

Współczesny monitoring obiektów budowlanych

Dr inż. Marek Skłodowski, PAN, Warszawa

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono wybrane współczesne techniki monitorowania konstrukcji budowlanych. Spośród wielu znanych metod i czujników położono nacisk na systemy światłowodowe. Opiszano w zarysie postawy fizyczne pomiarów tymi rodzajami czujników, które znalazły najszersze zastosowanie do monitorowania odkształceń konstrukcji budowlanych (czujniki interferometryczne SOFO, czujniki Bragga i bazujące na rozpraszaniu Brillouina). Druga prezentowana grupa czujników obejmuje czujniki GPS i Robovec wchodzące w skład systemu monitorowania trójwymiarowych deformacji. Podane są istotne z punktu widzenia pomiarów budowlanych właściwości metrologiczne opisywanych czujników i systemów, a także spektrum możliwości ich typowych zastosowań praktycznych.

W artykule opisano różnice między pomiarami okresowymi a monitorowaniem konstrukcji umożliwiające ocenę trendów zmian jej stanu technicznego i ułatwiające tym samym identyfikację ewentualnych zagrożeń oraz współczesne systemy monitorowania konstrukcji budowlanych. Przedstawione przykłady monitorowania konstrukcji nakierowane są na omówienie zagadnień jakie należało rozwiązać i pokazaniu jakie informacje uzyskano dzięki zastosowaniu konkretnych systemów monitorowania.

Opisane w artykule czujniki i systemy pomiarowe do monitoro-

wania obiektów budowlanych wybrane zostały na podstawie ich przydatności do pomiaru wielkości mechanicznych, niezawodności działania oraz odporności na zakłócenia, łatwości zastosowań praktycznych, możliwej automatyzacji pomiarów i dostępności handlowej. Przedstawiono zarys potrzeb monitorowania budowli oraz metody monitorowania bazujące na odbiornikach GPS i działanie laserowego robota pomiarowego Robovec. Opiszano także przykłady zastosowań tych systemów w praktyce inżynierskiej.

Czujniki światłowodowe stosowane są do monitorowania mostów, tuneli, zapór, wysokich budynków, torowisk, kratownic dachowych, platform wiertniczych, nabrzeży portowych, zabytkowych budowli, rurociągów i innych konstrukcji. Czujniki te służą między innymi do pomiaru deformacji konstrukcji, w szczególności rozwarcia rys i pęknięć, osiadania, ugięć, drgań, temperatury, stopnia sprężenia, pochylenia ścian i filarów, skurczu betonu oraz współpracy betonu starego z nowym [5]. Spośród kilku rodzajów czujników światłowodowych przedstawiono jedynie te, które znalazły liczne zastosowania w monitorowaniu konstrukcji. Jako zasadę działania wykorzystują one różne zjawiska fizyczne towarzyszące propagacji światła w światłowodach. W związku z tym różna jest budowa czujników, różne są sposoby pomiaru i różne stosowane analizatory sygnału optycznego.

W dalszej części przedstawiono minimum wiadomości konieczne dla lepszego zrozumienia opisywanych następnie przykładów. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w obszernej literaturze, np. [7]. Przykłady zastosowania czujników światłowodowych obejmują monitorowanie podczas podwyższania korony betonowej zapory, ugięć i obciążeń eksploatacyjnych mostów, rozwoju spękań sklepienia zabytkowego kościoła (Szwajcaria), oceny pracy i nośności pali fundamentowych fabryki półprzewodników (Tajwan) i naprężeń kratownic dachowych (Kanada). Drugą grupą opisywanych układów pomiarowych są stacje GPS i roboty laserowe pozwalające na zdalny pomiar w trzech wymiarach przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji. Mogą one pracować niezależnie od siebie lub występować wspólnie jako jeden system monitorowania. Oba systemy mają podobną dokładność pomiarów rzędu milimetra i szczególnie nadają się do monitorowania dużych obiektów geotechnicznych, np. zapór, falochronów, terenów osuwiskowych [8, 9, 10], ze względu na możliwość zasilania z akumulatorów i baterii słonecznych. Wykorzystywane są one także do monitorowania ugięć kratownic dachowych i osiadania budowli [8]. Praktyczne zastosowanie stacji GPS pokazuje przykład monitorowania deformacji falochronu (Włochy), a zastosowanie robota laserowego ilustruje przykład monitorowania ugięć kratownic dachowych (Kanada).

2. Mierzenie, monitorowanie i identyfikacja zagrożeń

Konstruktorzy, budowniczowie i rzeczoznawcy budowlani mają wiedzę wystarczającą do oceny stanu technicznego konstrukcji i potencjalnych zagrożeń jej bezpieczeństwa. Dla poprawnej identyfikacji zagrożeń ważne jest uzupełnienie tej wiedzy o informacje o aktualnym stanie konstrukcji i jej podłożu oraz jej zachowaniu się pod wpływem występujących oddziaływań, a także o zmianach tego stanu w krótkim i długim okresie czasu, czyli o przebiegu zachodzących procesów.

Ilustracją zadania oceny przeszłego stanu technicznego konstrukcji niech będzie śledzenie trendu zmian rozwarcia szczeliny. Przyklejenie płytki szklanej jest dobre tylko w jednym przypadku – gdy nic się nie dzieje. Bowiem z faktu, że szkło nie pęka wynika tylko jeden wniosek – nie ma zmian. Jeśli jednak pęknie, to jesteśmy dokładnie w punkcie wyjścia – wiemy, że pękło. Problem niedostatecznej informacji bierze się stąd, że płytka szklana nie jest czujnikiem. Jest ona jedynie wskaźnikiem. Nie mierzy niczego tylko wskazuje czy pęknięcie miało miejsce. Płynie stąd pierwszy wniosek naszych rozważań: „Ekspert potrzebuje informacji z pomiaru, czyli ekspert powinien stosować czujniki, a nie wskaźniki”.

Pomiary mogą być przeprowadzane okresowo lub w sposób ciągły. Te dwa sposoby pomiarów dostarczają tylko pozornie tej samej informacji. Różnica jest jednak taka jak między fotografią a filmem. Pomiar jednorazowy lub okresowa kontrola dokumentują jedynie aktualny stan. Pomiar „ciągły” czyli monitorowanie konstrukcji pozwala śledzić zachodzące zmiany. Jednak nie ma pomiarów dosłownie ciągłych. Kiedy więc kończy się mierzenie, a zaczyna monitorowanie konstrukcji? Nie ma tu żadnej definicji. Decyduje jedynie problem jaki mamy rozwiązać oraz wiedza

i zdrowy rozsądek eksperta. Można monitorować drgania budynku tylko wtedy, gdy w jego pobliżu przejeżdża pociąg, ale można też monitorować zachowanie tego budynku w okresie gdy pociąg nie jedzie, jeśli spodziewamy się dodatkowo pełzania gruntu, które przy samym obciążeniu statycznym by nie wystąpiło. Wynika stąd drugi wniosek: „Dla identyfikacji zagrożeń konieczna jest ocena procesów zmian stanu konstrukcji poprzez odpowiednie monitorowanie”.

