

津波波源から橋梁までの全体系津波再現解析

野中 哲也¹・本橋 英樹¹・原田 隆典²・坂本 佳子³・菅付 紘一⁴・宇佐美 勉⁵

¹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）

²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）

³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）

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）

⁵フェロー D.Sc.名城大学教授 理工学部建設システム工学科（〒468-8502名古屋市中天白区塩釜口1-501）

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、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)~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、著者らが実施した津波解析は、観測された津波高さをもとに、対象橋梁近辺の領域だけを取り出した解析であった。すなわち、津波高さ以外の情報がなかったため、高さ以外の特性（方向、流速等）を仮定して段波状の津波を設定し、その津波を解析領域の一辺の端部から本橋梁に対して垂直に作用させるというものであった。

そこで、本研究では、東日本大震災の津波波源として研究されてきた波源を参考にして、津波波源域から対象橋梁までの全体系の津波解析を実施し、その結果得られた波力でもって対象橋梁の桁流出の判定を行うという方法を提案し、実際に被災した橋梁を対象にして再現解析を試みた。

著者らは、これまで地震動と構造物に関する分野において、「震源断層から橋梁までの全体系解析」のための解析法や解析モデルを提案⁷⁾してきた。本研究では、この「全体系で解く」という考えを津波再現解析に適用している。

2. 再現解析手順

詳細な津波被害再現のためには、津波（流体）と橋梁（構造）の連成挙動の考慮、桁流出後の漂流解析等を行う必要もあるが、ここでは東北地方太平洋沖地震に伴った津波により対象橋梁の桁が流失するかどうかに着目した再現解析とした。

津波が発生してから対象橋梁に到達するまでの津波挙動と、その津波により対象橋梁がどのような挙動を示すかを解明するため、本研究では、図-1に示すような解析手順を提案する。本研究における解析

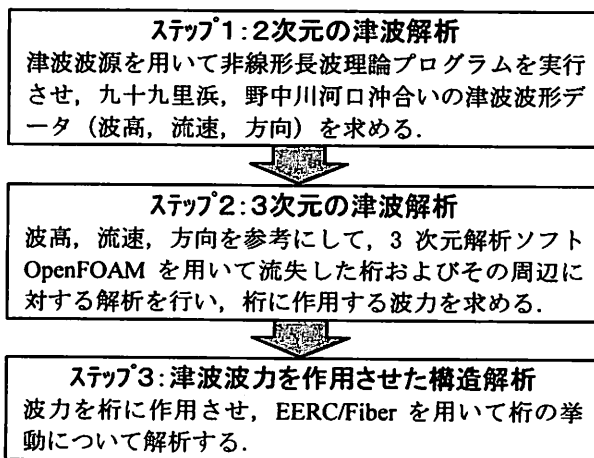
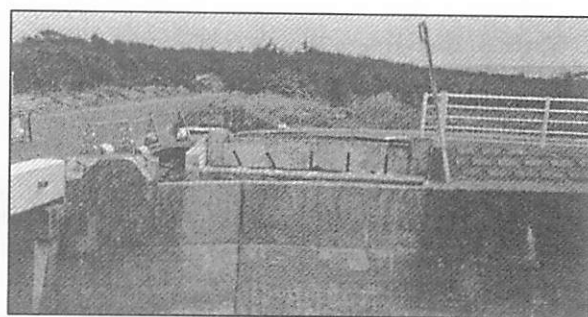


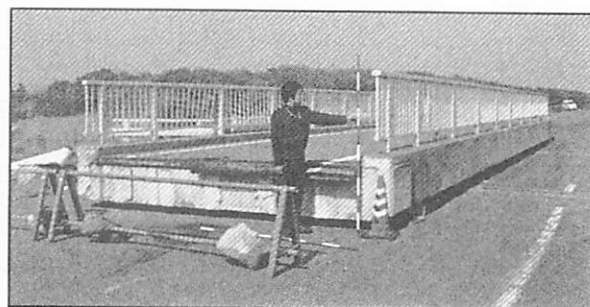
図-1 再現解析手順



(a) 被災後



(b) 左岸側流失状況



(c) 流出した桁

写真-1 対象橋梁被災状況

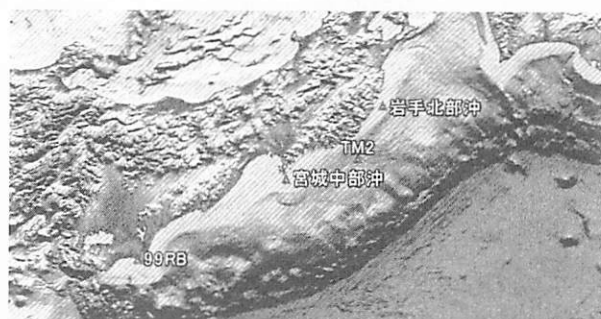


図-2 評価位置

表-1 評価位置の情報

場所	緯度	経度	水深(m)	説明
岩手北部沖	40.1167	142.0667	125	GPS波浪計 (国土交通省港湾局)
宮城中部沖	38.2325	141.6836	144	
TM2 (陸側)	39.2489	142.4411	約1000	ケーブル式海底水圧計 (東大地震研究所)
99BR*	35.6903	140.6938	—	対象橋梁の河口沖合い

