

Mosty wiszące o superdługich przęsłach



tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

Od lat inżynierowie budownictwa lądowego, prowadząc analizy i testy modeli, starają się odpowiedzieć na niezwykle nurtujące ich pytania: jak długa, z technicznego punktu widzenia, może być konstrukcja mostu wiszącego oraz jakiej maksymalnej długości może być środkowe przęsło takiego mostu. Dziś już wiemy, co jeszcze 100 lat temu wydawało się fantastyczne i wręcz nierealne, że długość 2000 m przęsła środkowego nie jest granicą ostateczną.

Dowodem na to jest zbudowany i oddany do użytku w 2022 r. most Çanakkale 1915 z przęsłem środkowym o długości 2023 m. Czy zatem – wracając do postawionego pytania o możliwą długość przęsła środkowego – jest to 3000 m? Niekoniecznie, bo w ostatnich latach przeprowadzono kilka wstępnych analiz projektu budowy mostu Mesińskiego we Włoszech o długości przekraczającej tę granicę. A może 5000 m? Też nie, ponieważ inżynierowie dokonali oceny wykonalności mostów nad Cieśniną Gibraltarską oraz Cieśniną Tajwańską (TY Lin, COWI, Uniwersytet Tongji w Szanghaju), w której poddali analizie przęsła o tej właśnie długości i stwierdzili, że przy obecnym stanie wiedzy technicznej i zastosowaniu nowych materiałów są wykonalne. Czy jest to ostatecznie całkiem utopijna dzisiaj granica 10 000 m, przy założeniu, że nie rozpatrujemy na tym etapie ekonomicznej zasadności takiej budowy, a jedynie możliwości techniczne? Szukając odpowiedzi na tak postawione pytania, spróbujmy prześledzić stan wiedzy w obszarze badań i projektowania superkonstrukcji wiszących prowadzonych w ostatnich latach w celu określenia ich maksymalnej rozpiętości.

Historia współczesnych mostów wiszących zaświadcza, że w przeszłości podejmowano się budowy mostów, które wydawały się w pierwszej chwili niemożliwe do realizacji. Analizując chronologicznie rozwój tych konstrukcji w okresie ostatnich 200 lat, można przywołać przykłady, które stanowiły przełom w projektowaniu i budowie mostów. We wszystkich przypadkach rekordowej długości konstrukcje mostowe pokonywały dzięki inżynierom istniejące bariery techniczno-technologiczne i materiałowe, często implementowały śmiałe i niekonwencjonalne rozwiązania konstrukcyjno-montażowe.

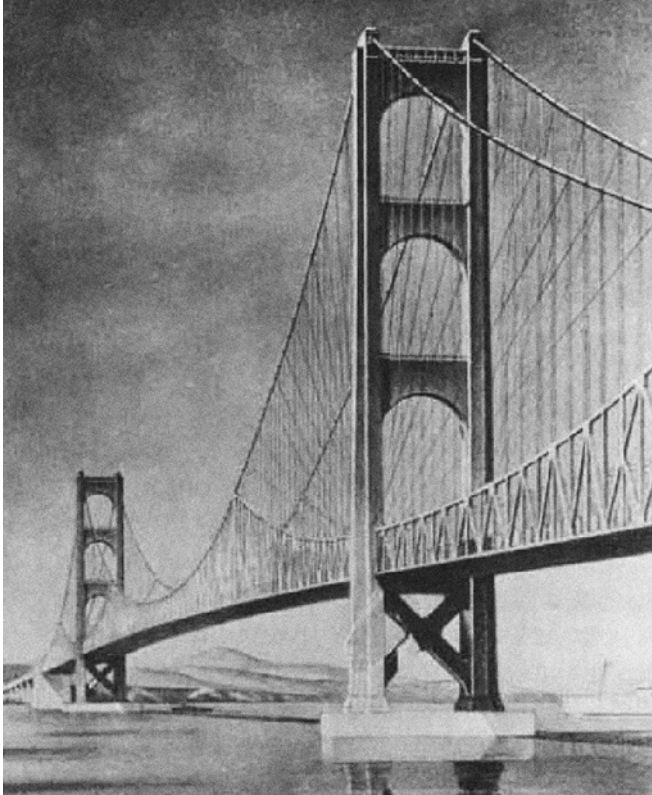
Trzy generacje współczesnych mostów wiszących

Ewolucję współczesnych długich przepraw zapoczątkował most Menai (1826) o przęsle środkowym 176 m i całkowitej długości mostu 417 m. Ponad pół wieku po Menai został zbudowany most Brookliński (1883) z przęsłem środkowym 486 m przy całkowitej długości obiektu 1834 m. Po kolejnych 50 latach otwarto most Golden Gate (1937) o przęsle środkowym 1280 m przy całkowitej długości konstrukcji 2737 m. Po następnych 60 latach oddano do użytku Akashi Kaikyō (1998) z przęsłem środkowym 1991 m przy całkowitej długości przeprawy 3911 m. Wszystkie przyto-

