

宮崎大学大学院
博士学位論文

数値シミュレーション技術を用いた
橋梁の津波被害機構に関する基礎的研究

2015年3月

宮崎大学大学院農学工学総合研究科
資源環境科学専攻

坂本 佳子
(鳥越 佳子)

学位論文の要旨

これまでの地震工学では地震動に対する施設やシステムの安全性確保等が主要な目標であり、津波では早期避難情報や市民意識向上等による人的被害軽減を目的とするため、津波の発生・伝播に基づく海岸線での津波高や到達時間の予測等が主要な目標であった。しかし沿岸部には、重要生産・社会基盤構造物が集中し、都市・産業ネットワークが形成されており、人命と経済損失を抑える都市・産業ネットワークの改良案を提案するためには、第一段階として津波による重要生産・社会基盤構造物の応答評価法に関する研究を進展させなければならない。大津波を発生させる海溝型巨大地震は少なく、津波被害の観測記録は極めて少ないため、津波による重要生産・社会基盤構造物の応答評価においては、理論的方法に基づく「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による構造物の3次元非線形応答解析法」の開発が必要不可欠となる。

そこで本研究では、人命の救助、緊急輸送道路の確保、その後の復旧・復興で重要となる沿岸域の道路橋を対象構造物として、「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による橋梁の3次元非線形応答解析法（数値シミュレーション技術を用いた橋梁の津波3次元非線形応答解析法）」の開発を目的に、以下に示す3つの目標を定め成果を得た。

(1) 津波発生・伝播・構造物周辺地形を考慮した津波による橋梁の3次元非線形応答解析法の開発

従来の非線形長波理論に震源断層破壊伝播特性を組み入れた「2次元津波解析に基づく震源から沿岸域までの津波解析法」と、「3次元津波構造物応答解析法」を組み合わせた「震源から構造物応答の解析法」を開発した。本手法により、構造物の津波応答に及ぼす震源断層特性・伝播特性・周辺地形効果の効率的かつ定量的評価が可能となった。

(2) 津波による構造物応答に及ぼす空気塊の影響と実験による検証

上記(1)で開発した「震源から構造物応答の解析法」と「水路実験」を用いて、橋梁の津波被害機構を検討した。津波が橋梁に作用するとき、橋梁桁下の形状による桁下に空気塊ができる場合がある。このため、空気が橋梁に与える影響に注目し、空気を考慮しない一相流解析と空気を考慮する気液二相流解析を行い、水路実験結果との比較により、解析法の検証と共に空気塊の影響が大きいことを定量化した。

(3) 2011年東北地方太平洋沖地震による橋梁の津波流出事例の解析と解析法の定性的検証

本地震で発生した大津波により被災した橋梁を対象に、上記(1)で開発した「震源から構造物応答の解析法」を用いて津波被害の再現を行った。震源から周辺地形を考慮した大規模3次元津波応答解析を行い、被害状況と比較し解析結果の定性的妥当性を検討し、周辺地形が橋梁に与える影響が大きいことを定量化した。

本研究成果は、今後の橋梁の耐津波設計や津波対策のための重要な基礎資料を提供するものである。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	東北地方太平洋沖地震による巨大津波の被害状況	1
1.1.2	スマトラ沖地震による巨大津波の被害状況	4
1.2	既往の研究	5
1.2.1	調査・画像解析による研究	5
1.2.2	実験による研究	5
1.2.3	数値解析による研究	6
1.3	本研究の目的	7
1.4	論文の構成	8
	参考文献	9
第2章	橋梁の3次元非線形応答解析の概要と数値解析法	11
2.1	橋梁の3次元非線形応答解析手法の概要	11
2.2	3次元流体解析ソフトウェア	13
2.2.1	一相流解析ソフトウェア CADMAS-SURF/3D	13
2.2.2	二相流解析ソフトウェア OpenFOAM	17
2.3	3次元構造解析ソフトウェア SeanFEM	22
2.3.1	解析ソフトウェア概要	22
2.3.2	動的解析手法	22
2.3.3	津波波力の入力手法	24
	参考文献	25
第3章	津波により桁流出した床板橋の再現解析と水路実験	26
3.1	まえがき	26
3.2	被害状況	26
3.3	再現解析の方法	27
3.4	床版橋の流出解析における津波解析	29
3.4.1	解析条件および解析モデル	29
3.4.2	段波の定義	30

3.5	津波解析の結果	30
3.5.1	全体挙動	30
3.5.2	波高	31
3.5.3	桁に作用する圧力	32
3.6	床板橋の流出解析における橋梁の津波応答解析	33
3.6.1	橋梁の津波応答解析の条件と解析モデル	33
3.6.2	桁に作用させる波力	34
3.6.3	荷重作用点数と死荷重載荷解析	35
3.7	橋梁の津波応答解析の結果	35
3.7.1	支承の応答特性	35
3.7.2	桁の挙動	36
3.8	隣接道路橋の影響	37
3.9	水路実験	40
3.9.1	実験概要	40
3.9.2	実験結果の再現解析	41
3.10	地震応答解析による支承の応答	42
3.11	まとめ	44
	参考文献	45
第4章	I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討	46
4.1	まえがき	46
4.2	解析条件	46
4.2.1	解析ソフト	46
4.2.2	津波解析の条件	47
4.2.3	検討ケース	47
4.3	解析モデル	48
4.4	津波解析結果および考察	49
4.4.1	ケース A1	49
4.4.2	ケース A2	55
4.4.3	ケース A2'	58
4.4.4	ケース B1	59
4.4.5	ケース B2	60

4.5	水路実験の再現解析	61
4.5.1	水路実験	61
4.5.2	再現解析	62
4.6	まとめ	64
	参考文献	65
第 5 章	I 桁橋津波数値解析による津波波形特性に及ぼす 橋梁周辺地形による 3 次元的影響	66
5.1	まえがき	66
5.2	小泉大橋とその周辺地形の津波特性に及ぼす影響	66
5.2.1	対象橋梁の被害状況	66
5.2.2	津波被害再現解析の方法	66
5.2.3	解析条件	67
5.2.4	解析結果	71
5.3	まとめ	75
	参考文献	76
第 6 章	結論	77
謝 辞		80

第1章 序論

1.1 研究の背景

これまでの地震工学では地震動に対する施設やシステムの安全性確保等が主要な目標であり、津波では、逃げることを前提とした早期避難情報や市民意識向上等による人的被害軽減を目的とするため、津波の発生・伝播に基づく海岸線での津波高さや到達時間の予測等が主要な目標であった。しかし沿岸部には、重要生産・社会基盤構造物が集中し、都市・産業ネットワークが形成されており、人命と経済損失を抑える都市・産業ネットワークの改良案を提案するためには、第一段階として津波による重要生産・社会基盤構造物の応答評価法に関する研究を進展させなければならない。

大津波を発生させる海溝型巨大地震は少なく、次項 1.1.1 と 1.1.2 で記述する 2011 年東北地方太平洋沖地震や 2004 年スマトラ沖地震で発生した大津波による橋梁被害の報告書から明らかのように、津波被害の原因やその観測記録は極めて少ない。さらに次節 1.2 で記述するように、2004 年スマトラ沖地震で発生した大津波による橋梁被害の現地調査が行われ始め、橋梁被害の分析と津波特性に着目した研究が精力的に行われるようになったが、実験的研究が主流である。

したがって、津波による重要生産・社会基盤構造物の応答評価においては、経験的方法や実験的方法に加えて、理論的方法に基づく「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による構造物の 3 次元非線形応答解析手法」の開発が必要不可欠となる。当然に、この理論的方法は既往の経験的方法や実験的方法から得られた研究成果による検証を必要とする。

そこで本研究では、人命の救助、緊急輸送道路の確保、その後の普及・復興で重要となる沿岸域の道路橋を対象構造物として、「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による構造物の 3 次元非線形応答解析手法」に基づく数値シミュレーション技術を用いた橋梁の津波 3 次元非線形応答解析法を開発することとする。

1.1.1 東北地方太平洋沖地震による巨大津波の被害状況

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、この地震に伴う津波により、東北地方の太平洋沿岸部は壊滅的な被害を受けた。社会基盤施設である、道路、ライフライン、構造物などが被災し、橋梁についても、桁が流出するなどの被害が多数報告されている^{1),2)}。調査報告書¹⁾によると、橋梁の津波による被害形態として、(a)洗掘によって基礎が倒壊し橋脚自体が

破壊した結果、桁が流出した橋、(b)津波による上揚力によって桁が持ち上げられた結果、桁が流出した橋、(c)津波による上揚力によって下流側の支承が破断し、桁が回転し、横転する形で流出した橋、の3つの分類が記載されている。これらの津波被害形態は、被害後の現場の調査により工学的に推測されたもので、実際に橋梁がどのような津波力を受けたか等の観測記録は無いため、次節 1.2 に示すような実験的研究による研究が進められてきた。

以下の図 1.1.1 から図 1.1.3 に、上記3つの橋梁の津波被害形態の代表的な事例¹⁾を示す。



図 1.1.1 小泉大橋：橋脚の流出と橋台部の破壊状況

(a)洗掘によって基礎が倒壊し橋脚自体が破壊した結果、桁が流出した橋



図 1.1.2 歌津大橋：橋脚と落下した桁

(b) 津波による上揚力によって桁が持ち上げられた結果、桁が流出した橋



図 1.1.3 橋梁名不明：横転した桁と支承が破断した左岸側橋台

(c) 津波による上揚力によって下流側の支承が破断し、桁が回転し、横転し流出した橋

1.1.2 スマトラ沖地震による巨大津波の被害状況

2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震により、巨大津波が発生した。この津波によりインドネシア、スリランカ、インド、タイ、マレーシア等のインド洋沿岸諸国において28万人以上もの人名が奪われ、甚大な被害が発生した。このように被害が拡大した要因には、港湾、道路、鉄道、電力施設、上下水道施設等の社会基盤構造物の被災が挙げられる。社会基盤施設である橋梁についても完全に流出する等、被害が多数報告されている^{3)~6)}。インドネシアではスマトラ島北西海岸のバンダ・アチェからムラボーに至る約250kmの道路のうち約85%が何等かの被害を受けており、橋梁も約53%において桁が流出したり全壊したりしている。以下に、橋梁の被害例を示す。



図 1.1.4 流出したトラス橋（左），橋梁の流出と洗掘された土壌（右）

この巨大津波による被害情報は映像とともに世界中に発信され、津波に対する警戒意識を高め、対策の重要性を知らしめた事例となった。これにより、日本でも多く土木構造物に対する津波研究が行われるようになった。

1.2 既往の研究

1.2.1 調査・画像解析による研究

2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震にともなう巨大津波による橋梁の被害により、現地調査が行われ、橋梁の被害分析と津波の相関関係に着目した研究が精力的に行われるようになった^{5),6)}。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震津波でも多数の調査、分析が行われている^{1),2)}。

被害機構を明らかにするために、被害を受けた橋梁と、その周辺の被害を受けなかった橋梁についての調査も行われ、分析が行われている。また、橋梁の構造種別毎に損傷ランクを判定し、桁抵抗力、津波作用力比を用いた簡易判定式による上部構造流出判定を目的とした研究では、損傷度と桁抵抗力津波作用力比の相関関係が示されている⁶⁾。

東北地方太平洋沖地震津波では、被害状況を分析することができる画像資料が静止画像だけではなく、津波襲来時の様子を撮影した動画など様々な形で多数残された。これらの画像を解析することによる研究も進められている⁷⁾。画像解析によって、実際の津波の水位上昇の傾向がわかり、漂流物の移動速度から津波流速が得られ、橋梁周辺での津波形状の分析も行われている。また、この分析結果を実橋梁の津波被害機構の解明に役立て、後述する数値解析の妥当性に関する指標を得ることができる。

1.2.2 実験による研究

古来我が国は幾度となく津波の猛威に襲われてきたため、2011年3月より前から、津波の研究については実験による検証が行われ、実験結果を基に設計条件の判定に用いる理論式の構築がなされてきている。福井ら⁸⁾は、実験によって津波段波を発生させて、水理学理論と実験結果から、津波段波の波速式を求めている。また合田⁹⁾は、系統的な波圧実験値などを基礎データとしてその公式化をはかり、設計に用いる新しい波圧計算法を提案した。

橋梁に対する津波の実験的研究としては、2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震にともなう巨大津波で多くの橋梁被害があったことを契機に、橋梁を対象とした水理実験による検証が行われるようになってきた。荒木ら^{10)~12)}は、水理実験によって、河口付近にける橋梁位置、橋梁形状、津波波形などの違による橋梁に作用する津波波力特性を求めている。二井¹³⁾らは、水理実験から碎波の有無や、波高に対する波力特性を求め、この実験結果を2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震津波被害の評価に適用し、その実験結果の検証を行っている。

1.2.3 数値解析による研究

広域を対象とした津波解析の実用的な手法としては、流速や水位の時間変動を精度よく評価できる平面 2 次元解析の非線形長波理論¹⁴⁾が用いられてきている。また、この解析に用いる初期波形の決定方法では、Mansinha and Smylie¹⁵⁾の結果を用いて断層近くの海底面で生じた鉛直変位の場所的分布を決め、津波の初期波形を求める方法が一般的である。この方法は、震源断層モデルから計算される永久鉛直地盤変位がそのまま海面の変動量になると仮定している。

平面 2 次元津波解析では、津波伝播や河川・陸域での津波遡上過程を求め、津波高（海岸線での津波高さ）、浸水深（陸域の津波深さ）や流速を求めることができる。非線形分散理論を用いることによって長波がソリトン分裂波に変形する過程を再現することもできるが、ソリトン分裂波の碎波変形を再現することはできない^{16),17)}。また平面 2 次元津波解析では、流速の鉛直方向分布は一定と仮定されているが、構造物によって構造物周辺の津波特性は 3 次元的に津波高さや流速が変化するので、平面 2 次元津波解析結果から構造物に作用する津波波力を算出するには限界があり、適切ではない。

したがって構造物に作用する津波波力を精度よく調べるためには、従来から多用されてきた平面 2 次元津波解析ではなく、3 次元津波解析が必要となる。3 次元津波解析手法としては、VOF 法、粒子法などがある。海岸構造物の耐波設計への適用に対して実用的な VOF 法の解析プログラムとしては、数値波動水槽 CADMAS-SURF^{18),19)}の断面 2 次元計算用プログラム、また 3 次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D²⁰⁾などがある。CADMAS-SURF/3D を用いて、橋梁の津波応答解析を行った研究としては坂本²¹⁾らの研究がある。また、VOF 法解析プログラムとしては、ソースコードが公開されている 3 次元流体解析コードである OpenFOAM²²⁾がある。

OpenFOAM は多相層、燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有しているが、坂本ら^{23),24)}、本橋ら²⁵⁾は OpenFOAM のうち非圧縮・不混和流体の気液二相流解析が行える interFoam を使用し、橋梁を対象とした津波解析の研究を行っている。

その他の解析方法として 3 次元粒子法を用いて、橋梁に対する津波解析を行った例としては田邊ら²⁶⁾の研究がある。

以上から、各種の数値流体解析法を用いて津波波力を評価する橋梁の津波応答特性に関する解析的研究は最近になって始められたことがわかる。このような理論的方法によって、橋梁の形態、橋梁の位置、橋梁の周辺地形によって変化する津波高さや流速やその 3 次元的分布等の津波特性の多様性、そしてその津波特性による橋梁の津波応答特性の多様性が解明できるものと期待される。

1.3 本研究の目的

前節 1.1 の研究の背景や 1.2 節で記述した既往の研究からわかるように、津波による重要構造物の応答挙動に関する研究は、最近になって精力的に進められている新しい研究分野である。今後、東海・東南海・南海の 3 連動地震や、それに日向灘を含めた 4 連動の南海トラフ巨大地震の発生が予測されている。2011 年 3 月 11 日の壊滅的な津波被害の経験から、人命の救助、緊急輸送道路の確保、その後の迅速な復旧・復興のために、ライフラインである道路、橋梁を津波被害から守るための対策が重要であることは明白であり、そのために橋梁の津波被害機構の解明が必要とされる。

本研究では、数値シミュレーション技術を用いて橋梁の津波被害機構に関する基礎的研究として、以下に示す 3 つの目標を定めて研究を進める。

(1)津波発生・伝播・構造物周辺地形を考慮した津波による橋梁の 3 次元非線形応答解析法の開発

これまで、津波による構造物被害に関連する数値解析的研究では、「①地震による断層変位から津波の伝播を解析する 2 次元非線形長波理論による手法」、「②構造物に対する 3 次元流体解析の手法」の研究開発がそれぞれに進められてきた。また、一方で地震動による時刻歴応答解析などの「③時刻歴で構造物に外力を与える動的解析手法」の研究開発も行われてきている。本研究では、地震発生により津波が発生伝播し、その津波により対象橋梁に作用する波力を求め、その波力が作用したときに橋梁にどのような影響があるかを解明するために①～③を複合させた効率的な一連の解析手法を提案する。

(2)津波による橋梁応答に及ぼす空気塊の影響と実験による検証

3 次元流体解析手法の精度を向上させることにより、橋梁の津波被害機構について検討を深める。まず、一般的な橋梁が桁下に空気塊ができる形状であることから、空気が橋梁に与える影響に注目し、空気を考慮しない一相流解析と空気を考慮する気液二相流解析について結果の比較検証を行う。また、水路実験結果と解析結果の比較を行い 3 次元流体解析の妥当性の検証を行う。

(3)2011 年東北地方太平洋沖地震による橋梁の津波流出事例の解析と解析法の定性的検証

実際の橋梁は複雑な地形上に立地していることを踏まえ、橋梁とその周辺地形をモデル化した大規模 3 次元モデルによる検証を行う。東北地方太平洋沖地震の津波によって実際に被災した橋梁について、震源断層モデルから地盤沈下および津波を 2 次元非線形長波理論により求め、得られた地盤沈下、波高、流速条件を用いて周辺地形を考慮した大規模 3 次元モデルで 3 次元

津波解析を行い、再現解析を実施する。実際の被害状況と比較を行い解析結果の妥当性と、周辺地形が橋梁に与える影響を検証する。そのモデル化手法を提案する。

1.4 論文の構成

本論文は、全6章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

第1章では、序論として研究の背景、既往の研究、研究の目的および概要を述べる。

第2章では、本研究で用いる3次元津波解析と構造解析の数値解析手法についてそれぞれ提示する。

第3章では、2次元非線形長波理論、3次元流体解析、構造解析を複合させた一連の解析手法を提案する。東北地方太平洋沖地震の津波によって実際に被災し、コンクリート桁が流出した床版橋を対象にして、3次元津波解析と構造解析による再現解析を行う。また、3次元津波解析の精度検証を行うために水路実験による検証を行い、比較結果を示す。

第4章では、一般的な橋梁形状であるI桁橋を対象とし、桁下に空気塊ができる構造であることから、その影響を確認するために一相流解析と気液二相流解析結果との比較を行う。また、解析の妥当性を検証するために、水路実験による検証結果を示す。

第5章では、実際の橋梁は複雑な地形条件に立地していることを踏まえ、橋梁の周辺地形をモデル化した大規模モデルによる東北地方太平洋沖地震の津波によって実際に被災した橋梁の再現解析を行い、周辺地形の影響を検証し、モデル化手法を提案する。

第6章では、本研究で得られた結論を要約し、今後の展望を簡単にまとめる。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，2011.
- 2) 清水英樹，幸左賢二，佐々木達生，竹田周平：道路橋の津波による被害分析，構造工学論文集 Vol.58A, pp.366-376, 2012.
- 3) A report of the reconnaissance team of Japan Society of Civil Engineers : The damage induced by Sumatra Earthquake and associated tsunami of December 26, 2004, 2005.
- 4) 土木学会・日本地震工学会合同 スマトラ島沖地震津波詳細現地調査団：スマトラ島沖地震・インド洋津波によるスマトラ島北西海岸での被害(速報)，土木学会誌 Vol.91, No.10, pp.50-53, 2006.
- 5) 幸左賢二，二井伸一，庄司学，宮原健太：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析，構造工学論文集 Vol.56A, pp.454-463, 2010.
- 6) 新道路技術会議：津波による道路構造物の被害予測とその軽減対策に関する研究，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.19-2, 2010.
- 7) 佐々木達生，幸左賢二，神宮司博志：画像解析と数値解析に基づく陸前高田地区の津波特性の評価，第 17 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.127-134, 2014.
- 8) 福井芳朗，白石英彦，中村充，佐々木泰雄：津波の研究（I）－段波津波の波速について－，第 9 回海岸工学研究発表会論文集，pp. 44-49, 1962.
- 9) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告第 12 巻第 3 号, pp.31-69,1973.
- 10) 荒木進歩，中嶋悠，出口一郎，伊藤禎和：河口付近の橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.866-870, 2008.
- 11) 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(海岸工学)，Vol.66, No.1，pp.796-800, 2010.
- 12) 荒木進歩・塚本裕太・青木伸一：異なる造波方法により発生させた 2 種類の擬似津波による桁橋への作用波力特性，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69, No.2, pp.836 -840, 2013.
- 13) 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.
- 14) 後藤智明：アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式，土木学会論文集，No.351/II -2, pp.193-201, 1984.
- 15) Mansinha, L. and Smylie, D.E. : The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.

- 16) 佐藤兼太, 横尾善之: ソリトン分裂波の数値計算の高精度化に向けた文献調査と提案, 東北地域災害科学研究, 第 50 巻, pp.187-192, 2014.
- 17) 原子力土木委員会 津波評価部会: 津波評価手法の高精度化研究, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.2, pp168-177, 2007.
- 18) (財) 沿岸技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 2001.
- 19) (財) 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 2008.
- 20) (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.
- 21) 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.
- 22) 一般社団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM ユーザガイド和訳 Version 2.2.0, 2013.
- 23) 坂本佳子, 原田隆典, 野中哲也, 吉野廣一, 鳥越卓志: I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.450 -458, 2013.
- 24) 坂本佳子, 原田隆典, 川崎浩司, 青木伸一, 荒木進歩, 本橋英樹, 野中哲也: 「I 桁橋津波数値解析における」実験による検証と周辺地形による 3 次元的影響の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.866-870, 2014.
- 25) 本橋英樹・菅付紘一・野中哲也・川崎浩司・原田隆典: 小泉大橋の津波被害再現解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.831-835, 2013.
- 26) 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.