※観測装置の場所ではない

は、津波による2種類の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からなる。

著者らは、既に文献5), 6)にて、このような解析手順を提案しているが、この文献においては津波波源からの河口沖合いまでの津波解析を実施しておらず、対象橋梁近辺の挙動だけに着目したため全体系の津波再現解析とはなっていない。

ステップ1では、非線形長波理論プログラムにより広域の2次元津波解析を実施する。これにより、津波の波源位置(断層位置)から対象橋梁の河口沖合いまでの津波挙動(波高、流速、方向、到達時間等)がわかる。なお、文献5), 6)では、対象橋梁に近い銚子漁港の気象台の潮位計にていて観測された津波高さのみをそのまま用いて再現解析を実施したため本ステップを省略している。

ステップ2では、前ステップで得られた波高や方向を基に、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)を定義する。この波状段波を沖合いの造波境界から入力させる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OpenFOAM⁸⁾を用いた。

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/Fiber⁹⁾(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、地震力(加速度波形)以外に動的な外力(波力)も定義できる。

以上のような解析手順により、津波の波力により桁が浮上り、流出していくメカニズム等について、概ね把握することができると考えられる。

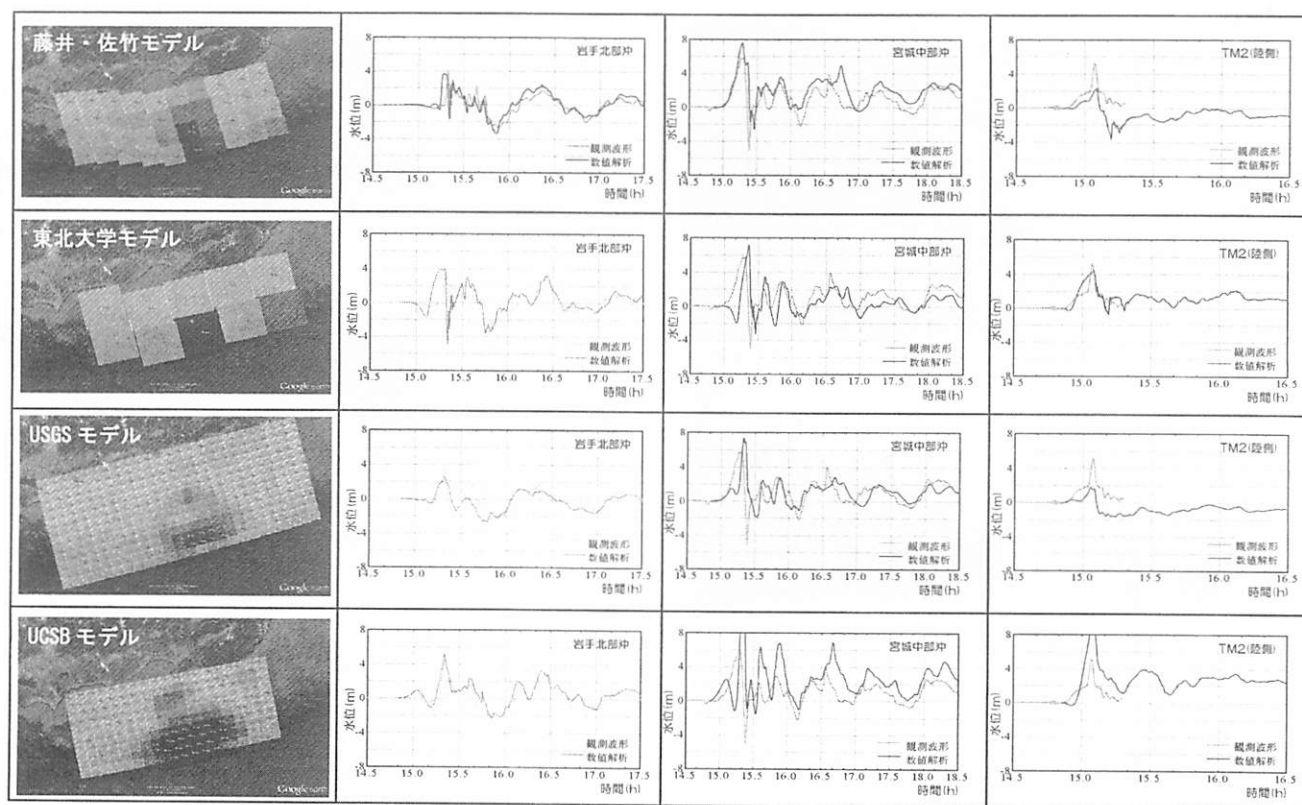


図-3 各波源モデルによる解析結果の一覧

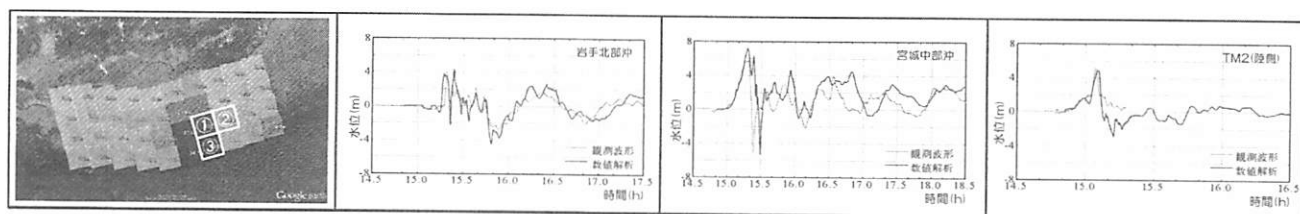


図-4 修正波源モデルによる解析結果

3. 検討対象地点および橋梁被害状況

