

橋脚破壊に着目した津波による橋りょうの流出の限界値評価

(公財)鉄道総合技術研究所	修(工)	○田中	章
(公財)鉄道総合技術研究所	正会員	博(学)	渡辺 健
(公財)鉄道総合技術研究所	修(工)	大野	又稔
大成建設(株)	博(工)	織田	幸伸

Abstract : The limit state value for outflow of concrete bridges was examined based on the specimens with different types of pier and bearing subjected to the uniform flow. This paper made clear that the horizontal, the vertical forces, and the moment at outflow of bridges specimens was roughly evaluated by considering the dimensions of bridges, buoyancy, horizontal and vertical forces by water-flow.

Key words : PC girders, Tsunami, fluid force, uniformed flow, limit state value for outflow

1. はじめに

東日本大震災において、多くのPC橋りょうが流出する被害が発生した。このような被害が発生した背景には、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十分には確立されていないこと、および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があげられる。ところで、津波波形は短時間に水位が上昇する先端部、およびその後の徐々に水位と流速が増加する準定常態部に区別して考えることができる。本研究では、津波の準定常状態部における桁の流出限界値を評価するため、橋脚の破壊に着目し、橋脚形状および支承部形式の異なる縮小橋りょう試験体を用いた水理実験を実施した。そして、橋脚形状や支承部形式の組み合わせごとに限界値を検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体諸元および実験水路

図-1に、試験体の概要を示す。対象とする桁は桁高スパン比1/12のPCT形桁(超高強度繊維補強コンクリート製)とし、縮尺は1/40とした。併せて用いた橋脚は、高さ125mm(実機スケール5m, P5)および250mm(実機スケール10m, P10)の円錐台形状の橋脚をモルタルで、桁座をアクリルで製作し、無筋橋脚の打継目を模擬するため、基部の上に橋脚部を重ね合わせた構造を再現した。また、橋脚P5に、鋼棒挿入による補強などを想定し、0.6, 1.0, 2.0mmの鋼材(はんだ)を挿入した試験体(P5R)を製作した。図-2に支承部形式の概要を示す。支承部形式は、ゴム支承(S1)、鋼支承(S2)、ゴム支承に移動制限装置として鋼棒(S3)およびサイドブロック(S4)を組み合わせた4種類とした。なお、支承S1には、 $t=2.0\text{mm}$ の天然ゴムを使用し、支承S2には、 $t=1.0\text{mm}$ のアルミ板を用いた。また、支承S3には、 $\phi=2.0\text{mm}$ の真鍮棒を用い、支承S4には高さ15mm、幅15mmのアクリル製のブロックを製作し、橋桁の隙間を0.5mmとして設置した。

図-3に、実験に用いた水槽を示す。水槽の幅は2500mmで、水槽内には高さ500mmの架台を設置し、上流側に1/25と1/5の斜面を設置した。また、初期水深を変化させるため、架台の下流端に高さ調整が可能な越流堰を設けた。