Pojedyncze pomiary od monitorowania odróżnia jeszcze jeden ważny element. Jest to ilość rejestrowanych danych i czas w jakim one napływają, a w konsekwencji również ilość czasu potrzebnego do opracowania tych danych i ich analizy. Ilość danych rejestrowanych podczas monitorowania jest tak duża, że konieczne jest użycie mikroprocesorowych układów elektronicznych – komputerów lub zespołów wbudowanych w autonomiczne urządzenia pomiarowe. Korzyścią z zastosowania tej zaawansowanej elektroniki w urządzeniach pomiarowych jest ogromna precyzja monitorowania, znacznie wyższa niż w starszych metodach pomiarów. Przykładem może być wzrost dokładności pomiaru zmian szerokości szczeliny – od wskaźnika jakim jest płytka szklana (tylko „znak”: pękło = szerokość rysy wzrosła) przez przymiary geometryczne z noniuszem (rozdzielczość odczytu około 0,05 mm) do mocowanych na konstrukcji czujników indukcyjnych i światłowodowych (rozdzielczość pomiaru 0,002 mm) [1].

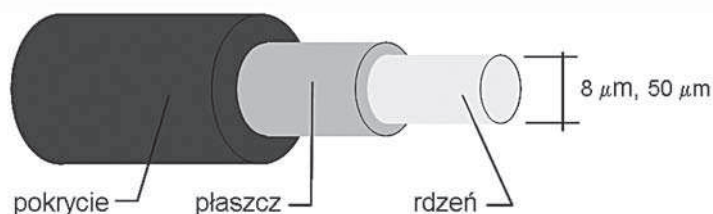
Przedstawione cechy charakterystyczne monitorowania konstrukcji budowlanych – ciągły pomiar, użycie automatycznych systemów rejestracji danych, bardzo duża dokładność pomiarów, możliwość śledzenia przebiegu procesów deformacji konstrukcji – zdecydowały o coraz powszechniejszym i coraz częstszym stosowaniu takiego podejścia do identyfikacji zagrożeń i oceny bezpieczeństwa obiektów inżynierskich. W pracy [2] podano informację, że w najbliższych kilkunastu latach planowane jest zainstalowanie w Chinach systemów monitorowania obejmujących łącznie 450 tysięcy(!) czujników światłowodowych w 30 zaporach. Z kolei w Kanadzie funkcjonuje program [3] edukacji i rozwoju zastosowań czujników światłowodowych do monitorowania konstrukcji. Takie przedsięwzięcia możliwe są dlatego, że technologia czujników światłowodowych do monitorowania konstrukcji jest obecna na rynkach światowych od ponad 10 lat. Szerokie zastosowania inżynierskie są możliwe, ponieważ dostępne są gotowe rozwiązania technologiczne, sprawdzone w laboratoriach badawczych [4, 6, 7] i wdrożone na wielu obiektach.

3. Czujniki i systemy pomiarowe

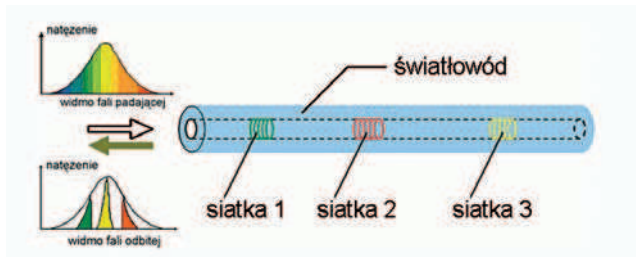
3.1. Czujniki światłowodowe

Czujniki światłowodowe wytwarzane są ze światłowodów zbudowanych tak jak standardowe światłowodów telekomunikacyjne. Ich budowę ukazuje rysunek 1.

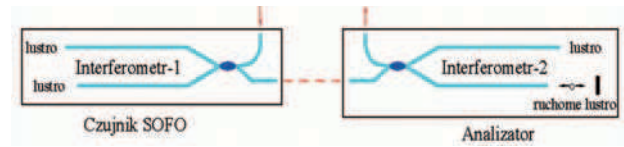
Różnica, w stosunku do światłowodów telekomunikacyjnych, polega



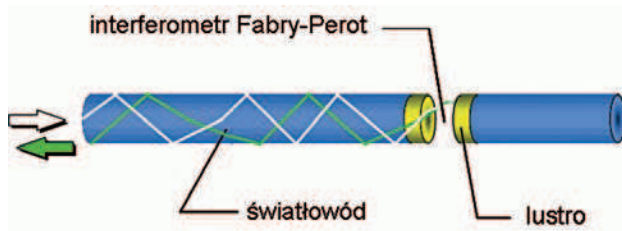
Rys. 1. Budowa światłowodu



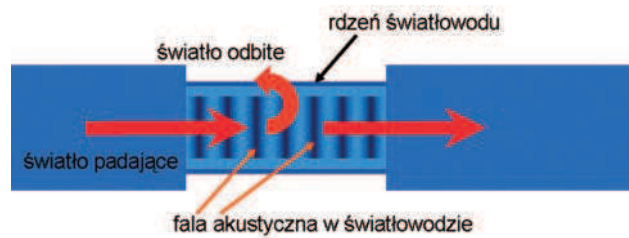
Rys. 2. Zasada działania czujnika Bragga



Rys. 4. Schemat systemu SOFO



Rys. 3. Schemat działania czujnika EFPI



Rys. 5. Schemat działania czujnika DiTeST

na tym, że pokrycie wykonane jest z materiału o dużej przyczepności i dużym współczynniku tarcia, aby wyeliminować poślizgi w strefie mocowania czujnika. Dzięki temu czujnik odkształca się tak jak monitorowana konstrukcja. Do niewielkich odkształceń można używać czujników na bazie światłowodów telekomunikacyjnych, ale lepiej jest tego unikać.

Wspólną cechą wszystkich czujników światłowodowych jest odporność na zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od silników, nadajników radiowych i telewizyjnych, telefonów komórkowych, a nawet wyładowań towarzyszących uderzeniom piorunów. Drugą wspólną cechą jest brak zasilania elektrycznego, co eliminuje niebezpieczeństwo iskrzenia i umożliwia stosowanie tych czujników w strefach zagrożonych wybuchem. Trzecią wspólną cechą jest możliwość transmisji sygnału optycznego na duże odległości i umieszczenie analizatora sygnału w bezpiecznym miejscu z dala od strefy pomiaru.