検討対象地点は、千葉県九十九里浜の野中川河口にかかる橋梁近辺である。この橋梁の桁が、東日本大震災の津波により流失した。本橋梁は、海岸線に沿って延びる自転車道の床版橋（橋長 19.1m）であり、道路橋と並行してかけられていた。被災した橋梁近辺の状況を写真-1(a)に示す。流失した桁は、コンクリート桁で、重量が約 1500kN あり、桁下面にほとんど凹凸がない。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、写真-1(b)に示すように、桁が流失し、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、桁全体が浮上り、道路橋の桁の上に着地（写真-1(c)）したと想像できる。

4. 津波波源域から沖合いまでの津波解析

(1) 津波波源の選定

津波波源モデルとして、これまでいくつか提案されている。その中から、藤井・佐竹モデル^{10),11)}、東北大学モデル¹²⁾、USGS（アメリカ地質調査所）モデル¹³⁾および UCSB（カリフォルニア大学サンタバーバラ）モデル¹⁴⁾について、比較検討を実施した。なお、この比較は、各モデルの優劣を決めるのではなく、本研究で設定した評価位置で、観測と最もよく一致するものを選定することである。メッシュ分割や地形データ等の解析条件としては、各参考文献を基に、できるだけ共通な条件を設定して、比較検討を実施した。

評点位置は、広範囲にて少ない数で均等になるように、図-2、表-1 に示すような岩手北部沖、宮城中部沖、および TM2 の 3 箇所とした。

各モデルの解析結果を、図-3 に示す。この図か

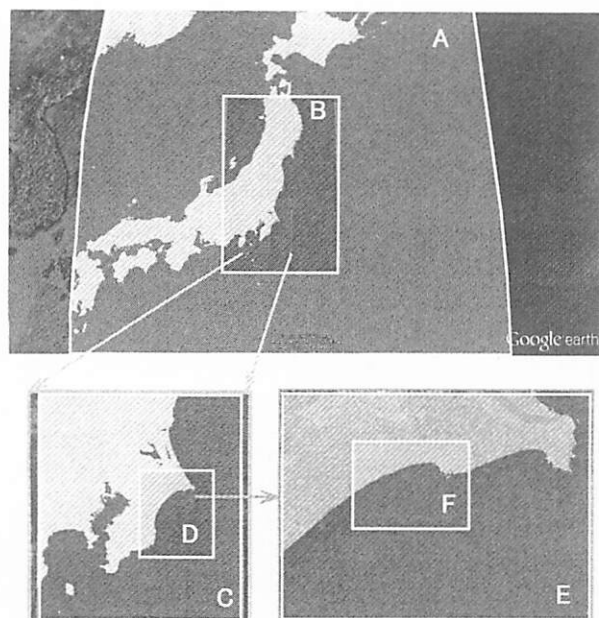


図-5 地形メッシュデータ

表-2 メッシュサイズ

領域番号	領域範囲				領域サイズ			
	南西端(経度・緯度)	北東端(経度・緯度)	メッシュサイズ	経度分割数	緯度分割数	メッシュ数		
領域A	130.1726 29.0770	152.2234 44.3848	2430m	800	700	560000		
領域B	137.9547 33.5673	143.8074 40.7474	810m	637	985	627445		
領域C	139.0144 34.4153	141.4339 36.6046	270m	790	901	711790		
領域D	140.2251 35.0649	141.0592 35.8602	90m	817	982	802294		
領域E	140.5511 35.5600	140.8860 35.7620	30m	995	748	736780		
領域F	140.6295 35.6438	140.7545 35.7187	10m	1102	832	916864		

