



Brooklyn Bridge, w tle Manhattan Bridge

Most Brookliński – dzieło życia Roeblingów

■ Krzysztof Dąbrowiecki



John Roebling, projektant i budowniczy mostu Brooklińskiego przez East River pomiędzy Nowym Jorkiem i Brooklynem, we wstępie do propozycji jego budowy w 1867 r. napisał: „Zakończona budowla, jeśli będzie zrealizowana zgodnie z moim projektem, stanie się nie tylko największym istniejącym mostem, ale największym inżynierskim dziełem kontynentu i wieku. Jej najbardziej widocznymi elementami będą wielkie pylony służące jako punkty orientacyjne dla obu miast i jednocześnie zyskają one status zabytku. Jako wielkie dzieło sztuki i udany przykład zaawansowanej inżynierii mostów konstrukcja ta zawsze będzie świadczyć o energii, przedsiębiorczości i bogactwie wspólnoty, która zagwarantuje jej wybudowanie”¹.

Prorocze słowa Roeblinga po 144 latach od czasu ich napisania są tak samo aktualne dzisiaj, jak w dniach entuzjastycznego świętowania otwarcia mostu 128 lat temu. Brooklyn Bridge stał się symbolem i ikoną budownictwa mostowego Nowego Jorku.

John August Roebling (1806–1869), student i zarazem miłośnik niemieckiego filozofa Georga Hegla, po skończeniu studiów technicznych w Berlinie, nie mogąc znaleźć odpowiedniego miejsca pracy w targanej wojnami Europie, z grupą entuzjastów Nowego

Świata w 1831 r. opuścił Prusy i wyemigrował do Ameryki. Osiedlając się i wykupując ziemię razem z bratem w pobliżu Pittsburgha, założył osadę Germany, przemianowaną później na Saxonburg. Przez kilka lat uprawiał ziemię, jednak nie mając zbyt dużego zamiłowania do rolnictwa, zajął się pracami pomiarowymi kanałów w stanie Pensylwania. W tym samym czasie realizując jeden ze swoich pomysłów, a przy okazji odpowiadając na rosnące zapotrzebowanie rynkowe, otworzył warsztat, w którym rozpoczął produkcję plecionych z drutów żelaznych lin i kabli. Po kilku przebudowach wodnych kanałów w Pittsburghu i Delaware przeniósł zakład i dom do Trenton w New Jersey. Wkrótce złożył ofertę na budowę mostu kolejowego Niagara Falls, jednak Niagara Falls International Bridge Company wybrała projekt Charlesa Elleta (1810–1862) i jemu zleciła realizację przeprawy.

Interesująco z inżynierskiego punktu widzenia brzmi list Roeblinga z 1847 r., wyrażający opinię na temat budowy projektowanego mostu wiszącego: „Poświęciłem jakiś czas na studiowanie tego tematu i mam przemyślany plan wraz ze szczegółami. Choćby pomysł zastosowania mostów wiszących do budowy mostów kolejowych został negatywnie oceniony przez Roberta Stephensona, mam odwagę powiedzieć, że znamienitemu inżynierowi nie po-



Od lewej: John Roebling, Washington Roebling, Emily Warren Roebling

¹ McCullogh D.: *The Great Bridge. The Epic Story of the Building of the Brooklyn Bridge*. New York 1972, p. 27.

wiodło się rozwiązanie tego problemu. Nie ma wątpliwości, że kable, dobrze zrobione, oferują najbezpieczniejszy i najbardziej ekonomiczny sposób wsparcia dużych ciężarów. Każde przęsło do 450 m długości, przy zwykłym ugięciu, może być całkowicie bezpieczne dla wsparcia ciężaru pociągów, jak również zwykłego ruchu drogowego. Im większy ciężar, który należy podpierać, tym mocniejsze muszą być zastosowane kable, i jest to jedynie kwestia nieomylnych obliczeń i nie powinno być żadnych trudności w sprawie oceny ich wytrzymałości. Powstaje tylko pytanie, które brzmi: czy most wiszący jest wystarczająco sztywny, aby nie uległ i nie ugiął się pod nierównomiernie rozłożonym ciężarem pociągu i czy wystąpią duże drgania, które wynikają z szybkiego ruchu pociągów, niszczycielskie dla zwykłych mostów, a których należy unikać i im przeciwdziałać? Moja odpowiedź na to pytanie jest twierdząca i utrzymuję, że kablony most, prawidłowo zbudowany, będzie najtrwalszy i najtańszy dla przęseł mostów kolejowych powyżej 30 m².

