

Historia i analiza kolejowo- -drogowych mostów wiszących



tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

Rewolucja przemysłowo-technologiczna rozpoczęta w Anglii pod koniec XVIII w. i kontynuowana w wielu dziedzinach w XIX w. w krajach Europy Zachodniej doprowadziła do powstania nowych gałęzi przemysłu, takich jak m.in. przemysł metalurgiczny, stoczniowy, transportowy. Zmechanizowanie produkcji, wynalezienie i zastosowanie maszyny parowej, wprowadzenie nowych technologii i maszyn przemysłowych miało duży wpływ na szybki rozwój gospodarczy, handel i transport. Rosnące uprzemysłowienie Europy oraz zaludnianie i rozwój kontynentalnych terenów nowo powstałych stanów Ameryki Północnej wymagały dobrego transportu, głównie kolejowego, w tym budowy torów i mostów. W Stanach Zjednoczonych rozwijano z rozmachem w drugiej połowie XIX w. sieć kolejową, będącą jedyną drogą transportu z wybrzeża wschodniego na zachodnie. Jednak stosowane rozwiązania i technologie budowy belkowych czy wspornikowych mostów drewnianych, choć tanie w budowie, nie spełniały rosnących wymagań transportowych, szczególnie w przeprawach wodnych na znaczne odległości lub nad stromymi i głębokimi wąwozami. Poszukiwano odpowiednich koncepcji dla długich przepraw, dlatego pomysł budowy mostów wiszących wydawał się skutecznym i właściwym rozwiązaniem.

Most Stockton w Anglii

W historii budownictwa mostowego uznaje się, że kolejowy most wiszący Stockton, zbudowany w Anglii w 1830 r., był pierwszą tego typu konstrukcją w dziejach światowego budownictwa lądowego. Autorem projektu był Samuel Brown (1776–1852), emerytowany oficer marynarki wojennej, który nabrał doświadczenia, realizując dekadę wcześniej budowę wiszącego mostu Union (1820) nad rzeką Tweed między Szkocją a Anglią. Jednopoziomowy most Stockton o całkowitej długości 126 m, którego główne przęsło miało długość 66 m, był przeznaczony do prowadzenia jednego toru kolei. Pomost podtrzymywały dwa łańcuchy. Podobnie jak w projekcie mostu Union, Brown użył prętów oczkowych w trzech rzędach jako łańcuchów nośnych, które zostały wsparte na murowanych, portalowych pylonach. Nieusztyniony pomost o szerokości 1,8 m nie zapewniał jednak odpowiedniej wytrzymałości do przenoszenia 112-tonowego



Most Stockton, fot. Wikimedia Commons

obciążenia lokomotywy z wagonami węglowymi i znacznie ugiął się podczas przejazdu pociągu. Niebezpieczne ugięcia pomostu zostały stwierdzone już w czasie pierwszej próby, wywołując wśród maszynistów strach przed zawaleniem się mostu. Dodatkowo pylony były na tyle mało wytrzymałe konstrukcyjnie, że szybko popękały. W świetle raportów z testów mało wiarygodna jest grafika mostu prezentująca w prasie obraz nieodkształconego mostu wiszącego z pociągiem, w skład którego wchodziła lokomotywa i 25 wagoników.

Aby kolej mogła korzystać ze zbudowanego mostu, musiał on zostać podparty w środkowej części przęsła, równocześnie prędkość przejazdu została ograniczona do kilku kilometrów na godzinę, a ponadto wprowadzono znaczne odstępy pomiędzy wagonami dla zmniejszenia obciążenia ruchomego. Ostatecznie most Stockton został rozebrany, a ruch kolejowy przejął równolegle wybudowany przez Roberta Stephensona (1803–1859) most pięcioprzęsłowy, kratownicowo-dźwigarowy (1844). Pierwsza próba budowy kolejowego mostu wiszącego była tak nieudana, że od tamtego czasu aż do dzisiaj w Anglii nie powstała żadna konstrukcja mostu wiszącego przeznaczonego dla ruchu kolejowego, nawet dla kolei podmiejskiej.

Most Niagara Falls w Stanach Zjednoczonych

Nieco odmiennie potoczyły się losy tych konstrukcji w Stanach Zjednoczonych. Sukces pierwszego kolejowego mostu wiszącego Niagara Falls (1855) nad Niagarą odbił się szerokim echem w kraju i otworzył drogę do budowy inżynierskiego cudu świata, jakim później został nazwany most Brookliński (1883). Projektantem i głównym inżynierem obu konstrukcji był John A. Roebling (1806–1869). Ten niezwykle twórczy inżynier, wynalazca i autor

licznych patentów (US patent 2720, 4710, 4945), przedsiębiorca, uczeń Hegla, emigrant z Turyngii i filozof w jednej osobie na trwałe zapisał się na kartach historii budownictwa lądowego Ameryki. Pozostawił po sobie kanały wodne w Pensylwanii, mosty wiszące bijące światowe rekordy długości (Cincinnati, Nowy Jork) i dobrze prosperujące przedsiębiorstwo produkujące stalowe liny dla później zbudowanych mostów wiszących (Golden Gate) i dźwigów osobowych (Empire State Building). Historię rodziny Roeblingów przedstawiono w artykule [1]. Pomysł budowy kolejowego mostu wiszącego Niagara Falls poddał w 1845 r. Charles B. Stuart, amerykański inżynier, który pracował wtedy dla linii kolejowej Great Western w Kanadzie. Zaproponował połączenie ze sobą kolei kanadyjskiej z amerykańską. Zasugerował poprowadzenie kolejowego mostu wiszącego pomiędzy jeziorami Ontario i Erie nad Niagarą. Wielu współczesnych mu inżynierów było przeciwnych temu pomysłowi. Aby rozwiązać wszelkie wątpliwości, Stuart zwrócił się do znanych ówczesnie w kraju ekspertów z pytaniem, czy możliwa jest budowa takiego mostu. Na ankietę Stuarta pozytywnie odpowiedzieli m.in. Charles Ellet Jr. (1810–1862) i John A. Roebling. Zlecenie otrzymał Ellet, uważany w tamtym czasie za najbardziej doświadczony inżyniera w zakresie budowy mostów wiszących. Jednak po roku pracy, z powodu konfliktu z zarządem mostu, został zwolniony przez spółkę, a na jego miejsce przyjęto Johna A. Roeblinga. Chętnie podjął się on trudnego zadania i zaprojektował bardzo innowacyjną w tamtym czasie konstrukcję dwupoziomowego mostu kolejowo-drogowego. Interesujący jest opis zawarty w 50-stronicowym raporcie końcowym głównego budowniczego mostu Niagara, skierowanego do zarządu mostu (1855) [2]. Na wstępie Roebling pisze: „Z wielką przyjemnością mogę zakomunikować, że kolejowy most wiszący Niagara został w całości ukończony. Sukces tej pracy można uznać obecnie za zaistniały fakt. Pociągi New York Central i Great Western w Kanadzie kursują regularnie od 18 marca [1855], średnio ponad 30 kursów dziennie” i dalej: „Wspólne zastosowanie drewna i żelaza w połączeniu z drutem umożliwiło wykonanie tak dużej konstrukcji małym kosztem. W przyszłości wraz z rozwojem i zwiększonym ruchem, gdy wydatki na prace publiczne będą większe, zbudujemy mosty całkowicie z żelaza, pomijając wszelkie mało trwałe materiały. Zobaczmy wtedy wiszące mosty kolejowe o rozpiętości 2000 stóp [667 m], które pozwolą na przejazd pociągów z większą prędkością”. Roebling odniósł się również do drgań konstrukcji podczas przejazdu pociągu: „Most Niagara posiada pożądaną sztywność, znacznie większą, niż jest to faktycznie potrzebne do bezpiecznego przejazdu pociągów. Pociąg jest bezpieczny, nie ma na świecie mostu kamiennego, żeliwnego czy kutego, który byłby wolny od wszelkich wibracji”.

