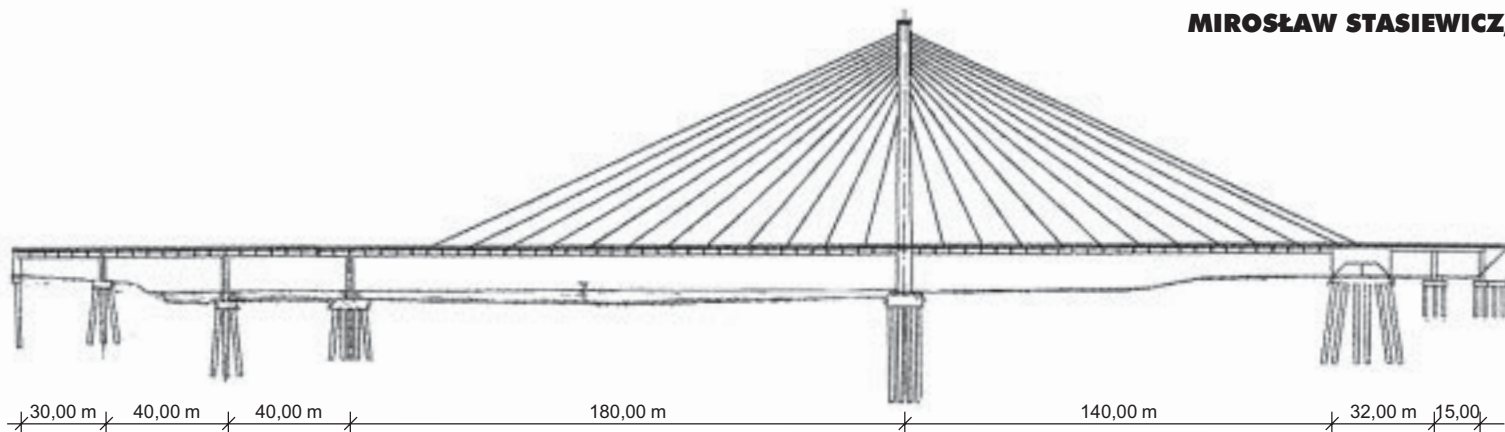


Doświadczenia WPG S.A. z geodezyjnej obsługi budowy pylonów mostów:

Jak rosły pylony pod cz

MIROSLAW STASIEWICZ,



W chwili oddawania niniejszego artykułu do druku, na moście Świętokrzyskim w Warszawie realizowana jest faza pełnego naprężania cięgien podwieszających przęsła, zaś na moście Sucharskiego przez Martwą Wisłę w Gdańsku wykonywane są sekcje górnej, pionowej części pylonu. Doświadczenia, jakie zdobyło Warszawskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne S.A., prowadząc obsługę geodezyjną budowy pylonów, a także innych elementów konstrukcyjnych obu mostów, pozwalają na zaprezentowanie szerszemu gronu geodetów kilku sprawdzonych już na gruncie praktycznym spostrzeżeń i przemysłów dotyczących problematyki pomiarów geodezyjnych przy budowie przepraw z przęsłami podwieszonymi.

Skupimy się na kilku aspektach mających istotne znaczenie dla powodzenia całości tego inżynierskiego przedsięwzięcia. Z uwagi na to, iż informacje ogólne o konstrukcji mostu Świętokrzyskiego (Sw) i mostu Sucharskiego (Su) oraz szczegółowy opis technologii budowy ich pylonów znaleźć można w literaturze [4, 5, 6, 7], po zestawieniu syntetycznych danych porównawczych dla ww. obiektów przejdziemy od razu do problematyki pomiarów geodezyjnych. Będziemy przy tym unikać niepotrzebnych powtórzeń w stosunku do informacji podanych już w GEODECIE [3].

Dane dotyczące konstrukcji i technologii wznoszenia pylonów w Warszawie i Gdańsku

Obydwa mosty mają przęsła główne podwieszane za pomocą cięgien stalowych zakotwionych w trzonie pylonu. Przekroje podłużne tych mostów pokazane są na rys. 1a, 1b. Pylony mostów stanowią konstrukcje żelbetowe w kształcie odwróconej litery Y o przekrojach poprzecznych przedstawionych na rys. 2a i 2b (na s. 22). W części trzonowej pylonu mostu Sw w betonie zatopiona jest stalowa konstrukcja wsporcza dla tulei cięgien podwieszających, wychodzących poza obrys trzonu.

W przypadku mostu Su podobna konstrukcja wsporcza, ale o znacznie większych gabarytach, pełni także funkcję konstrukcji nośnej trzonu. Technologia wznoszenia jest, generalnie rzecz biorąc, identyczna dla obu mostów:

- pierwsze 3 sekcje: szalunek stacjonarny oparty na płycie fundamentu;
- pozostałe sekcje: szalunek samowznoszący PERI;
- konstrukcja wsporcza utrzymująca tuleje cięgien wykonywana jest w segmentach (klatkach) w wytwórni, przy czym zamocowane do niej na sztywno tuleje ucięte są tak, by nie wystawały poza obrys trzonu pylonu; ucięte części są dołączane po zabetonowaniu trzonu.

W procesie wznoszenia pochyłych słupów dolnej części pylonu (zwanych dalej w uproszczeniu „nogami”) na trzech poziomach stosowane są tymczasowe rozporzy zabezpieczające przed nadmiernym wyężeniem konstrukcji, wykorzystywane także do korygowania kształtu nóg pylonu.