2. 2 流出実験および計測項目

写真-1に、流出実験状況を示す。また、試験ケースの一覧を表-1に示す。実験では、水路内に3径

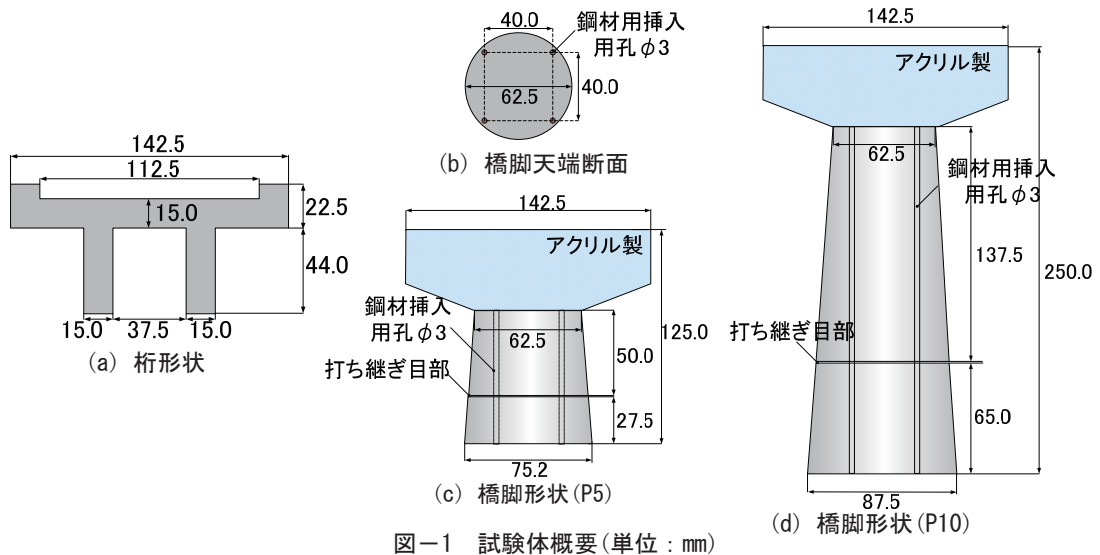


図-1 試験体概要(単位: mm)

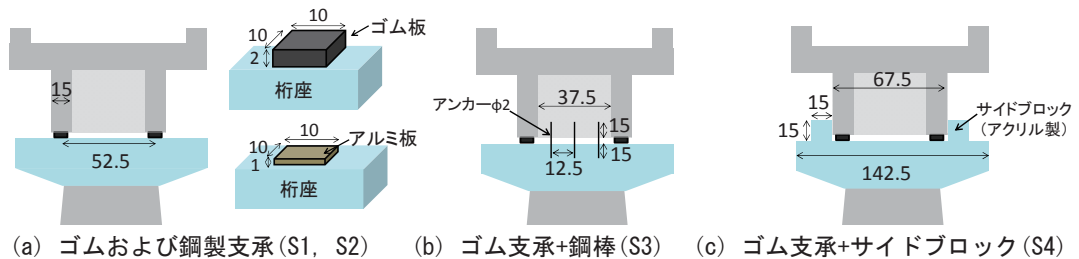
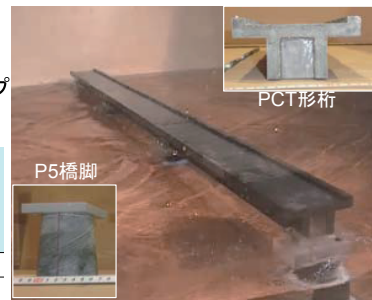
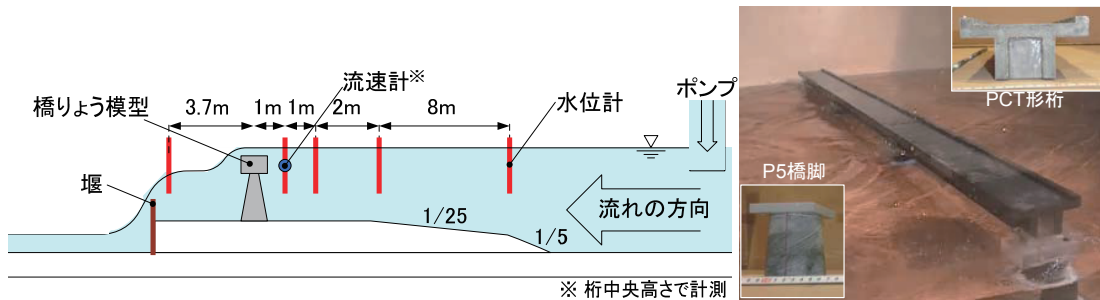


図-2 支承部概要(単位: mm)



