



Hydrauliczne badania modelowe filarów mostowych na przykładzie wybranych mostów Opola

Tomasz Tymiński

Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław

1. Wstęp

W procesie projektowania obiektów hydrotechnicznych w jednokowej mierze należy położyć nacisk na obliczenia konstrukcyjne, związane ze statecznością i wytrzymałością budowli, jak również na analizę (np. położenia zwierciadła wody) i poprawne wymiarowanie hydrauliczne budowli wodnych lub ich elementów.

Podczas przepływu wody przez zabudowany przekrój mostowy następuje spiętrzenie wody przed budowlą hydrotechniczną. Wysokość tego spiętrzenia zależy głównie od geometrii koryta, natężenia przepływu, rodzaju ruchu, a przede wszystkim od kształtu przyczółków i filarów mostowych [3]. Do najczęściej stosowanych w praktyce metod obliczania spiętrzenia wody przed mostem należy zaliczyć: metodę wynikającą z zasady zachowania energii mechanicznej strumienia [5, 7], empiryczną metodę Rehbocka [1, 3, 4] i empiryczną metodę Yarnella [1, 3]. Metody te uwzględniają w swoich formułach obliczeniowych parametry charakteryzujące geometrię filarów.

Niewłaściwie dobrane przez konstruktorów kształty przyczółków i filarów mostowych zwiększają ryzyko powstawania zatorów i lokalnych podpiętrzeń zwierciadła wody. Wezbrane rzeki niosą z sobą różne-

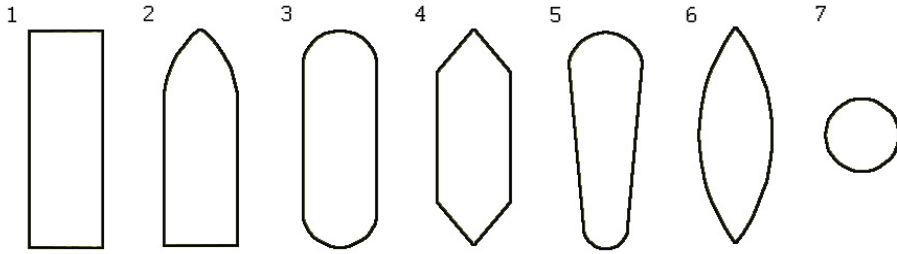
go rodzaju materiały np. namuły, kłody drzew, gałęzie, śmieci, które często zatrzymują się na filarach mostów piętrząc wodę i hamując przepływ (rys. 1). Problem ten nabiera szczególnego znaczenia zwłaszcza zimą, w aspekcie niekorzystnych zjawisk lodowych (rys. 11) i powodzi zatorowych. Najlepszą drogą określenia optymalnego hydraulicznie kształtu filarów mostowych są badania eksperymentalne.



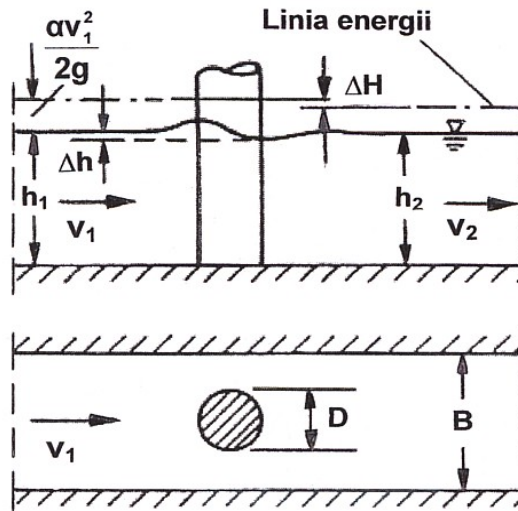
Rys. 1. Skutki nie najlepiej dobranego kształtu filara mostu
Fig. 1. Results of inappropriately selected shape of bridge pier

2. Metodyka i zakres badań laboratoryjnych

W Laboratorium Wodnym Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu przeprowadzono badania hydrauliczne opływu modeli pojedynczych filarów mostowych o różnego rodzaju kształtach (rys. 2), charakterystycznych dla wybranych mostów Opola (rys. 4-8). Wielkość obiektów w naturze oraz możliwości techniczne laboratorium umożliwiły odwzorowanie filarów w skali 1:20. Rozpatrując działanie sił przy przepływie wody przez przekrój mostowy można stwierdzić, że dominującą rolę odgrywa tu siła ciężkości. Wpływ innych czynników (np. lepkości) jest w tym przypadku niewielki i można je pominąć. Do przeliczeń odpowiednich wartości z modelu na naturę i odwrotnie zastosowano właściwe dla tego przypadku hydrodynamiczne kryterium podobieństwa Froude'a [4, 6, 8].



