

水路実験結果に基づく橋桁に作用する津波の状態と 橋の挙動

中尾尚史¹・炭村 透²・星隈順一³

¹正会員 博(工) 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(工) 株式会社 川金コアテック 技術部 (前 独立行政法人土木研究所 交流研究員)
(〒530-0012 大阪市北区芝田1-14-8)

³正会員 博(工) 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波により、多くの橋梁が流出する被害を受けた。橋梁の流出は、近傍で迂回路の確保ができない場合には長期間にわたって道路ネットワークとしての機能に支障をもたらすことになり、二次的な被害にもつながる。また、近い将来に発生すると予想されている東海、東南海、南海地震により、大規模な津波が襲来する可能性も指摘されており、大規模災害発生時においても、避難路・緊急輸送道路として道路ネットワークの機能を早期に確保することが喫緊の課題となっている。

津波が作用したときの橋桁に与える影響については、これまでに、水路実験^{例えば(1),(2)}や数値解析^{例えば(3),(4)}による様々な研究が行われており、橋桁の津波対策についても検討が行われている^{5),(6)}。同時に、ビデオ映像などから、橋桁の設置位置付近にどのような津波が発生したのか、橋桁の流出メカニズムや津波特性に関する分析も行われている^{7),(8)}。

しかし、津波が橋桁に作用したときの挙動に関して、定量的に評価した検討例は少ない。橋梁(特に既存の橋梁)における津波による橋桁の挙動を評価するためには、どのような特性の津波が橋桁に作用し、その結果どれくらいの力が橋桁や橋梁の各部位に作用するのかについて、正確に評価しなければならない。

そこで本研究では、著者らが実施した既往の水路実験^{9),(10)}の結果を基に、橋の照査を行う際に着目す

べき津波が橋に作用するときの状態を明らかにするとともに、その状態において津波による橋の挙動を評価する方法について検討した。

2. 橋に影響を与える津波の作用状態

津波作用時の橋桁の挙動を定量的に評価するには、橋桁に津波が作用するときの状態を明確にする必要がある。橋桁に作用する津波の特性については、砕波などの段波状の津波が橋桁に作用するケース、急斜面を駆け上がって橋桁に作用するケース、水面が上昇して橋桁に作用するケースなど幾つかのパターンが考えられているが¹¹⁾、本研究では、橋に大きな影響を及ぼすと考えられる状態として、津波により桁下まで水位が達した状態(桁下空間がない状態)で、段波などの津波が橋桁に作用した場合に着目した。著者らが行った水路実験^{9),(10)}や、東北地方太平洋沖地震により発生した津波が橋に作用している時の映像解析による幸左らの研究^{7),(8)}を基に、津波が橋桁に作用した状態を分析し、図-1に示すように、桁下まで水位が達した後、段波状の津波が作用する場合と、そのまま水位が上昇していく場合を考えた。

桁下まで水位が達した後、段波状の津波が作用する場合は、津波が橋桁に到達した段階(状態Ⅰとする)と津波が橋桁の上を通過している段階(状態Ⅱとする)があり、それぞれの段階の中で橋桁に作用する力として極大点が生じると考えた。これらの状態では、津波作用側の耳桁に津波が作用することにより、津波作用側の桁が持ち上がるような挙動を示