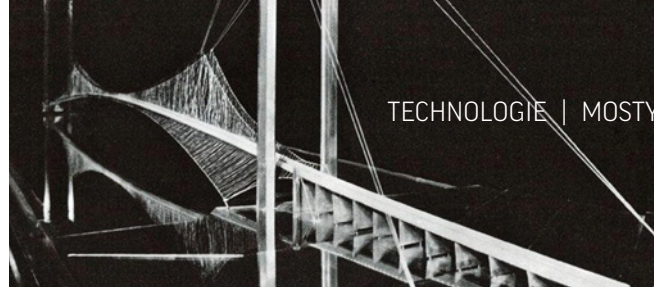
czone mosty zostały zbudowane z zastosowaniem głębokich, kratownicowych usztywnień pomostu, których projekty można zakwalifikować do pierwszej generacji współczesnych mostów wiszących. Rozwiązania te wynikały głównie z doświadczenia wybitnych w ówczesnym czasie budowniczych mostów, jak Roebling, Modjeski, Moisseiff, Amman czy Steinman, a w przypadku XX-wiecznych mostów – szerokiego zastosowania teorii ugięcia do obliczania konstrukcji wiszących. Jak wiadomo, próba odejścia od klasycznego projektowania i budowy pierwszej generacji mostów zakończyła się spektakularną klęską inżynierską. Jednocześnie, jak się później okazało, do pewnego stopnia była ona zbawienna dla przyszłości mostownictwa. Mowa tu oczywiście o skutkach zawalenia się mostu Tacoma-Narrows opracowanego przez Leona Moisseiffa, w konsekwencji czego implementowano tunele aerodynamiczne do analizy nowych modeli konstrukcji mostów. Również brak stali po II wojnie światowej zaowocował bardziej ekonomicznym podejściem do projektowania mostów i odejściem od materiałochłonnych, ciężkich i głębokich usztywnień pomostów. Zainicjowana przez brytyjskich inżynierów Robertsa, Browna i Parsonsa po raz pierwszy w projekcie mostu Severn (Anglia, 1966) nowatorska, opływowa konstrukcja skrzynkowego, zintegrowanego pomostu otworzyła nowy, drugiej generacji rozdział konstrukcji w budownictwie mostowym. Inżynierski sukces takich przedsięwzięć mostowych, jak Humber (Anglia, 1981) i Great Belt (Dania, 1998), utwierdził inżynierów w słuszności obranego kierunku i spowodował rozwój zintegrowanych pomostów skrzynkowych. Obecny rekordzista, most wiszący Çanakkale 1915 w Turcji o całkowitej długości 4608 m, z nowoczesnym rozwiązaniem opływowym i płytką konstrukcją, jest przykładem postępującej ewolucji i narodzenia się trzeciej generacji mostów wiszących, charakteryzujących się dzielonymi, wieloskrzynkowymi pomostami.

Most Mesiński

Jednym z najbardziej analizowanych i opisywanych, a niezrealizowanych jeszcze projektów mostów o rekordowej długości przęsła środkowego – ponad 3000 m, w ostatnich dekadach jest niewątpliwie most Mesiński, mający połączyć Włochy kontynentalne z Sycylią. Bez zbytniej złośliwości można chyba ten projekt nazwać znikającym punktem na mapie budownictwa mosto-



Ryc. 1. Koncepcja mostu Mesyńskiego Davida Steinmana [1]



Ryc. 2. Projekt mostu Mesyńskiego Sergio Musmeciego [2]



Ryc. 3. Graficzna wizualizacja mostu Mesyńskiego COWI [3]

wego, gdyż kilka razy był on wznawiany i anulowany przez rząd włoski, by w 2013 r., w okresie cięć oszczędnościowych, zostać ostatecznie odłożony kolejny raz na półkę. Jednak w 2022 r. po wcześniejszym zapewnieniu Pietro Saliniego, prezydenta Webuild, że jest gotowy rozpocząć prace przy budowie mostu na podstawie zatwierzonego projektu z 2013 r., kolejny rząd włoski w pierwszym budżecie przeznaczył środki finansowe na wznowienie działalności firmy. Według zapewnień Matteo Saliniego, obecnego ministra infrastruktury koalicyjnego rządu, budowa rozpocznie się za dwa lata i potrwa około pięciu lat. Rząd włoski liczy na poparcie i udział Unii Europejskiej w tym przedsięwzięciu.

Współczesną historię tej przeprawy rozpoczęła śmiała wizja Davida Steinmana, który na prośbę Italian Steel Institute w 1950 r. przeanalizował przeprawę przez Cieśninę Mesyńską i zaproponował niekonwencjonalny most kratownicowo-wiszący o całkowitej długości 3000 m i rozpiętości głównego przęsła 1524 m (ryc. 1).

W 1969 r. rząd włoski wsparty analizą Steinmana ogłosił międzynarodowy konkurs na most wiszący łączący Kalabrię z Sycylią, który przy rekordowej długości i rozpiętości przęsła środkowego miał obejmować komunikację drogową i kolejową. Na konkurs wpłynęły 143 prace światowych biur projektowych. Wśród wyłonionych laureatów pierwszej nagrody obok propozycji mostu hybrydowego, wisząco-podwieszono prof. Petrangelego czy koncepcji 1400-metrowej długości przęsła mostu podwieszono Lambertiniego, Leonhardta i De Mirandy, znalazło się rozwiązanie Sergio Musmeciego, które charakteryzowało się największą oryginalnością i innowacyjnością. Był to projekt wiszącej konstrukcji z kablami nośnymi pomostu nieprzechodzącymi przez gniazda na szczytach pylonów, lecz podtrzymywanymi przez układ lin wspartych na pylonach i zakotwionych jak w tradycyjnym rozwiązaniu trójprzęsłowych mostów wiszących (ryc. 2). Wielu ekspertów uważało jednak, że koncepcja Musmeciego obciążona była dużym ryzykiem niewykonalności i wymagała znacznego dopracowania.

