

I桁橋に対する津波作用力特性の解析的検討

吉野広一¹・野中哲也²・原田隆典³・坂本佳子¹・菅付紘一⁴

¹正会員 株式会社地震工学研究開発センター

（〒889-2155宮崎市学園木花台西1-1宮崎大学産学・地域連携センター）

²正会員 博（工） 株式会社地震工学研究開発センター

（〒889-2155宮崎市学園木花台西1-1宮崎大学産学・地域連携センター）

³正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科（〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1）

⁴正会員 修（工） 株式会社地震工学研究開発センター

（〒889-2155宮崎市学園木花台西1-1宮崎大学産学・地域連携センター）

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（例えば^{1)~4)}。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、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^{5),6)}。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、多くの道路橋が被災した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。具体的には、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

(1) 解析ソフト

本研究の2相流の条件としては、水と空気の不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/3D⁷⁾を、2相流解析ソフトとしてOpenFOAM⁸⁾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（ $PV=const$ ）」と称して、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なかった。

(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ため、津波がある程度浸水して水位が高くなった状況で、再度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

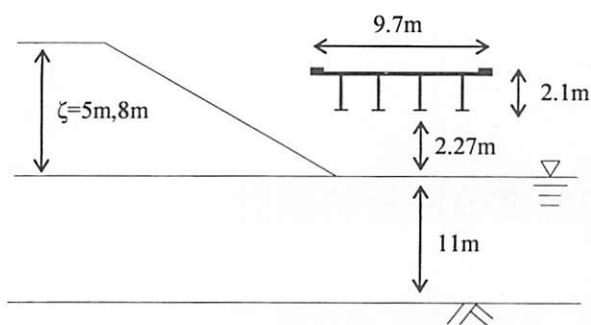


図-1 解析条件

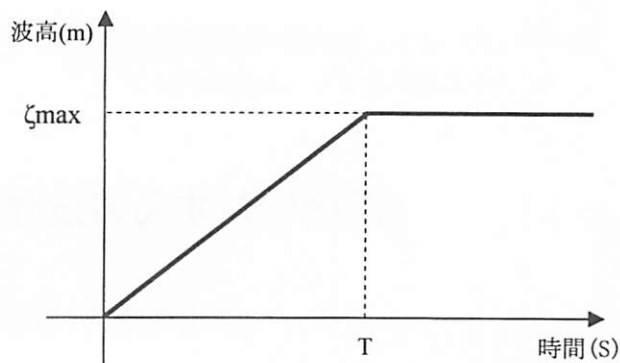


図-2 造波波形の定義

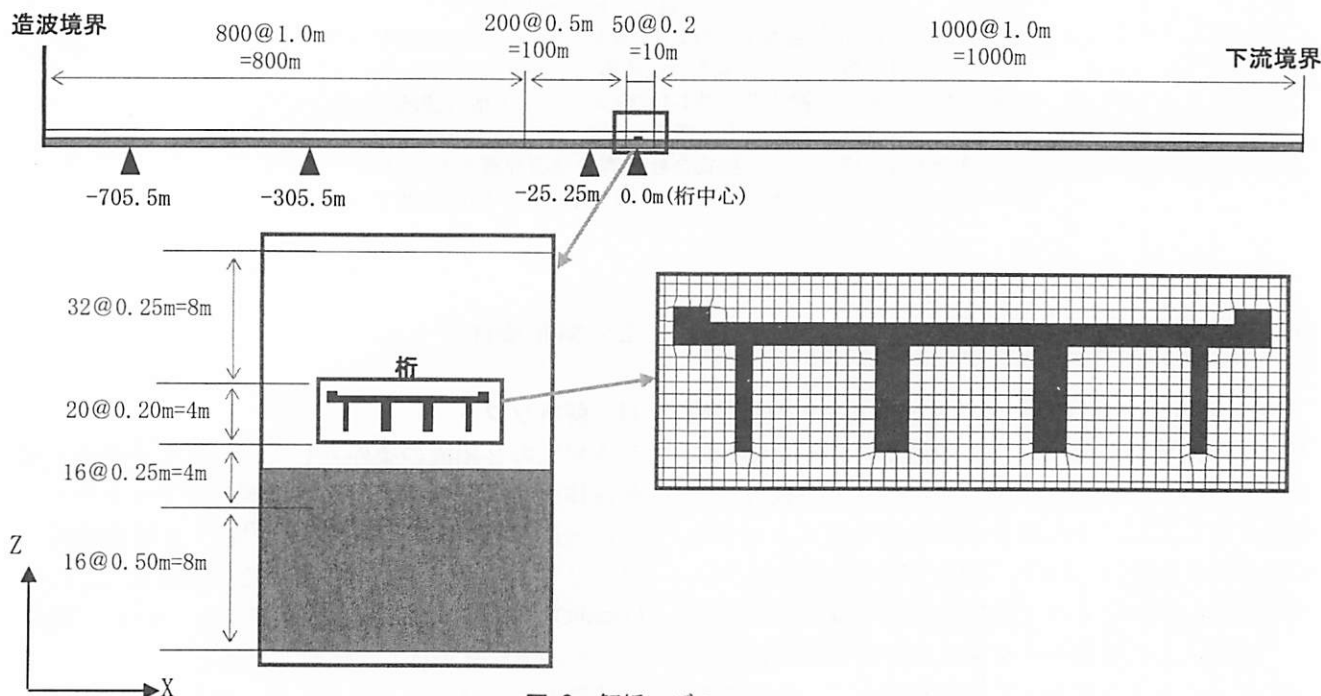


図-3 解析モデル

表-1 検討ケース

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

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緩やかな波の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もあるが、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。

(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。

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。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圧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、桁を通り過ぎた波が反射しても影響がないように下流側の境界の位置も桁から遠くに設定した。今回使用したOpenFOAMには無反射モデルがないため、このように桁と境界位置をある程度長くする必要がある。

メッシュ分割については、桁回りの挙動が十分に

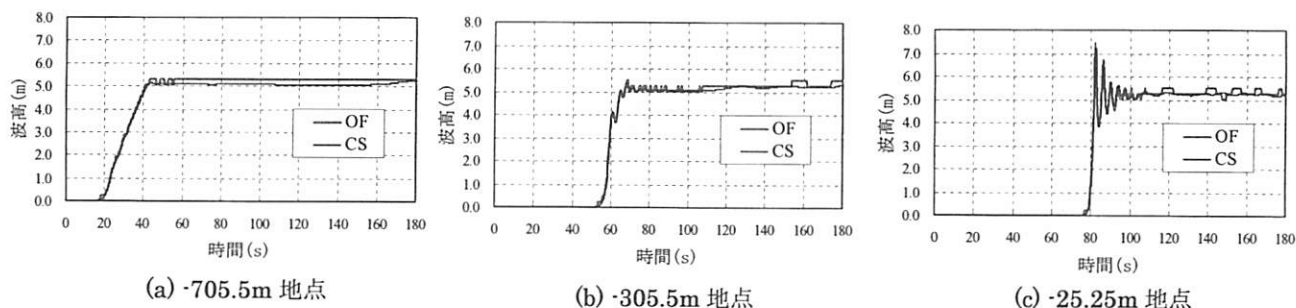
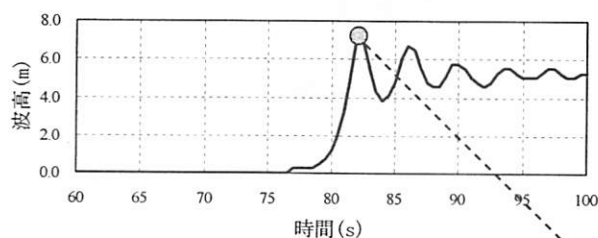
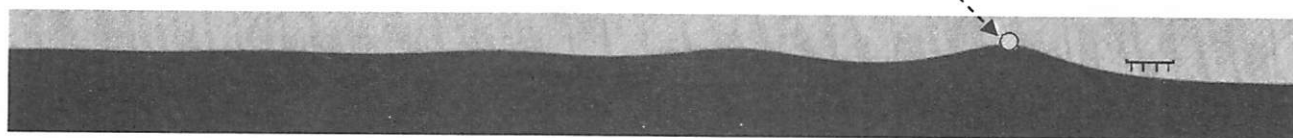


図-4 波高比較 (ケースA1)



(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)

