

FIBRAIN 



KABEL DSST

ŚWIATŁOWODOWE
SENSORY OPTYCZNE

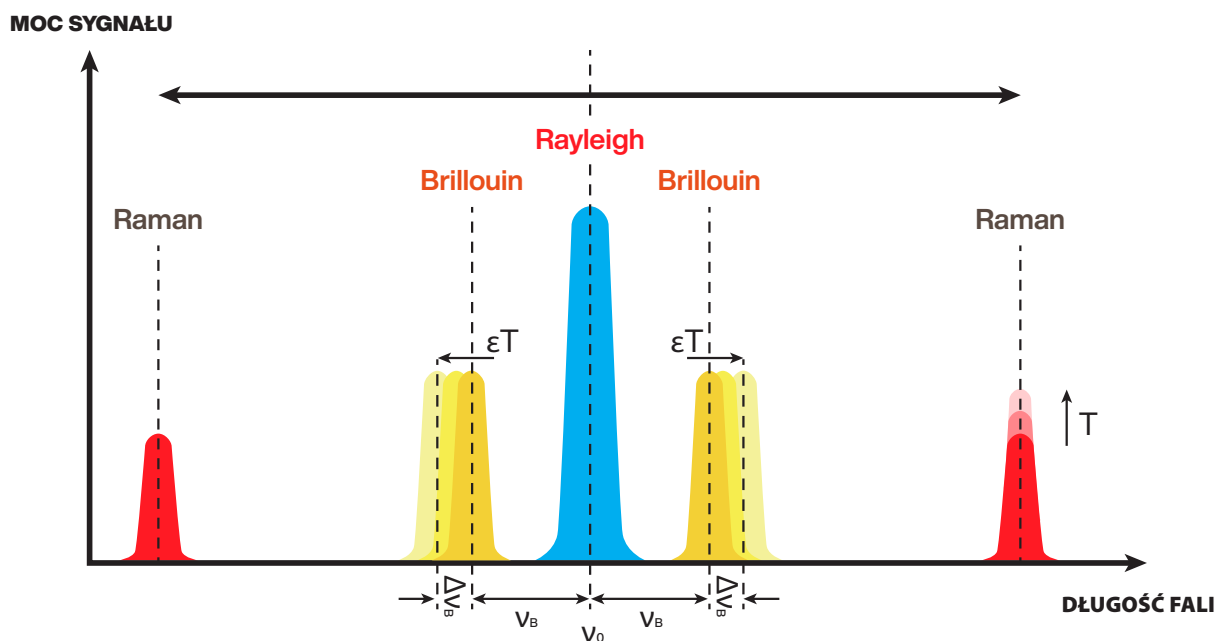
Kable światłowodowe w większości wypadków kojarzymy jako medium telekomunikacyjnym przesyłające pakiety danych pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci. Fibrain poprzez wprowadzanie nowych rozwiązań udowadnia, że nie jest to ich jedyne zastosowanie. Opracowanie to przedstawia **nową konstrukcję do zastosowań pomiarowych - Fibrain DSST - Distributed strain sensing cable**. Podniesienie wymagań wytrzymałościowych budowli oraz coraz większy nacisk przykładany do

standardów bezpieczeństwa cywilnego zarówno konstrukcji budowlanych, jak i struktur ziemnych przyczyniły się do znaczącego rozwoju metod monitoringu tych obiektów. Relatywnie nowym, intensywnie rozwijanym systemem wspomagającym tego typu monitoring są **światłowodowe sensory optyczne**. Opisywana technologia wraz ze stworzoną innowacyjną konstrukcją kabla stanowi atrakcyjne rozwiązanie dla rozłożonej przestrzeni kontroli konstrukcji i budowli w czasie rzeczywistym.