Raport zawiera również wiele bardzo cennych wskazówek dla przyszłych inżynierów budownictwa lądowego, dlatego przytoczę jedną z nich, moim zdaniem kluczową i interesującą z technicznego punktu widzenia. Roebling podkreśla: „Ciężar jest najbardziej podstawowym składnikiem, gdy głównym celem rozwiązania jest sztywność, pod warunkiem, że jest właściwie wykorzystywany w połączeniu z innymi elementami. Jeśli pozostawiony jest sam sobie, jak było w przypadku mostu Wheeling, może oznaczać zniszczenie. Most ten został zniszczony przez momenty powstałe pod wpływem jego własnego ciężaru, gdy kołysał się w górę i w dół pod działaniem sił wiatru. Silny wiatr, działając na wiszący pomost pozbawiony właściwej sztywności,

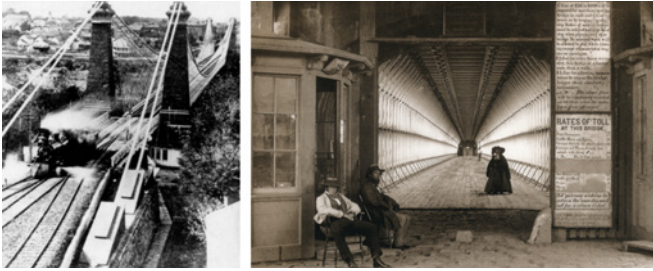
będzie produkować serię falowań, które rozchodzą się od środka w każdą ze stron. A z tego wynika konieczność wprowadzenia zasady trójkąta, tak aby utworzyć stacjonarne punkty i tym samym kontrolę drgań i przywracania równowagi. Falowania pod wpływem wiatru będą wzrastały do pewnego stopnia, do wyprodukowania przez stały podmuch momentu sił, który może okazać się silniejszy od kabli. I choć ciężar pomostu jest bardzo istotnym elementem oporu wobec silnych wiatrów, nie powinien być pozostawiony sam sobie, bo doprowadzi do własnej zagłady. Ciężar powinien być po prostu czynnym składnikiem dla jeszcze ważniejszego wymogu, jakim jest odpowiednia sztywność. Nie dodając wiele do ciężaru konstrukcji, zaskakujący stopień sztywności uzyskuje się przez połączenie działania dźwigarów i kratownic. Ta kombinacja w pełni spełniła moje oczekiwania. Innymi środkami sztywności, jakie zastosowałem, są wanty powyżej, jak również poniżej pomostu. Mosty o półmilowych przesłach dla przejazdów drogowych lub kolejowych mogą być zbudowane przy użyciu żelaznych kabli przy zachowaniu całkowitego bezpieczeństwa. A zastępując je najwyższej jakości stalowym drutem, możemy niemal dwukrotnie zwiększyć długość przesł, zapewniając ten sam poziom bezpieczeństwa”.

Zatem, jak można wnioskować z przytoczonego cytatu, Roebling zdawał sobie sprawę ze współzależności zasadniczych elementów konstrukcji: parabolicznych kabli głównych, diagonalnych kabli (lin wantowych), kratownicy usztywniającej pomost i dodatkowo wpływu wiatru na poszczególne elementy konstrukcji. Potwierdzeniem tego, że zdawał sobie sprawę z wad mostów wiszących przeznaczonych dla kolei, świadczy jego wcześniejszy artykuł opublikowany w „American Railroad Journal and Mechanics Magazine” (1841), w którym uzasadnia użycie kabli wantowych dla większego usztywnienia dźwigarów mostów. Zauważył, że przy równomiernym obciążeniu środkowe przesł mostu wiszącego ugina się o 55% bardziej niż mostu wantowego o tej samej długości, a przy obciążeniu połowy przesła głównego ugięcie mostu wiszącego jest o ok. 200% większe w porównaniu z mostem wantowym. Stwierdził ponadto, że porywisty wiatr może z łatwością wprowadzić most wiszący w niebezpieczne oscylacje rezonansowe, które mogą doprowadzić do jego zniszczenia. Do tłumienia takich niebezpiecznych oscylacji zaproponował dodatkowe kable wantowe. Zatem nowatorstwo jego analizy polegało na połączeniu i uwzględnieniu w obliczeniach wszystkich istotnych składników i zaprojektowania hybrydowego rozwiązania dla mostów wiszących poddawanych okresowemu, ale bardzo dużym obciążeniom ruchomym. Według Roeblinga takie podejście pozwalało na budowanie coraz to dłuższych przesł, przewyższając problemy towarzyszące zwiększonym rozpiętościom.

Kolejowo-drogowy most Niagara Falls miał dwa poziomy: górny przeznaczony dla pociągów, dolny – dla ruchu drogowego. Długość przesła głównego wynosiła 251 m. Cztery kable, po



Most Niagara Falls, fot. [5]



Archiwalne zdjęcia mostu Niagara Falls, fot. Niagara Falls Public Library

dwa z każdej strony, były osadzone na czterech murowanych pylonach o wysokości 75 m. Każdy kabel składał się z 3640 nieocynkowanych drutów, ściśniętych i oplecionych dodatkowo drutem zabezpieczającym. Wieszaki przęsła głównego zostały ponadto wzmocnione wantami, rozchodzącymi się promieniście ze szczytów pylonów [3, 4].

Most Brooklyński w Nowym Jorku

30 lat później został oddany do użytku wiszący most Brooklyński w Nowym Jorku, zawierający wszystkie elementy konstrukcyjne, o których Roebling pisał w przytoczonym artykule i raporcie. Przęsło główne o szerokości 26 m było dwukrotnie dłuższe od mostu Niagara Falls (486 m) i zostało zaprojektowane dla ruchu kolejowo-drogowego. Lekki transport kolejowy przez most odbywał się między stacjami Brooklyn i Manhattan początkowo w jednym, a wkrótce w dwóch wagonach i był przeznaczony tylko dla ruchu pasażerskiego. Popularność tego środka transportu przez most w okresie przed erą samochodów była tak duża, że w pierwszym roku użytkowania skorzystało z niego ponad 9 mln pasażerów, a rok później ponad 18 mln. Washington Roebling, syn i kontynuator projektu ojca, nie wyraził zgody na użycie lokomotywy parowej do ciągnięcia wagonów pasażerskich przez most, obawiając się nieznanych mu skutków znacznego ugięcia pod wpływem punktowego obciążenia działającego na długie przęsło.



Grafika i zdjęcie mostu Brooklyńskiego pod koniec XIX i na początku XX w., fot. Granger, NYPost.com

Dlatego do przejazdu wagonów pomiędzy stacjami po dwóch stronach mostu zastosowano system linowy napędzany maszyną parową umieszczoną po stronie Brooklynu. Sam koncept ciągnięcia wagonów był zbliżony co do zasady do ruchu ulicznego tramwaju linowego w San Francisco. Wagony były ciągnięte liną napędzaną maszyną parową znajdującą się na łądzie. Zarząd mostu kilka lat po oddaniu go do użytku musiał zmierzyć się z malejącą przepustowością kolejki wobec rosnącej liczby przewożonych pasażerów, sięgającej 31 mln w 1888 r. Wprowadzono wtedy większą liczbę wagonów i zaczęto przeprowadzać modernizację stacji końcowych w celu skrócenia czasu oczekiwania, wsiadania i wysiadania pasażerów przy jednoczesnym usprawnianiu systemu napędowego. Ten proces doskonalenia szybkiego transportu trwał nieustannie nawet wtedy, gdy Nowy Jork budował w sąsiedztwie, nad cieśniną East

River, kolejne mosty i tunele, a wraz z nimi metro, czyli system szybkiej kolejowej komunikacji miejskiej. W 1908 r. zamknięto na moście Brooklyńskim kolejkę linową, zastępując ją tramwajami i trolejbusami. W 1950 r. ostatecznie zlikwidowano ostatnie stacje i zamknięto linie tramwajowo-trolejbusowe, przeznaczając most całkowicie dla ruchu drogowego, pieszego i rowerowego [6].

Most Williamsburg w Nowym Jorku



Drogowo-kolejowy most Williamsburg, fot. K. Dąbrowiecki

Drugi most łączący Manhattan z Brooklynem, otwarty dla ruchu w 1903 r., został zaprojektowany przez Lefferta L. Bucka (1837–1909). Masywne kratownice usztywniające i żelazne, zaprojektowane w gotyckim stylu pylonów pozwalały na poprowadzenie oprócz dwupasmowych jezdni – początkowo dla powozów, a po 1920 r. dla samochodów – dwóch torów kolejowych. Współcześnie dodano drogę dla rowerów i pieszych. Most Williamsburg ma 2227 m długości, a jego główne przęsło 488 m [7].



Kratownica i torowisko mostu Williamsburg, fot. YouTube: *Riding a J NYC Subway Train across the Williamsburg Bridge to Brooklyn*

Ta niezwykle potrzebna przeprawa dla udroźnienia ruchu pasażerskiego między dzielnicami Williamsburg i Lower Manhattan nie rozwiązała jednak problemów komunikacyjnych miasta.

