



RAFAŁ SIENKO

Politechnika Krakowska
rafal.sienko@pk.edu.pl
ORCID: 0000-0002-2751-7558



ŁUKASZ BEDNARSKI

Akademia Górniczo-
-Hutnicza w Krakowie
lukasz@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5404-9921



TOMASZ HOWIACKI

SHM System
th@shmsystem.pl



KATARZYNA ZUZIAK

Nerve-Sensors
katarzyna.zuziak@
nerve-sensors.com



CHRISTOPH MONSBERGER

ACI Monitoring GmbH,
Graz, Austria
christoph.monsberger@
aci-monitoring.at

Monitorowanie tunelu i jego otoczenia z wykorzystaniem strunowej i światłowodowej techniki pomiarowej DFOS

Infrastruktura tunelowa

Tunel to budowla podziemna lub podwodna, z wyjściami na powierzchnię, służąca do przeprowadzenia ciągu komunikacyjnego pod daną przeszkodą. Za jeden z najstarszych tuneli kolejowych na świecie uważany jest Fritchley Tunnel zlokalizowany w środkowej Anglii. Został zaprojektowany przez Benjaminą Outram i wzniesiony metodą odkrywkową w roku 1793 z bloków piaskowca. W tym czasie wykorzystywano jeszcze trakcję konną, przede wszystkim do zaspokajania potrzeb sektora przemysłowego. Przez ponad dwieście kolejnych lat, a zwłaszcza w ostatnich dziesięcioleciach, nastąpił ogromny postęp techniczny, który nie tylko zmienił sposób dostarczania energii do przemieszczania wagonów kolejowych, ale także zrewolucjonizował podejście do projektowa-

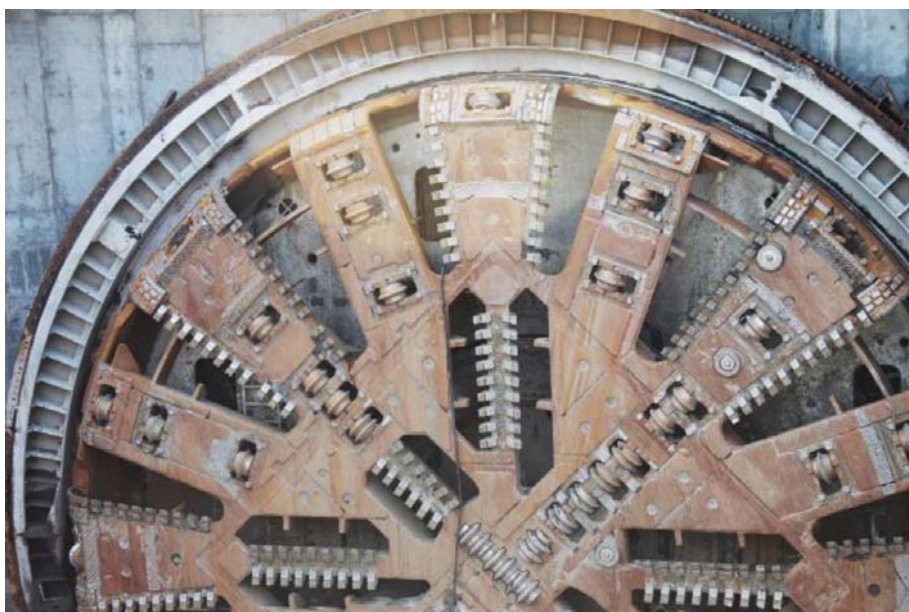
nia i realizacji tuneli. Współcześnie, do analizy konstrukcji powszechnie stosowane są zaawansowane programy numeryczne wykorzystujące metodę elementów skończonych MES, umożliwiające wielopłaszczyznowe modelowanie górotworu wraz z wykonywanym w nim tunelem.

Do realizacji tuneli stosowane są skomplikowane urządzenia, np. maszyny drążące TBM (*ang. tunnel boring machines* – rys. 1), pozwalające na budowę niespotykanych dotychczas obiektów. Biorąc pod uwagę stopień skomplikowania tego typu projektów, niepewności parametrów analizy związane przede wszystkim z właściwościami gruntu, ograniczenia obliczeń teoretycznych, a także ekstremalnie wysokie konsekwencje potencjalnej awarii (ekonomiczne, społeczne i środowiskowe), zasadne jest kontrolowanie i weryfikowanie sposobu pracy tunelu oraz jego otoczenia (górotworu). Współcześnie wykorzystuje się w tym celu zaawansowane technologie pomiarowe, umożliwiające pozyskiwanie wiedzy na temat wybranych parametrów fizyko-mechanicznych, na podstawie których możliwa jest ocena bezpieczeństwa budowy i późniejszej eksploatacji konstrukcji.

Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji

Przez system monitorowania stanu technicznego konstrukcji (*ang. SHM Structural Health Monitoring*) należy rozu-

Rys. 1.
Największa
maszyna
drążąca TBM
wykorzystana
w Polsce do
budowy tunelu
pod Martwą
Wisłą w Gdań-
sku, o śred-
nicy równej
niespełna
13 metrów [1]



mieć zestaw urządzeń i rozwiązań technicznych w postaci czujników, okablowania, rejestratorów, serwerów oraz oprogramowania, służący do pozyskiwania informacji o pracy danej konstrukcji w rzeczywistych warunkach budowy lub eksploatacji. W wybranych miejscach konstrukcji instalowane są czujniki rejestrujące zmiany wielkości fizycznych, istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa, takich jak np. odkształcenia, przemieszczenia czy zarysowania. Najczęściej proces taki odbywa się w sposób automatyczny, tj. w czasie rzeczywistym prezentowane są wyniki pomiarów, na podstawie których istnieje możliwość podejmowania konkretnych decyzji. Dzięki pomiarom możliwa jest weryfikacja założeń przyjętych na etapie modelowania i projektowania konstrukcji oraz podjęcie działań zaradczych w przypadku pojawienia się ewentualnych nieprawidłowości. Doświadczenie pokazuje, że koszty zapobiegania awariom są zawsze znacznie mniejsze od usuwania ich skutków. Systemy monitorowania konstrukcji powinny być zatem projektowane w taki sposób, aby dostarczały odpowiedzi na konkretnie postawione pytania, nie narażając jednocześnie użytkownika na nieuzasadnione koszty. Do inżyniera powinny trafiać wyłącznie istotne, poddane automatycznej obróbce dane i wyniki obliczeń, przedstawione w użytecznej formie.

Wymagania i wytyczne

Norma **Eurokod 0** [2] zaleca, aby w celu zrealizowania konstrukcji odpowiadającej wymaganiom i założeniom przyjętym w projekcie, **prowadzić kontrole w stadium projektowania, wykonywania i utrzymania**. Zalecenie to jest szczególnie istotne w przypadku konstrukcji inżynierskich projektowanych na okres użytkowania 100 lub więcej lat. Do takich obiektów zaliczają się tunele, dla których powinno się przyjmować klasę konsekwencji zniszczenia CC3 (bardzo duże konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe w przypadku awarii lub zniszczenia obiektu). Kwalifikacja konstrukcji do tej klasy skutkuje bezpośrednio **podniesieniem wymogów dot. niezawodności**, a w konsekwencji zaostrzeniem kontroli w trakcie projektowania, wykonawstwa i eksploatacji. Współcześnie jednym ze sposobów umożliwiających właściwe zarządzanie jakością prowadzonych prac budowlanych oraz związanym z tym ryzykiem (ang. *risk management*) **jest zainstalowanie na wybranych elementach konstrukcji urządzeń do stałej kontroli ich pracy**.

W odniesieniu do projektów geotechnicznych, realizowanych na podstawie norm [3 i 4], Rozporządzenie [5] wymusza **w ramach projektu geotechnicznego konieczność określenia zakresu niezbędnego monitorowania wybudowanego obiektu budowlanego, obiektów sąsiadujących i otaczającego gruntu, niezbędnego do rozpoznania zagrożeń mogących wystąpić w trakcie robót budowlanych lub w ich wyniku oraz w czasie użytkowania obiektu budowlanego**. Oznacza to, że projekt systemu monitorowania powinien być poprzedzony szczegółową analizą czynników mających istotny wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji, zarówno na etapie budowy, jak i eksploatacji.

Warto zatem zwrócić uwagę na taki wybór lokalizacji oraz takie skonstruowanie punktów pomiarowych, które pozwoli na kontynuację monitoringu także po zakończeniu prac budowlanych. Projekt systemu monitorowania, zwłaszcza w odniesieniu do obiektów tunelowych, powinien być wynikiem indywidualnego studium przypadku oraz interdyscyplinarnej współpracy specjalistów z zakresu geotechniki, konstrukcji budowlanych i inżynierskich, mechaniki i dynamiki budowli oraz elektroniki i informatyki.

Takie podejście do projektowania i wykonywania systemów monitorowania konstrukcji zostało przedstawione w opracowanej przez Instytut Techniki Budowlanej Instrukcji nr 443/2009 [6]. Opracowanie to podaje najważniejsze funkcje, które musi spełniać system pomiarowy, aby można było go nazwać systemem monitorowania. Wg zapisów Instrukcji *monitoring konstrukcji ma na celu wykrywanie i ostrzeganie użytkownika o możliwych zagrożeniach. Stąd też podstawowym krokiem przy planowaniu monitoringu konstrukcji jest ustalenie i przyjęcie rodzaju zagrożeń oraz sposobów informowania o ich wystąpieniu. Dopiero po ustaleniu warunku monitorowania dostosowywana jest struktura systemu monitorowania do tego zagrożenia*.

