

3次元数値波動水槽によるPCT桁橋に作用する津波波力の分析

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科 建設工学専攻 ○監物 希美
 長岡技術科学大学 正会員 ph.D 丸山 久一
 長岡技術科学大学 正会員 博(工) 田中 泰司

Abstract : Many bridges were washed away by tsunami in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. In this study, tsunami wave force acting on a bridge was calculated with three-dimensional fluid analysis program. Drag and lift force acting on the PCT-girder bridge named Hirouchi bridge in uniform stream were evaluated numerically. Then, safety factor against slip and rotation were examined. In case of 8.5m as initial depth with 0.6 as Froude number, large lift force is generated in front of the bridge. The lift force is strong enough to make the bridge rotated. It is expected that the rotation should cause preliminary to the slip even in uniform flow in case of Hirouchi bridge.

Key words : The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, PCT-girder bridge, Fluid analysis

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では多くの橋梁が流失被害を受けたことにより、救助や支援のための通行に大きな支障をきたした。今後発生すると予想される東海・東南海・南海地震においても同様の問題が懸念されるため、この問題の解決は早急に進める必要がある。しかし、津波波力による橋梁の被害については、その被害メカニズムすらほとんど明らかにされていないのが現状である。そこで、本研究では3次元流体解析を実施し、橋梁に作用する津波波力の分析と、被害メカニズムの検討を行うこととした。

2. 数値解析の概要

2.1 対象橋梁

本研究では岩手県野田村の広内橋を研究対象とした。この橋梁は海岸沿いに設置されたPCT4主桁の橋梁である。橋梁の概要を表-1に、断面図を図-1に示す。写真-1に広内橋の被災状況の全体図を、写真-2に橋台の拡大図を示す。アンカーバーの損傷状況より広内橋は下流側が50cm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。

2.2 解析条件

流体解析には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^{1), 2)} (以下、CS3D)を用いた。CS3Dの計算手法には、汎用性が高く複雑な自由表面を取り扱うことができるVolume of Fluid法とSimplified Marker and Cell法が採用されている。また、海岸域における波浪場の解析では海底斜面や透過

表-1 対象橋梁の概要

名称	広内橋
設置場所	岩手県野田村
架設年	1992年
形式	PCT4主桁
橋長	28.5m
全幅	8.2m
桁重量	4300kN(大気中)
落下防止装置	有り(アンカーバー)
斜角	90°

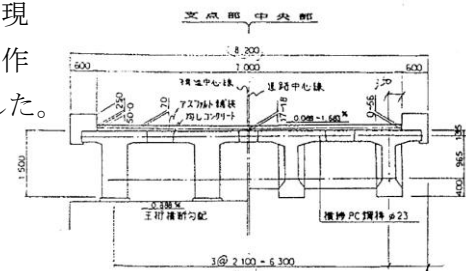


図-1 広内橋の断面図



写真-1 被災後の桁移動状況



写真-2 被災後の左岸橋台の状況

性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須となる。このため、CS3Dの基礎方程式には、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes方程式を採用している。CS3Dでは、構造物に作用する波圧や流速などの波動に関する諸課題の検討を行うことができる。一方で、CS3Dでは構造物の移動や変形に関する計算は行うことができないため、解析結果より得られた波圧をもとに移動に対する安全率を算出する必要がある。

津波による波力特性は定常流に近いと考え、解析境界に流速と水深を与えて流れの中で橋梁にどのような力が作用するのかを分析することにした。

解析メッシュを図-2に示す。流れ方向の解析領域は400mとした。本解析ではx=0mの解析境界(図-2の左側)から流れを与え、反対側の境界(x=400m)から同量の排水を行ったうえで、定常状態に至るまで解析を行った。橋桁はx=100mの地点に設置した。各軸における計算領域、格子数および総格子数は表-2に示すとおりである。

現況と同様に、橋の兩岸の高さは橋面と同じとした。式(1)は本解析で用いた水深と流速の関係式である。本稿ではフルード数をC=0.6一定とし、初期水深hは橋桁に触れる最低水深である2.0m、映像解析をもとに算出された流速5~6m/sとなる8.5mの2パターンで解析を実施した(図-3参照)。

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

v : 流速[m/s], C : フルード数, g : 重力加速度(9.8[m/s²]), h : 初期水深[m]

