



PIOTR OLASZEK<sup>1)</sup>  
MAREK ŁAGODA<sup>2)</sup>

## PRZYKŁAD MONITOROWANIA KONSTRUKCJI MOSTU W TRAKCIE MONTAŻU

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono zakres prac związanych z monitorowaniem procesu montażu mostu Siekierkowskiego w Warszawie. W czasie montażu mostu zastosowano nowatorską technologię. Zapewnienie jej pomyślnego przebiegu wymagało prowadzenia szeregu czynności pomiarowych o charakterze kontrolnym i ostrzegawczym. Opisano koncepcję monitorowania konstrukcji z rozróżnieniem funkcji kontrolnych (kontrola reakcji na podporach i geodezyjna obserwacja przemieszczeń podpór) oraz ostrzegawczych (pomiar stanu naprężeń i rejestracja deformacji środnika). Przedstawiono metody badawcze wraz z uzyskanymi wynikami pomiarów i wnioskami.

### 1. WSTĘP

W czasie budowy mostu Siekierkowskiego w Warszawie zastosowano nowatorską technologię montażu. Polegała ona na etapowym nasuwaniu konstrukcji stalowej mostu nad rzeką wraz z częściowo zespoloną płytą żelbetową pomostu, wykonywaną wielofazowo na brzegu rzeki [1]. Technologia ta została wybrana z dwóch powodów.

<sup>1)</sup> dr inż. - Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

<sup>2)</sup> dr inż. - Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

Pierwszy to czynnik ekonomiczny, związany z niższymi kosztami w stosunku do tradycyjnych metod montażu, które polegały na nasuwaniu przez rzekę samej konstrukcji stalowej i betonowaniu płyty nad rzeką na całej długości mostu. Drugi powód związany był z krótszym czasem wykonania mostu, umożliwiającym szybsze usunięcie podpór tymczasowych z rzeki.

Nasuwanie płyty wraz z żelbetowym pomostem spowodowało w tej fazie montażu mostu wystąpienie innych warunków pracy konstrukcji niż w czasie jej normalnej eksploatacji. Podczas nasuwania konstrukcji praktycznie wszystkie przekroje poprzeczne mostu przy przesuwaniu nad pylonem i podporami tymczasowymi poddane były działaniu stosunkowo wysokich reakcji. Z tego względu konieczne było monitorowanie całego procesu nasuwania celem uniknięcia uszkodzenia konstrukcji.

## 2. KONCEPCJA MONITOROWANIA

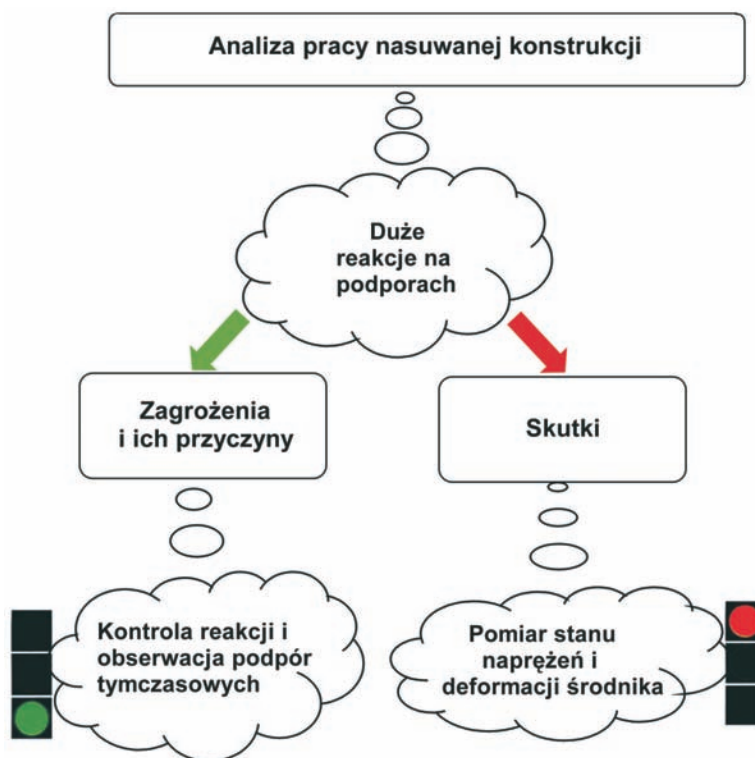
Mosty podwieszane są konstrukcjami, które ze względu na stosowane rozwiązania techniczne wymagają prowadzenia stosunkowo dużego zakresu prac badawczo-kontrolnych zarówno w czasie ich budowy jak i eksploatacji [2]. W niniejszym artykule opisano prace polegające na monitorowaniu procesu nasuwania konstrukcji mostu. Jak wspomniano wcześniej, konieczność monitorowania procesu montażu mostu wynikała głównie z występowania w czasie nasuwania dużych reakcji na pylonie i podporach tymczasowych.

