

Technologiczne aspekty budowy betonowych mostów podwieszonych

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CONSTRUCTION OF CABLE-STAYED BRIDGES MADE OF CONCRETE

Streszczenie

W pracy przedstawiono stan polskich mostów w zakresie dużych rozpiętości przęseł, ze szczególnym uwzględnieniem mostów podwieszonych. Omówiono ostatnie polskie realizacje, w których stosowano pylony i przęsła z betonu

Głównym przedmiotem referatu są problemy technologiczne występujące przy realizacji mostów podwieszonych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień budowy betonowych pylonów.

Abstract

Condition of Bridge Engineering in Poland was presented in this paper. There was special emphasis on large, cable-stayed bridges placed. Last polish constructions were described, where pylons and decks made of concrete were used.

Main topic of this paper are technological problems, which may occurred by erection of cable-stayed bridges. Problem of construction of concrete pylons was stressed.

1. Stan budownictwa w obszarze mostów o dużych rozpiętościach przęseł



Fot. 1. Rekordowe mosty oddane do eksploatacji w roku 2008: most przez Bug w Wyszkowie (zdjęcie lewe) i most przez Wisłę w Puławach (zdjęcie prawe)

W ostatnim dziesięcioleciu odnotowany został istotny postęp technologiczny i konstrukcyjny w polskim mostownictwie [2, 3, 4, 5, 6, 7, 13]. Pobite zostały prawie wszystkie polskie rekordy w zakresie maksymalnych rozpiętości przęseł. W roku 2008 oddano do eksploatacji dwa rekordowe obiekty (fot. 1):

- most belkowy z betonu sprężonego przez Bug w Wyszkowie (DK 8); o rozpiętości głównego przęsła 136 m i długości 600 m; realizowany w technologii betonowania wspornikowego;
- stalowy most łukowy przez Wisłę w Puławach (DK 14); o rozpiętości głównego przęsła równej 212 m i całkowitej długości 1012 m.

Jednocześnie rozpoczęto budowę innych znaczących obiektów. Aktualny stan polskiego mostownictwa w obszarze dużych przepraw mostowych przedstawiono w tabeli 1, gdzie zestawiono polskie mosty o największych w swojej klasie rozpiętościach przęseł.

Spektakularny sukces w ostatnich latach odnotowano w budowie mostów podwieszonych. Wybudowano trzy ogromne obiekty przez Wisłę z przęsłami przekraczającymi 200 m rozpiętości. Największym, jest nowy stalowy most w Płocku o rozpiętości głównego przęsła 375,00 m [14], będący równocześnie największym pod tym względem, mostem w kraju, odebrał on to miano wybudowanemu wcześniej mostowi Siekierkowskiemu w Warszawie o rozpiętości głównego przęsła 250,00 m [8]. Kolejnymi w tej kategorii mostami pod względem długości przęsła są, Most III Tysiąclecia im. Jana Pawła II w Gdańsku [12], most Świętokrzyski w Warszawie [1] i most Tysiąclecia we Wrocławiu [9].

W mostach tych stosowano przeważnie pylony z betonu. Całkowicie betonowy jest Most Tysiąclecia we Wrocławiu, obecnie budowany most przez Odrę w ciągu autostrady A8 oraz projektowane mosty przez Wisłę w Krakowie i w Kwidzynie.

Tablica. 1 Największe mosty w Polsce (sierpień 2008 roku)

	Lokalizacja, przeszkoda	Najdłuższe przęsło, m	Materiał – pomost / pylony, łuki, itp.	Rok ukoń- czenia
Mosty (kładki) wiszące				
1	Witryłów (kładka), San	150,00	drewno / stal	brak danych
2	Bachów (kładka), San	143,40	stal / stal	brak danych
3	Sanok (kładka), San	135,00	beton / beton	planowana
4	Słonne (kładka), San	127,70	stal / stal	brak danych
5	Wybrzeże (kładka), San	123,90	drewno / stal	brak danych
6	Krasiczyn (kładka), San	120,00	stal / stal	brak danych
7	Niziny (kładka), San	114,24	stal / stal	brak danych
8	Wrocław (Grunwaldzki), Odra	114,00	stal / cegła	1910/1947*
9	Wara (kładka), San	113,00	drewno / stal	brak danych
10	Tropie (kładka), Dunajec	110,00	stal / stal	1984
11	Olszany (kładka), San	104,30	stal / stal	brak danych
12	Piwniczna (kładka), Poprad	102,00	stal / stal	1973
13	Pustków (kładka III), Wisłoka	100,00	stal / stal	1970
14	Bochnia (kładka), Raba	100,00	stal / beton	brak danych
Mosty (kładki) podwieszzone				
1	Płock (Solidarności), Wisła	375,00	stal / stal	2005
2	Wrocław (A8), Odra	256,00	beton / beton	w budowie
3	Warszawa (Siekierkowski), Wisła	250,00	zespólny / beton	2002
4	Gdańsk (III Tysiąclecia), Martwa Wisła	230,00	zespólny / beton	2001
5	Kwidzyn (DK90), Wisła	204,00	beton / beton	planowany
6	Kraków (Trasa Nowohucka), Wisła	200,00	beton / beton	planowany
7	Warszawa (Świętokrzyski), Wisła	180,00	zespólny / beton	2000
8	Wrocław (Tysiąclecia), Odra	153,00	beton / beton	2004
9	Stary Sącz (DK87), Dunajec	143,00	beton-stal / stal	2008
10	Gdańsk (S7), Motława	135,00	beton / beton	planowany
11	Mszana (A1), Kolejówka	130,00	beton / beton	w budowie
12	Tylmanowa (kładka II) Dunajec	100,00	stal / stal	1961
Mosty łukowe				
1	Warszawa (Kraśnińskiego), Wisła	280,00	zespólny / stal	planowany
2	Toruń (DK15), Wisła	270,00	stal / stal	planowany
3	Puławy (im. Jana Pawła II), Wisła	212,00	zespólny / stal	w budowie
4	Kraków (Kotlarski), Wisła	166,00	stal / stal	2001
5	Wolin (DK3), Dziwna	165,00	zespólny / stal	2003
6	Kraków (kładka Kazimierz-Podgó- rze), Wisła	145,60	beton / stal	w budowie
7	Gorzów (DK3), Warta	120,00	zespólny / stal	2007
8	Ostrołęka (Madalińskiego), Narew	110,00	zespólny / stal	1995
9	Milówka (S69), Kameszniczanka	103,84	beton / beton	2006
Mosty kratownicowe				
1	Toruń (Piłsudskiego), Wisła	130,00	stal / stal	1934/1950*
2	Tczew (most drogowy), Wisła	128,60	stal / stal	1857/1959*
3	Tczew (most kolejowy), Wisła	128,60	stal / stal	1891/1971*

	Lokalizacja, przeszkoda	Najdłuższe przęsło, m	Materiał – pomost / pylony, łuki, itp.	Rok ukoń- czenia
4	Płock (Legionów Piłsudskiego), Wisła	110,40	stal / stal	1937/1950*
5	Puławy (Mościckiego), Wisła	110,00	stal / stal	1934/1949*
6	Grudziądz (Malinowskiego), Wisła	100,00	stal	1879/1951*
7	Góra Kalwaria (most kolejowy), Wisła	100,00	stal	1954
Mosty belkowe				
1	Warszawa (Most Północny), Wisła	160,00	zespolony	planowany
2	Knybawa (DK22), Wisła	142,40	stal	1941/1950*
3	Kędzierzyn Koźle (DK40), Odra	140,00	beton	w budowie
4	Wyszków (DK8), Bug	136,00	beton	2008
5	Szczecin (Trasa Zamkowa), Parnica	135,31	stal	1987
6	Szczecin (Trasa Zamkowa), Parnica	134,67	stal	1996
7	Kraków (Zwierzyniecki), Wisła	132,00	beton	2001
8	Toruń (A1), Wisła	130,00	beton	1998
9	Kiezmark (DK7), Wisła	130,00	zespolony	1973
10	Wrocław (Tysiąclecia), Odra	126,00	beton	2004
11	Warszawa (Grota-Roweckiego), Wisła	120,00	stal	1981
12	Łany (DK8), Odra	120,00	beton	planowany
13	Szczecin (Cłowy), Regalica	116,00	zespolony	2000/2003
14	Wrocław (Wschodni), Odra	110,02	beton	planowany
15	Opole (DK46/94), Odra	100,00	beton	1999
16	Wyszogród (DK50), Wisła	100,00	zespolony	1999

* data ukończenia odbudowy po zniszczeniach II Wojny Światowej.

