢二, 宮原健太, 庄司学: 実験結果に基づく津波による橋梁への作用力算定方法と安全照査法に関する一提案, 第 13 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. 109-116, 2010.
- 6) 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.
- 7) 原田隆典, 村上啓介, Indradi Wijatmiko, 坂本佳子, 野中哲也: 津波により桁が流失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.
- 8) 坂本佳子, 原田隆典, 村上啓介, 福田利紀, 野中哲也: 津波により桁流失した床版橋の再現解析と水路実験, 構造工学論文集, Vol.58A, pp. 387-398, 2012.
- 9) (財) 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 2010.
- 10) OpenFOAM ユーザー会, 一般社団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM ユーザガイド和訳, 2010.
- 11) (財) 国土技術研究センター: 津波の河川遡上解析の手引き (案), 2007.

(2012 年 9 月 28 日受付)