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

Study of Fluid Force Generated at Railway Concrete Bridges Subjected to Uniform Flow

渡辺 健¹・河村佳英²・大野又稔³・織田幸伸⁴

Ken WATANABE, Yoshihide KAWAMURA, Yuto OHNO and Yukinobu ODA

Some bridges have been failed by Tsunami and river flood in Japan. One of the reasons of the damage was the lack of useful method for evaluating the action of the bridges subjected to the water flow. This means that there was no verification of the bridges caused by Tsunami. The authors have conducted experiments and numerical analysis in order to understand the effect of bridge properties: the cross-section shape of beam, velocity of water, height under the beam, and the existing of gird wall, on the force applied to the beam by water flow. This paper focused on the railway bridges having large depth of beam compared with the road bridges, and uniformed flow of water.

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（流向、水深、流速など）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十分には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あげられる。

東日本大震災において被害があった橋りょう位置における流体情報（方向、波高、流速など）には、段波などと比較して水位や流速が徐々に増加して橋りょうに作用した事例が、佐々木ら（2013）などにおいて報告されている。また、被害として桁や床板を含む上部工の浮遊あるいは反転により流出した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、例えば幸左ら（2010）が、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を提案している。一様流における検討では、形状係数や浮力を考慮した簡易法の適用が報告されているが、様々な断面形式が供用されている橋りょう構造物における簡易法の適用範囲については、不明な点が多い。

本研究は、橋りょうに流体が作用した際の応答を評価するため、桁の断面形状、流速、桁下空頭、防音壁の有

無が、桁周辺に発生する流速分布や圧力分布に及ぼす影響を確認し、これらの桁に作用する流体力との関連について評価することを目的としている。特に、同一のスパンであっても道路橋と比較して桁高が大きい鉄道橋りょうに焦点を絞り、準定常状態の流速が働く状況を対象に検討する。

2. 実験概要

(1) 鉄道橋りょうの諸元調査と検討対象

東日本大震災において桁が流出した鉄道橋りょうの調査では、海岸より数百メートルの位置にある、比較的重量の大きいプレストレストコンクリート（PC）桁が流出していることが報告されている（土木学会編，2013）。

供用されている鉄道PC橋りょうについて、断面形状

図-1 鉄道橋りょうの桁高とスパンの傾向
(括弧内の数字は桁高スパン比を示す)

図-2 2次元造波水槽と水位計、流速計の配置

1 正会員	博(学)	(公財)鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部
2 正会員	修(工)	(公財)鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部
3 正会員	修(工)	(公財)鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部
4 正会員	修(工)	大成建設(株) 技術センター
土木技術研究所

(T形桁、下路桁、箱桁) ごとに、流体の作用面積に関連するスパンと桁高について傾向を把握した結果、例えばT形桁では、はりの桁高スパン比が $1/10 \sim 1/12$ 程度の橋りょうが多く存在することが分かった(図-1(a))。そこで検討では、断面形状および防音壁の有無を考慮して、下路桁(T1)、T形桁(T2: 防音壁有、T3: 防音壁なし)、箱桁(T6: 防音壁有、T7: 防音壁なし)の5種類の試験体を製作し、代表的な桁高スパン比を考慮した。図-1(b)に試験体の諸元を示す。なお、試験体の縮尺は $1/30$ とし、実験諸元はフルードの相似則に従い設定した。対象とする現象の最小流速を $V=1.0$ m/sとすると、水の動粘性係数 $\nu=1.14$ mm²/s (15℃)、桁高の最小値 $D=2.0$ mから算出されるレイノルズ数 Re は、 $Re=1.75 \times 10^5$ (実機)、 1.07×10^4 (縮尺模型)である。いずれも $Re \geq 1.0 \times 10^4$ となり、乱流状態と考えられることから、水の粘性の影響は無視できると判断される。