Budowa mostów podwieszonych jest procesem skomplikowanym, wymagającym kadry inżynierskiej o najwyższych kwalifikacjach, niektóre aspekty tego procesu zostaną omówione w niniejszej pracy.

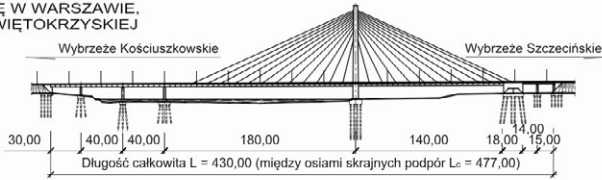
2. Polskie mosty podwieszane

Mosty podwieszane to obiekty stosunkowo niedrogie, atrakcyjne wizualnie, funkcjonalne i możliwe do zastosowania przy niemal każdej szerokości przeszkody. Dlatego buduje się ich wiele, od małych kładek, dla pieszych do wielkich mostów drogowych.

W niniejszym referacie zakres rozważań zostanie ograniczony do mostów o dużych rozpiętościach przęseł. Na rysunku 2 pokazano zrealizowane, będące w budowie lub planowane polskie mosty podwieszane. Natomiast na fot. 3 przedstawiono ich widoki lub wizualizację. Rozczarowaniem dla środowiska polskich inżynierów mostowych jest odstąpienie przez GDDKiA od budowy mostu podwieszanego w ciągu autostrady A1 w Grudziądzu. Projekt tego mostu opracował Transprojekt Gdańsk, niestety praca zespołu świetnych inżynierów pracujących pod kierunkiem T. Stefanowskiego poszła na marne, a przecież w Polsce mamy niewiele budowli, które byłyby zauważone w świecie i przyczyniły się do promocji naszego kraju.

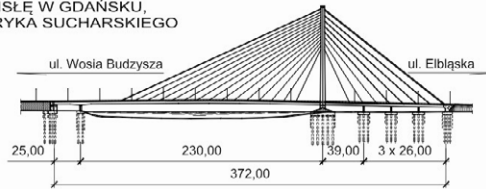
MOST PRZEZ WISŁĘ W WARSZAWIE,
W CIĄGU TRASY ŚWIĘTOKRZYSKIEJ

2000 r.



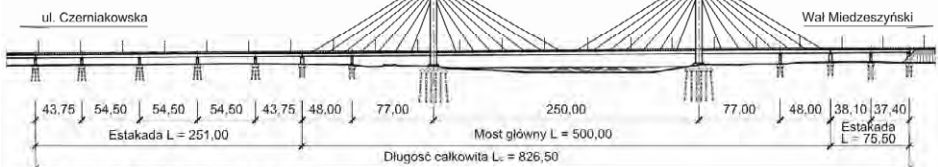
MOST PRZEZ MARTWĄ WISŁĘ W GDAŃSKU,
W CIĄGU TRASY IM. HENRYKA SUCHARSKIEGO

2001 r.



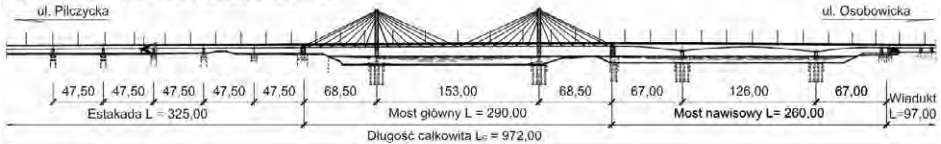
MOST PRZEZ WISŁĘ W WARSZAWIE,
W CIĄGU TRASY SIEKIERKOWSKIEJ

2002 r.



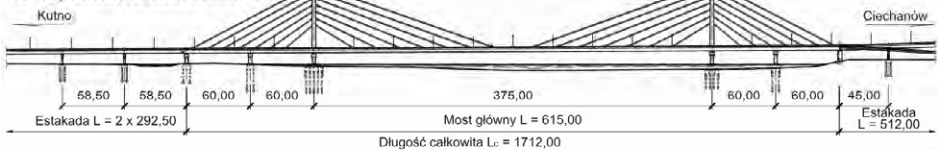
MOST PRZEZ ODRE WE WROCŁAWIU,
W CIĄGU OBWODNICY ŚRÓDMIEJSKIEJ

2004 r.



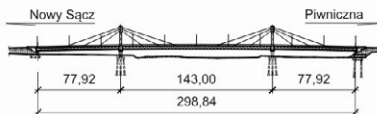
MOST PRZEZ WISŁĘ W PŁOCKU,
W CIĄGU OBWODNICY MIASTA

2005 r.



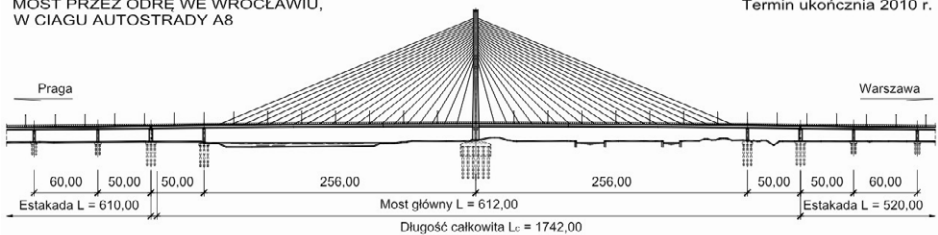
MOST PRZEZ DUNAJEC W STARYM SĄCZU,
W CIĄGU OBWODNICY MIASTA

2008 r.

