

津波により桁が流失した床版橋の再現解析

原田隆典¹・村上啓介²・Indradi Wijatmiko³・坂本佳子⁴・野中哲也⁵

¹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）
²正会員 博（工） 宮崎大学准教授 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 修（工） 宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程
（〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1）
⁴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宮崎大学産学連携センター）
⁵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宮崎大学産学連携センター）

1. はじめに

2011年3月11日にマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、この地震に伴った津波により、道路、ライフライン、構造物などが被災した。橋梁に対しては、上部構造が流失するといった被害が多数見受けられた。

2004年に発生したスマトラ沖地震の津波によって橋梁に被害を受けたことから、津波による橋梁への影響についての研究が精力的に行われるようになってきた^{例えは1)~4)}。しかし、橋梁の上部構造の流失メカニズム等が十分に解明されたとはいえないのが現状である。

そこで、本研究では、今回の東北地方太平洋沖地震の津波によって被災した橋梁の中で、コンクリート桁が流失した床版橋を対象にして、再現解析を試みることにした。津波による橋梁の応答特性につい

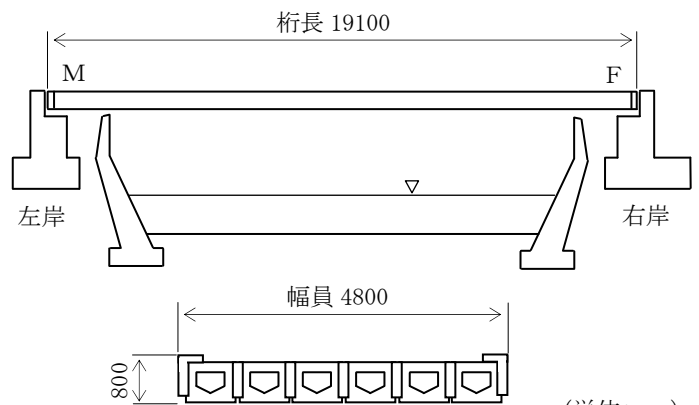
て、これまで実験を中心とした研究が盛んにされているが、本研究では解析的に検討を進めることにした。本稿では、津波解析と構造解析を組合せた再現解析の方法および実際に桁流失した橋梁の再現解析の結果について報告する。

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の桁が、東日本大震災の津波により流失した。本橋梁は、**図-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）であり、道路橋と並行してかけられている。流失した桁は、コンクリート桁で、重量が約1500 kNあり、桁下面にほとんど凹凸がない（**図-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。



(a) 対象橋梁の位置



(b) 対象橋梁の寸法

(単位:mm)

図-1 対象橋梁



写真-1 流失した桁



写真-2 桁流失後のアンカーバー

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-1,2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)したと想像できる。床版橋の桁が移動した後は、写真-2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まっている。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、左回りで回転しながら桁が移動したと思われる。

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、対象橋梁の桁が流失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。

沖合い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-2に示すような解析手順を提案する。

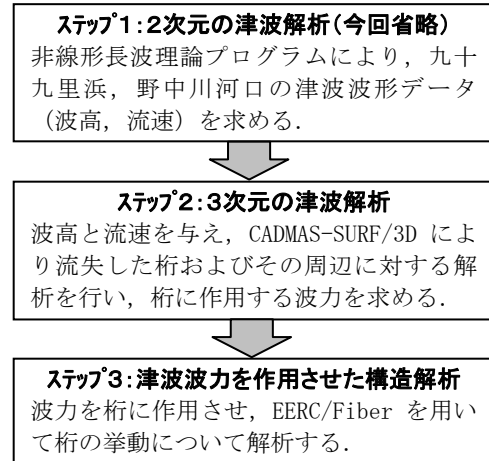


図-2 解析手順

ステップ1では、非線形長波理論プログラムにより2次元の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)から対象橋梁近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いで津波高さが観測されたため、その値を用いるものとし本ステップを省略した。

ステップ2では、前ステップ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い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/3D⁵⁾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/Fiber⁶⁾(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、流失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思われる。