Przez lata most Mesyński pomimo politycznego rollercoastera był impulsem do licznych analiz i badań, które dały podstawę do dalszej eksploracji konstrukcji wiszących o superrozmiarach. Przykładem mogą być patenty Williama Browna

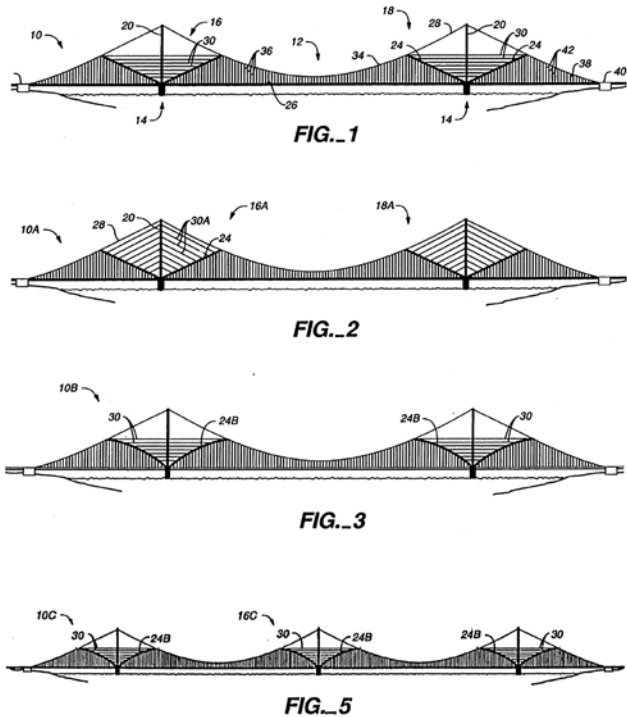
(US 5615436, EP 0666941), Giorgio Diana (US 4741063) czy prace duńskiego biura inżynierskiego COWI, które w latach 2004–2005 na zlecenie działającego wtedy konsorcjum ATI Impregilo opracowało propozycję tego gigantycznego mostu. COWI, podobnie jak Brown, zaproponowało trójkomorowy, opływowy pomost (ryc. 3).

Klaus Ostenfeld, były prezydent COWI, w artykule *Evolution of Suspension Bridges* (2019), opublikowanym przez Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE) [4], analizując rozwój współczesnego mostownictwa, potwierdził opinię, że w przyszłości mosty w niektórych lokalizacjach na świecie będą wymagały rozpiętości przęsła rzędu 3000–5000 m. Powołał się na przykłady opracowanych przez COWI wstępnych projektów mostów Mesyńskiego i Gibraltarskiego, których długość przęsła środkowego będzie musiała mieć odpowiednio 3300 m i 2 x 5000 m. Długości te podyktowane są głównie wymaganiami żegludowymi, warunkami geologicznymi dna przepraw i bezpośrednio związaną z nimi głębokością fundamentów pylonów. Przeprowadzone badania modelowe mostów trzeciej generacji, jak również uzyskane doświadczenia z już oddanych do użytku mostów potwierdzają, że fragmentacja pomostu, czyli wieloskrzynkowa lub wielokomorowa, opływowa w kształcie i zamknięta konstrukcja, poprawia aerodynamiczną stabilność, szczególnie konstrukcji wiszących z rozpiętością przęsła powyżej 2000 m.

Most Gibraltarski

W panteonie licznych inżynierów, którzy zaangażowali się w rozwój prekursorskich konstrukcji mostowych, był Tung Yen Lin (1912–2003), amerykański inżynier budownictwa lądowego pochodzenia chińskiego, profesor Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley. Był założycielem znanej firmy projektowej TY Lin International z siedzibą w San Francisco. Szkic koncepcji mostów wiszących o superdługich przęsłach przedstawił w amerykańskim patencie US5070566 (1991; ryc. 4). Zaproponował rozwiązanie konstrukcji mostu łączącego Hiszpanię i Maroko przez Cieśninę Gibraltarską. Gdyby taki most został zbudowany, przęsło środkowe byłoby dwuipółkrotnie dłuższe od mostu Akashi Kaikyō.

Opatentowane rozwiązanie hybrydowej, wspornikowo-wiszącej konstrukcji mostu umożliwiało, według autora, zwiększenie



Ryc. 4. Patent TY Lina US5070566 [5]

rozpiętości środkowego przęsła do 5000 m. Oczywiście wraz ze zwiększonymi rozmiarami przęsła głównym wyzwaniem inżynierskim stał się wzrost ciężaru pomostu i lin nośnych oraz zwiększona wysokość pylonów przy zachowaniu tradycyjnego współczynnika zwisu kabli w okolicach 1/10. Dla ograniczenia bariery przyrostu ciężarów TY Lin proponuje dodatkowe konstrukcyjne podparcie kabli nośnych. Załączone do patentu szkice ilustrują oryginalną koncepcję hybrydowego mostu wiszącego wraz z podporami kabli. Stałe wsporniki umieszczone pod kątem do pionowych konstrukcji pylonów, podtrzymywane cięgnami lub stalowymi ramami, częściowo przejmowałyby zwiększony ciężar wydłużonego pomostu i kabli. TY Lin przedstawia, jak ilustruje załączony szkic, dwie wersje kształtu konstrukcji wspornikowej: prostą i łukową. Proponuje dwa układy cięgien montowanych w górnej części pylonów: równoległe do pomostu i w układzie harfowym. Autor rozważa zastosowanie tego rozwiązania dla konstrukcji dwu- i trójpylonowych, prognozując, że takie rozwiązanie umożliwi pokonanie znacznych odległości.