3. 波力の計算結果

3.1 初期水深h=2.0mの場合

図-4に抗力および揚力の経時変化をそれぞれ示す。なお、図-4の揚力は動水圧であり、浮力が含まれている。図に示す抗力および揚力は、それぞれの合力として示す。25s経過時で約100kNの抗力と約700kNの揚力が発生した。h=2.0mでは水深が浅く、流速が2.66m/sと小さかったために、流れが橋桁におよぼす影響が小さかったと考えられる。図-5に橋桁中央部における圧力コンター図を示す。h=2.0mでは流れは桁にのみ接触しており、床版にまで達していない。また、背面に比べて前面の圧力が大きくなっていることがわかる。

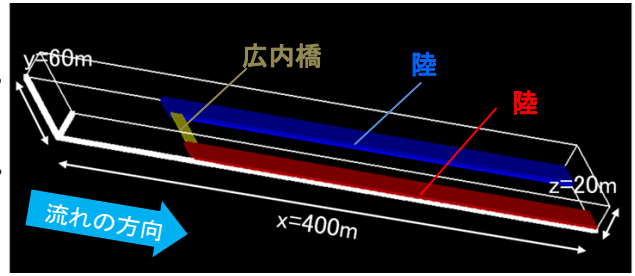


図-2 計算領域

表-2 計算領域と格子数の概要

軸	領域[m]	格子数	総格子数
x	400	520	5,158,400
y	60	160	
z	20	62	

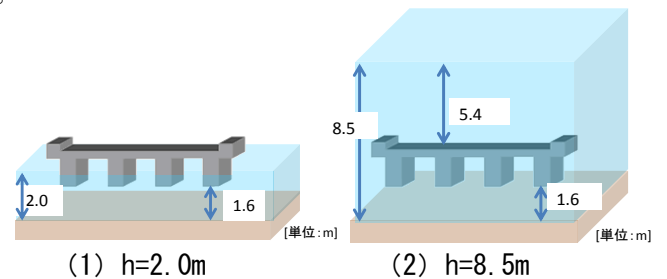


図-3 橋桁と水深の関係

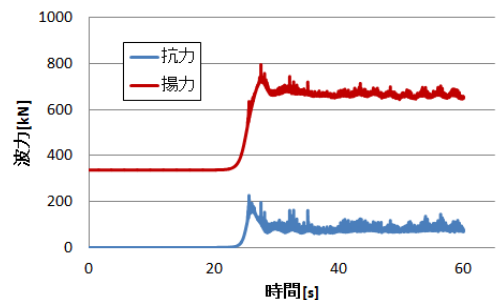


図-4 抗力・揚力の経時変化 (h=2.0m)

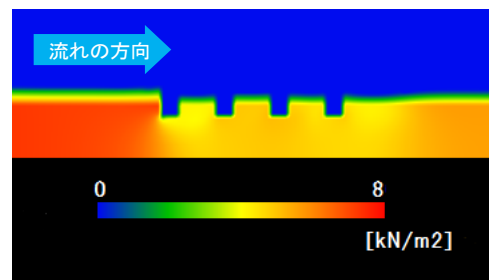


図-5 圧力コンター図 (h=2.0m)

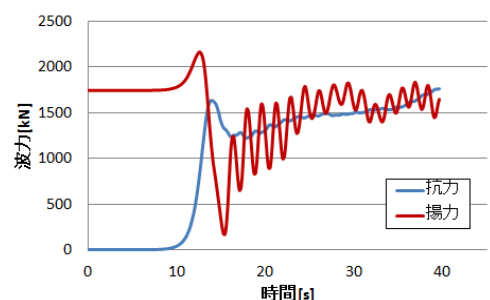


図-6 抗力・揚力の経時変化 (h=8.5m)

3.2 初期水深h=8.5mの場合

図-6に抗力および揚力の経時変化をそれぞれ示す。こちらも図-4と同様に、揚力は動水圧として浮力を含み、抗力の合力、揚力の合力をそれぞれ示す。本解析では、10 s 経過時に流れが桁に衝突し、瞬間的に約1700kN の抗力が発生した。その瞬間、揚力は急激に減少し、その後、揚力の合力は浮力に相当する値まで漸増する結果となった。また、図-7に示した圧力コンター図から、桁前方に集中的に抗力が作用することや、耳桁の部分に大きな揚力が発生することがわかった。また、桁上面では前方よりも後方により大きな下向きの力が発生することが明らかとなった。

