

Fotogrametryczny pomiar odkształceń termicznych mostów stalowych

Wojciech Buczek, Paweł Orłowski, Ryszard Preuss
Dariusz Sobala, Henryk Zobel

Photogrammetric measurements of thermal deformations of steel bridges

Abstract:

Interest in natural thermal phenomena, which occur in bridges, has been lasting from the thirties. However, field measurements of real objects have been performed very seldom. Therefore experimental verification of theoretical works becomes very important. An attempt concerning such investigations was performed within the Research Project KBN (the Committee of Scientific Research) no 7 T07E 012 15 „Development of methodology of determination of thermal deformations of steel bridges” at the Institute of Road and Bridges of the Warsaw University of Technology. Analysis of climatic conditions in Poland allowed to select a region characterised by the extreme distribution of annual and daily temperatures. Such requirements were met by the area of the city of Przemyśl. Two bridges were selected for measurements and tests within this area: one plate girder road object with an integrated pier of 152.9 m expansion, and the second object, a railway flyover with an ortotropowym channel cut-walk of 20 m expansion. Measurements of temperatures and spatial deformations, made by means of electronic meters, with the use of a photogrammetric method, were performed in January and July of 1999 and 2000. A concept of differential measurements was assumed as an initial method for designing photogrammetric measurements. For that purpose photographs were taken from stable positions, with repeatable external orientation photogrammetric cameras. Due to considerable time intervals of successive registration, this condition was approximately met in practice. This allowed to perform observations according to the temporary stereogramme mode, for which only changes of external orientation of photographs, resulting from the method of restoration of positions and utilisation of the UMK-10 low stability camera, were determined. Observations were performed by means of an analytical stereo-plotter, with the use of a specialised procedure of measurements performed according to the mode of temporary stereogrammes. Each of measured objects was registered by means of a net of coherent photographs, in order to allow equal determination of co-ordinates of investigated points. In practice, photogrammetric models, which describe particular geometric features of investigated bridges, were reconstructed with the accuracy of $m_x = m_y = m_z = \pm 2\text{mm}$. Values of deformations, determined by means of the photogrammetric method (with an exception of the component perpendicular to the axis of the investigated bridge) have met expectations of “road experts”.

1. Wprowadzenie

Stan wiedzy w zakresie oceny wpływu temperatury otoczenia i innych czynników meteorologiczno-klimatyczno-topograficznych na pracę konstrukcji mostowych potwierdza przeświadczenie wielu projektantów i wykonawców o niedoskonałości polskich norm i innych przepisów dotyczących tej materii. Sprawa jest tym ważniejsza, że konieczne jest opracowanie tzw. arkusza krajowego do normy europejskiej Eurocode 1991 – 2.5.

Nieodzownym staje się więc nadrobienie tego zapóźnienia i właśnie w tym celu zrealizowano badania w ramach projektu KBN nr 7 T07E 012 15 p.t. „Opracowanie metodologii wyznaczania odkształceń termicznych mostów stalowych” w Instytucie Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej. W ramach tego projektu zrealizowano określone szczegółowe cele, a mianowicie:

- określenie na podstawie danych uzyskanych z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej maksymalnych i minimalnych temperatur rocznych powietrza, największych różnic dobowych

temperatur oraz maksymalnych i minimalnych średnich temperatur dobowych.

- określanie temperatur różnych rodzajów konstrukcji mostowych jako funkcji wyżej wymienionych temperatur powietrza, rodzaju mostu, charakterystyk geometrycznych konstrukcji, materiałów z których została zbudowana, prędkości i kierunku wiatru oraz innych czynników klimatycznych, meteorologicznych, geograficznych i topograficznych.
- weryfikację tych danych pomiarami i obserwacjami w terenie.
- określenie wartości i kierunków odkształceń termicznych w mostach o dowolnej geometrii i powiązanie tych informacji z zasadami doboru oraz lokalizacji łożysk i urządzeń dylatacyjnych.

Wybór mostów do pomiarów w terenie, a co za tym idzie i poddanych symulacjom komputerowym w zakresie termo-sprężystym, został dokonany po przeanalizowaniu wielu kryteriów.

Po pierwsze, most musiał być dostępny dla wykonujących pomiary bez przerywania ruchu na nim i pod nim, co oznaczało, że dostęp do dźwigarów, spodu pomostu, łożysk i podpór w celu pomiaru temperatur i odkształceń musiał być swobodny. Jednocześnie, badania nie mogły powodować zagrożenia dla bezpieczeństwa ruchu. Potrzebne było również należyte oświetlenie pożądaných elementów mostów podczas dokonywania pomiarów.

Po drugie, ze względów logistycznych, należało znaleźć region, gdzie w niewielkich odległościach od siebie znajdowały się zarówno mosty zespolone jak i czysto stalowe o różnych typach konstrukcji.

Po trzecie mosty musiały być zlokalizowane w takich rejonach, aby dysponować jak najszerszym zakresem warunków klimatycznych, skoro poprzednie badania wykazały dużą zależność projektowej temperatury mostu od lokalnego klimatu.

Po czwarte, konieczne było posiadanie zgody właściciela obiektu na wykonywanie takich pomiarów oraz udostępnienie przez niego rysunków projektowych, aby móc kompleksowo analizować pracę mostu.

