



WOJCIECH RADOMSKI, w.radomski@il.pw.edu.pl

Politechnika Warszawska

KATASTROFY I AWARIE MOSTÓW A ROZWÓJ WIEDZY BUDOWLANEJ

BRIDGE COLLAPSES AND FAILURES VERSUS PROGRESSES IN BUILDING KNOWLEDGE

Streszczenie Przedstawiono i zdefiniowano subiektywne i 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. Wymieniono i scharakteryzowano te katastrofy, które stanowiły kamienie milowe tego postępu. Podjęto problematykę wpływu doświadczeń płynących z awarii i katastrof mostów na wzrost bezpieczeństwa ich budowy i użytkowania. Sformułowano kilka wniosków i postulatów dotyczących relacji między bezpieczeństwem obiektów mostowych oraz ich nowymi rozwiązaniami materiałowymi i konstrukcyjno-architektonicznymi.

Abstract Subjective and objective factors influencing the progress in building knowledge are presented and defined. Some barriers in the above progress are identified and exemplified by historical and contemporary cases. Effect of bridge failures and collapses on the progress in building engineering is discussed. Several bridge collapses as the milestones of his progress are briefly described. Effects of engineering experience from the bridge failures and collapses on the growth of bridge safety during construction and service periods are also presented and discussed. Some conclusions and postulates concerning relation between the bridge safety and new material and structural as well as architectural solutions in bridge engineering are formulated.

1. Uwagi wstępne

Zacniemy od przedstawienia (lub lepiej: przypomnienia) kilku spraw o podstawowym znaczeniu, które dla wielu zdawać się mogą truizmami, ale w istocie nimi nie są, bo mimo ich ważnej roli stale się o nich bądź zapomina, bądź też nie są dostatecznie mocno zakorzenione w świadomości inżynierskiej, a częstokroć i badawczej, związanej z szeroko rozumianym budownictwem.

Budownictwo jest jedną z najstarszych dziedzin działalności człowieka, mającą historię tak długą, jak dzieje cywilizacji. Nie miejsce tu na szczegółowe śledzenie jego rozwoju. Poprzestaniemy na potrzebnym do dalszych rozważań stwierdzeniu, że wiedza budowlana miała swe prąródła w praktyce – to realizacje najrozmaitszych budowli, nawet tych uznawanych dziś za prymitywne, i ich użytkowanie dostarczały obserwacji, początkowo zwykle cząstkowych, później bardziej całościowych, które gromadzone przez kolejne generacje i przekazywane i wzbogacane przez następne, tworzyły z czasem dość spójny zasób informacji, stanowiących to, co dziś określamy dziś mianem wiedzy budowlanej.

Szczególną rolę w rozwoju tej wiedzy stanowiły różnego rodzaju niepowodzenia, w tym najbardziej drastyczne, bo katastrofy budowlane. O najdawniejszych katastrofach wiemy stosunkowo niewiele, choć występowały one na pewno. Więcej wiemy o czasach nowożyt-

nych, poczynając zwłaszcza od wieku XIX, w którym wskutek rozwoju kolejnictwa nastąpił wyraźny wzrost skali i znaczenia budowy mostów. Od początku XX wieku, zwłaszcza zaś od lat 1920-tych, 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 właśnie.

Wiedza budowlana ma różne źródła. Była zdobywana przez lata i nadal jest rozwijana. Zostawiając historykom techniki szczegółowe rozpatrywanie na ten temat, tu ograniczymy się do syntetycznego i popartego przykładami przedstawienia niektórych tylko, subiektywnie wybranych, aspektów tej wiedzy, jej podstawowych źródeł i barier rozwojowych.

2. Źródła wiedzy budowlanej

Wiedzę budowlaną i źródła jej rozwijania można rozpatrywać w różnych aspektach – technicznych, psychofizycznych, społecznych, ekonomicznych i kulturowych, w skali indywidualnej lub zbiorowej, formalnych lub nie usankcjonowanych żadnymi przepisami. Każdemu z nich poświęcić można niejedną obszerną rozprawę. Według zapowiedzianego poprzednio subiektywnego wyboru za najważniejsze źródła wiedzy budowlanej można uznać następujące:

- a) podpatrywanie przyrody i wzorowanie się na niej zarówno pod względem występujących w przyrodzie form i struktur, jak i naturalnych materiałów wykorzystywanych do celów budowlanych;
- b) doświadczenia z poprzednich realizacji różnego rodzaju obiektów budowlanych i inżynierskich oraz ich funkcjonowania – mniej lub bardziej świadome oraz mniej lub bardziej sformalizowane analizowanie tych doświadczeń i przekazywanie ich następnym pokoleniom w mniej lub bardziej usankcjonowany sposób (dydaktyka budowlana);
- c) badania doświadczalne materiałów budowlanych i elementów konstrukcyjnych, tworzenie na ich podstawie teoretycznych metod obliczania (lub szerzej: projektowania) konstrukcji, które zwykle rozwijane są już w ramach wyodrębnionych teorii;
- d) korzystanie z nauk podstawowych – matematyki, fizyki, chemii, ale i filozofii oraz estetyki, a także innych jeszcze nauk;
- e) wyobraźnia, nowatorstwo pomysłów oraz intuicja inżynierska poparta własnym doświadczeniem – to zawsze ma wymiar indywidualny.

Źródła te, których można by wymienić znacznie więcej, wymagają krótkiego komentarza.

W nawiązaniu do źródła **a)** warto zauważyć, że jest ono pierwotne i najstarsze, trwało całe wieki od czasów prehistorycznych, ale trwa nadal. Nie będziemy tu rozwijać wątków historycznych, tylko zwrócimy na aspekt całkiem współczesny, bo owo źródło – mimo swych dawnych korzeni – nadal zachowuje swą aktualność. Warto więc zwrócić uwagę, że wszelkie próby dokładnego odtwarzania natury, a więc na przykład odwzorowywanie przekryć w postaci struktury liścia łośniany lub budowanie wysokościowców o strukturze bambusa, w realnych konstrukcjach budowlanych (ale też na przykład wzorowanie helikopterów na proporcjach ważki) kończą się niepowodzeniem. Konstrukcje budowlane i inżynierskie mogą wymienione naturalne struktury w większym lub mniejszym stopniu przypominać, ale mają jednak swą specyfikę, swoje prawa wytrzymałości, trwałości i komfortu eksploatacyjnego, które ściśle naturze nie odpowiadają. Niemniej jednak, to natura właśnie jest pierwszym nauczycielem budowania, ale – dodajmy – przecież nie bezkrytycznego jej kopiowania. Natura była także (i często nadal pozostaje) dostarczycielką materiałów budowlanych. Tego wątku nie będziemy tu rozwijać wobec wcześniejszego opracowania na ten temat

[1]. Nadmienimy tylko, że budownictwo zawsze umiało i umie nadal twórczo korzystać pod względem materiałowym „z tego co jest”, przetwarzając „zastane”, tworząc ze znanych składników materiały bardziej przydatne do zastosowań konstrukcyjnych. Umie też – zwłaszcza współcześnie – sterować właściwościami materiałów odpowiednio do określonych potrzeb oraz – ze względu na swą skalę – umie rozwijać masową ich produkcję. Najpierw rozeznanie i formułowanie, a następnie spełnianie owych określonych potrzeb, które dotyczą wytrzymałości, bezpieczeństwa, trwałości, funkcjonalności, ekonomii i estetyki wszelkich budowli, to właśnie dwa podstawowe składniki wiedzy budowlanej.

W nawiązaniu do źródła **b)** zauważmy, że jest ono bodaj najbardziej istotnym elementem gromadzenia i rozwijania wiedzy budowlanej oraz jej przekazywania w aspekcie, który stanowi główny przedmiot niniejszego opracowania. Źródło to bowiem obejmuje także analizę przyczyn i skutków wszelkich niepowodzeń, w tym awarii oraz katastrof budowli. To te o tragicznych często konsekwencjach zdarzenia mówią najwięcej o popełnionych błędach i stanowią lekcję ich unikania w przyszłych realizacjach. Ten wątek będzie jeszcze podejmowany w dalszym tekście, a jego doniosła rola w kształtowaniu działań inżynierskich, zwłaszcza projektowych, jest przedmiotem anglojęzycznej publikacji [2].