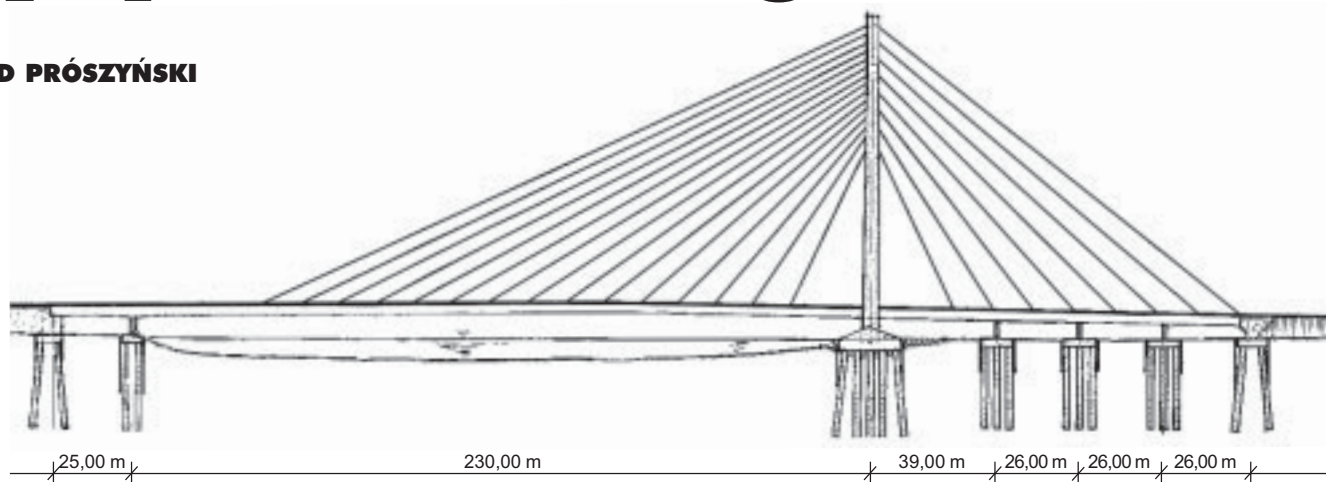
Sposób prezentacji konstrukcji pylonów - projekt i geodezyjne opracowanie

Zauważmy, że bryła pylonu, szczególnie w obrębie jego pochyłych nóg, charakteryzuje się skomplikowanym kształtem powierzchni zewnętrznej. Wykonawca pylonu – WARBUD S.A., poza zestawieniami tabelarycznymi (współrzędne X, Y, Z dla charakterystycznych przekrojów poziomych budowli), przekazał WPG projekt pylonu warszawskiego opracowany w AutoCAD-zie. Taka forma zapisu projektu zapewniała zarówno łatwe pozyskiwanie informacji o wszelkich parametrach geometrycznych konstrukcji, jak i wykonywanie różnego rodzaju dokumentów graficznych (przekrojów, rzutów i widoków zewnętrznych bryły). Niezależnie od tego WPG (inż. A. Papis) na podstawie analitycznych danych bazowych opracowało w MicroStation własną wersję modelu obiektu (wizualizacja na rys. 2a). Inicjatywa ta okazała się zgodna z życzeniem technologa WARBUD-u. Uzyskano w ten sposób możliwość niezależnej kontroli geometrii obiektu.

Świętokrzyskiego w Warszawie oraz Sucharskiego w Gdańsku *)

ujnym okiem geodetów

WITOLD PRÓSZYŃSKI



W kilku zaledwie miejscach wystąpiły niewielkie rozbieżności (do 3 mm) w wartościach współrzędnych punktów szczegółowych (otwory technologiczne), które to rozbieżności zostały natychmiast wyjaśnione i usunięte.

Na rysunku 2b zamieszczona jest komputerowa wizualizacja projektowanej bryły pylonu dla mostu Sucharskiego (opracowanie również autorstwa A. Papisa). Zdublowanie przez WPG dokumentacji projektowej pylonu, wymagające szczegółowego zapoznania się z jego geometryczną strukturą, umożliwiło wykonawcom obsługi geodezyjnej łatwe poruszanie się po dokumentacji, kontrolę wszelkich danych z projektu oraz sporządzanie szkiców realizacyjnych i inwentaryzacyjnych.

Wymagania dokładnościowe dla realizacji pylonów

Pylon jest jednym z podstawowych elementów funkcjonalnych mostu podwieszonoego, podtrzymującym – poprzez zespół cięgien – przęsła mostu. Podane w projekcie odchyłki graniczne dla realizacji geometrii pylonu, gwarantujące poprawną pracę całego układu „pylon-cięgna-przęsła”, muszą obejmować błędy wykonawstwa (w tym błędy pomiaru) oraz wpływ różnego rodzaju czynników, takich jak np. zmienność temperatur, parcie wiatru czy osiadanie podpór. W ramach planu jakości robót budowlanych i montażowych wyszczególnione były m.in. odchyłki geometryczne dotyczące konstrukcji pylonu oraz tulei dla cięgien podwieszających osadzonych w jego trzonie. Kilka przykładowych wartości odchyłek granicznych dla mostu Sw podano w tabeli 1.

Na podstawie ogólnego planu jakości powstał plan jakości dla prac geodezyjnych. W pierwszej kolejności postawiono wymóg atestacji instrumentów pomiarowych przeznaczonych do obsługi budowy pylonu i sprawdzenia całego oprzyrządowania pomocniczego. Niezbędne dokładności wyznaczeń pozycji i wytyczeń ustalone zostały wprawdzie według obowiązujących zasad, ale wartości współczynników udziału prac pomiarowych

Rys. 1a, b. Przekrój podłużny mostu: a) Świętokrzyskiego, b) Sucharskiego (rysunki z [7] publikujemy za zgodą autora)

w całkowitej odchyłce przyjmowano tak, by pozostawić wystarczająco duży zapas dla trudniejszych do oszacowania błędów wnoszonych przez inne składowe czynności procesu budowlano-montażowego.

