

Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane w fundamentach mostu łukowego przez Wisłę w Toruniu

Doświadczenie jest drugą naturą inżyniera. Pierwszą jest wiedza, która w budownictwie opiera się również na sięgającej setki lat wstecz tradycji.

Jeden z wielu kroków prowadzących do projektowania fundamentów jednego z największych obecnie miejskich drogowych obiektów mostowych w Polsce i Europie (rys. 1) projektanci firmy PontProjekt z Gdańska wykonali wiele lat temu, projektując i nadzorując wykonanie trudnych technicznie fundamentów dwóch dużych mostów drogowych przez Odrę i Regalicę w Szczecinie. Pozytywne doświadczenia z realizacji fundamentów tych obiektów zaowocowały projektem, który na zdecydowanie większą skalę wykorzystuje sprawdzone wcześniej rozwiązania.

Łuki toruńskiego mostu, zbudowanego przez firmę Strabag, spinają brzegi Wisły z wykorzystaniem naturalnej łachy piasku, przekształconej w sztuczną wyspę, na której wykonano zespolony fundament podpory pośredniej. Na brzegach rzeki zlokalizowano zespolone fundamenty palowo-ściankowe, przenoszące jednocześnie duże obciążenia pionowe i jeszcze większe siły poziome. Roboty fundamentowe z wykorzystaniem grodzic stalowych oraz żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych i towarzyszące robotom projekty technologiczne wykonała firma Aarsleff sp. z o.o.

Efektywne wykorzystanie pali prefabrykowanych w fundamentach bardzo dużego mostu łukowego bez ściągu jest nie-

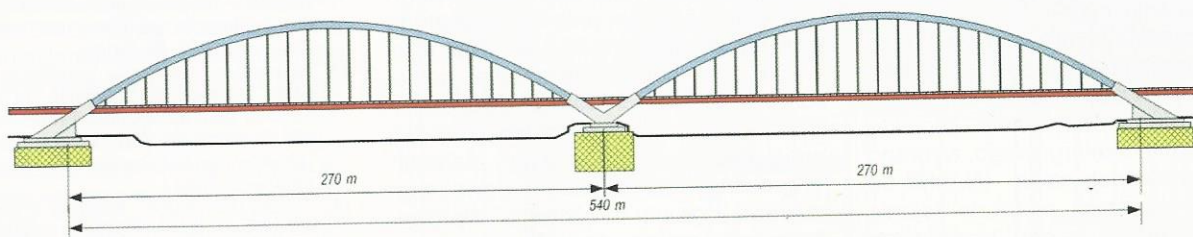
wątpliwym osiągnięciem technicznym i stanowi potwierdzenie, udokumentowanych w tradycji budownictwa, dużych możliwości „małych” pali.

Budowa sztucznej wyspy

Opracowując projekt mostu, wykorzystano charakterystykę naturalnego koryta Wisły w przekroju mostowym na potrzeby budowy podpory środkowej. Sztuczna wyspa (rys. 2, tabl. 1) powstała przez obudowanie grodzicami stalowymi naturalnej łachy piasku zlokalizowanej na środku koryta. Grodzice, ze względu na zmienne stany wody w korycie Wisły, musiały być wykonywane „z wody” ze specjalnej platformy pływającej, która w trakcie pograżania grodzic była stabilizowana w dnie przez opuszczenie podpór szczudłowych (por. rys. 2). Wyporność platformy umożliwiła realizację robót palowych przy użyciu wibratora zmontowanego na maszcie ciężkiego kufara. Wibrowanie grodzic przy użyciu takiego zestawu sprzętowego umożliwia zapewnienie większej dokładności pograżenia grodzic, co ma szczególnie duże znaczenie w robotach prowadzonych z wody.

Wibrowaniu grodzic z pływającej platformy roboczej towarzyszyły roboty:

- refulacyjne, zapewniające utrzymanie żeglowności technologicznej koryta rzeki (minimalna wymagana głębokość umożliwiająca realizację robót to około 1,2 m);



