

# Katastrofy i awarie mostów a rozwój wiedzy budowlanej, cz. 2



■ prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski, Instytut Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska

Od początku XX w., szczególnie od jego lat 20., zauważyć można szybki rozwój dróg samochodowych, a wraz z nimi burzliwy rozwój mostownictwa drogowego. Mosty kolejowe (relatywnie częściej) i mosty drogowe (relatywnie rzadziej) ulegały awariom i katastrofom, o których wiemy stosunkowo dużo (choć nie wszystko), i które, oprócz często tragicznych skutków, przynosiły – paradoksalnie – także pożytek w postaci pogłębienia i rozszerzenia wiedzy budowlanej.

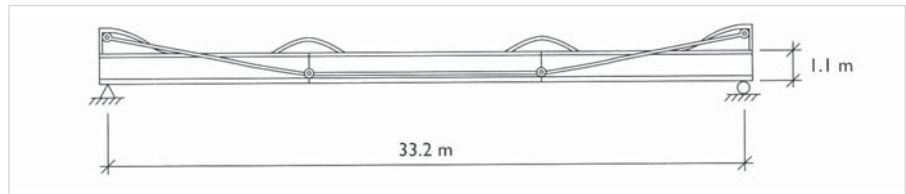
W pierwszej części artykułu, który ukazał się w numerze 4 (37) „Nowoczesnego Budownictwa Inżynierskiego”, przedstawiono i zdefiniowano subiektywne oraz obiektywne czynniki wpływające na rozwój wiedzy budowlanej. Wskazano na bariery tego rozwoju, posługując się przykładami historycznymi i współczesnymi. Opisano wpływ awarii i katastrof, szczególnie konstrukcji mostowych, na postęp w budownictwie.

Niniejsza, druga część artykułu zawiera charakterystykę katastrof, które stanowiły kamienie milowe tego postępu. Analizie poddano wpływ doświadczeń wynikających z awarii i katastrof mostów na wzrost bezpieczeństwa ich budowy i użytkowania. Sformułowano kilka wniosków i postulatów dotyczących relacji między bezpieczeństwem obiektów mostowych a ich nowymi rozwiązaniami materiałowymi i konstrukcyjno-architektonicznymi.

## 1. Katastrofy mostów jako milowe kamienie rozwoju wiedzy budowlanej

Każda katastrofa, a nawet relatywnie drobna awaria obiektów mostowych niesie ze sobą pewną dozę przestrogi i wskazań na przyszłość. Jednak spośród wielu takich zdarzeń, wskazać można zaledwie kilka, które odegrały szczególnie ważną rolę w rozwoju wiedzy budowlanej przez lepsze zrozumienie specyfiki konstrukcji mostowych zarówno od strony statycznej, jak i dynamicznej. Według P.G. Sibly'ego i A.C. Walkera, których opinię na ten temat, sformułowana jeszcze w 1977 r., zacytowano w monografii [12], takimi katastrofami, nazwanymi tu kamieniami milowymi rozwoju wiedzy budowlanej, były katastrofy mostów:

- przez rzekę Dee w Wielkiej Brytanii w 1847 r.
- przez ujście rzeki Tay w Wielkiej Brytanii w 1879 r.
- przez rzekę św. Wawrzyńca w Kanadzie w 1907 r.
- Tacoma Narrows w USA w 1940 r.



Ryc. 1. Wzmocnienie żeliwnego dźwigara prętami z żelaza zgrzewnego [12]

- kilka katastrof mostów skrzynkowych, które nastąpiły w latach 1969–1971 w Austrii, Wielkiej Brytanii, Australii i Niemczech.

Jest rzeczą dość znamioną, że wymienione katastrofy następowały w ok. 30-letnich interwałach. Niektórzy przewidywali więc, iż ok. 2000 r. katastrofom będą ulegać mosty podwieszane, które na dużą skalę zaczęto budować na przełomie lat 60. i 70. XX w. [12]. Na szczęście nic takiego się nie stało. Wręcz przeciwnie – mosty podwieszane osiągają coraz większe rozpiętości, nadal przeżywają rozkwit i funkcjonują bezpiecznie. Są nieliczne wyjątki (np. most Normandii we Francji, z przęsłem o rozpiętości 856 m, ukończony w 1995 r.), ale dotyczą one komfortu, a nie bezpieczeństwa użytkownika.

Drugi charakterystyczny fakt polega na tym, że wymienione kamienie milowe dotyczą konstrukcji stalowych. Mosty betonowe ulegały katastrofom znacznie rzadziej od stalowych. Stosunkowo nieliczne katastrofy mostów betonowych następowały częściej w trakcie budowy niż eksploatacji, co m.in. wskazuje na bardzo duże znaczenie rusztowań i deskowań w bezpiecznej realizacji mostów z betonu.

Podstawowe pytania, które nasuwają się w związku z wymienionymi katastrofami, brzmią: dlaczego mogą być one uznane za kamienie milowe rozwoju wiedzy budowlanej, dlaczego ich wpływ na jej rozwój był tak duży, że doprowadził do poważnych zmian w projektowaniu i budowaniu mostów bądź zrewidowania dotychczas stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Postaramy się na pytania te odpowiedzieć poniżej.

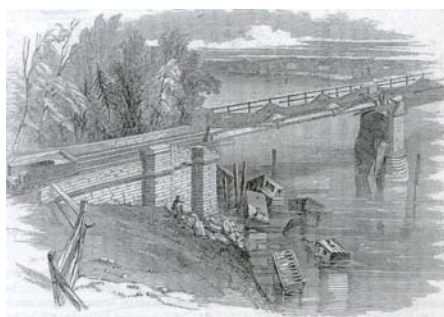
### 1.1. Katastrofa mostu kolejowego przez rzekę Dee, 1847 r. – koniec ery żeliwa

Most ten został ukończony w 1846 r. Tworzyły go trzy swobodnie podparte przęsła o jednakowych rozpiętościach, równych 33,2 m, co samo w sobie było dużym osiągnięciem jak na tamte czasy. Konstrukcję nośną przęsła stanowiły cztery żeliwne dźwigary dwuteowe, do których dolnych półek zamocowano podkłady kolejowe – most był dwutorowy. Żeliwne dźwigary były wzmocnione za pomocą rozciąganych prętów z żelaza zgrzewnego (ryc. 1).