Pozostawiawszy kwestię ustalania tolerancji geometrycznych specjalistom z zakresu budownictwa mostowego, zauważmy tylko, iż większość z wymienionych na wstępie tego rozdziału wpływów (w tym także błędy wykonawstwa budowlanego) mogła być jedynie oszacowana z pewnym przybliżeniem. W takiej sytuacji tym trudniej byłoby projektantowi (w fazie analiz wstępnych) oszacować efekty ich niekorzystnych superpozycji, stanowiące istotne dane w zadawaniu wartości odchyłek granicznych. Można przypuszczać, iż tolerancje geometryczne dla szeregu wielkości podano z pewnym „zastrzeżeniem” mającym mobilizować wykonawstwo (zwłaszcza w początkowej fazie budowy) i jednocześnie stanowiącym pewien „zapas” dokładnościowy mogący wchłonąć nieprzewidziane wcześniej sploty trudnych do oszacowania wpływów.

W niektórych przypadkach wymagania dokładnościowe podane w dokumentacji projektowej, a odnoszące się do zrealizowanej konstrukcji pylonu, implikowały ostre rygory dokładnościowe dla prac w kolejnych fazach procesu budowy. I tak, na przy-

| | |
|---|----------------|
| ■ odchyłka grubości ścian nogi | -20 mm/ +30 mm |
| ■ odchyłka wyznaczenia wysokości pylonu | ± 10 mm |
| ■ odchyłka wytyczenia zakotwień | ± 3 mm |
| ■ odchyłka wymiarów stalowej konstrukcji wsporczej | ± 3 mm |
| ■ ΔX, ΔY, ΔZ dla osi tulei cięgna: | |
| a) w płaszczyźnie stykowej do płaszczyzny oporowej cięgna | 10 mm i 20 mm |
| b) w płaszczyźnie wyjścia tulei z trzonu | 10 mm |
| c) w płaszczyźnie końcowej tulei | 20 mm |

Tabela 1. Przykładowe wartości odchyłek granicznych dla mostu Świętokrzyskiego

kład, spełnienie tych wymagań dla ustawienia tutej cięgien podwieszających, osadzonych na sztywno w klatce konstrukcji wsporczej w wytwórni pozaobiektywnej, uwarunkowane jest odpowiednio dokładnym ustawianiem na pylonie (podczas wykonywania trzonu) poszczególnych klatek tej konstrukcji. Wobec ograniczonych możliwości regulacji położenia klatek następujących po pierwszym segmencie (stanowiącym zespolenie 3 klatek) niezbędne dokładności ich ustawienia umożliwiające spełnienie wymagań projektowych, okazują się bardzo trudne do osiągnięcia zarówno dla geodetów, jak i montażystów.

W przypadku mostu w Gdańsku specyfikacja wymagań dokładnościowych była nieco oszczędniejsza (tabela 2).

| | |
|--|---------|
| ■ odchyłki graniczne rzędnej (dolna i górna część pylonu) | ± 10 mm |
| ■ odchyłki graniczne wymiarów w płaszczyźnie poziomej (dolna i górna część pylonu) | ± 10 mm |
| ■ pozioma odchyłka pochylenia ścian słupów oraz osi pylonu (część dolna) | 0,1% H |
| ■ pozioma odchyłka pochylenia ścian słupów | 0,1% H |

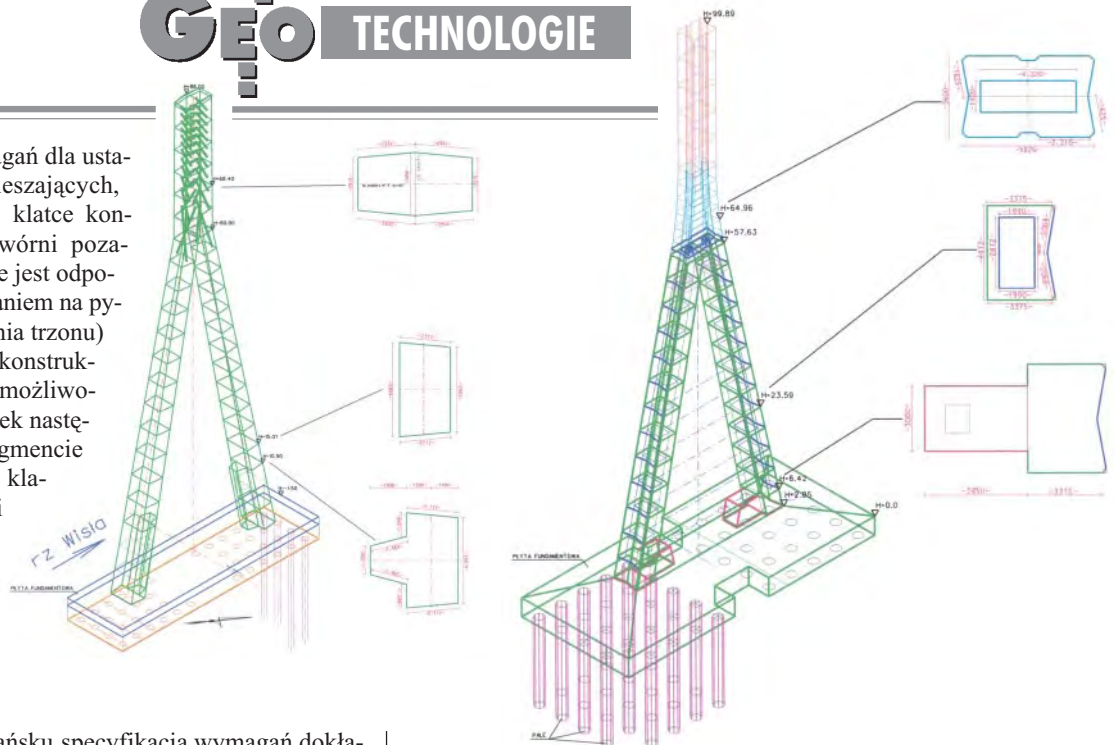
Tabela 2. Przykładowe wartości odchyłek geometrycznych pylonu mostu Sucharskiego