Rys. 2. Kształty badanych filarów
Fig. 2. Shape of investigated bridge pillars



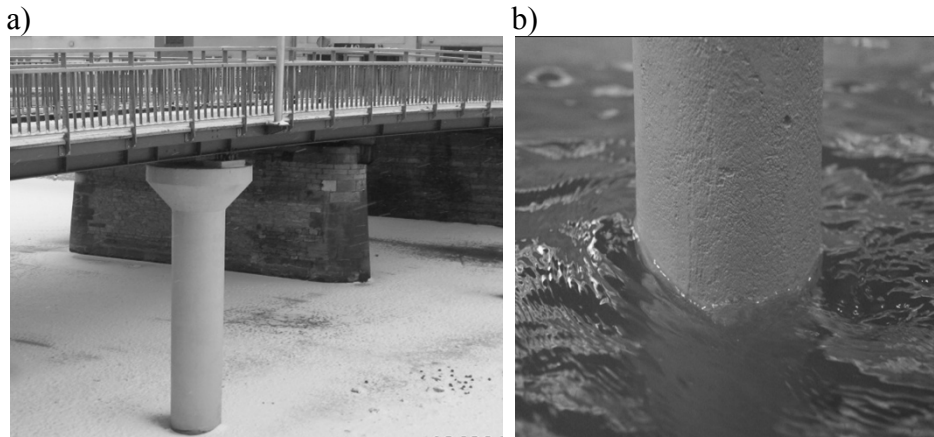
Rys. 3. Schemat ideowy badań
Fig. 3. Schematic diagram of research

Główną ideą badań było potraktowanie filara jako przeszkody powodującej lokalne piętrzenie wody oraz próba wyznaczenia najbardziej opływowego kształtu filara. Opływowość poszczególnych kształtów filarów mostowych badano metodą pomiarów i obserwacji spiętrzenia Δh zwierciadła wody przed filarem (rys. 3) oraz rozkładów prędkości lokalnej strumieni wody wokół filara (rys. 10). Do pomiarów prędkości miejscowych wykorzystano sondę elektromagnetyczną typu PEMS (rys.

5, 6), a głębokości: h_1 przed i h_2 za filarem, mierzono za pomocą dwóch wodowskazów szpilkowych o dokładności $\pm 0,1$ mm.

Pomiary natężenia przepływu, prędkości lokalnych oraz spiętrzenia zwierciadła wody na badanych filarach przeprowadzono dla następujących parametrów hydraulicznych:

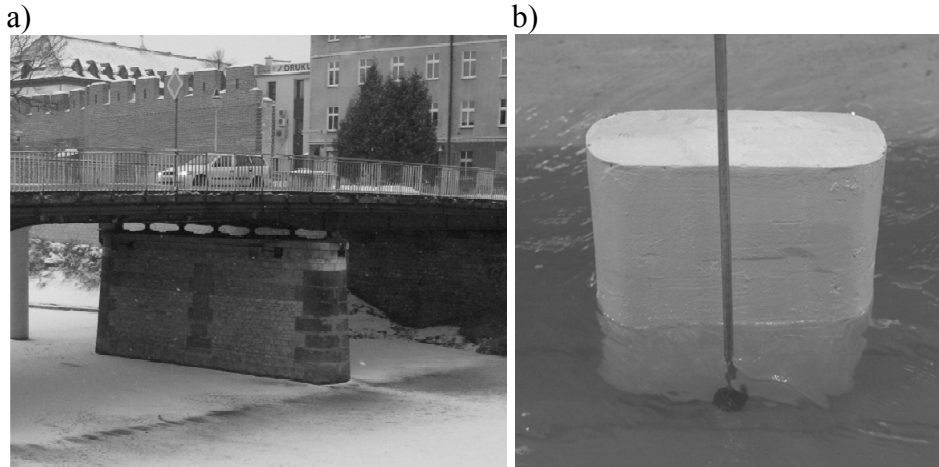
- przepływ jednostkowy $q = 0,037 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$,
- głębokość w korycie bez filarów $h = h_2 = 210$ mm,
- spadek dna koryta $I = 0,3\text{‰}$,
- prędkość miejscowa $v = 0,010 \div 0,593$ m/s,
- spiętrzenia zwierciadła wody na filarze $\Delta h = 7 \div 30$ mm.