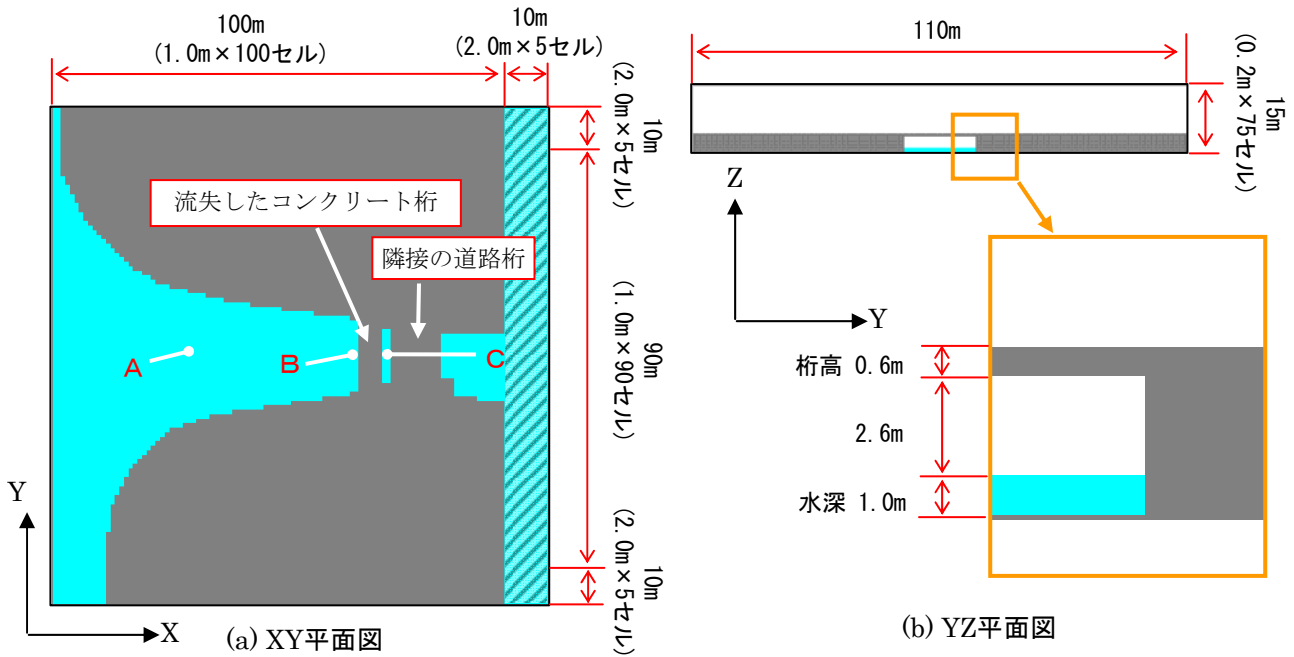


図-3 津波解析の条件

4. 津波解析の条件

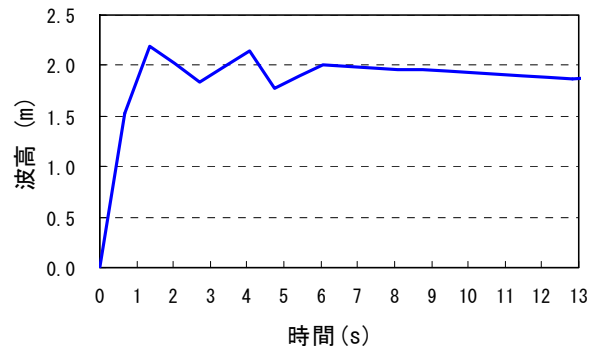
(1) 解析条件および解析モデル

前述の再現解析の方法(図-2)に従って、差分法による津波解析を行うものとする。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次元の津波解析が必要である。図-3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(110m×110m)に対して、1m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787500(=105×100×75)セルの解析モデルとなっている。図-3(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。

