

津波によるコンクリート橋りょうの被害判定

渡辺 健* 大野 又稔* 岡本 大*

Method for Assessing Tsunami Damage to Concrete Bridges

Ken WATANABE Yuto OHNO Masaru OKAMOTO

In order to counter the impact of large scale tsunamis, and to understand the damage to railway bridges caused by tsunamis, methods were proposed for diagnosing damage and calculating the effect of fluid force acting on the bridges. In the course of this research, tsunami tests were conducted, providing insight into the fact that in the area close to concrete bridge girders, the water level rose as the flow speed fell, and that there was a difference in water levels between the upper and lower flows around the girders; and then a method was proposed for calculating fluid force acting on girders. The proposed method enables as to calculate fluid forces occurring at the bearing placed between concrete girders and bridge piers, on the basis of the information about the bridge, and the height and speed of the assumed tsunami.

キーワード：津波，流体力，水平力，コンクリート橋りょう，桁流出

1. はじめに

わが国では、津波や河川増水により、多くの橋りょうが流出被害を受けている。このような被害が発生する背景には、橋りょう位置における流体情報を予測することが困難であること、橋りょうに流体が作用した際の応答値の評価手法が確立されていないこと、橋りょうの限界状態や限界値の設定について統一した見解が示されていないことなど、流体力に対する橋りょうの照査法が確立されていないことが挙げられる。鉄道構造物の耐津波設計では、部材の損傷状態と耐荷力および修復に係る費用と時間を考慮した、安全性と復旧性の照査が求められており、想定された津波に対してコンクリート橋りょうの被害状況を事前に予測することで、復旧計画や、橋脚の補強や桁流出防止工の設置など効率的な補強計画を策定することが期待される。

ところで、東日本大震災の事例では、被害があった橋りょう位置における流体情報として、水位や流速が短時間に急激に変化する段波などと比較して、徐々に増加する準定常状態で橋りょうに作用した事例が多く報告された¹⁾。また、被害として桁や床版を含む上部工の浮遊あるいは反転による流出事例が報告されている。橋桁に働く津波の流体力については、例えば鉛直上方や水平方向の力、モーメント力に代表させて、上部工に作用する流体力を評価する手法などが提案されている²⁾。

本研究では、津波により準定常状態の流れが発生する状況において、桁に作用する流体力を算出する手法の提案を目的に実験や解析を実施した。近年、広域津波解析により、波高や流速など襲来する津波規模の予測が行わ

れている。目指す手法は、想定される津波規模（波高、流速）と橋りょうの情報を用いて、主に桁の支承や橋脚に発生する流体力を算出するものである。そして、東日本大震災において被害の多かった単線区間における鉄道コンクリート橋りょうを模擬した津波実験を行い、津波による桁流出あるいは橋脚破壊といった橋りょうの被害状況の評価を検証した。

2. 桁に作用する流体力の評価

2.1 検討対象構造の決定

津波により桁に作用する流体力は桁の形状にも依存すると考えられる。東日本大震災の津波において、桁が流出もしくは落橋した鉄道桁式橋りょうの桁形式を調査した結果、図1に示す通り、鋼上路桁（58連）および鉄筋コンクリート（RC）T形桁（22連）が多かった¹⁾。また、比較的重量の大きいプレストレストコンクリート（PC）桁も流出しており、本検討では鉄道PC橋りょうを対象とすることとした。すなわち、断面形状および防音壁の有無を考慮して、図2に示す、下路桁（T1）、桁高の高いT形桁（T2：防音壁有、T3：防音壁なし）、桁高の低いT形桁（T4：防音壁有、T5：防音壁なし）、箱桁（T6：防音壁有、T7：防音壁なし）の7種類の桁形状を検討対象とすることとした。

2.2 準定常状態の流れによる作用力計測実験

図3、図4に、フルード則に従い実機の1/30スケールで実施した、波高や流速を定常状態とした実験の水路および状況を示す。なお、本論文では流体情報や計測値については、注釈が無い限り実機換算で表すこととする。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