Rys. 4. a) Kładka dla pieszych przy moście Katedralnym, b) Model badawczy filara nr 7/rys. 2

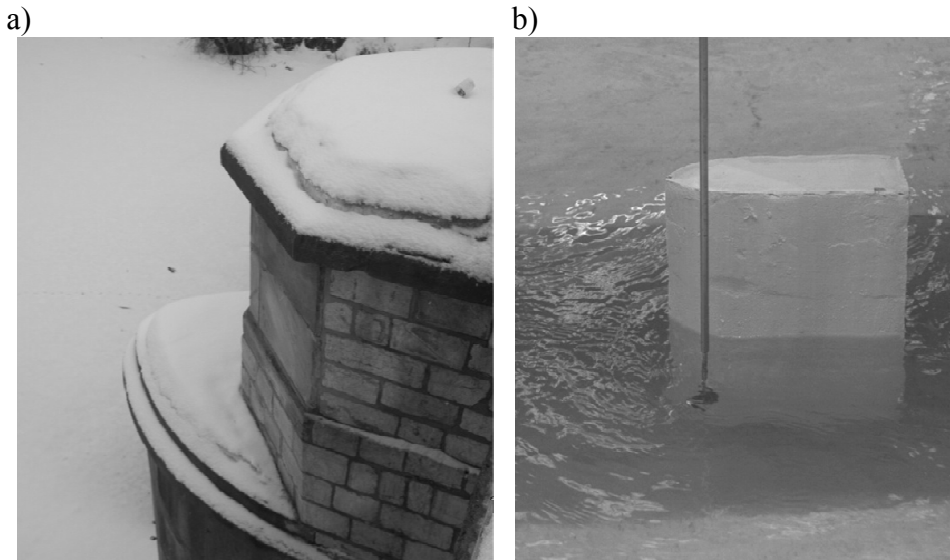
Fig. 4. a) Footbridge next to the Cathedral Bridge (Most Katedralny), b) Research model of pier no. 7/Fig. 2

Wyniki pomiarów hydraulicznych na modelach wykorzystano do obliczenia dla każdego z filarów współczynników strat miejscowych ζ [4, 6, 9], współczynników oporów opływu c_w [4, 8] oraz współczynników kształtu: δ – Rehbocka i K - Yarnella [1, 3]. Porównywanie wartości tych współczynników (tab. 2, 3) przyjęto za kryterium oceny opływowości badanych filarów.



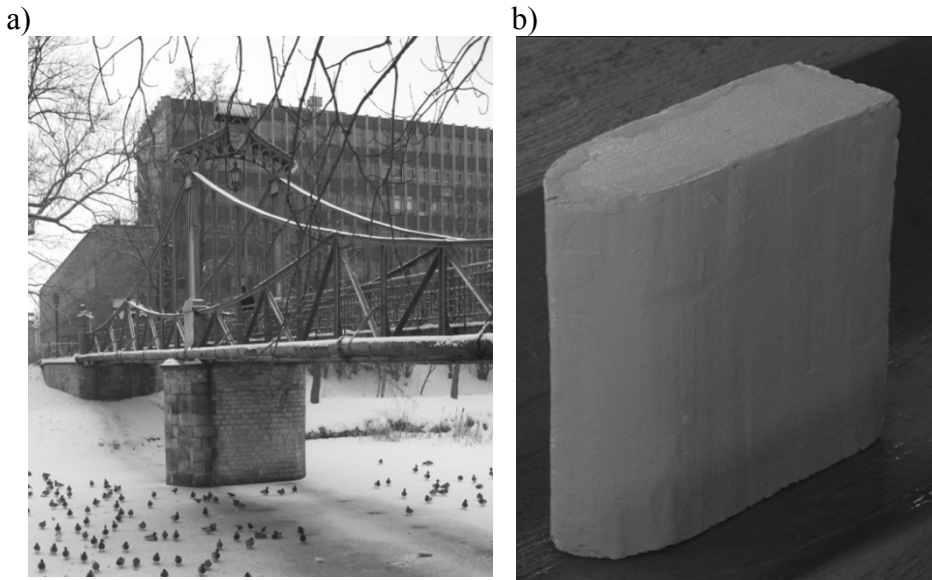
Rys. 5. a) Most Katedralny – typ filara nr 3/rys. 2, b) Pomiar prędkości lokalnej sondą elektromagnetyczną PEMS