Rys. 1. Schemat mostu z zaznaczonym zasięgiem robót palowych



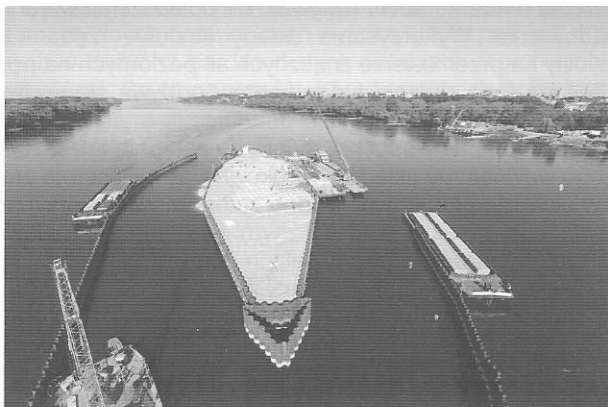
Rys. 2. „Domykanie” obudowy wyspy; widoczne: obudowa stalowa wyspy, platforma pływająca z podporami szczudłowymi, holownik oraz kufar z wibratorem

Tablica 1

Parametry techniczno-technologiczne wyspy wokół podpory środkowej

Element	Opis/wartość		
Wymiary w planie, m	129,5×30,0		
Powierzchnia wyspy, m ²	2636,8		
Odcinek	obudowa wyspy	rdzeń izbicy	obudowa izbicy
Długość zabezpieczenia w planie, m	266	11,2	20,4
Rodzaj grodzicy	AZ18-700	AZ18	GU6N
Długość grodzicy, m	17,0	14,0	13,0
Powierzchnia obudowy, m ²	4522	156,8	265,2
Stal grodzic	S355GP		
Siła maksymalna w ściągu, kN	805		
Liczba ściągów	51		
Długość całkowita ściągów, m	1292		

– zabezpieczające wykonaną obudowę wyspy przed podmyciem; wykonano m.in. dodatkową ściankę z grodzic stalowych stanowiącą osłonę (izbicę) tymczasową budowanej wyspy (rys. 3) oraz wypełniano lokalnie powstające rozmycia workami, które stanowiły również element docelowego zabezpieczenia sztucznej wyspy.

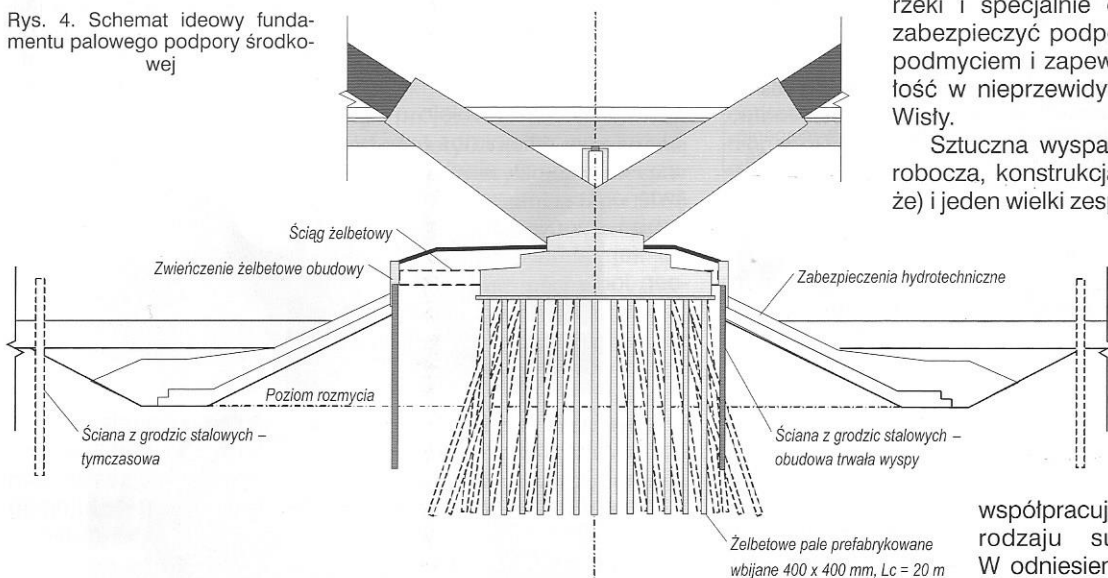


Rys. 3. Wyspa po zakończeniu robót palowych; widoczna obudowa stalowa wyspy, izbica, wykonany fundament palowy podpory pośredniej, ścianka osłonowa określająca zakres robót hydrotechnicznych wokół wyspy

Wszystkie działania były konieczną reakcją na zmiany ukształtowania dna w rejonie robót. Poziom dna rzeki zmieniał się często o kilka metrów w ciągu kilku godzin.