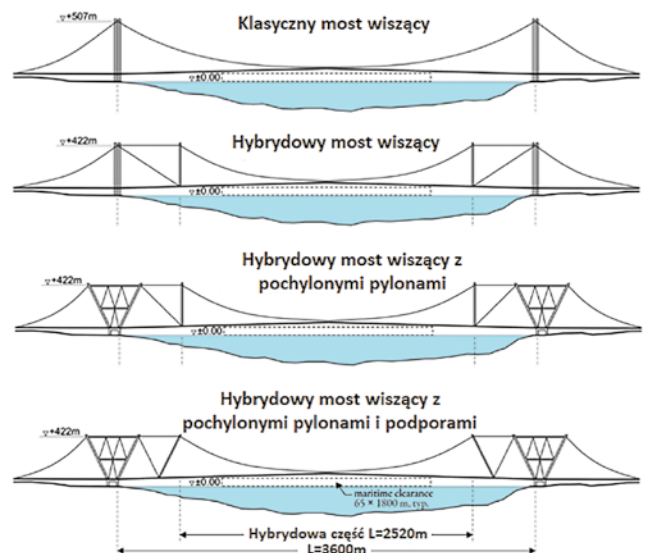
W następstwie przyznanego patentu TY Lin bardziej szczegółowo analizuje swoją koncepcję w opracowaniu *Gibraltar Strait Crossing. A Challenge to Bridge and Structural Engineers* [6]. Poddał w nim analizie trzy wersje konstrukcji mostów wiszących o zróżnicowanych długościach, zastrzegając, że są to sugestie rozwiązań do dyskusji o dalszej ewaluacji ze wszystkimi zainteresowanymi inżynierami. Autor, rozpatrując w opracowaniu kilka wariantów poprowadzenia mostu przez głębokie wody cieśniny, opowiada się za koncepcją mostu o długości 14 km, który z punktu widzenia ochrony środowiska i ekonomii jest lepszym i bezpieczniejszym rozwiązaniem w porównaniu z innymi, dłuższymi przeprawami. Przedstawiając koncepcję proponowanego mostu w ogólnym zarysie, pozostawił szczegóły konstrukcyjne do inżynierskiego opracowania. O weryfikację pomysłu prof. Lin zwrócił się do firmy projektowo-konsultacyjnej OPAC z San Francisco (ryc. 5). Zbadała ona sugerowane rozwiązanie pod względem wykonalności konstrukcyjnej, układów usztywnień



Ryc. 5. Graficzna ilustracja mostu Gibraltarskiego na podstawie opracowania OPAC [7]

i warunków aerodynamicznych dla rozpiętości przęsła 5000 m pomiędzy miejscowościami Oliveros w Hiszpanii i Point Cires w Maroku. Sprawdzone kilka konfiguracji mostu, opracowano modele komputerowe i przeanalizowano je pod kątem charakterystyk statycznych i dynamicznych. W konkluzji potwierdzono, że hybrydowy most wiszący jest najodpowiedniejszym wariantem, gdyż jego konstrukcja ma większą sztywność i lepsze właściwości aerodynamiczne w porównaniu z innymi, konkurencyjnymi koncepcjami o znacznie mniejszych rozpiętościach. Koszt budowy oszacowano wówczas na 15 mld USD. Opracowanie ukończono w 2003 r. Jak wiadomo, nie zakończyło to dyskusji nad rodzajem stałego połączenia Hiszpanii z Marokiem. Sukces zbudowanego tunelu pomiędzy Francją i Anglią dał impuls do rozważań nad analogicznym do Eurotunnelu połączeniem międzykontynentalnym w tym miejscu.

Do pomysłu TY Lina wiszącego mostu hybrydowego po kilku dekadach powrócił Roumen Mladjov, inżynier i publicysta, w artykule magazynu „Structure” *Hybrid Suspension Bridges for Super Long Spans* [8]. Potwierdza on, że przy zachowaniu wymaganej, znacznej rozpiętości przęsła konieczne jest podparcie kabli nośnych. Uważa, że w zawieszeniu hybrydowym można to osiągnąć przez dodanie równoległych do pylonów słupów wawtowych po stronie przęsła środkowego, w odległości 300–500 m, łącząc wsporniki wawtowe i centralną część zawieszenia (ryc. 6). We-



Ryc. 6. Hybrydowy most wiszący Roumena Mladjova [8]

dług autora takie rozwiązanie zmniejsza długość wiszącej części kabli, a faktyczną rozpiętość 3600 m można zrekomensować zawieszeniem o długości ok. 2500 m. Nowością i jednocześnie sporym wyzwaniem inżynierskim w tej koncepcji są dodatkowe pylony umieszczone bezpośrednio na pomoście. W podsumowaniu propozycji autor potwierdza obawy, stwierdzając: „Co ważniejsze, systemy hybrydowe oferują możliwość budowy znacznie dłuższych przęseł o rozmiarach głównych elementów w zakresie już stosowanych w konstrukcjach o krótszych rozpiętościach, zmniejszonej wysokości pylonu i zmniejszonej średnicy zawieszenia. Systemy hybrydowe w bardzo długich rozpiętościach (np. 11 811 stóp, 3600 m) obejmowałyby bezprecedensowe elementy, takie jak wewnętrzne pylony na pomoście wyższe niż wieża Eiffla, aby wspierać reakcje znacznej części zawieszenia (np. 8268 stóp, 2520 m), co stanowi poważne wyzwanie. Rzeczywisty projekt wymagałby bardziej szczegółowej analizy i testów w tunelu aerodynamicznym”.