Były one rozmieszczone w taki sposób, że ich rozciąganie następowało po wystąpieniu rozciągania spowodowanego zginaniem dźwigarów głównych. Trzeba zwrócić uwagę na fakt, iż żeliwo jest materiałem kruchym, z bardzo niewielkim zakresem deformacji plastycznej. Ponadto przy tym samym poziomie naprężeń odkształcenia żeliwa są około dwukrotnie większe od odkształceń żelaza zgrzewnego, co wynika z różnych wartości modułu Younga obu tych materiałów (żeliwo – ok. 100 GPa, żelazo zgrzewne – ok. 200 GPa). Fakt ten miał duże znaczenie w wyjaśnianiu przyczyn katastrofy. Nastąpiła ona 24 maja 1847 r., niespełna rok po zakończeniu budowy mostu, podczas przejazdu pociągu. Zginęły wtedy cztery osoby, a 18 zostało rannych [13] – wagony poza lokomotywą i tendrem spadły do rzeki wskutek utraty stateczności zewnętrznego dźwigara w skrajnym przęśle mostu. Widok tuż po katastrofie mostu pokazano na rycinie 2.

Przyczyny katastrofy były szczegółowo analizowane. Za główny powód uznano niedostateczną sztywność poprzeczną

ustroju, ponieważ konstrukcja doznała utraty stateczności skrętnej. Ponadto skuteczność oddziaływania układu prętów wzmacniających z żelaza zgrzewnego była w miarę eksploatacji mostu osłabiana przez efekt tzw. owalizacji otworów z bolcami mocującym ten układ do żeliwnych dźwigarów – była ona ułatwiona wskutek różnych właściwości stosunkowo słabego żeliwa i twardszego materiału bolców oraz prętów wzmacniających. Skutkiem tej owalizacji było znaczne zwiększenie podatności całej konstrukcji, bowiem układ prętów przestawał być stopniowo aktywny. Powodowało to też wzrost oddziaływań dynamicznych taboru kolejowego.

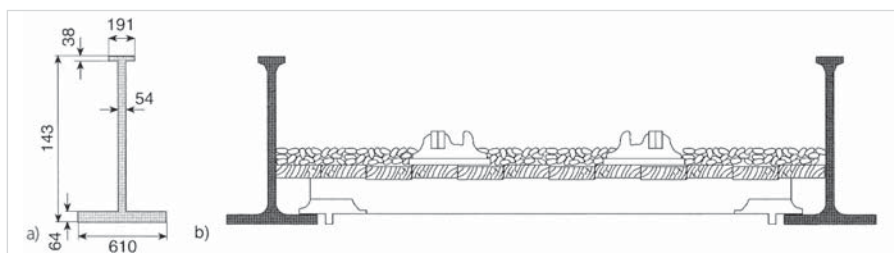


Ryc. 2. Katastrofa mostu kolejowego przez rzekę Dee, Wielka Brytania, 1847 [12]

Zwiększony był też w stosunku do pierwotnego projektu ciężar torowiska (ryc. 3). Oprócz tego warto nadmienić, że sam sposób rozwiązania konstrukcji wprowadzał niepożądane mimośrod.

Wskutek małego pola przekroju pasa górnego w stosunku do pola pasa dolnego (ryc. 3) stosunek naprężeń ściskających do rozciągających wynosił aż 16:3, co wraz z wymienionym poprzednio czynnikiem prowadziło do małej stabilności konstrukcji.

Katastrofa mostu przez rzekę Dee miała poważne reperkusje. Uznano, że system konstrukcyjny zastosowany w tym moście jest błędny, bo prowadzący do katastrof. Większość istniejących mostów o dźwigarach żeliwnych została wymieniona lub wzmocniona przez dodanie dodatkowych płyt i profili w celu zwiększenia ich wysokości ustrojowej. Jak pisze autor

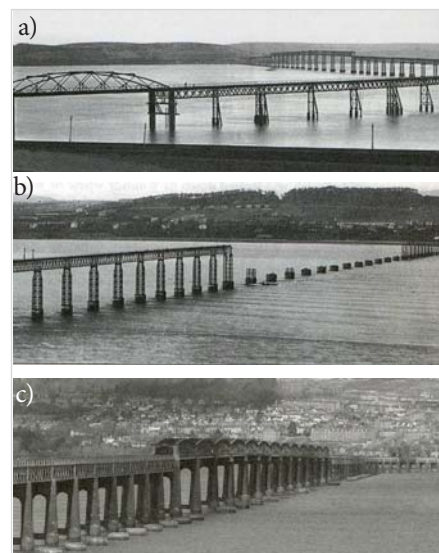


Ryc. 3. Przekrój żeliwnego dźwigara (a) i przekrój poprzeczny jednej nitki mostu przez Dee (b) [13]

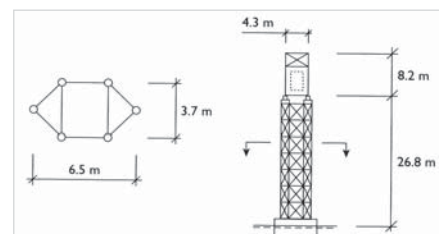
monografii [13], chlubny start żeliwa jako mostowego materiału konstrukcyjnego w 1779 r. (istniejący do dziś Iron Bridge przez rzekę Severn w Wielkiej Brytanii), zakończył się katastrofą mostu przez Dee. Odtąd zaczęto stosować do budowy mostów żelazo zgrzewne, wykazujące większą wytrzymałość i ciągliwość od żeliwa. Dlatego też tę katastrofę można zaliczyć do kamieni milowych rozwoju wiedzy budowlanej. A na pierwsze konstrukcyjne zastosowanie stali trzeba było poczekać do 1860 r.

## 1.2. Katastrofa mostu przez ujście rzeki Tay, 1879 r. – pierwsza wielka katastrofa spowodowana działaniem wiatru na most o konstrukcji innej niż wisząca

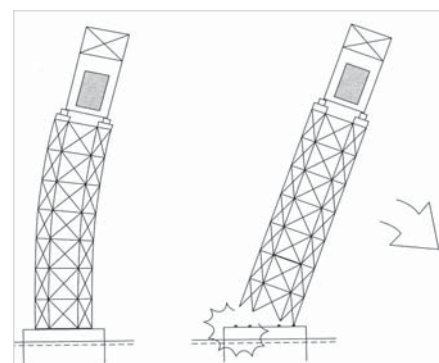
Jednotorowy most kolejowy przez ujście rzeki Tay ukończono w 1878 r. (ryc. 4a), przekraczając przewidywane koszty budowy (skąd my to znamy?) o 60%. Miał ponad 3 km długości i był wtedy najdłuższym obiektem na świecie. Jego centralną część stanowiło 13 przęseł kratownicowych z jazdą dołem, o rozpiętości 75 m, podczas gdy sąsiednie przęsła kratownicowe były z jazdą górą. Zmiana ta wynikała z potrzeb nawigacyjnych. Przęsła nawigacyjne miały stałą i znaczną wysokość, równą 8,2 m. Były oparte na kratownicowych podporach o dużej wysokości – 26,8 m, o stałych wymiarach w planie (ryc. 5). Podpory te nie były dostosowane kształtem do przenoszenia dużych sił w kierunku poprzecznym do mostu (brak np. zewnętrznych elementów ukośnych). Było to – wraz ze zbyt słabym zamocowaniem podpór w podstawie – głównym powodem katastrofy (ryc. 6). Nastąpiła ona 28 grudnia 1879 r. podczas przejazdu pociągu. Wszystkie przęsła centralne (nawigacyjne) wraz z pociągiem runęły do wody (ryc. 3b i 7). Zginęło 75 osób, nikt nie ocalał. Stało się to w czasie bardzo silnego wiatru (10–11 w skali Beauforta), wiejącego z prędkością 34 m/s [13]. Most najpierw się poprzecznie rozkołysał (jak pionowy pręt z masą skupioną na wierzchołku), a następnie zostały zerwane zamocowania kratownicowych podpór w podstawie (ryc. 6) i nastąpiło wspomniane zawalenie przęseł.



