



# 東北地方太平洋沖地震津波による矢の浦水管橋の被害に関する数値解析

直田, 梓  
米山, 望  
鋤田, 泰子

---

## (Citation)

土木学会論文集B3 (海洋開発) , 69(2):I\_353-I\_358

## (Issue Date)

2013

## (Resource Type)

journal article

## (Version)

Version of Record

## (Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003285>



# 東北地方太平洋沖地震津波による矢の浦水管橋の被害に関する数値解析

直田 梓<sup>1</sup>・米山 望<sup>2</sup>・鍬田 泰子<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所)

E-mail:naota.azusa.32v@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所)

E-mail:yoneyama.nozomu.4w@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1)

E-mail:kuwata@kobe-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震津波により、矢の浦水管橋の3径間のうち2径間の上部工が流失した。重要なインフラである水管橋の被害を防ぐためには適切な補強が必要であり、矢の浦水管橋の詳細な被害分析を行うことは重要である。本研究では、残存した径間と流失した径間に作用する波力を数値解析により求め、それらの比較から水管橋被災への作用波力の影響を検討した。まず、鉛直二次元での解析を行い、比較を行った結果、作用波力により発生するトルクの差が現れ、これが水管橋の上部工の流失被害に影響していることが示唆された。次に鉛直二次元解析による評価の妥当性を確認するために三次元解析を行った。その結果、作用波力やトルクの大きさなどは異なるものの、鉛直二次元解析における作用波力の影響評価がおおむね妥当であることが分かった。

**Key Words :** tsunami, wave force, water-pipe bridge, numerical simulation

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波により、沿岸部の橋梁や水管橋等の河川横断構造物が多数被災した<sup>1)</sup>。岩手県釜石市では甲子川河口付近の矢の浦水管橋(図-1参照;以下、水管橋)の3径間のうち2径間の上部工のみが流失するという被害が発生した(図-2、図-3参照)。一方、水管橋の直下流側にある矢の浦道路橋(以下、道路橋)は防護柵が欠損・変形したものの、大きな損傷を受けなかった。水管橋が被災すると被災後の断水期間が長期化し、復旧の大きな妨げとなる。津波対策が望まれる水管橋へは今後適切な補強が必要であるため、水管橋にどのような波力が作用し、どのように流失に至ったのか、といった被災のメカニズムを明らかにすることは重要である。

図-2に示すように、直下流側の道路橋が湾曲しているため、道路橋と水管橋の水平距離は場所によって異なっている。本研究では、このような位置関係に着目し、水管橋の被災メカニズム解明に資することを目的として、数値解析を用いて水管橋流失被害への作用波力の影響を検討した。



図-1 釜石湾周辺地図 (Google earthより引用)



図-2 矢の浦水管橋付近 (Google earthより引用)

## 2. 研究内容

流失しなかった北側1径間の中心を通る河川の縦断面Nと流失した南側2径間の中心を通る縦断面S（図-4参照）を対象として、水管橋の上部工（以下、上部工）に作用する波力を数値解析により求めた。解析で得られた2断面の作用波力の比較を行い、上部工流失被害への作用波力の影響を検討した。

### (1) 解析手法の概要

本研究で用いた非圧縮性流体解析手法の概要を示す。以下の連続式（式(1)）、運動方程式（式(2)）、およびVOF法に基づく流体充填率の移流方程式（式(3)）を直交座標系上で離散化し、SIMPLE法に基づき解析した。精度良く水面挙動の予測を行うために計算メッシュ内の水面勾配を計算し、また、メッシュ内に物体形状を再現して解析を行った。乱流はk-εモデルで取り扱った。

$$\frac{\partial \gamma^v}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^a \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^a \bar{u}_j}{\gamma^v} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\gamma^v F)}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_j^a F \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $F$ ：計算セルの流体充填率（=セル内の流体体積/セル内の空隙体積）、 $u_j$ ：流速の各方向成分、 $\gamma^v$ ：計算セルの空隙率、 $\gamma_j^a$ ：計算セル境界面の開口率、 $G_i$ ：単位体積あたりの重力、 $p$ ：圧力、 $\rho_w$ ：流体密度、 $\nu$ ：動粘性係数、 $\bar{\cdot}$ ：レイノルズ平均量、 $\cdot'$ ：レイノルズ平均量からの変動量である。

