

dr inż. Rafał Sienko*

Systemy monitorowania obiektów mostowych

Chęć tworzenia nowatorskich obiektów mostowych, wymagania ograniczające sytuowanie podpór w częściach korytek, czy konieczność rozwiązywania skomplikowanych węzłów drogowych powodują, że współcześnie projektowane mosty mają większe rozpiętości, skomplikowane niwelety zakrzywione zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej i są obiektami o niestandardowych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

Projektowanie obiektów nietypowych oraz założenia upraszczające przyjmowane w modelach teoretycznych powodują, że analizy obliczeniowe tylko w pewnym stopniu odwzorowują sposób pracy konstrukcji w warunkach eksploatacji. Mimo ciągłego rozwoju technik obliczeniowych, stosowania skomplikowanych modeli przestrzennych wciąż jeszcze jesteśmy daleko od potrzeb.

Pewną weryfikacją odpowiedzi konstrukcji na przykładane do niej obciążenia jest narzucona w polskich przepisach prawnych konieczność prowadzenia obciążeń próbnych obiektów mostowych. Natomiast w dużej części norm krajowych innych państw wycofano się z tego sposobu badania konstrukcji [B. Lewicki: *Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków. Metodyka postępowania i kryteria oceny*, Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1997] ze względu na trudności jednoznacznego określenia kryterium poprawności odpowiedzi obiektu na przykładane do niego obciążenia. W przypadku konstrukcji żelbetonowych dodatkowy, bardzo istotny wpływ na sposób ich pracy mają zjawiska reologiczne związane z relaksacją stali sprężającej oraz skurczem, pełzaniem i zmianą modułu sprężystości betonu.

Charakterystyka

Jedną z budzących duże nadzieje metod weryfikacji sposobu pracy odpowiedzialnych obiektów mostowych jest instalowanie na wybranych elementach konstrukcji systemu monitorującego, który realizuje ciągły pomiar różnych wielkości fizycznych: począwszy od odkształceń elementów, a na określaniu wartości oddziaływań kończąc – możliwości są tutaj ogromne. Współczesne techniki pomiarowe bazują na:

- klasycznej tensometrii elektrooporowej czy strunowej;
- systemach laserowych;
- czujnikach światłowodowych oraz piezoelektrycznych.

Celem artykułu jest zasygnalizowanie możliwości prowadzenia zdalnej obserwacji zmieniających się w czasie wartości pomiarowych.

Pomiar względnego ugięcia przęsła mostu najprościej jest prowadzić w stosunku do punktów bazowych zainstalowanych przy podporach. System pomiarowy można dodatkowo wyposażać w nieodkształcalną bazę, którą instaluje się poza obszarem oddziaływania mostu na osiadanie gruntu. Wówczas możliwe jest prowadzenie obserwacji **osiadań podpór** oraz **bezwzględnych ugięć przęseł**. Dokładność pomiaru zależy od przyjętej metody i wynosi $\pm 0,2$ mm. Pomiar realizowany jest za pomocą układu naczyń połączonych lub metodą laserową. Prowadzone są również próby wykorzystania techniki GPS, ale obecnie dokładność tej metody jest mało zadowalająca.

Pomiary odkształceń elementów ze stali profilowej mogą być realizowane za pomocą różnego typu czujników tensometrycznych mocowanych metodą klejenia lub spawania (tylko czujniki strunowe). **Do pomiaru odkształceń betonu najlepiej jest stosować czujniki zatapiane** (fotografia) instalowane podczas wykonywania konstrukcji lub czujniki mocowane na zewnątrz elementów. Odkształcenia