Do monitorowania konstrukcji stosuje się czujniki siatkowe Bragga (FBG – Fiber Bragg Grating), czujniki interferometryczne Fabry-Perot (EFPI – Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) i SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Opti-

ques) oraz czujniki wykorzystujące rozproszenie Brillouina światła w światłowodzie (np. DiTeST – firmy SMARTEC, DTSS – firmy Sensornet). Czujniki FBG i EFPI mają krótką bazę pomiarową i służą do pomiaru lokalnych wartości odkształceń i przemieszczeń, np. rozwarcia szczeliny [11], odkształcenia elementów kratownicy [8], drgań lin mostów i linii energetycznych [12]. Czujniki SOFO mają długą bazę pomiarową (standardowo od 2 m do 30 m) i mierzą średnie wartości odkształceń elementów konstrukcji np. odcinków przęsła [13], słupów między poszczególnymi piętrami [14], napięcia kotew [15] czy cięgien sprężających [16]. Czujniki DiTeST i DTSS nie mają wyraźnej określonej bazy pomiarowej, a jeden światłowód zastępuje do 30 tysięcy pojedynczych czujników – stąd nazwa czujniki lub pomiary rozłożone. Przeznaczone są one do pomiaru odkształceń dużych konstrukcji, np. fragmentów zapór [18], wielokilometrowych odcinków rurociągów [19], zbiorników gazu i paliw [20], dróg, torowisk [17] i mostów [21].

Opracowano pięć sposobów mocowania czujników do konstrukcji:

- zgrzewanie punktowe (stalowe kratownice, zbiorniki i kolumny),
- przykręcanie (zewnętrzne ściany, skały),

- klejenie (rurociągi, zbiorniki gazu),
- zalewanie w betonie (w trakcie wylewania konstrukcji),
- wklejanie w otworach (ściany tuneli, skarpy, tamy).

Fizyczne zasady pomiaru czujnikami światłowodowymi różnią się znacznie między sobą. Czujniki FBG mają w rdzeniu światłowodu krótki fragment (5–12 mm) o okresowo zmiennym współczynniku załamania światła. Jest to siatka Bragga. Okres tej siatki jest rzędu długości fali światła. Siatka taka działa jak filtr. Odbija ona falę o długości takiej jak okres siatki. Fale dłuższe i krótsze są przepuszczane. Ilustruje to rysunek 2. Odkształcenie czujnika FBG powoduje odkształcenie siatki Bragga i odbicie innej długości fali światła – odpowiednio do nowego okresu siatki. Tak więc pomiar odkształcenia polega na pomiarze zmiany długości fali odbitej od siatki Bragga. Czujnik taki mierzy sumę odkształceń mechanicznych i cieplnych.

Czujniki EFPI zbudowane są z dwóch odcinków światłowodu umieszczonych w rurce wspólnie względem siebie. Schemat takiego czujnika pokazano na rysunku 3.

Do oświetlenia czujnika wykorzystywane jest źródło światła białego. Końce światłowodów, pokryte

warstwą lustrzaną, tworzą miniaturowy interferometr Fabry-Perot odbijając światło o długości fali zależnej od odległości luster. Odległość luster jest całkowitą wielokrotnością długości fali odbitej. Zmiana odległości luster światłowodów na skutek odkształcenia czujnika zmienia długość fali odbitej. Mierzone odkształcenie jest sumą odkształceń mechanicznych i cieplnych.

Czujniki SOFO mają wewnątrz dwa równoległe światłowody, niemal identycznej długości. Jeden z nich jest napięty, a drugi swobodny. Oba światłowody mają na jednym końcu lustrzane warstwy odbijające, na drugim zaś połączone są do wspólnego światłowodu tworząc w ten sposób dwa ramiona interferometru Michelsona. Fala świetlna wysłana do czujnika rozdziela się na dwie fale biegnące w dwóch światłowodach – napiętym i swobodnym. Po odbiciu od lustrzanych końców światłowodów wracają dwie fale przesunięte względem siebie, zależnie od różnicy długości światłowodów w czujniku. Pomiar odkształcenia polega na odczytaniu przesunięcia obu fal (różnicy długości dróg optycznych) wykorzystując drugi interferometr Michelsona umieszczony w analizatorze sygnału. Schematycznie przedstawia to rysunek 4.

Przesunięcie lustra analizatora pozwala skompensować różnicę długości dróg optycznych powsta-

łą w czujniku. Odkształcenie mechaniczne czujnika powoduje zmianę długości napiętego światłowodu. Odkształcenie cieplne zmienia jednakowo długość obu światłowodów – napiętego i swobodnego – nie zmieniając różnicy dróg optycznych. Tak więc czujniki SOFO są skompensowane termicznie i mierzą tylko odkształcenia mechaniczne.

Czujniki DiTeST i DTSS mają bardziej złożone działanie. Mocny impuls światła laserowego wywołuje w rdzeniu światłowodu falę ultradźwiękową. W miejscu, przez które przechodzi impuls fali ultradźwiękowej powstają zmiany współczynnika załamania światła wywołane naprężeniami towarzyszącymi tej fali. W światłowodzie powstaje więc ruchoma siatka Bragga, pędząca przez rdzeń z prędkością dźwięku zależną od właściwości materiału rdzenia, jego odkształceń i temperatury. Pomiar tej prędkości polega na wykorzystaniu zjawiska Dopplera. Druga fala świetlna, wysłana z analizatora, odbija się od tej ruchomej „siatki” i wraca do analizatora jako fala o innej częstotliwości, przesuniętej względem swojej częstotliwości pierwotnej. Schematycznie zjawisko to ujmuje rysunek 5. Przesunięcie częstotliwości zależy od odkształcenia i temperatury światłowodu.

3.2. Stacje GPS

Stacja GPS (Global Positioning System) składa się z anteny, odbiornika sygnału radiowego z satelity, układu przetwarzania sygnału, modemu telefonicznego (do komunikacji z serwerem gromadzenia danych celem dalszych obliczeń), układu zasilania (najczęściej baterii słonecznej i akumulatora) oraz obudowy zabezpieczającej przed wodą i uszkodzeniem. Całość pokazana jest na rysunku 6.

Stacje GPS są dwojakiego rodzaju:

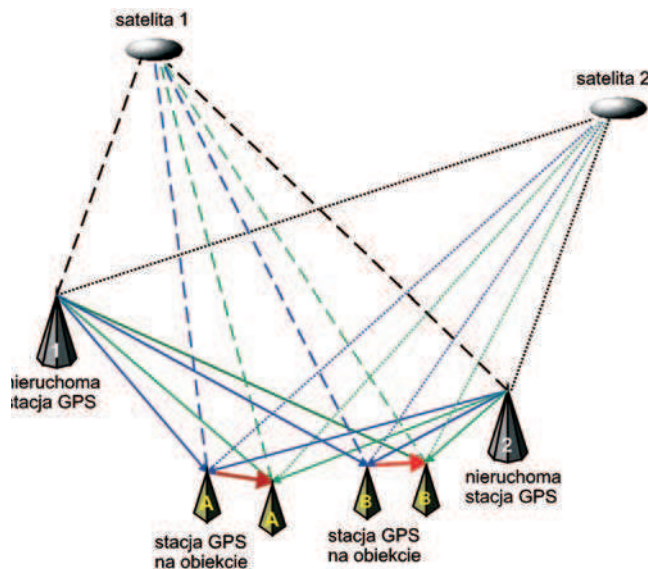
- stacje ruchome (pomiarowe) – ang. rover stations,
- stacje bazowe (odniesienia) – ang. reference stations.