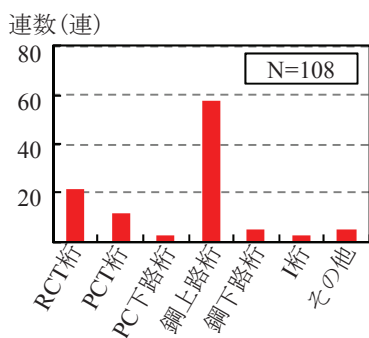


図1 流出した橋りょうの形式¹⁾

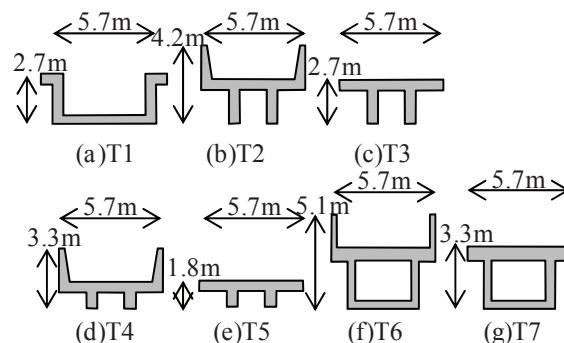


図2 検討対象とした桁形状（模型は 1/30）

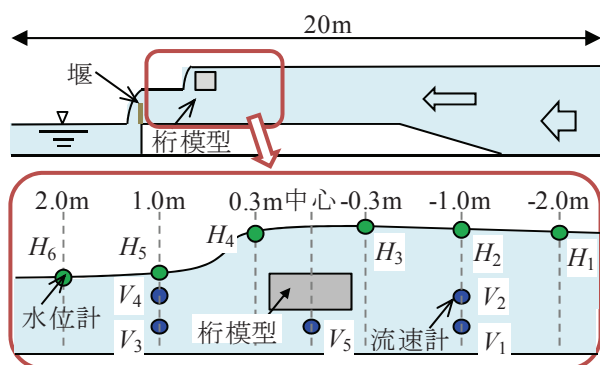


図3 実験水路および計測器設置位置

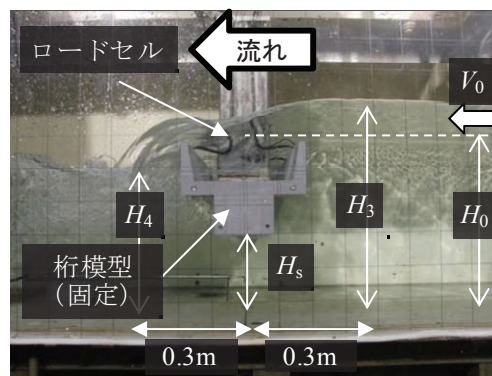


図4 実験状況

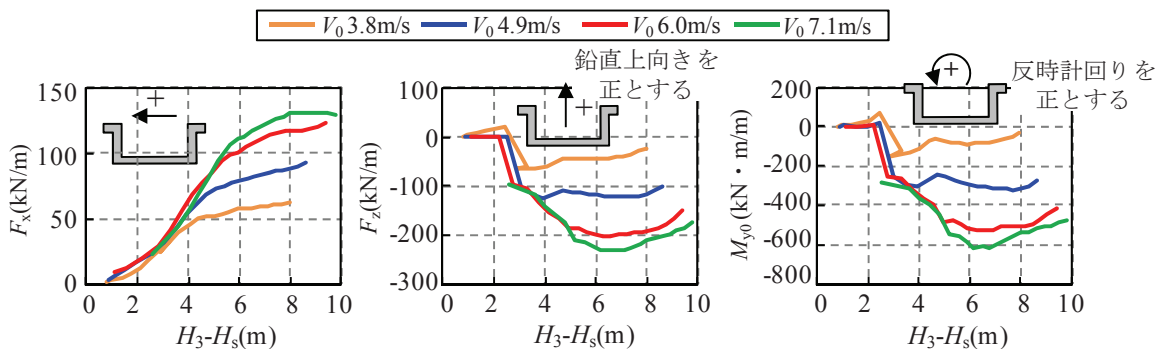


図5 流速ごとの没水深 (H_3-H_s) と流体力の関係 (T1-H₀9.0) (実機換算)