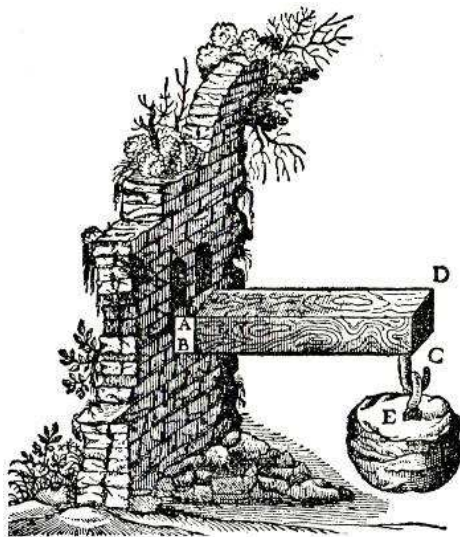
Źródła **c)** i **d)** to naukowe podstawy rozwoju wiedzy budowlanej. Rozwój ten napotykał w swej historii na wiele barier w postaci błędnych rozumowań, nieumiejętnych powiązań teorii z praktyką, a także ograniczających lub wręcz hamujących postęp przepisów. Będzie to poparte przykładami w dalszej treści tego opracowania. Warto jednak zauważyć, że różnego rodzaju bariery rozwoju wiedzy budowlanej wynikającej z dociekań naukowych istnieją i obecnie. Świadczy to o żywości dziedziny, bo nie wszystko jest już w niej wiadome i dlatego wymagane są stale nowe badania doświadczalne, nowe ujęcia teoretyczne oraz nowe analizy numeryczne. To stwierdzenie, wskazujące na permanentny rozwój wiedzy budowlanej, też będzie poparte przykładami.

Wreszcie źródło **e)**, które wynika z indywidualnych cech mentalności i psychiki ludzi działających w sferze szeroko rozumianego budownictwa i związanych z nim nauk, jest kto wie, czy nie głównym motorem postępu w tej sferze. U podstaw leży tu bowiem ciekawość inżynierska i badawcza, tworzenia nowych rozwiązań oraz chęć zbadania nowych zagadnień. słowem – dążenie do rozszerzenia zakresu poznania. Wszystkie te nowe elementy wymagają sprawdzenia – historycznie rzecz biorąc, najpierw opierano je na intuicji właśnie i poprzednich doświadczeniach (co nadal zachowuje ważność), potem na eksperymentach i formułowanych na ich podstawie teoriach, obecnie – niemal powszechnie – na modelowaniu numerycznym i symulacji komputerowej, co często zastępuje (i dodajmy: nie zawsze słusznie) badania doświadczalne, a także i intuicję inżynierską popartą praktyką (np. gdy przyjmowane są niewłaściwe modele konstrukcji lub źle interpretowane są wyniki pomiarów lub obliczeń). Ale znane metody sprawdzania nowych koncepcji mogą okazać się niewystarczające. Inaczej rzecz ujmując, zastana wiedza budowlana, mimo że zdawać się może bardzo obszerna i ugruntowana, może też nie wystarczać do weryfikacji tego, co podsuwa wyobraźnia projektanta i tworzone przez niego innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe. Było i jest wiele takich przypadków. Z tej niewystarczalności zastanych metod wynika właśnie rozwijanie wiedzy budowlanej w zakresie teorii, doświadczalnictwa i praktyki wreszcie.

3. Bariery rozwoju wiedzy budowlanej

Bariery rozwoju wiedzy budowlanej najlepiej jest przedstawić, podając przykłady wskazujące jak to, co dla środowiska inżynierskiego (a nawet studentów) jest dziś oczywiste, kiedyś stanowiło sprawy nieznanne, niezrozumiałe lub błędnie pojmowane.

Zacniemy od przypadku dla nas obecnie najprostszego. Pierwsze udokumentowane doświadczenia dotyczące zginania belek wspornikowych (rys. 1) były przeprowadzane przez Galileusza (1564÷1642) [3]. Z zachowanych szkiców i opisów wynika, że nie odróżniał on w przekrojach poprzecznych (szczególnie w przekroju utwierdzenia) strefy ściskanej i rozciąganej – dla niego cały przekrój był rozciągany tak, jak to zilustrowano na rys. 2a. Na rys. 2b÷2e pokazano jak mozolnie wybitni uczeni sprzed wieków zblizali się do prawdy dla nas tak oczywistej. Od badań Galileusza opublikowanych w 1638 roku do poprawnego rozwiązania Coulomba (1736÷1806) w 1773 roku minęło aż 135 lat. A sprawa wydaje się taka prosta.... Przykład ten wskazuje na ograniczoność naszego pojmowania zagadnień nowych. Przecież i dzisiaj wiele spraw nie rozumiemy w sposób właściwy lub o nich po prostu nie wiemy. A więc najpierwszą barierą rozwoju wiedzy, także budowlanej, jesteśmy my sami.



Rys. 1. Belka wspornikowa badana przez Galileusza [3]

Drugi przykład dotyczy tak dziś często budowanych mostów o konstrukcji podwieszanej. Mosty o takie, z pochyłymi cięgnami budowano już w początkach XIX wieku. Cechowała je jednak duża awaryjność, a nawet ulegały katastrofom. Słynny Claude Louis Marie Henri Navier (1785÷1836) opublikował w 1823 roku pracę [4], z której pochodzi szkic pokazany na rys. 3, i w której dowodził, że mosty o ukośnych cięgnach prostych są niebezpieczne, brzydsze od mostów wiszących z krzywoliniowymi cięgnami nośnymi, a ponadto nie cechuje ich ekonomiczność rozwiązania konstrukcyjnego w porównaniu z mostami o wieszakach pionowych czyli w porównaniu z mostami wiszącymi. Autorytet Naviera był tak wielki, że zahamował on wykonywanie mostów podwieszonych aż na 126 lat. Dopiero bowiem Franz Dischinger (1887÷1953) zwrócił w 1949 roku uwagę [5], że cięgna w pierwszych mostach podwieszonych nie miały żadnego wstępnego naciągu, wskutek czego ich efektywność w przenoszeniu obciążeń była niweczona przez zwis, dość znaczny w przypadku długich cięgien. Dlatego wpływ tych cięgien na zachowanie konstrukcji mógł się ujawnić dopiero wtedy, gdy przeszło doznawało już znacznych przemieszczeń. Dziś wiemy dzięki wzorowi H.J. Ernsta [6], że naprężenia w cięgnie ukośnym mają wielki wpływ na jego efektywny moduł Younga, a przez to przemieszczenia całej konstrukcji.

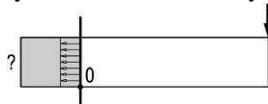


Domenico Galileo Galilei (Italia, 1564÷1642)

Dialogi i dowodzenia matematyczne (1638)

Zginana belka wspornikowa:

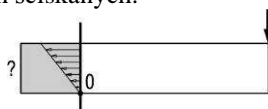
- Wyznaczanie obciążenia niszczącego w belce wspornikowej,
- Założenie stałego rozkładu naprężeń w strefie rozciąganej,
- Oś obojętna w skrajnych włóknach ściskanych.



Edme Mariotte (Francja, 1620÷1684)

Zginana belka wspornikowa:

- Trójkątny rozkład naprężeń w strefie rozciąganej, oś obojętna w skrajnych włóknach ściskanych.

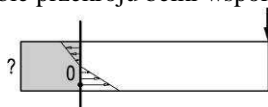


Antoine Parent (Francja, 1660÷1726)

Rozwinął teorię belek podając rozkład naprężeń w przekroju belki zginanej w funkcji momentu zginającego.

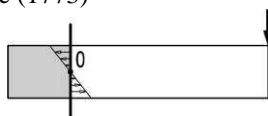
Udoskonalił teorię zginania belek:

- Oś obojętna w obrębie przekroju belki wspornikowej.