間(桁間1.0mm)の橋りょうを模擬した試験体を設置した。そして、初期水深の状態から徐々に流量を増加させ、橋脚試験体または橋桁試験体が移動した段階で実験を終了した。試験ケースは、支承S1～S4を配置した橋りょうに対して、初期水深を橋脚P5では、250mm(実機スケール1.0m, H)および0.0mm(L)、橋脚P10では、105mm(実機スケール4.2m, H)および90mm(実機スケール3.6m, L)とした。また、補強橋脚を模擬した橋脚P5Rでは、支承S1およびS2で $\phi=0.6\text{mm}$ 、支承S3で $\phi=2.0\text{mm}$ 、支承S4で $\phi=1.0\text{mm}$ の鋼棒を4本挿入した試験体を用い、初期水深は0.0mm(L)とした。

計測項目は、水位・流速とした。水位は計5点で計測しており、試験体より上流側1.0, 2.0, 4.0, および8.0mの地点では容量式水位計で、下流側3.7mの地点で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、試験体より上流側1.0mの位置の奥側、手前側の2点で計測した。また、桁に対する波の作用および桁の移動は、水槽側面に設置した高速度カメラにより捉えた。

3. 実験結果

3. 1 流出状況

表-2に、流出時において計測された結果の一覧を示す。なお、表-2に示した流出時の水深および流速は、計測結果をフルードの相似則に従って実機スケールに換算した値としている。また、写真-2~4に、初期水深Lのケースにおいて橋りょうが流出した際の写真を示す。なお、試験ケースは、橋脚および支承の形式、初期水深を反映させた名称となっている。

流出状況は、P5R-S3-L(写真-4(c))で桁のみが流出したが、それ以外のケースではいずれの支承においても橋脚に設けた打継目位置で橋脚が破壊し、橋りょうが流出する結果となった。さらに、打継目位置で破壊したケースに着目すると、P5-S1~S4-H,L(写真-2)では、打継目位置で橋脚上部の水平方向の移動、あるいは打継目の下流側の縁端(以下、支点)を中心とした回転による移動、により橋りょうが流出することを確認した。また、P5R-S2-L(写真-4(b))では、桁が支承部で水平方向に移動した後、回転して流出した。P5R-S4-L(写真-4(d))では、桁が下流側の桁下端部を中心して回転し、桁がサイドブロックに引っかかった後に、回転して流出した。一方、P10-S1~S4-H,L(写真-3)およびP5R-S1-L(写真-4(a))では、橋脚打継目および桁の水平方向の移動や桁の浮き上がりはなく、回転する挙動のみが確認できた。流出時の流速は、P10-S1~S4-Hで3.9m/s、P5R-S3-Lで5.3m/s、それ以外のケースでは4.2m/s程度であった。また、表-2に示す通り、いずれの支承(S1~S4)においても橋脚を補強したP5(初期水深L)に対して、P5R(初期水深L)の水深または流速が同等もしくは増加している。特に、P5R-S2-Lでは桁の移動に伴い橋脚打継目に対する負荷が増加したことが推察されており、この桁ずれの影響については引き続き検討する必要があるものの、破壊による桁の流出について、橋脚を補強することで高い流体力の作用にも抵抗できたことがわかる。

表-1 試験ケース一覧

桁形式	橋脚形式 [※]	支承部形式	初期水深 [※]
PCT形桁	P5 125mm(5m)	S1 (コ ^ゝ ム)	H: 25mm(1.0m) L: 0.0mm(0.0m)
		S2 (鋼)	H: 25mm(1.0m) L: 0.0mm(0.0m)
		S3 (鋼棒)	H: 25mm(1.0m) L: 0.0mm(0.0m)
		S4 (サイド ^ゝ ブロック)	H: 25mm(1.0m) L: 0.0mm(0.0m)
	P10 250mm(10m)	S1 (コ ^ゝ ム)	H: 105mm(4.2m) L: 90mm(4.2m)
		S2 (鋼)	H: 105mm(4.2m) L: 90mm(4.2m)
		S3 (鋼棒)	H: 105mm(4.2m) L: 90mm(4.2m)
		S4 (サイド ^ゝ ブロック)	H: 105mm(4.2m) L: 90mm(4.2m)
	P5R 125mm(5m) 鋼棒φ0.6×4本	S1 (コ ^ゝ ム)	L: 0.0mm(0.0m)
		S2 (鋼)	
		S3 (鋼棒)	
	P5R 125mm(5m) 鋼棒φ2.0×4本	S4 (サイド ^ゝ ブロック)	
P5R 125mm(5m) 鋼棒φ1.0×4本			

