

# Dwustuletnia historia rozwoju nowoczesnych mostów wiszących, cz. 2. Wiek XX

tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

W pierwszej połowie XX w. w Stanach Zjednoczonych nastąpił gwałtowny rozwój mostów wiszących. Było to skutkiem ogromnego sukcesu związanego z oddaniem do użytku w 1883 r. mostu Brooklińskiego, rosnących potrzeb w zakresie coraz dłuższych przepraw mostowych oraz – co wydaje się równie ważnym elementem – udoskonalenia projektowania opartego na nowej teorii obliczania konstrukcji nośnych.



Mosty wiszące w Stanach Zjednoczonych

W XIX w. analizowano zachowanie się lin nośnych bez dźwiga usztywniającego pod skoncentrowanym i nieliniowym obciążeniem. Pierwszy matematyczny zapis tej nieliniowości pojawił się w publikacji przybliżonej analizy w 1862 r. W tym okresie teoria mostów wiszących zaczęła ewaluować od teorii opracowanej przez Claude'a Louisa Naviera do teorii Williama Rankina i Josefa Melana.

W 1888 r. ukazała się nieliniowa teoria mostów wiszących Melana. Założenia uzupełnionej teorii uwzględniają nieliniowe zachowanie się kabla przez uznanie zmiany jego kształtu pod wpływem ruchomego obciążenia, biorąc również pod uwagę zmianę jego napięcia. Melan nazwał to podejście „bardziej precyzyjną teorią sprężystości”. Nie sądził jednak, że proponowana wersja obliczeń będzie miała jakieś praktyczne zastosowanie, gdyż uważał, że wyniki obliczeń na podstawie teorii sprężystości są wystarczające dla mostów wiszących.

## Nie tylko most Brookliński

Pod koniec XIX w. Nowy Jork wraz z napływem fal emigrantów z całego świata, głównie z Europy, szybko się rozrastał. Jedno połączenie Manhattanu z Brooklynem stawało się niewystarczające. Według statystyk, most Brookliński w 1890 r. przekroczyło blisko 38 mln ludzi. Promy kursujące po East River nie nadążały z obsługą ruchu pasażerskiego i kołowego wzrastającego w błyskawicznym tempie. Planowanie drugiego mostu przeciągało się latami, blokowane nieustannie przez właścicieli promów i opóźniane przez prawne rozgrywki pomiędzy

miastem a liniami kolejowymi. Ostatecznie w obliczu groźby awarii i zamknięcia mostu Brooklińskiego zdecydowano o budowie mostu łączącego Dolny Manhattan z Williamsburgiem, ok. 30 km na północ od mostu Brooklińskiego.

Prace rozpoczęto w 1896 r. Głównym inżynierem został Lefert Lefferts Buck. Budowa mostu Williamsburg trwała siedem lat, uroczyste otwarcie nastąpiło w grudniu 1903 r. Konstrukcja mostowa o całkowitej długości 2227 m i głównego przęsła 487,7 m ustanowiła nowy światowy rekord rozpiętości pomiędzy pylonami. Przęsło środkowe było tylko o 1,4 m dłuższe od mostu Brooklińskiego. Charakterystyczne, stumetrowej wysokości kratownicowe pylony wspierają dwie pary lin nośnych o średnicy 0,46 m. Usztywnienia kratownicowe o głębokości 12 m zostały zaprojektowane do podtrzymywania ośmiu pasów ruchu drogowego i dwóch linii kolejowych. Ponad pomostem drogowym, podobnie jak na moście Brooklińskim, zainstalowano promenadę dla pieszych. Konstrukcja mostu Williamsburg wyraźnie podkreśla industrialny charakter, niestety pod względem estetycznym pozostawia wiele do życzenia. Dodatkowa przeprawa zrealizowała postawiony cel, zmniejszając zatory drogowe na moście Brooklińskim, i stała się ważnym łącznikiem między Manhattanem a częścią Williamsburga na Brooklynie. Była też ostatnim mostem wiszącym zaprojektowanym z zastosowaniem teorii sprężystości do obliczeń wytrzymałościowych oraz, co nie mniej istotne, ostatnim mostem zaprojektowanym bez udziału architektów, mających w przyszłości wielki wpływ na architektoniczną formę konstrukcji.

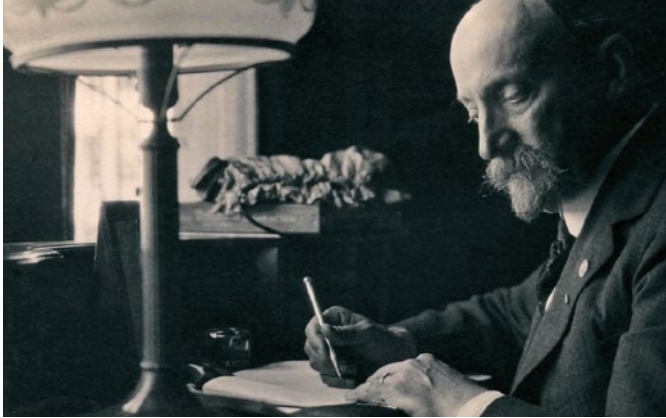
Tab. 1. Zestawienie mostów wiszących w Stanach Zjednoczonych

Mosty wiszące w USA													
Nazwa mostu		Brooklyn	Williamsburg	Manhattan	Benjamin Franklin	Ambassador	George Washington	San Francisco – Oakland	Golden Gate	Bronx-Whitestone	Tacoma Narrows	Mackinac	Verrazano-Narrows
Rok budowy		1883	1903	1909	1926	1929	1931	1936	1937	1939	1940	1957	1964
Główny inżynier		J. Roebling	L. Buck	O. Nichols	R. Modjeski	McClintic-Marshall Co.	O. Ammann	C. Purcell	J. Strauss	O. Ammann	L. Moisseiff	D. Steinman	O. Ammann
Konsultanci / projektanci mostu		W. Roebling	H. Robinson	R. Modjeski, L. Moisseiff	L. Moisseiff	R. Modjeski, L. Moisseiff, J. Jones	E. Stearns, A. Dana, M. Case	R. Modjeski, G. Woodruff, L. Moisseiff	C. Ellis, L. Moisseiff, I. Morrow	L. Moisseiff	F. Lienhard	G. Woodruff	M. Brumer, H. Rothman, F. Stahl, L. Just
Długość głównego przęsła	m	486	487,5	451	533	564	1067	2 x 704	1280	701	853	1158	1298
Całkowita długość mostu	m	1834	2227	2089	2917	2300	1402	2 x 1412	1823	1150	1524	2274	1966
Szerokość pomostu (rozstaw linii głównych)	m	25,9	36	37	39	18	32,3	20	27,4	23,5	11,9	20,7	31,4
Liczba pasów ruchu		6	8 + 2	7 + 4	7 + 2	4	14	2 x 5	6	6	2	4	12
Wysokość pylonów	m	82,9	94,5	102	117	118	181,4	158	227,4	115	129,5	168,2	210,3
Średnica linii głównej	mm	400	457	530	762	587	914	730	930	552	444	622	904
Całkowity ciężar konstrukcji stalowej	t	22 200	47 800	60 800	61 700	21 000	94 600	60 000	83 600	17 717	9373	55 000	132 100

