

Samokotwiący most wiszący

San Francisco – Oakland Bay

tekst: **KRZYSZTOF DĄBROWIECKI**,
zdjęcia: **ZBIGNIEW CICHOCKI**,
grafika na podstawie materiałów CDOT:
ŁUKASZ DĄBROWIECKI



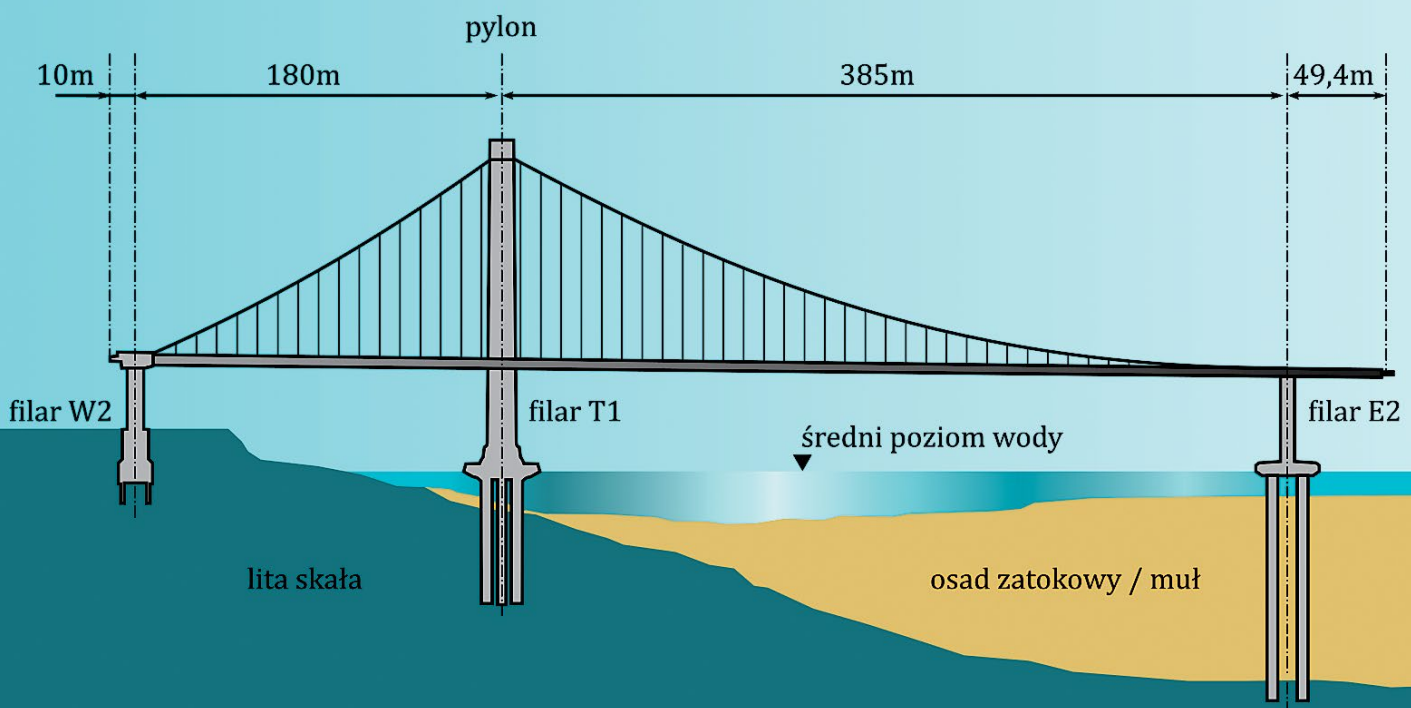
Obszar metropolitalny San Francisco jest miejscem szczególnym i niepowtarzalnym. Miasto, które wzięło swoją nazwę od zatoki San Francisco, położone na samym cyplu półwyspu San Francisco, połączone jest z lądem dwoma wyróżniającymi się mostami: Golden Gate oraz Oakland Bay. Obie konstrukcje zbudowane w latach 30. XX w., a więc mające ponad 80 lat, w dalszym ciągu pełnią wyjątkową funkcję w komunikacyjnym ciągu tej rozległej aglomeracji.