ら、各モデルとも観測値と概ね一致しているが、特に藤井・佐竹モデルと東北大学モデルはよい精度で一致しているのがわかる。本研究では、対象橋梁の千葉県に近い宮城中部沖の再現性を優先して、藤井・佐竹モデルを採用することにした。

(2) 波源モデルのチューニング

藤井・佐竹モデルにおいては、TM2 の精度が東北モデルと比較して少し精度が悪い。そのため、一部の波源パラメータを修正することにした。図-4 内に示した波源モデルにおいて、3箇所のセグメント①～③のすべり量を、それぞれ 25.7m→30.0m、6.5m→10.0m、28.8m→60.0m のように変更した。その変更後の解析結果を同図に示している。この図から、TM2 において観測値とよい精度で一致しているのがわかる。なお、他の地点については、この変更により精度低下は起きていない。よって、対象橋梁に対する津波波源モデルとして、このように変更した藤井・佐竹モデルを用いることにした。

(3) 解析条件

解析領域の地形データについては、図-5 に示すように、津波波源域を含む広域の粗いメッシュ領域 A から対象橋梁近辺の細かいメッシュ領域 F までの

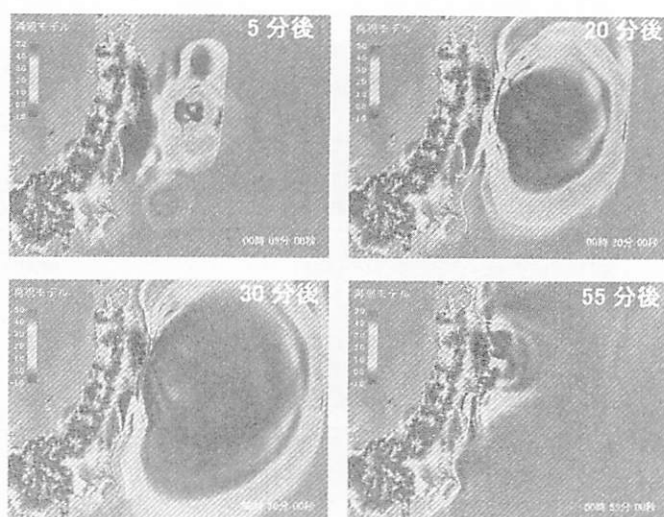


図-6 修正波源モデルによる解析結果

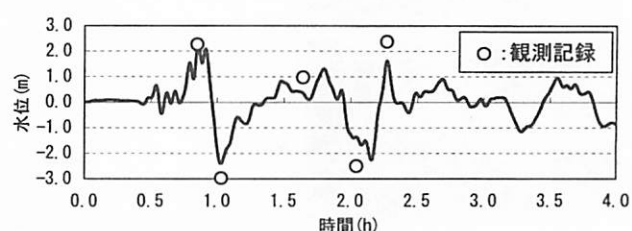


図-7 銚子沖での波高（解析結果と観測記録）

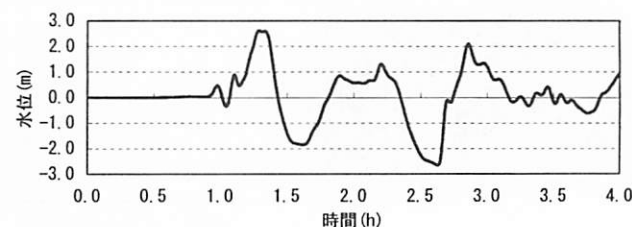


図-8 対象橋梁河口沖合いでの解析結果の波高

6種類のメッシュ領域でメッシュデータを構築する。各メッシュ領域の位置とメッシュサイズについては表-2のように設定し、対象橋梁近辺のメッシュをできるだけ細かくし、この領域Fを10mメッシュとした。

解析手法には一般的によく使用されている非線形長波理論を採用し、解析時間を4時間、計算時間間隔を0.1秒として、2次元の津波解析を実施した。

(4) 非線形長波理論による2次元津波解析結果

選定した前述の波源モデルと本メッシュデータにより、解析した結果の津波波高シミュレーションを図-6に示す。この図は、地震発生からの5分後、海底水圧計TM2が最大波高を示した時刻に近い20分後、銚子漁港の気象台の潮位計で水位が急上昇した30分後、そしてその潮位計で最初の大きな水位2m超を示した55分後をそれぞれ示している。30分後の津波シミュレーションの結果から、銚子沖に

