

小泉大橋の津波被害再現解析

Tsunami Damage Simulation of KOIZUMI Bridge

本橋英樹¹・菅付絢一²・野中哲也³・川崎浩司⁴・原田隆典⁵

Hideki MOTOHASHI, Koichi SUGATSUKE, Tetsuya NONAKA,
Koji KAWASAKI and Takanori HARADA

After the 2011 Great East Japan Earthquake, it is becoming important to consider the reappearance of tsunami damage by the fluid dynamics numerical analysis. Also, the tsunami three-dimensional simulation is being received much attention. However, practical applications of the three-dimensional fluid numerical analysis in the tsunami simulation have not been investigated yet. Therefore the purpose of this study is to propose the three-dimensional simulation method of a large domain using the method which combined two-dimensional analysis and three-dimensional analysis. Moreover, this method is applied to the Koizumi bridge area which suffered a great deal of damage.

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桁橋の桁が流失するといった被害が多数見受けられた。今回の東日本大震災以降、津波についての研究が進み、橋梁の上部構造の流失メカニズム等が実験や解析により解明されつつある。原田ら(2011)も3次元の流体解析ソフトによる津波解析およびその結果を用いた構造解析を実施して再現解析の研究を進めている。しかし、これらの解析は、波源から対象橋梁までの津波挙動の連続性や解析精度について検討が不十分であると思われる。

そこで、本研究では、宮城県気仙沼市本吉町にある小泉大橋およびその周辺を対象にして、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、橋梁周辺の被害および桁流出メカニズムについて解析的に検討した。

2. 対象橋梁の被害状況

検討対象橋梁の小泉大橋は、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伴った津波によって大きな被害を受けた。写真-1に示すように、上部構造全てが流失し、さらに橋脚1基も倒壊した。片岡ら(2012)も示しているように、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。

3. 再現解析の方法

対象橋梁の桁や橋脚が流出するかどうかの判定は、これらに作用する波力(圧力の積分)と抵抗する力(各部位の耐力)と比較すればよい。例えば、支承の耐力以上に波力(浮力も含む)が作用すれば、桁は流出する。各部位の耐力は、これまでの耐震設定等で既にわかっている場合が多い。しかし、波力の方については容易に算出できていない。平面2次元解析から求まる流速等を基にして、波力の算定方法もあるが厳密ではない。よって、本研究では、3次元津波解析(流体解析)を実施することにより、対象構造物周りの圧力を算出して、その圧力から波力を算定することにした。波源も含め広域全体を3次元津波解析ができれば、より正確に波力が算出できるが、これは解析時間からも非現実的である。そのため、本研究では、図-1に示すような津波被害再現解析の方法を提案する。

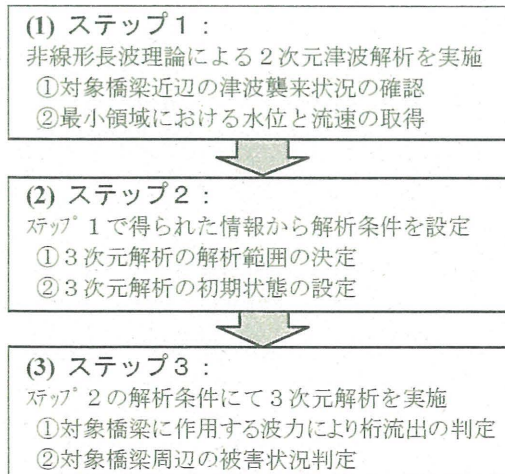
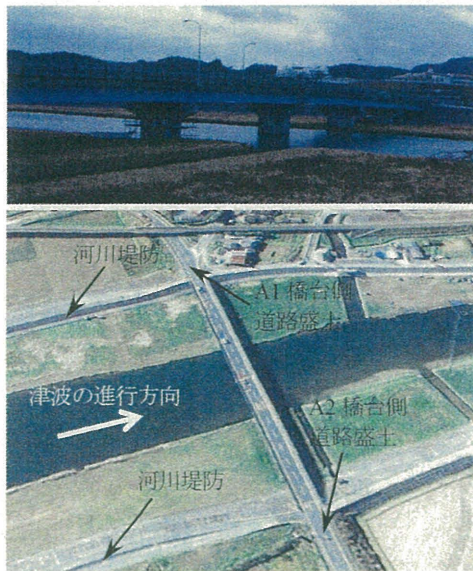
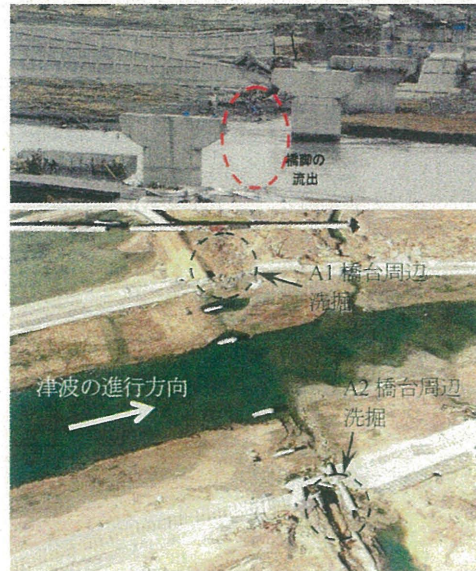


