

一様流中の橋桁に作用する流れ方向の水平力に関する一考察

(公財)鉄道総合技術研究所 工修 ○河村 佳英
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 工博 渡辺 健
 (公財)鉄道総合技術研究所 工修 大野 又稔
 大成建設(株) 工修 織田 幸伸

Abstract : Many prestressed concrete (PC) girders was collapsed at the the Great East Japan Earthquake, 2011. Fluid force caused by the application of tsunami on PC girders can be considered as two parts: the impact force at the initiation of Tsunami and continuous force caused by the uniformed flow. The drag coefficient is effective for calculating the horizontal force, however, is also depends on shape and sink level into the water. This paper discussed the effect of the initial water level, the water velocity, height of PC girder location, and the angle to water flow, on the horizontal force applied to the PC girders. The paper concluded that the drag coefficient was not set as an identical value and 3-dimension numerical wave flume was useful for expressing the stress measured at the experiment.

Key words : PC girders, Tsunami, fluid force, uniformed flow, 3-dimension numerical wave flume

1. はじめに

東日本大震災において、多くのPC橋梁が流出被害を受けた。津波により橋桁には、波形の衝突による衝撃的な力が生じ、その後準定常状態の力が生じると考えられる。橋桁に働く流れ方向の作用力の算出に用いられる抗力係数に関する研究は、一様空気流中に設置された物体のほか、非水没物体や河床に設置された水没物体を対象としたものが多い¹⁾。本研究では、初期水深、流速、没水深、迎角をパラメータとして、自由表面を有する一様流中の橋桁に作用する水平力の変化について検討した。

2. 実験方法

本実験では、一様流中の橋桁を模擬した試験体に作用する流れ方向の水平力（以下、 F_x ）を計測した。図-1 に本実験で用いた水路を示す。水路幅は 500mm として、水路の下流側には、初期水深を変化させるための越流堰を設けた。図-2 に試験体の概要を示す。試験体は実在する鉄道の PCT 桁を参考に諸元を決定し、その縮尺は 1/30 とした。試験体の水路直角方向の長さは、水路幅と同じ 500mm と

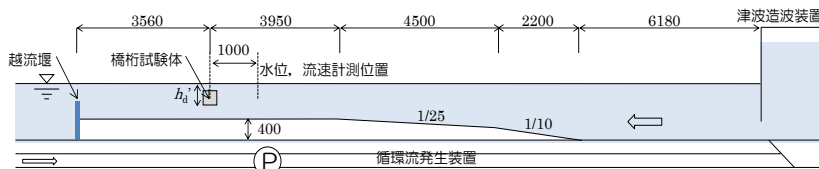


図-1 実験水路

表-1 実験ケース

Case	初期水深(m)	流速(m/s)	没水深(mm)
1	0.4	0.7	10mm ~ 全没水
2		0.9	
3		1.1	
4	0.3	0.7	
5		0.9	
6		1.1	
7		1.3	
8	0.2	1.3	
9		1.8	