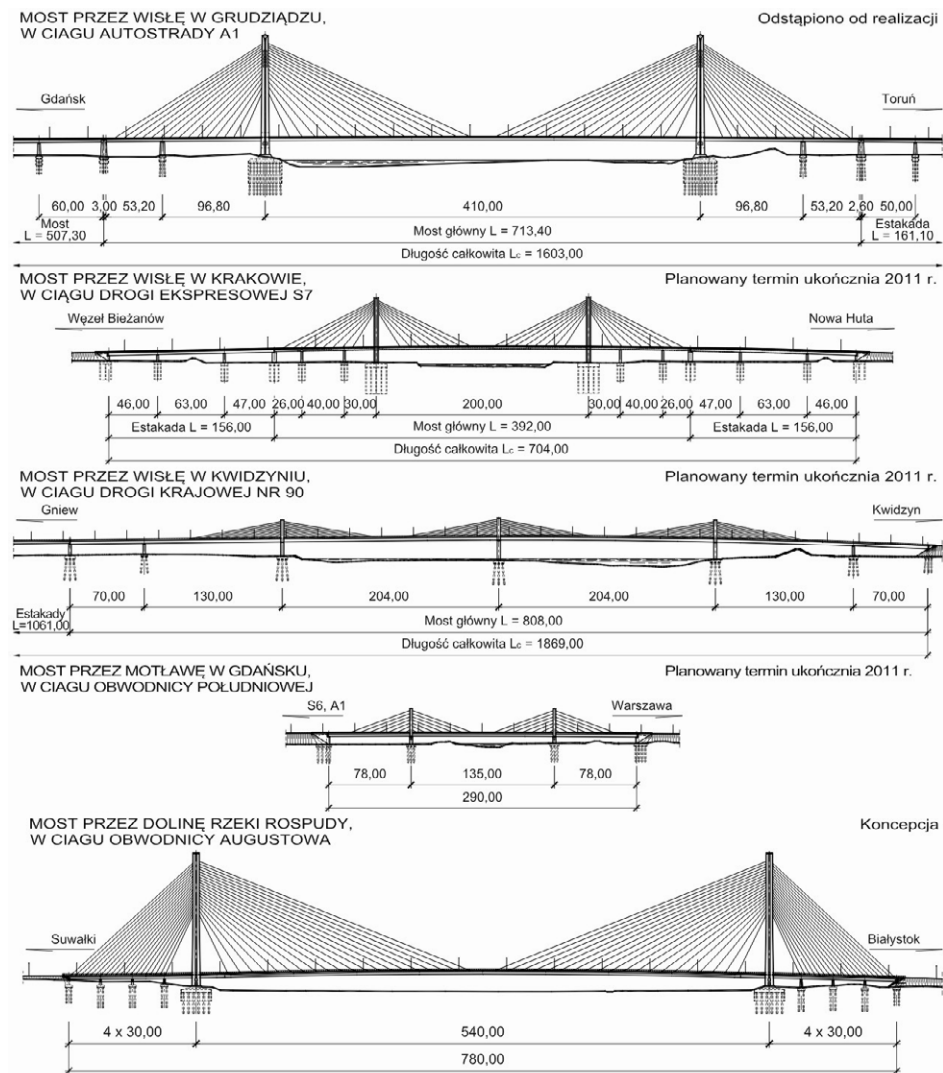


MOST PRZEZ ODRE WE WROCŁAWIU,
W CIĄGU AUTOSTRADY A8

Termin ukończenia 2010 r.



Rys. 2. Polskie mosty podwieszane zrealizowane i planowane

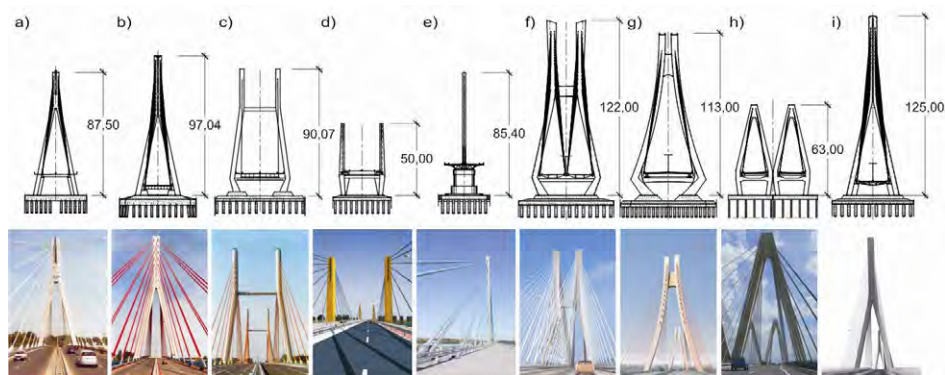


Rys. 2. Polskie mosty podwieszane zrealizowane i planowane – cd.



Fot. 3. Największe mosty podwieszone w Polsce (zrealizowane i planowane), w kolejności długości przęsa:

- a) wizualizacja mostu przez Wisłę w Grudziądzu – projekt Transprojekt Gdański,
- b) most Solidarności w Płocku,
- c) budowany most przez Odrę we Wrocławiu (wizualizacja) – projekt ZB-P Mosty Wrocław,
- d) most Siekierkowski w Warszawie,
- e) most III Tysiąclecia im. Jana Pawła II w Gdańsku,
- f) planowany most przez Wisłę w Krakowie (wizualizacja) – projekt Mosty Katowice,
- g) most Świętokrzyski w Warszawie,
- h) most Tysiąclecia we Wrocławiu.



Rys. 4. Największe mosty podwieszane w Polsce zrealizowane i planowane – widoki pylonów z pozycji kierowcy:

- a) most przez Wisłę w Warszawie (Trasa Świętokrzyska),
- b) most przez Martwą Wisłę w Gdańsku, (Trasa im. Henryka Suchockiego),
- c) most przez Wisłę w Warszawie (Trasa Siekierska),
- d) most przez Odrę we Wrocławiu (Obwodnica Śródmiejska),
- e) most przez Wisłę w Płocku (droga krajowa nr 60),
- f) most przez Odrę we Wrocławiu (autostrada A8 – w planach),
- g) projekt mostu przez Wisłę w Grudziądzu (A1 – niezrealizowany),
- h) projekt mostu przez Wisłę w Krakowie (droga ekspresowa S7 – planowany),
- i) koncepcja mostu przez Dolinę Rospudy (obwodnica Augustowa).

W roku 2007 zakończono budowę mostu przez Wartę w Koninie w ciągu obwodnicy tego miasta (fot. 5), a w tym roku (2008) oddano do eksploatacji wiadukt w Wykrotach nad autostradą A4 (fot. 7) i most nad Dunajcem w ciągu obwodnicy Starego Sącza (fot. 6). Są to obiekty wykonane z betonu sprężonego.

Po analizie dotychczas wybudowanych obiektów podwieszonych można stwierdzić, iż:

- wybudowane i przewidziane do realizacji w Polsce obiekty charakteryzują się dużą różnorodnością architektoniczną; powstały lub są budowane mosty, które są lub będą punktami charakterystycznymi miast lub tras komunikacyjnych; nie odnotowano projektów chybionych z architektonicznego punktu widzenia;
- ustroje nośne projektowano jako czysto stalowe (Płock, 2005), zespolone lub betonowe; ostatnio jednak coraz częściej (tablica 1) projektuje się obiekty betonowe;
- pylony dużych mostów (rys. 2, fot. 3 i 4) są projektowane przeważnie jako betonowe.

Tak więc beton w budownictwie mostów podwieszonych odgrywa coraz większą rolę. Mosty te wymagają stosowania:

- betonów o wysokiej wytrzymałości i szybkim jej wzroście oraz dużej trwałości na ustroje nośne i pylony ($C \geq 50/60$);
- betonów do konstrukcji masywnych (stopy pylonów) wykonywanych na cementach o niskim cieple hydratacji.

Zauważa się coraz częściej stosowanie konstrukcji mieszanych stalowo-betonowych, jak np. most na obwodnicy Starego Sącza (fot. 6).



Fot. 5. Budowa betonowego mostu przez Wartę w ciągu obwodnicy Konina (2007)



Fot. 6. Most podwieszony (podwójnie zespolony) nad Dunajcem w ciągu obwodnicy Starego Sącza (2008)



Fot. 7. Wiadukt w ciągu drogi 94 nad autostradą A4 w Wykrotach (2008)

3. Technologie budowy ustrojów nośnych mostów podwieszonych

Mosty podwieszane mogą być wznoszone przy wykorzystaniu różnych technologii i sposobów montażu. Technologię budowy należy dobierać w zależności od:

- warunków specyficznych dla miejsca budowy,
- wielkości realizowanego obiektu (np. kładka nad budowaną autostradą lub wielki most przez rzekę),
- materiału zastosowanego na konstrukcję ustroju nośnego i pylonów,
- stopnia przygotowania pod względem technicznym i kadrowym wykonawcy obiektu.

W procesie budowy obiektu podwieszanego można wyróżnić kilka charakterystycznych faz, a w tym m.in.:

- budowę fundamentów i trzonów podpór; tu za specyficzne należy uznać fundamenty (i ewentualnie trzony filarów), na których opierają się pylony, oraz fundamenty i korpusy podpór kotwiących przenoszące duże siły wrywające (rozciągające),
- wznoszenie pylonów,
- budowę ustroju nośnego,
- instalowanie olinowania połączone z korektą parametrów geometrycznych i kontrolą napięcia want,
- wyposażanie obiektu.