第2章 橋梁の3次元非線形応答解析の概要と数値解析法

本章では、3章～5章で具体的に記述するが、「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による橋梁の3次元非線形応答解析手法」の概要と、3次元津波解析法と3次元橋梁津波応答解析法のための数値解析法を記述する。

2.1 橋梁の3次元非線形応答解析手法の概要

「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による橋梁の3次元非線形応答解析手法」の解析手順を図2.1.1に示す。この手法は「非線形長波理論に基づく2次元津波解析」、「3次元津波解析」と「3次元非線形応答構造解析」の3つの解析方法を組み合わせたハイブリッド法である。

現在、高性能なコンピュータを用いても震源（波源）から橋梁までの全体の3次元津波解析は困難である。よって、従来の非線形長波理論に基づく2次元津波解析によって得られる対象橋梁の河口域の津波高と流速分布（図2.1.1ステップ1の解析結果）を、橋梁を含む周辺地域を3次的にモデル化した3次元津波解析領域の境界に入力し（同図ステップ2）、橋梁に作用する津波波力を求める（同図ステップ3の解析結果）。最後に、この津波波力を3次元非線形橋梁応答解析モデルに入力し橋梁の津波応答挙動を求める（同図ステップ4の解析結果）。橋梁の桁流出の判定などを目的とするため、津波と橋梁応答の相互作用の影響は小さいものと仮定し、これを無視した解析手法である。

効率的な解析を行うために、解析を進めるにしたがって、解析空間と解析対象時間を最小化していくことになる。

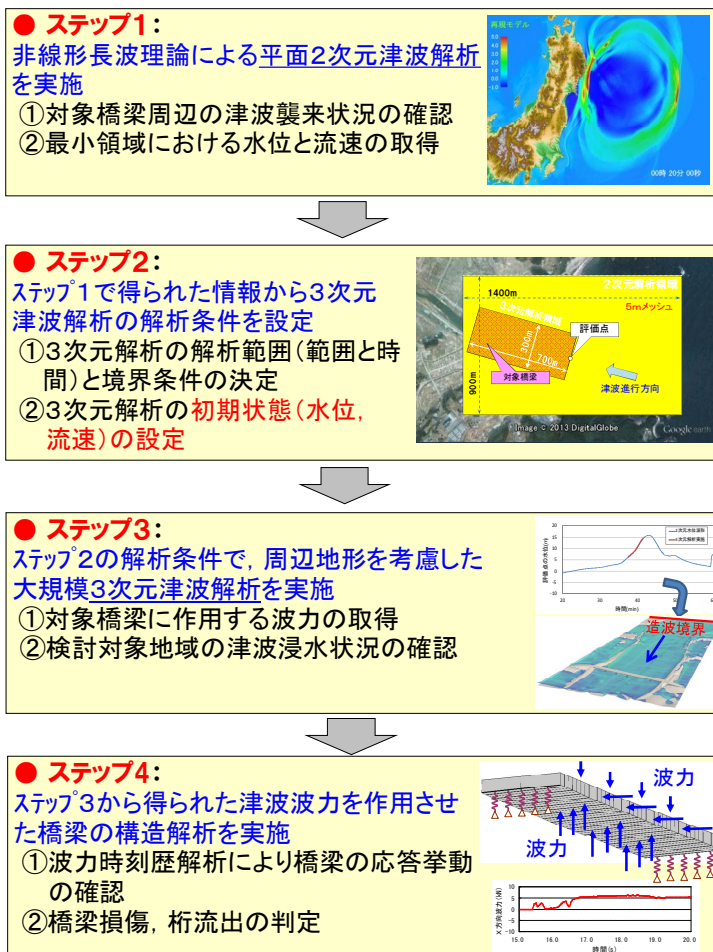


図 2.1.1 橋梁の3次元非線形応答解析の解析手順

2.2 3次元流体解析ソフトウェア

2.2.1 一相流解析ソフトウェア CADMAS-SURF/3D

(1) 数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D の概要

一相流の3次元津波解析の数値シミュレーションには、(財)沿岸開発技術研究センターで開発された3次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D¹⁾⁻³⁾を用いる。

CADMAS-SURF/3D は、3次元構造物へ適用できるように、プログラムが改良されており、計算手法にはVOF (Volume Of Fluid) 法が用いられている。

図2.2.1にVOF法における自由水面の概念を示す。VOF法は、流体力学の基礎方程式(連続式およびNavier-Stokes方程式)と同時に、流体濃度(VOF関数)の計算を行うことにより砕波などの複雑な自由水面の運動を伴う流体運動の解析を可能にしたモデルである。CADMAS-SURFでは、そのVOF法による流体運動の解析を基本に、ポーラスモデルおよび高Re型 $\kappa-\epsilon$ 乱流モデルの付加、また規則波から不規則波までの多彩な波の造波が可能など、実用的に優れた数値波動水路となっている。すでに、砕波、越波および波力問題などの多くの実務的な解析に適用されており、その適用事例は、文献3)にまとめられている。

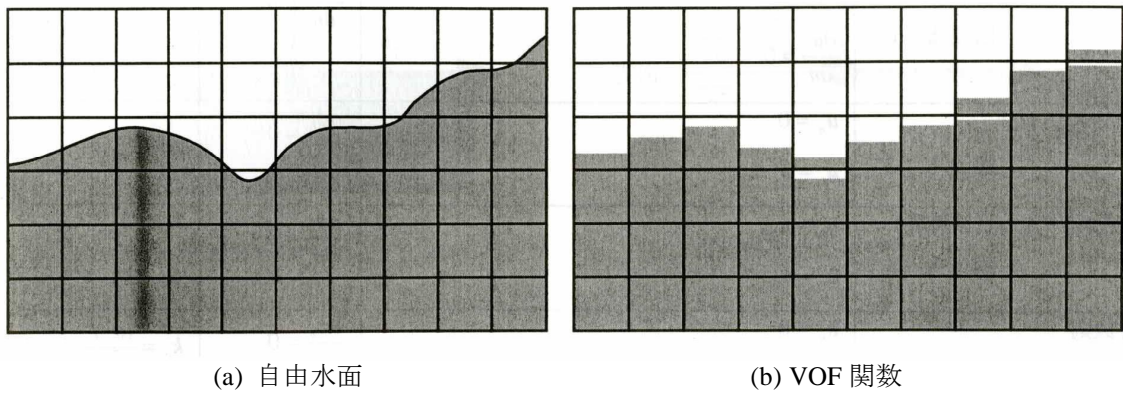


図 2.2.1 VOF 法における自由水面の概念

(2) 3次元非圧縮性流体の基礎方程式

海岸域における波浪場の解析では、海底斜面および透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須である。このため、数値波動水路 CADMAS-SURF/3D の基礎方程式には、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した次式が適用されている。

連続式：

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_\rho \quad (2.2-1)$$

運動方程式：

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (2.2-2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uv}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vv}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wv}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \quad (2.2-3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vw}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \end{aligned} \quad (2.2-4)$$

- ここに、 t : 時間
 x, y, z : 水平および鉛直座標
 u, v, w : 流速の水平および鉛直成分
 ρ : 流体の基準密度
 ρ^* : 浮力を考慮する密度
 p : 圧力
 v_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和

g : 重力加速度
 γ_v : 空隙率
 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: 水平および鉛直方向の面積透過率

であり、 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ は慣性力係数 C_M を用いて次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M \\
 \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \\
 \lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y)C_M \\
 \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M
 \end{aligned} \right\} \quad (2.2-5)$$

この式における各式の右辺第2項は、構造物から受ける慣性力の効果を表している。 D_x, D_y, D_z はエネルギー減衰帯のための係数、 S_p, S_u, S_v, S_w は造波ソースのためのソース項である。また、多孔質体からの抵抗力 R_x, R_y, R_z は、抵抗係数 C_D を用いて流速の2乗に比例する次式の形式でモデル化されている。

$$\left. \begin{aligned}
 R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\
 R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\
 R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.2-6)$$

ここに、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は水平および鉛直方向の格子間隔である。

(3) 自由水面解析モデル

自由水面解析モデルには、汎用性が高く、複雑な表面形状を解析可能な VOF 法が採用されている。VOF 法による自由水面のモデル化の概念は図 2.2.1 に示されている。VOF 法では、本来ステップ関数となる流体の有無を表す関数を計算セル毎に平均化した VOF 関数 F の移流方程式、および表面の向きを逐次的に計算することにより、自由水面の挙動を解析する。ポーラスモデルに基づく VOF 関数 F の移流方程式は、次式で表される。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = \gamma_v S_F \quad (2.2-7)$$

ここに、 S_F は造波ソース項である。

VOF 関数 F は二相流解析等で用いられるボイド率とは異なり、自由水面をシャープに表現するための関数であり、その移流方程式の離散化には表面がぼやけないために特別に工夫されたドナー・アクセプタ法が用いられている。

(4) 数値計算法

数値波動水路 CADMAS-SURF/3D における離散化の格子系には、格子幅を自由に設定できるスタaggered 格子系可変格子が用いられている。時間方向の離散化は、次の 2 種類の方法が採られている。

- ・ Euler 法
- ・ Simplified Marker and Cell (SMAC) 法

本研究では、時間方向の離散化は、Euler 法を基本とし、運動方程式および連続の式の連成には圧力項を陰的に評価する SMAC 法を採用している。

一方、空間方向の離散化は、コントロール・ボリューム法に基づいて離散化されており、また移流項の離散化スキームには次の 5 種類のスキームが組み込まれており、VOF 関数 F 以外の移流項に関しては 4 種類の離散化スキームから選択可能になっている。

- ・ VOF 関数 F 以外の移流項：
 - ① 1 次精度風上差分
 - ② 2 次精度風上差分
 - ③ DONOR スキーム (①と②とのハイブリッド)
 - ④ QUICK スキーム
- ・ VOF 関数 F の移流項：ドナー・アクセプタ法

2.2.2 二相流解析ソフトウェア OpenFOAM

(1) 3次元数値流体解析ツール OpenFOAM の概要

OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation)⁴⁾は、ソースコードが公開されているオープンソースの数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) ツールボックスである。多相流、燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有している。オブジェクト指向プログラミング言語 C++ で開発された偏微分方程式ソルバ開発用のクラスライブラリであり、C++ のシンタックスをフルに活用して高い記述性と拡張性を実現している。

本研究では、OpenFOAM のうち、非圧縮・不混和流体の二相流ソルバである **interFoam** を採用した。

(2) 非圧縮・不混和流体の二相流ソルバ **interFoam** の基礎方程式

基礎方程式は、以下に示す連続式と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式である。

連続式：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2.2-8)$$

Navier-Stokes 方程式 (3次元非圧縮)：

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla \cdot \mathbf{p}^* + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_s \quad (2.2-9)$$

∇ : 3次元領域におけるベクトル微分演算子

\mathbf{U} : 流速ベクトル

ρ : 密度

\mathbf{p}^* : 疑似動圧

$\boldsymbol{\tau}$: 粘性応力テンソル

\mathbf{g} : 重力加速度

\mathbf{f}_s : 表面張力に相当する体積力

(3) 数値計算法

空間の離散化には有限体積法を用いており、流速と圧力は PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 法で解かれる。気液界面の追跡には Ruche と Weller によって改良された VOF (Volume Of Fluid) 法^{5),6)}を用いている。その移流方程式は以下ととおりである。

Ruche と Weller による VOF 法の移流方程式：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2.2-10)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (2.2-11)$$

α : 流体の体積率を表す VOF 値 ($0 \leq \alpha \leq 1$)

\mathbf{U} : 気液相の平均流速

\mathbf{U}_c : 気相と液相の相対流速

ここに、 \mathbf{U}_c は次式で定義されている。

$$|\mathbf{U}_c| = \min[C_\alpha |\mathbf{U}|, \max(|\mathbf{U}|)] \quad (2.2-12)$$

C_α は VOF 値の拡散を抑制するためにユーザーが設定する変数であり、本研究ではデフォルトの設定値 $C_\alpha = 1.0$ を用いている。

(4) 乱流モデルの種類

OpenFOAM で用いることができる各乱流モデルを比較すると次のようになる。本研究の4章の乱流モデルの影響の検証には、LESモデルの動的 Smagorinsky モデルを用いる。

1) RANS モデル (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

時間平均処理のレイノルズ平均に基づくモデルであり、粗いメッシュで設定することができる。おおよその流れのパターンを見ることができるが、平均的な評価となるため正確な渦は表現することができない。実務で最も使用されている乱流モデルである。乱流による平均の圧力損失を得ることができ、 $\kappa-\epsilon$ モデル (渦粘性モデルで2方程式モデル) などがあげられる。

2) LES モデル (Large Eddy Simulation)

空間平均処理に基づくモデルであり、大スケールの渦は表現できる。このサイズの渦を考慮してメッシュ分割を行う必要がある。計算時間が増大するが、実務でも使用され始めている。Smagorinsky モデルなどがあげられる。

3) DNS モデル (Direct Numerical Simulation)

基礎式を仮定せずに直接計算する手法であり、小スケール渦が表現できるように非常に細かくメッシュを分割する必要がある。大小全ての渦が表現でき、最も計算精度が高い。計算時間は膨大となり現在、実務では非現実的な乱流モデル (計算法) である。

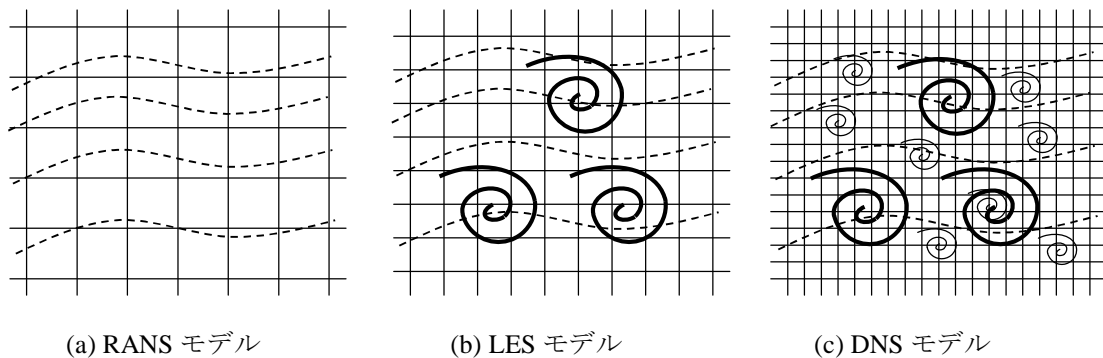


図 2.2.2 乱流モデルの概念

(5) 乱流 LES モデルの基礎式

GS (格子スケール) 流れ場 (\bar{u}_i, \bar{P}) の非圧縮流れの連続式と運動方程式は、以下のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.2-13)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{i,j} + 2\nu \bar{D}_{i,j}) \quad (2.2-14)$$

$$\bar{D}_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2-15)$$

上式を用いると、格子スケール以下の渦を解かなくても良いが、その効果を表す SGS 応力 τ が必要になる。すなわち、 τ がエネルギー消散を表す。

1) 静的 Smagorinsky モデル

Reynolds 応力は以下のように表される。

$$R_{i,j} = -2\nu_{sgs} (\bar{S}_{i,j} - \bar{S}_{k,k} \delta_{i,j}) + 2/3k \delta_{i,j} \quad (2.2-16)$$

ここに、

$$\text{乱流エネルギー: } k = (2c_k / c_e) \Delta^2 \|\bar{S}\|^2 \quad (2.2-17)$$

$$\bar{S}_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2-18)$$

$$\|\bar{S}\| = (2\bar{S}_{i,j} \bar{S}_{i,j})^{1/2} \quad (2.2-19)$$

$$\text{sgs 渦粘性係数: } \nu_{SGS} = c_k \sqrt{k} \Delta \quad (2.2-20)$$

ここに、 Δ : フィルター幅 モデル定数: c_k, c_e

Smagorinsky モデルでは、SGS 応力 τ は

$$\tau = L + C + R \quad (2.2-21)$$

ここに、Leonard 応力 L , Cross 応力 C , Reynolds 応力 R と分解されるが、 $L + C = 0$ と無視されて、 $\tau = R$ と Reynolds 応力に一致する。

OpenFOAM の Smagorinsky モデルでは、モデル定数は $c_k=0.094$ $c_e=1.048$ が用いられている。

2) 動的 Smagorinsky モデル (homogeneousDynSmgorinsky)

Reynolys 応力は、Smagorinsky モデルと同じく以下のように表される。

$$R_{i,j} = -2\nu_{sgs}(\overline{S_{i,j}} - \overline{S_{k,k}}\delta_{i,j}) + 2/3k\delta_{i,j} \quad (2.2-22)$$

ここに、

$$\text{乱流エネルギー: } k = c_i\Delta^2\|\overline{S}\|^2 \quad (2.2-23)$$

$$\text{sgs 渦粘性係数: } \nu_{SGS} = c_d\Delta^2\|\overline{S}\| \quad (2.2-24)$$

$$\overline{S_{i,j}} = 1/2\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right) \quad (2.2-25)$$

$$\|\overline{S}\| = (2\overline{S_{i,j}}\overline{S_{i,j}})^{1/2} \quad (2.2-26)$$

この動的モデルでは、定数 c_i と c_d はシミュレーション時に以下の式によって計算される。

$$c_i = \langle K^*m \rangle / \langle m^*m \rangle \quad (2.2-27)$$

$$c_d = \langle \frac{1}{2}L_{i,j}M_{i,j} / M_{i,j}M_{i,j} \rangle \quad (2.2-28)$$

$\langle \rangle$ は空間平均を意味し、また、

$$K = \frac{1}{2}(\overline{\overline{u_i u_i}} - \overline{\overline{u_i}}\overline{\overline{u_i}}) \quad (2.2-29)$$

$$m = \Delta^2(4\|\overline{\overline{S}}\|^2 - \|\overline{\overline{S}}\|^2) \quad (2.2-30)$$

$$L_{i,j} = \overline{\overline{D_{i,j}}} - \overline{\overline{D_{k,k}}}\delta_{i,j} \quad (2.2-31)$$

$$M_{i,j} = \Delta^2(\|\overline{\overline{S}}\|(\overline{\overline{S_{i,j}}} - \overline{\overline{S_{k,k}}}\delta_{i,j}) - 4\|\overline{\overline{S}}\|(\overline{\overline{S_{i,j}}} - \overline{\overline{S_{k,k}}}\delta_{i,j})) \quad (2.2-32)$$

$$\overline{\overline{D_{i,j}}} = \frac{1}{2}(\overline{\overline{u_i u_j}} - \overline{\overline{u_i}}\overline{\overline{u_j}}) \quad (2.2-33)$$

1重、及び2重の‘ $\overline{\overline{\quad}}$ ’はフィルターを1重および2重で掛けたことを意味する。

2.3 3次元構造解析ソフトウェア SeanFEM

2.3.1 解析ソフトウェア概要

本研究で用いた非線形動的解析ソフトウェア⁷⁾は、ファイバーモデルを採用している。ファイバーモデルの要素（以下、「ファイバー要素」と呼ぶ）は、材料非線形性が正確に表現できる梁要素である。さらに、本解析ソフトウェアは、幾何学的非線形性を考慮した要素の定式化を行っている。

2.3.2 動的解析手法

本研究で使用した動的解析ソフトウェアは、動的解析手法としてニューマークの β 法を採用している。

外力 $\mathbf{p}(t)$ が作用する場合の橋梁の運動方程式を示すと次式となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}(t)\mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (2.3-1)$$

ここに、 \mathbf{M} は質量マトリックス、 \mathbf{C} は減衰マトリックス、 $\mathbf{K}(t)$ は剛性マトリックス、 $\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}$ はそれぞれ変位ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトルである。また、 $\mathbf{p}(t)$ は外力で、地震動加速度を $\ddot{\mathbf{z}}$ とすると、一様加震の場合、 $-\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}}$ のようになる。ここに、 \mathbf{I} は単位ベクトルを表す。

ニューマークの β 法の公式を増分表現にすると、次式のようになる^{例えぼ7)}。

$$\Delta\mathbf{u} = \dot{\mathbf{u}}_n\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{u}}_n\Delta t^2 + \beta\Delta\ddot{\mathbf{u}}\Delta t^2 \quad (2.3-2)$$

$$\Delta\dot{\mathbf{u}} = \ddot{\mathbf{u}}_n\Delta t + \frac{1}{2}\Delta\ddot{\mathbf{u}}\Delta t \quad (2.3-3)$$

$$\Delta\ddot{\mathbf{u}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{u}} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}(t)\Delta\mathbf{u} + \mathbf{M}^{-1}\Delta\mathbf{p} \quad (2.3-4)$$

ここに、

$$\Delta\mathbf{u} = \mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n, \quad \Delta\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}_{n+1} - \dot{\mathbf{u}}_n$$

$$\Delta\ddot{\mathbf{u}} = \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} - \ddot{\mathbf{u}}_n, \quad \Delta\mathbf{p} = \mathbf{p}_{n+1} - \mathbf{p}_n \quad (2.3-5)$$

式(2.2-2)～(2.2-5)を変位増分 $\Delta \mathbf{u}$ について解くと、

$$\Delta \mathbf{u} = \bar{\mathbf{K}}^{-1} \bar{\Delta \mathbf{p}} \quad (2.3-6)$$

ここに、

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K}(t) + \frac{1}{2\beta\Delta t} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta\Delta t^2} \mathbf{M} \quad (2.3-7)$$

$$\bar{\Delta \mathbf{p}} = \Delta \mathbf{p} + \mathbf{M} \left[\frac{1}{\beta\Delta t} \dot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{u}}_n \right] + \mathbf{C} \left[\frac{1}{2\beta} \dot{\mathbf{u}}_n + \left(\frac{1}{4\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{u}}_n \Delta t \right] \quad (2.3-8)$$

また、 $\Delta \dot{\mathbf{u}}$ 、 $\Delta \ddot{\mathbf{u}}$ は式(2.2-6)の $\Delta \mathbf{u}$ を用いて次式より求められる、

$$\Delta \dot{\mathbf{u}} = \frac{1}{2\beta\Delta t} \Delta \mathbf{u} - \frac{1}{2\beta} \dot{\mathbf{u}}_n - \left(\frac{1}{4\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{u}}_n \Delta t \quad (2.3-9)$$

$$\Delta \ddot{\mathbf{u}} = \frac{1}{\beta\Delta t^2} \Delta \mathbf{u} - \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{\mathbf{u}}_n - \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{u}}_n \quad (2.3-10)$$

なお、 $\bar{\mathbf{K}}$ を等価剛性、 $\bar{\Delta \mathbf{p}}$ を等価荷重と呼ぶ。式(2.3-6)～(2.3-10) を繰返して外力 $\mathbf{p}(t)$ による橋梁の津波応答時刻歴波形を求めることができる。

ニューマーク 法を用いた増分式の計算において、もっとも計算時間を要するのは式(2.3-6)の計算である。すなわち、動的解析においても静的解析と同じように高速化すべき点は、連立1次方程式の数値解法である。

大規模な連立1次方程式の解法として、直接法と反復法がある。マトリックスのサイズが億レベルのような大規模な連立1次方程式の解法として、速いコンピュータ（ベクトル計算機、並列計算機等）を前提にした SCG 法や ICCG 法などの反復法が注目されている。しかし、ここでは、通常の対象橋梁を前提にすれば、これほど次数は大きくならないため、安定性を優先し直接法の中から採用が考えられる。行列の次数や、行列の特性（スパース性、対称性など）により、最適は計算手法が決まってくる。この場合、コンピュータの性能（メモリ容量、ディスク容量、キャッシュ容量等）にも影響される。

ファイバーモデルは、FEM シェル要素やソリッド要素の場合と比較して、それほど次数やフロント幅が大きくなり、対角優位のスパースマトリックスとなる。したがって本研究では、このような条件を満たす計算手法のなかで、スカイライン法を採用している。

2.3.3 津波波力の入力方法

動的解析において，対象橋梁の質量行列**M**，減衰行列**C**，剛性行列**K(t)**および，この対象橋梁に作用する津波波力を**p(t)**としたときの運動方程式を改めて示すと式(2.3-11)のようになる．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}(t)\mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (2.3-11)$$

図 2.3.1 は，津波波力**p(t)**をファイバー要素で離散化した橋梁モデルの各節点に作用させた橋梁の津波応答解析のイメージ図である．

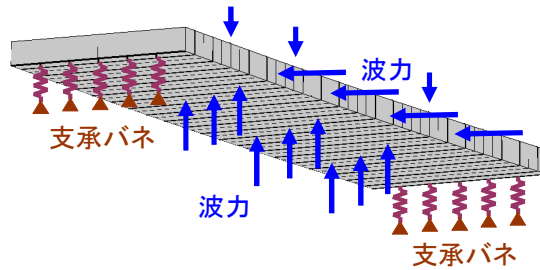


図 2.3.1 動的解析モデルおよび入力津波波力(イメージ図)

参考文献

- 1) (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.
- 2) (財) 沿岸技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，2001.
- 3) (財) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，2008.
- 4) 一般社団法人オープン CAE 学会：OpenFOAM ユーザガイド和訳 Version 2.2.0, 2013.
- 5) Rusche, H. : Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, pp.152-154, 2002.
- 6) Weller, H. G. : Derivation, modeling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations, Technical Report TR/HGW/02, Nabla Ltd., p29, 2002.
- 7) 野中哲也, 吉野廣一：ファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析，丸善, 2010.

