

# 橋梁に作用する津波流体力の解析的検討

指導教員 丸山 久一 , 田中 泰司  
コンクリート研究室 監物 希美

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による橋梁の流出は、救助や支援のための交通に支障をきたし、被害を拡大させた。今後起こると予想されている東海・東南海・南海地震においても同様の問題が発生すると懸念されており、問題解決が急務となっている。これまでも、津波による被害メカニズムの検討として、段波に関する実験・解析は多く行われてきたが、段波を直接受けないと考えられる橋梁でも落橋の被害が報告されているものも多く、橋梁の被害メカニズムを解明するには段波以外にも定常流や非定常流といった流れの中によって橋梁に作用する外力の検討を行う必要がある。そのため、本研究では流失被害が生じた橋梁の諸元を用いて流体解析を実施し、流れを与えることによって橋梁に作用する津波による流体力の分析や上部工の移動に対する安全率の検討を行うことを目的とした。

## 2. 流体解析の概要

### 2.1 対象橋梁と橋梁周辺の津波被害の概要

本研究では、中規模のコンクリートT桁橋として標準的な諸元であり、海岸に近く陸上遡上などの影響が比較的少ないと考えられたことから岩手県九戸郡野田村の広内橋を流体解析の対象橋梁と設定した。橋梁の概要を表-1、橋梁の断面図を図-1に示す。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの痕跡調査結果<sup>1)</sup>より、この橋梁付近では津波高さと同様に14~15m程度であったと推定されている。また、津波高さは第2波以降の方が大きくなり、その際に本橋梁は浸水状態で流速の大きな波を受けたと考えられる。写真-1、写真-2に広内橋の被災状況、写真-3に橋台の拡大図を示す。拡大図より、アンカーバーが上流側のみ損傷していることから、広内橋は下流側が30cm程度持ち上がったあとに、上流側に水平移動し、落橋したと推定される。

表-1 広内橋の概要

名称	広内橋
設置場所	岩手県九戸郡野田村
架設年	1992年
形式	PCT4主桁
橋長	28.5m
桁長	28.4m
桁幅	8.2m
桁重量	4300kN
落下防止装置	アンカーバー
斜角	90°

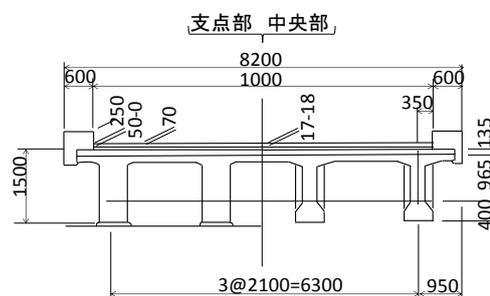


図-1 広内橋の断面図



写真-1 広内橋の被災後の様子（右岸側）



写真-2 広内橋の被災後の様子（左岸側）



写真-3 広内橋橋台の拡大図

## 2.2 解析環境の構築

本研究では橋梁にかかる波力を分析するために、沿岸技術センターより公開されている3次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D (以下, CS3D)<sup>2)</sup> というプログラムを用いた。CS3Dは「数値波動水路の耐波設計への適用に関する共同研究会」によって開発されたプログラムである。このプログラムは、室内実験に代わり、様々な地形や構造物の配置に対する波や流れの数値シミュレーションを行うことにより、海岸・港湾・海洋構造物の設計の検討が行えるようにすることを目的として作られた。

本研究における解析手順を図-2に、使用するツールを表-3に示す。CA3Dの解析には、入力ファイル、マトリックスファイル、空隙率ファイル、詳細ファイルの4つのファイルが必要であるが、CS3Dに組み込まれている規則波を造波させる場合には入力ファイルのみを、ユーザーが作成する任意の波を造波させる場合には入力ファイルとマトリックスファイルの2つのファイルを用意すればよい。本研究は後者に該当するため2つのファイルを作成する必要がある。また、CS3Dはsingle CPUでも実行は可能であるが、格子数が多い場合には、膨大な時間を必要とすることを考慮すると、並列計算が行える環境を構築しておくことが賢明である。本研究ではMPICH2<sup>3)</sup>という無償ソフトを用いて並列計算を行える環境を構築した。

