

津波により桁流失した床版橋の再現解析と水路実験

Numerical simulation analysis and flume experiment for slab bridge washed away by the tsunami

坂本佳子*, 原田隆典**, 村上啓介***, 福田利紀****, 野中哲也*****

Yoshiko Sakamoto, Takanori Harada, Keisuke Murakami, Toshiki Fukuda, Tetsuya Nonaka,

*(株)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・地域連携センター内)

**工博, 宮崎大学教授, 工学部土木環境工学科(〒889-2155 宮崎市学園木花台西 1-1)

***博(工), 宮崎大学准教授, 工学部土木環境工学科(同上)

****宮崎大学工学部土木環境工学科(同上)

*****博(工), (株)地震工学研究開発センター代表取締役

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

This paper presents a numerical simulation method to examine the damage mechanism of bridge superstructure washed away by tsunami flow. To demonstrate a capability of the proposed method, the proposed method is applied to simulate the slab bridge behavior washed away by the tsunami flow of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) in Japan, and the mechanism of the slab bridge damage is discussed. And also some hydraulic experimental results are compared with the numerical simulation results to confirm the validity of the proposed numerical simulation method.

Key Words: tsunami, slab bridge, flume experiment, analysis

キーワード: 津波, 床版橋, 水路実験, 解析

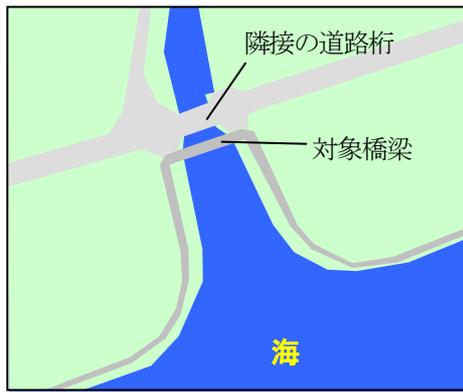
1. はじめに

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(例えば^{1)~4)}. その研究成果として, 橋梁の上部構造の流失メカニズム等が解明されてきている. 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いるが, 本研究では, 解析的に検討を進める. 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. 具体的には, 再現解析の方法として, 津波解析と構造解析を組合せた方法を提案し, その方法により実際に桁流失した橋梁の再現解析を行い, 被害状況と比較検討する. また, 解析結果の妥当性の検証のために水路実験も行う.

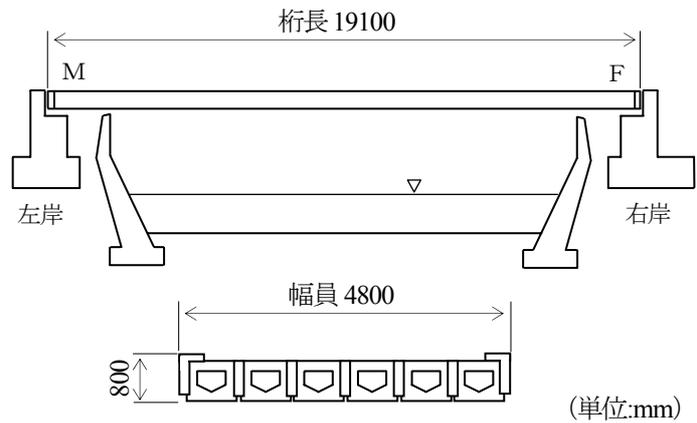
2. 被害状況

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1500kN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.

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されている. 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ものと思われる.



(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

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。

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

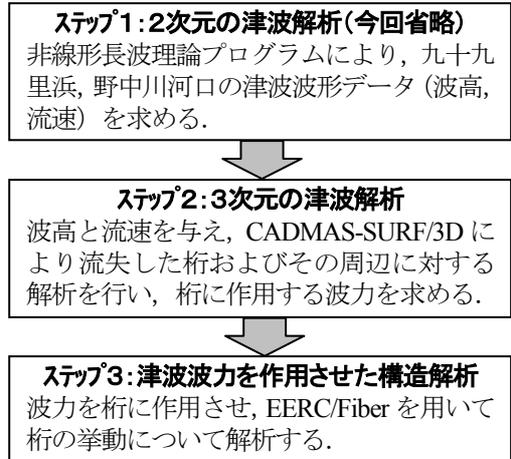


図-2 解析手順

を求める。本解析では、解析ソフトCADMAS-SURF/3D⁹⁾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/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。