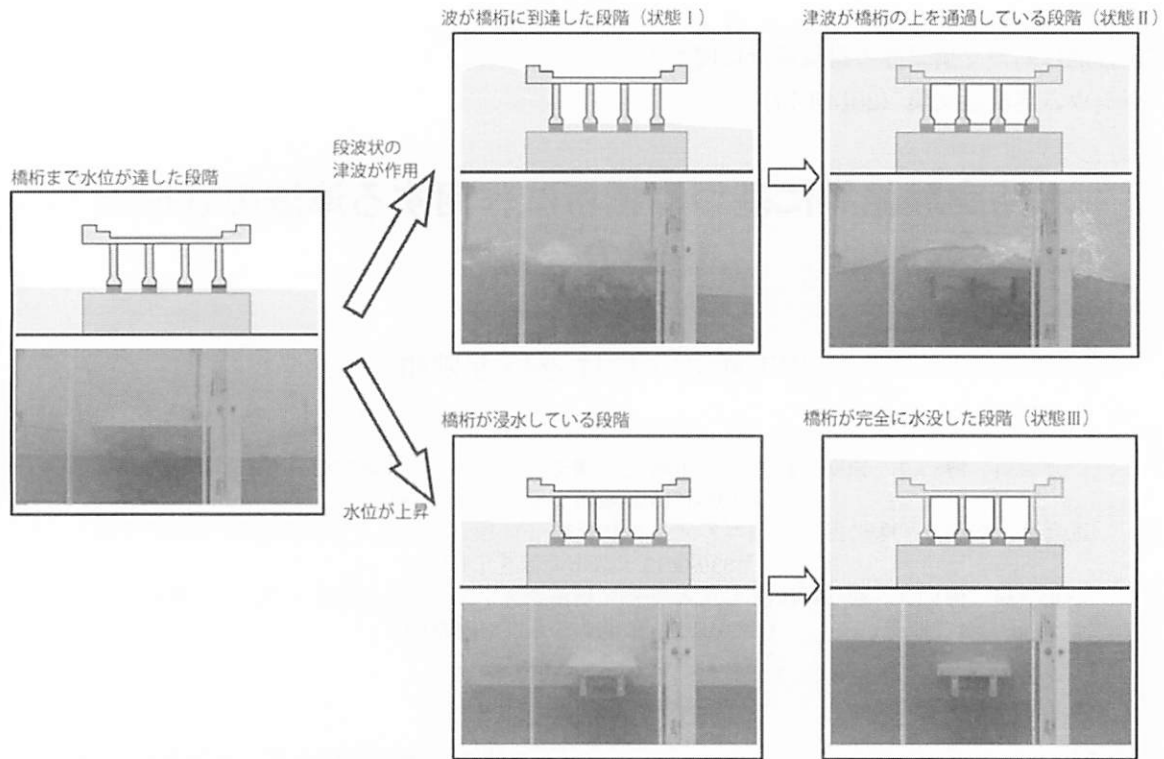


図-1 橋桁まで水位が達した後に考えられる津波作用状態（下図は実験で得られた流況）

すため、橋桁が裏返って流出することがある。

桁下まで水位が達した後も水位が上昇する場合は、徐々に橋桁が浸水していき、橋桁が完全に水没した段階(状態Ⅲとする)で、橋桁に作用する力が最大になる。この状態では、橋桁全体が持ち上がるような挙動を示し、橋桁は裏返らずに流出すると考えられる。

3. 津波による橋桁に作用する力の評価

(1) 既往の評価式

津波による橋桁に作用する力を評価する手法を検証した例は少ないが、検証例の1つとしてオレゴン州で提案されている津波外力評価式¹²⁾（本論文ではオレゴン式と呼称）がある。オレゴン式は、次式で表される。

$$F_H = F_h + F_d = (1 + C_r(N-1))C_h F_h^* + 0.5C_d \rho b (\Delta h u)_{\max}^2 \quad (1a)$$

$$F_V = [\gamma(\Delta h_{\max}) + 0.5\rho U_{x,\max}^2] A_v \quad (1b)$$

ただし $F_h^* = \gamma g(\Delta h_{\max}) A_h$

（ここに、 C_r ：内側桁に作用する圧力の低減係数($C_r=0.4$)、 N ：桁本数、 C_h ：変動荷重($C_h=1.0$)、 $\Delta h_{\max}$ ：最大波高、 A_h ：桁の側面積、 A_v ：桁の平面積、 b ：桁の長さ、 γ ：単位体積重量(ρg)、 F_h^* ：静水圧)

オレゴン式では、水平方向に作用する力は、内桁部に作用する影響も考慮されており、鉛直方向に作

用する力は、右边第1項および第2項ともに桁幅に一樣な力が作用させているのが特徴である。本研究では、既往の評価式の考え方を踏まえつつ、前章に示した状態に着目した上で、著者らが別途実施した水路実験の結果を基に、津波による橋桁に作用する力の評価式を検討した。

(2) 各状態における津波により橋桁に作用する力の考え方

a) 波が橋桁に到達した段階（状態Ⅰ）

津波が橋桁に到達した直後の状態は、図-2(a)に示すように、橋桁には津波により津波作用側の耳桁に水平方向の力 f_{H1} が作用する。この時の水平方向の力は、流体力による動的な力と、静水圧による静的な力が含まれる。桁内の空気が保持されていると考えると、津波作用側の耳桁以外の桁には津波は作用しないため、津波による力は生じない。また、床版張出部側面に生じる力も考慮する必要があるが、著者らが行った水路実験により⁹⁾、水平反力が最大になる時、床版張出部側面に作用する圧力は小さく、水平反力が低下してから、圧力がピーク値になったことから、この状態で床版張出部側面に生じる圧力を考慮しなくてもよいと考えた。

鉛直方向の力としては、床版張出し部底面に津波が衝突したときに生じる動的な力 f_{Vd1} と、津波により浸水した部分(斜線で示した部分)の浮力による静的な力(ただし桁間の空気はそのまま保持される)

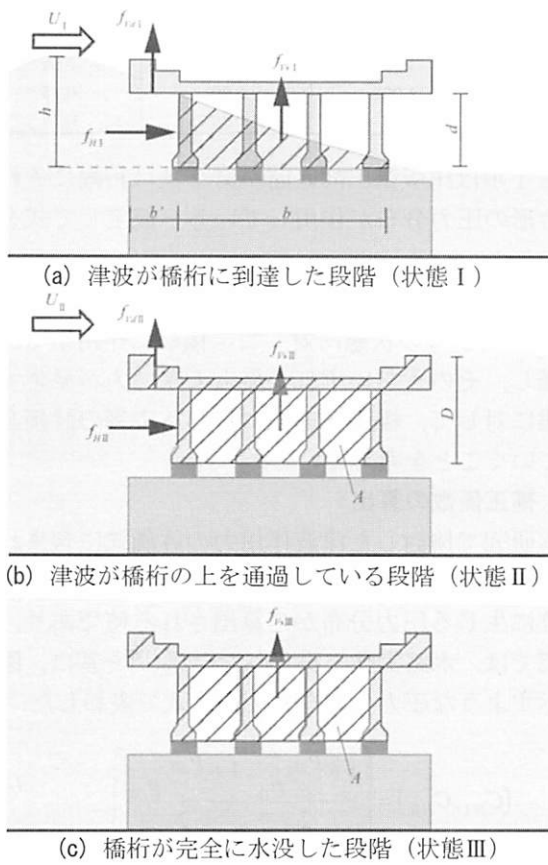


図-2 各状態における津波作用状態

f_{vs1} が上向きに作用する。津波衝突時に津波作用側耳桁の下フランジからの剥離により、桁間の流れが乱れることは考えられるが、著者らが行った水路実験¹⁰⁾により、桁下まで水位がある状態で、橋面までの高さの津波が作用したときは、このような現象はほとんど生じていない。そのため、桁間の空気はそのまま保持されるという仮定は、本研究で検討する範囲内では妥当であると考えた。