(2) 実験水槽

図-2に、実験に用いた実験水槽を示す。水槽の幅は800mmであるが、大きな流速を得るために幅500mmとなるように仕切りを設けた。なお、試験体の幅は500mmである。水槽内には高さ400mmの架台を設置し、上流側に $1/25$ の斜面を設置した。また、水深を変更するため、架台の下流端に高さの調整可能な越流堰を設けた。実験に先立ち、試験体を設置しない状態で水位と流速を計測して流量調整を行った。実験条件の水深と流速から流量を算定し、その流量を流した状態で桁試験体の設置位置での水深が、設定値となるように下流側の堰高を調整した。

(3) 定常流実験および計測項目

試験体は、水路底面から試験体底面までの高さ(桁下空頭 h_s)を管理して設置した。 h_s は50~250mmの間で10mmごとに設定した。桁の設置角度は、流れに対し90°を基本とした。初期水深 H は400, 300, 200mm(実機換算: 12.0m, 9.0m, 6.0m)の3種類とし、初期流速 V は0.7m/s~1.83m/s(実機換算: 3.8m/s~10.0m/s)の範囲で変化させた。なお、初期水深および初期速度は、試験体を設置する前の水深を示している。試験ケースの名称には、試験体-初期流速-初期水深-桁下空頭を反映している。

図-3に、実験状況を示す。試験体は塩化ビニル製で、分力計を介して治具に固定し、水平方向、鉛直方向および回転方向に作用する分力を計測した。治具は、抵抗を小さくするため、流れ方向に向けた縦板2枚で接続する形状である。計測のサンプリング周波数は10Hzとし、2分間計測の平均値を採用した。また、試験体の底面および側面には圧力計($\phi 10$ mm)を設置し、作用する圧力を計測した。

図-2に、水位および流速の計測地点を示す。容量式水位計で水位を計測し、試験体中心より上流・下流側に

図-3 実験状況

表-1 解析ケース(T2)

No.	ケース	初期流速 V (m/s)	初期水深 (mm)	桁下空頭 (mm)
1	T2V07H30	0.7	300	50~250
2	T2V13H30	1.3	300	50~250

図-4 流速分布(目標流速0.9m/s, 実機: 4.9m/s)

0.3m, 1.0m, 2.0m離れた地点の計6点で計測した。流速は、電磁流速計を試験体より前後に1.0mの地点で、底面より50mmおよび初期水面より20mm下の2点、および試験体の中心下部の計5点で計測した。また、高速度カメラ(500枚/秒)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。検討には、1秒間の計測結果の平均値を用いた。

(4) 3次元数値波動水槽による解析の検証

3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF3D)((財)沿岸技術研究センター編, 2010)を用いて、実験水槽および3種類の試験体を2次元でモデル化した。そして、表-1に示す初期流速 V および桁下空頭 h_s ごとに、水位、流速、圧力を算出した。計算位置は桁模型周りで10mm間隔とし、定常状態の10秒間の平均値を検討に用いた。

3. 実験結果

(1) 流況確認結果

図-4に、試験体を設置しない状態で、流速の鉛直分布を計測した結果を示す。底面の摩擦により流速がやや減少したが、概ね鉛直方向に一樣であることを確認した。なお、水深が200mmでは、流速が大きく水面付近で電磁流速計背後の剥離の影響が大きく計測できなかったため、底面から100mm(実機換算: 3.0m)まで計測した。

図-5 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)

*()内は実機スケールの h_s 図-6 実スケールに換算した流速ごとの h_s と流体力の関係(T2, $H=0.3$ m)

*()内は試験時のスケール

(2) 流体力に関する初期流速および桁下空頭の影響

図-5に、T形断面、箱形断面の初期流速 $V=0.7\text{m/s}$, 1.3m/s を対象に、高速度カメラによる画像を用いたPIVにより、試験体周辺に発生した流れの流速、方向を算出した結果を示す。画像は、試験体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。実験では、シート光を試験体の上流(図中の右側)上方に設置しており、試験体の陰になる領域ではPIVによる測定ができていないが、流れが試験体の上下を迂回する状況や、試験体上下部で流域高さの縮減による流速の増加が、定量的に把握できる。また、図中には計測された圧力を併せて示す。なお、T形断面(T2)では、防音壁内側に圧力計を設置しておらず計測できていない。いずれの断面形状も、防音壁の高さ中央を境に流れが上下に2分されており、試験体下部に速度の大きい流れが発生していることがわかる。特に、箱形断面の $V=1.3\text{m/s}$ では、試験体の下部で流れがはく離しており、その結果、試験体下面に発生する上向きの圧力は小さい。