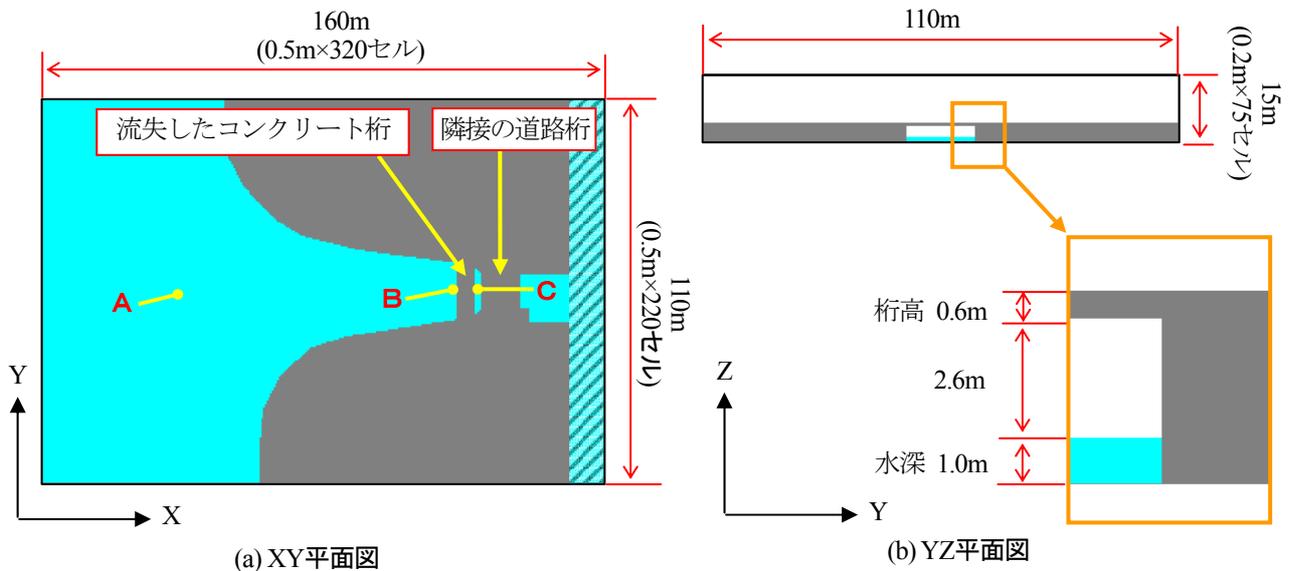


図-3 津波解析の条件

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う。

4. 津波解析の条件

4.1 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（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(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。

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(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。

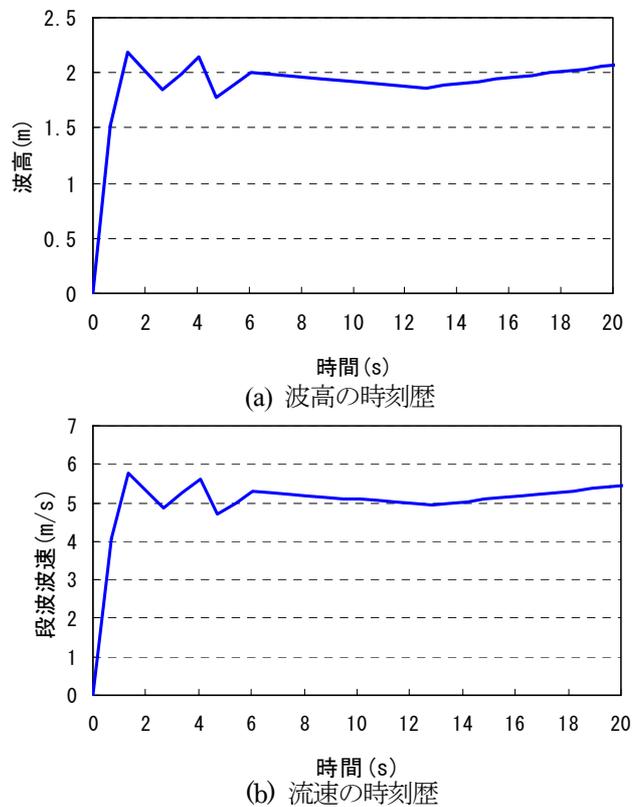


図-4 作用させる津波

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5）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-4(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7)における図-7と式(21)を参考にして図-4(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。