Ich budowa jest taka sama, a podział wynika jedynie z roli jaką pełnią w systemie pomiarowym. Stacje ruchome zamocowane są na monitorowanym obiekcie (np. koronie zapory, pylonie mostu, osuwisku), zaś stacje bazowe znajdują się w nieruchomych punktach, z dala od monitorowanego obiektu (np. wzgórzu, wieży ratusza, latarni morskiej).

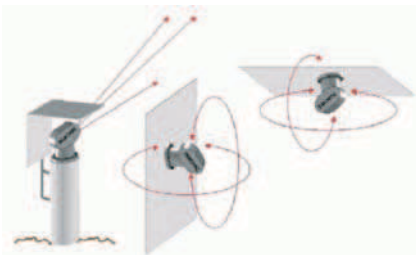
Obliczenie aktualnych współrzędnych monitorowanego obiektu możliwe jest dzięki odbieraniu sygnału radiowego od 3 (deformacje dwuwymiarowe) lub 4 satelitów (deformacje trójwymiarowe). Sygnał taki zawiera sygnał pomiarowy i tzw. „depeszę nawigacyj-



Rys. 6. Stacja GPS firmy GEODEV (zdjęcie autora)



Rys. 7. Zasada pomiaru przemieszczeń w systemie GPS



Rys. 8. Laserowy robot pomiarowy Robovec firmy Geodev (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

ną” informująca o pozycji satelity. Sygnał pomiarowy służy do wyznaczenia wektora położenia stacji GPS względem satelity. Wektory położenia wyznaczone są dla stacji bazowych i stacji pomiarowych. Pomiar polega na odejmowaniu aktualnych wektorów położenia obu rodzajów stacji i wyznaczeniu współrzędnych końca wektora odległości od stacji bazowej do stacji ruchomej. Współrzędne te obliczane są podczas każdej sesji pomiarowej. Przemieszczenie punktu, w którym zamocowana jest stacja ruchoma obliczane jest jako różnica współrzędnych dwóch wektorów odległości – aktualnego i początkowego (z pierwszej sesji pomiarowej). Ilustruje to rysunek 7.

3.3. Laserowy robot pomiarowy Robovec

Drugim urządzeniem stosowanym do monitorowania trójwymiarowych deformacji konstrukcji jest robot laserowy Robovec. Jest on połączeniem dalmierza laserowego oraz sterowanego mikroprocesorowo robota umożliwiającego pełny obrót głowicy laserowej wokół dwóch osi. Tak więc głowica dalmierza może być automatycznie

skierowana w dowolnym kierunku przestrzeni w ramach pełnego kąta bryłowego i może dokonać pomiaru z wyjątkiem sytuacji, gdy promień lasera trafia na podstawę robota. Wewnętrzny mikrokomputer zapamiętuje położenia wybranych punktów pomiarowych (w których może znajdować się znacznik, np. lustro lub reflektor odblaskowy) i steruje skanowaniem przestrzeni wokół ostatnio zapamiętanego położenia punktu pomiarowego. Odpowiedni algorytm obliczeniowy wyznacza położenie kątowe maksimum odbicia światła od znacznika. Położenia punktów określane są we współrzędnych sferycznych – dwa kąty i długość promienia. Widok robota pomiarowego Robovec pokazany jest na rysunku 8.

4. Przykłady monitorowania konstrukcji

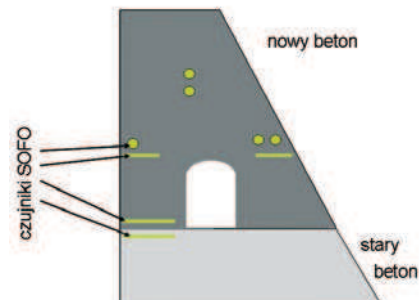
4.1. Podwyższanie betonowej zapory w Luzzone

Zapora w Luzzone położona jest w Alpach Szwajcarskich w kantonie Ticino (rys. 9). Jej pierwotna wysokość wynosiła 220 metrów. W roku 1997 przystąpiono do podwyższenia korony zapory o 17 m celem zwiększenia objętości retencyjnej zbiornika.

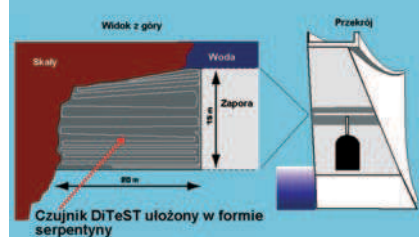
Monitorowanie konstrukcji w trakcie rozbudowy oraz po spiętrzeniu wody miało na celu ocenę współpracy starego i nowego betonu oraz długofalowe pomiary po oddaniu



Rys. 9. Zapora w Luzzone (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

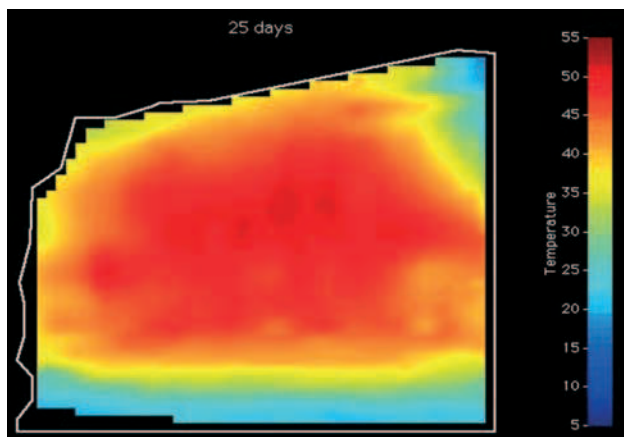


Rys. 10. Schemat rozmieszczenia czujników SOFO w zaprze (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)



Rys. 11. Układanie i rozmieszczenie światłowodu rozłożonego czujnika DiTeST (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

do eksploatacji [18]. Zainstalowano 9 czujników SOFO, schematycznie pokazanych na rysunku 10, w sąsiedztwie nowobudowanej galerii w podniesionej części zapory dla oceny koncentracji odkształceń wokół galerii i zgodności deformacji z modelem MES oraz oceny zgodności odkształceń na granicy warstw starego i nowego betonu. Drugim użytym rodzajem czujnika był czujnik DiTeST (Brillouina, pomiary rozłożone) wykorzystany do monitorowania rozkładu temperatury podczas wiązania betonu w rejonie połączenia nowej korony zapory z górotworem. Monitorowanie temperatury prowadzono nieprzerwanie przez okres 180 dni, aż do wyrównania temperatury w całym bloku betonowym. Światłowód układano w formie serpentyny bezpośrednio przed zala-