Czujniki zatapiane w konstrukcji podczas jej betonowania

prętów zbrojeniowych mogą być mierzone specjalistycznymi czujnikami umieszczonymi wewnątrz wcześniej przygotowanych odcinków prętów lub do nich klejonych. Ciekawą propozycją są czujniki umożliwiające pomiar „naprężeń” w betonie bez konieczności znajomości zmienianego się w czasie modułu sprężystości betonu. Dokładność pomiarów odkształceń wynosi zazwyczaj $\pm 0,1\%$ przyjętego zakresu pomiarowego. Możliwe jest zastosowanie tensometrii strunowej lub elektrooporowej, a także czujników światłowodowych. W przypadku wykonania dwóch uzupełniających się pomiarów możliwe jest ciągłe śledzenie zmiany modułu sprężystości betonu w rzeczywistej konstrukcji, a nie jak dotychczas tylko w laboratorium na specjalnie przygotowanych próbkach.

Zmiana szerokości rozwarcia rys lub dylatacji może być określana za pomocą tzw. przetworników przemieszczeń. Dokładność pomiaru wynosi zazwyczaj $\pm 0,1\%$ przyjętego zakresu pomiarowego. Możliwe jest zastosowanie tensometrii elektrooporowej lub strunowej.

Pomiar zmiany kąta przechyłu dowolnego elementu konstrukcji wykonuje się w celu kontroli przemieszczenia osi podpór słupowych, przyczółków, pylonów itp. Przy wykorzystaniu tensometrii strunowej możliwy jest pomiar kąta przechyłu z dokładnością $\pm 0,05$ mm/m.

Pomiar drgań (amplitudy, częstotliwości) realizowany jest najczęściej w przypadku podatności obiektu mosto-

* Politechnika Krakowska

wego na oddziaływanie dynamiczne. Możliwa jest rejestracja wartości amplitud oraz częstotliwości drgań wybranych elementów konstrukcji. Zazwyczaj stosowane są czujniki piezoelektryczne. Wynikiem pomiarów jest czasowy przebieg przyspieszeń wybranych punktów pomiarowych.

Pomiar ciśnienia parcia gruntu na elementy konstrukcji lub odporu gruntu realizuje się za pomocą specjalnych czujników o różnym zakresie pomiarowym, wrażliwych na zmiany ciśnienia. Możliwe jest prowadzenie pomiaru wartości odporu podłoża gruntowego pod fundamentami, co jest szczególnie istotne w podstawach pali, gdyż dzięki niemu możliwe jest bardzo dokładne zweryfikowanie założeń przyjętych na etapie projektu. Pomiar określa się z dokładnością $\pm 0,1\%$ zastosowanego zakresu pomiarowego. W przetwornikach ciśnienia wykorzystywana jest tensometria strunowa bądź elektrooporowa.

Do pomiaru sił wciąganych sprężających, wantach i linach (prętach) podwieszających oraz kotwach gruntowych mogą być stosowane czujniki umożliwiające pomiar siły pod zakotwieniem (klasyczne siłomierze), względnie w dowolnym punkcie na długości cięgna. Dokładność pomiaru wynosi od $\pm 0,1$ do $\pm 0,5\%$ zastosowanego zakresu pomiarowego. Mogą być wykorzystywane przetworniki siły z pomiarem tensometrycznym elektrooporowym lub strunowym.

Pomiar liczby pojazdów, liczby poszczególnych osi, prędkości oraz ciężaru pojazdów lub obciążenia przekazywanego przez poszczególne osie może być realizowany za pomocą zestawu składającego się z czujników kwarcowych uzupełnionych pętlami indukcyjnymi. Stosowane są również czujniki radarowe, laserowe lub systemy wizyjne.

Stacje klimatyczne umożliwiają rejestrację temperatury powietrza i nawierzchni, poziomu nasłonecznienia, opadów oraz kierunku i siły (prędkości) wiatru oraz informację o stopniu przejrzystości powietrza, oblodzeniu lub oszronieniu nawierzchni, grubości pokrywy śnieżnej oraz stężeniu substancji odladzających.