W 1851 r. Niagara Falls International Bridge Company przyjęła Roeblinga do pracy w celu ukończenia budowy rozpoczętego i nieskończonego przez Charlesa Elleta mostu drogowo-kolejowego (Niagara Bridge, 1855). W końcowym sprawozdaniu adresowanym do zarządu Roebling zawarł ciekawe, ogólne rozważania dotyczące konstrukcji mostów wiszących: „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 Wheeling Bridge, 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 przywrócić równowagę. Falowania powodowane wiatrem 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 na silne wiatry, 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 przęsłach, 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 przęseł, zapewniając ten sam poziom bezpieczeństwa”².

Jak można wnioskować z przytoczonego cytatu, John Roebling zdawał sobie sprawę ze współzależności trzech zasadniczych elementów konstrukcji: parabolicznych kabli głównych, diagonalnych kabli (want) i usztywniającej kratownicy pomostu. Nowatorstwo i odmienność jego rozwiązania polegała na połączeniu tych trzech układów ze sobą i stworzeniu hybrydowego rozwiązania dla mostów wiszących. Pozwalało mu to na budowanie coraz to dłuższych



Pylon Brooklyn Bridge



Przejazd przez most zimą

przęseł, przewyższając problemy towarzyszące zwiększonym rozpiętościami.

W tamtych czasach nie było wiarygodnej metody pozwalającej na obliczenie sił i momentów i ich dystrybucji w statycznie niewyznaczalnych konstrukcjach, dlatego Roebling opracował własną analizę obliczeniową, którą można określić jako metodę równowagi wytrzymałościowej. Stephen Buonopane, profesor budownictwa lądowego Bucknell University, analizując materiały kolekcji prac Roeblinga w Rensselaer Polytechnic Institute odszukał informacje dotyczące proponowanych i niezbudowanych kilkudziesięciu mostów wiszących w latach 1847–1914. Choć nie ma wśród nich dokumentów i obliczeń dotyczących mostu Brooklińskiego, pozwalają one jednak na szczegółowe przesledzenie toku postępowania i metody obliczeniowej stosowanej przez Johna Roeblinga i jego syna, Washingtona, przy projektowaniu krótszych mostów. Stosowana metoda zawierała kilkanaście prostych kroków proceduralnych i zasadniczo polegała na zsumowaniu obciążenia stałego (bez kabli głównych) i zmiennego, arbitralnym rozdziale procentowym całkowitego obciążenia przejmowanego przez kable diagonalne (wanty) i kable główne w stosunku 1/4 lub 1/3, a następnie zwiększenie całkowitego obciążenia przez dodanie ciężaru własnego kabli i pomnożenie przez współczynnik bezpieczeństwa (Roebling przyjmował wartość WB = 4–5). Maksymalne napięcie

² Steinman D., Watson S.: *Bridges and their Builders*. Dover Publications. New York 1957, p. 217.

³ Interesujące jest to, że most Tacoma Narrows doświadczył tego, co przewidział i opisał Roebling sto lat wcześniej. Zob. Dąbrowiecki K.: *Mosty Tacoma Narrows*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2010, nr 5 (32), s. 66–70.

osiowe T w parabolicznym kablu na pylonie było obliczane na podstawie następujących równań:

$$\text{dla poziomego napięcia kabla } H = W\left(\frac{L}{8f}\right),$$

$$\text{dla pionowego napięcia kabla } V = H\left(\frac{4f}{L}\right).$$

Z geometrii trójkątnego rozkładu sił Roebling otrzymał wzór na maksymalne napięcie kabla:

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = W\left(\frac{L}{8f}\right)\sqrt{1 + \left(\frac{4f}{L}\right)^2}$$

gdzie:

W – całkowite pionowe obciążenie

L – długość przęsła

f – zwis kabla pomiędzy przęsłami

H, V – poziome i pionowe napięcie kabla.