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、ソリトン分裂が発生する箇所のメッシュサイズは、0.5m (または 1m) とし、ソリトン分裂が十分に表現できる分割 (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。

(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、ソリ

トン分裂が起き、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 でも同様であった。この図から、短周期のソリトン分裂が起きていることが確認できる。また、ソリトン分裂が起きたため、波高が増大し波の形も変わり、橋梁に対して大きな影響を与えることになる。

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。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圧は発生しない。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 秒で最大波圧を示すが、そのときとの

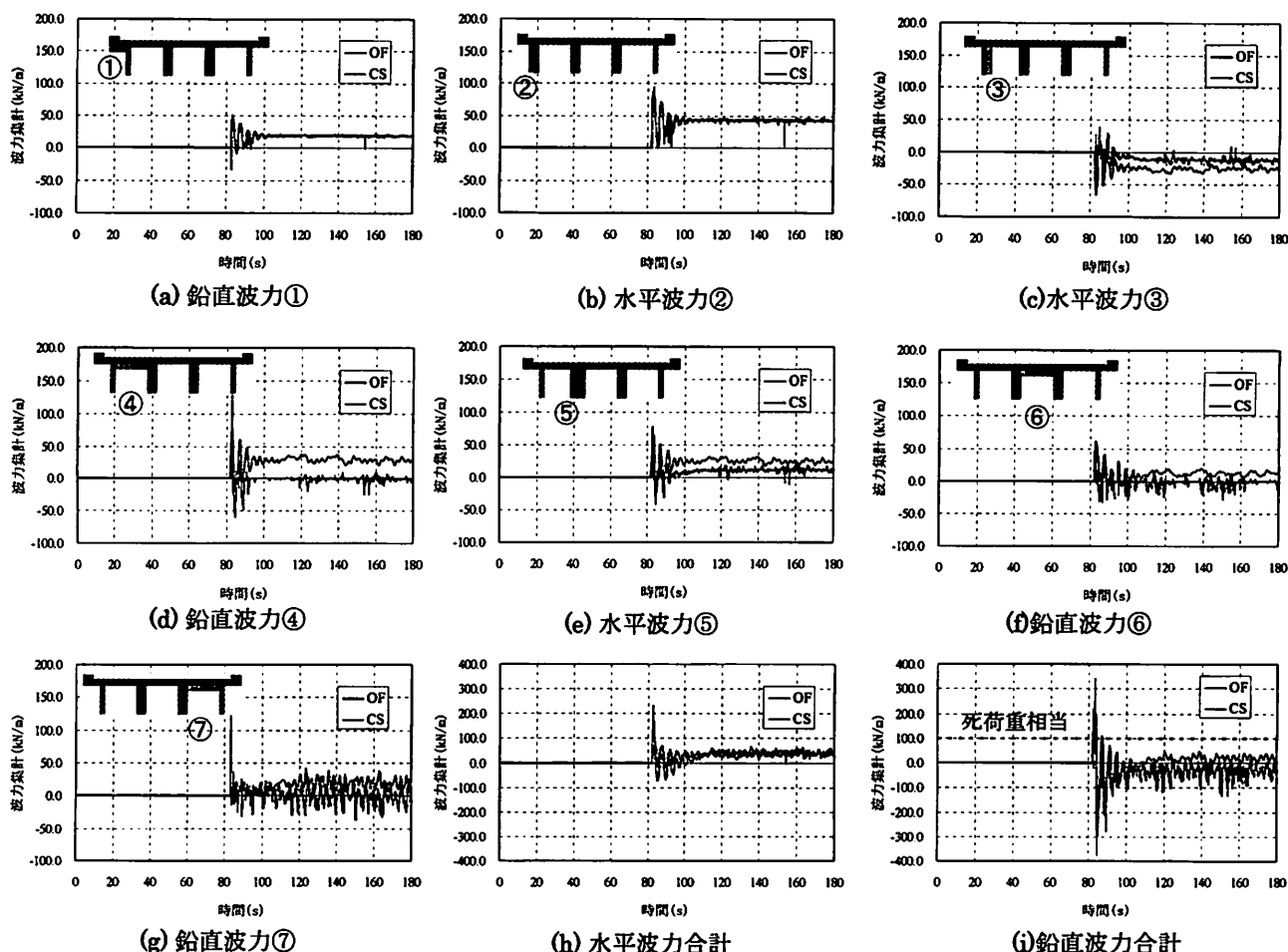


図-6 波力比較 (ケースA1)