Fig. 5. a) The Cathedral Bridge (Most Katedralny) – type of pier no. 3/Fig. 2, b) Measurement of local velocity with a PEMS electromagnetic sensor



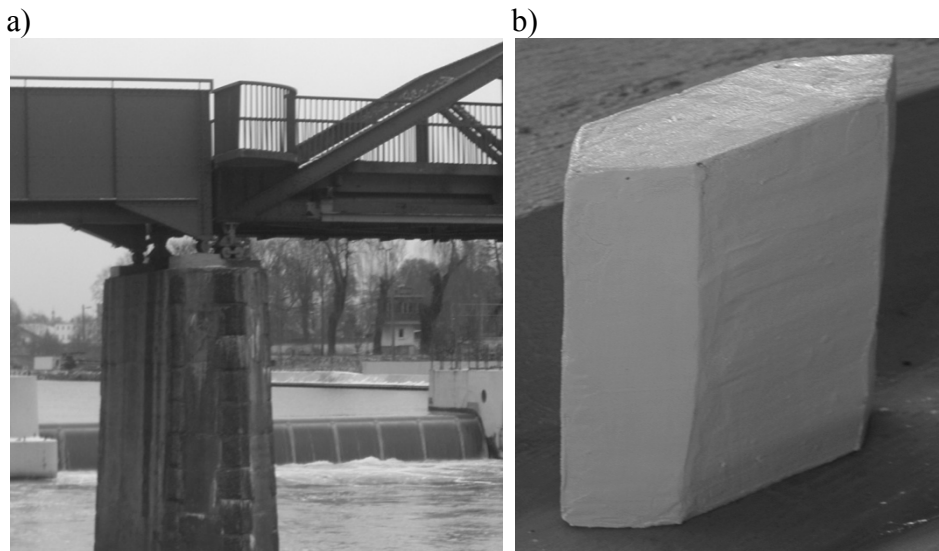
Rys. 6. a) Most Zamkowy – typ filara nr 2/rys. 2, b) Pomiar rozkładu prędkości sondą elektromagnetyczną PEMS

Fig. 6. a) The Castle Bridge (Most Zamkowy) – type of pier no. 2/Fig. 2, b) Measurement of velocity distribution with a PEMS electromagnetic sensor



Rys. 7. a) Most Groszowy, b) Model badawczy filara nr 2/rys.2

Fig. 7. a) The Groszowy Bridge, b) Research model of pier no. 2/Fig.2



Rys. 8. a) Most na wyspę Bolko, b) Model badawczy filara nr 4/rys.2

Fig. 8. a) The bridge to the Bolko Island, b) Research model of pier no. 4/Fig.2

3. Badania własne

3.1. Podstawy teoretyczne

Oporo opływu filarów mostowych można wyznaczać ze wzoru (patrz rys. 3):

$$F = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v_1^2 = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot D \cdot h_1 \cdot v_1^2 \quad (1)$$

gdzie:

F – siła oporu przy opływie pojedynczego filara [N],

c_w – współczynnik oporów kształtu przy opływie filara [-],

D – szerokość filara [m],

h_1 – głębokość wody przed filarem [m],

A – powierzchnia rzutu filara prostopadła do kierunku przepływu

($A = D h_1$) [m²],

v_1 – średnia prędkość w przekroju strumienia dopływającego do filara

[m/s],

ρ – gęstość wody [kg/m³].

Praca wykonana przez siłę oporu przy opływie filara przez ciecz nieściśliwą, równa jest co do wartości stracie energii układu. Bilans ten w odniesieniu do jednostki czasu możemy zapisać następująco:

$$F \cdot v_1 = \rho \cdot g \cdot v_1 \cdot A_1 \cdot \Delta H \quad (2)$$

gdzie:

A_1 – powierzchnia przekroju przepływowego ($A_1 = B h_1$) [m²],

B – szerokość koryta [m],

h_1 – głębokość wody przed filarem [m],

ΔH – lokalna strata energii [m], którą obliczyć można ze wzoru:

$$\Delta H = \zeta \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (3)$$

gdzie:

ζ – współczynnik strat miejscowych [-].