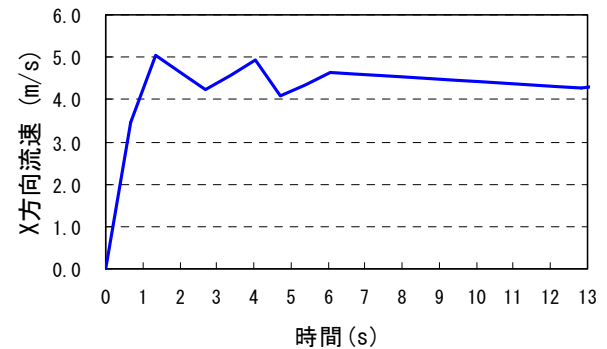
(2) 段波の定義

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)、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(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を採用して、筆者らが過



(a) 波高の時刻歴



(b) 流速の時刻歴

図-4 作用させる津波

去に実施した実験計測の結果(文献5)の4.5.1参照)をもとに、図-4(a)に示すような波状段波を定義した。また、流速変動については、文献7)における図-7と式(21)を参考にして図-4(b)のように仮定した。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。

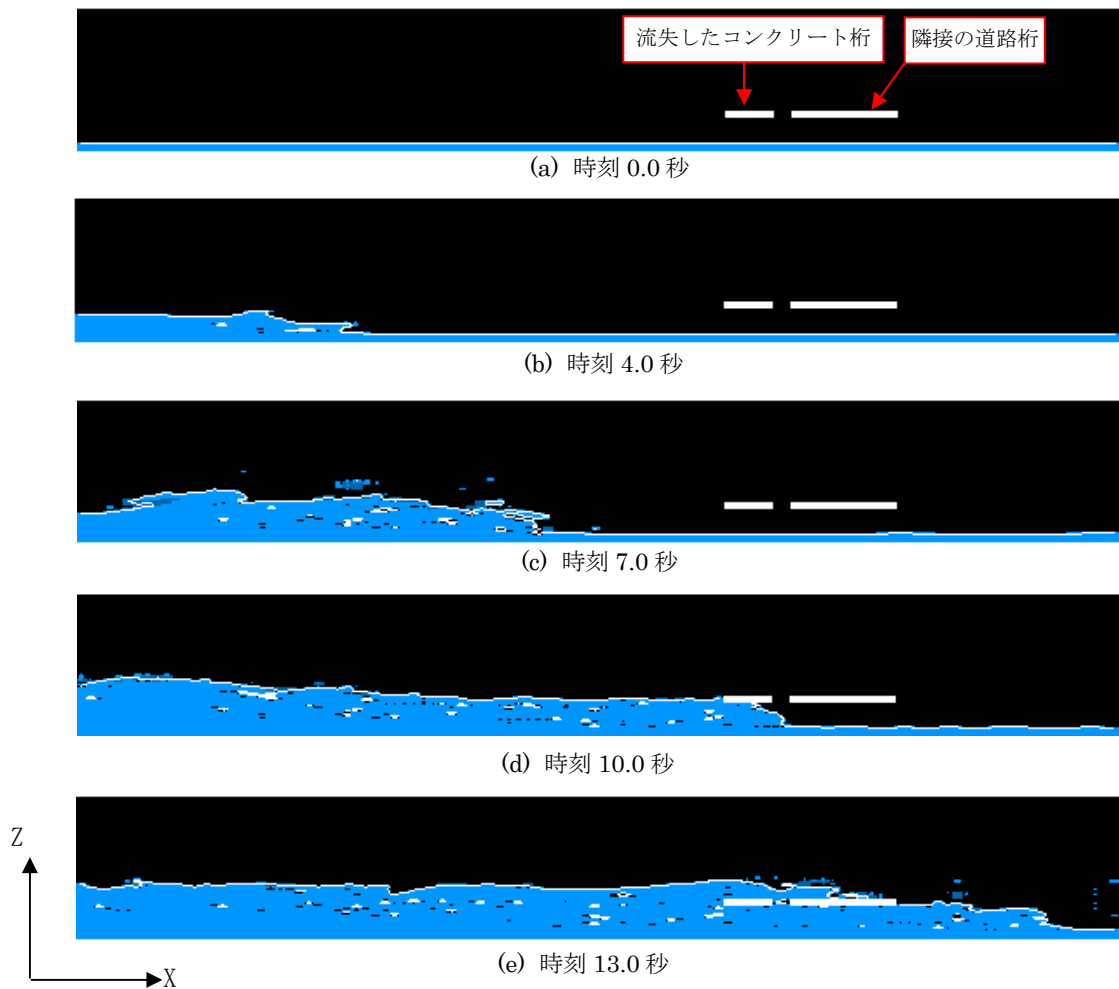


図-5 津波解析の結果

5. 津波解析の結果

(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、13秒間津波解析を実施した。その解析結果を図-5に示す。この図から、河口側から津波が徐々に押し寄せ、約10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、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。

(2) 波高

前述した図-3内の3点（A, B, C）の位置での津波高さの履歴を、図-6に示す。この図より、沖合い側から津波が来襲してA点を通過後、約9秒後にB点に達していることがわかる。また、B点で最大約6mの波高となった。沖合いの津波高さが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3.8m水位が上昇したことになる。