Zasada działania

Technologia sensorów optycznych wykorzystuje efekt towarzyszący transmisji sygnału przez medium światłowodowe. Kiedy impuls świetlny przemieszcza się przez światłowód, część światła zostaje rozproszona wstecznie (bez zmiany długości fali), w kierunku źródła na zasadzie rozproszenia Rayleigha. Na takiej zasadzie działają powszechnie stosowane reflektometry

optyczne OTDR, które mierząc natężenie i czas powrotu wysłanego impulsu tworzą charakterystykę tłumienia linii światłowodowej. Jednak oprócz rozproszenia Rayleigha, możemy również zaobserwować rozproszenia przesunięte w dziedzinie długości fali względem fali nadawanej: rozproszenia Ramana i Brillouina.



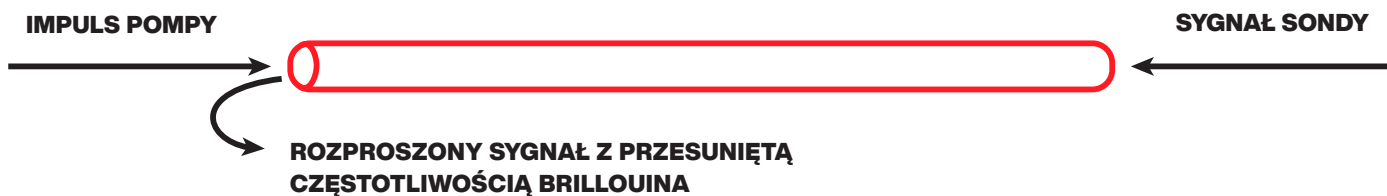
Rozpraszanie Brillouina i Ramana odnosi się do efektu interakcji między impulsem świetlnym (fotony) a falą akustyczną (fonony) propagującą się w rdzeniu włókna. Efekt ten charakteryzuje się pewnym przesunięciem częstotliwości w stosunku do fotonów padających spowodowanym efektem Dopplera. Wskutek efektu Dopplera (odbicie fali optycznej na fali akustycznej) obserwujemy, podobnie jak podczas pomiaru radarem prędkości samochodów, zmianę częstotliwości fali wiązki odbitej. W rozpraszaniu Ramana obserwowalna jest zmiana amplitudy piku rozproszonego sygnału proporcjonalna do zmiany tem-

peratury. Cechą charakterystyczną rozproszenia Brillouina jest przesunięcie częstotliwości rozproszonego światła proporcjonalnie do zmiany gęstości włókna. Zmiana gęstości z kolei wynika ze zmian temperatury włókna, jak i odkształcenia włókna, która jest następstwem jego naprężenia. Instalując światłowód wzdłuż monitorowanej struktury dzięki pomiarom przesunięcia częstotliwości Brillouina względem długości fali nadawczej otrzymujemy możliwość pomiaru zmiany temperatury materiału, jak i względnego przesunięcia mierzonych punktów badanej konstrukcji.

Wyróżniamy dwie najbardziej popularne technologie do pomiarów rozproszenia Brillouina: BOTDA i BOTDR.

