

Ewolucja architektury pylonów mostów wiszących



tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

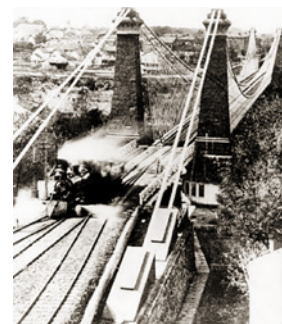
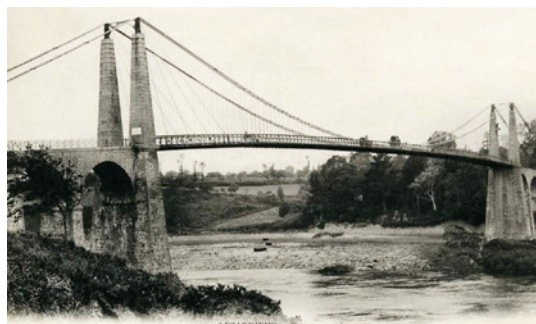
Pylony współczesnych mostów wiszących są jak wieże średniowiecznych katedr i minaretów lub wysokie maszty telekomunikacyjne Fritza Leonhardta. Stanowią doskonały punkt orientacyjny, o czym przed 150 laty pisał John Roebling, wskazując m.in. na most Brookliński w Nowym Jorku. Są najbardziej widoczną i jednocześnie dominującą częścią wiszącej konstrukcji mostowej. Ich forma architektoniczna i proporcje wpływają na wizualny odbiór całej konstrukcji oraz jej atrakcyjność i popularność. One też przez wyjątkowy układ konstrukcyjny w znacznym stopniu rzutują na to, czy most stanie się ikoną miejsca, w którym został wzniesiony. Z technicznego punktu widzenia pylony spełniają ważną funkcję, utrzymują bowiem w stabilnym położeniu główne kable nośne i dają wsparcie pomostom komunikacyjnym.

David P. Billington, profesor Princeton University, w książce *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering* kompleksowo analizuje projekty i konstrukcje budowlane Thomasa Telforda (1757–1834), Isambarda K. Brunela (1806–1859), Gustave'a Eiffela (1832–1923), Johna Roeblinga (1806–1869), Jamesa B. Eadsa (1820–1887), Othmara H. Ammanna (1879–1965), Roberta Maillarta (1872–1940), Eugène'a Feysineta (1879–1962), Féliksa Candela (1910–1997), Fazlura R. Kahna (1929–1982) oraz Christiana Menna (1927–2018). Nie wszyscy oni mieli do czynienia z budową mostów wiszących, tym niemniej ich prace projektowe wyróżniały się nowymi formami architektonicznymi w okresie zachodzących w Europie przemian techniczno-technologicznych. Na ich podstawie David P. Billington próbuje określić wspólne elementy zaprojektowanych przez nich konstrukcji i sprowadza je do trzech „e”, czyli efektywności, ekonomiczności i elegancji. Przez efektywność rozumie dążenie do minimalnej ilości materiałów, co skutkuje mniejszą wagą, niższym kosztem i mniejszą wizualnie masą obiektu. Ekonomiczność, czyli minimalny koszt budowy, wiąże z prostotą konstrukcji, łatwością utrzymania i ze zintegrowaną formą. Natomiast ogólna niechęć do brzydoty prowadzi bezpośrednio do poszukiwania inżynierskiej elegancji, estetycznego wyrazu i harmonii, maksymalnego wyrazu estetycznego konstrukcji.

Spróbujmy zatem w odniesieniu do tej ostatniej kategorii, jaką jest elegancja, prześledzić zmiany form architektonicznych pylonów mostów wiszących w perspektywie czasowej, czyli od powstania pierwszych konstrukcji po czasy współczesne. A wybiegając nieco w przyszłość, jakie nowe rozwiązania konstrukcji pylonów analizują projektanci i z jakimi wyzwaniem będą musieli się zmierzyć twórcy przyszłych mostów wiszących [1].

Mosty wiszące z murowanymi pylonami w kształcie portali

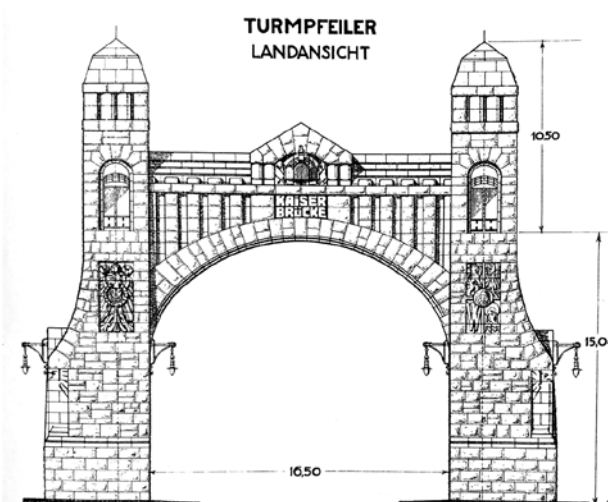
Główny inicjator koncepcji współczesnych konstrukcji wiszących, James Finley (1762–1828), w liście do amerykańskiego biura patentowego jako jedną z charakterystycznych cech mostów wiszących wymienia pylony (wieże). Od czasu powstania pomysłu wiszącej przeprawy do początku XX w., czyli przez pierwszych 100 lat budowy tych konstrukcji, ze względu na wielowiekową znajomość kamieniarskiej technologii budowlanej i ogólną dostępność materiału pylony były wznoszone z kamienia lub cegły. Wzorowano się głównie na konstrukcjach średniowiecznych wież, murów, słupów, filarów kamiennych mostów łukowych. Początkowo dla krótkich mostów każde zawieszenie łańcuchowe miało osobny, murowany, nierzadko stożkowy słup, przypominający kształtem egipski obelisk. Przykładem takich konstrukcji pylonów



