

Dzieła z betonu

– mosty i wiadukty Europy

cz. 1 – rys historyczny

Historia, wiedza, rozwój i postęp

Od najdawniejszych czasów różne wynalazki i idee wpływają na zmianę warunków życia człowieka. Niektóre z nich przetrwały próbę czasu, inne popadły w zapomnienie, jednakże wszystkie one w równym stopniu składają się na historię rozwoju cywilizacji. Znajomość tej historii pozwala zrozumieć procesy wpływające na rozwój współczesnego świata, niejednokrotnie zmienia światopogląd i przekonania poznających ją osób, poszerza ich horyzonty myślowe i pozwala im dostrzec nowe obszary działania. Ważne miejsce w tej historii zajmuje rozwój dyscyplin technicznych i inżynierii. Technika stanowi bowiem jeden z zasadniczych składników cywilizacji i kultury.

Wiedza techniczna dotycząca budownictwa jest jedną z najdłużej rozwijanych dziedzin życia. Ma historię tak długą, jak dzieje cywilizacji. Zagadnienia z nią związane, poza oczywistym aspektem technicznym, dotyczą również kwestii społecznych, ekonomicznych i kulturowych [1]. Umiejętne wykorzystywanie tej wiedzy odgrywa istotną rolę w procesie rozwoju społeczeństwa, gospodarki i cywilizacji. Istotna, a być może wręcz kluczowa dla zapewnienia rzeczoności rozwoju jest również znajomość historii rozwoju tej wiedzy, a także świadomość wpływu owej historii na działania podejmowane współcześnie. Zaryzykować można stwierdzenie, że postęp techniczny bez znajomości

historii rozwoju techniki i inżynierii skazany jest na nieuniknione spowolnienie i stagnację bądź regres. Szczególnym obszarem działalności wykorzystującym osiągnięcia techniki i inżynierii, wypracowane w drodze wielopokoleniowych doświadczeń i badań naukowych, jest mostownictwo. Wśród licznych typów obiektów mostowych na specjalną uwagę zasługują obiekty betonowe wznoszone z materiału określanego mianem „kamienia współczesności”, stworzonego przez człowieka i udoskonalanego od pokoleń w celu dorównania najtrwalszym i najbardziej wytrzymałym materiałom naturalnym. Rozwój technologii betonu i metod projektowania konstrukcji betonowych wywarł i nadal wywiera duży wpływ na rozwój społeczeństw, gospodarek i cywilizacji.

Dzięki poznaniu i wykorzystywaniu zasad zbrojenia i sprężania betonu, dzięki opracowaniu technologii podwieszania przęseł do pylonów oraz dzięki nieustannemu postępowi w zakresie inżynierii materiałowej mosty betonowe ewoluowały od obiektów o rozpiętości kilku metrów do obiektów pokonujących przeszkody kilkusetmetrowe.

Analiza rozwoju mostownictwa i jego największych osiągnięć, szczególnie w zakresie obiektów betonowych, stwarza okazję do poznania istotnych dokonań minionych epok oraz zaobserwowania przebiegu rozwoju wiedzy technicznej. Uważnemu czytelnikowi zapewne pozwoli również dostrzec rolę i znaczenie historii rozwoju techniki w codziennej działalności inżynierskiej i związek współczesnej wiedzy technicznej ze spuścizną minionych epok oraz z aspektami społecznymi, ekonomicznymi i kulturowymi życia codziennego.

Spoiva cementowe – ich rozwój i znaczenie

Jednym z istotnych osiągnięć cywilizacji było opracowanie procedur produkcji spoiw cementowych. Historia opanowania tej cennej umiejętności w krótkim chronologicznym ujęciu przedstawia się następująco [2, 9]:

- około 10 000 000 lat p.n.e. – w wyniku reakcji między skałą wapienną i roponośnymi łupkami (po ich samozapłonie) powstały naturalne złoża cementu odkryte w Izraelu i opisane przez geologów w latach 60 i 70 XX w.
- 9000 lat p.n.e. – wypalanie gipsu w Çatal Hüyük, (dzisiejsza Turcja)
- 7500 lat p.n.e. – wytworzenie cementu na dnie prehistorycznej jaskini wapiennej w miejscu paleniska. Najprawdopodobniej skutek przypadkowego zmieszania wody, pyłu wapiennego i popiołu
- 7000 lat p.n.e. – podłogi i fragmenty ścian w budowlach w miejscowości Yiftah El (południowa Galilea, Izrael) wykonane z betonu ze