Koordinacja prac geodezyjnych

Obiekt po zakończeniu robót powinien stanowić spójną i poprawnie funkcjonującą całość, niezależnie od jego podziału w procesie budowy na odcinki czy też części (pylon, podpory, przęsła mostu, wiadukty) wykonywane przez różne firmy budowlane i obsługiwane przez różne firmy geodezyjne. Na rzecz ścisłej koordynacji prac geodezyjnych przy budowie funkcjonalnie powiązanych elementów mostu podwieszanego przemawiają m.in. następujące względy:

- przyjęcie uzgodnionych, jednolitych zasad podejścia do wyspecyfikowanych w projekcie tolerancji geometrycznych i wynikających stąd reguł ustalania dokładności prac pomiarowych;
- dostosowanie formy prezentacji wyników pomiarów do wymogów stawianych przez inspektora nadzoru;
- uzgadnianie (w miarę możliwości) terminów wykonania prac pomiarowych mających wzajemne uwarunkowania;
- przekazywanie poszczególnym ekipom geodezyjnym wyników okresowych pomiarów podstawowej sieci realizacyjnej oraz wyników okresowych pomiarów przemieszczeń pionowych;
- przyjęcie jednolitych zasad postępowania w przypadku wystąpienia odchyłek większych od odchyłek granicznych, nie spowodowanych jakimikolwiek błędami w „sztuce pomiarowej”.

Większość z powyższych pozycji uwzględniano w działalności koordynacyjnej przy budowie mostu Świętokrzyskiego prowadzonej z ramienia generalnego wykonawcy przez inż. Jerzego Szymańskiego z GEO-INWEST-u oraz ze strony inwestora za-



Rys. 2a, b. Wizualizacja projektowanej bryły pylonu z podziałem na sekcje betonowania oraz wybrane przekroje poprzeczne a) most Świętokrzyski, b) most Sucharskiego

stępczego przez mgr. inż. Zbigniewa Ogrodowskiego z Geoprojekt S.A. Pionierski na skalę krajową charakter przedsięwzięcia (w szczególności mostu warszawskiego) narzucił potrzebę wyjątkowej rzetelności i specjalnej (może czasami przesadnej) ostrożności w podejściu do wszystkich wykonywanych prac. W odniesieniu do pomiarów geodezyjnych znalazło to wyraz w wysunięciu na czoło postulatu wysokiej niezawodności wyznaczeń i wytyczeń. Wymagało to takiego zorganizowania procesu pomiaru i tyczenia (system kontroli wewnętrznych i zewnętrznych), aby wyeliminować możliwość pozostawienia pomyłki bądź błędu grubego w finalnym produkcie. Więcej na temat koordynacji prac geodezyjnych przy budowie mostu Świętokrzyskiego można znaleźć w GEODECIE [3].

Szczegółowa osnowa realizacyjna

Do geodezyjnej obsługi budowy pylonu na obydwu mostach WPG założyło szczegółową poziomą osnowę realizacyjną, stosując dowiązanie niezniekształcające sieci szczegółowej (tj. wyrownanie w układzie lokalnym oraz transformacja bez zmiany skali) do punktów podstawowej osnowy realizacyjnej wykonanej uprzednio przez inne firmy geodezyjne (most Sw – zob. [3]). Punkty osnowy szczegółowej obierano z przeznaczeniem na stanowiska do obserwacji pylonu, uwzględniając przy tym różne fazy jego wznoszenia i związany z tym stopień widoczności określonych punktów obiektu (rys. 3). Do wyrównania obserwacji w sieci szczegółowej



Stanowisko obserwacyjne na punkcie szczegółowej osnowy pomiarowej

oraz transformacji współrzędnych użyto pakietu GEONET autorstwa prof. Romana Kadaja.

Bardzo wysoki poziom globalnego wskaźnika niezawodności (dla rutynowych prac zalecany jest poziom $> 0,71$) jest wynikiem przesadnie dużej, ale celowej, nadliczbowości obserwacji w sieci szczegółowej.

Przy porównywalnej dokładności sieci szczegółowych obu mostów dosyć znaczna różnica w maksymalnych wielkościach odchyłek wpasowania sieci w punkty osnowy podstawowej wynika z różnicy poziomu dokładnościowego obu osnow podstawowych. W przypadku mostu Sw była to precyzyjna klasyczna sieć kątowniowa o błędzie średnim położenia punktu nie przekraczającym 1,3 mm. W przypadku mostu Su, wobec trudności w użyciu wizur pomiędzy punktami sieci, zastosowano także technologię pomiarową GPS, co pozwoliło osiągnąć dokładność osnowy na poziomie kilku milimetrów.

Okresowe pomiary kontrolne osnowy szczegółowej umożliwiły wykrycie punktów, które doznały przesunięć o wielkościach niedopuszczalnych z punktu widzenia wymaganej dokładności wyznaczeń i wskazań na pylonie.

