



fol. Archiwum Marek Paliak

Fot. 1. Most Ganter w ciągu drogi E62 między Brig i przełęczą Simplon, Szwajcaria

Beton w parze z teorią i praktyką

Najwspanialsze dzieła architektoniczno-budowlane wznoszone i podziwiane od pokoleń łączy niezmiennie jedna podstawowa cecha: dzieła te kształtowane i wznoszone są z zachowaniem zasad statyki i mechaniki budowli, z uwzględnieniem właściwości wytrzymałościowych wykorzystywanych materiałów budowlanych.

Zgodnie z zasadami statyki i mechaniki budowli określone są siły wewnętrzne i naprężenia powstające w konstrukcji w zależności od sposobu działania i wartości obciążeń zewnętrznych oraz jej schematu statycznego. Znajomość właściwości fizycznych i mechanicznych materiałów budowlanych pozwala natomiast dobrać materiał gwarantujący zachowanie wymaganych nośności, trwałości i niezawodności projektowanego obiektu. Dobrze poznana oraz kreatywnie i poprawnie stosowana wiedza z zakresu inżynierii materiałowej, statyki i mechaniki budowli pozwala projektować i wznosić zarówno konstrukcje klasyczne jak i nowoczesne, konstrukcje zaprojektowane estetycznie i ekonomicznie, a także konstrukcje wyznaczające kierunki rozwoju i uznawane za rozwiązania wyjątkowe, innowacyjne i genialne.

Istota inżynierii, polegająca na sprawnym, efektywnym i poprawnym rozwiązywaniu zagadnień technicznych, wymaga od osoby zaangażowanej w ten proces pomysłowości, sprytu, inteligencji oraz wiedzy technicznej i naukowej. Łacińskie słowo *ingeniosus*, od którego pochodzi angielskie *engineer*, oznacza osobę uzdolnioną, obdarzoną

talentem, sprytną, pomysłową, kreatywną i rozwiniętą intelektualnie. A zatem, inżynier jako osoba pomysłowa, sprytna i inteligentna (osoba myśląca) zobligowany jest niejako do pomysłowego i kreatywnego wykorzystywania posiadanej wiedzy w celu skutecznego rozwiązywania problemów technicznych, projektowania konstrukcji trwałych, bezpiecznych, spełniających swe funkcje użytkowe i jednocześnie (jak to ma miejsce w największych dziełach inżynierii) wyróżniających się wdroną myślą techniczną oraz swym pięknem (estetyką). W zakresie inżynierii lądowej pomysłowość, spryt, inteligencja i talent inżyniera powinny objawiać się poprzez umiejętne łączenie zagadnień technicznych z zakresu inżynierii materiałowej, mechaniki budowli, geotechniki i geodezji z zagadnieniami z zakresu architektury. Wymaga to od inżyniera odpowiednio rozbudzonej świadomości (co, dlaczego i jak robię), wrażliwości, talentu oraz wiedzy i doświadczenia.

Szczególną dziedziną inżynierii lądowej, w której obowiązuje i z całą siłą objawia się kreatywność, spryt i talent inżynierski, jest inżynieria mostowa. Rozwój mostownictwa w szczególnym stopniu zależy od rozwoju inżynierii materiałowej (rozwój nowych i ulepszanie stosowanych materiałów budowlanych) oraz rozwoju metod obliczeniowych (wzrost dokładności analiz stanów wyężenia konstrukcji). Obiekty mostowe wraz z rozwojem nauki ewoluowały od kamiennych mostów kołatkowych (fot. 2)