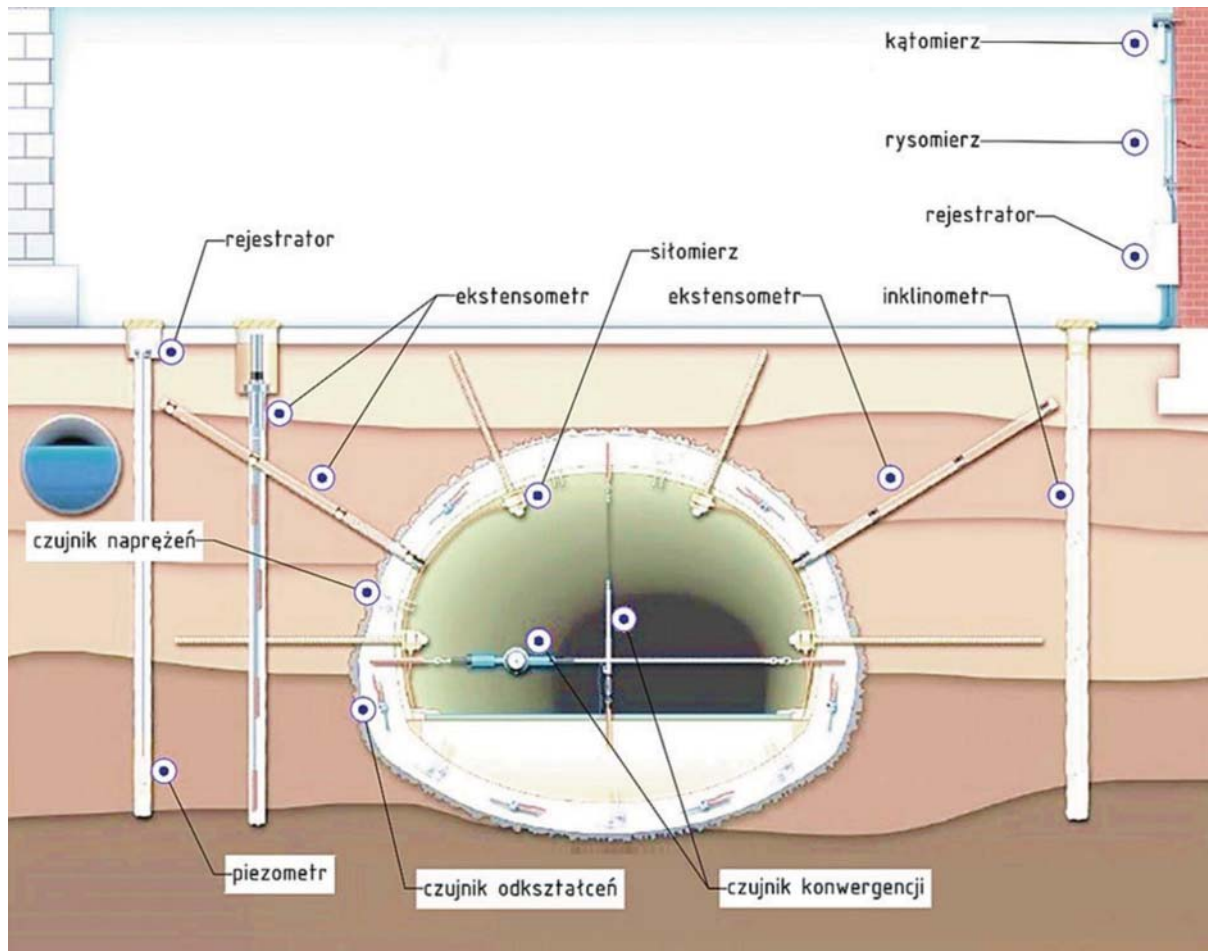
System monitorowania stanu technicznego konstrukcji musi zatem składać się **zawsze z dwóch podsystemów: obserwacyjnego, umożliwiającego pozyskiwanie informacji stosownych do rodzaju potencjalnego zagrożenia**, oraz ostrzegawczego, który umożliwia analizę pozyskiwanych danych pomiarowych, porównywanie ich z zadanymi stanami alarmowymi i przekazywanie tych informacji użytkownikowi systemu. Realizacja podsystemu obserwacyjnego powinna zostać zapewniona poprzez dobór i instalację odpowiednich czujników pomiarowych, urządzeń rejestrujących i przesyłających dane oraz okablowania. Natomiast podsystem **ostrzegawczy stanowić musi dedykowane do tego celu oprogramowanie, umożliwiające zarządzanie danymi** (gromadzenie, przetwarzanie, prezentowanie itp.) **oraz ostrzeganie o zagrożeniach** (alarmowanie).

Mierzone wielkości fizyczne

Celem prowadzenia monitoringu w trakcie budowy konstrukcji tunelu może być kontrola pracy obiektu i górotworu w stosunku do przyjętych założeń oraz wyników obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, weryfikacja parametrów fizyko-mechanicznych gruntu, określanie wpływu prac budowlanych na istniejące obiekty budowlane, czy też wprowadzanie korekt w przyjętych wstępnie rozwiązaniach projektowych. Zasadne jest zaprojektowanie systemu monitorowania w taki sposób, aby jak największa liczba urządzeń pomiarowych mogła służyć obserwacji pracy tunelu i górotworu, także w czasie późniejszej eksploatacji konstrukcji. Należy zatem wykorzystywać czujniki charakteryzujące się bardzo wysoką trwałością (rzędu kilkudziesięciu lat), długoterminową stabilnością pomiarową oraz odpornością na działanie ekstremalnych warunków środowiskowych.

Do najczęściej mierzonych wielkości fizycznych związanych z monitorowaniem tuneli zaliczyć można:

Rys. 2. Ogólna koncepcja systemu monitorowania konstrukcji tunelu [1]



- względne przemieszczenia elementów konstrukcji (np. segmentów obudowy),
- odkształcenia elementów konstrukcji,
- zmiany szerokości dylatacji i ewentualnych zarysowań,
- zmiany kąta przechyłu dowolnego elementu konstrukcji,
- osiadania konstrukcji tunelu,
- przemieszczenia pionowe i poziome warstw górotworu wokół obudowy tunelu,
- drgania przekazywane na znajdujące się w pobliżu prac obiektu budowlane,
- parcie gruntu na elementy obudowy tunelu,
- naprężenia (ciśnienia) wewnątrz elementów żelbetowych,
- siły w kotwach i gwoździach gruntowych,
- ciśnienie wody w porach gruntowych,
- poziom wody gruntowej,
- i wiele innych.

Lokalizację wybranych standardowych urządzeń pomiarowych w obrębie konstrukcji przykładowego tunelu zaprezentowano na rysunku 2.

Wpływ budowy tunelu na otoczenie

Należy zwrócić uwagę na potencjalnie negatywny wpływ prowadzonych prac budowlanych (np. drążenie w górotworze) na znajdujące się w pobliżu obiektu budowlane i sam

górotwór. Określanie tego wpływu w czasie rzeczywistym np. na podstawie pomiarów przyspieszeń drgań, kątów obrotu, przemieszczeń czy też zmian rozwarcia istniejących w konstrukcji zarysowań, powinno być podstawą do podjęcia stosownych działań w przypadku przekroczenia zdefiniowanych wartości granicznych danych wielkości fizycznych. Zmiana technologii wykonania, czy też zrealizowanie dodatkowych zabezpieczeń, w dalekowzrocznej perspektywie może skutkować nie tylko wymiernymi korzyściami ekonomicznymi, ale także, co ważniejsze, niedopuszczeniem do wystąpienia awarii lub katastrofy budowlanej. Wskazania systemu monitorowania mogą również służyć jako obiektywne dane w przypadku ewentualnych sporów stron procesu inwestycyjnego.

Lokalizacja punktów pomiarowych w obrębie konstrukcji tunelu, w otaczającym go górotworze oraz w sąsiednich obiektach budowlanych, powinna zostać przyjęta w taki sposób, aby na podstawie dostarczanych przez czujniki danych, można było wnioskować o stanie bezpieczeństwa całej inwestycji. Pomiarom podlegać zatem będą wielkości fizyczne wykorzystywane w określaniu szeroko rozumianych stanów granicznych [2]. W dalszej części artykułu omówiono w tym zakresie możliwości dwóch technik pomiarowych, znajdujących zastosowanie w monitorowaniu tuneli: punktowych czujników strunowych (ang. *vibrating wire gauges*) oraz geometrycznie ciągłych czujników światłowodowych DFOS (ang. *distributed fiber optic sensors*).

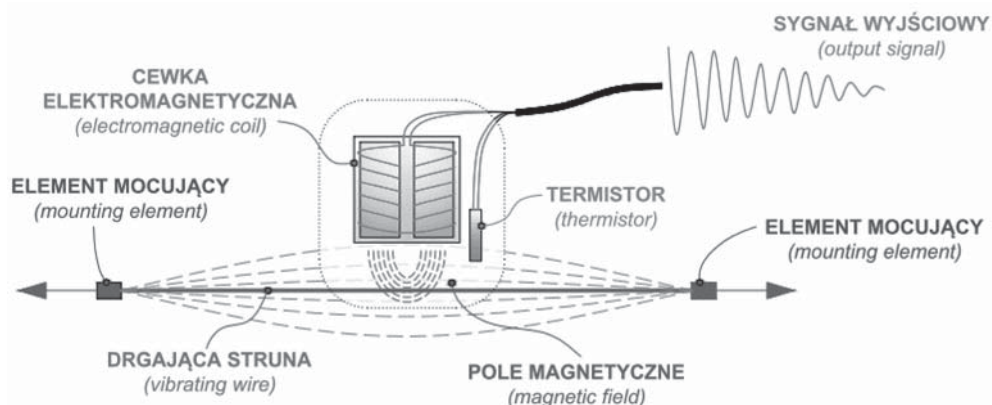
Strunowa technika pomiarowa

Informacje podstawowe

Historia czujników strunowych sięga roku 1888, kiedy to pierwsze eksperymenty prowadził profesor Pietro Cardani z uniwersytetu w Palermo. Za pomocą drgającej struny osiągnął dokładność pomiaru wydłużenia równą 0,003 mm. Komercyjne zastosowania technologii strunowej miały miejsce na początku lat 30 XX wieku, kiedy to rozwój urządzeń elektronicznych umożliwił przesyłanie sygnału pomiarowego za pomocą kabli. W 1931 r. francuski inżynier André Coyne otrzymał patent na czujnik strunowy, nazywany wtedy przetwornikiem akustycznym [7].

Czujniki strunowe ze względu na swoją prostą i niezawodną konstrukcję mechaniczną oraz możliwość przesyłania sygnału pomiarowego na znaczne odległości są obecnie jednymi z podstawowych urządzeń pomiarowych stosowanych do budowy długoterminowych systemów monitorowania konstrukcji [8]. Zasada działania opiera się na pomiarze zmian częstotliwości drgań własnych struny pod wpływem zmian jej długości (a zatem pod wpływem odkształceń opomiarowanego elementu konstrukcji). Wzbudzenie struny do drgań, jak również odczytanie sygnału, wykonywane jest przy pomocy zintegrowanej cewki elektromagnetycznej – rysunek 3. Należy podkreślić, że czujnikami strunowymi możemy mierzyć takie odkształcenia ε , które powodują powstanie w konstrukcji naprężeń. W przypadku elementów stalowych odkształcenie to jest wprost zależne od zmian częstotliwości drgań (stalowej) struny, natomiast w przypadku elementów żelbetonowych lub wykonanych z innych materiałów, należy uwzględnić korektę termiczną ze względu na różne współczynniki rozszerzalności termicznej czujnika i konstrukcji. W związku z powyższym, wszystkie czujniki strunowe wyposażone są dodatkowo w czujnik temperatury. Pozwala on uwzględniać wpływ zmian termicznych zarówno na sam czujnik, jak i analizować globalną pracę konstrukcji poddanej oddziaływaniu temperatury.

