

Ewolucja usztynienia nowoczesnych mostów wiszących

tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

Historia nowoczesnych mostów wiszących notuje kilka ewolucyjnych zwrotów, które wpłynęły na rozwój i innowacje techniczne związane z mostownictwem. W ciągu ostatnich 200 lat można było zaobserwować parę takich istotnych reorientacji projektowych, m.in. zastąpienie płytowych łańcuchów wiązkami drutu, wprowadzenie głębokich usztywnień ustroju nośnego czy integracja kratownicowych dźwigarów z pomostem drogowym.

Można dyskutować, który z tych przełomowych momentów miał kluczowe znaczenie i najbardziej wpłynął na zintensyfikowanie dynamiki rozwoju konstrukcji mostowych. Niewątpliwie osiąganie rekordowych długości przęsła środkowego stawało się możliwe dzięki zmianom w podejściu do projektowania związanego z rozwojem teorii obliczeniowych mostów wiszących, zastosowania nowych materiałów czy wprowadzenia sprawniejszych i bardziej niezawodnych technologii wykonawczych.

W artykule *Dwustuletnia historia mostów wiszących* [1] autor głównie skupił się na etapach i transformacji technicznej, opisując liczne budowle mostowe na świecie. Wydaje się jednak, że pogłębionej analizie wymaga ta część owej historii, która dotyczy ewolucji dźwigarów usztywniających.

Projekt i konstrukcja mostu Brooklyńskiego (1883) stały się wzorcem dla przyszłych pokoleń inżynierów, którzy stanęli przed nowymi wyzwaniem. Wraz ze wzrostem długości przepraw, w tym przęsła środkowego, coraz trudniejsze stawało się zachowanie równowagi pomiędzy długością a ciężarem a ekonomią konstrukcji. Widać to wyraźnie na przykładzie mostu Verrazano-Narrows, którego ciężar wynosi ponad 130 tys. t, a usztywnienie kratownicowe osiąga głębokość 10 m. W przypadku mostu Mackinac głębokość usztywnienia wynosi ponad 11 m.

Powodem, dla którego amerykańscy inżynierowie w latach 50. i 60. XX w. zdecydowali się na głębokie kratownice pod pomostem drogowym, była spektakularna porażka Leona Moisseiffa przy budowie mostu Tacoma Narrows. Moisseiff, będąc prekursorem udoskonalonej metody obliczeniowej mostów, podjął się próby znacznej redukcji stali, a tym samym obniżenia kosztów budowy. Lekcja wyniesiona z katastrofy mostu Tacoma Narrows (1940) na lata sparaliżowała amerykańskich projektantów w podejmowaniu progresywnych wyzwań. Dopiero w 2003 r. w rejonie zatoki San Francisco został oddany do użytku pierwszy most wiszący nowej generacji, z opływowym, stalowym dźwigarem skrzynkowym (most Carquinez [2]).

Progresywny rodzaj połączeń konstrukcji

Najpowszechniejszą metodą łączenia elementów stalowych mostów do połowy XX w. oprócz śrubowych były połączenia nitowane. Zapewniały one doskonale sztywne zespolenie dzięki zaciskaniu uzyskiwanemu podczas schładzania gorącego nitu po zamontowaniu. Jednak metoda ta była bardzo pracochłonna, kosztowna i niebezpieczna, dlatego powstała pilna potrzeba lepszego, bardziej efektywnego ekonomicznie i bezpiecznego dla ludzi rozwiązania łączenia części konstrukcji stalowych. Spawanie łukowe, rozwinięte w latach 20. i 30. XX w., dawało nadzieję równie wytrzymałego, szybkiego i taniego łączenia

blach i kształtowników. Przyspieszone udoskonalenie tej metody nastąpiło w Ameryce w okresie II wojny światowej, kiedy metoda spawania łukowego była wykorzystywana do łączenia blach stopowych dużych konstrukcji okrętowych. W kilkunastu amerykańskich stoczniach w latach 1941–1945 wybudowano ponad 2700 okrętów transportowych typu Liberty i ponad 500 typu Victory. Wprowadzone wtedy spawanie blach kadłubów statków wyparło połączenia nitowane. Prefabrykowanie modułów kadłuba w halach lub na placach prefabrykacyjnych całkowicie zastąpiło składanie kadłuba z indywidualnych sekcji blachowych na pochylniach lub w dokach, co wydatnie przyczyniło się do skrócenia czasu produkcji okrętów. Nie ma w tym nic wyjątkowego, że w budownictwie mostowym wykorzystywano i dalej wykorzystuje się metody i technologie zaczerpnięte ze stoczni. Stocznie przez masową produkcję statków opracowują i udoskonalają bez przerwy procesy technologiczne, wprowadzając automatyzację procesów spawalniczych, modułowość sekcji kadłubowych czy transport suwnicowy i kołowy z placu prefabrykacji do miejsca końcowego montażu.