Chińskie mosty Zhang-Jing-Gao i Shiziyang w budowie

Od ponad trzech dekad Chiny są niewątpliwie największym obszarem eksperymentalnym w zakresie budowy mostów, w tym mostów wiszących o długich przęsłach. Niedawno oddany do użytku most Çanakkale 1915 przekaże wkrótce palmę pierwszeństwa dwóm będącym w budowie chińskim mostom: Zhang-Jing-Gao o konfiguracji przęseł 660 m + 2300 m + 1220 m (planowane ukończenie w 2026 r.) i Shiziyang (przęsło środkowe o długości 2180 m, ukończenie w 2027 r.). W chińskich instytutach w celu zmniejszenia ciężaru kabli nośnych i konstrukcji pomostu prowadzone są intensywne prace koncepcyjno-analityczne w zakresie podwyższenia wytrzymałości pojedynczego drutu oraz zastąpienia stalowych drutów tworzywami sztucznymi wzmocnionymi włóknem węglowym (CFRP – carbon fiber reinforced polymer). Jednym z chińskich autorytetów, najbardziej znanym w zachodnich kręgach naukowych, jest Yaojun Ge, profesor Uniwersytetu Tongji w Szanghaju. Sprawuje on obecnie również prestiżową funkcję prezydenta International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). Prof. Ge, pracując w State Key Lab for Disaster Reduction w departamencie mostów uniwersytetu, przeprowadził szereg badań dotyczących aerodynamicznych reakcji konstrukcji mostowych z przęsłem środkowym 5000 m. W licznych publikacjach i na konferencjach prezentuje wyniki testów w tunelu aerodynamicznym i stawia interesujące tezy o możliwościach realizacji takich projektów. We wstępie do pracy *Tomorrow’s Challenge in Bridge Span Length* (2006) [9], której współautorem jest prof. Hai Fan Xiang, pisze: „Dominujące problemy związane z mostami o dużej rozpiętości dla projektantów mostów to zasadniczo potencjalne wymagania żeglugowo-ekonomiczne, wykonalność technologiczna oraz względy dynamiczne i aerodynamiczne. Potencjalne wymaganie ekstremalnych przęseł mostów jest głównie związane z poziomymi prześwitami dla nawigacji i ekonomiczną budową głębokowodnego fundamentu. Na podstawie aktualnej wytrzymałości i ciężaru materiałów, np. stali, tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem szklanym (GFRP) i tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem węglowym (CFRP), można dokonać oszacowania możliwej długości przęsła, aby zapewnić wykonalność technologiczną mostów wiszących o najdłuższych przęsłach. Po ewaluacji metod w celu podniesienia stabilności aerodynamicznej, w tym modyfikacji systemu zawieszenia, rozwiązania pomostu z dzielonym dźwigarem, dodatkowymi stabilizatorami, w tym sterowania pasywnego i aktywnego, pro-

jekt próbny mostu wiszącego o długości 5000 m, który ocenia się jako rozsądne ograniczenie rozpiętości przęsła, jest sprawdzany, aby odpowiedzieć na wyzwania jutra dotyczące rozpiętości przęseł mostów wiszących zgodnie z charakterystyką dynamiczną, stabilnością aerodynamiczną trzepotania i aerostaticznego skręcania”.

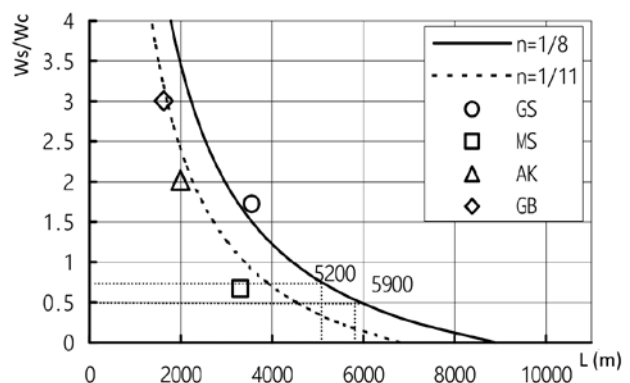
W przytoczonej pracy rozpatrywane są istotne zagadnienia z punktu widzenia analizy superdługich mostów. Wymaga ona określenia maksymalnej rozpiętości mostu według kryteriów technologicznych i żeglugowych, określenia ogólnej sztywności zapewnionej przez układ wiszący, dźwigary i pylony, przeprowadzenia analizy konstrukcji pomostu metodą elementów skończonych (MES) dla zbadania częstotliwości drgań własnych konstrukcji na podstawie współczynnika ugięcia oraz analizy stabilności aerodynamicznej i aerostaticznej. Dla wstępnego oszacowania długości przęsła środkowego mostu wiszącego autorzy opracowania sugerują użycie oceny statycznej, opartej głównie na wytrzymałości materiału oraz ciężarach pomostu i kabli. Autorzy określają krytyczną długość L przęsła środkowego typowego stalowego, trójprzęsełowego mostu wiszącego o parabolicznym kształcie kabla głównego na podstawie formuły:

$$L \leq \frac{8nA\sigma_a/w_c}{\sqrt{1+16n^2(1+w_s/w_c)}}$$

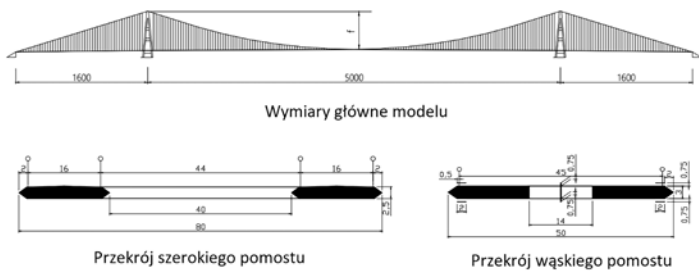
gdzie: n – współczynnik zwisu kabla nośnego, σ_a – dopuszczalne naprężenia kabla, A – pole przekroju drutów, w_c – ciężar kabla na jednostkę długości, w_s – ciężar pomostu na jednostkę długości, włączając ciężar stały i ruchomy [9].

Graficzną interpretację zależności długości przęsła L i współczynnika ciężaru pomostu i kabli (w_s/w_c) przedstawiają krzywe dla dwóch współczynników zwisu kabla nośnego, n = 1/8 i n = 1/11. Autorzy przykładowo nanieśli na wykres wymiary mostów już wybudowanych Great Belt (GB), Akashi Kaikyō (AK) oraz będące w planach budowy Mesiński (MS) i Gibraltarski (GS; wykres 1).

Jeśli w przypadku proponowanego mostu Mesińskiego przyjęty zostanie współczynnik ciężaru $w_s/w_c = 0,7$ lub $w_s/w_c = 0,5$, to rozpiętość przęsła o współczynniku zwisu kabla nośnego n = 1/8 można zwiększyć z 3300 m do odpowiednio 5200 m i 5900 m. Dla wybudowanych mostów Great Belt i Akashi Kaikyō współczynnik w_s/w_c odpowiednio wynosił 3 i 2 przy współczynniku zwisu kabla nośnego n = 1/11, stąd długość przęsła głównego została określona odpowiednio na 1624 m i 1991 m. Autorzy opracowania wstępnie przeanalizowali most wiszący nad Cieśniną Tajwańską, zakładając rozpiętości przęseł mostu



Wykres 1. Graficzna interpretacja długości stalowego przęsła i współczynników ciężaru [9]



Ryc. 7. Model mostu wiszącego badanego przez prof. Yaojuna Ge [9, 10, 11]

o konfiguracji 1600 m + 5000 m + 1600 m. W celu podniesienia stateczności aerodynamicznej przebadano wersję szerokiego, 80-metrowego pomostu z 40-metrowym odstępem pomiędzy dźwigarami skrzynkowymi i bez stabilizatorów oraz wersję wąskiego, 50-metrowego pomostu z 14-metrowym odstępem, z poziomymi i pionowymi stabilizatorami. Ponadto autorzy pracy przeprowadzili serię analiz metodą elementów skończonych, aby uzyskać kilka pierwszych częstotliwości drgań własnych konstrukcji o różnych współczynnikach ugięcia i konfiguracjach pomostu. Główny nacisk w tym badaniu położono na przewidywanie występowania trzepotania i analizę dywergencji skrętnej, a w rezultacie do określenia limitu stabilności aerodynamicznej dla mostów wiszących o długości 5000 m (ryc. 7).

W podsumowaniu opracowania profesorowie Ge i Xiang konkludują: „Potencjalne zapotrzebowanie na przęsła mostów, biorąc pod uwagę rozwój nawigacji w cieśninach głębokowodnych, może być ekonomicznie ograniczone do górnej granicy rozpiętości 5000 m, a obecna technologia wydaje się obiecywać rozpiętość przęsła powyżej 5000 m dla mostów wiszących w niedalekiej przyszłości. Oznacza to, że rozpiętość mostu wiszącego wynosząca 5000 m może być rozsądnym ograniczeniem ze względów technologicznych lub żeglugowych” i dalej kontynuują: „Po wykonaniu projektu aerodynamicznego, analizie i porównaniach można stwierdzić, że most wiszący o rozpiętości 5000 m z pomostem z wystarczająco szerokimi szczelinami lub pomostem z wąskimi szczelinami i z centralnymi, poziomymi statecznikami przy znacznych krytycznych prędkościach wiatru ze względu zarówno na drgania typu trzepotanie, jak i dywergencję skrętną może spełnić wymagania dotyczące aerodynamiki w większości obszarów podatnych na tajfuny na świecie”.

Analizowane przez Yaojuna Ge i Hai Fan Xiang czy Klause Osterfelda projekty długich przepraw opierają się na rozwijanej koncepcji trzeciej generacji mostów wiszących, a więc stalowej konstrukcji zintegrowanego, opływowego, wieloskrzynkowego