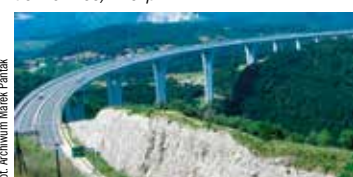
fol. Archiwum Marek Paliak

Fot. 2. Most kołatkowy w Parku Narodowym Dartmoor, Wielka Brytania



fol. Archiwum Marek Paliak

Fot. 3. Kamienny most łukowy w pobliżu Navacepeda del Tormes, Hiszpania



fol. Archiwum Marek Paliak

Fot. 4. Wiadukt Črni Kal w ciągu autostrady A1, Słowenia

Fot. 5. Podwieszony most autostradowy przez Odrę i jezioro Antoszowickie



fol. Archiwum Marek Paliak



fot. Archiwum Marek Pentlak

Fot. 6-7. Podwieszony most autostradowy przez Odrę i jezioro Antoszowickie



Fot. 8. Podwieszony most autostradowy przez Odrę i jezioro Antoszowickie

poprzez kamienne mosty łukowe (fot. 3) do imponujących konstrukcji wznoszonych z betonu z wykorzystaniem innowacyjnych technologii i metod budowy (fot. 4 i 1).

W dalszej części artykułu przedstawiono przykłady konstrukcji wyróżniających się spośród obiektów mostowych światła umiejętnym i kreatywnym wykorzystaniem zasad statyki i mechaniki budowli oraz swą innowacyjnością i estetyką.

Podwieszony most autostradowy przez Odrę i Jezioro Antoszowickie, Czechy

Obiekt zlokalizowany jest w ciągu autostrady D1 w pobliżu Ostravy. Przekracza Odrę i Jezioro Antoszowickie (fot. 5). Zaprojektowany został przez czeską firmę SHP Ltd. (Strasky, Husty and Partners Ltd.) jako betonowa, ciągła konstrukcja czternastoprzęsłowa, z przęsłem głównym o rozpiętości 105,0 m, podwieszonym do pojedynczego usytuowanego w osi mostu pylonu drążkowego o wysokości 46,8 m (mierzonej od górnej powierzchni płyty fundamentowej). Całkowita długość obiektu wynosi 605,6 m, łączna długość dwóch sąsiadujących ze sobą przęseł podwieszonych to 201,0 m. Most wyróżnia się dużą dbałością o rozwiązania detali architektonicznych (fot. 7-10) oraz nowator-

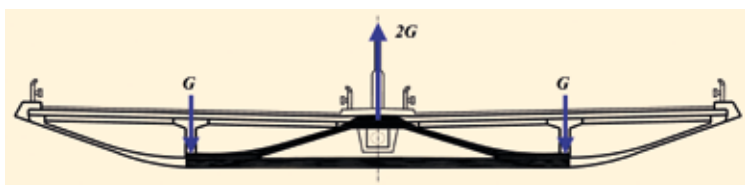
skim rozwiązaniem konstrukcyjnym pomostu pod dwie jezdnie autostrady D1, zastosowanym w obrębie przęseł podwieszonych (fot. 12, rys. 1, 2). Forma i jakość wykonania detali architektonicznych w obrębie przyczółków (fot. 7), filarów (fot. 9 a i 9 b), gzymsów (fot. 10) oraz pylonu (fot. 8) przykuwa uwagę i budzi podziw. Tak duża staranność zaprojektowania i wykonania detali jest rzadko spotykana w obiektach mostowych tej wielkości.

Pomost obiektu składa się z dwóch równoległych dźwigarów o wysokości 2,20 m, o przekroju skrzynkowym dwukomorowym z krzywoliniową płytą dolną (bez tradycyjnych bocznych wsporników podchodnikowych) (rys. 1). Całkowita szerokość pomostu zmienia się od 13,6 do 14,6 m. Przęsła dojazdowe wykonano z betonu C30/37, przęsła podwieszane z betonu C37/45. Pylon powyżej pomostu zaprojektowano jako zespolony stalowo-betonowy ze stalowym rdzeniem o przekroju skrzynkowym zespolonym z betonową obudową z betonu C60/75.