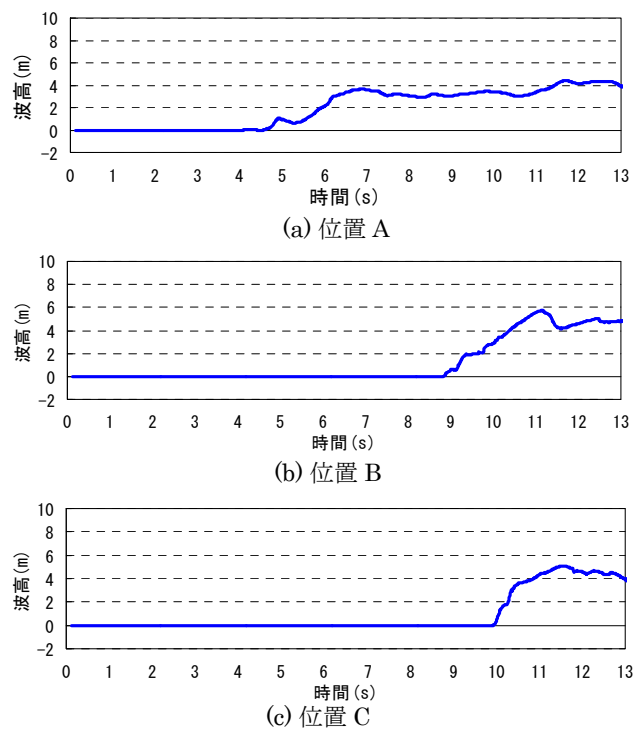


図-6 解析結果の波高の時刻歴

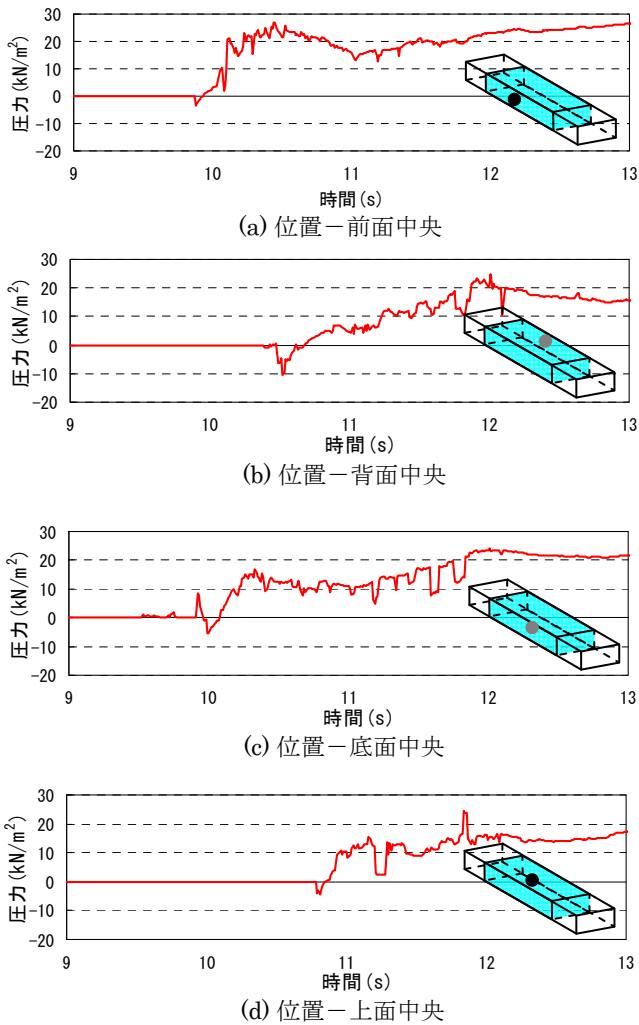


図-7 桁に作用した圧力

(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-7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、約10秒から急激に圧力が上昇し、10.5秒で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。低下後は再度上昇し最初の最大と同じ程度にまで上昇する。これは、後の波が次々と押し寄せてくるためである。また、前面が最も大きな圧力値を示すが、他の面と比較してそれほど大きな差がなく、全方位から圧されていることもわかる。背面の圧力値が比較的大きいのは、隣接の道路橋の桁からの影響によるものと考えられる。