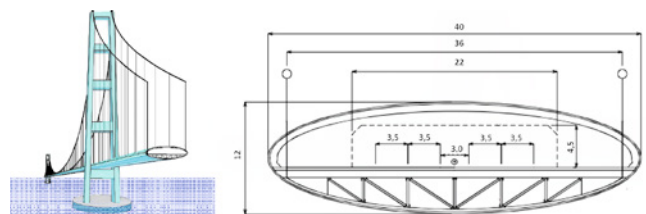
Ryc. 8. Koncepcja tunelowego mostu wiszącego Miguela A. Astiza i Erika Y. Andersena [12]

i dzielonego pomostu z aktywnymi lub pasywnymi stabilizatorami strumieni powietrza. Dlatego w tym kontekście koncepcja pomostu w kształcie eliptycznej rury transportowej, podwieszanej na zbliżonych do siebie linach nośnych [12], wydaje się radykalną zmianą w inżynierskiej wizji przyszłościowych mostów wiszących (ryc. 8). Ruch drogowy odbywałby się wewnątrz

zamkniętej konstrukcji, jakby w zawieszonym ponad wodą tunelu komunikacyjnym. Według autorów zamknięty, eliptyczny przekrój poprzeczny ma tę zaletę, że siła oporu może być zmniejszona do ok. 30% siły oporu opływowej wersji pojedynczego dźwigara o takiej samej szerokości, ponadto ruch samochodowy jest całkowicie osłonięty przed porywami wiatru. Co więcej, według autorów bliskość siebie kabli nośnych wytwarza stosunkowo niewielkie pary sił skręcających na szczytach pylonów w porównaniu z klasycznym mostem wiszącym o dużym rozstawie pylonów. W ten sposób nowa konfiguracja kabli eliminuje silne dynamiczne sprzężenie skrętne między dźwigarami głównego i bocznych przęseł [13].

Japońskie badania nad ultradługimi mostami wiszącymi z tworzyw sztucznych wzmocnionych CFRP

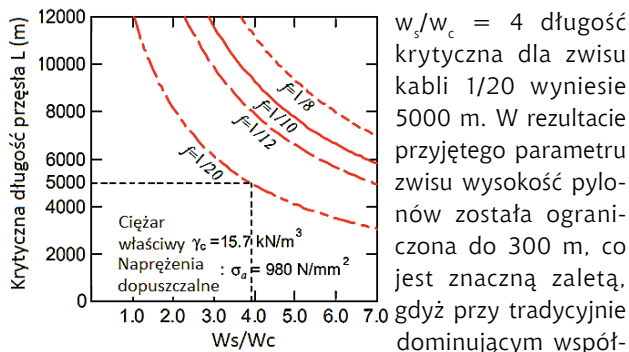
Następny krok w rozwinięciu i testowaniu tej koncepcji wykonał zespół kierowany przez prof. Kenichi Maeda z Uniwersytetu Tokijskiego. Bazując na modelu konstrukcji wiszącej w kształcie eliptycznej rury i znanej zależności pomiędzy długością przęsła L a współczynnikami ciężaru pomostu i kabli (w/w_c), zaprezentował analizę ultradługiego mostu wiszącego wykonanego z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem węglowym (CFRP; ryc. 9). W opracowaniu *Feasibility of Ultra Long-Span Suspension Bridges Made of All Plastics* (2002) [14], uwzględniając znaczny postęp w rozwoju tworzyw sztucznych wzmocnianych włóknem węglowym, autorzy w celu zmniejszenia ciężaru własnego kabli poddali analizie zastosowanie lin z CFRP zamiast stalowych. Zespół przeanalizował wykonalność trójprzęsłowego mostu wiszącego o rozpiętości 2000 m + 5000 m + 2000 m, wykonanego z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknami węglowymi. W badanym modelu przyjęto kabie główne wykonane z CFRP o współczynniku zwisu 1/20, a w obliczeniach konstrukcji pylonów przyjęto właściwości materiałów kompozytowych i betonu. Pomost drogowy został poprowadzony wewnątrz owalnej rury z CFRP. Na podstawie tak zdefiniowanego projektu testowego przeprowadzono modelowanie i obliczenia dla różnych przekrojów i zamocowań dźwigara usztywniającego oraz zbadano statyczne charakterystyki konstrukcyjne dla różnych obciążeń projektowych. Autorzy studiowali stateczność aerodynamiczną i zweryfikowali wpływ różnych rozwiązań na poprawę stateczności.



Ryc. 9. Koncepcja modelu mostu wiszącego CFRP prof. Kenichi Maeda [14]

Posługując się przedstawioną powyżej formułą zależności długości przęsła i współczynników ciężaru, autorzy wykreślił krzywe dla czterech parametrów zwisu kabli głównych 1/20, 1/12, 1/10 i 1/8 (wykres 2).

Unikatowość tej koncepcji polega nie tylko na zastosowaniu innych niż stal materiałów, ale również na odmiennej od obecnie stosowanych rozwiązaniach konstrukcji dźwigara / pomostu i systemu zawieszenia. Owalny, zamknięty pomost o wymiarach 40 m szerokości i 12 m wysokości umożliwia poprowadzenie dwóch pasów ruchu w każdą ze stron. Z punktu widzenia maksymalnej długości przęsła środkowego interesujące są wyniki krytycznej długości przy zastosowaniu CFRP lin nośnych. Przy współczynniku ciężaru



Wykres 2. Graficzna interpretacja krytycznej długości przęsła CFRP i współczynnika ciężaru [14]

W podsumowaniu analizy autorzy podkreślają, że dzięki zastosowaniu polimeru wzmocnionego włóknem węglowym w dźwigarze usztywniającym wykonanie projektu staje się możliwe przy współczynniku zwisu kabli 1/20. Przypuszczają jednak, że krytyczna prędkość wiatru może być zapewniona do wartości ok. 60 m/s. Zwiększenie sztywności skrętnej dźwigara usztywniającego jedynie przez zmianę kształtu przekroju poprzecznego nie poprawia znacząco stabilności aerodynamicznej. Dla podniesienia krytycznej prędkości wiatru do wartości ok. 70 m/s lub 80 m/s konieczne będzie zwiększenie grubości płyty dźwigara usztywniającego odpowiednio dwa lub trzy razy większego niż wartość ustalona na podstawie projektu statycznego.