Most Manhattan w Nowym Jorku

Projekt kolejnego mostu był kamieniem milowym w światowym budownictwie lądowym. Trzeci most wiszący (Manhattan, 1909), którego głównym inżynierem był Othniel F. Nichols (1845–1908), został zaprojektowany według nowej teorii obliczeń wytrzymałościowych konstrukcji wiszących. Koncepcja obliczeniowa zainicjowana przez Josefa Melana (1854–1941) została zastosowana w Stanach Zjednoczonych po raz pierwszy przez Leona Moisseiffa (1872–1943) i Fredericka Lienharda w tym właśnie projekcie. O dokonanie weryfikacji obliczeń konstrukcyjnych zwrócono się do Ralpha Modjeskiego, który po analizie i opinii konsultanta Frederica E. Turneure'a w raporcie konkludował poprawność metody i możliwość jej zastosowania w obliczeniach wytrzymałościowych mostów wiszących. Konsekwencją śmiałego użycia przez Moisseiffa teorii ugięcia były znacznie lżejsze i płytsze kratownice usztywniające, a tym samym mniejsza ilość materiałów wymagana do ich budowy. Ponadto Manhattan był pierwszym mostem wiszącym, w którego konstrukcji wykorzystano kratownicę War-

rena oraz, na co zwracają szczególną uwagę inżynierowie, był pierwszym mostem, który wzniesiono, używając stali niklowej, lżejszej i wytrzymalszej od stali węglowej [8].



Pylon i kratownica mostu Manhattan, fot. Mohit, Adobe Stock

Most o całkowitej długości 2089 m, prześle środkowym 451 m i szerokości pomostu 37 m przeznaczony był dla ruchu drogowo-kolejowego. Miał siedem pasów ruchu samochodowego, w tym cztery na górnym poziomie i trzy na dolnym oraz cztery tory na poziomie dolnym. Umieszczenie torów kolejowych oddalonych od osi mostu oraz cykliczne, asymetryczne obciążenia powstające od przejeżdżających pociągów metra stały się przyczyną powstawania sił skrętnych przy okresowym przechylaniu się konstrukcji na jedną lub drugą stronę. Konsekwencją tych przechyłów i cyklicznych dużych naprężeń było szybkie zużywanie się mostu, zmęczenie materiałowe, a w związku z tym liczne kosztowne naprawy i ograniczenia w ruchu pociągów, szczególnie uciążliwe współcześnie [9].



Szkic obrazujący rozkład jezdni i torowisk na moście Manhattan

W Nowym Jorku obecnie tylko dwa z siedmiu mostów wiszących są przeznaczone dla wspólnego ruchu drogowego i kolejowego, są to mosty Williamsburg i Manhattan.

Most Benamina Franklina w Filadelfii

W 1926 r. w Filadelfii oddano do użytku most Camden (później nazwany imieniem Benamina Franklina), który do czasu zbudowania mostu Ambassador (1929) był najdłuższym mostem wiszącym na świecie. Głównym inżynierem był Ralph Modjeski, a inżynierem konstruktorem Leon Moisseiff. Modjeski w komentarzu do artykułu o mostach tak pisał o estetyce konstrukcji („Journal of the Western Society of Engineers”, 1898): „Wydaje się, że nawet wśród najlepszych inżynierów naszego kraju panuje pogląd, że dodanie kilku żeliwnych gwiazd, wygiętych prętów, perforowanych płyt w portalach nada każdemu mostowi piękny wygląd. Jeśli szkielet mostu lub jakiegokolwiek konstrukcji nie jest zaprojektowany estetycznie, takie drobne ozdoby tylko pogarszają sprawę i zawsze należy odradzać. Nie można wziąć szkieletu garbusa i zrobić z niego Apolla, pokrywając go dowolną ilością pięknego ciała i skóry. Jeśli konstrukcja ma być piękna, jej strona estetyczna musi być traktowana na równi z jej stabilnością.

Obie muszą prowadzić projektanta od samego początku projektu; szkielet musi być zbudowany w harmonii z ornamentami”. Pierwotnie projekt mostu Camden przewidywał sześć pasów ruchu drogowego i po dwa tory tramwajowe i kolejowe. Jednak linie tramwajowe nigdy nie zostały oddane do użytku i w 1932 r. tory usunięto, wprowadzając w ich miejsce dodatkowe pasy ruchu [10].



Budowa mostu Camden (Benamina Franklina), fot. Delaware River Port Authority Archive



Most Benamina Franklina z przejeżdżającą kolejką podmiejską, fot. Jin, Adobe Stock

Wraz z rosnącym ruchem komunikacyjnym w latach 30. XX w. zarząd mostu, Delaware River Joint Commission, zdecydował o instalacji na konstrukcji zewnętrznej mostu torów kolejowych. Podmiejska kolejka elektryczna rozpoczęła kursowanie przez most w 1936 r. Stanisław Kunicki (1859–1942), profesor Politechniki Warszawskiej, analizując konstrukcję obiektu w artykule dla „Przeglądu Technicznego” [11], przedstawia różnice i charakterystyczne cechy projektu Ralpa Modjeskiego w porównaniu z mostami wiszącymi w Nowym Jorku. Zalicza do nich m.in. dwie linie nośne zamiast czterech, wyeliminowanie lin ukośnych, żelazo-betonową płytę jezdni, nieruchome połączenie lin nośnych z pylonami, liny z drutów równoległych zamiast skręconych, użycie zróżnicowanych gatunków materiałów do różnych części ustroju, obliczenie ustroju metodą ugięć, uwzględnienie odkształceń wszystkich jego części, tj. pylonów, lin i belek usztywniających, uwzględnienie możliwych zderzeń samolotów z pylonami, uwzględnienie panujących w miejscowościach nadmorskich silnych wiatrów, zwrócenie uwagi na względy estetyczne i na architektoniczne opracowanie projektu mostu, względną taniocę w porównaniu ze sztywnym mostem wspornikowym. Kunicki konkluduje: „Należy się spodziewać, że znakomite dzieło naszego rodaka, Dra. Inż. Ralpa Modrzejewskiego, posłuży jako wzór i da impuls do szerszego zastosowania w przyszłości systemu wiszącego do budowy mostów o dużych rozpiętościach, powyżej 300 m, co dałoby możliwość unikania budowy filarów na żeglownych rzekach i osiągnięcia budowlu mostowych względnie tanich, a mających lekki i piękny wygląd”.

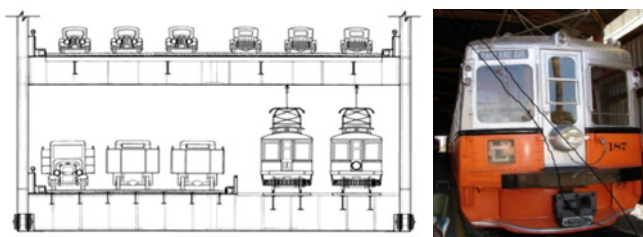
Most San Francisco – Oakland Bay w zatoce San Francisco

W 1936 r. na zachodnim wybrzeżu Stanów Zjednoczonych został oddany do użytku most kolos, przecinający zatokę ze wschodu na zachód, który połączył miasta Oakland i San Francisco. W skład tej wyjątkowej konstrukcji wchodziły cztery mosty: po zachodniej stronie wyspy Yerba Buena dwa mosty wiszące mające pomiędzy sobą wspólne betonowe zakotwienie i po wschodniej stronie wyspy kratownicowy most wspornikowy i wieloprzęsłowy most kratownicowy.



Most San Francisco – Oakland Bay, strona zachodnia i wschodnia przed przebudową, fot. K. Dąbrowiecki

Historię budowy i przebudowy tego mostu przedstawiono w [12], dlatego w tym artykule zostanie omówiony tylko aspekt kolejowy. Kolejowy ruch pasażerski na tym moście rozpoczął się w styczniu 1939 r. i był prowadzony przez prywatną firmę Key System. Miała ona długoletnie doświadczenie, sięgające początku wieku, w transporcie publicznym, kolejowym i autobusowym w San Francisco, Oakland i San Jose. Dolny poziom dwupoziomowej konstrukcji został podzielony na dwie części: drogową, przeznaczoną dla samochodów ciężarowych (trzy pasy ruchu), i kolejową dla lekkich pociągów elektrycznych (dwa tory). Wynalazkiem firmy było użycie pantografów do zasilania silników elektrycznych, które były montowane na dachu każdego wagonu. Z upływem lat tabor kolejowy uległ znacznej zmianie i licznym udoskonaleniom. Początkowo składał się ze specjalnie zaprojektowanych i przeznaczonych do użytku tylko na tym moście „jednostek mostowych”. Kabiny wagonów były wykonane z drewna, później zostały zastąpione metalowymi. Dużym udoskonaleniem wagonów było rozplanowanie szeregu drzwi z boku wagonów przegubowych, a nie jak wcześniej tylko z przodu i z tyłu. Rozwiązanie to stało się prekursorem większości projektowanych do dziś linii metra i lekkich pojazdów szynowych na świecie.