Zakładając, że stosunek zwisu do długości przęsła w tamtym czasie był przyjmowany 1/12,5, maksymalne napięcie w wyniku obciążenia mostu wynosiło $T = 1,64 W$. Przy użyciu dwóch kabli otrzymane z równania napięcie T było dzielone przez 2 dla pojedynczego kabla. Końcowy wynik napięcia kabla T był równoważony wytrzymałością na rozciąganie dobieranych drutów i kabli. W przypadku kabli diagonalnych ich długość i obciążenie było zależne od miejsca zamocowania, dlatego Roebling wraz ze wzrostem długości kabli stopniowo zwiększał ich średnicę, wzmacniając tym samym ich wytrzymałość na rozciąganie.

Wybudowany kolejowo-drogowy most Niagara był dwupoziomowy, górny pomost przeznaczony był dla pociągów, dolny dla ruchu drogowego. Długość przęsła głównego wynosiła 251 m. Cztery kable po dwa z każdej ze stron, były osadzone na czterech, pojedynczych, 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. Budowa tego mostu była niezwykłym sukcesem inżynierskim Johna Roeblinga, choć jego estetyka pozostawiała wiele do życzenia.

W 1856 r. konstruktor rozpoczął pracę przy budowie drugiego mostu wiszącego, przez rzekę Ohio w Cincinnati. Całkowita długość mostu wynosiła 659 m, przęsła głównego 322 m, a szerokość pomostu 7,6 m. Był to kolejny rekord długości. W przypadku tego projektu Roebling wykorzystał sprawdzone hybrydowe, nieco udoskonalone rozwiązanie mostu Niagara, dwa kable nośne podparte murowanymi pylonami wzmocnione diagonalnymi wantami. Dostrzegając, konstrukcyjno-architektoniczną zmianą jest połączenie pylonów po każdej ze stron potężnym rzymskim łukiem. Dla zapewnienia bezpiecznej stabilności konstrukcji stosuje wszystkie elementy, o których pisał w raporcie dotyczącym mostu Niagara. Geometryczny trójkąt utworzony przez wanty, usztywnienie pomostu i pylony dawały w opinii Roeblinga gwarancję wymaganej stabilności.

Budowa początkowo posuwała się szybko, ale ze względu na kryzys ekonomiczny i wojnę secesyjną została zawieszona i ukończona dopiero w 1866 r. W końcowym etapie budowy brał udział syn konstruktora, Washington. Przez lata użytkowania most był kilkakrotnie reperowany, wzmacniany dodatkowymi kablami i konserwowany, ale do dzisiaj w pełni funkcjonuje, a zaliczony do narodowych pomników budownictwa lądowego stanowi jedną z historycznych atrakcji miasta.

Washington August Roebling (1837–1926), absolwent inżynierskiej szkoły Rensselaer Polytechnic Institute, pomagając ojcu w dołączeniu mostu w Cincinnati, nabierał inżynierskiego doświadczenia. Wkrótce okazało się, jak niezwykle było ono potrzebne przed czekającym go życiowym wyzwaniem, którym miała być budowa w nieodległej przyszłości mostu Brooklińskiego.

John Roebling kilkanaście lat wcześniej w liście do Abrama Hewitta, nowojorskiego kongresmena, zamieszczonym w „New York Journal of Commers”, przedstawił propozycję budowy mostu łączącego Nowy Jork z Brooklynem. Ale podobnie jak w przypadku mostu w Cincinnati, kryzys ekonomiczny, wojna i brak politycznej woli projekt ten wstrzymywały aż do mroźnej zimy 1866–1867, kiedy transport promowy pomiędzy tymi miastami został całkowicie wstrzymany z powodu zamrożniętej rzeki. Na skutek presji społecznej stan przyjął uchwałę powołującą do życia firmę New York Bridge Company, której głównym celem była budowa mostu. W maju 1867 r., po zaakceptowaniu przez nią i przyjęciu projektu mostu, John Roebling został mianowany głównym projektantem i budowniczym nowej przeprawy.