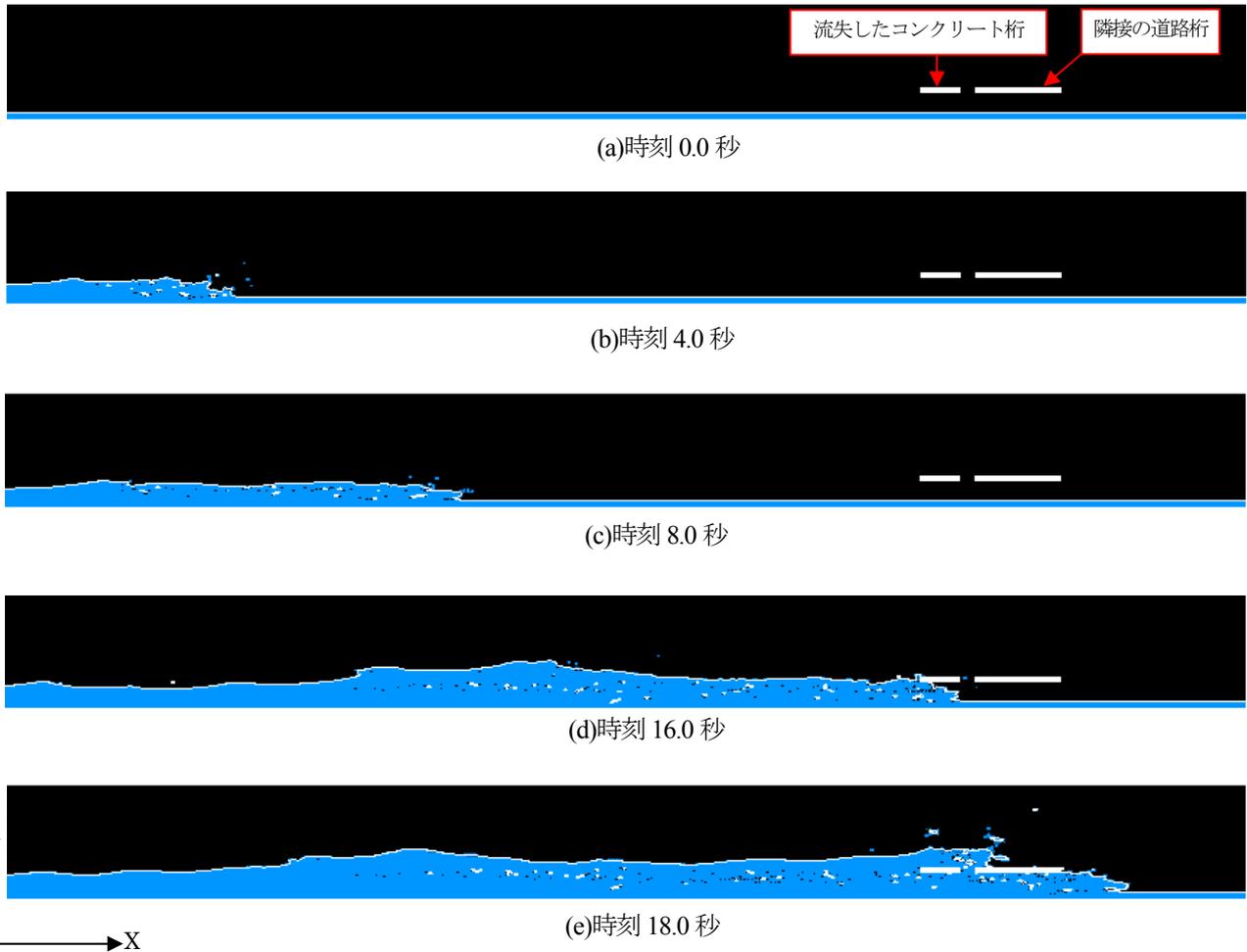


図-5 津波解析の結果

5. 津波解析の結果

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-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、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。

5.2 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、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3.3m水位が上昇したことになる。

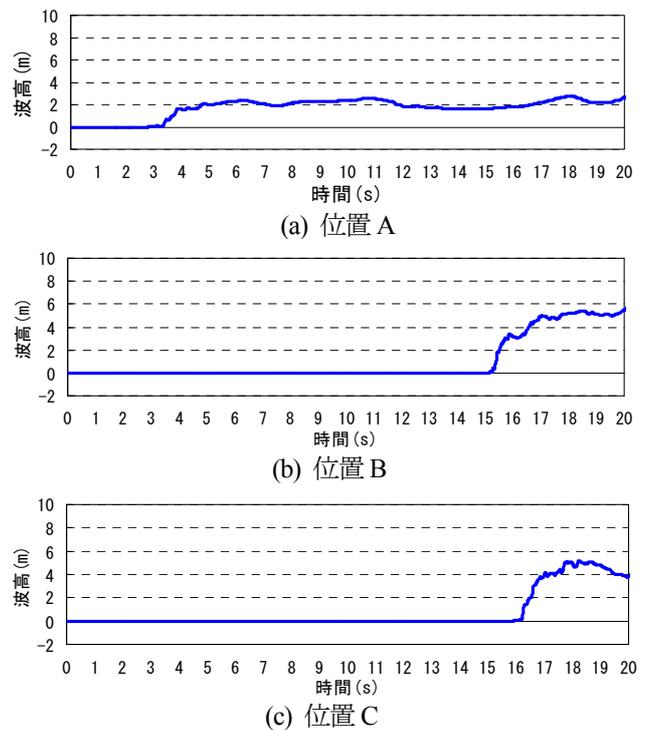
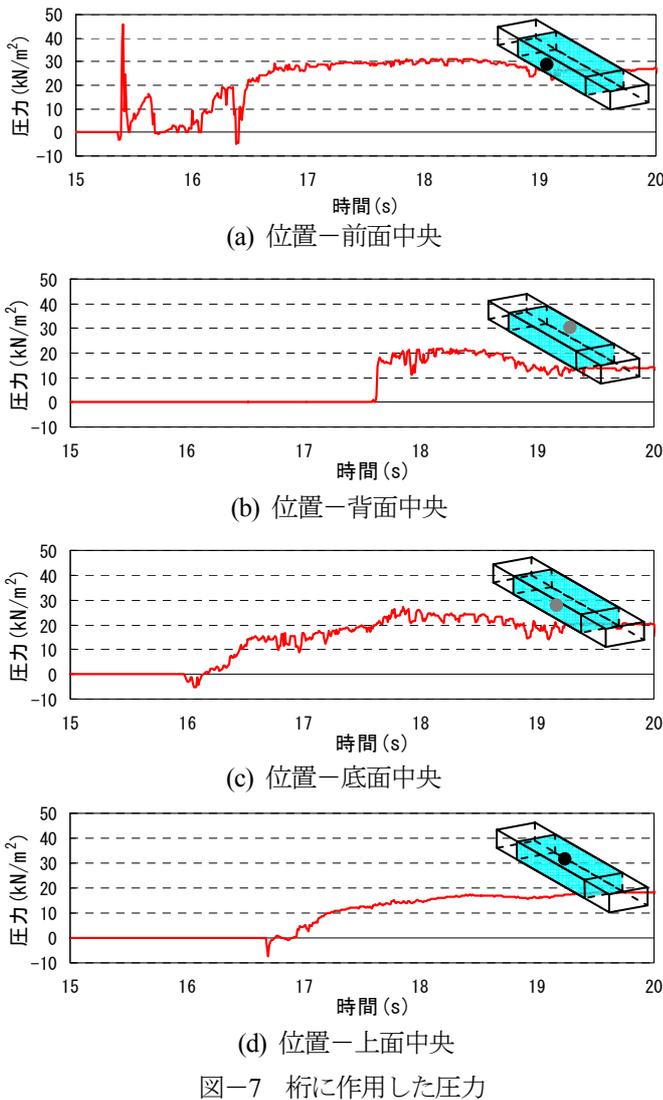


図-6 解析結果の波高の時刻歴



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-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、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、上面の下向きに押さえつける圧力より大きくなっている。