b) 津波が橋桁の上を通過している段階（状態Ⅱ）

津波が橋桁の上を通過しているときには、図-2(b)に示すように、津波が橋桁に到達した直後に作用する衝撃的な力は作用せず、橋桁を通過する流れによる力が作用する。

水平方向の力は、両耳桁に均等な静水圧が作用すると考えられるため、流体力による動的な力 f_{HII} のみ、津波作用側の耳桁に作用する。また、鉛直方向の力は、津波通過時に床版張出部底面に作用する動的な力 f_{vdII} と橋桁が浸水したことにより生じる浮力（静的な力） f_{vsII} が橋桁に作用する。橋桁が完全に水没する状態となるため、桁間の空気溜りを含む橋桁全体が浮力として作用する。

c) 橋桁が完全に水没した段階（状態Ⅲ）

津波速度はほぼ 0 の状態で徐々に橋桁が浸水していき、図-2(c)のように橋桁が完全に水没した場合、

流体力が発生せず、さらに両耳桁に均等な静水圧が作用することで静的な力が相殺されるため、津波による水平方向に作用する力はほとんど生じない($f_{HIII} \approx 0$)。そのため、鉛直方向の力は、橋桁が水没した状態で生じる浮力 f_{vsIII} のみが橋桁に作用する。なお、水位が上昇するときの流体力（鉛直方向の流速による影響）も考慮する必要があるが、著者らが別途実施した水路実験¹³⁾により、水位の上昇速度が橋桁に与える影響はほとんどないことがわかっている。そのため、水位上昇による流体力は考慮しなくてもよいと考えた。

(3) 橋桁に作用する力の評価

図-2 で示した力の作用状態を考慮すると、橋桁に作用する力（単位長さあたりの力）は次式で表される。なお、実際の現象は非常に複雑であると考えられるが、ここでは先述した以外の外力は小さく無視できると仮定した。

a) 水平方向に作用する単位長さあたりの力

$$\text{状態Ⅰ： } f_{HI} = 0.5\rho U_I^2 d C_{D1} C_{H1} C_r \quad (2a)$$

$$\text{状態Ⅱ： } f_{HII} = 0.5\rho U_{II}^2 D C_{DII} C_{HII} \quad (2b)$$

$$\text{状態Ⅲ： } f_{HIII} \approx 0 \quad (2c)$$

ここで、 ρ は海水の密度（後述する実験模型に対する計算では水の密度(1000kg/m³)), d は主桁高(m), D は上部構造物の高さ(m), C_r は浸水比（主桁高と津波高の比, $0 \leq C_r \leq 1$), U_I, U_{II} は各状態における津波速度(m/s)である。 C_{H1}, C_{HII} は津波特性による補正係数であり、各部位に生じる圧力分布から算出される値である。 C_{D1}, C_{DII} は各状態における抗力係数であり、状態Ⅰにおける抗力係数 C_{D1} は、動的な力と静的な力を合わせた係数となっている。

式(1a)で示したオレゴン式では、前述したように、水平方向に作用する力は、桁間部に作用する影響も考慮されているが、本研究では、桁下まで水位があり桁内の空気が保持されていると考えるため、津波作用側の耳桁以外の桁には津波は作用しない。そのため、式(2a)および式(2b)では、この桁間に作用する力は考慮していない。

b) 鉛直方向に作用する単位長さあたりの力

$$\begin{aligned} \text{状態Ⅰ：} \\ f_{vI} &= f_{vdI} + f_{vsI} \\ &= 0.5\rho U_I^2 C_{L1} b' C_{vdI} + \rho g h b C_{vsI} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \text{状態Ⅱ：} \\ f_{vII} &= f_{vdII} + f_{vsII} \\ &= 0.5\rho U_{II}^2 C_{LII} b' C_{vdII} + \rho g A \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \text{状態Ⅲ：} \\ f_{vIII} &= f_{vdIII} + f_{vsIII} = \rho g A \end{aligned} \quad (3c)$$