Monitorowanie jest zbiorem czynności mających na celu kontrolę i ostrzeżenie. W opisywanym przypadku podjęto próbę ich rozdzielenia. Kontrola miała na celu takie prowadzenie monitorowanego procesu technologicznego, aby przebiegał on w warunkach bezpiecznych. Uwagę skierowano na występowanie ewentualnych zagrożeń w celu ich uniknięcia. Przyczyną ewentualnych zagrożeń mogły być za duże reakcje na podporach. W celu utrzymania ich w dopuszczalnym zakresie prowadzono pomiary kontrolne wartości reakcji występujących na podporach tymczasowych oraz prowadzono obserwację geodezyjną przemieszczeń podpór. Te pomiary dostarczały informacji umożliwiających bezpieczne prowadzenie procesu nasuwania i symbolicznie zostały oznaczone znakiem światła zielonego (rys. 1).

Ostrzeżenie miało na celu zauważenie pierwszych objawów nieprawidłowości w monitorowanym procesie technologicznym. Uwagę skierowano na ewentualne skutki negatywne oddziaływania na nasuwaną konstrukcję za dużych reakcji. W tym celu prowadzono pomiary stanu naprężeń i deformacji środnika. W przypadku wystąpienia nieprawidłowości pomiary te dostarczałyby informacji o negatywnych skutkach procesu nasuwania i symbolicznie zostały oznaczone znakiem światła czerwonego (rys. 1).

Program monitorowania, nadzór nad wszystkimi pomiarami, rejestrację deformacji środnika oraz analizę wyników wykonała Pracownia Mostów Stalowych Zakładu

Mostów IBDiM. Geodezyjną obserwację przemieszczeń podpór prowadziło Warszawskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne S.A.<sup>3)</sup>. Kontrolę reakcji na podporach prowadził Mostostal Warszawa S.A.. Elastooptyczny pomiar stanu naprężeń w elementach mostu wykonywał Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej<sup>4)</sup>.



Rys.1. Schemat powstawania koncepcji monitorowania procesu nasuwania konstrukcji  
Fig.1. The idea of structure monitoring during launching

### 3. KONTROLA REAKCJI

Pierwszą i najbardziej istotną czynnością kontrolną była aktywna kontrola reakcji na podporach. Na wszystkich podporach w celu zmniejszenia reakcji zastosowano dla

<sup>3)</sup> Dokumentacja pomiarów geodezyjnych przemieszczeń podpór tymczasowych. Warszawskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne S.A. Warszawa, marzec –lipiec 2001

<sup>4)</sup> *Stupnicki J., Matyjewski M., Pyrzanowski P., Suchodolski S.*: Elastooptyczny pomiar stanu naprężeń (różnicy naprężeń głównych) w elementach mostu w trakcie przesuwania i podwieszania. Sprawozdanie z I i II etapu pracy. Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002

obu dźwigarów nasuwanej konstrukcji po 2 podparcia (o rozstawie 4 m na podporach tymczasowych i 8 m na pylonie). W celu równomiernego rozkładu reakcji na 2 podparcia na wszystkich podporach tymczasowych zastosowano układy siłowników, połączone ze sobą oddzielnie dla każdego dźwigara i każdej podpory (rys. 2 i 3). Dzięki temu kontrola reakcji była możliwa poprzez pomiar ciśnienia cieczy roboczej w siłownikach. W czasie nasuwania prowadzono na bieżąco porównywanie wartości ciśnień zmierzonych z wartościami obliczonymi w projekcie nasuwania konstrukcji nośnej mostu<sup>5)</sup>. Średnia dokładność pomiaru wartości reakcji była równa  $\pm 80$  kN.

We wszystkich fazach nasuwania zarejestrowane wartości ciśnień w siłownikach były w przybliżeniu zgodne z wartościami przewidywanymi teoretycznie. W tablicy 1 zamieszczono zarejestrowane w czasie nasuwania maksymalne wartości reakcji i odpowiadające im wartości przewidywane w projekcie nasuwania.