Tab. 1. Pierwsze realizacje mostów betonowych i żelbetonowych

Nazwa/Lokalizacja	Projektant	Rok	Kraj	Rozpiętości przęseł [m]
Most w Souillac (beton niezbrojony)	L. Vicat	1825	Francja	22,0
Kładka w ogrodzie w botanicznym w Grenoble (beton niezbrojony)	L. Vicat	1855	Francja	~ 6,0
Most w Chazelet (beton zbrojony)	J. Monier	1875	Francja	13,8
Most w Bremen (beton zbrojony)	G. Wayss	1890	Niemcy	40,0
Kładka we Lwowie	M. Thulie	1894	Polska	11,0
Most Stauffacher w Zurychu (beton zbrojony)	R. Maillart	1899	Szwajcaria	40,0
Most Camille de Hogues w Châtellerauld (beton zbrojony)	F. Hennebique	1900	Francja	40,0+50,0+40,0
Kładka Mativa w Liège (beton zbrojony)	F. Hennebique	1905	Belgia	15,0+50,0+15,0
Pont de la Mescla w Malaussène (beton zbrojony)	F. Hennebique	1909	Francja	60,0
Most w Verde (beton zbrojony)	E. Freyssinet	1910	Francja	64,0+72,0+64,0
Most Risorgimento w Rzymie (beton zbrojony)	F. Hennebique	1911	Włochy	100,0
Most Boutiron w Vichy (beton zbrojony)	E. Freyssinet	1912	Francja	67,5+72,5+62,5

spoiwem wapiennym i kruszywem z rozdrobnionego wapienia

- 5600 lat p.n.e. – podłogi chat rybackich w miejscowości Lepenski Vir (Serbia) wykonane z betonu ze spoiwem wapiennym
- 3000 lat p.n.e. – Egipcjanie wykorzystują muł z domieszką słomy do zespalania cegieł. Wykorzystywanie zaprawy gipsowej i wapiennej do budowy piramid
- 800 lat p.n.e. – Grecy, Kreteńcy i Cypryjczycy znają i wykorzystują zaprawę wapienną znacznie mocniejszą niż późniejsze zaprawy rzymskie
- 700 do 200 lat p.n.e. – Chińczycy wykorzystują zaprawę cementową do łączenia bambusowych części w łodziach oraz do łączenia kamiennych bloków w Wielkim Murze
- 300 lat p.n.e. – Babilończycy i Asyryjczycy wykorzystują bitumy (smoła ziemna) do zespalania kamieni i cegieł
- 300 lat p.n.e. do 476 r. n.e. – Rzymianie wykorzystują cement pucolanowy z Pozzuoli, Włochy (okolice Vezuwiusza), do budowy Drogi Appijskiej (Via Appia Antica, Appian Way), Koloseum (rys. 1), Panteonu (rys. 2), akweduktu Pont du Gard, łaźni i wielu innych konstrukcji
- 1200 – 1500 – okres średniowiecza – pogorszenie jakości spoiw cementowych, zaprzestanie wykorzystywania wapna i pucolan
- XVIII w. – renesans spoiw cementowych – wzrost zapotrzebowania na dobre spoiwo budowlane w związku z rozwojem przemysłu i komunikacji
- 1729 r. – słowo „béton” zostaje użyte po raz pierwszy przez Bernard Forest de Bélidor na łamach „La Science des Ingénieurs”
- 1754 r. – Anglik John Smeaton, budowniczy latarni morskiej Eddystone koło Plymouth po zmieszaniu wapna, glinu, tufów wulkanicznych oraz pucolan stworzył wapno hydrauliczne, będące w rzeczywistości naturalnym cementem, wiążące także pod wodą
- 1818 r. – Francuz Luis Vicat publikuje wyniki swych badań cementu naturalnego. Materiał stworzony na bazie cementu naturalnego miał jednak istotną wadę: stosunkowo małą wytrzy-