第 1 波が到着しているのがわかる。また、55 分後の結果から、銚子沖に津波高さが 2~2.5m の津波となっているのがわかる。

まず、銚子漁港の気象台の潮位計が設置されている地点の津波高の時刻歴を図-7 に示す。図内には、潮位計が観測した代表的な波高も示している（なお、この観測値は、銚子地方気象台から提供された潮位変化のグラフから読み取った値で、図内に○印で示した）。この図から、解析結果が観測された水位の上下動の傾向をよく捉えているのがわかり、観測された最大波高 2.4m とほぼ一致した。ただし、潮位計で最大波高 2.4m を示したのが地震発生から 2 時間 36 分後であり、解析の方は 1 番目の大きな波高を示した 55 分後と異なった。しかし、観測された 1 番目の大きな波高も 2m 超と大きいいため、観測値と解析値は概ね一致しているといえる。

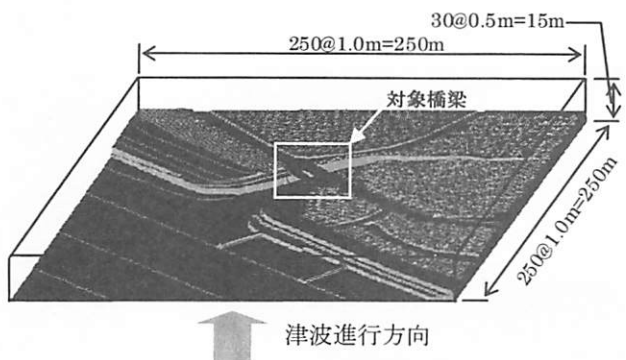


図-9 対象橋梁近辺の解析モデル

次に、対象橋梁河口の約 200m 沖合い地点（表-1 内の 99BR 地点）の津波高の時刻歴を図-8 に示す。この図から、銚子沖の津波と比較して、水位の上下動の傾向は大きくは変わらず、約 20 分ずれているのがわかる。また、銚子沖における最大波高 2.4m の波が、地震発生から 1 時間 20 分後に河口沖合いで 2.6m の津波高さに多少増幅されていることもわかる。

5. 沖合いから橋梁までの津波解析

(1) 使用した解析ソフト

津波（流体）解析ソフトとしては、一般的に差分法がよく用いられ、著者らも文献 5), 6) にて差分法を採用した解析ソフトを用いていた。しかし、構造物および地形（特に、護岸、河川等）の形状を少ないメッシュ数でモデル化するには、やはり非構造格子として定義できる有限要素法か有限体積法が有効である。計算効率（計算時間）から、本モデルのような解析には、有限体積法がより有効であると思われる。本研究では有限体積法を採用した解析ソフト OpenFOAM[®]を用いた。この解析ソフトは、水と空気の不混和流体の非圧縮性の 2 相流解析ソフトであり、自由表面解析モデルとしては VOF 法を採用している。なお、この解析ソフト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。