Ryc. 1. Mosty Lézardrieux (1840), Belleperche (1841) i Niagara Falls (1855); źródło: www.bridgemeister.com



Ryc. 2. Mosty Menai (1826), Cincinnati (1866) i Brookliński (1883); źródło: www.bridgemeister.com



Ryc. 3. Most Grunwaldzki (1910), oryginalny plan i zdjęcie współczesne; źródło: [3]

mogą być mosty Lézardrieux (Francja, 1840), Belleperche (Francja, 1841), jak również kolejowo-drogowy most wiszący Niagara Falls (USA, 1855; ryc. 1).

Z czasem wraz z koniecznością budowy dłuższych przepraw, zwiększoną odległością między punktami zawieszenia kabli i wysokością pylonów, a w konsekwencji znacznym wzrostem obciążenia stałego, wieże wymagały większego wzmocnienia konstrukcyjnego. Projektanci zainicjowali łączenie pojedynczych słupów, tworząc masywne, grube, kamienne ramy. Systemy zawieszenia pomostów, początkowo w postaci łańcuchów, prętów oczkowych i wielowarstwowych pasów blach, a później w formie wiązek drutów, były wspierane w gniazdach na szczycie murowanych bram. Typową egzemplifikacją są konstrukcje pylonów mostów Menai (Anglia, 1826), Szechenyi (Węgry, 1840), Clifton (Anglia, 1864), Cincinnati (USA, 1866) oraz ikona światowego budownictwa lądowego – most Brookliński (USA, 1883; ryc. 2) [2]. W formie architektonicznej monumentalne pylony nawiązują do łuków triumfalnych wznoszonych w starożytnym Rzymie. Bardzo często łuki triumfalne były stawiane dla upamiętnienia ważnego wydarzenia bądź osoby. Nie ulega wątpliwości, że otwarcie mostu było i jest doniosłym wydarzeniem w życiu każdego miasta, więc brama w formie łuku triumfalnego miała uzasadnienie. Most z tak potężną bramą stawał się symbolem i świadectwem poziomu rozwoju technicznego danej epoki. Architektura ówczesnych portalowych, murowanych pylonów sprowadzała się zasadniczo do dwóch rodzajów rozwiązań: z jedną lub dwoma arkadami zakończonymi półkolistymi, rzymskimi bądź gotyckimi łukami, jak w przypadku mostu Brooklińskiego. W Polsce takim przy-

kładem monumentalnej bramy są pylony jednego z nielicznych mostów wiszących, mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu (dawniej Kaiserbrücke, 1910; ryc. 3). Historia i konstrukcja tej przeprawy nad Odrą zostały wnikliwie i szczegółowo przedstawione przez Jana Biliszczuka, Leszka Budycha i Józefa Rabięgi w albumie *Most Grunwaldzki – Kaiserbrücke 1910–2010*, wydanym z okazji 100-lecia otwarcia tego mostu [3].

Mosty wiszące z pylonami ze stali w kształcie portali

Rewolucja przemysłowo-technologiczna, wprowadzając do budownictwa nowe materiały, takie jak żelazo i stal, miała znaczący wpływ na ewolucję konstrukcji wiszących, w tym również na kształt i konstrukcję pylonów. Pierwszy żelazny pylon został zaprojektowany przez Lefferta L. Bucka (1837–1909) dla mostu Williamsburg w Nowym Jorku. W czasie, kiedy po raz pierwszy opublikowano plany tego mostu w czasopiśmie „Engineering News” (1896), rozwiązanie kratownicowego pomostu spotkało się z falą krytyki ze strony amerykańskich elit inżynierskich. Jednak sama konstrukcja stalowych pylonów zyskała ogólną akceptację. Opinia wyrażona w „Engineering News” sprzeciwiała się zbędnym ozdobnikom i wszelkim próbom ukrywania prawdziwych materiałów i elementów konstrukcyjnych. Zatem ich odsłonięcie zdaniem wielu było zaletą. Zwrócono jednak uwagę na to, że w tak masywnym dziele w centrum wielkiego miasta należy uwzględnić dobry gust projektowy dla zapewnienia przyjemniejszego efektu wizualnego. Architektoniczna forma pierwszego stalowego pylonu w ogólnym zarysie nawiązuje do murowanych w przeszłości portalowych bram.