Kryteria te spełniał w najlepszym stopniu rejon miasta Przemyśla, które położone jest w tzw. Bramie Przemyskiej.

Do pomiarów wybrano zlokalizowany w centrum miasta most „Orląt Przemyskich” Jest to obiekt drogowy, blachownicowy z pomostem zespolonym, 4-ro dźwigarowy (rozstaw 4.30 m), o schemacie statycznym trójprzęsłowej belki ciągłej, o rozpiętości $38.693 + 74.610 + 38.693 = 152.9$ m.

Drugim obiektem będącym przedmiotem badań i dla którego są prezentowane wyniki w niniejszej publikacji jest pokazany na rys. 1 wiadukt kolejowy, o schemacie statycznym belki swobodnie podpartej, z ortotropowym pomostem korytkowym i rozpiętości teoretycznej 20.0 m. Znajduje się on w ciągu bocznicy kolejowej ciepłowni miejskiej w miejscowości Buszkowice.

Pomiary temperatur i odkształceń w terenie wykonywano w styczniu i w lipcu 1999 i 2000 roku. Temperatury konstrukcji mierzono przez trzy doby, natomiast odkształcenia termiczne przez jeden bądź dwa dni, w każdym przypadku co 3 godziny. Ze względów bezpieczeństwa instrumenty pomiarowe były przenośne. Natomiast punkty pomiarowe na konstrukcjach zostały zamocowane na stałe.

Temperatury powietrza i konstrukcji, a w tym dźwigarów (kilka punktów na wysokości), górnej i dolnej powierzchni pomostu oraz w innych odpowiednich miejscach na długości i szerokości mostu mierzono za pomocą elektronicznego miernika wraz z czujnikiem.

Także prędkość wiatru i zachmurzenie były obserwowane i odnotowywane w odpowiednich przedziałach czasowych, podobnie jak opady deszczu, lokalne zaciemnienia i wszelkie inne zjawiska pogodowe. Dane te posłużyły do późniejszej korekty obliczeniowej temperatury mostów w dniach kiedy te zjawiska miały miejsce.

Jednocześnie przeprowadzono pomiary odkształceń termicznych, które dokonywano w dwójaki sposób. Metodą fotogrametryczną mierzono odkształcenia całej bryły konstrukcji w kilku wytypowanych przekrojach, a na wybranych łożyskach przesuwnych, w celach kontrolnych mierzono przemieszczenia wzdłuż osi podłużnej mostów.

Niniejszy artykuł poświęcony jest omówieniu metody fotogrametrycznej zastosowanej do wyznaczania odkształceń konstrukcji mostów, a szczegółowe rezultaty dotyczą kolejowego

wiaduktu stalowego w miejscowości Buszkowice.

2. Fotogrametryczna charakterystyka zadania pomiarowego

Celem pomiarów fotogrametrycznych w projekcie badawczym KBN było wyznaczenie zmian geometrycznych wytypowanych do badań dwóch mostów o konstrukcji stalowej pod wpływem zmieniających się warunków termicznych. Oczywiście pomiar ten nie miał mieć charakteru ciągłego lecz powinien inwentaryzować stan badanych konstrukcji w maksymalnie skrajnych warunkach termicznych (zima – lato); dodatkowo pomiarowi podlegały odkształcenia w ciągu jednego dnia w 3 godzinnych odstępach czasowych. Dokładne wyznaczenie terminów rejestracji nastąpiło w wyniku analizy danych meteorologicznych dostępnych w długim przedziale czasu dla danego obszaru w IMiGW. W efekcie zostały określone jako optymalne terminy rejestracji koniec stycznia i początek lipca. Do badań wytypowane dwa obiekty. Obiekt 1 to most „Orląt Przemyskich”, a praktycznie jego przeszło naziemne o długości ca.30 m. Usytuowanie osi tego przeszła w terenie to orientacja wschód – zachód. Obiekt drugi to wiadukt kolejowy o rozpiętości przeszła 20 m. Orientacja jego osi podłużnej to kierunek północ – południe. Charakterystyka możliwych do wystąpienia odkształceń pod wpływem zmian termicznych nie była znana zarówno co do wielkości jak i kierunków. W związku z powyższym na etapie opracowania koncepcji pomiaru fotogrametrycznego postanowiono przyjąć, że będą to odkształcenia przestrzenne. Równocześnie zostały postawione kryteria dokładnościowe, przyjęto że dokładność wyznaczanych składowych współrzędnych badanego punktu będzie określona z błędem średnim ± 2 mm na obiekcie. Układ współrzędnych w którym będą wyznaczane przemieszczenia będzie geometrycznie związany z badaną konstrukcją co ułatwi interpretację uzyskanych wyników. W praktyce pomiar odkształceń będzie posiadał charakter dyskretny. Wytypowanie miejsc dokonywania pomiaru odkształceń zostanie wykonane przez „drogowców” i nastąpi przed pierwszą rejestracją fotogrametryczną. Będzie ono zachowane w kolejnych rejestracjach. Postanowiono również, że cały pomiarowy cykl badawczy obejmie dwa lata czyli cztery cykle pomiarowe. Momenty pomiarowej rejestracji (fotografowania) będą zsynchronizowane z czasem prowadzenia innych pomiarów bezpośrednich.