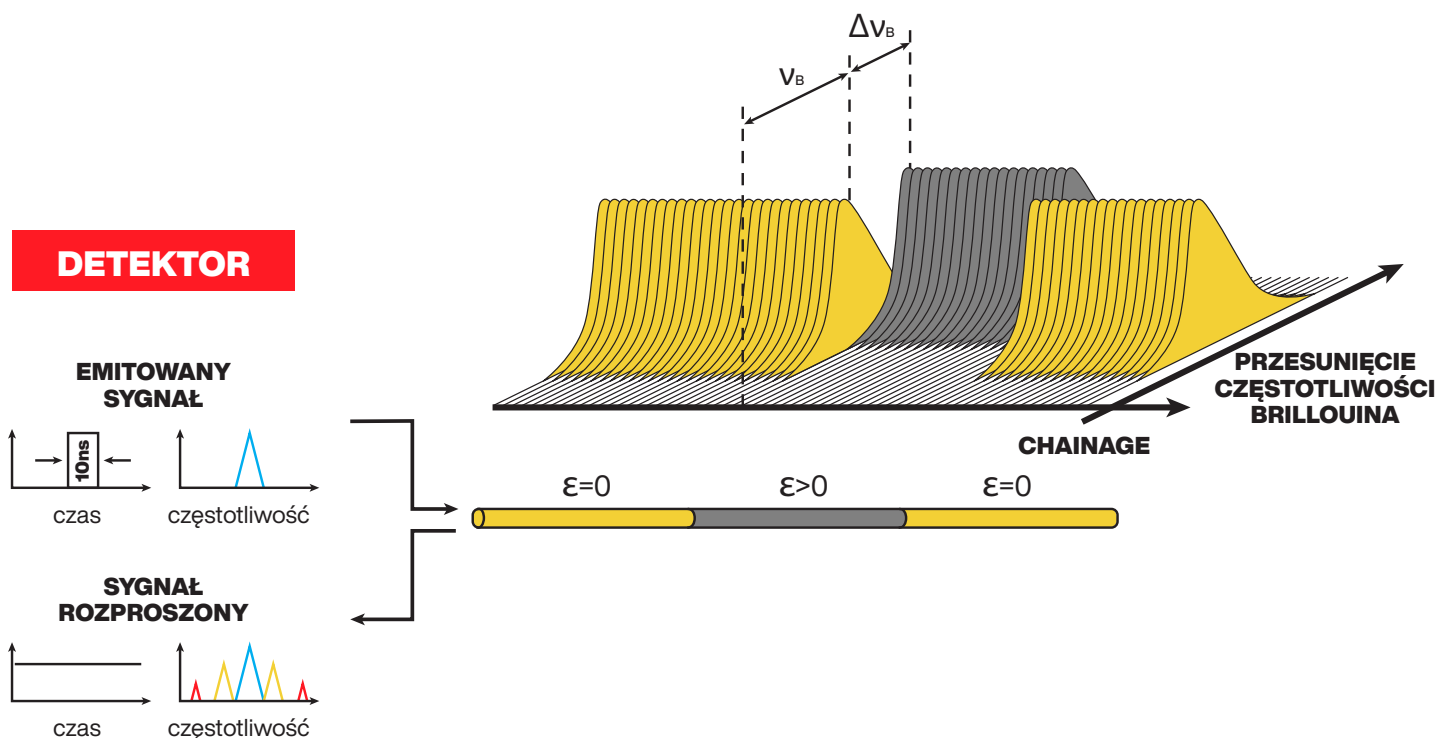
Technologia BOTDR (ang. Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry) opiera się na wykrywaniu spontanicznego rozpraszania impulsu świetlnego, powstającego w wyniku interferencji z falą akustyczną obecną we włóknie. Instrument BOTDR generuje impuls wejściowy z jednego końca do światłowodu jednomodowego i rejestruje emitowane wstecznie rozproszenie Brillouina generowane przez impuls, na tym samym końcu światłowodu - dlatego też wymagany jest dostęp tylko do jednego końca światłowodu. Rozwiązanie to daje więc możliwość pomiaru również w przypadku awarii linii światłowodowej.

W przypadku BOTDA (ang. Brillouin Optical Time-Domain Analysis) do pomiarów wymagany jest dostęp do obydwóch końców linii światłowodowej. Do linii światłowodowej transmitowane są z każdej strony wiązki światła poprzez generowanie krótkiego impulsu „pompy” na jednym końcu i sygnału „sondy” na drugim końcu włókna. Wymuszone rozpraszanie Brillouina ma miejsce, gdy różnica długości fali impulsu i sygnału sondy odpowiada przesunięciu częstotliwości Brillouina. Interakcja ta prowadzi do większej wydajności rozpraszania, powodując transfer energii z impulsu do sygnału sondy, jednocześnie wzmacniając go. Ze względu na dużą siłę sygnału pomiary odkształcenia i temperatury są dokładniejsze, a zakres pomiarowy jest dłuższy niż w przypadku technologii BOTDR.