幅 0.5m、長さ 20m（実機換算：幅 15m、長さ 600m）の実験水路において、桁模型を設置していない状態で、桁模型の設置位置における水位が 400, 300, 200mm（実機換算：12.0, 9.0, 6.0m）、流速が 0.7, 0.9, 1.1, 1.3m/s（実機換算：3.8, 4.9, 6.0, 7.1m/s）となる流れを設定した。この桁模型を設置する前の水位および流速を、初期水深 H_0 および初期流速 V_0 とする。ここに、図 2 に示す形状の桁模型を、水路底面から桁模型底面までの高さ（桁下空頭 H_s ）を管理して設置した。なお、以下で記述する実験ケースの名称には、桁模型形式－初期流速－初期水深－桁下空頭を反映した。

桁模型は塩化ビニル製で、ロードセルを介して治具に固定し、水平・鉛直・回転方向の作用力を計測した。図 3 に、水位計および流速計の設置位置を示す。さらに、高速度カメラを用いて流れ場を撮影し、粒子画像流速測定法（PIV：Particle Image Velocimetry）を用いて、

10mm 間隔で流速および方向を算出した。PIV の測定値としては、1 秒間の計測結果の平均値を用いた。

図 5 に、T1 の $H_0=9.0\text{m}$ を例に、没水深の増加に伴う水平力 F_x 、鉛直上向き力 F_z 、桁下流側下端を中心とした橋軸まわりモーメント M_{y0} の変化を、 V_0 ごとに区別して示す。 F_x は、没水深の増加に伴い増加し、その増加量は没水深の増加に伴い徐々に鈍化する傾向にあり、また V_0 が大きくなるほど大きくなる傾向にあった。 F_z は、桁模型が水没する前では上向きの力が作用し、水没直前で最大値を示した。桁模型が水没すると、防音壁間に流れが滞留することで上向きの力が急激に減少し、さらに H_s が減少すると徐々に上向きの力が増加する傾向が観察された。 M_{y0} は、 F_z に類似した傾向にあり、没水深の増加に伴い時計回りのモーメントが増加した。その傾向から、 M_{y0} は鉛直方向の力により変動していることが分かる。

図 6 に、T2 の $V_0=3.8, 7.1\text{m/s}$ を対象に、PIV により、

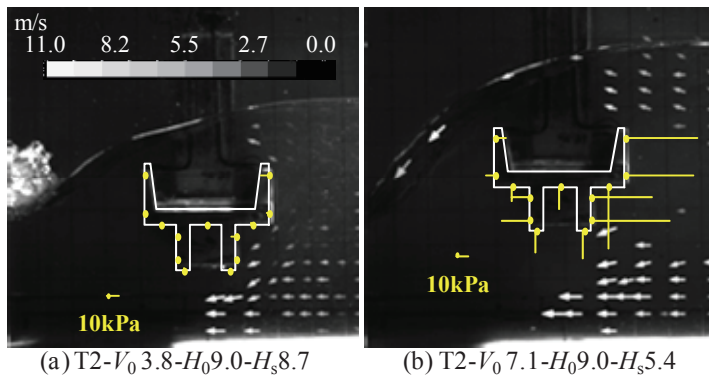


図6 PIVによる流れ場の可視化と圧力計測結果（圧力は試験体外向きを正）

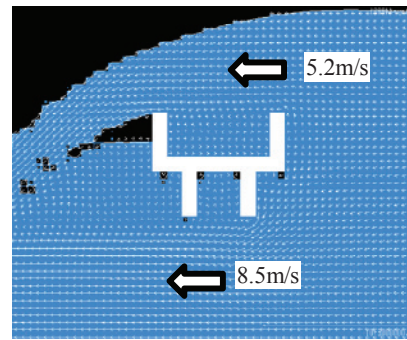


図7 数値波動水槽によるT2桁まわりの流速分布の評価 ($H_0=6.9m$, $V_0=9.3m/s$, $H_s=5.0m$)