Kilka słów o Fritzu Leonhardzie

W wielu europejskich krajach po wojnie przystąpiono do odbudowy zniszczonej infrastruktury, w tym mostów. Z powodu braku wystarczającej ilości stali i blachy walcowanej próbowano opracować oszczędne materiałowo metody budowy. W Niemczech prof. Fritz Leonhardt (1909–1999) z uniwersytetu w Stuttgarcie przeprowadził szereg eksperymentów i opracował analizę budowy pomostów ortotropowych. Budowa zaprojektowanych dźwigarów zamkniętych proponowanych przez Leonhardta była możliwa tylko dzięki wprowadzeniu spawania blach i kątowników. Ten rodzaj połączeń wpływał również na smukłość i znacznie poprawiał estetykę konstrukcji. Tak więc zmniejszenie ciężaru mostu i kosztów było możliwe przez wyeliminowanie nitowania części usztywnień i usunięcie dodatkowego podparcia pomostu, niezależnego od dźwigara głównego. W 1948 r. został wybudowany most Kolonia – Deutz, zaprojektowany przez Leonhardta z wykorzystaniem trzech 185-metrowych stalowych dźwigarów skrzynkowych, które w połowie długości miały głębokość 3,3 m.

W tym miejscu warto poświęcić trochę uwagi profesorowi Leonhardtowi, jednemu z najbardziej znanych niemieckich inżynierów budownictwa lądowego w XX w. Był on autorem i współautorem ponad 20 książek i wielu artykułów z dziedziny budownictwa, w tym mostowego. Będąc dociekliwym badaczem i wynalazcą, jako jeden z pierwszych akademików promował zasadę estetyki w budownictwie mostowym. W artykule pod tytułem *Aesthetics of Bridge Design* [3], podjął temat estetyki konstrukcji, przedstawiając osiem zasad, które jego zdaniem powinny być spełnione przy projektowaniu mostów. Są to m.in. zasada harmonii i jedności, prostoty i czystości konstrukcji, wyraźnego przepływu sił, spójności i uporządkowania linii, smukłości konstrukcji dla zachowania krajobrazu. Zasady te rządzą tym, co prof. David P. Billington nazywa sztuką konstrukcyjną. Jednym z przykładów zrealizowanych projektów Leonhardta według tych zasad jest most Neckar Valley w Weitingen koło Stuttgartu. Zbudowany w 1978 r. 900-metrowy wiadukt drogowy ma konfigurację przęsła 234 + 134 + 134 + 134 + 264 m i przebiega nad doliną rzeki Neckar na wysokości 125 m. Most ma dwa smukłe środkowe i dwa



Filary mostu Neckar w Weitingen, fot. K. Dąbrowiecki, 2020



Filar środkowy mostu Neckar, fot. K. Dąbrowiecki, 2020



Podwójny filar skrajny mostu Neckar, fot. K. Dąbrowiecki, 2020



Dźwigar mostu Neckar, fot. K. Dąbrowiecki, 2020

podwójne filary na obu końcach. Leonhardt wyjaśniał, że celem smukłych środkowych filarów było zmniejszenie negatywnego wizualnego wpływu, jaki most miałby na krajobraz. Podwójne filary na obu końcach zaprojektowano tak, aby były odporne na skręcanie konstrukcji. Skrajne przęsła o długości ponad 230 m są podparte wiszącą konstrukcją kablową z uwagi na osuwiste zbocza doliny i niemożność postawienia w tym miejscu stałych podpór. Innym, jeszcze ciekawszym i innowacyjnym projektem Leonhardta, jest znana wieża telewizyjna w Stuttgarcie. Ta 216-metrowa konstrukcja została otwarta w 1955 r. i była pierwszą wieżą żelbetową na świecie. Wyznaczyła trend w budowaniu podobnych konstrukcji w Niemczech (Hamburg, Frankfurt, Mannheim, Düsseldorf, Berlin) i na świecie (Wiedeń, Moskwa, Toronto, Seattle, Johannesburg, Makau, Auckland). Stuttgarcka budowla o lekko stożkowatym kształcie i osadzona na wysokości 153 m wielopoziomowa kapsuła, nad którą dominuje spiczasty maszt antenowy, przypomina nieco gigantyczną szpatułkę do miodu wbitą w ziemię. Przez wielu inżynierów wieża została uznana za jeden z najbardziej eleganckich przykładów konstrukcji betonowych i tak jak w wielu

innych miejscach podobne konstrukcje, stała się wizytówką miasta. Profesor Leonhardt podsumował swoje wieloletnie dociekania na temat estetyki w popularnej książce *Bridges. Aesthetics and Design* [4], w której starał się zdefiniować reguły rządzące estetyką w sposób tak przystępny, aby każdy inżynier i architekt mógł je przyswoić i uwzględnić w projektowaniu dużych konstrukcji w miejscach publicznych.