Optymalnym rozwiązaniem może być również wykonywanie pomiarów opierając się o rozproszenie Rayleigha. Każde włókno w zależności od zastosowanego materiału i domieszek ma własną charakterystykę rozproszeniową Rayleigha, która powoduje rozproszenie wsteczne. W efekcie rozciągania

danego odcinka włókna, charakterystyka ta zmienia się (liniowo wraz z rozciąganiem lub zwiększaniem temperatury). Następstwem tego, jest zmiana natężenia sygnału rozproszonego wstecznie, co jest w stanie wykryć odpowiednie urządzenie pomiarowe.

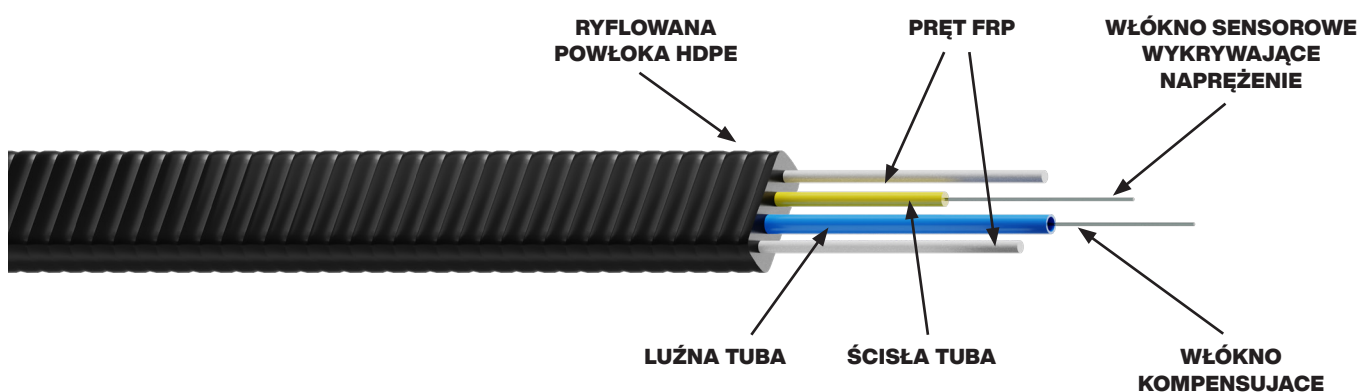


Budowa kabla DSST

Aby osiągnąć opisany nowatorski system monitorowania, niezbędne było zaprojektowanie nowego typu kabla światłowodowego. Standardowe, transmisyjne kable projektowane są tak, aby w jak najmniejszym stopniu przenosić obciążenia mechaniczne bezpośrednio na włókno, aby zapobiec zakłóceniom transmisji danych. W tym wypadku pożądana jest odwrotna sytuacja i dążenie do osiągnięcia najdokładniejszego przełożenia na włókno deformacji badanej konstrukcji, do której przymocowany jest kabel. Teoretycznie idealnym rozwiązaniem byłoby zastosowanie niezolowanego włókna, ale wówczas poziom zabezpieczenia przed uszkodzeniem jest oczywiście niewystarczający. Potrzebny jest kompromis między ochroną włókna, a zachowaniem jego zdolności wykrywania odkształceń. Aby przełożyć zewnętrzne naprężenia na włókno trzeba zastosować **konstrukcje o jak najmniejszym efekcie poślizgu pomiędzy poszczególnymi warstwami wewnętrznymi kabla**. Należy pamiętać przy tym, o dostatecznym zabezpieczeniu włókna i pozostawieniu możliwości strippowania wymaganego na etapie instalacji i serwisowania kabla.