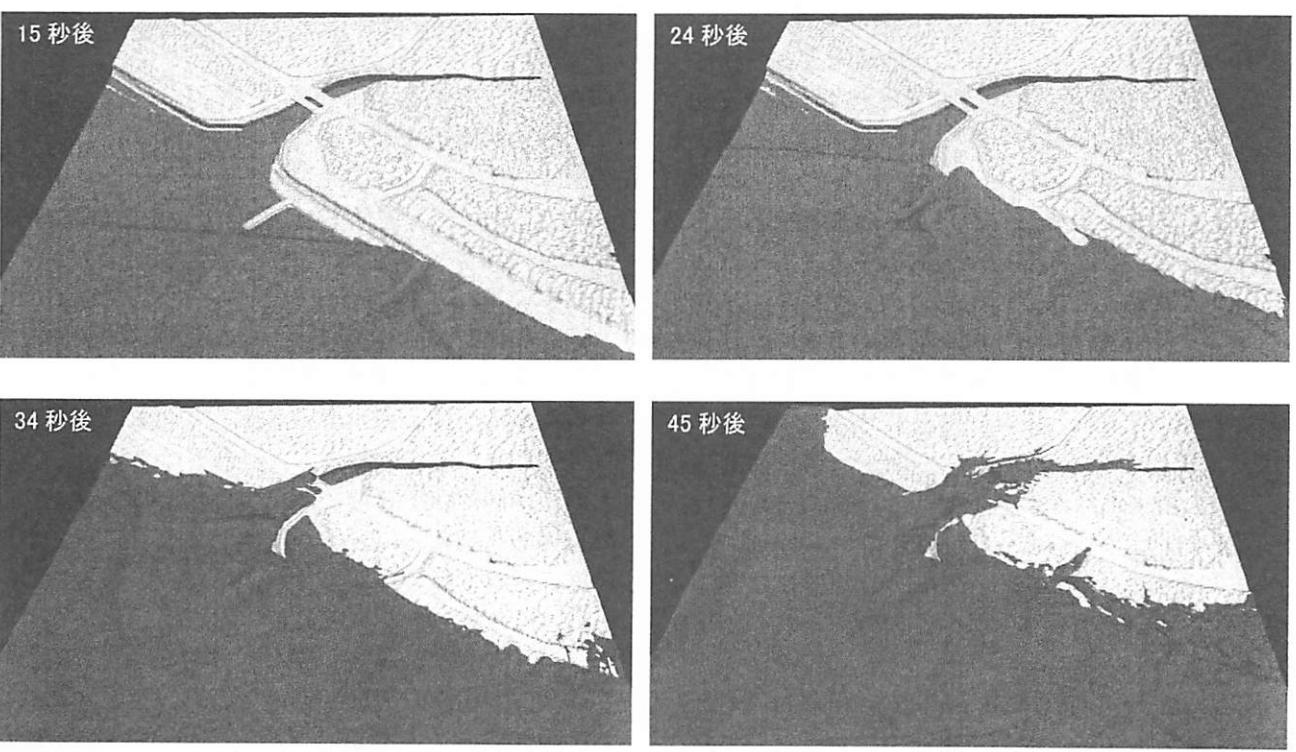


図-10 3次元津波解析結果（解析領域全体）

(2) 解析モデルおよび解析条件

対象橋梁を中心に河口沖合いから陸上までの3次元空間を本解析の解析範囲とする。メッシュ分割については、まず差分法と同じように、水平2方向および鉛直方向に対して等分割する。本解析では、水平2方向に250分割、鉛直30分割とした。多少粗いメッシュになっているが、計算時間を考えこのような分割とした。次に、このように等分割した後は、橋梁や護岸等に対して、より正確に形状を定義するため、格子点をずらして再メッシュ分割した。その結果、図-9に示すような解析モデルとなる。解析モデルの規模を表す総セル数は約188万となり、計算時間については一般的なワークステーションで約14時間となった。

この解析モデルにおいて造波境界を定義して、その造波境界から津波を作用させる。前述の2次元津波解析結果から津波の作用方向（北に対して-60度）がわかるため、その方向を考慮して解析モデルを作成することになる。具体的には、解析空間の矩形領域の一边を津波の造波境界にする必要があるため、津波作用方向とその造波境界が垂直になるように定義する。これにより、解析空間が対象橋梁や海岸線に対して並行にならず傾いた状態となる。

造波境界から作用させる津波の形状については、最大波高が2.6mでそれに達する時間を20秒とする段波を仮定した。造波境界位置の平均初期水位は、2.5mである。

(3) 有限体積法による3次元津波解析結果

前述の解析モデルに対して、造波境界から設定した津波を作用させた。造波境界上で津波を造波させた時点を開始時刻として、各時刻の津波の襲来状況を図-10に示す。

まず、津波を造波してから15秒経過すると、造波境界上で生成した津波が明確な段波として形成され、対象橋梁の河口近辺まで近づいている。海岸線に対して斜め方向から津波が襲来するため、海岸線から一様に浸水せず、津波の段波が早く到達する手前の左岸の海岸から徐々に浸水している。