Dziennie przejeżdża przez nie ponad 400 tys. pojazdów. Most Golden Gate, ikona i wizytówka miasta, przyćmił swoją rozpoznawalnością znacznie dłuższy, dwupoziomowy zespół dwóch mostów wiszących w kierunku wyspy Yerba Buena – most Oakland Bay. Położony w samym centrum zatoki, łączy jej wschodnie i zachodnie wybrzeże, a przede wszystkim dwa miasta, San Francisco i Oakland, oba ulokowane w aktywnych strefach sejsmicznych, biegnących wzdłuż zatoki po obu jej stronach. Oakland leży na pęknięciu Hayward, San Francisco na uskoku San Andreas. Właśnie ta specyficzna lokalizacja mostu San Francisco – Oakland Bay i tragiczne doświadczenia trzęsień ziemi w San Francisco Bay Area (rejon zatoki San Francisco) w 1989 r. oraz w południowej Kalifornii (Northridge) w 1994 r., a także powtarzające się cyklicznie wstrząsy o różnym natężeniu w tym rejonie spowodowały, że inżynierowie i architekci wraz z władzami lokalnymi i stanowymi byli zdeterminowani, aby stworzyć wyjątkowo wytrzymałą konstrukcję dla wschodniej części mostu Oakland Bay. To najsłabsze ogniwo w ciągu komunikacyjnym było najbardziej narażone na pęknięcie lub zerwanie w wyniku kolejnych drgań ziemi. Potwierdziły te obawy liczne symulacje i testy modelowe przeprowadzone

po uszkodzeniu mostu w 1989 r. Jednakże w wyniku analiz finansowych okazało się, że koszt modernizacji i wzmocnienia istniejącej konstrukcji byłby porównywalny z kosztem całkowitej nowej budowy, znacznie bardziej odpornej na największe wstrząsy ziemi w perspektywie 150 lat eksploatacji. Stąd też zdecydowano się na budowę nowego mostu po wschodniej stronie wyspy Yerba Buena.

Proces wyłaniania ostatecznej wersji mostu spośród zgłoszonych rozwiązań był długi, burzliwy i pełen kontrowersji. Po licznych publicznych przesłuchaniach i interwencjach zarządów miast i stanu wybrano ostatecznie dwie wersje: podwieszony most z jednym pylonem o konfiguracji harfowej i również jednopylonowy, ale samokotwiący most wiszący (*self anchored suspension – SAS*). Ostatecznie Metropolitalna Komisja Transportowa (*Metropolitan Transportation Commission – MTC*) większością głosów zdecydowała się na koncepcję mostu, którego centralnym punktem jest unikatowy w skali światowej most SAS. Został on zaprojektowany przez architektów Donalda MacDonalda i Herba Rothmana, którzy, podobnie jak Irving Morrow, projektując most Golden Gate bez mała 90 lat wcześniej, szczególną uwagę zwrócili na walory estetyczne, grę światła, proporcje i harmonię z otoczeniem, starając się dorównać ikonie San Francisco. Konstrukcyjny projekt mostu został opracowany przez firmę T.Y. Lin International we współpracy z Moffatt & Nichol.

Klasyczny most wiszący to zazwyczaj dwupylonowa, trójprzęsłowa konstrukcja z przęsłami niezależnie podpartymi. Przęsła te są podwieszane za pośrednictwem pionowych wieszaków do dwóch ciągów nośnych opartych swobodnie na pylonach i zakotwionych na końcach w blokach kotwiących. Dwa niezależne ciągi nośne przenoszą siły rozciągające do zewnętrznych bloków kotwiących. Montaż tego rodzaju zakotwień jest czasochłonny i stanowi stosunkowo wysoki koszt w całkowitych