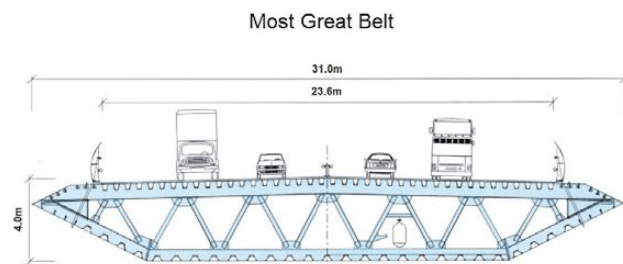
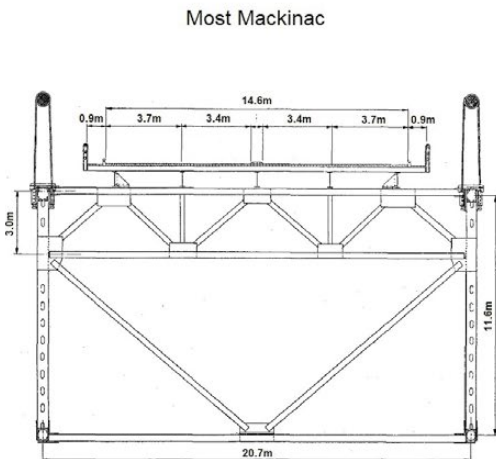
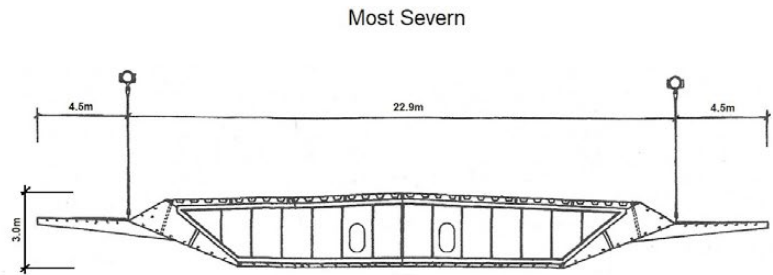
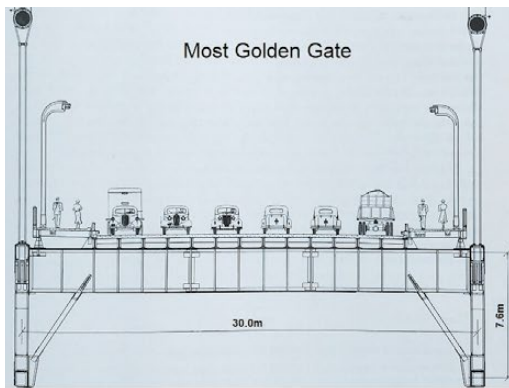
Brytyjska szkoła budowy mostów

W Anglii na przełomie lat 40. i 50. XX w. w ramach rozwijanej krajowej sieci autostrad zaczęto opracowywać plany mostów o dużej rozpiętości przez rzeki Tamar, Forth i Severn. W owym czasie w USA oddano do użytku wspomniane rekordowej długości mosty Mackinac (1957) i Verrazano-Narrows (1964), a w Europie ogłoszono konkurs na most Salazara w Lizbonie (od 1974 r. most 25 Abril). Dlatego dwa pierwsze mosty, Tamar (1961) i Forth (1964), zostały zbudowane na podstawie dominującej w tej dziedzinie amerykańskiej technologii.

W tym samym czasie Fritz Leonhardt zajmował się przeprowadzaniem testów modeli dźwigarów zamkniętych w tunelach aerodynamicznych w National Physical Laboratory (NPL) w Teddington (Anglia). Jego innowacyjny projekt mostu wiszącego, zgłoszony na konkurs w Lizbonie, oparty na tych badaniach modelowych, nie został przyjęty do realizacji z powodu zbyt nowatorskiej koncepcji [1]. Tym niemniej pomysł Leonhardta został zauważony i podchwycyony przez brytyjskich inżynierów z firmy Freeman Fox & Partners. Wielkimi zwolennikami koncepcji aerodynamicznego dźwigara skrzynkowego dla mostów wiszących byli Gilbert Roberts (1899–1978), William Brown (1928–2005) oraz Michael Parsons (ur. 1928). Roberts w firmie Freeman Fox był odpowiedzialny za projekty nowych mostów. Wniósł do połączonej firmy nabyte doświadczenie w firmach Sir Douglas Fox & Partners, Dorman Long & Sir William Arrol & Co, gdzie m.in. w latach 30. pracował nad pierwszymi projektami mostów spawanych (most Bullingham, 1931). Niewątpliwie był ekspertem w dziedzinie spawania blach, gdyż pracując w firmie Sir William Arrol, projektował spawane profile z blach stalowych, maszty radiowe i dźwigary skrzynkowe suwnic bramowych. W 1949 r. Roberts zatrudnił, będącego zaraz po studiach na uniwersytecie w Bristolu, 20-letniego Michaela Parsonsa. Wkrótce do zespołu dołączył Bill Brown, równolatek Parsonsa. Trudno jest czasami odtworzyć przebieg zdarzeń wpływających na radykalne zmiany późniejszych roz-