Ryc. 4. Mosty Williamsburg (1903) i Manhattan (1909); źródło: www.bridgemeister.com

David B. Steinman, budowniczy mostów i współautor książki *Bridges and Their Builders*, bardzo surowo ocenił most Williamsburg, pisząc: „Dzięki niezgrabnej konstrukcji wieży i zbyt głębokim kratownicom konstrukcja sprawia wrażenie kanciastej i niezgrabnej” [4]. Henry Petroski, profesor Duke University i autor książki *Engineers of Dreams: Great Bridge Builders and the Spanning of America*, jest przekonany o tym, że w dużej mierze jest kwestią gustu, czy stojący obok mostu Brooklińskiego most Williamsburg będzie postrzegany jako pefen gracji łabędź, czy brzydkie kaczątko [5]. Podobną opinię można wyrazić, porównując bezpośrednio sąsiadujące ze sobą mosty Manhattan i Brookliński. Dla jednych obserwatorów most Brookliński jest nieprzemijającym dziełem sztuki inżynieryjnej, dla innych z kolei most Manhattan jest symbolem nowego, lepszego czasu i postępu technologicznego (ryc. 4).

W dyskusji o estetyce pylonów mostów Williamsburg i Manhattan prowadzonej na łamach prasy branżowej w 1924 r. głos zabrał Othmar H. Ammann. Ten wybitny projektant mostów pisał: „Podczas gdy wieże mostu Brooklińskiego były wspaniałym przykładem starego, masywnego, murowanego typu, bez wątplenia najbardziej przyjemnego dla oka, koszt stał się wygórowany ze względu na ogromną wagę kamienia potrzebnego

tylko do podparcia pylonów, które mają mieć czterdzieści pięć piętér. Przeciwną skrajność reprezentują smukłe, elastyczne, stalowe wieże. Przy odpowiedniej obróbce architektonicznej, jak w przypadku mostu Manhattan, ten typ może być bardzo przyjemny dla oka, ale często jego konstrukcja sugeruje prymitywną użyteczność. Ten typ jest jednak w większości przypadków najtańszy. Stężone stalowe wieże, jak te zastosowane w moście Williamsburg, mają bardziej masywny wygląd i pewne zalety w montażu, ale jeśli nie są odpowiednio proporcjonalne, wyglądają niezgrabnie”.

Stalowy pylon pierwszego mostu wiszącego Ammanna – mostu George’a Washingtona (1931) – tylko przez przypadek nawiązuje do wcześniejszych nowojorskich mostów wiszących Williamsburg i Manhattan. Widoczna konstrukcja pylonu miała zostać zastąpiona, jak pierwotnie zaprojektował Ammann. Jednak wieloletnia dyskusja i odmienność opinii dotyczących ostatecznego wyglądu pylonów, a ponadto kryzys ekonomiczny lat 30. XX w. sprawiły, że zarząd mostu, tnąc koszty budowy, ostatecznie zrezygnował z obłożenia pylonów betonem i granitem. W takiej niezakrytej formie pylony pozostają do dzisiaj. W ogólnym kształcie projekt ten daje początek nowej formie architektonicznej, typowej dla Ammanna. Charakteryzuje się ona dwukolumnowym, smukłym pylonem bez krzyżulców i rygli, z wysokim, półkolistym portalem. Wielkie powierzchnie kolumn i portali, pod którymi kryją się kratownice, są gładkie. Ich jasny kolor nadaje całej konstrukcji optycznej lekkości, wprowadzając jednocześnie walor dużej wytrzymałości. Do tej formy konstrukcyjnej Ammann będzie powracać w kolejnych projektach mostów: Bronx-Whitestone (1939), Delaware Memorial (1951), Walt Whitman (1957), Throgs Neck (1961) i Verrazzano-Narrows (1964; ryc. 5) [6]. Ammann w całej swojej inżynieryjnej twórczości hołduje tym samym ideałom estetycznym, które wyrażał w swojej wizji sztuki architektonicznej jego nauczyciel z Federalnego Instytutu Politechnicznego w Zurychu Wilhelm Ritter (1847–1906) [7]. Podkreślał on prostotę analizy, znaczenie doświadczenia i doskonałości estetycznej. Kontynuując tę wizję, Ammann, podobnie jak inny szwajcarski budowniczy mostów, Robert Maillart, szczególną uwagę zwracał na estetykę. Do końca życia był wierny zawodowej filozofii, którą bardzo esencjonalnie, ale też stanowczo wyraził stwierdzeniem: „Przy projektowaniu mostu wrażenia estetyczne są tak samo ważne, jak szczegóły techniczne. Budowa brzydkiego mostu to zbrodnia”. Niewątpliwie innowacyjnym pomysłem Ammanna było wykorzystanie na elementy konstrukcyjne poddawane ścisłaniu dwóch nowych materiałów – stali i betonu, z których stal jest całkowicie zatopiona w betonie. Aby ułatwić budowę



Ryc. 5. Mosty George’a Washingtona (1931), Bronx-Whitestone (1939) i Verrazzano-Narrows (1964); źródło: www.bridgemeister.com



Ryc. 6. Mosty Benjamin Franklin (1926); źródło: www.modjeski.com, Ambassador (1929); źródło: <https://en.wikipedia.org>, San Francisco – Oakland (1936), Golden Gate (1937), fot. K. Dąbrowiecki

takiego pylonu, proponował zaprojektowanie stalowego szkieletu tak, aby przenosił większość stałego obciążenia mostu, przy czym beton i stal będą miały udział w przenoszeniu obciążenia ruchomego. Co więcej, zakładał, że beton chroniłby stal przed korozją, zmniejszając w konsekwencji koszty konserwacji, i zapewniałby bardziej monumentalny wygląd. Architektura pylonów została celowo utrzymana w prostocie, aby harmonizować z prostą, stalową konstrukcją. Ammann uważał, że monumentalny efekt musi dawać harmonia bryły i linii, a nie ornamentyka. W efekcie proponował coś w rodzaju żelbetowego pylonu, czyli rodzaj konstrukcji zainicjowanej kilkadziesiąt lat później przez francuskich inżynierów przy budowie mostu Tancarville.