W obrębie mostów dojazdowych obiekt wykonano w postaci dwóch równoległych, rozdzielonych konstrukcji opartych na filarach pośrednich (fot. 11). W przęśle podwieszonym dźwigary skrzynkowe połączono belką podłużną z betonu C60/75 (wypełniająca przerwę między pomostami występującą w częściach dojazdowych) oraz dolną belką poprzeczną (fot. 12, rys. 1 i 2). Na całej długości belki górnej, połączonej monolitycznie z płytą pomostu, zaprojektowano bloki zakotwienia want rozmieszczone w rozstawie 6,07 m. Dolną belkę poprzeczną wprowadzono w przekrojach zakotwienia want.

Fot. 9-10. Podwieszony most autostradowy przez Odrę i jezioro Antoszowickie

Rys. 1. Trójkątny kratownicowy układ nośny przęseł podwieszonych [1]

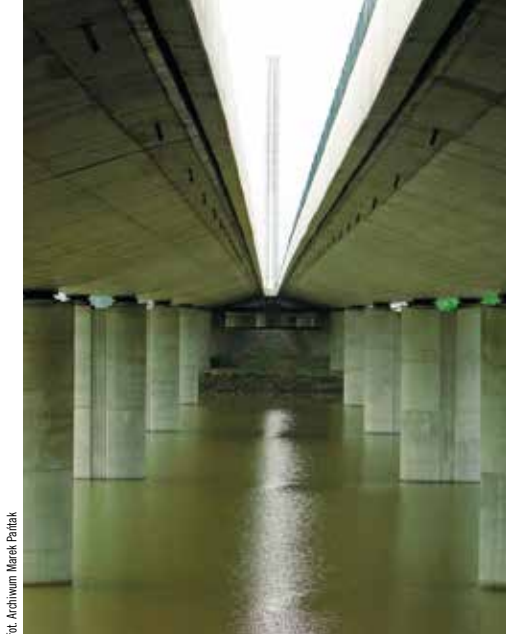


fot. Archiwum Marek Pentlak



fot. Archiwum Marek Pentlak





fol. Archiwum Marek Paitlak



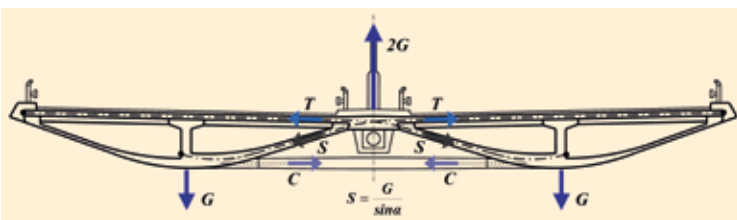
fol. Archiwum Marek Paitlak

Taki system połączenia dźwigarów tworzy wraz z bocznymi ściankami przekrojów skrzynekowych trójkątny układ kratownicowy zapewniający współpracę sąsiednich dźwigarów i właściwą sztywność skrętną układu podwieszonoego w jednej płaszczyźnie (rys. 1). Zastosowanie ażurowego systemu połączenia sąsiednich dźwigarów skrzynekowych za pomocą poprzecznej belki dole przynoszącej siły ściskające pozwoliło wyeliminować maszyną betonową płytę dolną łączącą sąsiednie dźwigary. Rozwiązanie takie korzystnie zredukowało ciężar własny przęsta podwieszonoego.

Działanie ciężaru własnego dźwigarów, obciążeń użytkowych oraz sił w wantach podwieszających pomost wywołuje rozciąganie bocznych ścianek przekroju skrzynekowego (rys. 2). W miejscu podwieszonoego want rozciągana jest również płyta pomostu monolitycznie połączona z górną belką podłużną i blokami kotwiącymi. Te niekorzystne dla betonu efekty zredukowane zostały dzięki zastosowaniu sprężenia w ściankach bocznych dźwigara skrzynekowego oraz w płycie pomostu (sprężenie poprzeczne). W zaprojektowanym rozwiązaniu sprężenie płyty pomostu dźwigara lewego przechodzi płynnie w sprężenie ścianki bocznej dźwigara prawego i odwrotnie. Odpowiednio przyjęta trasa sprężonoego oprócz redukcji rozciągania sprężonoego elementów pozwoliła także zredukować siły poprzeczne w zakotwienieniach want. Dodatkowo użycie trójkątnego kratownicowego układu nośnego

skutecznie redukuje siły ścinające występujące w centralnym środku przekroju skrzynekowego. W celu przeniesienia przęstowych i podporowych momentów zginających skrzynekowe dźwigary mostu

Fot. 11-12.