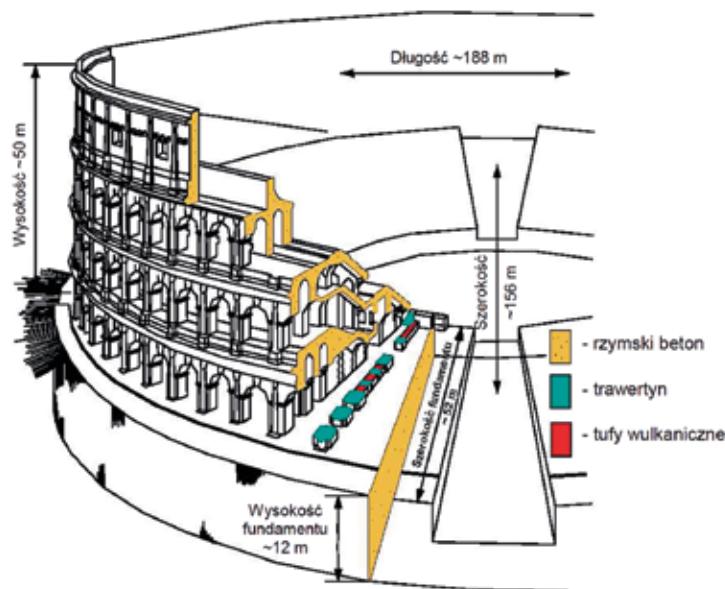
Tab. 2. Współczesne mosty betonowe dużej rozpiętości

Nazwa/Lokalizacja	Kraj	Rozpiętość przęsa głównego [m]
Mosty podwieszane		
Centennial Bridge	Panama	420,0
ANZAC Bridge	Australia	345,0
Guadiana International Bridge	Hiszpania/Portugalia	324,0
Most Rędziński	Polska	256,0
Bandra-Worli Sea Link	Indie	250,0
Kien Bridge	Wietnam	200,0
Mosty extradosed		
Jiayue Bridge	Chiny	250,0
Most autostradowy pod Kwidzynie	Polska	204,0
Sunniberg Bridge	Szwajcaria	140,0
Most MA 532 w Mszanie	Polska	130,0
Mosty i wiadukty łukowe		
Wanxian Bridge	Chiny	420,0
Krk Bridge	Chorwacja	416,0
Zhaohua Jialing River Bridge	Chiny	364,0
Wiadukt Froschgrundse	Niemcy	270,0
Los Tilos Arch	Hiszpania	255,0
Wiadukt w ciągu drogi S69 w Miłówcze	Polska	103,8
Mosty i wiadukty ramowe i belkowe		
Shibanpo Bridge	Chiny	330,0
Stolmasundet Bridge	Norwegia	301,0
Raftundet Bridge	Norwegia	289,0
Most autostradowy pod Grudziądzem	Polska	180,0
Most Południowy w Kędzierzynie-Koźlu	Polska	140,0
Most im. Armii Krajowej w Grabowcu k. Torunia	Polska	130,0

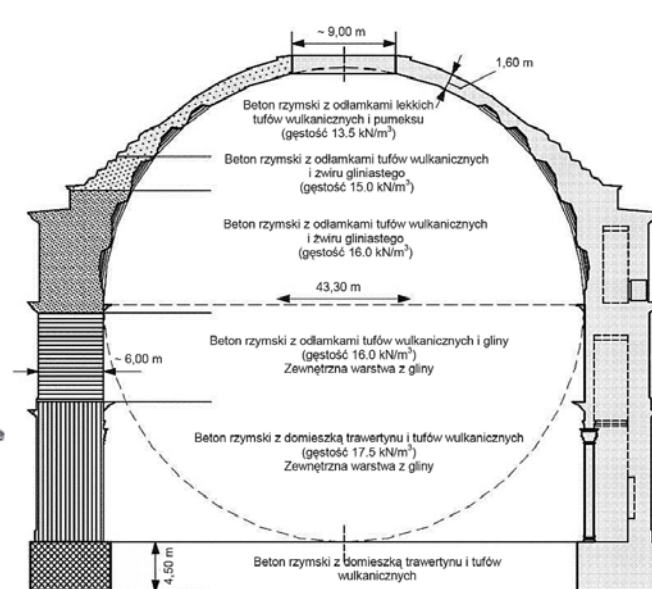
małość, gdyż wypalano go w zbyt niskiej temperaturze