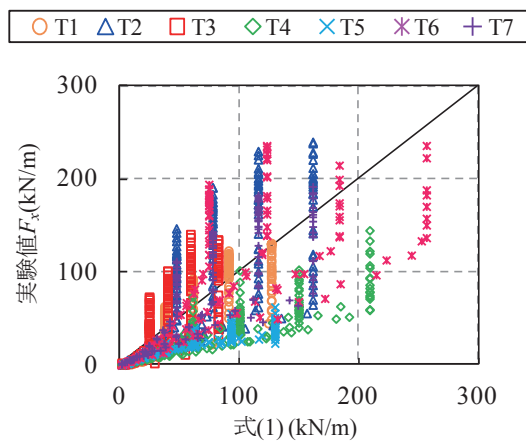


図8 流体力 (F_x) の実験値と計算値 (式(1)) の比較

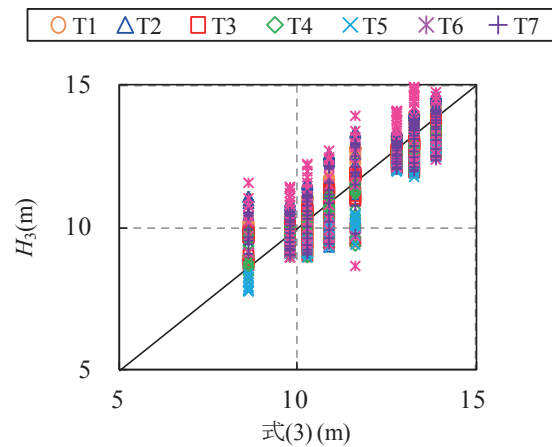


図9 水位の推定

桁模型周辺に発生した流れの流速、方向を算出した結果を、計測された圧力と併せて示す。画像は、桁模型が完全に水没し下流に発生する跳水位置が不変となった H_s における結果を用いている。水面形状の特徴として、いずれも、上流から下流にかけて水位が連続的に低下すること、および防音壁の高さ中央を境に流れが上下に分かれ、桁模型下部に速度の大きい流れが発生していることがわかる。なお、模型スケールでの桁模型周りの流速については、三次元数値波動水槽 CADMAS-SURF3D³⁾ を用いても算出した。図7に、 V_0 に依存した桁模型まわりの流速分布を示す⁴⁾。抽出点で算出した流速の平均値は、桁模型上部に対して下部の流速が増加する点やその増加割合が V_0 の増加に伴い増加した点について、実験と同様の結果が得られている。すなわち、この流速比が減少（流速差が増加）することで、下部の圧力が相対的に小さくなり、下向きの力が大きくなったと考えられる。

2.3 準定常状態の流れにおける流体力算定法

2.3.1 水平力

河川橋脚などに作用する流体力を評価する手法として、式(1)が用いられている。この場合、抗力係数 C_d は式(2)で求められる²⁾。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A_h \quad (1)$$

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 ρ_w :水の密度 (=1000kg/m³)、 v :水の流速 (m/s)、 A_h :有効鉛直投影面積 (m²)、 g :重力加速度 (=9.8m/s²)、 B :桁の総幅、 D :桁の総高 (=桁高+防音壁高)、である。

図8に、2.2節の実験より得られた、桁に作用する流体力 F_x の計測値と式(1)、式(2)による計算値の比較を示す。ただし、 A_h は没水部の面積としている。式(1)、式(2)では、実験値を十分な精度で再現できているとは言えず、他の要因の影響を検討する必要があることが分かる。