Przekrój mostu San Francisco – Oakland Bay (w oryginalnej wersji) i zdjęcie mostowego wagonika kolejowego, rys. i fot. [13]

Dobrze prosperujące linie tramwajowe i kolejowe w miastach amerykańskich, w tym położonych nad zatoką San Francisco, w latach 30. i 40. XX w. stały się ofiarą potężnego lobby samochodowego kontrolowanego przez General Motors. GM był aktywnie zaangażowany w monopolizację sprzedaży autobusów i dostaw, m.in. dla National City Lines (NCL). W 1946 r. NCL przejął 64% udziałów Key System i rozpoczął proces zastępowania transportu tramwajowo-kolejowego autobusami. Ostatecznie ruch kolejowy na moście San Francisco – Oakland Bay został zamknięty w 1958 r. Po likwidacji torów oba poziomy przeznaczono dla jednokierunkowego ruchu samochodów. Ruch kolejowy przez zatokę został wznowiony w latach 70. XX w. przez BART (Bay Area Rapid Transit), który przez podwodny, dwukanałowy tunel osadzony na dnie ponownie połączył koleją wschodnią i zachodnią część zatoki.

Most Salazara w Lizbonie

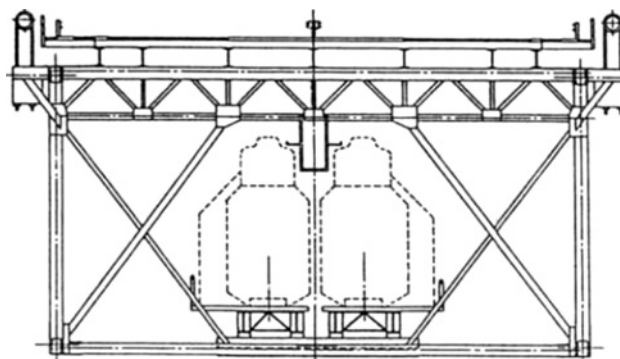
30 lat po wybudowaniu mostu San Francisco – Oakland Bay w 1966 r. w Lizbonie oddano do użytku najdłuższy w tamtym czasie most wiszący w Europie – most Salazara. Po obaleniu dyktatury został przemianowany na ponte 25 de Abril.



Most Lizboński (Ponte 25 de Abril), fot. K. Dąbrowiecki

Konstrukcja o całkowitej długości 2277 m i szerokości 24 m ma pylony o wysokości 190 m rozstawione w odległości 1013 m [14]. Choć początkowo miał to być most drogowo-kolejowy, to jednak część kolejowa w postaci dwóch torów na dolnym poziomie została dobudowana dopiero w 1998 r. Wprowadzenie dodatkowego, kolejowego obciążenia wymagało nowych analiz i badań, w wyniku których zainstalowano dodatkową parę lin nośnych na podwyższonych pylonach, usztywniono pomost drogowy i wprowadzono odpowiednie procedury przejazdu pociągów przez most.

Problemem, z którym musieli się zmierzyć inżynierowie w tym czasie, był brak odpowiednich krajowych i europejskich zaleceń do zastosowania w zmodernizowanym rozwiązaniu. Istniejące kodeksy przyjmowały zbyt rygorystyczne kryteria projektowania. Antonio Reis i Jose Pedro w opracowaniu *Railway Installation on the Tagus Suspension Bridge in Lisbon, Portugal* [15] wyjaśniają: „Most został pierwotnie zaprojektowany dla lekkich pociągów, a standardowe obciążenia kolejowe UIC (Union Internationale de Chemins de Fer), przyjęte w kodeksie portugalskim, spowodowałyby zbyt surowe kryterium projektowe, biorąc pod uwagę typ pociągów, które mają kursować przez most. Uwzględniono nośność filarów, pylonów i fundamentów, a także granice ugięcia wymagane dla wiszących przeseł. Na podstawie kilku opracowań zdecydowano się zaprojektować wzmocnienie mostu dla zestawu obciążeń pociągów, z których najpoważniejsze to pociągi towarowe o maksymalnym obciążeniu 13 800 kN, pociągi pasażerskie o maksymalnym obciążeniu 7232 kN dla typu 4UTE i pociągi dwupoziomowe o nacisku 7400 kN. Ze względów techniczno-ekonomicznych zdecydowano o wprowadzeniu następujących ograniczeń ruchu: tylko jeden pociąg towarowy na moście wiszącym, maksymalnie dwa pociągi pasażerskie jednocześnie na moście wiszącym, maksymalna prędkość pociągu to 60 km/h i maksymalna przewidywana liczba pociągów na moście to 250 dziennie w każdym kierunku”.



Przekrój kratownicy mostu Lizbońskiego, rys. [15]

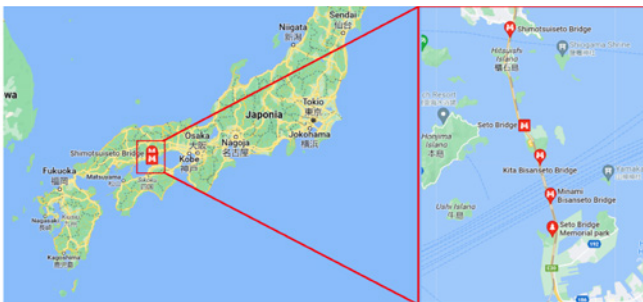
Most Lizboński jest obecnie najdłuższym czynnym wiszącym mostem drogowo-kolejowym w Europie. Dlatego warto śledzić i studiować eksploatację tej przeprawy przez najbliższe lata dla poznania zachowania się materiałów tej konstrukcji pod wpływem zmieniających się obciążeń i drgań powstających podczas przejazdu pociągów.



Most Lizboński z przejeżdżającym pociągiem, fot. K. Dąbrowiecki

Mosty między wyspami Honsiu i Sikoku w Japonii

Ostatnia dekada XX w. usytuowała japońskich inżynierów w czołówce światowego budownictwa mostowego. Stało się to głównie za sprawą połączeń mostowych pomiędzy główną wyspą Honsiu i wyspą Sikoku w rejonie Okayama oraz pomiędzy wyspami Sikoku, Awaji i Honsiu w rejonie Kobe nad cieśninami Naruto i Akashi. Pierwsza przeprawa powstała w 1988 r. i objęła serię mostów, m.in. wiszące mosty drogowo-kolejowe Minami Bisan-Seto (rozpiętość przęsła środkowego 1100 m), Kita Bisan-Seto (rozpiętość przęsła środkowego 990 m) i Shimotsui-Seto (rozpiętość przęsła środkowego 940 m). W skład ponad 13-kilometrowego ciągu mostów Honsiu – Sikoku wchodzi 11 dwupoziomowych konstrukcji mostowych, w tym trzy mosty wiszące, dwa podwieszane wantowe, kratownicowy i pięć wiaduktów. Górny poziom z czterema pasami ruchu, po dwa w każdą stronę, przeznaczony jest dla samochodów, natomiast dolny dla dwutorowej kolei [16, 17].