Ryc. 4. Most Tay: a) widok mostu w 1878 r., b) katastrofa w 1879 r., c) most odbudowany w 1887 r. [12]



Ryc. 5. Podpora mostu Tay [12]



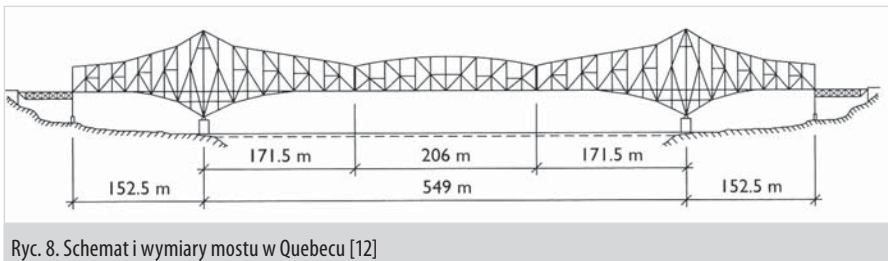
Ryc. 6. Przebieg zawalenia podpór mostu Tay [12]



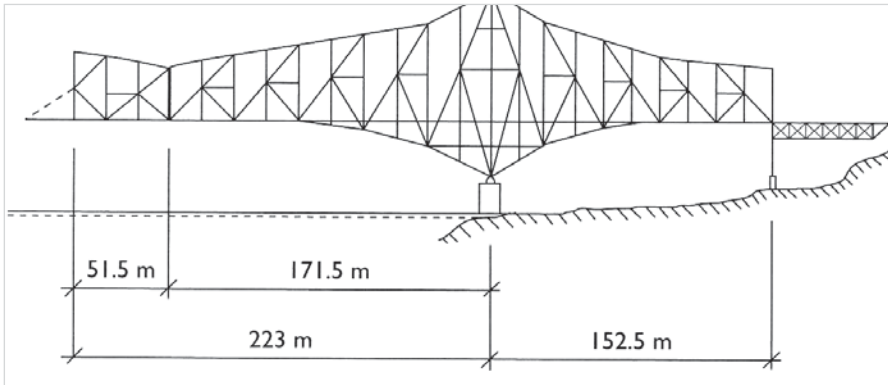
Ryc. 7. Rycina obrazująca katastrofę mostu Tay [13]

Projektując most, przyjęto parcie wiatru na poziomie tylko 1/3 wartości, które rzeczywiście wystąpiło tego krytycznego dnia. Na zbyt małą stateczność poprzeczną konstrukcji oraz inne usterki rozwiązania konstrukcyjnego zwracano





Ryc. 8. Schemat i wymiary mostu w Quebecu [12]



Ryc. 9. Sytuacja tuż przed katastrofą [12]

uwagę jeszcze przed oddaniem mostu do eksploatacji. Część z nich starano się usunąć, ale uczyniono to nie dość skutecznie. Ze względu na tragiczne następstwo oraz skalę katastrofy była ona przedmiotem wielu dociekań, w wyniku których nastąpiły istotne zmiany w projektowaniu mostów.

Most Tay został odbudowany i rozbudowany przez równoległe do starego wzniesienie nowego, niosącego drugi tor. Prace ukończono w 1887 r., a więc osiem lat po katastrofie. Nadano inny, zapewniający stabilność, kształt podporom, które wykonano ze zgrzewnego żelaza w postaci kolumn o zmiennej grubości, u góry stężonych poprzecznie łukiem. Zmieniono również konstrukcję przęsła (ryc. 4c). Most istnieje do dziś. W 2003 r. był remontowany i wzmacniany.

Wnioski z katastrofy zostały w całości wykorzystane nie tylko do zaprojektowania i wybudowania nowego mostu, ale i wielu innych, wśród których wymienić trzeba słynny i też do dziś istniejący most Firth of Forth. Konieczność zapewnienia odporności konstrukcji kratownicowych i belkowych na działanie wiatru i inne oddziaływania poprzeczne stała się ważnym elementem projektowania mostów.

### 1.3. Pierwsza katastrofa mostu przez rzekę św. Wawrzyńca w 1907 r. – fałszywe poczucie bezpieczeństwa; druga katastrofa, w 1916 r. – uwaga na ważne detale przy montażu. Najwięcej ofiar w trakcie budowy

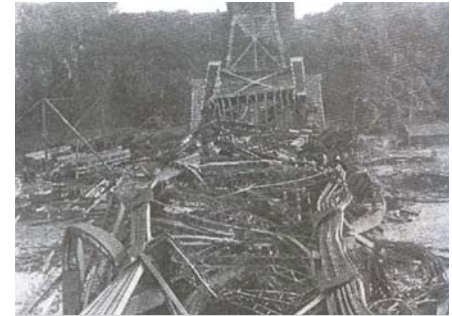
Ten powszechnie znany i do dziś użytkowany most do chwili obecnej dzierży rekord świata w rozpiętości przęsła mostu

kratownicowego – 549 m (ryc. 13). Rekord ten jednak był okupiony ofiarami ludzkimi, bo podczas budowy most dwukrotnie ulegał katastrofom – pierwsza miała miejsce 29 sierpnia 1907 r., druga we wrześniu 1916 r. W wyniku pierwszej zginęło 75 osób, w wyniku drugiej – 13.

Kazus budowy tego mostu jest dobrze znany, gdyż był wielokrotnie analizowany i szczegółowo opisywany w wielu publikacjach. Przypomnijmy tylko krótko, że pierwszą katastrofę zapoczątkowała utrata stateczności dolnego pasa kratownicy brzegowej (kotwiącej długie przęsło od strony południowej), mającej rozpiętość 152,5 m. W wyniku tego cała połowa już wykonanego mostu uległa zawaleniu. Sytuację w chwili poprzedzającej katastrofę pokazano na rycinie 9. Wyboczenie to nastąpiło wskutek niedoszacowania ciężaru własnego konstrukcji, tymczasowego łączenia elementów na śruby, przyjęcia zbyt wysokiego poziomu naprężeń dopuszczalnych (czego konsekwencją było przyjęcie zbyt małych przekrojów), zbyt słaby system usztywnień do powstrzymania wyboczenia wspomnianego pasa dolnego z jego płaszczyzny. Widok sytuacji po pierwszej katastrofie pokazano na rycinie 10.