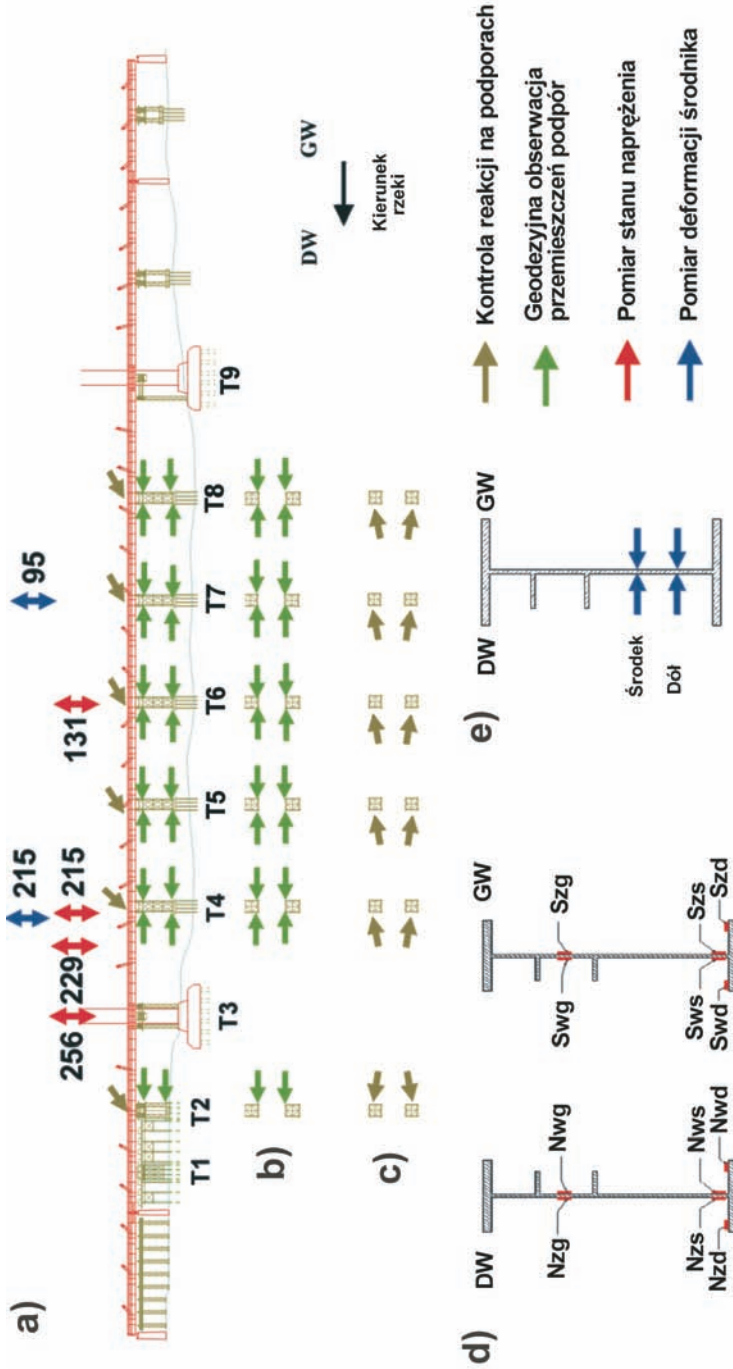
Tablica 1. Analiza reakcji na podporach  
Table 1. The analysis of support reactions

Reakcja	Zmierzona [kN]	Przewidywana [kN]
Maksymalna wartość reakcji	3600 T4 <sup>*)</sup>	3900 T4 <sup>*)</sup>
Maksymalna różnica reakcji pomiędzy dźwigarami	2850 - 2400 T7 <sup>*)</sup>	0
*) nr podpory zgodnie z rysunkiem 2		

#### 4. OBSERWACJA PODPÓR TYMCZASOWYCH

Drugą czynnością kontrolną była obserwacja podpór tymczasowych. Ze względu na ograniczone możliwości dostępu do podpór tymczasowych do kontroli ich pracy w czasie nasuwania wybrano obserwację geodezyjną. Prowadzono pomiar przemieszczeń względnych, wybranych punktów podpór tymczasowych w trzech kierunkach:  $\Delta X$  – poziomym w poprzek mostu,  $\Delta Y$  - poziomym wzdłuż mostu i  $\Delta H$  pionowym. Na podporach zostały zamocowane punkty stałe – przyklejono tarcze celownicze (reflektory przyzmatyczne). Punkty zostały rozmieszczone w celu kontroli odkształceń samej podpory i osiadania pali (rys. 2 i 4). Pomiar przemieszczeń badanych punktów prowadzono metodą biegunową z jednego stanowiska przy pomocy TOTAL STATION TC 2003. Uzyskiwane średnie błędy położenia badanego punktu X, Y, H