Lokalizacja przeprawy mostowej między wyspami Honsiu i Sikoku w rejonie Okayama, Google Map

Ciekawa z punktu widzenia architektury krajobrazu przeprawa, podziwiana przez turystów z różnych krajów, powstała w wyniku wszechstronnych analiz. Była szeroko dyskutowana w kręgach nie tylko inżynierskich, ale również architektów i przedstawicieli ochrony przyrody. Teren, na którym miała powstać konstrukcja, był unikatowy pod względem ekologicznym, stąd tak ważne było zapewnienie harmonii z otoczeniem. Do zbadania aspektów estetycznych zespołu mostów o dużej rozpiętości wybrano główne punkty widokowe: dwa po stronie Honsiu i dwa po stronie Sikoku dla osób przyjeżdżających podziwiać krajobrazy parku narodowego. Spośród pobliskich wysp reprezentatywny punkt widokowy stworzono na wyspie Honjima, a jako punkt widokowy z pokładu statku wybrano trasę promową Marugame – Shimotui. Badania przeprowadzono za pomocą kolorowych fotomontaży z tych punktów widokowych, aby określić, czy rodzaj konstrukcji

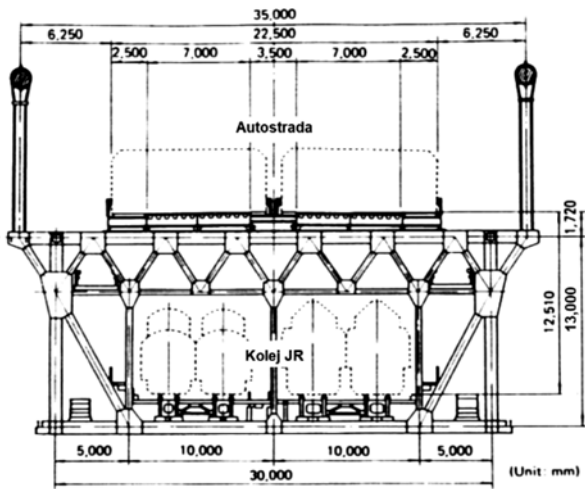
każdego mostu współgra z krajobrazem parku narodowego. Przytoczę sposób podejścia i analizy autorów końcowego rozwiązania architektury mostowej, w mojej opinii istotny, gdyż tak duże konstrukcje jak mosty są na kilka pokoleń wpisane w przestrzeń publiczną i ważne jest, aby obok funkcji praktycznych tworzyły harmonię z otoczeniem. W artykule *Aesthetic design on the Seto Ohashi bridge* [18] Takeaki Iijima i Hiro-o Jin piszą: „Pylony mostu wiszącego i mostu wantowego można przedstawić jako wyróżnik każdego mostu, ponieważ można je łatwo oglądać z wielu punktów widokowych, niezależnie od odległości. Z tego powodu konstrukcja pylonów została przeanalizowana w różnych wariantach nie tylko z punktu widzenia funkcji, ale także krajobrazu. Istnieje wiele rodzajów pylonów, takich jak pylony proste, nachylone i wygięte, a poza takimi konstrukcjami istnieją typy kratownicowe i sztywne ramy, które mają dobre cechy z punktu widzenia konstrukcji i krajobrazu. Istnieją również trójkątne, wypukłe i krzyżowe kształty przekroju pylonów, które mają zarówno zalety, jak i wady z punktu widzenia krajobrazu i konstrukcji. Łącząc te konfiguracje kolumn pylonów, materiałów i przekrojów oraz biorąc pod uwagę położenie każdego mostu z punktu widzenia krajobrazu, ekonomii i użyteczności, określono podstawową architekturę. Z punktu widokowego na górze Washu, który rocznie odwiedza ponad milion turystów, pylon staje się najbardziej wyróżniającą się budowlą i stanowi otwarcie mostu Seto Ohashi po stronie Honsiu. W przypadku projektu estetycznego przeprowadzono badania kwestionariuszowe oceny z punktu widzenia scenografii, przygotowując szkice 20 różnych typów pylonów. W wyniku badań wieża w typie sztywnej ramy, w przeciwieństwie do tej, której nie można było zobaczyć w przypadku mostów Innoshima i Ohnaruto, była do zaakceptowania, a skoro nie było zbyt dużej ekonomicznej różnicy w porównaniu z kratownicą, przyjęto pionowy pylon ze sztywną ramą. Ponieważ pylon jest o ok. 50 m niższy w porównaniu z pylonami mostów Minami i Kita Bisan-Seto, charakteryzuje się tym, że jest bardziej opływowy, gdyż nie ma elementów ukośnych w porównaniu z pylonami typu kratownicowego”.

Interesujący jest zespół mostów wiszących Minami Bisan-Seto i Kita Bisan-Seto, bowiem w konstrukcji połączenia wykorzystano rozwiązanie z zachodniej strony mostu San Francisco Bay ze wspólnym zakotwieniem dwóch mostów wiszących. Wzięto przy tym pod uwagę estetykę bloku kotwiącego, jak również jego negatywny wpływ na odczyty radarów przepływających obok statków. Stwierdzono, że pochylenie faktury na powierzchni bloku kotwiącego pod kątem większym niż 5 stopni może zapobiec załamaniom obrazu radaru, a przez to nie zniekształci odczytów z radarów statków. Ponadto ponieważ cień betonowego bloku zmienia się w zależności od położenia słońca, to faktura optycznie pomniejsza jego rozmiary.

W raporcie *Design of long span suspension bridges for combined highway and railway* (1988) [19] inżynierowie Ohashi, Narui, Fujii i Hirano przedstawiają problemy projektowe i rozwiązania mostów dla autostrad i kolei dużych prędkości, posługując się przykładem mostu



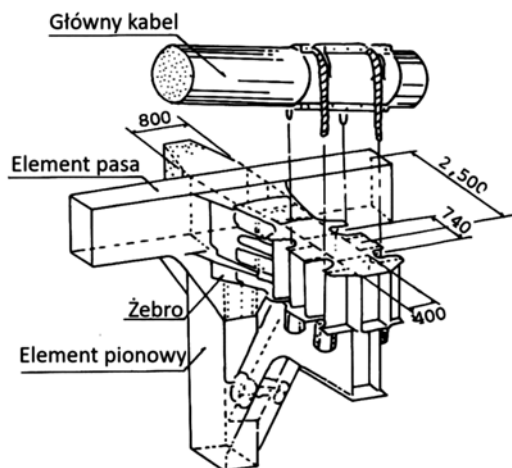
Mosty Minami Bisan-Seto i Kita Bisan-Seto, fot. Delphotostock Adobe Stock



Przekrój poprzeczny kratownicy mostu Kita Bisan-Seto, rys. [19]

ten o rozpiętości przesł 274 + 1100 + 274 m ma dwa pylony o wysokości 194 m. Główne liny nośne o średnicy 1070 mm mają długość 1780 m. Stalowy pomost wznosi się 65 m nad powierzchnią wody. Autorzy do głównych problemów zaliczają m.in. bezpieczeństwo eksploatacji pociągów dużych prędkości oraz ustanowienie kryteriów projektowych dotyczących zmęczenia konstrukcji poddawanej dużym ugięciom i siłom. Ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji kolei na podstawie przeprowadzonych analiz i obliczeń wybrano dźwigar trójprzesłowy, ciągły. Pod wpływem obciążenia ruchomego ogranicza on ugięcie pylonów i usztywnienia. Według projektantów mosty w okresie eksploatacji, czyli 100 lat, mają obsłużyć ponad 6 mln przejazdów pociągów, dlatego problem zmęczenia elementów konstrukcji uznano za jeden z najważniejszych tematów projektu. Przeprowadzono wiele testów zmęczeniowych krytycznych części konstrukcyjnych i badań pęknięcia materiałów. Na ich podstawie ustalono projektowe kryteria zmęczeniowe dla projektu. Przykładem jest przedstawiony szczegół wspornika lin wieszakowych, obliczony za pomocą metody elementów skończonych (MES) i badań zmęczeniowych.

Ponadto określono dodatkowe wymagania, takie jak procedury spawania poszczególnych elementów konstrukcyjnych, dobór materiałów spawalniczych, kwalifikacje spawaczy i ostrzejsze tolerancje wymiarowe wad spawalniczych. Wprowadzono automatyczne badanie ultradźwiękowe spawanych głównych elementów, aby upewnić się, że jakość konstrukcji spawanej spełnia określone wymagania zmęczeniowe.



Wspornik i zawieszenie lin wieszakowych, rys. [19]

Most Tsing Ma w Hongkongu

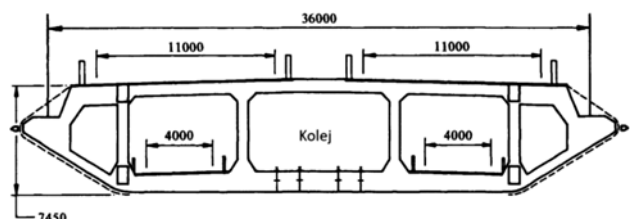
Dekadę później w Hongkongu oddano do użytku najdłuższy na świecie w tamtym czasie wiszący most drogowo-kolejowy Tsing Ma (1997). Ta dwupoziomowa konstrukcja o całkowitej długości ponad 2 km, w tym prześle środkowym o długości 1377 m, i szerokości pomostu 41 m została zaprojektowana przez brytyjską firmę inżynierską Mott MacDonald. Most połączył centrum Hongkongu z wyspą Lantau, na której zbudowano nowe lotnisko w Chek Lap Kok.