Tworząc nową konstrukcję kabla ważne jest, aby pamiętać również o odpowiednim zróżnicowaniu źródła zmiany charakterystyki rozpraszania Brillouina. Jak wspomniane zostało wcześniej - może to być jednocześnie zmiana temperatury jak i wzdlużne naprężenie światłowodu. Do jednoznacznego wyodrębnienia obserwacji wzdlużnego naprężenia w konstrukcji kabla, zastosowane powinno być drugie włókno w jak najmniejszym stopniu

zależne od odkształceń i sił mechanicznych działających na kabel, a co za tym idzie mogące kompensować zmiany temperatury. **Wychodząc naprzeciw stawianym wymaganiom firma FIBRAIN stworzyła innowacyjną konstrukcję sensorowego kabla światłowodowego DSST.** Głównym elementem chroniącym włókno przed fizycznymi czynnikami zewnętrznymi są dwa pręty FRP. Kabel ten posiada w swojej budowie dwa włókna światłowodowe różniące się metodyką pokrycia i zabezpieczenia. Wspomnianą kompensację temperatury zapewnia włókno umieszczone w luźnej tubie. Tego typu ochrona zapewnia najwyższą niezależność odkształceń włókna, od naprężeń działających na kabel. Dodatkowo zastosowany do produkcji luźnej tuby poliamid, gwarantuje niski współczynnik tarcia na styku z kolejną warstwą konstrukcji kabla. Drugie włókno tymczasem pełni funkcję mierzenia odkształceń, aby więc najlepiej przenosić je na włókno otaczająca go konstrukcja ma postać ściślej tuby. Zastosowane przy tym materiały zapewniają wysokie tarcie i niski współczynnik przemieszczania się poszczególnych warstw względem siebie. Zbadany stosunek odkształcenia włókna względem wydłużenia całej konstrukcji kabla osiąga optymalne 90%. Margines od wartości 100% jest w tym wypadku pożądanym, ponieważ włókno powinno nadal umożliwiać poślizg do pewnego stopnia, aby uniknąć wczesnego zerwania włókna w przypadku idealnego połączenia między włóknom a strukturą kabla. Może się to zdarzyć w przypadku nadmiernego obciążenia, a zwłaszcza lokalnego pęknięcia, które gwałtownie przekroczyłoby dopuszczalne wydłużenie zrywające włókno.



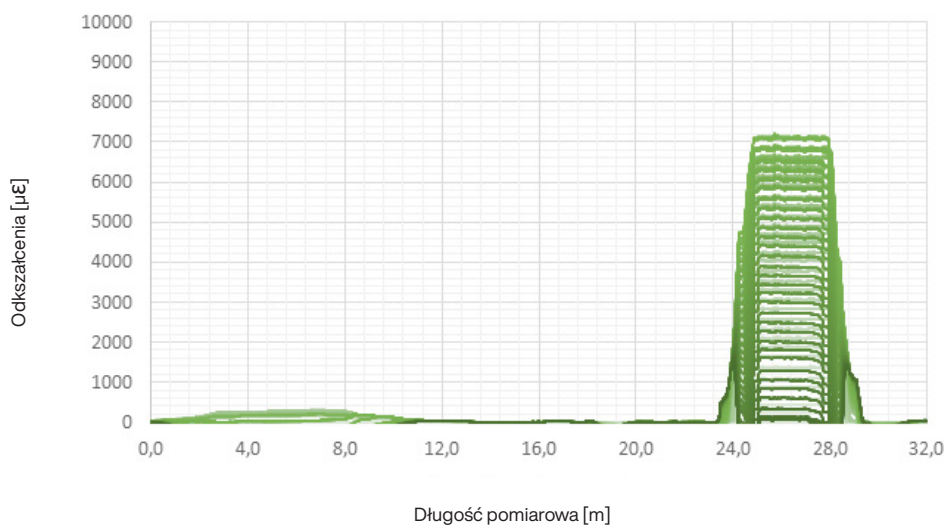
Istotny w tym zakresie jest również rodzaj i kształt powłoki zewnętrznej, tak aby przenosił zewnętrzne odkształcenia bezpośrednio na włókno. Ten aspekt ma również duże znaczenie, ponieważ nieodpowiednie przeniesienie sił może silnie zdegradować cały system pomiarowy. W konstrukcji DSST zapro-

ponowano przekrój poprzeczny płaski z powłoką zewnętrzną o ryflowanej strukturze, która pozwoli osiągnąć najwyższy stopień przylegania do badanej konstrukcji, jednocześnie minimalizując możliwości poślizgu.