Wieże telekomunikacyjne w Stuttgarcie, Hamburgu i Frankfurcie, źródło: „Structural Engineering International” 2007, Vol. 1

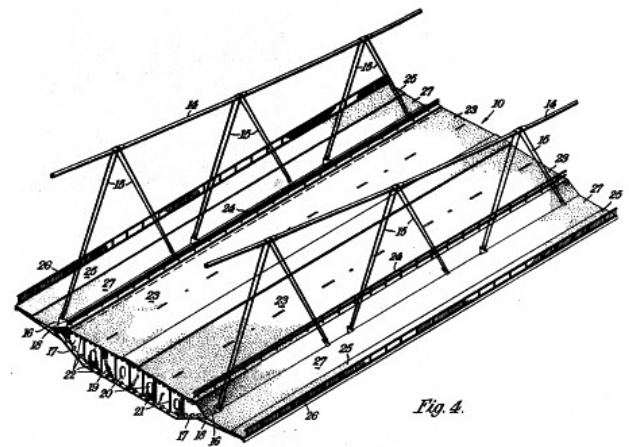
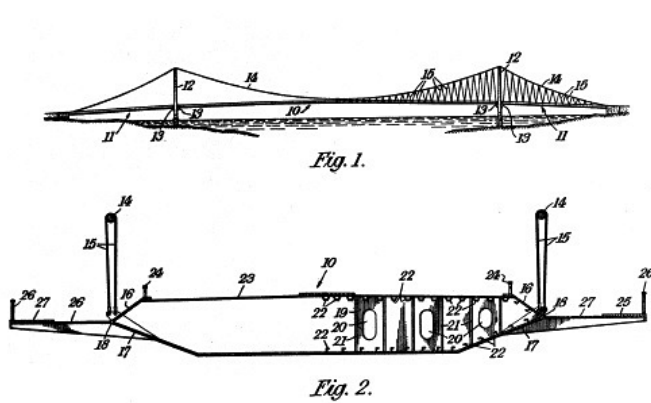


Porównanie przekrojów mostów Golden Gate, Mackinac, Severn, Great Belt na podstawie odpowiednio: Golden Gate Bridge: Report of the chief engineer of the Golden Gate Bridge, Highway and Transportation District, California, 1987; State of Michigan, The Mackinac Bridge Authority, 1951; materiały severnbridges.org; materiały firmy COWI, 1997, oprac. K. Dąbrowiecki

wiązań konstrukcyjnych. Dlatego wywiad przeprowadzony przez Thomasa Leana w ramach *National Life Stories – An Oral History of British Science* z Michaeliem Parsonsem [5] to nieocenione źródło wiedzy. Dzięki nagraniu dowiadujemy się o pracy inżynierskiej w czołowej firmie projektowej Freeman Fox & Partners w ciągu 40 lat, od 1949 do 1989 r., tj. w czasie gdy – jak zauważył prof. Alfred Pugsley – projekty mostów Forth i Severn włączyły z powrotem brytyjskich inżynierów do światowej czołówki projektantów mostów wiszących, tak jak to miało miejsce w czasach Thomasa Telforda i Isambarda K. Brunela. W wywiadzie Parsons, najpierw początkujący inżynier, z czasem jeden z czołowych projektantów i w końcu partner w firmie Freeman Fox, opowiada o inżynierskich przemyśleniach, wątpliwościach, wahaniach, doświadczeniach i niepowodzeniach, ale też o sukcesach i momentach satysfakcji oraz odpowiedzialności inżynierskiej. Głównym zadaniem Parsonsa było obliczanie wytrzymałościowe konstrukcji ustroju nośnego i pylonów, w tym określanie i badanie wielkości elementów konstrukcji usztywnień, analiza naprężeń w pylonach i pomostach stalowych. Do wykonania obliczeń projektów używał udoskonalonej przez Charles'a D. Crosthwaite'a metody szeregów Fouriera, którą opanował w firmie na podstawie jego prac, m.in. *The Corrected Theory of the Stiffened Suspension Bridge* [6], jak również poleconych przez prof. Johna Morrisona z uniwersytetu w Bristolu prac dotyczących opływowego kształtu skrzydeł samolotu.