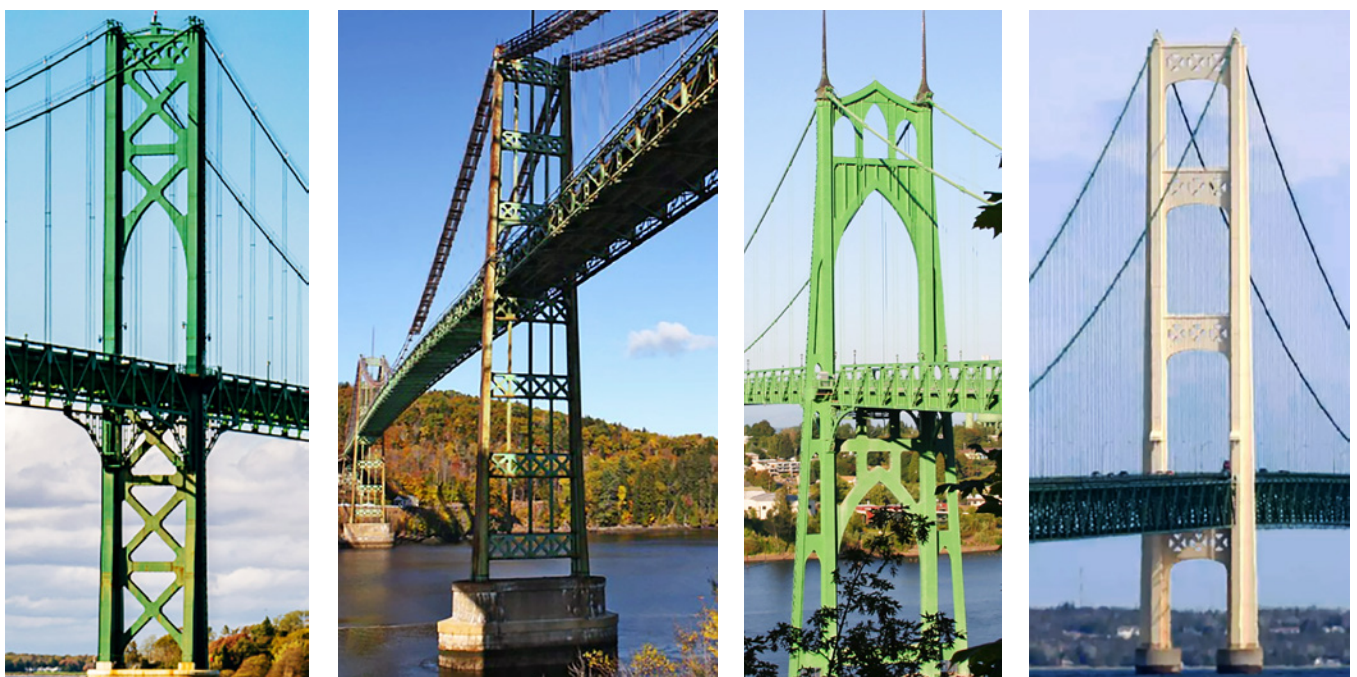
Mosty wiszące ze stalowymi pylonami w kształcie ram

Większość projektantów mostów wiszących o rekordowych długościach zbudowanych w XX w. preferowała jednak stalowe

pylony ramowe, usztywnione krzyżulcami lub ryglami nad i pod pomostem komunikacyjnym. W tej grupie mieści się też most Golden Gate z tą różnicą, że projektanci i architekci dla podniesienia walorów estetycznych zdecydowali się na zakrycie profilowanymi blachami krzyżowych usztywnień nad pomostem [8].

Wśród wielu znakomitych inżynierów na szczególną uwagę zasługują Ralph Modjeski (1861–1940) i David B. Steinman (1886–1960), gdyż to oni w pierwszej połowie XX w. w równym stopniu co Gustav Lindenthal (1850–1935) i Ammann wytyczali nowe kierunki i trendy rozwoju tych konstrukcji.

Ralph Modjeski oprócz licznych kratownicowych mostów kolejowych jest autorem (projektantem) lub współautorem (konsultantem) również mostów wiszących. Są to znane i podziwiane mosty Manhattan (1906), Camden (Benjamin Franklin, 1926), Ambassador (1929) i most San Francisco – Oakland (1936; ryc. 6). Modjeski miał bardzo klarowną i zbieżną z Ammannem opinię



Ryc. 7. Mosty Mount Hope (1929), Waldo-Hancock (1931), St. John's (1931) i Mackinac (1957); źródło: <https://en.wikipedia.org>

na temat estetyki mostów. W komentarzu do artykułu o mostach pisał m.in.: „Jeśli konstrukcja ma być piękna, jej strona estetyczna musi być traktowana na równi z jej stabilnością. Obie muszą prowadzić projektanta od samego początku projektu; szkielec musi być zbudowany w harmonii z ornamentami”. W projektowanych pylonach wprowadził krzyżowe usztywnienia oraz drobne, konstrukcyjne ornamenty w portalu. Na szczególną uwagę zasługuje pylon mostu Camden (Benjamin Franklin) z regularnymi, wielopoziomowymi, krzyżowymi usztywnieniami i ryglami stalowych słupów. Górną część zdobi ażurowy portal, który ma lustrzane odbicie w części nad pomostem, z dodatkowo wstawionym nad jezdnią profilowanym łukiem.