第3章 津波により桁流出した床版橋の再現解析と水路実験

3.1 まえがき

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、上部構造が流出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)}。その研究成果として、橋梁の上部構造の流出メカニズム等が解明されてきている。

これまでの津波による橋梁の応答特性に関する研究は、実験を中心とした研究であるが、本研究では、理論的方法に基づく数値解析によって津波による橋梁の応答特性を解析的に調べる。

本章では、東北地方太平洋沖地震による津波で被災した橋梁の中で、コンクリート桁が流出した床版橋を対象にして再現解析を試み、さらに解析方法の検証のために水路実験結果との比較を示す。本章で示す再現解析の方法は、坂本ら⁵⁾によって初めて提案された方法で、後節3.3に示すように3段階の解析方法を組み合わせたハイブリッド法である。すなわち、従来の2次元津波解析によって得られる河口域の津波高と流速分布（ステップ1の解析結果）を、橋梁を含む周辺地域を3次元的にモデル化した3次元津波解析領域の境界に入力し、橋梁に作用する津波波力を求める（ステップ2の解析結果）。最後に、この津波波力を3次元非線形橋梁応答解析モデルに入力し橋梁の津波応答挙動を求める（ステップ3の解析結果）。ただし本解析法では、津波と構造物応答の相互作用は小さいと仮定し、この相互作用は考慮していない。

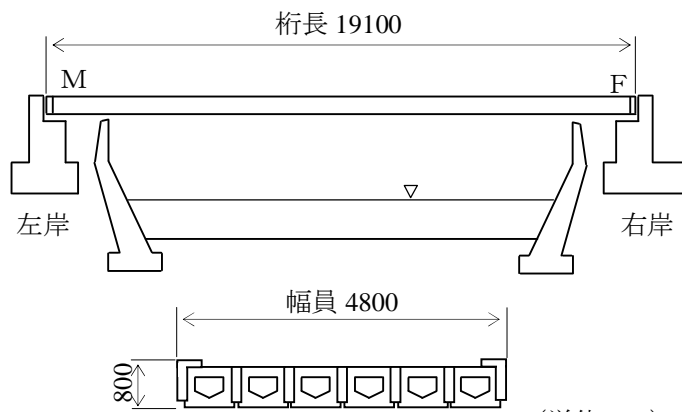
3.2 被害状況

千葉県九十九里浜の野中川河口にかかる橋梁桁が、東日本大震災の津波により流出した。本橋梁は、図3.2.1に示すように海岸線に沿って延びる自転車道の床版橋（橋長19.1m）で、道路橋に並行して架けられている。流出した桁は、重量が約1500kNのコンクリート桁で、桁下面にはほとんど凹凸がない（図3.2.1(b)参照）。常時の水深は1.0mで、2.6mの桁下高さ（空間）が確保されている。

道路橋の方は、ほとんど被害はなかったが、対象橋梁は、図3.2.2と図3.2.3の写真で示すように、桁が流出し、隣接の道路橋の上に移動した。移動した桁は、あまり損傷が見られず、桁全体が浮上し、道路橋桁の上に着地（図3.2.2）したと想像できる。床版橋の桁が移動した後には、図3.2.3からわかるように、水平支承の役目をするアンカーバーだけが残された。このアンカーバーの状態は



(a) 対象橋梁の位置



(b) 対象橋梁の寸法 (単位:mm)

図 3.2.1 対象橋梁



図3.2.2 流出した桁



図3.2.3 桁流出後のアンカーバー

番号 1 と 2 のアンカーバーは多少曲がっているが、残りの番号 3～5 は垂直に立ったままとっている。アンカーバーの状態から、桁の右側（海側）の方が上方に浮上り、その後、左回り（半時計回り）で回転しながら桁が移動したものと推測できる。

3.3 再現解析の方法

本研究における解析は、津波による流体解析とその解析により得られた波力による構造解析の 2 種類からなる。本来は、津波（流体）と橋梁（構造）の連成挙動を考慮した解析を実施するところであるが、対象橋梁の桁が流出するかどうかに着目したため、最初に流体解析を実施して、その結果をもとに構造解析するという方法を採用した。

沖合から対象橋梁に向かって来襲する津波により、対象橋梁に直接、津波の波力が作用し、その波力によって対象橋梁がどのような挙動を示すか（損傷メカニズム）を解明するため、本研究では、図 3.3.1 に示すような解析手順を提案する。

ステップ 1 では、非線形長波理論による 2 次元津波解析を実施する。これにより、津波の波源位

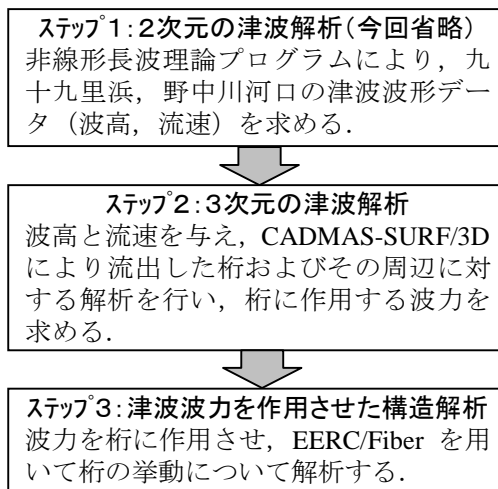


図 3.3.1 解析手順

置(断層位置)から橋梁周辺までの津波の挙動(波高と流速)がわかる。なお、本研究では、対象橋梁の河口沖合で津波高さが観測されていたため、その値を用いるものとし、ステップ1を省略した。

ステップ2では、ステップ1で得られた波高や流速を基に、解析の入力となる波状段波(作用する波の波高と流速の時刻歴データ)を定義する。今回は、観測された津波高さから波状段波を定義した。この波状段波を沖合の開境界から入力させる差分法による3次元津波解析を実施し、対象橋梁のコンクリート桁に発生する圧力を求める。本解析では、解析ソフトCADMAS-SURF/3D⁶⁾を用いた。この解析ソフトは、非圧縮性流れの数値解析を行うものであり、自由液面流れの数値解析法にVOF法を採用している。格子で囲まれた解析領域をセルで分割し、圧力変数をセル中心に、流速変数をセル境界に配置するスタガード格子が用いられている。

ステップ3では、コンクリート桁と支承部をモデル化した解析モデルに対して、ステップ2で得られた圧力を波力に変換し、その波力を作用させる時刻歴応答解析を実施する。本解析では、解析ソフトEERC/Fiber6⁷⁾(Ver.1.3)を用いた。この解析ソフトは、解析モデルとしてファイバーモデルが採用され、弾塑性有限変位解析が行える。作用荷重としては、動的な外力(波力)以外に地震力(加速度波形)も作用させることができる。

以上のような解析法は、津波波源特性・伝播特性・橋梁周辺の津波特性の3要素を考慮した津波による橋梁の応答挙動を評価することができる1つの理論的方法であるといえる。このような理論的方法は、津波波源特性・伝播特性・橋梁周辺の津波特性と橋梁特性によって多様な津波応答挙動を示すと考えられる橋梁の津波応答を予測できるので、今後の橋梁の耐津波設計や対策に役立つものと思われる。

3.4 床版橋の流出解析における津波解析

3.4.1 解析条件および解析モデル

前述の理論的方法の手順（図 3.3.1）に従って，差分法による津波解析を行う．検討対象の床版橋と隣接の道路橋の 2 橋をモデル化する．沖合いから対象橋梁まで川幅が徐々に狭まる河口近辺の形状から，3次元津波解析が必要である．

図 3.4.1 に 3次元の有限差分の解析モデルを示す．平面上の解析領域（160m×110m）に対して，0.5m メッシュ（以降，「セル」と呼ぶ）基本として分割する．高さ（15m）方向には，高さ方向の圧力分布を考慮して 0.2m で分割している．合計で 5280000(=320×220×75)セルの解析モデルとなっている．図 3.4.1(a)において，陸側に斜線の領域があるが，これは対象橋梁を通り過ぎた津波が反射しないように設定したものであり，ダミー的に海水領域として定義した．同図(b)における水深 1m は，津波が来襲する前の水深である．

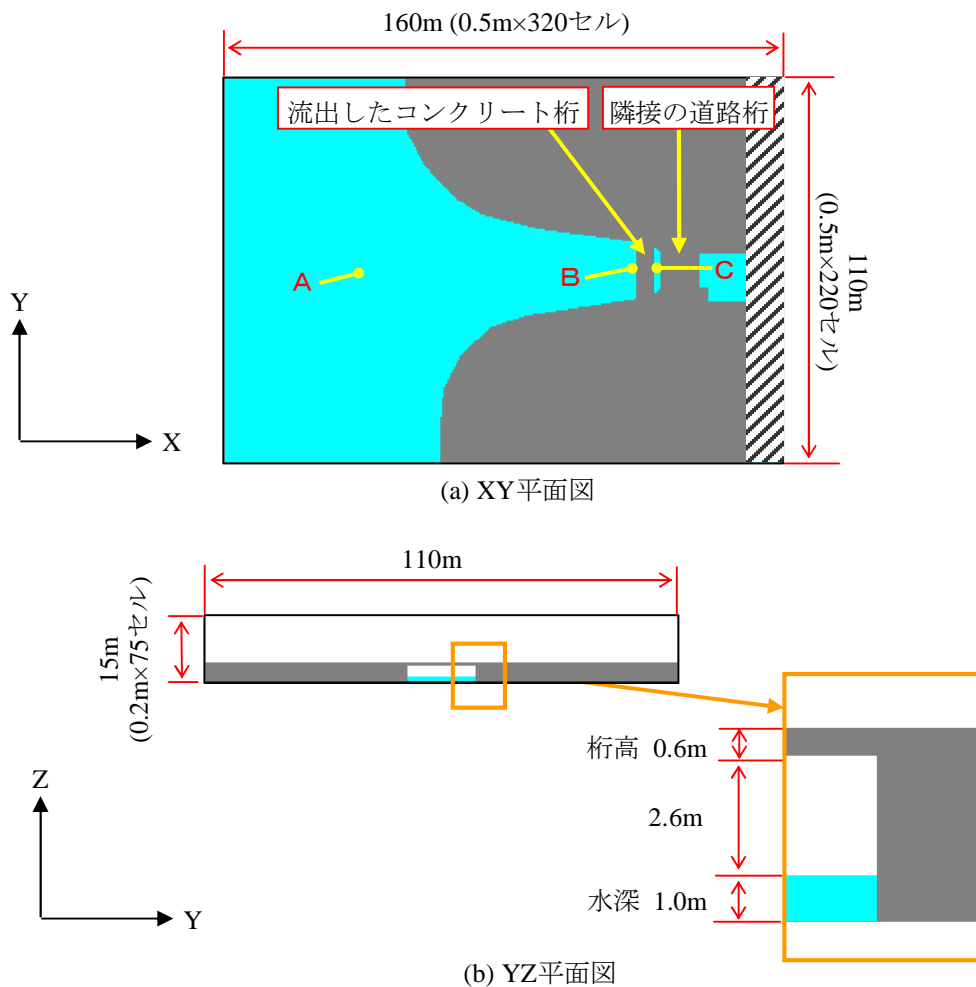


図3.4.1 津波解析の条件

3.4.2 段波の定義

津波が深いところから浅いところへ向かうときに（例えば、河川を遡上するときに）、津波の波頭部で段波になることが知られている。本解析では、対象橋梁に作用させる津波として、次のような波状段波を仮定した。前述の解析領域の開境界（図 3.4.1(a)の解析領域の左端）において、水位変動と流速変動を与える必要がある。

水位変動については、対象橋梁の河口沖合いで観測された津波高さ 2.2m を入力段波波高の最大高さとして仮定した。筆者らが過去に実施した水理実験の波状段波の水位変動計測結果（文献 6）の 4.5.1 参照）をもとにフルードの相似則に従って波高と時刻を設定し、図 3.4.2(a)に示すような今回の波状段波を定義している。

また、流速変動については、文献 8)における図-7 と式(21)を参考にして、図 3.4.2(b)のように算出した。なお、この流速を水底から水表面まで一様な分布とする。以上のように定義した津波を、前述した図 3.4.1(a)の解析領域の左端（沖合い側）の開境界（入射境界）から作用させる。

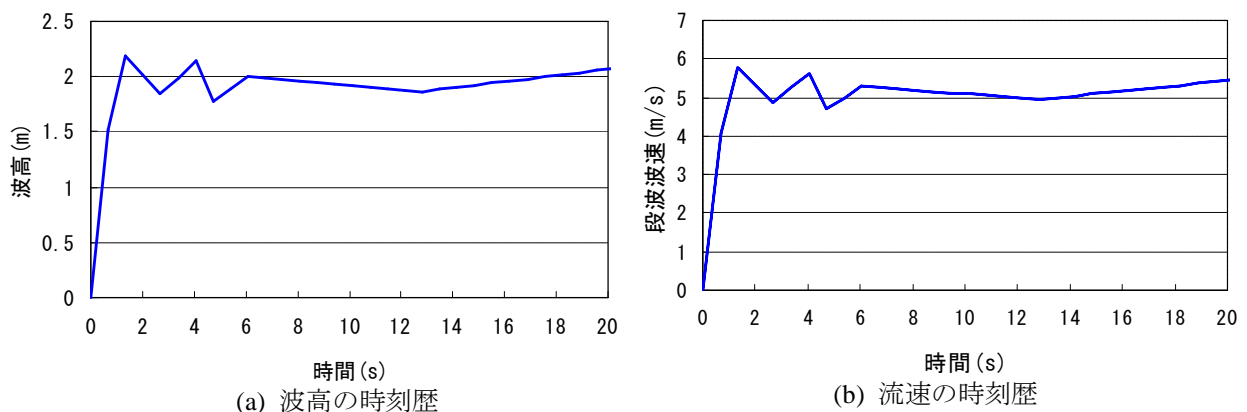


図3.4.2 作用させる津波

3.5 津波解析の結果

3.5.1 全体挙動

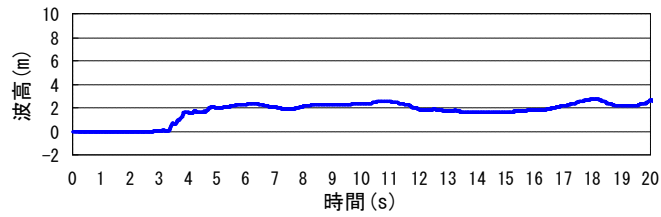
解析領域の左端から段波状の津波が来襲して、20 秒間津波解析を実施した。その解析結果を図 3.5.1 に示す。この図から、河口側から津波が徐々に押し寄せ、約 15 秒～16 秒で対象橋梁に達し、床版の上を越波していく様子がわかる。沖合いの津波高さが 2.2m であるが、川幅が徐々に狭くなっているため、対象橋梁に進行するにつれて水位が上昇し続けていくこともわかる。もし、河口から一定の川幅（水深も変化なし）であれば、津波高さ 2.2m のままで津波が来襲し、桁下が 2.6m あるため、津波が桁には当たらないことになる。



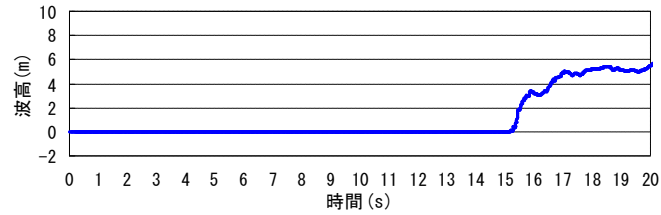
図3.5.1 津波解析の結果

3.5.2 波高

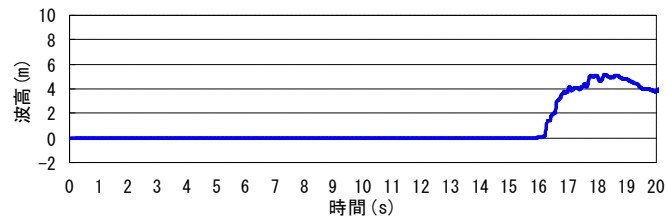
前述した図 3.4.1(a)内の 3 点 (A,B,C) の位置での津波高さの履歴を、図 3.5.2 に示す。この図より、沖合側から津波が来襲して A 点を通過後、15 秒を過ぎてから B 点に達していることがわかる。また、B 点で最大約 5.5m の波高となった。沖合の津波高さが 2.2m であったので、河口の形状等により沖合いの津波高さから 3.3m 水位が上昇したことになる。



(a) 位置 A



(b) 位置 B



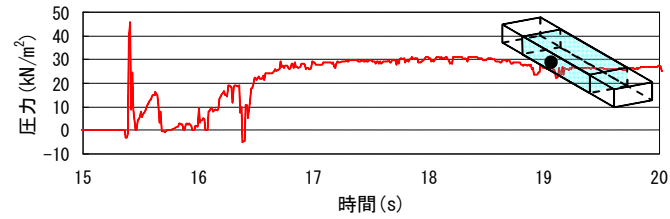
(c) 位置 C

図3.5.2 解析結果の波高の時刻歴

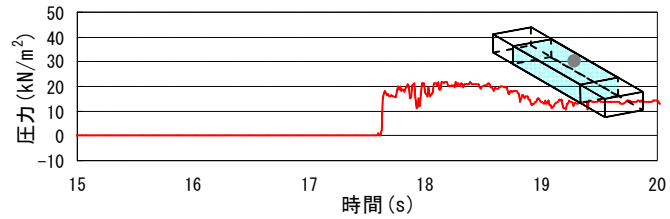
3.5.3 桁に作用する圧力

床版橋の桁に作用する圧力を示すと図 3.5.3 のようになる。この図は、代表点として桁中央の前面と背面、底面と上面の圧力の時刻履歴応答を示している。その圧力は、各面において幅（幅員）方向にも変化しているが、幅方向の中心位置での値である。桁全面に対して、ほとんどが圧縮側（正の値で押す力）となっているが、底面と上面の圧力差が、桁を浮上らせる力となる。幅方向の端部位置では、この差が中央位置と異なり、浮上る力は幅方向において一様ではない。

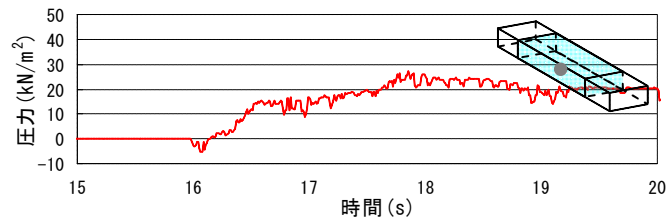
桁前面に着目すると、15秒を過ぎて急激に大きな圧力が生じ、最大値を示した後は、一度低下することがわかる。この最大値は、最初の波の衝突によるものである。低下後は再度上昇する。これは、後の波が次々と押し寄せてくるためである。圧力は、まず前面に生じた後に底面に生じ、遅れて上面、背面と生じ、桁が全方位から圧されていることもわかる。また、底面の上向きに押し上げる圧力の方が、上面の下向きに押しえつける圧力より大きくなっている。



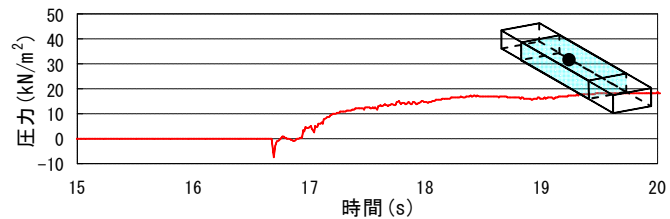
(a) 位置—前面中央



(b) 位置—背面中央



(c) 位置—底面中央



(d) 位置—上面中央

図3.5.3 桁に作用した圧力

3.6 床版橋の流出解析における橋梁の津波応答解析

3.6.1 橋梁の津波応答解析の条件と解析モデル

津波解析結果から求めた波力を外力とする構造解析のための解析モデルを図 3.6.1 に示す。この図からわかるように対象橋梁の桁と支承（アンカーバーと鉛直支承）をモデル化し、橋台は省略した。桁をファイバーモデルでモデル化し、断面方向の分割については、幅員方向に 50 分割、桁高さ方向に 6 分割とした。

また、桁に対して正確に波力を作用させるために、桁の表面に節点を配置（図 3.6.2 参照）し、その節点に波力を作用させることにした。橋梁の形状により直接津波波力が作用しない桁両端側の節点には荷重を設定していない。配置した節点とファイバー要素の構成節点は、剛体処理（ファイバー要素の構成節点を主節点、桁の表面に配置した節点を従節点と定義）されている。

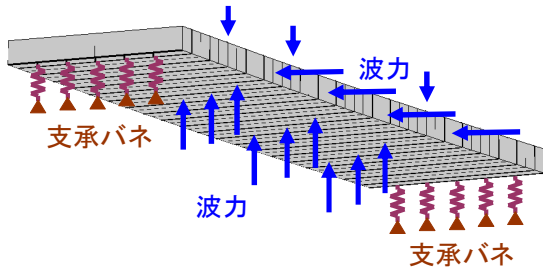


図3.6.1 構造解析の床版橋のモデル化

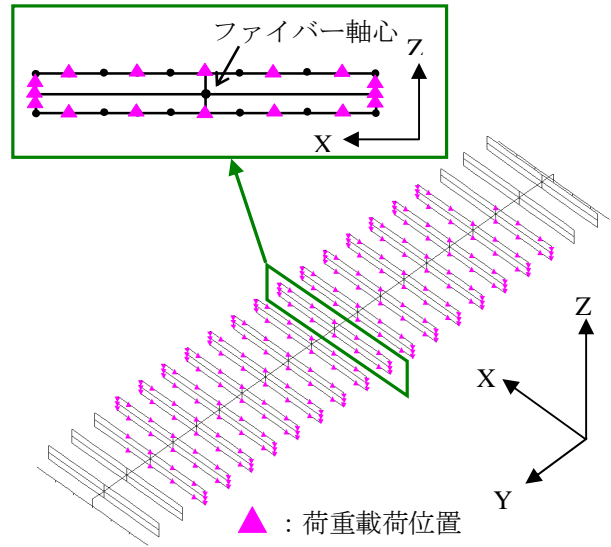


図3.6.2 波力を作用させる桁上の位置

3.6.2 桁に作用させる波力

津波の波力が作用する（接する）桁表面全てに対して、波力を作用させる。前述した津波解析により求めた圧力を、前述の桁表面に配置した節点間隔に合わせて波力（節点荷重）に変換する。その場合、前述の圧力の時刻歴データが細かく値が変動しているため、作用させる波力については移動平均で平滑化した。平滑化した代表的な波力の時刻歴として、図 3.6.2 内の拡大した桁中央、また桁幅方向中央の断面位置における波力を図 3.6.3 に示す。波力の符号は解析モデルの全体座標系での符号であり、前述した図 3.5.3 の圧力と符号が異なる。

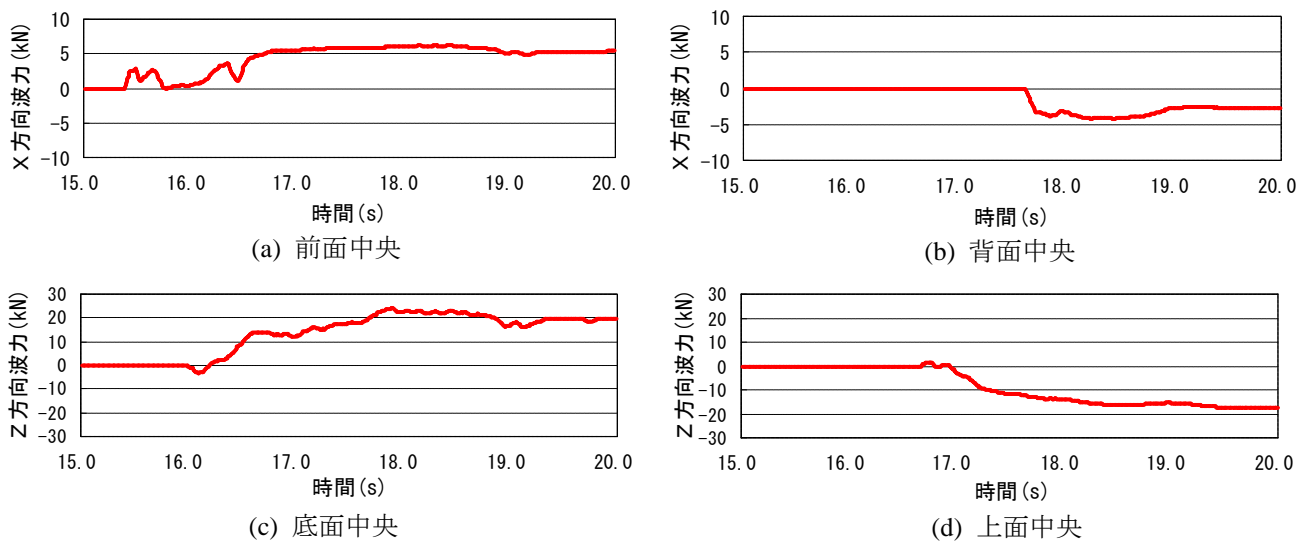


図3.6.3 作用させる波力

3.6.3 荷重作用点数と死荷重載荷解析

求まった波力を荷重として、時刻歴応答解析を実施する。荷重作用点は、前述した桁周囲の節点であり、本解析では 230 節点となった。

なお、時刻歴応答解析を実施する前に、桁の自重による死荷重載荷解析（静的解析）を実施した。

3.7 橋梁の津波応答解析の結果

3.7.1 支承の応答特性

波力を作用させた構造解析の結果を、図 3.7.1 に示す。桁端部でアンカーバー（水平支承）が 5 個、ゴムパッド（鉛直支承）が配置されているが、この図のグラフは一番大きな応答値を示す河口側位置での鉛直反力と水平反力を死荷重反力で正規化して示した反力の時刻歴応答である。

鉛直反力については、河口側から中央までの支承で、両岸で約 16.5 秒時に負反力（桁が浮上る力）が発生している。河口形状が左右対称でないため、左岸側の反力の方が大きく、死荷重反力の 0.74 倍の大きな負反力となっている。このような負反力が発生することから、対象橋梁の桁が浮上ったと考えられる。