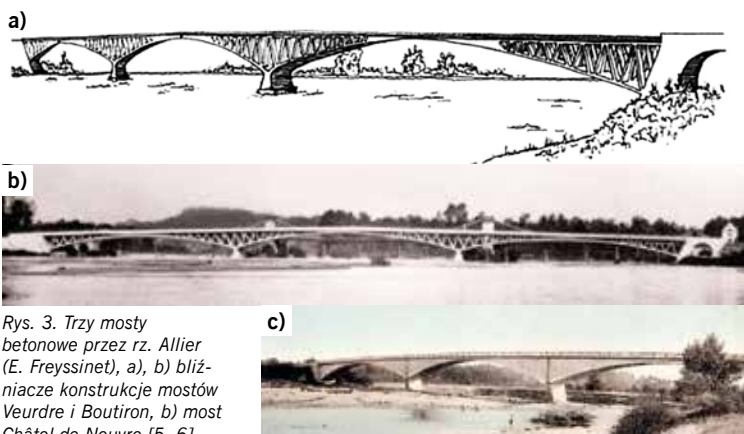
- 1824 r. – Anglik Joseph Aspdin, przedsiębiorca i murarz, opatentował cement portlandzki i rozpoczął jego produkcję w małej fabryce w Wakefield. Jego syn ulepszył cement portlandzki i zainicjował jego wytwarzanie w Niemczech i we Francji
- 1845 r. – Izaak Johnson poddaje mieszankę gliny i wapna procesowi topienia i spiekania, doбира odpowiednią temperaturę prażenia, ustala najbardziej korzystne proporcje składników, co daje produkt o bardzo dobrych właściwościach wiążących

Rys. 1. Koloseum, Rzym – zakończenie budowy 80 r. n.e. [2]



Rys. 2. Panteon, Rzym - rozpoczęcie budowy 27 r. p.n.e. [2]





Rys. 3. Trzy mosty betonowe przez rz. Allier (E. Freyssinet), a), b) bliźniacze konstrukcje mostów Veudre i Boutiron, c) most Châtel de Neuvre [5, 6]

– od połowy XIX w. cement portlandzki rozpowszechnia się w Europie. W 1857 r. w Grodźcu pod Będzinem Jan Ciechanowski uruchamia produkcję cementu portlandzkiego w Polsce (piąta cementownia na świecie).

Stosowany przez wieki kamień dał się poznać jako dobry, wytrzymały na ściskanie i trwały materiał budowlany o wielkich walorach architektonicznych. Zachowane do dnia dzisiejszego niektóre starożytne konstrukcje, w tym także mosty i akwedukty, świadczą niezbicie, że trwałość budowli kamiennych przy ich należyтым wykonaniu jest praktycznie nieograniczona, a koszt utrzymania znikomo mały. Mimo tych dużych walorów i wysokiego poziomu wykonawstwa osiągniętego na przełomie XIX i XX w., konstrukcje kamienne nie wytrzymały rywalizacji z konstrukcjami stalowymi i betonowymi, tak pod względem ekonomicznym jak i czasu budowy oraz osiąganych rozpiętości. Wielką przewagę ekonomiczną konstrukcji betonowych nad kamiennymi uwiłocznł w 1911 r. francuski inżynier Eugène Freyssinet. Wybudował on wspólnie z przedsiębiorcą François Mercierem trzy mosty betonowe przez rz. Allier (most Veudre 1910-1911 r., most Boutiron 1912-1913 r., Châtel de Neuvre 1914-1923 r.) (rys. 3), każdy o długości ponad 200 m, za cenę ustaloną na wykonanie jednego z tych mostów w wersji kamiennej [3].

Nowa era

– konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone

Powstanie i rozwój przemysłu cementowego w XIX w. umożliwił wprowadzenie do budownictwa, na szeroką skalę, nowych materiałów – betonu i następnie betonu zbrojonego (żelbetu). Wynalezienie cementu portlandzkiego (Joseph Aspdin – 1824) oraz rozpoczęcie masowej jego produkcji, opartej na naukowych podstawach, stworzyło w drugiej połowie XIX w. pełne możliwości wykorzystywania betonu.

Pierwsze próby budowy betonowych mostów przeprowadzono już na początku XIX w.

W początkowym okresie mosty te budowano w formie pełnych sklepień z murami czołowymi i zasypką, wzorując się na rozwiązaniach sklepionych mostów kamiennych. Betonowe mosty sklepione stanowiły postęp głównie od strony wykonawstwa. Odpadała bowiem pracochłonna obróbka i transport bloków kamiennych. Do budowy można było wykorzystać miejscowe tanie materiały (żwir i piasek). Łatwiej też można było nadać budowli kształt, dostosowany do wymagań wytrzymałościowych i sytuacyjnych. Z drugiej jednak strony, monolityczne sklepienia betonowe były bardziej od kamiennych wrażliwe na wpływy zmian temperatury i przemieszczenia podpór oraz skurcz.