Most Tsing Ma w Hongkongu, fot. leungchopan, AS

Przeprawa stanowi szybkie połączenie drogowo-kolejowe pomiędzy centrum miasta i lotniskiem. O skali trudności projektu świadczy fakt, że most jest poddawany stałym obciążeniom ruchu samochodowego (sześć pasów) na górnym poziomie i okresowym obciążeniom ruchu szybkiej kolei (dwa tory oraz dwa pasy ruchu) na dolnym poziomie. Ponadto lokalizacja konstrukcji stawiała wysokie wymagania co do zabezpieczenia przed silnymi wiatrami (tajfunami), częstymi w tym rejonie. Dlatego zaprojektowano most tak, by do minimum zredukować statyczne obciążenia wiatrem i aby wytrzymał działanie wiatru o prędkości w porywach do 300 km/h, zachowując stabilność konstrukcyjną. Na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym zaprojektowano opływowy, wielokomorowy pomost, wzmocniony wewnątrz kratownicą typu Vierendeela. Ten typ kratownicy wykorzystujący prostokątne ramy zamiast trójkątnych pozwala na zwiększenie wytrzymałości konstrukcji na zginanie. Konstrukcja niesymetrycznego mostu wiszącego o konfiguracji 495 + 1377 + 288 m podtrzymywana jest przez dwa kable nośne o średnicy 1100 mm. Dla redukcji oporu powietrza w pomoście wprowadzono również wzdłużne kanały wentylacyjne i profilowane osłony na krawędziach ciągłego dźwigara. Dwa tory kolejowe wewnątrz pomostu zostały umieszczone blisko osi mostu.

W opracowaniu *Design Evolution of the Tsing Ma Bridge* [20] Alan Simpson, Andrew Beard i Jeffrey Young definiują założenia projektu: „Elastyczność mostu wiszącego wymagała jednak starannego rozważenia skrętów, które występowałyby zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej. Przyjęto następujące kryteria: pożądane pionowe przyspieszenie radialne nie przekraczało 0,03 g, pożądane poziome przyspieszenie radialne nie przekraczało 0,05 g. Na podstawie tych podstawowych założeń obliczono maksymalne dopuszczalne skręty na każdej podporze i wyznaczono proporcje konstrukcji pomostu dostosowane tak, aby zapewnić ich osiągnięcie we wszystkich warunkach obciążenia. Było to szczególnie ważne w przypadku wspornika końcowego po stro-



Przekrój poprzeczny kratownicy mostu Tsing Ma, rys. [20]



Graficzna ilustracja mostu Tsing Ma, ryc. [21]

nie Tsing Yi, gdzie miał zostać zainstalowany system przegubów ruchomych. Pozwoliłoby to uwzględnić nie tylko ruchy wzdłużne, ale także pionowe i poziome skręty, jednocześnie umożliwiając przejazd pociągów z normalną prędkością eksploatacyjną”.

W celu monitorowania stanu wiatru i konstrukcji na moście zamontowano system sensorowy (*wind and structural health monitoring system* – WASHMS), składający się z ponad 900 czujników i powiązanych z nimi urządzeń interfejsowych, system przekazywania danych (*data acquisition system* – DAS), system przetwarzania i analizy danych (*portable data acquisition system* – PDAS) oraz komputerowej obsługi i sterowania systemem (CSOC). WASHMS nieprzerwanie monitoruje stan konstrukcyjny mostu przez 24 godziny na dobę, dostarczając wielu danych, takich jak temperatura pomostu, naprężenia konstrukcyjne, prędkość wiatru, dynamiczne / statyczne przemieszczenia i przyspieszenia. Dla zapewnienia bezpieczeństwa jazdy na moście przyjęto zasadę przejazdu przy określonych prędkościach wiatru włącznie z zamknięciem całkowicie ruchu drogowego przy prędkości wiatru powyżej 165 km/h [22].

Most Selima Groźnego w Stambule

W Turcji, która obecnie może szczycić się najdłuższym mostem wiszącym na świecie – Çanakkale 1915 (2022), siedem lat wcześniej oddano do użytku most Selima Groźnego (2016, inaczej Trzeci Most Bosforski). Ta hybrydowa konstrukcja mostu wisząco-wantowego (*highly rigid suspension bridge* – HRSB) o konfiguracji przęseł 378 + 1408 + 378 m i szerokości 58,5 m została zaprojektowana dla ruchu drogowo-kolejowego. Autorami niezwykle oryginalnego projektu byli uznani inżynierowie Jean Francois Klein i Michel Virlogeux. Podjęli się oni bezprecedensowego zadania wykonania projektu mostu, który nawiązuje pod względem estetycznym do dwóch poprzednich konstrukcji wiszących w Stambule, posiada minimalną rozpiętość 1275 m i dodatkowo prowadzi dwa tory kolejowe, po obu stronach ma chodniki, a jego budowa trwałaby nie dłużej niż 36 miesięcy. Wyjątkowość konstrukcyjna rozwiązania polega również na tym, że opływowi, jednokomorowy i ortotropowy pomost został zaprojektowany dla ruchu komunikacyjnego na jednym poziomie. Betonowe przęsła boczne mostu stanowią istotną przeciwwagę dla stalowego przęsła głównego, którego długość wynosi 1360 m. Nowatorstwo rozwiązania wynika także z wprowadzenia trzech rodzajów stref zawieszenia pomostu: want w strefie usztywnienia w pobliżu pylonów, want i kabli nośnych w strefie przejściowej i tylko kabli nośnych z wieszakami w środkowej strefie podwieszenia. System wiszący składa się z 176 lin wantowych (od 154 do 597 m długości i średnicy od 225 do 315 mm), pary lin nośnych o średnicy 723 mm i długości 2420 m i 34 par wieszakowych w środkowej części (od 13 do 106 m długości i średnicy od 100 do 175 mm). Do wykonania lin nośnych wykorzystano ocynkowany drut (PPWS) o średnicy 5,2 mm i wytrzymałości na rozciąganie 1860 MPa. Liny wieszakowe stanowią równoległe sploty (PWS) drutów ocynkowanych o średnicy 7 mm i wytrzymałości 1770 MPa, zabezpieczonych osłoną polietylenową. Żelbetowe pylony w kształcie litery A mają wysokość 322/318 m

i połączone są ze sobą poprzeczną, betonową belką tuż pod pomostem na wysokości 61 m i stalowym, profilowanym zakotwieniem w szczytowej części. Obecnie czynnych jest osiem pasów drogowych, po cztery w każdą stronę. Jak do tej pory dwutorowa linia kolejowa przez most nie została jeszcze zbudowana, więc ruch kolejowy nie odbywa się [23].



Graficzna ilustracja przekroju mostu Selima Groźnego, fot. [23]

W udzielanych wywiadach Michel Virlogeux wyjaśniał: „Ten most musi udźwignąć duże obciążenia ze względu na to, że prowadzone są po nim tory kolejowe. Oprócz tego obciążenie będzie wyjątkowo wysokie w wyniku dużego ruchu w Stambule. W projekcie mostu występują liny podwieszane i usztywniające, które odchodzą od pylonów. Jest to system wyjątkowy dla potrzeb połączonego ruchu drogowo-kolejowego. Podobne mosty budowano w XIX w., ale nie miały one tego samego stylu. Trzeci Most Bosforski był rozwijany zgodnie z tą filozofią od samego początku, z wykorzystaniem wszystkich obecnych możliwości, jakimi dysponuje współczesna komputeryzacja” i dalej, nawiązując do trzęsień ziemi występujących w Turcji, stwierdził: „Nasz most został zaprojektowany w taki sposób, aby dzięki swojej elastyczności żadne trzęsienie ziemi nie miało na niego wpływu”. Virlogeux nawiązuje tu do zastosowania pomiędzy konstrukcją pomostu a fundamentem podpór łożysk wahadłowych, które zapobiegają nie tylko trzęsieniom ziemi, ale także efektem zmian temperatury i drganiom spowodowanym przejazdem lub zatrzymaniem się na moście pociągu. Most jest unikatowy w skali światowej i stanowi przełom w podejściu do projektowania dwufunkcyjnych przepraw o dużej rozpiętości przęseł [24].