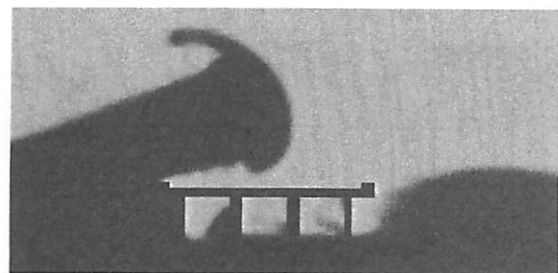
スナップショット、および水が桁の上をある程度流れた状態 (100 秒後) のときのスナップショットをそれぞれ図-7 に示す。これらの図から、OF では桁内の空間に空気塊が存在するが、CS ではほとんどない状態であることがわかる。OF ではある程度桁が水に浸かった 100 秒後の状態 (図-7(b)) でも、桁内には空気塊が存在している。④において前述したように CS である程度の波圧を示すのは、図-7(c)(d)からわかるように桁内ほぼ全体に水が入っているからである。桁内 (空気塊部分) 以外の桁周囲の挙動については、最大水平波力を示す 83.5 秒後、およびある程度水が桁を越流する 100 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、鉛直方向の波圧を合計した図-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 (3400kN) に相当する波圧 (桁を浮かせる圧力) 値も図内に示している。最初に波が桁に当たった瞬間に、その波圧以上になり桁を浮上らせる (揚力が発生する) ことが想像できる。また、桁の形状 (桁内

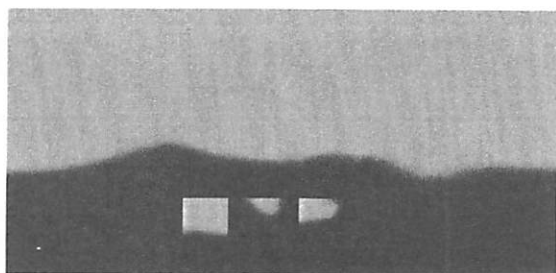
の空間も含めた体積) から浮力が計算でき、約 170kN/m となるが、その瞬間は鉛直波力合計が浮力よりも大きくなっている。ただし、その後は、鉛直波力合計が浮力より小さい状態が続くことになる。これは、床版上面に水がかぶるようになって押し付ける力が発生し、桁内にも多少水が浸水するため、浮力より小さくなったと思われる。

一方、水平方向の波圧合計 (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 の波圧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 の波圧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の波圧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。

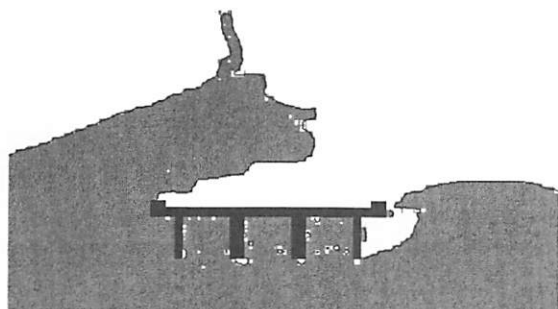
前述の OF の鉛直波力合計の時刻歴において、83.5 秒で浮上らせる最大の波圧が発生した。そのときの床版上下面の幅員方向の波圧分布を示すと、



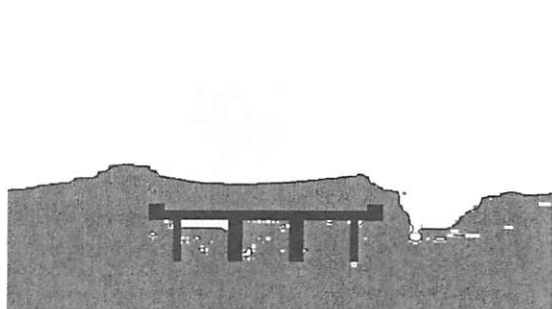
(a) OF : 84 秒



(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)