Trzecią nowojorską przeprawą, budowaną tuż obok mostu Brooklińskiego, która na trwałe zapisała się w historii mostownictwa, był most Manhattan. Ta ponad dwukilometrowa konstrukcja z 450-metrowym przęsłem głównym, zlokalizowana pomiędzy istniejącymi już nowojorskimi mostami wiszącymi, różniła się od projektu Johna Augustusa Roeblinga zastosowaniem stalowych zamiast murowanych pylonów oraz od mostu Williamsburg użyciem płytkiej kratownicy Warrena zamiast głębokiego, kratownicowego dźwigara. Liny i ustrój nośny nadają mostowi bezsprzecznie nowoczesny wygląd, ale niekonwencjonalny projekt stalowych pylonów kontrastuje z innowacyjnymi technikami inżynierskimi zastosowanymi w jego budowie. Nawowe, ażurowe pylony o stumetrowej wysokości wspierają cztery liny nośne, które podtrzymują kolejowo-drogowy, dwupoziomowy ustrój nośny. Projekt mostu Manhattan stanowi przełom w koncepcji obliczeniowej mostów wiszących, otwierając drogę do coraz to dłuższych konstrukcji. Choć głównym budowniczym był Othniel Nichols, inicjatorem zmiany w kalkulacji wytrzymałościowej konstrukcji był Leon Moisseiff, rosyjski inżynier. Historia życia i osiągnięć zawodowych Moisseiffa, w tym współpracy z czołową amerykańską budowniczą, została szczegółowo przedstawiona przez autora w artykule [1]. W bieżącym artykule zostanie przytoczonych tylko kilka raportów Moisseiffa wyjaśniających genezę zastosowania teorii Melana w obliczeniach mostowych. „Pracując nad opracowaniem bardziej poprawnej analizy, autor [Moisseiff] zwrócił uwagę na mało uważane potraktowanie teorii Melana, na coś, co on nazywał »The More Exact Theory«

[odniesienie do pracy Melana z 1888 r.]. O dziwo, Melan nie kładł dużego nacisku na praktyczne wyniki teorii. Autor [Moisseiff] stwierdził, że analiza Melana jednoprzęsłowego mostu wiszącego, biorąc pod uwagę wpływ obciążenia własnego na odkształcenie mostu pod obciążeniem ruchomym (użytecznym), dała rozwiązania, które ściśle korelują z warunkami rzeczywistymi (...). Zdając sobie sprawę, że nie może być teorii, która zastosowana do praktycznego rozwiązania konstrukcji będzie absolutnie dokładna, autor [Moisseiff] nazwał tę teorię »teorią ugięcia«, nawiązując do ugięcia kabla i kratownicy. Tak więc Manhattan Bridge został zaprojektowany w 1904 r., stosując teorię ugięcia, i można go uznać za pierwszy nowoczesny most wiszący” [2].

Dekadę później Moisseiff bardziej szczegółowo opisał pomysł zastosowania do obliczeń wytrzymałościowych teorii potwierdzającej jego codzienne spostrzeżenia. „Po kontrowersjach dotyczących zachowania się i bezpieczeństwa mostu Brooklińskiego, które pojawiły się po opublikowaniu raportu inżynierskiego, autor [Moisseiff] pracował nad analizą naprężeń i ugięć tego mostu. Odkrył, że chociaż nie było oficjalnych pomiarów ugięcia mostu pod obciążeniem, takie ugięcia, które można było zaobserwować codziennie, były znacznie mniejsze, niż wynikałoby to z obliczeń opartych na teorii sprężystości. Dalsze rozważania wykazały, że pomijając całkowity wpływ dźwigarów usztywniających na ugięcie mostu i wracając do prostych obliczeń wielokątów równowagi pod obciążeniem stałym i ruchomym (użytecznym), spowodowałyby to znacznie bliższą zgodność z faktycznym zachowaniem się mostu. Stało się



Ralph Modjeski

oczywiste, że milczące pomijanie w teorii sprężystości wpływu obciążenia własnego i ruchomego na odkształcenie mostu było poważnym błędem dla dużych mostów. Wyjaśnia to fakt, że teoria Rankine'a – Rittera opierała się na sztywnej kratownicy, a zatem logicznie wprowadziła błąd. Później został on przejęty bez dalszej analizy przez zwolenników teorii sprężystości. Z tego powodu ta ostatnia teoria jest rażąco błędna w przypadku mostów wiszących" [3].

### **Teoria ugięcia Moisseiffa zrewaluowana w praktyce**

Zanim jednak całe amerykańskie środowisko inżynierskie zaakceptowało nową, niesprawdzoną jeszcze w praktyce metodę 30-letniego rosyjskiego emigranta, konieczna była weryfikacja potwierdzona przez znane autorytety w tej dziedzinie. Weryfikację techniczną mostu Manhattan powierzono Ralphowi Modjeskiemu, cenionemu już wtedy specjalście inżynierii mostowej. Modjeski zlecił wykonanie prac obliczeniowo-weryfikacyjnych Frederickowi Eugene'owi Turneure'owi, profesorowi Uniwersytetu Wisconsin, którego zatrudnił jako konsultanta. Turneure razem z asystentem Modjeskiego, Williamem Richardem Weidmanem, i Moisseiffem jeszcze raz przeanalizowali teorię ugięcia na podstawie projektu mostu Manhattan. We wrześniu 1909 r. Modjeski przedstawił raport, w konkluzji uznając teorię za poprawną i możliwą do zastosowania w obliczeniach konstrukcji mostowych. Modjeski, potwierdzając zasadność nowego podejścia do obliczeń wytrzymałościowych mostów wiszących, zatrudnił Moisseiffa do obliczenia następnego, własnego projektu. Był nim most Benjamin Franklin, łączący Camden w stanie New Jersey i Filadelfię w Pensylwanii. Długość głównego przęsła wynosiła 533 m, bijąc dotychczasowy rekord. W wywiadzie dla gazety „Evening Public Ledger” w 1921 r. Modjeski, promując projekt, podkreślił, że nowy most będzie wyjątkową budowlą pod względem artystycznym i inżynierskim. Był zwolennikiem prostoty i jednocześnie elegancji, unikał zbędnych ozdób i ornamentów konstrukcji spotykanych na niektórych amerykańskich mostach. Oddany do użytku w 1926 r. most w pełni potwierdził słowa głównego inżyniera i był ogromnym sukcesem Modjeskiego i Moisseiffa. Trzy lata później został oddany do użytku most Ambassador, łączący Stany Zjednoczone z Kanadą. Projekt i budowę wykonała firma McClintic-Marshall Co., a konsultantami mostu był duet Modjeski i Moisseiff. Ustanowiony nowy rekord długości przęsła głównego, 564 m, przetrwał tylko dwa lata.

Jak podsumował Tadaki Kawada w książce *History of the modern suspension bridge*: „W ten sposób »bardziej dokładna teoria mostów wiszących« – porzucona przez Melana – została ponownie odkryta przez nowojorskiego inżyniera Moisseiffa. Przemianowana na »teorię ugięcia mostów wiszących« została ponownie zrewaluowana, dzięki czemu stała się użyteczna do projektowania mostów wiszących o dużej rozpiętości”.

