

Nieniszczące metody kontroli stanu kabli mostów kablobetonowych i podwieszonych

Zwiększająca się wraz ze starzeniem się obiektów mostowych kablobetonowych i podwieszonych liczba awarii i katastrof wskutek uszkodzeń lub zniszczenia kabli powoduje poszukiwania i doskonalenie metod ich kontroli. Szczególne zainteresowanie wzbudzają metody nieniszczące (NDE/NDT – Non-Destructive Evaluation/Testing), umożliwiające ocenę stanu kabli bez uszkodzeń badanych konstrukcji. Na podstawie licznych publikacji można odnieść wrażenie, że zainteresowanie tymi metodami ma jeszcze w dużym stopniu charakter poznawczy. Świadczy to o złożoności problemu kontroli kabli, którego rozwiązanie wymaga z jednej strony korzystania z osiągnięć podstawowych nauk przyrodniczych (fizyki i chemii), z drugiej – o istotnej różnicy pomiędzy problemami kontroli stanu kabli i innych elementów konstrukcji mostowych.

Nieniszczącą ocenę stanu kabli sprężających i podwieszających konstrukcje mostowe umożliwiają:

- kontrola wizualna;
- kontrola penetrantami;
- termografia podczerwieni (pasywna i aktywna);
- metody elektromagnetyczne: georadar; radiografia; metoda sprężysto-magnetyczna; elektryczna tomografia pojemnościowa;
- metody magnetyczne: wycieku strumienia magnetycznego, aktywnego i rezidualnego; indukowanego pola magnetycznego; mikromagnetyczna; czujników magnetostrykcyjnych;
- metody fali mechanicznej i wibracji: kontrola dźwiękowa; echa uderzenia; emisji akustycznej; prędkości impulsu dźwiękowego/ultradźwiękowego; echa ultradźwięków; tomografia ultradźwiękowa; ultradźwięków małej częstotliwości; ultradźwięków ukierunkowanych; techniki wibracyjne (ogólnej reakcji na drgania, wibrometria), fotogrametria/kontrola wideo;
- metody elektrochemiczne: potencjału półogniwa; liniowej rezystancji polaryzacyjnej; szumu elektrochemicznego; elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej;
- metody czujników: reflektometria w domenie czasu; optyczna reflektometria w domenie czasu; czujników bezprzewodowych („Smart Pebble” – wykrywających w betonie chlorki oraz wbudowanych w kable, wykrywających korozję cięgien); czujników światłowodowych z siatką długookresową i *Braga*; zewnętrznego interferometru *Fabry-Perota* oraz tensometrów strunowych;
- metody przepływu powietrza;
- pomiar sił w kablach.

Do kontroli stanu kabli podwieszających nadają się metody: wycieku strumienia magnetycznego, sprężysto-magnetyczna, mikromagnetyczna, dźwiękowa, ultradźwiękowe, emisji akustycznej, wibrometria, fotogrametria i pomiaru sił w kablach [1÷3].

Do wykrywania defektów cięgien zewnętrznych kabli sprężających są przydatne metody nieniszczące takie, jak do kontroli kabli podwieszających.

Do wykrywania defektów cięgien kabli sprężających wewnątrz betonu dźwigarów mostowych nadają się metody: emisji akustycznej, ultradźwiękowe i echa uderzenia.

Pustki i inne defekty iniektu oraz infiltracje wody można wykryć [1÷3]:

– w zewnętrznych kanałach plastikowych (z HDPE) stosując georadar, termografię podczerwieni, elektryczną tomografię pojemnościową, metody fali mechanicznej, sondowanie akustyczne, metodę ultradźwięków małej częstotliwości i echa uderzenia;

– w zewnętrznych kanałach metalowych metodami przydatnymi do kontroli w zewnętrznych kanałach plastikowych, z wyjątkiem georadaru;

– w wewnętrznych kanałach plastikowych, stosując georadar, tomografię podczerwieni, tomografię ultradźwiękową oraz metodę echa ultradźwiękowego i echa uderzenia (z dokładnością małą do umiarkowanej);

– w końcowych kołpakach stref zakotwienia kabli, stosując metodę sondowania akustycznego i termografię podczerwieni.

Charakterystyka metod nieniszczących [1÷4]

W artykule scharakteryzowano metody nieniszczące, które są najczęściej stosowane do kontroli stanu kabli sprężających i podwieszających mosty.

Kontrola wizualna. Należy do najczęściej stosowanych nieniszczących metod badania kabli. Często jest wstępną kontrolą stanu kabli podwieszających i zewnętrznych kabli sprężających oraz jest wykorzystywana do wykrywania na powierzchni betonu oznak defektów kabli wewnętrznych. Jej przydatność ogranicza konieczność dostępu do miejsc kontrolowanych. W przypadku kabli podwieszających tę niedogodność zmniejsza stosowanie dronów wyposażonych w kamerę telewizyjną. Gdy udaje się usunąć końcowe kołpaki zakotwień kabli, to można ocenić stan ich końców. Umożliwia poprawne oszacowanie ilościowe wykrytych defektów. Korzysta z boroskopu lub wideoskopu. Wtedy wykrywa w kanałach zewnętrznych i wewnętrznych, metalowych i niemetalowych defekty iniektu, korozję i duże uszkodzenia cięgien (mniejsze bywają przeoczone) oraz defekty stref zakotwienia kabli.

Kontrola penetrantami. Pod wpływem roztworu penetrantu nałożonego na powierzchnię kontrolowanego elementu ujawniają się jego pęknięcia, porowatość i inne defekty. Penetranty umożliwiają skuteczną, tanią kontrolę dużych powierzchni. Stosowane do badania elementów stalowych nie zawierają związków fluorowo-węglowodorowych, chloru i siarki, a stosowane do określania wskaźnika pH – zawierają fenoloftaleinę.