Rys. 2. Układ sprężonoego i rozkład sił w dźwigarach głównych w obrębie przęst podwieszonoego (G – ciężar własny dźwigara, T – siła rozciągająca w płycie pomostu, C – siła ścinająca w belce dolnej, S – siła rozciągająca w ściankach bocznych) [2]

sprężonoego również w kierunku podłużnym prostoliniowymi kablami przyczepnościowymi umieszczonoymi i zakotwionoymi w centralnym środku przekroju skrzynekowego oraz zewnętrznymi krzywoliniowymi kablami bez przyczepności połączonoymi z dźwigarami za pośrednictwem betonowych bosaży.

Most nagrodzony został w Czechach licznymi nagrodami branżowymi (tytuł Mostowego Dzieła Roku 2007, tytuł Budowy Roku 2008, nagroda ministerstwa transportu (2008), pierwsze miejsce w konkursie na najlepszą budowę kraju morawsko-śląskiego oraz tytuł Najlepszej Inwestycji roku 2007). Liczba tych nagród najlepiej świadczy o znaczeniu i randze dzieła.

Kładka dla pieszych w Kelheim, Niemcy

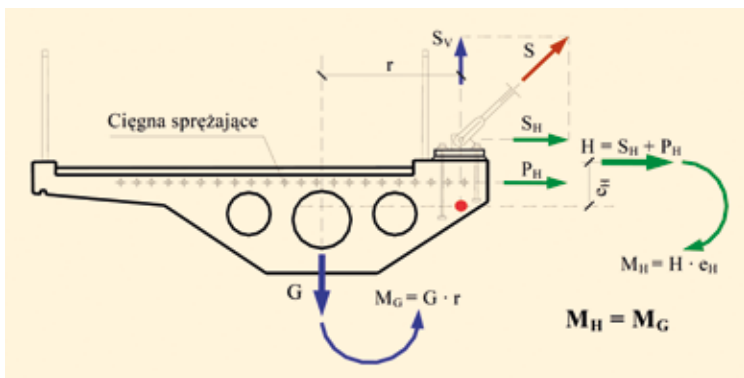
Kolejnym przykładem pomysłowości i umiejętnego wykorzystania wiedzy inżynierskiej jest odznacza-

Fot. 13-14. Kładka dla pieszych w Kelheim



fol. Archiwum Marek Paitlak

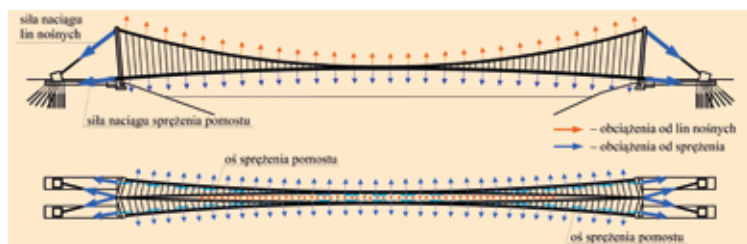
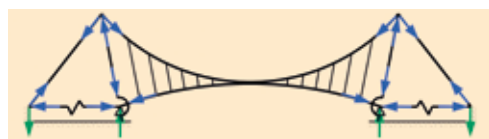




Rys. 3. Rozkład sił w obrębie mimośrodowo podwieszonego przęsla kładki [2]

jąca się dużymi walorami estetycznymi kładka dla pieszych w bawarskim mieście Kelheim (fot. 13, 14). Projektanci obiektu (Schlaich Bergermann und Partner, Ackermann und Partner) dowiedli, że nauka jest doskonałym narzędziem do tworzenia wybitnych dzieł inżynierii, a złożona geometria konstrukcji może być jej dużym atutem.