David B. Steinman, znakomity inżynier i wielki rywal Ammanna, miał zupełnie odmienną wizję estetyki mostów i bardzo różniła się ona od koncepcji Ammanna. Wystarczy przyrzeć się jego mostom, aby uchwycić wielki kontrast pomiędzy jego finezją konstrukcyjną a masywnością pylonów konkurenta. Dla Steinmana stal jest materiałem o najwyższym potencjale harmonijnego połączenia piękna i siły, a piękno stali wyrażane jest, w jego opinii, wieloma lekkimi elementami. Ideę tę najlepiej ilustruje most St. John's ze skomplikowanymi formami i licznymi elementami dekoracyjnymi, które zostały wprowadzone dla podniesienia jego walorów artystycznych (ryc. 7). Pochylone pylony zakończone są gotyckimi łukami, nad którymi górują strzeliste iglice. Może taka forma wydaje się nieco przestarzała, jednak daje wyraz pragnienia stworzenia przez Steinmana, jak zostało to określone w broszurze firmy Robinson & Steinman, „poezji ponad rzeką” i „symfonii z kamienia i stali”. Henry Petroski odnosi się dość sceptycznie do tych określeń i bardzo krytycznie ocenia rozwiązania Steinmana, pisząc o nieudanej integracji pylonów i pomostu oraz o niezintegrowaniu konstrukcji z naturalnym środowiskiem. Największe dzieło Steinmana – most Mackinac (1957) – przez wprowadzenie do konstrukcji ażurowych portali oraz rygli w pełni oddaje ducha jego udoskonalonej formy estetyki. David P. Billington, pisząc o estetyce inżynierii, zwraca uwagę głównie na to, że rozwiązania Steinmana pomogły w upowszechnieniu nowego pojmowania inżynierii jako dziedziny sztuki [9].

Mosty wiszące z pylonami z betonu w kształcie usztywnionych, prostych ram

W drugiej połowie XX w. w celu obniżenia kosztów budowy coraz dłuższych mostów wiszących stalowe pylony zastąpiono

betonowymi konstrukcjami. W Normandii, przy ujściu Sekwany do Oceanu Atlantyckiego, został zbudowany most wiszący Tancarville (1959), którego pylony wykonano ze zbrojonego betonu. Wybór takiego materiału był naturalną alternatywą w przypadku elementów konstrukcyjnych poddawanych głównie działaniu sił ściskających. Było to znaczne odstępstwo od amerykańskich rozwiązań dotychczas stosowanych w budowie mostów wiszących. Projektantem pylonów był Nicolas Esquillan (1902–1989), doświadczony inżynier i autor wielu łukowych, betonowych mostów i wiaduktów, jak również ogromny entuzjasta i propagator prefabrykacji i standaryzacji w sektorze budownictwa publicznego we Francji.

W ślad za francuską innowacyjną metodą wznoszenia pylonów przy użyciu betonu poszli projektanci i inżynierowie mostu Little Belt (1970). Głównym projektantem był Christen Ostenfeld (1900–1976), duński inżynier budownictwa lądowego, zwolennik sprężonego betonu i metody Freyssineta, którą zaadaptował do warunków klimatycznych Danii [10]. Pomimo zbliżonych wymiarów do mostu Tancarville widać znaczną różnicę w architekturze i profilu konstrukcji. Wysokość belki portalowej jest mniejsza, podobnie jak belki między słupami pylonu pod pomostem. Rozstaw słupów jest ponad dwukrotnie większy niż w moście francuskim mającym rozstaw tylko 12,5 m przy nieznacznie mniejszej wysokości pylonów. Skutkiem zmienionych proporcji duński most sprawia wrażenie bardziej masywnego i o większej wytrzymałości konstrukcyjnej.

Pod koniec lat 60. XX w. rząd brytyjski zatwierdził plany budowy długo oczekiwanego mostu Humber. Głównym biurem projektowym została firma Freeman Fox & Partners. Jej udziałem były wcześniej zaprojektowane mosty Forth i Severn. Most Humber (1981) stanowił niemałe wyzwanie i ryzyko dla brytyjskich inżynierów ze względu na rekordowe rozmiary konstrukcji.

Genezę implementowania betonowych pylonów zamiast stalowych w tym projekcie wyjaśnił Michael Parsons (1928–2021), inżynier konstruktor i jeden z autorów opływowego, płytkiego pomostu z firmy Freeman Fox & Partners, w wywiadzie przeprowadzonym przez Thomasa Leana w 2012 r. „Stało się to wtedy, kiedy nie byłem jeszcze współnikiem, w zarządzie mostu Humber nie było Billa Browna, Gilbert Roberts odszedł na emeryturę, więc pozostali współnicy zdecydowali, że inżynierem odpowiedzialnym będzie Bernard Wex. Był dobrym człowiekiem, dobrym