Kontrola dźwiękowa. Umożliwia łatwe kontrolowanie kabli podwieszających i zewnętrznych kabli sprężających w kanałach/osłonach metalowych i niemetalowych. Kontrola polega na ostukiwaniu kabla młotkiem (rys. 1)

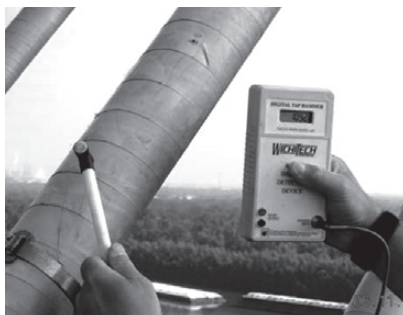
i ocenie wywołanych tym dźwięków. Kabel ostukuje się wzdłuż obwodu: z boków, wierzchu i od spodu. Charakterystyczne dźwięki wskazują miejsca występowania w kanale kabla pustek, wadliwego iniektu i wody. Dźwięki nie informują o stanie ciągłości. Ponieważ korozja występuje zwykle w miejscach złego wypełnienia kanału – usuwa się w nich jego obudowę lub korzysta z boroskopu/endoskopu i sprawdza stan ciągłości.

Na podstawie dźwięku trudno określić rodzaj defektu i wykryć defekt niewielki. Nie można wykryć defektów kabli sprężających wewnętrznych i defektów w strefach zakotwień. Wyjątkiem są ich zakończenia, w których udaje się wykryć pustki, wadliwy iniekt i infiltrację wody.

Kontrola dźwiękowa jest żmudna, wysoce subiektywna i bywa niedokładna, ale łatwo ją przeprowadzać. Umożliwia stosunkowo szybkie znajdowanie miejsc potencjalnej korozji ciągłości. Wymaga zaangażowania pracownika mającego odpowiednie doświadczenie. Kontrolę dźwiękową udoskonala stosowanie mikrofonu, nagrywanie dźwięków uderzeń (rys. 2) i zobiektywizowana ich analiza.

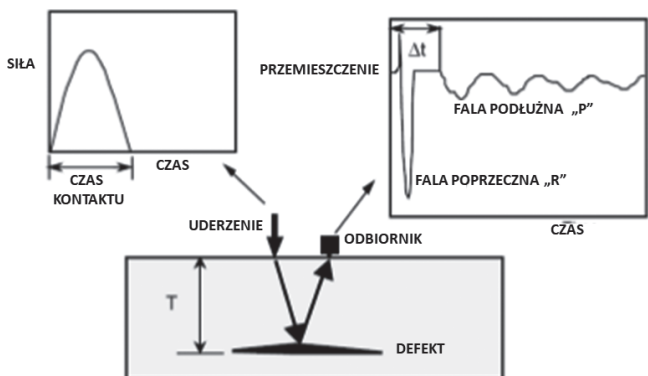


Rys. 1. Kontrola dźwiękowa młotkiem zewnętrznym kabli sprężających w skrzynkowym dzwigniku mostowym [Corven Engineering Inc.]



Rys. 2. Kontrola przez ostukiwanie stanu osłony kabla podwieszającego [8]

Metoda echa uderzenia (Impact Echo – IE) – rys. 3. Polega na uderzeniu (por. rys. 2) w powierzchnię badanego elementu młotkiem impulsowym i rejestracji w pobliżu miejsca uderzenia odbitych fal energii odbiornikiem przemieszczeń lub przyspieszoniemierzem. Wywołane uderzeniami fale podłużne P (w kierunku uderzenia) odbijają się od wewnętrznych defektów badanego elementu. Fala wygenerowana uderzeniem wnika głęboko w element z lepszym stosunkiem sygnału do szumu niż przy stosowaniu technik ultradźwiękowych. Metodą IE wykrywa się z dużą dokładnością wodę, pustki i inne defekty iniektu w zewnętrznych kanałach z HDPE, z małą do umiarkowanej dokładnością w wewnętrznych kanałach metalowych i niemetalowych. Umożliwia orientacyj-



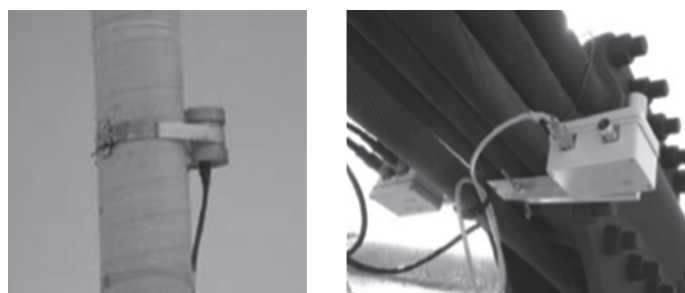
Rys. 3. Schemat metody echa uderzenia (IE) [4]

nie oszacowanie rozmiaru defektu (bywa z dużym błędem). Nie wykrywa defektów ciągłości. Jest nieprzydatna do kontroli stanu iniektu w kanałach wewnętrznych o niewielkiej średnicy i gdy grubość betonu pokrywającego kanał przekracza 5–6 cm. Nie nadaje się do oceny stanu stref zakotwienia i miejsc o złożonej geometrii, w których występuje wiele odbić fal energii, a także odcinków kanałów, w których skurcz iniektu spowodował powstanie szczeliny powietrznej przy ścianie kanału. Wadą metody IE jest jej powolność.

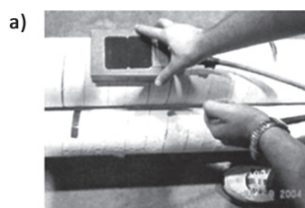
Metoda emisji akustycznej (Acoustic Emission – AE) – rys. 4. Rejestruje dźwięki wywołane pękaniem ciągłości drutów kabli. Wygenerowaną pęknięciem falą dźwiękową wykrywają czujniki akustyczne piezoelektryczne zainstalowane na kontrolowanym kablu i jego zakotwień. Obecnie są używane czujniki bezprzewodowe.

Metoda AE umożliwia kontrolowanie/monitorowanie pęknięć drutów/ciągłości kabli w czasie użytkowania mostu. Warunkiem jej miarodajności jest ciągła kontrola dźwięków generowanych przez pękające druty/ciągła. Aby lokalizować pęknięcia, trzeba korzystać z wielu czujników. Miejsce pęknięcia określa się w przybliżeniu na podstawie czasów przybycia fali dźwiękowej do różnych czujników. Tłumienie fal dźwiękowych w kablach z ciągłymi otoczonymi iniektu cementowym jest znacznie większe niż w kablach bez iniektu.