<sup>5)</sup> Obliczenia faz nasuwania konstrukcji nośnej mostu Siekierkowskiego w Warszawie. Sprawozdanie Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa, wrzesień 2000



Rys.2. Schemat rozmieszczenia punktów monitorowania procesu nasuwania konstrukcji: a) stan po zakończeniu nasuwania, b) punkty geodezyjnej obserwacji podpór, c) punkty kontroli reakcji podpór, d) pomiar naprężeń - rozmieszczenie płytek elastooptycznych w przekroju poprzecznym mostu, e) pomiar deformacji środknika - rozmieszczenie czujników mechanicznych w przekroju poprzecznym mostu.

Fig. 2. The lay out of monitoring structure arrangement during launching: a) final stage, b) geodesic observation points at temporary supports, c) points of preventive inspection of bearing reaction on supports, d) stress measurements - the arrangement of photo-elastic plates in bridge cross section, e) the girder web deformation measurement - the inductive sensors arrangement in bridge cross section

wynosiły  $\pm 1,0$  mm. W tablicy 2 zamieszczono zarejestrowane w czasie nasuwania zakresy maksymalnych przemieszczeń podpór.



Rys.3. Kontrola reakcji na podporach; a) rozmieszczenie układu siłowników na podporze, b) widok nasuwanej konstrukcji

Fig. 3. Preventive inspection of bearing reaction on supports: a) the servomotor pressure system arrangement, b) the view of the structure during launching across the river

Tablica 2. Zarejestrowane zakresy przemieszczeń podpór tymczasowych  
Table 2. The recorded range of the support displacements

Mierzona wielkość	Zakres [mm]
Przemieszczenia pionowe $\Delta H$	-14 ÷ 5
Przemieszczenia poziome (wzdłuż mostu) $\Delta Y$	-8 ÷ 31
Przemieszczenia poziome (w poprzek mostu) $\Delta X$	-10 ÷ 14

Występujące w czasie nasuwania konstrukcji wartości przemieszczeń podpór tymczasowych nie miały negatywnego wpływu na proces nasuwania konstrukcji. Zakres mierzonych przemieszczeń mieścił się w zakresie wartości dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość podpór tymczasowych. Pionowe przemieszczenia były automatycznie korygowane przez wysuw lewarów siłowników.



Rys.4. Geodezyjna obserwacja podpór tymczasowych – na pierwszej widocznej podporze zaznaczono rozmieszczenie punktów pomiarowych, które było analogiczne na wszystkich podporach tymczasowych

Fig. 4. Geodesic observation of temporary supports – the measuring point arrangement is shown at the first support, which was similar at all remaining temporary supports

## 5. POMIAR STANU NAPRĘŻEŃ W ELEMENTACH MOSTU

Pierwsza realizowana czynność ostrzegawcza to pomiar stanu naprężeń. Pomiar był realizowany w czterech przekrojach nasuwanego przęsła (rys. 2). Dwa przekroje (215 i 229) zostały wybrane ze względu na występowanie maksymalnych sił w czasie nasuwania konstrukcji, a dwa pozostałe (131 i 256) ze względu na występowanie maksymalnych sił w czasie eksploatacji mostu. Prowadzone pomiary miały na celu określenie stanu naprężeń w czasie nasuwania konstrukcji; ich poziomu oraz wartości odkształceń trwałych, powstałych w tej fazie montażu. Pomiary prowadzono od momentu rozpoczęcia montażu konstrukcji stalowej poprzez fazę betonowania płyty pomostu do zakończenia etapu nasuwania konstrukcji. Pomiary były również prowadzone w następnych fazach wykonywania mostu aż do czasu próbnego obciążenia. Dzięki temu możliwe było określenie poziomu naprężeń pochodzących od ciężaru własnego konstrukcji i wprowadzonych odkształceń trwałych podczas jej montażu.