Przyczyny pierwszej katastrofy w najbardziej zwięzły sposób można było sformułować tak: nośność konstrukcji została przeszacowana, a działające na nie obciążenia – niedoszacowane. Komisja badająca przyczyny katastrofy orzekła, że projektant mostu, Theodore Cooper (1839–1919), skądinąd bardzo doświadczony i z dużymi osiągnięciami inżynier

mostowy, przez swoje dość rutynowe, a szczególnie wnikliwe i staranne zaangażowanie w budowę, czego tak unikatowy obiekt wymagał, wytworzył u wykonawców fałszywe poczucie bezpieczeństwa. Okazało się ono zgubne.



Ryc. 10. Zawalona kratownica o długości 152,5 m [12]

Przygotowania do odbudowy mostu (a właściwie do zaprojektowania i zbudowania go na nowo) podjęto już w 1908 r. W skład powołanego do tego celu zespołu wchodził również Ralph Modjeski (1861–1940). Nową budowę rozpoczęto w 1909 r. W pierwotnym projekcie dokonano zmian polegających na ukształtowaniu dolnego pasa kratownicowej konstrukcji wzdłuż prostej, a nie krzywej, a także zmieniono nieco rozpiętość przęsła skrajnych, natomiast rozpiętość głównego przęsła pozostała ta sama, czyli 549 m. Inaczej natomiast, bo znacznie wnikliwiej, potraktowano zagadnienia obliczeniowe oraz rozwiązania usztywnień konstrukcji. Wprowadzone zmiany polegały głównie na przyjęciu wyższego poziomu obciążenia użytkowego, dokładnym wyznaczeniu ciężaru własnego, przyjęciu wartości naprężeń dopuszczalnych o uzasadnionej wartości, dwukrotnym sprawdzeniu obliczeń oraz zastosowaniu mocnych usztywnień kratownicowych ściskanego pasa konstrukcji. Skalę wprowadzonych zmian dobrze ilustruje fakt, że przekrój dolnego pasa głównych dźwigarów kratownicowych był aż o 150% większy niż w poprzednim rozwiązaniu, i to mimo zastosowania do nowego mostu stali o wyższej jakości – nie oszczędzano więc restrykcyjnie zużycia materiału, tak jak to czyniono w przypadku zawalonego mostu. Ponadto przeprowadzono szerokie badania właściwości materiału i elementów konstrukcyjnych, a także przestrzegano szczególnej staranności przy czynnościach montażowych oraz unikano tymczasowych połączeń na śruby.

Mimo to nie udało się jednak uniknąć drugiej katastrofy. Nastąpiła ona podczas podnoszenia przęsła zawieszonego (ryc. 11) o długości 195 m – w pierwszym projekcie miało ono 206 m długości (por. ryc.

8). Przeszło to było połączone z urządzeniem podnoszącym za pomocą czterech narożnych łożysk. Przyczyną katastrofy było nagłe zniszczenie jednego z nich, gdy podnoszona konstrukcja znajdowała się na wysokości 9 m nad poziomem wody. Pozostałe trzy nie wytrzymały przeciążenia, działającego na dodatek z dużym mimośrodem, i cała konstrukcja runęła do wody, ulegając skręceniu i innym deformacjom.



Ryc. 11. Druga katastrofa podczas budowy mostu w Quebecu [13]

Drugą próbę podnoszenia przęsła, tym razem udaną, podjęto we wrześniu 1917 r., niemal równo rok po opisanej katastrofie. Sposób połączenia łożysk przęsła zawieszono z urządzeniem podnoszącym kompletnie przeprojektowano. Most oddano do użytku w październiku 1917 r., po prawie 20 latach od rozpoczęcia pierwszych robót. Ukończony most w swej ostatecznej postaci pokazano na rycinie 12.

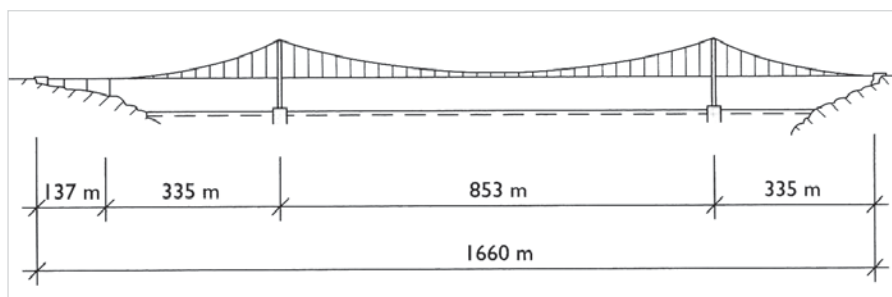


Ryc. 12. Most w Quebecu w ostatecznej postaci [12]

Opisane pokrótce wypadki z mostem w Quebecu do dziś należą do najbardziej tragicznych w swych skutkach katastrof, które nastąpiły podczas fazy budowy. Zmiany wprowadzone w ich wyniku wzbogaciły wiedzę budowlaną, ale kosztem wielu istnień ludzkich. Są poważne przesłanki, aby przypuszczać, że można było uniknąć tak strasznej ceny, gdyby nie panowało fałszywe poczucie bezpieczeństwa i gdyby staranniej obmyślono pierwsze podnoszenie zawieszono przęsła – detale konstrukcyjne są niezwykle ważne także w fazie budowy mostów, zwłaszcza tych o wielkiej skali. Most w Quebecu jest najtragiczniejszym chyba kamieniem milowym rozwoju wiedzy budowlanej.

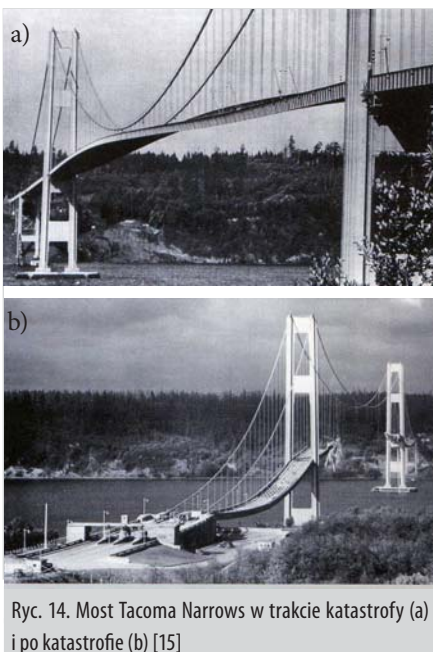
#### 1.4. Katastrofa mostu Tacoma Narrows w 1940 r. – początek intensywnego rozwoju aerodynamiki mostów

To najbardziej bodaj znana i najczęściej przywoływana katastrofa mostu. Dla-



Ryc. 13. Widok boczny i główne wymiary mostu Tacoma Narrows [12]

tego jej opis przedstawimy tu w wielkim skrócie. Most ten, którego widok boczny pokazano na rycinie 13, ukończono w lipcu 1940 r. Jego katastrofa nastąpiła 7 listopada 1940 r., a więc tylko po ok. czterech miesiącach użytkowania. Jak wiadomo, głównym jej powodem było dynamiczne parcie (podmuchy) wiatru, który wiał z prędkością 16–19 m/s i wprawił przęsło w narastające drgania skrętne, co doprowadziło do zniszczenia środkowego przęsła. Przebieg katastrofy został sfilmowany (ryc. 14). Ponieważ w porę wstrzymano ruch po moście, obyło się bez ofiar w ludziach.