Georadar. Elementy konstrukcji mostowych są kontrolowane radarem stosowanym w badaniach geofizycznych (rys. 5). Używa się anten monostatycznych 500 i 900 MHz, 1,0 i 1,5 GHz oraz tubowe 1,0 i 2,5 GHz [6]. Georadar wy-



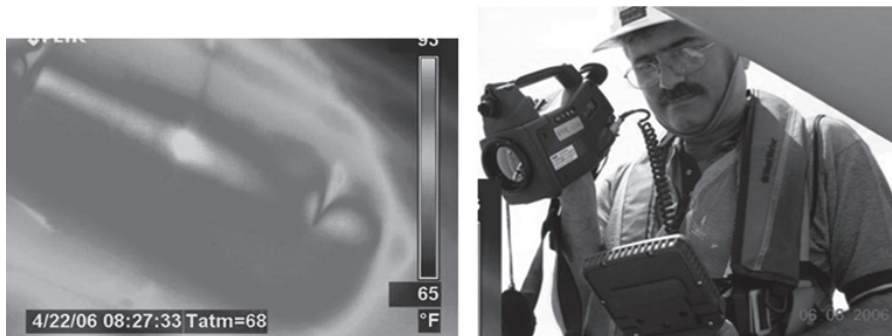
Rys. 4. Czujniki emisji akustycznej (AE) zainstalowane na kablu podwieszającym [2]: z lewej z przewodem, z prawej bezprzewodowy



Rys. 5. Badanie kabla georadarem: a) aparatura, b) skan kabla [1]

syła w badany element impulsy elektromagnetyczne i przechwytyje ich odbicia od styku ośrodków o różnych cechach dielektrycznych. Znając przenikalność elektromagnetyczną materiału, można na podstawie czasu przebiegu fali określić, na jakiej głębokości nastąpiło odbicie. Zaletą georadaru jest krótki czas badania. Wykrywa on w betonie, do głębokości około 25 cm, kanały kabli metalowe i plastikowe, pręty zbrojenia, kształtowniki i rury, a także pęknięcia betonu i miejsca zawilgocone. Wykrywa z umiarkowaną dokładnością w zewnętrznych kanałach plastikowych pustki i zły stan iniektu (miękki, zdezagregowany) oraz przecieki wody. Nie oszacowuje objętości pustek. Nie wykrywa defektów iniektu w zewnętrznych i wewnętrznych kanałach metalowych. Nie wykrywa defektów ciągów i defektów stref zakotwienia kabli.

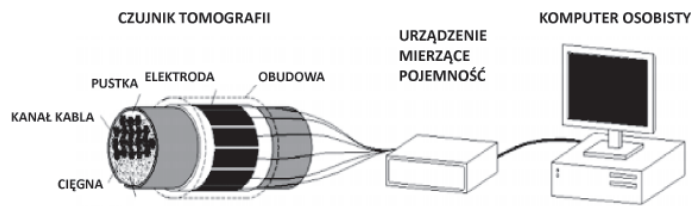
Termografia w podczerwieni (IRT) – rys. 6. Kamera na podczerwień wykrywa defekty betonu i iniektu. Wykorzystuje przekształcanie energii cieplnej emitowanej przez powierzchnię badanego obiektu w mapę rozkładu jej temperatur. Na podstawie tej mapy można wykryć wewnętrzne defekty obiektu i znajdujące się w nim elementy. Metoda IRT może być stosowana biernie lub aktywnie. W biernym użyciu wykorzystuje się ogrzanie badanego obiektu przez słońce, w aktywnym – obiekt jest podgrzewany. Niedogodnością podejścia biernego jest zależność od naturalnego gradientu termicznego. Przy podejściu aktywnym najlepsze rezultaty daje umieszczenie źródła ciepła po stronie badanego obiektu przeciwnej do tej, na której określa się temperatury jego powierzchni.



Rys. 6. Stosowanie termografii do kontroli kabla podwieszającego [8]

Metoda IRT jest przydatna wyłącznie, gdy kanały są plastikowe. W kanałach zewnętrznych IRT wykrywa z dużą dokładnością pustki i wodę, w wewnętrznych – gdy pokrycie ich betonem nie przekracza około 5 cm. Umożliwia zgrubne oszacowanie rozmiaru defektu. Nie rozróżnia rodzaju defektu i nie określa jego zagłębienia w betonie. Nie lokalizuje w betonie wewnętrznych kanałów plastikowych i metalowych. W strefach zakotwienia wykrywa jedynie pustki i wodę w końcowych kołpakach. Metoda IRT jest nieprzydatna w miejscach z kilkoma warstwami kanałów oraz z zagęszczonym zbrojeniem [10]. Nie wykrywa defektów ciągów. Można ją wykorzystać do oceny stanu ciągów, stosując do tego ich ogrzewanie elektrooporowe. Wykrywa uszkodzenia obudowy kabli podwieszających.

Elektryczna tomografia pojemnościowa (Electrical Capacitance Tomography – ECT) – rys. 7. Wartości pojemności kabla uzyskuje się za pomocą czujników wieloelektrodowych, które otaczają jego kanał. Stosując kilka tysięcy iteracji i technikę numeryczną rekonstrukcji, uzyskuje się obrazy przenikalności elektrycznej wewnątrz



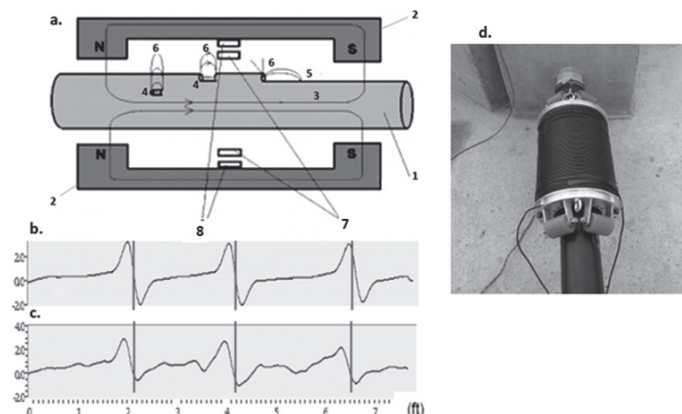
Rys. 7. Schemat elektrycznej tomografii pojemnościowej – ECT [3]

kanału kabla. Niewiele tą metodą skontrolowano kabli mostowych, ale obrazy uzyskane z kontroli przewodów rurociągów płynu pokazują w nich pustki powietrzne. Choć rozdzielczość obrazów jest mała, to poprawia je optymalizacja przetwarzania danych. ECT należy do najbardziej obiecujących technik tomografii, ponieważ jest bezpieczna, szybka i stosunkowo niedroga.