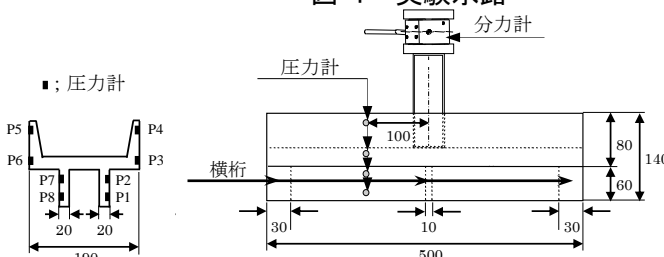


図-2 試験体の概要

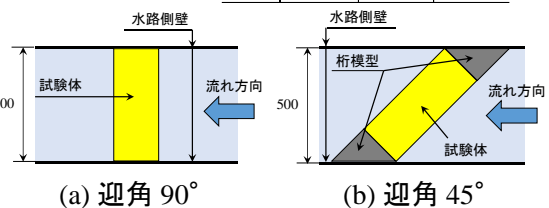


図-3 試験体の設置状況

した。試験体に作用する合力は、6分力計を用いて計測し、分力計はアルミ製の支柱を介して試験体と固定した。試験体に作用する局所的な圧力（以下、 P_i ）は、試験体表面に埋め込んだ圧力計により計測した。計測器のサンプリング周波数は10Hzとして、計測値は2分間の平均値とした。表-1に実験ケースを示す。流れ方向に対する試験体の角度（迎角）は、図-3に示すように 90° 、および 45° とした。実験では、初期水深を3ケース、流速を2~4ケースとした。水深と流速は、試験体上流側1000mmにおいて、電磁流速計、超音波水位計により測定した。流速は流量と越流堰により制御し、その代表値は4割水深の値とした。実験ケースにおけるレイノルズ数は $4.05 \times 10^4 \sim 1.07 \times 10^5$ であり、流れは乱流と考えられる。

3. 実験結果

3.1 試験体の没水深に伴う水深と流速の変化

はじめに没水深と迎角が水深と流速に与える影響について検討する。図-4、図-5に試験体の没水深 h_d' （上流側水位から桁下端までの高さ）と、初期水深 h_1 に対する試験体没水後の水深 h_i の比の関係、および h_d' と、初期流速 u_1 に対する試験体没水後の流速 u_i の比の関係を示す。ここで、 h_i は、 h_d' の増加とともに上昇している。全ての実験ケースにおいて、 h_d' の増加に伴い h_i/h_1 が増加し、 u_i/u_1 が低下した。

本実験では、各ケースで流量が一定であるため、 u_i/u_1 と h_i/h_1 は概ね反比例の関係となっている。また、Case8,9は、概ね同一曲線上にあることがわかる。Case8,9は下流側が射流状態であり、この場合、 h_i が h_d' の増加に伴い上昇しても、流量に関係なく、没水深に対して同一の曲線に乗ることがわかる。

3.2 流速と流体力の関係

図-6に迎角 90° における u_i^2 と F_x の関係を示す。図の(a)は、桁の一部が没水している状態を、図の(b)は全没水した状態の結果を示している。一般に一様流中に設置された水没物体に作用する流体力には、式(1)による抗力の式が用いられる²⁾。

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

ここに、 C_D :抗力係数、 F :抗力(N)、 ρ_0 :水の密度(kg/m^3)、 A :物体の投影面積(m^2)、 v :流速(m/s)である。

これによれば、抗力は投影面積と流速の二乗に

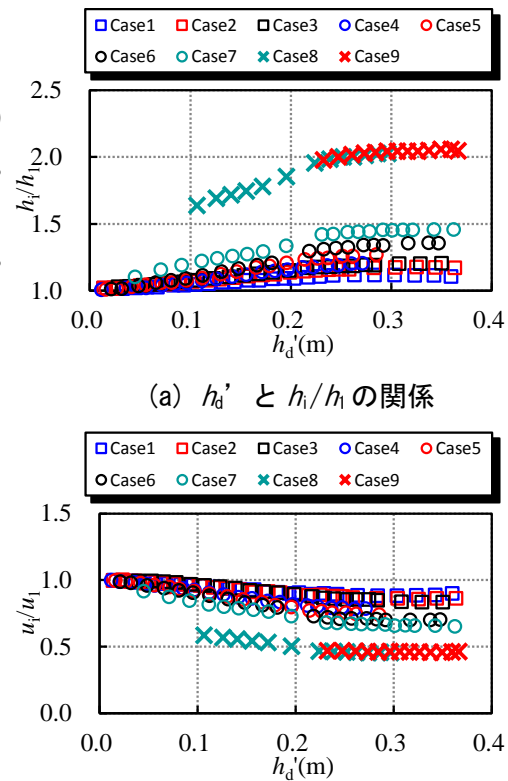


図-4 試験体の没水に伴う水位と流速の変化 (迎角 90°)