著者等は同解析手法を用いて、橋桁に作用する津波波力に関する水理模型実験の再現計算を行い、橋桁のような河川横断構造物への津波作用力を適切に予測評価できることを確認している<sup>2)</sup>。

## 3. 鉛直二次元数値解析手法の適用

### (1) 計算条件

解析で用いた上部工および道路橋の形状と解析のメッシュ分割のイメージを図-5、図-6に示す。図-5中のCase NおよびCase Sはそれぞれ、図-4に示した縦断面N、縦断面Sに対応している。メッシュサイズはX軸方向に0.3m～2m、Z軸方向に0.3m～0.5mの間で変化させ、水管橋近傍では $dx$ 、 $dz$ ともに0.3mとした。解析で用いた上部工および



図-3 被災後の水管橋と道路橋

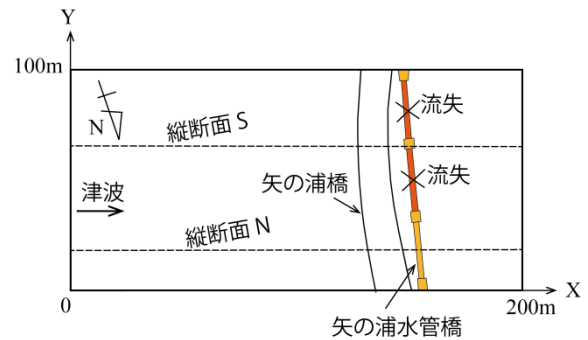
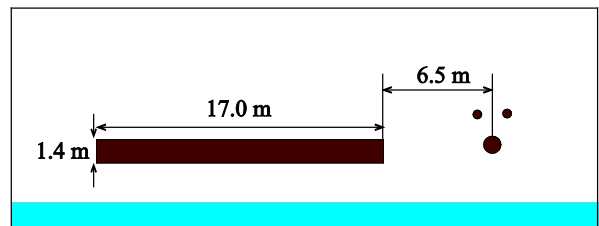
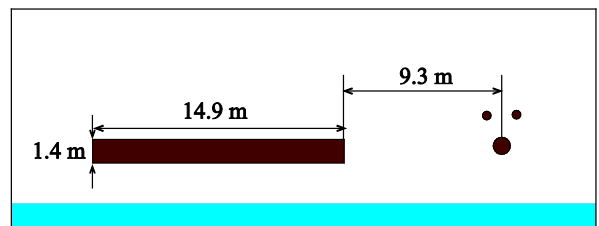


図-4 解析領域の概要



(a) Case N（残存した上部工を想定した縦断面N）



(b) Case S（流失した上部工を想定した縦断面S）

図-5 水管橋の上部工および道路橋の解析形状

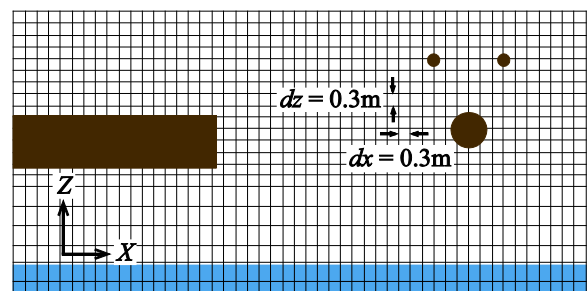


図-6 解析のメッシュサイズ

び道路橋の形状はそれぞれの設計図に基づいてモデル化した。道路橋は平板とし、上部工は送水管と2本の支持部材を円管として扱った(図-7参照)。

米山らは、2011年東北地方太平洋沖地震津波を対象に、釜石湾沖に設置されている岩手南部沖GPS波浪計の観測データを入力波として用いて、釜石湾における津波の挙動解析を行っている。釜石湾沿岸部での津波痕跡調査結果と解析で得られた最大津波水位との比較により、その再現性が十分であることを確認している<sup>3)</sup>。そこで本研究では、この解析により得られた甲子川河口での水位変化(図-8)を入力波として用いた。