Badanie kabla FIBRAIN

Skuteczność kabli sensorowych została poddana skrupulatnym, zewnętrznym badaniom laboratoryjnym. **Sprawdzone zostały możliwości mierzenia odkształceń włókna pomiarowego jak i pomiaru temperatury włókna kompensacyjnego.** Jednocześnie porównano wyniki jakościowe z innym wiodącymi producentami kabli sensorowych. Na rysunku nr 1 zobrazowano przebieg odkształceń we wszystkich próbach różniących się

między sobą przyłożoną siłą powodujących rozciąganie. W wyniku pomiaru jednoznacznie można zidentyfikować miejsce powstania odkształcenia co potwierdza jedną z głównych funkcji kabli sensorowych stwierdzenie zagrożenia i lokalizację uszkodzenia konstrukcji. Dodatkowo wartości uzyskane na wykresie są proporcjonalne do zadanego odkształcenia, co umożliwia łatwy sposób oceny skali powstałej deformacji.

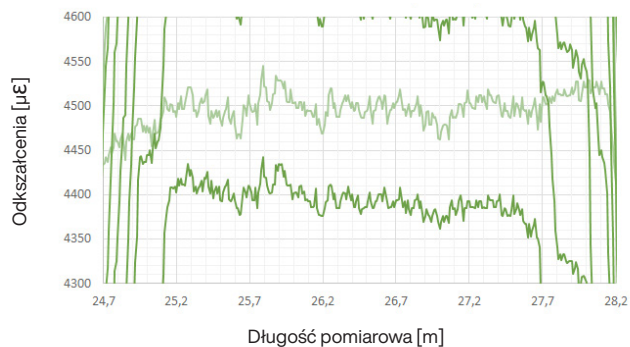


Rysunek 1. Odkształcenie na trasie pomiarowej zarejestrowane przez kabel FIBRAIN DSST

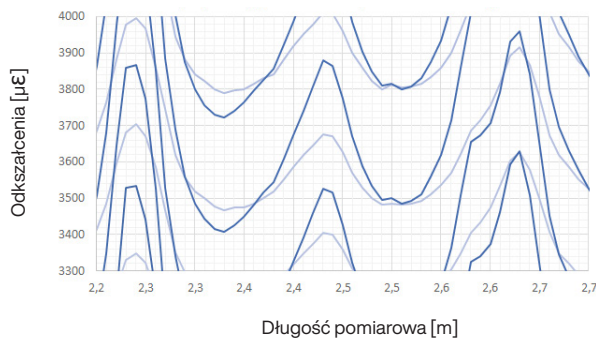
Istotna pozostaje dokładność pomiaru. Jeśli wykres ten będziemy analizować przy wyższej rozdzielczości pomiarowej, wówczas można zauważyć, że odkształcenia dla FIBRAIN

DSST mają zmienność ok. 100 µε na długości odcinka pomiarowego (Rysunek nr 2). Dla porównania dla konkurencyjnej konstrukcji zmienność sięga 500 µε i więcej.