## 2.3 解析条件

本解析では流れを発生させ、水深やフルード数などを変更することにより、橋梁に作用する流体力の検討を行った。表-2に各軸の解析領域および格子数、図-3に計算領域と橋桁の配置位置を示す。なお、y方向は0.1mの領域とし、ほぼ2次元的な解析としている。また、本解析で用いた流速の式を以下に示す。

$$v = C\sqrt{gh} \quad (1)$$

ここに、 $v$ : 流速,  $C$ : フルード数,  $g$ : 重力加速度,  $h$ : 初期水深である。

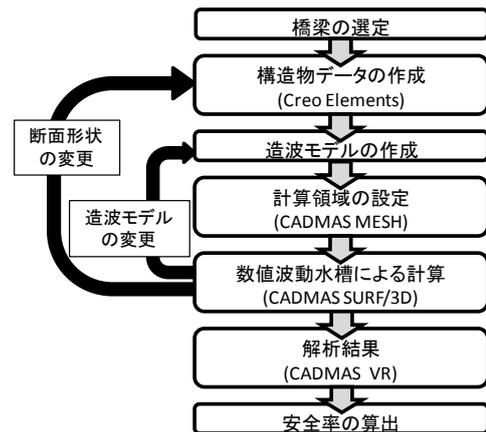


図-2 流体解析のフロー

表-2 解析に用いるツールの名称と用途

名称	用途
Microsoft Visual Studio	・解析の実行
Creo Elements	・3次元構造物データの作成
サクラエディタ (テキストツール)	・入力データの作成 ・マトリックスファイル作成
CADMAS MESH	・計算領域の設定 ・計算格子の設定 ・格子座標データの作成
MPICH2	・並列計算環境の構築
GFconv.exe	・複数図化ファイルの結合
View3DKAI	・図化ファイルの可視化
CADMAS VR	
AVI Maker	・AVIファイルの作成
Microsoft Excel	・時系列ファイルの確認

表-3 解析領域および格子数

軸	領域[m]	分割幅[m]	格子数	総格子数
x	100	0.1	1,000	200,000
y	0.1	0.1	1	
z	20	0.1	200	

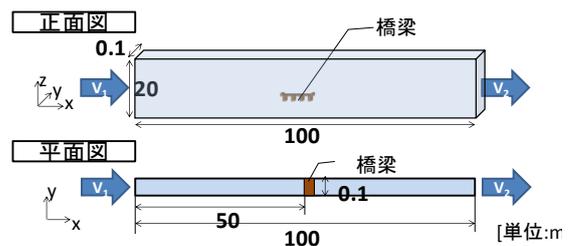


図-3 解析領域と橋桁位置



図-4 解析における橋桁の寸法

ここで、CD3Dにおける流入条件と流出条件の違いについて示す。図-5は例として仮に与える流速を0.3m/sとしたものであり、図の左側から右側に流れが発生する。流入時はマトリックスデータを用いて正弦曲線で徐々に流入させる流速を増加させていき、10秒後に0.3m/sとなるように設定している。しかし、流出側は、プログラムの仕様の都合上、流入側と同様の設定ができず、解析開始から一定の流速で流出が行われる。図の場合、解析初期段階から一定で0.3m/sの流速で流出させることになる。これに加え、流入・流出境界には流速のみを与えているので、境界条件の与え方によっては、水位が一定とはならない場合も生じえる。このような理由で、定常流を与えるためには流入流速と流出流速の関係性について把握しなければならない。そこで、流入流速( $V_1$ )を4.601m/sで一定とした場合に、流出流速( $V_2$ )を1.0倍、1.3倍としたときの流入側の水位と流出側の水位の比較をしたグラフを図-6、図-7にそれぞれ示す。この図より、1.0倍の場合では時間経過とともに水位の上昇がみられ、1.3倍では100秒程度経過した後の水位が安定していることがわかる。このことから $V_1$ よりも $V_2$ の流速を大きくする必要があることがわかる。また、他の水準で解析を行う場合に、 $V_2$ の $V_1$ に対する倍率が大きすぎると、今回の現象とは逆に、水位が時間経過とともに減少していく可能性もある。そのため、本研究では $V_2$ は $V_1$ の1.3倍として解析を行った。