## (2) 計算結果および作用波力の影響の検討

解析で得られた、送水管に作用する水平および鉛直波力をCase NとCase Sで比較した結果を図-9に示す。波力は、図-6の座標の向きを正とし、計算で得られた圧力を作用面積で積分して算出した。図-9(b)より、鉛直波力に関してはケース間での大きな差が見られなかったが、水平波力はCase Nの波力がCase Sの波力を上回った。

### a) 鉛直波力と上部工重量の比較

上部工流失への鉛直波力の影響を検討するため、鉛直波力と上部工重量との比較を行った。上部工の単位長さ当たりの重量 $W$ を以下の式から求めた。ここでは、送水管内が下水で満水状態であったと仮定している。

$$W = (M_1 + 2 \times M_2)g + W_3 \quad (4)$$

$$W_3 = 3.14 \times \frac{r^2}{4} \times \rho_d g \quad (5)$$

ここで、 $M_1$ 、 $M_2$ ：それぞれ送水管STPY管(700×12.7)および支持部材STK管(318.5×10.3)の単位長さあたりの質量、 $W_3$ ：単位長さあたりの送水管に存在する下水重量、 $r$ ：送水管直径、 $\rho_d$ ：下水密度である。 $M_1=219(\text{kg/m})$ 、 $M_2=78.3(\text{kg/m})$ 、下水の密度は水と同じであると仮定し、 $\rho_d = \rho_w$ とした。

図-9の(b)より、上部工の重量を若干上回る鉛直波力がどちらのケースでも作用していることが分かる。Case N、Case Sともに同じような鉛直波力が作用していることから、流失への鉛直波力の影響は小さいと考えられる。

### b) 作用波力により発生するトルクの検討

図-10にCase Sでの水平波力が最大となる時間532秒のCase NおよびCase Sの上部工周辺の流況を示す。Case Nでは送水管のみが水没しており、Case Sでは支持部材にも速い流れが作用していることが分かる。支持部材に作用する水平及び鉛直波力を図-11に示す。送水管に作用する水平波力は残存した径間を想定したCase NがCase Sを上回る結果であったが、支持部材に作用する水平波力ではCase Sでの最大値がCase Nでの最大値の約2倍となった。

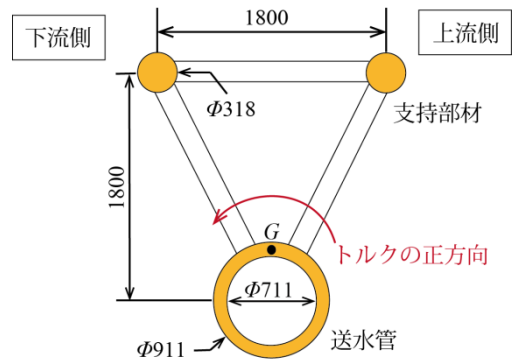


図-7 上部工断面図 (単位: mm)

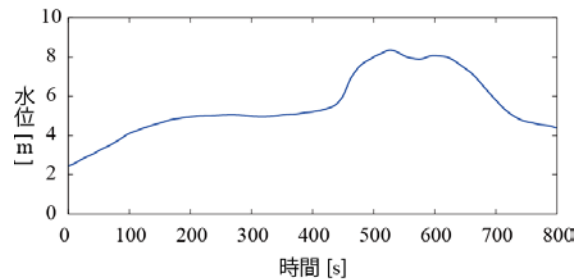
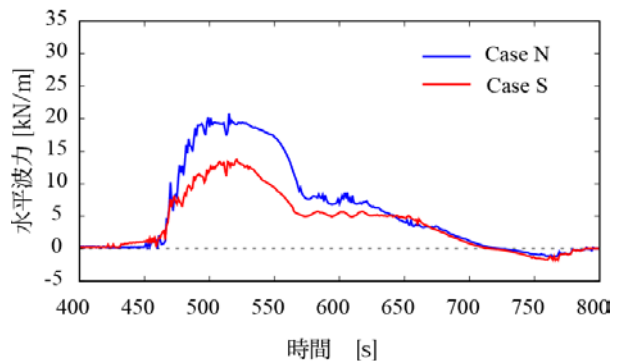
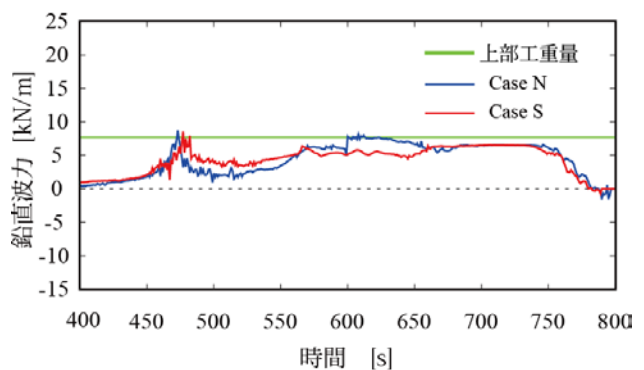