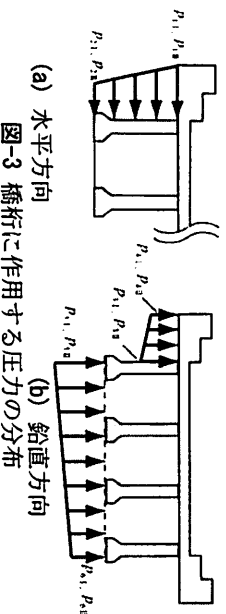


図-3 橋桁に作用する圧力の分布

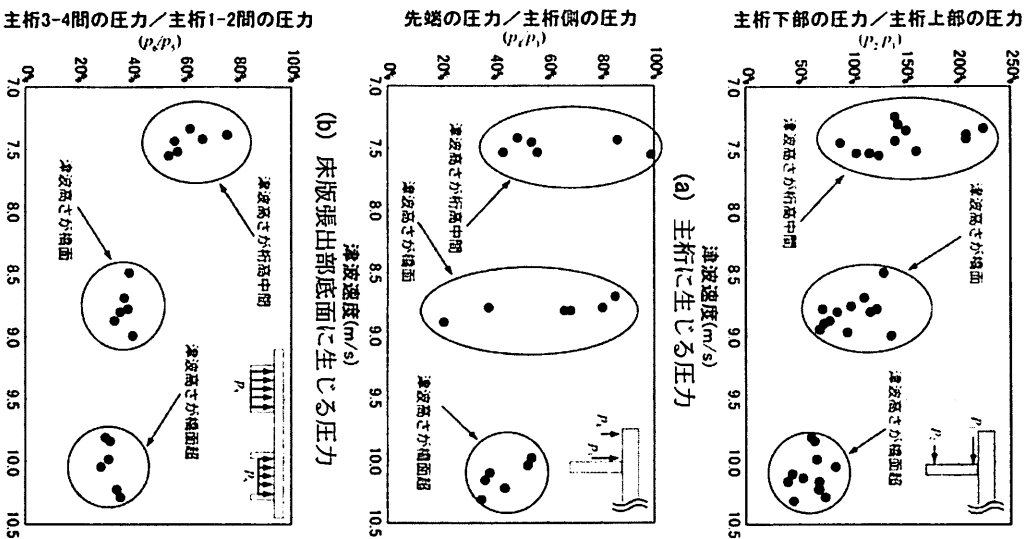


図-4 橋梁各部位に生じる圧力

右辺第 1 項は床版張出し部底面に作用する動的な力、第 2 項は津波により浸水した部分の浮力(静的な力)を表している。したがって、橋桁が完全に水没している状態Ⅱおよび状態Ⅲの静的な力の項は、桁間の空気溜まりを含む橋桁全体の浮力になっている。式中の g は重力加速度(9.8m/s^2)、 b は耳桁間の距離(m)、 b' は床版張出し部の長さ(m)、 A は桁間に生じる空気溜りを含めた桁断面積(m^2)、 h は波高($h \geq d$ のときは d)(m)、 C_{H1} 、 C_{L1} 、 C_{LH} は津波到達時および津波通過時の揚力係数、 C_{H21} 、 C_{L21} 、 C_{H2H} 、 C_{L21} 、 C_{L2H} は津波特性による補正係数である。

式(1b)で示したオレゾン式では、右辺第 1 項および第 2 項ともに桁幅に一樣な力が作用させているが、本研究では、水路実験で得られた結果¹⁰⁾を基に、右

表-1 補正係数			
補正係数	津波高が桁高中間	津波高が橋面	津波高が橋面超
C_{H1}	1.25	1.00	0.85
C_{L21}	1.00	0.90	0.75
C_{L21}	0.80	0.70	0.70

辺第 1 項は床版張出部底面、第 2 項は桁幅にそれぞれ台形の圧力分布が作用していると仮定して式を修正した。

橋梁に対する津波の影響を評価する場合、本研究ではこの 3 つの状態に対して、橋桁に作用する力を評価し、そのうちいずれか最も大きい力が発生する状態に対して、橋梁各部位に生じる応答の評価を行うっていくことを考えている。

(4) 補正係数の算出

本研究で検討した津波作用力の評価式に含まれている補正係数(C_{H1} 、 C_{H2} 、 C_{L21} 、 C_{L2H} 、 C_{H21} 、 C_{H2H})は、各部位に生じる圧力分布から算出される値であり、本研究では、水路実験で得られた結果¹⁰⁾を基に、図-3に示すような圧力分布を考え、次式で表わした。

$$(C_{H1}, C_{H2}) = \left[\frac{1 + P_{21}/P_{11}}{2}, \frac{1 + P_{2H}/P_{1H}}{2} \right] \quad (4a)$$

$$(C_{L21}, C_{L2H}) = \left[\frac{1 + P_{21}/P_{11}}{2}, \frac{1 + P_{2H}/P_{1H}}{2} \right] \quad (4b)$$

$$(C_{H21}, C_{H2H}) = \left[\frac{1 + P_{21}/P_{11}}{2}, \frac{1 + P_{2H}/P_{1H}}{2} \right] \quad (4c)$$

ここで P_1 は主桁上部に作用する圧力、 P_2 は主桁下部に作用する圧力、 P_3 は床版張出部の主桁側に作用する圧力 P_4 は床版張出部の先端部に作用する圧力、 P_5 は津波作用側の桁間に作用する圧力、 P_6 は反対側の桁間に作用する圧力である。また添え字の I および II は各状態を表している。

水路実験の結果¹⁰⁾から、橋梁の各部位に生じる圧力を示したのが図-4 である。縦軸は主桁上部に作用する圧力と主桁下部に作用する圧力の比、床版張出部の主桁側に作用する圧力と床版張出部の先端部に作用する圧力の比、津波作用側の桁間に作用する圧力と反対側の桁間に作用する圧力の比を示している。各ケースともばらつきが見られ、この圧力の比と津波の特性との関係についてはさらに精査が必要になるが、ここではこの得られた結果を基に、主桁下部に生じる圧力は、主桁上部に生じる圧力の 150%(津波高が桁高中間)、100%(津波高が橋面)、70%(津波高が橋面超)となる圧力分布を仮定し、作用高さ(ここでは主桁高 d)で積分することにより、

C_{H1} は 1.25(津波高が桁高中間), 1.00(津波高が橋面), 0.85(津波高が橋面超)に設定した. 床版張出部底面に作用する圧力については, 床版張出部先端に作用する圧力は, 床版張出部主桁側に生じる圧力の 100%(津波高が桁高中間), 80%(津波高が橋面),

50%(津波高が橋面超)となる圧力分布を仮定し, 床版張出部の長さ b' で積分することにより C_{Vd1} は 1.00(津波高が桁高中間), 0.90(津波高が橋面), 0.75(津波高が橋面超)に設定した. 同様に, 桁間に生じる圧力について, 津波作用側と反対側の桁底面に生じる圧力は, 津波作用側の主桁底面に生じる圧力の 60%(津波高が桁高中間), 40%(津波高が橋面, 津波高が橋面超)と仮定し, 耳桁間の距離 b で積分することにより C_{Vs1} は 1.6 と 1.4 にそれぞれ設定した.