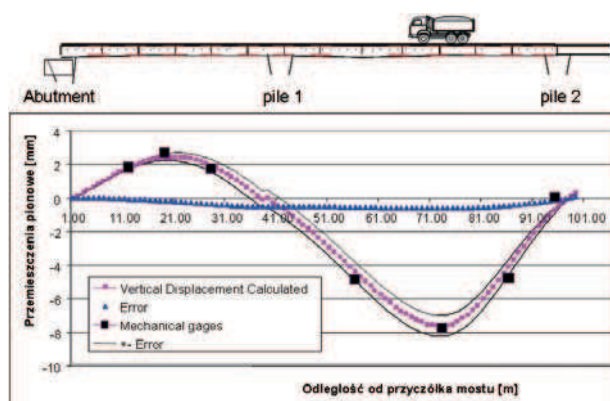
Rys. 12. Rozkład temperatury w bloku zapory w 25. dniu wiązania betonu (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

niem betonem, co ilustruje rysunek 11. Z kolei rysunek 12 pokazuje przykładowo rozkład temperatury otrzymany po 25 dniach od wylania betonu.

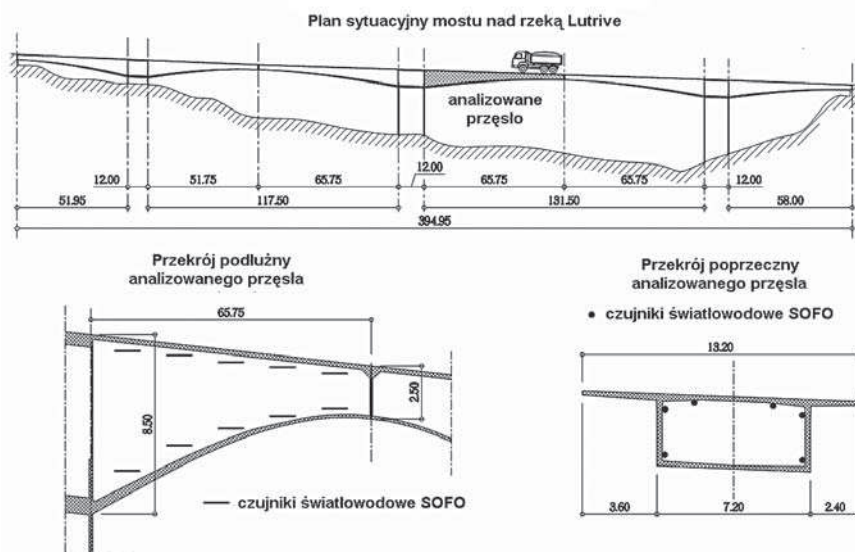
4.2. Ugięcia mostu w Versoix

Most w Versoix, na autostradzie

w pobliżu Genewy, został rozbudowany i poszerzony z jednej strony po 35 latach pracy przy natężeniu ruchu około 60 tysięcy pojazdów na dobę. Wymagało to wzmocnienia jego konstrukcji nośnej i dobudowania nowej konstrukcji złączonej z dawnym mostem,



Rys. 13. Ugięcie mostu Versoix na podstawie pomiarów czujnikami SOFO i czujnikami zegarowymi w wybranych punktach (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

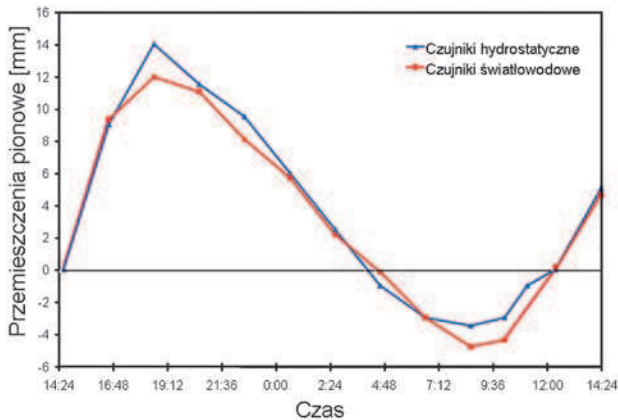


Rys. 14. Schemat usytuowania czujników SOFO na dźwigarze mostu (źródło: IMAC-EFPL, Lausanne; dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

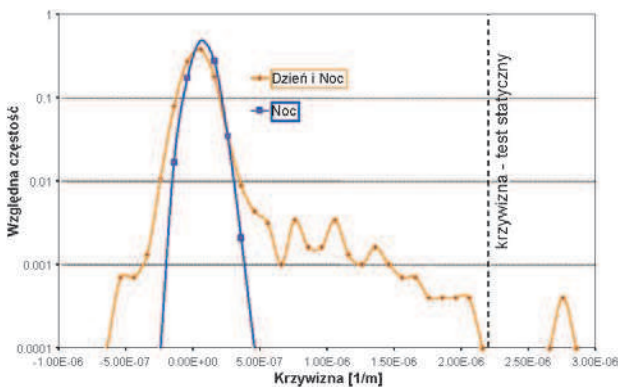
tak aby pracowały jako jeden monolit. Problemem inżynierskim było zapewnienie jednorodności odkształceń starej i nowej części mostu w trakcie wiązania i skurczu nowego betonu oraz w trakcie eksploatacji poszerzonego mostu [5]. Dla kontroli realizacji przyjętych założeń zainstalowano ponad 100 czujników SOFO umieszczonych w 13 różnych przekrojach mostu. Część czujników była przykręcona do istniejącej konstrukcji, a część zalana w betonie nowopowstającej części mostu. Analiza pomiarów odkształceń w świeżo wylanym betonie pozwoliła przewidzieć wystąpienie w przyszłości pęknięć na długo zanim stały się one widoczne. W konsekwencji opracowano inny, odpowiedni rodzaj mieszanki betonowej do wylewania nowej części mostu. Następne pomiary wykazały, że różnice odkształceń starego i nowego betonu w trakcie wiązania nie przekraczają $\epsilon = 10^{-5}$. Na podstawie pomiarów czujnikami SOFO określono również wartości poziomego wygięcia mostu na skutek skurczu i sił wiązania nowego betonu oraz ugięcia pionowe rozbudowanego mostu podczas prób statycznych. Rysunek 13 ukazuje ugięcia mostu obliczone metodą podwójnego całkowania na podstawie zmierzonych odkształceń. Dla porównania pokazano również ugięcia zmierzone w kilku punktach czujnikami zegarowymi. Zatopione w moście czujniki światłowodowe umożliwiają między innymi monitorowanie jego deformacji sezonowych wynikających ze zmian temperatury. Pozwala to na wczesne wykrycie ewentualnych zmian sztywności mostu będących sygnałem uszkodzeń lub degradacji.