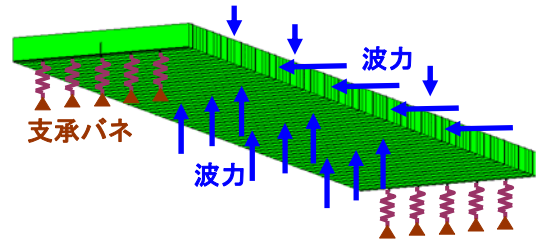


図-8 構造解析の床版橋のモデル化

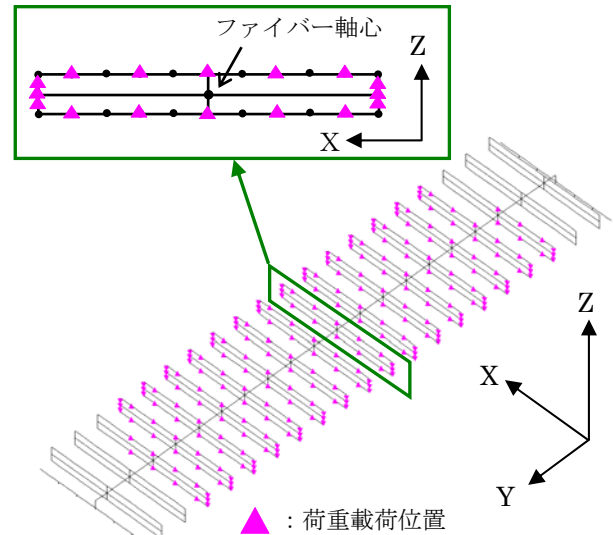


図-9 波力を作用させる桁上の位置

6. 構造解析の条件

(1) 解析条件および解析モデル

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-8に示す。この図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-9参照）し、その節点に波力を作用させることにした。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。