図-1 津波被害再現解析の方法

1	正会員	博(工)	(株)地震工学研究開発センター
2	正会員	修(工)	(株)地震工学研究開発センター
3	正会員	博(工)	(株)地震工学研究開発センター
4	正会員	博(工)	名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
5	正会員	工博	宮崎大学教授 工学部社会環境システム工学科



(a) 被災前



(b) 被災後

写真-1 小泉大橋の被害状況（土木学会東日本大震災被害調査団（地震工学委員会）緊急地震被害調査報告書より）

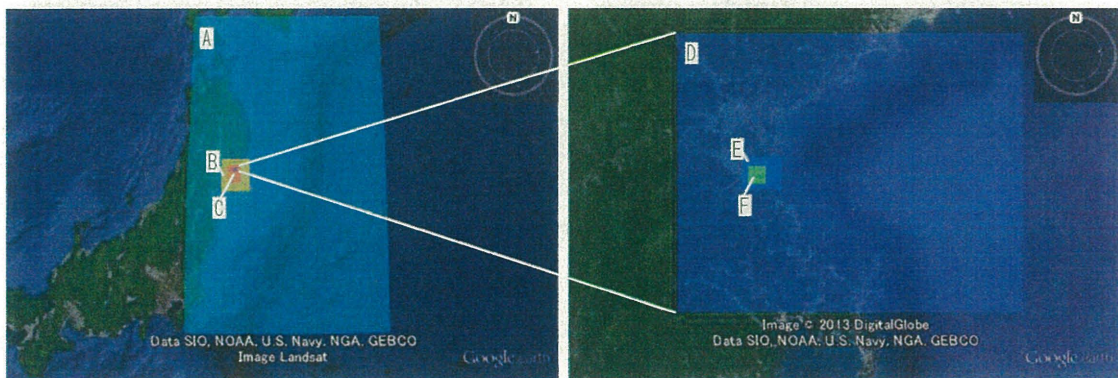


図-2 地形メッシュ領域

なお、本研究では、3次元流体解析ソフトとして、OpenFOAMを採用した。OpenFOAMは、ソースコードが公開されている流体解析コードであり、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。本解析では、OpenFOAMのうち、非圧縮・不混和流体の2相流ソルバであるinterFoamを用いた。このinterFoamは、離散化手法として有限体積法を、自由表面流体解析モデルにはVOF法を採用している。

図-1からわかるように、本研究の津波被害再現解析は以下に示す(1)~(3)の3つのステップから成る。

(1) 2次元津波解析の実施：ステップ1

非線形長波理論による平面2次元津波解析を実施する。この解析法は、一般的に行われている方法であり、波源を含む広範囲から対象橋梁を含む最小領域までの領域に対して津波解析を実施する。この解析により、対象橋梁周辺の津波襲来状況の確認や最小領域における水位と流速を得ることができる。

表-1 メッシュサイズ

領域名	グリッド間隔	格点数			領域幅(km)	
		横方向	縦方向	全格点数	横方向	縦方向
A	1215m	432	684	295,488	524.9	831.1
B	405m	176	198	34,848	71.3	80.2
C	135m	268	314	84,152	36.2	42.4
D	45m	314	246	77,244	14.1	11.1
E	15m	98	80	7,840	1.5	1.2
F	5m	140	140	19,600	1.4	0.9
合計				519,172		