Ryc. 8. Mosty Tancarville (1959); źródło: www.bridgemeister.com, Little Belt (1970); źródło: www.bridgemeister.com, Humber (1981); źródło: www.bridginfo.net, Tsing Ma (1997); źródło: <https://en.wikipedia.org>, Great Belt (1998); źródło: www.bridgemeister.com



Ryc. 9. Mosty Jiangyin (1997); źródło: <https://structurae.net>, South Runyang (2005); źródło: <https://en.wikipedia.org>, Xihoumen (2009); źródło: www.bridgeinfo.net, Yi Sun-sin (2012), źródło: <https://megaconstruccion.es/>

inżynierem, ale nie miał doświadczenia z mostami wiszącymi. Tak więc on został partnerem odpowiedzialnym za most Humber, a ja zostałem mianowany inżynierem projektu konstrukcji, Keith Simm został inżynierem projektu fundamentów. Jednak ze względu na moje doświadczenie w pracy z mostami wiszącymi wykonałem wstępny projekt pylonów i zdecydowałem, że beton będzie lepszym materiałem na pylony niż stal. Powiedziałem o tym Bernardowi Wexowi, a on omówił tę kwestię z Keithem Simmem i wiesz, zgodzili się ze mną, że jest to właściwy materiał” [11]. Michael Parsons na podstawie własnej analizy porównawczej kosztów budowy pylonów stalowego i betonowego mostu Bosforskiego doszedł do wniosku, że pylon stalowy jest dwa razy droższy od betonowego. Parsons miał również świadomość zmian zachodzących w technologii stosowania zbrojonego betonu i postępu, jaki się dokonał w jego zastosowaniu. W wywiadzie mówił: „Nowa technologia formowania ślizgowego różnego rodzaju betonowych wież sprawia, że ich wznoszenie było znacznie szybsze niż kiedyś. Nie tak szybkie jak stalowych wież, ale coraz bardziej porównywalne”. Interesujące jest to, że w wywiadzie Parsons nie wspominał o wcześniej wybudowanych mostach francuskim i duńskim, w których zastosowano żelbetowe pylony. Wydaje się, że zajmując się przez kilkadziesiąt lat projektowaniem i budową zaawansowanych mostów wiszących, musiał mieć o nich wiedzę. W rozmowie w sposób dość oględny nadmienił tylko o metodzie ślizgowej wznoszenia betonowych wież. W następstwie sukcesu brytyjskich inżynierów tą drogą podążyli inni twórcy i kolejne biura projektowe na świecie, wykorzystując koncepcję betonowych pylonów w budowie mostów, m.in. Tsing Ma (1997), Great Belt (1998), Xihoumen (2009), Yi Sun-sin (2012; ryc. 8, 9) [12].

Przy rozpiętościach głównych przęseł mostów wiszących powyżej 1400 m wysokość pylonów wynosi ponad 200 m. W rozwiązaniach tak wysokich betonowych pylonów dominuje usztywniona, prosta rama. Kolumny pylonów, najczęściej o przekroju prostokątnym, zmniejszają się w górnej części, a w niektórych przypadkach również rama ulega zwężeniu. Konstrukcja ramy jest dodatkowo wzmocniona ryglami. Zasadniczo dominuje kolor jasnoszary, typowy dla faktury powierzchni betonowej, choć Chińczycy inżynierowie próbują wprowadzić inne kolory, np. żółty. Warto dokładnie przyjrzeć się pylonom mostu Great Belt, gdyż odzwierciedlają one, jak to określił Klaus Ostenfeld (1943), „skandynawski styl”, w którym wizualna ekspresja jest szczerą, lekką i elegancką, z minimalną dekoracją konstrukcji. W przeciwieństwie do innych dużych mostów wiszących bezpo-

średnio pod pomostem nie ma belki poprzecznej. Została ona zaprojektowana w połowie wysokości pylonu.

Mosty wiszące w nowoczesnej, czystej formie

Wybudowany w Chinach w 2005 r. most South Runyang jest kolejnym doskonałym przykładem nowoczesnej, przejrzystej i czystej w formie architektonicznej konstrukcji. Według Nielsa J. Gimsinga, profesora Duńskiego Uniwersytetu Technicznego i współautora przekrojowej publikacji *Cable Supported Bridges: Concept and Design*, wszystkie elementy konstrukcyjne są funkcjonalne i pozbawione jakichkolwiek ozdób [13].

Blisko dekadę później w Korei Południowej został oddany do użytku most Yi Sun-sin. W 2013 r. budowa tego mostu znalazła się w finale konkursu organizowanego rokrocznie przez International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) w Zurychu nagradzającego wybitne konstrukcje. W uzasadnieniu napisano: „Most Yi Sun-sin w Gwangyan w Korei Południowej charakteryzuje się wyjątkową stabilnością aerodynamiczną pomimo małej szerokości w stosunku do rozpiętości przęsła oraz faktu, że znajduje się na drodze tajfunów. Most ma 270-metrowe pylony, a użyte druty mają wytrzymałość 1860 MPa, co oznacza, że betonowy pylon jest najwyższy, a drut jest najmocniejszy ze wszystkich mostów wiszących na świecie. Most został ukończony bardzo szybko, w ciągu pięciu lat. W szczególności słupy pylonu zostały ukończone w ciągu zaledwie czterech miesięcy metodą ślizgową” [14]. Przyglądając się mostom Great Belt i Yi Sun-sin, nasuwa się nieodparte wrażenie sporego podobieństwa architektury obu betonowych konstrukcji pylonów.