W rozwiązaniach betonowych największe rozpiętości przeseł można było osiągnąć przy stosowaniu dźwigarów łukowych. Wynikało to z korzystniejszych niż w dźwigarach zginanych (belkowych lub ramowych) warunków pracy betonu. Należy tu pamiętać o podstawowych cechach wytrzymałościowych betonu: wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie. Przykładowo dzisiejszy beton klasy C35/45 odznacza się charakterystyczną wytrzymałością na ściskanie $f_{ck} = 35,0$ MPa oraz średnią wytrzymałością na rozciąganie $f_{ctm} = 3,2$ MPa. Tak mała wytrzymałość betonu na rozciąganie (ponaddziesięciokrotnie mniejsza od wytrzymałości na ściskanie) przyczynia się do łatwego powstawania rys w elementach betonowych narażonych na działanie naprężeń rozciągających.

Jeden z pierwszych betonowych mostów belkowy został zaprojektowany przez Louisa Vicata w Grenoble w 1855 roku (rys. 4).

Możliwości stosowania betonu, ograniczone początkowo do budowy mostów sklepionych i podpór mostowych (konstrukcji pracujących na ściskanie), rozszerzyły się wkrótce dzięki zastosowaniu zbrojenia betonu, obejmując dziedzinę budowy mostów płytowych, belkowych i ramowych.

Początki stosowania betonu zbrojonego sięgają połowy XIX w., kiedy to:

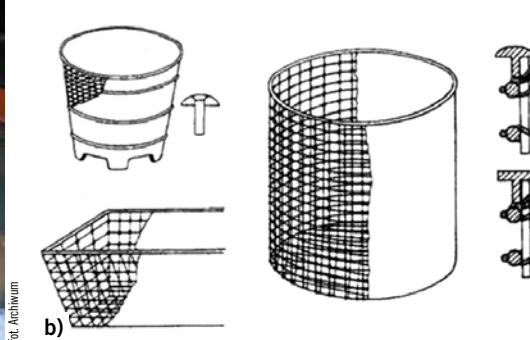
- Joseph Luis Lambot (Francja) wykonał łódź betonową zbrojoną siatką żelazną – 1848 r. (rys 5a)
- Joseph Monier, francuski hodowca roślin, poszukując nowych rozwiązań w celu produkcji trwałych donic na ozdobne palmy (donice dębowe były rozsadzane przez korzenie), wykonał klatkę z drutu i załął ją cementem (rys. 5b). W latach 1867-1873 Monier uzyskał szereg patentów na zbiorniki, rury i mosty z betonu zbrojonego (rys. 6)
- Thaddeus Hyatt (USA) przeprowadził badania na belkach z betonu zbrojonego.

Rys. 4. Most belkowy projektu Luisa Vicata, Francja, 1855 r. – miejsce ekspozycji: ogród botaniczny, Grenoble, Francja [7]





a)



b)

Rys. 5. Konstrukcje żelbetowe a) łódź Lambota, b) wazonny kwiatowe Moniera [8, 10]

Pierwszy most betonowy zbrojony według patentu Moniera zbudowano w 1875 r. w Chazelet (rys. 6). Bezpośrednim bodźcem do budowy całego szeregu mostów z betonu zbrojonego stała się jednak dopiero wystawa w Bremie w 1890 r., na terenie której zbudowano pokazową kładkę dla pieszych o rozpiętości sklepienia 40,0 m, strzałce 4,5 m, grubości w kluczu 25 cm i na węzłowiach 55 cm (rys. 7).

Wprowadzenie do wnętrza elementów betonowych wiotkich prętów stalowych okazało się doskonałym sposobem na zwiększenie nośności elementów oraz odporności betonu na zarysowanie. Pręty te umieszczane w strefie podlegającej rozciąganiu pozwalają przenieść działające siły rozciągające.