Wprowadzone nowe podejście do obliczania mostów było spektakularnym, osobistym sukcesem Moisseiffa. Wielkim zwolennikiem tej postępowej teorii stał się wkrótce David Steinman. Był on autorem tłumaczenia na język angielski oryginalnej pracy profesora Melana z 1888 r. *Teoria mostów łukowych i wiszących*. Kilka lat później opublikował własną książkę *Praktyczny traktat o mostach wiszących. Projektowanie, konstrukcja i budowa*, w której podał szereg przykładów obliczeniowych, potwierdzając po raz kolejny poprawność metody Moisseiffa.

W latach 20. i 30. XX w. Leon Moisseff uczestniczył we wszystkich ważnych budowach mostów wiszących, stając się niepodważalnym autorytetem w dziedzinie obliczeń konstrukcyjnych. Wziął udział w pracach różnych zespołów roboczych jako asystent projektanta, konsultant czy projektant takich mostów, jak Manhattan (1912), Camden (1926), Ambassador (1929), Bayonne (łukowy, 1931), George Washington (1931), San Francisco – Oakland Bay (1936), Golden Gate (1937), Triborough (1936), Bronx – Whitestone (1939) i Tacoma Narrows (1940).

### **Awangarda inżynierów mostownictwa**

Szybki rozwój mostownictwa w Stanach, a także związa-nej z nim nauki, szczególnie w pierwszej połowie XX w., był możliwy przede wszystkim dzięki znakomitym żyjącym w tym czasie inżynierom, takim jak Leffert Lefferts Buck (1837–1909), Gustav Lindenthal (1850–1935), William Burr (1851–1934), Ralph Modjeski (1861–1940), Joseph Strauss (1870–1938), Leon Moisseiff (1872–1943), Charles Ellis (1876–1949), Othmar Ammann (1879–1965), David Steinman (1886–1960) czy Holon Robinson (1886–1960). To oni stanowili awangardę inżynierów, wytyczając nowe kierunki w światowym rozwoju mostownictwa, a w szczególności mostów wiszących.

Gustav Lindenthal, senior budownictwa mostowego w tym czasie, często powtarzał, że miał wielu inżynierów asystentów, ale trudno nie ulec opinii o wyjątkowym traktowaniu w jego biurze Othmara Ammanna i Davida Steinmana. Wkrótce obaj wyrosli na liderów amerykańskiego budownictwa mostowego XX w. Jak to często bywa, uczniowie przerośli mistrza.

Othmar Ammann, urodzony i wychowany w Schaffhausen w Szwajcarii, ukończył wyższą szkołę inżynierską w Zurychu (Swiss Federal Institute of Technology – ETH). W latach studiów jego wykładowcą był prof. Karl Wilhelm Ritter, który wcześniej, w latach 1873–1881, wykładał mechanikę w Rydze, a później w ETH statykę mostów. Profesor Ritter, a szczególnie prof. Karl Emil Hilgard usilnie namawiali Ammanna, aby po studiach wyjechał do Stanów, gdzie będzie mógł dalej się uczyć, praktykować i realizować swoje marzenia związane z budową mostów. Postępując za ich radą, z rekomendacjami nauczycieli Ammann w 1904 r. przyjechał do Nowego Jorku. Początkowo znalazł zatrudnienie w biurze Josepha Mayera, gdzie pracował jako asystent głównego inżyniera. W niecały rok później przeniósł się do Pennsylvania Steel Company, gdzie pod kierownictwem Fredericka Charles'a Kunza pracował przy budowie wspornikowego mostu Queensboro. Prawdopodobnie dzięki rekomendacji Kunza brał udział w pracach komisji powypadkowej Schneidera, która miała przygotować raport po katastrofie w 1907 r. pierwszego mostu Quebec. W lipcu 1912 r. Ammann zanotował w swoim dzienniku: „OHA rozpoczął pracę z G.L.”.





Zespół inżynierów mostu San Francisco – Oakland Bay, od lewej: Charles Andrew, Charles Purcell, Leon Moisseiff, Ralph Modjeski, Charles Derleth, Henry Bruinnier



David Steinman



Dr. Othmar K. Ammann  
with best wishes,  
Lyndon B. Johnson

Wręczenie Othmarowi Ammannowi Narodowego Medalu Nauki USA (National Medal of Science) przez Lyndona Johnsona

OHA to Othmar Hermann Ammann, a GL – Gustav Lindenthal. Ten ostatni, budowniczy o dużym autorytecie i ogromnym doświadczeniu, szybko docenił umiejętności młodego inżyniera, skoro po kilku miesiącach mianował Ammanna na stanowisko asystenta głównego inżyniera. Jego zadaniem był nadzór nad pracami biura projektowego i pracami montażowymi oraz inspekcja budowy łukowego mostu Hell Gate przez East River (1916). Była to w owym czasie prestiżowa budowa Lindenthala, a powierzenie praktykującemu inżynierowi nadzoru świadczyło o dużym zaufaniu Lindenthala do jego umiejętności organizacyjnych i wiedzy inżynierskiej.

Wśród ponad 90 inżynierów i projektantów w biurze Lindenthala pracował również David Steinman, pełniąc funkcję specjalnego asystenta inżyniera. Steinman urodził się w Nowym Jorku i wychował na Brooklynie, w cieniu mostu Roeblinga, jak napisał o sobie w książce *Bridges and their Builders*. W 1909 r. ukończył Columbia University, pisząc pracę końcową *Design of the Henry Hudson Memorial Bridge as a Steel Arch*. Čwierć wieku później firma Robinson&Steinman wybudowała bez wprowadzania większych poprawek zaprojektowany i opisany w ramach tej pracy most. W 1911 r. Steinman otrzymał stopień doktora za pracę naukową na temat mostów o długich przęsłach, publikując jednocześnie swoją pierwszą książkę *Suspension Bridges and Cantilevers – Their Economic Proportions and Limiting Spans*. Kilka lat później na prośbę Lindenthala podjął pracę w jego biurze jako specjalny asystent przy projekcie mostu Hell Gate. W ten sposób przez kolejne trzy lata, do 1917 r., Ammann i Steinman mieli okazję pracować razem i być może wtedy zrodziło się między nimi zawodowe współzawodnictwo.

Dla Steinmana pierwszą okazją do wzięcia udziału w projektowaniu mostu wiszącego była propozycja Holona Robinsona z 1920 r. wspólnego udziału w konkursie na projekt mostu w Brazylii. Steinman zgodził się i wspólnie założona firma Robinson&Steinman w 1922 r. wygrała konkurs na most wiszący Florianopolis. Ukończona w 1926 r. konstrukcja o całkowitej długości 820 m miała ponad 300-metrowe przęsło główne. Pozostaje ona do dziś najdłuższym mostem w Brazylii, a po niedawnym odrestaurowaniu stanowi historyczną atrakcję.