Zamknięcie obudowy stalowej pozwoliło na kontynuowanie robót refulacyjnych, mających na celu wypełnienie komory do pierwszego poziomu technologicznego, na którym zamontowano prętowe ściągi stalowe. Ich układ musiał być skoordynowany ze skomplikowaną geometrią fundamentu palowego, złożonego z wbijanych żelbetowych pali prefabrykowanych, w większości pochylonych w różnych kierunkach (rys. 4). Po usypaniu nad zamontowanymi ściągami platformy roboczej rozpoczęły się roboty palowe. Wielkość wyspy (powierzchnia powyżej 26 arów) pozwoliła na jednoczesną pracę kilku kafarów.

Rys. 4. Schemat ideowy fundamentu palowego podpory środkowej



Zadaniem inżynierskim było rozwiązanie problemów logistycznych, m.in. umożliwienie wjazdu kafarów, dźwigów i innych maszyn budowlanych na wyspę z jednostek pływających przy zmiennym poziomie wody. Zaprojektowano w tym celu specjalny pomost najazdowy, który później obsługiwał cały ruch technologiczny, jaki odbywał się między wyspą a lądem.



Rys. 5. Roboty palowe w fundamencie podpory 13/14 od strony centrum Torunia; widoczny magazyn pali i kafary z młotami hydraulicznymi w trakcie wbijania pali

W ramach robót palowych najpierw zrealizowano fazę badań, podczas której zweryfikowano założenia projektowe dotyczące nośności pali oraz sprawdzono pograżalność pali. Analiza pograżalności uwzględniała konieczność wbicia dużej liczby pali w ograniczonej przestrzeni wyspy, bez nadmiernych odkształceń obudowy i przeciążenia ściągnięć tymczasowych. Palowaniu zasadniczemu musiało towarzyszyć, nieuniknione w takiej sytuacji i zakładane w projekcie, dogęszczanie piasków, ujednoczenie warunków posadowienia podpory środkowej, a także rozpychanie i zmiany kształtu obudowy stalowej, ograniczone technologicznie układem ściągnięć. Dopiero w trakcie zasadniczych robót palowych wyspa uzyskała swój ostateczny kształt, który mieścił się w tolerancjach założonych przez projektanta.

Zakończenie robót palowych pozwoliło na jednoczesne wykonanie żelbetowych zwieńczeń fundamentu palowego, zwieńczenia grodzic stalowych stanowiących obudowę wyspy oraz wykonanie trwałych ściągnięć żelbetowych. W tym samym czasie wokół wyspy wykonano różne roboty hydrotechniczne, które wraz ze starannie określoną lokalizacją wyspy w korycie rzeki i specjalnie dobranym kształtem mają zabezpieczyć podporę środkową mostu przed podmyciem i zapewnić jej przewidywaną trwałość w nieprzewidywalnych warunkach koryta Wisły.

Sztuczna wyspa to jednocześnie platforma robocza, konstrukcja hydrotechniczna (nabrzeże) i jeden wielki zespolony element konstrukcyjny

złożony z obudowy z grodzic stalowych ze zwieńczeniem, układu trwałych ściągnięć żelbetowych, gruntu naturalnego i zasypowego oraz układu pali ze zwieńczeniem. Wszystkie elementy składowe podpory środkowej

współpracują ze sobą, tworząc swego rodzaju superelement podporowy. W odniesieniu do poszczególnych elementów składowych na potrzeby realizacji robót palowych sformułowano oddzielne wymagania, uwzględniając etapy realizacyjne. Głównym celem było zapewnienie integralności konstrukcyjnej całego bloku fundamentowego wykorzystywanego w analizie globalnej obiektu.

Integralność całego rozwiązania w sposób ciągły sprawdzał projektant w ramach nadzoru autorskiego.