Widok boczny mostu

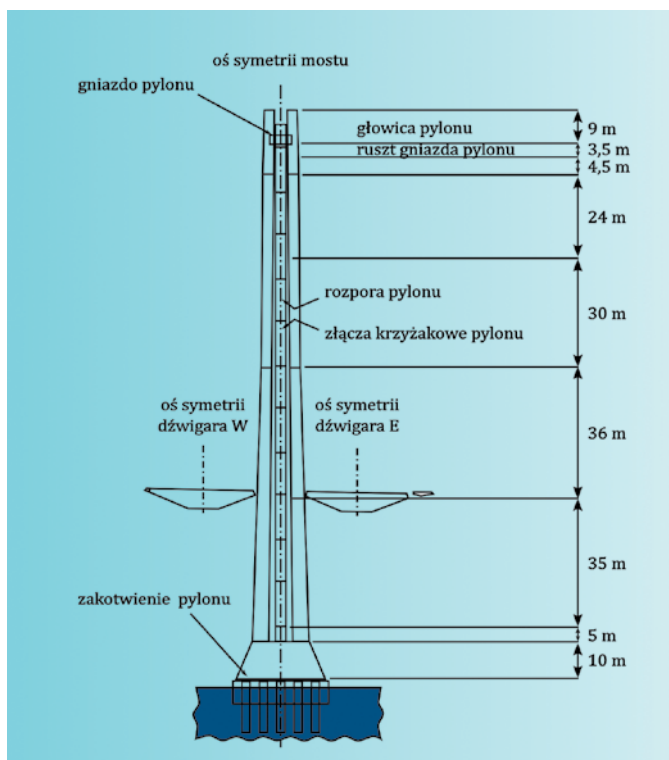


Widok wschodniej części mostu Oakland Bay

wydatkach na budowę mostu wiszącego. W dużym stopniu możliwość zakotwienia zewnętrznego zależy od lokalizacji i warunków terenowych. Dlatego też dla wyeliminowania zewnętrznych bloków kotwiących inżynierowie opracowali koncepcję samokotwiących mostów wiszących. Oznacza to,

że główne ciągną są umocowane do ustroju nośnego mostu. Zasada samokotwiącego mostu wiszącego polega również na tym, że przenosi horyzontalny komponent siły rozciągającej ciągną głównego na konstrukcję dźwigara mostu zamiast na bloki zewnętrzne. Nie jest to jednak nowe rozwiązanie. Ma ono historię tak długą jak tradycyjne mosty wiszące, ale ze względu na odmienną i dość skomplikowaną w porównaniu z budową klasycznych mostów wiszących technologię budowy było rzadko stosowane.

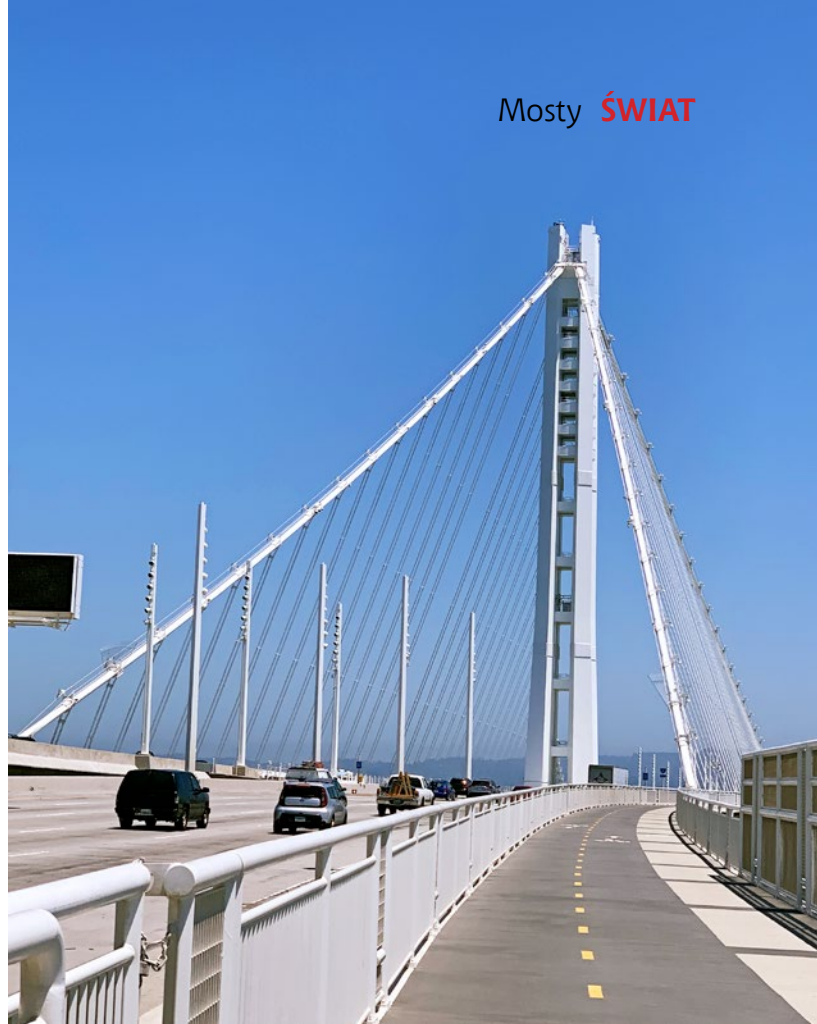