Po 10 latach pracy Ammann zrezygnował z pracy w biurze Lindenthala i przyjął nominację na stanowisko inżyniera mostów w zarządzie dróg i mostów Nowego Jorku (Port Authority of New York). Wkrótce, współzawodnicząc ze swoim niedawnym mentorem, wygrał konkurs na zaprojektowanie mostu George'a Washingtona. Było to olbrzymie wyzwanie techniczne, gdyż długość przęsła środkowego po raz pierwszy w historii mostownictwa wyniosła ponad 1000 m przy całkowitej długości przeprawy 1450 m. W projekcie współuczestniczył Cass Gilbert i Leon Moisseiff, który wykonał obliczenia konstrukcyjne

mostu, potwierdzając kolejny raz użyteczność zastosowania teorii ugięcia. Jedną z najważniejszych cech, wręcz rewolucyjną w tamtym czasie, było wyeliminowanie głębokich kratownic usztywniających ustrój nośny. W końcowym raporcie Ammann tak uzasadniał nowe rozwiązanie: „Obszerne badania przekonały autora [Ammanna], że w przypadku mostu wiszącego o dużej rozpiętości sztywny system nie jest konieczny. Jest on [autor] również zaznajomiony z faktem, że przez zastosowanie właściwej lub tak zwanej teorii ugięcia, w odróżnieniu od teorii sprężystości, dla mniej lub bardziej elastycznego układu można uzyskać oszczędności materiałowe. Jest to nieodłącznie spowodowane efektem usztywnienia własnym ciężarem, które to zjawisko jest ignorowane w tzw. teorii sprężystości. (...) W wyniku długich badań teoretycznych, uzupełnionych obserwacjami na modelach mechanicznych, poczynionych w celu znalezienia odpowiedniego stopnia sztywności kratownic usztywniających dla mostu George'a Washingtona, autor doszedł do wniosku, że rozmieszczenie prawie elastycznych dźwigarów w ukończonym moście i pominięcie kratownic w początkowej fazie, dla pojedynczego poziomu autostrady, było całkowicie dopuszczalne i zapewniało stopień sztywności co najmniej równoważny z jakimkolwiek z wyżej wymienionych, dużych, współczesnych mostów” [4]. Ammann do końca życia uważał ten właśnie projekt za jedyny i najbliższy jego inżynierskim marzeniom.

Le Corbusier, znany szwajcarsko-francuski architekt, projektant i pisarz, nazwał most George'a Washingtona najpiękniejszym mostem na świecie, pisząc, zafascynowany dziełem Ammanna: „Wykonany z kabli i stalowych belek lśni na niebie jak odwrócony łuk. Jest błogostawiony. To jedyna siedziba łaski w nieuporządkowanym mieście. Jest pomalowany na kolor aluminiowy, a między wodą a niebem widać tylko wygięty sznur wsparty na dwóch stalowych wieżach. Kiedy samochód wjeżdża na rampę, dwie wieże wznoszą się tak wysoko, że to przynosi ci szczęście: ich struktura jest tak czysta, tak zdecydowana, tak regularna, że tutaj wreszcie stalowa architektura wydaje się śmiać” [5].

Most George'a Washingtona został początkowo zaprojektowany jako przeprawa dwupoziomowa. Przy 8,8-metrowej głębokości kratownicy i stosunku głębokości do rozpiętości 1:120 usztywnienie było znacznie płytsze niż w przypadku mostu Williamsburg. Ammann i Moisseiff, pracując nad projektem, doszli do wniosku, że nawet kratownica usztywniająca nie jest potrzebna i wybudowano tylko górny poziom przeprawy. Przez następne 30 lat most stał bez usztywnionego pomostu. Jedynym usztywnieniem był ciężar kabli nośnych i konstrukcja pomostu. Zgodnie z nową teorią, projektanci twierdzili, że wraz ze wzrostem masy zwiększała się sztywność mostów

wiszących, przez co kratownica usztywniająca stawała się zbędna. W 1962 r. dobudowano drugi poziom jezdni, przez co most został bardziej usztywniony.

Ammann, podobnie jak wcześniej Modjeski, a wkrótce również Charles Ellis i Joseph Strauss, przekonując się do metody ugięcia, wykorzystywali ją, projektując kolejne mosty. Sześć lat po otwarciu rekordowej przeprawy w Nowym Jorku na wybrzeżu zachodnim Stanów ukończono realizację życiowego projektu Josepha Straussa – most Golden Gate [6]. Autorem obliczeń konstrukcyjnych był Charles Ellis, inżynier prowadzący zespół projektantów mostu Golden Gate. Na bieżąco konsultował on wszystkie detale i rozwiązania konstrukcyjne z Moisseiffem i Ammannem, wchodzącymi w skład zespołu konsultantów. W liście do Straussa, głównego inżyniera mostu, Moisseiff pisał: „Panowie, zgodnie z naszą umową podczas spotkania Zarządu Inżynierów Konsultantów w Chicago 11 i 12 czerwca 1930, ja i mój personel pod moim kierownictwem, uważnie przeegzaminowaliśmy i sprawdziliśmy projekt mostu Golden Gate, przygotowany przez Strauss Engineering Corporation pod kierunkiem Pana Charlesa A. Ellisa. Sprawdziłem również szacunkowe wielkości dla tego projektu oraz szacunkowy koszt. W tym celu Pan Ellis przedłożył mi 41 rysunków razem z fotokopiami jego obliczeń i ocen. (...) Mam tę sposobność wyrazić moje zadowolenie, że praca wykonana przez Pana Ellisa i pod jego kierunkiem personel Strauss Engineering Corporation pokazuje troskliwą rozważę zawartych problemów i przedstawia dobry, wykonalny projekt mostu”.

Ta legendarna już konstrukcja, podziwiana od ponad 80 lat i uważana przez wielu znawców za szczyt dokonań sztuki inżynieryjnej, ustanowiła kolejny rekord przęsła głównego, osiągając 1280 m długości. Realizacja tego arcytrudnego i złożonego przedsięwzięcia stała się również przykładem świetnej współpracy inżynierów konstruktorów i architektów, dając w końcowym wyniku niepowtarzalną budowlę.

### Inżynierowie z licencją

Katastrofa mostu Tacoma Narrows, która nastąpiła w 1940 r., wstrząsnęła światem mostownictwa i stanowiła ogromny, bezpośredni cios nie tylko dla głównego projektanta, Leona Moisseiffa, ale także dla całej czołówki amerykańskich budowniczych [1]. Komisja powypadkowa z Ammannem w składzie, jak również David Bernard Steinman w książce *Bridges and Their Builders*, wydanej po katastrofie, zgodnie potwierdzili, że most został zaprojektowany prawidłowo, jak na współczesne warunki wiedzy inżynieryjnej. Jednak nie do końca zdawano sobie sprawę z działania sił aerodynamicznych i niestabilności aerodynamicznej przy znacznej redukcji usztywnienia przęsła, sprowadzając je do pływających dźwigarów. Bezpośrednią konsekwencją wypadku było wprowadzenie obowiązkowych aerodynamicznych badań tunelowych modeli, jak również dosztywnienie istniejących konstrukcji mostowych, takich jak Bronx-Whitestone czy Golden Gate. Steinman posunął się jeszcze dalej i w następnych projektach stosował wzdłużne otwory w pomoście w celu zredukowania ciśnienia wiatru.

David B. Steinman był niezwykle ambitnym inżynierem. Jego zawodowym celem była budowa światowej klasy mostu nie tylko pod względem inżynieryjnym, ale również architektonicznym. Próba stworzenia czegoś wyjątkowego był most Mount

Hope. W pewnym stopniu zrealizował ambicje Steinmana, gdyż projekt ten w 1929 r. otrzymał nagrodę Amerykańskiego Instytutu Stali za najbardziej artystyczny most wiszący. Powtórna próbą był most St. Johns w Portland, który według Steinmana spełniał wysokie wymagania estetyczne konstrukcji. Mimo że w firmowym folderze określano tę konstrukcję jako „poemat łączący brzegi rzeki” oraz „symfonię w kamieniu i stali”, estetyka, jak konkluduje prof. Henry Petroski w książce *Engineers of Dreams*, pozostawia wiele do życzenia.