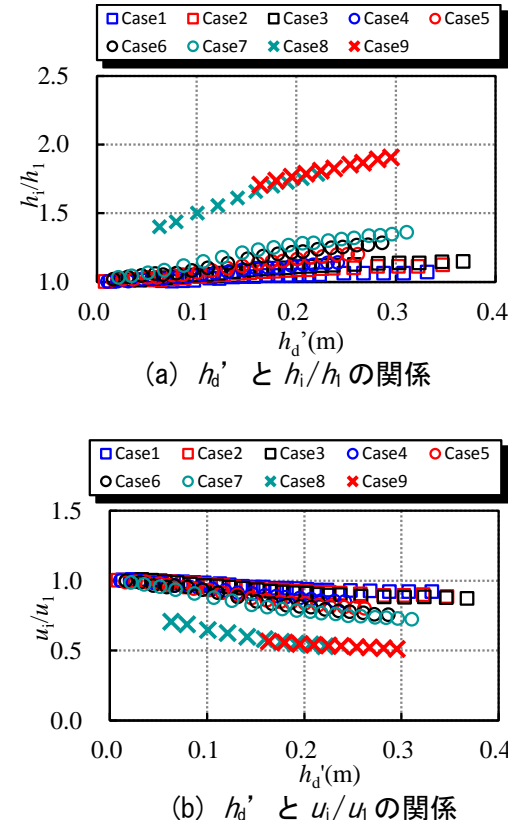


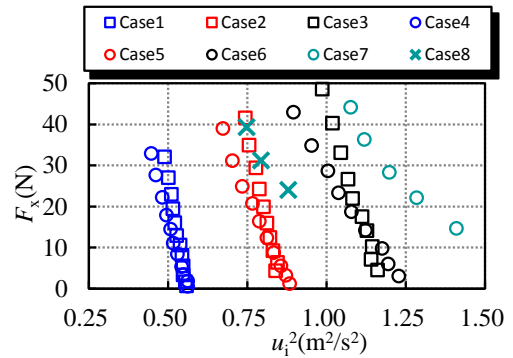
図-5 試験体の没水に伴う水位と流速の変化 (迎角 45°)

比例する。全没水前は、 h_d' の増加とともに h_i が増加して u_i は小さくなるが、投影面積の増大の影響が大きく、抗力は大きくなっていると考えられる。一方で全没水後は、投影面積は変化しないにもかかわらず、流速の低下とともに抗力が大きくなっている。また、流量が異なる(例えば Case1,2,3)と、抗力の値は同じ流速に対し大きく異なる。初期水深の違い(例えば Case2,5)の影響も全没水後に大きく表れている。上記は水深に対して桁高が比較的大きいと考えられる本実験では、抗力係数が唯一に定まらず、流量や初期水深の影響により抗力が定まることを示唆している。常流状態の Case1~7 と、射流状態の Case8,9 を比較すると、その傾きが顕著に異なっている。両者は、桁の上流側がともに常流状態であることから、下流側の流れが常流か射流かにより抗力特性が異なると考えられる。なお、迎角 45° の u_i^2 と F_x の関係についても、その傾向は同様であった。

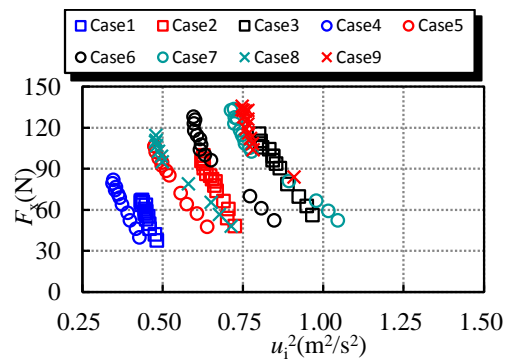
3.3 没水深と流体力の関係

図-7 に h_d' と F_x の関係を示す。図-4, 5 と同様に Case8, 9 は同一線上にあることから、下流側が射流状態の場合は、上流側の h_d' のみによって抗力が定まることが分かる。また、図-7 (a)(b)から、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見られる。図-6, 7 では h_d' の増加とともに抗力は増加しているが、桁が十分に没水した場合は、抗力が一定すなわち抗力係数が一定の値に近づくことが伺える。この要因について、局部的圧力の観点から若干の考察を加える。