(2) 3次元津波解析の条件設定：ステップ2

前述のステップ1で得られた情報から解析条件を設定する。具体的には、まず対象橋梁周辺の津波襲来状況（流速や方向、水位変化など）から判断して3次元解析の解析範囲を決定する。決定した範囲で3次元津波解析を実施するが、その範囲でも解析時間が膨大となる。そのため、地震発生時や対象橋梁に津波が到達する時刻（対象橋梁地点で水位変化が起こる時刻）から、3次元津波解析を実施するのではなく、対象橋梁が桁流出といった被

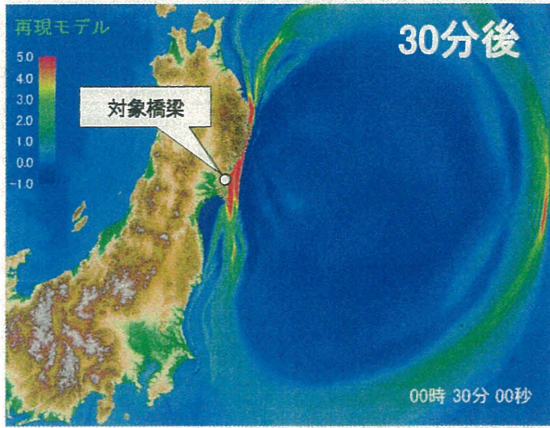


図-3 2次元津波解析結果

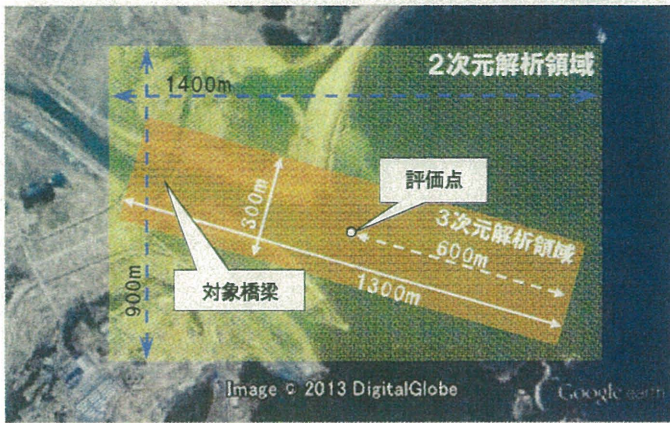


図-4F 領域と3次元津波解析領域

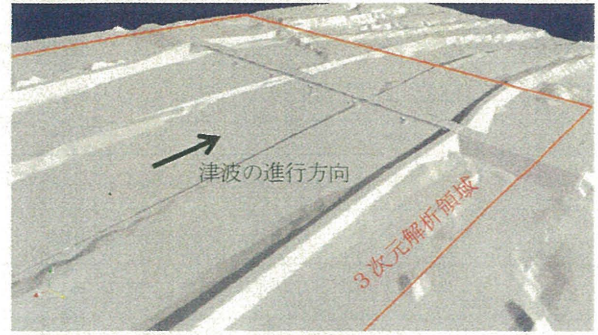


図-5 3次元モデルと3次元解析領域

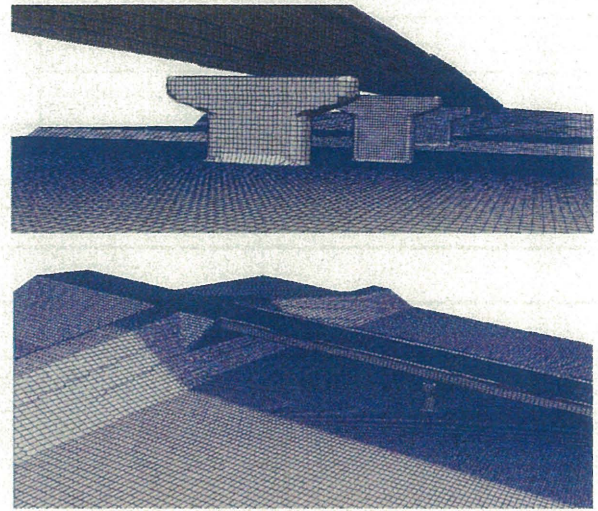


図-6 3次元解析モデル（メッシュモデル）

害を受ける直前またはある程度の前の状況から、解析を実施する方が効率的である。よって、本研究では、桁が流出する前の状況から解析を開始することにした。解析を実施する前に、その時点の状態（初期状態）をつくる必要がある。その状態を、前述の平面2次元解析の結果から作成するようにした。