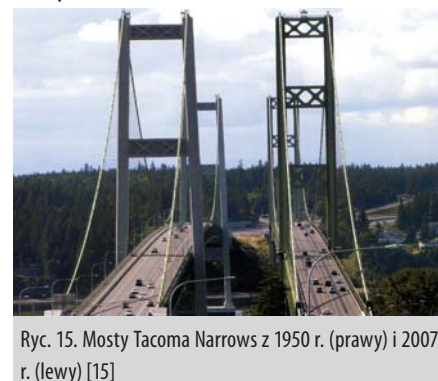


Ryc. 14. Most Tacoma Narrows w trakcie katastrofy (a) i po katastrofie (b) [15]

Most był szczególnie śmiało, by nie pisać, zbyt oszczędnie, zaprojektowany. Stosunek szerokości pomostu do rozpiętości przęsła był równy  $11,9 \text{ m} / 853 \text{ m} = 1:72$  (np. w moście George'a Washingtona ten stosunek wynosi 1:30, a w moście Golden Gate – 1:47), stosunek zaś wysokości dźwigara do jego rozpiętości był równy  $2,45 \text{ m} / 853 \text{ m} = 1:348$ . Dodać też należy, że był to chyba pierwszy tak duży most wiszący o pełnościennych, a nie kratownicowych dźwigarach przęsła. Głównym projektantem mostu był wybitny inżynier,

mający wiele osiągnięć, Leon Moisseiff (1872–1943), który dążył do projektowania dużych mostów wiszących jako lekkich, ekonomicznych, a zarazem estetycznych konstrukcji. Mimo dużej smukłości mostu obliczenia wykazały, że jest on całkowicie bezpieczny ze względu na przenoszenie przez konstrukcję obciążenia stałego i ruchomego, zmian temperatury oraz statycznego działania wiatru, czyli po prostu obciążenia, na które był projektowany. Potwierdziła to komisja powołana do zbadania przyczyn katastrofy. W porównaniu jednak z innymi mostami most Tacoma nie został zaprojektowany na przeciwdziałanie dynamicznemu efektom działania wiatru. Z jednej strony nie było pełnej świadomości skali skutków dynamicznego oddziaływania wiatru na duże, ale smukłe konstrukcje, z drugiej zaś strony brakowało odpowiednich narzędzi teoretycznych i doświadczalnych, aby skutki te należycie obliczać i badać. Katastrofa mostu Tacoma ujawniła z całą mocą brak analiz i badań aerodynamicznych, które od chwili jej wystąpienia stały się integralną częścią projektowania mostów wiszących.

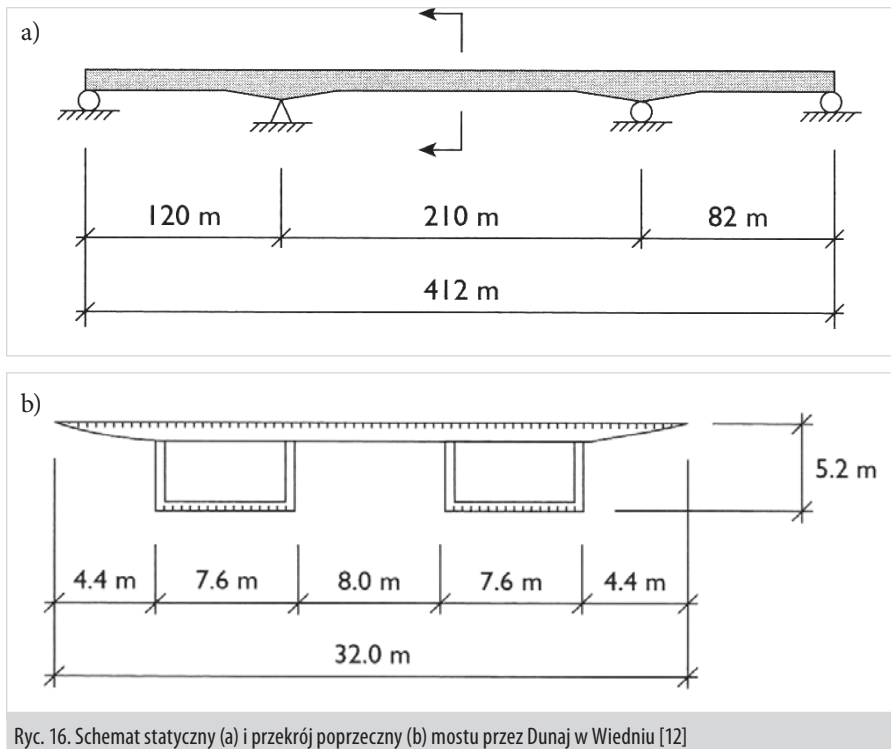
W 1950 r. oddano do użytku drugi most wiszący Tacoma Narrows, a w 2007 r. – wobec narastającego natężenia ruchu – ukończono trzeci. Oba mosty pokazano na rycinie 15.



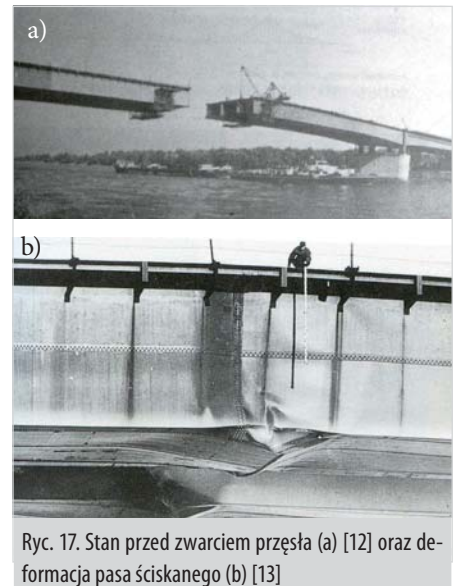
Ryc. 15. Mosty Tacoma Narrows z 1950 r. (prawy) i 2007 r. (lewy) [15]

Katastrofa mostu w 1940 r. nadal budzi kontrowersje. Charakterystycznym tego przejawem jest choćby publikacja [16], w której analizowano tę katastrofę, sto-





Ryc. 16. Schemat statyczny (a) i przekrój poprzeczny (b) mostu przez Dunaj w Wiedniu [12]



Ryc. 17. Stan przed zwarciem przęsła (a) [12] oraz deformacja pasa ściskowego (b) [13]

głównego przęsła mostu w Wiedniu oraz wyoboczenie jego pasa dolnego pokazano na rycinach 16 i 17.