なお、鉛直反力のグラフにおいてゼロではなく -1 から応答が開始しているのは、最初に死荷重を作用させているからである。

水平反力についても両岸の支承で発生するが、鉛直反力に比べて小さくなっている。対象橋梁のような一般的な床版橋の支承においては、水平反力が $3k_h R_d (=0.63R_d)$; R_d は死荷重反力、 k_h は水平設計震度 0.21) で降伏に達すると考えてよいため、グラフ内に $3k_h R_d$ のラインを示している。右岸側の水平反力が大きな値を示しているが、 $3k_h R_d$ 以下であるため降伏には達しない。ただし、前述の浮き上りにより、5 本のアンカーバー全てでは受持つことができず、少ない数（例えば、解析で負反力が生じない図 3.7.2 の拡大写真の 1,2 番の 2 本）で受け持つ状態になった場合には、そのアンカーバーは損傷する（曲がる）ことも考えられる。

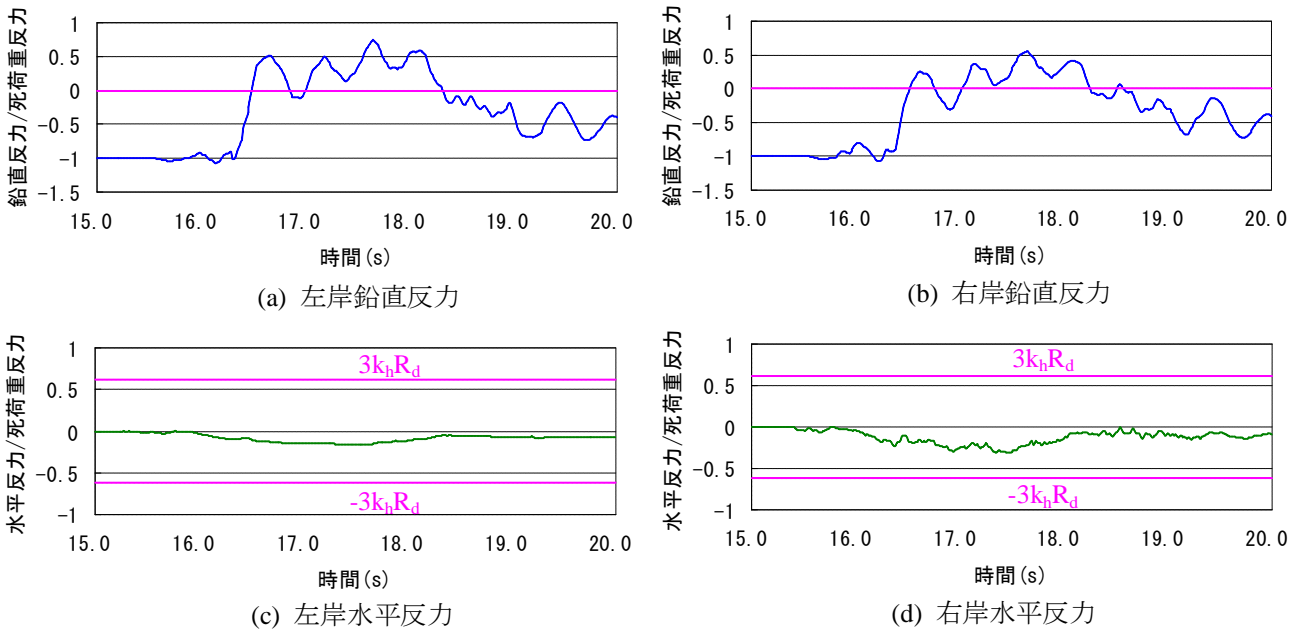


図3.7.1 波力構造解析の結果（支承の応答履歴）

3.7.2 桁の挙動

津波が作用した桁の挙動を予測するため、浮上りが表現できるように解析モデルを変更して、再度解析を実施することにした。前述の解析モデルでは、図 3.6.1 の支承バネが剛な線形バネとなっていたが、それを鉛直方向の浮上りだけを許す非線形バネに全て変更した。均等に床版下面に荷重を作用すれば水平に保ったまま桁全体が浮上るようになっている。

解析モデル変更後の解析結果の変形図を図 3.7.2 に示す（なお、アンカーバーのように見える線は、支承バネの構成節点を結んだ線であり、アンカーバーではない）。この図は、最初に桁が浮上った約 16.5 秒時点の変形状態を示している。桁自体はほとんど変形せず（たわまず）、桁の浮上り状態においては河口側の方が大きく浮上り、桁全体が回転しながら浮上っているのが確認できる。このような挙動を示すことから、3～5 番のアンカーバーが鉛直に立ったままで、1,2 番のアンカーバーが曲がっているという現象を説明できる。なお、ファイバーモデルでモデル化した桁自体の応答は、桁のコンクリートや鉄筋は降伏せず弾性範囲であった。

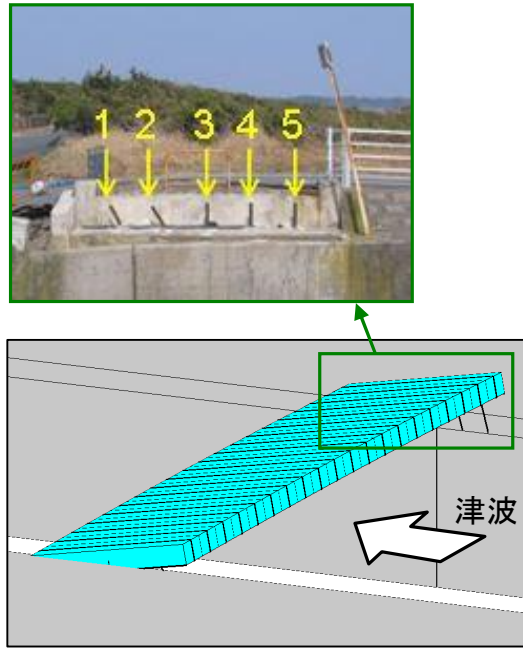


図3.7.2 桁の浮上り（支承バネ変更）

3.8 隣接道路橋の影響

本検討の流出したコンクリート桁の周辺条件の特徴の1つは、上流側に隣接する道路橋の存在である。図3.8.1は、前述の解析結果における流速ベクトルのスナップショットである。この図より、津波が隣接する道路桁に当たって反射し、2つの桁間の流速場に影響を与えることがわかる。隣接道路橋の存在が、コンクリート桁に生じる波圧にどのような影響を与えるかを調べるために、図3.8.2に示すような道路橋桁を取り除いたモデルで津波解析を実施した。解析モデルのセル分割、作用させる津波など、その他の解析条件は、道路橋有りの解析モデル（図3.4.1）と同様である。

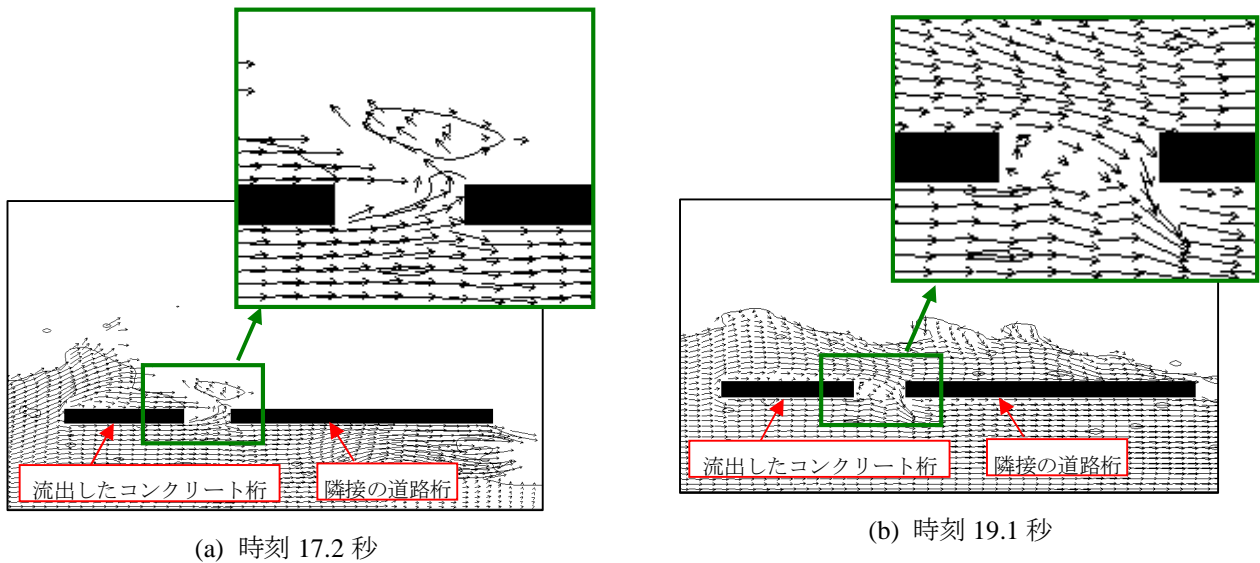


図3.8.1 流速ベクトル

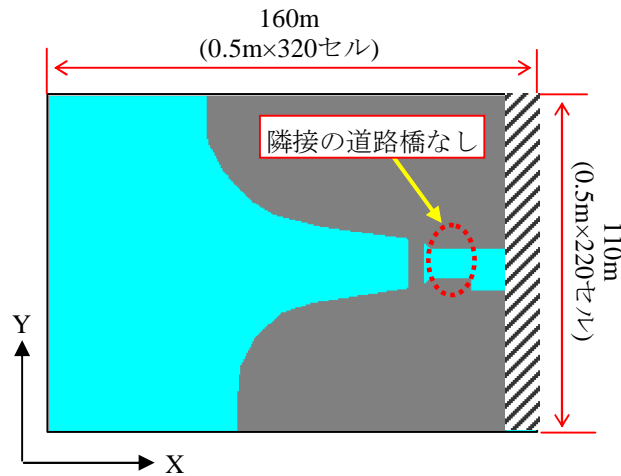
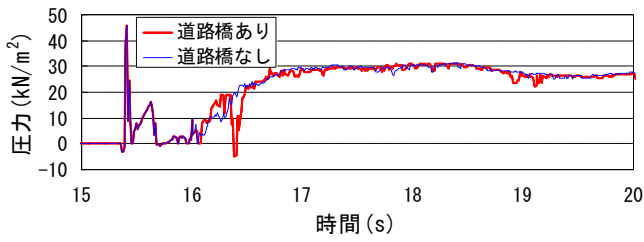


図3.8.2 道路橋の無い津波解析の条件(XY平面図)

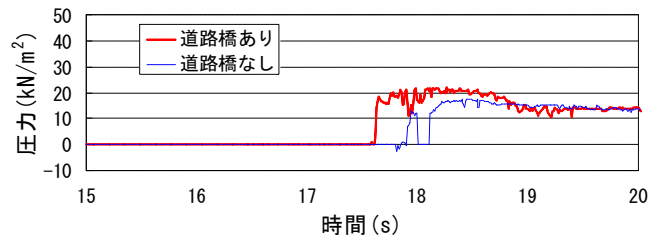
図 3.8.3 に、道路橋有り と道路橋無し の場合の波圧の比較を示す。図 3.5.3 と同様に、代表点として桁中央の前面と背面、底面と上面の圧力の応答時刻歴を示している。図 3.8.3(a) に示す前面の波圧時刻歴では、16.4 秒前後に道路橋が有る場合に圧力が一旦下がる現象が見られるが、道路橋無しでは見られない。圧力の最大値についてはほぼ同じである。同図(b) に示す背面では、波圧が発生する時刻にも違いが見られ、道路橋有りの方の圧力の最大値が約 24% 大きくなっている。これは道路橋からの反射波が原因であると考えられる。

図 3.8.3 の(c) と(d) に示す波圧時刻歴では、より桁の浮き上がりへの影響が大きい底面と上面の波圧について、道路橋有り と道路橋無し の応答の傾向は、ほぼ同じとなっている。最大値については、底面では道路橋有りの方が 14% 程度大きくなり、上面ではほぼ同じとなっている。多少の差はみられるものの、大きな違いはない結果となっている。

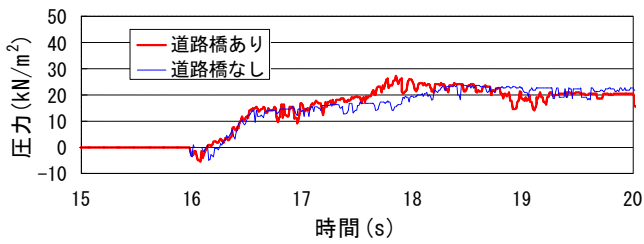
隣接道路橋が無い場合での津波解析から得られる津波波力を与えて橋梁の応答解析を行い、得られた支承の応答時刻歴を図 3.8.4 に示す。鉛直反力については、左岸支承では河口側から 3 本、右岸支承では河口側から 2 本の支承で負反力が生じ、最大値は左岸側で死荷重反力の 0.63 倍となった。道路橋が有る場合の 0.74 倍から少し減少したが、負反力が生じることから、道路橋が無い場合も対象桁は浮き上がったと考えられる。また、水平反力については道路橋有りと同様に $3k_h R_d$ 以下となった。



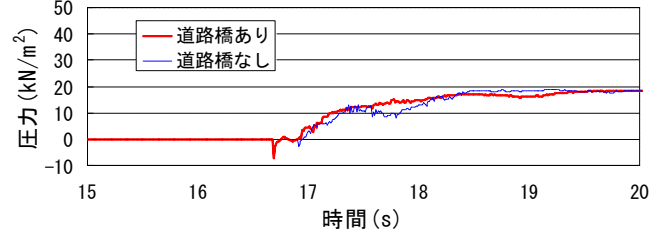
(a) 位置－前面中央



(b) 位置－背面中央

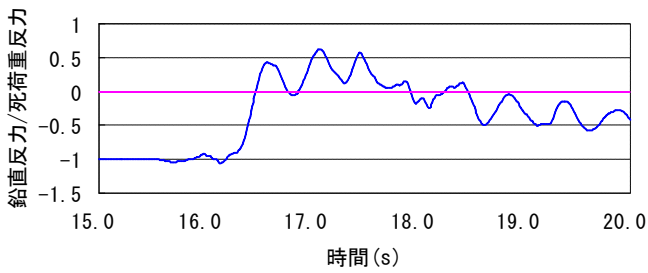


(c) 位置－底面中央

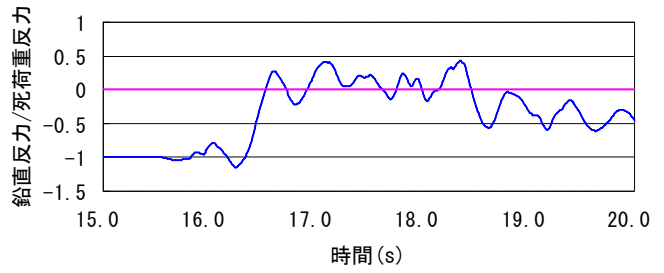


(d) 位置－上面中央

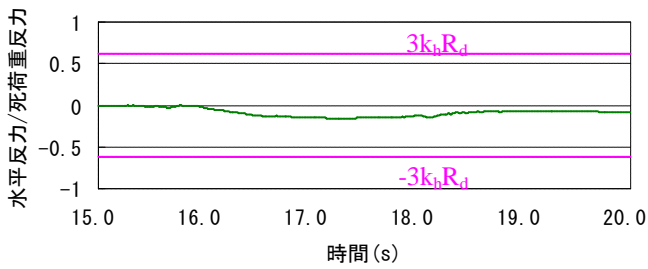
図3.8.3 隣接道路橋の影響比較（桁に作用した圧力）



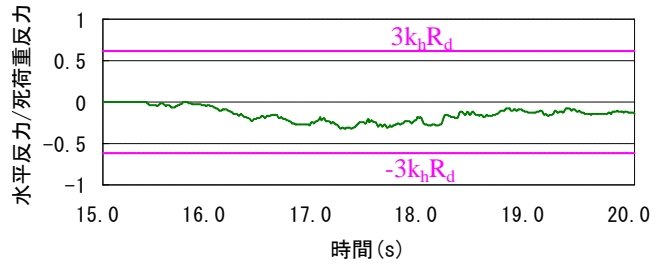
(a) 左岸鉛直反力



(b) 右岸鉛直反力



(c) 左岸水平反力



(d) 右岸水平反力

図3.8.4 隣接橋が無い場合の橋梁津波応答（支承の応答時刻歴）

3.9 水路実験

3.9.1 実験概要

前述の解析の妥当性を確認するために、水路実験を行ったので、その内容を記述する⁵⁾。水路模型は、対象とした橋梁規模の約 1/50 のスケールとし、長さ 12m、幅 0.4m、高さ 0.4m の開水路で行った。水路床は水平であり、水路幅は一定である。実橋梁のような河口から徐々に川幅が狭まる地形は再現していない。

図 3.9.1 にその概要を示す。ここでは、水路上流部に設けたゲートを急開する方法で水路内に段波を伝播させた。ゲート上流の初期水深 h_1 は 0.2m と 0.3m の 2 パターンで行い、ゲート下流の初期水深 h_2 は 0.02m、初期水面から桁下までの長さ h_3 は 0.056m とした。桁高 h_4 は 0.012m である。

本実験では、道路桁模型を設置する道路橋有りの場合と取り外して行う道路橋無しの 2 つの場合で、波圧計の設置位置を対象桁の上面と下面の front, middle, rear と変えて、それぞれの条件につき 3 回ずつ実施した。桁高が 0.012m と小さいため、桁前面と背面には波圧計を設置していない。

図 3.9.2 は水路実験（道路橋無し）の様子を示している。

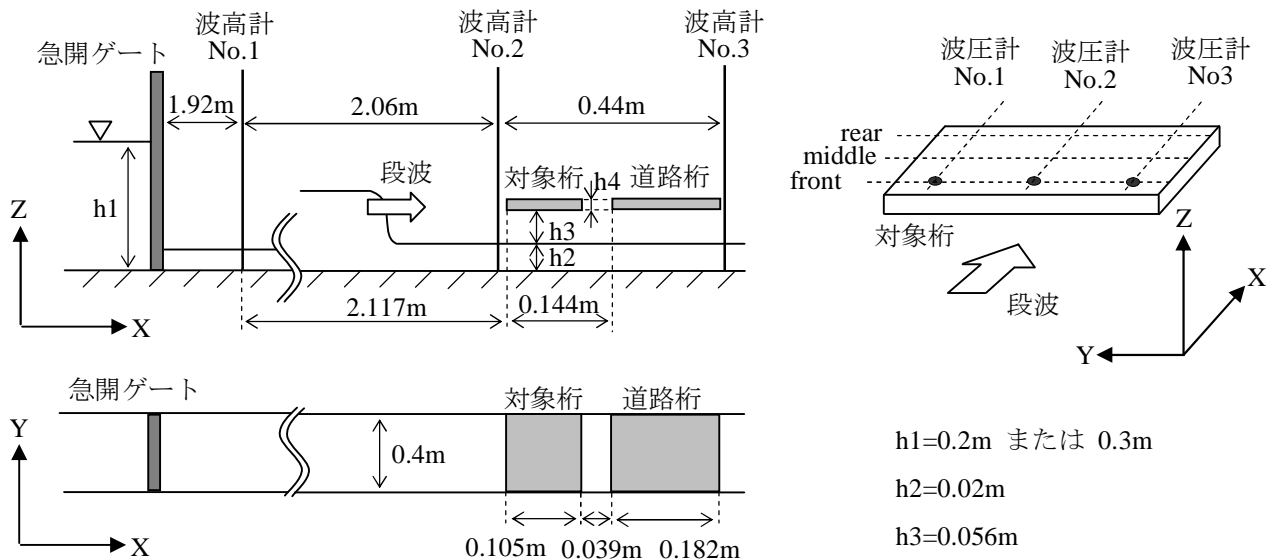


図 3.9.1 水路模型実験の概略

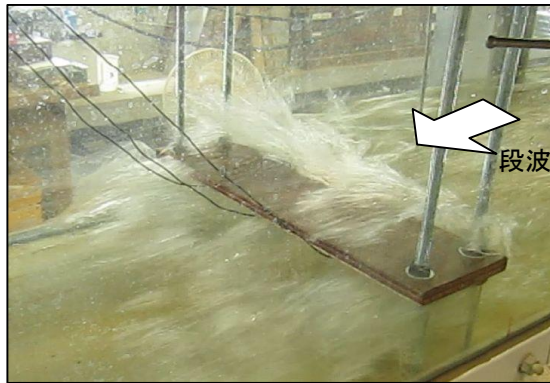


図3.9.2 水路実験（道路橋無し）

3.9.2 実験結果の再現解析

実橋梁と同様に，解析ソフト CADMAS-SURF/3D[®]を用いて水路模型実験のモデル化を行い，解析を行った．図 3.9.3 に解析モデルを示す．模型構造が奥行き方向について一定であることから奥行き方向の格子を 1 として簡略化した 2 次元モデルとしている．解析領域の左端から，実験の波高計 No.1 の波高を入力段波として与えた．

図 3.9.4 は，解析結果と実験結果の波圧を比較したものである．両者を比較すると，波圧が生じ始めてから一定時間が経過し，波圧の時刻歴が安定した 4～5 秒程度での波圧は概ね一致している．波圧が発生する立ち上がり時間については，道路橋有りの場合では，ほぼ一致している．しかし，道路橋無しの立ち上がり時刻には，解析結果と実験結果には 11 秒程度の差が生じている．これは，図 3.9.2 に示すように実験においてもまた解析においても，波の先端が砕波し気泡を多量に含んだ状態で桁に衝突しているため，桁衝突時における現象の再現性が低くなっているものと考えられる．

しかし，桁の浮き上がりに大きく影響する安定してからの波圧は，再現できているので，この程度の精度で解析的方法は実験値を再現することができているといえる．

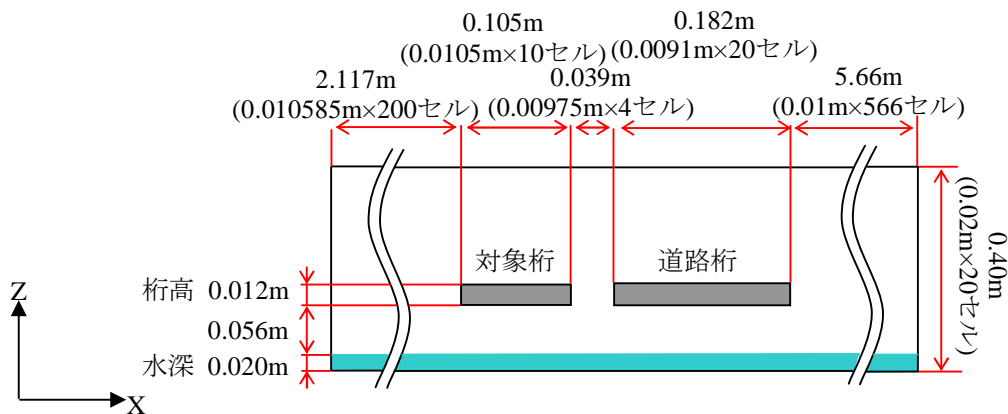


図 3.9.3 水路実験解析モデル（道路橋ありのケース）

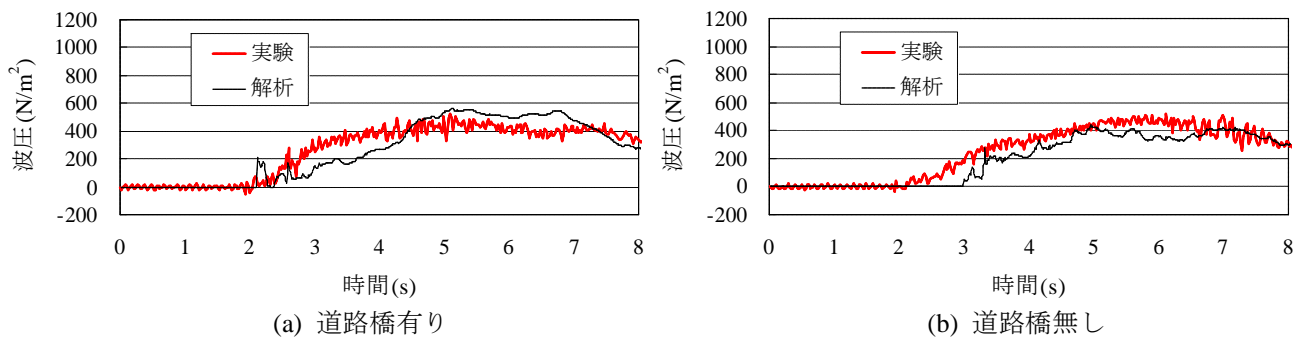


図 3.9.4 実験と解析の波圧比較 (h1=20cm 下面-rear)