Przy budowie tradycyjnego mostu wiszącego najpierw wznoszone są pylony i budowane bloki zakotwień. Następnie pomiędzy blokami kotwiącymi przez pylony przeciągane są pojedyncze lub w wiązkach stalowe druty. Do ukończonych ciągnie nośnych podczepiane są liny wieszakowe, a do końców lin wieszakowych sekcje ustroju nośnego. Natomiast aby wznieść samokotwiący most wiszący, trzeba właściwie zbudować dwa mosty. Zasadniczo do ich budowy używane są dwie metody, wspornikowa lub z rusztowaniem podpierającym, czasami kombinacja obu. Ponieważ ciągną nośne są zakotwione w dźwigarze mostu, a nie w blokach kotwiących, cały ustrój nośny musi być najpierw wybudowany, i aby to zrobić, konieczne jest tymczasowe podparcie czy to w postaci lin wieszakowych mocowanych do tymczasowego pylonu, czy w postaci rusztowania. Po ukończeniu ustroju nośnego przeciągane są ciągną, które mocuje się do końcowych krawędzi dźwigara. Wtedy dopiero następuje ostateczna faza budowy, czyli do lin wieszakowych podczepiany jest ustrój nośny, a następnie podnoszony w przypadku użycia rusztowania podpierającego. Gdy ciężar mostu swobodnie zawisnie na ciągnach nośnych i zostanie odpowiednio wyważony, tymczasowe podparcie zostaje usunięte.