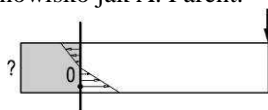
Charles Augustin de Coulomb (Francja, 1736÷1806)

Poprawne rozwiązanie (1773)



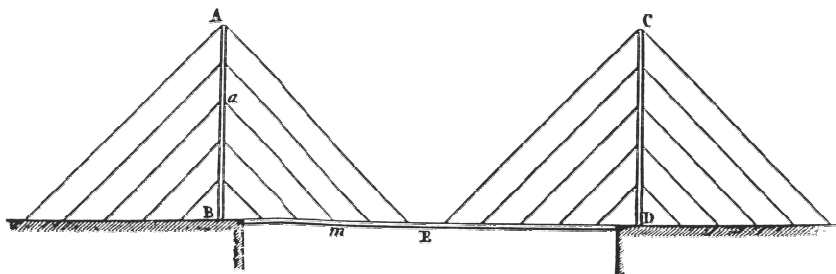
Pierre-Simon Girard (Francja, 1765÷1835)

1798 – *Traité analytique de la résistance des solides*, pierwsza we Francji książka dotycząca wyłącznie teorii belek (rozciąganie, zginanie, sprężysty zakres pracy). Tytuł tej książki dał nazwę dyscyplinie „wytrzymałość materiałów”. Poglądy Girard’a na statykę belek są mniej oryginalne niż jego poprzednika Coulomb’a. Jedyne nieco ulepszył teorię Mariotte’a dotyczącą belek zginanych. Reprezentował podobne stanowisko jak A. Parent.



Rys. 2. Historia belki wspornikowej (materiał uzyskany dzięki uprzejmości prof. Jacka Śliwińskiego z Politechniki Krakowskiej)

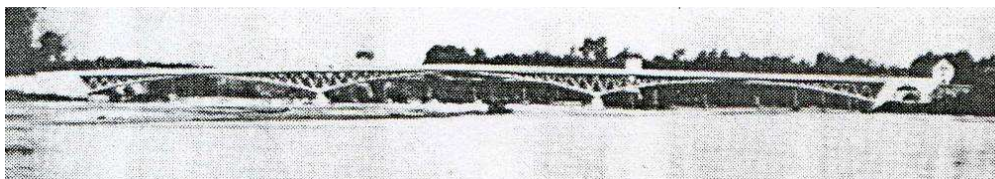
Warto jednak zauważyć, że gdy Dischinger ogłaszał swą pionierską pracę, a następnie projektował i realizował stalowe mosty podwieszane z wstępnym naprężaniem ukośnych cięgien, znany już był i stosowany w mostownictwie beton sprężony.



Rys. 3. Most podwieszony według propozycji Naviera [4]

Była więc także produkowana odpowiednia stal do kabli sprężających. Idea naprężania kabli była z powodzeniem sprawdzona. Stąd tylko krok do stwierdzenia, być może ryzykownego, ale przecież nie bezpodstawnego, że bez konstrukcji z betonu sprężonego, konstrukcje podwieszane musiałyby jeszcze troszeczkę poczekać na zdjęcie „klątwy” Naviera. Przy okazji warto przypomnieć, że podobne działania do Dischingera podjął we Francji w zakresie podwieszonych mostów betonowych Alfred Caquot (1881÷1976). Obaj należą więc bez wątpienia do prekursorów współczesnych mostów o tej właśnie konstrukcji.

Trzeci przykład wskazuje jak niepokój światłego projektanta i budowniczego mostów, niepokój związany z „dziwnym” zachowaniem konstrukcji prowadzącym zapewne do katastrofy, może dać początek nowej nauce, w tym przypadku reologii betonu. Otóż rzecz dotyczy mostu przez Algier w Veudre we Francji (rys. 4.). Gdy patrzy się na jego sylwetkę, aż trudno uwierzyć, że ten trójprzęsłowy obiekt (3×72,50 m) budowano go w latach 1907÷1911. Szkoda, że został zniszczony w 1940 roku podczas działań wojennych.

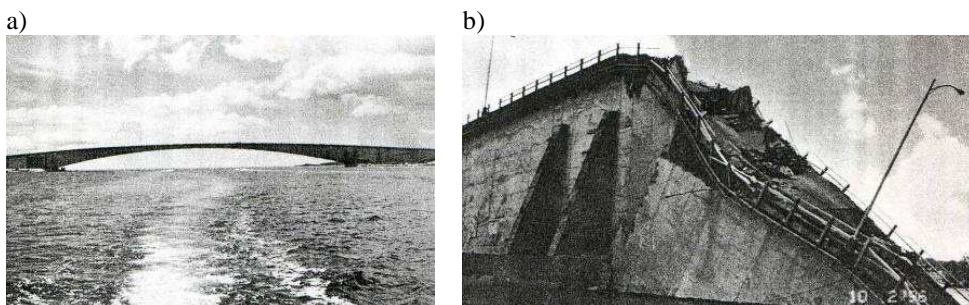


Rys. 4. Widok mostu przez rzekę Allier w Veudre, Francja [7]

Jego projektantem był Eugène Freyssinet (1879÷1962), który swój niepokój o los mostu opisał we wspomnieniach [8]. Most ten zaprojektował zgodnie z najwyższym poziomem ówczesnego stanu wiedzy o betonie i kształtowaniu konstrukcji łukowych. Łuki były więc zaprojektowane i wykonane jako trójprzegubowe. W 1911 roku, już w trakcie eksploatacji obiektu, Freyssinet zauważył z trwogą stale obniżanie zworników łuków, o ponad 13 cm. O swym spostrzeżeniu nie powiadomił nikogo. Wraz z majstrem i trzema zaufanymi robotnikami podniósł za pomocą pras hydraulicznych połówki łuków do pierwotnego, wymaganego położenia i zlikwidował przeguby w zwornikach przez zabetonowanie przestrzeni między tymi połówkami. O działaniu tym, które podjął bez zamykania ruchu po moście, też nie powiadomił władz administracyjnych. W wyniku przedstawionej interwencji zachowanie mostu, aż do jego zniszczenia w czasie II Wojny Światowej, nie budziło zastrzeżeń. Freyssinet, szukając przyczyn powstałej sytuacji zrewidował wiele poglądów na odkształcalność betonu

w funkcji czasu. Między innymi odszukał wyniki badań, które były błędnie interpretowane przez komisję złożoną w większości z teoretyków, którzy uznali za pewnik niezmiennosc współczynnika sprężystości betonu w czasie i jego stałość niezależnie od poziomu i zmienności naprężeń w czasie. Dociekania Freyssineta doprowadziły w konsekwencji do narodzin reologii betonu. Warto w kontekście opisanych okoliczności zacytować pewien fragment jego wspomnień [8]: „Komisja kierująca badaniami zamiast rozpatrzyć przyczyny stwierdzonych odchyłeń ...odrzucała wszystkie te anomalne odkształcenia jako wynikające z niedokładności pomiarów. Zrozumiałem wówczas, że konstruktorzy-teoretycy stanowiący większość członków komisji, jeszcze przed rozpoczęciem doświadczeń byli przekonani, że beton może odkształcać się tylko według praw, które przypisywane stali pozwoliły zmienić naukę o konstrukcjach w zwykłą gałąź matematyki. Matematycy ci, zamknięci w świecie urojonym nie dopuszczającym żadnej rzeczywistości fizycznej, szukali w swych doświadczeniach jedynie potwierdzeniu swych pojęć. Przyjmowali więc za prawdę największe zniekształcenia pomiarów, aby potwierdzić swe błędne przekonania, odrzucali zaś jako fałszywe wszelki obserwacje, które by mogły prowadzić do odstąpienia od panującej teorii lub skomplikować pojęcia.”. Odrzucając być może nadmierny krytycyzm Freyssineta wobec postaw teoretyków, warto jednak zastanowić się, czy w jego wypowiedzi nie ma ziarna prawdy, aktualnej i w naszych czasach.

A sprawa niedoceny lub złego szacowania reologicznych właściwości betonu mści się niemal do dziś. Najlepszym tego przykładem jest wielki most łączący dwie wyspy na Pacyfiku Koror i Babekthup w archipelagu Palau (rys. 5a). Wybudowano go w 1978 roku, stosując metodę betonowania nawisowego. Rozpiętość najdłuższego przęsła była równa 241 m, w jego środku uformowano przegub. Wskutek działania pełzania przegub ten po blisko 18 latach eksploatacji obiektu obniżył się o 1,3 m (130 cm!) [9]. Postanowiono temu zaradzić likwidując przegub i odcinkowo sprężając środkową część długiego przęsła, co prowadzi oczywiście do zmiany pierwotnego schematu statycznego konstrukcji mostu i wynikającej z niej redystrybucji sił wewnętrznych. Jak zamierzano, tak też zrobiono. 27 września 1996 roku środkowe przęsło mostu uległo nagłemu zawaleniu (rys. 5b). Nie wszystkie przyczyny tego zostały do końca wyjaśnione.