Projektowany obiekt o całkowitej długości 1825 m i szerokości 26 m, ponad dwa i pół razy dłuższy od tego w Cincinnati, miał być najdłuższym mostem wiszącym na świecie. Główne przęsło miało mieć długość 486 m i znajdować się 40 m ponad wodą, przęsła boczne po 283 m. Cztery kable nośne o średnicy 0,40 m, każdy złożony z 5434 równoległych, ocynkowanych, stalowych drutów, zostały wsparte na dwóch identycznych pylonach i zakotwione po obu stronach rzeki w masywnych, murowanych blokach kotwiących. Charakterystyczną cechą przeprawy były dominujące nad okolicznymi domami nawowe, gotyckie w kształcie łuki pylonów z ogromnymi katedranymi portalami ponad pomostem. Gotyckie łuki dla Roeblinga były wyrazem, biorąc pod uwagę rozmiary konstrukcji i lokalizację, dobrej architektonicznej proporcji. Na tle całości sprawiały wrażenie masywności i dużej wytrzymałości budowli. Roebling doskonale zdawał sobie sprawę z wyjątkowego położenia mostu i jego roli w życiu miasta. Dlatego z pełną świadomością zaprojektował, wzdłuż mostu, podwyższony 3,5 m ponad pomostem drogowym, wygodny dla pieszych deptak o szerokości 4,75 m, który umożliwiał pieszym niezakłócone i panoramiczne widoki Manhattanu, Brooklynu i rzeki. W raporcie pisał: „Tę część nazwałem podwyższoną promenadą, ponieważ podstawową jej funkcją będzie pozwolić ludziom, starym i młodym, dla przyjemności przechadzać się po moście podczas pogodnych dni, podziwiać piękne widoki i oddychać czystym powietrzem. Nie trzeba udowadniać, że w przeludnionym, handlowym mieście taka promenada będzie miała ogromną wartość⁴”. Most Brookliński był trzecim, a zarazem najbardziej przemyślanym i nowoczesnym mostem wiszącym w karierze zawodowej Johna Roeblinga.

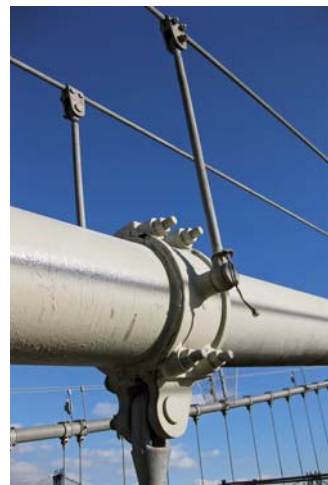
Nieszczęśliwym zbiegiem okoliczności, w pierwszych miesiącach dokonywania pomiarów pod lokalizację fundamentów pylonów (28 czerwca 1869 r.) Roebling uległ fatalnemu wypadkowi, którego skutki zignorował, a rady lekarzy zupełnie zbagatelizował. W wyniku zgniecenia stopy nastąpiło tężcowe zapalenie organizmu, które w ciągu kilku tygodni doprowadziło do śmierci.

David Steinman (1886–1960), jeden z wielkich amerykańskich projektantów i budowniczych mostów, pisząc o Roeblingu, zastanawiał się, jak temu tytanowi pracy starczało czasu na wszystkie zajęcia, którymi się zajmował w niezwykle aktywnym życiu. Roebling brał udział w konwencjach technicznych, pisał do czasopism naukowych, studiował metafizykę, pozostawił ponad dwa tysiące stron rękopisów o koncepcji wszechświata, był wynalazcą narzędzi

⁴ McCullough D.: *The Great Bridge...*, p. 32.



Wjazd na most od strony Manhattanu



Kabel główny z zamocowaniem wieszaka



Promenada

i maszyn, niektóre z nich opatentował (US patent 4945), grał na flecie i fortepianie. W pewnym sensie odpowiedzi można szukać w krążącej o nim anegdocie. Kiedy generał Fremont wezwał go do siebie i przez jakiś czas kazał mu czekać w poczekalni, zniecierpliwiony inżynier napisał na kartce: „Szanowny Panie, cieszę się z każdej pracy, którą mi Pan zleci, ale czekanie w beczynności to luksus, na który nigdy sobie nie pozwalam”, po czym wyszedł. Roebling pracował gorączkowo, jakby zdając sobie sprawę, że ma tak wiele do zrobienia i tak mało czasu do realizacji. Jego końcowa praca była wyścigiem ze śmiercią. Niestety, los odmówił mu dożycia splendoru, który byłby ukoronowaniem jego życia.