図-8 に Case1 における h_d' と P_i の関係を示す。 P_i は大気圧を 0, 上流側側面の圧力を正, 下流側側面の圧力を負とした。上流側の圧力は h_d' の小さい段階から、没水深に応じた圧力(傾き 9.8)が生じているが、下流側圧力は上に凸の曲線となっており、没水深に対する圧力の上昇が小さいことが分かる。また、P8 (△印) 以外の青のプロットに着目すると、試験体が完全に没水する $h_d'=0.14\text{m}$ では、殆ど圧力が生じておらず、 h_d' が概ね 0.2m を上回ってから、圧力が生じ始めることがわかる。図-8 の Case1 におけるプロットの傾きは、 $h_d'=0.2\text{m}$ 付近から小さくなっていることから、下流側の面における局部的圧力の発生と合力のプロットの傾きの変化が対応していることがわかる。つまり、 $h_d'=0.14\sim 0.2\text{m}$ において、下流側に没水深に応じた局部的圧力が発生しないことが、図-7 における傾きを大き

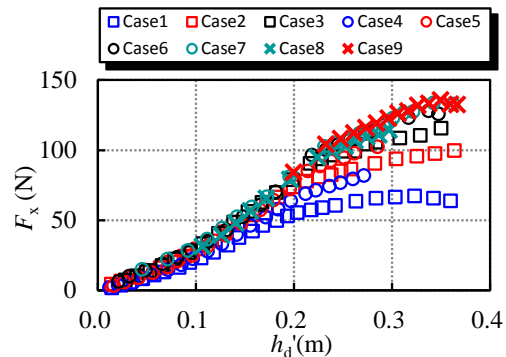


(a) 全没水前

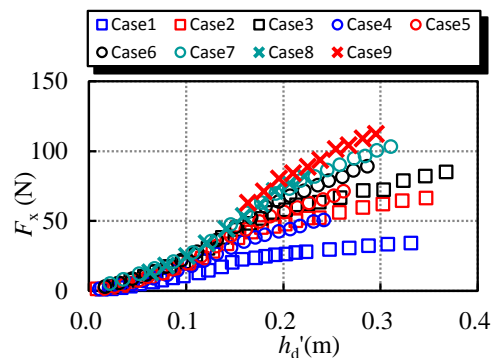


(b) 全没水後

図-6 u_i^2 と F_x の関係 (迎角 90°)