3.10 地震応答解析による支承の応答

対象橋梁は、津波により桁が流出したといえるが、津波来襲前に揺れが大きければ対象橋梁が揺れ（地震力）によって損傷することも考えられる．そこで、対象橋梁が地震力により損傷したかを確認するため、観測波形を用いて地震応答解析を実施した．

地震応答解析に用いる解析モデルは、図 3.6.1 に示したものをを用い、波力の代わりに地震力を作用させる．地震力の作用方法は、通常の動的解析と同じように構造全体に対して観測された加速度波形を作用させる．ただし、桁の浮上りに着目しているため、水平 2 方向だけでなく鉛直方向にも同時に地震力を作用させることにした．

2011 年東北地方太平洋沖地震では、対象橋梁地点の観測地震動波形が得られていない．揺れによるおおよその挙動を把握することとし、対象橋梁から約 7.5km 離れた位置での観測波形 (K-NET,CHB010) を用いることとした．観測波形の大きさは、最大加速度が約 180gal、対象橋梁の固有周期 (0.45 秒) 近辺の加速度応答スペクトル (減衰 5%) は、図 3.10.1 に示すように NS,EW 方向で約 400gal で、UD 方向で約 250gal となる．

この観測地震動波形を用いて、地震応答解析した結果を図 3.10.2 に示す．前述の津波解析と同様な支承位置での応答結果を示している．津波波力による支承半力の時刻暦を示した図 3.7.1 と比較すると、津波解析では鉛直反力の方が大きい、地震応答解析では水平反力の方が大きい．地震応答解析の水平反力の大きさは、 $3k_h R_d$ には達していない．したがって、対象橋梁は地震の揺れによる損傷はなかったと判定できる．

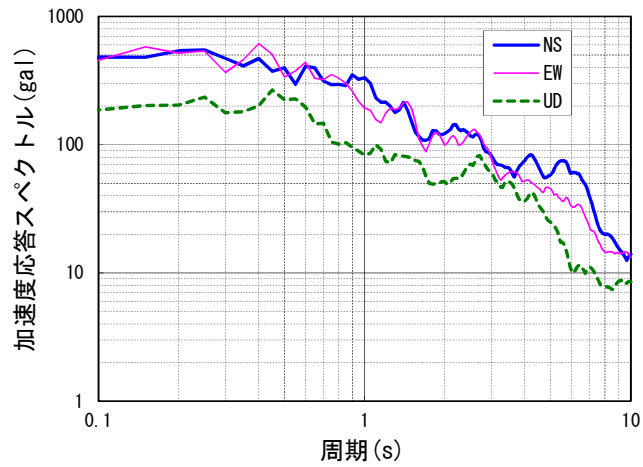


図3.10.1 入力地震波の加速度応答スペクトル

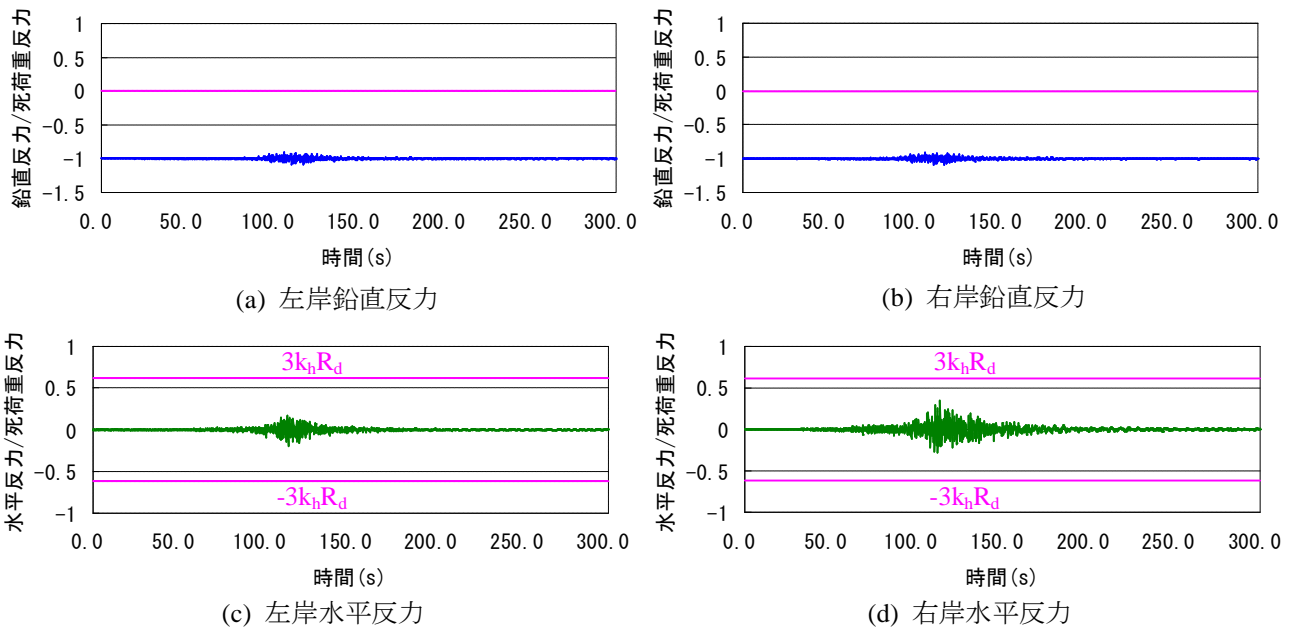


図3.10.2 地震応答解析の結果 (支承の応答履歴)

3.11 まとめ

本章では、津波波源特性・伝播特性・橋梁周辺の津波特性の3要素を考慮した津波による橋梁の応答挙動を評価することができる理論的方法を提案し、この方法を2011年東北地方太平洋沖地震の津波によりコンクリート桁が流出した床版橋に適用し、再現解析を行った。さらに、水路実験により橋梁の津波応答解析法の妥当性を検証した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 本章で提案した理論的方法は、3段階の解析方法を組み合わせたハイブリッド法である。すなわち、従来の非線形長波理論に基づく2次元津波解析によって得られる河口域の津波高と流速分布（ステップ1の解析結果）を、橋梁を含む周辺地域を3次的にモデル化した3次元津波解析領域の境界に入力し、橋梁に作用する津波波力を求める（ステップ2の解析結果）。最後に、この津波波力を3次元非線形橋梁応答解析モデルに入力し橋梁の津波応答挙動を求める（ステップ3の解析結果）。ただし本解析法では、津波と構造物応答の相互作用は小さいと仮定し、この相互作用は考慮されていない。
- 2) この理論的方法を2011年東北地方太平洋沖地震の津波によりコンクリート桁が流出した床版橋に適用し再現解析を行った結果、津波の波力により支承に負反力が発生し、河口側の方が大きく浮上り、桁全体が回転しながら浮上って流出する結果となり、現地の状況が再現できていることがわかった。
- 3) 本解析により、もしも流出した対象橋梁の鉛直支承が死荷重反力の0.74倍の負反力に耐えうる構造であれば、桁の流出は起きなかったと予測できる。
- 4) 隣接の道路橋の影響を調べるために、道路橋が無い場合の解析を行い、桁に作用する波圧の比較を行った。波圧は前面と上面ではほぼ同じ、背面と下面では道路橋有りの方が大きくなり、その影響が確認できた。道路橋が無い場合の波圧を用いた橋梁の津波応答解析から、道路橋が無い場合でもコンクリート桁は浮き上がり、流出したと判定された。
- 5) 理論的方法の妥当性を確認するために水路実験を行った結果、桁の浮き上がりに影響する波圧を再現することができ、理論的方法の妥当性を確認した。
- 6) 橋梁の津波応答解析とともに橋梁の地震応答解析を実施した結果、津波では橋梁の鉛直反力の方が大きくなるのに対して、地震動応答解析では水平反力の方が大きくなるという対照的な結果となった。
- 7) 津波が襲来する前に本橋梁に対して揺れ（地震力）が作用するが、地震応答解析結果から、支承は損傷しないことがわかった。したがって本橋梁は、地震による揺れではなく、津波により被災したと判定できる。

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) 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) 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.
- 6) (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.
- 7) 野中哲也, 吉野廣一: ファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析, 丸善, 2010.11.
- 8) 福井芳朗, 白石英彦, 中村充, 佐々木泰雄: 津波の研究 (I) 一段波津波の波速について-, 第 9 回海岸工学研究発表会論文集, pp. 44-49, 1962.

第4章 I桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討

4.1 まえがき

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桁橋等の桁が流出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)~6)}。2011年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出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。坂本ら^{7),8)}は3次元の流体解析ソフトを用いて再現解析を試みている。しかし、3章で示したように解析の対象橋梁は、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。

そこで本章では、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⁹⁾。I桁橋は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、この影響を確認するために、本章では水と空気の二相流解析を実施する。具体的には、この二相流解析ソフトと、3章で述べた床版橋（空気塊ができない桁橋）を対象にして使用してきた水のみの一相流解析ソフトの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、特に空気塊の影響について調べるとともに、水路実験によって解析結果を確認したので、その内容の記述する。

4.2 解析条件

4.2.1 解析ソフト

本章で使用する二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。一相流解析ソフトとして3章で用いたCADMAS-SURF/3D¹⁰⁾を、二相流解析ソフトとしてソースコードが公開されている流体解析コードであるOpenFOAM¹¹⁾を採用し、OpenFOAMのうち非圧縮・不混和流体の気液二相流解析が行えるinterFoamを使用している。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 では、「空気圧計算モデル (PV=const)」として、近似的に空気領域を評価する方法が示されているが、本章ではそのモデルは使用していない。

4.2.2 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 4.2.1 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、一般的な河川よりも深くなっている。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仮定している。

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 4.2.2 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もあるが、本章では、波の特性と桁周りの空気塊の挙動に着目するため、地形形状の影響をなくし水平地形とした (5 章では周辺地形の影響を調べている)。

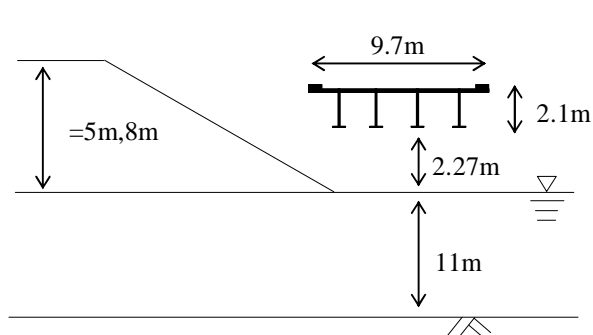


図4.2.1 解析条件

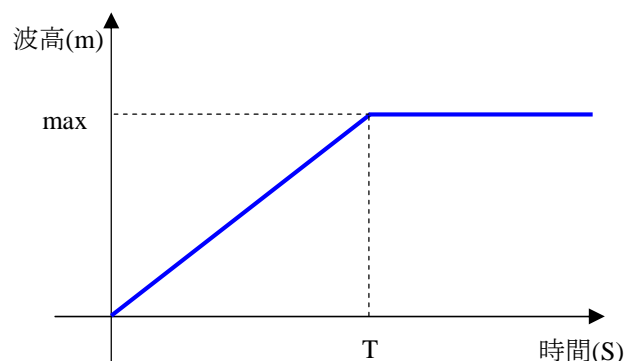


図4.2.2 造波波形の定義

4.2.3 検討ケース

本研究では、表 4.2.1 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は、波高と初期水位から決まる。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。

本検討の解析は層流で行うが、乱流モデルの影響を確認するためにケース A1 については OpenFOAM により乱流 (LES モデルの動的 Smagorinsky) 解析も行い、層流解析と結果を比較する。

表4.2.1 検討ケース

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

4.3 解析モデル

本解析で使用するソフトは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4.3.1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）。

I桁に対しても、図4.3.1に示すようにできるだけ簡略化した。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、モデルにおいて外桁の厚さを薄くしている理由は、張出し部の床版下面の波力を正確に評価するために、外桁の板厚をフランジ幅の半分の板厚としたためである。

桁に作用させる波を安定させるため、造波境界と桁との距離を長くした。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。

メッシュ分割では、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12)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。

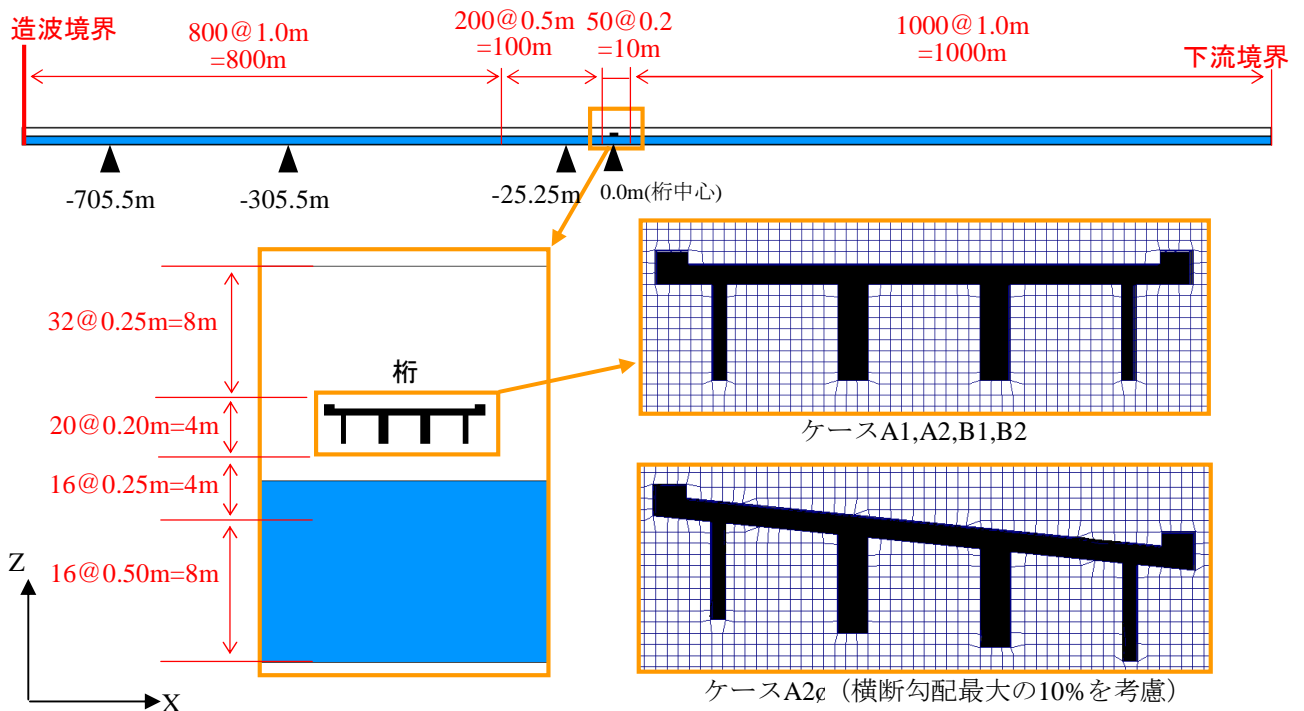


図4.3.1 解析モデル

4.4 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）の解析結果を以下に示す。

4.4.1 ケース A1

(1) 層流解析

造波境界から桁までの各位置（図 4.3.1 内の▲位置）における波高の時刻歴波形を OF と CS の結果を重ねて図 4.4.1 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 4.2.2 のような形をした段波($T=30s$)であるが、流速を図 4.2.2 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 4.4.1(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（図 4.4.1(c)）になっている。この現象は、浅瀬が続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 4.4.2 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。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、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。

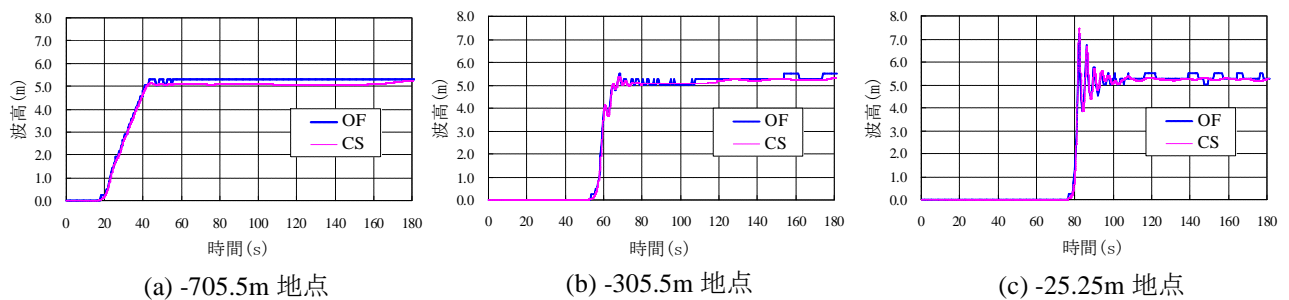
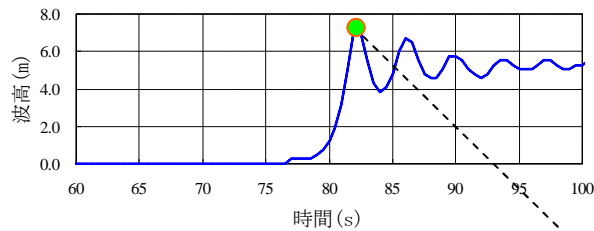


図4.4.1 波高比較（ケースA1）



(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4.4.2 ソリトン分裂の現象 (ケースA1)

このような波を作用させた場合における桁周りに発生する波力の時刻歴変化を図 4.4.3(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 A1 では、水平波力の合計 (図 4.4.3(h))，鉛直波力合計 (図 4.4.3(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 (図 4.4.3(a)(b)) では、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 (図 4.4.3(c)～(g)) では、空気塊の影響により、CS と OF で差が生じている。CS は一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、二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、その時刻付近のスナップショット (84 秒) ，および波が桁の上をある程度通過した状態 (100 秒) のときのスナップショットをそれぞれ図 4.4.4 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 4.4.4.(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 4.4.4(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時刻付近の 84 秒、およびある程度水が桁を越流する 100 秒で、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。

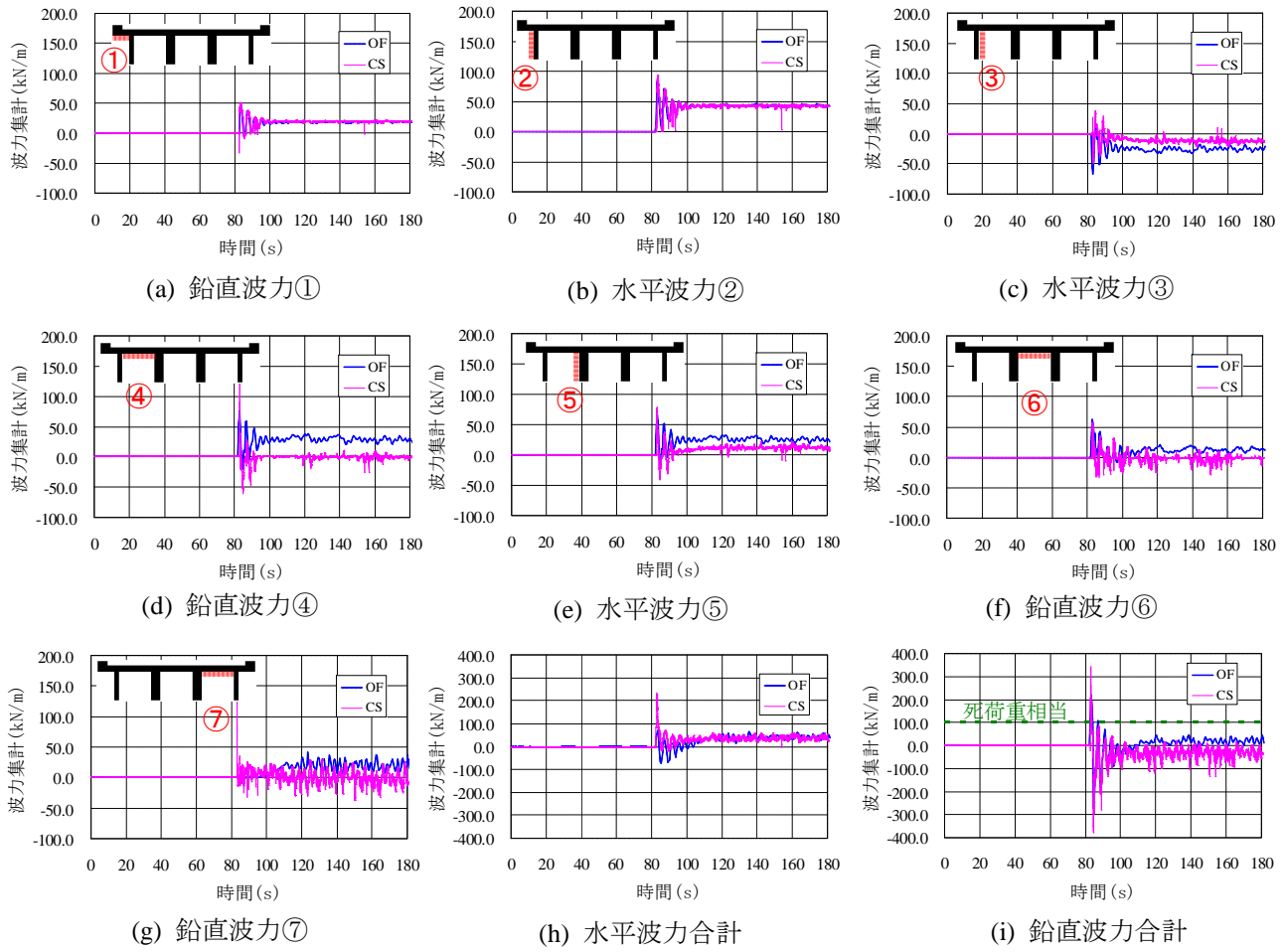


図4.4.3 波力比較 (ケースA1)

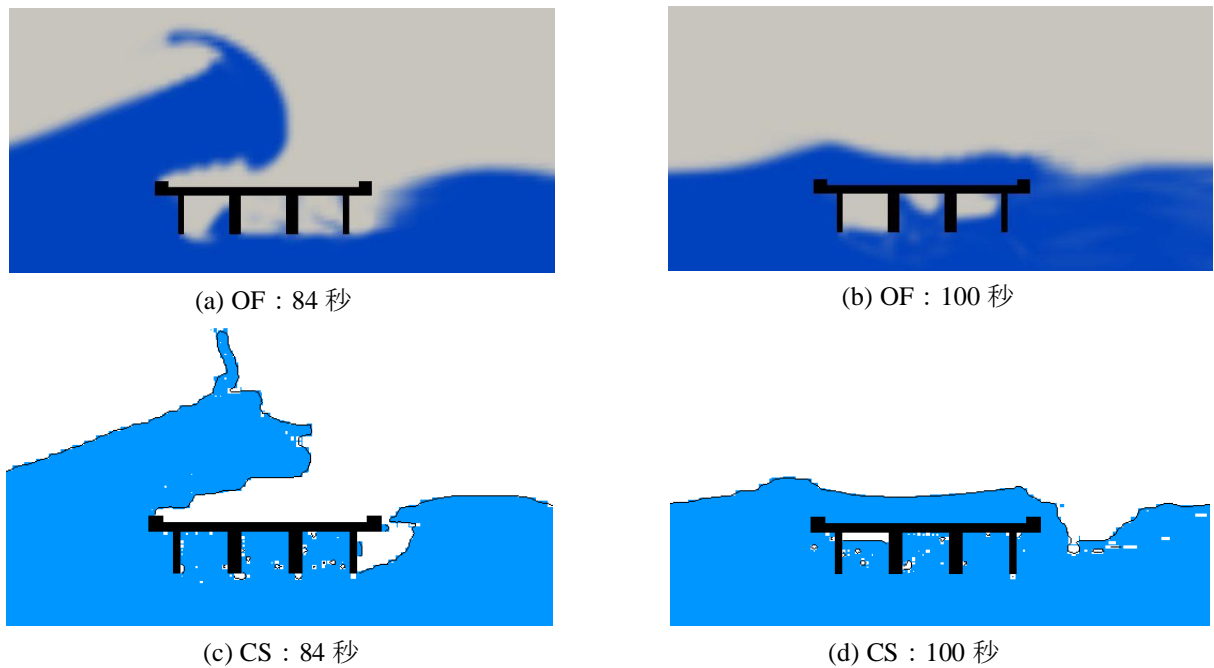


図4.4.4 スナップショット (ケースA1)