W miarę postępu badań i rozwoju teorii obliczeń powstają nowe, bardziej poprawne ekonomicznie i właściwe dla betonu zbrojonego formy kształtowania ustrojów oraz sposoby zbrojenia. Duży wpływ wywarły tu prace François Hennebique'a (Francja 1892 – zbrojenie za pomocą cienkich prętów okrągłych) i Josepha Melana (Austria 1892 – zbrojenie sztywne w formie kratownic z żelaza profilowanego). Hennebique podał schemat zbrojenia belek niewiele różniący się od stosowanego obecnie. Zaproponował zbrojenie składające się nie tylko z prętów podłużnych, ale również ze strzemion i prętów odgiętych. Poprawność rozwiązania potwierdziły dalsze prace badawcze i teoretyczne. Według jego patentu powstały liczne mosty betonowe o dużych i bardzo dużych, jak na ówczesne czasy, rozpiętościach (tab. 1). Na terenie Polski pierwszy doświadczalny most z betonu zbrojonego zbudowano w 1892 r. w Warszawie [4]. Jak pisze J. Nechay w [4]: „Miał on podobno 8,0 m rozpiętości, 0,80 m strzałki łuku, 8 cm grubości w kluczu i 12 cm w węzłowiach. Przy obciążeniu próbnym pierwsza rysa pojawiła się przy $q = 2075 \text{ kg/m}^2$. Niestety nie udało mi się zebrać wiadomości, gdzie ten mostek wybudowano i czy się dotąd zachował”.

W dobrym stanie zachował się natomiast drugi most dla pieszych, zbudowany w 1894 r. w ogrodzie Politechniki Lwowskiej, z okazji odbywającej się w tym czasie we Lwowie Wystawy Krajowej. Obiekt ten, zaprojektowany przez prof. Maksymiliana Thullie,



foto. Archiwum



foto. Archiwum

Rys. 6. Most Chazelet, 1875 r. zbrojony wg patentu J. Moniera – rozpiętość 13,8 m, Chazelet, Francja [8, 9]



foto. Archiwum

Rys. 7. Kładka dla pieszych w Bremen wg projektu G. Wayssa, Niemcy, 1890 r. [11]

wybudowany został przez przedsiębiorstwo „J. Sosnowski i A. Zachariewicz”, które posiadało licencję francuskiej firmy Hennebique'a oraz monopol na roboty z zakresu betonu zbrojonego w ówczesnej Galicji [3]. Na zdjęciu 8 widoczna jest kładka po remoncie wykonanym przez firmę Sika Polska w 2004 r.

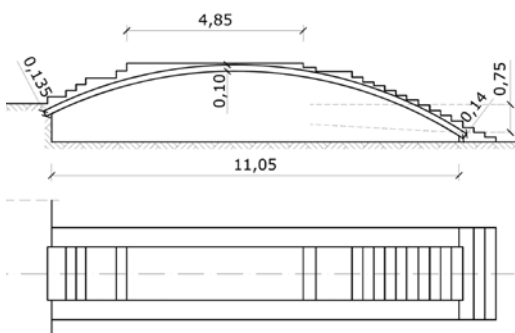
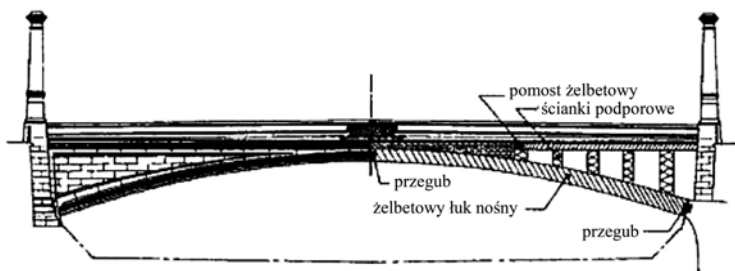


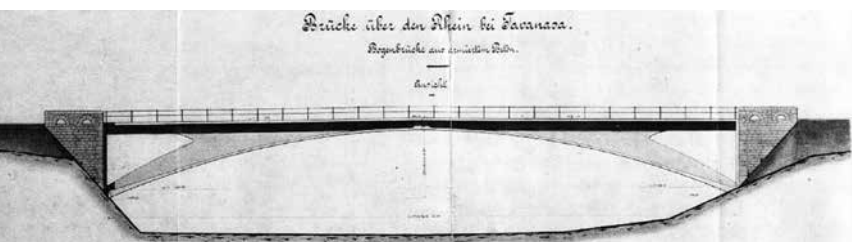
foto. Archiwum

Rys. 8. Eksperymentalna żelbetowa kładka dla pieszych projektu Maksymiliana Thullie, Lwów, 1894 r.



Rys. 9. Most Stauffacher nad rz. Sihl w Zurichu, 1899 r., R. Maillart [12, 13]

Wielkim twórcą i innowatorem konstrukcji żelbetowych był również znakomity konstruktor szwajcarski Robert Maillart. Swoją pierwszy most Maillart zbudował w 1899 r., pracując jeszcze jako asystent u Hennebique'a. Był to niewielki most łukowy Stauffacher o rozpiętości 40,0 m, nad rzeką Sihl w Zurichu [12]. Choć zastosowano w nim tradycyjną formę mostów łukowych, kamienną okładzinę, ozdoby i motywy dekoracyjne, most Stauffacher to w rzeczywistości smukły łuk betonowy trójprzegubowy.