(3) 3次元津波解析の実施：ステップ3

前述のステップ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が求まり、対象橋梁の桁や橋脚の流出の判定を行う。また、対象橋梁の周辺の被害状況も確認する。

4. 平面2次元津波解析

前述した津波被害再現解析の方法に従って、非線形長波理論による平面2次元津波解析を実施する。本解析に必要な地形の各メッシュ領域を図-2に、各メッシュサイズを表-1に示す。この表に示すように、最小メッシュの解析領域は、領域Fであり、そのサイズは5mになっている。波源モデルとしては、Fujitaら(2011)の藤井・佐竹モデルを採用した。このような条件で解析した結果の

一部を図-3に示す。この図は、地震発生から30分後の津波の襲来状況を示したものであり、対象橋梁の河口近くに高い津波が襲来していることがわかる。

5. 3次元津波解析の条件設定および解析方法

(1) 3次元解析領域の設定

前述した平面2次元津波解析結果の津波襲来状況（対象橋梁近辺の流速と方向）から判断して、3次元津波解析の領域を図-4（オレンジ色）に示すように幅300m、長さ1300m、そして高さを30mとした3次元空間とした。

本研究では、次のような手順で、この3次元空間の解析モデルを作成した。まず、最小領域Fに対して、5mメッシュ情報から3次元の地形を作成する。その地形上に対象橋梁の3次元構造モデルを構築する。また、対象橋梁周辺の地形、特に河川堤防や盛土などが不正確なところがあつたため手作業で微調整した。このようにして作成したF領域の3次元モデルを図-5に示す。

次に、この3次元モデル上で、図-5に示すように3次元津波解析の解析範囲を決定する。その範囲での3次元津波解析モデル（メッシュモデル）を図-6に示す。対象橋梁

領域	幅 [m]	長さ [m]	高さ [m]
A	1000	1000	30
B	1000	1000	30
C	1000	1000	30
D	1000	1000	30
E	1000	1000	30
F	300	1300	30

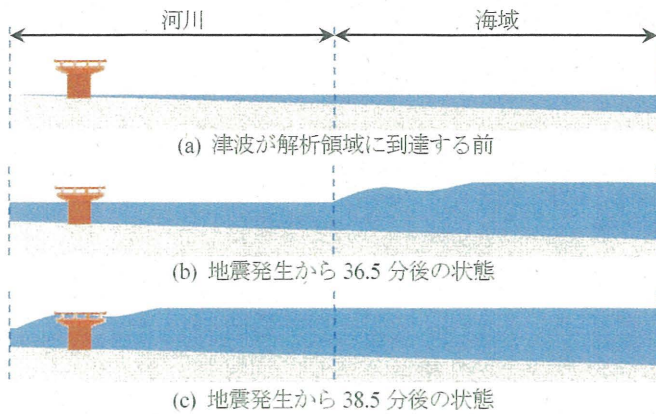


図-7 3次元津波解析における津波襲来のイメージ

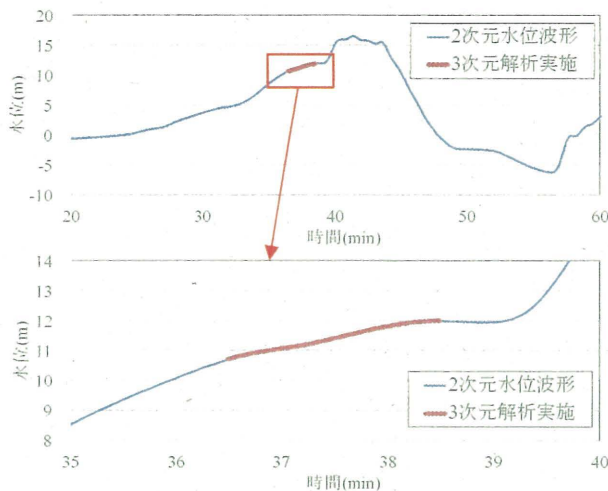
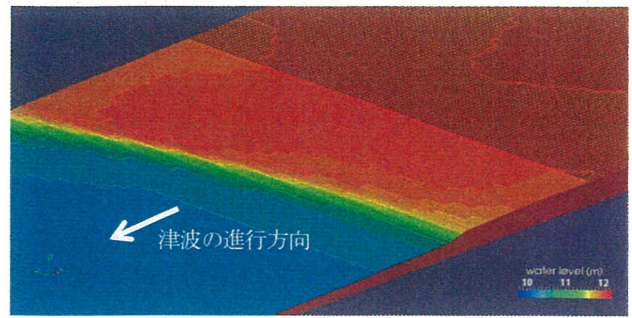