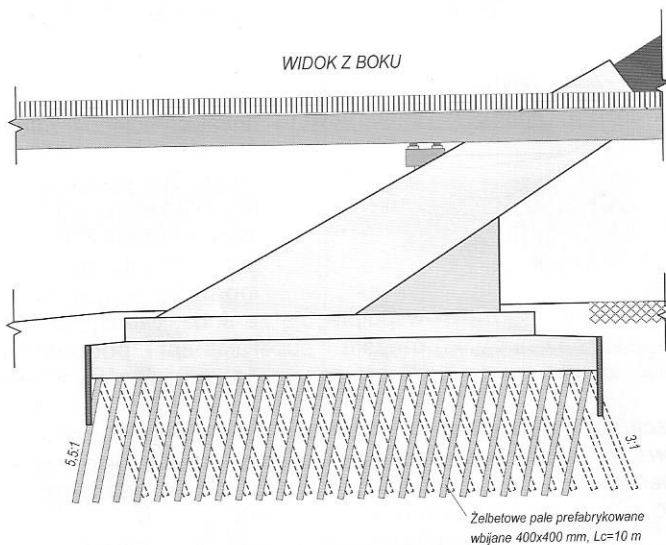
Fundamenty palowe mostu głównego

Most łukowy przez Wisłę w Toruniu to pod względem posadowienia na palach znaczące wyzwanie projektowe, wykonawcze i organizacyjne (tabl. 2). Łuk bez ściągą o tych gabarytach generuje na fundamenty podpór skrajnych bardzo duże siły pionowe i jeszcze większe siły poziome w kierunku podłużnym oraz nieco mniejsze w kierunku poprzecznym do osi mostu (por. rys. 1 i 6). Podpora środkowa z kolei jest silnie obciążona pionowo i poziomo poprzecznie do osi mostu (por. rys. 1 i 4). W fazach technologicznych i użytkowych każdy z fundamentów jest poddawany próbie zginania.

Tablica 2

Parametry techniczno-technologiczne fundamentów palowych

Fundament palowy podpory	Podpora 13/14 (od strony Torunia)	Podpora 15 (środkowa)	Podpora 16/17 (od strony Łodzi)
Wymiary obrysu fundamentu, m	34,8×48,2	20,4×52,4	34,8×47,7
Liczba pali	538	395	538
Przekrój pali, cm	40×40	40×40	40×40
Długość pali docelowych, m	12 (10+2) 13 (11+2)	20 i 21	12 (10+2) 13 (11+2)
Nachylenia pali (zakres):	1:1 ÷ 3:1	1:1 ÷ 3:1	1:1 ÷ 3:1
Łączna długość wbitych pali, m	6686	8068	6682
Beton pali	C40/50		
Zbrojenie pali, mm	12 ϕ 12 lub 12 ϕ 12+8 ϕ 16	12 ϕ 12 lub 12 ϕ 12+8 ϕ 16	12 ϕ 12 lub 12 ϕ 12+8 ϕ 16
Q_r , kN	1015	1100(C) / 590(T)	1037
$R_{d,calc}$, kN	1390	1240(C) / 605(T)	1340
Liczba przeprowadzonych próbnych obciążeń			
SLT	(C) 6	(C) 4 + (T) 1 = 5	(C) 6
DLT (A)	21	14	20
DLT (B)	70	60	74
Wyniki próbnych obciążeń R_d , kN			
SLT	1700 ÷ 2129	2067 ÷ 2207(C) / 667(T)	1770 ÷ 2605
DLT (A)	1496 ÷ 2717	1528 ÷ 2776(C) / 756 ÷ 1244(T)	1187 ÷ 2495
DLT (B)	1801 ÷ 3407	1570 ÷ 2637(C) / 612 ÷ 1454(T)	1620 ÷ 2538
SLT – badania statyczne nośności pali, DLT – badania dynamiczne nośności pali przy dużych przemieszczeniach, (A) – przed palowaniem zasadniczym, (B) – po palowaniu zasadniczym, (C) – wciskanie, (T) – wyciąganie, Q_r – obciążenie pala, $R_{d,calc}$ – nośność obliczona, R_d – nośność zbadana.			



Rys. 6. Schemat ideowy fundamentu palowego podpory skrajnej

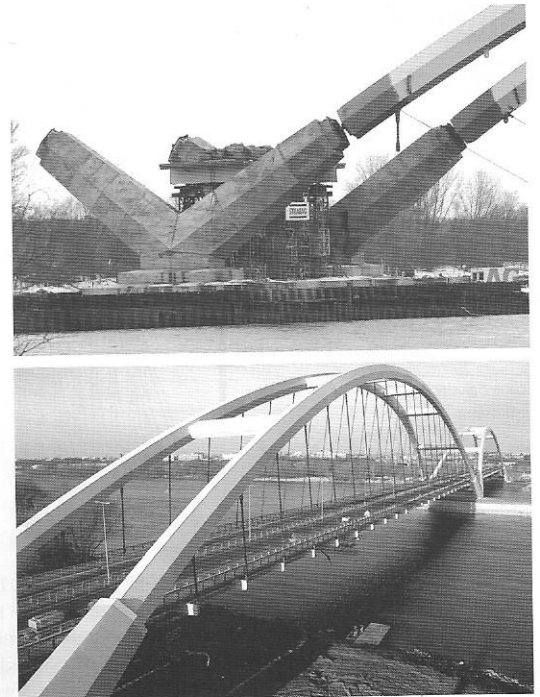
Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane, z których wykonano fundamenty głębokie podpór, są jedynie elementem większej całości, który w fazie technologicznej kształtuje warunki posadowienia każdego z fundamentów.