Parsons tak wspominał pierwszy, jak podkreślił, samodzielny projekt mostu wiszącego: „Cóż, most Forth, który był pierwszym zbudowanym i zaprojektowanym przez nas mostem,

był oparty w zasadzie na amerykańskiej technologii. Miał stalowe pylony, stalową konstrukcję podpartą kratownicą i kable, wszystko zostało zaczerpnięte bezpośrednio z amerykańskiej technologii”. Podobnie jak w Niemczech, w okresie powojennym z powodu braku dostatecznej ilości stali jednym z naczelnych wyzwań dla brytyjskich inżynierów stało się zmniejszenie ciężaru konstrukcji. Dlatego głównym celem projektantów było udoskonalenie materiałochłonnej metody amerykańskiej, a właściwie przeprojektowanie układu nośnego mostów i konstrukcji pylonów tak, aby zredukować ilość zastosowanej stali. Inspiracją do zaprojektowania dźwigara skrzynkowego dla mostów wiszących były rozwiązania mostów inżynierów niemieckich. Parsons wspominał, nawiązując do prac profesora Leonhardta: „Niemcy od jakiegoś czasu budowali mosty, stosując dźwigar skrzynkowy, ale po raz pierwszy został użyty w moście wiszącym i oczywiście, wielka rzecz, problem z mostami wiszącymi polegał na upewnieniu się, że są stabilne we wszystkich warunkach wiatru, w tym pod względem stabilności *flutter* przy bardzo silnym wietrze. Udowodniliśmy, że dźwigar skrzynkowy się do tego nadaje i na tej podstawie zaczęliśmy je budować”. I dalej: „Nigdy nie rozmawiałem o tym bliżej z Billem Brownem czy Gilbertem Robertsem, ale wiedziałem, że pomysł mostów z dźwigarami skrzynkowymi był dla nich atrakcyjny. Pomyślałem, że mogę zaprojektować taki dźwigar, który będzie odpowiedni dla mostu wiszącego o dużej rozpiętości i będzie stabilny na wietrze. Miałem jednego inżyniera pracującego dla mnie w biurze, który nazywał się Peter Crossley, i namówiłem go do narysowania mojej koncepcji dźwigara skrzynkowego



Roberts US 678259, patent, Biuro Patentów USA

dla mostu Severn. Miał być głęboki na trzy metry, co uznałem za konieczne dla stabilności *flutter*, i wiedziałem, że przy tej głębokości naprężenia będą stosunkowo niskie. To był pierwszy rysunek dźwigara skrzynkowego dla mostu Severn, który został przygotowany w Freeman Fox, i byłem tym, który to zaproponował. Peter Crossley narysował go dla mnie, zabrałem rysunek z sir Gilbertem do National Physical Laboratory i tam otrzymaliśmy potwierdzenie”.

W tym miejscu opowieści pojawia się interesujący wątek związany z Gilbertem Robertsem. Otóż w 1960 r. Roberts zgłosił do brytyjskiego biura patentowego wniosek dotyczący innowacyjnej konstrukcji mostu wiszącego. Ten sam wniosek został złożony w amerykańskim i kanadyjskim biurze patentowym. Na tej podstawie w 1964 r. Roberts otrzymał patent w USA (US 3132363) i w Kanadzie (CA 678259). Patenty opisują generalnie użycie dźwigara skrzynkowego jako zintegrowanej z usztywnieniem konstrukcji pomostu drogowego oraz zastosowanie odchylonych od pionu lin wieszakowych. Rysunki załączone w patencie wyraźnie wskazują na projekt mostu Severn. Bardzo zastanawiające jest to, że autorem zgłoszonych patentów był samodzielnie Gilbert Roberts, choć ewidentnie, na podstawie wspomnień Parsonsa, on razem z Billem Brownem aktywnie uczestniczyli w projektowaniu aerodynamicznego dźwigara skrzynkowego. Dalej w wywiadzie Parsonsa

niał zaprojektowanie odchylonych lin wieszakowych: „Most Severn miał odchylone wieszaki, których używano do uzyskania pewnego tłumienia konstrukcyjnego, aby zatrzymać oscylacje aerodynamiczne. Ale te odchylone wieszaki doprowadziły do pewnego zmęczenia [wytrzymałościowego]. A kiedy przyszło do drugiego mostu Bosforskiego, który został wybudowany wiele lat później, zdecydowałem – ponieważ wtedy byłem partnerem – że wrócę do wieszaków pionowych, których użyliśmy w projekcie mostu Forth. Zrobiłem to częściowo na podstawie tego, że drugi most Bosforski był znacznie szerszy i mniej podatny na oscylacje aerodynamiczne i zdałem sobie sprawę, że było tam trochę tłumienia konstrukcyjnego, z którego wcześniej nie zdawaliśmy sobie sprawy”.

Jak wiemy na podstawie późniejszych raportów inżynierskich, most Severn miał kilka istotnych problemów, które pojawiły się wkrótce po wybudowaniu. Tadaki Kawada w książce *History of Modern Suspension Bridge* [7] dość szczegółowo odniósł się do drgań lin wieszakowych, pęknięć zmęczeniowych spoin spawalniczych dźwigara czy niskiej wytrzymałości konstrukcyjnej pylonów. Koszt prac naprawczych dwuipółkrotnie przerósł koszt budowy mostu. Był to więc słodko-gorzki akcent radykalnych zmian konstrukcyjnych.