図-8 2次元津波解析結果の水位履歴

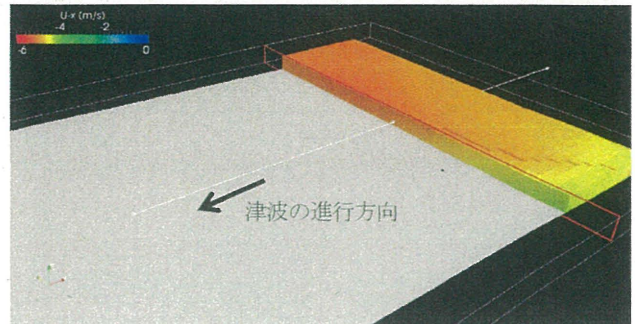
が桁橋で、空気が溜まる桁内（床版と桁で囲まれた空間）をモデル化する必要がある、その部分を複数メッシュに分割するため、最小メッシュサイズを0.25mとした。ただし、総メッシュ数を減らすため、対象橋梁から離れた沖合いのメッシュは粗くした(0.5~1.0m)。また、3次元解析領域をこのように小さくしてもできるだけ影響がないように、この領域に対して、津波を作用させる入射境界と津波が橋梁を通り過ぎて反射しない放射境界（透過境界）を設定した。以上のようにして作成した3次元津波解析のメッシュモデルは、約3000万メッシュのモデルとなった。このように大規模モデルとなったため、PCクラスタを使用しても、約2週間の解析時間を要した。

(2) 初期状態の設定

本大規模モデルに対して、次に示すような方法で、初期状態を設定して解析することになる。初期状態の作成方法を図-7と図-8を用いて説明する。通常は、水位変化なし、流速ゼロの静止状態から、津波を作用させる（図-7(a)）。本解析では、ある程度、津波が襲来したとき（図-7(b)）から、3次元津波解析を実施する。前述した平面



(a) 水位コンター図



(b) 流速コンター図

図-9 3次元津波解析の初期状態の3次元表示

2次元津波解析における評価地点（図-4内の評価地点）の水位変化を図-8に示す。平面2次元解析結果の対象橋梁位置の津波高さから、おおよそその橋梁の桁の高さまで津波水位が達する時刻がわかる。その時刻より前で桁下に津波が当たらないと予想できる36.5分から38.5分の2分間（120秒）を解析することにした。その時間を図-8内の赤線で示している。なお、38.5分以降、津波高さはさらに高くなるが、本解析ではこの2分間で、津波が桁下に当たってから路面を十分に乗り越え、桁が流出すると予想した。ここで設定した初期状態を3次元的に表示すると、図-9のようになる。図-9(a)は、初期状態の水位コンターである。3次元メッシュで定義しているため、滑らかではない。図-9(b)は、対象橋梁から沖合い700m地点における鉛直方向に断面を切った面での流速の状態である。なお、2次元解析結果の流速を用いているため、この時点で鉛直方向には流速の変化はない。

(3) 3次元解析の方法

前述したように初期状態（図-7(b)）から、3次元解析を実施する（解析終了は図-7(c)）が、その方法を次に示す。2次元解析結果から時刻36.5分の水位と流速データを得て、海面の全メッシュ上にその水位を、水の領域の全メッシュ上にその流速を初期値として設定する。3次元解析を実施する時点で、入射境界（造波境界）から、その地点の2次元解析結果の流速で水流入させる。なお、この境界上での水位については、本再現解析において影響が少ないと思われるため、一定とした。