図4、図6に示した通り、桁模型が着水後、桁模型付近の上流側において水位が上昇するが、桁模型直前では流れが滞留し、流速がゼロに近くなることが観察されている。よって、ベルヌーイのエネルギー保存則を用いて、 H_0 に対して損失した速度水頭分水位 ($=V_0^2/2g$) が上昇したと仮定すると式(3)を得る。

$$H_3 = H_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (3)$$

図9に、桁形式ごとの H_3 の計測値と算定値の比較を示す。いずれに対しても、式(3)による算定値は計測値の傾向を概ね捉えている。

次に、水平力 F_x について検討する。準定常状態の流れ実験では、桁模型の着水後、桁模型前後で水位の大きな変化が認められた。すなわち、桁模型周辺で渦運動が発生し、運動エネルギーの急激な逸散を伴う状態であることが推察される。そこで、エネルギー保存則であるベルヌーイの定理ではなく、運動量保存則によりこの事象を扱うこととした。水圧が静水圧分布となる桁模型前後の断面において、運動量保存則に基づくと式(4)、式(5)が成り立つ⁵⁾。

$$\frac{D_x}{\rho_w g} = \left(\frac{h_1^2}{2} + \frac{q^2}{gh_1} \right) - \left(\frac{h_2^2}{2} + \frac{q^2}{gh_2} \right) \quad (4)$$

$$D_x = [D_x]_1 + [D_x]_2 + [D_x]_3 \quad (5)$$

ただし、 D_x ：流体抵抗力、 h_1 ：上流側水位、 q ：流量、 h_2 ：下流側水位、 $[D_x]_1$ ：桁の流体抵抗力、 $[D_x]_2$ ：桁に固定した治具の流体抵抗力、 $[D_x]_3$ ：区間内に設置した流

速計や壁面などの流体抵抗力、である。なお、 $[D_x]_3$ は流速計のみを設置した実験水路において、計測した H_1 、 H_6 を用いて算出したが、 $[D_x]_2$ は計測できていない。

図10に、桁形式ごとの計測された F_x と式(4)、式(5)を用いて算出した $[D_x]_1 + [D_x]_2 + [D_x]_3$ および $[D_x]_1 + [D_x]_2 (=D_x - [D_x]_3)$ を示す。 F_x に対して $[D_x]_1 + [D_x]_2$ がやや大きい傾向にあり、 $[D_x]_2$ を適切に除去できていないことが推察されるが、桁形式、 H_0 および V_0 に依存せず両者に線形関係がみられたことから、式(4)を用いて F_x を評価可能であると考えられる。そこで、式(4)において、 D_x ：計測した F_x 、 h_1 ：桁模型中心より上流側200mmで計測した水位 H_1 、 h_2 ：桁模型中心より下流側200mmで計測した水位 H_6 、として、縮脈係数 $C_c (=h_2/h_1)$ を算出した。

図11に、算出した C_c と没水深($=H_3 - H_s$)の関係を示す。没水深の増加に伴い C_c は減少するが、十分に没水後概ね一定値を示すこと、 H_0 および V_0 ごとにその傾向が異なることが分かった。ところで、この C_c は流れに対する障害物の形状や流速、流量に依存するが、実験的に評価されていることが多く²⁾、本論文でも C_c を、実験定数を用いて式(6)で表現することとした。