Do najważniejszych zalet czujników strunowych należy zaliczyć stabilność realizowanych pomiarów w czasie. Właściwość ta pozwala na długoterminową (kilkudziesię-



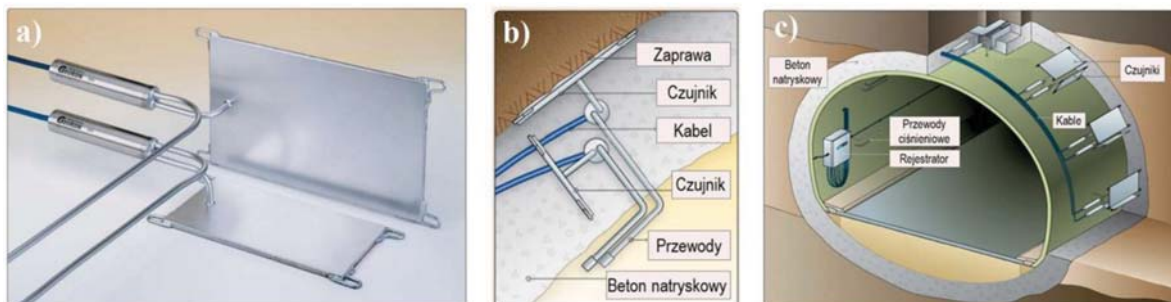
Rys. 3. Budowa strunowego czujnika odkształceń

cioletnią) pracę systemów monitorowania, bez konieczności kalibrowania czujników w trakcie eksploatacji. Badania przeprowadzone w Norweskim Instytucie Geotechniki wykazały, że odpowiedź przetwornika strunowego nie zmieniła się więcej niż o 0,1% zakresu pomiarowego w okresie blisko trzydziestu lat badań [9]. Taki wpływ czasu na pracę czujnika z inżynierskiego punktu widzenia może zostać pominięty. Dodatkową zaletę stanowi fakt, że sygnał wyjściowy ma charakter częstotliwościowy, co czyni go odpornym na zakłócenia. Dane pomiarowe mogą być zatem przesyłane przewodami na bardzo duże odległości, sięgające kilku kilometrów. Należy podkreślić, że w stosunku do innych typów czujników (np. elektrooporowych), przetworniki strunowe charakteryzują się wysoką odpornością na oddziaływania zewnętrzne, w tym na wnikanie wilgoci.

Czujniki strunowe osiągają dokładność pomiaru rzędu dziesiątych lub setnych części procenta swojego zakresu pomiarowego (w zależności od modelu czujnika i zastosowanej kalibracji). Możliwość skonstruowania różnych typów czujników na podstawie zasady drgającej struny, czyni je uniwersalnymi narzędziami do stosowania w pomiarach konstrukcji inżynierskich, geotechnicznych, hydrotechnicznych i innych, a także do analizy zagadnień naukowych.

Pomiary obudowy tunelu

W praktyce powszechnie stosowane są czujniki odkształceń, instalowane zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz betonowych elementów obudowy tunelu. Na podstawie ich wskazań istnieje możliwość oszacowania stopnia wyężenia danego przekroju, przy założeniu odpowiedniego prawa fi-



Rys. 4. a) Widok czujników „naprężen” w betonie; b) przykładowy przekrój przez obudowę tunelu; c) wizualizacja punktów pomiarowych w obrębie konstrukcji tunelu [12]

Rys. 5. Strunowe czujniki
a) kąta;
b) przemieszczeń;
c) konwergencji [12]



zycznego. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że ze względu na niejednorodność betonu, różne składy ilościowe i jakościowe mieszanki betonowej w poszczególnych częściach konstrukcji, zmienne nasycenie stałą betonu oraz wpływ procesów reologicznych, nie jest możliwe jednoznaczne zdefiniowanie wartości modułu sprężystości betonu (żelbetu), a tym samym wnioskowanie o wartości naprężeń w konstrukcji żelbetowej na podstawie pomierzonych odkształceń [10]. Istnieją jednak przetworniki, dzięki którym możliwe jest wyznaczenie naprężeń w konstrukcji obudowy tunelu bez konieczności znajomości modułu sprężystości jego materiału. Przykładem mogą być czujniki ciśnienia wykonane w postaci dwóch stalowych blach połączonych ze sobą na obwodzie (rys. 4). Odpowiednia instalacja urządzeń pozwala na obserwację zmian naprężeń (ciśnień) równoleżnikowych i obwodowych w żelbetowej obudowie tunelu. Warto podkreślić, że jednoczesna instalacja czujników ciśnienia oraz czujników odkształceń wewnątrz betonu pozwala na wyznaczenie zmian modułu sprężystości w czasie, co może być podstawą kalibracji modelu numerycznego oraz wartością odniesienia w przypadku analiz związanych z pełzaniem i skurczem [11].

Odkształcenia mogą być także mierzone na prętach zbrojeniowych. Taki pomiar pozwala na wyznaczenie wartości naprężeń w stali (moduł sprężystości dla stali, z inżynierskiego punktu widzenia, możemy uznać za wielkość znaną i stałą w czasie) oraz, w połączeniu z pomiarem odkształceń betonu, na ocenę poprawności założenia o pełnej przyczepności stali i betonu.

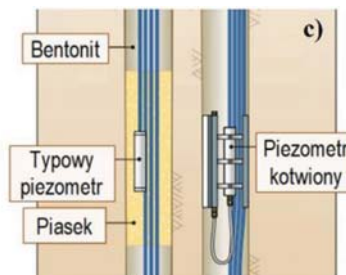
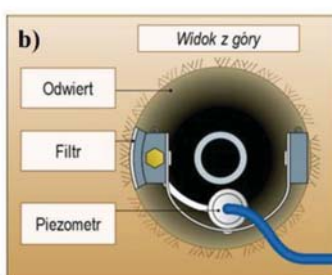
Bardzo istotne w procesie budowy konstrukcji tunelu są pomiary wielkości związanych ze zmianą jej geometrii. Stosowane są do tego celu czujniki kąta (przechyłomierze), czujniki przemieszczeń, które mogą służyć do obserwacji zmian szerokości dylatacji pomiędzy poszczególnymi segmentami obiektu lub zmian szerokości rozwarcia ewentualnych zarysowań, a także czujniki konwergencji (zbieżności). Te ostatnie realizują pomiary zmian odległości pomiędzy dwoma, dowolnie wybranymi punktami na ścianie tunelu. Przykłady powyższych urządzeń przedstawiono na rysunku 5.

System monitorowania można wyposażyć w zestaw czujników, które dzięki połączeniu przewodami hydraulicznymi, będą realizowały pomiary osiadań (różnic przemieszczeń pionowych) ścian tunelu. Tunel, jako konstrukcja liniowa, jest szczególnie narażony na nierównomierne osiadanie w związku ze zmianami parametrów mechanicznych gruntu w obrębie poszczególnych odcinków.

Pomiary górotworu

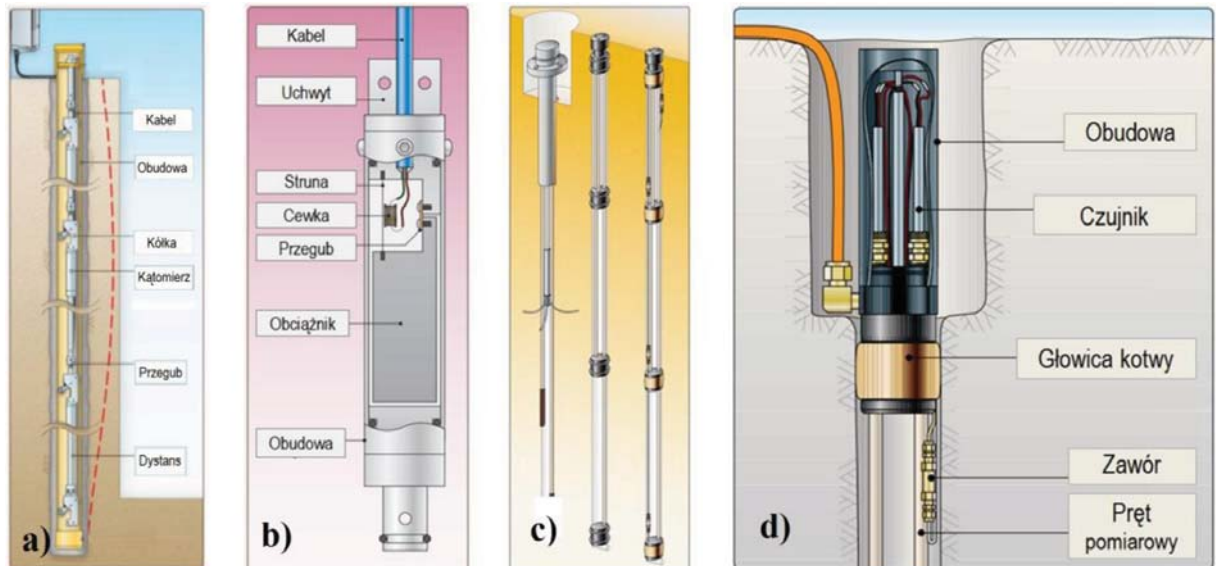
Ponieważ obudowa konstrukcji tunelu bezpośrednio współpracuje z otaczającym ją górotworem, duże znaczenie ma obserwacja zmian w czasie parametrów fizycznych (np. temperatura, wilgotność) i mechanicznych tego ośrodka. Często instalowane będą zatem czujniki ciśnienia do pomiaru zmian poziomu wody gruntowej oraz/lub ciśnienia porowego gruntu. Widok przykładowych przetworników wraz ze schematem instalacji w odwiercie przedstawiono na rysunku 6. Lokalizacja piezometrów względem obudowy oraz ich liczba uzależniona będzie zawsze od warunków gruntowo-wodnych.

Bardzo istotne w ocenie współpracy obudowy tunelu z otaczającym ją górotworem będzie także prowadzenie pomiarów deformacji gruntu, tj. przemieszczeń poziomych oraz pionowych. Te pierwsze realizowane mogą być poprzez zainstalowanie rur inklinometrycznych (rys. 7a) dla sondy, którą stanowi czujnik kąta (rys. 7b). Na podstawie pomiarów wartości przemieszczeń kątowych na poszczególnych głębokościach, wyznaczana jest wartość przemieszczenia poziomego. Inklinometry mogą być wykorzystywane także do wyznaczania profili osiadań pod obudową tunelu. Warto zwrócić uwagę na postęp w dziedzinie technik pomiarowych, który powoduje, że obecnie ekonomicznie uzasadnione jest już prowadzenie pomiarów inklinometrycznych w sposób ciągły w czasie (automatycznie, bez udziału człowieka). Wyznaczanie profili przemieszczeń pionowych i poziomych odbywać się może wówczas co kilkanaście minut, gwarantując rejestrację praktycznie każdej deformacji i umożliwiając jednoznaczne wskazanie jej przyczyn.