Metody wycieku strumienia magnetycznego (Magnetic Flux Leakage – MFL; NCHRP 848). Wykorzystują zjawisko „wycieku” strumienia pola magnetycznego z pręta metalowego w miejscach ubytku jego przekroju (rys. 8). Są stosowane od dawna do kontroli stanu lin kolei linyowych. Należą do najbardziej obiecujących nieniszczących metod badań stanu kabli podwieszających i kabli sprężających w kanałach zewnętrznych.

Są dwie odmiany MFL: metoda wycieku głównego strumienia magnetycznego stosująca trwały magnes (Magnetic Main Flux Method – Permanent Magnet) oraz metoda wycieku głównego strumienia magnetycznego stosująca solenoid (Magnetic Main Flux Method – Solenoid). Przy stosowaniu obu metod urządzenie pomiarowe jest przesuwane wzdłuż kabla. W miejscach z wykrytymi uszkodzeniami jest zatrzymywane i są mierzone ubytki ciągów.

W pierwszej odmianie metody MFL dwa silne trwałe magnesy indukują pomiędzy swymi biegunami strumień magnetyczny. Magnesy są zainstalowane w otaczającej kabel głowicy, po obu jego stronach. W głowicy jest kilka czujników *Halla* (generują napięcie elektryczne przy zmianie pola magnetycznego). Czujniki są rozmieszczone wokół kabla, pomiędzy biegunami magnesów, pod jednakowymi do niego kątami. W czasie



Rys. 8. Metoda wycieku strumienia magnetycznego (MFL) [4]: a) zasada metody, b) wykres z badania ciągna bez korozji, c) wykres wskazujący korozję, d) widok magnetyzera; 1 – namagnesowane cięgno, 2 – magnes generujący pole magnetyczne, 3 – linie strumienia magnetycznego, 4 – miejscowy defekt ciągna, 5 – ubytek przekroju ciągna, 6 – wyciek strumienia magnetycznego, 7 – czujniki wykrywające defekty lokalne, 8 – czujniki wykrywające ubytki przekroju metalu

badania głowica przesuwana wzdłuż kabla generuje strumień magnetyczny, czujniki odbierają sygnały magnetyczne „wyciekające” z cięgien charakteryzujące ich stan, są gromadzone i przekazywane do laptopa. Przetworzone dają obraz rozproszeń pola magnetycznego wzdłuż kabla. Analiza tego obrazu umożliwia lokalizację uszkodzeń cięgien. Zmniejszenia ich przekroju wskazują doliny na wykresie sygnałów.

Druga odmiana metody MFL różni się od pierwszej tym, że w niej strumień magnetyczny jest indukowany przez pierścieniową cewkę z drutu miedzianego owiniętego na bębnie otaczającym kabel. Przez cewkę przepływa prąd elektryczny. Bęben jest przesuwany wzdłuż kabla. MMFM – Solenoid jest bardziej dokładna niż MMFM – Permanent Magnet, cechuje ją większa wykrywalność defektów cięgien. Zwykle wymaga więcej czasu, ale umożliwia dokładniejszy pomiar ubytków metalu.

Metoda wycieku strumienia magnetycznego resztkowego (rezydualnego). Polega na namagnesowaniu wybranego miejsca kabla do odpowiedniego nasycenia cięgien ładunkami magnetycznymi i następnie na zeskanowaniu pola magnetycznego. Wymaga stosowania potężnego magnesu i wielokrotnych magnesowań, co w praktyce jest uciążliwe. Tą metodą są kontrolowane krótkie odcinki cięgien.

Metody wycieku strumienia magnetycznego wykrywają defekty cięgien kabli podwieszających oraz kabli sprężających w zewnętrznych kanałach metalowych i plastikowych, gdy zmniejszenie przekroju cięgna/drutu przekracza 5% (niekiedy wykrywają jego ubytek wynoszący 1%). Z trudnością wykrywają wewnętrzne defekty w cięgnach/drutach. Nie rozróżniają rodzaju defektu (korozji, ubytku przekroju, pęknięcia). Pozwalają oszacować wielkość ubytku, z tym że nie zawsze dokładnie. Nie wykrywają ubytków cięgien w strefach ich zakotwienia i defektów iniektu w kanałach kabli. Interpretacja wyników badań metodami wycieku strumienia magnetycznego wymaga dużego doświadczenia i wiedzy o tych metodach.

Metoda sprężysto-magnetyczna (Elastomagnetic Method). Wykorzystuje reagowanie przenikalności magnetycznej na zmiany naprężeń w cięgnach. Czujniki przesuwane wzdłuż kabla, wykrywając te zmiany, wskazują miejsca ubytków cięgien [14].

Metoda mikromagnetyczna (Micromagnetic Method). Wykorzystuje zależność właściwości magnetycznych materiałów ferromagnetycznych oraz ich cech mechanicznych do wykrywania redystrybucji sił w kablu spowodowanej zerwaniem lub ubytkiem przekroju cięgna. Wywołana tym zmianą naprężeń jest wykrywana dzięki pomiarowi wielkości mikromagnetycznych. Prowadząc długotrwałą obserwację mikromagnetyczną, można wykrywać pęknięcia cięgien.

Tomografia ultradźwiękowa (Ultrasonic Tomography – UST). Stosuje fale akustyczne o częstotliwości powyżej 20 kHz (zwykle 55 kHz). W badany element jest emitowany impuls naprężeń w postaci fali ciśnienia (P – w kierunku propagacji) i fali ścinania (S – prostopadłej do P). Część fali odbija się od miejsc mających inne cechy niż transmitujące ją medium i jest przechwytywana przez czujniki. Fale ścinania szczególnie silnie odbijają się od powietrza i wody. Pomiary czasu powrotu odbitej fali, jej częstotliwości i amplitudy umożliwiają określenie defektów (nieciągłości) badanego elementu.