4.3. Ugięcia i spektrum obciążeń mostu nad rzeką Lutrive

Most autostrady No. 9 nad rzeką Lutrive (Szwajcaria) o długości 395 m składa się z dwóch bliźniaczych czteroprzęsłowych konstrukcji. Dźwigary przęseł mają kształt skrzynek z dwoma boczo-



Rys. 15. Porównanie ugięć mostu nad Lutrive pod wpływem temperatury, zarejestrowane czujnikami światłowodowymi i hydrostatycznymi (źródło: IMAC-EFPL, Lausanne; dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)



Rys. 16. Dobowy histogram obciążeń mostu w Lutrive (źródło: IMAC-EFPL, Lausanne; dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

nymi nadwieszzeniami. We wnętrzu dźwigarów przykręcono czujniki SOFO o długości 10 m dla pomiaru odkształceń w różnej odległości od osi obojętnej zginania [13]. Schemat rozmieszczenia czujników pokazuje rysunek 14.

Celem inżynierskim jest ocena stanu technicznego mostu poprzez porównanie aktualnych ugięć z ugięciami przewidywanymi na podstawie modelu obliczeniowego. Łącznie zainstalowano 26 czujników i monitorowano zmiany krzywizny pionowej mostu obliczając na tej podstawie jego ugięcia pionowe. Równolegle prowadzono pomiary ugięć na podstawie zmian poziomu cieczy w sieci hydrostatycznej. Wyniki obu pomiarów ilustruje rysunek 15, wskazując na wyższą dokładność wyników uzyskanych czujnikami światłowodowymi.

Pomiar chwilowej krzywizny mostu posłużył do oceny jego rzeczywistych obciążeń. Rozkład dobowy tych obciążeń pokazano na rysunku 16. Zaznaczono na nim ugięcie projektowe, kontrolowane w pró-

bie statycznego obciążenia mostu. Widać, że wystąpiły nieliczne przypadki przekroczenia tego obciążenia.

4.4. Pęknięcia sklepień kościoła w Gandrii

Zabytkowy kościół w Gandrii z roku 1650 stoi na zboczu góry stromo opadającym do jeziora Lugano. W latach 90. ubiegłego stulecia pojawiły się kilkumilimetrowe pęknięcia wzdłuż jego sklepienia, praw-

dopodobnie w wyniku przeprowadzonych w poprzedzającym okresie prac konserwatorskich dachu. Kolebkowe sklepienie zaczęło pracować jak trójprzegubowy mechanizm. Pojawił się problem analizy rozwoju spękań i na tej podstawie oceny bezpieczeństwa konstrukcji. Zamontowano 10 czujników SOFO wewnątrz i na zewnątrz sklepienia dla monitorowania dobowych i sezonowych zmian rozwarcia szczelin [23]. Czujniki zamocowane od wewnątrz sklepienia nawy kościoła ukazuje rysunek 17.

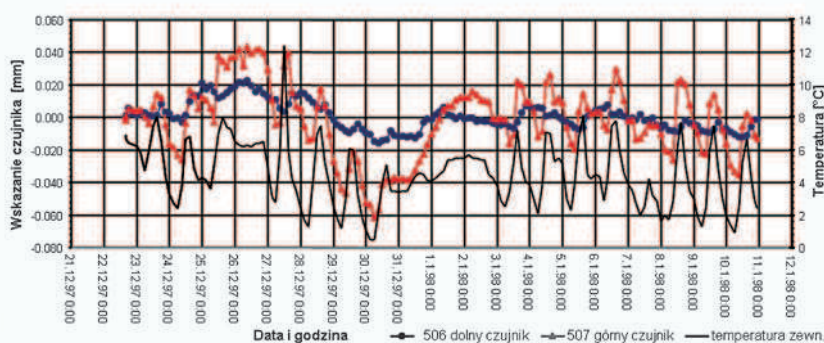
Automatyczne monitorowanie prowadzono nieprzerwanie w kilkutygodniowych okresach co trzy miesiące w roku. Pomędzy tymi pomiarami automatycznymi przeprowadzono dodatkowe ręczne pomiary kontrolne. Analiza trendów zmian temperatury i zmian rozwarcia szczelin od wewnątrz i na zewnątrz sklepienia pokazana na rysunku 18 wskazuje na sprężystą pracę konstrukcji, bez kumulacji odkształceń trwałych.

4.5. Analiza nośności i wytrzymałości pali

Tainan Scientific Park na Tajwanie ma być posadowiony na gruntach o niskich właściwościach mechanicznych. Oceniono, że dla zapewnienia odpowiedniej stabilności podłoża należy wzmocnić grunt około 3 tysiącami żelbetowych pali o średnicy 120 cm i długości 35 m. Wszystkie pale są tej samej kon-



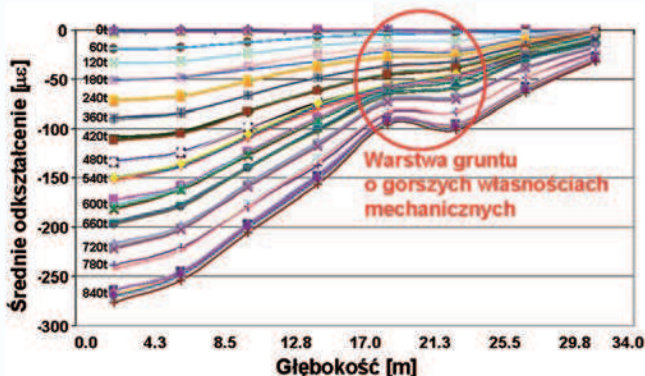
Rys. 17. Czujniki SOFO na sklepieniu nawy kościoła w Gandrii (zdjęcie autora)



Rys. 18. Porównanie zmian temperatury i rozwarcia szczelin sklepienia kościoła w Gandrii (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)



Rys. 19. Sposób mocowania czujników światłowodowych do zbrojenia przyszłych pali żelbetowych (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)



Rys. 20. Deformacje pala podczas próby wciskania w grunt (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

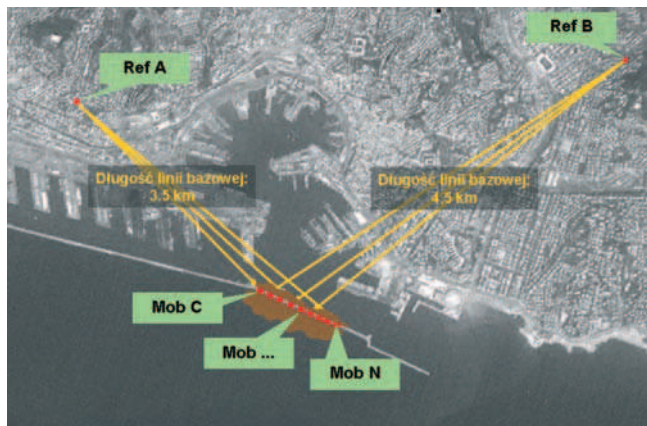
struktury i mają takie same właściwości mechaniczne. Postanowiono zrobić próbne testy mechaniczne sześciu pali w dwóch grupach, po 3 pale, usytuowanych we wschodnim i zachodnim rejonie przyszłego fundamentu. Przeprowadzono testy wciskania pali w grunt, wyciągania pali i zginania. W każdej z grup jeden pal poddany był tylko jednemu rodzajowi obciążenia [22]. Badanie miało za zadanie