※()の値は、実機スケールに換算した値

3. 2 流体力と流出限界値の関係

3. 1で得られた橋りょう流出時の流速を基に、橋りょうに作用する流体力(F_z:鉛直力, F_x:水平力, M_y:打継目位置でのモーメント)と試験体の諸元および浮力と揚力を考慮して推定した抵抗力の関係について検討した。

(1) 流体力の算出

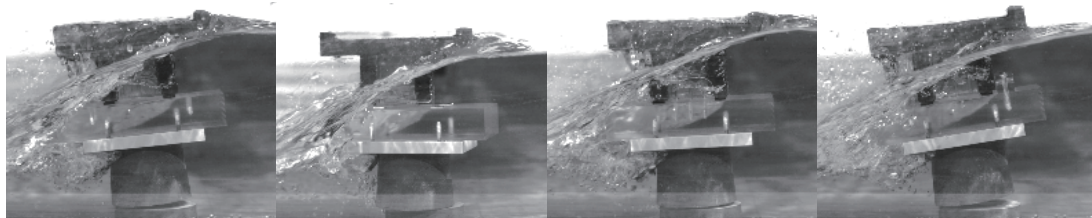
桁および橋脚に作用する力をそれぞれ推定し、これらの合計値を橋りょうに作用する流体力とした。具体的には、桁に作用する流体力は、既往の成果¹⁾から得られた実験データを基に桁下空頭5mおよび10m時における流速と流体力の関係から得られた近似式(図-4, 図-5)より、F_zおよびF_xを推定したものである。M_yは、F_xの作用位置を支点から桁高さの1/2までの距離、F_zの作用位置を支点から桁幅の1/2の距離と仮定して算出した(図-6)。橋脚に作用する流体力は、鉄道構造物等設計標準・解説(コンクリート構造物)²⁾を参考に形状係数η=0.73として推定し、作用位置は水深の0.6倍の高さとした(図-6)。

表-2 実機スケールに換算した橋りょう流出時の計測結果

橋脚形式	初期水深	ゴム (S1)			鋼製 (S2)			鋼棒 (S3)			サイドブロック (S4)		
		流出状況	水深 (m)	流速 (m/s)	流出状況	水深 (m)	流速 (m/s)	流出状況	水深 (m)	流速 (m/s)	流出状況	水深 (m)	流速 (m/s)
P5	H	×※ ¹	7.8	4.3	×※ ^{1,2}	7.4	4.0	×※ ¹	7.7	4.3	×※ ¹	7.7	3.7
	L	×※ ¹	7.7	4.3	×※ ^{1,2}	7.4	4.2	×※ ¹	7.7	4.4	×※ ¹	7.7	4.3
P10	H	×	12.1	3.9	×	12.1	3.9	×	12.1	3.9	×	12.1	3.9
	L	×	12.1	4.3	×	11.9	4.4	×	12.0	4.2	×	12.0	4.2
P5R	L	×	7.9	4.3	×※ ³	7.4	4.2	△	11.6	5.3	×	9.1	4.5