Rys. 6. a) Przykładowe czujniki ciśnienia;
b) i c) przekroje przez odwiera przez czujnikiem [12]

Rys. 7. a) Układ inklinometrów do ciągłego pomiaru przemieszczeń poziomych gruntu; b) budowa czujnika kąta; c) i d) układ ekstensometrów do pomiaru przemieszczeń pionowych warstw gruntowych [12]



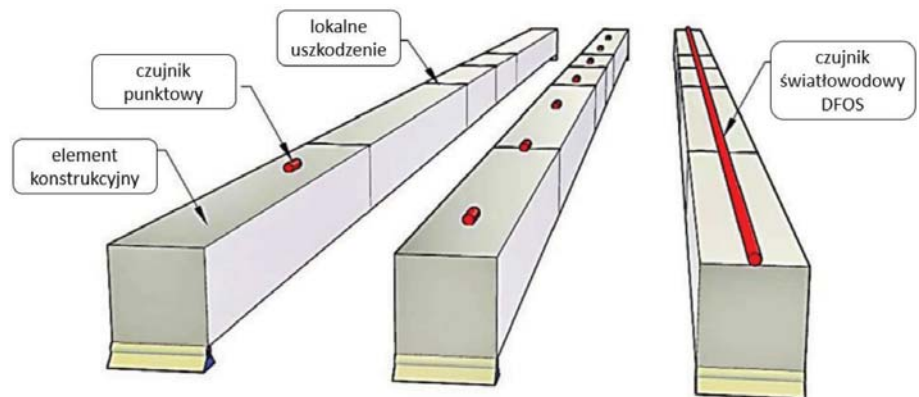
Pomiary przemieszczeń pionowych realizowane mogą być również za pomocą układu ekstensometrów (przetworników przemieszczeń – rys. 7c), które należy zaprojektować w taki sposób, aby umożliwić wyznaczanie zmian grubości wybranych warstw gruntowych. W jednym pionie umieszczanych jest wówczas kilka czujników połączonych mechanicznie z kotwami instalowanymi na wybranych głębokościach (rys. 7d). Różnice w wartościach przemieszczeń zmierzonych kolejnymi czujnikami będą odpowiadały zmianie grubości danej warstwy. Przykładowo, rozwiązanie takie z powodzeniem zostało zastosowane w ramach systemu monitorowania gruntowego korpusu Kopca Kościuszki w Krakowie [13, 14].

Należy również wspomnieć, że istnieją możliwości realizowania pomiarów zmian wartości parcia [kPa] przekazywanego przez górotwór na ściany obudowy tunelu, czy też zmian wartości sił [kN] w kotwach gruntowych czy gwoździach.

Światłowodowa technika pomiarowa

Zasada działania

Odpowiednio zarządzana informacja, dostarczana przez czujniki punktowe, może w znaczącym stopniu przyczynić się do zrozumienia pracy konstrukcji i zachodzących w jej obrębie mechanizmów, a tym samym do podniesienia jej bezpieczeństwa. Jednak bezpośrednie wykrywanie lokalnych zdarzeń (rys. uszkodzeń, ubytków, przecieków, koncentracji naprężeń itd.) na całej długości liniowej konstrukcji (np. tunelu), na podstawie pomiarów realizowanych tylko w kilku wybranych punktach, nie jest możliwe. Stanowi to podstawowe ograniczenie wszystkich konwencjonalnych, punktowych technik pomiarowych. W odróżnieniu od klasycznego podejścia, technika światłowodowa DFOS (ang.



Rys. 8. Schemat pomiaru odkształceń konstrukcyjnego elementu liniowego – od lewej: punktowego, quasi-ciągłego, ciągłego geometrycznie (rozłożonego)

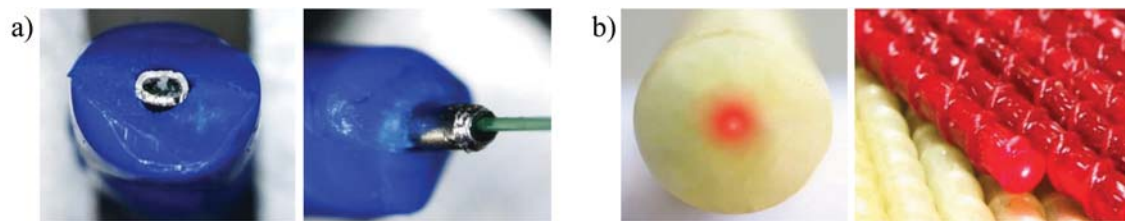
distributed fibre optic sensing) umożliwia realizowanie pomiarów wybranych wielkości fizycznych w sposób geometrycznie ciągły na całej długości liniowego czujnika światłowodowego (liczącego od kilku metrów do nawet dziesiątek kilometrów – rys. 8).

Ponadto, technologia światłowodowa charakteryzuje się szeregiem zalet, umożliwiających jej zastosowanie w ramach długoterminowego monitorowania rzeczywistych konstrukcji inżynierskich i geotechnicznych. Do najważniejszych należą wysoka dokładność i trwałość, odporność na trudne warunki środowiskowe, korozję oraz zakłócenia powodowane polem elektromagnetycznym. Do praktycznych aspektów zaliczyć także należy niewielkie rozmiary przekroju poprzecznego czujników, niewielką masę, łatwość transportu i instalacji czy też minimalizację okablowania (czujnik DFOS sam jest jednocześnie przewodem sygnałowym, obsługującym tysiące punktów pomiarowych).

Czujniki światłowodowe

System monitorowania w oparciu o technologię DFOS składa się z rejestratora optycznego oraz sieci czujników

Rys. 9. Przykładowe przekroje i widoki: a) konwencjonalnych, warstwowych kabli sensorycznych; b) kompozytowych i monolitycznych czujników odkształceń DFOS



zainstalowanych w obrębie konstrukcji. W zależności od zastosowania i specyfiki danego projektu, dobierany jest rejestrator o odpowiednich parametrach. Należy uwzględnić m.in. rozdzielczość przestrzenną, tj. liczbę punktów pomiarowych na jednostkę długości czujnika, dokładność i rozdzielczość pomiaru odkształceń, maksymalny dystans pomiarowy oraz czas potrzebny na wykonanie pomiaru. Współczesne rejestratory DFOS wykorzystują zasadniczo trzy zjawiska optyczne: rozpraszanie Rayleigha [15], Brillouina [16] i Ramana.

Kluczowym komponentem całego systemu pozostają jednak czujniki – raz zainstalowane w obrębie konstrukcji, powinny umożliwiać niezaburzone pozyskiwanie informacji w całym projektowanym okresie eksploatacji. Ich ewentualna wymiana byłaby bardzo trudna i kosztowna, a w wielu przypadkach wręcz niemożliwa, jeśli przykładowo czujniki zostały zatopione w mieszance betonowej na etapie budowy. Dlatego jakość i trwałość czujników są jednym z kluczowych aspektów, które należy uwzględnić przy projektowaniu systemu. W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost liczby zastosowań technologii DFOS, któremu towarzyszy rozwój czujników [17]. Warto w tym miejscu podkreślić znaczący wpływ polskiej myśli technicznej oraz opracowanych w Polsce kompozytowych, monolitycznych czujników odkształceń, przemieszczeń i temperatur, zaprojektowanych specjalnie do pomiarów w inżynierii lądowej i geotechnice. Czujniki te znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu praktycznych zagadnieniach związanych z monitorowaniem infrastruktury drogowej [18], mostowej [19], tunelowej i wielu innych. Do podstawowych zalet czujników DFOS w porównaniu do konwencjonalnych kabli optycznych należy zaliczyć monolityczny przekrój poprzeczny (brak poślizgów międzywarstwowych, zaburzających transfer odkształceń), czterokrotnie większy zakres pomiaru odkształceń kompozytu od stalowych i plastikowych komponentów kabli, a także żebrowaną powierzchnię zewnętrzną, zapewniającą doskonałe parametry przyczepnościowe. Widoki i przekro-

je przykładowego uwarstwionego kabla optycznego i monolitycznego czujnika DFOS przedstawiono na rysunku 9. Powyższe cechy monolitycznych czujników są szczególnie istotne w przypadku analizy zjawisk lokalnych z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Brak poślizgów międzywarstwowych umożliwia bowiem określenie nie tylko lokalizacji rys z dokładnością liczoną w mm, ale również oszacowanie zmian ich szerokości, zarówno w kierunku rozciągania, jak i ściskania z rozdzielczością rzędu 0,001 mm.

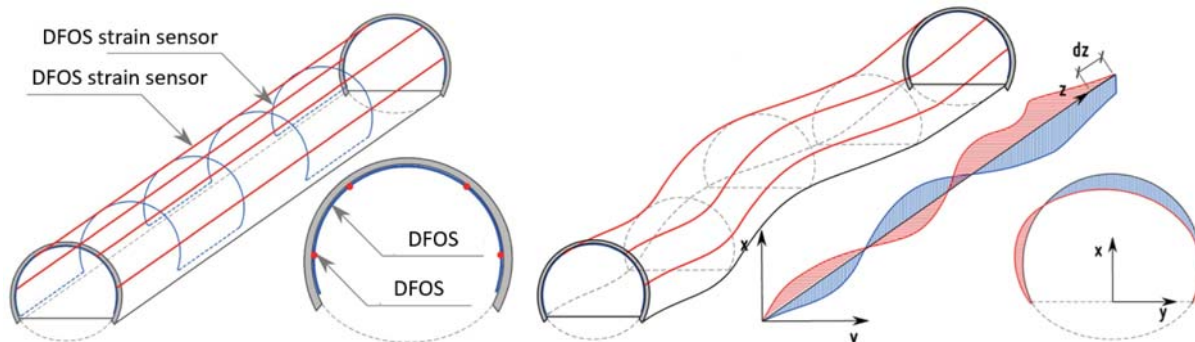
Pomiary deformacji obudowy tunelu

Technologia DFOS daje możliwość swobodnego kształtowania tras pomiarowych, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie kompleksowego obrazu deformacji całej konstrukcji tunelu, zarówno wzdłuż kierunku osi tunelu, jak i w wybranych przekrojach poprzecznych. Należy podkreślić, że instalacja czujników może odbywać się:

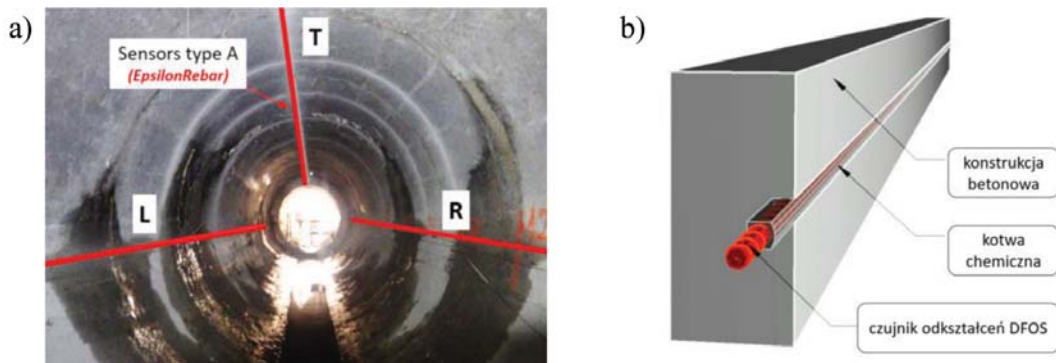
- na etapie budowy, np. poprzez zatopianie czujników wewnątrz monolitycznych fragmentów konstrukcji żelbetonowej,
- po zakończeniu budowy lub w trakcie eksploatacji konstrukcji, np. poprzez instalację czujników w przypowierzchniowych bruzdach.