Michael Parsons w kolejnym projekcie dokonał paru innych znaczących zmian. W propozycji mostu Humber oprócz zwiększonej do 4,5 m głębokości pomostu po raz pierwszy zastosował betonowe pylony zamiast stalowych. Parsons opowiadał, jak doszło do wprowadzenia nowej konstrukcji pylonów: „Kiedy zaczęliśmy most Humber, będącym tym, który miał doświadczenie w mostach wiszących, wykonałem trochę pracy nad możliwym projektem pylonów i wywnioskowałem na podstawie moich doświadczeń z mostami Severn, Forth i Bosforskim, że stalowy pylon byłby prawdopodobnie prawie dwa razy droższy niż betonowy, a beton byłby idealnym materiałem do przejmowania sił ściskających. Nowa technologia przesuwnej formowni betonowych wież różnego rodzaju sprawiła, że wznoszenie ich było znacznie szybsze niż kiedyś. Nie tak szybkie, jak budowa stalowych pylonów, ale staje się porównywalna. Dlatego zaproponowałem Bernardowi Wex, żebyśmy spróbowali pomyśleć o użyciu betonu. Zaakceptował ten pomysł. Cóż, on i jego inżynier projektu, Keith Simm, który był odpowiedzialny za fundamenty, zgodzili się, że wykonamy betonowy pylon. Tak więc stał się on częścią kontraktu dla mostu Humber”.



Most Severn, montaż sekcji pomostu, archiwum „Bristol Post” 2018

Inną istotną zmianą w budowie wprowadzoną przez Parsonsa była kolejność podwieszania i montażu sekcji pomostu: „Wiedziałem na podstawie doświadczenia o sposobie działania mostu, że najszybszym sposobem na wybudowanie było wzniesienie go od środka. To był nowy pomysł, bo nigdy wcześniej o nim nie słyszałem. Wtedy wydawało się to dobrym pomysłem. Myślę, że wykonawcy mogliby zaprzeczyć, że był on dobry, ponieważ oznaczał, że pracownicy, aby się dostać do pracy, musieli wspinać się do wieży i przejść w dół po wybiegu. Natomiast jeśli zaczniesz od wieży, wiesz, oni wchodzi na wieżę i są już w pracy. Ale czy to naprawdę zaoszczędziło czas, czy nie, nie wiem, ale oni nie czuli się na tyle pewni siebie, aby podważyć pomysł”.

Tak więc w tamtym czasie Parsons z pozostałymi inżynierami nie przeprowadzali żadnych dodatkowych obliczeń lub badań w tunelu aerodynamicznym w celu wybrania optymalnego rozwiązania podwieszania części pomostu, bazując jedynie na inżynierskim doświadczeniu. W przypadku Parsonsa to doświadczenie było istotne, gdyż zajmował się analizą wytrzymałościową konstrukcji mostu i pylonów w różnych warunkach obciążenia stałego i ruchomego i znał zachowanie się mostu pod częściowym obciążeniem. W późniejszych budowlach metoda instalacji części pomostu, zaczynając od środka przęsła głównego, była potwierdzana badaniami i przyjęta w ogólnej praktyce montażu konstrukcji mostów wiszących.

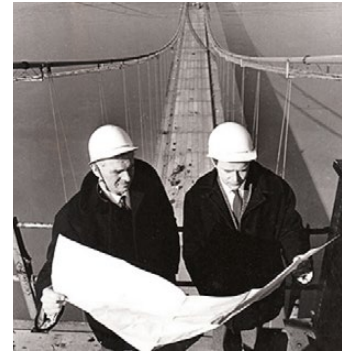
W świetle wspomnień Parsonsa nie będzie chyba zbytnią przesadą i uproszczeniem stwierdzenie, że Brytyjcy inżynierowie dokonali rewolucji w budownictwie mostów wiszących o długich przęsłach. Realizacja pomysłu Leonhardta o wykorzystaniu ortotropowych dźwigarów skrzynkowych w projektowaniu mostów została uwieńczona sukcesem Roberta. Parsonsa i Browna w realizacjach najpierw mostu wiszącego Severn, potem Humber, pierwszego i drugiego mostu Bosforskiego. Sukces tych konstrukcji spowodował duże zainteresowanie inżynierów tą metodą w wielu krajach na całym świecie.