Steinman, jak żaden inny budowniczy mostów, umiał łączyć różne inne zainteresowania. Zajmował się tłumaczeniem i pisanie książek o teorii projektowania konstrukcji, udzielał się w organizacjach zawodowych. Niektórym z nich także przewodniczył, np. Amerykańskiemu Stowarzyszeniu Inżynierów. W latach 20. i 30. XX w. w wielu częściach kraju powstał ruch instytucji stanowych domagający się regulacji praw i rejestracji inżynierów na podobnych zasadach, jak prawników czy lekarzy. Gorącym zwolennikiem rejestracji inżynierów był także Steinman, który w wielu artykułach domagał się, aby miano nazywania się inżynierem przysługiwało tylko zarejestrowanym osobom. Postulował, by wszystkim inżynierom z licencją przysługiwało prawo używania przy nazwisku inicjału PE – *professional engineer*, podobnie jak lekarzom MD (*doctor of medicine*). W tym celu zainicjował powstanie stowarzyszenia pod nazwą National Society of Professional Engineers, które ustalało formę i zasady rejestracji inżynierów. NSPE miało również egzekwować od poszczególnych stanów kraju przestrzeganie ustalonych przez organizację zasad, dążąc do ustanowienia obowiązującego we wszystkich stanach prawa respektującego wytyczne NSPE. Niezależnie od ukończonej szkoły technicznej i uzyskanego stopnia naukowego (BSc, MSc lub PhD), aby uzyskać rejestrację stanową i móc pracować dla instytucji rządowych, stanowych lub federalnych, należało zdać dwustopniowy, ośmiogodzinny egzamin z wiedzy inżynieryjnej, wykazać się co najmniej czteroletnią praktyką w zawodzie pod nadzorem inżyniera z licencją i wnieść opłatę licencyjną. Taki proces rejestracji w zawodzie inżyniera obowiązuje do dzisiaj we wszystkich stanach USA.

### Most Mackinac projektu Steinmana

Ostatnie starcie liderów amerykańskiego budownictwa mostowego miało miejsce podczas prac komisji, która rozważała rozwiązania konstrukcyjne mostu nad cieśniną Mackinac, w najwęższym miejscu łączącym dwa jeziora, Michigan i Huron. W skład komisji weszli zaproszeni Ammann, Steinman i Glen B. Woodruff. Podczas pierwszych dyskusji okazało się, że Ammann i Steinman prezentują skrajnie odrębne opinie dotyczące projektowanego mostu. Ammann uważał, że sam ciężar mostu jest rozwiązaniem jego problemów stabilności, natomiast Steinman, wyciągając wnioski z katastrofy mostu Tacoma Narrows, twierdził, że nie ciężar, a wyeliminowanie zawirowań wokół konstrukcji jest drogą do poprawy aerodynamicznej stabilności konstrukcji. W efekcie otwartego konfliktu Ammann zrezygnował z udziału w pracach komisji i Steinman przejął kierownictwo, zostając głównym inżynierem projektu. Oto jak Steinman w raporcie przedstawił swoją koncepcję nowej konstrukcji: „Wykorzystując całą nową wiedzę na temat aerodynamiki mostów wiszących, w szczególności moje własne odkrycia matematyczne i naukowe oraz wynalazki, sprawiłem,





Most Verrazano-Narrows, fot. Ł. Dąbrowiecki

że most Mackinac jest najbardziej stabilnym, aerodynamicznym mostem wiszącym, jaki kiedykolwiek został zaprojektowany. Ten wynik nie został osiągnięty przez wydanie milionów dolarów na zbudowanie struktury pod względem masy i sztywności, aby oprzeć się efektom, ale przez zaprojektowanie przekroju przęsła w celu wyeliminowania przyczyny niestabilności aerodynamicznej. Pionowe i skrętne siły aerodynamiczne, które mają tendencję do wywoływania oscylacji, zostały po prostu wyeliminowane. Podstawową cechą tego wysokiego stopnia stabilności aerodynamicznej jest zapewnienie szeroko otwartych przestrzeni między kratownicą usztywniającą i zewnętrzną krawędzią jezdni. Kratownice usztywniające mają szerokość 20,7 m, a jezdnia ma tylko 14,6 m. To pozostawia otwarte przestrzenie z każdej strony o szerokości 3 m na całej długości trzech przęsła. (...) Aby jeszcze bardziej udoskonalić stabilność aerodynamiczną, wprowadziłem szerokie otwory w jezdni przęsła wiszącego. Dwa zewnętrzne pasy o szerokości 3,66 m są pełne, a dwa wewnętrzne pasy i środkowy w centrum o szerokości 7,1 m są wykonane z otwartej, bezpiecznej i ulepszonego typu siatki” [7]. Most Mackinac, mimo że nie pobił rekordu pod względem długości głównego przęsła, ale licząc 8 km całkowitej długości, był najdłuższym wtedy zbudowanym mostem na świecie.

### Most Verrazano-Narrows projektu Ammanna

W czasie, kiedy Steinman kończył budowę mostu Mackinac, Ammann otrzymał zlecenie na projekt mostu pomiędzy Brooklynem a Staten Island. Jest to niezwykle prestiżowe miejsce w obrębie zatoki Nowego Jorku, gdyż znajduje się przy wejściu do portu. Na świecie jest tylko kilka tak wyjątkowych miejsc, wśród nich Golden Gate (wejście do zatoki San Francisco) czy wejście do Zatoki Tokijskiej. Budowę mostu w tym właśnie miejscu już od lat 20. XX w. proponował Steinman. Jednak ciągły brak zdecydowania zarządu miasta i rządu krajowego latami odraçał decyzję budowy połączenia komunikacyjnego w tej części zatoki. Dopiero w latach 50. XX w. projekt stał się realny pod

względem politycznym i finansowym. Robert Moses, w tamtym czasie najbardziej politycznie i ekonomicznie wpływowa osoba w Nowym Jorku, zaufał po raz kolejny Ammannowi i przekazał zadanie w jego ręce. Powołanie zespołu projektowego Ammanna, w skład którego weszli Milton Brumer (główny inżynier), Herb Rothman, Frank Stahl i Leopold Just (projektanci), rozwiązało marzenia Steimana o udziale w tym ważnym dla niego osobiście przedsięwzięciu. Projekt Ammanna mostu Verrazano-Narrows stał się kolejną wersją poprzednich jego realizacji, mostów George’a Washingtona i Bronx-Whitestone. W ten sposób Ammann ugruntował swój styl i estetykę konstrukcji, wpisując się na trwałe do historii mostownictwa jako budowniczy mostów Nowego Jorku. Stał się inżynierem prostych i czystych w formie rozwiązań mostowych. Budowa Verrazano-Narrows o długości środkowego przęsła 1298 m, o 18 m dłuższego niż mostu Golden Gate, rozpoczęła się w 1959 r. Uroczysta inauguracja z udziałem władz miasta i stanu miała miejsce w listopadzie 1964 r. Robert Moses, prowadząc ceremonię otwarcia, tak przedstawił Ammanna: „Proszę teraz, aby jeden ze znamienitych, wielkich ludzi naszych czasów – niepozorny, skromny i zbyt często pomijany przy tak doniosłych okazjach – wstał i został rozpoznany. Być może pośród tylu celebrytów nawet nie wiecie, kim on jest. Moi przyjaciele, proszę abyście teraz spojrzeli na największego żyjącego inżyniera mostów, być może największego wszech czasów”. Niestety Moses, chyba z przejęcia, nie wymienił nazwiska Ammanna. Uczestniczący w tym wydarzeniu Donald Trump tak zapamiętał to powitanie w rozmowie z dziennikarzem „New York Times” (1980): „Deszcz padał godzinami [archiwalne zdjęcia pokazują słoneczną pogodę], gdy wszyscy ci bufoni byli przedstawiani i wychwalani. Wtedy myślę tylko o tym, że wszyscy ci politycy, którzy byli przeciwni mostowi, byli oklaskiwani. Podczas gdy w kącie po prostu stoi w deszczu ten człowiek, ten 85-letni inżynier, który przyjechał ze Szwecji [pomylił ze Szwajcarią] i zaprojektował ten most, wlał w niego serce i nikt nawet nie wspomniął jego nazwiska”. Faktem jest, że Ammann unikał rozgłosu i światła kamer. Uważał, że inżynier czerpie uznanie