Koncepcję sieci czujników światłowodowych przedstawia rysunek 10. W podstawowym ujęciu realizują one pomiary odkształceń, na podstawie których istnieje możliwość analizy powstałych zarysowań, pracy styków czy też detekcji obszarów koncentracji naprężeń. Jednak znając geometrię konstrukcji oraz dokładne rozmieszczenie czujników w jej obrębie, istnieje możliwość wyznaczenia przestrzennej krzywizny, a następnie przemieszczeń w przestrzeni 3D. W ten sposób, z samej konstrukcji tunelu, tworzony jest niejako czujnik przemieszczeń.

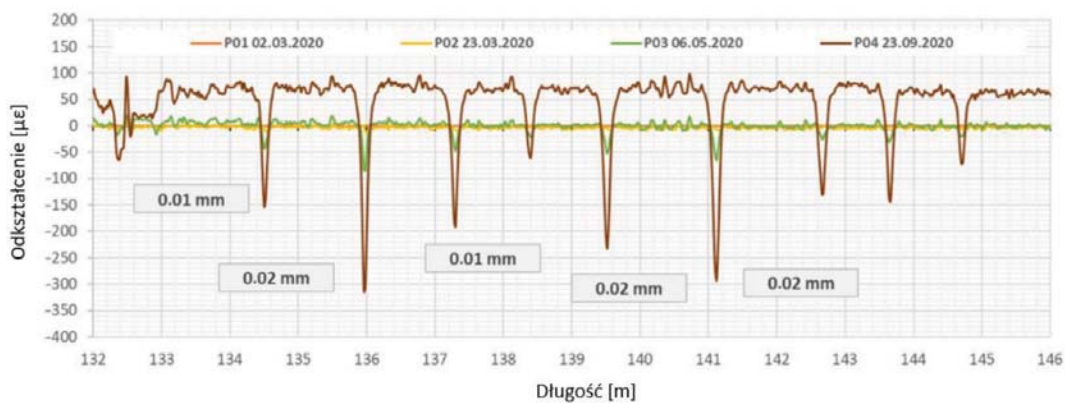
Koncepcję taką z powodzeniem zrealizowano w ramach jednego ze wzmacnianych kolektorów warszawskich [20].



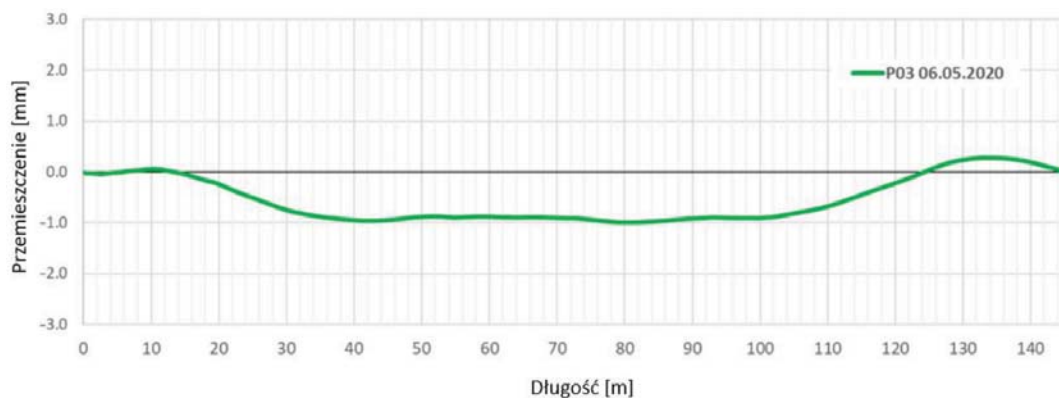
Rys. 10. Koncepcja sieci czujników światłowodowych DFOS do pomiarów deformacji (odkształceń i przemieszczeń) obudowy tunelu na kierunku podłużnym oraz w wybranych przekrojach poprzecznych



Rys. 11. Czujniki światłowodowe w kolektorze: a) konfiguracja w przekroju poprzecznym; b) schemat instalacji w przypowierzchniowej bruzdzie z wykorzystaniem kotwy chemicznej [20]



Rys. 12. Przykładowy wykres odkształceń wraz z analizą pracy istniejących zarysowań [20]



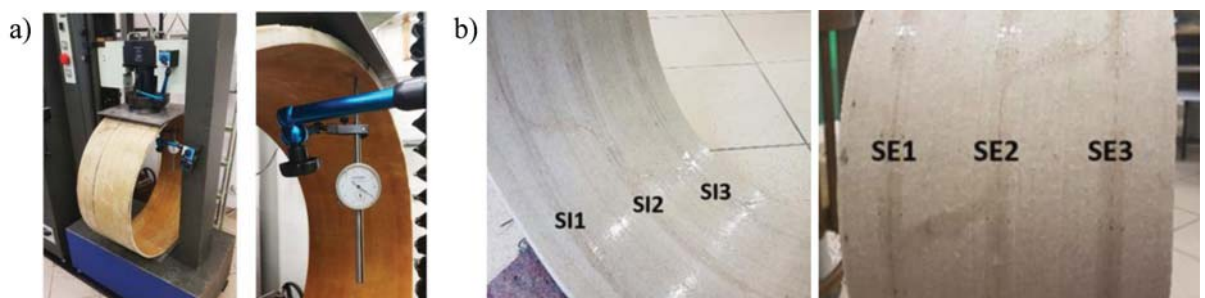
Rys. 13. Przykładowy wykres przemieszczeń pionowych (osiadań) kolektora [20]

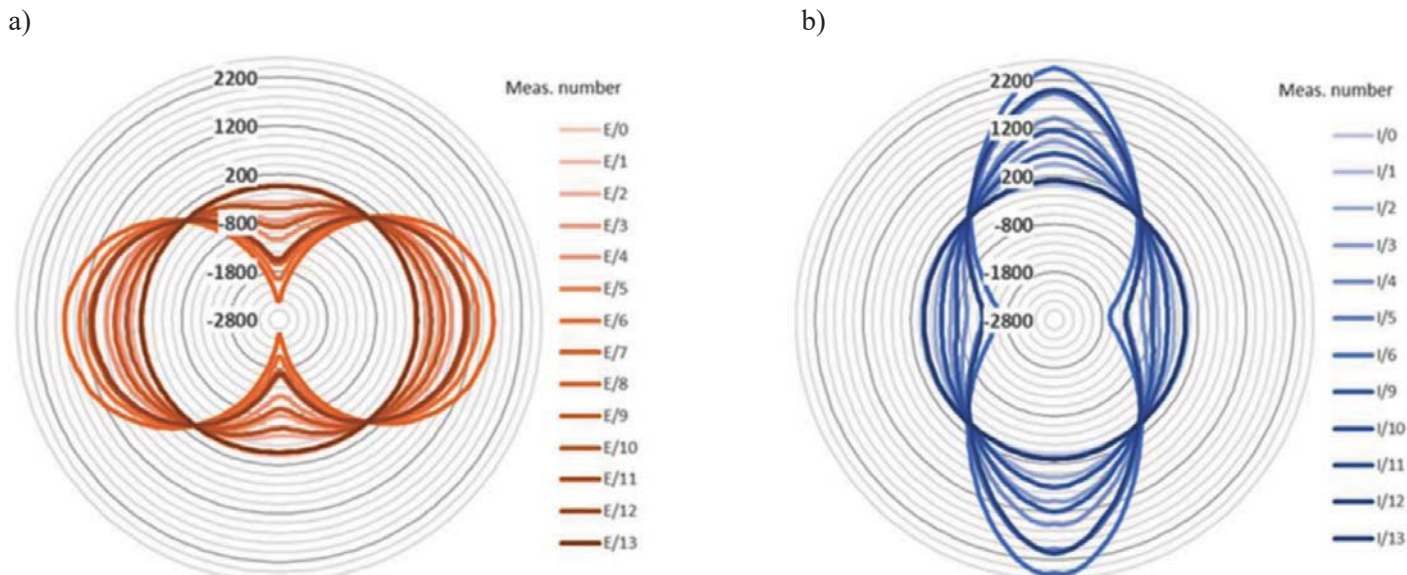
W starej, betonowej części zainstalowano w bruzdach trzy czujniki odkształceń (rys. 11a i 11b) na całej monitorowanej długości równej 150 m.

Pomiary wykonywano w trakcie wzmocnienia polegającego na instalacji wewnątrz kolektora kompozytowych paneli oraz uzupełnieniu powstałej przestrzeni (pomiędzy starą, betonową częścią, a nowymi panelami) iniekcją cementową. System zaprojektowano w taki sposób, aby czujniki DFOS mogły zostać wykorzystane także w trakcie późniejszej eksploatacji konstrukcji. Przykładowe wyniki w postaci profilu odkształceń na długości newralgicznego obszaru przedstawia rysunek 12. Na podstawie uzyskanych danych szczegółowo zinventaryzowano wszystkie istniejące zarysowania oraz oszacowano, w jakim stopniu prace remontowe spowodowały ich zaciśnięcie – na podstawie profilu odkształceń możliwe jest bowiem szacowanie zmian szerokości rys, wyrażonych bezpośrednio w milimetrach.