Scharakteryzowane warunki pomiaru jak również geometria obiektów podlegających pomiarowi określa analizowane zadanie pomiarowe jako różnicowy pomiar punktowy o charakterze przestrzennym. Duży odstęp czasu pomiędzy kolejnymi cyklami pomiarowymi nakłada dodatkowe wymagania na etapie projektowania pomiarów fotogrametrycznych oraz sposobie opracowania wyników rejestracji.

3. Zastosowane rozwiązanie technologiczne

Różnicowy charakter pomiaru może być osiągnięty poprzez wykonywanie zdjęć fotogrametrycznych ze stałych stanowisk i przy niezmiennych ich orientacji. Spełnienie tego warunku przy długich odstępach czasowych pomiędzy kolejnymi rejestracjami jest w praktyce niemożliwe bez dużych nakładów finansowych. Można to osiągnąć technologicznie poprzez zastosowanie tzw. centrowania wymuszonego na specjalnie do tego celu wybudowanych trwałych (przez cały okres badań) stanowiskach. Koszt takiego rozwiązania nie był możliwy do zaakceptowania przy realizacji omawianych prac eksperymentalnych w ramach wcześniej cytowanego grantu. W efekcie aby zachować kryterium pomiaru różnicowego postanowiono zastosować wznawiane stanowiska na statywach geodezyjnych oraz odtwarzaną orientację zdjęć. Stosowane procedury odtwarzania elementów orientacji zdjęć nie pozwalają na przyjmowanie ich następnie w procesie opracowania jako stałe (niezmiennie !). Dlatego też będą one analitycznie

określone i aktualne ich wartości będą służyły do korekcji współrzędnych tłowych. Takie podejście jest niezbędne dla uzyskania wcześniej założonych dokładności pomiaru fotogrametrycznego. Czynnikiem decydującym o terenowej dokładności wyznaczania badanych odkształceń jest skala zdjęcia. Oczywiście skala ta musiała być dostosowana do gabarytów obiektu i w przypadku mniej korzystnym czyli mostu „Orląt Przemyskich” wynosiła ok. 1:350. Nieznany charakter odkształceń spowodował, że należało zastosować rejestrację wielostanowiskową. W praktyce przy projektowaniu pomiaru przyjęto, że każdy punkt pomiarowy będzie wyznaczany z trzech stanowisk. Takie rozwiązanie przy minimalnie zwiększonym zakresie prac podnosi dokładność opracowania jak również niezawodność technologiczną pomiaru. Rozmieszczenie stanowisk zostało dostosowane do topografii terenu występującej w obrębie mierzonych obiektów. Ostatecznie po wywiadzie terenowym zlokalizowano stanowiska względem badanych obiektów pozwalające na uzyskanie najlepszej geometrii sieci zdjęć naziemnych. Do wykonywania rejestracji przyjęto koncepcję zdjęć zbieżnych pozwalających na zrównoważenie dokładnościowe wyznaczanych składowych odkształceń. Zlokalizowane stanowiska zostały trwale zastabilizowane w gruncie. Przyjęty sposób stabilizacji pozwolił na wznawianie sytuacyjne stanowisk z dokładnością geodezyjną. Przed rozpoczęciem pierwszej rejestracji fotogrametrycznej na obiekcie wykonano sygnalizację punktów które miały podlegać badaniu we wszystkich cyklach pomiarowych. Ilość oraz lokalizacja tych punktów została określona przez specjalistów od konstrukcji mostowych. Dodatkowo sygnalizacji podlegały również punkty osnowy (zlokalizowane na przyczółkach mostowych), dla których były wyznaczane współrzędne metodami geodezyjnymi w przyjętym terenowym układzie odniesienia jednoznacznie związanym z badaną konstrukcją mostu. Pomiaru geodezyjne w pełnym cyklu zrealizowano jednorazowo przed pierwszą rejestracją. W kolejnych cyklach pomiarowych dla wznawianych stanowisk wyznaczano jedynie każdorazowo zmieniającą się wysokość stanowisk. Rezultaty tych pomiarów następnie wykorzystywano do kontroli i wyznaczania analitycznego rzeczywistych elementów orientacji kamer. Przy przyjęciu takiej koncepcji pomiaru fotogrametrycznego w terenie dla każdego stanu pomiarowego wykonywano rejestrację fotograficzną obiektu. Rejestracja ta była zsynchronizowana z innymi pomiarami prowadzonymi równolegle na badanym obiekcie. Właściwe wyznaczenie odkształceń odbywało się analitycznie na podstawie pomierzonych współrzędnych tłowych punktów wyznaczanych na wywołanych negatywach zdjęć pomiarowych. Do pomiaru zdjęć wytypowano autograf analityczny P 3 firmy Zeiss, a do obliczeń analitycznych program Terranet. Program ten pozwala na analityczne wyznaczenie współrzędnych punktów obiektu z zespołu zdjęć tworzących sieć fotogrametryczną metodą niezależnych wiązek. Zaletą tego programu jest możliwość indywidualnego wagowania punktów osnowy oraz uwzględniania w procesie obliczeniowym bezpośrednich dodatkowych obserwacji geodezyjnych. Spełnienie różnicowego charakteru pomiaru wymagało w opracowywanej technologii rozwiązania dwóch zagadnień:

- **opracowanie specjalnego sposobu prowadzenia obserwacji na instrumencie fotogrametrycznym,**
- **zagwarantowanie stałości układu odniesienia w procesie obliczeniowym dla wszystkich wyznaczanych stanów.**

Do wykonywania pomiarów na autografie analitycznym P 3 firmy Zeiss wykorzystywano standardowe oprogramowanie PCAP służące w zasadzie do odtwarzania orientacji modeli przestrzennych. Po analizie tego oprogramowania opracowano specjalną procedurę pomiarową pozwalającą na pomiar na tym instrumencie stereogramów „czasowych”. Stereogramy czasowe tworzone w ten sposób, że zdjęcie wyjściowe z danego stanowiska zakładano na lewy nośnik pomiarowy instrumentu, natomiast na prawy

kolejne fotogramy z tego samego stanowiska. W efekcie dla każdego stanowiska powstawało $n-1$ stereogramów czasowych, gdzie n to liczba rejestracji wykonanych z danego stanowiska. W praktyce więc stereogram mogły tworzyć zdjęcia z lata i zimy co pogarszało uzyskiwany efekt stereoskopowy. Wszystkie stereogramy były obserwowane w układzie stereokomparatorowym (opcja orientacji wzajemnej) dostarczając wynikowo współrzędnych tłowych obserwowanych punktów w postaci pliku numerycznego. Oczywiście analizowane w czasie pomiaru kryterium paralaksy poprzecznej nie było spełniane przy takiej koncepcji obserwacji, co wymagało zmiany parametrów technologicznych pomiaru. **Z każdego stanowiska pierwszy pomiar stereogramu czasowego dostarczał pliku sterującego do pomiaru kolejnych stereogramów czasowych z danego stanowiska.** Dzięki temu osiągnięto jednoznaczny identyfikację homologicznych punktów na obrazach wyższą od sporządzonej sygnalizacji terenowej (dzięki wykorzystaniu efektu stereoskopowego). Stworzyło to możliwość dodatkowego pomiaru punktów naturalnych, dla których była możliwa poprawna percepcja stereoskopowa. Dzięki zastosowanemu rozwiązaniu zautomatyzowano numerację obserwowanych punktów, przez co ograniczono przekłamania identyfikacyjne co ma miejsce przy prowadzeniu dużej serii powtarzalnych pomiarów.

Drugi warunek; czyli stałość układu odniesienia we wszystkich stanach pomiarowych uzyskano poprzez przyjęcie za stałe współrzędnych (wyznaczonych fotogrametrycznie dla pierwszego stanu rejestracji obiektu) dla zdefiniowanych punktów osnowy pomiarowej. Punktami tymi były punkty zastabilizowane na przyporach mostowych. Dodatkowo uwzględniano bezpośrednie pomiary geodezyjne. Tymi pomiarami były zmieniające się (dla każdej rejestracji) wysokości stanowisk kamer pomiarowych (na skutek odtwarzania ich na statywach). Zmiany wysokości stanowisk wyznaczano metodami niwelacji geometrycznej od lokalnego reperu. Jak już wspomniano program „TERRANET” posiada opcję – uwzględniania dodatkowych pomiarów geodezyjnych.

4. Sposób prowadzenia rejestracji, obserwacji fotogrametrycznych i obliczeń

Zgodnie z przyjętą koncepcją pomiarów fotogrametrycznych przed pierwszą rejestracją dokonano wywiadu terenowego na wytypowanych obiektach. W czasie tego wywiadu określono lokalizację przyszłych stanowisk kamer fotogrametrycznych w ten sposób, aby w istniejących warunkach topograficznych zapewnić optymalną rejestrację badanych przęseł i uzyskać najkorzystniejsze wcięcia geometryczne dla punktów wyznaczanych. Jednocześnie wytypowano lokalizację punktów pomiarowych, które poddano sygnalizacji. Zastosowano do sygnalizacji materiał samoprzylepny w postaci kólek o średnicy 20 mm w kolorze żółtym. Rozmieszczenie i ilość punktów pomiarowych została zaproponowana przez specjalistów „drogowców”. W trakcie obserwacji fotogrametrycznych prowadzono dodatkowe obserwacje na punktach naturalnych w celu sprawdzenia, czy takie rozwiązanie jest możliwe w praktyce. Uwagi co do przydatności punktów naturalnych przy tego typu badaniach są podane w podsumowaniu. Po wykonaniu stabilizacji stanowisk rejestracyjnych oraz sygnalizacji punktów badanych wykonano pomiar geodezyjny osnowy geodezyjnej. Do pomiaru użyto instrumentu typu „Total station” firmy Topcon. Instrument ten pozwala na pomiar oraz wyznaczenie współrzędnych w układzie lokalnym z błędem średnim ± 5 mm. Pomiary te zostały przeliczone w ten sposób, aby oś X układu odniesienia pokrywała się z osią podłużną badanego mostu. Dodatkowo wyznaczono w filarze każdego z badanych mostów lokalny reper, względem którego każdorazowo po ustawieniu statywów określano wysokości stanowisk. Wysokości te mierzono z dokładnością ± 2 mm. W czasie wykonywania pierwszej serii zdjęć na badanych mostach określono i zarejestrowano orientację