Wskutek redystrybucji sił wynikającej z obniżenia podpór pośrednich oraz efektów termicznych nastąpił tak duży wzrost momentów zginających, że ściskany pas dolny przekrojów skrzynkowych uległ wyoboczeniu, powodując częściowe, lokalne zniszczenie konstrukcji. W wyniku tego powstał układ statycznie

sując metody znane u progu XXI w. i odkrywając dzięki nim nowe, szczegółowe aspekty mechanizmu katastrofy mostu, m.in. wirów powietrznych wpływających na postać drgań.

Na koniec tego krótkiego opisu trzeba zauważyć, że dzięki temu, że katastrofa mostu Tacoma Narrows rozpoczęła modelowe badania mostów wiszących w tunelach aerodynamicznych oraz przyczyniła się w decydującym stopniu do rozwoju ujęć teoretycznych (powstanie inżynierii wiatrowej ma swe źródło także i w tej katastrofie), to od czasu jej zaistnienia nie było na świecie katastrofy mostu wiszącego spowodowanej działaniem wiatru. To sukces, wynikający wszak z katastrofy... Ale jak nie nazwać tej katastrofy kolejnym kamieniem milowym rozwoju wiedzy budowlanej?

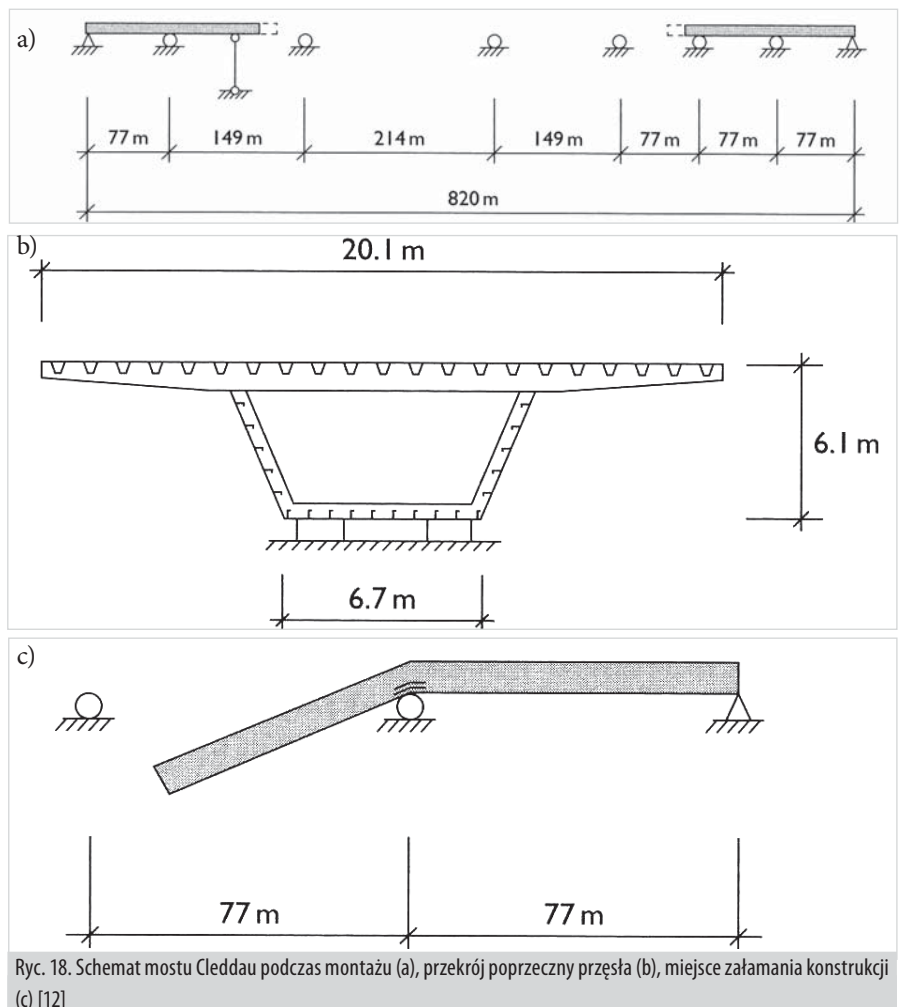
### 1.5. Katastrofy mostów skrzynkowych w latach 1969–1971 – stateczność podczas budowy

W latach 1969–1971 nastąpiło kilka katastrof drogowych mostów skrzynkowych. Wymienić tu należy katastrofy mostu przez Dunaj w Wiedniu (6 listopada 1969 r., bez ofiar śmiertelnych), mostu Cleddau w Walii (2 czerwca 1970 r., cztery ofiary śmiertelne), mostu Waste Gate w Melbourne (15 października 1970 r., 34 ofiary śmiertelne) oraz mostu przez Ren w Koblencji (10 listopada 1971 r., 13 ofiar śmiertelnych).

Aczkolwiek każda katastrofa konstrukcji ma swe specyficzne cechy, to katastrofy wymienionych czterech mostów mają pewne cechy wspólne – wszystkie wystą-

piły podczas fazy budowy (montażu) metodą wspornikową i ich główną przyczyną była zbyt mała sztywność elementów stalowych skrzynek konstrukcji przęsła.

Schemat statyczny i przekrój poprzeczny oraz sytuację przed zwarciem



Ryc. 18. Schemat mostu Cleddau podczas montażu (a), przekrój poprzeczny przęsła (b), miejsce załamania konstrukcji (c) [12]

wyznaczalny przez uformowanie dwóch przegubów w miejscach wybożenia pasa dolnego. Gdyby uformował się trzeci, to konstrukcja przekształciłaby się w mechanizm. Na szczęście do tego nie doszło i dlatego most uratowano przez wymianę uszkodzonych części konstrukcji. To dzisiejszy most Prater, normalnie użytkowany.

Most Cleddau w Walii uległ katastrofie wskutek niedostatecznej sztywności stalowej przepony nad podporą. Schemat mostu, miejsce katastrofy oraz widok jej skutków przedstawiono na rycinach 18 i 19. Niedowymiarowanie tej przepony najlepiej ilustruje fakt, że po odbudowie mostu, podczas jego użytkowania, rzeczywiste siły w przeponie były o 55% większe od wartości, która doprowadziła do katastrofy [13]. Pewnym tylko usprawiedliwieniem jest fakt, że ówczesne normy nie ujmowały dostatecznie precyzyjnie projektowania przepon nadpodporowych. Inżynierowie nie byli też w pełni świadomi ich wielkiego znaczenia w konstrukcjach skrzynkowych. Obecnie przepony te są projektowane jako znacznie sztywniejsze i mają często lokalne wzmocnienia, zabezpieczające przed utratą stateczności.