Z prowadzonych badań w wielu ośrodkach naukowych i biurach projektowych wynika, że pylony mostów przekraczające wysokość 300 m będą wykonywane ze stali o wysokiej wytrzymałości. Potwierdzeniem tego jest fakt, że obecnie najdłuższy wiszący most świata – Çanakkale 1915 (2022) – ma stalowe pylony. Ich całkowita wysokość wynosi 334 m. W delcie Jangcy w budowie jest most Zhang-Jing-Gao o prawie 300 m dłuższy od mostu Çanakkale 1915 (ryc. 10). Jego stalowe pylony osiągną wysokość 350 m. Ponadto we wstępnym projekcie mostu Messyńskiego również przewiduje się stalowe pylony o wysokości 383 m [15]. Do podobnego wniosku skłania też analiza przeprowadzona przez koreańskich naukowców z Uniwersytetu w Seulu. Miała ona na celu określenie koncepcji formy i architektury pylonów dla prototypowego mostu o długości przęsła 2800 m i wysokości pylonu 420 m. Dodatkowo w opracowaniu zaprezentowano metodę ulepszenia kształtów konstrukcyjnych zarówno z perspektywy strukturalnej, jak i wizualnej. Autorzy demonstrują szereg modeli wysokich wież,



Ryc. 10. Most Çanakkale 1915 (2023); źródło: <https://www.sohu.com>, projekt mostu Zhang-Jing-Gao (2028); źródło: [20]



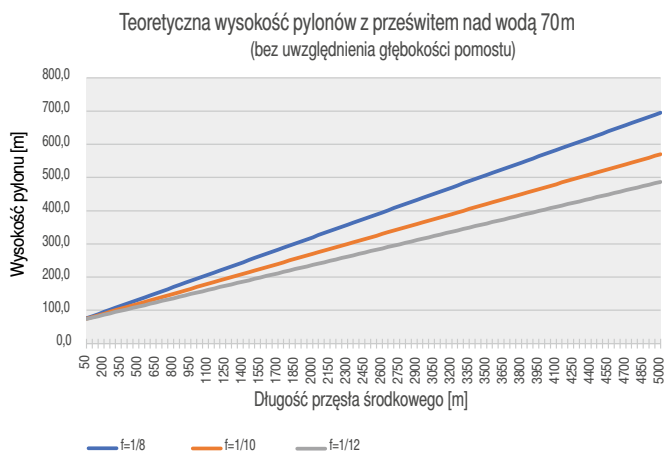
Ryc. 11. Wizja architektoniczna pylonów o wysokości 420 m; źródło: [16]

w tym hybrydową konstrukcję pylonu. Polega ona na budowie z betonu dolnej części pylonu, poniżej pomostu komunikacyjnego, natomiast ze stali górnej jego części, nad pomostem. W celu zapewnienia stabilności bocznej górnej części pylonu wprowadzono wiele poziomów krzyżowych usztywnień w zwężającej się ku górze ramie. W konkluzji przeprowadzonej analizy autorzy wybrali dwa rozwiązania optymalne pod względem konstrukcyjnym i formy architektonicznej (ryc. 11) [16].

Zupełnie nowa architektura i konstrukcja stalowych pylonów superdługich mostów wiszących

W artykule *Mosty wiszące o superdługich przęsłach* [17] przedstawiono stan wiedzy i analizy dotyczące maksymalnej rozpiętości przęseł mostów wiszących. Badania i wstępne analizy wykazały, że z technicznego punktu widzenia most wiszący o długości 5000 m przęsła głównego jest możliwy do wykonania. Zatem należy zastanowić się, jaka będzie teoretyczna wysokość pylonów przy takiej długości przęseł. Przeanalizujemy tę wysokość przy założeniu współczynnika f zwisu kabla stosowanego najczęściej przy projektowaniu współczesnych mostów wiszących, czyli w zakresie 1/8, 1/10 i 1/12 oraz przy założeniu wysokości pomostu nad wodą 70 m. Zignorujmy na tym etapie analizy głębokość pomostu. Z graficznego wykresu wysokości pylonów w funkcji długości przęsła wynika, że wysokość pylonów, czyli od powierzchni wody do punktu mocowania kabli na szczycie pylonów, mieści się w zakresie 500–700 m (wykres 1). Zatem zasadne wydaje się pytanie, czy usztywniona,

Wykres 1. Wysokość pylonów w funkcji długości przęsła środkowego dla wybranych współczynników f , oprac. K. Dąbrowiecki