Rys. 4. Schemat samokotwiącego się układu konstrukcyjnego kładki [2]



Rys. 5. Rozkład sił generowanych przez naciąg lin nośnych i sprężenie pomostu [2]

Kładka przeprowadza ruch pieszych i rowerzystów nad kanałem Ren-Men-Dunaj. Jest konstrukcją wiszącą ze sprężonym betonowym pomostem podwieszonym mimośrodowo do pojedynczej liny nośnej podtrzymywanej przez dwa stalowe pylony pochylone w kierunku pomostu.

Sprężony pomost kładki, ukształtowany w planie w łuku, eliptyczny, o promieniu $18,89 \div 37,79$ m, został podwieszony wzdłuż wewnętrznej krawędzi łuku do liny nośnej za pomocą odchylonych od pionu wieszaków. Geometria liny, kąt pochylecia wieszaków oraz siły ich naciągu zostały dobrane tak, by pionowe składowe tych sił SV równoważyły ciężar własny pomostu G (rys. 3). Dodatkowo, pozioma

Fot. 15. Kładka dla pieszych nad jeziorem Vranov

składowa siły naciągu wieszaków SH oraz siła pozioma PH pochodząca od cięgien sprężających pomost rozmieszczonych w łuku poziomym, w pobliżu górnych włókien przekroju, wywołują moment MH pozwalający zrównoważyć moment skręcający od pozostałych obciążeń pionowych. Podczas użytkowania kładki przez pieszych przy wzroście obciążeń pionowych wzrastają również wartości sił naciągu w wieszakach. Równowaga sił zostaje zachowana. Układ równoważy się samoczynnie.

Odpowiedni dobór geometrii pomostu, jego przekroju poprzecznego oraz sił w wieszakach i miejsc ich przyłożenia zapewnił wymaganą stateczność i nośność konstrukcji, która na pierwszy rzut oka (oka niedoświadczonego) nie ma prawa funkcjonować. Podobną grę sił i obciążeń odnaleźć można również w konstrukcji kładki dla pieszych nad jeziorem Vranov w Czechach.

Kładka dla pieszych nad jeziorem Vranov, Czechy

Kładka wybudowana w 1993 r. w pobliżu miejscowości Vranov nad Dyji wyróżnia się spośród obiektów mostowych wyjątkową estetyką i nowatorskimi rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Projektantem kładki jest uznany czeski projektant Jiří Stráský z firmy SHP Ltd., wspomnianej już wcześniej przy okazji pierwszego z prezentowanych w artykule obiektów. Konstrukcja zaprojektowana została jako wisząca z betonowym pomostem sprężonym wykonanym z elementów prefabrykowanych w łuku pionowym (kołowym) o promieniu 1514,69 m. Dwie liny nośne umieszczono w rurach stalowych wypełnionych iniektem cementowym. Rozpiętość przęsla kładki wynosi 252,0 m. Strzałka zwisu liny nośnej wynosi 18,0 m, strzałka łuku pionowego pomostu 5,0 m.

W obiekcie wdrożono szereg skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych zapewniających konstrukcji dużą nośność i sztywność w kierunkach pionowym i poziomym oraz czyniąc ją odporną na oddziaływania dynamiczne wiatru i pieszych.