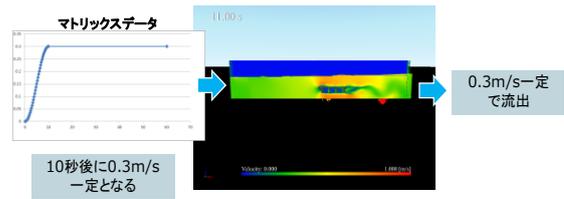


図-5 流入流速と流出流速の関係

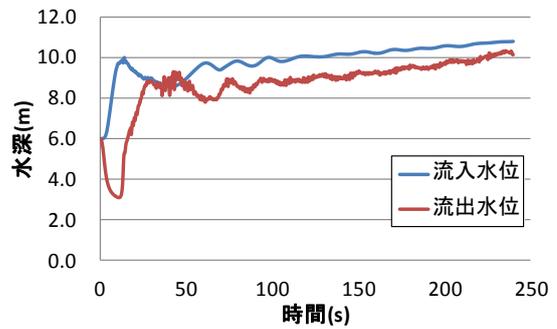


図-6 流出流速と水位の関係 ( $V_2=1.0 V_1$ )

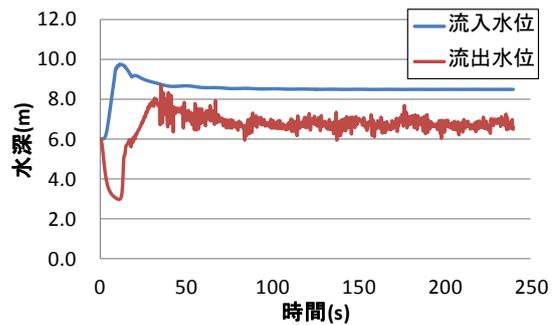


図-7 流出流速と水位の関係 ( $V_2=1.3 V_1$ )

## 2.4 安全率の算出

また、本解析で得られた結果より、桁の水平移動に対する安全率 $\beta$ を幸左らによって提案された式(2)を用いて算出し、 $\beta < 1$ となったとき、桁の水平移動が生じるとみなす。

$$\beta = \frac{R}{D} = \frac{\mu(w - L)}{D} \quad (2)$$

ここに、 $D$ : 抗力 (解析値)、 $R$ : 摩擦抵抗力、 $\mu$ : 摩擦係数、 $w$ : 大気中重量、 $L$ : 揚力 (解析値) である。また、回転移動に対する安全率 $\beta_M$ は、式(3)より算出し、 $\beta$ と同様、 $\beta_M < 1$ となったとき、桁の回転移動が生じるとみなす。このとき、揚力の作用モーメントの正負に応じて式(4)、式(5)あるいは式(6)、式(7)を用いて算出する。また、回転中心は上流側の桁下端とし、各辺に作用する抗力あるいは揚力の回転中心からの距離は図-8に示した値とした。

$$\beta_M = \frac{M_r}{M_a} \quad (3)$$

$\Sigma \left\{ DA_g \left( d + \frac{a}{2} \right) \right\} \geq 0$  の時

$$M_a = \Sigma \left( DA_b \frac{d}{2} \right) + \Sigma \left\{ DA_g \left( d + \frac{a}{2} \right) \right\} + (Lx) \quad (4)$$

$$M_r = \frac{b}{2} w \quad (5)$$

$\Sigma \left\{ DA_g \left( d + \frac{a}{2} \right) \right\} < 0$  の時

$$M_a = \Sigma \left( DA_b \frac{d}{2} \right) + (Lx) \quad (6)$$

$$M_r = \frac{b}{2} w - \Sigma \left\{ DA_g \left( d + \frac{a}{2} \right) \right\} \quad (7)$$

ここに、 $M_r$ ：抵抗モーメント、 $M_a$ ：作用モーメント、 $A_b$ ：ウェブ面積、 $d$ ：ウェブ高さ、 $A_g$ ：地覆面積、 $a$ ：地覆高、 $x$ ：回転中心からの距離、 $b$ ：桁幅である。