Aby skontrolować kanały wewnętrzne, najpierw lokalizuje się ich trasy (np. georadarem). Następnie na powierzchni betonu, na trasie kanału, jest rysowana siatka.

Wzdłuż jej linii skanuje się kanał. Rozstaw linii zależy od pożądanej rozdzielczości wyników skanowania. Zazwyczaj są one w odległości 5 cm.

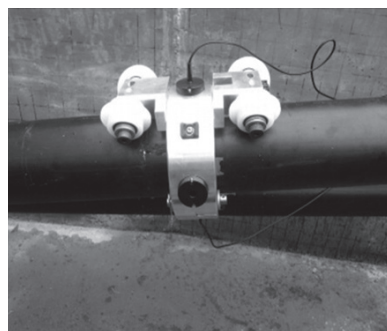
Metoda UST najlepiej nadaje się do wykrywania anomalii (raków, rozwarstwień, pęknięć, pustek) w betonie niezawierającym koncentracji prętów zbrojenia oraz do pomiaru ich zagłębienia w betonie. Można wykryć zbrojenie, kształtowniki stalowe, rury itp., a także określić grubość pokrywającego je betonu i grubość badanego elementu oraz moduł sprężystości betonu. Głębokość skanowania metodą UST jest ograniczona do 30 cm (jest większa w betonie z małą ilością zbrojenia). Metoda nie określa rodzaju wykrytej anomalii. Nie wykrywa anomalii w kanałach wewnętrznych zarówno metalowych, jak i niemetalowych. Nie wykrywa defektów iniektu w kanałach wewnętrznych i zewnętrznych. Nie nadaje się do kontroli stref zakotwienia kabli oraz w przypadku niepłaskiej powierzchni elementu. Nie można metodą UST rozpoznać kanałów wewnętrznych znajdujących się za innymi kanałami.

Metoda echa ultradźwiękowego (Ultrasonic Echo – USE). Jej zasada jest podobna do zasady UST: w badany betonowy element jest emitowany impuls naprężeń (fala P lub S), który wzbudza w elemencie ultradźwięki. Część fali odbija się znajdujące się w betonie powietrze i elementy metalowe. Odbite części fali wychwytyują czujniki. Mierząc częstotliwość/amplitudę i prędkość odbitych fal, można wykryć defekty betonu.

Metoda USE stosuje liniowy układ przetworników, które generują fale ścinania z częstotliwością 55 kHz. Skaner z podwójną sondą i przetwornikami przesuwa się automatycznie co około 25 mm nad powierzchnią badanego elementu. Dane są zbierane punktowo (nie w sposób ciągły).

Metoda USE nadaje się do badań elementów z betonu o grubości do 30 cm (może być więcej, gdy w betonie nie ma dużej ilości zbrojenia). Wykrywa pęknięcia, pustki i rozwarstwienia betonu, infiltracje wody oraz zbrojenie, metalowe kształtowniki, rury itp., a także określa ich zagłębienie w betonie, grubość betonu i moduł jego sprężystości. USE lokalizuje wewnętrzne kanały kabli. Z dokładnością małą do średniej wykrywa defekty iniektu w kanałach metalowych i plastikowych. Z małą dokładnością wykrywa pustki i infiltracje wody w strefach kotwienia kabli. Nie nadaje się do wykrywania uszkodzeń cięgien. Nie wykrywa anomalii w kanałach wewnętrznych. Nie pokazuje kanałów znajdujących się za innymi kanałami. Nie nadaje się do badania elementów mających niepłaskie powierzchnie, miejsc bezpośrednio za i pomiędzy prętami zbrojenia.

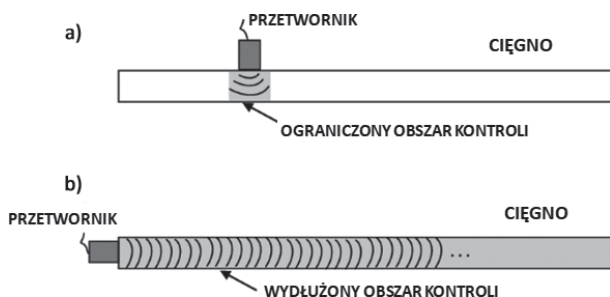
Metoda ultradźwięków o małej częstotliwości (Low Frequency Ultrasound – LFUT) – rys. 9. Działa jak konwencjonalne metody ultradźwiękowe. W badany element są emitowane impulsy naprężeń (zwykle fale P lub S). Miejsca z różną impedancją odbijają część fal i ich odbicia



Rys. 9. Zmotoryzowany system ultradźwięków małej częstotliwości (LUFT) w czasie badania kabla zewnętrznego [3]

wykrywają czujniki. Defekty i nieciągłości wykrywa się, mierząc czas przebiegu fali oraz jej częstotliwość/amplitudę. Fale o bardzo małej częstotliwości mają większą zdolność penetracji niż konwencjonalne. LFUT wykrywa defekty iniektu w zewnętrznych kanałach plastikowych bez oszacowania wielkości. Nie wykrywa defektów cięgien.

Metoda ultradźwięków ukierunkowanych (Ultrasonic Guided Wave – UGW) – rys. 10. Bardzo skutecznie określa ubytki przekroju, pęknięcia i zmniejszenie napięcia cięgien kabla, do których jest dostęp w strefie ich zakotwienia. Stosuje elektromagnetyczne przetworniki akustyczne. Nie wykrywa defektów iniektu oraz wody w kanałach kabli.



Rys. 10. Różnica badania cięgna falami ultradźwiękowymi: a) konwencjonalnego, b) falami ukierunkowanymi [Weiwei Zhang, Internet]

Radiografia rentgenowska. Jest techniką uzyskiwania wewnętrznych obrazów obiektu przez rzutowanie na niego wiązki elektromagnetycznych promieni Roentgena (X) o dużej energii. Badanie polega na koncentracji przez wymagany czas promieni rentgenowskich na badanym miejscu obiektu, z którego przeciwnej strony jest umieszczona błona filmowa. Promienie są wytwarzane przez akcelerator liniowy, cykliczny akcelerator cząstek lub generator promieni rentgenowskich. Aby uzyskać dwuwymiarowe obrazy trójwymiarowego obiektu skanuje się go promieniami pod różnymi kątami oraz stosuje komputerowe techniki rekonstrukcyjne. Ta metoda jest nazywana tomografią komputerową (CT). Radiografia rentgenowska wykrywa inkluzje i pustki w iniektach, pęknięcia i ubytki (także korozyjne) cięgien w kanałach znajdujących się płytko w betonie oraz w kanałach zewnętrznych, zarówno metalowych, jak i z plastiku. Wykrywa defekty w strefach zakotwienia kabli. Nie określa głębokości występowania defektów. Pokrycie kanałów betonem i otaczające je zbrojenie istotnie ograniczają przenikanie promieni X. Głębokość penetracji promieni zależy od stosowanej aparatury radiograficznej.