図-8 入力波



(a) 水平波力



(b) 鉛直波力

図-9 送水管に作用する波力の比較 (鉛直二次元解析)

支持部材に作用する波力の影響を検討するため、モデル化した上部工を送水管と上部の2部材からなる剛体であると仮定し、重心G(図-7参照)周りのトルクを以下の



式により求めた。回転の向きは図-7中に赤で示した方向を正とした。

$$T = \sum_i r_i \times F_i \quad (6)$$

ここで、 $r_i$ ：作用点の位置ベクトル、 $F_i$ ：作用波力のベクトルである。

Case NとCase Sで比較した結果を図-12に示す。Case Nでは上部工を正の向きに回転させるトルクが発生しており、Case Sでは負の向きに回転させるトルクが発生していることが分かる。これは図-11に示したように、Case Sにおいて支持部材に大きな水平波力が作用したためである。回転方向の違いがどのように被災に影響したのかについては、詳細な検討が必要であるが、トルクの絶対値を比較すると、Case Sでは最大でCase Nの約2.4倍のトルクが作用しているため、上部工の流失にはこのようなトルクが影響したことが考えられる。

直下流側の道路橋との水平距離が異なる2つの縦断面について上部工への作用波力の比較を行った結果、支持部材への作用波力によるトルクが上部工の流失被害に影響している可能性が示唆された。

#### 4. 鉛直二次元解析により得られた評価結果の妥当性検討

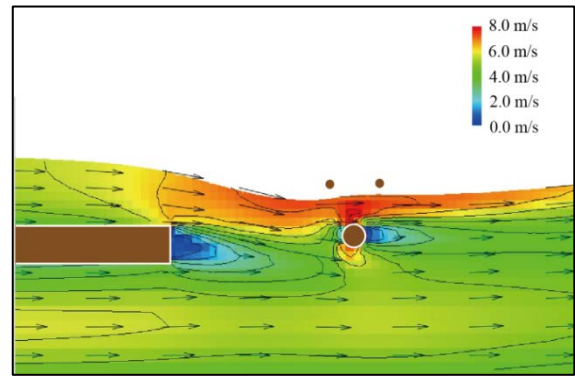
鉛直二次元解析の結果から、直下流側の道路橋との水平距離の違いにより、支持部材への作用波力が異なることが分かったが、直下流側の道路橋は下流側に向かって凸に湾曲した形状をしており、水平距離の差に加えて、このような道路橋形状が作用波力の差に影響を及ぼした可能性も考えられる。そこで、道路橋の湾曲形状を考慮した三次元解析を行い、鉛直二次元解析による波力の影響評価の妥当性を検証した。

##### (1) 計算条件

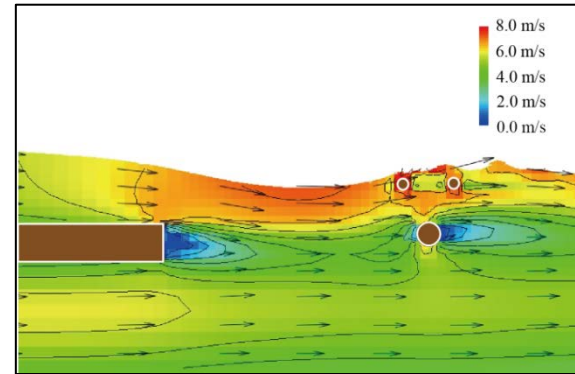
解析で用いた上部工および道路橋の形状を図-13に示す。図-4に示す解析領域の下流端の境界条件として、鉛直二次元の解析と同様の水位変化を与えた（図-7参照）。