Most Högabruket, fot. K. Flaga

nie z osobistego rozgłosu, ale z uznania jego pracy. Kilka lat po jego śmierci Moses wspominał tego wielkiego budowniczego podczas otwarcia Ammann College w Stony Brook University: „Ammann reprezentuje nie tylko matematykę, materiały, obciążenia i naprężenia, ale charakter, którego nie można wydobyć, wytworzyć i uformować. On musi istnieć od samego początku. Masz go lub nie, a Othmar Ammann go miał” (1968).

Ammann od młodości marzył o budowie wielkich mostów. Miał wyjątkowe szczęście i talent, aby zrealizować swoje marzenia w wykreowanym przez siebie stylu. Otwarcie mostu Verrazano-Narrows zakończyło epokę amerykańskiej dominacji w dziedzinie mostów wiszących. Był to ostatni most ustanawiający rekord długości, a zarazem najcięższy, jaki kiedykolwiek zbudowano z serii mostów wiszący w Stanach Zjednoczonych i na świecie.

### Most Severn – milowy krok Brytyjczyków

Druga połowa XX w. przyniosła ożywienie w budowie mostów wiszących w Europie. W Wielkiej Brytanii oddano do użytku mosty Forth Road (1964), Severn (1966), Humber (1981), w Portugalii most 25 de Abril (1966) [8], w Norwegii most Askøy (1992), most Gjemnessund (1992), we Francji most Tancarville (1959), w Danii mosty nowy Mały Bełt (1970), Wielki Bełt (1998), w Szwecji most Högabruket (1997), w Turcji mosty Bosforski (1973) i Mehmeda Zdobywcy, zwany drugim mostem Bosforskim (1988).

Brytyjskie firmy, przejmując projektowanie i technologię wykonania od amerykańskich biur projektowych, od samego początku duży nacisk położyły przede wszystkim na oszczędności materiałowe. Uzyskały zamierzony cel, wprowadzając wiele innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, m.in. stosując stalowe, opływowe ustroje nośne i betonowe pylony. W pełni też zaczęły wykorzystywać rozwijaną teorię aerodynamiczną w połączeniu z badaniami w tunelach aerodynamicznych. Gilbert Roberts, jeden z czołowych brytyjskich inżynierów, tak opisał zamianę głębokiej kratownicy na aerodynamiczny ustrój nośny: „Zalety konstrukcji z płytowej skrzynki, o ile byłoby

to wykonalne, były oczywiste dla autora [Roberts] od kilku lat, zanim pojawiła się możliwość dokładnego przestudiowania jej dla mostu Severn. Praktyczne zalety są oczywiste. Pełna szerokość górnej powierzchni skrzynki, bez przerw podłużnych, jest dostępna jako użyteczny obszar drogi, a powierzchnia wymagająca zewnętrznego malowania jest bardzo zmniejszona. Wnętrze skrzynki można uszczelnić i nie wymaga ono konserwacji. Sztywność skrętna pokładu mostu wiszącego jest bardzo przydatną właściwością w radzeniu sobie z oscylacjami aerodynamicznymi, a sekcja skrzynkowa ma znacznie większą sztywność skrętną, ciężar w stosunku do masy niż jakikolwiek układ kratownic i dźwigarów poprzecznych. Ponadto istnieje perspektywa znacznych oszczędności masy stali w porównaniu z mostem kratownicowym z oddzielnym pomostem, ponieważ stal w sekcji skrzynkowej jest w stanie wytrzymać naprężenia w kilku kierunkach jednocześnie przy zginaniu lokalnym i ogólnym, zginaniu bocznym, ścinaniu i skręcaniu. Zmniejszenie ciężaru podwieszono znajduje odzwierciedlenie w dalszych oszczędnościach w kablach, pylonach i zakotwieniach, dzięki czemu nawet jeśli sekcja skrzynkowa kosztuje tyle samo co kratownice, to ogólnie można zaoszczędzić pieniądze. Kolejną zaletą sekcji skrzynkowej jest zmniejszenie oporu powietrza na pomoście do jednej trzeciej w porównaniu z dźwigarami; ma to szczególne znaczenie w konstrukcji pylonów, które przejmują 70 procent siły wiatru działającej na pomost (...)” [9]. Dodatkowym udoskonaleniem wprowadzonym przez Roberts był montaż par wieszaków mocowanych oddzielnie do lin nośnych i poprowadzonych diagonalnie do pomostu zamiast pionowo. Jednak jak to bardzo często bywa z nowymi rozwiązaniami, nie obyło się bez problemów, które wyniknęły niespodziewanie na moście Severn. Dotyczyły one diagonalnych wieszaków, które ulegały nadmiernym, niekontrolowanym wibracjom. W obliczu narastającego ruchu na moście konstrukcja pylonów wymagała wzmocnienia. W konsekwencji po dodatkowych, sprawdzających badaniach w tunelu aerodynamicznym zrezygnowano w późniejszych projektach z wieszaków diagonalnych i nieznacznie





Most Akashi Kaikyō, fot. K. Flaga

zwiększono masę pomostów. Tym niemniej projekt mostu Severn był milowym krokiem w rozwoju mostów wiszących. Można nawet zaryzykować stwierdzenie, że był rewolucyjnym rozwiązaniem w porównaniu z amerykańskimi projektami, szczególnie Ammanna. Proponowane rozwiązania były bardzo ekonomiczne i przedstawiały nowe, innowacyjne podejście do projektowania i wykonania. Porównując parametry mostów wybudowanych w Europie w latach 60. XX w., takich jak Severn, Bosforski czy Humber, zaprojektowanych przez brytyjską firmę Freemann Fox and Partners, z mostami amerykańskimi, w tym również lizbońskim 25 de Abril, można bardzo łatwo zauważyć różnicę w całkowitej ciężarze mostów (tab. 1, tab. 2).

Otwarty w 1981 r. most Humber pobił rekord długości przęsła głównego Verrazano-Narrows, osiągając 1410 m. Ma on konstrukcję podobną do zastosowanej w mostach Severn i Bosforskim, a więc płytki, opływowy, skrzynkowy pomost. Pylony wykonane są z betonu. Niezwykłą cechą mostu jest zróżnicowana długość przęseł bocznych, z których jedno ma 280 m długości, a drugie 530 m. Taka asymetria nie była stosowana w żadnym z poprzednich projektów.