zewnętrzną każdego zdjęcia względem punktów osnowy. Orientację tę odtwarzano przy każdej kolejnej rejestracji. W praktyce więc przy kolejnych rejestracjach terenowych wznawiano stanowiska przy pomocy statywów geodezyjnych. Niwelowano ich wysokości, a następnie wykonywano zdjęcia odtwarzając ich orientację kątową na podstawie znanego stanu wyjściowego. Do rejestracji zastosowano kamerę UMK-10. Zdjęcia wykonywano na negatywowych płytach szklanych TOPO-PLATTE o czułości ok. 1 DIN. Czas naświetlania zdjęcia wahał się od 9 do 50 sek. w zależności od warunków oświetleniowych. Należy w tym miejscu podkreślić, że zdjęcia fotogrametryczne wykonywano synchronicznie wraz z innymi pomiarami prowadzonymi na badanych mostach. Spowodowało to jakościowe obniżenie jakości fotograficznej niektórych fotogramów, które były wykonywane „pod światło”. Ustalony harmonogram rejestracji przy sporządzaniu zdjęć w pierwszym stanie dla każdego mostu był następnie powtarzany przy rejestracji kolejnych stanów, w ten sposób zachowano kryteria pomiaru różnicowego. W efekcie zdjęcia wykonywano w 4 cyklach pomiarowych: zima 1999, lato 1999, zima 2000, lato 2000. W każdym cyklu zarejestrowano zmienną ilość stanów dostosowaną do panujących warunków pogodowych i niezbędnych parametrów ekspozycji zdjęć. W efekcie dla każdego mostu badanego wykonano następującą ilość rejestracji:

Most „Orląt Przemyskich”

ozn. cyklu	Ilość stanów
zima 1999	4
lato 1999	4
zima 2000	2
lato 2000	4

Wiadukt „Kolejowy”

ozn. Cyklu	ilość stanów
zima 1999	4
lato 1999	5
zima 2000	2
lato 2000	3

Wszystkie naświetlone klisze poddano obróbce laboratoryjnej uzyskując negatywy pomiarowe gotowe do obserwacji na autografie analitycznym w układzie stereokomparatorowym. Do pomiarów wykorzystano autograf analityczny P 3 firmy Zeiss. Obserwacje różnicowe prowadzono w systemie PCAP z wykorzystaniem opcji orientacji wzajemnej zachowując kryteria podane w poprzednim rozdziale. Obserwacje prowadzono dla całych cykli obserwacyjnych każdego mostu. Wynikiem pomiaru były wyznaczone współrzędne tłów punktów sygnalizowanych oraz dodatkowo wybranych szczegółów naturalnych, których lokalizacja została zdefiniowana pierwszym pomiarem na zdjęciach odniesienia. W efekcie dla każdego fotogramu po obserwacjach tworzony był plik numeryczny zawierający wyniki pomiaru współrzędnych tłowych punktów wyznaczanych i osnowy. Na podstawie obserwacji geodezyjnej utworzono dwa pliki inicjalne współrzędnych punktów osnowy oraz orientacji zewnętrznej zdjęć do prowadzenia obliczeń. Pliki te były indywidualne dla każdego cyklu badanego mostu i uwzględniały dodatkowo zmieniające się różnice wysokości stanowisk. Te pliki zawierające wyniki pomiaru współrzędnych tłowych na zdjęciach każdego stanu były przetwarzane na współrzędne przestrzenne badanych punktów wyrażone w układzie odniesienia zdefiniowanym przez współrzędne punktu osnowy połowej wyznaczone fotogrametrycznie dla stanu wyjściowego. W efekcie dla każdego stanu wyznaczano wynikowy zbiór numeryczny współrzędnych terenowych pozwalający na wtórne określenie odkształceń przestrzennych konstrukcji badanego mostu w wytypowanych miejscach pomiarowych.

5. Omówienie wyników pomiaru wiaduktu kolejowego

Poniżej prezentowane rezultaty były uzyskane z pomiarów fotogrametrycznych dla wiaduktu „Kolejowego”. Lokalizacja obiektu oraz jego widok jest prezentowany na rys 1a, 1b i 1c. W tym pomiarze poprawniej udało się zrealizować założenia teoretyczne omówione we wcześniejszych rozdziałach.

W tabelach 1,2,3,4 zestawiono wyznaczone wartości odkształceń (*jako jednostki dx, dy, dz przyjęto metr*) dla wybranych pomiarowych punktów charakterystycznych badanej konstrukcji mostu. Punkty wybrane (lokalizacja na obiekcie - patrz rys.2a,2b) znajdują się w otoczeniu jednocześnie prowadzonych pomiarów kontrolnych technikami pomiaru bezpośredniego.