Pomimo szeregu zalet CFRP, jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie, małe liniowe wydłużenie, wysoka odporność na zmęczenie, odporność na korozję czy wreszcie mały ciężar na jednostkę długości kabli i pomostu, zasadniczym i nierozwiązanym jeszcze problemem pozostaje technologia łączenia dużych rozmiarów sekcji i profili konstrukcji, zakotwienie kabli, bezpieczeństwo przeciwpożarowe i obecnie wysoka cena materiału.

Podsumowanie

Z przeglądu opublikowanych prac i przeprowadzonych do tej pory analizy przez liczne ośrodki naukowo-badawcze i ekspertów wynika kilka spostrzeżeń dotyczących maksymalnych rozmiarów mostów wiszących (wykres 3). Most wiszący o rozmiarach 5000 m przęsła głównego jest możliwy do zbudowania przy zastosowaniu aktualnej wiedzy i przy użyciu znanych i sprawdzonych materiałów. Potwierdziły to badania statyczne i aerodynamiczne analizowanych modeli. Górna granica długości przęsła głównego mogłaby nawet być przesunięta do rozmiaru ok. 6000 m. Dalsze zwiększenie rozmiarów mostów

wiszących będzie wiązać się z zastosowaniem lżejszych od stali materiałów, np. CFRP, oraz zmianą i optymalizacją konstrukcji pomostów i systemu zawieszenia. Dużą pomoc we wstępnych konstrukcyjnych analizach i weryfikacjach obliczeniowych oferują sprawdzone programy MES, w tym programy obejmujące dynamikę przepływów płynów (*computational fluid dynamics – CFD*). Badania w tunelu aerodynamicznym pełnych modeli mostów są nieodzowne w celu sprawdzenia i określenia warunków sztywności i stabilności aerodynamicznej analizowanych konstrukcji.

Literatura

- [1] Petroski H.: *Engineers of Dreams: Great Bridge Builders and the Spanning of America*, 1996.
- [2] *A Bridge on the Messina Strait. The Longest Span in the World*. „Domus. Italian Architecture Magazine” 1971.
- [3] Materiały firmy COWI, www.cowi.dk
- [4] Ostenfeld K.H.: *Evolution of Suspension Bridges*. Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2019.
- [5] Materiały biura patentowego USA, www.uspto.gov
- [6] Lin T.Y., Chow P.: *Gibraltar Strait Crossing. A Challenge to Bridge and Structural Engineers*. „Structural Engineering International” 1991, no. 2.
- [7] Materiały firmy OPAC, www.opacengineers.com
- [8] Mladjov R.: *Hybrid Suspension Bridges for Very Long Spans*. „Structure Magazine” 2021, No. 10.
- [9] Ge Y.-J., Xiang H.-F.: *Tomorrow's Challenges in Bridge Span Length*. IABSE Symposium Budapest 2006: Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering.
- [10] Ge Y.-J., Xiang H.-F.: *Bluff Body Aerodynamics Application in Challenging Bridge Span Length*. VI International Colloquium, Bluff Bodies Aerodynamics & Applications Milano, Italy, 2008.
- [11] Ge Y.-J., Xiang H.-F.: *Aerodynamic Stabilization for Box-girder Suspension Bridges with Super-long Span*. EACWE 5 Florence, Italy, 2009.
- [12] Astiz M.A., Andersen E.Y.: *On Wind Stability of very long Spans in Connection with a Bridge across the Strait of Gibraltar*. In: *Strait crossings. Proceedings of the 2nd symposium on Strait Crossings, Trondheim, Norway 10–13 June 1990*. Ed. J. Krokeborg. A.A. Balkema, Rotterdam, 1990, pp. 257–264.
- [13] Larsen A., Ostenfeld K.H.: *Aerodynamics of Large Bridges*. I International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, Copenhagen, Denmark, 1992.
- [14] Maeda K., Ikeda T., Nakamura H., Meiarashi S.: *Feasibility of Ultra Long-Span Suspension Bridges Made of All Plastics*. IABSE Symposium Melbourne, 2002.
- [15] Brancaloni F. et al.: *The Messina Strait Bridge A Challenge and a Dream*. CRC Press, Taylor & Francis Group. London 2010.
- [16] Ge Y.-J.: *Aerodynamic Challenge and Limitation in Long-span cable-supported Bridges*. 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16), Jeju Island, Korea, 2016
- [17] Ge Y., Xia J., Zhao L., Zhao S.: *Full Aeroelastic Model Testing for Examining Wind-Induced Vibration of a 5,000 m Spanned Suspension Bridge*. „Frontiers in Built Environment” 2018, vol. 4.
- [18] Gimsing N.: *Cable Supported Bridges – Concept and Design*. John Wiley and Sons Ltd, 1983.
- [19] Liu Y., Zwingmann B., Schlaich M.: *Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures – A Review*. „MDPI Journal” 2015, no. 7.
- [20] Huang W., Pei M., Liu X., Wei Y.: *Design and Construction of Super-long Span Bridges in China: Review and Future Perspectives*. Higher Education Press, 2020.



Czytaj więcej

Wykres 3. Ważniejsze mosty wiszące na świecie