Rys. 10. Most Tavana – 1905 r. (rozpiętość 51,0 m) [11]

W późniejszych dziełach Maillart zadziwiał lekkością, prostotą i ściśle funkcjonalnym kształtem swoich rozwiązań. Od swych mistrzów przejął główną ideę kształtowania konstrukcji, głoszącą, iż forma dzieła inżynierskiego musi wynikać i śledzić przebiegi sił [13]. W ten sposób, konsekwentnie kształtował własne dzieła. Starając się dociec przyczyn zarysowań betonu, które pojawiły się na ścianach czołowych mostu Zuoz, w kolejnym swoim dziele, moście Tavana (1905 r.), zlikwidował te powierzchnie wprowadzając trójkątne wycięcia i uzyskując nowy wyraz estetyczny (most zniszczony przez lawinę kamienną w 1927 r.)

Ideę tę Maillart z powodzeniem wykorzystuje również w wielu późniejszych swych obiektach. Jednym z najbardziej znanych jest most Salginatobel koło Scheirs.

Maillart był jednym z czołowych pionierów szkoły kształtowania ustrojów betonowych, dążącej do pełnego wyzyskania właściwości mechanicznych i plastycznych stosowanego tworzywa. W latach 1911-1933, wykorzystując beton w sposób mistrzowski, rozwijał i realizował nowatorskie obiekty składające

się z wiotkich łuków współpracujących ze sztywnym pomostem. Uzyskał w ten sposób zmniejszenie ciężaru własnego mostu i nowe spojrzenie na estetykę betonowych mostów łukowych [13].

Śledząc rozwój mostownictwa betonowego nie sposób pominąć wspaniałą konstrukcję mostu Plougastel (rozpiętości przęsła 3x186,4 m), której twórcą jest wspomniany już wcześniej Eugène Freyssinet. Tym mostem Freyssinet pobił wszystkie rekordy w zakresie budowy mostów z betonu zbrojonego. Znaczenie historyczne mostu Plougastel polega także na tym, że przy jego budowie Freyssinet wykonał badania nad pęczaniem betonu, uwiarygodnił rząd jego wielkości i przekonał innych o jego znaczeniu.

Łuki mostu otrzymały przekrój skrzynkowy trójkomorowy o stałej szerokości 9,5 m i grubości zmieniającej się od 5,1 m w kluczu do 9,0 m przy wezłowiach. Dwa pomosty mostu (górny drogowy, dolny kolejowy) łączą się w kluczach łuków z ich komorą środkową. Na odcinkach między kluczami połączone są ze sobą żelbetowym skratowaniem i oparte na poprzecznych ściankach nadłuczca.

Opisany ustrój mostu zwyciężył w ostrej rywalizacji z rozwiązaniami stalowymi, dzięki ekonomicznemu i śmiałemu rozwiązaniu problemu rusztowań. Trzy przęsła mostu zabetonowano kolejno przy użyciu tych samych drewnianych kratowych krążyn. Krążyny osadzono na pływających, betonowych kesonach połączonych stalowymi ściągniętymi i transportowano kolejno z przęsła do przęsła w miarę postępu budowy. Łuki wykonywano odcinkami, które wciągano do współpracy z krążynami przy przenoszeniu ciężaru kolejnych sekcji. Oddzielenie od krążyn przeprowadzono przez rozparcie połówek łuków siłownikami hydraulicznymi umieszczonymi w kluczu. W powstałej szczelnie wykonywano ostatni fragment łuku. Rozpieranie łuków pozwalało zniwelować efekt skurczu i pęczania betonu (po raz pierwszy technikę rozsuwania dwóch części łuku Freyssinet wypróbował na moście Veudre (rys. 3), przewidując wystąpienie wcześniej nieznanego inżynierom zjawiska pęczania betonu.