図-6に、初期水深300mmの防音壁を有するT形桁(T2)を例に、 h_s の増加に伴う分力(水平力 F_x 、鉛直上向き力 F_z 、橋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、初期流速 V ごとに区別して示す。

F_x は、流速が大きくなるほど大きくなり、図-5において V が増加するほど試験体の上流側と下流側の側面に作用する圧力差が大きくなったことと一致する。また、桁

の設置位置が底面に接近するほど(h_s が減少するほど)増加していることが分かる。

F_z は、没水深が小さい(h_s が大きい)と、底面の圧力による上向きの力が作用する。特に、試験体が水没する直前では、ウェブに衝突した水流が張出し部分に作用することによる上向きの力が加算され、 F_z は最大値を示す。ただし、試験体下部の剥離部分には圧力が生じないため没水深による浮力よりは小さく、この傾向は流速が大きいくほど顕著である。試験体が水没すると、防音壁間に滞留することで F_z は急激に減少する。また、桁の上部よりも下部の流速の方が大きいため、下部の圧力が相対的に小さくなり下向き(負)の力が大きくなる。さらに h_s が減少すると F_z は徐々に増加(負の力が減少)する傾向が観察された。PIVの結果によると、初期流速 $V=0.7\text{m/s}$, 1.3m/s でT2の下部に対する上部の流速比は0.65, 0.69となり、この流速比が増加(流速差が減少)することで下向きの力が緩和されたと考えられる。

M_{y0} は、 h_s の減少とともに概ね単調に増加しており、 F_x の影響により正方向のモーメントが生じることで、値が増加している。ただしその変化の特徴は F_z に類似していることから、鉛直方向の力により M_{y0} が変動していることが分かる。同一の h_s で比較すると、 F_x に見られるような V の増加に伴う力の増加の傾向は、 M_{y0} には見られず、 V による顕著な差は見られない。これは、 V が小さくなると F_x による正のモーメントは小さくなるが、 F_z による負

図-7 3次元数値波動水槽の測定点

図-8 水位の比較

図-9 流速の比較

図-10 圧力の比較

(a) T2V07H30-hs18 (V=0.7m/s)

(b) T2V13H30-hs15 (V=1.3m/s)

図-11 数値波動水槽によるVに依存した試験体まわりの流速分布の評価(T2)

図-12 実スケールに換算した桁形式ごとの h_s と流体力の関係(V=0.7m/s, H=0.3m)

*()内は試験時のスケール

のモーメントも小さくなるためと考えられる。

(3) 3次元数値波動水槽による実験結果の再現性の確認

試験体に作用する流体力は、発生する圧力の積分値として算出されるが、この圧力は流れ場に関連している。今後の数値解析による流体力の解析を念頭に、3次元数値波動水槽による流速分布および圧力分布の算出結果について、実験で水位計およびPIVを用いて計測した結果と比較することで検証した。図-7に、3次元数値波動水槽の測定点を示す。

図-8に、実験で計測した位置における水位を比較した。V=0.7m/sでは、水理実験と数値解析の結果が概ね一致したが、V=1.3m/sでは、下流側の水位の実験結果に対して

解析結果がやや大きい値を示した。図-9に流速について、PIVにより計測した実験値および3次元数値波動水槽を用いた算出値を比較した。なお、流速抽出位置は図-7に示すとおりである。流速の水平成分 V_x および垂直成分 V_z に区別して比較した結果、V=1.3m/sでは(T2V13H30-hs18)試験体の下流側で計測した V_x および V_z について実験と解析結果の大小関係が異なっており、流れの方向にやや差があることが示唆されたが、数値解析の流速の増加に伴い水理実験の流速が増加していることから、PIVと解析結果は部位に依存して大きく異なる流速を概ね再現できていると考える。また、図-10に、実験の圧力計設置位置における圧力を比較した。3次元数値波動水槽は、試験体周