×: 橋脚打ち継ぎ目位置で壊れ流出, △: 桁のみ流出

※1: 橋脚打ち継ぎ目位置でずれ有, ※2: 桁の僅かなずれ有, ※3: 桁の大きなずれ有



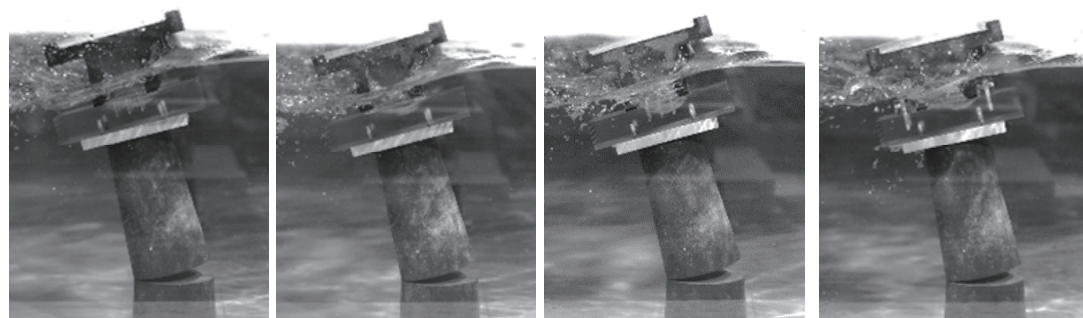
(a) P5-S1

(b) P5-S2

(c) P5-S3

(d) P5-S4

写真-2 流出状況 (P5 橋脚 初期水深 0.0m)



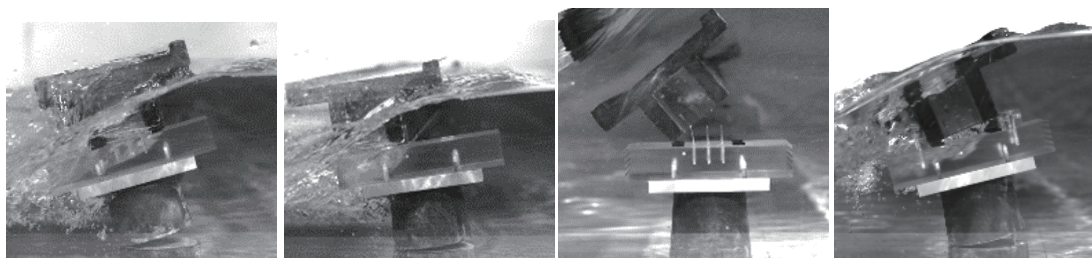
(a) P10-S1

(b) P10-S2

(c) P10-S3

(d) P10-S4

写真-3 流出状況 (P10 橋脚 初期水深 0.0m)



(a) P5R-S1

(b) P5R-S2

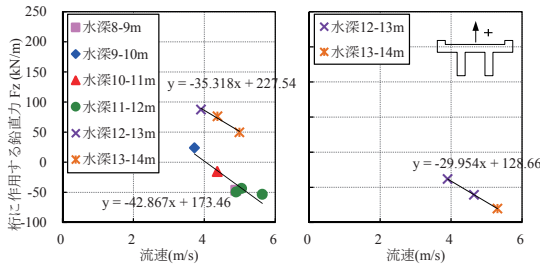
(c) P5R-S3

(d) P5R-S4

写真-4 流出状況 (P5R 橋脚 初期水深 0.0m)

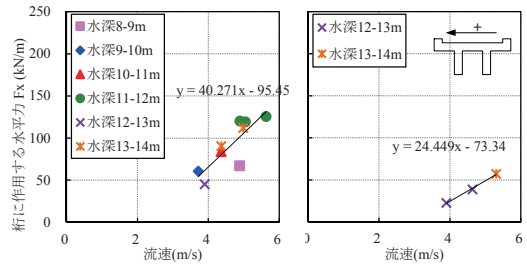
(2) 抵抗力の算出

橋脚P5およびP10を用いた場合の抵抗力は、打継目位置より上側の橋脚および桁の自重を F_z の限界値、自重と橋りょうに作用する揚力および浮力を考慮した鉛直力に橋脚の摩擦係数を乗じた値を F_x に対する限界値とした。また、 M_y の限界値は、自重に支点から橋脚中心までの距離を乗じた値とした。橋脚P5Rを用いた場合の抵抗力は、同様に自重を F_z に対する限界値、鉛直力に摩擦係数を乗じた値に鋼棒ストッパーのせん断耐力²⁾を加算した値を F_x に対する限界値とした。また、 M_y に対する限界値は、平面保持を仮定したRC断面として算出した打継目位置の降伏曲げモーメントとした。なお、橋脚の摩擦係