W celu zapewnienia wewnętrznej równowagi sił w konstrukcji pylony kładki połączono z blokami kotwiącymi liny nośne za pośrednictwem betonowych belek ukrytych w gruncie pod ścieżkami doprowadzającymi ruch pieszych do pomostu kładki (rys. 5). Rozwiązanie takie, przedstawione schematycznie na rys. 4, tworzy wraz z elementami pomostu i napiętą liną nośną zamknięty, samokotwiący się układ konstrukcyjny. W celu osiągnięcia pożąda-



nego efektu wymagane było jednak dobranie odpowiednich sił naciągu lin nośnych oraz geometrii i sił działających w pomoście kładki. W tym celu pomost zaprojektowano jako sprężony, w łuku pionowym oraz o zmiennej szerokości zwiększającej się od środka rozpiętości przęsła w kierunku przyczółków (szerokość użytkowa wzrasta z 3,40 – 6,60 m). Przy napiętych cięgnach sprężających umieszczonych w pomoście krzywoliniowa geometria pomostu sprzyja powstawaniu pionowych i poziomych sił składowych od sprężenia, które wraz z siłami pochodzącymi od lin nośnych stabilizują konstrukcję, zapewniając jej dużą sztywność giętą i skrętną (rys. 5). Stabilizacji tej sprzyja również nietypowy układ dwóch lin nośnych. Liny te na pylonach zbliżone są do osi podłużnej pomostu, natomiast w środku przęsła połączone są z bocznymi krawędziami pomostu. Wpływa to na powstawanie sił poziomych, które łącznie z siłami poziomymi pochodzącymi od cięgien sprężających pomost (ciągną te ułożone są w łuku poziomym i pionowym) usztywniają pomost w kierunku poprzecznym.

Powyższy system konstrukcyjny jest również z powodzeniem stosowany w linowych i membranowych przykryciach dachowych, w których połączone ze sobą liny o przeciwnych krzywiznach (liny wklęsłe i wypukłe) stabilizują się wzajemnie, zapewniając odpowiednią sztywność i nośność konstrukcji.

Wisząca kładka w Kelheim (1988 r.) oraz kładka nad jeziorem Vranov (1993 r.) są obiektami znanymi od lat i podziwianymi przez nowe pokolenia projektantów obiektów mostowych. W ostatnim okresie dołączyły do nich również podwieszony most autostradowy nad Jeziorem Antoszowickim (2007 r.). Konstrukcje te dzięki swej innowacyjności oraz wystudiowanej i estetycznej formie w pełni zastępują na podziw i naśladowanie zawartych w nich myśli technicznych i idei.

Przytoczone przykłady obiektów mostowych uznawane są za wybitne osiągnięcia mostownictwa. Do ich powstania przyczyniła się pomysłowość, kreatywność i odpowiednia świadomość ich twórców (inżynierów) oraz ich wiedza, którą zdobyli w drodze



foto: Archiwum Marek Pańtak

nauki, obserwacji i studiów. Nie bez znaczenia są tu również możliwości, jakie stwarza wykorzystany w nich materiał i technologia (beton i sprężenie). Podsumowaniem powyższych rozważań niech będą słowa niemiecko-amerykańskiego psychologa Kurta Lewina: „*There is nothing more practical than a good theory*” (Nie ma nic bardziej praktycznego niż dobra teoria). Życzyc wszystkim wypada, by inżynierowie budownictwa w dalszym ciągu tak pomysłowo i kreatywnie wykorzystywali osiągnięcia nauki w swej praktyce zawodowej. Ciągły rozwój inżynierii stwarza w tym zakresie duże możliwości.

Fot. 16. Kładka dla pieszych nad jeziorem Vranov

dr inż. Marek Pańtak
Politechnika Krakowska

Institut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych

Literatura

- 1 Stráský J., Konečný L., Novák R., Romportl T.: *Projekt zavěšeného mostu přes Odru (Design of the cable-stayed bridge across the Odra river)*, *Beton: Technologie, Konstrukce, Sanace*, 4/2008, s. 10-15.
- 2 Stráský J., *The power of prestressing*, *Structural Concrete*, vol. 4, nr 1, 2003, s. 25-43.
- 3 Stráský J., *Design-construction of Vranov lake pedestrian bridge*, *PCJ Journal*, vol. 42, nr 6, 1997, s. 60-75.



foto: Archiwum Marek Pańtak

Fot. 17. Kładka dla pieszych nad jeziorem Vranov