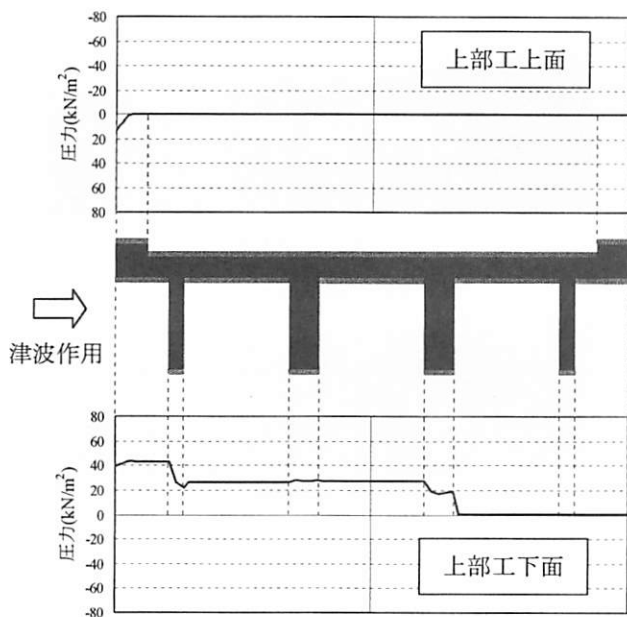
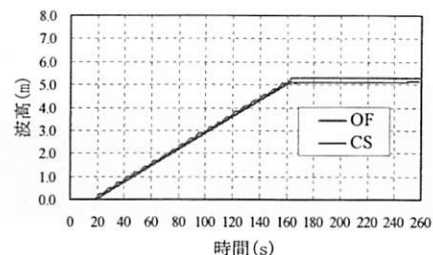


図-8 鉛直方向圧力分布図 : 83.5秒 (ケースA1,OF)

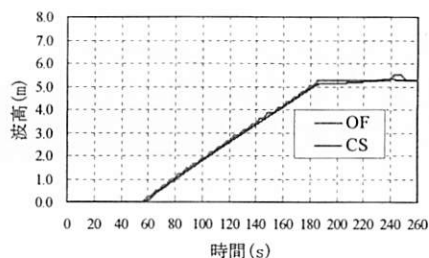
図-8 のようになる。この図から、床版上面で波圧がほぼゼロとなり、床版下面（下フランジも含む）においては、波が最初に当たる床版張り出し部の波圧が大きくなっていることがわかる。このような波圧分布で波圧値が大きくなると、時計回りに桁が回転し浮上ることが予想される。

(2) ケースA2

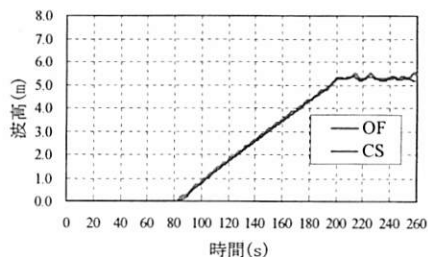
造波境界から桁までの代表的な位置における波高の時系列を図-9 に示す。本ケースにおいても、OF と CS の結果がよい精度で一致している。造波境界では、前述した図-2 のような形をした段波である



(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)