FIBRAIN DSST



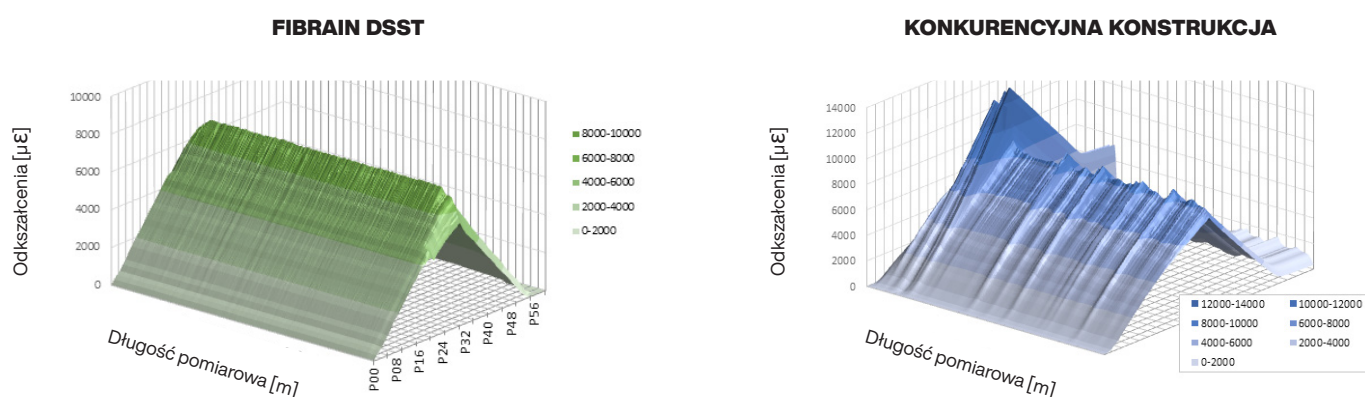
KONKURENCYJNA KONSTRUKCJA



Rysunek 2. Odkształcenia na odcinku pomiarowym dla FIBRAIN DSST i konkurencyjnej konstrukcji

W danym cyklu badawczym w kolejnych krokach (P1, P2 ..) przez połowę cyklu zadawana siła zwiększana była proporcjonalnie do wyznaczonej wartości, a następnie została stopniowo zmniejszona. Zgodnie z rysunkiem nr 3 - uśredniając wartości zauważamy oczekiwaną liniowość przebiegu odczytu względem kolejnych kroków odkształcenia. Gwarantuje nam to zachowanie odpowiedniej proporcji pomiędzy deformacją konstrukcji, a uzyskanymi przy pomocy kabla sensorowego

wartościami pomiaru. Należy zauważyć, że wartości uzyskane dla FIBRAIN DSST zapewniają mniejsze odchylenia od wartości oczekiwanej w porównaniu do konkurencyjnego rozwiązania. Jednocześnie po odciążeniu kabla odczytana wartość powróciła do wartości początkowej i nie zostało zaobserwowane zjawisko „zamrożenia” odkształcenia widoczne w drugim przypadku, które mogłoby mylnie wskazywać na dalsze działanie naprężeń w badanej konstrukcji.



Rysunek 3. Wizualizacja przestrzenna rozkładu odkształceń dla FIBRAIN DSST i konkurencyjnej konstrukcji

Zastosowanie

Przy pomocy rozłożonego przestrzennie systemu wykrywania odkształceń światłowodowych można zastąpić konwencjonalne metody pomiaru naprężenia i deformacji szeregu konstrukcji budowlanych i geotechnicznych:

Osuwiska – Przemieszczenia gleby inicjowane przez pełzające osuwiska mogą powodować ogromne problemy, niszcząc infrastrukturę i budynki w obszarze swojego ruchu. Ocena i monitorowanie osuwisk ma zasadnicze znaczenie, szczególnie w zakresie planowania zapór i zbiorników, aby zapewnić ich bezpieczeństwo podczas retencji i eksploatacji przez cały okres użytkowania. Obecne mapowanie i monitorowanie oparte jest na tradycyjnych technikach, takich jak geodezyjne pomiary powierzchni. Wymaga to bardzo gęstej siatki markerów w pobliżu granicy osuwiska, co sprawia, że jest to niezwykle czasochłonne w przypadku większych obszarów.

Nasypowe wały przeciwpowodziowe – Pomiary szczególnie istotne dla oceny stanu wałów w trakcie powodzi jak i tuż po niej. Kable światłowodowe wplecione w geosyntetyki mogą dostarczać informacji o zachowaniu konstrukcji, a jednocześnie ją korygować i wspierać.

Zapory i tamy wodne – Znaczenie tutaj ma zarówno deformacja konstrukcji jak i zastosowanie kabli sensorowych do lokalizacji przecieków. Wykorzystując włókno przystosowane do pomiaru temperatury możemy zlokalizować przecieki na podstawie zmienności temperatury spowodowanej przepływającą wodą.