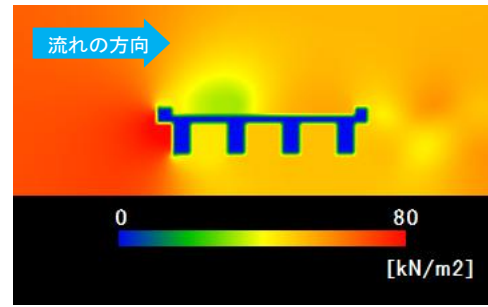


図-7 圧力コンター図 (h=8.5m)

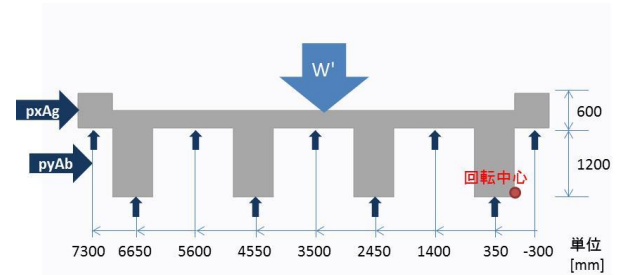


図-8 抗力・揚力作用位置

4. 安全率による被害形態の検討

解析によって得られた波力に対する被害安全率を水平移動と回転移動の各被害形態に対して算出した。ここで、安全率 β は値が大きいほど桁の抵抗力が大きく、移動しにくい橋梁であることを示す。また、 $\beta < 1$ となったとき、橋梁の移動が生じるとみなすことができる。桁の水平移動に対する安全率 β は幸左らによって提案された式(2)を用いて算出した³⁾。

$$\beta = \frac{R}{D} \quad (2)$$

ここに、 D ：抗力（解析値）[kN]、 R ：摩擦抵抗力[kN]であり、式(3)より求めた。

$$R = \mu w \quad (3)$$

ここに、 μ ：摩擦係数、 w ：大気中の重量－揚力（解析値）[kN]であり、摩擦係数 μ は幸左らによって提案された0.6とした³⁾。

回転移動に対する安全率 β_M は、式(4)より算出した。回転中心は上流側の桁下端とした。

$$\beta_M = \frac{M_r}{M_a} \quad (4)$$

ここに、 M_r ：抵抗モーメント、 M_a ：作用モーメントであり、式(5)、(6)により、それぞれ求めた。

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

b ：桁幅、 w' ：大気中の重量

$$M_a = \sum(p_x A_b \frac{d}{2}) + \sum(p_x A_g (d + \frac{a}{2})) + \sum(p_y x) \quad (6)$$

p_x ：水平波力、 A_b ：ウェブ面積、 d ：ウェブ高さ、 A_g ：地覆面積、 a ：地覆高、 p_y ：揚力、 x ：回転中心からの距離

また、各辺の回転中心からの距離は図-8に示した値とした。図中の記号は $p_x A_g$ ：地覆に働く抗力、 $p_y A_b$ ：ウェブに働く抗力、 w' ：橋桁の大気中の重量を示している。