W zasadzie budowa obiektów podwieszonych przebiega podobnie jak realizacja mostów o innej konstrukcji, a specyficzne elementy (wymagające zastosowań specjalnych procedur technologicznych) to podpory kotwiące, pylony i system olinowania.



Fot. 8. Różne metody wykonywania ustrojów nośnych mostów podwieszonych: a) wykonywanie na pełnym rusztowaniu – wiadukt w Wykrotach; b) nasuwanie podłużne – most na Warcie w Koninie; c) betonowanie wspornikowe – most Tysiąclecia we Wrocławiu.

W niniejszym referacie zostaną omówione tylko te procesy technologiczne, które są stosowane przy wznoszeniu mostów podwieszonych.

Ustroje nośne mostów podwieszonych można budować stosując następujące metody (fot. 8):

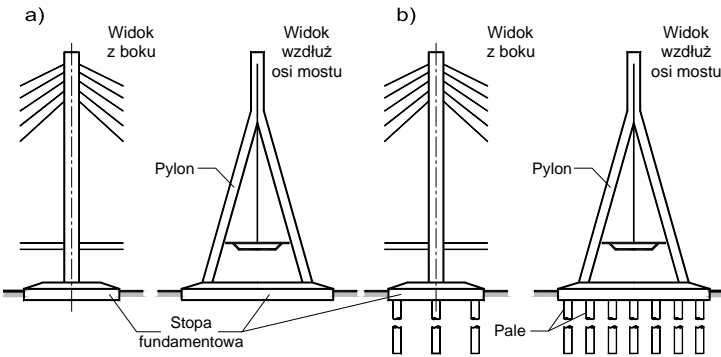
- betonowanie na rusztowaniach lub montaż na podporach tymczasowych różnych typów i systemów (fot. 8a),
- nasuwanie podłużne konstrukcji sukcesywnie betonowanej lub montowanej (fot. 8b),
- betonowanie lub montaż wspornikowy (fot. 8c),
- nasuwanie obrotowe konstrukcji wykonanej uprzednio na rusztowaniach,
- kombinowane (połączenie wyżej wymienionych metod).
- Wybór technologii realizacji zależy od wielu czynników, takich jak:
 - rodzaj budowanej konstrukcji (most nad przeszkodą wodną, wiadukt, estakada itp.),
 - rodzaj materiału konstrukcji nośnej mostu,
 - warunki terenowe w miejscu budowanej przeprawy,
 - warunki klimatyczne w strefie budowy (rejon silnych wiatrów, krótki – w cyklu rocznym – okres sprzyjających warunków pogodowych, obszar zmiennych poziomów wody itp.),
- czas i koszt budowy obiektu, będące funkcją zastosowanej technologii.

W przypadku wznoszenia wiaduktów i niewielkich mostów usytuowanych nisko nad terenem zazwyczaj racjonalne jest wykonywanie ustroju nośnego na rusztowaniach. Pozostałe metody znajdują zastosowanie, jeżeli pod budowanym obiektem musi funkcjonować komunikacja lub gdy koszt rusztowań jest zbyt wysoki. W przeciętnych warunkach obiekty o przęsłach mających rozpiętość powyżej 100 m realizuje się metodami nasuwania podłużnego lub wspornikową.

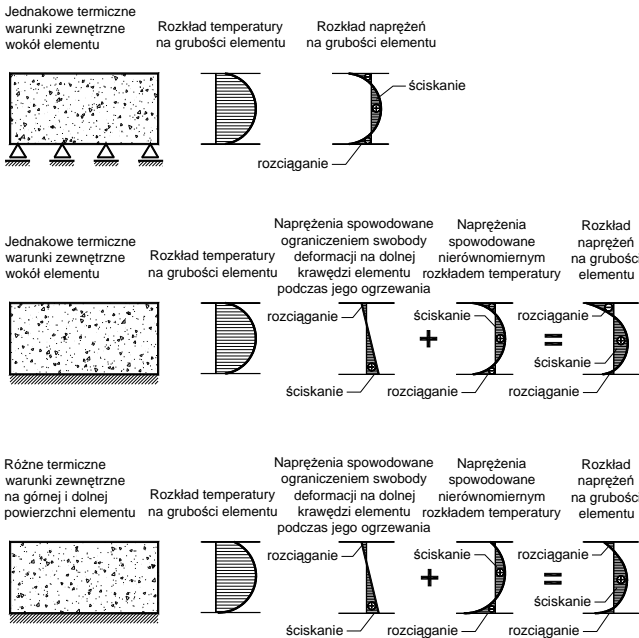
4. Budowa pylonów

Fundamenty pylonów dużych mostów podwieszonych przenoszą zazwyczaj znaczne siły (reakcje) pionowe i momenty zginające wynikające z zamocowania w nich pylonów. Na rysunku 9 pokazano typowy fundament, na którym sadowi się pylon. Elementy fundamentu to:

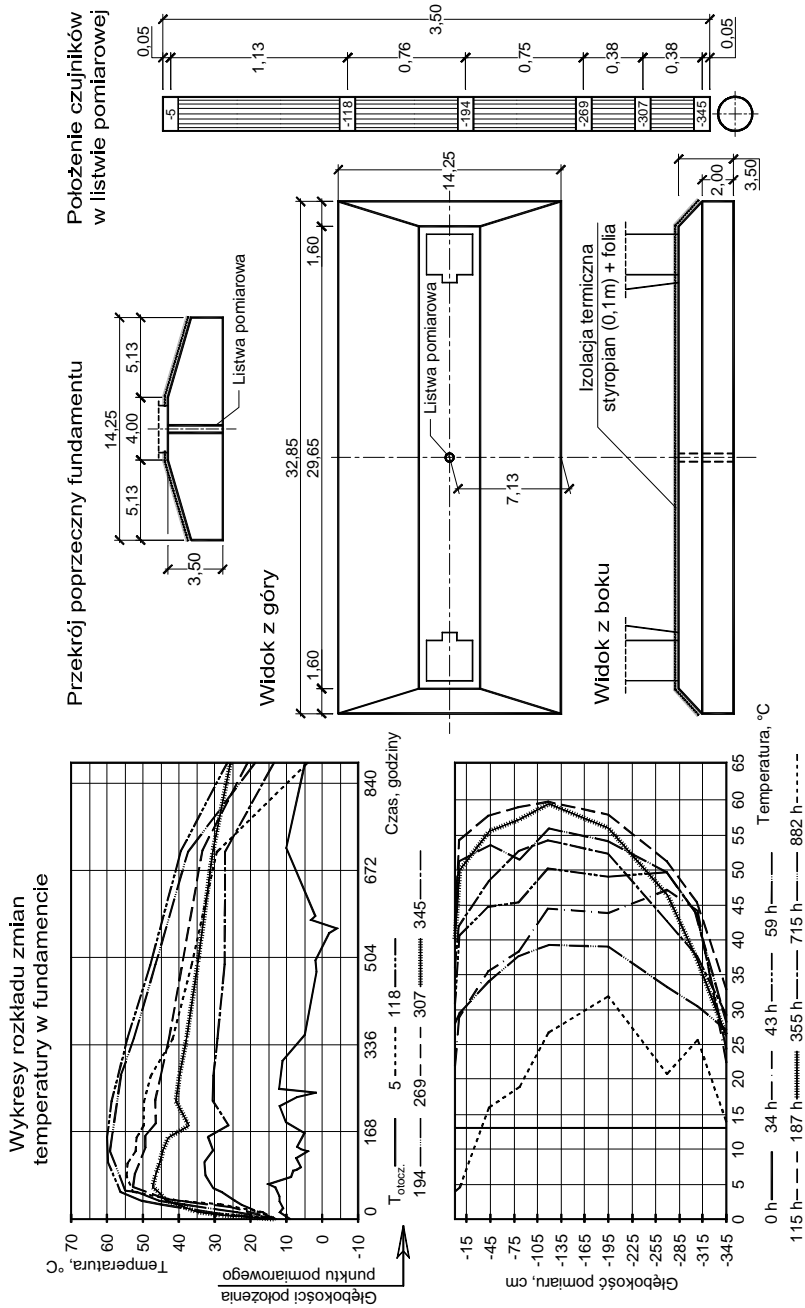
- pale żelbetowe sięgające podstawą gruntu nośnego,
 - stopa zwińczająca pale i przeznaczona do oparcia lub utwierdzenia w niej pylonu.
- Jeżeli w miejscu posadowienia występują płytko grunty o dużej nośności (np. skały), fundament może stanowić sama stopa. W Polsce warunki gruntowe na terenach imundacyjnych dużych rzek nie pozwalają przeważnie na posadowienie bezpośrednie,