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 4.4.3(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)も図 4.4.3(i)に緑破線(死荷重相当)で示している。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き上げることが予測できる。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 4.4.3(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、図 4.4.3(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 4.4.4(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 4.4.3(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 4.4.3(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力が発生した。その時刻の床版上下面の幅員方向の波圧分布を示すと、図 4.4.5 のようになる。この図から、床版上面の波圧はほぼゼロであり、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が大きくなると、時計回りに桁が回転し浮き上がることが予測される。

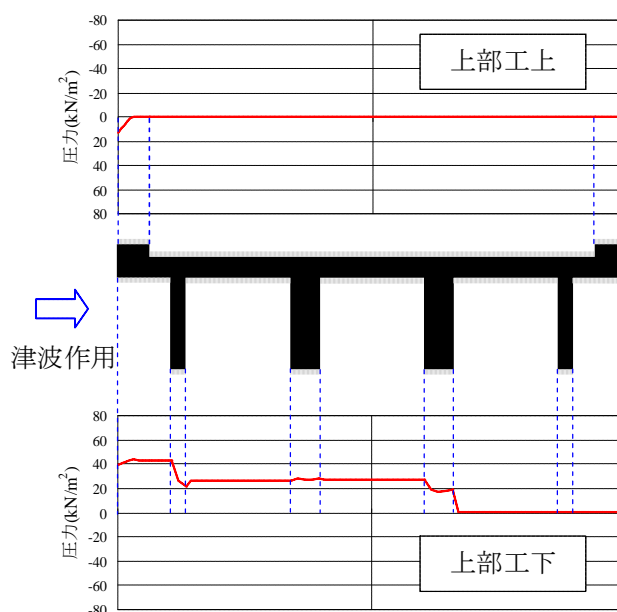


図4.4.5 鉛直方向圧力分布図 : 83.5秒 (ケースA1,OF)

(2) 乱流解析

このケース A1 については、乱流モデルの影響を確認するために OF による乱流解析を行った。使用した乱流モデルは、LES モデルの動的 Smagorinsky である。造波境界から桁までの各位置 (図 4.3.1 内の▲位置) における波高の時刻歴変化について、前述の OF の層流解析と乱流解析の比較を図 4.4.6 に示す。両者の傾向に大きな違いはないが、同図(c)に示すように、層流解析に対して乱流解析の位相が 0.5 秒程度遅れる結果となった。また、最大波高は 3%程度、層流解析の方が大きい。

桁周りに発生する波力について、層流解析と乱流解析を比較した時刻歴変化を図 4.4.7(a)~(f)に示す。波力の変動傾向は、波高と同様に両者に大きな違いはないが、層流解析に対して乱流解析の位相が 0.5 秒程度遅れる結果となった。最大波力合計については、水平波力では 6%程度、鉛直波力は 9%程度、層流解析の方が大きい。

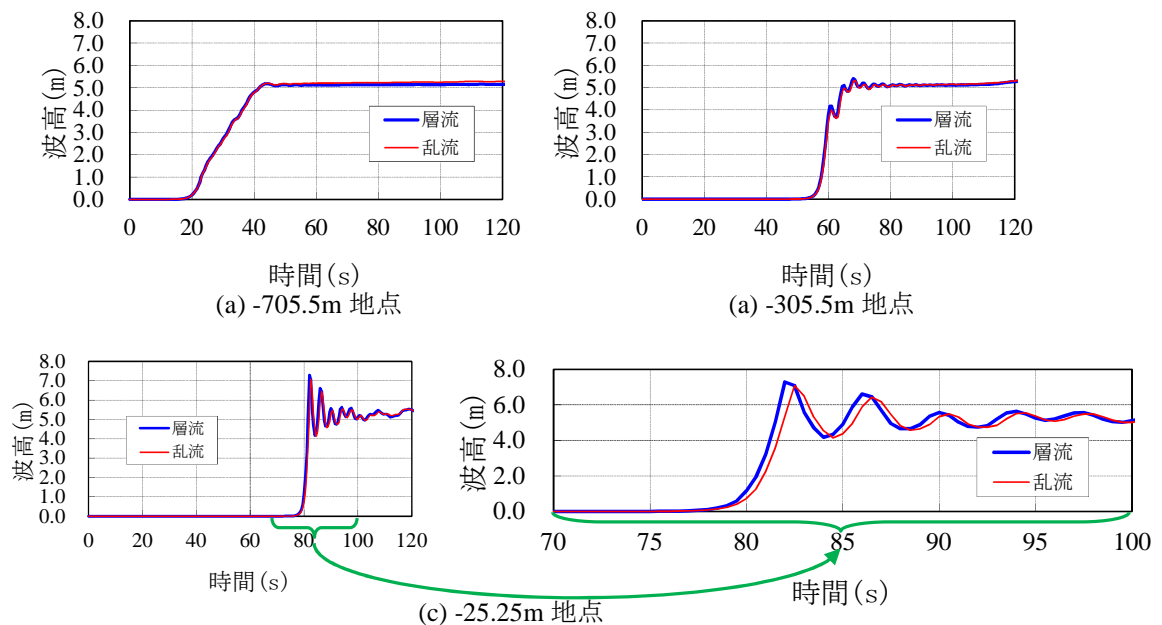


図4.4.6 層流解析と乱流解析の波高比較 (ケースA1)

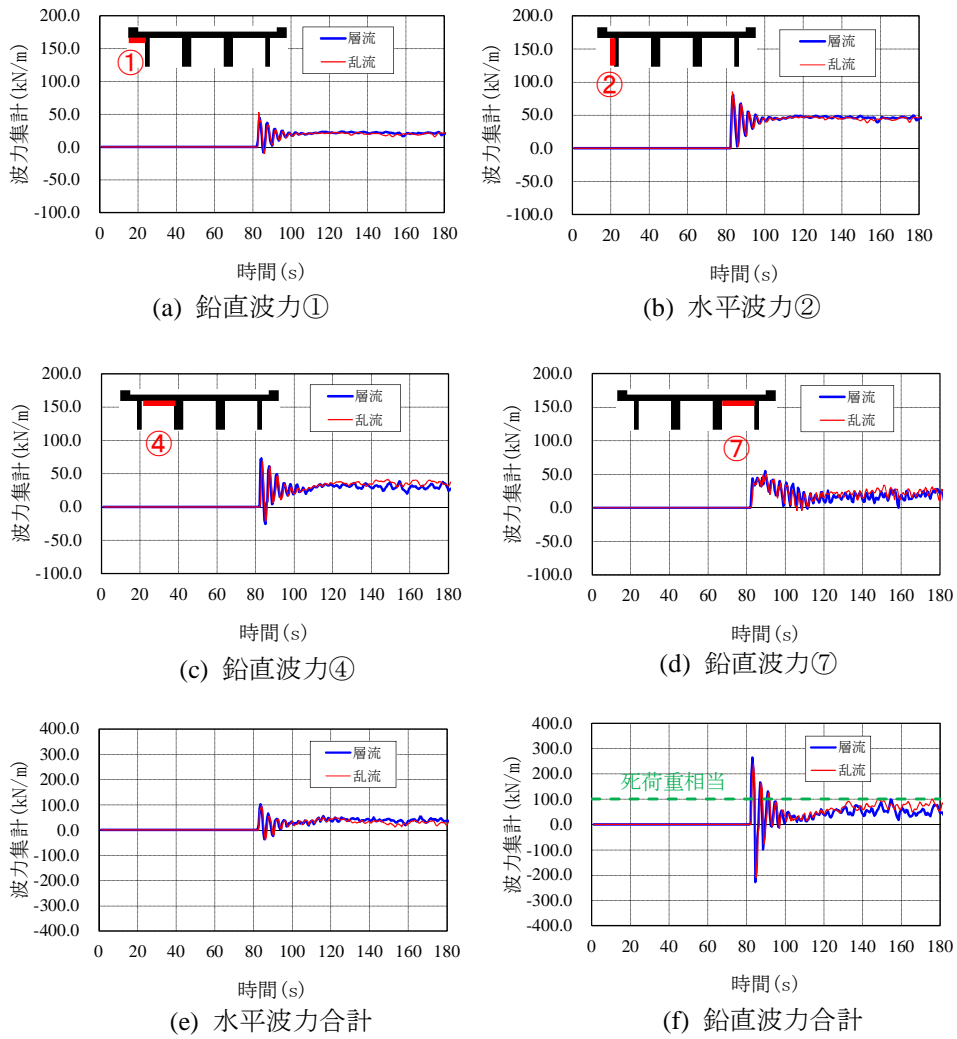


図4.4.7 層流解析と乱流解析の波力比較（ケースA1）

4.4.2 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波形を図 4.4.8 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 4.2.2 のような形をした段波であるが、流速を図 4.2.2 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 4.4.6 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る時間 150 秒が約 120 秒と多少縮まり（図 4.4.8(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波形を図 4.4.9(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（図 4.4.9(e)）、鉛直波力合計（図 4.4.9(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、図 4.4.9(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、OF と CS の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（図 4.4.9(c)）では、OF と CS で大きく異なっている。前述の図 4.4.3(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（図 4.4.9(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 OF と CS のスナップショットを図 4.4.10 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 4.4.4(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 4.4.9(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 4.4.10(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 4.4.9(f)において差が出てくる。OF が常に正の波力（浮き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 4.4.3(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なっていることの原因と思われる。一方、水平方向の波力合計（図 4.4.9(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4.4.11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、桁が浮き上がることになるが、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、桁が浮き上らない対策のひとつになるものと思われる。

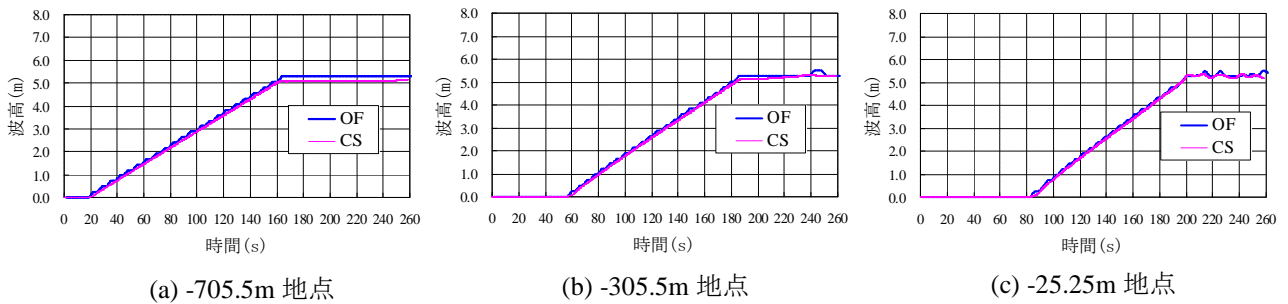


図4.4.8 波高比較（ケースA2）

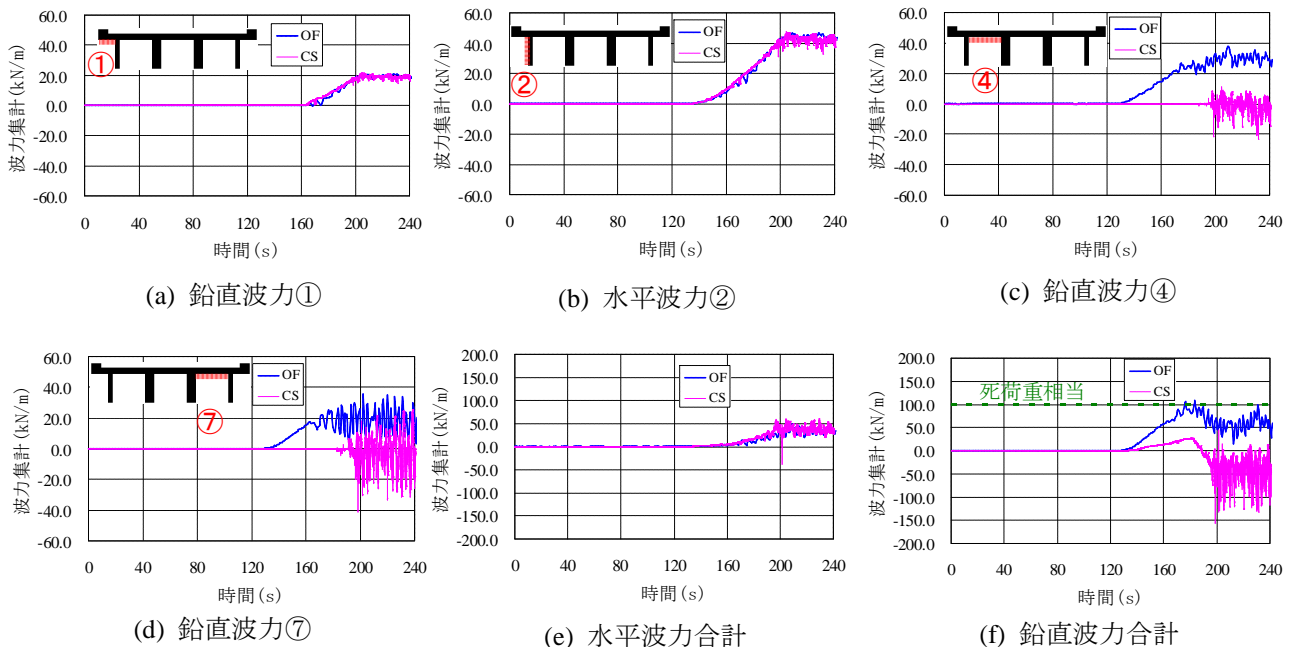


図4.4.9 波力比較（ケースA2）

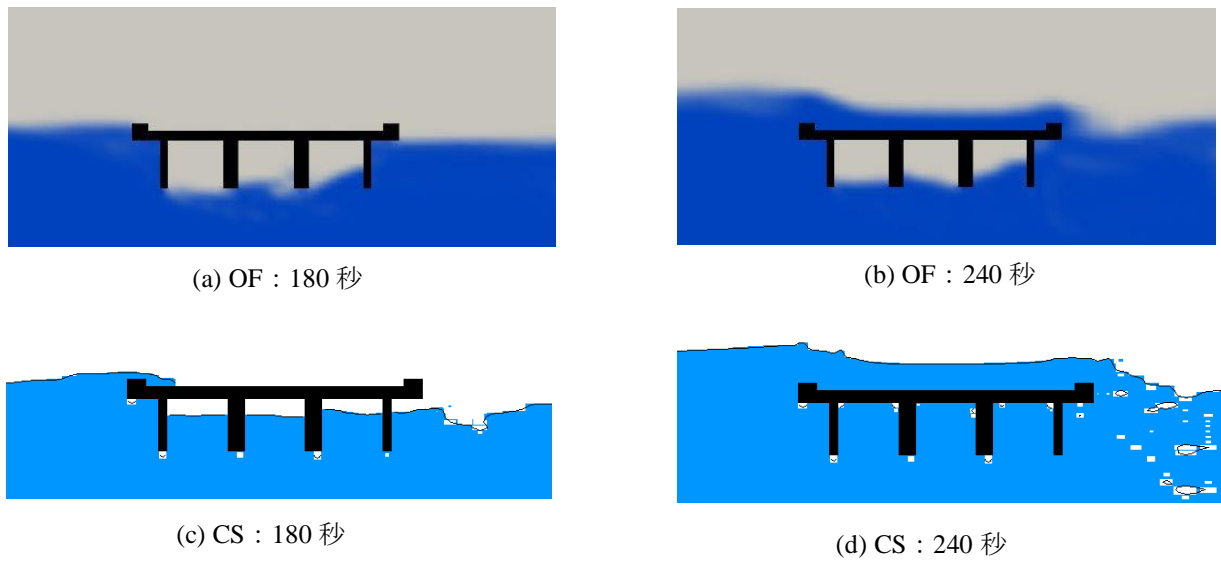


図4.4.10 スナップショット (ケースA2)

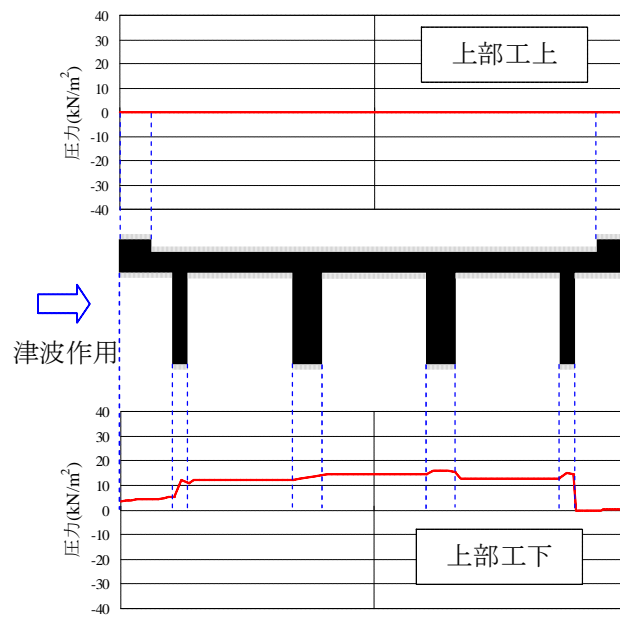


図4.4.11 鉛直方向圧力分布図 : 176.5秒 (ケースA2)

4.4.3 ケース A2'

前述のケース A2 では、常に桁内に空気塊が存在し続けたため、本ケース A2' 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 4.4.12 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 4.4.13 に示す。同図(a)より勢いよく桁下面で水が跳ね上が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' の方の波力が大きくなったものと思われる。200 秒以降については、図 4.4.13(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を水が流れ難くなり、下向きを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。

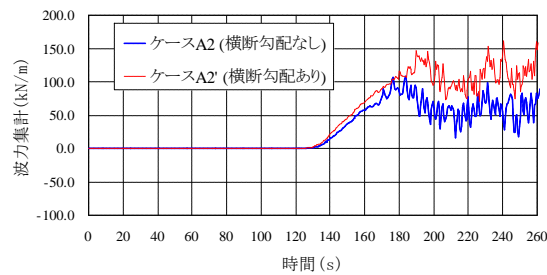


図4.4.12 ケースA2とケースA2' 鉛直波力合計比較



(a) OF : 190 秒



(b) OF : 240 秒

図4.4.13 スナップショット (ケースA2' ,OF)

4.4.4 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 4.4.14(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の挙動に差が生じ、鉛直方向の波力を合計した図 4.4.14(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 4.4.14(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。

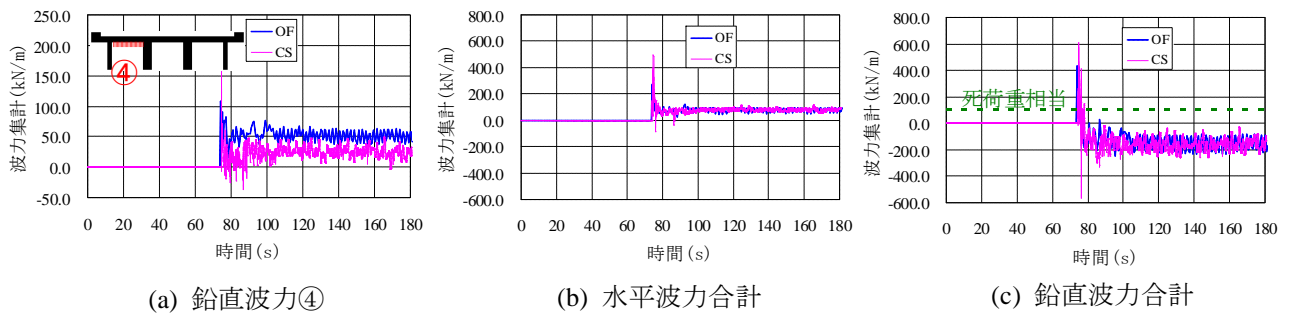


図4.4.14 波力比較（ケースB1）

4.4.5 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 4.4.15(a)~(c)に示す。床版下面④（図 4.4.15(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、OF と CS 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 4.4.15(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 4.4.9(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 4.4.15(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。

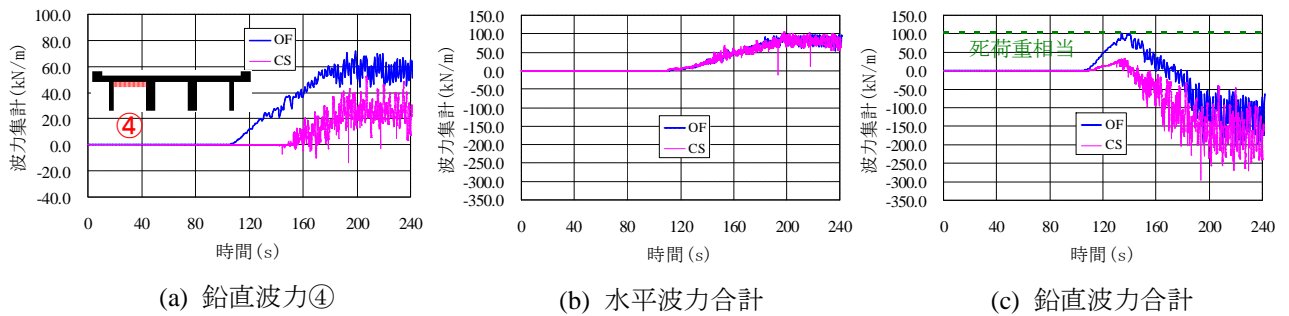


図4.4.15 波力比較（ケースB2）

4.5 水路実験の再現解析

4.5.1 水路実験

数値解析の妥当性を検証するために使用した水路実験は、荒木ら¹³⁾が行ったものである。実験水路は長さ 44.0m、幅 0.7m、高さ 1.2m の屋外断面 2 次元水路で、勾配 1/40 および 1/100 の水路床交差点の静水面の上に、空気塊の影響があると想定される桁橋模型を設置している。

図 4.5.1 に実験水路の概要、図 4.5.2 に圧力測定点を示す。今回は、図 4.5.1 に示すように水路の一端から 7.9m の地点に設置したゲートを急開することによって発生させるダムブレイク型造波（ゲート水位差 $\Delta h=0.196\text{m}$ ）による段波を桁橋へ作用させた実験結果と数値解析の結果を比較することにする。

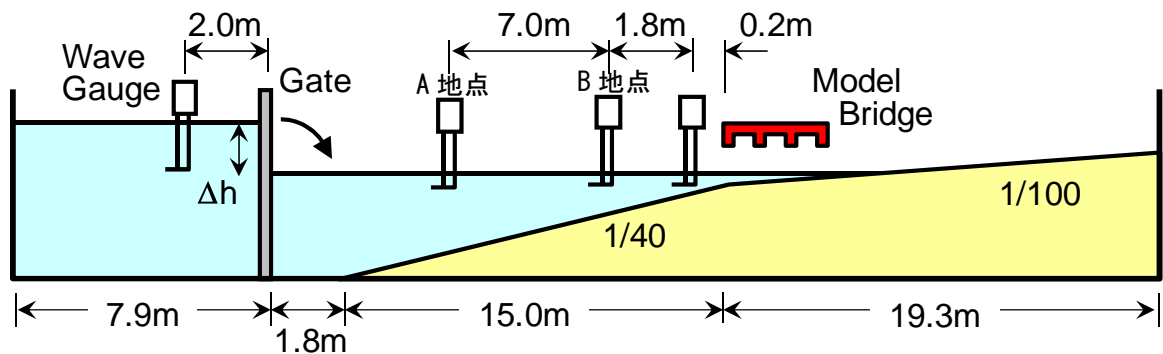


図 4.5.1 実験水路の概要

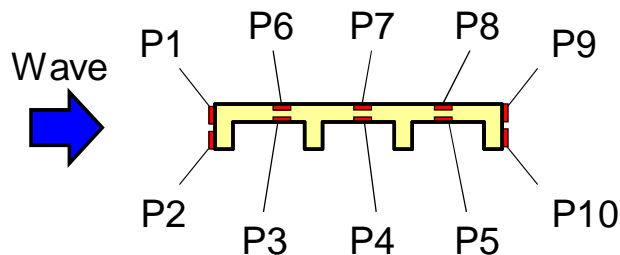


図 4.5.2 実験の圧力測定点

4.5.2 再現解析

再現解析を行う 3 次元流体解析ソフトは、前節までの二相流解析と同様に OpenFOAM のうち非圧縮・不混和流体の気液二相流解析が行える interFoam を使用している。

再現解析における解析モデルの概要を図 4.5.3 に示す。実験水路および桁橋模型構造が奥行き方向について一定であることから簡略化し、2 次元モデルでの解析をおこなった。