Kolejne innowacje konstrukcyjne

William Brown, będąc inżynierem prowadzącym projekt budowy drugiego mostu Bosforskiego, próbował pójść jeszcze dalej i wprowadzić kolejne udoskonalenie konstrukcyjne, zastępując pojedynczy pomost dwoma oddzielnymi częściami dźwigara skrzynkowego. Parsons, usłyszawszy o tej zmianie, kategorycznie się sprzeciwił. Argumentował, że nowa koncepcja ma niewystarczającą sztywność skrętną, aby zagwarantować stabilność *flatter* przy silnym wietrze i pomost nie będzie wystarczająco sztywny, aby zapobiec skręcaniu się głównych kabli. Uważał, że koncepcja, którą proponował Brown, była nieodpowiednia pod względem wytrzymałościowym. Jego ocena wynikała również z tego, że propozycja nie została sprawdzona obliczeniowo i nie była jeszcze potwierdzona w tunelu aerodynamicznym, a w związku z tym zbyt ryzykowna dla firmy. W tym czasie Parsons był już partnerem w Freeman Fox i mógł decydować o proponowanym rozwiązaniu. Trzeba przypomnieć, że firma Freemann Fox w tamtym czasie miała też mocno nadszarpniętą reputację z powodu dwóch mostów: Milford Haven (obecnie most Cleddau) w południowej Walii i Yarra w Australii (1970), które uległy podczas budowy zawaleniu, pociągając za sobą liczne ofiary śmiertelne. Według Parsonsa, niesprawdzona koncepcja stwarzała dodatkowe i niepotrzebne ryzyko.



Gilbert Roberts z modelem mostu Severn, fot. G. Freston, 1962, fot. w zbiorach British Library



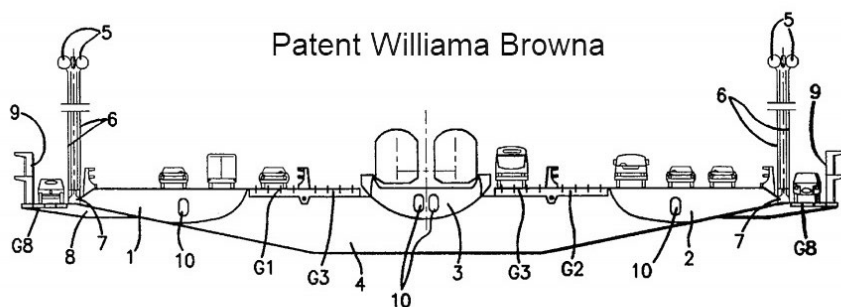
Gilbert Roberts i Michael Parsons w trakcie budowy mostu Severn, fot. w zbiorach British Library, 2012



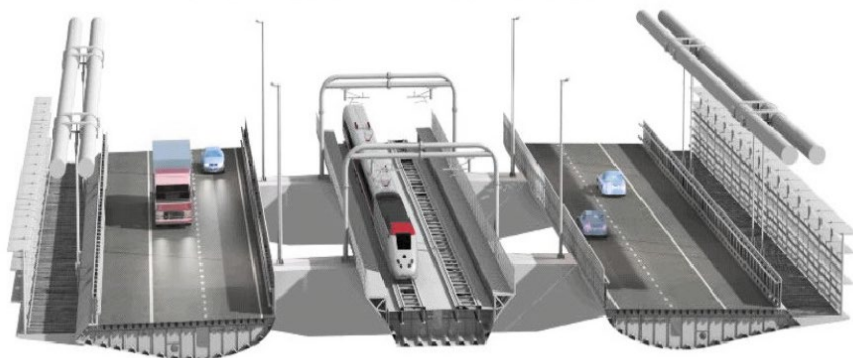
Michael Parsons i Elżbieta II podczas otwarcia mostu Severn, fot. w zbiorach British Library, 2012

Kilka lat później Brown wrócił jednak do pomysłu wieloczołnowych pomostów, gdy po raz kolejny odkurzono projekt budowy mostu Cieśniny Mesyńskiej (Messina Strait) pomiędzy Półwyspem Apenińskim i Sycylią i przedstawiono wstępny zarys przeprawy. W 1992 r. Brown najpierw we Włoszech, a później w USA złożył wnioski patentowe, na który otrzymał w 1997 r. amerykański patent US 5615436 i europejski EP 0666941. Opisuje w nim trójczłonowy, zintegrowany dźwigar o opływowym kształcie. Zewnętrzne pomosty, oddzielone od środkowej części wzdłużnymi otworami ulżeniowymi, były przeznaczone dla ruchu drogowego, wewnętrzny dla kolei. Części pomostu drogowo-kolejowego połączone zostały poprzecznikami stalowymi, do których na końcach zamocowano liny wieszakowe. Wieszaki z kolei były podczipione do dwóch lin nośnych po każdej ze stron. Zaangażowana w ten projekt w fazie przygotowawczej firma COWI, bazując na koncepcji Browna, przedstawiła plan przyszłego mostu. Niezrealizowany projekt miał być pierwszym mostem na świecie, który zaadaptowałby trójczłonową koncepcję pomostu. Przewidywana długość przęsła środkowego wynosiła 3300 m, pylony miały mieć wysokość 383 m.