Pomiary prowadzono metodą elastoptycznej warstwy powierzchniowej [3]. Metoda ta umożliwia znalezienie różnicy oraz kierunku działania odkształceń głównych na powierzchni badanego obiektu. Zakładając liniową zależność naprężenia od odkształcenia (zakres pracy sprężystej) oraz płaski stan naprężeń, różnicę odkształceń głównych przeliczyć można na różnicę naprężeń głównych. Zaletą metody jest możliwość obserwacji stanów sprężystych i plastycznych dla konstrukcji wykonanych ze stali ze względu na liniową zależność efektu optycznego od odkształceń nawet dla kilku procent odkształcenia. Niedogodnością metody jest brak możliwości (w ogólnym przypadku bez dodatkowych pomiarów [3]) rozseparowania składowych naprężenia.

W każdym z przekrojów rozmieszczono po 3 punkty pomiarowe po obu stronach obu dźwigarów (razem 12 punktów). Czujniki umieszczone na dolnej półce miały na celu pomiar naprężeń normalnych. Czujniki umieszczone na środku, na wysokości wypadającej w połowie odległości pomiędzy żebrami wzmacniającymi, miały na celu pomiar naprężeń ścinających. Czujniki umieszczone na środku, w okolicy pasa dolnego ścianki miały na celu pomiar złożonego stanu naprężeń w miejscu teoretycznie najbardziej narażonym na wyboczenie.

We wszystkich punktach umieszczono płytki elastoptyczne o wymiarach ok. 90×90 mm (rys. 5). Po eliminacji efektów brzegowych, związanych z różną rozszerzalnością cieplną czujników oraz konstrukcji, wymiary pola pomiarowego wynosiły ok. 50×50 mm. W tym polu wybierano punkt pomiarowy, w którym dokonywano odczytów. Wielkość płytek była dobrana w celu uzyskania wystarczających informacji o stanie naprężeń przy minimalizacji kosztu płytek i trudności w zapewnieniu ich ochrony przed zniszczeniem w czasie przesuwania konstrukcji.

Wszystkie kierunki działania naprężeń głównych przedstawiono licząc kąt od położenia poziomego dla czujników na środku oraz od osi dźwigara dla czujników



na pasie dolnym. Miara kąta była odliczana zgodnie ze zwrotem matematycznym (przeciwzegarowo  $+\alpha$ ; zegarowo  $-\alpha$ ), patrząc na czujnik.



Rys.5. Pomiar stanu naprężeń: a) rozmieszczenie płytek elastooptycznych w przekroju nr 256 – widoczne 3 płytki w osłonach zamocowane na dźwigarze od strony górnej wody, b) widok 2 płytek - w osłonie i bez oraz polaryskopu do odczytu stany naprężeń

Fig.5. The state of stress measurement: a) the arrangement of photo-elastic plates in section 256 – three plates with screen may be seen on the headwater girder, b) view of two plates, with and without the screen, and polariscope ready for state of stress readout

Błąd metody oszacowano dla różnicy naprężeń głównych na  $\pm 5$  MPa, zaś dla kierunku działania naprężeń głównych na  $\pm 10^\circ$ , w przypadku różnicy naprężeń głównych większej niż 20 MPa.

Wykonywano dwa rodzaje pomiarów. Pomiary statyczne (po zakończeniu danej fazy nasuwania konstrukcji) wykonywane były we wszystkich punktach dostępnych przekrojów. Pomiary dynamiczne prowadzono w trakcie przesuwania nad podparciami na pylonie dla płytki umieszczonej w dolnej części środника dźwigara od strony górnej wody.

W tabelicy 3a przedstawiono maksymalne wartości różnicy naprężeń głównych  $\sigma_1 - \sigma_2$  i kąty działania naprężeń głównych  $\alpha$ , zarejestrowane podczas pomiarów statycznych, a w tabelicy 3b podczas pomiarów dynamicznych.

Tablica 3a. Zarejestrowane maksymalne wartości różnicy naprężeń głównych podczas pomiarów statycznych

Table 3a. The recorded maximum values of the principal stresses difference during static measurements

Miejsce pomiaru	Max ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) [MPa]
Część środkowa środnika	128 $\alpha=90^\circ$
Część dolna środnika	265 $\alpha=5^\circ$
Pas dolny	136 $\alpha=90^\circ$

Tablica 3b. Zarejestrowane maksymalne wartości różnicy naprężeń głównych podczas pomiarów dynamicznych