図-13 没水高 h_d' と抗力係数 C_D の関係(図中の数値は実機スケールに換算)

辺の圧力の変化を概ね再現できていることを確認した。

こうして検証した3次元数値波動水槽を用いて算出した、 V に依存した試験体まわりの流速分布を図-11に示す。試験体前面の抽出点(間隔:50mm)で算出した流速の平均値は、同一の V および H であるPIVの結果(図-5(a)(b))と比較して絶対値にやや差異があるものの、試験体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 の増加に伴い増加した点について、実験と同様の結果を得た。

(4) 流体力に関する桁形式の影響

図-12に、 $V=0.7\text{m/s}$ 、 $H=300\text{mm}$ における構造形式に依存した流体力を比較して示す。いずれの試験体も、 h_s が減少するほど F_x が大きくなる傾向は、T形断面(T2)の結果と同様である。また、試験体が没水する条件では、防音壁を含む桁高が大きい程、 F_x が大きい。一方、 F_z には断面形式の効果が大きく表れている。下路桁や防音壁を有する試験体では、没水時に F_z が急激に低下するのに対し、壁無の試験体では常に正(上向き)の力が働いている。壁無の場合、桁上部の流れが床板に沿うように流れ、流速の低下が小さく下部との流速差が小さいため、下向きの力が低減されたと考えられる。一方、 h_s の減少に伴う左肩上がり傾向については、すべてのケースで一致した傾向を示した。また、 M_{y0} の変化は F_z に類似しているが、下路断面のみ他のケースとは異なった傾向を示している。これは、モーメントの算出点が F_x の作用点に近く、 F_z の作用点から遠いために、 F_z の影響が他のケースよりも大きく出ると考えられる。

(5) 水平力に関する抗力係数

抗力係数を、式(1)により算出した。

$$C_D = \frac{2F}{\rho_0 \cdot A \cdot V^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 C_D : 抗力係数、 F : 抗力、 ρ_0 : 水の密度、 A : 流れ方向の物体の投影面積であり、 V は初期流速ではなく試験中に流速計により計測した接近流速を用いている。

図-13に、試験体の没水高 $h_d' (=h_2 - h_s)$ と C_D の関係を示す。ここで、 h_2 は上流側の水深を示す。いずれも h_d' がある程度大きくなると、傾きが小さくなる傾向があった。試験体が完全に没水する前は、 h_d' の増加にともない抗力係数は増加したが、これは h_d' が小さい場合、桁の下部に回り込む下向き流れが卓越し、桁に作用する水平流速が小さいためと考えられる。一方で、試験体が完全に水没した後も、投影面積が変化しないに関わらず抗力係数が増加した。また、初期流速 V が小さく、流量が小さい程、抗力係数は大きくなっている。これらのことは、水深に対して桁高が比較的大きい本実験では、抗力係数が唯一に定まらず、流量や初期水深と没水高の比の影響により抗力が定まることを示唆している。

4. まとめ

橋桁を対象とした定常流実験により、橋桁の形状や没水深、流量による、橋桁に働く流体力特性を明らかにした。実験結果から、本実験で対象とした水深に対し桁高が比較的大きい条件の場合、抗力係数による流体力の評価は出来ないこと、防音壁の有無により鉛直方向の力の特性が大きく異なることなどが示された。

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。

参 考 文 献

- 幸左賢二・宮島昌克・藤間功司・庄司 学・小野祐輔・重枝未玲・廣岡明彦・木村吉郎 (2010): 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, 新道路技術会議。
- (財) 沿岸技術研究センター編 (2010): 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。
- 佐々木達生・幸左賢二・神宮司博志・佐藤 崇 (2013): 東北地方太平洋沖地震による小泉地区の津波被害分析, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, I_821-I_825。
- 土木学会編 (2013): 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。