Tab 1. Zestawienie wybranych danych technicznych mostów wiszących

Lp.	Nazwa mostu	Rok budowy	Długość przęsła głównego [m]	Wysokość pylonu [m]
1.	Menai	1826	176	46
2.	Lézardrieux	1840	152	20
3.	Belleperche	1841	2 x 150	12
4.	Niagara Falls	1855	251	27
5.	Clifton	1864	214	26
6.	Cincinnati	1866	322	30
7.	Brookliński	1883	486	83
8.	Williamsburg	1903	488	102
9.	Grunwaldzki	1910	127	26
10.	Manhattan	1910	451	102
11.	Benjamin Franklin	1926	530	117
12.	Ambassador	1929	564	116
13.	Mt Hope	1929	370	87
14.	George Washington	1931	1067	184
15.	Waldo-Hancock	1931	244	72
16.	St. John's	1931	368	120
17.	San Francisco – Oakland	1936	2 x 704	160
18.	Golden Gate	1937	1280	227
19.	Bronx-Whitestone	1939	700	115
20.	Mackinac	1957	1158	168
21.	Tancarville	1959	608	123
22.	Verrazzano-Narrows	1964	1298	207
23.	Little Belt	1970	600	112
24.	Humber	1981	1410	156
25.	Jiangyin	1997	1385	190
26.	Tsing Ma	1997	1377	206
27.	Great Belt	1998	1624	254
28.	Runyang	2005	1490	215
29.	Xihoumen	2009	1650	211
30.	Yi Sun-sin	2012	1545	272
31.	Çanakkale1915	2022	2023	334
32.	Zhang-Jing-Gao	2028	2300	350

stalowa rama o takiej wysokości spełni oczekiwane wymagania sztywności konstrukcyjnej w rejonach aktywnych sejsmicznie, wysokich zmian termicznych i znacznego ciśnienia powietrza dla przewidywanych prędkości wiatru na danym obszarze. Częściowo na to pytanie odpowiedziała firma OPAC, analizując koncepcję TY Lina, przedstawioną w przywołanym powyżej artykule. Można jednak wnioskować, że przy wysokości pylonów przekraczającej 500 m wymagana będzie zupełnie nowa architektura i konstrukcja stalowych pylonów.

W tabeli 1 przedstawiono wybrane dane techniczne omawianych w artykule mostów, głównie dla porównania wysokości pylonów [18, 19]. Obrazują one ewolucję wież i skalę osiągnięć inżynierów mostów wiszących przez ostatnie 200 lat.

Most Zhang-Jing-Gao nad Jangcy jest obecnie w trakcie budowy fundamentów, a przewidywany termin ukończenia został określony na 2028 r. [20, 21].

Literatura

- [1] Dąbrowiecki K.: *Dwustuletnia historia mostów wiszących*, cz. 1. *Wiek XIX*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2020, nr 3, s. 100–106; cz. 2. *Wiek XX*, nr 4, s. 90–96; cz. 3. *Wiek XXI*, nr 5, s. 100–109.
- [2] Dąbrowiecki K.: *Most Brookliński – dzieło życia Roeblingów*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, nr 5, s. 74–78.
- [3] Biliszczuk J., Budych L., Rabięga J.: *Most Grunwaldzki – Kaiserbrücke. 1910–2010*. Mosty Dolnośląskie. Wrocław 2010.
- [4] Steinman D.B., Watson S.R.: *Bridges and Their Builders*. Dover Publications. New York 1957.
- [5] Petroski H.: *Engineers of Dreams: Great Bridge Builders and the Spanning of America*. Vintage Books. New York 1996.
- [6] Ammann O.H.: *Developments in long-span steel Bridges*. „IABSE Congress Report” 1948, Vol. 3, pp. 409–414.
- [7] Billington D.P.: *Wilhelm Ritter: Teacher of Maillart and Ammann*. „Ingénieurs et architectes suisses” 1987, Vol. 11, Issue 7, pp. 94–100.
- [8] Dąbrowiecki K.: *Art déco w pylonach mostu Golden Gate*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2022, nr 6, s. 98–101.
- [9] Billington D.P.: *The Towers and the Bridge The New Art of Structural*. Princeton University Press. Princeton 1983.
- [10] Ostenfeld K.H.: *Evolution of Suspension Bridges*. Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2019.
- [11] Lean T.: *National Life Stories: An Oral History of British Science*. Transcript London, 2012.
- [12] Burchardt J.: *From invention to production: The case of pre-stressed concrete*. In: *Building Knowledge, Constructing Histories, Volume 1. Proceedings of the 6th International Congress on Construction History (6ICCH 2018), July 9–13, 2018, Brussels, Belgium*, Elsinger 2018.
- [13] Gimsing N.J., Georgakis C.T.: *Cable Supported Bridges: Concept and Design*. John Wiley & Sons, Ltd, 1983.
- [14] Materiały IABSE, Outstanding Structure Awards, 2013.
- [15] Materiały COWI, www.cowi.dk
- [16] Hong N.K., Koh H.-M., Hong S.-G.: *Design Trend of Tower Shapes toward Long-Span Suspension Bridges*. IABSE Symposium Report No. 101, Kolkata, India, 2013.
- [17] Dąbrowiecki K.: *Mosty wiszące o superdługich przęsłach*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2023, nr 2, s. 68–73.
- [18] Lista najdłuższych mostów wiszących, https://en.wikipedia.org/wiki/list_of_longest_bridges_spans
- [19] Lista mostów w Chinach, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridges_in_China
- [20] Materiały Seetao, www.seetao.com/details/23202.html
- [21] Materiały www.en.mantong.gov.cn

NBI.com.pl/branze/mosty/



REKLAMA

VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna

17 -19 kwietnia 2024
Niepołomice

Masz pytanie?
Skontaktuj się z nami:

SITK RP Oddział w Krakowie
ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków
Informacja telefoniczna
tel: 12 658-93-72



NOWOCZESNE TECHNOLOGIE
W PROJEKTOWANIU,
BUDOWIE I EKSPLOATACJI
INFRASTRUKTURY
DROGOWEJ MIAST,
METROPOLII I REGIONÓW