Rys. 5. Most Koror przed i po katastrofie [9].

Oprócz nieprzystosowania bardzo sztywnych przęseł brzegowych do owej redystrybucji, przyczyną katastrofy upatrywano jeszcze w bardzo nierównomiernym rozkładzie temperatury w konstrukcji i stosunkowo niskiej jakości betonu. Oficjalny raport nie został jednak według wiedzy piszącego te słowa upubliczniony. Niemniej jednak, gdyby nie nadmierne pełzanie betonu, nie byłoby potrzeby ingerencji w konstrukcję mostu. Efekty reologiczne trzeba więc zawsze szczególnie starannie analizować.

4. Źródła wiedzy o katastrofach i awariach mostów

Katastrofy mostów zdarzały się chyba od tak dawna, jak mosty zaczęto budować. Ograniczmy jednak nasze rozważania – zgodnie z wcześniejszą zapowiedzią – do czasów, w których zaczęto katastrofy mostowe rejestrować, dociekać ich przyczyn i traktować je jako swoistą naukę na przyszłość. Nasza wiedza o tych katastrofach jest w przeważającej większości wiedzą pośrednią i przesuniętą w czasie, i to często dość znacznie, w stosunku do ich zaistnienia. Jest tak dlatego, że opisy katastrof mostów (zresztą nie tylko ich) zamieszczane w ogólnie dostępnych źródłach oparte są zwykle na części tylko dokumentów oficjalnych – części, bo nie wszystkie są badaczom ujawniane, a jeśli do nich docierają, to właśnie z pewnym, nieraz wieloletnim opóźnieniem w stosunku do wystąpienia owych katastrof. Dlatego nierzadko więcej wiemy o katastrofach sprzed dziesięcioleci, gdy dochodzie ich przyczyn dawno już zostało zamknięte, niż o tych, które miały miejsce niedawno. Aspekt postępowania prawnego i prawnej odpowiedzialności jest tu czynnikiem decydującym o ograniczeniu dostępności wszystkich źródeł, dotyczących tych relatywnie niedawnych zdarzeń, nie mówiąc już o tych co do których dochodzenie jeszcze trwa.

Wiadomości o katastrofach mostów, mimo ich kluczowego znaczenia dla rozwoju wiedzy budowlanej, są przedmiotem stosunkowo niewielu ujęć monograficznych, a to przede wszystkim wskutek wspomnianych już trudności w docieraniu do ich oficjalnego, szczegółowego i w pełni wiarygodnego udokumentowania. Jak można sądzić, pierwszą po II Wojnie Światowej pozycją monograficzną, w której zamieszczono rozdział poświęcony katastrofom mostów, jest tłumaczona z rosyjskiego pozycja [10], wydana w 1956 roku. Na monografię polskich autorów, poświęconą wyłącznie katastrofom i awariom mostów, trzeba było czekać aż do roku 1986 [11]. Oczywiście wiadomości na ten temat można czerpać i ze źródeł rozproszonych, głównie artykułów i referatów konferencyjnych (w tym oczywiście zamieszczonych w księgach konferencji „Awarie Budowlane”), ale w odniesieniu do konstrukcji mostowych są to pozycje na szczęście raczej nieliczne – w Polsce nie było po ostatniej wojnie światowej katastrofy mostu w trakcie normalnej eksploatacji.

Warto zwrócić uwagę, że podobna sytuacja co do źródeł występowała do niedawna i w światowym piśmiennictwie technicznym. Dopiero lata całkiem ostatnie przyniosły istotną zmianę, bo ukazały się dwie pozycje monograficzne [12] i [13], wydane w roku 2008 [12] i w roku 2010 [13], obie poświęcone w całości katastrofom konstrukcji mostowych. Zawierają one nie tylko opisy wielu tych, tragicznych często w skutkach, zdarzeń, lecz także własne analizy autorów oraz wskazania co do sposobów unikania błędów do katastrof prowadzących. W pozycji [12] przedstawiono 20 głośnych katastrof mostów w okresie od 1847 roku do 2003 roku, w pozycji zaś [13] podano informacje o ogółem aż o 440 takich zdarzeniach, które nastąpiły od roku 1846 do roku 2008. W niektórych wcześniejszych podręcznikach (np. w [14] z 1997 roku) można znaleźć opisy katastrof wraz z wnioskami z nich płynącymi, ale nie zmienia to faktu, że nowoczesne ujęcia monograficzne o tej tematyce, ukazały się na świecie dopiero niedawno.

Ze względu na szczególnie dużą liczbę katastrof przedstawionych w monografii [13], warto podać ich klasyfikację według głównych przyczyn, które je spowodowała. Uczyniono to w tabl. 1 (kolumna z udziałem procentowym jest uzupełnieniem autora niniejszego opracowania).

Dane zestawione w tabl. 1 nie pretendują rzecz jasna do uogólnienia mniej lub bardziej częstych przyczyn katastrof mostów (uderza np. mała liczba katastrof spowodowanych oddziaływaniami sejsmicznymi), niemniej jednak aż 440 katastrof wymienionych w [13], rzuca pewne światło na temat częstości wystąpienia określonej przyczyny, a to jest niewątpliwie elementem rozwoju wiedzy budowlanej.

Tablica 1. Klasyfikacja przyczyn katastrof wymienionych w monografii [13]

Główna przyczyna i okres nastąpienia katastrofy	Liczba przypadków	Udział procentowy
Podczas budowy	105	23,9%
Podczas normalnego użytkowania	107	24,3%
Uderzenia taboru pływającego	59	13,4%
Uderzenia od taboru pod obiektem	19	4,3%
Uderzenia od taboru na obiekcie	21	4,8%
Powódź, parcie lodu, pływające przedmioty, huragany	41	9,3%
Pożary lub wybuchy	22	5,0%
Oddziaływania sejsmiczne	6	1,4%
Katastrofy rusztowań	60	13,6%
Razem	440	100,0%

W niniejszym opracowaniu, zgodnie z jego tytułem, przedstawimy tylko bardzo krótkie opisy niektórych, wymienionych dalej (por. punkt 5) katastrof, natomiast skoncentrujemy się na tym, jak one wpłynęły na rozwój wiedzy budowlanej.

5. Katastrofy mostów, jako milowe kamienie rozwoju wiedzy budowlanej

Każda katastrofa, czy choćby relatywnie drobna awaria, obiektów mostowych niesie ze sobą pewną dozę przestrogi i wskazań na przyszłość. Spośród jednak 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, sformułowaną jeszcze w 1977 roku, zacytowano w monografii [12], takimi katastrofami, nazwanymi tu milowymi kamieniami rozwoju wiedzy budowlanej, były następujące katastrofy:

- a) mostu przez rzekę Dee w Wielkiej Brytanii, w 1847 roku;
- b) mostu przez ujście rzeki Tay w Wielkiej Brytanii, w 1879 roku;
- c) mostu przez rzekę Św. Wawrzyńca, Quebec, w Kanadzie, w 1907 roku;
- d) mostu Tacoma Narrows, w USA, w 1940 roku;
- e) 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 około trzydziesto-letnich interwałach. Niektórzy przewidywali więc, iż około roku 2000 katastrofom będą ulegać mosty podwieszane, które na dużą skalę zaczęto budować na przełomie lat 1960-tych i 1970-tych [12]. Na szczęście nic takiego się nie stało. Wręcz przeciwnie – mosty podwieszane osiągają coraz większe rozpiętości, nadal przeżywają swój rozkwit i funkcjonują bezpiecznie. Są nieliczne wyjątki (np. most Normandii we Francji z przeszłym rozpiętości 856 m, ukończony w 1995 roku), ale dotyczą one komfortu, a nie bezpieczeństwa użytkownika.