Most Selima Groźnego, fot. murattellioglu, AS

Most Wufengshan nad Jangcy

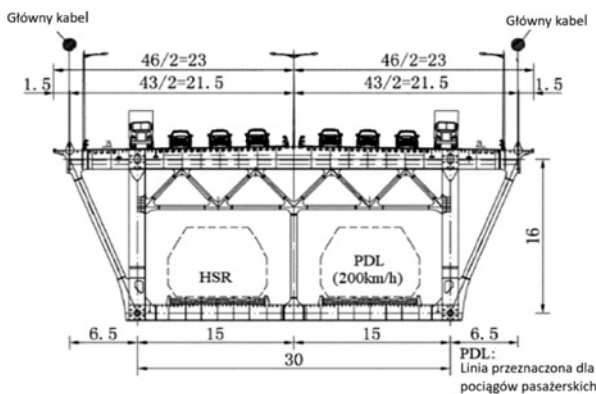
W Chinach do 2025 r. łączna długość kolei dużych prędkości (*high-speed rail* – HSR) wyniesie 38 tys. km. Oczekuje się, że całkowita długość planowanych kolei HSR przekroczy 50 tys. km, tworząc kompletną sieć, która połączy wszystkie miasta przekraczające pół miliona mieszkańców. Wraz z szybkim rozwojem kolei HSR w Chinach zbudowano wiele mostów o rekordowej rozpiętości [26]. Obecnie najdłuższe główne przęsło wybudowanego mostu Wufengshan dla kolei HSR wynosi 1092 m. Most Wufengshan



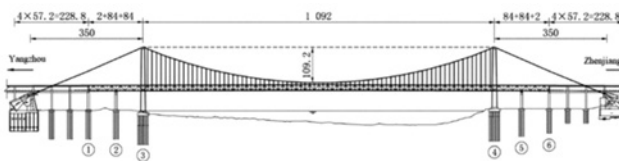
Most drogowo-kolejowy Wufengshan, fot. Shantui Janeoo, China

został zaprojektowany przez China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute i zbudowany przez China Railway Major Bridge Engineering Group. Chcąc w tym eksperymentalnym

projekcie w historii chińskiego budownictwa mostowego przezwyciężyć problemy techniczne, które wynikają z wyjątkowo dużego ciężaru własnego i generalnie małej sztywności konstrukcyjnej mostów wiszących o dużej rozpiętości, opracowano wiele nowych technologii. Oddany do użytku w 2020 r. most Wufengshan jest pierwszą na świecie wiszącą konstrukcją drogowo-kolejową przeznaczoną dla pociągów dużych prędkości, do 250 km/h. Dwufunkcyjna przeprawa przez Jangcy o konfiguracji 350 + 1092 + 350 m ma całkowitą długość 1792 m. Stalowy pomost podtrzymywany przez dwie liny nośne o średnicy 1100 mm usztywniony jest kratownicą o głębokości 16 m. Poziom górny z ośmioma pasami ruchu przeznaczony jest dla komunikacji drogowej, poziom dolny dla czterotorowej komunikacji kolejowej.



Przekrój poprzeczny kratownicy mostu Wufengshan, rys. [26]



Przekrój wzdłużny mostu Wufengshan, rys. [26]

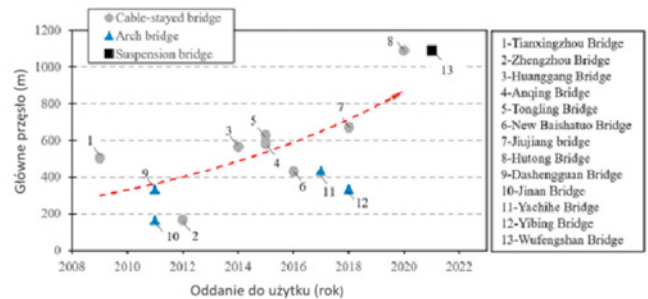
Mosty Jinshajiang i Guojiatuo w Chinach

Inną interesującą konstrukcją kolejową jest zbudowany w 2021 r. most wiszący Jinshajiang, przecinający przełom rzeki Jinsha na wysokości 250 m. Przeprawa kolejowa w prowincji Junnan nad wąwozem Tiger Leaping była rozważana przez wiele lat, zanim inżynierowie ostatecznie zdecydowali się na wersję wiszącego mostu o konfiguracji przęseł 132 + 660 + 132 m. Dla zapewnienia dużej sztywności konstrukcji pomostu, po której pociągi będą przejeżdżały z prędkością 120 km/h, zaprojektowano 16-metrowej głębokości usztywnienie kratownicowe, podtrzymywane w części środkowej przez dwie liny nośne o średnicy 762 mm. Związujące się ku górze żelbetowe pylony mają zróżnicowaną wysokość, odpowiednio 194 m i 155 m. Ze względu na strome zbocza z obu stron skrócono przęsła boczne

tak, aby mieściły się między górami i wchodziły bezpośrednio do wydrążonych w skałach tuneli [27].

Amerykańskie biuro projektowe TY Lin z San Francisco wspólnie z Chongqing Communication Research & Design Institute zaprojektowało oddany do użytku na przełomie 2022 i 2023 r. dwupoziomowy wiszący most drogowo-kolejowy Guojiatuo nad Jangcy. Konstrukcja o całkowitej długości 1403 m ma pomost o szerokości 41 m w górnej części i 17 m w dolnej części kratownicy. Dolny poziom przeznaczony jest dla podmiejskiej kolei o prędkości 80 km/h. Głębokość kratownicowego usztywnienia wynosi 12,7 m. Portalowe pylony mają wysokość odpowiednio 162 m i 173 m [28].

Przedstawione poniżej zestawienie mostów dla szybkiej kolei w Chinach w latach 2008–2022 wyraźnie pokazuje dominację konstrukcji podwieszonych w zakresie do 800 m rozpiętości przęseł. Wiszący most Wufengshan jest wyjątkiem, będącym próbą rozwiązania konstrukcyjnego dla rozpiętości mostu wiszącego powyżej 1000 m.



Zestawienie mostów dla szybkiej kolei w Chinach, oprac. [29]

W kontekście ekspansji kolejowej w Chinach ciekawy jest artykuł Yinglianga Wang, głównego inżyniera China Railway Eryuan Engineering Group. *The selection of box girders for cable-supported railroad bridges* [30]. Przeprowadził on przegląd i analizę doboru dźwigarów skrzynkowych wiszących mostów kolejowych z punktu widzenia projektowania konstrukcji, prefabrykacji, transportu i montażu. Dokonał przeglądu zastosowania szerokich, pojedynczych dźwigarów skrzynkowych i dźwigarów skrzynkowych dzielonych, z podwójnymi i potrójnymi komorami. Wyciągnięte wnioski autora na podstawie przeprowadzonych badań wskazują na potencjalne przyszłe kierunki rozwoju drogowo-kolejowych konstrukcji wiszących w Państwie Środka. Autor konkluduje: „Dla wiszących mostów kolejowych o szerokości całkowitej większej niż 45,0 m przekrój poprzeczny dźwigara głównego należy określić przez szczegółowe porównanie pojedynczych i dzielonych dźwigarów skrzynkowych. W przypadku kolei dużych prędkości z więcej niż trzema torami i dodatkowo sześciopasmową autostradą potrójną, dzielony dźwigar skrzynkowy jest bardzo dobrym rozwiązaniem ze względu na wyjątkowo dobre zachowanie konstrukcyjne, warunki produkcji, transportu i montażu. Ponieważ droga i tor kolejowy są oddzielone belkami poprzecznymi, boczne siły wiatru wywołane przez pociągi dużych prędkości mają bardzo mały wpływ na ruch drogowy i można pominąć ściany osłonowe. Dla zwiększenia ekonomiczności i trwałości można odpowiednio stosować pomosty stalowo-betonowe zespolone i stalowe ortotropowe. Ze względu na oddzielenie pomostów szczelinami granice właścicieli i koszty utrzymania są bardzo wyraźne. Potrójny, oddzielny dźwigar skrzynkowy z czterema płaszczyznami kablowymi wykazuje bardzo dobre zachowanie konstrukcyjne przy mimośrodowym obciążeniu ruchem drogowym i kolejowym, dzięki czemu znacznie poprawia się stabil-

ność poprzeczna i komfort jazdy pasażerów, zwłaszcza w przypadku pociągów dużych prędkości, przekraczających 200 km/h”.