さらに、24秒経過すると、津波が河口に到達し、海岸線の浸水が拡大する。ただし、この時点では、海岸線近辺だけが浸水している状態である。

34秒経過した時点で、津波が対象橋梁に到達する。海岸線の浸水も進むが、この時点で奥の陸地までは遡上していない。

最後の解析ステップである45秒後においては、対象橋梁が完全に浸水し道路橋の方も浸水している。河川を津波が遡上し、河川堤防も乗り越え、浸水範

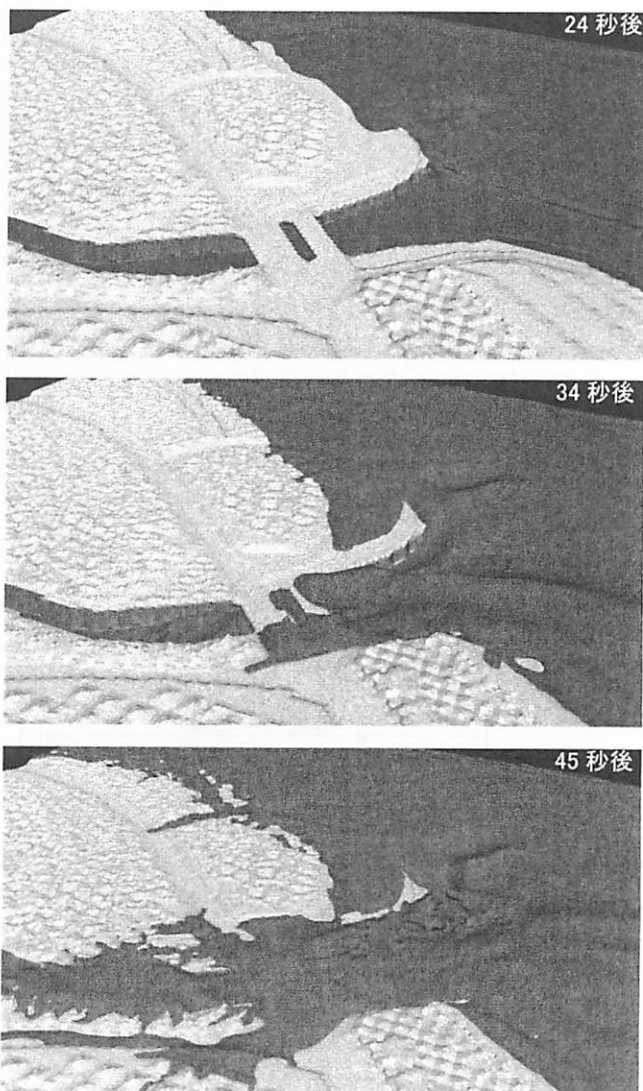


図-11 3次元津波解析結果（対象橋梁近辺の拡大図）

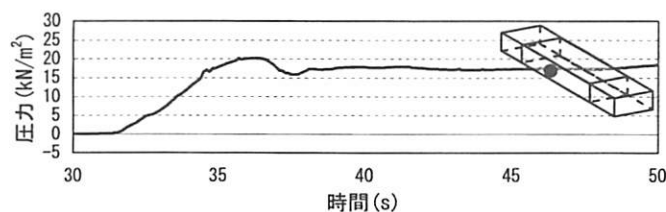
囲が拡大している。

対象橋梁近辺を拡大して、同じ時刻のときの津波の襲来状況を図-11に示す。

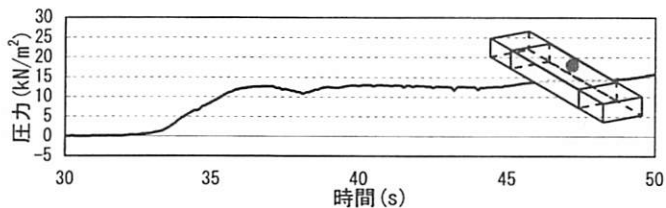
前述の同じ24秒後では、まだ、津波の段波が対象橋梁に到達していない。左岸側の海岸線のみが浸水している。

前述の同じ34秒後では、対象橋梁の床版橋に到達し、床版の上を津波が乗り越え、この床版橋と隣接の道路橋の間から水が噴き出している。津波の進行方向にあたる右岸側の方も浸水を始めている。

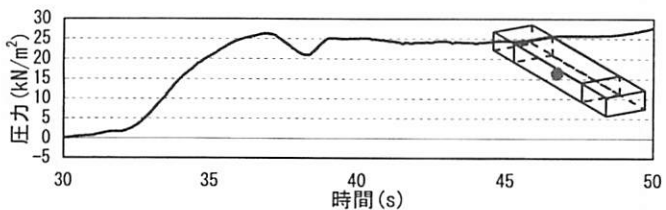
前述の同じ45秒後においては、河川を遡上し、河川堤防を越流して浸水が拡大している。津波が海岸線に対して斜めに襲来したが、河川に入ると河川に沿って氾濫しながら流れていく様子がわかる。また、周りより低い道路も浸水していることが確認できる。この最後の解析ステップの浸水状況は、前述した津波襲来後の写真-1(a)の被害状況と比較して概ね対応し、特に左岸側の海岸近くの浸水痕跡と



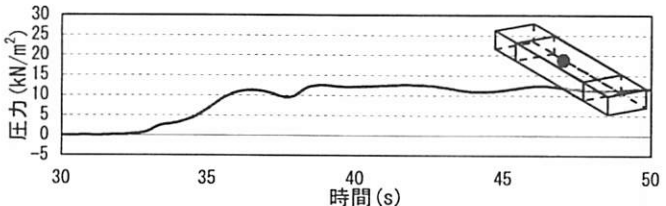
(a) 位置－前面中央



(b) 位置－背面中央



(c) 位置－底面中央



(d) 位置－上面中央

図-12 桁に作用した圧力

橋梁を過ぎた右岸側の細い道路周辺の浸水被害をよく再現できているといえる。

6. 津波波力による橋梁の応答解析

(1) 解析条件および解析モデル

前述の3次元津波解析において、算出できた桁に発生する代表的な桁中央の圧力を図-12に示す。これらの圧力を波力に変換して、対象橋梁に作用させる。

対象橋梁の解析モデルを図-13に示す。この図からわかるように、桁と支承だけをモデル化して、橋台等はモデル化していない。桁に対してファイバー要素でモデル化し、支承についてはバネ要素でモデル化した。モデル化の詳細は、文献5), 6)を参照されたい。同図内の波力は、前述の図-12の圧力から変換された波力であり、時刻歴波形としてこの解析モデルに作用させる。作用させる位置は、津波波力が作用する（波が接する）桁表面全てとする。解析