Po podstawieniu wzorów (1) i (3) do równania (2) otrzymamy:

$$\frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v_1^2 \cdot v_1 = \rho \cdot g \cdot v_1 \cdot A_1 \cdot \zeta \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (4)$$

stąd:

$$c_w = f(\zeta; A; A_1) = \zeta \cdot \frac{A_1}{A} \quad (5)$$

Po wprowadzeniu do równania Bernoulliego wzoru na straty miejscowe (3) i jego przekształceniu [4, 6], uzyskamy formułę do wyznaczania współczynnika oporów ζ dla badanych filarów mostowych w następującej postaci:

$$\zeta = \frac{2g(h_1 - h_2) + \alpha(v_1^2 - v_2^2)}{v_1^2} \quad (6)$$

gdzie:

v_1 i v_2 – średnie prędkości przepływu w przekroju strumienia przed i za filarem [m/s],

h_1 – głębokość wody przed filarem [m],

h_2 – głębokość wody za filarem [m],

α – współczynnik St. Venanta [-].

Współczynnik oporów kształtu c_w przy opływie filara można więc w prosty sposób wyznaczyć znając wartość współczynnika strat miejscowych ζ otrzymaną z pomiarów hydraulicznych oraz wzoru (6).

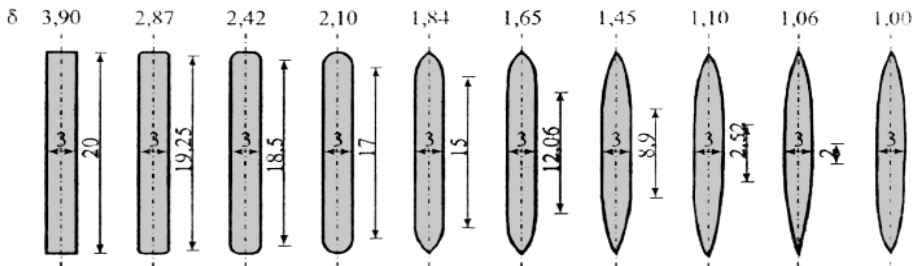
Oprócz współczynników oporów c_w i ζ , kształt filarów mostowych i jego wpływ na lokalne spiętrzenie wody Δh , można analizować wykorzystując empiryczną formułę Rehbocka, właściwą dla mostów z dowolną liczbą filarów (również dwuprzęsłowych z pojedynczym filarem) [1, 3, 4]. Na szczególną uwagę zasługuje w niej współczynnik δ , który charakteryzuje geometrię filarów (rys. 9). W zagadnieniach projektowych jego wartość można dobierać z literatury [1, 3, 4]. Zakładając brak rozmycia dna w przekroju mostowym, spiętrzenie wody Δh [m] przed filarem wynosi:

$$\Delta h = \delta(0,72 + 1,2\alpha_0 + 40\alpha_0^4)(1 + 2\omega)\alpha_0 \frac{v_2^2}{2g} \quad (7)$$

gdzie:

ω – stosunek wysokości prędkości przepływu do głębokości w przekroju poniżej mostu [-],

α_0 – stosunek sumy powierzchni czołowej filarów do całkowitej powierzchni przepływu w przekroju poniżej mostu [-],
 v_2 – średnia prędkość przepływu w przekroju strumienia poniżej mostu [m/s].








Rys. 9. Współczynniki δ do wzoru Rehbocka [1]

Fig. 9. Non-dimensional shape coefficients δ for the Rehbock's formula [1]

Tabela 1. Współczynniki K do wzoru Yarnella (na podst. [3])

Table 1. Non-dimensional shape coefficients K for the Yarnell's formula [3]

Kształt filara	K
 Zakończenie półkoliste	0,9
 Filar dwusłupowy ze ścianą łączącą	0,95
 Filar dwusłupowy bez ściany łączącej	1,05
 Zakończenia trójkątne	1,05
 Filar prostokątny	1,25

Na podobnej do Rehbocka (7) formule opiera się empiryczna metoda Yarnella [1, 3]. Kształt filarów mostowych charakteryzuje w niej współczynnik K (tab. 1), którego wartość można dobierać z literatury [1, 3]. Formuła Yarnella pozwala obliczać różnicę rzędnych zwierciadła wody w przekrojach położonych powyżej i poniżej mostu:

$$\Delta h = 2K(K + 10\omega - 0,6)(\alpha_0 + 15\alpha_0^4) \frac{v_2^2}{2g} \quad (8)$$

gdzie:

ω – stosunek wysokości prędkości przepływu do głębokości w przekroju poniżej mostu [-],

α_0 – stosunek sumy powierzchni czołowej filarów do całkowitej powierzchni przepływu w przekroju poniżej mostu [-],

v_2 – średnia prędkość przepływu w przekroju strumienia poniżej mostu [m/s].