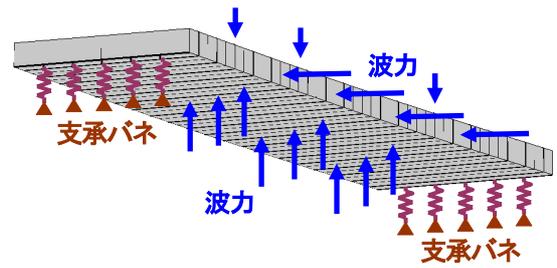


図-8 構造解析の床版橋のモデル化

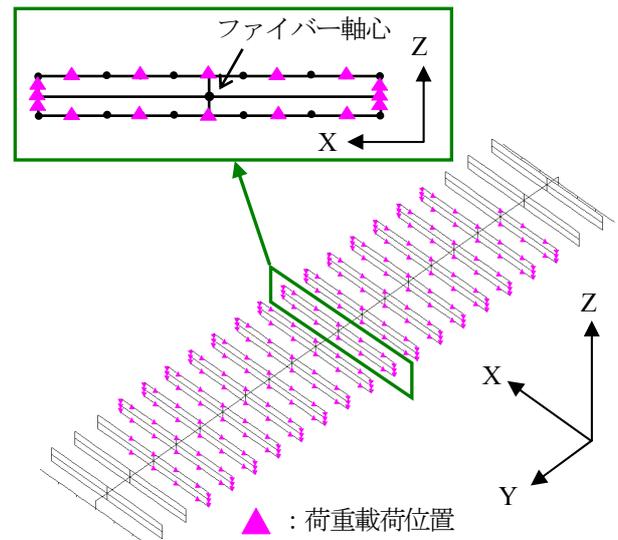


図-9 波力を作用させる桁上の位置

6. 構造解析の条件

6.1 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。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。

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

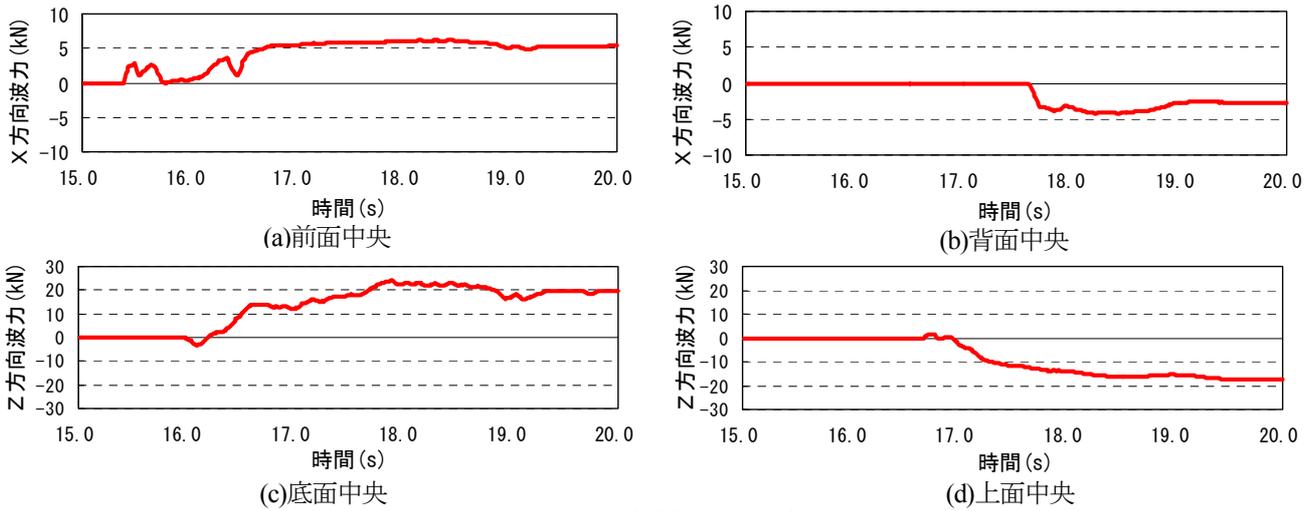


図-10 作用させる波力

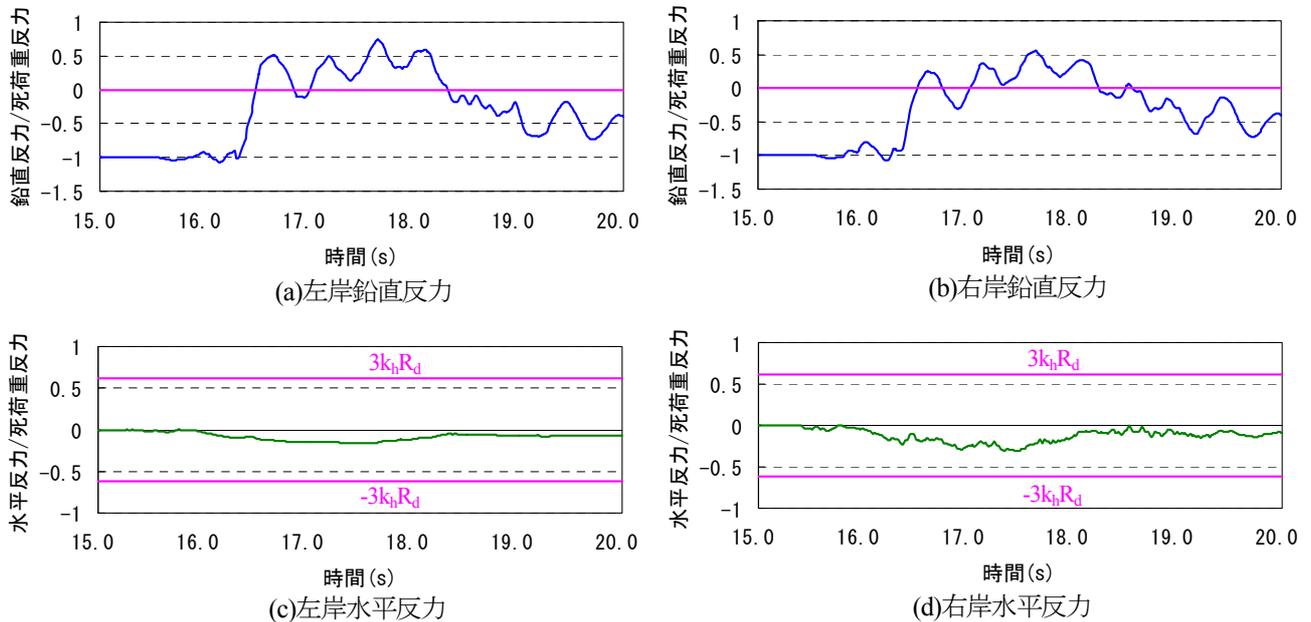


図-11 波力構造解析の結果（支承の応答履歴）

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-9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-10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-7の圧力と符号が異なる。