Radiografia gamma. Jest analogiczna do rentgenowskiej, z tym że promienie gamma mają większą moc niż promienie X. Jest wszechstronna: wykrywa zerwania, ubytki przekroju i inne defekty cięgien, także w miejscach z zagęszczonym zbrojeniem i elementami metalowymi, w tym w strefach zakotwień kabli. Jednak nie wykazuje korozji cięgien. Wykrywa pustki w iniektach. Skutecznie określa położenie i średnice kanałów wewnętrznych, cięgien i zbrojenia, ale nie podaje ich głębokości w betonie. Czasami wykrywa infiltrację wody. Jest techniką kosztowną, czasochłonną i potencjalnie niebezpieczną. Wymaga dostępu z dwóch stron do badanego elementu. Chociaż radiografia gamma bardzo skutecznie wykrywa wiele defektów kabli wewnętrznych, to ze względu na duży koszt sprzętu, zagrożenie zdrowia i czasochłonność badań jest rzadko stosowana w warunkach polowych.

Generalnie, metody radiograficzne są kosztowne, czasochłonne i potencjalnie niebezpieczne dla zdrowia oraz

wymagają dostępu do badanego elementu z dwóch stron. Są stosowane, gdy innymi metodami nie udaje się rozpoznać wewnętrznego stanu obiektu.

Czujniki światłowodowe. Są instalowane w kanałach kabli sprężających i podwieszających. Wykrywają odkształcenia ich cięgien. Do długookresowego kontrolowania odkształceń jest stosowany system SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibers Optiques). Jego czujnik składa się z dwóch jednomodowych światłowodów zainstalowanych w kablu. Jeden, pomiarowy, jest połączony z ciągną kabla, drugi – odniesienia, jest umieszczony luźno przy pierwszym. Wszystkie zmiany długości cięgien powodują zmianę długości światłowodu pomiarowego. Natomiast zmiana temperatury wpływa identycznie na oba światłowody, co umożliwi określenie jej wpływu na odkształcenia światłowodu pomiarowego. Na podstawie odkształceń cięgien wnioskuje się o ich pęknięciach i innych defektach oraz o aktywności korozji cięgien.

Tensometry strunowe. Są przymocowane do cięgien kabli podwieszających. Umożliwiają kontrolowanie ich reakcji na wiatr i ruch drogowy oraz odkształceń cięgien, a przez to zmian naprężeń w ciągnach powodowanych pęknięciami ich drutów [5].

Metoda przepływu powietrza. Przez strefę zakotwienia lub wywiercony w niej otwór wpompowuje się w kanał kabla suche powietrze. Mierzy się jego objętość, którą można swobodnie wpompować. Na tej podstawie ocenia się, czy w kanale są pustki. Innym zastosowaniem tej metody jest określanie wilgotności powietrza wypływającego z przeciwnego końca kanału lub z wywierconego przy nim otworu. Wilgotność wskazuje warunki w kanale – czy sprzyjają aktywności korozji.

Ocena stanu systemu kabli podwieszających na podstawie działających w nich sił. Inne wartości sił rozciągających kable niż projektowe wskazują na nieprawidłowość działania systemu podwieszeń. Na przykład uszkodzenie cięgien zmniejsza efektywność działania kabla i zwiększa siły rozciągające pozostałe kable. Wartość siły rozciągającej kable można zmierzyć wprowadzonym w zakotwienie kabla dynamometrem lub siłownikiem hydraulicznym albo mierząc zwis lub drgania kabla. Siła w kablu jest odwrotnie proporcjonalna do jego zwisu. Zwis mierzy się zazwyczaj metodami geodezyjnymi, laserem lub fotogrametrycznie.

Siłę w kablu na podstawie jego drgań określa się z zależności: $T = 4L^2f^2m$, gdzie: T – siła rozciągająca kable, m – masa kabla na jednostkę długości, L – długość kabla, f – częstotliwość drgań kabla. Nie jest to zależność dokładna, gdyż nie uwzględnia sztywności zginania kabla, ale akceptowana. Częstotliwość drgań mierzy się zainstalowanymi na kablu przyspieszeniomierzami lub dopplerowskim wibrometrem laserowym. Przyspieszeniomierze umożliwiają długookresową obserwację drgań kabli. Na podstawie ich analizy ocenia się stan systemu podwieszającego. Duże amplitudy drgań kabli podwieszających w dwóch mostach w Teksasie doprowadziły do stwierdzenia zmęczenia uszkodzeń kabli. W moście w Wenezueli drgania kabli wskazały, że siły w nich różnią się od określonych w projekcie nawet o 30% [13]. To doprowadziło do wykrycia, że nastąpiły „osiadania” zakotwień kabli podwieszających i do skorygowania napięć wszystkich kabli mostu.

Wibrometria. Polega na bezdotykowych pomiarach drgań kabli podwieszających wibrometrem laserowym wykorzystującym efekt *Dopplera*. Na podstawie wyników pomiarów ocenia się stan systemu podwieszeń mostu.

Kombinacje metod nieniszczących

Planując użycie metod nieniszczących, zawsze należy rozważyć zastosowanie ich kombinacji, gdyż poprawiają skuteczność kontroli. Niżej podano przykłady.

Kombinacja georadaru i echa ultradźwięków zwiększa skuteczność kontrolowania kabli w kanałach wewnętrznych kablobetonu. Metoda ultradźwięków jest powolna, natomiast georadar nie dostarcza wystarczająco szczegółowych informacji. Łącząc te metody można szybciej i dokładniej kontrolować kable, niż stosując te metody odrębnie. Georadar można użyć do wykrywania odcinków kabli wymagających zbadania, a metodę echa ultradźwięków – do szczegółowego skontrolowania w nich stanu kabla.