$$C_c = \frac{1 - \alpha}{\beta(H_3 - H_s)^4 + 1} + \alpha \quad (6)$$

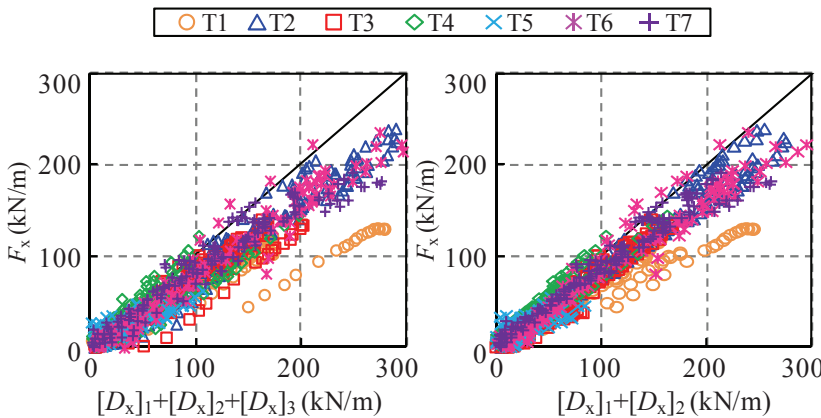


図10 F_x と式(4)(5)による算定値の比較

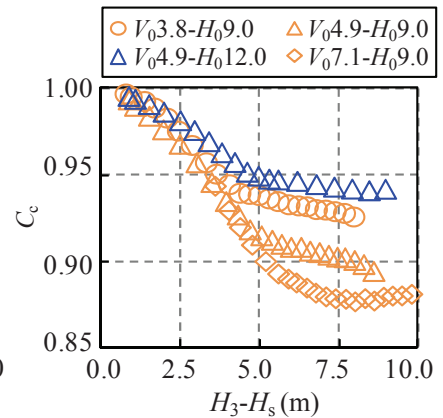


図11 縮脈係数 C_c

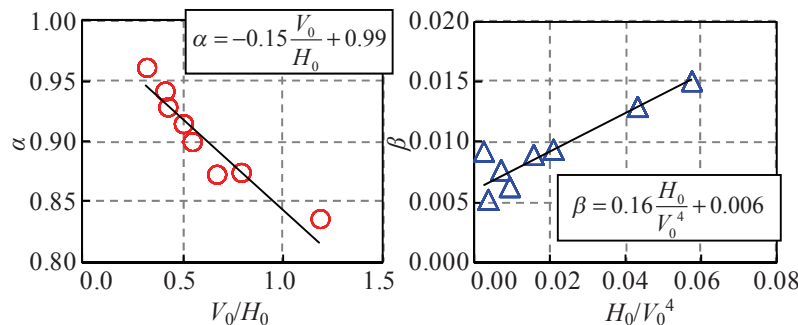


図12 実験定数の傾向

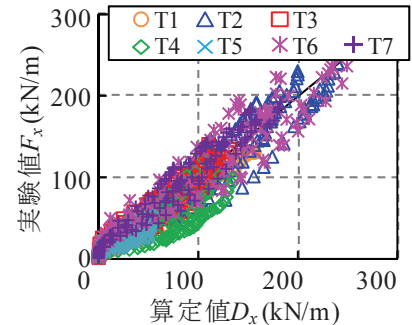


図13 F_x と算定値の比較

ただし、 C_c ：縮脈係数、 a, β ：実験定数、 H_3 ：上流側水位、 H_s ：桁下空頭である。この定数 a, β は式 (7)、式 (8) で表され、図 12 に示すように推移する。

$$\alpha = a \frac{V_0}{H_0} + b \quad (7)$$

$$\beta = c \frac{H_0}{V_0^4} + d \quad (8)$$

ただし、 V_0, H_0 ：桁を設置していない状態での桁位置における流速および水位、 a, b, c, d ：実験定数、である。この実験定数は、桁の断面形状に依存して変化するため、これを統一的に表すために、ここでは桁高 + 防音壁高 (H_k) を用いて整理することで式 (9)、式 (10) を得た。

$$\alpha = \frac{1-0.71}{0.23 \times \left(V_0 \times \frac{H_k}{H_0} \right)^2 + 1} + 0.71 \quad (9)$$

$$\beta = \left(\frac{0.07 H_0}{H_k} + 0.10 \right)^4 \quad (10)$$

図 13 に、式 (4)、(6)、(9)、(10) による算定値 (D_x) と実験で計測された F_x の比較を示す。 H_0 が小さく V_0 が大きいケースにおいて、やや算定値と実験値にかい離が見られる。これは、 H_1 断面における圧力分布を静水圧状態と仮定した点に実際と異なった可能性がある。このようなケースについては、さらに検討を進める余地があるが、図 8 の結果と比較しても式 (4)、(6)、(9)、(10) による算定値は概ね実験値の傾向を捉えていることを確認した。