6.3 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

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-11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。

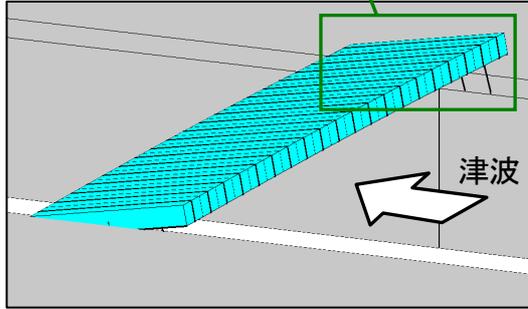


図-12 桁の浮上り (支承バネ変更)

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 $3k_h R_d (=0.63R_d)$ 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-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。

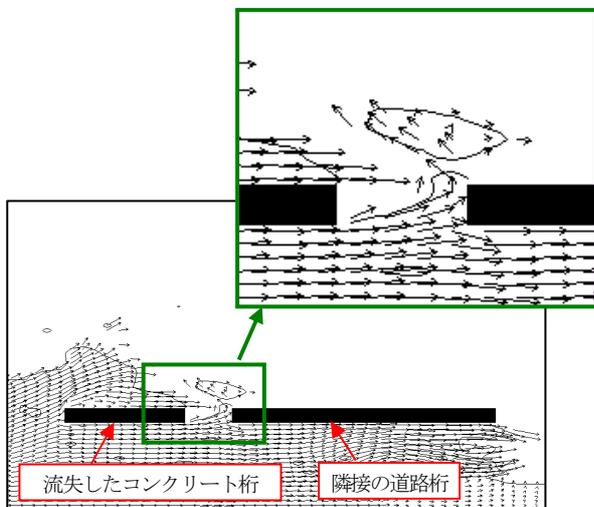
7.2 桁の挙動

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-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りようになっている。

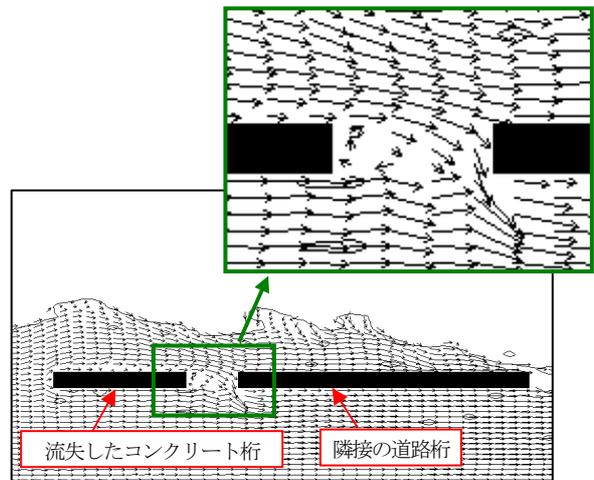
解析モデル変更後の解析結果の変形図を図-12に示す(なお、アンカーバーのように見える線は、支承バネの構成節点を結んだ線であり、アンカーバーではない)。この図は、最初に桁が浮上った約16.5秒時点の変形状態を現している。桁自体はほとんど変形せず(たわまず)、桁の浮上り状態においては河口側の方が大きく浮上り、桁全体が回転しながら浮上っているのが確認できる。このような挙動を示すことから、3~5番のアンカーバーが鉛直に立ったまま、1,2番のアンカーバーが曲がっているという現象を説明できる。なお、ファイバーモデルでモデル化した桁自体の応答は、桁のコンクリートや鉄筋が降伏せず弾性範囲であった。

8. 隣接の道路橋の影響の検証

本検討の流失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-13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橋に当たって反射し、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検証するために、図-14に示すような道路橋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、道路橋ありの解析モデル(図-3)と同様に行った。



(a)時刻 17.2 秒



(b)時刻 19.1 秒

図-13 流速ベクトル

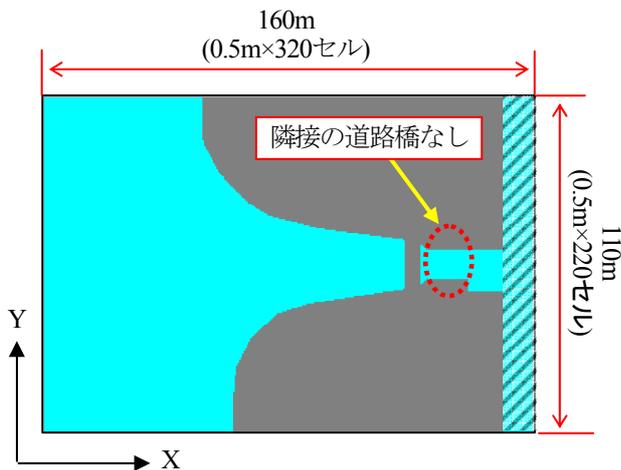


図-14 道路橋のない津波解析の条件(XY平面図)