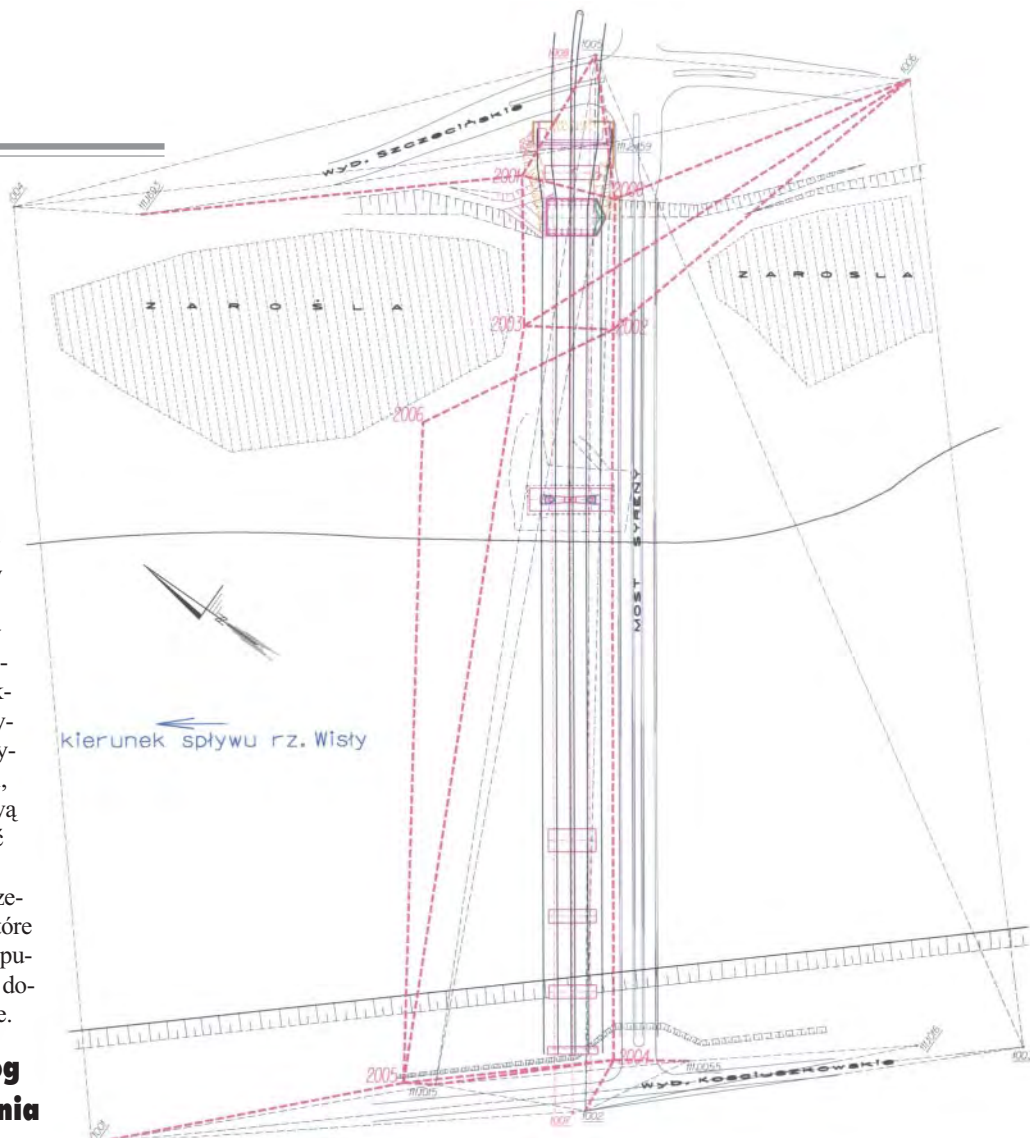
Prowadzenie osi pochyłych nóg pylonu w trakcie ich wznoszenia

Skoncentrujemy się tutaj na jednym z niewątpliwie trudnych etapów geodezyjnej obsługi budowy pylonu, jakim było prowadzenie osi pochyłych nóg pylonu. Dla kompletności wymienimy inne jej etapy będące w gestii WPG: obsługa budowy fundamentu pylonu, ustawianie kolejnych segmentów konstrukcji w sporczej z wewnętrznymi odcinkami tulei ciągien; kontrola ustawiania szalunków trzonu, kontrola ustawienia zewnętrznych odcinków tulei ciągien po zabetonowaniu ostatniej sekcji trzonu. Zaiśniała też konieczność wykonania przez WPG kontroli wymiarowej segmentów konstrukcji w sporczej montowanej w wytwórni, przed jej przetransportowaniem na plac budowy. Aktualnie firma ta prowadzi na moście warszawskim monitoring zachowania się obu podwieszanych przęseł w trakcie pełnego naprężania ciągien.

a) Zasada zadawania osi pochyłych nóg pylonu. Pierwotnie koncepcja wysunięta przez dr. A. Stańczyka z Politechniki War-

| most | Świętokrzyski | Sucharskiego |
|---|--|--|
| typ sieci | kątowno-łiniowa | kątowno-łiniowa |
| błędy średnie pomiaru (a priori) | 1 mm; 4,7 ^{cc} -6,1 ^{cc} | 1 mm; 4,3 ^{cc} -5,4 ^{cc} |
| globalny wskaźnik niezawodności | 0,96 | 0,98 |
| odchyłka wpasowania w osnowę podstawową | < 0,5 mm | < 5 mm |

Tabela 3. Parametry dokładnościowe szczegółowej osnowy realizacyjnej obu mostów



Rys. 3. Szczegółowa osnowa realizacyjna dla budowy pylonu mostu Świętokrzyskiego

szawskiej, konsultanta z ramienia WARBUD-u, zakładała ustawianie każdej kolejnej sekcji wzdłuż stycznej do osi ostatniej wykonanej już sekcji nogi pylonu. Zamierzał on uzyskać w ten sposób przebieg osi (w płaszczyźnie prostopadłej do osi mostu) ukształtowany zasadniczo pod wpływem odkształceń z tytułu ciężaru własnego konstrukcji działającego mimośrodowo w stosunku do podstawy nogi (tzw. odkształcenia natychmiastowe) oraz z tytułu pełzania betonu (tzw. odkształcenia opóźnione – malejące w funkcji czasu). Po zamontowaniu rozpory kształt ten miał być doprowadzany do przebiegu teoretycznego w postaci linii prostej poprzez odpowiednie naprężanie rozpory, z uwzględnieniem przyszłego finalnego efektu usunięcia wszystkich trzech rozpór.