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

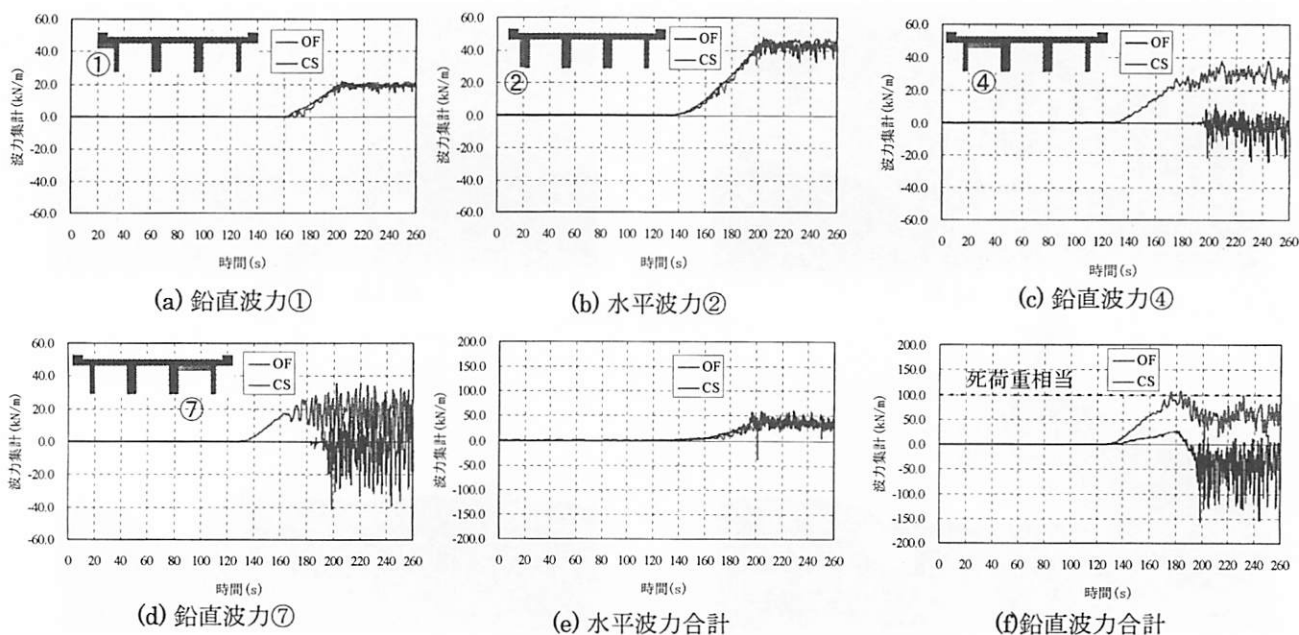
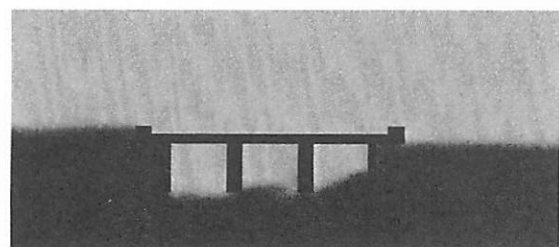
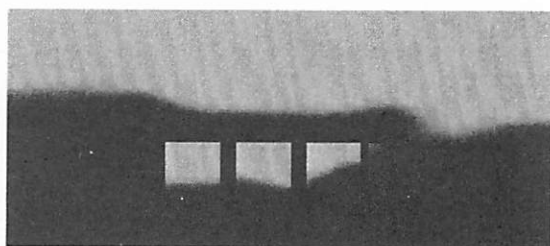


図-10 波力比較 (ケースA2)



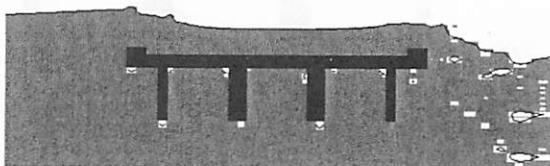
(a) OF : 180 秒



(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,OF)

は起こらず、同じ形を保ちながら、波高ゼロから設定した高さに達す時間 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、静か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、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。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、前述のケース 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 の波圧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、それにより波圧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、鉛直方向の波圧を合計した図-10(f)においても差が出てくる。OF が常に正の波圧（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圧が発生した後、負の波圧になって、傾向が大きく異なる。前述のケースの鉛直方向合計（図-6(i)）と比較しても、傾向は大きく異なっている。一方、水平方向の波圧合計（図-10(e)）については、両者の結果はほぼ一致した。

OF の鉛直方向の波圧において、最大波圧を示した時刻 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。

(3) 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-13(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、ある程度の波圧を示す。