図-15に、道路橋ありと道路橋なしの場合の波圧比較を示す。図-7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時刻履歴応答である。図-15(a)から前面の波圧履歴については16.4秒前後に道路橋がある場合には圧力が一旦下がる現象が見られるが、道路橋なしにはみられない。圧力の最大値についてはほぼ同じである。同図(b)背面については、波圧が発生する時刻にも違いがみられ、道路橋ありの方が圧力の最大値が約24%大きくなった。これは道路橋からの反射波が原因であると考えられる。

同図(c)(d)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は、道路橋ありと道路橋なしの応答の傾向は、ほぼ同じとなった。最大値については、底面では道路橋ありの方が14%ほど大きくなり、上面ではほぼ同じとなった。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た。

隣接道路橋がない津波解析で得られた波力を与えて

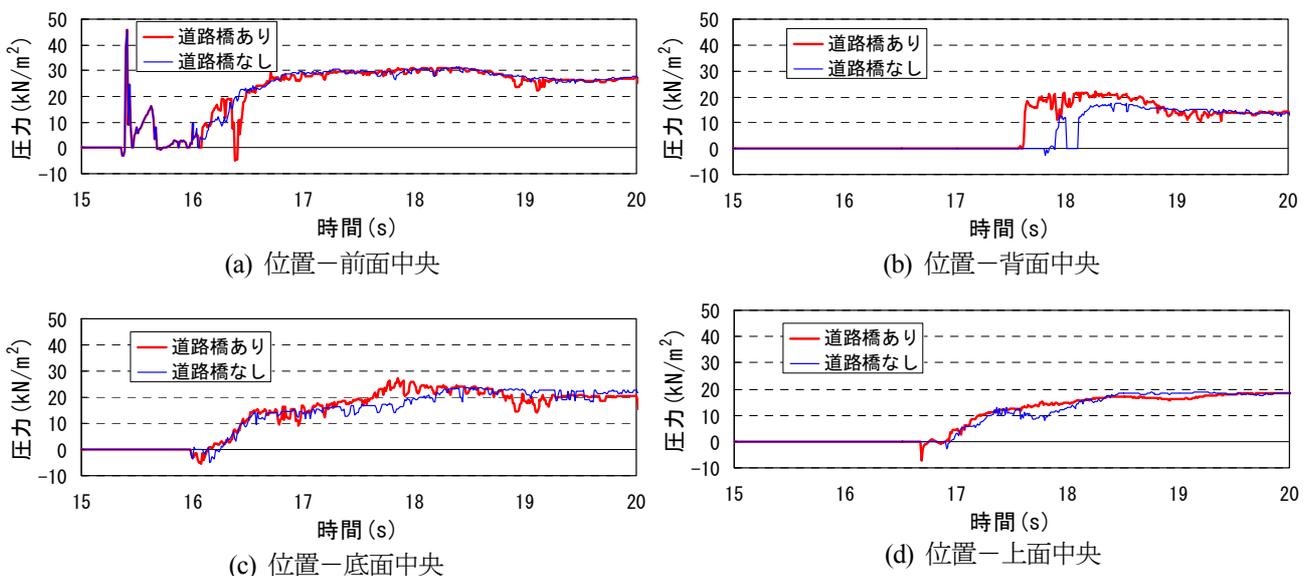


図-15 隣接道路橋の影響比較 (桁に作用した圧力)

構造解析を行った支承の応答履歴を図-16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。道路橋がある場合の0.74倍から少し減少したが、負反力が生じることから、道路橋がな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ありと同様に $3k_p R_d$ 以下となった。

9. 水路実験

9.1 実験概要

前述の解析の妥当性の確認のために、水路実験を行った。

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、路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-17にその概要を示す。図に示すように、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ありのケースと取り外して行う道路橋なしの2ケースで、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。写真-3は水路実験(道路橋なし)のものある。

