一様流作用下におけるPC桁の流出の限界値評価に関する実験的検討

渡辺 健¹・大野 又稔²・織田 幸伸³

¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: watanabe.ken.08@rtri.or.jp

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: ono.yuto.47@rtri.or.jp

³大成建設(株) 技術センター土木技術研究所
E-mail: od-ykn00@pub.taisei.co.jp

本研究は、津波による桁流出に対する橋りょうの抵抗力を把握することを目的とする。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、縮小橋りょう模型を用いた流体作用実験を行った。その結果、一様流による桁流出に対する抵抗力は、断面形状および支承形式に依存することを明らかとし、また従来使用されている移動制限装置の有効性を確認した。桁流出時に作用した流体力（水平方向 F_x 、鉛直方向 F_z 、回転方向 M_{y0} ）と、支承の摩擦力、ストッパーのせん断力により算出される抵抗力を比較すると、流体力の（ F_x 、 F_z 、 M_{y0} ）いずれかが抵抗力を上回っており、流出状況とも一致することが確認され、桁の流出判定が可能であることが示された。

key words : tsunami, bridge, fluid force, pc girder, uniform flow, quasi-steady flow

1. はじめに

東日本大震災では、沿岸部の鉄道橋りょうが多数流失し甚大な被害を受けた。また、近い将来に発生が懸念されている東海・東南海・南海地震によって、東海、近畿および四国などの沿岸部の鉄道が大きな被害を受けることが想定される。このような沿岸部に位置する構造物は、旧基準で設計された構造物がほとんどであり、無筋コンクリート橋脚や、桁の移動に対する抵抗性の乏しい支承を有する構造物が多い。近年、橋りょう流出に関する作用、応答値、限界値について多くの研究が実施されており、著者らもこれまで橋りょう模型を用いた津波作用の模型実験や数値解析を行い、様々な流体情報と桁の諸元が桁の流体力に及ぼす影響について検討を行った¹⁾。

これに対して本研究は、桁断面形状、橋脚高さ、支承部形式の異なる縮小試験体を用いた水理実験により、津波による桁流出に対する橋りょうの抵抗力の特性を把握することを目的としている。これまで、橋りょう流出に関する限界値を評価できるマクロ式として、支承の摩擦や桁の重量に頼った支承まわりの回転力²⁾あるいは浮き上がりに対する抵抗力³⁾に着目して整理された事例が報告されている。様々な流体情報および橋りょう情報に対

する適用方法については検討の余地が残されているものの、流れ方向、鉛直方向および橋軸回りの回転方向に対する抵抗力に着目して、橋りょう流出に対する限界値をマクロ式に基づいて検討することは、一定の合意が得られていると言える。ここでは、既往の研究で対象となることが多い道路橋と比較して、スパンが同程度であっても桁高が大きい特徴を有する、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。なお本研究では、橋りょう流出の限界状態として、支承位置において桁と橋脚がかい離する状態を対象とし、橋脚の破壊による流出は検討の対象としない。

2. 実験概要

(1) 検討対象および実験水槽

図-1 に縮小橋りょう模型を、図-2 に実験水路の断面を示す。水路内には、3 径間（桁間：1mm）の橋りょう模型を設置し、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。模型縮尺を 1/40 とし、実験諸元はフルードの相似則にしたがって設定した。対象とする現象の最小流速を 2.0 m/s（実機）とすると、水の動

図-1 縮小橋りょう模型

図-2 実験水路, 模型配置および計測位置

図-3 10m 橋脚試験体 (実機換算寸法)

(a)下路桁(G1)

(b)T形桁高欄あり(G2)

(c)T形桁高欄なし(G3)

図-4 桁形式 (実機換算寸法)

図-5 支承および落橋防止装置の形式

粘性係数 $\nu = 1.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ (15°C), 最小橋桁高さ 2.7m から求められるレイノルズ数 Re は, 実機で 4.74×10^6 , 縮尺模型で 1.87×10^4 となり, 模型においても十分に大きく, 乱流状態であり水の粘性の影響は無視できる程度に小さいと考えられる。

橋脚の柱部は円錐台形状とした。実験対象とする橋脚高さすなわち桁下空頭は, 10m と 5m (実機換算寸法) の 2 種類とした。橋脚試験体は, アクリルにより制作し, 上下流側の側面に, 圧力計を設置した (図-3 参照)。

図-4 に, 実験に使用した桁模型の諸元を示す。断面寸法・形状は, 鉄道橋りに使用されている鉄道プレストレストコンクリート(PC)下路桁と PCT 形桁を参考にしたものであり, 防音壁の有無を含めた 3 タイプ (G1, G2, G3) とした。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, 実物と同程度となるように, 超高強度繊維補強コンクリート