得られた結果をまとめると, 各津波高における補正係数は表-1 のようになる.

4. 実験模型を用いた津波作用力の計算

(1) 橋桁模型

上述した評価式を用いて, 図-5 に示す著者らが行った水路実験¹⁰⁾で使用した床版張出長の異なる 2

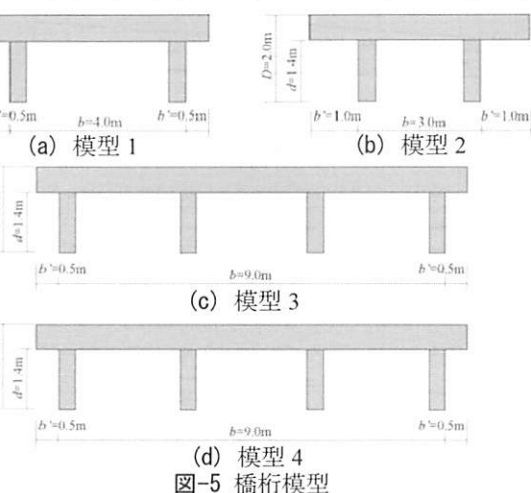
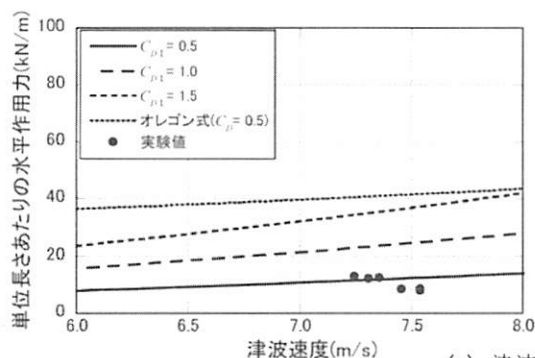
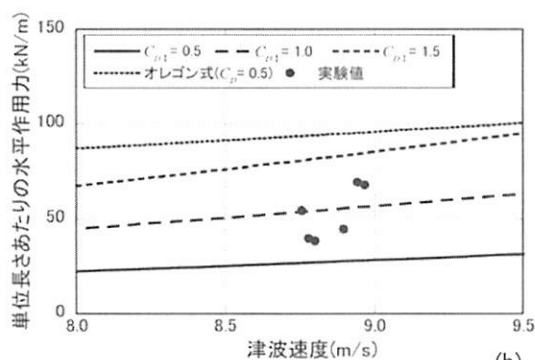
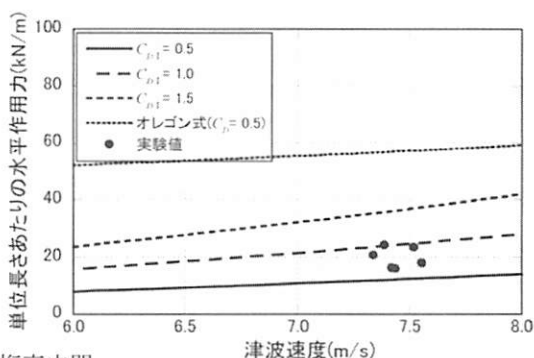


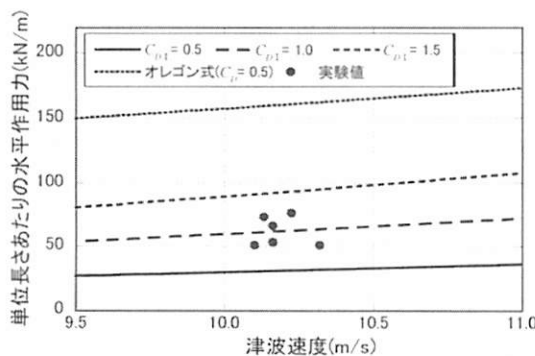
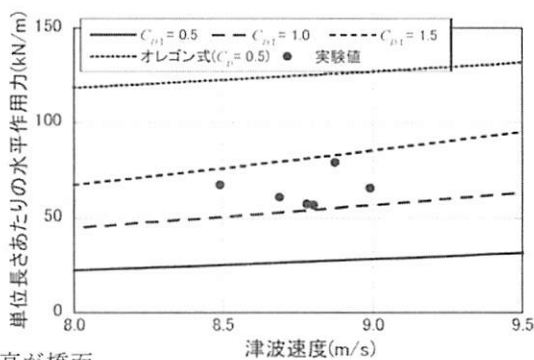
図-5 橋桁模型