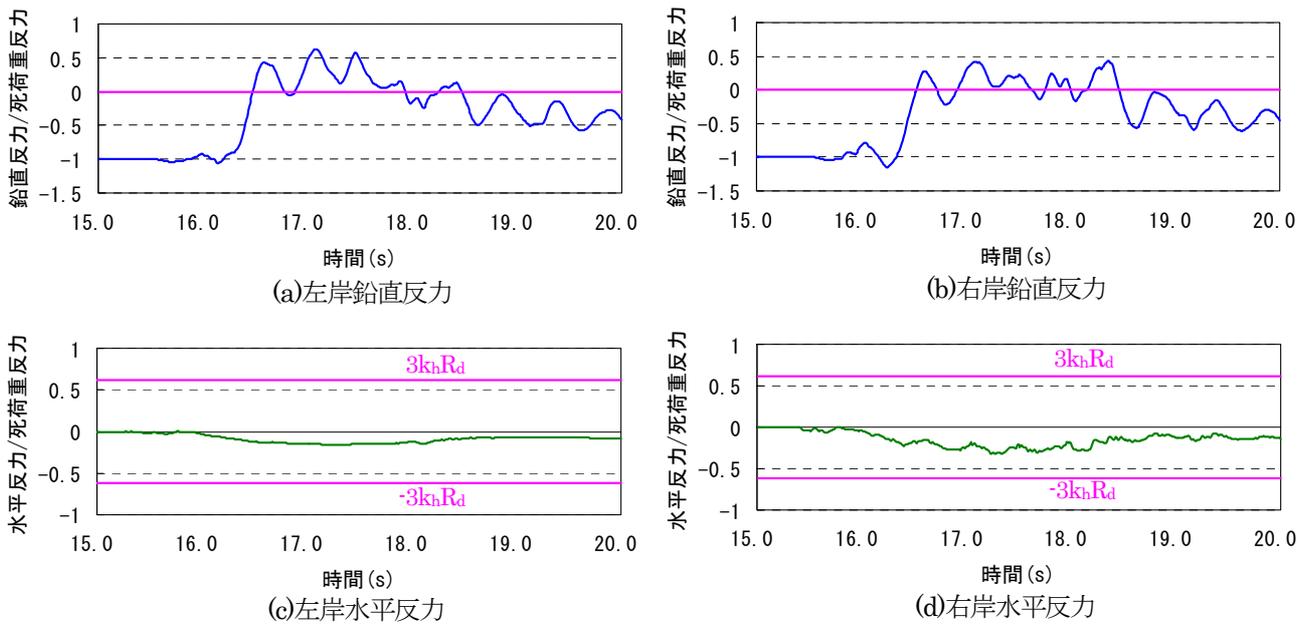


図-16 隣接道路橋がない波力構造解析の結果（支承の応答履歴）

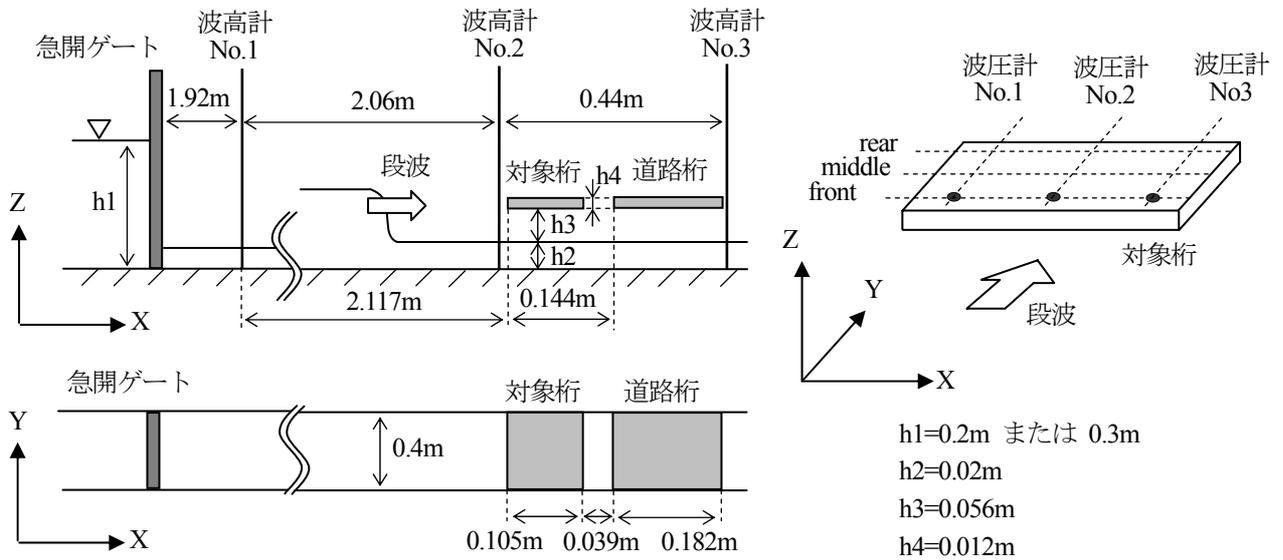


図-17 水路模型実験の概略

9.2 実験の再現解析

実橋梁と同様に、解析ソフト CADMAS-SURF/3D⁵⁾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-18に解析モデル図を示す。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-19は、解析結果を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、波圧が生じはじめてから一定時間たち安定した4~5秒くらいから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、道路橋ありはほぼ一致しているが、道路橋なしの立ち上がりには1秒程度の差が生じている。これは、写真3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



写真-3 水路実験（道路橋なし）

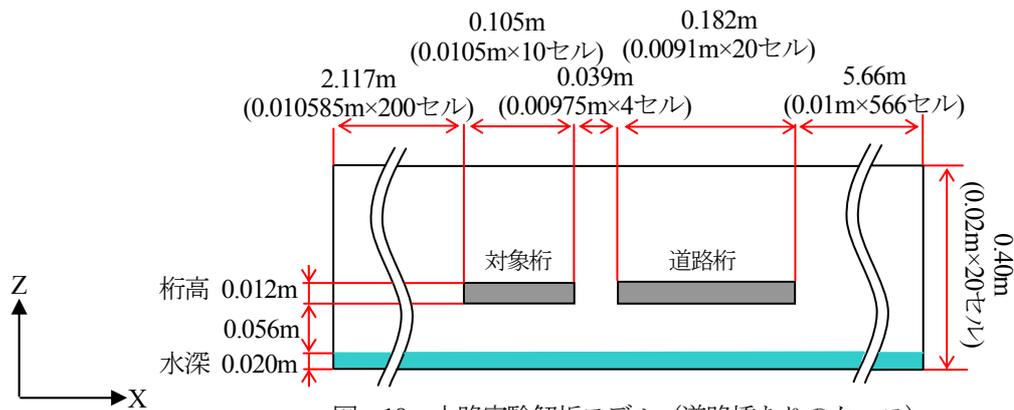


図-18 水路実験解析モデル (道路橋ありのケース)

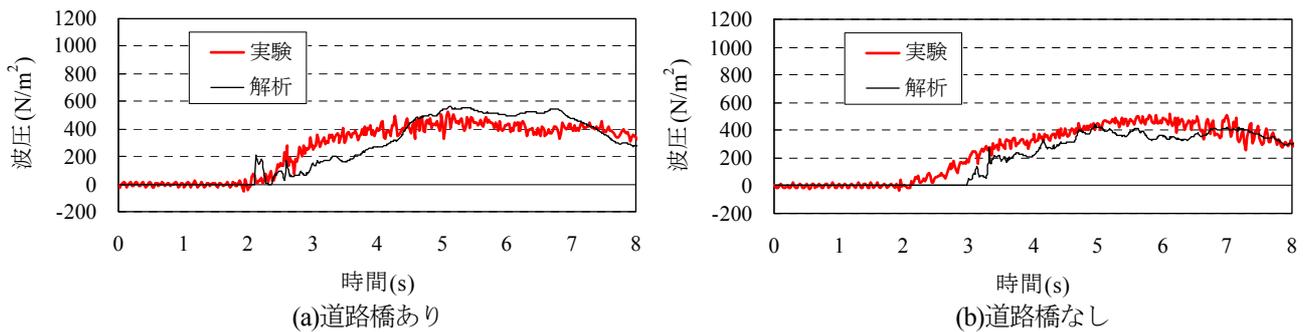


図-19 実験と解析の波圧比較 (h1=20cm 下面-rear)