### **Most Akashi Kaikyō – palma pierwszeństwa w rękach Japończyków**

Dwie ostatnie dekady XX w. zdecydowanie należą do Japonii pod względem budowy nowych mostów wiszących. Do połowy minionego stulecia konstrukcje te nie były znane w Kraju Kwitnącej Wiśni. Wynikało to po części z braku wiedzy i technologii wykonania. Pierwszą konstrukcją o przęśle przekraczającym 200 m był most łukowy Saikai, zbudowany w 1955 r. Jednak w krótkim czasie mosty wiszące zaczęły przekraczać tę granicę i w latach 80. osiągnęły długości głównych przęseł w granicach 1000 m. Oglądając japońskie mosty, nietrudno doszukać się podobieństw do technologii rozwiniętej w Ameryce w latach 20. i 30. tak pod względem konstrukcji pylonów, jak i pomostów oraz ich usztywnień. Japońscy inżynierowie przejęli całkowicie amerykańską technologię, udoskonalając niektóre

elementy konstrukcyjne i dostosowując do lokalnych warunków, m.in. zwiększając odporność na trzęsienia ziemi i tajfuny. W 1998 r. zakończono budowę najdłuższego mostu świata, Akashi Kaikyō. Ta czterokilometrowa konstrukcja, o której mogli tylko marzyć mistrzowie mostów, Roebling, Modjeski, Steinman czy Ammann, ma przęsło główne o prawie dwukilometrowej długości i przęsła boczne po 960 m. Pomost wzmacnia głęboka na 14 m kratownica usztywniająca. Stalowe pylony o wysokości 283 m wspierają dwie liny główne o średnicy 1,12 m każda. Budowniczy w celu ochrony lin przed korozją powstającą w warunkach morskich zastosowali unikatową metodę osuszania wiązek drutów. Polega ona na usuwaniu wody z zabezpieczonego kabla przez właczanie osuszonego i odsolonego powietrza do wewnętrznych przestrzeni kabli. Inną innowacją konstrukcyjną jest umieszczenie na pylonach zestawu kilkudziesięciotonowych tłumików dla zapobiegania nadmiernym wibracjom dość smukłych w kształcie pylonów.

### **Most Wielki Bełt w Danii – nowy progresywny trend**

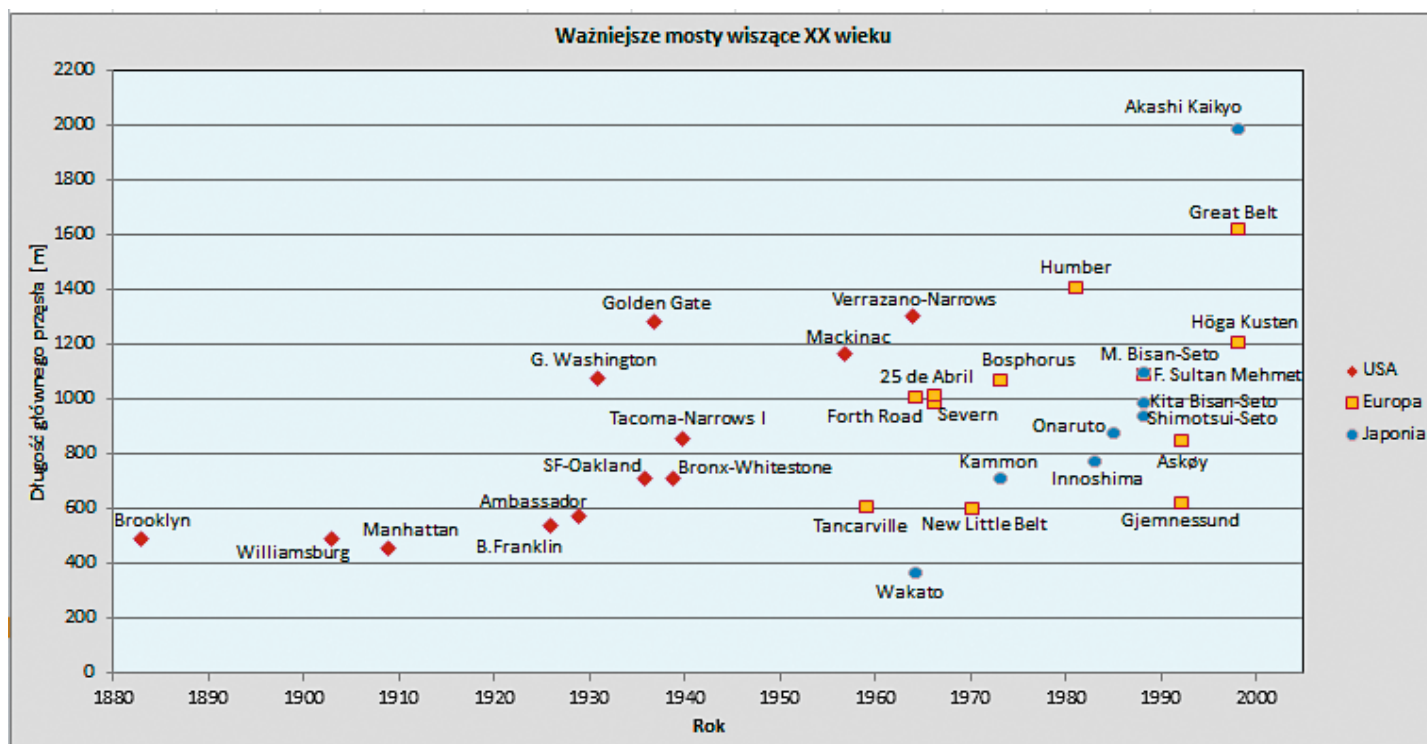
W roku otwarcia mostu Akashi Kaikyō w Danii zakończono budowę mostu Wielki Bełt. Jest to rekordowej długości konstrukcja mostu wiszącego w Europie, z przęsłem głównym o długości 1624 m i przęsłami bocznymi po 535 m. W tym projekcie inżynierowie zastosowali takie samo rozwiązanie pomostu, jak w projektach mostów Severn i Humber, a mianowicie płytki, opływowy kształt dźwigara skrzynkowego, liny nośne spięte z pomostem w środkowej części i tłumiki hydrauliczne dodane pomiędzy pomostem a blokami kotwiącymi. Pylony o wysokości 254 m są wykonane z betonu o prostej geometrii, z tylko dwiema belkami poprzecznymi między słupami pylonu. Szczególne znaczenie ma pominięcie belki poprzecznej pod pomostem dla umożliwienia ciągłości dźwigara skrzynkowego. Smukłość mostu wyrażona proporcją głębokości do długości przęsła pobiła wszelkie dotychczasowe rekordy w historii mostownictwa i wyniosła 1:400. Trend w rozwoju mostów wiszących po raz kolejny dokonał zwrotu. Po tragedii mostu