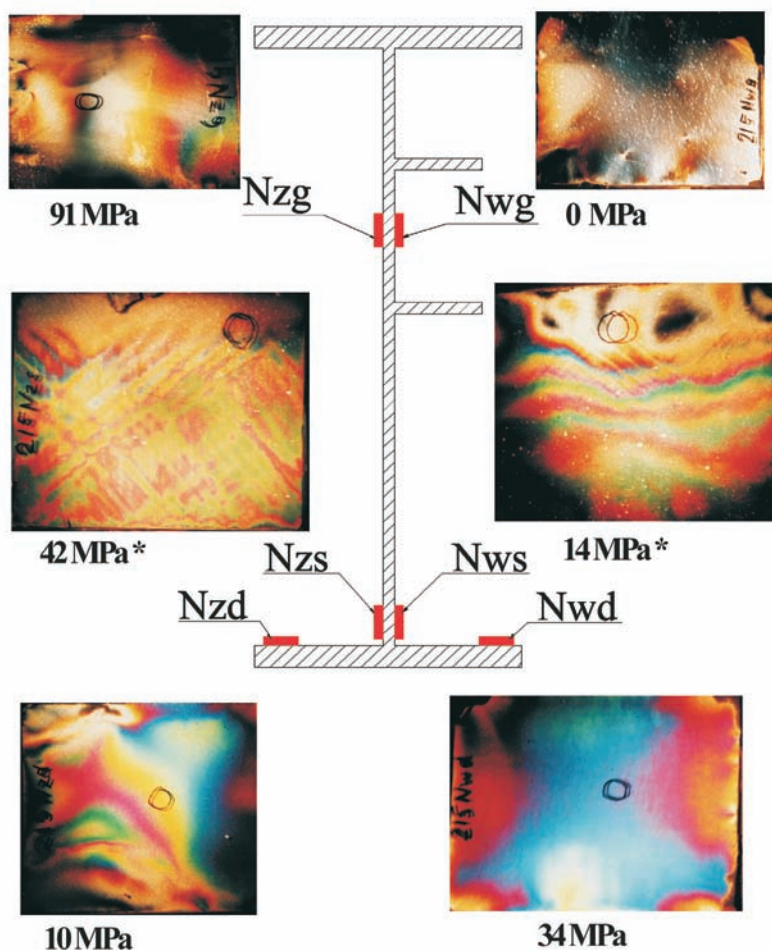
Table 3b. The recorded maximum values of the principal stresses difference during dynamic measurements

Numer przekroju	Max ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) [MPa]	Odległość od osi pylonu [m]
131	254 $\alpha=35^\circ$	-3,80
215	349 <sup>*)</sup> $\alpha=0^\circ$	3,95
229	149 $\alpha=40^\circ$	3,37
256	230 $\alpha=30^\circ$	-4,08

<sup>\*)</sup> zarejestrowano efekt wprowadzonych podczas nasuwania odkształceń plastycznych

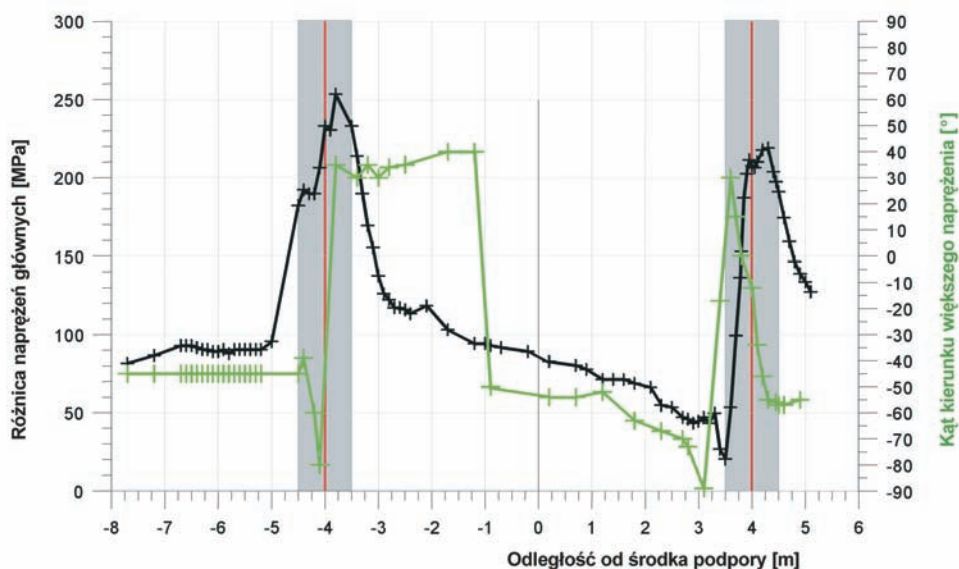
Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe zdjęcia obrazów izochrom wraz z wartościami liczbowymi różnicy naprężeń głównych, zarejestrowane w przekroju 215 po zakończeniu nasuwania.