(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

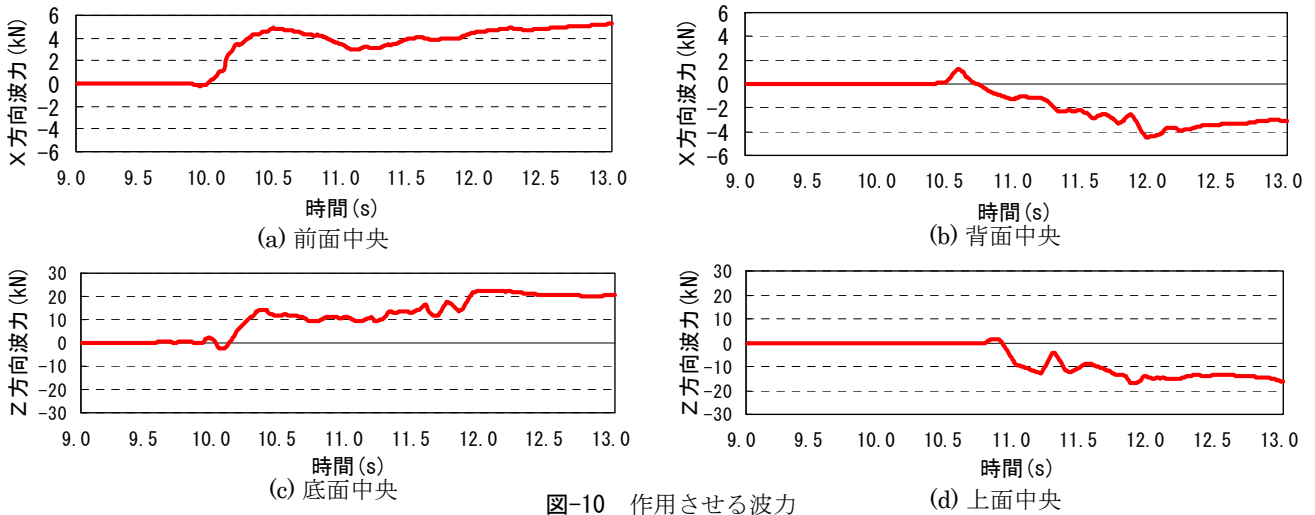


図-10 作用させる波力

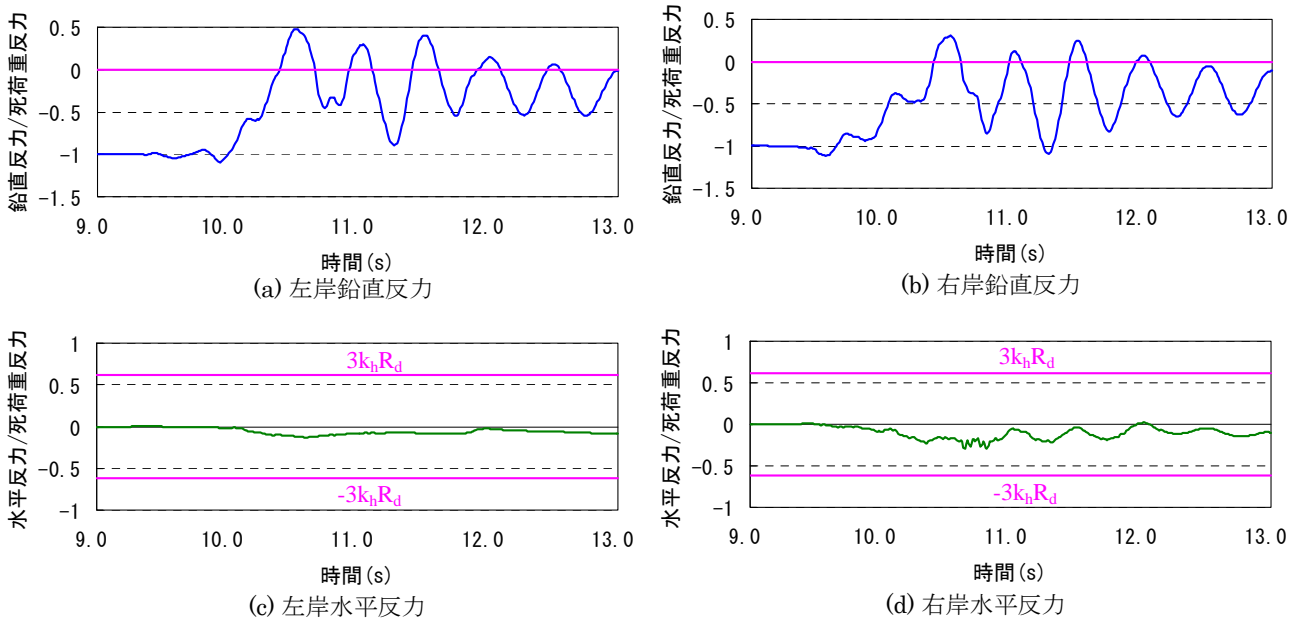


図-11 波力構造解析の結果（支承の応答履歴）

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-9内の拡大した桁中央部の断面位置における波力を図-10に示す。この波力は、桁の幅方向の中央に作用させるものである。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-7の圧力と符号が異なる。

(3) 支承の応答特性

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）を実施しておく必要がある。

7. 構造解析の結果

(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-11に示す。この図のグラフは、支承の鉛直反力と水平反力を死荷重反力で正規化した反力の時刻歴応答である。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、代表として河口側位置での反力を示している。

鉛直反力については、両岸で約10.5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0.5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、

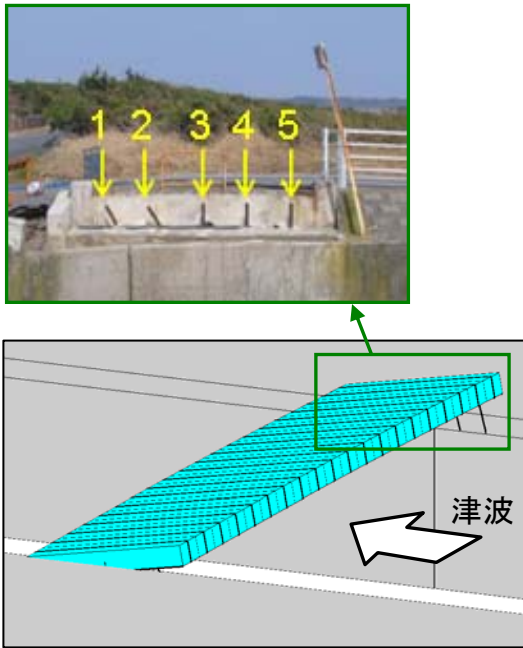


図-12 桁の浮上り（支承バネ変更）

最初に死荷重を作用させているからである。負反力は河口側から中央までの支承で発生した。

水平反力についても兩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 $3k_h R_d (=0.63R_d)$ 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。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たず、少ない数（例えば、図-12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。