Pylon mostu



Wjazd na most od strony Oakland

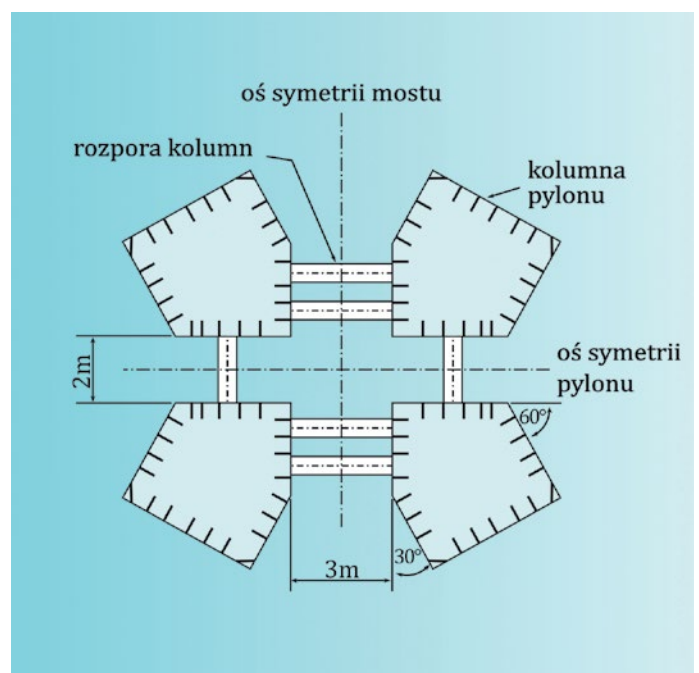


Ścieżka pieszo-rowerowa

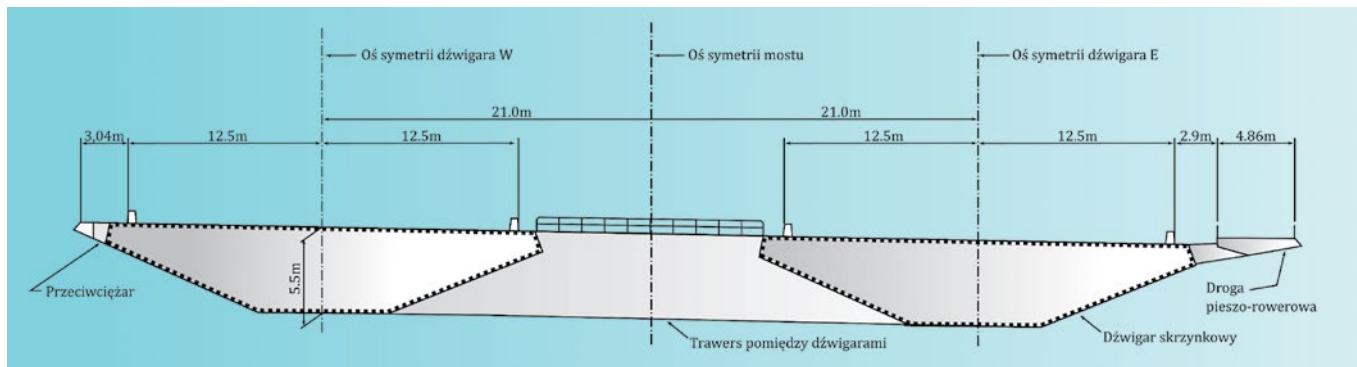
Konceptę samokotwiącej wiszącej konstrukcji jako pierwszy opublikował w 1859 r. Josef Langer. W 1867 r. Charles Bender otrzymał w USA patent na podobne rozwiązanie. Pomimo długiej historii do tej pory wybudowano tylko kilkanaście tego typu konstrukcji na świecie, z których najbardziej znane to: w Niemczech – mosty Köln – Deutz (1915), Krefeld – Uerdinger (1935), Duisburg (1955), w USA – w Pittsburghu: „trzy siostry”, czyli mosty Sixth Street (1928), Seventh Street (1926) i Ninth Street (1928), oraz Hutsonville (1939), w Anglii – most Chelsea (1937), we Francji – mosty St Germain (1950) i Merelbeke (1960). Były to jednak konstrukcje o stosunkowo krótkich środkowych przęsłach, w większości mających ok. 100 m długości. W ostatnim czasie powrócono do tej koncepcji i wybudowano kilka mostów bijących rekordy długości, z których dwupylonowe mosty o 300-metrowym prześle środkowym powstały w Japonii i Korei Południowej. Most Konohana (Osaka, 1990) o całkowitej długości 540 m ma przęsła w rozkładzie 120 + 300 + 120 m, most Yeongjong Grand (Inczon, 2000) o całkowitej długości 550 m przęsła w rozkładzie 125 + 300 + 125 m.

Oddany do użytku w 2013 r. most wschodniej części zatoki San Francisco należy do tej samej kategorii samokotwiących wiszących mostów. Odmienność tej konstrukcji w porównaniu z istniejącymi polega na zastosowaniu jednego, ale złożonego z czterech kolumn pylonu i jednego cięgna nośnego przy długości najdłuższego przęsła ponad 300 m. Cięgno nośne podtrzymuje dwa równoległe, niepodparte na pylonie dźwigary. Jest więc to bardzo nowatorskie i oryginalne pod względem inżynierskim rozwiązanie. Zlokalizowany po wschodniej stronie wyspy Yerba Buena jednopylonowy wiszący most o asymetrycznych przęsłach (385 + 180 m) przechodzi następnie łagodnie w dwa betonowe wiadukty o długości 2,4 km.

Głównym elementem mostu SAS jest wysoki na 160 m pylon. Jego zwężająca się ku górze konstrukcja składa się z czterech niezależnych, stalowych kolumn w kształcie pięciokątów i gniazda dla cięgna głównego. Cięgno główne o średnicy 0,78 m (137 wiązek, w wiązce 127 drutów o średnicy 5 mm każdy), zamocowane z jednej strony pylonu, przebiega przez gniazdo na szczycie pylonu, by następnie obić koniec krótszego, skrzynkowego dźwigara po przeciwnej stronie.



Przekrój kolumn pylonu



Przekrój dźwigarów nośnych

Przechodząc poniżej jezdni na drugą stronę mostu, ponownie biegnie przez ten sam pylon, a następnie jest umocowane do dźwigara po przeciwnej stronie punktu pierwszego zakotwienia. „Nie było miejsca na zakotwienie na wyspie Yerba Buena – wyjaśniał Brian Maroney, główny inżynier ds. transportu w Kalifornii, w wywiadzie dla „Popular Mechanics”. – Musieliśmy użyć nietypowej pętli po zachodniej stronie, najbardziej skomplikowanej części projektu”.