Tab. 2. Zestawienie mostów wiszących w Europie i Japonii

Mosty wiszące w Europie i Japonii												
Nazwa mostu		Tancarville	Forth Road	Severn	25 de Abril	nowy Mały Belt	Bosforski	Humber	drugi most Bosforski	Höga Kusten	Wielki Belt	Akashi Kaikyō
Rok budowy		1959	1964	1966	1966	1970	1973	1981	1988	1998	1998	1998
Kraj		Francja	Anglia	Anglia	Portugalia	Dania	Turcja	Anglia	Turcja	Szwecja	Dania	Japonia
Główny projektant		La Chambre de commerce et d'industrie	Freeman Fox & Partners, Mott, Hay and Anderson	G. Roberts, Freeman Fox & Partners	Steinman, Boynton, Gronquist & London, Parsons	C. Ostfeld, O. Nielsen	G. Roberts, M. Parsons, Freeman Fox & Partners	Freeman Fox & Partners	Freeman Fox & Partners, BOTEK	K. Ekesund, G. Jorgensen, L. Pettersson	COWI & Ramboll	Satoshi Kashima
Długość głównego przęsła	m	608	1006	988	1012	600	1074	1410	1090	1210	1624	1991
Całkowita długość mostu	m	1060	2500	1600	2277	1080	1560	2220	1510	1867	2694	3910
Szerokość pomostu (rozstaw lin głównych)	m	12,5	33	22,9	23,5	33	33,4	28,5	39	22	31	35,5
Liczba pasów ruchu		4	4	4	6 + 2	6	6	4	8	4	4	6 + 4
Wysokość pylonów	m	123	156	136	190	120	165	156	107	178	256	283
Średnica liny nośnej	mm	580	590	508	586	580	584	700	770	652	827	1120
Całkowity ciężar konstrukcji stalowej	t	7500	39 000	19 000	52 400	30 000	17 900	16 700	13 600	17 000	96 000	135 600

Tab. 3. Mosty wiszące XX w.



Tacoma Narrows amerykańscy projektanci wrócili do koncepcji Roeblinga, stosując głębokie usztywnienia kratownicowe przy proporcji głębokości do długości nieprzekraczającej 1:200. W przypadku Tacoma Narrows wskaźnik smukłości wynosił 1:350. Już konstrukcja mostu Severn wykazała, że możliwe jest zaprojektowanie mostu z płytowym dźwigarem przy proporcji zbliżonej do fatalnego mostu Tacoma Narrows. Konieczne są jednak do spełnienia odpowiednie warunki, które potwierdził projekt mostu Humber wskaźnikiem 1:313. Jak to więc stało się możliwe i co zostało przedsięwzięte, żeby zapobiec potencjalnej katastrofie? Przede wszystkim dźwigar usztywniający jest spawanym, zamkniętym, a więc szczelnym blokiem skrzynkowym o głębokości 4 m. Krawędzie boczne dźwigara dla zmniejszenia oporu powietrza mają wyprofilowany kształt. Pionowe wieszaki linowe podczepiono przegubowo do opasek kablowych. Liny nośne w środkowej części połączone są na sztywno z pomostem. Konstrukcja dźwigara jest ciągła na całej długości i nie jest podparta przez pylony. Tak więc ciężar pomostu całkowicie wisi na dwóch linach nośnych. Jedyne podparcie stanowią bloki kotwiące po obu stronach mostu, na których zamontowano tłumiki do kontrolowania nadmiernych ruchów wzdłużnych dźwigara. Inną konstrukcyjną innowacją jest budowa betonowych pylonów o wyprofilowanym kształcie.

Wiek XX kończą dwie wspaniałe konstrukcje mostów wiszących o zupełnie odmiennej koncepcji projektowania i wykonania. Japoński most Akashi Kaikyō, którego inżynierowie bazowali głównie na tradycyjnym rozwiązaniu, z głęboką kratownicą i stalowymi pylonami. Duński most Wielki Biełt oparto na prekursorskiej koncepcji projektowania, z płytowym, profilowanym dźwigarem i betonowymi pylonami. Wydaje się, że ten trend otwiera nowy, progresywny rozdział w budownictwie mostów wiszących dla bardzo długich przepraw i daje realne nadzieje na pokonanie nadchodzących inżynierskich wyzwań.

## Literatura

- [1] Dąbrowiecki K.: *Mosty Tacoma Narrows*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2010, nr 5, s. 66–70.
- [2] Moisseiff L.: *The towers, cables and stiffening trusses of the bridge over the Delaware River between Philadelphia and Camden*. J. Franklin Institute, October 1925.
- [3] Moisseiff L.: *Note to A Generalized Deflection Theory for Suspension Bridge by D.B. Steinman*. „Transactions of the American Society of Civil Engineers” 1935, Vol. 100, pp. 1205–1209.
- [4] Ammann O.H.: *George Washington Bridge: general conception and development of design*. „Transactions of the American Society of Civil Engineers” 1933, Vol. 97, Paper no. 1818, pp. 1–65.
- [5] Le Corbusier: *When the cathedrals were white: A journey to the country of timid people*, 1947.
- [6] Dąbrowiecki K.: *Magiczny most Golden Gate*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2009, nr 1, s. 8–11.
- [7] Steinman D., Watson R.: *Bridges and Their Builders*. Dover Publications, 1957.
- [8] Dąbrowiecki K.: *Lizboński most wiszący – Ponte 25 de Abril*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2019, nr 1, s. 56–59.
- [9] Roberts G.: *The Severn Bridge design: a new principle of design*. Proceedings, International Symposium on Suspension Bridges, Lisbon, Portugal, 1966.



Most Wielki Biełt, fot. mema, Adobe Stock

- [10] Buonopane S.G., Billington D.P.: *Theory and History of Suspension Bridges Design from 1823 to 1940*. „Journal of Structural Engineering” 1993, Vol. 119, Issue 3, pp. 954–977.
- [11] Brown D.J.: *Bridges – Three Thousand Years of Defying Nature*. MBI Publishing Company, 2001.
- [12] Kurrer K.: *The History of Theory of Structures*. Ernst & Sons, 2008.
- [13] Timoshenko S.: *History of Strength of Materials*. Dover Publications, 1983.
- [14] Kranakis E.: *Constructing a Bridge. An Exploration of Engineering Culture, Design and Research in Nineteenth-Century France and America*. MIT Press. Cambridge 1997.
- [15] Petroski H.: *Engineers of Dreams. Great Bridge Builders and the Spanning of America*. Vintage Books, 1996.
- [16] Kawada T.: *History of the Modern Suspension Bridge. Solving the Dilemma between Economy and Stiffness*. ASCE Press, 2010.
- [17] Peters F.T.: *Transitions in Engineering*. Birkhauser Verlag, 1987.
- [18] Gimsing N., Georgakis C.: *Cable Supported Bridges. Concept and Design*. Technical University of Denmark, 2012.
- [19] Ostfeld K.: *Design of the Great Belt East Bridge*, 1995.
- [20] Syken J.M.: *Mighty Mac: Bridging the Mackinac Straits*. PDH Center, 2013.
- [21] Billington D.P.: *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press, 1985.
- [22] Nagai M., Yabuki T., Suzuki S.: *Design Practice in Japan*. CRC Press, 2000.
- [23] Materiały firmy COWI.
- [24] Dąbrowiecki K.: *Przebudowa mostu San Francisco – Oakland*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2008, nr 4, s. 24–27.
- [25] Dąbrowiecki K.: *Wiszący most Carquinez*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2009, nr 2, s. 42–45.
- [26] Dąbrowiecki K.: *Most Brookliński – dzieło życia Roeblingów*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2011, nr 5, s. 74–78.