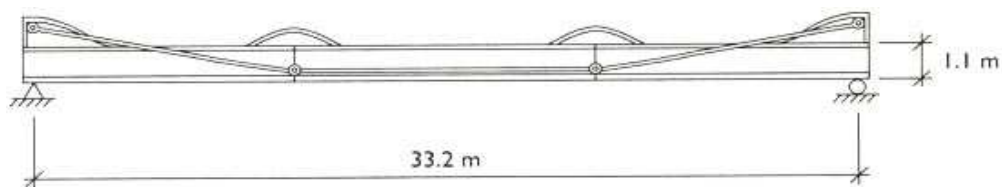
Drugą sprawą charakterystyczną to fakt, że wymienione kamienie milowe dotyczą konstrukcji stalowych. Faktem jest, że mosty betonowe ulegały katastrofom znacznie rzadziej od stalowych. Stosunkowo nieliczne katastrofy mostów betonowych następowały częściej w trakcie budowy niż eksploatacji, co między innymi wskazuje na bardzo duże znaczenie rusztowań i deskowań w bezpiecznej realizacji mostów z betonu.

Podstawowe pytania, które powstają odnośnie do wymienionych katastrof brzmią: dlaczego mogą być one uznane jako kamienie milowe rozwoju wiedzy budowlanej, dlaczego ich wpływ na jej rozwój był tak istotny, że doprowadził do poważnych zmian w projektowa-

niu i budowaniu mostów bądź zrewidowania dotychczas stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Postaramy się na pytania te odpowiedzieć poniżej.

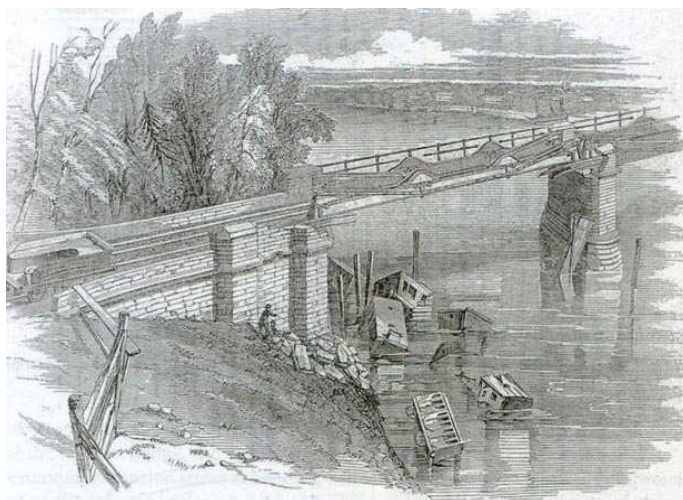
Katastrofa mostu kolejowego przez rzekę Dee w Wielkiej Brytanii, 1847 rok – koniec ery żeliwa

Most ten został ukończony w 1846 roku. Tworzyły go trzy swobodnie podparte przęsła o jednakowych rozpiętościach równych 33,2 m, co było samo w sobie 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 (rys. 6).



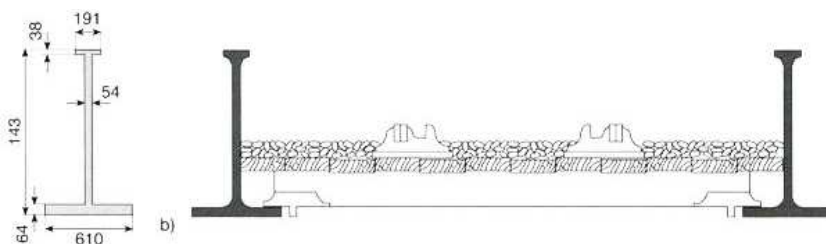
Rys. 6. Wzmocnienie żeliwnego dźwigara prętami z żelaza zgrzewnego [12]

Były one rozmieszczone w taki sposób, że ich rozciąganie następowało po wystąpieniu rozciągania spowodowanego zginaniem dźwigarów głównych. Trzeba zwrócić uwagę, że żelwo 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 – około 100 GPa, żelazo zgrzewne – około 200 GPa). Fakt ten miał duże znaczenie w wyjaśnianiu przyczyn katastrofy. Nastąpiła ona 24 maja 1847 roku, niespełna rok po zakończeniu budowy mostu, podczas przejazdu pociągu. Zginęły wtedy cztery osoby, a osiemnaście zostało rannych [13] – wagony poza lokomotywą i tendrem spadły do rzeki wskutek utraty stateczności zewnętrznego dźwigara w skrajnym przęśle mostu. Widok tuż po katastrofie pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Katastrofa mostu kolejowego przez rzekę Dee, Wielka Brytania, 1847 rok [12]

Przyczyny katastrofy mostu były szczegółowo analizowane. Za główną przyczynę 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 bardziej twardego materiału bolców i prętów wzmacniających. Skutkiem owej owalizacji było znaczne zwiększenie bolców i prętów wzmacniających. Skutkiem owej owalizacji było znaczne zwiększenie podatności całej konstrukcji, bo układ prętów przestawał być stopniowo aktywny. Powodowało to też wzrost oddziaływań dynamicznych taboru kolejowego. Zwiększony był też w stosunku do pierwotnego projektu ciężar torowiska (rys. 8). Oprócz tego warto nadmienić, że sam sposób rozwiązania konstrukcji wprowadzał niepożądane mimośrodowość.



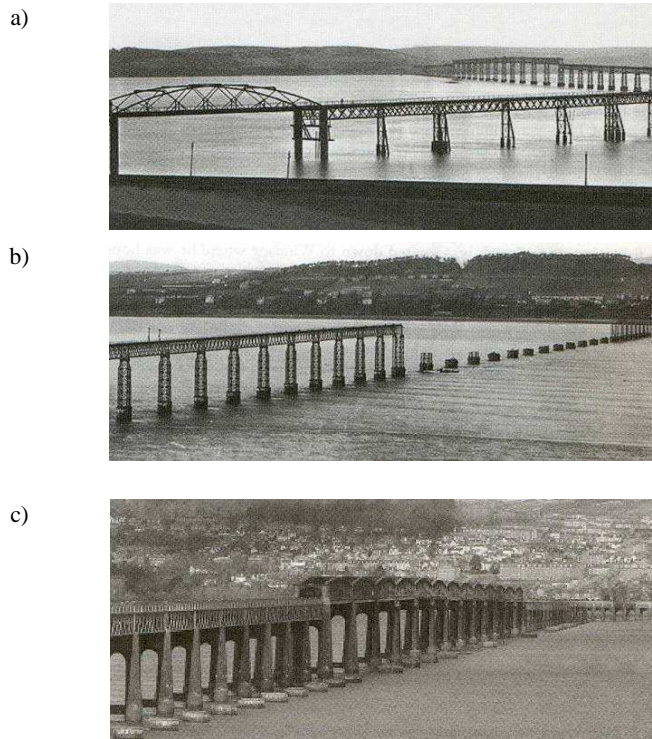
Rys. 8. Przekrój żeliwnego dźwigara (a) i przekrój poprzeczny jednej nitki mostu przez Dee (b) [13]

Wskutek małego pola przekroju pasa górnego w stosunku do pola pasa dolnego (rys. 8) stosunek naprężeń ściskających do rozciągających wynosił aż 16:3, co wraz z wymienionym poprzednio czynnikami 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 zostało wymienionych lub wzmocnionych przez dodanie dodatkowych płyt i profili w celu zwiększenia ich wysokości ustrojowej. Jak pisze autor monografii [13], chlubny start żeliwa jako mostowego materiału konstrukcyjnego w 1779 roku (istniejący do dziś Ironbridge przez rzekę Severn, Wielka Brytania), zakończył się katastrofą mostu przez Dee. Od tej katastrofy zaczęto stosować do budowy mostów żelazo zgrzewne, wykazujące wyższą wytrzymałość i ciągliwość od żeliwa. Dlatego można ją zaliczyć do kamieni milowych rozwoju wiedzy budowlanej. A na pierwsze konstrukcyjne zastosowanie stali trzeba było poczekać do roku 1860...

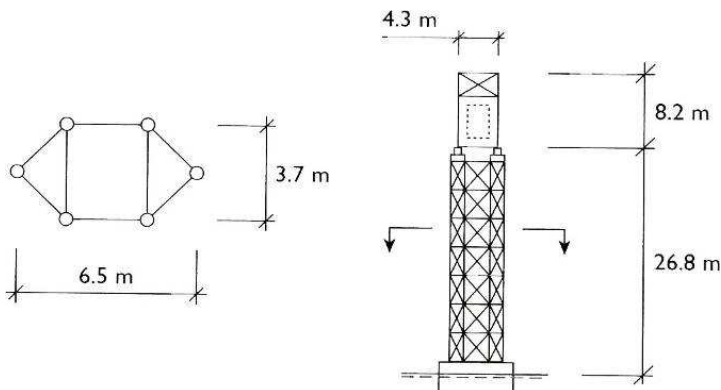
Katastrofa mostu przez ujście rzeki Tay w Wielkiej Brytanii, 1879 rok – pierwsza wielka katastrofa spowodowana działaniem wiatru na most o konstrukcji innej niż wisząca

Jednotorowy most kolejowy przez ujście rzeki Tay ukończono w 1878 roku (rys. 9a), 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, mających rozpiętość 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 (rys. 10). Podpory te, jak widać nie miały kształtu dostosowanego 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 (rys. 11).