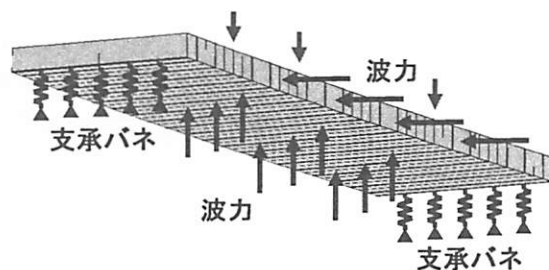


図-13 構造解析の床版橋のモデル化

の種類としては、この波力を時間に依存する荷重とした時刻歴応答解析である。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）を実施しておく必要がある。

(2) 解析結果

波力を作用させた構造解析（時刻歴応答解析）の結果を、図-14に示す。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、左岸側で34秒時、右岸側で36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0.4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、その値は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 $3k_h R_d (=0.63 R_d)$ で降伏に達すると考えてよい。グラフ内に $3k_h R_d$ のラインを示している。両岸の水平反力は小さく、 $3k_h R_d$ 以下であるため、津波の水平力より支承は降伏（破壊）しないといえる。

7. まとめ

本研究では、津波波源から対象橋梁までの全体系津波再現解析を実施した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 津波波源から対象橋梁までの津波の再現解析において、津波波源から対象橋梁の河口沖合いまでを2次元津波解析（非線形長波理論）で、河口沖合いから対象橋梁（構造物）までを3次元津波解析（有限体積法）で、求まった波力をもとに対象橋

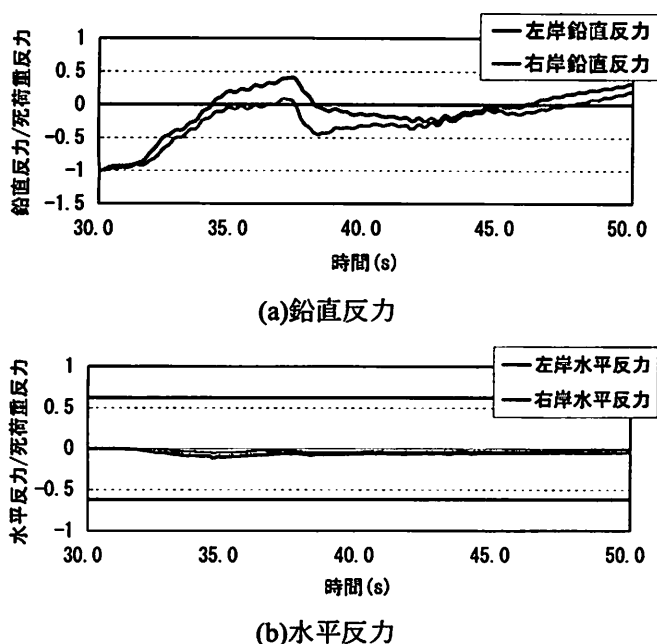


図-14 波力による構造解析の結果（支承応答履歴）

梁の構造解析（有限要素法）で実施することを提案した。

- 2) 津波波源としていくつか提案されている波源モデルから、着目位置において再現性が高いものを選定し、さらにパラメータチューニングして本解析の波源モデルを決定した。波源から対象橋梁の河口沖合いまでをこの波源モデルを用いた2次元津波解析を実施して、河口沖合いにおける波高等を求めた。
- 3) 河口沖合いから対象橋梁までの解析領域に対して、3次元解析モデルを構築し3次元津波解析を実施した。その解析結果から、対象橋梁に作用する波力を算出した。
- 4) 3次元津波解析で求めた津波波力による対象橋梁の構造解析を実施して、支承に発生する反力を求めた。その反力がある時刻で負反力を示し、桁が浮上ることが確認できた。以上から、対象橋梁の桁の流失が、本解析により再現できていると考えられる。

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) 原田隆典，村上啓介，Indradi Wijatniko，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) 原田隆典，野中哲也，王宏沢，岩村真樹，宇佐美勉：震源断層近傍における上路式鋼トラス橋の応答特性，構造工学論文集，Vol.55A, pp.573-582, 2009.
- 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.
- 9) 野中哲也，吉野廣一：パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析，丸善，2010.
- 10) Fujii, Y., K.Satake, S.Sakai, S.Masanao, T.Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 815-820, 2011.
- 11) Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S. Shinohara, M. and Kanazawa, T., Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japanearthquake, Earth, Planets, Space, in press, 2011 (published online).
- 12) 今村文彦，越村俊一，村嶋陽一，秋田善弘，新谷勇樹：東東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施-東北大学モデル (version1.1)，東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター HP.
- 13) Gavin, H., Finite Fault Model Preliminary Result of the Mar 11 2011 Mw 8.9 Earthquake Off shore Honshu Japan, USGS HP, 2011.
- 14) Guangfu, S., Xiangyu L, Chen, J, and Takahiro M., Focal mechanism and slip history of the 2011 Mw 9.1 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, constrained with teleseismic body and surface waves, Earth Planets Space, 63, 559-564, 2011.