Jak już wspomniano, podobne przyczyny legły u podstaw katastrof dwóch pozostałych mostów – w Melbourne i w Koblencji – z tym że w przypadku mostu australijskiego wystąpiły jeszcze rażące błędy wykonawcze.

Przedstawiona tu krótko seria katastrof stalowych mostów skrzynkowych spowodowała zmiany w projektowaniu, zwrócenie znacznie większej uwagi na zagadnienia stateczności w fazie montażu konstrukcji. Dlatego katastrofy te zaliczyć można za kolejny kamień milowy rozwoju wiedzy budowlanej.

### 1.6. Katastrofy mostów betonowych – brak kamieni milowych rozwoju wiedzy budowlanej

Jest rzeczą interesującą, że do kamieni milowych rozwoju wiedzy budowlanej zostały zaliczone tylko mostowe konstrukcje metalowe. Ma to może uzasadnienie historyczne i faktograficzne, ale nieco dziwi. Faktem jest jednak, że mosty betonowe nie ulegały właściwie katastrofom podczas eksploatacji. Katastrofy i awarie mostów z betonu następowały przede wszystkim w fazach budowy realizowanej przeważnie metodą betonowania nawisowego lub metodą nasuwania wzdłużnego, i to w początkowych okresach stosowania tych metod, czyli mniej więcej do połowy lat 70. XX w. Jeden spektakularny przykład przedstawiono na rycinie 20. Zdarzały się też katastrofy spowodowane błędami w zaprojektowaniu i wykonaniu rusztowań, co miało miejsce także w Polsce w ostatnich latach.



Ryc. 20. Katastrofa wiaduktu Cannavino, 1972 [13]

Katastrofa pokazanego na rycinie 20 wiaduktu Cannavino została spowodowana upadkiem dźwigara rusztowaniowego, który uderzył w wspornik przęsła, załamując go. Kable sprężające nie były zainiektowane i nie mogły zapobiec katastrofie.

Można by zapewne poszukiwać kamieni milowych rozwoju wiedzy budowlanej także wśród katastrof mostów z betonu, ale poza opisanym incydentem w przypadku mostu zbudowanego przez Eugène Freyssineta, którego badania dały początek reologii betonu, trudno się ich doszukać. Może tylko warto przypomnieć, że cała koncepcja częściowego

i ograniczonego sprężenia wzięła swój początek z zarysowań, głównie termicznych, mostów z betonu sprężonego. Generalnie rozwój wiedzy w mostownictwie betonowym wynikający z relatywnie rzadkich awarii i katastrof przebiegał dość płynnie. Jest to zresztą pole do dyskusji, którą warto przeprowadzić, bo przecież jest to może pogląd błędny.

## 2. Co dalej? Uwagi końcowe

Mimo że katastrofy w sposób niewątpliwy wpływały, i ponieważ nadal się zdarzają, stale wpływają na rozwój wiedzy budowlanej, to można postawić zupełnie zasadnicze pytanie, dlaczego się zdarzają, skoro wiedza budowlana jest coraz większa. Otóż zachowując wszelkie proporcje, jest to pytanie niemal egzystencjalne z rodzaju takich, jak: skoro uczymy się na błędach, dlaczego wciąż je popełniamy?

Analiza katastrof, które nie nastąpiły wskutek trudnych do przewidzenia katalizatorów (np. powodzi), wskazuje, że zawsze ich źródło tkwi w jakichś uchybieniach w działaniu ludzi – braku dostatecznej wiedzy budowlanej (projektowej, wykonawczej lub eksploatacyjnej) i organizacyjnej, użyciu materiałów niewłaściwej jakości, uleganiu presji czasu lub wymuszanych oszczędności itp. Dobrym tego i stosunkowo niedawnym przykładem jest katastrofa mostu autostradowego z betonu sprężonego przez rzekę Jiantuo w Chinach w 2007 r., która pochłonęła 36 ofiar śmiertelnych. Jej przyczyną była niewłaściwie przeprowadzona rozbiórka rusztowań, co spowodowało zawalenie całego obiektu w ciągu kilku sekund [13].

Katastrofy więc nadal występują i zapewne będą występować, przede wszystkim ze względu na niezamierzone błędy ludzkie. Z drugiej jednak strony, to właśnie katastrofy mostów, jak starano się tu dowieść, były i są źródłem odkrywania nieznanych przedtem zagadnień, wymagających nowych ujęć teoretycznych lub nowych badań eksperymentalnych, bądź – i tak jest najczęściej – obu tych działań. To właśnie stanowiło i stanowi o postępie w budownictwie. Bo złe, prowadzące do katastrof, rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe wynikały także z aktualnego w danym okresie stanu wiedzy, nieobejmującego wielu spraw, były więc konsekwencją nieświadomości nawet wybitnych inżynierów.

Jak zwrócono uwagę poprzednio, wiedza budowlana ma swój wymiar zbiorowy i indywidualny. Zbiorowy znajduje odzwierciedlenie w bezpieczeństwie, funkcjonalności i trwałości budownictwa, które



Ryc. 19. Most Cleddau po katastrofie [13]



można by tu nazwać powszechnym. Indywidualny dotyczy budowania obiektów nowatorskich lub unikatowych ze względu na swą skalę i rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne. Obiekty takie są zwykle projektowane przez wybitnych konstruktorów i realizowane przez znakomitych wykonawców – wystarczy podać przykład słynnego już wiaduktu Millau we Francji, przekazanego do eksploatacji 16 grudnia 2004 r. Otóż te wyjątkowe współczesne obiekty nie ulegają takim katastrofom, jak ich równie wtedy nowatorskie i unikatowe odpowiedniki w poprzednich okresach. To stanowi miarę rozwoju wiedzy budowlanej w tym indywidualnym aspekcie. To on przecież kreuje postęp. I wsparta wiedzą wyobraźnia inżynierska.

Ale i to czasem jest zbyt mało. Wystarczy podać przykłady dwóch też już słynnych obiektów – mostu podwieszono-normandie we Francji z głównym przęsłem o rozpiętości 856 m i ukończonego w 1995 r. oraz kładki Milenijnej w Londynie, zamkniętej w dniu otwarcia, czyli 10 czerwca 2000 r. i ponownie, po wprowadzonych zmianach, przekazanej do użytku 22 lutego 2002 r. [17]. Na pierwszym z wymienionych obiektów przy pewnych warunkach pogodowych (wiatrowych) ruch jest ograniczany lub zamykany, podana informacja o drugim obiekcie mówi sama za siebie. Otóż mimo najnowszych metod projektowania i wykonawstwa bywa, że natura pokonuje jeszcze mostowca. Ale ważny tu jest inny sens podejmowania tych działań zapobiegawczych. Obu obiektom nie groziła katastrofa podobna do opisanych poprzednio – działania te podejmowano dlatego, że przemieszczenia konstrukcji pod wpływem wiatru są w pewnych warunkach na tyle duże, że psują komfort użytkowania – ludzie odczuwają te przemieszczenia nieprzyjemnie. I to jest zasadnicza sprawa: nie katastrofa lecz komfort użytkowników. To też jest miarą postępu wiedzy budowlanej.