Pętla cięgna nośnego



SAS w trakcie budowy pylonu w 2011 r., fot. K. Dąbrowiecki

Poprowadzenie jednego cięgna nośnego jest niekonwencjonalne i interesujące z technicznego punktu widzenia, bowiem nigdy wcześniej nie próbowano zastosować go w takiej skali. Natomiast architektonicznie smukły pylon z dwoma cięgnami i opadającymi wieszakami na zewnątrz dwóch równoległych, pięciopasmowych jezdni tworzy sklepioną przestrzeń, przez którą przejeżdżają samochody. Pylon przesunięty o 38 m od osi symetrii w kierunku Yerba Buena podkreśla dynamikę konstrukcji, a asymetryczność formy przestrzennej optycznie równoważy długi wiadukt mostowy.

Główny architekt, Donald MacDonald, jest zdania, że pylon to najistotniejszy element całego projektu. Jest to pierwszy szczegół, który widzimy, zbliżając się do obiektu, patrząc z bliska czy z oddali. Projektant podkreśla, że obszar zatoki San Francisco ma długą tradycję mostów wiszących, a SAS jest rozwiązaniem niejako uzupełniającym. Charakterystyczny pylon o wyjątkowym kształcie, w przeciwieństwie do wklęsłej formy głównego cięgna, łączy sylwetkę mostu z kształtem wzgórz East Bay. Zwraca uwagę, że w projektowaniu mostu wszystko wynika z jego formy. Podkreśleniem jest włączenie światła w strukturę przez otwarte części konstrukcji. Cztery oddzielne słupy połączone łącznikami umożliwiają przepływ światła przez pylon, a zwężając się ku górze, wywołują wrażenie prostoty i osobliwej gracji konstrukcji. Biały kolor, który nieodparcie przypomina konstrukcje mostowe Santiago Calatravy, nadaje pylonowi elegancji. Powtarzające się przerwy w konstrukcji tworzą rytm architektoniczny, który uzupełniająco zwiększa poczucie lekkości zarówno w masie, jak i formie, a jednocześnie stanowi optyczną przeciwwagę dla ciężkich, szarych pylonów dwóch mostów wiszących po przeciwnej stronie wyspy. Pylony starych mostów wiszących i nowej konstrukcji mają prawie identyczną wysokość, więc nowy most jest swego rodzaju ich konstrukcyjną kontynuacją. Trawersy i otwarta przestrzeń pylonów po stronie wschodniej i zachodniej Yerba Buena współtworzą wizualny rytm. Podobnie jak w moście Golden Gate, osłony belek łącznikowych spełniają tylko i wyłącznie funkcję estetyczną. Ich znaczenie polega na utrzymaniu jednolitości wyglądu całego mostu. Siedem zaokrąglonych osłon na szczycie pylonu powtarza się w słupach oświetleniowych, które mają wysokość od 10,6 do 21,2 m. Światła na nich zamontowane są na 2/3 wysokości każdego słupa oświetleniowego i zajmują 1/3 wysokości każdego z nich.

Niepospolite, stopniowane oświetlenie wykorzystuje system LED-owy. Wszystkie pionowe elementy przęsła, takie jak pylon, barierki, słupy oświetlenia, podkreślają czystą, nowoczesną linię konstrukcyjną, intensyfikując światło i cień. Słupy oświe-

Tab. 1. Główne parametry i wielkości mostu SAS

1.	Najdłuższe pojedyncze przęsło w mostach SAS	385 m
2.	Najdłuższe niepodparte przęsło pomiędzy filarami mostów SAS	385 + 180 m = 565 m
3.	Najdłuższe efektywne przęsło w mostach SAS	2 x 385 m = 770 m
4.	Największa średnica cięgna SAS	0,78 m
5.	Wiszący most bez połączenia pomiędzy ustrojem nośnym i pylonem	po raz pierwszy
6.	Pylon o pentagonalnych czterech kolumnach	po raz pierwszy
7.	Koncept połączeń zabezpieczających pojedynczy pylon podczas wstrząsów	po raz pierwszy
8.	Największe gniazdo pylonu mostów wiszących	380 t
9.	Użycie kevlarowych cięgień wieszakowych w mostach wiszących	po raz pierwszy
10.	Najdłuższe słupy podpierające most wiszący	100 m
11.	Największa średnica cięgna w pętli użyta w mostach	0,78 pętla cięgna
12.	Najwyższy współczynnik efektywnej asymetrii przęseł w SAS	1:4,3
13.	4,5-metrowej szerokości ścieżka pieszo-rowerowa na SAS	po raz pierwszy
14.	Długość użytego drutu stalowego	30 tys. km
15.	Ilość użytej stali	55 tys. t
16.	Całkowity koszt budowy	6,5 mld USD