(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-8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-12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10.5秒時点の変形状態を現している。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

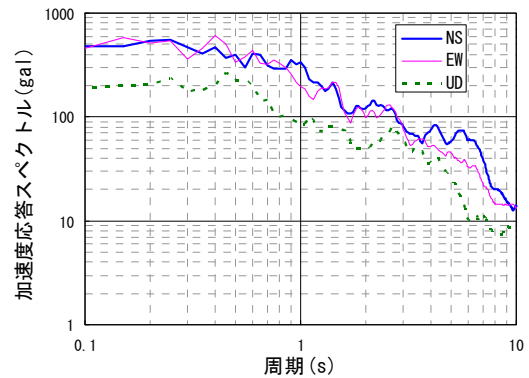


図-13 入力地震波の加速度応答スペクトル

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が降伏せず弾性範囲であった。

8. 地震応答解析による支承の応答

対象橋梁は、津波により桁が流失したといえるが、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あり得る。そこで、対象橋梁が地震力により損傷しなかったかどうか確認するため、観測波形を用いて地震応答解析を実施することにした。

地震応答解析に用いる解析モデルは、図-8に示したのを用い、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。

今回の地震では、対象橋梁地点の観測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-13に示すようにでNS,EW方向で約400galで、UD方向で約250galとなる。

この観測波形によって実際に地震応答解析した結果が図-14である。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。図-12と比較して、津波解析では鉛直反力が大きかったことに対して、地震応答解析では水平反力が大きいといえる。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。この程度の大きさなら、対象橋梁は地震の揺れによる損傷はなかったと思われる。