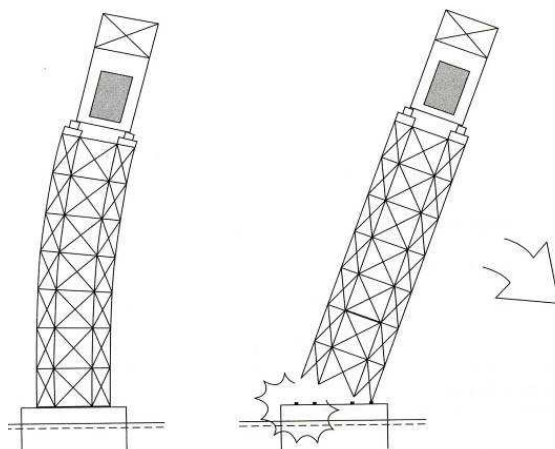


Rys. 9. Most Tay: a) widok mostu w 1878 roku; b) katastrofa w 1879 roku; c) most odbudowany w 1887 roku [12]

Nastąpiła ona 28 grudnia 1879 roku, podczas przejazdu pociągu. Wszystkie przęsła centralne (nawigacyjne) wraz z pociągiem runęły do wody (rys. 8b) i rys 12). Zginęło 75 osób, nikt nie ocalał. Stało się to w czasie bardzo silnego wiatru (10 do 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 (rys. 11) i nastąpiło wspomniane zawalenie przęsła.



Rys. 10. Podpora mostu Tay [12]



Rys. 11. Przebieg zawalenia podpór mostu Tay [12]



Rys. 12. Rycina obrazująca katastrofę mostu Tay [13]

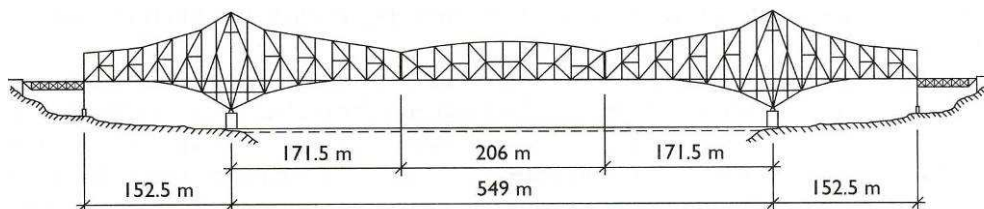
Projektując most przyjęto parcie wiatru na poziomie tylko $1/3$ wartości, które rzeczywiście wystąpiły owego krytycznego dnia. Na zbyt małą stateczność poprzeczną konstrukcji oraz inne usterki rozwiązania konstrukcyjnego zwracano uwagę jeszcze przed oddaniem mostu do eksploatacji. Część z nich starano 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 roku, 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 przęseł (rys 9c). Most istnieje do dziś. W 2003 roku 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.

Pierwsza katastrofa mostu przez rzekę Św. Wawrzyńca w Quebecu, Kanada, w 1907 roku – fałszywe poczucie bezpieczeństwa. Druga katastrofa, w 1916 roku – uwaga na ważne detale przy montażu. Najwięcej ofiar w trakcie budowy

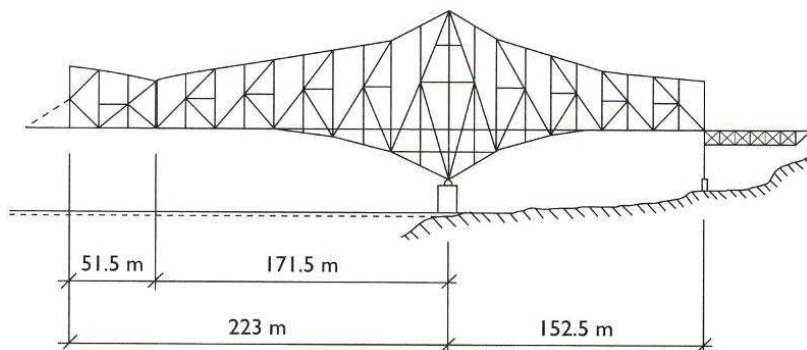
Ten powszechnie znany i do dziś użytkowany most do chwili obecnej dzierży rekord świata w rozpiętości przęsła mostu kratownicowego – 549 m (rys. 13). Rekord ten jednak był okupiony ofiarami ludzkimi, bo podczas budowy most dwukrotnie ulegał katastrofom – pierwszej 29 sierpnia 1907 roku i drugiej we wrześniu 1916 roku. W wyniku pierwszej zginęło 75 osób, w wyniku drugiej – 13.



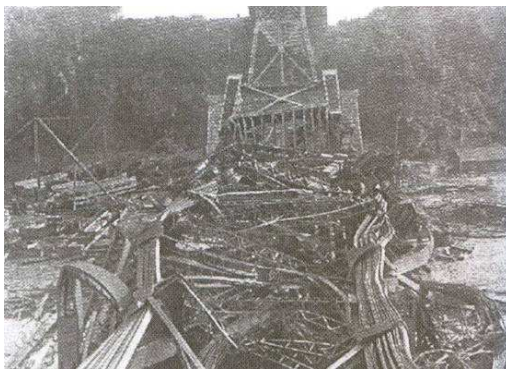
Rys. 13. Schemat i wymiary mostu w Quebec (przed przeprojektowaniem) [12]

Casus budowy tego mostu jest dobrze znany, bo 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 rys. 14. 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 rys. 15.

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 nie szczególnie wnikliwe i staranne zaangażowanie w budowę, czego tak unikatowy obiekt wymagał, wytworzył u wykonawców fałszywe poczucie bezpieczeństwa. Okazało się ono zgubne.



Rys. 14. Sytuacja tuż przed katastrofą [12]



Rys. 15. Zawalona kratownica długości 152,5 m [12]

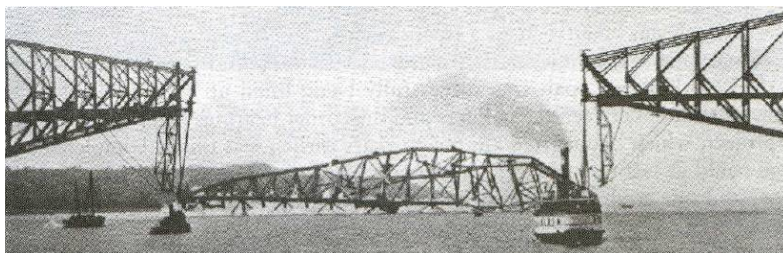
Przygotowania do odbudowy mostu (a właściwie do zaprojektowania i zbudowania go na nowo) podjęto już w 1908 roku. W skład powołanego do tego celu zespołu wchodził również Rudolf Modrzejewski (Ralph Modjeski, 1861÷1940). Nową budowę rozpoczęto w 1909 roku. W pierwotnym projekcie dokonano zmian polegających na ukształtowaniu dolnego pasa kratownicowej konstrukcji wzdłuż prostej nie krzywej oraz zmieniono nieco rozpiętość przęseł 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. Skąłę 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 niż do mostu, który uległ katastrofie – 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 zawieszono (rys. 16) mającego długości 195 m – w pierwszym projekcie miało ono długość 206 m, por. rys. 13. Przęsło to było połączone z urządzeniem podnoszącym za pomocą czterech narożnych łożysk. Przyczyną katastrofy było nagłe zniszczenie jednego z nich, gdy podnoszona konstrukcja była 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.