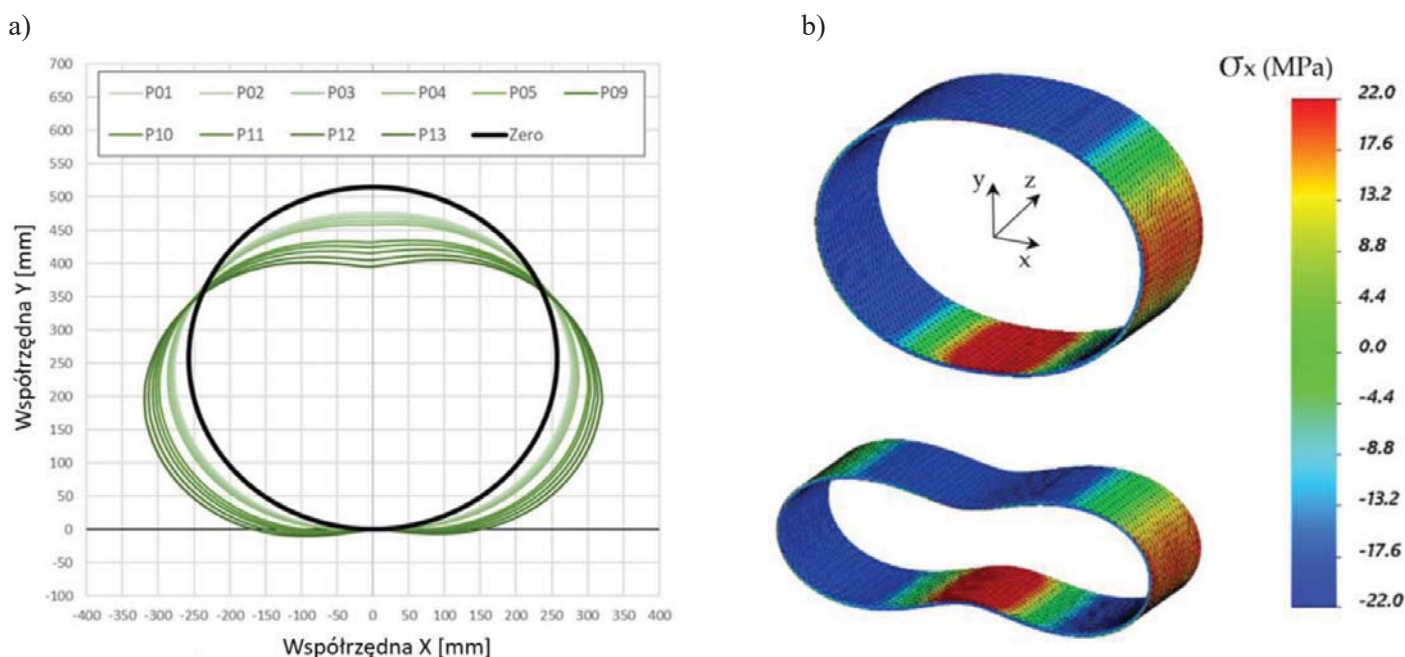
Kolejnym krokiem analizy było wyznaczenie przemieszczeń pionowych spowodowanych ciężarem własnym paneli kompozytowych oraz iniektu. Warto podkreślić, że w ramach stosowanego algo-

Rys. 14. Badania kompozytowych rur: a) widok przykładowej próbki na maszynie wytrzymałościowej; b) światłowodowe czujniki odkształceń na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni rury [22]





Rys. 15. Badania kompozytowych rur: a) rozkład odkształceń na długości obwodu zewnętrznego próbki w kolejnych krokach obciążeniowych; b) rozkład odkształceń na długości obwodu wewnętrznego próbki w kolejnych krokach obciążeniowych [22]



Rys. 16. Badania kompozytowych rur: a) wyznaczone zmiany kształtu przekroju poprzecznego; b) obliczenia numeryczne na potrzeby analiz porównawczych [22]

rytmu nie jest konieczna znajomość charakterystyk materiałowych konstrukcji, które często pozostają nieznane (zwłaszcza w odniesieniu do istniejących konstrukcji). Do obliczeń wykorzystuje się jedynie parametry geometryczne (znajomość położenia czujników w przekroju poprzecznym), zmierzone profile odkształceń na całej długości oraz zdefiniowane warunki brzegowe [21]. Przykładowe wyniki osiadań (przemieszczeń pionowych wyrażonych bezpośrednio w milimetrach) dla analizowanego kolektora przedstawiono na rysunku 13.

Koncepcja budowy czujnika przemieszczeń z całej konstrukcji bądź elementu konstrukcyjnego na podstawie po-

miaru odkształceń jest stosowana w wielu praktycznych przypadkach. Jednak skuteczną alternatywą może być zainstalowanie kompozytowego czujnika przemieszczeń, którego idea jest analogiczna, tj. opiera się na precyzyjnym rozmieszczeniu światłowodowych włókien do pomiaru odkształceń na obwodzie kompozytowego rdzenia. Szczegóły teoretyczne, aspekty praktyczne oraz przykłady rzeczywistych zastosowań tego rozwiązania omówiono w pracy [21].

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 10, technika światłowodowa DFOS umożliwi realizowanie geometrycznie ciągłych pomiarów odkształceń na obwodzie wybranych przekrojów poprzecznych konstrukcji. Możliwo-

ści techniki światłowodowej w tym zakresie badano przy współpracy z Politechniką Warszawską [22]. Kompozytowe fragmenty rur o różnych kształtach przekroju poprzecznego poddano obciążeniu na maszynie wytrzymałościowej (rys. 14a). Próbkę wyposażono w światłowodowe czujniki odkształceń, zainstalowane zarówno na wewnętrznej, jak i zewnętrznej powierzchni rury (rys. 14b).

Przykładowe wyniki pomiarów w postaci rozkładów odkształceń na długości obwodu próbki w kolejnych krokach obciążeniowych przedstawiono na rysunku 15a (powierzchnia zewnętrzna) i rysunku 15b (powierzchnia wewnętrzna).

Znając grubość ścianki badanego elementu oraz jego schemat statyczny, w kolejnym kroku wyznaczono przemieszczenia, tj. zmiany kształtu przekroju poprzecznego spowodowane zwiększającą się siłą (rys. 16a). Wszystkie dane pomiarowe zostały zweryfikowane z wykorzystaniem referencyjnych technik pomiarowych, a także obliczeń w środowisku metody elementów skończonych MES (rys. 16b).

Instalacja czujników wewnątrz obudowy tunelu, tj. w rzeczywistych warunkach placu budowy, zawsze stwarza ryzyko ich uszkodzenia, dlatego należy stosować odpowiednie i sprawdzone techniki instalacyjne w celu zachowania poprawnej pracy całego systemu. W przypadku elementów zbrojonych, jak na rysunku 17a, czujniki mocować można bezpośrednio do prętów z wykorzystaniem opasek zaciskowych. Takie rozwiązanie nie tylko chroni światłowód, ale również zapewnia precyzyjne ułożenie czujnika wzdłuż okładziny, które dodatkowo może zostać zinwentaryzowane z wykorzystaniem tachimetru geodezyjnego lub skaningu laserowego. Instalacja dwóch linii pomiarowych (tj. wzdłuż wewnętrznej i zewnętrznej warstwy zbrojenia) pozwala na pomiary po obu stronach osi obojętnej przekroju ściany obudowy, a następnie oszacowanie krzywizny samej obudowy [23].

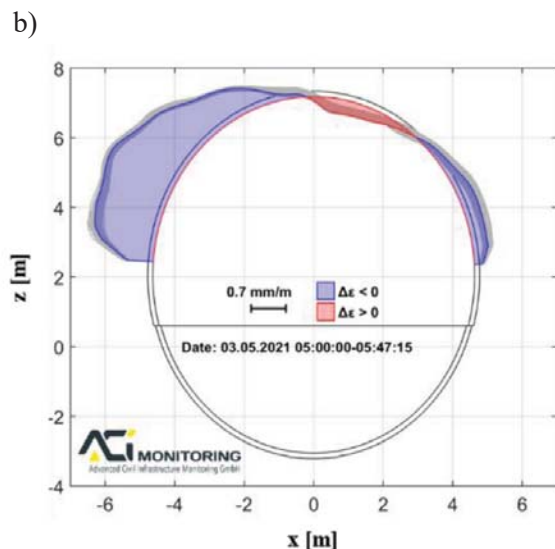
Instalacje wzdłuż niezbrojonych obudów mogą wymagać zastosowania elementów wsporczych w celu stabilizacji czujników w projektowanym położeniu [34]. Istniejące konstrukcje mogą być opomiarowane poprzez przyklejenie

czujnika do wewnętrznej powierzchni obudowy, bądź poprzez wklejenie w przypowierzchniowe bruzdy. Takie podejście jest szczególnie korzystne dla utrzymania starzejącej się infrastruktury, gdzie czujniki nie mogły być zainstalowane podczas budowy [24].

Kable podłączeniowe czujników DFOS są zazwyczaj doprowadzane do skrzynki zlokalizowanej bezpośrednio w obrębie monitorowanego przekroju, z której następnie podłączane są do rejestratora danych (bezpośrednio lub z wykorzystaniem odpowiednich przedłużek). W przypadku tuneli kolejowych i drogowych, czujniki mogą być również zintegrowane z istniejącą siecią prowadzenia pomiarów z wnętrza tunelu, bez utrudniania normalnej eksploatacji tunelu.

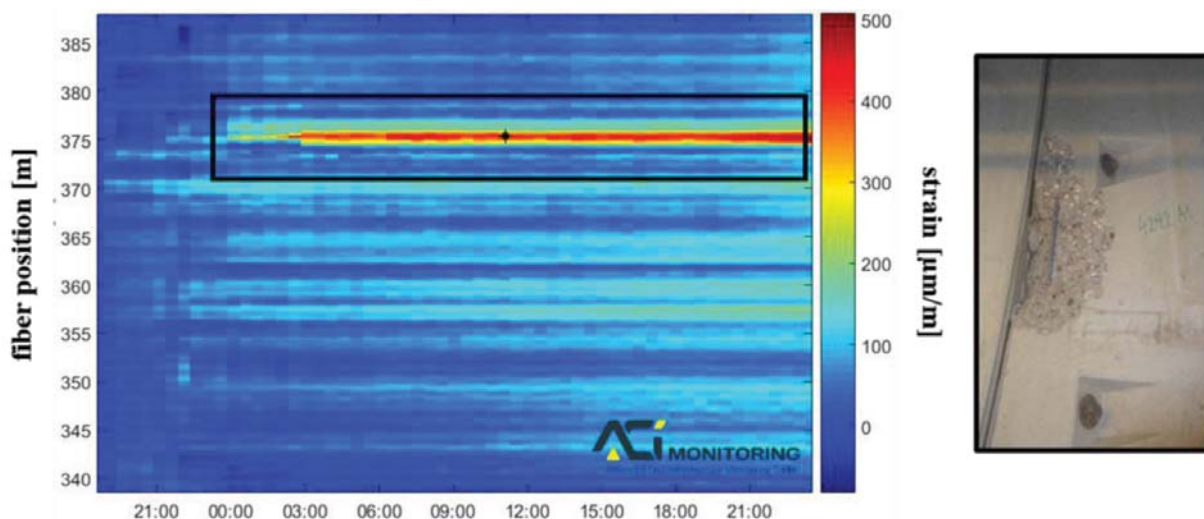
Na rysunku 17b przedstawiono przykładowe wartości odkształceń zarejestrowane wzdłuż wybranego przekroju tunelu wykonanego w technologii betonu natryskowego. Odkształcenia ze znakiem ujemnym (odpowiadające ścisaniu) przedstawiono po stronie zewnętrznej obrysu przekroju, a ze znakiem dodatnim (odpowiadające rozciąganiu) po stronie wewnętrznej. Zmierzony profil obrazuje owalizację okładziny ze strefą rozciąganą w środkowej części i strefami ścisany wzdłuż ścian bocznych. Lewostronna orientacja zowalizowanego kształtu związana była z prowadzonymi wówczas pracami budowlanymi. Wyniki zostały potwierdzone niezależnymi odczytami przemieszczeń reperów geodezyjnych [25].