W opinii WPG koncepcja operowania styczną do osi ostatniej wykonanej sekcji uznana została za zbyt ryzykowną z uwagi na niebezpieczeństwo niekorzystnego przenoszenia się na wyższe poziomy błędów wykonawstwa (głównie – ustawiania szalunku, przesunięcia i deformacji szalunku w trakcie betonowania, w mniejszym stopniu – niedokładności wskazań geodezyjnych), które nakładają się na (traktowane jako naturalne i uwzględniane przez projektanta) deformacje pochylej nogi pylonu z tytułu obciążenia ciężarem własnym oraz z powodu pełzania betonu. Rozważano możliwość odfiltrowywania wpływu z tytułu błędów wykonawstwa, pozwalającego na analityczne odtworzenie przebiegu każdej, niezakłóconej tymi błędami chwilowej osi nogi pylonu. Wówczas jednakże wymagany byłby bardzo absorbujący monitoring geodezyjny wszystkich istotnych faz cyklu technologicznego dla każdej

| | 30.10.99 szalunek A6 | 2.11.99 beton A6 | 5.11.99 szalunek A7 | 8.11.99 beton A7 | 10.11.99 szalunek A8 | 12.11.99 beton A8 | 13.11.99 beton A8 | 16.11.99 szalunek A9 | 17.11.99 beton A9 |
|-------------|-------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| lusterko L1 | 11,228 | 11,227 | 11,227 | 11,226 | 11,225 | 11,222 | 11,223 | 11,222 | 11,219 |
| lusterko L2 | 9,005 | 9,005 | 9,005 | 9,004 | 9,004 | 9,001 | 9,001 | 9,001 | 8,999 |

Tabela 4. Wartości współrzędnej Y dla góry sekcji A5 podczas wykonywania sekcji A6-A9

sekcji. Z tego też względu taki sposób realizacji koncepcji konsultanta WARBU-u, aczkolwiek minimalizujący ryzyko przeniesienia się błędów wykonawstwa, uznany został za nieekonomiczny. Po kilku naradach przyjęto wersję polegającą na zadawaniu przebiegu chwilowej osi kolejnej sekcji według obliczeń konsultanta WARBU-u, uwzględniających zginanie pod wpływem ciężaru własnego i pełzania betonu. Predykcja ta była konfrontowana z wynikami powykonawczego pomiaru inwentaryzacyjnego.

Przykładowe wielkości zmian przebiegu chwilowej osi nogi pylonu pod wpływem zginania (przed zamontowaniem pierwszej rozpory) pokazano w tabeli 4. Wartości współrzędnej Y (oś skierowana zgodnie z biegiem Wisły) lusterek L1, L2 umieszczonych na bocznej ścianie nogi (góra sekcji A5) wyznaczone zostały na podstawie pomiaru w trakcie wykonywania kolejnych sekcji A6-A9. Dokładność wyznaczenia tej współrzędnej można oszacować na $\pm 1,5$ mm (błąd graniczny).

Na wyższych sekcjach obliczenia komplikował brak danych inwentaryzacyjnych dla każdego z ostatnich wykonanych sekcji (nie można było wykonać pomiaru na skutek okrywania ich folią w celu pielęgnacji betonu). Mimo tych trudności udało się, m.in. poprzez drobne korekty dokonywane za pomocą odpowiedniego naprężania rozpór tymczasowych, uzyskać ostatecznie kształt pochyłych nóg pylonu w granicach wymaganych tolerancji.

W przypadku mostu Su wykorzystano doświadczenia z Warszawy pozwalające znacznie usprawnić prace pomiarowe. Dzięki możliwości pełnego monitorowania w istotnych momentach położenia wykonanego fragmentu budowli (nie używano folii pielęgnacyjnej) i wprowadzania na tej podstawie korekt z tytułu błędów wykonawstwa zastosowano procedurę zadawania przebiegu osi każdej z nóg pylonu po stycznej (zaproponowaną pierwotnie przez dr. Stańczyka dla mostu Sw). Wyniki pomiaru inwentaryzacyjnego wykonanej konstrukcji (przebieg osi chwilowej) konfrontowane były z obliczeniami konsultanta uwzględniającymi wspomniane wcześniej odkształcenia natychmiastowe i opóźnione. Dzięki odpowiedniej regulacji naprężenia rozpór tymczasowych udało się zredukować pewną asymetrię w odchyłkach osi nóg pylonu od ich przebiegu projektowanego i sprowadzić odchyłki na poziomie drugiej rozpory do wartości nie przekraczających 6 mm.

Z punktu widzenia kanonów obowiązujących w tym zakresie prowadzenie osi pochyłych nóg pylonu było zadaniem nietypowym z uwagi na brak danego z góry i niezmiennego w czasie przebiegu nominalnego dla wskazywanej osi, stanowiącego przedmiot tyczenia. Przebieg nominalny był przebiegiem docelowym, tj. osiąganym dopiero po wielu zabiegach zmieniających geometrię obiektu. Przy okazji pragniemy tutaj wyrazić uznanie dla dr. Stańczyka za fachowość i praktyczne podejście do pojawiających się problemów oraz podziękować za harmonijną współpracę w procesie wznoszenia obu pylonów.

b) Stosowane konstrukcje pomiarowe. W fazie projektowania prac pomiarowych przewidywano użycie przestrzennych wcięć kątowych i kątowo-liniowych oraz przestrzennych konstrukcji biegunowych z punktów szczegółowej osnowy realizacyjnej (fot. na s. 22), wcięć ze stanowisk swobodnych oraz zastosowanie pionownika optycznego. Poza pionownikiem wszystkie te konstrukcje i związane z nimi metody pomiaru zostały w różnych fazach budowy wykorzystane.