Konstrukcje żelbetowe – Główne przyczyny deformacji to osiadanie fundamentów, ciężar własny oraz obciążenie dynamiczne. Dodatkowymi czynnikami mogą być również reakcje termiczne, nieproporcjonalne rozłożenie temperatur a co za

tym idzie odmienny skurcz w różnych częściach konstrukcji powodujący między innymi pękanie powierzchniowe. Zastosowanie jednego z rozwiązań integracji kabla sensorowego z żelbetową konstrukcją umożliwia ciągłe monitorowanie deformacji i pęknięć betonu.

Mosty – Budowle wymagające zapewnienia wysokiej dokładności pomiarów odkształceń elementów konstrukcyjnych – najczęściej betonu i stali – zarówno podczas etapu budowy jak i w fazie użytkowania, podczas pracy konstrukcji. Poprzez implementację szeregu rozwiązań łączenia kabla z strukturą mostu mogą być również szczególnie użyteczne do badania aktualnego stanu starszych konstrukcji.

Tunele – Odształcenia konstrukcyjne w tunelu mogą sta-

nowić poważne zagrożenie bezpieczeństwa. Konieczne jest ciągłe szybkie sprawdzenie stabilności i niezawodności konstrukcji jak i długoterminowe weryfikacja rozwoju powstałych deformacji

Kopalnie – Optyczne czujniki sensorowe gwarantują monitorowanie integralności konstrukcji i parametrów produkcji jednocześnie umożliwiają wczesne ostrzeganie o możliwym niebezpieczeństwie. Niewątpliwą zaletą jest zastosowanie materiału nie będącego źródłem zapłonu w środowisku wybuchowym.

Rurociągi – Kable sensorowe pozwalają na ciągłe monitorowanie integralności linii, lokalizowanie wycieków również na podstawie zmiany temperatury. Daje to możliwość najszybszego wykrycia krytycznych deformacji i pęknięć.

Dlaczego Kable Sensorowe?

W wielu przypadkach metoda pomiarów oparta o sensorowe kable optyczne wydaje się być bardziej optymalnym podejściem niż standardowe dotychczas spotykane rozwiązania. Przemawia za tym szereg zalet:

- Duży zakres możliwych danych do zebrania na całej długości linii okablowania pomiarowego
- Zautomatyzowane i szybkie zbieranie danych (zastępująca odczyty ręczne i ocenę operatora, ciągłe monitorowanie, zdalne pomiary)
- Możliwość monitorowania konstrukcji w sposób rozłożony przestrzennie a nie tylko punktowo jak w przypadku tradycyjnych rozwiązań
- Możliwość korzystnej integracji optycznych sensorów w geosyntetykach
- Niewrażliwość na czynniki zewnętrzne – układy elektryczne, wyładowania atmosferyczne, silne pole elektromagnetyczne, wilgoć, chemicznie trujące środowisko
- Brak wymogu zasilania elektrycznego w punktach pomiaru
- Niewielkie rozmiary kabli światłowodowych
- Możliwość użycia w trudnodostępnych punktach konstrukcji
- W niektórych wypadkach jedyne dopuszczalne rozwiązanie
- Niskie koszty światłowodu w porównaniu do tradycyjnych urządzeń pomiaru punktowego

Podsumowanie

Technologia czujników opartych o sensory optyczne śmiało wkroczyła w świat monitoringu konstrukcji budowlanych i struktur ziemnych. Wprowadzony nowy typ kabla Fibrain DSST znakomicie wpasowuje się w wymagania tej technologii wykazując **wysoką jakość odczytów w przeprowadzonych laboratoryjnych testach pomiarów**. Zastosowanie

odpowiedniej konstrukcji kabla i wykorzystanie rozłożonego przestrzennie systemu wykrywania odkształceń światłowodowych **może zastąpić konwencjonalne metody pomiarów jednopunktowych**. Przemawiają za tym niejednokrotnie aspekty ekonomiczne jak i również szereg opisanych zalet technologicznych.