(a) 津波高が桁高中間



(b) 津波高が橋面



(c) 津波高が橋面超

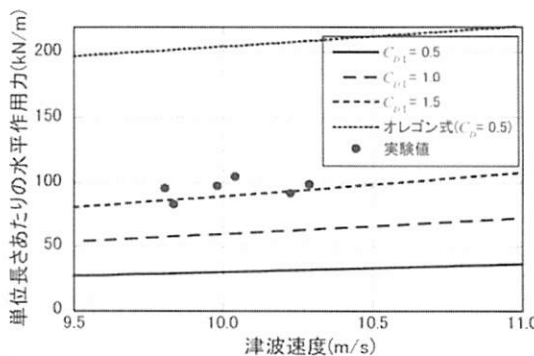
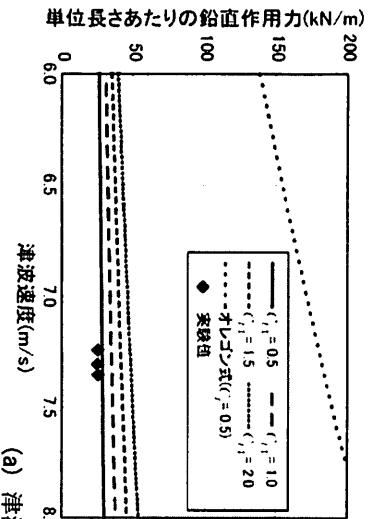
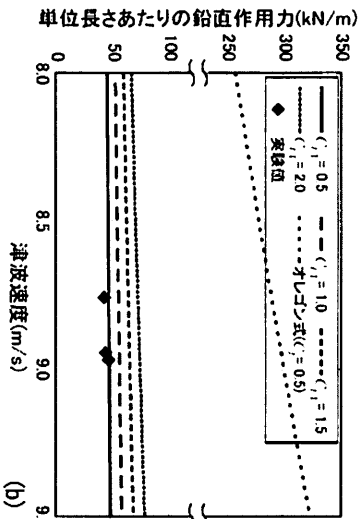
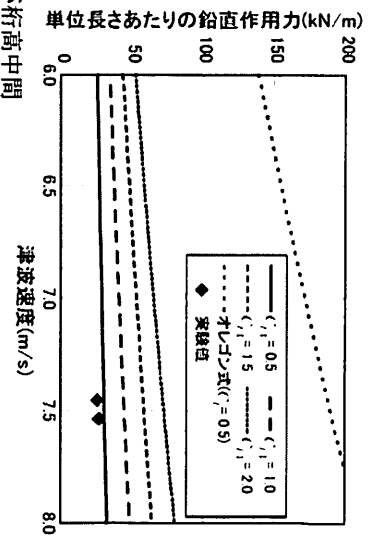


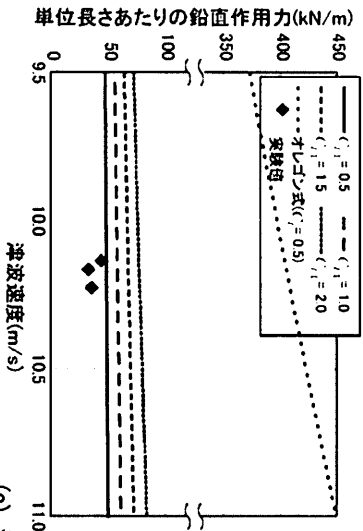
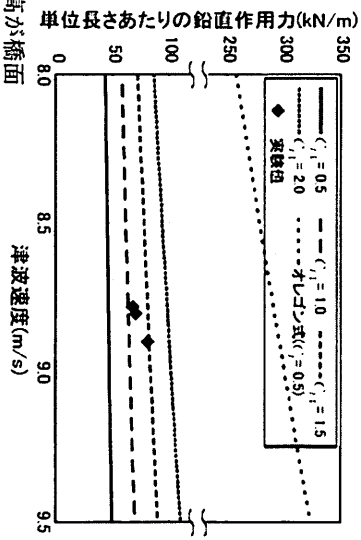
図-6 水平方向に作用する力の試算結果 (左: 2主桁断面(模型 1,2) / 右: 4主桁断面(模型 3,4))



(a) 津波高が桁高中間



(b) 津波高が橋面



(c) 津波高が橋面超

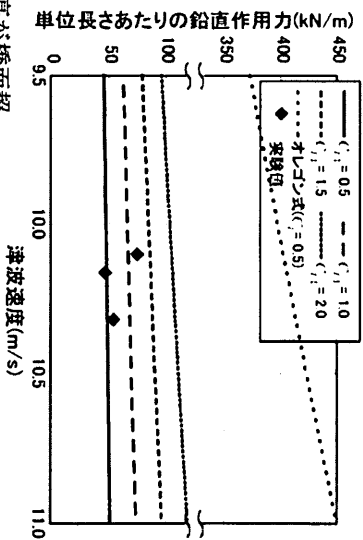


図-7 鉛直方向に作用する力の試算結果 (2 主桁断面, 左: 模型 1/右: 模型 2)

主桁および 4 主桁断面模型について、3 種類の高さの段波状の津波(波高が桁高中間、津波高が橋面、津波高が橋面超)が作用した場合の、橋桁に生じる力を算出した。なお、状態Ⅲについては、著者らが別途行った水位が上昇した場合の水路実験¹⁰⁾により、鉛直方向の津波による力は、浮力にほぼ等しくなることがわかっている。したがって、本研究では、津波が橋桁に到達した段階(状態Ⅰ)における、津波により橋桁に作用する単位長さあたりの力を求めた。