Rys. 9. Typowe fundamenty stosowane do posadowienia pylonów: a) posadowienie bezpośrednie (stopy), b) posadowienie na palach



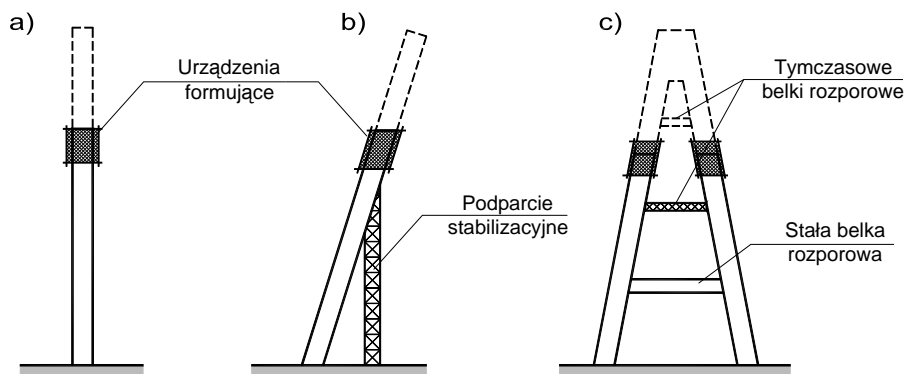
Rys. 10. Stany naprężeń i rozkłady temperatury w masywnych elementach betonowych w procesie hydratacji cementu



Rys. 11. Pomierzony rozkład temperatury na grubości stopy fundamentowej mostu Tysiąclecia we Wrocławiu (badania A. Helowicz)

w związku z czym powszechnie są stosowane wiercone pale żelbetowe długości przekraczającej nawet 30 m.

Stopy wieńczące pale lub ściany szczelinowe mają przeważnie wymiary w planie ok. 35x20 m i grubość dochodzącą do 4 m. W przypadku mostów o bardzo dużych rozpiętościach przęseł wymiary stóp, w których utwierdzono pylony, są jeszcze większe.



Rys. 12. Ilustracja podstawowych uwarunkowań technologicznych budowy pylonów różnych typów: a) pionowy jednogłęziowy, b) ukośny jednogłęziowy, c) o dwóch pochylonych gałęziach

Tak masywne elementy betonowe ogrzewają się na skutek ciepła wydzielanego w procesie hydratacji cementu. Transport ciepła odbywa się w kierunku chłodniejszych na ogół powierzchni zewnętrznych, zatem w elemencie powstają niestacjonarne pola temperatury (rys. 10), które generują samorównoważące się stany naprężeń. Problem jest jeszcze bardziej skomplikowany z uwagi na to, że stopa fundamentowa nie jest masywem swobodnym (rys. 10), co oznacza, że jej spód ma ograniczoną możliwość deformacji z powodu tarcia między dnem fundamentu a podłożem lub zamocowania w głowicach pali czy ścian szczelinowych. Ograniczenie lub brak swobody deformacji dolnej krawędzi przy rozszerzaniu termicznym masywu (lub zmniejszaniu jego wymiarów na skutek stygnięcia) generuje powstanie w nim dodatkowego stanu naprężenia. Pokazano to w sposób ideowy na rys. 10. Naprężenia generowane w wyniku występującego gradientu temperatury oraz ograniczenia swobody deformacji w masywnych stopach lub trzonach podpór mogą przekroczyć wytrzymałość betonu na rozciąganie i spowodować uszkodzenie lub zniszczenie wykonanych elementów.

Wyniki badań rozkładu temperatury w stopie wieńczącej pale mostu Milenijnego we Wrocławiu pokazano na rys. 11 [11]. Stopę wykonano z betonu klasy B35 (C30/37) na cemencie hutniczym CEM III/A 32.5 NA (z cementowni w Strzelcach Opolskich). Gdyby korzystano z cementu portlandzkiego, temperatura we wnętrzu stopy byłaby wyższa o około 10°C.

Aby prawidłowo wykonać masywną stopę fundamentową, należy po ustaleniu wymiarów elementu i receptury betonu przeprowadzić teoretyczną symulację rozkładu temperatury w fundamencie. Symulacja taka pozwoli na oszacowanie stopnia zagrożenia zniszczeniem fundamentu na skutek zachodzących w nim procesów cieplnych.

Warunkiem niedopuszczenia do powstania rys i spękań w stopie jest ograniczanie gradientów temperatury do akceptowalnego poziomu określanego zwykle na 20°C/m

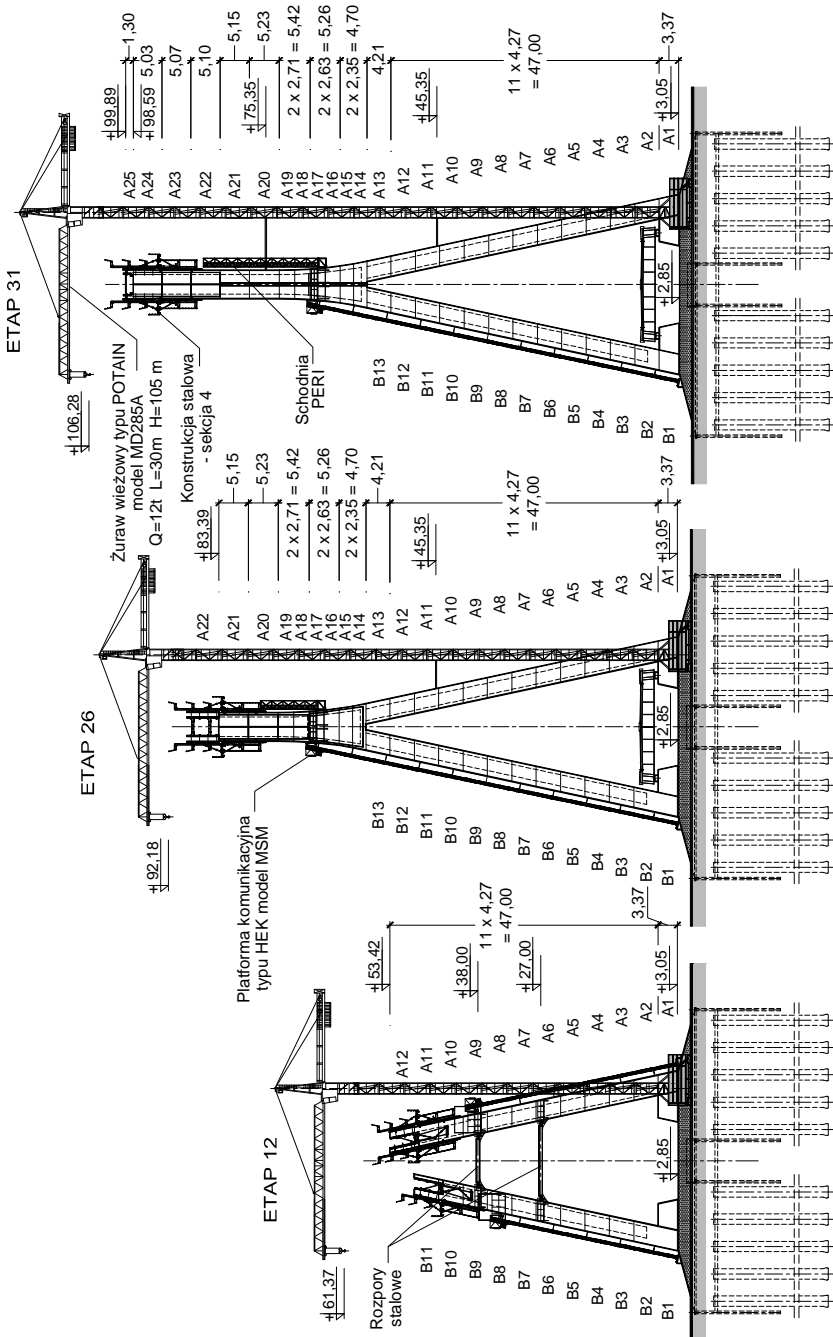
(grubości elementu), oraz minimalizacja wartości temperatury maksymalnej. Aby to osiągnąć, trzeba zmniejszyć ilość ciepła, jaka wyzwoli się w procesie hydratacji cementu. Efekt ten można uzyskać przez:

- ograniczenie ilości cementu w betonie,
- zastosowanie do mieszanki betonowej cementów o niskim cieple hydratacji (np. cementów hutniczych),
- betonowanie warstwami grubości nieprzekraczającej 1,5 m; poszczególne warstwy układa się z przesunięciem czasowym od 12 do 48 godzin.
- Jeżeli mimo tych zabiegów, zagrożenie związane z przekroczeniem wymaganych reżimów będzie realne, można przewidzieć działania dodatkowe, jak:
 - przykrycie fundamentu warstwą izolacyjną, co zapobiega intensywnemu schładzaniu powierzchni betonu i ogranicza wartość gradientów temperatury (bardzo dobre właściwości izolacyjne ma warstwa styropianu grubości 0,1 m; taką metodę zastosowano podczas wykonywania stóp fundamentowych mostu Milenijnego we Wrocławiu i mostu w Płocku; należy jednak zaznaczyć, że stosowanie izolacji termicznej zmniejsza wprawdzie wartość gradientu temperatury, ale powoduje zwiększenie temperatury maksymalnej,
 - chłodzenie wewnętrznej części masywu za pomocą zimnej wody przepompowywanej przez system rur stalowych zabetonowanych wcześniej w fundamencie (metoda ta była z powodzeniem stosowana przy realizacji fundamentów mostów podwieszonych w Warszawie [8] i w Gdańsku [12]); chłodzenie ogranicza jednocześnie temperaturę maksymalną w fundamencie i wartość temperatury gradientu.
- inny sposób opóźnienia hydratacji cementu (i jednocześnie rozciągnięcia w czasie procesu wydzielania ciepła) polega na dodaniu do mieszanki betonowej środków opóźniających wiązanie lub, co daje podobny efekt, powodujących maksymalne chłodzenie świeżego betonu, tak by jego temperatura w chwili układania nie była wyższa niż 5-7°C.

Szybkie i precyzyjne wykonanie pylonów decyduje o długości okresu budowy mostu podwieszonego. Dlatego projektując kształt pylonów i sposób mocowania w nich odciągów, należy brać pod uwagę także uwarunkowania technologiczne. Sposób budowy pylonów zależy od następujących czynników:

- wielkości pylonu i jego konstrukcji,
- wybranego materiału konstrukcyjnego (stal, beton),
- ukształtowania i formy architektonicznej,
- sposobu mocowania odciągów,
- schematu statycznego.

Na rysunku 12 pokazano wpływ ukształtowania pylonów na uwarunkowania technologiczne ich realizacji. Generalnie najmniej problemów technologicznych występuje w przypadku pionowych pylonów jednogałęziowych zamocowanych w fundamentach. Każde odchylenie od pionu komplikuje technologię wykonania i podnosi koszty realizacji. Pylony ukośnie utwierdzone lub dowolnie ukształtowane, ale mocowane przegubowo w fundamentach lub w konstrukcji wymagają zaprojektowania i wykonania dodatkowej stabilizacji na czas budowy (rys. 12). Obecnie istnieją techniczne możliwości wznoszenia pylonów o dowolnych kształtach ze stali lub betonu. Tempo budowy pylonów z betonu jest porównywalne z tempem realizacji tych elementów ze stali. Pylony z betonów klasy B60 (C50/60) i wyższej odznaczają się wysoką trwałością i niższymi kosztami utrzymania w porównaniu z pylonami o konstrukcji stalowej.



Rys. 13. Technologia budowy pylonu mostu Jana Pawła II w Gdańsku

Pylony z betonu zbrojonego są wykonywane przy zastosowaniu urządzeń formujących wspinająco-przestawnych [1] składających się z odsuwanych od ścian pylonu deskowań zewnętrznych i - w przypadku pylonów o przekroju skrzynkowym – wewnętrznych. Urządzenie formujące jest mocowane do wykonanej części konstrukcji za pomocą tymczasowych kotew. Przesuwanie do góry zapewniają dźwigniki hydrauliczne lub żuraw.

Do transportu pionowego materiałów (betonu i zbrojenia) i ciężkich urządzeń technicznych wykorzystuje się zazwyczaj żurawie; (rys. 13 i 15), do transportu brygad roboczych zaś dźwigi osobowo-towarowe montowane do zewnętrznych ścian pylonów.

Zbrojenie pylonów w dużej części przygotowuje się wcześniej w wytwórni i dostarcza do miejsca wbudowania w postaci koszy lub siatek.

Do zalet takiej organizacji robót należą:

- proste i ekonomiczne wykonawstwo w warunkach zbliżonych do fabrycznych,
- wysoka jakość montażu i dokładność wykonania oraz łatwy dostęp w celu przeprowadzenia kontroli,
- możliwość zlecenia wykonania zbrojenia firmom specjalistycznym na zasadach akordowych,
- brak opóźnień w procesie realizacji dzięki wcześniejszym dostawom zbrojenia na budowę.

Prefabrykowany element zbrojenia (kosz) może mieć masę do 16 ton (most Normandie [1]) i wysokość równą 2,5-krotnej wysokości segmentów. Całość zbrojenia powinna być usztywniona stelażem z kształtowników stalowych zapobiegającym odkształceniom podczas podnoszenia. Zbrojenie ustawia się zazwyczaj przed podniesieniem deskowań do góry, co trwa kilka godzin (na moście Normandie czas ten wynosił od 4 do 5 godzin).

Długość cyklu wykonania segmentu zależy od szybkości montażu zbrojenia. Wykonawca nie ma jednak wpływu na ilość, rodzaj i sposób wykonania zbrojenia, co jest zależne m. in. od rozkładu sił wewnętrznych w konstrukcji i od technologii betonowania pylonu. Już na etapie projektowania należy dołożyć wszelkich starań, aby zbrojenie było jak najprostsze z technologicznego punktu widzenia. System szalunkowy jest niezależny od metody jego przemieszczania, do przestawiania deskowań można używać zarówno żurawia, jak i siłowników hydraulicznych. O przyjęciu danego rozwiązania decydują wymagania, których spełnienie jest związane z:

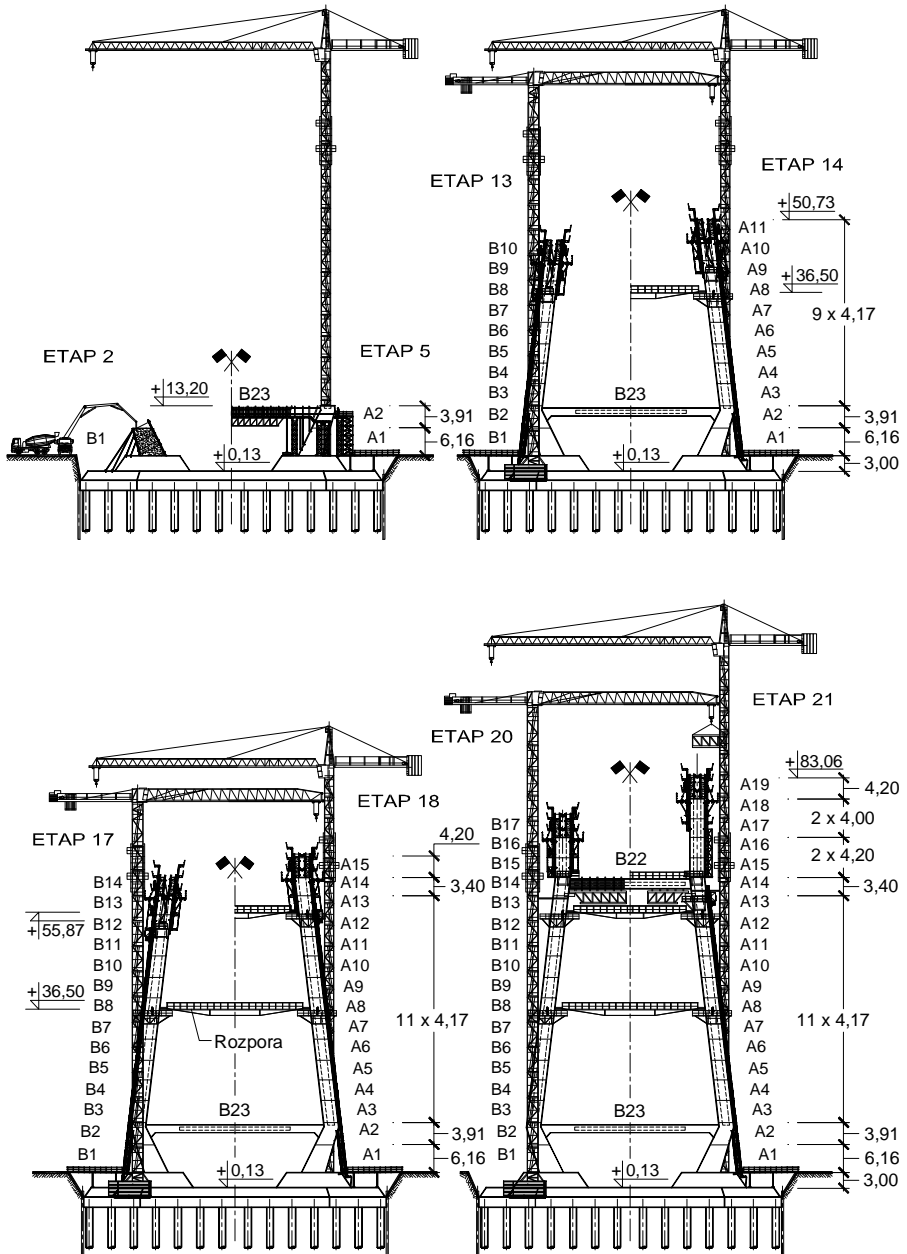
- bezpiecznym podnoszeniem szalunków na duże wysokości,
- uzależnieniem prac od warunków pogodowych, np. mocnego wiatru, słabej widoczności,
- przeciwdziałaniem dużym zmianom geometrycznym konstrukcji,
- pochyleniem budowli.

Zazwyczaj przy budowie pylonów z betonu przyjmuje się następujące parametry konstrukcyjno-technologiczne:

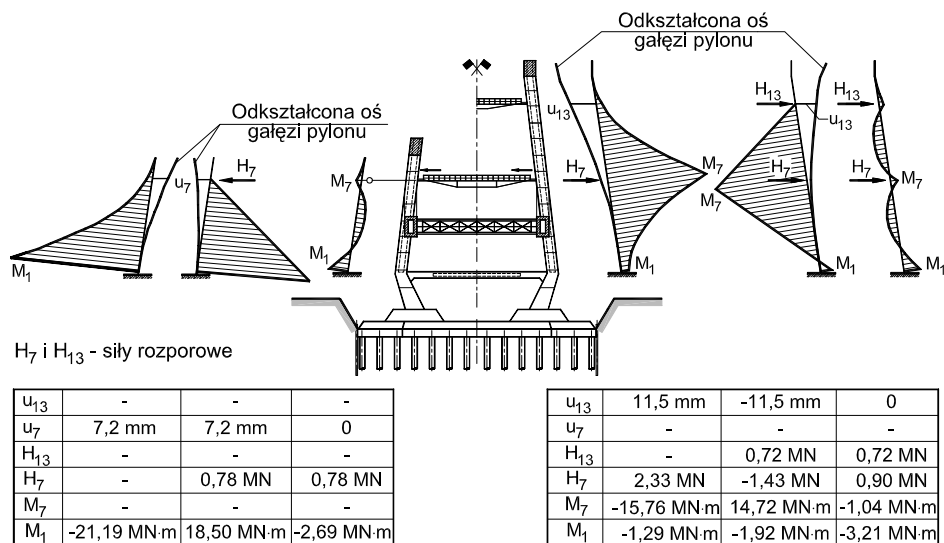
- wysokość segmentu 3÷6 m,
- wymagany czas realizacji odcinka (segmentu) 2÷3 dni,
- minimalna wytrzymałość betonu umożliwiająca przestawienie deskowania ~10 MPa,
- pochylenie gałęzi pylonu 15 stopni,
- procent prętów zbrojenia łączonych w jednym przekroju < 50%,
- czas potrzebny na podniesienie szalunku o jeden takt do góry od 30 do 60 min.



Fot. 14. Poszczególne fazy budowy pylonu mostu III Tysiąclecia im. Jana Pawła II w Gdańsku



Rys. 15. Technologia budowy pylonu mostu Siekierkowskiego w Warszawie



Rys. 16. Kształtowanie cech geometrycznych poszczególnych gałęzi pylonu za pomocą rozpór

Przy pracy na wysokości muszą obowiązywać specjalne instrukcje, określające zasady bezpieczeństwa pracy, w tym dopuszczalną prędkość wiatru, przy której można prowadzić roboty.

Na rysunkach 13 i 15 pokazano główne założenia technologiczne (podział na segmenty, miejsca instalacji rozpór itp.), jakie obowiązywały przy budowie pylonów betonowych dwóch największych polskich mostów [8, 9, 12]. Warto podkreślić, że przyjęte w Polsce rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne nie odbiegają od stosowanych na zagranicznych budowach.

Pylon jest podstawowym elementem konstrukcji mostu podwieszonego. Jego prawidłowe ukształtowanie decyduje o dalszych pracach, w tym o łatwym lub utrudnionym montażu przęseł i olinowania. W projekcie muszą być określone odchyłki graniczne cech geometrycznych pylonu, których nieprzekroczenie przy realizacji konstrukcji zagwarantuje poprawną pracę układu pylon-ciężna-przęsła.

Osiągnięcie założonego w projekcie celu wymaga fachowej obsługi geodezyjnej oraz specjalnych procedur postępowania pozwalających na ocenę wpływu na dokładność tyczenia osi pylonów różnego rodzaju czynników, takich jak np.: dokładność wykonawstwa, odkształcenia sprężyste i reologiczne oraz zmienność temperatury wykonanej części pylonu, parcie wiatru czy osiadanie fundamentu.

W technologii wznoszenia pylonów żelbetowych dużych mostów podwieszonych można wyodrębnić cztery etapy:

- wykonanie masywnej, żelbetowej płyty stanowiącej fundament bezpośredni lub wiążącej głowice elementów posadowienia pośredniego (pale, ściany szczelinowe, studnie),
- budowę najczęściej pochyłych słupów (gałęzi, nóg) dolnej części pylonu,
- budowę rygli łączących obie gałęzie pylonu,
- wykonanie elementów w górnej części pylonu, obejmujących zakotwienia cięgien podwieszających.