Na rysunku 7 przedstawiono zarejestrowany przebieg zmian różnicy naprężeń głównych w dolnej części środnika przekroju 131, podczas przesuwania nad pylonem w dniu 27.04.2001.



Rys.6. Wyniki pomiaru stanu naprężeń w przekroju 215 zarejestrowane po zakończeniu nasuwania; podane wartości oznaczają różnicę naprężeń głównych  
Fig. 6. Results of stress state measurement in section 215, recorded after launching termination; the values shown are equal to the differences between the principal stresses

Zmierzone wartości różnicy naprężeń głównych we wszystkich badanych przekrojach były zgodne z wartościami przewidywanymi teoretycznie. Stwierdzone ślady odkształceń plastycznych miały charakter lokalny, związane są z miejscowym wystąpieniem naprężeń własnych i nie były groźne dla konstrukcji.



Rys.7. Przebiegi zmian różnicy naprężeń głównych i kąta kierunku zarejestrowane w dolnej części środnika przekroju 131, podczas przesuwania nad pylonem w dniu 27.04.2001  
Fig.7. Differences between the principal stresses and direction angle, which were recorded in the lower part of girder web at section 131 during launching over pylon on 27.04.2001

## 6. POMIAR DEFORMACJI ŚRODNIKA

Kolejna realizowana czynność ostrzegawcza to pomiar deformacji środnika. Ze względu na występowanie wysokich wartości sił poprzecznych w momencie przechodzenia nad podporami tymczasowymi, prowadzono dla wybranych przekrojów 95 i 215 kontrolę geometrycznych odkształceń środnika w pionowej płaszczyźnie prostopadłej do środnika. Zostało to zrealizowane poprzez zamocowanie po obu stronach środnika (dla dźwigara od strony górnej wody) w dwóch specjalnych uchwytach par czujników mechanicznych (indukcyjnych), sprzęgniętych z komputerowym systemem rejestrującym (rys. 2 i 8). Pary czujników zostały zastosowane w celu zwiększenia wiarygodności pomiarów – czujniki zamocowane po przeciwnych stronach środnika powinny mieć wskazania przeciwnego znaku o takiej samej wartości bezwzględnej. Dokładność pomiaru wynosiła  $\pm 0,05$  mm.



Rys.8. Pomiar deformacji środknika: a) widok uchwyty i czujników od strony górnej wody, c) widok przekroju pomiarowego nr 215 podczas dochodzenia do podpory  
Fig.8. The measurement of girder web deformation: a) a tailwater view of inductive sensors and the special stand, b) a headwater view of inductive sensors and the special stand, c) view of section 215 at the moment of support approaching

W tabelicy 4 przedstawiono zarejestrowane maksymalne wartości deformacji środnika, zmierzone podczas przechodzenia nad podporami i maksymalne wartości trwałe, zmierzone po przejściu poza obszar oddziaływania reakcji.

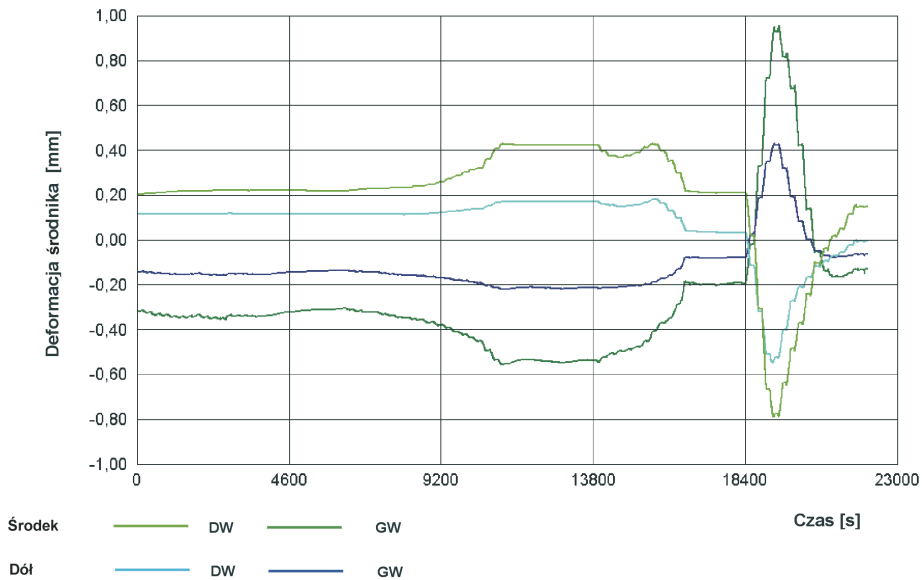
Tablica 4. Zarejestrowane wartości deformacji środnika  
Table 4. Recorded maximum values of web girder deformation