Tabela 1

Nr Punktu	Cykl pomiarowy - zima 1999								
	2			3			4		
	dx	dy	dz	Dx	dy	Dz	dx	dy	Dz
310	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.000
312	0.001	-0.003	-0.001	-0.001	0.000	0.002	-0.003	-0.001	-0.002
330	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.008	-0.001	0.000
333	0.000	-0.000	-0.000	-0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
411	0.001	0.001	0.000	-0.002	-0.001	0.001	-0.001	0.000	0.001
412	0.000	0.001	0.000	-0.003	-0.002	0.001	-0.001	0.001	0.001
427	-0.004	-0.004	0.001	-0.003	-0.004	0.000	-0.003	0.000	0.001

Tabela 2

Nr Punktu	Cykl pomiarowy - lato 1999											
	1			2			3			4		
	dx	dy	dz	Dx	dy	dz	dx	dy	Dz	dx	dy	Dz
310	0.007	0.000	-0.001	0.006	-0.003	-0.002	0.006	-0.004	-0.001	0.007	-0.011	-0.002
312	0.005	-0.006	-0.001	-0.008	0.006	-0.003	0.008	-0.006	0.001	0.007	-0.004	-0.001
330	0.002	-0.006	0.000	-0.001	-0.003	0.001	0.001	-0.003	-0.002	0.003	-0.005	-0.004
333	0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.004	-0.001	0.000	-0.005	-0.001	0.001	-0.005	0.000
411	0.001	-0.002	-0.001	0.003	-0.001	-0.001	0.003	-0.003	-0.002	0.003	0.000	0.000
412	0.001	-0.001	-0.001	0.004	0.000	-0.002	0.002	0.000	-0.002	0.003	0.000	-0.002

Tabela 3

Nr Punktu	Cykl pomiarowy - zima 2000					
	1			2		
	dx	dy	dz	Dx	dy	dz
310	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002
312	0.001	0.006	0.005	-0.000	0.005	0.001
330	0.003	0.004	-0.003	0.001	0.008	-0.001
333	-0.001	-0.001	0.001	0.001	0.003	0.001
411	-0.006	-0.003	-0.002	-0.005	-0.003	-0.003
412	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.002
427	0.005	0.003	0.001	0.004	0.002	0.000

Tabela 4

Nr Punktu	Cykl pomiarowy - lato 2000								
	1			2			3		
	dx	Dy	dz	Dx	dy	dz	Dx	dy	Dz
310	0.002	-0.001	0.000	0.003	-0.002	-0.001	0.004	-0.002	0.000
312	0.005	-0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000
330	0.002	-0.003	-0.001	0.001	-0.004	-0.003	0.001	-0.005	-0.002
333	0.001	-0.004	0.000	0.002	-0.002	0.000	0.001	-0.007	0.001
411	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
412	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.000	-0.002
427	-0.007	-0.004	0.002	-0.005	-0.001	0.003	-0.006	-0.002	0.002

a)



b)



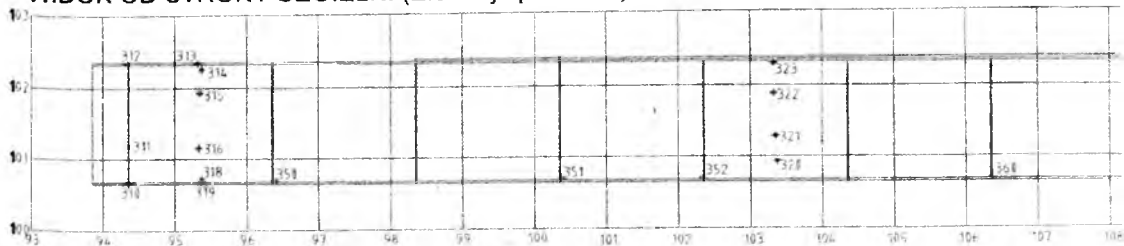
c)



Rys. 1. Wiadukt kolejowy w Buszkowicach k/Przemyśla:

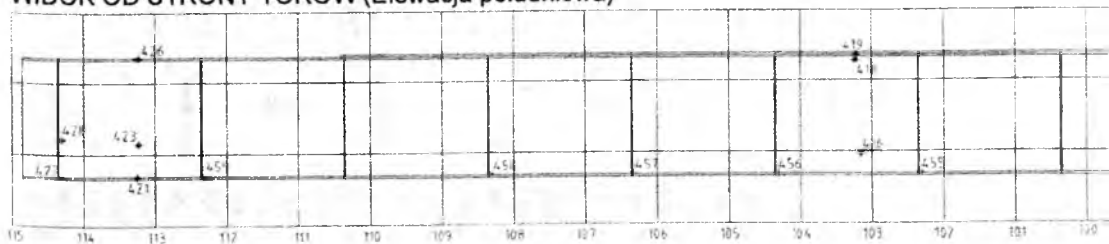
a) lokalizacja, b) widok ogólny wiaduktu, c) przekrój poprzeczny przęsła

WIDOK OD STRONY CEGIELNI (Elewacja północna)