W nowej i niespodziewanej sytuacji znalazł się jego syn, Washington Roebling. W wieku 32 lat, jako osoba najbardziej zaznajomiona z projektem mostu, został jego głównym budowniczym. New York Bridge Company, mimo kontrowersji związanej z niedostatecznym doświadczeniem zawodowym, zlecił mu kontynuowanie prac ojca.

Prawdziwym wyzwaniem budowniczych mostu nie był sam jego rozmiar, ale fundamenty 90-metrowych pylonów. Przy zaprojektowanej rozpiętości przęsła głównego zlokalizowane one zostały kilkanaście metrów od każdego z brzegów rzeki. Ich budowa wymagała użycia nowatorskiej metody, jaką były pneumatyczne kesony o wymiarach 50 x 30 x 4,4 m. Ogólna koncepcja kesonu, z którą Washington kilka lat wcześniej zapoznał się podczas podróży po Europie, była stosunkowo prosta. Keson jest sześćścianem zamkniętym ścianami tylko po pięciu stronach. Otwarta strona skrzynki oparta jest na dnie rzeki i po wypompowaniu ze skrzyni wody, wprowadzeniu powietrza o ciśnieniu większym niż ciśnienie otaczającej wody, możliwe jest wybieranie ziemi i osadzanie kesonu poniżej dna rzeki. Wraz z osadzaniem się kesonu wzrastał ciężar fundamentów pylonów budowanych na górnej jego ścianie. Prace wewnątrz kesonów prowadzone ręcznie, przy oświetleniu jedynie lampami gazowymi były wyjątkowo ciężkie i trudne i posuwały się bardzo wolno. Gdy wraz z głębokością ziemia stawała się twardsza z licznymi kamieniami osadowymi i prawie niemożliwa do ręcznego kopania, Roebling zdecydował o użyciu prochu wybuchowego do kruszenia gruntu.

Po osadzeniu na wymaganej głębokości kesony wypełnione betonem stanowiły podstawę do budowy murowanych pylonów. Roebling osobiście kierował pracami w kesonach, spędzając w nich wiele godzin. Na wiosnę 1872 r., trzy lata od rozpoczęcia budowy, zachorował na chorobę kesonową (dekompresyjną), która uniemożliwiła mu dalsze prowadzenie nadzoru prac. W krótkim czasie po raz drugi budowa straciła głównego budowniczego i jej kontynuacja stała pod znakiem zapytania. W tej bezprecedensowej sytuacji

z pomocą projektowi i budowie przyszła żona Washingtona, Emily Warren Roebling (1843–1903). Okazała się niestrudzoną asystentką, sekretarką, energiczną łączniczką i rzeczniczką swojego współspiralizowanego, głuchego i niemego męża. Aby sprostać wyzwaniu, zaczęła studiować matematykę, wytrzymałość materiałów, konstrukcję i budowę mostów. Jej bezgraniczne oddanie w kierowaniu i nadzorowaniu prac konstrukcyjno-budowlanych przeszło do legendy. Początkowo 29-letnia Emily była tylko kurierem przekazującym polecenia Washingtona budowniczym na placu budowy, z czasem stała się osobą w znacznym stopniu prowadzącą budowę samodzielnie, bezpośrednio odpowiadając na techniczne pytania pracowników, inżynierów, dostawców i urzędników instytucji publicznych.

Prace były kontynuowane pomimo ogromnych trudności wynikających także z wszechogarniającej Nowy Jork korupcji, braku środków finansowych oraz nieuczciwości podwykonawców. W okresach poprawy stanu zdrowia Roebling przez lornetkę z pokoju obserwował postępujące prace i przekazywał polecenia i instrukcje. Ta niecodzienna forma koordynacji i nadzoru prac trwała ponad 10 lat, do czasu całkowitego ukończenia budowy mostu na wiosnę 1883 r.

Rok przed zakończeniem prac budowlanych podjęto próbę usunięcia Roeblinga z funkcji głównego budowniczego. Podważano jego fizyczne zdolności do prowadzenia budowy. Dzięki przekonującej argumentacji, taktowi i dyplomacji w złożonym sprawozdaniu przed Amerykańskim Stowarzyszeniem Inżynierów Budownictwa Lądowego (ASCE) Emily Roebling obroniła i zachowała dla Washingtona Roeblinga pozycję głównego budowniczego.