Pomiary geometrycznie ciągłe umożliwiają wykrywanie i kwalifikację lokalnych zdarzeń, takich jak np. pęknięcia lub odpryski. Na rysunku 18 przedstawiono zmiany odkształceń na kierunku obwodowym segmentu prefabrykowanej obudowy tunelu w funkcji czasu i długości. Początkowo wartości odkształceń były równomierne na długości obwodu, jednak po pewnym czasie zidentyfikowano wyraźne, lokalne zaburzenie. W trakcie późniejszych oględzin konstrukcji zinwentaryzowano uszkodzenie w postaci odprysku fragmentu betonu, odpowiedzialne za lokalny wzrost odkształcenia na wykresie. Efekt ten nie mógłby być zarejestrowany z wykorzystaniem konwencjonalnych technologii punktowych.



Rys. 17. a) Przykładowa instalacja światłowodowego czujnika DFOS w obrębie obudowy tunelu; b) przykładowy profil odkształceń obwodowych

Rys. 18. Zmiana odkształcenia wzdłuż monitorowanego przekroju w funkcji czasu (po lewej) oraz fotografia zidentyfikowanego uszkodzenia obudowy tunelu (po prawej)



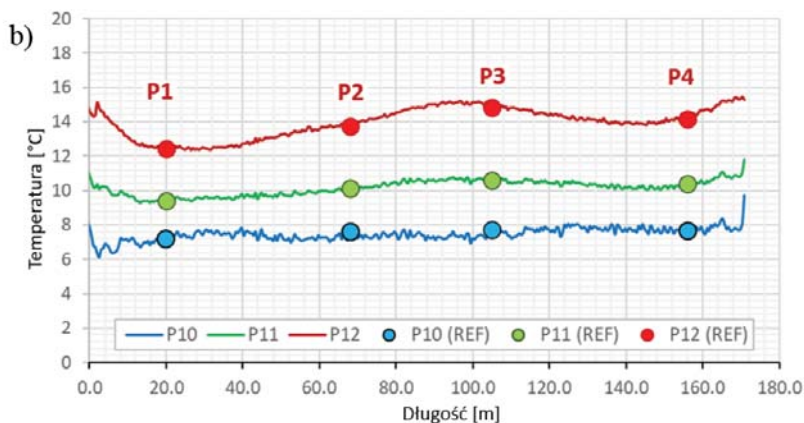
Pozostałe możliwości pomiarowe

Technika geometrycznie ciągłych pomiarów DFOS oferuje bardzo szeroką funkcjonalność w zakresie analizy pracy konstrukcji tunelu oraz otaczającego go górotworu. Możliwość pomiaru różnych wielkości fizycznych (odkształcenia, zarysowania, przemieszczenia pionowe, przemieszczenia poziome, drgania, temperatury, inne), dowolność kształtowania tras pomiarowych oraz oferta rejestratorów o różnych parametrach pomiarowych, pozwala na skonstruowanie indywidualnego systemu dostosowanego do specyfiki danego projektu. Poza uprzednio omówionymi przykładami pomiarów **odkształceń, detekcji zarysowań i uszkodzeń** oraz **obliczania przemieszczeń** na kierunku podłużnym i w wybranych przekrojach, do istotnych możliwości techniki DFOS należy zaliczyć:

- pomiary i **analiza pracy styków** prefabrykowanych obudów tunelowych (zaciskanie, rozszczelnienie),
- szacowanie **naprężeń [MPa]** oraz identyfikacja newralgicznych obszarów, w których dochodzi do ich koncentracji,
- szczegółowa ocena **współpracy konstrukcji oraz otaczającego ją górotworu**, poprzez instalację czujników

światłowodowych w obrębie tych dwóch ośrodków (rys. 19a),

- **wykorzystanie tych samych czujników do jednoczesnych pomiarów odkształceń i temperatur** (rys. 19b) – np. z wykorzystaniem różnych rejestratorów optycznych lub rejestratorów wykorzystujących jednocześnie dwa zjawiska optyczne,
- **identyfikacja przecieków** w obudowie tuneli oraz związanych z nimi zmian temperatury (**termodetekcja**),
- możliwość instalacji czujników na etapie budowy **pod warstwami nawierzchni**, gdzie w trakcie eksploatacji brak jest możliwości wizualnego dostępu na potrzeby oceny stanu technicznego, bądź detekcji przecieków,
- wykorzystanie **systemu czujników do stworzenia kompleksowego „układu nerwowego” konstrukcji**, umożliwiającego analizę odkształceń, zarysowań, przemieszczeń, temperatur i drgań (np. identyfikacja tąpnięć w terenach objętych wpływem eksploatacji górniczej),
- instalacja czujników nie tylko w obrębie nowych tuneli (np. **zatapianie wewnątrz monolitycznych fragmentów konstrukcji**), ale także w ramach istniejących obiektów (**instalacja wewnątrz przypowierzchniowej bruzdy**).



Rys. 19. a) Widok czujników światłowodowych do monitorowania pracy rurociągu oraz otaczającego go gruntu [21]; b) przykładowy rozkład temperatury na całej długości (180 m) w odniesieniu do referencyjnych pomiarów punktowych [26]

Podsumowanie

Jednym z podstawowych celów stosowania systemów monitorowania konstrukcji jest wzrost bezpieczeństwa w trakcie realizacji prac budowlanych oraz eksploatacji istniejącego obiektu. Monitorowanie konstrukcji inżynierskich, a w szczególności obiektów tunelowych, jest zagadnieniem bardzo złożonym, znacznie trudniejszym od monitorowania dobrze zdefiniowanych układów mechanicznych. Fakt ten wynika między innymi z licznych imperfekcji materiałowych i geometrycznych, ograniczonej dokładności wykonania obiektów, trudnych do zdefiniowania oddziaływań środowiskowych, czy też współpracy obudowy tunelu z górotworem, którego parametry nie są możliwe do jednoznacznego zidentyfikowania. Stąd każdy projekt systemu monitorowania powinien być poprzedzony szczegółową analizą prowadzącą do przyjęcia optymalnych, z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy konstrukcji oraz ekonomii, rozwiązań.

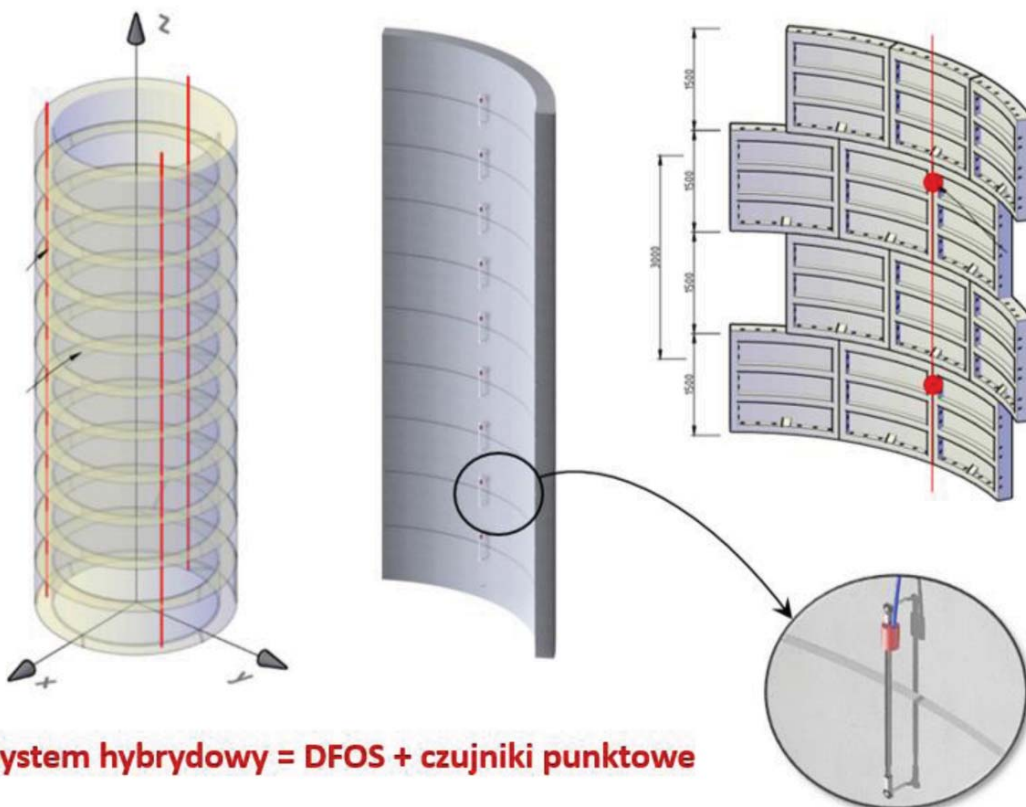
W nowoczesnej inżynierii tunelowej, ocena powstających deformacji i odpowiednia analiza danych jest niezbędna do zapewnienia bezpiecznej budowy i ostatecznie, zoptymalizowanej eksploatacji z możliwością przewidywania remontów we właściwym czasie. Konwencjonalne metody monitorowania są często ograniczone pod względem rozdzielczości przestrzennej lub wymagają fizycznego dostępu do tunelu, co nie tylko utrudnia prace budowlane lub eksploatację, ale także stwarza zagrożenia bezpieczeństwa dla inspektora na miejscu.