##### (2) 計算結果および鉛直二次元解析評価の妥当性検証

鉛直二次元と同じ縦断面Nおよび縦断面S（図-4参照）における送水管に作用する水平および鉛直作用波力の解析結果を図-14に示す。図-14(a)より、送水管に作用する水平波力は縦断面Nでの波力が縦断面Sでの波力を若干上回る結果となった。図-14(b)より、鉛直波力が水管重量を上回ることではなく、鉛直二次元解析での評価と同様に流失への鉛直波力の影響は小さいと考えられる。支持



(a) Case N (t=532s)



(a) Case S (t=532s)

図-10 上部工周辺の流況（鉛直二次元解析）

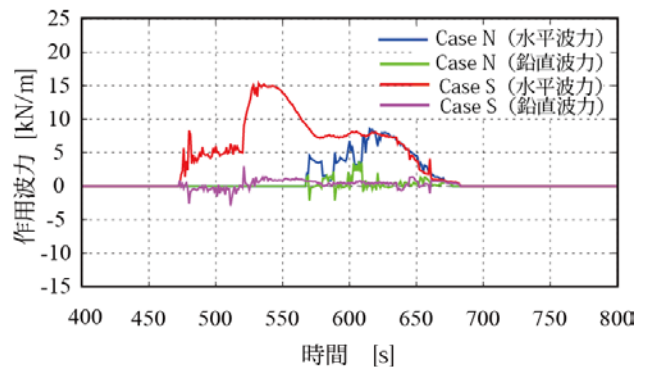


図-11 支持部材に作用する波力（鉛直二次元解析）

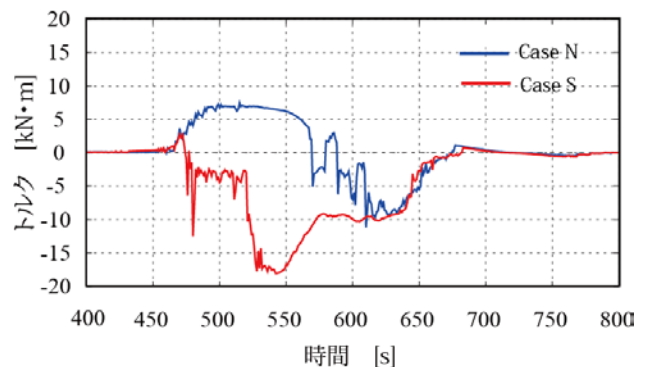


図-12 上部工に作用するトルクの比較（鉛直二次元解析）

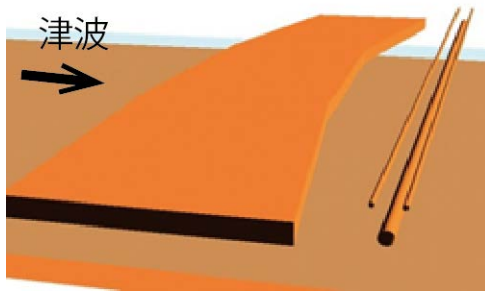
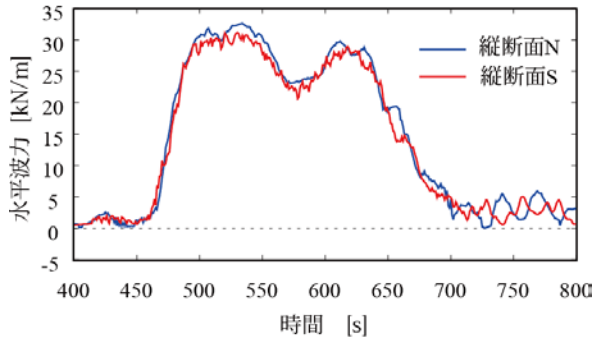
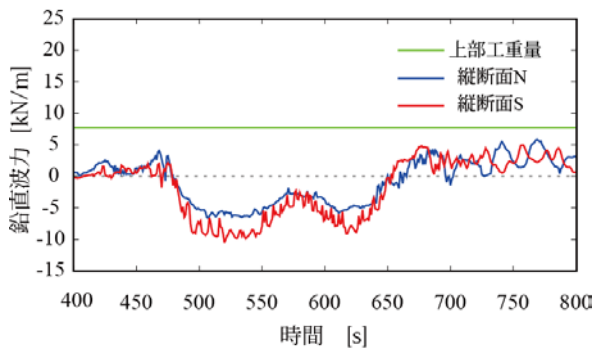