określenie rzeczywistej wytrzymałości i nośności pali oraz analizę współpracy pali z gruntem przy każdym z trzech rodzajów obciążenia. W tym celu zainstalowano łącznie 72 czujniki SOFO do klatek z prętów zbrojeniowych, w sposób pokazany na rysunku 19, przed zalaniem zbrojenia betonem. Rysunek 20 przedstawia wykres deformacji pala podczas próby nośności dla obciążeń do 840

ton. Na bazie wskazań czujników światłowodowych można ocenić rozkład sił osiowych w palu i sił tarcia w gruncie, a na tej podstawie zidentyfikować całkowitą nośność i strefę gruntu o gorszych właściwościach mechanicznych.

4.6. Wzmacnianie falochronu portu w Genui

Dla wzmocnienia XIX-wiecznego falochronu portu w Genui postanowiono utworzyć przed falochronem, od strony morza, strefę luźno usypanego materiału skalnego. Łączna masa kamieni wynosi 1 mln ton. Oceniono, że tak poważne obciążenie dna morskiego bezpośrednio przy falochronie musi wpłynąć na warunki jego posadowienia. Prace budowlane dodatkowo komplikował fakt, że duże barki, o głębokim zanurzeniu, mogły zrzucić materiał do morza tylko od strony portu. Z tego miejsca składowania musiał on być następnie wybrany i transportowany małymi barkami na właściwe miejsce przy falochronie od strony morza. Do monitorowania deformacji falochronu podczas składowania materiału skalnego i prowadzenia właściwych prac wzmacniających oraz do stałego monitorowania po zakończeniu tych prac, użyto stacji GPS. Na falochronie umieszczono 10 pomiarowych stacji GPS, a 2 stacje bazowe umieszczono na dachach budynków na stałym lądzie w odległości około 4 km od falochronu [9]. Pokazano to schematycznie na rysunku 21. Każda ze stacji pomiarowych ma autonomiczny układ zasilania złożony z ogniwa słonecznego i akumulatora oraz wyposażona jest w modem GSM do komunikacji z serwerem, gdzie gromadzone są dane i prowadzone obliczenia zmian wektorów odległości od stacji bazowych. Monitorowanie deformacji falochronu wykazało jego pochylenie się w stronę portu podczas składowania kamieni i następnie ruch powrotny i miejscami pochylenie w stronę morza, po odciążeniu



Rys. 21. Plan sytuacyjny rozmieszczenia stacji GPS do monitorowania falochronu portu w Genui (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

gruntu w porcie i usypaniu strefy ochronnej przed falochronem. Dzięki monitorowaniu wszystkich trzech składowych przemieszczeń korony falochronu, uzyskiwane są również na bieżąco informacje o jego ruchach pionowych. Wyniki te ilustruje przykładowo rysunek 22. Zainstalowany system GPS zwiększa bezpieczeństwo eksploatacji portu, gdyż monitorowanie pozwala wykryć ewentualne nietypowe deformacje falochronu na długo wcześniej, zanim wystąpi zagrożenie jego użytkowania.

4.7. Ugięcia dachu sali sportowo-widowiskowej w Halifaxie

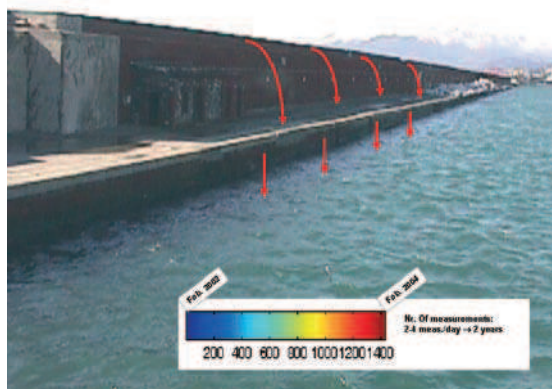
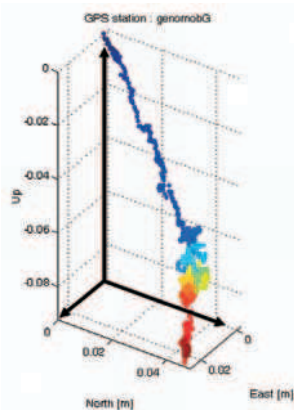
Halifax Metro Centre (Kanada) usytuowane jest w centrum miasta jako budowla związana z World Trade and Convention Centre. Jest to obiekt sportowo-rozrywkowy, mieszczący między innymi kryty stadion hokejowy dla ponad 10 tysięcy widzów (rysunek 23). Jego dach wsparty jest na przestrzennej kratownicy o dużej rozpiętości. Konstrukcja nośna dachu służy jednocześnie do podwieszenia ciężkiego sprzętu podczas koncertów i innych imprez. Dach narażony jest ponadto na silne wiatry i ciężkie opady śniegu. Całość konstrukcji podlega więc różnorodnym obciążeniom ciągłym i punktowym, w tym również termicznym – od zawieszanych w różnych miejscach silnych reflektorów. Utrudnia to bieżącą ocenę bezpieczeństwa jej pracy. Dla wspomaganie oceny tego bezpieczeństwa w roku 2006

na elementach kratownicy dachowej zainstalowano 36 czujników światłowodowych FBG monitorujących temperaturę i odkształcenia konstrukcji. Drugim elementem systemu bezpieczeństwa jest laserowy robot pomiarowy ROBOVEC zainstalowany dla monitorowania ugięć węzłów kratownicy [8]. Schemat tego systemu ilustruje rysunek 24

5. Podsumowanie

Współczesne metody monitorowania konstrukcji umożliwiają ocenę zmian ich odkształceń i przemieszczeń nie tylko w przypadkach istniejącego zagrożenia, ale przede wszystkim już na etapie budowy, rozbudowy lub wzmocnienia obiektu. Służą one jako narzędzia kontroli jakości powstających obiektów i jako narzędzia do identyfikacji pojawiających się zagrożeń konstrukcyjnych. Przytoczone przykłady