Podłoże podpór stanowiły głównie piaski o różnym stopniu zagęszczenia. Wykorzystanie pali prefabrykowanych wbijanych pozwoliło na ujednoczenie charakterystyki gruntów w obrębie fundamentów i wpływało na polepszenie warunków posadowienia. Wykorzystane układy koźlowe rzędami pali pozwoliły na przeniesienie znacznych sił poziomych na podłoże. Analiza tego rodzaju fundamentów odbywa się w dwóch etapach: w pierwszym analizie poddaje się bryłę/blok fundamentu (wspomniany superelement), a następnie tak kształtuje się jego wewnętrzny układ konstrukcyjny, aby właściwie pracował w układzie globalnym. Trudno zatem mówić w przypadku omawianego obiektu o klasycznym fundamentem palowym, a należałoby raczej mówić o palach jako elementach składowych większego układu konstrukcyjnego, stanowiącego fundament tego wielkiego mostu. Na etapie wbijania pali próbnych określono szczegółowo kolejność robót palowych, przeprowadzono badania nośności i próby technologiczne, które zapewniły spełnienie wymagań projektowych.

Podsumowanie

Wykonane roboty fundamentowe nabierają wartości dopiero, gdy przejdą pozytywną weryfikację w badaniach i pomiarach inżynierskich. Na etapie realizacji przeprowadzono serię badań nośności pali na potrzeby projektowe (przed palowaniem zasadniczym), próby technologiczne (pale próbne na potrzeby analizy wbijalności) i powykonawcze (badania nośności pali losowo wybranych lub wskazanych przez nadzór). Nośność pozioma fundamentów była weryfikowana na budowie wraz z postępem prac. W przypadku tak dużego obiektu fazy technologiczne i obciążenia stałe mają charakter oddziaływań dominujących i dlatego pomiary przemieszczeń podpór w trakcie budowy stanowią w praktyce wynik próbnego obciążenia poziomego fundamentu w skali naturalnej. Pomierzone przemieszczenia pionowe i poziome podpór okazały się bardzo małe i mieściły się z zapasem w tolerancjach wymaganych w projekcie.

Opisane roboty fundamentowe mostu głównego (rys. 7) stanowią tylko fragment większej całości, która obejmuje dojaz-



Rys. 7. Podpora środkowa w trakcie montażu łuku (u góry) i ukończony most

dy do obiektu oraz włączenie go w istniejący układ komunikacyjny Torunia (wiadukty, tunele itp.). Całość robót fundamentowych obejmowała 8695 m² stałych lub tymczasowych traconych i 6230 m² tymczasowych odzyskiwanych ścian z grodziec stalowych, 2677 m kotew trwałych, 995 m rozpór tymczasowych oraz 3313 żelbetonowych pali wbijanych o przekroju 400 × 400 mm i łącznej długości 42 475 m.

Przykładów takich interesujących fundamentów i jednocześnie pozytywnych doświadczeń wykorzystania pali prefabrykowanych w dużych i bardzo dużych obiektach mostowych jest coraz więcej. Są to na przykład fundamenty dwóch równoległych, 160-metrowych mostów autostradowych łukowych ze ściągiem przez San w ciągu A4, wspomniane już mosty przez

Odrę i Regalicę w Szczecinie, estakada WE-1 w ciągu południowej obwodnicy Gdańska (najdłuższy obiekt mostowy w Polsce, oparty na blisko 70 podwójnych podporach i palach prefabrykowanych), estakady dojazdowe do mostu Rędziańskiego we Wrocławiu, budowanego mostu przez Wisłę w Połanicy itp.

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Pont-Projekt sp. z o.o. Projekt wykonawczy. Nowy przebieg drogi krajowej nr 1 z mostem drogowym przez Wisłę w Toruniu. Etap I – Budowa mostu drogowego wraz z dojazdami łączącymi drogę krajową nr 1 z drogą krajową nr 15 i nr 80. Most łukowy przez rzekę Wisłę. 12.2008.