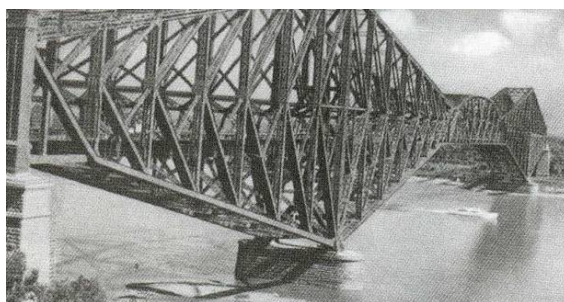
Drugą próbę podnoszenia przęsła, tym razem udaną, podjęto we wrześniu 1917 roku, niemal równo rok po przedstawionej katastrofie. Sposób połączenia łożysk przęsła zawieszono z urządzeniem podnoszącym kompletnie przeprojektowano. Most oddano do użytku w październiku 1917 roku, po prawie 20 latach od rozpoczęcia pierwszych robót. Ukończony most, w swej ostatecznej postaci, pokazano na rys. 16.

Opisane pokrótce katastrofy mostu w Quebecu należą do dziś do najbardziej tragicznych w swych skutkach katastrof, które nastąpiły podczas fazy budowy. Zmiany jakie wprowadzono 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 owo 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.



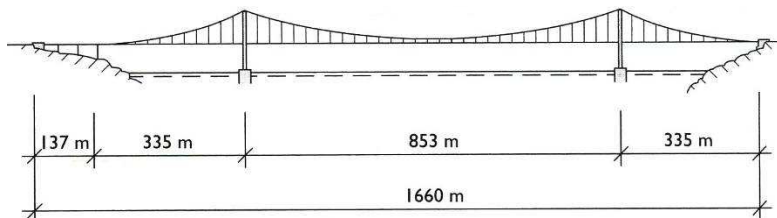
Rys. 16. Druga katastrofa podczas budowy mostu w Quebecu [13]



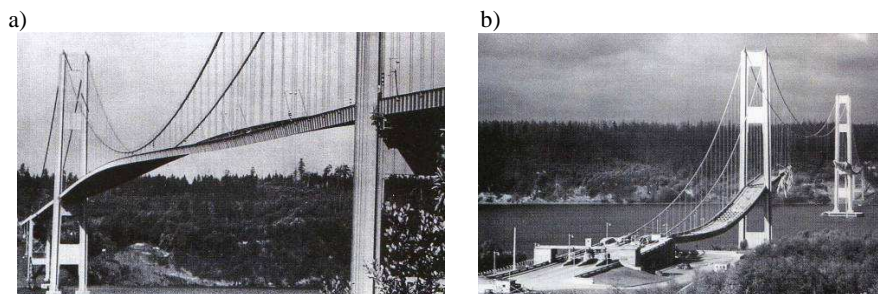
Rys. 16. Most w Quebecu w swej ostatecznej postaci [12]

Most był szczególnie śmiało, by nie napisać zbyt oszczędnie, zaprojektowany. Stosunek szerokości pomostu do rozpiętości przęsła był równy $11,9/853 \text{ m} = 1/72$ (np. w moście George Washington ten stosunek jest $1/30$, a w moście Golden Gate – $1/47$), stosunek zaś wysokości dźwigara do jego rozpiętości był równy $2,45/853 \text{ m} = 1/348$. 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.

Katastrofa mostu Tacoma Narrows w 1940 roku – początek intensywnego rozwoju aerodynamiki mostów



Rys. 17. Widok boczny i główne wymiary mostu Tacoma Narrows [12]



Rys. 18. Most Tacoma Narrows w trakcie katastrofy (a) i po katastrofie (b) [15]

Potwierdziła to komisja powołana do zbadania przyczyn katastrofy. W porównaniu jednak z innymi mostami, most Tacoma nie został zaprojektowany na przeciwdziałanie dynamicznym efektom działania wiatru. Z jednej strony nie było pełnej świadomości skali skutków dynamicznego oddziaływania wiatru na duże, ale smukłe konstrukcje, z drugiej zaś strony nie było odpowiednich narzędzi teoretycznych ani 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 roku oddano do użytku drugi most wiszący Tacoma Narrows, a w 2007 – wobec narastającego natężenia ruchu – ukończono trzeci w kolejności most. Oba pokazano na rys. 19.

Katastrofa mostu w 1940 roku nadal budzi kontrowersje. Najbardziej charakterystycznym tego objawem jest choćby publikacja [16], w której analizowano tę katastrofę stosując metody znane u progu XXI wieku i odkrywając dzięki nim nowe szczegółowe aspekty mechanizmu katastrofy mostu, między innymi 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?



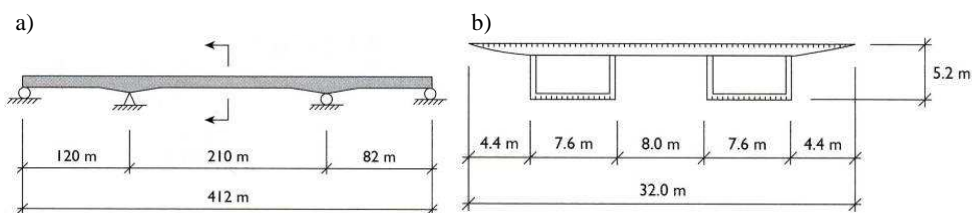
Rys. 19. Mosty Tacoma Narrows z 1950 roku (prawy) i 2007 roku (lewy) [15]

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 roku, na szczęście bez ofiar śmiertelnych), mostu Cleddau w Walii (2 czerwca 1970 roku, 4 ofiary śmiertelne), mostu Waste Gate w Melbourne (15 października 1970 roku, 34 ofiary śmiertelne) oraz mostu przez Ren w Koblencku (10 listopada 1971 roku, 13 ofiar śmiertelnych).

Aczkolwiek każda katastrofa konstrukcji ma swe specyficzne cechy, to katastrofy wymienionych czterech mostów mają pewne cechy wspólne – wszystkie wystąpiły podczas fazy budowy (montażu) metodą wspornikową oraz ich główną przyczyną była zbyta mała sztywność elementów stalowych skrzynek konstrukcji przęsła.

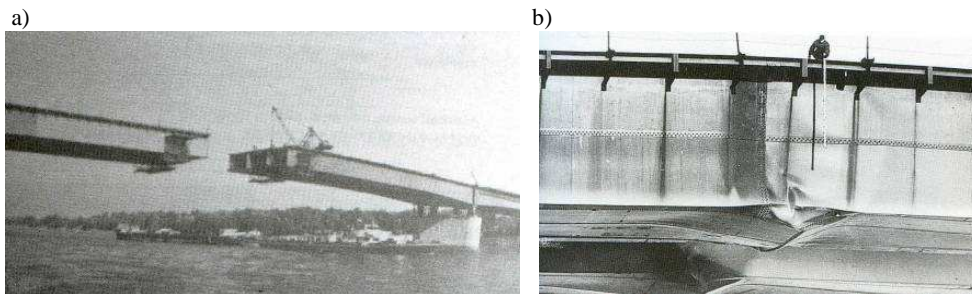
Schemat statyczny i przekrój poprzeczny oraz sytuację przed zwarciem głównego przęsła mostu w Wiedniu oraz wyboczenie jego pasa dolnego pokazano na rys. 20 i rys. 21.



Rys. 20. Schemat statyczny (a) i przekrój poprzeczny (b) mostu przez Dunaj w Wiedniu [12]

Wskutek redystrybucji sił wynikającej z obniżenia podpór pośrednich oraz efektów termicznych, nastąpił w taki wzrost momentów zginających, że ściskany pas dolny przekrojów skrzynkowych uległ wyboczeniu, powodując częściowe, lokalne zniszczenie konstrukcji. W wyniku tego powstał układ statycznie wyznaczalny przez uformowanie dwóch przegubów w miejscach wyboczenia 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.