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と考えられる。しかし、桁の浮き上がりに影響する安定してから波圧は再現できており、概ね解析の妥当性を示すことができた。

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 に示したものを、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-20 に示すように NS, EW 方向で約 400gal で、UD 方向で約 250gal となる。

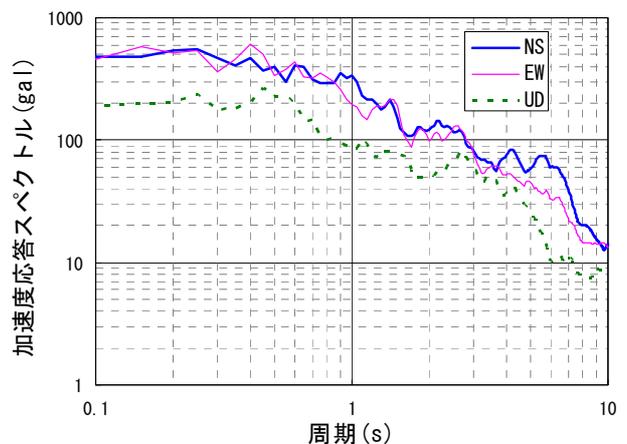


図-20 入力地震波の加速度応答スペクトル

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-21 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-11 と比較して、津波解析では鉛直反力が大きいことに対して、地震応答解析では水平反力が大きい。地震応答解析の水平反力の大きさは、 $3k_p R_d$ 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。

11. 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、再現解析と水路実験を試みた。得られた結論は以下のとおりである。

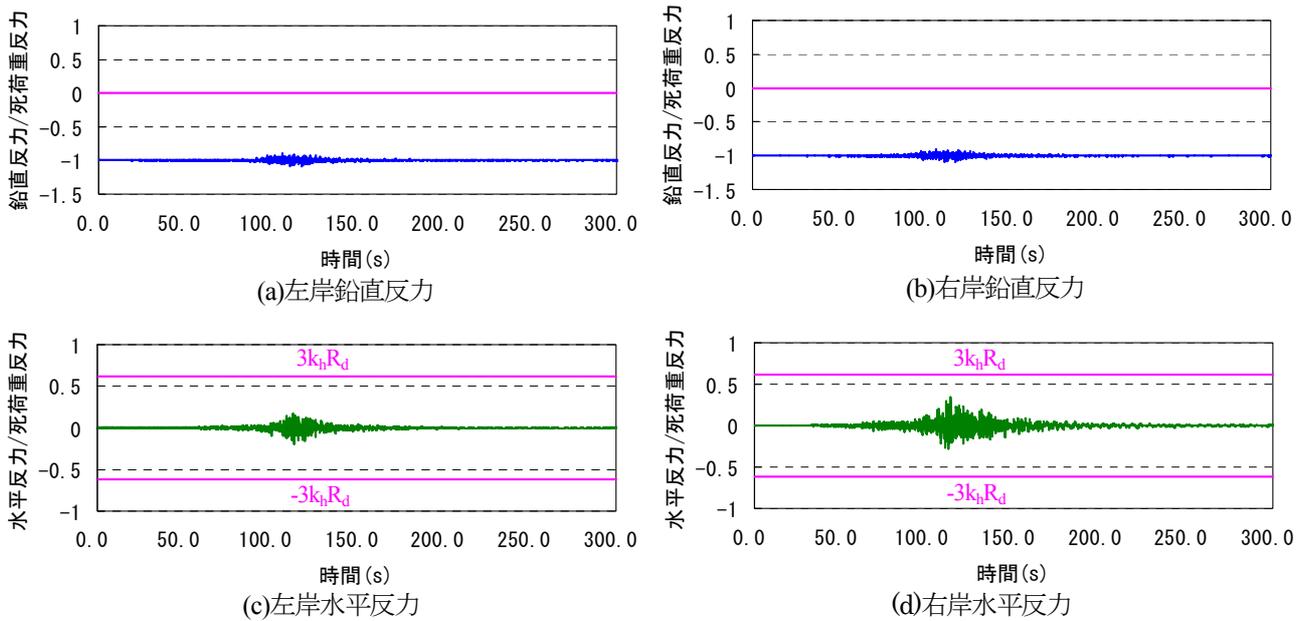


図-21 地震応答解析の結果 (支承の応答履歴)

- 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。鉛直支承が死荷重反力の0.74倍の負反力に耐える構造であれば、桁の流失は起きなかったと予想できる。
- 4) 隣接の道路橋の影響を検証するために、道路橋がない状態の解析を行い、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ありの方が大きくなり、その影響が確認できた。道路橋がない波力を用いた構造解析により、道路橋がない場合もコンクリート桁は浮き上がったと考えられる。
- 5) 解析の妥当性の確認のため水路実験を行った。桁の浮き上がりに影響する波圧は再現することができ、概ね解析の妥当性を示すことができた。
- 6) 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。
- 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、地震応答解析の結果から支承は損傷しないことがわかった。よって本橋梁は揺れではなく津波

により被災したといえる。

今後は、今回の手法をより複雑な形状の橋梁に対しても適用し、解析と実験の精度向上を図り、桁流失を防ぐための対策について研究を進める予定である。

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.

(2011 年 9 月 14 日受付)