解析では、図 4.5.1 の実験水路図に示す水位計が設置されている A 地点より右側の領域を解析対象としてモデル化し、解析領域左端の造波境界より、A 地点で計測された実験水位データと、段波津波の流速の式（福井ら¹⁴⁾により算出した流速を時刻歴境界条件データとして与えた。実験のゲート引き上げ速度は解析に反映させていない。解析領域のメッシュのグリッド間隔は、段波進行方向は 0.005~0.01m、高さ方向は 0.005m とし、時間刻み間隔は 0.001s とした。総メッシュ数は、約 33 万メッシュである。

実験と解析の波高変化と波圧変化の比較を図 4.5.4 に示す。B 地点における波高変化を比較すると両者の位相には差が生じており、これに伴い P1、P3 の波圧にも位相差が生じている。これは、A 地点での実験水位のみを用いて理論式より流速を算出して造波境界を設定しているためゲートの引き上げに伴う実験の複雑な流速分布を設定することができず、実験の津波を完全に再現できていないことが理由と考えられる。再現方法の改良が今後の課題である。波が直接当たる P1、空気塊の影響をうける P3 の波圧より、水位の変動に対する波圧の変動の傾向は実験と一致する結果となった。

図 4.5.5 に、P3 の圧力が最大値となる 7.12 秒時のスナップショットを示す。この図 4.5.5 からわかるように、特に P3 については、水は圧力測定点に直接は当たってないため、空気塊を介して伝わる圧力が生じていることがわかる。

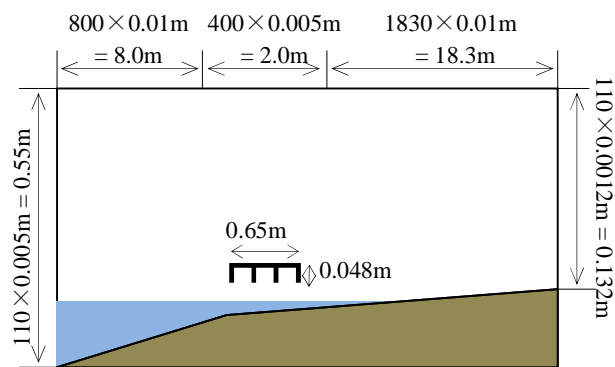


図 4.5.3 解析モデル

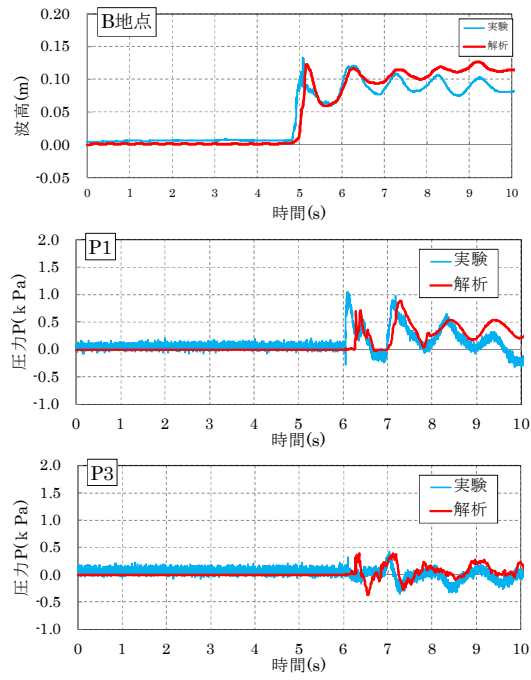


図 4.5.4 実験と解析の比較

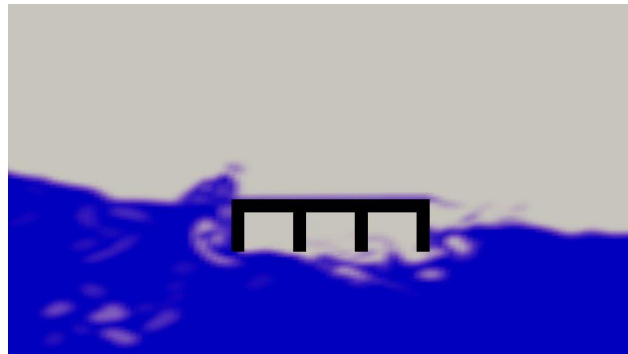


図 4.5.5 スナップショット (解析 7.12 秒時)

4.6 まとめ

本章では、I 桁橋を対象にして、水のみの一相流解析ソフトと水と空気の二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と水路実験結果との比較を行なった。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 I 桁橋に作用させたが、波が I 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、水と空気の二相流が評価できる 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床版に伝わることから、空気塊を評価する必要がある I 桁橋に作用する津波波力を評価するためには、二相流解析が必要となる。
- 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波形では、OF と CS の結果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）に作用する津波波力の評価は、一相流解析でも対応できる。
- 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。この空気塊が存在しない領域の桁周りの波圧や波の挙動については、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き上がることがわかった。
- 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が確認できた。
- 8) 乱流モデルの影響の検証では、波高変化、波力変化ともに層流解析に対して乱流解析のほうが 0.5 秒程度位相が遅れる結果となった。最大波高、最大波力は層流解析の方が 3~9% 程度、乱流解析よりも大きな値となった。変動傾向については波高と波力ともに大きな違いはなく、本解析対象については、乱流モデルを用いることの影響は小さいことが確認できた。
- 9) I 桁橋の水路実験の再現解析により、波が直接当たる位置の波圧、空気塊を介して伝わる波圧ともに、気液二相流解析によって、実験から得られた水位の変動に対する波圧の変動傾向が再現できることがわかった。

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) H.Iemura T., Yasuda M., Pradono H. , and Tada, T. : 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) 坂本佳子, 原田隆典, 野中哲也, 吉野廣一, 鳥越卓志: I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.450-458, 2013.
- 10) (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.
- 11) 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.
- 12) (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.
- 13) 荒木進歩・塚本裕太・青木伸一: 異なる造波方法により発生させた 2 種類の擬似津波による桁橋への作用波力特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.836 -840, 2013.
- 14) 福井芳朗, 白石英彦, 中村充, 佐々木泰雄: 津波の研究 (I) 一段波津波の波速についてー, 第 9 回海岸工学研究発表会論文集, pp. 44-49, 1962.

第5章 I桁橋津波数値解析による津波波形特性に及ぼす 橋梁周辺地形の3次元的影響

5.1 まえがき

実際の橋梁に作用する津波波力は、3章と4章で示したような水路実験とは違い、橋梁周辺の複雑な地形の影響を受けるものと考えられる。本橋ら¹⁾は、2011年東日本大震災で被災した宮城県気仙沼市本吉町にある小泉大橋とその周辺地形を対象に、実際に近い津波襲来の状況を再現させる解析方法を提案し、再現解析を行ったが、橋梁の周辺地形が橋梁に作用する津波波力に与える影響を詳細に調べてはいない。小泉大橋は、以下に記述するように、全てのI桁と橋脚1基が流出し、また橋台背面盛土や河川堤防までも洗掘された²⁾。したがって、橋梁とその周辺地形による津波高や流速の3次元的分布を調べて、橋脚やI桁の流出過程を解明しなければならない。

本章では、3章で提案した手法のステップ2を改良した手法¹⁾を用いて、橋脚やI桁の流出過程や橋台背面盛土や河川堤防の洗掘過程の解明のための前段階の研究として、橋梁とその周辺地形による津波の高さや流速の3次元的分布を確認し、橋梁に作用する津波波力を得た結果の内容を記述する⁵⁾。

5.2 小泉大橋とその周辺地形の津波特性に及ぼす影響

5.2.1 対象橋梁の被害状況

気仙沼市本吉町の津谷川河口部に架かる国道45号小泉大橋は、橋長が約180m、鋼3径間連続非合成I桁橋が2連で構成されている。この橋梁は東北地方太平洋沖地震により発生した津波で大きな被害を受けた。上部構造6径間全てが流出し、橋脚1基も倒壊した。さらに橋梁本体だけでなく、橋台背面盛土や河川堤防までが洗掘された²⁾。被害状況^{3),4)}を示す写真を図5.2.1に示す。

5.2.2 津波被害再現解析の方法

津波被害再現解析は、本橋ら¹⁾が過去に提案した次の3つのステップで行う。この方法は、3章で提案した方法⁶⁾のステップ2での初期水位とOpenFOAM⁷⁾を使った3次元領域への入力津波波形の処理を、より良く現象を再現できるように改良したものである。

ステップ1：まず非線形長波理論による平面2次元津波解析を実施する。この解析により、対象橋梁近辺の津波襲来状況の確認や平面2次元メッシュの最小領域の水位と流速を得ることができる。

ステップ2：ステップ1で得られた情報から3次元津波解析の条件の設定を行う。具体的には、

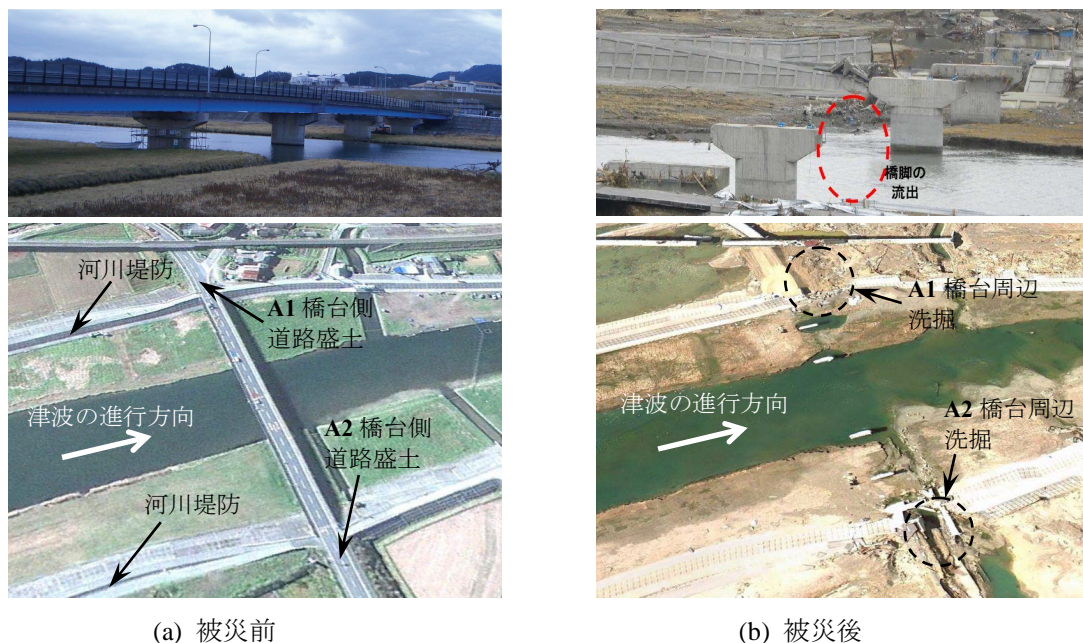


図 5.2.1 小泉大橋の被害状況

橋梁近辺の津波襲来状況（流速や方向，水位変化等）から判断して 3 次元解析の解析範囲を決定する．また桁流出等の状況を効率的に再現するために，対象橋梁地点で水位変化が始まる時刻から 3 次元津波解析を実施するのではなく，対象橋梁の桁が浸水する直前から，解析を実施する．したがって解析実施前に，その時点の状態（初期状態）を，前述の平面 2 次元津波解析の結果から作成する．

ステップ 3：ステップ 2 で設定した初期状態から，3 次元津波解析を実施する．その解析結果から対象橋梁に作用する波力を求め，対象橋梁の桁流出の判定を行う．

5.2.3 解析条件

非線形長波理論による平面 2 次元津波解析の解析条件については，本橋ら¹⁾が過去に行った解析と同じであり，その結果の一部を図 5.2.2 に示す．詳細は本橋ら¹⁾を参照されたい．この平面 2 次元津波解析の結果より，図 5.2.3 に示す対象橋梁を含む幅 300m，長さ 700m，高さ 30m の範囲を 3 次元津波解析の解析対象領域と決定した．

3 次元津波解析の計算領域を図 5.2.4 に示す．周辺地形と対象橋梁をモデル化し，I 桁橋の，空気が溜まる桁内（床版と桁で囲まれた空間）をモデル化するために，その部分を複数メッシュに分割し，最小メッシュサイズを 0.25m とした．ただし，総メッシュ数を減らすため，対象橋梁から離れた下流側のメッシュは粗くした（0.5～1.0m）．総メッシュ数は，約 2300 万メッシュである．3 次元津波解析領域のメッシュ図を図 5.2.5 に示す．モデルは，地震による断層運動による沈下を考慮している．

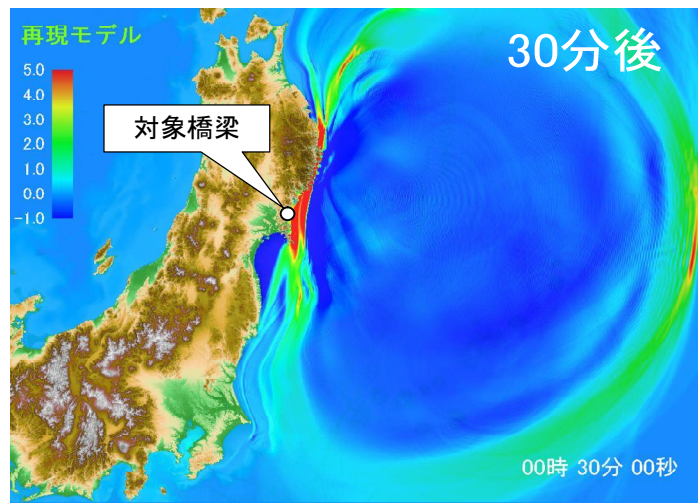


図 5.2.2 平面 2 次元津波解析結果

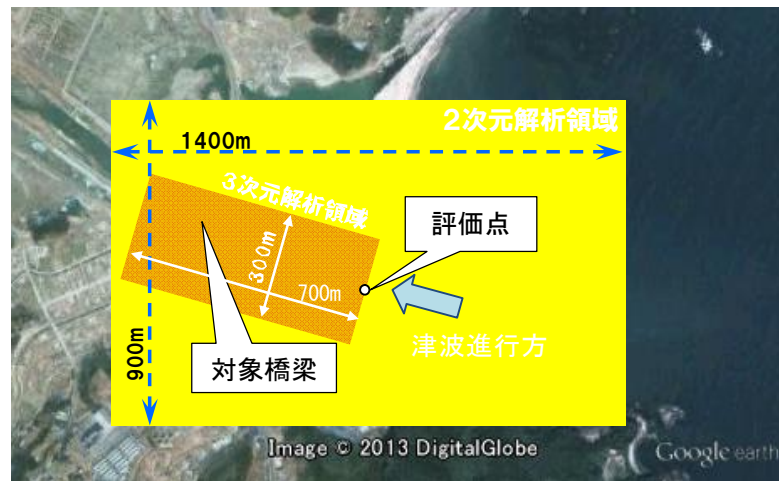


図 5.2.3 平面 2 次元解析領域と 3 次元津波解析領域

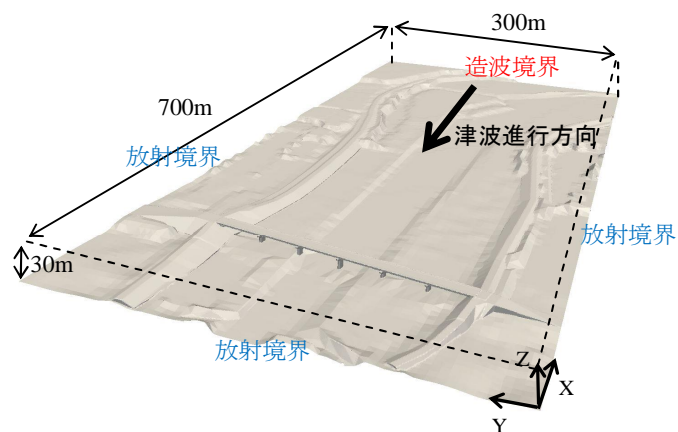


図 5.2.4 3 次元津波解析の計算領域

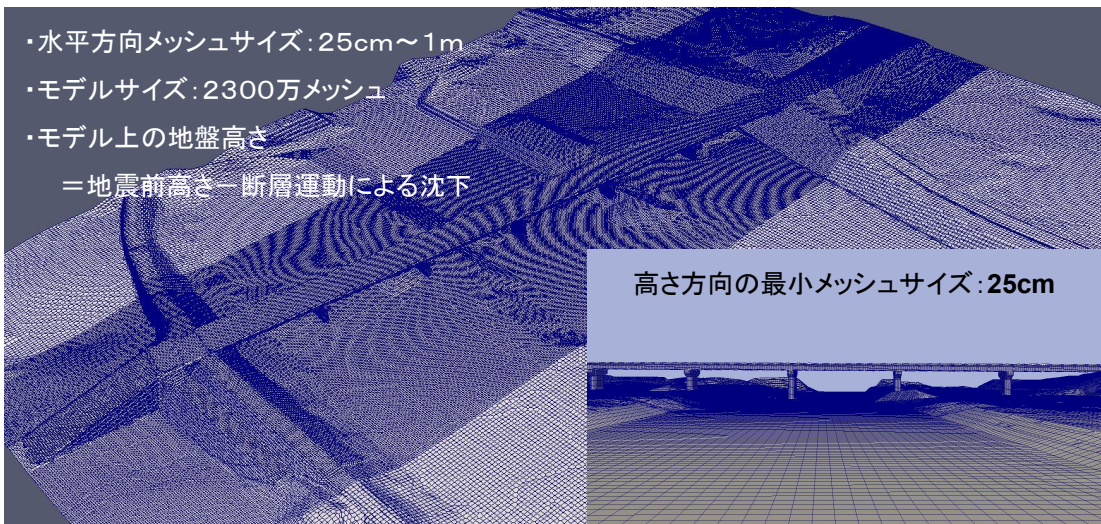
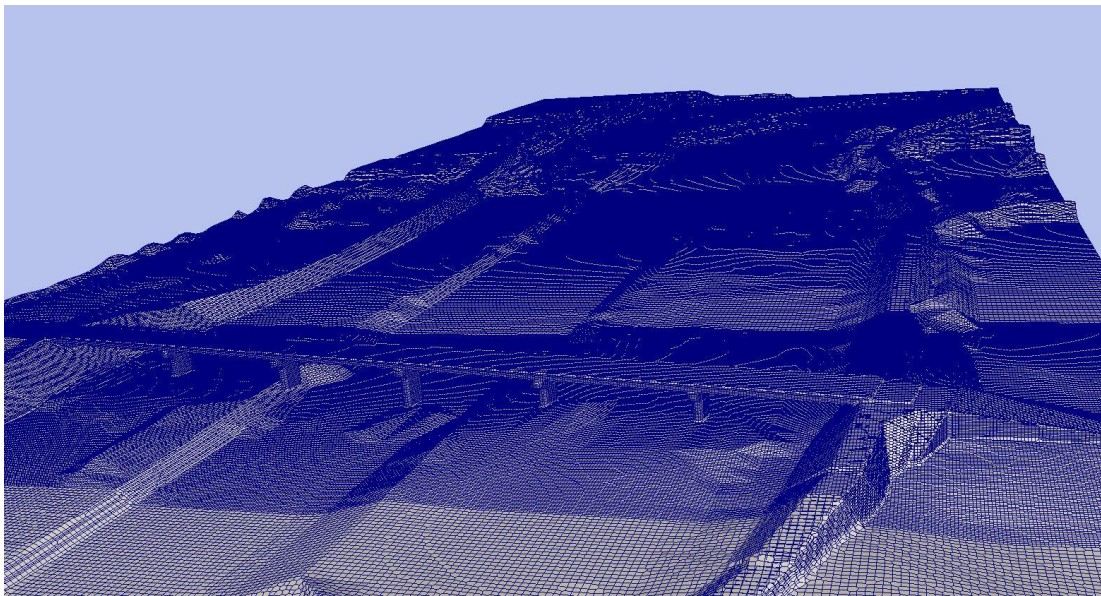
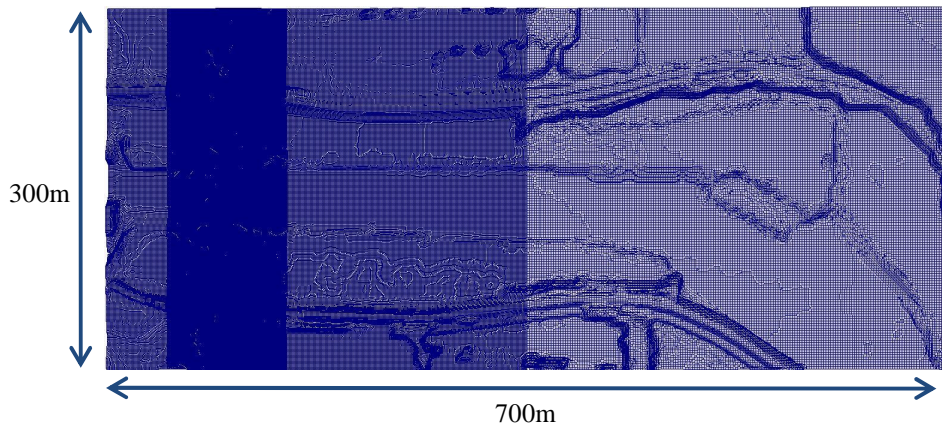


図 5.2.5 3次元津波解析のメッシュ図

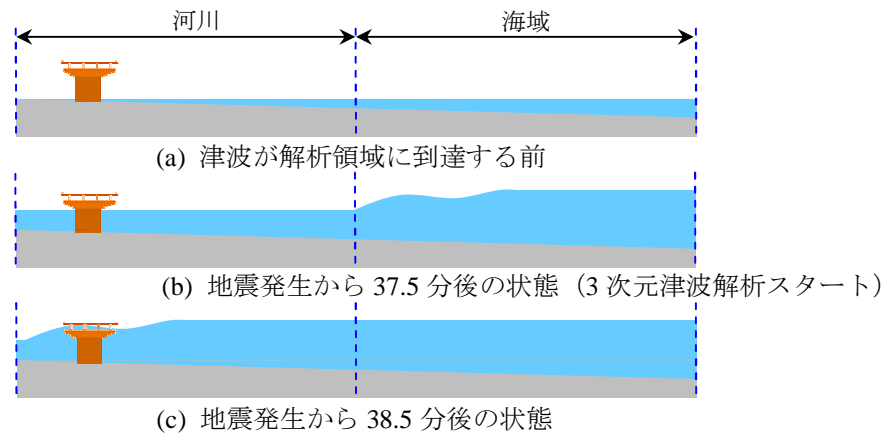


図 5.2.6 3次元津波解析における津波襲来のイメージ

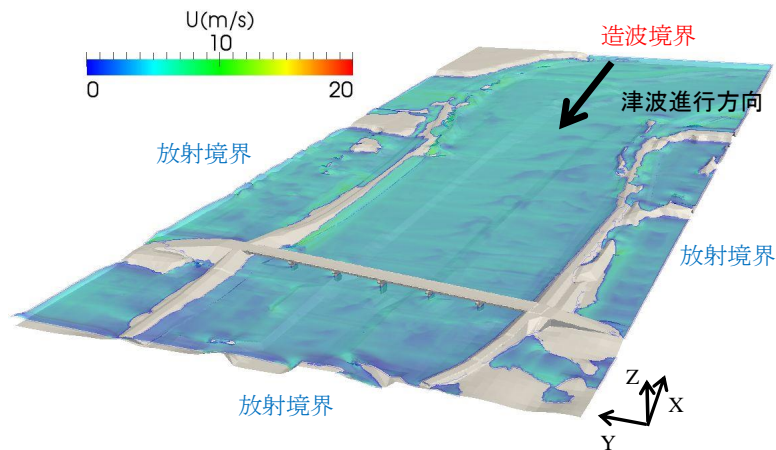


図 5.2.7 3次元津波解析の初期状態（水位、流速の分布）

計算時間を要する大規模モデルで効率的な解析を行うために、3次元津波解析の解析開始時刻をある程度解析領域が浸水し対象橋梁の桁が浸水する直前の、平面2次元津波解析における2250秒（37分30秒）からの230秒間とし、平面2次元津波解析の2250秒における各位置の水位、流速の状態を3次元津波解析モデルの各位置の初期状態として設定した。津波襲来のイメージを図5.2.6に、初期値を設定した3次元津波解析領域の初期状態（水位、流速の分布）を図5.2.7に示す。初期値設定後、平面2次元津波解析の2250秒以降の結果による水位変化、流速変化を3次元津波解析の造波境界より時刻歴境界条件データとして与えた。平面2次元解析結果より造波境界の水位と流速は、どの位置もほぼ同様の推移を示すことから、代表として図5.2.3内の造波境界上の評価点の水位変化データ、流速変化データを境界条件として用いる。図5.2.8に境界条件として与えた水位変化と流速変化を示す。