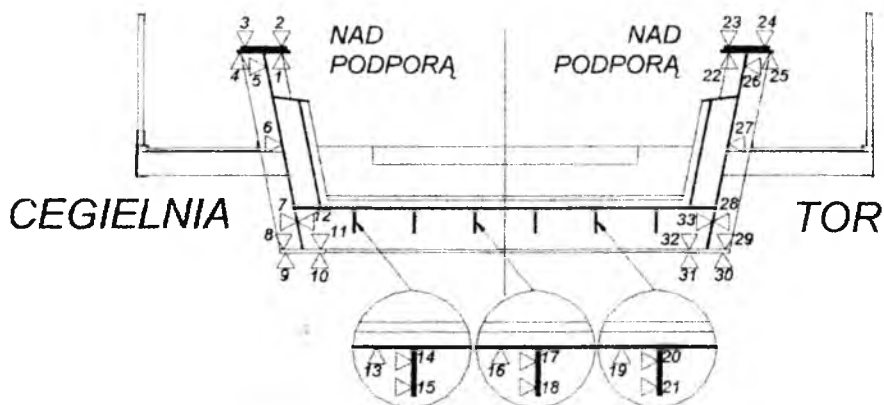


Rys. 2.1. Lokalizacja punktów pomiarowych

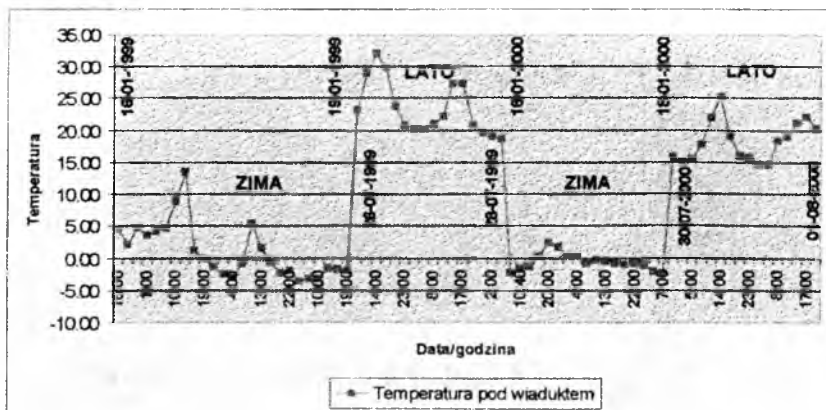
WIDOK OD STRONY TORÓW (Elewacja południowa)



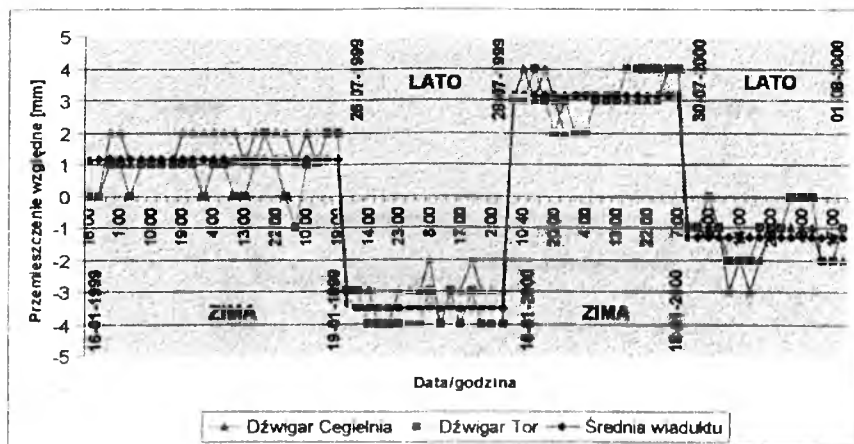
Rys. 2.2. Lokalizacja punktów pomiarowych



Rys. 3.1 Lokalizacja punktów pomiaru temperatury w przekroju poprzecznym wiaduktu



Rys. 3.2. Temperatura powietrza mierzona pod wiaduktem



Rys. 3.3. Względne przemieszczenia poziome łożysk wiaduktu kolejowego w

Buszkowicach (pomiar bezpośredni, znak (+) oznacza skrócenie, (-) wydłużenie przęsła)

Prowadzone równoległe pomiary bezpośrednie miały charakter pomiarów względnych i były wykonywane z użyciem mierników elektronicznych o dokładności nominalnej pomiaru równej 0.1mm. Pomiar odbywał się w miejscach, których lokalizację ilustruje rys.3.1 były one w otoczeniu punktów wyznaczanych fotogrametrycznie, których rezultaty zestawiono w tabelach. Uzyskane wartości przemieszczeń względnych pokazano na rys. 3.3. Można więc dokonać porównania uzyskanych wyników. Analizując wyniki zestawione w tabelach możemy stwierdzić, że na badanym obiekcie w ramach jednego cyklu wartości odkształceń w każdym mierzonym punkcie są niezmiennie z dokładnością pomiaru fotogrametrycznego. Traktując badaną konstrukcję jako sztywną możemy założyć, że punkty znajdujące się w tym samym przekroju pomiarowym (np. 310 i 312) podlegają tym samym odkształceniom. Wychodząc z tego założenia uśredniono w danym przekroju wszystkie wyznaczone wartości uzyskując dla poszczególnych stanów następujące wartości:

zima 1999	$dx_{sr} = -0.8$ mm
lato 1999	$dx_{st} = 4.1$ mm
zima 2000	$dx_{st} = -1.2$ mm
lato 2000	$dx_{q} = 1.5$ mm

Widzimy, że tak określone wartości wykazują bardzo dobrą zgodność z danymi pokazanymi na rys 3.3. Jedyne dla cyklu zima 2000 rozbieżność jest większa i osiąga 1.8 mm. Możemy więc stwierdzić, że pomiary fotogrametryczne pozwalają na pomiarową ocenę takich zjawisk jakimi są odkształcenia konstrukcji stalowej mostu pod wpływem zachodzących zmian termicznych.