Podsumowanie

Zreasumujemy zatem pokrótce wiedzę o współczesnych drogowo-kolejowych mostach wiszących. Konstrukcje te stanowią niewielki procent wszystkich budowanych przepraw mostowych na świecie. Jednak zauważalny jest trend, nie tylko w Chinach, do projektowania mostów dwufunkcyjnych, dwupoziomowych w obrębie dużych aglomeracji miejskich lub do prowadzenia szybkich kolei w terenach górzystych, nad głębokimi dolinami. Obecnie długość przęsła środkowego nie przekracza 1410 m, większość przęseł współcześnie budowanych mostów oscyluje w okolicach 1000 m. Wiąże się to głównie z zastosowaniem rozwiązań głębokich i ciągłych, kratownicowych usztywnień pomostów. Ruch kolejowy zlokalizowany jest w dolnej części konstrukcji. Wyjątkiem jest Trzeci Most Bosforński, w którym zaprojektowano opływowo, szeroki, jednokomorowy pomost, podtrzymywany i usztywniony hybrydowym olinowaniem. Niewątpliwie zbudowane mosty w czasie eksploatacji dostarczają wiele cennych informacji, które w przyszłości pomogą inżynierom w projektowaniu lepszych i doskonalszych konstrukcji. Bardzo ciekawe z technicznego punktu widzenia, o ile dojdzie do jego realizacji, jest rozwiązanie wiszącego mostu Mesińskiego. Na podstawie projektu COWI z 2003 r. wiadomo, że ma to być trzykomorowy most drogowo-kolejowy o całkowitej długości 5300 m, w tym przęsła środkowego 3300 m. Będzie to absolutny rekord konstrukcyjny pod wieloma względami i jednocześnie niebywałe wyzwanie inżynieryjne, warte śledzenia, bo być może rozwiązanie stanie się kolejnym punktem zwrotnym w rozwoju wielofunkcyjnych, dużych rozmiarów mostów wiszących.



Zestawienie ważniejszych drogowo-kolejowych mostów wiszących zbudowanych na świecie w latach 1850–2023, oprac. K. Dąbrowiecki

Literatura

- [1] Dąbrowiecki K.: *Most Brookliński – dzieło życia Roeblingów*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, nr 5, s. 74–78.
- [2] Roebling J.A.: *Report on the Niagara Railway Suspension Bridge*. Albion 1892.
- [3] Buenopane S.: *The Roablins and Stayed Suspension Bridges. Its Development and Propagation in 19th Century United States*. Cambridge 2006.
- [4] Svensson H.: *The Development of Cable-Stayed Bridges since John Røbling*. IABSE Symposium, Weimar, 2007.
- [5] Griggs F.: *John A. Roebling's Niagara River Railroad Suspension Bridge – 1955*. „Structure Magazine” 2016, June, pp. 60–61.
- [6] Small C.S.: *The Railway of the New York and Brooklyn Bridge*. „The Railway and Locomotive Historical Society Bulletin” 1957, Vol. 97, pp. 7–20.
- [7] Dąbrowiecki K.: *Dwustuletnia historia rozwoju nowoczesnych mostów wiszących, cz. 2. Wiek XX*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2020, nr 4, s. 90–99.
- [8] *Manhattan Bridge* (online). ASCE Professional Development Courses for Engineers and Architects. Dostępny w Internecie: [- section.org/committees/history-and-heritage/landmarks/manhattan-bridge \(dostęp 30 października 2023\).
 - \[9\] Nunez J.: *Suspension bridges: Concepts and various innovative techniques of structural evaluation*. „RT&S” 2013, April. Dostępny w Internecie: <https://www.rtands.com/track-construction/track-structure/bridges-tunnels/suspension-bridges-concepts-and-various-innovative-techniques-of-structural-evaluation/> \(dostęp 30 października 2023\).
 - \[10\] *Benjamin Franklin Bridge*. Dostępny w Internecie: <https://historicbridges.org/bridges> \(dostęp 16 października 2023\).
 - \[11\] Kunicki S.: „Most wiszący na rz. Delaware w Filadelfii w porównaniu z innymi mostami o dużych rozpiętościach. Warszawa 1928 \(odbitka z „Przeglądu Technicznego”\).
 - \[12\] Dąbrowiecki K.: *Przebudowa mostu San Francisco – Oakland*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2008, nr 4, s. 24–27.
 - \[13\] *San Francisco Oakland Bay Bridge, Spanning San Francisco Bay, San Francisco, San Francisco County, CA*. Fotografie w Library of Congress. Dostępny w Internecie: <https://www.loc.gov/item/ca1352/> \(dostęp 3 listopada 2023\).
 - \[14\] Dąbrowiecki K.: *Lizboński most wiszący ponte 25 de Abril*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2019, nr 1, s. 56–59.
 - \[15\] Reis A., Pedro J.: *Railway Installation on the Tagus Suspension Bridge in Lisbon, Portugal*. „IABSE Reports” 1995, Vol. 73, Issue 1–2, pp. 528–534.
 - \[16\] *Great Seto Bridge – Aug 17 2017*. Wikimedia Commons. Dostępny w Internecie: \[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_Seto_Bridge_-_Aug_17_2017.webm\]\(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_Seto_Bridge_-_Aug_17_2017.webm\) \(dostęp 30 października 2023\).
 - \[17\] Fujino Y., Siringoringo D.: *Historical and Technological Developments of Steel Bridges in Japan – A Review*. „Steel Construction” 2020, Vol. 35, Issue 1, pp. 34–58.
 - \[18\] Takaki I., Horo-O J.: *Aesthetic design on the Seto Ohashi bridge*. „IABSE Reports” 1991, Vol. 63, pp. 142–150.
 - \[19\] Ohashi M., Narui S., Fujii Y.: *Design of long span suspension bridges for combined highway and railway*. „IABSE Congress Report” 1988, Vol. 13, pp. 876–882.
 - \[20\] Simpson A., Beard A., Young J.: *Design evolution of the Tsing Ma bridge*. „IABSE Reports” 1991, Vol. 64, pp. 460–466.
 - \[21\] Ni Y.Q., Xia H.W., Ko J.M.: *Structural Performance Evaluation of Tsing Ma Bridge Using Long-Term Monitoring Data*. „Modern Physics Letters B” 2008, Vol. 22, Issue 11, pp. 875–880.
 - \[22\] Wong K.Y.: *Current and Future Bridge Health Monitoring Systems in Hong Kong*. TMCA Division, Highways Department, The Government of the Hong Kong, 2001.
 - \[23\] Del Forno J.Y.: *Third Bosphorus Bridge*. Greisch presentation, 2014.
 - \[24\] *Yavuz Sultan Selim Bridge \(3rd Bosphorus Bridge\)*. „e-mosty” 2016, Issue 2. Dostępny w Internecie: <https://e-mosty.cz/3rd-bosphorus-bridge-michel-virlogeux-izmit-bay-bridge/> \(dostęp 10 października 2023\).
 - \[25\] Klein J.F.: *Third Bosphorus Bridge – A masterpiece of sculptural engineering*. „Stahlbau” 2017, Vol. 86, Issue 2, pp. 160–166.
 - \[26\] Hue G.: *Displacement at Girder End of Long-Span Railway Steel Bridges and Performance Requirements for Bridge Expansion Joint*. 9th International Conference on Advances in Steel Structures. Hong Kong 2018.
 - \[27\] Huang W., Pei M., Liu X., Wei Y.: *Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives*. „Structure Civil Engineering” 2020, Vol. 14, Issue 4, pp. 803–838.
 - \[28\] *Guojiatuo Bridge*. TyLin. Dostępny w Internecie: <https://www.tylin.com/work/projects/guojiatuo-bridge> \(dostęp 16 października 2023\).
 - \[29\] Su M., Dai G., Marx S., Liu W., Zhang S.: *A Brief Review of Developments and Challenges for High-speed Rail Bridges in China and Germany*. „Structural Engineering International” 2018, Vol. 29, Issue 1, pp. 1–7.
 - \[30\] Wang Y.: *The selection of box girders for cable-supported railroad bridges*. „Steel Construction” 2019, Vol. 12, Issue 2, pp. 114–123.
 - \[31\] Dąbrowiecki K.: *Dwustuletnia historia rozwoju nowoczesnych mostów wiszących, cz. 3. Wiek XXI*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2020, nr 5, s. 100–109.
 - \[32\] Qin S., Gao Z.: *Developments and Prospects of Long-Span High-Speed Railway Bridge Technologies in China*. „Engineering” 2017, Vol. 3, Issue 6, pp. 787–794.
 - \[33\] *Great Seto Bridge: Kojima-Sakaide Route Links Honshu and Shikoku*. The International Association of Ports and Harbors. Tokyo 1988.
 - \[34\] *Jinshajiang Hutiaoxia Bridge*. Materiał wideo CCTV.
 - \[35\] *China's first road-rail suspension bridge opens to traffic*. Materiał wideo New China TV.](http://www.ascemet-

</div>
<div data-bbox=)



Czytaj więcej