3.2. Wyniki badań

Rezultaty pomiarów głębokości h_1 i h_2 (wody górnej i dolnej), natężenia przepływu Q oraz prędkości przed i za filarem (v_1 , v_2) umożliwiły obliczenie z formuły (6) współczynników oporów ζ oraz spiętrzeń zwierciadła wody ($\Delta h = h_1 - h_2$). Znając wartości parametru ζ dla badanych filarów możliwe było wyznaczenie ze wzoru (5) współczynników oporów opływu c_w . Należy podkreślić, że w tym przypadku współczynnik ζ odnosi się do średniej prędkości przepływu przed przeszkodą $\zeta = f(v_1) = \zeta_1$. W praktyce wyznacza się go najczęściej dla prędkości za przeszkodą $\zeta = f(v_2) = \zeta_2$ np. ze wzoru (6) wstawiając do mianownika v_2 zamiast v_1 . W tabeli 2 zamieszczone zostały obie wartości tego parametru.

Tabela 2. Przykład otrzymanych wyników badań

Table 2. Sample results of measurements

Badany parametr		Typ filara (na podst. rys. 2)						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
spiętrzenie przed filarem; mm	Δh	30,0	12,0	17,0	12,0	25,0	7,0	10,0
współczynnik strat miejscowych; -	ζ_1	3,13	0,84	1,41	0,84	2,42	0,33	0,63
	ζ_2	2,36	0,75	1,20	0,75	1,91	0,31	0,57
współczynnik oporów kształtu; -	c_w	5,13	1,76	2,76	1,76	4,24	0,75	1,35

Wykorzystując uzyskane wartości Δh oraz prędkości przepływu v_2 , obliczono współczynniki δ , po przekształceniu wzoru (7), dla każdego z badanych filarów i porównano z danymi literaturowymi [1, 3, 4]. W analogiczny sposób wyznaczono współczynniki kształtu filara K wykorzystując formułę Yarnella (8). Wyniki zestawiono w tabeli 3.

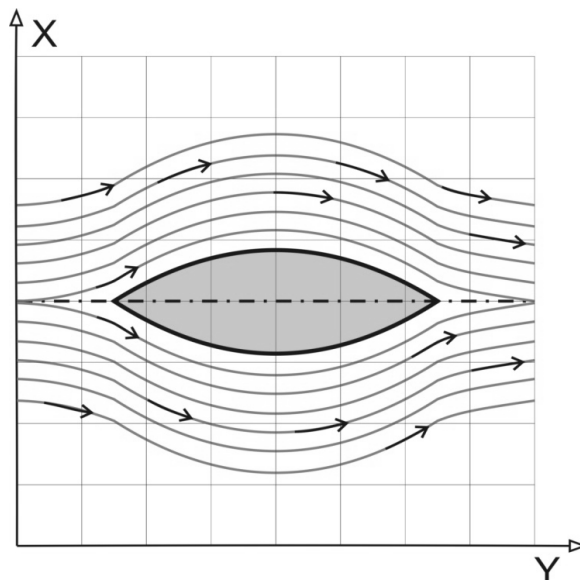
Pomiary laboratoryjne wielokierunkową sondą elektromagnetyczną PEMS rozkładu lokalnych prędkości przepływu wokół badanych filarów dostarczyły danych do wykreślenia linii prądu, które przykłado-

wo pokazano na rys. 10. Dodatkowo przeprowadzono w laboratorium symulację przepływu kry lodowej przez przekrój mostowy (rys. 11). Dało to możliwość analizy porównawczej zaburzeń pola prędkości wywoływanych opływem poszczególnych filarów.