(2) 試算結果

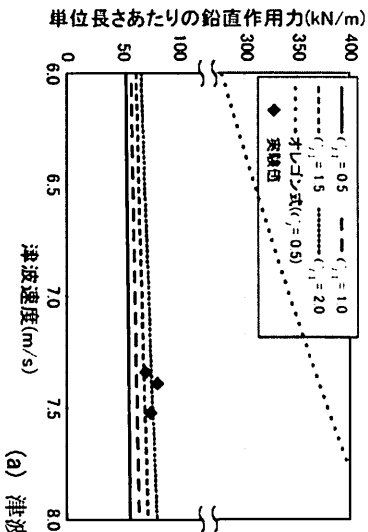
これらのパラメータを用いて、津波速度および抗力係数、揚力係数を変化させたときの津波により橋桁に作用する力を試算した。本研究では、既往の水路実験の結果¹⁰⁾を参考にし、津波の速度を津波が橋桁の中間高さのときは 6.0m/s から 8.0m/s、津波が橋面までの高さのときは 8.0m/s から 9.5m/s、津波が橋面を超える高さのときは 9.5m/s から 11.0m/s に設定した。また、実験で得られた、水平および鉛直方向

の力の最大値を図中にプロットした。水平および鉛直方向の力は、支承反力を合計して算出した。

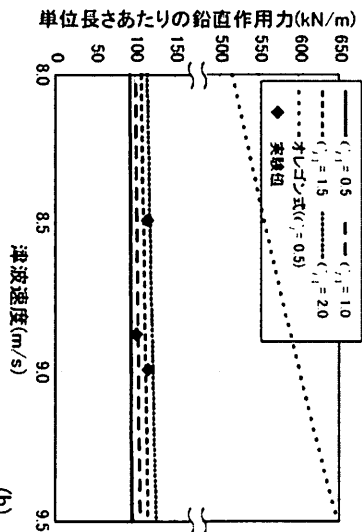
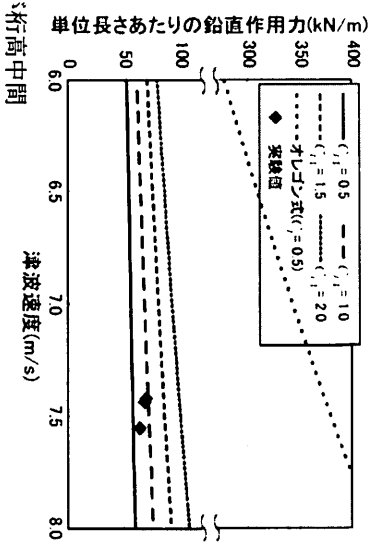
a) 水平方向に作用する力

水平方向に作用する力の計算結果を図-6 に示す。ここでは、津波が橋桁の中間高さの浸水比は 0.5、それ以外は 1.0 に設定している。また参考として、オレゴン式(式(1a))で計算した結果も示した。本研究では一例として、オレゴン式における抗力係数は 0.5、変動係数は 1.0、津波高は 1.0m(津波が橋桁の中間高さ)、2.0m(津波が橋面までの高さ)、3.0m(津波が橋面を超える高さ)、桁の長さ b は 1.0m、 A_h は 2.0m^2 に設定して計算を行った。

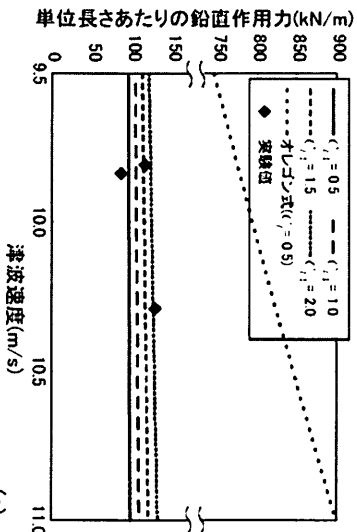
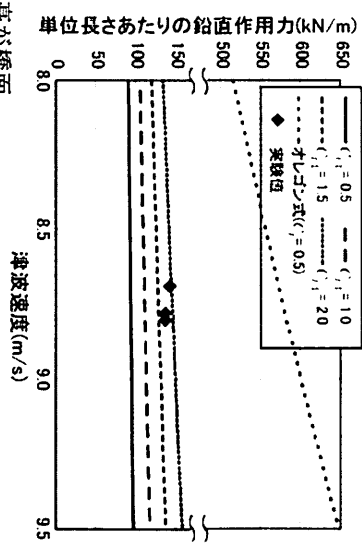
津波が橋桁中間の高さのとき、2 主桁断面では、抗力係数を 0.5 に設定すると、実験で得られた結果とほぼ一致している。また 4 主桁断面では、抗力係数を 0.5 から 1.0 にすると、実験値は計算値の範囲に入っていることがわかる。同様に、津波が橋面までの高さのとき、および津波が橋面を超える高さの



(a) 津波高が桁高中間



(b) 津波高が橋面



(c) 津波高が橋面超

図-8 鉛直方向に作用する力の試算結果 (4主桁断面, 左: 模型3/右: 模型4)

ときは, 2主桁断面では抗力係数を1.0付近, 4主桁断面では1.0から1.5の付近にすると, 実験値は計算値の範囲に入っている.