### 3. 定常流における流体解析の検討

本研究では、まず定常流を発生させ、水深やフルード数などの条件を様々に変更することにより、橋梁に作用する流体力の検討を行った。解析水準は、フルード数  $C$  を 0.4, 0.6, 0.7 の 3 種とし、それぞれ初期水深  $h_0$  を 4.0m, 6.0m, 8.0m, 10.0m の 4 種とした全 12 水準とした。なお、桁は地面から 1.6m の高さに設置されており、橋桁の地覆までの高さが 1.8m のため、地面から橋桁地覆までの高さは 3.4m となり、解析水準内で最も初期水深が小さい  $h_0=4.0m$  においても、橋桁が完全に浸水した状態から定常流を与える流体解析を開始する。(図-9 参照) 解析結果より、流入流速と抗力の関係を図-10 に、流入流速と揚力の関係を図-11 に示す。なお、図に示す揚力とは浮力も含んだ値とする。この図より、抗力はフルード数の違いに関わらず、定常時における流入流速に依存するといえる。しかし、揚力は、流入流速の増加にともなって負の揚力が増加するものの、 $C=0.6$ ,  $h_0=6.0m$  の水準で最も大きな負の揚力が作用した後は、流入流速が大きくなるほど負の揚力は減少する傾向を示した。図-12 は本研究における水準内で(a)最も流入流速の小さい  $C=0.4$ ,  $h_0=4.0m$  と (b)最も流入流速の大きい  $C=0.7$ ,  $h_0=10.0m$  における揚力の分布を示した図である。この 2 水準は図-11 からわかるように、定常時における揚力がほぼ同等である。しかし、図-12 の (a)では橋桁

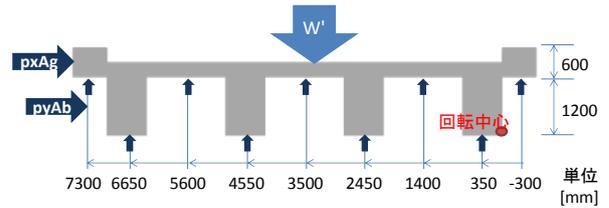


図-8 抗力および揚力の作用位置

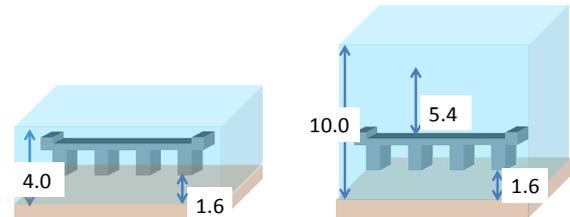


図-9 橋桁の位置と初期水深の関係

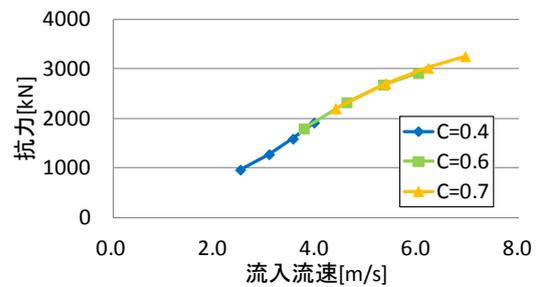


図-10 流入流速と抗力の関係 (定常)

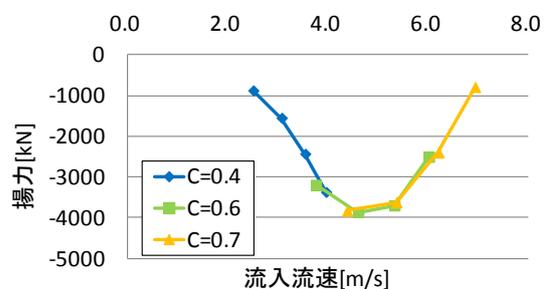


図-11 流入流速と揚力の関係 (定常)

に揚力が特別大きくかかる箇所は確認できないが、最大水深の場合は上流側の耳桁部に大きな揚力、下流側に下向きの力が発生していることから、両者の揚力分布の傾向は大きく異なっていることが分かり、両者には揚力の作用の仕方に違いがみられる。