Punkt pomiaru	Deformacje środnika [mm]	
	Max zmierzone	Max trwałe
Część środkowa	> 1,00	0,20
Część dolna	0,60 (0,90)*)	< 0,10

\*) wartość podana w nawiasie wystąpiła tylko jeden raz

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy zarejestrowany przebieg deformacji środnika podczas przesuwania przekroju 215 nad podporą T4.

W badanych przekrojach praktycznie nie zaobserwowano znaczących odkształceń plastycznych środnika, które mogłyby mieć negatywne skutki dla dalszej pracy konstrukcji.



Rys. 9. Przebieg deformacji środnika zarejestrowany podczas przesuwania przekroju 215 nad podporą T4

Fig. 9. Transient records of the girder web deformation during launching of the section 131 over the support T4

## 7. WNIOSKI

We wszystkich fazach nasuwania konstrukcji nie zaobserwowano negatywnych objawów pracy konstrukcji. Potwierdzają to oględziny konstrukcji po zakończeniu nasuwania jak i wyniki opisanych czynności (pomiarów) ostrzegawczych. Należy podkreślić to, że wykonywane czynności kontrolne, zapewniły przeprowadzenie monitorowanego procesu nasuwania konstrukcji w warunkach zgodnych z założeniami projektowymi. Szczególnie dotyczy to prowadzenia aktywnej kontroli reakcji na podporach, która zapobiegała nadmiernemu przeciążeniu konstrukcji.

Pomiary przeprowadzone w następnych fazach wykonywania mostu oraz w czasie próbnego obciążenia umożliwią określenie rozkładu poziomego naprężeń pochodzących od ciężaru własnego konstrukcji i wprowadzonych odkształceń trwałych podczas jej montażu oraz od obciążeń użytkowych.

Zdobyte doświadczenia pomiarowe podczas monitorowania staną się podstawą do dalszego rozwoju metod diagnostyki konstrukcji mostu. Dotyczy to szczególnie przydatności metody elastooptycznej warstwy powierzchniowej do monitorowania stanu naprężeń konstrukcji mostowej w czasie jej budowy.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Łagoda M.*: Technologia montażu mostu Siekierkowskiego przez Wisłę w Warszawie. Zeszyty naukowo-techniczne SITK w Krakowie. Ogólnopolska Konferencja naukowo-techniczna „Aktualne osiągnięcia budownictwa mostowego w Polsce. Seria: Proceeding, No 50, 97, 127-138, Kraków 2002
- [2] *Biliszczyk J., Hildebrand M.*: Kontrola stanu technicznego i badania mostów podwieszonych. Inżynieria i Budownictwo, 378-382, 7/2001
- [3] *Kapkowski J., Słowikowska I., Stupnicki J.*: Badanie naprężeń metodą elastooptycznej warstwy powierzchniowej. PWN, Warszawa 1987

## BRIDGE CONSTRUCTION MONITORING DURING ASSEMBLING

### Abstract

Structure monitoring activities undertaken during construction of Warsaw Siekierkowski Bridge are presented in the paper. An innovative assembling technology was applied. Control and warning measurements were executed to ensure a positive result of the assembly.

Control functions of the monitoring process were assured with two types of activities. The first one concerned on preventive inspection of bearing reactions on temporary supports. It was realized by pressure inspection of servomotor, the bridge girders were lied on it during launching across the river.

The second activity concerned geodesic observation of displacements of temporary supports. It was done with the use of Total Station system.

The warning functions of the monitoring process were also provided by two kinds of actions. The state of stress measurements in the steel girders were performed with a use of photoelastic coating method. The measurements were focused on monitoring of the state of stress in girders during all phases of bridge assembling (the minor phases were welding of steel girders, concrete deck lying and bridge launching on the temporary supports). Such measurements were carried on during the load testing as well.

The investigation of I-beam steel girder web deformation was also performed. It was done using inductive sensors supported by special stands on both sides of the girder web.

The testing methods, test results and conclusions are presented in the paper.