Tabela 3. Bezwymiarowe współczynniki kształtu δ i K dla badanych filarów mostowych

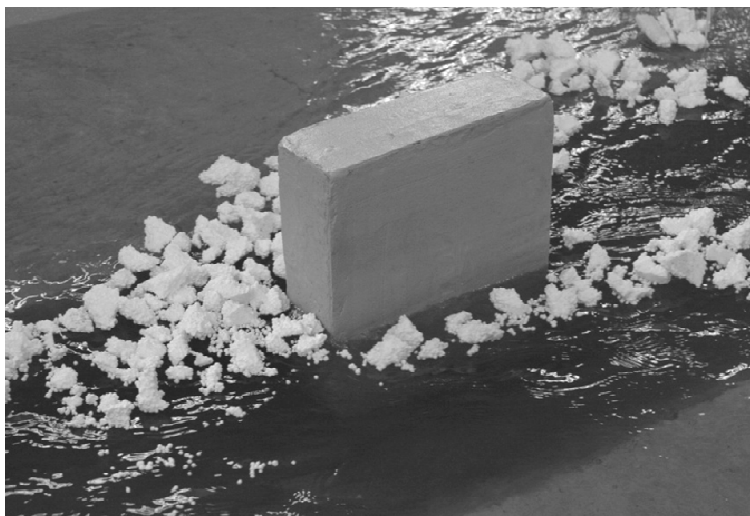
Table 3. Non-dimensional shape coefficients, δ and K , for the selected bridge piers

Typ filara	Parametr Rehbocka δ – wz. (7)		Parametr Yarnella K – wz. (8)	
	δ - z literatury	δ - z pomiaru (wg autora)	K - z literatury	K - z pomiaru (wg autora)
I	3,90	9,80	1,25	1,42
II	1,84	2,94	-	1,10
III	2,10	4,71	0,90	0,86
IV	-	1,92	1,05	1,06
V	-	7,00	-	0,62
VI	1,00	0,28	-	0,25
VII	-	0,28	1,05	1,00



Rys. 10. Linie prądu przy opływie filara nr VI

Fig. 10. Stream lines by flow around the pier no.VI



Rys. 11. Symulacja przepływu kry lodowej na badanym filarze nr I
Fig. 11. Simulation of ice floes floating at the investigated pier no I

4. Analiza i wnioski

Przeprowadzone badania i obserwacje laboratoryjne dały podstawę do analizy jakościowej zjawiska opływu różnego rodzaju kształtów filarów mostowych. Potwierdziły one wyraźne, niezależne od kształtu, oddziaływanie filarów na warunki hydrauliczne przepływu w korycie. Tego typu zabudowa techniczna ewidentnie zmniejsza przekrój czynny przepływu, a co za tym idzie przepustowość koryta.

W każdym badanym przypadku występowało lokalne spiętrzenie zwierciadła wody przed filarem. Analiza danych pomiarowych (tab. 2) wykazała, że największe tego typu zaburzenia przepływu wywoływał filar nr I (rys. 2/1), natomiast najmniejsze – filar nr VI (rys. 2/6). Pomiarzy potwierdziły, że największe zmiany powodują filary prostokątne, mniejsze – zaokrąglone i zastrzone, a najmniejsze – filary o kształcie opływowym wrzecionowatym. Z tego powodu, teoretycznie najlepszy byłby filar w kształcie wrzeciona (rys. 10). W praktyce nie jest on stosowany, podobnie jak filar o profilu nr V (rys. 2), ponieważ powoduje niekorzystny rozkład obciążeń na fundament [2].

W przypadku filarów o kształcie prostokątnym nr I i II (rys. 2/1-2; rys.11) zaobserwowano, większe niż dla pozostałych, zawirowania

wokół filara, co może powodować rozmycia dna w przekroju mostowym. Zjawiska tego nie zaobserwowano w przypadku filarów o dużej opływowości (rys. 2/3-6).

Największe współczynniki oporów (tab.2) charakteryzują najmniej opływowe filary (np. filar nr I ma $\zeta = 2,36$ oraz $c_w = 5,13$), a najmniejsze – filary o kształcie bardziej opływowym (np. filar nr VI ma $\zeta = 0,31$ oraz $c_w = 0,75$). Wartości uzyskanych w badaniach współczynników kształtu (tab. 3) potwierdzają słuszność stosowania formuły Yarnella (8) dla wszystkich badanych filarów. W przypadku wzoru Rehbocka (7) można było zauważyć wyraźną prawidłowość, która polega na niemal dwukrotnym zaniżaniu wartości współczynnika kształtu δ w stosunku do wyników eksperymentów. W przypadku formuły Yarnella – uzyskano porównywalną zgodność wyników (tab. 3).

Otrzymane wyniki z badań laboratoryjnych mogą być wykorzystane przy weryfikacji wzorów Rehbocka (7) i Yarnella (8) stosowanych w hydraulicznych obliczeniach mostów. Dla wprowadzenia ewentualnych poprawek do wartości literaturowych (rys. 8, tab. 1) badanych współczynników kształtu, potrzebne jest rozszerzenie ilościowego zakresu przeprowadzonych doświadczeń.