図-13 水管橋の上部工および道路橋の解析形状



(a) 水平波力



(b) 鉛直波力

図-14 送水管に作用する波力の比較（三次元解析）

部材に作用する波力を図-15に、縦断面Sでの支持部材に作用する水平波力が最大となる時間476秒の上部工周辺の流況を図-16に示す。支持部材に作用する波力は、鉛直二次元解析で得られた結果と同様に縦断面Sで縦断面Nよりも大きな波力が作用していることが分かる。ただし、その作用時間は鉛直二次元解析の結果に比べて短く、また水平波力の最大値は鉛直二次元解析で得られた結果の約3割程度である。式(6)に基づいてトルクを算出し、縦断面Nと縦断面Sで比較を行った結果を図-17に示す。支持部材へ作用する波力の作用時間が短く、大きさも小さいため、縦断面NとSでの差が鉛直二次元解析の結果より小さい結果であるが、縦断面Sで負の方向の回転を起こすトルクが三次元解析においても発生していることが分かる。縦断面Nと縦断面Sにおける作用波力の差は

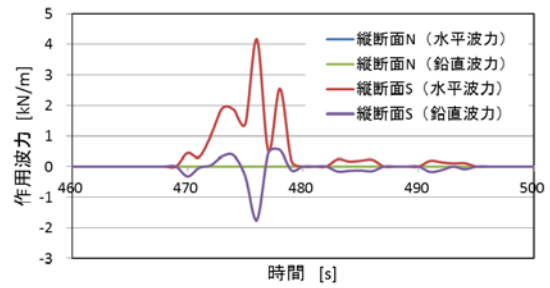
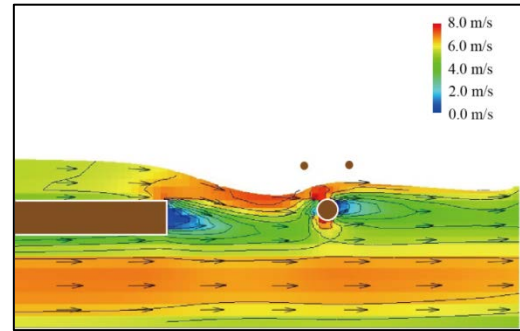
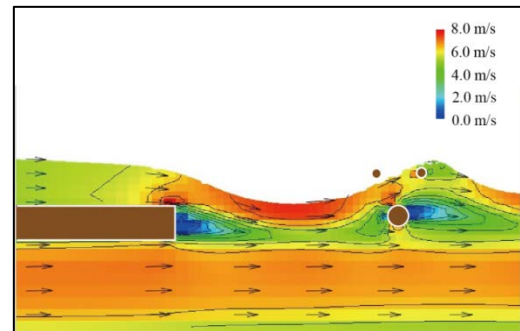


図-15 支持部材に作用する波力（三次元解析）



(a) 縦断面N (t=476s)



(b) 縦断面S (t=476s)

図-16 上部工周辺の流況（三次元解析）

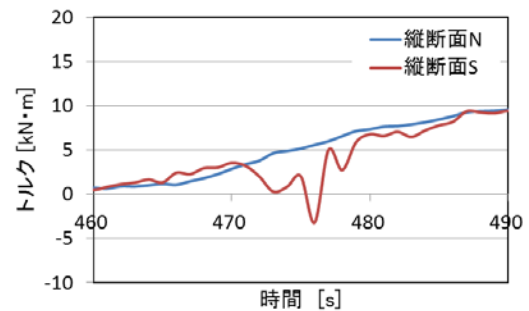


図-17 上部工に作用するトルクの比較（三次元解析）

三次元解析では大きく現れないのに対し、鉛直二次元解析では大きく現れることが分かった。この原因としては、鉛直二次元解析では河川横断方向の流れが拘束されて、現象が誇張されていることが考えられる。ただし、鉛直波力の上部工流失への影響は小さいことや、縦断面NおよびSでの支持部材への作用波力の差、上部工に発生す