Kombinacja georadaru i echa uderzenia. Podobnie jak poprzednia, ta kombinacja metod umożliwia zwiększenie szybkości i dokładności kontroli stanu kabli w kanałach wewnętrznych. Georadarem określa się odcinki kabli do bardziej szczegółowego badania, które przeprowadza się metodą echa uderzenia.

Kombinacja metod sondowania dźwiękowego i wycieku strumienia magnetycznego. Jest przydatna do kontroli kabli w kanałach zewnętrznych. Metodą wycieku skutecznie wykrywa się defekty cięgien: korozję, pęknięcia i ubytki ich przekroju. Jednak w przypadku długich kabli jest to czasochłonne i dość kosztowne. Natomiast sondowanie dźwiękowe dokładnie, małym kosztem wykrywa puszki w kanałach kabli, a korozja, pęknięcia i ubytki przekroju cięgien w większości przypadków występują w miejscach pustek. Dlatego, łącząc metody sondowania i metody wycieku, można zmniejszyć całkowity koszt kontroli, stosując sondowanie dźwiękowe do wykrycia pustek, a metodą wycieku – do sprawdzania, czy w ich miejscach występują defekty cięgien.

Kombinacja metod wycieku strumienia magnetycznego i echa uderzenia. Nadaje się do kontroli kabli zewnętrznych. Metodą echa lokalizuje się w kanałach puszki, wadliwy iniekt i wodę. Metodą wycieku ocenia się w tych miejscach defekty cięgien. Stosując kombinację metod echa i wycieku magnetycznego szybciej wykrywa się defekty iniektu i cięgien.

Kombinacja tomografii podczerwieni i echa ultradźwiękowego. Może być stosowana do kontrolowania kabli wewnętrznych. Metoda tomografii podczerwieni jest czasochłonna, natomiast echa ultradźwiękowego – szybko wykrywa puszki w plastikowych kanałach osadzonych płytko w betonie. Dlatego w przypadku kontroli długich kabli racjonalne jest stosowanie metody echa do wykrywania miejsc podejrzanych, a tomografii – do ich szczegółowego skontrolowania. Ponieważ tomografia podczerwieni zwykle nie wykrywa defektów w kanałach osadzonych w betonie głębiej niż 5 cm, więc w takich przypadkach jej kombinacja z metodą ultradźwiękową nie daje korzyści.

Zakresy przydatności metod nieniszczących

- Metody wycieku strumienia magnetycznego szczególnie nadają się do wykrywania defektów cięgien kabli podwieszających i kabli sprężających w kanałach zewnętrznych, zarówno metalowych, jak i z plastiku (HDPE).
- Metody fal mechanicznych i wibracji: USE i echa uderzenia nadają się do wykrywania pustek i innych defektów iniektu oraz wody w wewnętrznych kanałach metalowych i niemetalowych; jednak obie metody mają małą do umiarkowanej dokładność lokalizacji defektów iniektu.

- Metody akustyczne wykrywają puszki i inne defekty iniektu oraz infiltracje wody w zewnętrznych kanałach metalowych.

- Kombinacje metod magnetycznych z sondowaniem akustycznym lub z metodą echa uderzenia wykrywają defekty cięgien i iniektu w zewnętrznych kanałach metalowych i plastikowych.

- Kombinacja metody akustycznej i termografii podczerwieni umożliwia wykrywanie defektów iniektu w końcowych kołpakach stref kotwienia.

- Żadna ze zbadanych metod nieniszczących i ich kombinacji nie wykrywa defektów cięgien (korozji, ubytków, pęknięć) w kanałach wewnętrznych grubo otoczonych betonem: w dewiatorach i strefach zakotwienia kabli sprężających w belkach oraz w zakotwieniach kabli podwieszających w pomoście i pylonach; tylko dwie metody: echa ultradźwiękowego i echa uderzenia, umożliwiają z dokładnością małą do średniej, wykrywanie w tych miejscach defektów iniektu.

Sposoby udostępniania do badań kabli podwieszających konstrukcje przeseł mostów

W zależności od posiadanych możliwości i przyjętych metod kontroli są stosowane:

- pomosty lub pojazdy kontrolne,
- wózki przejeżdżające wzdłuż kabli,
- roboty przemieszczające się na kablach,
- techniki alpinistyczne,
- zdalne sposoby kontroli.

Stosowane pomosty i pojazdy kontrolne są takie, jak w przeglądach mostów belkowych i łukowych; umożliwiają sprawdzanie stanu kabli tylko do pewnej wysokości i ich dolnych zakotwień (rys. 11).



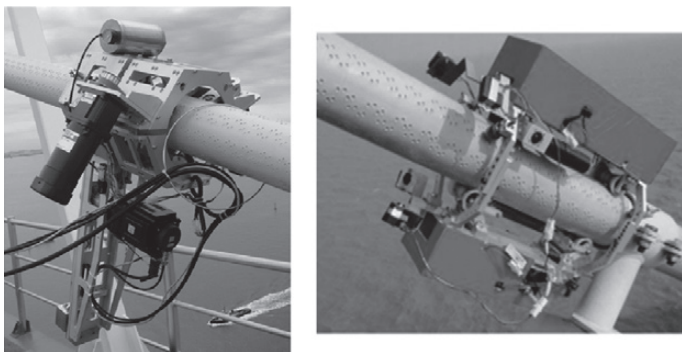
Rys. 11. Sprawdzenie dolnych zakotwień kabli podwieszających z pojazdu kontrolnego [1]

Wózki dla inspektorów są zawieszane na kontrolowanych kablach podwieszających i przesuwane wzdłuż nich systemem lin i wciągarek (rys. 12).