Podczas oficjalnego otwarcia mostu Brooklińskiego, 24 maja 1883 r., Abram Hewitt, dla podkreślenia zasług Emily oświadczył, że przysługuje jej pełne zawodowe uznanie na równi z głównym budowniczym i pozostałymi inżynierami, a jej „nazwisko od tej pory będzie nierozdzielnie związane ze wszystkim, co jest godne podziwu w ludzkiej naturze i co jest wspaniałe w twórczym świecie sztuki”⁵. Most nazwał „wiecznym pomnikiem ofiarnego poświęcenia kobiety i możliwości zdobycia przez nią wyższego wykształcenia, które było jej zbyt długo wzbraniane”⁶.

Emily Roebling po zakończeniu budowy mostu, dzieląc czas między rodzinę i pracę w charytatywnych stowarzyszeniach, studiowała prawo i w 1899 r. uzyskała dyplom na wydziale prawa nowojorskiego uniwersytetu.

⁵ Biografia Emily Warren Roebling, ASCE, <http://www.asce.org/PPLContent.aspx?id=2147487328>.

⁶ Ibidem.



Wiązanie want i wieszaków



Portal pylonu



Przejście kabli przez pylon

Brookliński Klub Inżynierów w 1951 r. ufundował i powiesił na pylonie mostu tablicę pamiątkową dedykowaną Emily Warren Roebling, której „wiara i dzielność pomogły dotkniętemu chorobą mężowi dokończyć budowę mostu według planów jego ojca, Johna Roeblinga”.

Steinman zachwycając się konstrukcją mostu, zresztą w cieniu którego wyrósł i wychował się, podkreślał: „Brooklyn Bridge, w formie i strukturze, w kompozycji i proporcji, jest jego [Johna Roeblinga] dziełem. Został zbudowany tak, jak on sobie wyobrażał. Jest to artystyczne, jak również inżynierskie arcydzieło. Przebite linami granitowe pylony, pełne wdzięku łuki głównych kabli, pajęczyna lekkich kabli i wygięta linia pomostu, łącznie tworzą niezrównaną kompozycję, stanowiąc harmonijny związek mocy i gracji. Jest kwintesencją trwałego piękna”⁷.

David Billington, profesor budownictwa lądowego Uniwersytetu Princeton zauważył, że most Brookliński otworzył nowy okres w budownictwie i symbolizuje, wraz m.in. z wieżą Eiffla, nowy okres w historii, w którym świat technologii stał się dominującym aspektem ludzkiego życia.

Zdaniem Alfreda Pugsleya, profesora budownictwa lądowego uniwersytetu w Bristolu, most Brookliński był triumfem inżynierii intuicyjnej i zarazem jej końcem. W tym okresie teoria mostów wiszących ewaluowała od teorii Naviera, Rankina do rozwoju teorii sprężystości i teorii ugięcia. Teoria sprężystości rozwijała się wielokierunkowo od 1880 r. Najpierw Celeste Clericetti próbował zwerifikować ją na przykładzie mostu Brooklińskiego, później Charles Bender opisał połączone działania

sprężystej belki zawieszanej na sprężystym kablu. W 1886 r. Maurice Levy sformułował podstawowe składniki przybliżonej teorii sprężystości. Główne założenia teorii sprężystości w porównaniu z teorią Rankina (1858) były takie same, z wyjątkiem wartości obciążenia jednostkowego q . Rankine przyjmował arbitralnie q jako stosunek całkowitego obciążenia zmiennego do długości przęsła. W teorii sprężystości q zależało od sztywności sprężystej kabli i usztywniającego dźwigara (a także w mniejszym stopniu od sztywności wieży itp.). Kabel był traktowany jako jednolicie obciążony odwrócony sprężysty łuk paraboliczny z podwieszoną sprężystą belką. Teoria sprężystości stanowiła postęp w porównaniu z teorią Rankina w ocenie wartości jednostkowej q . Równocześnie znacząco rozwinęła się teoria łuków równoległych. W tym czasie została również opublikowana praca Castigliano o energii odkształcenia.