⁴⁾ (UFC) で製作した。ただし, PCT 桁の防音壁のみ, 薄板のためアルミ製とした。

図-5 に, 今回対象とした支承形式を示す。実験対象とする支承部の形式は, ゴム製支承 S1 (摩擦係数 0.5, 長さ 10mm×幅 10mm×高さ 2mm), 鋼製支承 S2 (長さ 10mm×幅 10mm×高さ 1mm), および地震動作用に対する移動制限装置として供用されている鋼棒 (S3) またはサイドブロック (S4) をゴム製支承と併設したもの, および S4 に鉛直方向の移動制限装置として鋼棒を配置した形式 S5 の計 5 種類とした。

ゴム製支承は橋脚模型に接着し, また鋼製支承 S2 では, 2 枚のアルミ (摩擦係数 0.3) を用いており, それぞれ桁模型および橋脚模型の支承位置に接着した。S3 における鋼棒は直径 2mm の真鍮棒であり, 12.5mm 間隔で 3 本設置されている。各鋼棒は橋脚模型側に固定し, 桁模型側には直径 3mm の穴を開けて, 桁模型を差し込

む形で橋脚上に設置した。S4, S5 のサイドブロックは幅 15mm, 橋脚からの突出高さ 15mm の直方体形状であり、桁模型の両側に、桁模型との隙間が上下流側でそれぞれ 0.5mm となるように設置した。S5 では、直径 2mm の真鍮棒を用いて橋桁側に固定し、サイドブロックに直径 3mm の穴を設けて設置した。

(2) 実験方法

実験は、橋脚試験体および橋桁試験体を設置後、橋桁試験体が移動するまで流量を徐々に増やしながら、以下に示す項目を計測した。桁が移動した段階で実験を終了し、また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。下流端に設置した堰の高さを変化させることにより、初期水深すなわち流速と水深の関係を 2 種類について実験した。表-1 に実験ケースを示すが、ここで初期水深は堰高に一致し、流量 0 における水深を意味している。ただし、計測は水面が橋桁に接触しない程度に初期流量をあらかじめ流し、計測開始後に流量を徐々に増やした。

水位、流速は、図-2 に示す地点で計測した。水位は、計 5 点計測しており、橋りょう模型中心より上流側 1.0m, 2.0m, 4.0m, 8.0m の地点については容量式水位計で、下流側 3.72m の地点については超音波水位計で計測

した。流速は電磁流速計により計測し、橋りょう模型中心より上流側 1.0m, 2.0m の地点の上層、下層の 2 点で計測した。計測高さは、V2, V4 の流速計については橋脚中央の高さ、V1, V3 の流速計については橋桁の中央高さとした。ただし、V1, V3 については、流量が増加し橋桁が水没するまでは気中となるため、水位が十分増加するまでは水面下の高さとし、水位が増加した時点で鉛直方向に設定した高さまで上昇させて計測した。計測のサンプリング周波数は 10Hz である。

橋脚の上流側と下流側の側面には、小型の圧力計（直径 10mm）を、圧力分布が適切に計測できるよう配置した。また橋脚桁座には、上・下流それぞれのゴム支承または鋼支承に小型ロードセルを設置し、桁座に作用する支持力を計測した。なお、橋脚に作用する圧力の特性を明確にするため、橋桁を置かず橋脚のみとした状態でも計測を行った。

流れの作用状況及び桁の移動状況については、水槽上方及び水槽側面に設置したビデオにより撮影した。

3. 実験結果

(1) 桁模型の流出結果

表-1 に、橋桁試験体の流出状況をまとめる。表中の H ,

表-1 PC 桁流出時の流体情報(上段)^{*1}と流体力(下段)^{*2}

	橋脚高さ	初期水深	S1	S2	S3	S4	S5
G1 下路桁	5m	1m	未流出	$H=9.8, V=4.6$ 2670, -4506, -11570	未流出	未流出	未流出
		0m	未流出	ずれ	未流出	未流出	未流出
G2 T 形桁 防音壁あり	5m	1m	$H=9.8, V=4.2$ 4426, -2051, 1308	$H=8.2, V=3.7$ 3444, -1343, 3651	$H=11.7, V=4.6$ 5148, -2571, 5714	$H=11.6, V=4.6$ 5303, -2683, 5382	未流出
		0m	$H=9.9, V=4.4$ 4759, -2291, 514	$H=8.1, V=3.7$ 3434, -1336, 3674	$H=11.7, V=4.5$ 5027, -2485, 5971	$H=11.7, V=4.4$ 4906, -2397, 6231	未流出
G3 T 形桁 防音壁なし	10m	4.2m	ずれ	$H=12.7, V=3.3$ 219, 896, -783	未流出	未流出	未流出
		3.6m	未流出	$H=12.2, V=3.5$ 348, 738, -697	未流出	未流出	未流出
	5m	1m	$H=9.5, V=4.4$ 2489, -493, 2318	$H=8.2, V=3.9$ 1862, 174, 2818	$H=11.7, V=5.4$ 3652, -1732, 1390	ずれ	未流出
		0m	$H=9.4, V=4.5$ 2631, -645, 2204	$H=8.5, V=4.2$ 2180, -165, 2564	$H=11.7, V=5.3$ 3544, -1616, 1476	ずれ	未流出