Wieloletnie badania prowadzone przez Freyssineta nad fizycznymi właściwościami betonu pozwoliły mu wyjaśnić istotę i przyczyny pęczania betonu oraz pozwoliły rozwinąć ideę sprężania betonu. Freyssinet sformułował wnioski mówiące, iż praktyczna realizacja pomysłu sprężania betonu (idea sprężania sięga początków rozwoju betonu zbrojonego – pierwsze patenty w tej dziedzinie zostały zgłoszone w latach osiemdziesiątych XIX w. przez F. Jacksona – 1886 r., San Francisco i W. Döhrin-

Rys. 11. Most Salginatobel, rozpiętość 90,0 m, 1930 r. [12]



fot. Archiwum



Rys. 12. Mosty R. Maillarta: a) Aarburg – 67,8 m, 1911 r., b) Val Tschiel – 43,0 m, 1925 r. [13]

ga – 1888 r., Berlin) będzie możliwa w przypadku zastosowania stali i betonów wysokiej wytrzymałości. Freyssinet podał także wskazówki dotyczące ustalania wartości strat siły sprężającej powstających na skutek występowania skurczu i pęczania betonu. Było to istotnym przyczynkiem do stworzenia nowego typu konstrukcji betonowych.

Możliwość realizacji pomysłu sprężania betonu stanowiła przełom w tradycjach projektowania. Zamiast biernego dostosowywania wymiarów ustroju do występującego w konstrukcji układu sił oraz właściwości mechanicznych materiału, dokonano czynnej ingerencji w pracę ustroju poprzez wprowadzenie nowego układu sił, wywołującego pewien z góry obrany stan naprężenia. W ten sposób możliwe stało się zapobieganie, w granicach określonych obciążeń, pojawianiu się naprężeń rozciągających w przekrojach dźwigarów. Stworzyło to szerokie możliwości zastosowania różnorodnych materiałów kruchych, takich jak beton, nie tylko w ustrojach sprężonych w sposób naturalny (sklepienia, podpory), ale i w dźwigarach zginanych (płyty, belki, ramy) [3].

Technologia sprężania betonu, nadal rozwijana i unowocześniana, pozwala na realizację śmiałych wizji inżynierów. Współczesne mostownictwo zręcznie i efektywnie wykorzystuje jej możliwości, czego wyrazem są liczne obiekty mostowe dużych rozpiętości, jakie odnaleźć można na całym świecie. Wybrane realizacje tych obiektów przedstawione zostaną w kolejnej części artykułu.

Marek Pańtak
Politechnika Krakowska
Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych
Zbigniew Piłch
Stowarzyszenie Producentów Cementu

Literatura

- 1 Radomski W., *Katastrofy i awarie mostów a rozwój wiedzy budowlanej*, XXV Konferencja Naukowo-Tech-



- niczna „Awary Budowlane 2011”, Międzyzdroje, 2001, s. 153-174
- 2 Radić J., Kindij A., Mandić A., *History of concrete application in development of concrete and hybrid arch bridges*, Proc. of The Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Arch Bridges, Croatian University of Zagreb, University of FuZhou, Chorwacja, 2008, s. 9-118
- 3 Szczygieł J., *Mosty z betonu zbrojonego i sprężonego*, WKiŁ, Warszawa, 1978
- 4 Nechay J., *Konstrukcje żelbetowe*, Trzaska, Evert i Michalski, Warszawa, 1951
- 5 Billington D. P., *Historical perspective on prestressed concrete*, PCI Journal, Vol. 49, Iss. 1, Jan-Feb, 2004, s. 14-30
- 6 Dumay E., *Le Pont Chatel de Neuvre (Allier)*, (www.crdp-pupitre.ac-clermont.fr/anacr03), 2014
- 7 Riegler M., *Pont béton - Jardin des Plantes (Grenoble)*, (www.commons.wikimedia.org), 2014
- 8 Simonnet C., *Le Béton, histoire d'un matériau*, Editions Parenthèses, Marsylia, 2005
- 9 Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, PWN, Warszawa, 2009
- 10 Shaeffer R. E., *Reinforced concrete, preliminary design for architects and builders*, McGraw-Hill, New York, 1992
- 11 Baus U., Schlaich M., Dechau W., *Footbridges: construction, design, history*, Birkhäuser, Basel-Boston, 2008
- 12 Billington D. P., *Robert Maillart's Bridges: The Art of Engineering*, Princeton University Press, Princeton, 1989
- 13 Flaga K., *Od Roberta Maillarta do Christiana Menna. Piękno mostów betonowych „zakłete” w rozwiązaniach konstrukcyjnych*, Inżynieria i Budownictwo, 1-2.2004, Warszawa, s. 10-17

Rys. 13. Most Plougastel nad rzeką Elorn – 1925-1930 r. [12].