Najczęściej eksploatowane były przestrzenne konstrukcje biegunowe. Punkty pomiarowe na szalunku i budowli sygnalizowano za pomocą folii odbłaskowej bądź reflektorów szklanych. Zaniechania użycia pionownika ze względów bezpieczeństwa (strefa płyty fundamentu pylonu stwarzała największe zagrożenie z racji robót budowlano-montażowych i pracy żurawia) oraz praktycznie braku wizur spowodowanego pomostami szalunku PERI. Inne niekorzystne względy to zalewanie płyty fundamentowej i konieczność użycia znacznej liczby stanowisk. Mając na względzie wysokie wymagania w zakresie dokładności, a także niezawodności prac geodezyjnych, stosowano wyznaczenia i wytyczenia nadliczbowe, uzyskując niezbędną kontrolę wyznaczanych współrzędnych X, Y, H oraz wskazywanych pozycji.

Współpraca z brygadami montażowymi

Poprawne, czyli zgodne z projektem, wznoszenie pylonu jest – poza bezsprzecznie wiodącym udziałem kierownictwa budowy, projektantów i technologów – wspólnym dziełem brygad budowlano-montażowych oraz geodetów. Wysokie wymagania dokładnościowe w zakresie geometrii budowli i pionierski charakter przedsięwzięcia narzucają potrzebę ścisłej współpracy. Jej zasady wypracowywane były w trakcie budowy pierwszych sekcji nóg pylonu na moście Świętokrzyskim i sukcesywnie doskonalone na następnych. Podstawowe znaczenie ma ustalenie optymalnej sekwencji czynności ustawczych i pomiarowych oraz zdobycie wzajemnego zaufania. Należy tu podkreślić, że najważniejsza była faza geodezyjnej kontroli położenia każdego wstępnie ustawionego szalunku. Kontrola wykonanej sekcji była już wyłącznie zadaniem dla ekipy geodezyjnej. Wypracowane na moście Świętokrzyskim zasady współpracy zostały z pewnymi drobnymi modyfikacjami przeniesione na most Sucharskiego, zapewniając sprawny przebieg prac budowlano-montażowych (konieczność modyfikacji spowodowana była odmiennością sposobu zamykania szalunku i jego klinowania).

Wpływy utrudniające dotrzymanie tolerancji geometrycznych

W trakcie prowadzenia geodezyjnej obsługi wznoszenia pylonu występowało wiele wpływów naruszających stan geometryczny wykonanego już fragmentu konstrukcji. Poza odkształceniami wywołanymi ciężarem własnym każdej z pochyłych nóg pylonu oraz odkształceniami z tytułu pełzania betonu uwzględnionymi przez konsultanta w predykcji przebiegu osi kolejnej sekcji występowały wpływy z tytułu zmian temperatury (w tym efekt cykliczny obiegu Słońca), parcia wiatru, zamocowania dźwigu do jednej z nóg pylonu. W celu wychwycenia ewentualnych nierównomierności osiadań fundamentu pylonu prowadzone były okresowe pomiary przemieszczeń względnych reperów zastabilizowanych w płycie fundamentu. Służba geodezyjna działająca z ramienia inwestora monitorowała też osiadania względem zewnętrznego układu odniesienia, mając na uwadze wymóg dotrzymania tolerancji dla rzędnych konstrukcji.

Świadomość trudności w ustalaniu przez projektantów wielkości tolerancji geometrycznych (patrz rozdział *Wymagania dokładnościowe dla realizacji pylonów*) nakazywała utrzymywanie wyso-

kiej dokładności i niezawodności prac pomiarowych i konieczność konsultowania uzyskanych odchylek wymiarowych z kierownictwem budowy oraz projektantami WARBUD-u.

Pracochłonność samej obsługi geodezyjnej i względy natury finansowej nie pozwalały na przeprowadzenie specjalnie zaplanowanych badań mających na celu wyodrębnienie i oszacowanie wielkości i charakteru zmienności któregoś z ww. wpływów. Dokonano jednakże pewnych zgrubnych oszacowań, które będą uściślone w toku dalszej obsługi na moście w Gdańsku oraz prawdopodobnie na moście Siekierkowskim. Przewiduje się także uruchomienie jeszcze jednej pracy magisterskiej w ramach specjalności Geodezja Inżyniersko-Przemysłowa na Wydziale Geodezji i Kartografii PW poświęconej tej problematyce. W dalszej perspektywie planowane jest przygotowanie rozprawy doktorskiej.

Sprzęt geodezyjny i doświadczenia z jego stosowania

W początkowej fazie obsługi wznoszenia pylonu Sw stosowano tachimetr elektroniczny TC 905 firmy Leica. Punkty pomiarowe sygnalizowane były za pomocą przyklejanej folii odbłaskowej oraz przystawianych luster pryzmatycznych. Aczkolwiek sprzęt ten zapewniał wymaganą dokładność wskazań i wyznaczeń, znajdowanie celu na pylonie sprawiało duże kłopoty, trzeba było także rezygnować z wykonania pomiaru w warunkach mgły porannej i w czasie godzin nocnych. Do obsługi wyższych sekcji trzonu pylonu Sw oraz ustawiania segmentów stalowej konstrukcji wsporczej z wewnętrznymi odcinkami tulei cięgien, a później także do kontroli ustawienia zewnętrznych odcinków tych tulei użyto tachimetru elektronicznego Leica TCA 2003. Spowodowało to odczuwalne usprawnienie i podniesienie komfortu prac pomiarowych oraz rozszerzenie pomiarów na porę nocną. Automatyczne wyszukiwanie celu i precyzyjne celowanie okazały się szczególnie przydatne w warunkach zagęszczenia prętów zbrojeniowych oraz przebiegających między nimi elementów stalowej konstrukcji wsporczej i tulei cięgien. Stopniowo wprowadzano do użycia procedury obliczeniowe zawarte w oprogramowaniu tachimetru. Instrument ten stał się podstawowym oprzyrządowaniem geodezyjnej obsługi budowy pylonu Su.