^{*1}: 桁より上流 40m 位置の水深 H (m) および流速 V (m/s), ^{*2}: 既往の報告¹⁾に基づき推定した流体力: F_x (水平力, kN), F_z (鉛直上向き力, kN), M_y (橋軸回りのモーメント, kNm) の順に示す。

図-6 中央支間の橋桁試験体の流出状況(高速度カメラ撮影, 図中の線は橋桁試験体形状を示す)

図-7 計測値の例 (桁 G3, 橋脚高さ 5m, 支承 S3)

 図-8 桁に作用する水平力 F_x の推定 (桁下空頭 5m)

 図-9 桁に作用する鉛直力 F_z の推定 (桁下空頭 5m)

 図-10 桁に作用するモーメント M_{y0} の推定 (桁下空頭 5m)

図-11 桁に作用する流体力と抵抗力

V は、桁が流出した瞬間の 1m 上流における水位および桁位置における流速を示している。表中の値は、実機に換算して示した。なお、流出した瞬間は、後述するように下流側の桁座の支持力が抜けた瞬間としている。一部のケースでは、中央径間の桁が水平回転し、両側の桁と接触して固定された(表-1 中の“ずれ”)。この場合、桁の流出した瞬間が不明なため水位、流速の値を示していないが、条件としては流出に相当する流体力が働いていたものと推定できる。下段に示した数字は、後述する、既往の成果⁹⁾に基づき水深と流速から算出した、水平力、鉛直上向き力、下流側下端(支承部)周りの回転モーメントをそれぞれ示している。

図-6 に橋よう模型の流出状況を示す。支承 S1, S2 では、桁が水平方向下流側に移動後、桁座から落下して

流出した(図-6 (a)(b))。S2 では全てのケースで桁が流出したが、S1 では一部のケースで桁の流出が生じなかった。これは、支承の摩擦係数の違いによるものと考えられる。一方、移動制限装置が累加された S3, S4 では、桁の水平移動が拘束されるため、下流側支承を支点に回転して下流側に流出した(図-6 (c))。また、S3, S4 では、同じケースで桁の流出が阻止されている。両者は、水平方向の移動が拘束され、鉛直上向きには抵抗力が働かないという同条件であり、ここでの桁の流下に対しては同様の機能を有することが分かる。S5 では桁の流出は発生しなかった。

図-7 に、計測された水位 H 、流速 V 、橋脚側面の圧力 p 、桁座の荷重 F について時系列の例を示す。図-7 (a)より、流量の増加に伴い水位・流速が増加し、桁流出後水

図-12 作用力と抵抗力の関係 (P5: 橋脚高さ 5m)

図-13 作用力と抵抗力の関係 (P10: 橋脚高さ 10m)

位・流速が減少したことが分かる。図-7(b)では、桁の上流側では堰上げにより水位が上昇するため、橋脚上流側の圧力に比べて下流側の圧力が小さい。また、1000s 付近で一旦下流側の圧力が小さくなるが、これは流量の増加とともに桁が水没し、桁の下流側で射流が生じて水深が小さくなったためと考えられる。図-7(c)の桁座の支持力では、上流側は流量の増加に伴い支持力がゼロまで徐々に低下していることが分かる。下流側の支持力は徐々に上昇するが、流量が十分増加するとある一定の値となり、流出時に 0 となっている。上流側と下流側の合計値は、流量の増加とともに増加しており、下向きの揚力が生じていることが分かる。

(2) 試験体の流出時に作用した流体力の評価

図-8～10 に、既往の成果⁹⁾における、流速と、本実験と同断面形状の桁に作用する水平力 F_x 、鉛直力 F_z 、橋軸まわりのモーメント M_y の関係を示す。図中のプロットは、水深の異なる実験ケースの結果を示したものであるが、 F_z および M_y では桁の水没の有無により関係が大きく異なる結果となった。ただし、実験の範囲では、水深に関わらず概ね 1 つあるいは 2 つの直線で近似可能であった。桁下空頭 (=橋脚高さ)、桁断面形状および水深ごとに設定した図-8～10 中の近似式を用いることで、任意の水深および流速における桁に作用した流体力が推