W celu umożliwienia zdalnych, nieniszczących kontroli stanu kabli podwieszających mosty opracowano wiele robotów inspekcyjnych (rys. 13). Są ustawicznie doskonałe, z dążeniem do zmniejszenia ich rozmiarów, zwiększenia sterowalności, możliwości stosowania różnych metod kontroli i jej szybkości. Mogą być wyposażone



Rys. 12. Wózek stosowany do kontroli stanu kabli podwieszających mostu Luling [Mehrabi i inni, 2010, Internet]



Rys. 13. Przykłady robotów do zdalnej kontroli stanu kabli podwieszających [15]

w kamery do wizualnej kontroli kabli. Przykładem jest robot opracowany w Korei Południowej w 2010 r. Składa się z trzech głównych podsystemów: robota wspinaczkowego, badań nieniszczących oraz analizy. Robot jest sterowany bezprzewodowo z użyciem oprogramowania przez inspektorów kontrolujących kable, w zakresie odległości do 600 m. System wspinaczkowy umożliwia poruszanie się robota na pochylonych kablach mostu. Jest napędzany silnikami elektrycznymi (może mieć napęd pneumatyczny lub magnetyczny). Zawiera samoczynną blokadę zapobiegającą spadnięciu w przypadku zaniku zasilania. Podsystem badań wyposażono w dwa moduły: wykrywania ubytków przekroju cięgien metodą wycieku strumienia magnetycznego oraz wykrywania korozji powierzchni cięgien na podstawie ich obrazu. Dane z podsystemu badań są przekazywane do podsystemu analizy. W Europie roboty do kontrolowania kabli podwieszających wyprodukowały m.in. firmy niemieckie: Alpin Technik z Lipska (robot „ATIS Cable”) oraz Tiefenbach GmbH z Duisburga (robot „MavisReCreator”). Niektóre roboty poruszają się wzdłuż kabla ruchem spiralnym.

Stosuje się czujniki bezprzewodowe, urządzenia optyczne, radarowe i fotogrametryczne oraz drony wyposażone w kamery filmowe/video. Fotogrametria umożliwia monitorowanie drgań i zwisu kabla podwieszającego. Uważa się, że w przyszłości będzie możliwe uzyskiwanie tą metodą trójwymiarowych obrazów zachowania się kabli na całej ich długości.

Zakończenie

1. Warunkiem bezpiecznego użytkowania mostów podwieszonych i kablobetonowych jest stworzenie w kraju zespołu specjalistów do kontrolowania kabli. Zespół powinien być wyposażony w sprzęt do wybranych nieniszczących metod badań stanu kabli, powinien zapewniać poprawne stosowanie tych metod i interpretowanie uzyskiwanych wyników badań.

2. Nie ma uniwersalnej nieniszczącej metody, którą można wiarygodnie ocenić stan kabla sprężającego i podwieszającego. Konieczne jest stosowanie kombinacji metod, wybranych na podstawie wiedzy i doświadczenia specjalistów przeprowadzających badania nieniszczące i interpretujących ich wyniki.

3. Należy wprowadzić obowiązek wymiany co 10 lat w każdym moście podwieszonym i w dużym moście sprężonym kablami zewnętrznymi przynajmniej dwóch kabli w celu przeprowadzenia badań wytrzymałości (do zniszczenia), aby sprawdzić wiarygodność ocen kabli uzyskiwanych w użytkowanym moście metodami nieniszczącymi.

PIŚMIENICTWO

- [1] NCRP 353. Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems. Transportation Research Board. Consultant *H. Tabatabai*. University of Wisconsin–Milwaukee. Washington 2006.
- [2] NCHRP 14-28. Condition Assessment of Bridge Post-Tensioning and Stay Cable Systems Using NDE Methods. Research Report. *S. Hurlbaas, M.B.D. Hueste, M.M. Karthik, T. Terzioglu*. Transportation Institute the Texas A&M University System College Station, 2016.
- [3] NCHRP 848. Inspection Guidelines for Bridge Post-Tensioning and Stay Cable Systems Using NDE Methods. Research Report. *Hurlbaas S., Hueste M., Karthik M., Terzioglu T.* Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, 2017.
- [4] *Cercone Ch., Naito C., Corven J., Pessiki S., Keller W., Pakzad S.*: Designing and Detailing Post Tensioned Bridges to Accommodate Non Destructive Evaluation. CORVENENG. Federal Highway Administration, ATLSS REPORT NO. 14-01, 2015 (Internet).
- [5] *Dowd J., Poser M., Frank K.H., Wood S.L., Williamson E.B.*: Bending Fatigue of Cable Stays. “Journal of Bridge Engineering”, Vol. 6, No. 6, Nov./Dec. 2001.
- [6] Maierhofer: Nondestructive Evaluation of Concrete Infrastructure with Ground Penetration Radar. 2003.
- [7] *Manoj B.*: Stay Cable Inspection. Infrastructure, The Masterbuilder – May 2013. (www.masterbuilder.co.in).
- [8] *Mehrabi A.*: Stay Cable Replacement the Luling Bridge. Louisiana Transportation Engineering Conference, 2009.
- [9] *Kurz J.H., Niese F., Szielasko K., Laguerre L., Gaillet L.*: NDT for Need Based Maintenance of Civil Infrastructure – Filame NDT a Franco-German Project for Monitoring and Inspection of Bridge Cables, Ropes and Pre-Stressed Elements (Internet).
- [10] *Pollock D.G., Dupuis K.J., Lacour B., Olsen K.R.*: Detection of voids in prestressed concrete bridges using thermal imaging and ground-penetrating radar.” Transportation Research Board, 2008.
- [11] *Runkiewicz L., Sieczkowski J.*: Ocena techniczna obiektów budowlanych z wykorzystaniem metod nieniszczących i seminiszczących “Badania Nieniszczące i Diagnostyka”, nr 3/2018.
- [12] *Salam E.I.A.*: System for Detection of Defects in Cables of Bridge Structures. University of Wisconsin-Milwaukee, 2013 (Internet).
- [13] *Sarcos-Portillo A., Navarro-Cerpa A., Garcia-Legl H.*: Inspection and Process of Tension of Cables of General Rafael Urdaneta Bridge. “Journal of Bridge Engineering”, Vol. 8, No. 4, July 2003.
- [14] *Wichmann H.H., Holst A., Budelmann H.*: Magnetostress Measurement and Material Defect Detection in Prestressed Tendons using Coil Sensor. Nondestructive Testing in Civil Engineering. NDCE 2009.
- [15] *Hae-Bum Yun, Se-Hoon Kim, Liuliu Wu, Jong-Jae Lee*: Development of Inspection Robots for Bridge Cables. “The Scientific World Journal”, Sept. 2013.