6. Podsumowanie

Niewątpliwą zaletą stosowania metod fotogrametrycznych do pomiaru odkształceń konstrukcji stalowych mostu jest możliwość geometrycznego uchwycenia zmian przestrzennych w całej badanej konstrukcji w wytypowanych momentach czasowych. Problemem staje się sprostanie wymogom dokładnościowym pomiaru. Konstrukcje stalowe mostów posiadają duże gabaryty co wpływa na skalę wykonywanych zdjęć pomiarowych i w konsekwencji na uzyskiwane bezwzględne dokładności pomiaru fotogrametrycznego. Wyznaczane odkształcenia w konstrukcjach mostowych są więc często rzędu możliwych do uzyskania dokładności pomiarowych. Dla uzyskania postulowanych dokładności pomiaru fotogrametrycznego opracowano oryginalną metodę rejestracji i prowadzenia obserwacji na autografie analitycznym. Przeprowadzone prace eksperymentalne potwierdziły, że założone w projekcie badawczym dokładności pomiaru fotogrametrycznego zostały osiągnięte. Jednocześnie uzyskane wyniki badań wskazują jakim problemem jest, przy długich odstępach czasowych kolejnych rejestracji, spełnienie postulatu pomiaru czasowego na etapie obserwacji. Trudnym do przewidzenia na etapie projektowania pomiaru były również zmiany faktury badanych przęseł w okresie prowadzonych badań (2 lata). Zmiany te były spowodowane malowaniem konserwacyjnym mostu „Orla”, a w przypadku mostu „Kolejowego” powstało „Grafiti”. Te zmiany w fakturze rejestrowanego obiektu w sposób zdecydowany zakłócały uzyskiwanie efektu stereoskopowego i przyczyniały się do obniżania precyzji pomiarów lub wręcz ich uniemożliwiania na wybranych punktach naturalnych w kolejnych cyklach pomiarowych. Wykonana dodatkowa próba pomiaru punktów naturalnych wykazała, że może być ona poprawna na wybranych szczegółach (nity montażowe, krawędzie łączonych blach itp.) przy zastosowanej technice obserwacyjnej. Jednak dokładność pomiaru na tego typu punktach może być obniżona poprzez zmienne warunki oświetlenia, oraz powstałe pomiędzy rejestracjami zmiany w fakturze obiektu. Drastycznie może to prowadzić do uniemożliwienia poprawnego pomiaru. Tego typu punkty na pewno można by z powodzeniem zastosować w badaniach szybkozmiennych. Tak więc w praktyce badań długookresowych należy stosować jedynie punkty sygnalizowane gwarantujące możliwość pomiaru punktowego nawet przy

zakłóceniami efektu stereoskopowego. Oczywiście wynikowa dokładność pomiaru fotogrametrycznego na punktach sygnalizowanych zależy również od zastosowanego sposobu sygnalizacji punktów wyznaczanych. Przyjęta koncepcja wyznaczania punktu z przecięcia 3 wiązek, gwarantowała nie tylko lepsze zrównoważenie wyznaczanych współrzędnych punktów, ale podnosiła niezawodność technologiczną pomiaru (utrata widoczności jednego kierunku spowodowana np. przesłonięciami punktu roślinnością w okresie letnim lub pojazdami w ruchu nie powodowała braku pomiaru). Oczywiście punkt wyznaczony jedynie z dwóch przecięć był mniej dokładny co było sygnalizowane w protokole obliczeń i mogło być uwzględniane przy interpretacji uzyskanych wyników. Problem interpretacji wyników jest zagadnieniem bardzo istotnym gdy uzyskiwane dokładności pomiaru są rzędu wielkości wyznaczanych odkształceń. Bardzo pomocną na tym etapie może być szczegółowa charakterystyka dokładnościowa dla każdego punktu wyznaczonego dokumentowana w protokole tworzonym przez oprogramowanie „TERRANET”. W praktyce wszystkie modele fotogrametryczne opisujące poszczególne stany geometryczne badanych przeseł mostów udało się zrekonstruować przy założonych a priori średnich błędach współrzędnych punktów osnowy $m_x = m_y = m_z = \pm 2$ mm. Mankamentem przeprowadzonych pomiarów fotogrametrycznych było stosowanie jeszcze rejestracji fotograficznej. Jednak obecny stan rozwoju kamer cyfrowych nie gwarantuje, przy dużych gabarytach badanych konstrukcji, uzyskiwanie zakładanych w omawianym projekcie badawczym dokładności bezwzględnej. Biorąc pod uwagę dynamiczne zmiany w zakresie tworzenia matryc CCD wydaje się możliwe w przyszłości zastosowanie rejestracji cyfrowej do tego typu obiektów co pozwoli na zautomatyzowanie procesu opracowania i w efekcie znacznego skrócenia czasu uzyskiwania wyników końcowych.

Rezensował: dr hab. inż. Jerzy Bernasik, profesor AGH