このように水と空気の挙動に差が生じ、鉛直方向の波圧を合計した図-13(c)においても差が出てくる

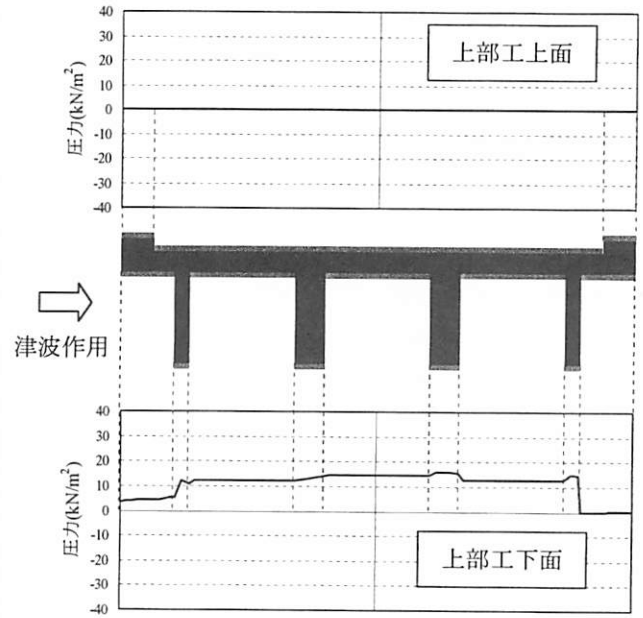


図-12 鉛直方向圧力分布図：176.5秒（ケースA2）

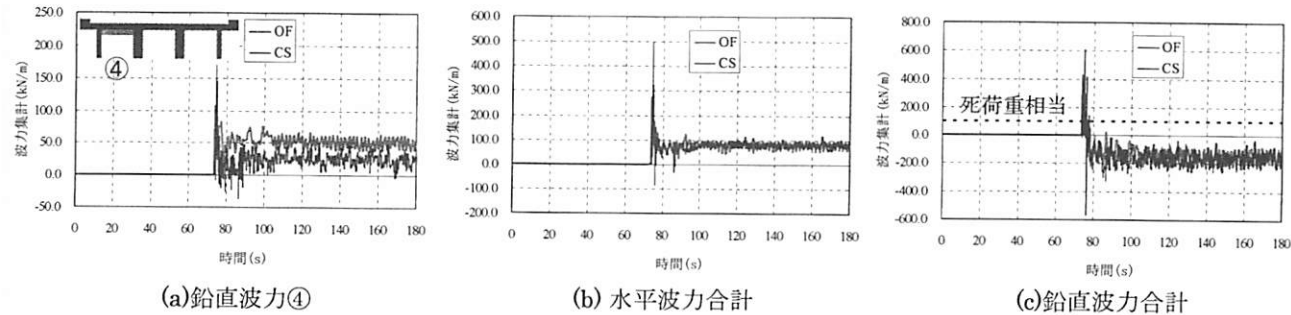


図-13 波力比較（B1）

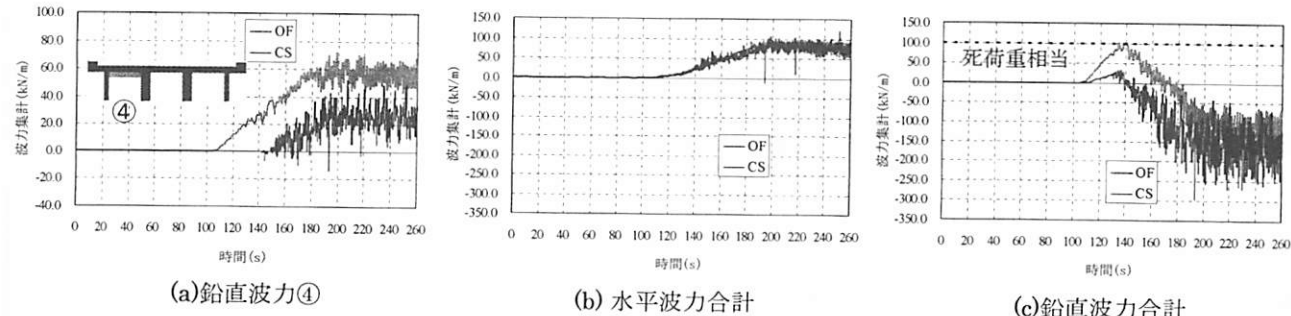


図-14 波力比較（ケースB2）

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圧は大きくなり、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、水平方向の波圧合計（図-13(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) 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-14(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。

鉛直方向の波圧を合計した図-14(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圧（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、浮力より押し付ける力が大きくなったからである。また、水平方向の波圧合計（図-14(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波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）の鉛直方向の波圧（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圧が発生せず、OF では空気を介して波圧が発生する。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)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、緩やかに波では回転せずそのまま浮上ることが予想できた。
- 6)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圧が負になって、浮上り難くなることが確認できた。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) (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.
- 8) 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.