定可能となる。桁が流出した際の水深、流速を用いて流体力 (F_x , F_z , M_y) を推定した結果を、表-1 の下段に示す。

図-11 に、ここで考慮した桁に作用する流体力を示す。

$$F_x = F_{xd} \quad (1)$$

$$F_z = F_b + F_d \quad (2)$$

$$M_y = l_x \times F_d + l'_x \times F_b + l_z \times F_{xd} \quad (3)$$

ここで、 F_{xd} : 水平方向の流体力、 F_b : 浮力、 F_d : 揚力、 l_x : 揚力作用位置と支点の水平距離、 l'_x : 浮力作用位置と支点の水平距離、 l_z : 水平力作用位置と支点の鉛直距離である。

(3) 試験体の流出に関する限界値評価と検証

桁流出に対する抵抗力 (R_x , R_z , R_y) は、式(4)～(6)により算出した(図-11 参照)。

$$R_x = \mu(F_{gm} + F_b + F_d) + R_{sh} \\ = \mu(F_{gm} + F_z) + R_{sh} \quad (4)$$

$$R_z = F_{gm} \quad (5)$$

$$R_y = l'_x \times F_{gm} \quad (6)$$

ここで、 μ : 支承における摩擦係数、 F_{gm} : 自重、 R_{sh} : 移動制限装置のせん断耐力である。なお、自重と浮力の作用水平位置は一致 (l'_x) するものとし、桁の中心とした。

図-12, 13 は、流体力を縦軸、抵抗力を横軸に、両者

の関係を示したものである。図中の○は表-1における未流出したケース、△はずれのケース、×は流出したケースをそれぞれ表している。なお、水平方向(図-12, 13 (b))において移動制限装置を設置したケースは、図の右端にプロットした。

鉛直方向(図-12, 13 (a))では、全てのケースで流体力が抵抗力を下回っており、浮上による移動ケースはないことを示している。また、流出時には下向きの流体力が作用していることが分かる。水平方向(図-12, 13 (b))では、水平移動した移動制限装置の無いS1, S2のケースで、概ね作用力と抵抗力が一致しており、流出しないケースでは作用力が抵抗力に対して小さい値を示している。また、S1とS2を比較すると、相対的にS1の方が抵抗力が大きい。これは支承の摩擦係数の違いであり、桁が流出するには、S1のゴム支承の方がより大きな流体力が作用する必要があることが分かる。下流側支承回りのモーメント(図-12, 13 (c))によると、水平移動したS1, S2のケースでは、回転方向の流体力が相対的に小さく、回転移動した移動制限装置のあるS3, S4では作用力と抵抗力が概略一致する傾向にあることが分かる。ただし、水平力に比較して流体力と作用力の関係が明確でない。回転方向の流体力は図-10から求めているが、計測点数が少なくばらつきも大きいため、流体力の算定精度に課題が残る。今後流体力の算定モデルを構築して、流体力の算定精度を高める必要がある。回転移動しなかったS3, S4のケースでは、負の回転流体力が働いている。これは下路桁(G1)のケースであり、桁高が低いために水平方向の流体力が小さいケースである。図-10(a)によれば、流速が大きくなるほど負の回転流体力が働いている。桁高が低い場合には、正の回転流体力として作用する水平力が小さいため、下向きの流体力による負の回転力が卓越することが分かる。

以上のように、抵抗力と作用力の関係から、桁の流出

形態によって流出を判断する指標(水平方向あるいは回転方向)が異なることを説明できることが分かった。

4. まとめ

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、1/40スケールの縮小橋りょう模型を用いた流体作用実験を行った。その結果、一樣流による桁流出に対する抵抗力は、下路桁、T形桁高欄なし、T形桁高欄ありの順に高く、また支承形式として移動制限装置の有効性を確認した。既往の成果に基づき算出した流体力(水平方向 F_x 、鉛直方向 F_z 、回転方向 M_{y0})と、支承の摩擦力、ストッパーのせん断力により算出される抵抗力を比較すると、流体力の(F_x , F_z , M_{y0})いずれかが抵抗力を上回ることによって流出することが判定され、さらに流出状況と一致することを確認した。

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

- 1) 渡辺 健, 河村佳英, 大野又稔, 岡本 大, 織田幸伸: 一樣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.
- 2) 土木学会編: 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.
- 3) プレストレストコンクリート技術協会: 東日本大震災PC構造物災害調査報告書, 2011.
- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004.

(2015.3.18 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON LIMIT VALUES FOR COLLAPSE OF PC GIRDERS BY UNIFORMED FLOW OF WATER

Ken WATANABE, Yuto OHNO and Yukinobu ODA

Some bridges have been failed by Tsunami and river flood in Japan. 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 limit value for collapse of PC girders: that is affected by the cross-section shape of beam, supported condition, and the restriction equipments for seismic force. This paper focused on the railway bridges having large depth of beam compared with the road bridges. The paper concluded that the limit values for flow-out of girders can be calculated by considering the the friction at the support and shear-load capacity of the restriction equipments.