W artykule zaprezentowano współczesne możliwości pomiarowe wykorzystywane do monitorowania konstrukcji tunelu oraz otaczającego go górotworu. Skupiono się na dwóch technikach, realizujących odmienne koncepcje pomiarowe: **punktowe pomiary czujnikami strunowymi oraz geometrycznie ciągłe pomiary światłowodowe DFOS**. Coraz częściej obserwuje się w praktyce integrację tych dwóch technologii w celu stworzenia **hybrydowych systemów monitorowania** (rys. 20). **Czujniki punktowe odczytywane są w sposób zdalny i automatyczny, dostarczając podstawowych informacji na temat pracy konstrukcji w czasie rzeczywistym**. Z kolei pomiary światłowodowe wykonywane są okresowo w ramach zaplanowanych sesji bądź w chwili wykrycia nieprawidłowości przez system czujników strunowych. W wyniku **pomiaru DFOS** uzyskiwany jest kompleksowy obraz pracy konstrukcji, uwzględniający m.in. **identyfikację wszystkich lokalnych zjawisk (uszkodzeń, przecieków, zarysowań itd.)**.

Koszty czujników światłowodowych w porównaniu do kosztów całej konstrukcji są pomijalnie małe, dlatego nie ma potrzeby ograniczania ich liczby. Doprowadziło to do powstania koncepcji i realizacji **inteligentnych konstrukcji wyposażonych w systemy czujników DFOS**, które **można porównać do układu nerwowego człowieka** [27, 28]. Informacje dostarczane z dziesiątek tysięcy punktów pomiarowych podlegają inżynierskiej interpretacji, pozwalając na identyfikację dowolnych zagrożeń, teoretycznie w każdym miejscu konstrukcji.

W ostatnich latach systemy monitorowania wykorzystujące technikę DFOS stały się znacznie bardziej powszechne w monitorowaniu tuneli, zapewniając dokładne i geometrycznie ciągłe pomiary na kierunku podłużnym i obwodowym. Znane zastosowania obejmują zarówno konwencjonalne przekroje wykonywane w technice torkretu [29, 30], obudowy szybów [31], monolityczne [32] oraz prefabrykowane segmenty obudowy tuneli [33, 34]. Każdorazowo dobierane są rejestratory pomiarowe, czujniki światłowodowe oraz sposoby ich instalacji w obrębie konstrukcji tunelu w taki sposób, aby zapewnić optymalną jakość wyników pomiarów. W przypadku obiektów o bardzo dużych konsekwencjach potencjalnej awarii, do jakich należą obiekty tunelowe,

W ostatnich latach systemy monitorowania wykorzystujące technikę DFOS stały się znacznie bardziej powszechne w monitorowaniu tuneli, zapewniając dokładne i geometrycznie ciągłe pomiary na kierunku podłużnym i obwodowym. Znane zastosowania obejmują zarówno konwencjonalne przekroje wykonywane w technice torkretu [29, 30], obudowy szybów [31], monolityczne [32] oraz prefabrykowane segmenty obudowy tuneli [33, 34]. Każdorazowo dobierane są rejestratory pomiarowe, czujniki światłowodowe oraz sposoby ich instalacji w obrębie konstrukcji tunelu w taki sposób, aby zapewnić optymalną jakość wyników pomiarów. W przypadku obiektów o bardzo dużych konsekwencjach potencjalnej awarii, do jakich należą obiekty tunelowe,



System hybrydowy = DFOS + czujniki punktowe

Rys. 20. Koncepcja hybrydowego systemu monitorowania na przykładzie obudowy szybu kopalnianego

wykonanie systemu monitorowania powinno wynikać nie tylko z konieczności spełnienia odpowiednich przepisów prawa budowlanego, ale przede wszystkim ze świadomych i odpowiedzialnych decyzji uczestników procesu inwestycyjnego.

Bibliografia

- [1] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T. *Monitorowanie górotworu oraz tunelu podczas jego realizacji*. Budownictwo Górnicze i Tunnelowe 3 (2016), ISSN 1234–5342
- [2] PN-EN 1990: Eurokod 0, Podstawy projektowania konstrukcji.
- [3] PN-EN 1997-1: Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
- [4] PN-EN 1997-2: Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [5] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych.
- [6] Instrukcja ITB 443/2009 *System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych*. Warszawa, Wydawnictwo ITB 2009.
- [7] Bednarski Ł., Sieńko R. *Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi*. Inżynieria i Budownictwo, 11/2013, str. 615–619.
- [8] Bednarski Ł., Sieńko R., Howiacki T. *Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji*. XXX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 25–28.03.2015.
- [9] Dibiago E. *A Case study of Vibrating-Wire Sensors That Have Vibrated Continuously For 27 Years*. Field Measurements in Geomechanics, September 15–18, 2003
- [10] Bednarski Ł., Sieńko R., Howiacki T. *Analysis of rheological phenomena in reinforced concrete cross-section of Rędziński bridge pylon based on in situ measurements*. Procedia Engineering 108 (2015), Science Direct, Elsevier, ISSN: 1877–7058, 09.07.2015, s. 536–543.
- [11] Bednarski Ł., Sieńko R., Howiacki T. *Estimation of the value and the variability of elastic modulus of concrete in existing structure on the basis of continuous in situ measurements*. Cement-Lime-Concrete, 6/2014, ISSN: 1425–8129, 396–404
- [12] www.geokon.com
- [13] Howiacki T., Jedliński S., Mieszczak M. *System monitorowania konstrukcji Kopca Kościuszki w Krakowie*. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane 2015, Szczecin–Międzyzdroje, 20–23.05.2015.
- [14] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T. *Continuous structural health monitoring of selected geotechnical quantities within Kościuszkow Mound in Cracow*. MATEC Web of Conferences, 117, 00157 (2017), ISSN: 2261–236X
- [15] Palmieri, L., Schenato, L. *Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering*. The Open Optics Journal 7, (Suppl-1, M7): 104–127, 2016.
- [16] Feng, Ch., Kadum J. E., Schneider, T. *The State-of-the-Art of Brillouin Distributed Fiber Sensing*. W IntechOpen, Fiber Optic Sensing – Principle, Measurement and Applications edited by Shien-Kuei Liaw, 2019
- [17] Bado, M. F., Casas J. R. *A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring*. Sensors 21, 1818 (2021); <https://doi.org/10.3390/s21051818>
- [18] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T., Zuziak K. *Composite and monolithic DFOS sensors for load tests and long-term structural monitoring of road infrastructure*. 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM2022), Palermo, Italy, July 4–7, 2022
- [19] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T. *Distributed fibre optic sensing for safety monitoring of concrete, steel and composite bridges*. 11th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2022), Barcelona, Spain, July 11–15, 2022
- [20] Popielski P., Bednarz B., Sieńko R., Howiacki T., Bednarski Ł., Zaborski B. *Monitoring of Large Diameter Sewage Collector Strengthened with Glass-Fiber Reinforced Plastic (GRP) Panels by Means of Distributed Fiber Optic Sensors (DFOS)*. Sensors 2021, 21(19), 6607; <https://doi.org/10.3390/s21196607>
- [21] Bednarski Ł., Sieńko R., Grygierek M., Howiacki T. *New Distributed Fibre Optic 3DSensor with Thermal Self-Compensation System: Design, Research and Field Proof Application inside Geotechnical Structure*. Sensors 2021, 21(15), 5089; <https://doi.org/10.3390/s21155089>
- [22] Bednarz B., Popielski P., Sieńko R., Howiacki T., Bednarski Ł. *Distributed Fibre Optic Sensing (DFOS) for Deformation Assessment of Composite Collectors and Pipelines*. Sensors 2021, 21(17), 5904; <https://doi.org/10.3390/s21175904>
- [23] C.M. Monsberger, W. Lienhart. *Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: Methodology, field applications, and monitoring results*. Journal of Civil Structural Health Monitoring 11: 337–350; 2021, doi: 10.1007/s13349-020-00455-8
- [24] Vorwagner A., Kwapisz M., Lienhart W., Winkler M., Monsberger C.M., Prammer D. *Verteilte Rissbreitenmessung im Betonbau mittels faseroptischer Sensorik – Neue Anwendung von verteilten faseroptischen Messsystemen*. Beton- und Stahlbetonbau 116: 727–740; 2020, doi: 10.1002/best.202100060
- [25] Monsberger C.M., Bauer P., Buchmayer F., Lienhart W. *Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings*. Journal of Civil Structural Health Monitoring; 2021, doi: 10.1007/s13349-022-00560-w
- [26] www.nerve-sensors.com
- [27] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T. *Smart Composite Rebars Based on DFOS Technology as Nervous System of Hybrid Footbridge Deck: A Case Study*. European Workshop on Structural Health Monitoring, Special Collection of 2020 Papers, Volume 2, Springer, 2021, 340–350, ISBN 978-3-030-64908-1
- [28] Kulpa M., Howiacki T., Wiater A., Siwowski T., Sieńko R. *Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel*. Measurement 175(15):109099, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109099>
- [29] Wagner L., Kluckner A., Monsberger C.M., Wolf P., Prall K., Schubert W., Lienhart W. *Direct and Distributed Strain Measurements Inside a Shotcrete Lining: Concept and Realisation*. Rock Mechanics and Rock Engineering 2019, 53: 641–652; doi:10.1007/s00603-019-01923-4
- [30] De Battista N., Elshafie M., Soga K., Williamson M., Hazelden G., Hsu Y.S. *Strain monitoring using embedded fibre optic sensors in a sprayed concrete tunnel lining during the excavation of cross-passages*. 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII, Turin, Italy, 2015: 47–56
- [31] Lienhart W., Buchmayer F., Klug F., Monsberger C.M. *Distributed Fiber Optic Sensing on a Large Tunnel Construction Site: Increased Safety, More Efficient Construction and Basis for Condition-Based Maintenance*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Smart Infrastructure and Construction 172 (4): 148–159; 2020, doi: 10.1680/jsmic.20.00006
- [32] Buchmayer F., Monsberger C.M., Lienhart W. *Distributed fibre optic sensing for long-term monitoring of tunnel inner linings in anhydrite*. 8th Civil Structural Health Monitoring Workshop (CSHM-8), Naples, Italy, 2021, (Online-Event): 13p
- [33] Monsberger C.M., Lienhart W., Moritz B. *In-situ assessment of strain behaviour inside tunnel linings using distributed fibre optic sensors*. Geomechanics and Tunneling 11 (6): 701–709; 2018, doi:10.1002/geot.201800050
- [34] Soga K., Kwan V., Pelecanos L., Rui Y., Schwamb T., Seo H., Wilcock M. *The Role of Distributed Sensing in Understanding the Engineering Performance of Geotechnical Structures*. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. ICE Virtual Library: London, UK: 13–48; 2015, doi: 10.1680/ecsmge.60678