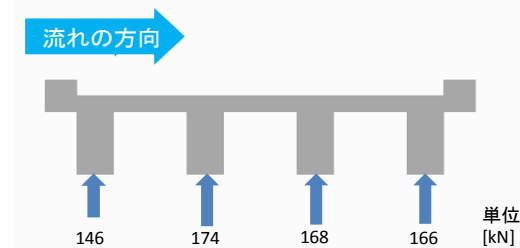


図-9 60s 時の揚力分布

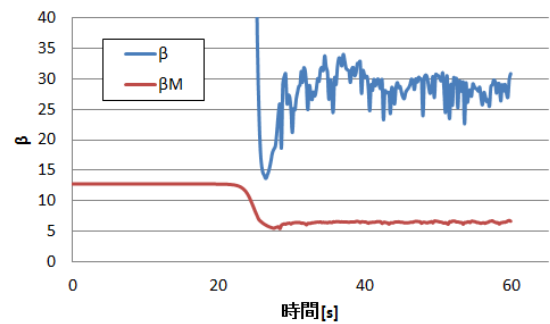


図-10 安全率の経時変化

4.1 初期水深 $h=2.0\text{m}$ の場合

$h=2.0\text{m}$ における揚力分布を図-9に示す。各桁のウェブ下面に作用する揚力にはほとんど差がみられなかった。図-10に安全率 β 、 β_M の経時変化をそれぞれ示す。水平移動に対する安全率 β は25~30程度で収束したのに対し、回転移動に対する安全率は $\beta \approx 6$ で収束をした。この解析条件では、波力が小さいので桁移動の被害は生じないものの、検討対象橋梁の諸元では、水平移動よりも回転移動に対する安全率が小さいといえる。

また、安全率は1を下回った場合に移動が生じるとしているが、どの程度の安全率が必要であるかについては検討を行っていないため、今後別途の検討が必要となる。

4.2 初期水深 $h=8.5\text{m}$ の場合

初期水深 $h=8.5\text{m}$ において、40s経過時に桁の各辺に作用した揚力の分布を図-11に示す。なお、この図では上向きと下向きの力の差を示した。桁への揚力はどの箇所においても上向きに働いているが、桁の前方部ほど、より大きな揚力が働いていることが明らかとなった。また、桁の後方では桁上面に作用する下向きの力が大きいため、揚力が小さくなる結果となった。図-12に安全率 β および β_M の経時変化を示す。流れが桁に衝突してから定常状態に至るまで、回転移動の安全率が水平移動の安全率よりも若干小さくなる結果となった。また、その値の収束値は1を若干下回っているため、今回の解析条件では橋桁が流失する可能性が大きいといえる。また、安全率の計算結果は、水平移動よりも先に回転移動が生じることを示しており、これは実際の被害状況と相違しない。

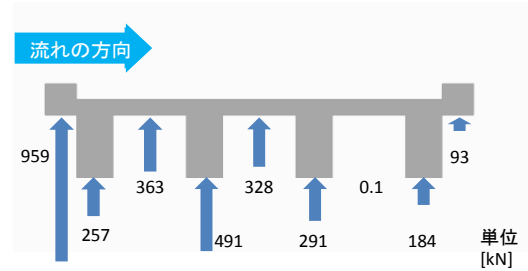


図-11 40s 時の揚力分布

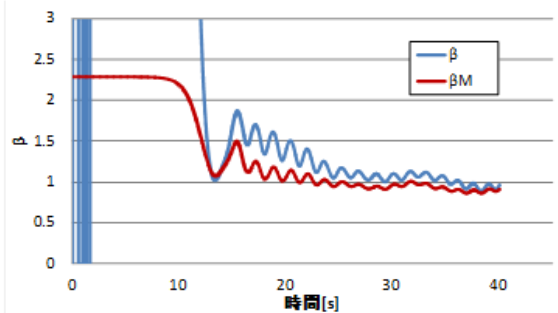


図-12 安全率の経時変化

5. まとめ

本研究では、PCT桁橋を対象として、流れの中で桁に働く流体力を3次元流体解析を用いて算出した。解析はフルード数を一定として初期水深を変化させる条件のもと行い、橋桁に働く波力を得ることで、その条件下での安全率を検討した。

その結果、初期水深が大きくなるほど抗力と揚力が増加し、フルード数が0.6で初期水深が8.5mの場合では流れの中で桁前方に大きな揚力が発生して回転移動が生じ得るといふ、実際の被害形態と同様の結果が示された。

今後、津波流速や橋梁の断面形状の影響による圧力分布や被害形態の差異について解析を進めていくとともに、回転移動の発生条件や回転力の大きさなどについても、さらなる検討を進める必要がある。また、安全率はどの程度必要であるかについても別途検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 財団法人 沿岸技術研究センター：沿岸開発技術ライブラリーNO.12 CADMAS-SURF 数値波動水槽の研究・開発，2001.10
- 2) 財団法人 沿岸技術研究センター：沿岸開発技術ライブラリーNO.39 CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，2010.12
- 3) 幸左，宮島，藤間，庄司，小野，重枝，広岡，木村：津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究成果報告書，新道路技術会議，2010.6