2.3.2 鉛直力

鉛直力には、浮力や桁周辺の流速の影響が考えられる。図 6 に示した通り、桁周辺の流速の影響については、鉛直下向きの作用力として確認されており、桁が流出しにくい方向に発生することが推察される。この影響については、今後さらに検討を行う必要があるが、ここでは、式 (11) により、水面が防音壁上面以下 ($H_3 < H_s + H_k$) である場合には、桁 + 防音壁の体積 V_k のほか、桁間および防音壁間の体積 V_a を考慮すること、一方、水面が防音壁上面以上 ($H_3 \geq H_s + H_k$) では、 V_k のみを考慮することとして浮力を算定し、これを鉛直力とした。

$$U = \begin{cases} \rho(V_k + V_a) & H_3 < H_s + H_k \\ \rho V_k & H_3 \geq H_s + H_k \end{cases} \quad (11)$$

3. 桁流出実験

3.1 実験概要

図 14 に縮小橋りょう模型を示す。水路内には、3 径間の橋りょう模型（模型縮尺 1/40）を設置し、中央径間を試験対象とした。なお、両側の径間は、中央径間に先行して流出することを防止するためにワイヤーで固定した。

実験に使用した橋脚模型の柱部は、円錐台形状とした。実験対象とする橋脚高さは、10m と 5m（実機換算）の 2 種類とし、橋脚試験体は、アクリルにより製作した（図 14）。桁模型は、防音壁の有無を含めた 3 タイプ（T1, T4, T5）とした（図 2）。桁長は 30m（実機換算寸法）である。桁模型は、実機スケールに換算した桁の総重量が、実物と同程度になるように、超高強度繊維補強コンクリートで製作した。ただし、PCT 桁の防音壁のみ、薄板のアルミ製とした。

実験対象とする支承形式は、ゴム支承（S1）、鋼製支承（S2）とした。なお支承 S1 には、 $t=2.0\text{mm}$ の天然ゴム（摩擦係数 0.5）を使用し、支承 S2 には、 $t=1.0\text{mm}$ のアルミ板（摩擦係数 0.25）を用いた。

実験は、橋脚試験体および橋桁試験体を設置後、初期水深の状態から徐々に流量を増加させ、橋桁試験体が移動した段階で実験を終了した。なお、実験装置の最大流量を流しても移動しない場合は、その段階で実験終了とした。実験ケースは、支承 S1, S2 を配置した橋りょうに対して下流側に設置した堰の高さを変化させた 2 種類（H, L）とした。

3.2 限界値の推定法と流体力算定法の検証

桁流出実験を対象に、支承 S1, S2 の摩擦抵抗力と予測式を用いて算定した水平作用力を比較することで限界値の推定法と流体力算定法の検証を行った。図 15 に、ここで考慮した桁に作用する流体力および桁流出への抵抗力を示す。桁に作用する水平力 (D_x) は、式 (4)(6)(9)(10) により算出した。一方、桁流出の抵抗力 (R_x) は、支承による水平方向の摩擦抵抗力として式 (12) で算出した。

$$R_x = \mu \times (W - U) \quad (12)$$

ただし、 μ ：摩擦係数、 W ：桁重量、 U ：浮力、である。なお、 μ は、使用材料を考慮して S1:0.5, S2:0.25 である。また、浮力は、式 (11) に従い算出した。

図 16 に、桁に対する作用力 (D_x) と抵抗力 (R_x) の比を示す。凡例は、流出：桁が橋脚上より下流に流出した事例、ずれ：桁がずれることで隣り合う桁に支えられることで流出を免れた事例、および未流失：桁の移動がほぼ見られなかった事例、である。作用力 (D_x) は、式 (4)(6)(9)(10) および桁の流出時の水位 H_0 および流速 V_0

特集：構造物技術

を用いて算出したが、未流失と判定されたケースでは、実験で作用された D_x の最大値を用いた。一方、抵抗力 (R_x) は式 (12) で算出している。図 16 をみると、流出と判定されたケースでは概ね流出の判定基準となる $D_x/R_x = 1.0$ を示した。一方で、いくつかのケースでは D_x/R_x が 1.0 に対して大きくかい離している。これは、桁に対する鉛直方向の作用力の影響を浮力のみを考慮して検討したが、さらに流速の影響等を考慮に入れる必要があることを示唆しているものと考えられる。また、本検討では、桁の流出に対する抵抗力として摩擦力を考慮したが、流体力の作用により桁が移動しつつも隣接する桁により抵抗力が増したケースなど、流出に対する抵抗機構として様々な事例があった。