(a) 桁下空頭 5m 時 (b) 桁下空頭 10m 時

図-4 桁に作用する鉛直力 F_z の推定



(a) 桁下空頭 5m 時 (b) 桁下空頭 10m 時

図-5 桁に作用する水平力 F_x の推定

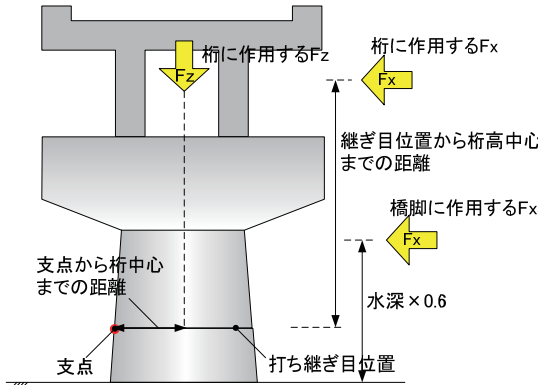


図-6 流体力の作用位置

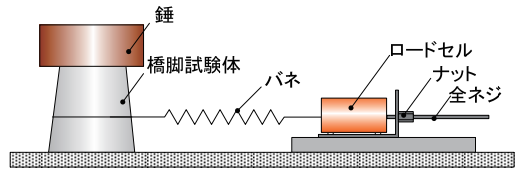


図-7 橋脚摩擦係数確認試験概要

表-3 橋脚摩擦係数試験結果

軸力 (N)	摩擦係数			
	1回目	2回目	3回目	平均値
19.6	0.228	0.214	0.237	0.218
29.4	0.230	0.209	0.204	
39.2	0.216	0.201	0.219	

数については、図-7に示すように橋脚5P上部に錘を載せ軸力(19.6N, 29.4N, 39.2N)を与え、バネを介して水平に橋脚上部を引張り、橋脚の上部が移動する際の引張力をロードセルにより計測することで算出した。摩擦係数試験の結果を表-3に示す。摩擦係数は、軸力19.6kNで0.23、軸力29.4kNで0.21、軸力39.2kNで0.21となり軸力に依存した差異はなかったことから、本研究では平均値である0.22(変動係数：5.3%)を用いた。

(3) 流体力と抵抗力の関係

図-8, 図-9に、流出時の橋りょうに作用する流体力と抵抗力の関係を示す。なお、P5R-S3-LおよびP5R-S4-Lでは、推定した抵抗力が過大なため、作成したグラフ上の最大値の位置にプロットし、推定した水平力とモーメントを併記している。

鉛直方向(図-8(a), 図-9(a))では、いずれも作用力は抵抗力に対して小さく、打継目位置で鉛直上向きに移動したケースは無いことを示している。なお、鉛直方向の作用力が全てのケースで負の値となっているのは、桁が水没することで水の重量が作用したことと、桁の上部よりも下部の流速の方が大きくなるため下部の圧力が相対的に小さくなり下向きの力が増加したことが要因としてあげられる。水平方向(図-8(b), 図-9(b))では、打継目位置で橋脚上部が水平方向に移動したP5-S1~S4-L,Hで、作用力がやや大きいものの抵抗力と概ね一致しており、その他のケースでは作用力が抵抗力を下回っていた。一方、打継目位置回りのモーメント(図-8(c), 図-9(c))は、回転移動したP5-S4-HおよびP10-S1~S4-H, P5R-S4-Lは作用力が抵抗力を下回ったが、その他のケースは概ね作用力と抵抗力が一致していた。なお、本検討では、流体力の作用位置が正確には把握できないため図-6の位置と仮定していることや、P5R-S4-Lでは、作用力の推定に用いた近似式(図-4, 図-5)では桁が回転した影響を考慮できていないため、P5-S4-HおよびP10-S1~S4-H, P5R-S4-Lでは作用力が過小に推定され、抵抗力を下回ったと推測される。3. 1に示した流出状況より、橋脚P5のケースでは、打継目位置での水