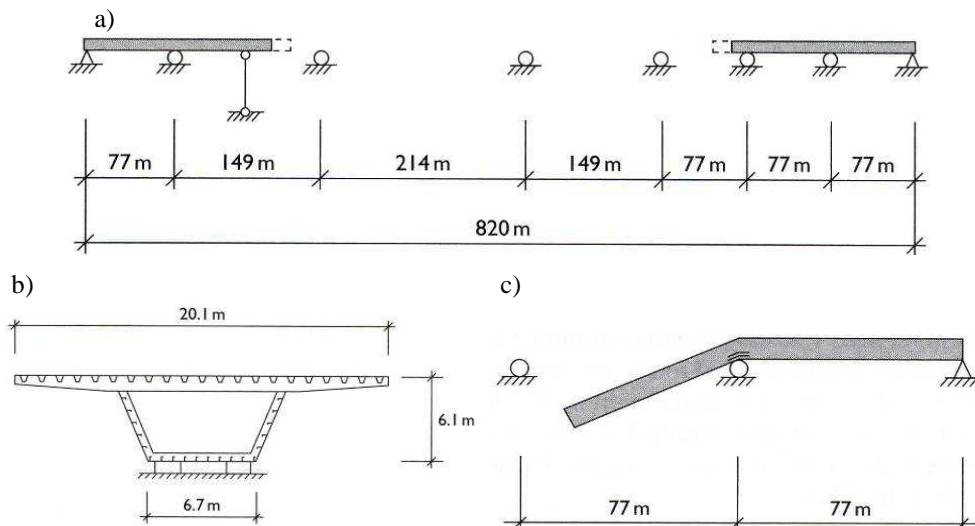
Most Cleddau w Walii uległ katastrofie wskutek niedostatecznej sztywności stalowej przepony nad podporą. Schemat mostu, miejsce katastrofy oraz widok jej skutków przedstawiono na rys. 22 i rys. 23. Niedowymiarowanie tej przepony najlepiej ilustruje fakt, że po odbudowie mostu, podczas jego użytkowania, 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.



Rys. 21. Stan przed zwarciem przęsła (a) [12] oraz deformacja pasa ściskanego (b) [13]

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.



Rys. 22. Schemat mostu Cleddau podczas montażu (a), przekrój poprzeczny przęsła (b), miejsce załamania konstrukcji (c) [12]

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.

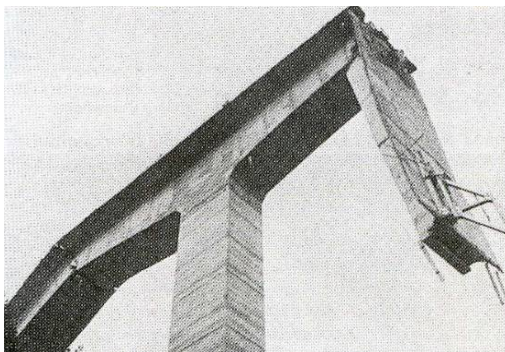


Rys. 23. Most Cleddau po katastrofie [13]

6. Katastrofy mostów betonowych – brak milowych kamieni rozwoju wiedzy budowlanej?

Jest rzeczą interesującą, że do milowych kamieni rozwoju wiedzy budowlanej zostały zaliczone tylko mostowe konstrukcje metalowe. Ma to może swe uzasadnienie historyczne i faktograficzne, ale nieco dziwi. Faktem jest jednak, że mosty betonowe nie ulegały właści-

wie 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 1970-tych. Jeden spektakularny przykład podano na rys. 24. Zdarzały się też katastrofy spowodowane błędami w zaprojektowaniu i wykonaniu rusztowań, co miało miejsce także w Polsce w ostatnich latach.



Rys. 24. Katastrofa wiaduktu Cannavino, Włochy 1972 rok [13]

Katastrofa pokazanego na rys. 24 wiaduktu Cannavino została spowodowana upadkiem dźwigara rusztowaniowego, który uderzył we wspornik przęsła, załamując go. Kable sprężające nie były zainiektowane i nie wystarczyły do „zatrzymania” katastrofy.

Można by zapewne poszukiwać kamieni milowych rozwoju wiedzy budowlanej także wśród katastrof mostów z betonu, ale poza opisanym incydentem w punkcie 3 mostu Freyssineta, który zapoczątkował reologię betonu, kamieni takich trudno się 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.

7. Co dalej? Uwagi końcowe

Mimo, że katastrofy w sposób niewątpliwy wpływały i – ponieważ nadal się niestety 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 gatunku takich oto: dlaczego skoro uczymy się na błędach ciągle je popełniamy.

Analiza katastrof, które nie nastąpiły wskutek trudnych do przewidzenia kataklizmów (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 wymuszonych oszczędności, etc. Dobrym tego i stosunkowo niedawnym przykładem jest katastrofa mostu autostradowego z betonu sprężonego przez rzekę Jiantuo w Chinach w 2007 roku, 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, nie obejmującego wielu spraw; były więc konsekwencją nieświadomości nawet wybitnych inżynierów.

Jak zwrócono uwagę poprzednio, wiedza budowlana ma swój wymiar zbiorowy i indywidualny (por. punkt 2). Zbiorowy ma swe odzwierciedlenie w bezpieczeństwie, funkcjonalności i trwałości budownictwa, które 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 roku. Otóż te wyjątkowe współczesne obiekty nie ulegają katastrofom takim, 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 podwieszonoego Normandii we Francji z głównym przęsłem rozpiętości 856 m i ukończonego w 1995 roku oraz kładki Milenijnej w Londynie zamkniętej w dniu otwarcia, czyli 10 czerwca 2000 roku i ponownie, po wprowadzonych zmianach, przekazanej do użytku 22 lutego 2002 roku [17]. Na pierwszym z wymienionych obiektów, 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 natura bywa, że pokonuje jeszcze mostowca. Ale ważny tu jest inny sens podejmowania tych działań zapobiegawczych. Obu obiektom nie groziła i nie grozi katastrofa podobna do opisanych poprzednio – działania te podejmowane są dlatego, że przemieszczenia konstrukcji pod wpływem wiatru są w pewnych warunkach na tyle duże, że psują komfort użytkownika – ludzie odczuwają te przemieszczenia nieprzyjemnie. I to też jest zasadnicza sprawa: nie katastrofa lecz komfort użytkowników. To też jest miarą postępu wiedzy budowlanej.

Ale rozwój wiedzy budowlanej dotyczy nie tylko wznoszenia nowych obiektów. Ważny dział krajowego i światowego mostownictwa stanowią remonty, renowacja i przede wszystkim modernizacje obiektów mostowych, a także rozbiórka istniejących. Szczególnie te dwa ostatnie działania 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. To – gdy jest 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 „Awaryje 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 przykłady podać rozwinięcie teorii wyboczenia 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. Tendencję taką można zauważyć i obecnie i będzie się ona prawdopodobnie utrzymywać w przyszłości.

Na koniec nie można nie wskazać, że awarie i katastrofy budowlane (nie tylko rzecz jasna mostowe), łącznie ze swymi tragicznymi często skutkami, to wspaniały materiał dydaktyczny. I to nie tylko dla studentów, ale i dla nas wszystkich, dla całego środowiska ludzi związanych z budownictwem. Jest to i przestroga i nauka, oby dobrze wykorzystane w naszej codziennej działalności. Ponadto awarie i katastrofy obiektów, to najlepszy dowód, że zawód inżyniera budownictwa słusznie jest zaliczany do zawodów zaufania publicznego, bo owoce jego działalności muszą zapewnić żądane bezpieczeństwo użytkownika. 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.

Wykaz piśmiennictwa

1. Radomski W.: Materiał a konstrukcja – refleksje mostowca, IV Konferencja Naukowo-Techniczna 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.: Hängebrücken für schwerste Verkehrslasten, Bauingenieur, nr 3, 4/1949.
6. Ernst H. J.: Der E-Modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhangs, Der Bau-ingenieur, nr 50/1965.
7. Wasiutyński Z.: Budownictwo Betonowe, Tom XIV, Mosty, cz. 1, Arkady, Warszawa 1967.
8. Freyssinet E.: Souvenirs „Cent Ans du Beton Armé”, STUP, Paris 1949 (tłum. Jerzego Fijałkowskiego).
9. Koror-Brücke eingestürzt, Beton- und Stahlbetonbau, 3 (92), 1997.
10. Dmitriew F.D.: Katastrofy budowli, tłum. z ros., Budownictwo i Architektura, Warszawa 1956.
11. Jarominiak A. i 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., and Puckett.: Design of Highway Bridges, JohnWiley&Sons, Inc., 1997.
15. Dąbrowiecki K.: Mosty Tacoma Narrows, Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie, 5 (32),
16. Larsen A.: Aerodynamics of the Tacoma-Narrows Bridge, Structural Engineering International, 4, 2000.
17. Radomski W.: Dynamiczne przyczyny awarii mostów, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje 2007.