図-13は流体解析より得た結果をもとに安全率を算出し、流入流速との関係をまとめたものである。この図より、 $\beta$ 、 $\beta_M$ ともに流入流速が大きくなるほど安全率の低下がみられ、最も安全率が小さくなった $h_1=13.48\text{m}$  ( $C=0.7$ ,  $h_0=10.0\text{m}$ ) の水準では、 $\beta=0.94$ 、 $\beta_M=4.66$  となり、水平移動が生じるとみなされた。しかし、対象橋梁の被害状況を示した写真より、対象橋梁は水平移動より先に回転移動が生じたと考えられ、本解析の結果と異なるものとなった。

#### 4. 水位上昇をともなう流体解析の検討

定常流における結果を踏まえ、次に非定常流に着目をし、流出側の流速を流入側よりも小さく設定することで、意図的に水位上昇を発生させ、橋桁におよぼす影響が定常流とどのように異なるかについて検討を行った。図-14は水位の経時変化を示したグラフであり、 $0.055\text{m/s}$  程度の速度で水位上昇をしていることが読み取れる。また、図-15は水位上昇を発生させた場合の抗力および揚力の経時変化を示している。図-14、図-15より、抗力は緩やかに減少し、揚力は水位上昇にともなって急激に揚力が増加し、正の揚力が発生した。

#### 5. 定常流と非定常流の比較

定常流と非定常流では流体力に違いが生じるかを確認するため、得られた定常流の流体力（抗力、揚力）と非定常流の流体力とをそれぞれ比較したグラフを図-16に示す。抗力においては、定常流では流入水深の増加にともなって増加するのに対し、水位を上昇させた非定常流の場合では抗力は減少する傾向がみられる。また、揚力においては、定常流では下向きの力が発生しているのに対し、非定常流では上向きの揚力が発生することが確認された。このことより、定常流における水準と水位上昇をともなう

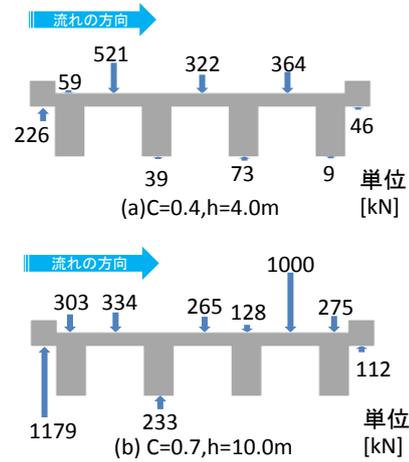


図-12 揚力分布

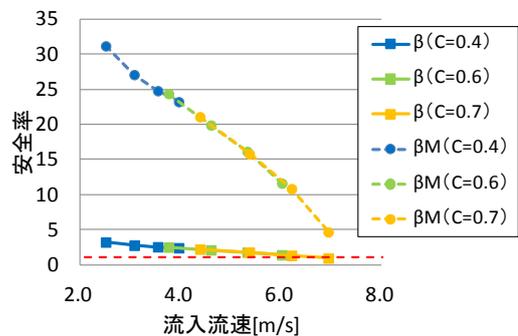


図-13 流入流速と安全率の関係（定常）

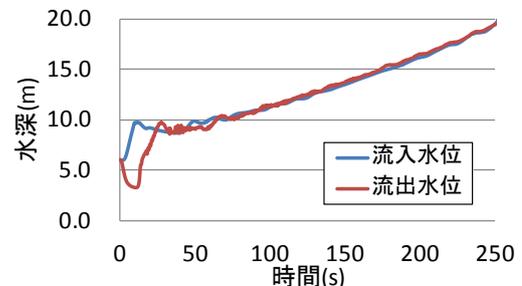


図-14 流入・流出水深の経時変化（水位上昇）

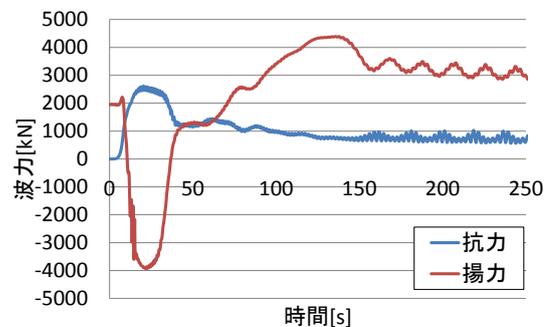


図-15 抗力・揚力の経時変化（水位上昇）

水準とでは橋桁に作用する波力は傾向が大きく異なることが明らかとなった。

安全率の経時変化を示した図-18より、水位上昇を開始した約50s経過後から急激に $\beta_M$ が減少し、約100s経過したときに $\beta_M$ が1を下回った。このことより、0.055m/sで水位上昇させた場合、 $h_1=11.62\text{m}$ で回転移動が生じるという、実現象と相違ない結果が得られた。