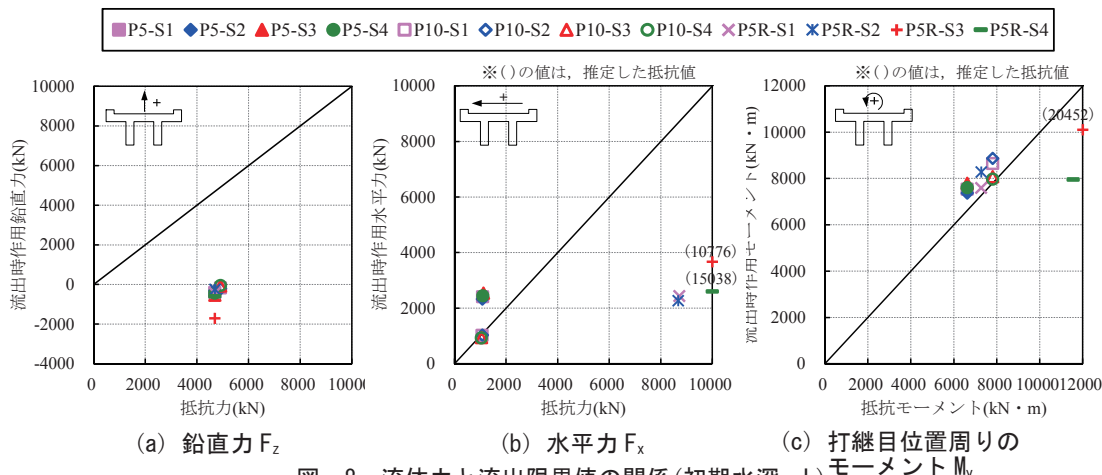


図-8 流体力と流出限界値の関係(初期水深: L)

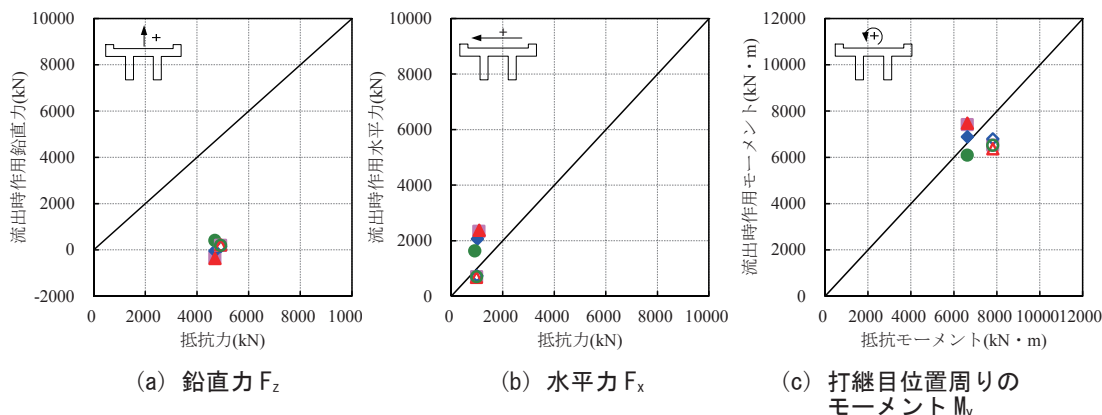


図-9 流体力と流出限界値の関係(初期水深: H)

平および回転移動が確認され、水平力と打継目位置でのモーメントが卓越したことが推測される。一方、橋脚P10およびP5Rを用いたケースでは回転による移動のみが確認されていることから、打継目位置でのモーメントが卓越し流出したものと推測される。なお、桁のみが流出したP5R-S3-Lでは、いずれの作用力も抵抗力を下回ったことから、桁と支承部における作用力が抵抗力を上回ったため流出したと推測される。

4. まとめ

コンクリート橋りょうを対象に橋脚、支承形式の異なる試験体を用いた水理実験を実施し、一樣流作用下における流出に対する橋りょうの限界値を検討した。その結果、試験体が流出する際の流速から推定した水平力・鉛直力・モーメントは、橋りょうの諸元、揚力および浮力を考慮して算出した水平方向および鉛直方向の抵抗力と概ね一致していることを明らかにした。

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) (財)鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善, 2004