teniuowe, różniące się wysokością i natężeniem oświetlenia, utrzymując stały poziom światła na jezdni, tworzą wrażenie białej linii światła rozciągniętej od Yerba Buena do Oakland.

Jednym z unikatowych i ważnych elementów projektu jest zastosowanie, pomiędzy wiszącą konstrukcją SAS i wiaduktem oraz rozjazdem od strony wyspy, amortyzatorów o średnicy 1,9 m. Pełnią one funkcję bezpiecznika konstrukcji, umożliwiającego elastyczne przenoszenie sił i momentów od obciążeń stałych, ruchomych i w przypadku wystąpienia trzęsienia ziemi. Gdy nastąpi silny wstrząs, bezpiecznik zminimalizuje uszkodzenie konstrukcji mostu. Taki efekt uzyskano dzięki zastosowaniu cieńszej stali w środkowej części bezpiecznika. Uszkodzona część bezpiecznika może zostać dość szybko i łatwo wymieniona. „Te połączenia zapewniają dodatkowe tłumienie drgań mostu przez rozpraszanie energii, zmniejszając w ten sposób siły sejsmiczne i przemieszczenia – mówi Marwana Nadera, główny projektant z T.Y. Lin International w wywiadzie dla „Popular Mechanics”. – W złączach dylatacyjnych dźwigary skrzynkowe są połączone amortyzatorami. Zostały one zaprojektowane tak, aby umożliwić konstrukcjom przesuwanie się względem siebie”.

Projektanci, spełniając postulat mieszkańców Bay Area i użytkowników, dodali 4,5-metrowej szerokości ścieżkę pieszo-rowerową po południowej stronie, która umożliwi przejazd ze wschodniego brzegu zatoki na wyspę Yerba Buena. Jest ciężarowo zrównoważona przeciwwagą umieszczoną wzdłuż północnej krawędzi dźwigara.

Most jest dziełem prawdziwie międzynarodowej współpracy, gdyż jego elementy zostały zbudowane i dostarczone przez dostawców z całego świata: w Chinach wykonano główny stalowy pylon, stalowe ortotropowe dźwigary skrzynkowe i cięgno nośne, w Japonii – gniazdo cięgna nośnego, urządzenia do owijania cięgna, w Korei – cięgna wieszaków, w Anglii – wysoko wytrzymałe pręty kotwiące, opaski cięgien, w Kanadzie – konstrukcyjne detale i agregaty, w USA – pale, kołpaki, konstrukcje tymczasową (stalowy dźwigar skrzynkowy) i belki rurowe. Żurawie, barki, tymczasowe wieże i wiele innych urządzeń związanych z budową pochodziło również od producentów z całego świata. Tabela 1 przedstawia główne parametry i wielkości mostu SAS z wyszczególnieniem zastosowanych po raz pierwszy rozwiązań i koncepcji.

Literatura

- [1] Dąbrowiecki K.: *Przebudowa mostu San Francisco – Oakland*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2008, nr 4, s. 24–27.
- [2] MacDonald D., Nadel I.: *Bay Bridge: History and Design of a New Icon*. Chronicle Book San Francisco, 2013.
- [3] Manzanarez R. et al.: *Design and Construction of the San Francisco – Oakland Bay Bridge East Spans*. New York 2007.
- [4] Nader M., Maroney B.: *One-of-a-Kind Design. The New San Francisco – Oakland Bay Bridge. Eastern Span*. „Structure Magazine” 2007, October.
- [5] SAS Factsheet, materiały California Department of Transportation, 2012.
- [6] Materiały firmy T.Y. Lin International, 2006.
- [7] *The Art of the Bridge: A Conversation with Donald MacDonald, the Noted Bridge Architect*. Wywiad z D. MacDonalodem w publicznym radiu Tulsa, 2013.