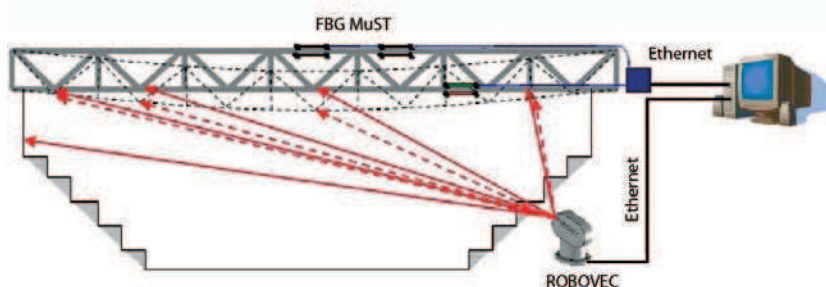
pokazują, że możliwe jest monitorowanie współpracy starego i nowego betonu, rozkładu temperatury, skurczu i czasu wiązania, ugięć przęseł mostów i kratownic dachów na skutek ich degradacji i obciążeń eksploatacyjnych, rozwarcia szczelin i pochylenia elementów konstrukcji. Inne, nieomawiane w artykule zastosowania, obejmują kontrolę sprężenia dźwigarów mostowych, odkształceń torów w czasie hamowania pociągów, szczelności rurociągów i zbiorników wodoru, drgań torowisk szybkiej kolei, odkształceń kadłuba tankowca i wiele innych pomiarów. Sprawdzone w laboratoriach i zweryfikowane w zastosowaniach praktycznych różnego rodzaju czujniki światłowodowe są dostępne na rynku i szeroko stosowane jako narzędzia wspomagające pracę rzeczoznawców i inspektorów budowlanych oraz administratorów obiektów, dostarczając bieżące wyniki pomiarów poprzez internet lub modemy komórkowe wprost do komputerów, w celu ich dalszej analizy. Tysiące już zastosowanych czujników światłowodowych i informacje o planowanych setkach tysięcy ich zastosowań wskazują, że tego rodzaju systemy automatycznego monitorowania staną się w przyszłości standardem, wbudowane jako element składowy konstrukcji i monitorujące jej zachowanie od chwili jej powstawania poprzez cały okres eksploatacji.



Rys. 22. Deformacje XIX-wiecznego falochronu w Genui na podstawie monitoringu GPS (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)



Rys. 23. Widok hali Metro Halifax Centre (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)



Rys. 24. Schemat systemu monitorowania odkształceń i ugięć kratownicy dachowej (dzięki uprzejmości SMARTEC SA, Manno, Szwajcaria)

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Glišić B., Inaudi D., 2002. Long-Gauge Fibre-Optic Sensors for Structural health monitoring, First Int. Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, ISIS Canada, str. 285–295, September 19–20, 2002, Winnipeg, Canada
- [2] Graver Th., Inaudi D., Doornink J., 2005. Growing Market Acceptance for Fiber-Optic Solutions in Civil Structures. SPIE, Optics East Conference, Boston, USA, October 23–26, 2005. Volume 5589, pp. 44–55, (2004)
- [3] <http://www.isiscanada.com/education/education.html> (z dnia 2008.10.07)
- [4] Inaudi D., 2005. Long-term reliability testing of packaged strain sensors, SPIE Smart Structures Conference, San Diego, CA, March 7–10, (2005)
- [5] Glisic B., Inaudi D., 2003. Structural Monitoring of Concrete Bridges during Whole Lifespan, 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), January 12–16, 2003, Washington DC, USA. On CD, paper number 03–3012. VERSOIX
- [6] Inaudi D., Vurpillot S., Casanova N., Osa-Wyser A., 1996. Development and field test of deformation sensors for concrete embedding. SPIE, Smart Structures and materials, San Diego, USA, (1996), Vol 2721, p. 139–148
- [7] Glišić B., Inaudi D., 2007. Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, England, ISBN 978–0470–06142–8
- [8] Manetti L., Inaudi D., Glisic B., 2008. 3-Demon Monitoring Platform: Examples of Applications in Structural and Geotechnical Monitoring Projects, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, LNEC, Lisbon, May 12–15, 2008
- [9] Del Grosso, A., Lanata, F., Pieracci, A., 2007 Data Analysis and Interpretation from GPS Monitoring of Breakwater, The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII-3, November 13–16, 2007, Vancouver, British Columbia, Canada, On Proceedings CD
- [10] Manetti L., Steinmann G., 2007. 3DeMoN ROBOVEC – Integration of a new measuring instrument in an existing generic remote monitoring platform. 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 24–27 September 2007, Boston, MA, USA
- [11] Whelan M. P., Albrecht D., Capsoni A. 2002. Remote structural monitoring of the cathedral of Como using an optical fibre Bragg sensor system. SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, USA, March (2002), Paper nr 4694–32
- [12] PAVICA Transmission line vibration recorder & analyser, Data Sheet E5018B-050901.pdf. <http://www.roctest.com/index.php?module=CMS&id=70>, (z dnia 2008.10.07)
- [13] Inaudi D., Conte J. P., Perregaux N., Vurpillot S. 1998. Statistical analysis of under-sampled dynamic displacement measurement. SPIE, Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, USA, Vol 3325, p. 105–110
- [14] Branko Glisic, Daniele Inaudi, Lau Joo Ming, Yap Tiem Yew, Ng Chun Tat, 2007. Large Scale Lifespan Monitoring of High-Rise Buildings Using Long-Gage Fiber Optic Sensors OPTIC SENSORS The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII-3, November 13–16, 2007, On conference CD
- [15] Inaudi D., Casanova N., 2000. Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors, SPIE, 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, March 5–9, 2000. Newport Beach, USA, Vol 3995, p. 164–174.
- [16] Idriss R. L., Liang Z., 2006. Monitoring an Interstate Highway Bridge with a Built-in Fiber-optic Sensor System. 3RD International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABSE06, Porto, Portugal, 16–19 July, 2006
- [17] http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy_id-23/casestudies_action-view_casestudy/ (z dnia 2008.08.29)
- [18] Casanova N., Inaudi D., 1999. Deformationsmessungen mit glasfasersensoren TFB Veranstaltung 4371/72, Wildegg, Switzerland, (1999), Ref 5, p. 1–22
- [19] Inaudi D., Glisic B., 2006. Long-Range Pipeline Monitoring By Distributed Fiber Optic Sensing, 6th International Pipeline Conference September 25–29, 2006, Calgary, Alberta, Canada
- [20] Senze A., Grosswig S., Stolze R., Nagler N., Hennig O., Inaudi D., 2005. Prüfung der Stützbelastung an Kugelbehältern durch faseroptische Vervormungsmessungen, Technische Überwachung, November/Dezember 2005.
- [21] Enckell-EI Jemli M., Karoumi R., Lanaro F., 2003. Monitoring of the new Arsta railway bridge using fiber optic and traditional sensor technology, SPIE Symposium on Smart Structures and Materials, 2–6 March 2003, San Diego, USA, Vol. 5057, 279–288
- [22] Glisic B., Inaudi D., Nan C., 2002. Piles monitoring during the axial compression, pullout and flexure test using fiber optic sensors. 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), on CD, 02–2701
- [23] Inaudi D., Casanova N., Glisic B., 2001. Long-term deformation monitoring of historical constructions with fiber optic sensors, 3rd International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Guimaraes, Portugal, November, Univrsity of Minho Publisher, pp. 421–430, 2001