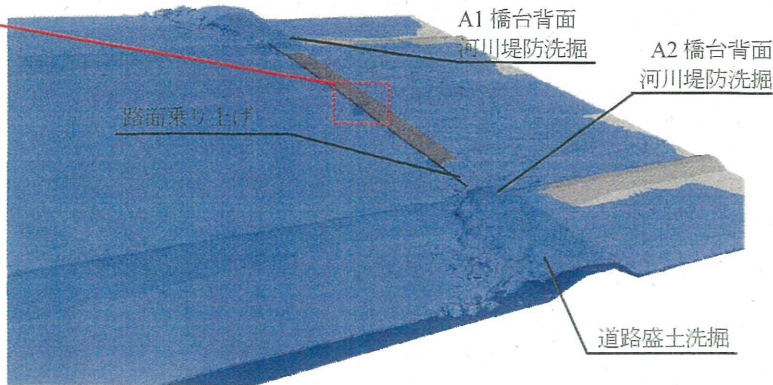


図-10 3次元津波解析結果

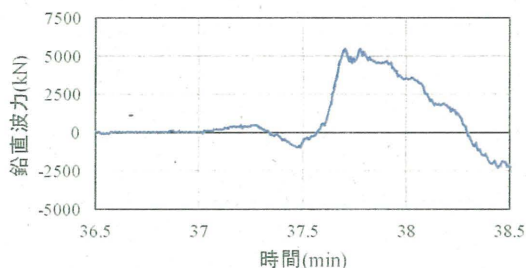


図-11 3次元津波解析結果の波力の時刻歴

6. 再現解析の実施結果

(1) 橋梁を含む周辺の解析結果

小泉大橋を含む周辺の解析結果 (37.7 分後) を図-10 に示す。この図から、津波が上部構造を乗り越え始めていること、さらに両サイドの橋台背面の道路盛土も津波が乗り越えていることがわかる。津波が道路盛土を乗り越上げるため、橋台側の水位が増すことになって、橋梁の桁上を中央に向かって水が流れる様子もわかる。このように道路盛土および河川堤防を津波が早い速度で越流するため、前述した写真-1(b)のようにこの部分が洗掘されると想像できる。

(2) 桁に作用する波力

本津波解析により、対象橋梁の桁周りの圧力が算出できる。その圧力から鉛直方向の波力へ変換して、その波力 (橋梁中央部の1径間分の合計波力) の時刻歴をグラフにすると図-11 のようになる。このグラフから、桁に津波が衝突して、津波が上部工を越流し始めた時点 (37.7 分付近) で、最大の鉛直方向波力を示すのがわかる。この鉛直波力は約 5000kN にも達し、桁の死荷重 (桁1径間の自重は約 3500kN) より大きいので、鉛直方向に浮き上がる結果となった。このことから、図-12 のように桁が流され、桁が流失 (写真-1(b)) したといえる。なお、このグラフにおいて、最大荷重を示した後、鉛直波力が低下するのは、津波が桁を覆いかぶさり下方向に押さえる力が発生したからである。

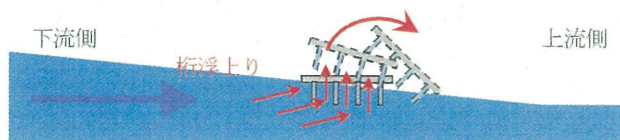


図-12 桁流出メカニズム (イメージ)

7. おわりに

本研究では、震災で被災した小泉大橋およびその周辺地形を対象にして、実際に近い津波襲来の状況を再現させ、津波被害メカニズムについて解析的に検討した。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 非線形長波理論による解析結果の水位と流速を3次元津波解析の初期状態として解析する方法を提案し、実際に再現解析を試みた。
- (2) 本3次元津波解析により、対象橋梁の桁が流失したことや橋台背面盛土や河川堤防が洗掘されたことが、概ね再現および想像できる結果が得られたといえる。

本研究では、2次元解析結果をもとにして3次元解析の初期状態を作成しているため、3次元解析を実施した時点で、計算が不連続性になっている。今後は、この不連続性を解決していく予定である。

参考文献

- 原田隆典・村上啓介・Indradi Wijatmiko・坂本佳子・野中哲也 (2011) : 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.
- Fujii, Y., K.Satake, S.Sakai, S.Masanao, T.Kanazawa (2011) : Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, pp. 815-820.
- 一般財団法人オープン CAE 学会 : OpenFOAM ユーザガイド和訳 Version 2.1.1 (オンライン), <http://www.opencae.jp/>, 参照 2013-06-02.
- 片岡正次郎・金子正洋・松岡一成・長屋和宏・運上茂樹 (2012) : 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, 9p.