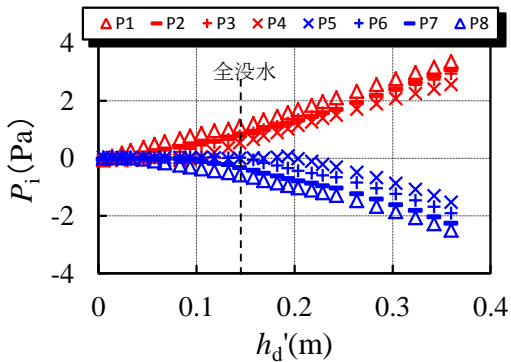


(a) 迎角 90°

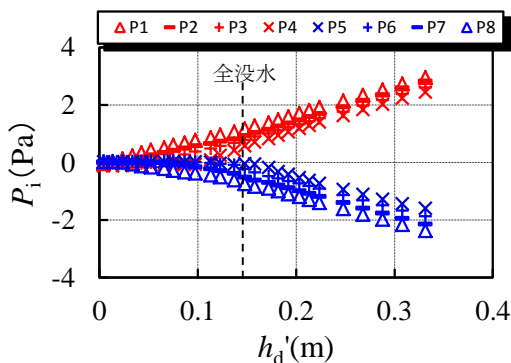


(b) 迎角 45°

図-7 h_d' と F_x の関係



(a) 迎角 90°



(b) 迎角 45°

図-8 h_d と P_i の関係

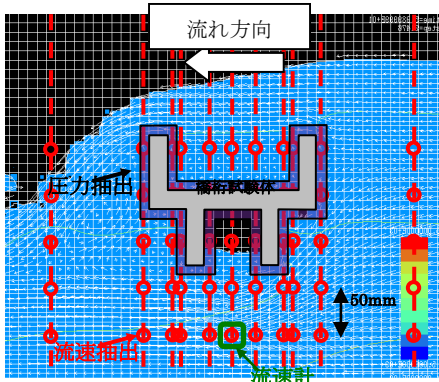


図-9 3次元波動水槽の解析例

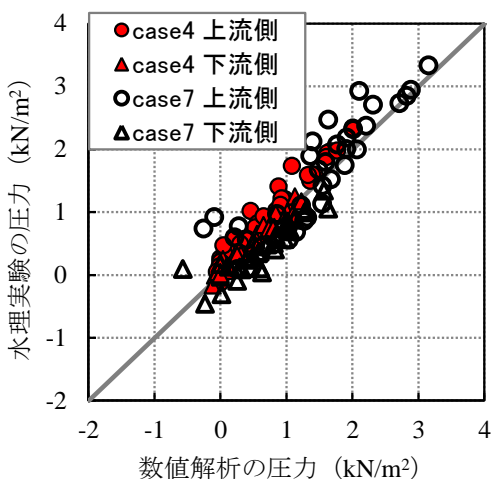


図-10 圧力の比較

くしている要因の一つと考えられる。この傾向は、迎角 45° と比べて 90° のほうが、より顕著となる傾向がある。

前述の局部的圧力の傾向について、数値解析による再現が可能であるか確認するため、3次元数値波動水槽：CADMAS-SURF3D³⁾を用いた数値解析を実施した。図-9に数値解析の例を示す。今回の解析では、本水理実験ケースのうち静水深が 0.3m で、流速が最大、最小となる case4 および case7 を対象として、試験体の周辺に発生する圧力分布を算出した。図-10 に、図-2 の圧力計位置における、解析値と実験値の圧力の比較結果を示す。計算格子は試験体周りで $\Delta x = \Delta y = 1\text{cm}$ 間隔として、解析値は、定常状態後の 10 秒間の平均値を用いた。実験値と解析値の圧力分布は概ね一致する結果となった。3次元数値波動水槽は、没水深に応じた試験体下流側の圧力の変化を概ね再現できていると考えられる。したがって、圧力分布の解析結果から、一様流中の橋桁に作用する流体力は概ね評価可能と考えられる。

4. まとめ

(1) 流量が一定の条件では、試験体の没水に伴う u_i / u_1 の減少量は、概ね h_i / h_1 の上昇量に応じた値となった。また、下流側が射流状態の場合は、試験体の没水深に伴う u_i / u_1 、および h_i / h_1 の変化が、流量と関係なく概ね同一の曲線となることがわかった。

(2) 橋桁の高さが水深に対して比較的大きい今回の実験条件において、抗力係数は唯一に定まらないことがわかった。また、下流側が射流状態の場合は上流側の没水深、常流の場合は流量と初期水深の影響が、抗力に対して支配的となることがわかった。

(3) 局部的圧力については、試験体が一定程度没水するまでは、下流側の面において没水深に応じた圧力が発生しない。また、迎角 45° と比べて 90° のほうが、上記の傾向がより顕著であることがわかった。

(4) 3次元数値波動水槽は、没水深に応じた試験体下流側の圧力の変化を概ね再現できていることがわかった。本研究は国土交通省鉄道技術開発費補助金にて実施した。

参考文献

- 1) 重枝, 秋山, 野中, 浅野: 定常自由表面流中の水没物体に働く流体力, 水工学論文集, 第48巻, pp.877-822, 2004.
- 2) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 社団法人 日本港湾協会, 2007.
- 3) CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, (財) 沿岸技術研究センター, 沿岸技術ライブラリー No.39, 2010.
- 4) 清水, 幸左, 佐々木, 竹田: 道路橋の津波による被害分析, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.366-376, 2012