るトルクの回転方向の違いについては三次元解析でも確認され、鉛直二次元解析による作用波力の影響評価はおおむね妥当であると言える。

## 5. おわりに

本研究では、矢の浦水管橋の被災メカニズムを分析するため、直下流側の道路橋との水平距離の差に着目し、残存した径間と流失した径間の縦断面（縦断面NおよびS）を対象として、矢の浦水管橋の上部工に作用する波力を数値解析により求めた。解析で得られた2断面の作用波力の比較を行い、上部工流失被害への作用波力の影響を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 道路橋と上部工の水平距離の差に着目して、鉛直二次元解析を行い、上部工に作用する波力の比較を行った。その結果、鉛直波力では大きな差が見られなかったが、上部工に作用するトルクは、流失した径間を想定したケースで大きな値となることが分かり、支持部材に作用する波力によるトルクが上部工の流失被害に影響している可能性が示唆された。
- 鉛直二次元評価の妥当性を確認するため、道路橋の湾曲形状を考慮した三次元解析を行った。その結果、鉛直二次元解析と同様に、残存した径間と流失した径間で支持部材に作用する波力やトルクに差異が見られ、鉛直二次元解析における評価がおおむね妥当であることが分かった。ただし、三次元解析で得られた縦断面Nと縦断面Sの差は鉛

直二次元解析で得られたものより小さくなった。

以上から、本研究の鉛直二次元解析により、上部工の流失には支持部材に作用する波力によるトルクの影響が大きいことが示唆されたが、二次元と三次元でその影響度合いが異なる結果となった。このことから、鉛直二次元解析は被災メカニズムの理解のために利用可能であるものの、現象が誇張されるため、定量的な評価については実形状を模擬した三次元解析に依る必要があると言える。今後、橋脚や河床形状等の地形条件を再現した解析を行い、特定の断面における評価だけでなく、水管橋の上部工全体が受ける力を検討し、水管橋の上部工と下部構造を連結する支承耐力との比較から水管橋の上部工流失に関して詳細な被災分析を行う。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、釜石市、東北地方整備局釜石事務所から矢の浦水管橋および矢の浦道路橋の構造諸元に関する資料を提供していただきました。ここに記して、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 中西陽一， 飯田 泰子：東日本大震災における水管橋・添架管の津波被害分析，日本地震工学会・年次大会 2012, 2012.
- 2) 米山 望，直田 梓：橋梁に作用する津波波力評価に対する VOF 法に基づく数値計算法の適用性検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），2012.
- 3) 米山 望，森 信人，三輪真輝：2011 年東北地方太平洋沖地震津波の釜石湾における挙動の数値解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），2012.

# NUMERICAL ANALYSIS OF THE DAMAGE OF YANOURA WATER-PIPE BRIDGE CAUSED BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Azusa NAOTA, Nozomu YONEYAMA and Yasuko KUWATA

When the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake occurred, an associated tsunami struck the coastal area and a number of river structures were damaged. Two spans out of three of the Yanoura water-pipe bridge (Kamaishi city, Iwate Prefecture) were washed away by the tsunami. For prevention of important infrastructures such as water-pipe bridges, it is necessary to reinforce them against tsunami. Therefore, detailed examination of tsunami attack on the Yanoura water-pipe is important. In this study, a vertical two-dimensional numerical simulation was applied to two longitudinal river profiles, focusing on the effect of the distance between the water-pipe and Yanoura road way bridge which is located just downstream of the water-pipe bridge. The results obtained in each case are compared in regard to horizontal forces, vertical forces and torque. According to the comparison, the effect of these forces upon the damage of water-pipe is discussed. As a result, it is suggested that an especially large torque contributed most considerably to the damage causing the water-pipe to be washed away. For verification of the results from 2D analysis, three-dimensional numerical simulation was also conducted. It is concluded that 2D analysis is sufficient to estimate the wave forces in each case.