System pomiarowy **projektowany jest indywidualnie dla każdego obiektu**. Uwzględnia się uwarunkowa-

nia konstrukcyjne, ekonomiczne oraz szczegółowe wymagania inwestora i/lub użytkownika. System składa się z zestawu czujników do pomiaru wybranych wielkości fizycznych, okablowania, modułów pomiarowych oraz jednostki centralnej, którą jest komputer przemysłowy sterujący całym systemem, rejestrujący zbierane dane i przesyłający je za pomocą bezprzewodowej transmisji do serwera znajdującego się w dowolnym miejscu na kuli ziemskiej. Dostęp do danych zgromadzonych na serwerze mogą mieć wszyscy zarejestrowani użytkownicy przez sieć internetową.

System pomiarowy powinien odznaczać się **bardzo dużą trwałością** (powyżej 20 lat), pomijalnym wpływem czasu na rejestrowane przez czujniki wartości (brak relaksacji i pełzania czujników oraz kleju), możliwością wykonania instalacji na obiekcie mostowym o dużych wymiarach, jak najmniejszą stratą sygnału pomiarowego na skutek różnych zakłóceń oraz możliwością rozbudowy systemu po jego oddaniu do użytkownika.

Koszt eksploatacji systemu monitorowania jest niewielki i stanowi przede wszystkim opłatę abonamentową za korzystanie z bezprzewodowej transmisji danych. W związku z tym, że zastosowana aparatura pomiarowa charakteryzuje się małą awaryjnością, podczas normalnego użytkowania systemu zazwyczaj konieczne są wyłącznie okresowe przeglądy sprawności układu pomiarowego.

Zalety

Najważniejszą zaletą systemów monitorowania konstrukcji jest **realny wzrost bezpieczeństwa nadzorowanych obiektów mostowych** dzięki ciągłej kontroli i analizie wpływu oddziaływań komunikacyjnych oraz warunków środowiskowych na poszczególne elementy konstrukcji. Mierzone wielkości pomiarowe pozwalają na zweryfikowanie założeń i modeli przyjętych na etapie projektowania obiektu budowlanego oraz określenie wyężenia poszczególnych elementów. Ciągła rejestracja wyników pomiarów umożliwia kontrolowanie sposobu pracy konstrukcji w czasie pod wpływem zmienia-

jących się obciążeń (wywołanych m.in. pojazdami, tłumem ludzi czy wiatrem). Systemy tego typu wspomagają także ekspertów w określaniu postępu procesu degradacji stanu technicznego konstrukcji rozumianej jako zaniżanie jej nośności, a także umożliwiają prognozowanie trwałości obiektu.

Zainstalowanie systemu pomiarowego na elementach konstrukcji podczas jej wznoszenia jest najkorzystniejsze z punktu widzenia późniejszego wykorzystania rejestrowanych danych. Jeżeli pomiar poszczególnych wielkości fizycznych będzie uwzględniał również ciężar własny elementów oraz zmieniające się podczas wznoszenia obiektu inne obciążenia związane m.in. z procesem budowy, będzie możliwe wyznaczenie **wyężenia poszczególnych elementów konstrukcji** na podstawie zmierzonych wielkości (w szczególności odkształceń). System monitorowania konstrukcji zainstalowano m.in. **na moście wantowym w Płocku** i uwzględniono go w projekcie **mostu przez Odrę we Wrocławiu**.

Obecnie obserwuje się wzrost zainteresowania projektantów oraz inwestorów nowoczesnymi systemami pomiarowymi. Już nie tylko największe mosty czy obiekty hydrotechniczne wyposażane są w urządzenia umożliwiające ich ciągłe i zdalne monitorowanie. Coraz częściej tego typu systemy instalowane są na obiektach handlowych czy sportowych. Biorąc pod uwagę doświadczenia z katastrofy w Chorzwie, podejście takie jest jak najbardziej uzasadnione, przede wszystkim dlatego, że dzięki systemom monitorowania można realnie zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia awarii budowlanej.