Jednocześnie z teorią sprężystości rozwijała się bardziej precyzyjna teoria sprężystości (Melan), nazwana później przez Leona Moisseiffa (1872–1943) teorią ugięcia. W pierwszej połowie XIX w. było dobrze znane zachowanie się ciężkiego wiszącego kabla bez dźwigara usztywniającego pod skoncentrowanym, nieliniowym obciążeniem. W postaci ogólnej, matematyczny zapis tej nieliniowości nie pojawił się aż do publikacji przybliżonej analizy w 1862 r. W 1888 r. ukazała się pierwsza nieliniowa teoria mostów wiszących Josefa Melana (1854–1941). W teorii tej, w wersji opublikowanej w 1906 r., obliczenia postępują jak w łukowej formie teorii sprężystości, ale uwzględniają nieliniowe zachowanie się kabla przez uznanie zmiany jego kształtu pod wpływem skoncentrowanego obciążenia i korespondującej z tym zmiany napięcia w kablu.

Pierwsze praktyczne zastosowania teorii ugięcia miało miejsce w obliczeniach mostu Manhattan dokonanych przez Moisseiffa. Została ona ponownie zweryfikowana przez Turneaura w 1909 r., kiedy ukończona budowa, nadzorowana przez Nicholasa i Modjeskiego, została otwarta dla ruchu. Te wszystkie doświadczenia wraz z tłumaczeniem pracy Melana przez Davida Steinmana (1913), jak pisał Pugsley, przyczyniły się do znacznego postępu w projektowaniu mostów wiszących i stanowiły podstawę do wielkiej ekspansji ich zastosowania w Ameryce w ciągu pierwszych dekad XX w.

Sukces mostu Brooklińskiego od pierwszych dni oddania do użytku jest nie do przecenienia. Od tamtego czasu setki tysięcy ludzi dziennie przechodzą lub przejeżdżają przez niego, dla jednych stał się alegorią wibrującego miasta, dla innych początkiem przemian techniczno-technologicznych czy początkiem rozwoju współczesnych teorii mostów wiszących. Jednak dla większości użytkowników jest obiektem niekończącej się fascynacji, wyobrażeń i konotacji.

Literatura

1. McCullough D.: *The Great Bridge*. Avon Books. New York 1972.
2. Buonopane S.: *The Roablings and Stayed Suspension Bridges. Its Development and Propagation in 19th Century United States*. Cambridge 2006.
3. Steinman D., Watson S.: *Bridges and their Builders*. Dover Publications. New York 1957.
4. Billington D.: *The Tower and the Bridge*. Princeton University Press. Princeton 1983.
5. Pugsley A.: *The Theory of Suspension Bridges*. Edward Arnold Ltd. London 1968.
6. Weingardt R.: *Engineering Legends*. ASCE Press, 2005.

ZDJĘCIA: PASCAL BOUVRON, KEN BURNS: AMERICA COLLECTION: BROOKLYN BRIDGE

⁷ Steinman D., Watson S.: *Bridges and their Builders*... p. 247.



GONAR SYSTEMS INTERNATIONAL

Posiadamy Aprobatę Techniczną IBDiM oraz Krajowy Certyfikat Zgodności w zakresie stosowania naszych systemów do rozwiązań tymczasowych oraz trwałych.

Firma Gonar Systems International jest producentem systemów samowierzących iniekcyjnych kotew, mikropali i gwoździ gruntowych.

Wyroby firmy znajdują swoje zastosowanie:

- w geotechnice do zabezpieczeń powstających osuwisk
- w budownictwie podziemnym jako obudowa wstępna i kotwiowa tuneli, wyrobisk korytarzowych i komorowych
- w przemyśle wydobywczym do wzmacniania górotworu oraz wiercenia otworów strzałowych, kotwionych, technologicznych i innych
- w przemyśle komunikacyjnym do wzmacniania skarp nasypów i wykopów drogowych, autostradowych bądź kolejowych oraz posadowienia wyposażenia na mikropalach
- w budownictwie do zabezpieczania ścian wykopów oraz posadowienia i podchwytywania fundamentów za pomocą mikropali



GONAR Systems International sp. z o.o.
ul. Obroki 109
40-833 Katowice
www.gonar-systems.com

Sekretariat
tel.: +48 32 20 71 201
fax.: +48 32 20 71 250
gsi@gonar.com.pl

Dział Handlowy:
tel.: +48 32 20 71 295, +48 32 20 71 220
fax.: +48 32 20 71 296
mariusz.maltazar@gonar-systems.com