Niestandardowe algorytmy z zakresu geometrii analitycznej w przestrzeni

Specyfika zadań wchodzących w zakres geodezyjnej obsługi budowy pylonu (determinowana między innymi przez takie czynniki, jak kształt bryły pylonu, kształt szalunku i sposób jego montowania, dostępność obiektu do pomiaru) zrodziła potrzebę sięgnięcia przy konstruowaniu algorytmów obliczeniowych do niestandardowych operacji z zakresu geometrii analitycznej w przestrzeni 3D (mamy tu na myśli obliczanie danych do tyczenia oraz odchylek od projektu). Przy ustawianiu szalunku bardziej wygodne okazało się operowanie liniami, płaszczyznami i bryłami, a przy ustawianiu tulei cięgien – liniami osiowymi i bryłami niż pojedynczymi punktami, będącymi przedmiotem wyznaczeń lub wytyczeń w rutynowych pracach geodezji inżynierskiej. Opracowano (inż. A. Kukawka) kilka programów obliczeniowych na kalkulator PSION umożliwiających realizację ww. zadań z zakresu geometrii analitycznej. Wprawdzie na moście Su zaczęto szerzej wykorzystywać oprogramowanie tachimetru Leica TCA 2003, to jednak w dalszym ciągu nieodzowne były własne programy WPG z zakresu geometrii analitycznej w 3D.

Uwagi końcowe

Technologia pomiarów realizacyjnych, jakiej dopracowano się na obu pylonach, dostosowana została do specyfiki obiektu, wymagań dokładnościowych, metod budowy i montażu oraz związanej z nimi dostępności obiektu dla prac pomiarowych, warunków bezpieczeństwa dla geodetów, a także dostępności i przydatności otoczenia obiektu do lokalizacji znaków pomiarowych. Wśród wymienionych uwarunkowań, znamiennych dla geodezyjnych pomiarów inżynierskich, na czoło wysuwa się specyfika wznoszenia pochyłych nóg pylonu i potrzeba spełnienia wysokich wymagań w zakresie dokładności i niezawodności wytyczeń i wyznaczeń.

Opisane tu doświadczenia zdobyte przez WPG na obu mostach wykorzystane będą w geodezyjnej obsłudze budowy kolejnego mostu o konstrukcji podwieszanej, jakim jest most Siekierkowski, i najprawdopodobniej również w geodezyjnej obsłudze budowy jego pylonów. Już obecnie zakładana jest tam osnowa realizacyjna, mająca pełnić jednocześnie funkcję osnowy podstawowej i szczegółowej.

Nawiązując do barwnych dygresji poczynionych w dotychczasowych publikacjach na temat budowy pylonu mostu Świętokrzyskiego, a dotyczących sfery ludzkich doznań, chcielibyśmy dodać, iż wszelkie emocje budowniczych związane z przebiegiem procesu budowy – obawy i niepokoje, zadowolenia i pozytywne wzruszenia – były też w jakimś stopniu przeżywane przez geodetów uczestniczących w tym pionierskim w skali kraju przedsięwzięciu inżynierskim. Geodetom pracującym na szczycie wznoszącego z tygodnia na tydzień pylonu dane też było (nawet mimowolnie) podziwiać panoramę stolicy roztaczającą się coraz bardziej rozległe w miarę postępu robót.

*) Oficjalne nazwy: most przez Wisłę w Warszawie, w ciągu Trasy Świętokrzyskiej; most przez Martwą Wisłę, w ciągu Trasy im. Sucharskiego

Prof. dr hab. inż. Witold Prószyński jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Warszawskiej i konsultantem WPG S.A. w zakresie geodezyjnej obsługi budowy pylonów mostów w Warszawie i Gdańsku.

Mgr inż. Mirosław Stasiewicz zatrudniony w WPG S.A. (w pracowni nr 15 kierowanej przez mgr. inż. M. Markiewicza) jest wykonawcą geodezyjnej obsługi budowy pylonów obu mostów.

Literatura:

1. Lennartz-Johansen H., *Surveying the opening of the Great Belt Fixed Link in 1998*, „GIM International”, May 1999;
2. Lennartz-Johansen H., *Analyzing Europe's largest suspension bridge*, „Proceedings of the International Symposium on Deformation Measurements”, Olsztyn 1999;
3. Przywara J., *Geodeci na moście. Pierwsza podwieszona konstrukcja przez Wisłę*, „GEODETA” 5/2000;
4. Stańczyk A., *Technologia budowy mostu Świętokrzyskiego w Warszawie – opracowania studialne dot. tymczasowych rozpór dolnej części mostu, deformacji pylonu podczas budowy jego dolnej części oraz stalowej konstrukcji wsporczej*, 1999;
5. Stańczyk A., *Most Świętokrzyski – technologia budowy pylonu*, „Kalejdoskop Budowlany” 4/2000;
6. Stańczyk A., *Pylon bez tajemnic*, „Kalejdoskop Budowlany” 7/8/2000;
7. Stańczyk A., *Nowe mosty przez Wisłę*, „Drogownictwo” 9/2000;
8. Stasiewicz M., Prószyński W., *Warunki techniczne obsługi geodezyjnej budowy mostu Świętokrzyskiego – w części przewidzianej dla WPG S.A.*; zał. 1, 2 *Geodezyjna obsługa wznoszenia pylonu*; 1999;
9. Dokumentacja projektowa i materiały z porad roboczych.