なお、河川流の影響については、東日本大震災の津波のように波高が大きい場合には、影響は一義的ではないとの報告がある⁸⁾。本章の解析では、計算が不安定化するので河川流は考慮しない。

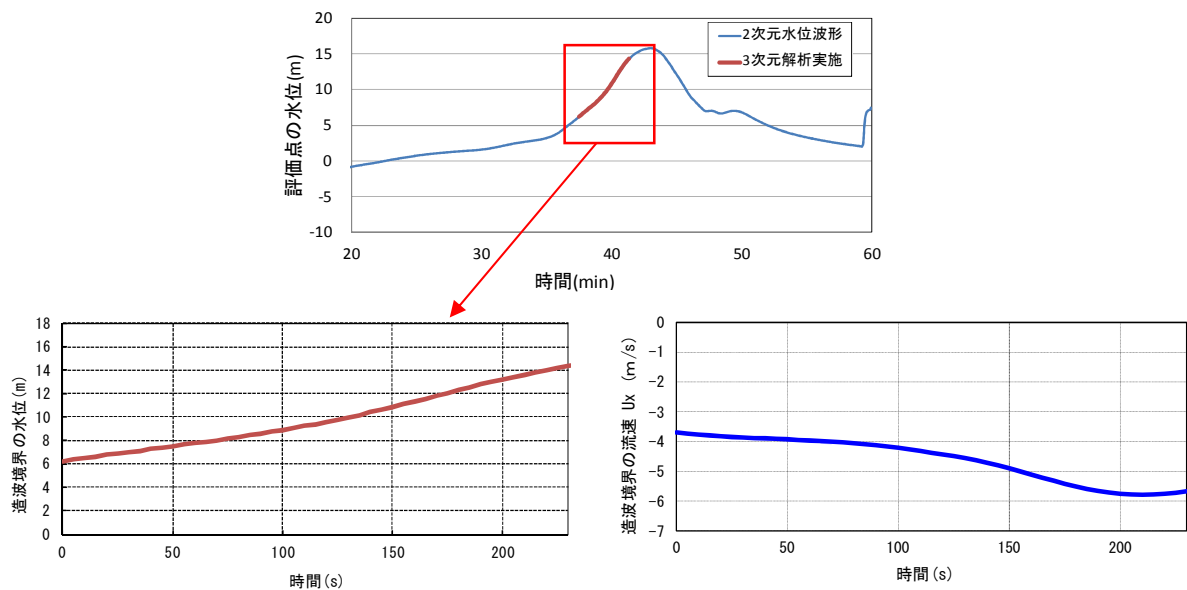


図 5.2.8 平面 2 次元解析結果による評価点（造波境界位置）の水位変化と流速変化

5.2.4 解析結果

図 5.2.9 に橋梁付近の水位と流速のスナップショットを示す。徐々に水位が上昇し、桁が浸水に至っている。3次元でモデル化した地形の影響をみるために、図 5.2.10 に示す対象橋梁から 20m 下流側の各位置 a~f の水位変化、流速変化を比較した。対象橋梁は 5 つの橋脚が並び、川幅方向には中央の P3 橋脚地点が一番深くなっている。図 5.2.11 に水位変化、図 5.2.12 に流速変化を示す。また、図 5.2.13 に 220s 時での橋梁より 20m 下流側の流速直角方向断面の流速ベクトルの分布を、図 5.2.14 に、216.4s 時での橋梁付近の流速ベクトル分布を示す。

図 5.2.10 に示す河川横断面の各位置での水位変化を、図 5.2.8 に示した平面 2 次元津波解析で求めた造波境界位置の水位変化と比較すると、図 5.2.8 に示した平面 2 次元津波解析で求めた水位変化には短周期の波形は含まれず滑らかに水位が上昇しているのに対し、図 5.2.11 に示す 3 次元津波解析での水位変化には短周期の波形が含まれていることがわかる。この短周期の津波波形は、河川を津波が遡上する場合に起こるソリトン分裂⁹⁾や、図 5.2.13、図 5.2.14 に示すように津波が地形や構造物に衝突することによって流速ベクトルが変動し、発生したと考えられる。

また、図 5.2.11 に示す河川横断面の各位置での水位変化は、川幅方向の位置 (a~f) によっても違っている。したがって、津波高や流速分布等の 3 次元津波特性は橋梁やその周辺地形の影響を強く受けることがわかる。

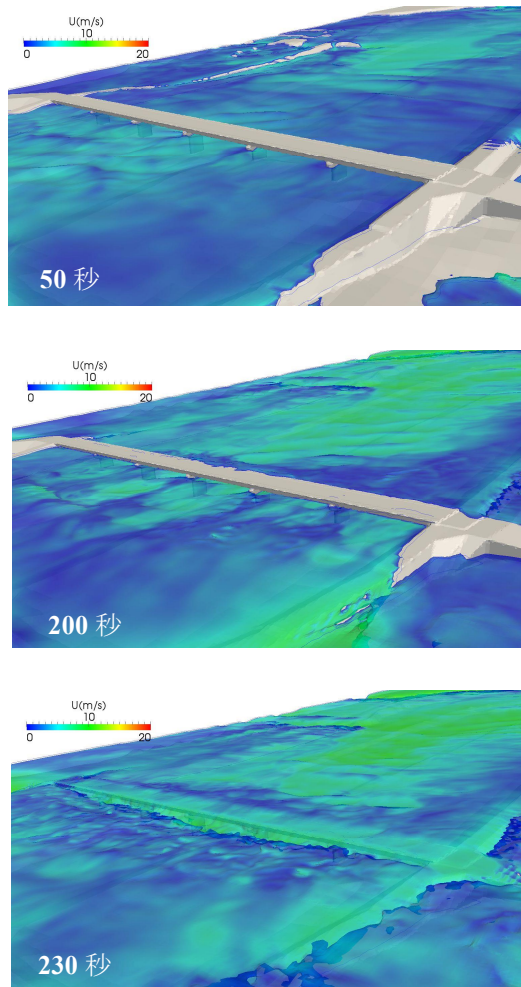


図 5.2.9 橋梁付近の水位と流速のスナップショット

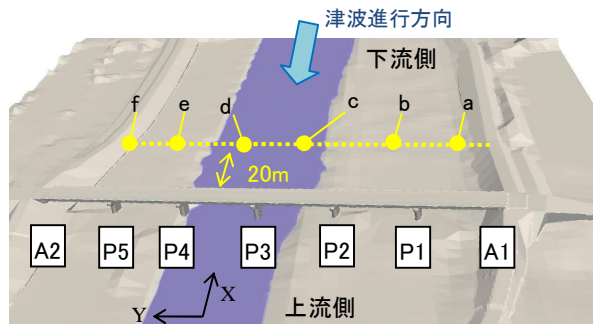


図 5.2.10 水位，流速比較位置

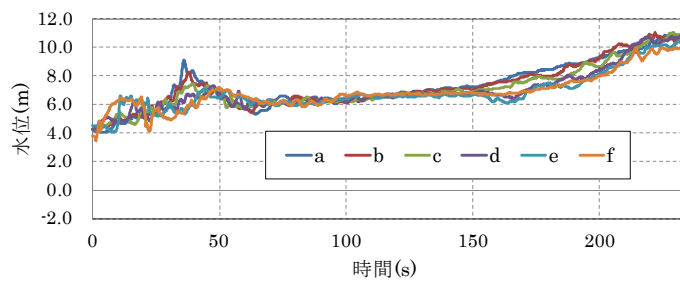


図 5.2.11 橋梁から 20m 下流位置の水位変化

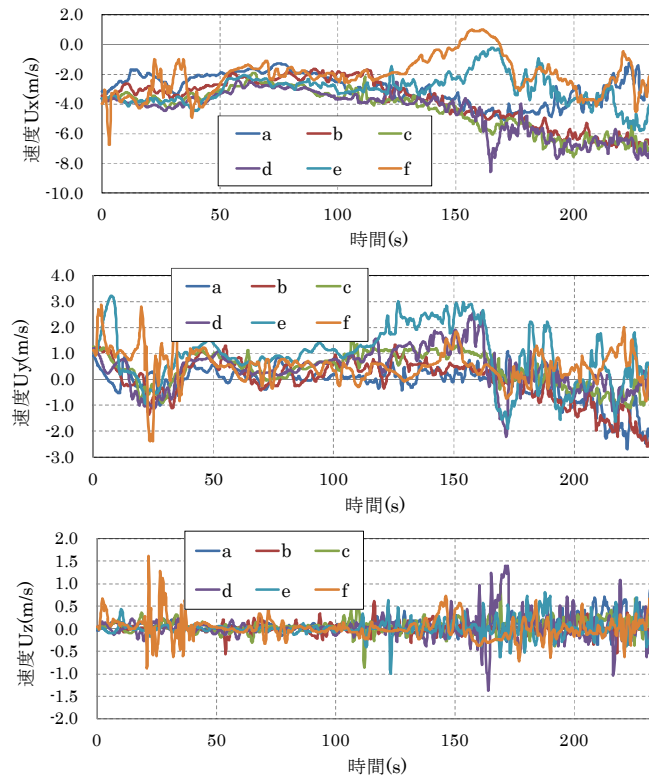


図 5.2.12 橋梁から 20m 下流位置の流速変化

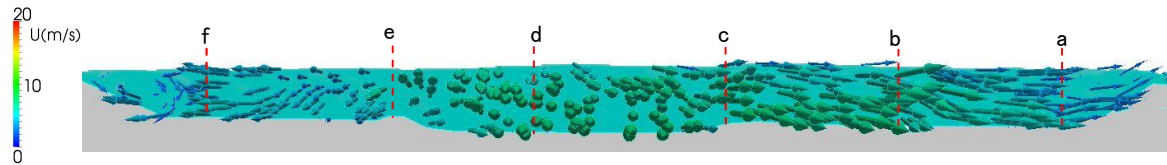


図 5.2.13 橋梁から 20m 下流側位置の津波進行に直角方向断面の流速ベクトル図(220s)

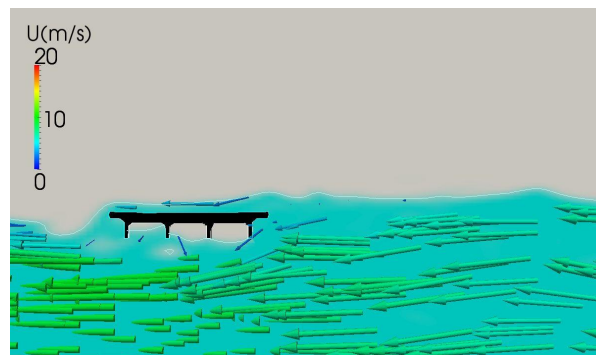


図 5.2.14 橋梁付近の流速ベクトル図(216.4s)

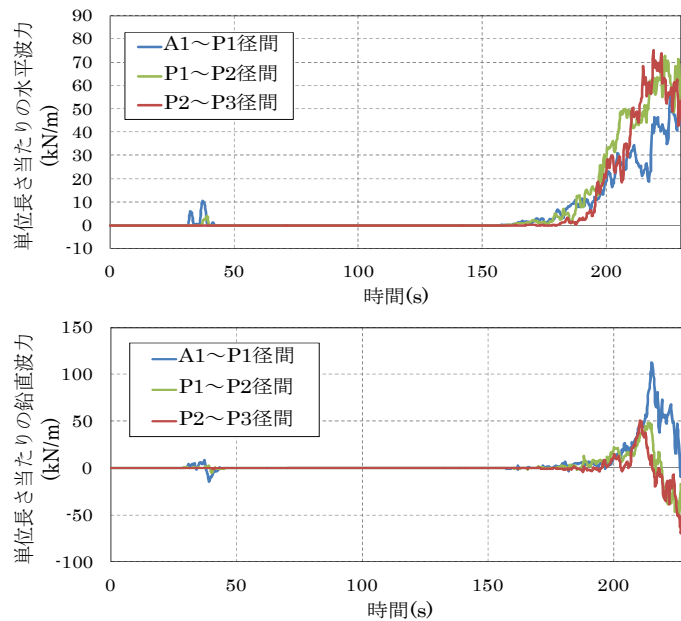


図 5.2.15 桁に作用する波力比較

図 5.2.12 に示す橋梁から 20m 下流位置での流速波形から、津波進行方向の流速 U_x は川幅の中央付近で大きくなることがわかる。津波進行方向に直角方向の流速 U_y も大きく、津波の速度ベクトルは川の流れに平行ではなく、時間とともに様々な方向に変化していることがわかる。また、2次元津波解析では生じない鉛直方向の流速 U_z も瞬間的に度々大きくなっている。図 5.2.13 に 220s 時での橋梁より 20m 下流側の流速直角方向断面の流速ベクトルの分布を示すが、河川横断面内で流速分布が複雑になっていることがわかる。

図 5.2.14 に示す橋梁付近の流速ベクトル (216.4s 時) からは、津波作用時に床版下面と外桁で囲まれた部分には空気塊が生じ、特に橋梁に作用する鉛直方向の津波波力に空気塊の影響が生じると考えられる。すなわち、4 章で調べたように I 桁橋が津波を受けると、空気塊が津波波力に影響するので、I 桁橋の津波波力の解析的評価においては、水と空気の影響を考慮できる二相流解析が必要であるといえる。

図 5.2.15 に径間のポイントにおける単位長さ当たりの水平津波波力と鉛直津波波力を示す。桁の 1 径間(30.1m)当たりの自重は約 3500kN 程度であるが、単位長さ当たりの津波波力に換算した場合、自重の 60%以上の水平津波波力、100%近くの鉛直津波波力が同時に発生しており、偶力の発生も考慮すると、この津波波力は桁を流出させるに十分な大きさであり、津波波力により桁が流出したものと考えられる。

5.3 まとめ

小泉大橋の3次元津波解析により、水位、流速は、橋梁とその周辺地形の影響により場所によって大きく違い、3次元的に複雑に変化することがわかった。同様に、橋梁に作用する波力も地形の影響を受けて、場所により大きく違った。したがって今後は、橋梁とその周辺地形を考慮した3次元津波解析モデルによる橋梁の津波応答挙動を調べる必要があることがわかった。

なお本章の3次元津波解析では、橋台背面盛土や河川堤防の洗堀、橋脚の流出機構の解明までには至っていないが、盛土や河川堤防の洗堀・橋脚の流出も考慮した解析が今後必要となる。本章での3次元津波解析で得られた津波高や流速等の3次元津波特性は、盛土や河川堤防の洗堀・橋脚の流出機構解明のための基礎資料となる。

参考文献

- 1) 本橋英樹・菅付紘一・野中哲也・川崎浩司・原田隆典：小泉大橋の津波被害再現解析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69, No.2, pp.831-835, 2013.
- 2) 片岡正次郎・金子正洋・松岡一成・長屋和宏・運上茂樹：上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析，第 32 回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号 5-349, p.9, 2012.
- 3) 土木学会地震工学委員会：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，2011.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：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，国土技術政策総合研究所資料第 646 号／土木研究所資料 4202 号，2011.
- 5) 坂本佳子，原田隆典，川崎浩司，青木伸一，荒木進歩，本橋英樹，野中哲也：I 桁橋津波数値解析における実験による検証と周辺地形による 3 次元的影響の検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.866-870, 2014.
- 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) 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 Version2.2.0, 2013.
- 8) 吉川泰弘・平井康幸・桑村貴志：一般断面を対象とした津波の河川遡上計算，第 55 回（平成 23 年度）北海道開発技術研究発表会，2012.
- 9) 坂本佳子・原田隆典・野中哲也・吉野廣一・鳥越卓志：I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.59A, pp.450-458, 2013.

第6章 結論

本研究では、津波波源特性・伝播特性・橋梁周辺の津波特性の3要素を考慮した津波による橋梁の応答挙動を評価することができる理論的方法（数値シミュレーション技術による橋梁の津波応答解析法）を提案し、この方法を2011年東北地方太平洋沖地震の津波によりコンクリート桁が流出した床版橋やI桁橋に適用し、再現解析を行った。さらに、水路実験により橋梁の津波応答解析法の妥当性を検証した。以下に本研究の概要と成果をまとめる。

第1章では、研究の背景、既往の研究についてまとめ、本研究の目的を記述した。その概要は次のようになる。

大津波を発生させる海溝型巨大地震は少なく、2011年東北地方太平洋沖地震や2004年スマトラ沖地震で発生した大津波による橋梁被害の報告書から明らかのように、津波被害の原因やその観測記録は極めて少ない。さらに、2004年スマトラ沖地震で発生した大津波による橋梁被害による現地調査が行われ始め、橋梁被害の分析と津波特性に着目した研究が精力的に行われるようになったが、実験的研究が主流である。

したがって、津波による重要生産・社会基盤構造物の応答評価においては、経験的方法や実験的方法に加えて、理論的方法に基づく「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による構造物の3次元非線形応答解析手法」の開発が不可欠となる。本研究は、（1）その解析手法の開発と、（2）これを用いた数値解析例による橋梁の津波応答特性の評価と、（3）その結果の水路実験や橋梁津波被害例による検証、を目的とする。

第2章では、本研究で開発する「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による橋梁の3次元非線形応答解析手法」の概要を記述した。この手法は3つの解析方法を組み合わせたハイブリッド法であるが、津波と橋梁応答の相互作用は小さいものと仮定しこれを無視した解析手法である。すなわち、従来の非線形長波理論に基づく2次元津波解析によって得られる河口域の津波高と流速分布（ステップ1の解析結果）を、橋梁を含む周辺地域を3次元的にモデル化した3次元津波解析領域の境界に入力し（ステップ2）、橋梁に作用する津波波力を求める（ステップ3の解析結果）。最後に、この津波波力を3次元非線形橋梁応答解析モデルに入力し橋梁の津波応答挙動を求める（ステップ4の解析結果）。

2章ではまた、この解析手法で用いる数値解析方法の概要を記述した。

第3章では、2章で示した「津波発生・伝播・海岸線での津波高等に加えて構造物周辺地形や構造物形状を考慮した津波による橋梁の3次元非線形応答解析手法」を2011年東北地方太平洋沖地震で発生した津波により、コンクリート桁が流出した床版橋に適用して、その床版橋の流出過程の再現を試み、以下のような結果が得られた。

- (1) 津波の波力により支承に負反力が発生し、河口側の方が大きく浮上り、桁全体が回転しながら浮上って流出する結果となり、現地の状況が再現できていることがわかった。
- (2) もしも鉛直支承が死荷重反力の 0.74 倍の負反力に耐えうる構造であれば、桁の流出は起きなかったと予測された。
- (3) 隣接の道路橋の影響を検証するために、道路橋が無い状態の解析を行い、桁に作用する津波波力の比較を行った。津波波力は前面と上面ではほぼ同じ、背面と下面では道路橋有りの方が大きくなり、道路橋有りの影響が確認できたが、道路橋が無い場合の津波波力を用いた構造解析より、道路橋が無い場合でもコンクリート桁は浮き上がる結果となった。
- (4) 本床版橋の解析では、津波の前に起こる地震による地盤の揺れによる地震応答解析を実施し、両者の橋梁への影響を調べた。その結果、津波では鉛直反力が大きくなるのに対して、地震応答解析では水平反力が大きくなるという対照的な応答特性となること、および地震応答では、支承は損傷しないことがわかった。したがって、本床版橋は地震動ではなく津波により被災したと判定できる。
- (5) 3次元津波解析の精度を検証するために水路実験結果との比較を行い、解析法の妥当性を示すことができた。

第4章では、一般的な橋梁に多用される I 桁橋を対象とした津波波力特性を調べた。3章の床版橋とは異なり I 桁橋では、桁下に空気塊ができる構造であることから、その影響を確認するために水のみの一相流解析と水と空気の影響が考慮できる気液二相流解析結果の比較により、以下のような結果を得た。

- (1) 本研究で使用した一相流解析法と気液二相流解析法の両方で、波が I 桁に当たる直前でソリトン分裂している現象が確認できた。
- (2) 床版下面と外桁で囲まれた部分（空気塊ができる部分）の鉛直方向の津波波力では、水と空気が評価できる気液二相流解析結果と水のみ評価できる一相流解析結果に大きな差が生じた。一相流解析では水が当たらないと津波波力が発生しないが、気液二相流解析では空気を介して津波波力が発生する。このことから、空気塊の影響を考慮する必要がある I 桁橋等については、気液二相流解析法を使わなければならないことを示した。
- (3) 波が直接当たる部分の津波波力および水平方向の津波波力合計の時刻歴波形は、両解析法でほぼ一致した。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、一相流解析でも対応できるといえる。
- (4) 設計最大の横断勾配 10%を考慮した I 桁モデルでも、桁内に空気塊は存在し続け、鉛直津波波力は勾配を設定したモデルの方が、大きな値となった。
- (5) 津波波形として、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種類を仮定して解析した結果、急な波では I 桁が回転するような浮上りを、緩やかな波では回転せず鉛直方向にそのまま浮上ることとなり、津波波形が急な波形か緩やかな波形かによって I 桁の流出過程は異なることがわかった。

- (6) 乱流モデルを考慮した気液二相流解析と層流モデルとした気液二相流解析による I 桁橋への津波波力を比較した結果、両者はほぼ一致したことより、I 桁橋に作用する津波波力の評価では、乱流モデルを考慮した解析は必要ないものと思われる。今後、さらに計算例を増やして乱流モデルを考慮する必要性の有無についての検討が必要である。
- (7) 津波高さが高くなると桁を越流する津波の高さが高くなり、その分だけ鉛直方向の津波波力が負になって、I 桁は浮上り難くなることがわかった。
- (8) 解析結果を検証するために、水路実験の再現解析を行い、津波が直接当たる位置の波圧、空気塊を介して伝わる波圧ともに、3 次元気液二相流解析結果は実験結果（波圧値や波圧の変動傾向）とほぼ一致することを示した。

第 5 章では、2011 年東北地方太平洋沖地震の津波で被災した小泉大橋（I 桁橋）の 3 次元津波解析を行い、被災過程の再現を試みた。その結果、水位、流速は、橋梁とその周辺地形の影響により場所によって大きく違い、3 次元的に複雑に変化することがわかった。同様に、橋梁に作用する波力も地形の影響を受けて、場所により大きく違った。したがって今後は、橋梁とその周辺地形を考慮した 3 次元津波解析モデルによる橋梁の津波応答挙動を調べる必要があることがわかった。

なお本章の 3 次元津波解析では、橋台背面盛土や河川堤防の洗堀、橋脚の流出機構の解明までには至っていないが、盛土や河川堤防の洗堀、橋脚の流出も考慮した解析が今後必要となる。本章での 3 次元津波解析で得られた津波高や流速等の 3 次元的津波特性は、橋台背面盛土や河川堤防の洗堀、橋脚の流出機構の解明のための基礎資料となる。

謝辞

本論文は、宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程に在籍した平成 24 年 4 月から平成 27 年 3 月までの 3 年間の研究成果をまとめたものです。

本研究を遂行するにあたり、指導教員である原田隆典教授には、研究の進め方から論文の執筆に至るまで、多大なご指導とご鞭撻を賜りました。また、研究者としての心得をご教示いただきました。心より感謝申し上げます。

本論文の審査を通じて貴重なご助言とご指導を賜りました村上啓介准教授、稲垣仁根教授、瀬崎満弘准教授、李春鶴准教授に深く感謝の意を表します。

株式会社 ハイドロソフト技術研究所の川崎浩司研究開発センター長には、研究の遂行、論文執筆にあたり貴重なご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

大阪大学の青木伸一教授、荒木進歩准教授には、貴重な実験結果を頂くとともに、貴重なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

株式会社 五省コンサルタントの福田利紀氏には、貴重な実験結果を頂きました。心より感謝申し上げます。

勤務先の株式会社 地震工学研究開発センターの野中哲也社長には、研究遂行にあたって適切なご助言と激励をいただきました。大学院社会人学生という環境を与えてくださいましたことを心より御礼申し上げます。

株式会社 地震工学研究開発センターの吉野廣一氏、鳥越卓志氏、本橋英樹氏には構造解析、流体解析において貴重なご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

職場の皆様には、業務遂行上、多大なるご迷惑をおかけしましたこととお詫びするとともに、暖かいご支援をいただきましたことに心から感謝いたします。

最後に、本研究の遂行にあたり多忙な中、協力し支えてくれた家族に心から感謝します。

平成 27 年 3 月