Przeprowadzone eksperymenty o cechach badań podstawowych mają również znaczenie praktyczne. Filary badanych mostów Opola (rys. 4, 6-8) charakteryzują współczynniki oporów i parametry kształtu typowe dla wysokiej opływowości (nr II, IV, VII – rys. 2). Filary o kształtach najmniej korzystnych hydraulicznie (filar nr I) nie występują w mostach Opola, a te istniejące - zostały zaprojektowane poprawnie. Biorąc pod uwagę, że obecnie rzadko do zabezpieczenia filarów np. przed krą lodową stosuje się izbice, ich rolę mogą przejąć częściowo filary o kształtach części napływowej nr II, IV i VI (rys. 2). Osobny problem badawczy, w aspekcie przepustowości mostu, stanowi kwestia poprawnego wymiarowania tzw. światła mostu. To ono stanowi zazwyczaj najsłabsze ogniwo w systemie, swoisty gorset na rzece, który determinuje przepustowość całego obiektu.

Literatura

1. Handbuch: *WaspTools, Version 5.1*. L+N Ingenieurgesellschaft, Burgwedel 2000.
2. **Jarocki W.:** *Budownictwo wodne, tom II*. PWRiL, Warszawa 1963.
3. **Kubrak J.** (red.), **Nachlik E.** (red.): *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
4. **Naudascher E.:** *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. Springer-Verlag, Wien & New York 1987.
5. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. Załącznik nr 1: Obliczanie świateł mostów i przepustów. Dziennik Ustaw Nr 63, poz.735, Warszawa 3 sierpnia 2000.
6. **Sobota J.:** *Hydraulika i mechanika płynów*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław 2003.
7. **Sobota J.:** *Hydraulika i hydrologia*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław 2004.
8. **Strobl T., Zunic F.:** *Wasserbau*. Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg 2006.
9. **Szewczyk H.** (red.): *Mechanika płynów, ćwiczenia laboratoryjne*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.

Hydraulic Model Research on Bridge Piers Based on the Example of Selected Bridges in Opole

Abstract

Designers' inappropriate choice of shapes for bridge abutments and piers increase the risk of ice jams and local build-ups of water. Swollen rivers carry various materials, which often end up on bridge piers causing water to rise up and slowing down its flow. In view of adverse ice phenomena and floods caused by ice jams, this problem becomes particularly important in winters.

In the Water Laboratory of the Wrocław University of Environmental and Life Sciences hydraulic research has been carried out on 1:20 models of flow around pier for various shapes typical for selected bridges in Opole. The principal idea behind this research was to consider a pier an obstacle that causes local water swelling and attempt to identify the most streamlined bridge pier shape. Streamliness of individual piers was investigated by means of measurements, observations of local velocity distribution for water fluxes and observa-

tions of water swelling in front of the pier. Results of hydraulic parameter measurements were used to calculate, for each pier, the local loss coefficients ζ , the flow-around drag coefficients c_w and the shape factors in the computational formulae of Rehbock (δ) and Yarnell (K). Comparison of these coefficients was used as a criterion for streamliness of investigated piers.

In each case being studied local water build-up was observed in front of the pier. Measurement data analysis revealed that the biggest turbulences were caused by the pier no I, and the smallest by the pier no VI. Measurements have confirmed that rectangular piers cause the greatest changes to the velocity field. These changes are smaller for piers which are rounded and pointed and are the smallest for those which are streamlined and cigar-shaped. For this reason the best choice would be, in theory, to design cigar-shaped piers. This shape is not used in practice, however, due to its disadvantageous load distribution over the foundations. For rectangular piers no I and II turbulences around the pier were bigger than those observed for other shapes. One might expect that this shape increases the risk of soil erosion in the vicinity of piers. Measured drag and shape coefficient values quantitatively confirm the qualitative analysis of the phenomenon. The biggest drag coefficient values were obtained for the two least streamlined piers (e.g. for pier no I $\zeta = 2.36$), whereas the most streamlined piers produced the smallest values (e.g. pier no VI with $\zeta = 0.31$).

Laboratory measurements enabled us to verify the formulas of Rehbock and Yarnell used in hydraulic bridge calculations. For the Rehbock's formula a certain distinct regularity could be observed: the shape factor δ was almost twice too low as compared to the results of experiments. In what concerns the formula of Yarnell, results of author's experiments are in good agreement with the theory.