Konieczność stosowania rozpór tymczasowych (o regulowanej wartości rozszerzenia) jest związana z występowaniem w czasie budowy ekstremalnych stanów obciążenia. Stanów tych nie obserwuje się po zakończeniu budowy (podczas eksploatacji mostu) i wobec tego nie są uwzględniane w projekcie mostu. Wszelkie obciążenia przekazywane na już zrealizowany pylon generują powstanie w nim sił wewnętrznych zgodnych z obliczeniami projektowymi. Jest tak w przypadku obciążenia ciężarem przęsła podwieszonych do całkowicie już zbudowanego pylonu, a także w przypadku obciążeń ciężarem nawierzchni i wyposażenia mostu oraz działania obciążeń ruchomych. Tylko siły od ciężaru własnego pylonu i efekty wynikające z jego odkształceń podczas budowy są różne od przewidywań projektowych. Zagadnienia te wyjaśniono (na podstawie [15]) na rys. 16. Końcówki rozpór – działające jak śruba rzymska – pozwalają rozsunąć obie gałęzie pylonu na wymaganą w projekcie odległość. W czasie wznoszenia pylona zastosowano dwukrotnie zabieg niwelowania wychyleń ramion za pomocą rozpór usytuowanych na poziomie 7 i 13 segmentu (rys. 16). Najpierw (zgodnie z postępem robót) zniwelowano wychylenie $u_7 = 7,2$ mm, a potem po wykonaniu kolejnych segmentów $u_{14} = 11,5$ mm. Pozwoliło to na minimalizację momentów zginających ramiona pylona (rys. 16).

Wznoszenie pionowej części pylonów jest zadaniem łatwiejszym, lecz wymagającym dużej dokładności przy umiejscawianiu zakotwień cięgien podwieszających; utrudnienia mogą pojawić się w przypadku pylonów wiotkich, które podczas budowy wychylają się bardziej niż pozwalają na to dopuszczalne tolerancje wykonania.

Deformacje pylonów wynikają z różnych przyczyn – są skutkiem odkształceń przewidywanych, niekiedy generowanych w sposób zamierzony, i odkształceń przypadkowych. Można wśród nich rozróżnić wychylenia:

- natychmiastowe – spowodowane ciężarem własnym elementów i ciężarem deskowania samowznoszącego, szybko narastające wraz ze zwiększaniem się mimośrodów sił ciężkości kolejnych sekcji; dodatkowo należy brać tu pod uwagę różne wartości modułu odkształcalności betonu poszczególnych segmentów, co zależy od wieku betonu tych sekcji (moduł sprężystości wzrasta z wiekiem betonu 4-6 razy szybciej niż wytrzymałość, więc wpływ tego czynnika przeważnie nie jest duży) oraz możliwość roztwarcia styków między sekcjami betonowanymi w różnych terminach,
- opóźnione wskutek pełzania betonu, zależne m.in. od tempa prowadzonych prac i od „grubości zastępczej” przekrojów pylonu (obciążenie stopniowane betonowaniem kolejnych sekcji jest przekazywane na coraz starszy beton wykonanych wcześniej segmentów pylonu),
- natychmiastowe – spowodowane naprężaniem kolejnych rozpór tymczasowych,
- wywołane użytkowaniem żurawi, kiedy to ich oddziaływania są przekazywane przez kotwy łączące żurawie ze słupami,
- wywołane parciem wiatru na słupy pylonu i na zamocowane do nich żurawie,
- od odkształceń termicznych związanych z nierównomiernym nagrzaniem konstrukcji przez słońce,
- od odkształceń termicznych związanych z egzotermicznymi procesami zachodzącymi w twardniejącym betonie.

Szczególnie groźne są te deformacje pylonu, których negatywnych skutków nie można korygować w wyniku odpowiedniego ustawienia deskowań kolejnej, betonowanej sekcji gałęzi.

5. Podsumowanie

Technologia budowy mostów podwieszonych w Polsce dalej się rozwija, gdyż realizowane są nowe, ciekawe projekty (porównaj tablicę 1).



Fot. 17. Wizualizacje mostu AOW (A8) na wyspie Rzędzin we Wrocławiu (autor fotografii: W. Kluźcewski, autor wizualizacji: A. Kloc)

Rozpoczęła się budowa największego polskiego betonowego mostu podwieszoności w ciągu AOW we Wrocławiu, a kilka projektów mostów wantungowych z betonu czeka na realizację.

Literatura

- [1] Biliszczuk J.: „Mosty Podwieszoności. Projektowanie i realizacja.”. Arkady, Warszawa 2005.
- [2] Biliszczuk J.: „Mosty drogowe o rekordowych rozpiętościach przęsł w Polsce”, Inżynieria i Budownictwo, nr 4/1994;
- [3] Biliszczuk J., Barcik., Hildebrand M.: „Bridge engineering in Poland. Achievements and challenges”. International Conference „Eko Most 2006. Durable bridge structures in the environment”, Kielce, 16-17 May 2005, Road and Bridge Research Institute, Warszawa 2006;
- [4] Biliszczuk J., Barcik W., Hildebrand M.: „Obiekty mostowe wybudowane w Polsce w latach 1999-2004”. L Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZiTb „Krynica 2004” – tom I. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa-Krynica 2004;
- [5] Biliszczuk J., Onysyk J., Barcik W., Hildebrand M., Sułkowski M.: “Bridge structure as landmark along Polish motorways”, Fib Symposium: Keep Concrete Attractive, May 23-25, 2005, Budapest 2005;
- [6] Biliszczuk J., Onysyk J., Berger K., Machelski CZ., Hildebrand M., Prabucki P.: “Launched Concrete Viaduct of Distinctive Shape in a Busy Area”, FIB Symposium: Concrete Structures: the Challenge of Creativity, (p.184-185), April 26-28, 2004, Avignon, 2004;
- [7] Biliszczuk J., Barcik W.: Architektura polskich mostów podwieszoności. Budownictwo, technologia, architektura, nr 3/2008;
- [8] „Budowa mostu Siekierkowskiego w Warszawie”, praca zbiorowa pod redakcją Stefana Filipiuka. Qax Manufaktura Artystyczna, Bydgoszcz-Gdańsk 2004;

- [9] „Budowa mostu Tysiąclecia we Wrocławiu”, praca zbiorowa pod redakcją: A. Woźniak, M. Kapiuk, A. Jarczewski, Babyloon Studio Industry, Wrocław 2004;
- [10] Hajdin N., Stipanić B., Krawczyk J., Wąchalski K.: „The roadway bridge over Vistula River in Plock (Poland) – design and construction”. „Bridges in Danube basin” – volume I. 5th International Conference on bridges across the Danube 2004. Novi Sad / Serbia & Montenegro / 24 –26 June 2004. EuroGardiGroup, Novi Sad 2004;
- [11] Helowicz A.: Rozkład temperatury twardnienia betonu w masywnych fundamentach mostu Milenijnego we Wrocławiu. Wrocławskie Dni Mostowe. Technologiczne aspekty w projektowaniu i budowie mostów betonowych. DWE. Wrocław 2006;
- [12] „Most III Tysiąclecia im. Jana Pawła II w Gdańsku”, praca zbiorowa pod redakcją Jana Biliszczuka. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Gdańsk-Metz-Łódź-Wrocław 2003;
- [13] Nadolny A.: „Nowy most przez Wartę w Koninie”. Seminarium: Wrocławskie dni mostowe – „Mosty podwieszane i wiszące”. Dolnośląskie Wydawnictwo Naukowe, Wrocław 1-2 grudnia 2005;
- [14] Podwieszony most przez Wisłę w Płocku. Praca zbiorowa pod redakcją J. Biliszczuka. DWE. Płock-Warszawa-Łódź-Wrocław 2007.
- [15] Stańczyk A.: Technologia budowy pylonów mostu Siekierkowskiego. Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2002;