## 6. 結論

本研究では、流失被害が生じた橋梁の諸元を用いて3次元流体解析を実施し、定常流や非定常流の流れを与えることによって橋梁に作用する津波による流体力の分析や上部工の移動に対する安全率の検討を行うことを目的とした。その結果、定常流において、流入流速の増加にともない抵抗力も増加するのに対し、揚力は負の揚力が増大したが、一定の流入流速を超えると、その後は水深と流速が大きくなるにつれて負の揚力は減少した。また、同等の揚力が生じている場合でも、流入水深が異なる場合では、揚力の分布は大きく異なった。さらに、定常流においては水平移動するという結果が得られ、実際の被害形態と異なる結果となった。この結果を踏まえ、非定常流における解析を行ったところ、水位上昇開始後、抵抗力は緩やかに減少していき、揚力は急激に増加することから、定常流と非定常流（水位上昇）では大きく異なった傾向を示した。また、非定常流においては、回転移動が生じやすくなるという、実際の被害状況と相違ない結果が得られた。

しかし、非定常流における解析は少ない条件でしか行っていないため、上昇速度や橋桁形状、橋桁の設置高さなどの条件が変化させた場合におよぼす影響について、今後検討を重ねる必要がある。

## 参考文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果  
<http://www.coastal.jp/ttjt/> (2014.1.30 参照)
- 2) 財団法人 沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo.39「CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発」, 2010.12
- 3) MPICH  
<http://www.mpich.org/> (2014.1.30 参照)

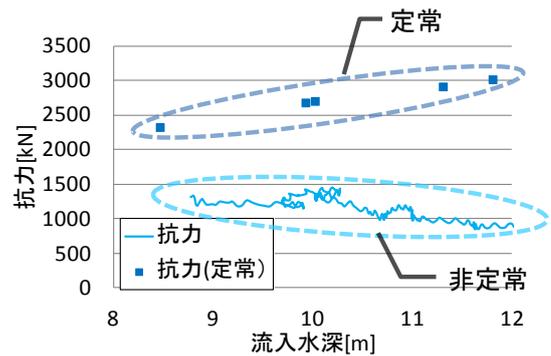


図-16 水位上昇と定常流の比較（抵抗力）

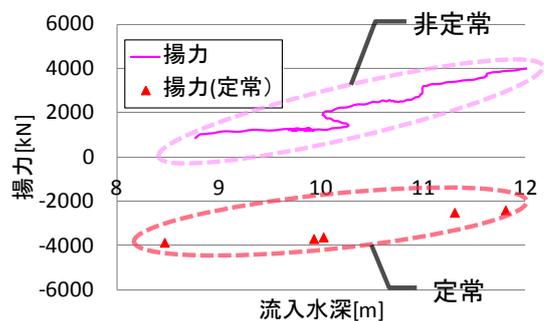


図-17 水位上昇と定常流の比較（揚力）

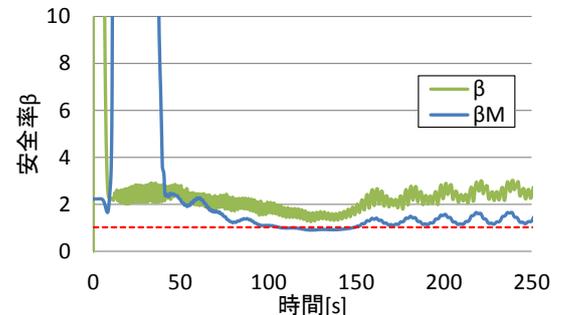


図-18 安全率の経時変化（水位上昇）