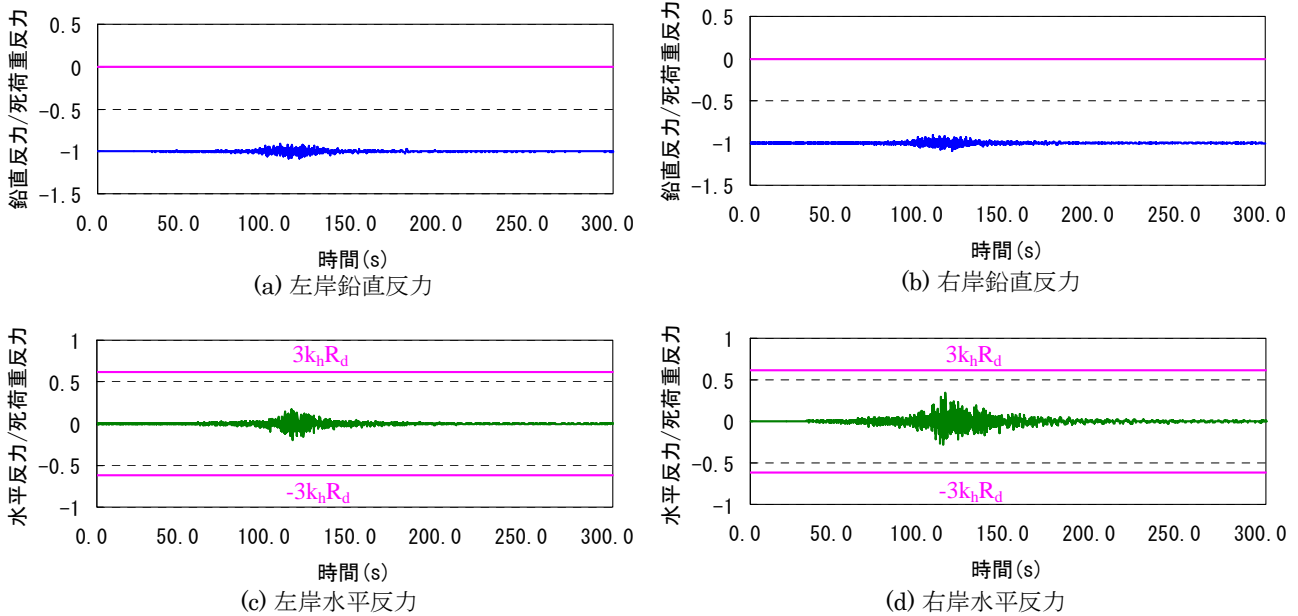


図-14 地震応答解析の結果（支承の応答履歴）

9. まとめ

本研究では、東日本大震災の津波により、コンクリート桁が流失した床版橋を対象にして、再現解析を試みた。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) まず観測された津波高さを活用または長波理論の2次元津波解析を実施することにより波状段波を定義して、差分法による3次元津波解析を実施する。この解析により得られた桁に発生する圧力を波力の時刻歴データに変換する。次に、対象橋梁の解析モデルに対して、その波力を作用させる時刻歴応答解析を実施する。このような一連の解析手順を提案した。
- 2) 本提案手順に従って対象橋梁の再現解析を実施したところ、津波の波力により支承に負反力が発生し、コンクリート桁が浮上ったと考えられる。
- 3) 対象橋梁の被災状況（アンカーバーの損傷状態）と比較検討してみても、本解析の結果から桁流失のメカニズムが推定できる。
- 4) 津波による解析結果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結果となった。
- 5) 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、地震応答解析の結果から支承が損傷しないことがわかったため、本橋梁は揺れではなく津波により被災したといえる。

謝辞：本研究で対象とした橋梁について、（財）土木研究センターから、被害状況の資料や写真（写真-1,2,図-12の写真）を提供していただいた。また、

千葉県県土整備部河川整備課海岸砂防室からは、対象橋梁の資料や波高観測結果を提供していただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

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) (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.
- 6) 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.
- 7) 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.