Rozwój wiedzy budowlanej dotyczy nie tylko wznoszenia nowych obiektów. Ważny dział krajowego i światowego mostownictwa stanowią remonty, renowacje i przede wszystkim modernizacje obiektów mostowych, a także rozbórka istniejących. Szczególnie te dwa ostatnie obszary działań zawsze związane są z większą lub mniejszą redystrybucją sił wewnętrznych w konstrukcji. W trakcie prac lub po ich zakończeniu zmieniany jest też często układ statyczny konstrukcji. Gdy jest to robione bez należytej staranności i bez poprzedzających roboty

dogłębnych analiz, może prowadzić do awarii i katastrof. Są tego liczne przykłady dotyczące zarówno mostów stalowych, jak i betonowych. Zdarzenia te również rozwijają wiedzę budowlaną. Potwierdzeniem tego są choćby referaty zgłaszane na wszystkie dotychczasowe konferencje *Awarie budowlane*. Referaty te w dużym stopniu dotyczą właśnie działań na obiektach istniejących, także mostach.

Jest rzeczą zmienną, że mostownictwo stanowi ten rodzaj budownictwa, które wnosi swój wkład do wiedzy ogólnobudowlanej. Wystarczy jako przykład podać rozwinięcie teorii wybożenia przez Ludwiga von Tetmajera (1850–1905) i Feliksa Jasińskiego (1856–1899), zainspirowane katastrofami stalowych mostów kolejowych o tzw. przekroju otwartym [3], lub wspomnianą już sprawę narodzin reologii betonu. Z czasów nam współczesnych można podać przykład potrzeby natychmiastowego wzmocnienia mostu Ibach koło Lucerny (Szwajcaria), która zapoczątkowała intensywne badania i zastosowania polimerowych materiałów kompozytowych z włóknami. Wszystkie te przykłady (można by ich znaleźć oczywiście znacznie więcej) wskazują, że to konstrukcje mostowe bywały częstym źródłem rozwoju teorii stosowanych w budownictwie. Innymi słowy, że w mostownictwie praktyka często wyprzedza teorię. Tę tendencję można zauważyć również obecnie, i będzie się ona prawdopodobnie utrzymywać w przyszłości.

Na koniec należy wskazać, że awarie i katastrofy budowlane (nie tylko, rzecz jasna, mostowe), łącznie ze swoimi często tragicznymi skutkami, to wspaniały materiał dydaktyczny. I to nie tylko dla studentów, ale i dla całego środowiska ludzi związanych z budownictwem. Jest to i przestroga, i nauka, oby dobrze wykorzystana w codziennej działalności. Ponadto awarie i katastrofy obiektów to najlepszy dowód na to, że zawód inżyniera budownictwa słusznie jest zaliczany do zawodów zaufania publicznego, bo owoce jego działalności muszą zapewnić żądane bezpieczeństwo użytkowania. Dlatego musi on zdawać sobie sprawę ze skutków swoich działań.

Chociaż objętość niniejszego opracowania jest stosunkowo duża, to poruszono w nim tylko niektóre zagadnienia dotyczące wpływu katastrof mostów na rozwój wiedzy budowlanej, zagadnienia subiektywnie wybrane i przedstawione. To zdawkowe, ale ważne zastrzeżenie, bo inni autorzy ujęliby ten temat inaczej i zapewne lepiej.

## Literatura

- [1] Radomski W.: *Materiał a konstrukcja – refleksje mostowca*. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej MATBUD 2003. Kraków 2003.
- [2] Petroski H.: *To Engineer is Human. The Role of Failure in Successful Design*. Vintage Boks, 1992.
- [3] Timoshenko S.P.: *Historia wytrzymałości materiałów*. Wydawnictwo Arkady. Warszawa 1966.
- [4] Navier C.L.: *Raport à Monsieur Becquey et Mémoire sue les Ponts Suspendus*. Imprimerie Royale. Paris 1823.
- [5] Dischinger F.: *Hägebrücken für schwerste Verkehrslasten*. „Bauingenieur” 1949, Nr. 3, 4.
- [6] Ernst H.J.: *Der E-Modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhangs*. „Bauingenieur” 1965, Nr. 50.
- [7] Wasiutyński Z.: *Budownictwo Betonowe*. T. 14. *Mosty*, cz. 1. Wydawnictwo Arkady. Warszawa 1967.
- [8] Freyssinet E.: *Souvenirs „Cent Ans du Beton Armé”*. Tłum. J. Fijałkowski. STUP. Paris 1949.
- [9] *Koror-Brücke eingestürzt*. „Beton- und Stahlbetonbau” 1997, Nr. 3 (92).
- [10] Dmitriew F.D.: *Katastrofy budowlane. Szkice historyczno-techniczne*. Warszawa 1956.
- [11] Jarominiak A., Rosset A.: *Katastrofy i awarie mostów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1986.
- [12] Åkesson B.: *Understanding Bridge Collapses*. Taylor&Francis, 2008
- [13] Scheer J.: *Failed Bridges – Case Studies, Causes and Consequences*. Ernst&Sohn, 2010.
- [14] Barker R.M., Puckett J.A.: *Design of Highway Bridges*. John Wiley&Sons, Inc., 1997.
- [15] Dąbrowiecki K.: *Mosty Tacoma Narrows*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2010, nr 5 (32), s. 66–70.
- [16] Larsen A.: *Aerodynamics of the Tacoma-Narrows Bridge*. „Structural Engineering International” 2000, Vol. 10, No. 4, pp. 243–248.
- [17] Radomski W.: *Dynamiczne przyczyny awarii mostów*. Materiały XXIII Konferencji Naukowo-Technicznej *Awarie budowlane 2007*. Szczecin–Międzyzdroje 2007.

ARTYKUŁ OPACOWANY NA PODSTAWIE REFERATU WYGŁOSZONEGO PODCZAS XXV KONFERENCJI NAUKOWO-TECHNICZNEJ, AWARIE BUDOWLANE 2011, MIĘDZYZDROJE, 24 MAJA 2011



WRĘCZENIE NAGRÓD LAUREATOM KONKURSU

# *Pontifex Cracoviensis*

W KATEGORIACH:

- Budowniczy roku
- Projektant roku
- Menadżer roku
- Debiut mostowy roku

ODBĘDZIE SIĘ PODCZAS

UROCZYSTEJ GALI

17 listopada 2011 roku

W FILHARMONII KRAKOWSKIEJ