なお, オレゴン式で計算した結果は, 実験値に比べて大きな値になっている. これは, 桁間に作用する力の影響について過剰評価していることや, 静水圧を一樣に分布に作用させていることが原因であると考えられる.

b) 鉛直方向に作用する力

図-7は2主桁断面における単位長さあたりの津波による橋桁に作用する鉛直方向の力を示したものである. 先ほどと同様に式(9)で示したオレゴン式(本研究では一例として, 揚力係数は0.5, $\Delta h_{\max}$ は1.0m(津波が橋桁の中間高さ), 2.0m(津波が橋面までの高さ), 3.0m(津波が橋面を超える高さ), A_h は5.0m²(2主桁断面), 10.0m²(4主桁断面)に設定)により算出した結果も図に示した.

床版張出部が小さい2主桁断面(模型1)では, 全

体的に実験値は計算値よりも小さくなっている. また床版張出部が大きい2主桁断面(模型2)においても, 津波が橋桁の中間高の場合は, 実験値は計算値よりも小さくなっている. 原因の1つとして, 浮力(静的な力)が大きく計算されていると考えらる. 津波が橋面までの高さおよび, 津波が橋面を超える高さのときの模型2の場合, 揚力係数を0.5から1.5に設定すると, 実験値は計算値の範囲に入っている.

また, オレゴン式により計算された値は, 実験値を大幅に上回っている. この原因として, 動的な力や静的な力を模型幅全体にかつー様に作用させていることが考えられる. また動的な力に関して, 本研究で検討した式では, 動的な力は床版張出部底面にのみ作用させているのに対し, オレゴン式では, 模型幅に作用させている. そのため, オレゴン式で算出した値は実験値を大幅に上回ったと考えられる.

4主桁断面における単位長さあたりの津波による橋桁に作用する鉛直方向の力を図-8に示す. 津波

が橋面までの高さおよび、津波が橋面を超える高さのときは、一部例外があるが、揚力係数を 1.5 から 2.0 に設定すると、実験値は計算値の範囲に入っている。また、2 主桁断面の結果と同様に、オレゴン式で計算した値は、実験値を大幅に上回っている。

以上のことから、津波が橋面以上の高さの場合は、本研究で検討した津波作用力の評価式を用いることで、実験値を再現することが可能である。

5. まとめ

本研究では、桁下まで水位が上昇している状態において、橋に影響を及ぼす津波の作用状態を示すとともに、著者らが別途実施した水路実験の結果に基づいて津波により橋桁に作用する力の評価方法の検討を行った。今後、実橋における津波による被害の実態との整合性の観点から、補正係数の設定の妥当性の検証や、評価式の精査を行う必要はあるが、水路実験の結果に基づいた検討により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 被害映像より橋桁に大きな影響が生じる状態として、図-1に示す3つの状態があると考えた。
- (2) 著者らが別途行った水路実験の結果¹⁰⁾に基づき、橋桁に作用する力の評価方法を検討し、各補正係数の設定方法を提示した。
- (3) 検討した評価方法を用いて実験模型について津波により橋桁に作用する力を試算した結果、水平方向に作用する力について、津波高が橋桁の中間までのときは0.5~1.0付近、それ以上の高さの津波のときは1.0~1.5付近に抗力係数を設定することで、実験値を再現できる。
- (4) 鉛直方向の津波作用力については、一部例外はあるが、2主桁断面の場合は0.5~1.5、4主桁断面では1.5~2.0に揚力係数を設定することで実験値を評価することができる。
- (5) オレゴン式を用いて、津波による作用力を算出した結果、水平および鉛直方向ともに実験値よりも大きな評価値となることが分かった。本研究の評価条件では、桁間に作用する力の影響について過剰評価していることや、力を桁幅全体にかつー様に分布に作用させていることが原因であると考えられる。

参考文献

- 1) Li Fu, Kenji Kosa, Tatsuo Sasaki, Takashi Sato : Tsunami force on bridge comparison of two wave types by experimental test, Journal of Structural Engineering,

Vol.60A, pp.282-292, 2014.

- 2) 有川 太郎, 渡邊 政博, 窪田 幸一郎 : 津波による橋梁の安定性に関する検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, p.I_911-I_915, 2013.
- 3) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行 : 3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
- 4) 嶋原良典, 藤間功司, 庄司学 : 橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1 (地震工学論文集第30巻), pp.899-904, 2009.
- 5) 川崎祐磨, 伊津野和行, 生島直輝, 山中拓也, 四井早紀 : 津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.1, pp.129-136, 2014.
- 6) 張広鋒, 薄井稔弘, 星隈順一 : 津波による橋梁上部構造への作用力の軽減対策に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集A1 (構造・地震工学), Vol.66, No.1, pp.425-433, 2010.
- 7) 神宮司博志, 幸左賢二, 佐々木達生, 佐藤崇 : 画像及び数値解析手法を用いた気仙大橋の津波被害分析, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.271-281, 2014.
- 8) 佐々木達生, 幸左賢二, 付李, 田崎賢治 : 津波による津谷川周辺のPC桁橋梁を含む構造物の損傷分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1117-1122, 2012.
- 9) 張広鋒, 中尾尚史, 星隈順一 : 津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関する水路実験, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.97-102, 2012.
- 10) 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一 : 津波速度の違いが上部構造の挙動に与える影響に関する実験的研究, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 421-428, 2013.
- 11) 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 2011.
- 12) DEVELOPMENT OF A GUIDELINE FOR ESTIMATING FORCES ON BRIDGE SUPERSTRUCTURES, Oregon Department of Transportation, 2011.
- 13) 中尾尚史, 張広鋒, 星隈順一 : 津波により上部構造の高さまで水位が上昇した時に橋に作用する浮力に関する研究, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.151-154, 2012.