Spróbujmy zatem zreasumować, na czym polegała innowacyjność brytyjskich inżynierów. Zasadniczo opierała się na koncepcji polegającej na zaprojektowaniu przekroju poprzecznego dźwigara pomostu o opływowym, smukłym kształcie, przy maksymalnie zmniejszonej jego głębokości, zazwyczaj 3 m, zakładając, że wytrzymałość skrętna dźwigara skrzynkowego



Wizualizacja COWI mostu Messina



Trójczłonowy pomost mostu wiszącego, patent 5615436 USA, materiały COWI

jest maksymalnie wykorzystana. W amerykańskich rozwiązaniach pomost drogowy był podparty głęboką kratownicą, zapewniającą ogólną sztywność konstrukcji. Othmar H. Ammann nie widział innej możliwości poza takim rozwiązaniem (most Verrazano-Narrows). Co prawda David B. Steinman zwracał uwagę na większą aerodynamiczność mostu przez eliminowanie zawirowań wokół konstrukcji, ale jego receptą było wprowadzenie prześwitów pomiędzy pomostem drogowym i kratownicą usztywniającą oraz wprowadzenie szczelin ulżeniowych w pomostach (most Mackinac, most 25 Abril). Roberts, Brown i Parsons, wykorzystując nagromadzoną przez lata wiedzę i doświadczenia Moisseiffa, Ammanna, Steinmana, Leonhardta czy takich teoretyków, jak Stephen Timoshenko, John Southwell i John Crosthwaite (użycie szeregów Fouriera do obliczania ugięcia kratownicy usztywniającej), zaproponowali zamknięty, opływowy ustrój nośny, modelowo przypominający nieco skrzydło samolotu. Obliczenia proponowanego modelu Roberts i Parsons zweryfikowali ze specjalistami od badań aerodynamicznych w NPL. Zalety nowej koncepcji były oczywiste. Przez zmniejszenie objętości i głębokości nastąpiło zmniejszenie ciężaru, a więc i znaczna poprawa ekonomiczności projektu. Równocześnie poprawiła się stabilność dynamiczna na wietrze przez opływowy kształt przekroju, a użycie odchylonych lin wieszakowych (max. kąt odchylenia lin 35°) pomogło uzyskać większą sztywność dla dużo lżejszych dźwigarów skrzynkowych. Dodatkową zaletą była łatwiejsza konserwacja konstrukcji w trakcie eksploatacji. Niezaprzeczalną zaletą dźwigara skrzynkowego jest to, że pomost drogowy jako element konstrukcyjny, po którym poruszają się pojazdy, został zintegrowany z dźwigarem usztywniającym, zatem prawie uległ proces prefabrykacji części wiszącej konstruk-

cji. Nie było też potrzeby konstruowania odrębnego podparcia pomostu, niezależnego od dźwigara. Konieczne natomiast stało się zaprojektowanie odpowiednio wytrzymałej płyty ortotropowej, odpornej na znaczne obciążenia kół pojazdów, bez nadmiernego miejscowego zginania i odkształcenia w różnych temperaturach otoczenia.

Jak możemy się przekonać, obserwując współcześnie zrealizowane lub będące w budowie rozwiązania mostów wiszących na świecie, konstrukcje pomostów wyraźnie nawiązują do oryginalnych koncepcji Leonhardta i brytyjskich inżynierów. Osiem z dziesięciu najdłuższych mostów wiszących zbudowanych do tej pory ma pojedyncze lub podwójne opływowe dźwigary skrzynkowe. Są to mosty Xihoumen, Storebælt (Great Belt), Osman Gazi, Yi Sun-Sin, Runyang, Fourth Nanjing Yangtze, Humber, a także Höga Kusten, Nizhou, Hardanger, Carquinez czy obecnie budowany Çanakkale 1915. W Europie natomiast są to powszechnie znane mosty podwieszane: Normandii i wiadukt Mil-lau, by wymienić tylko dwa z nich.

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.: *Wiszący most Carquinez. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”* 2009, nr 2, s. 42–45.
- [3] Leonhardt F.: *Aesthetics of Bridge Design. „PCI Journal”* 1968 (Feb.), pp. 14–31.
- [4] Leonhardt F.: *Bridges. Aesthetics and Design.* MIT Press. Cambridge 1984.
- [5] Lean T.: *National Life Stories: An Oral History of British Science.* Transcript London 2012.
- [6] Crosthwaite C.D.: *The Corrected Theory of the Stiffened Suspension Bridge. „Journal of the Institution of Civil Engineers”* 1947, Vol. 27 (Feb.), pp. 470–496.
- [7] Kawada T.: *History of the Modern Suspension Bridge: Solving the Dilemma between Economy and Stiffness.* ASCE Press, 2010.
- [8] Pugsley A.: *The theory of suspension bridges.* 2nd ed. Edward Arnold, 1968.
- [9] Timoshenko S.P.: *The Stiffness of Suspension Bridges. „ASCE Transactions”* 1930, Vol. 94, pp. 377–405.
- [10] Biliszczuk J.: *Mosty podwieszane. Projektowanie i realizacja.* Arkady, Warszawa 2005.
- [11] Dąbrowiecki K.: *Lizboński most wiszący – ponte de 25 Abril. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”* 2019, nr 1, s. 56–59.
- [12] Materiały firmy COWI.
- [13] Materiały europejskich, amerykańskich i kanadyjskich biur patentowych.