本論文では、これまでにあまり検討がなされていなかった、桁に作用する津波による流体力の評価法について主に検討を進めた。さらに橋りょう被害の判定精度を向上するためには、桁に対する鉛直方向の作用力の影響や、隣接する桁の影響など、流出に対する抵抗力の評価について検討する必要があると考えられる。

4. おわりに

津波により準定常状態の流れが作用する状況を対象に、桁・橋脚・支承部形式の異なる鉄道コンクリート橋りょうの流出について、縮小模型を用いた流体作用実験を行った。その結果、桁近傍で流速が小さくなり水位が上昇すること、桁の上流側と下流側に水位差が発生することを、津波実験や津波解析により把握した。そして、桁に作用する流体力をベルヌーイのエネルギー保存則等を活用することにより算出する手法を提案した。これは、想定された津波規模（波高，流速）と橋りょうの情報をを用いて、主に桁の支承や橋脚に発生する流体力を算出するものである。

また、鉄道コンクリート橋りょうを模擬した津波実験を行い、落橋防止装置や支承の抵抗力を考慮することで、これを橋りょうの抵抗力とし、提案した流体力の予測値と比較することで、桁流出あるいは橋脚破壊といった橋りょうの被害状況と、その際の津波情報（波高，流速）を概ね判定できることを確認した。一方で、さらに橋りょう被害の判定精度を向上するためには、桁に対する鉛直方向の作用力の影響や、隣接する桁の影響など、流出に対する抵抗力の評価について検討する必要があることがわかった。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

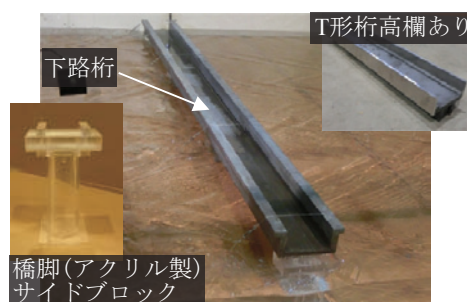


図 14 縮小橋りょう模型

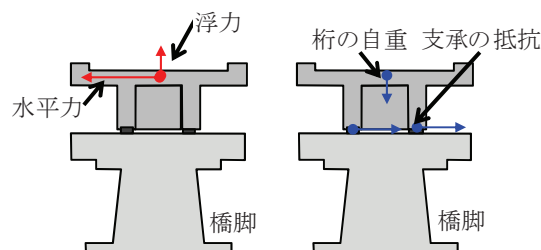


図 15 桁に作用する流体力および桁流出への抵抗力

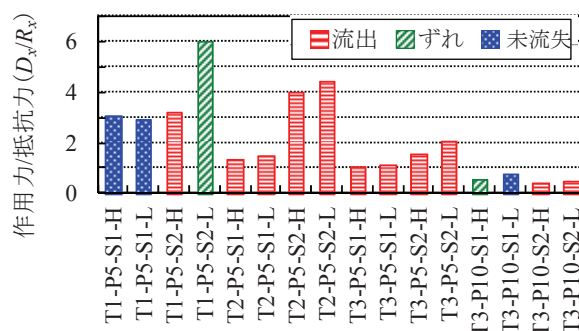


図 16 算定結果（桁流出実験，P5P10 は実機換算の橋脚高さ (m) を示す）

文 献

- 1) (公社) 土木学会：津波による橋梁構造物に及ぼす波力の評価に関する調査研究委員会報告書，コンクリートライブラリー 140，2013
- 2) (公社) 土木学会：地震工学委員会東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書，2015.8
- 3) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，沿岸技術ライブラリー No.39，H22
- 4) 渡辺 健，河村佳英，大野又稔，岡本 大，織田幸伸：一様流作用下におけるコンクリート鉄道橋りょうに働く流体力に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.2，I_856-I_860，2014
- 5) 日野幹夫：明解水理学，丸善，1983