



Fundacja Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa
Czasopismo „Inżynieria i Budownictwo”

DYPLOM

w konkursie autorskim artykułów wyróżniających się
ujęciem tematyki i przydatnością praktyczną, opublikowanych
na łamach miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” w roku 2023

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

przyznała

I NAGRODĘ

za artykuł pt. „Metodyka badania elementów kablobetonowych z wykorzystaniem
komplementarnych metod nieniszczących” (nr 5-6/2023).

Laureatami zostali

dr inż. SŁAWOMIR CZARNECKI

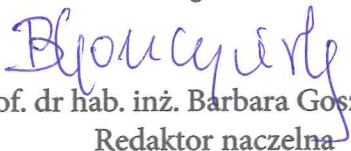
dr inż. arch. ANNA HOŁA

prof. dr hab. inż. JERZY HOŁA

dr hab. inż. ŁUKASZ SADOWSKI

SERDECZNIE GRATULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego


Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

W imieniu Rady Programowej


Prof. dr hab. inż. Anna Halička
Przewodnicząca Rady

Dr inż. SŁAWOMIR CZARNECKI (ORCID: 0000-0001-8021-943X)

Dr inż. arch. ANNA HOŁA (ORCID: 0000-0002-6105-7604)

Prof. dr hab. inż. JERZY HOŁA (ORCID: 0000-0001-7084-6990)

Dr hab. inż. ŁUKASZ SADOWSKI, prof. uczelni (ORCID: 0000-0001-9382-7709)

Politechnika Wrocławska

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Metodyka badania elementów kablobetonowych z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących

Methodology of testing cable concrete elements by means of complementary non-destructive methods

STRESZCZENIE: Artykuł przedstawia opracowaną metodykę badania elementów kablobetonowych z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących elektromagnetycznej tomografii ultradźwiękowej oraz młoteczkowej. Metodyka ta jest przydatna przede wszystkim w zakresie badania położenia kabli sprężających w elementach kablobetonowych oraz badań szczelności wypełnienia kanałów kablowych iniektem cementowym. Jej przydatność dla praktyki została poparta zamieszczonymi w artykule przykładowymi rezultatami badań wielkowymiarowego dźwigara kablobetonowego w budynku trzonolitym.

Słowa kluczowe: elementy kablobetonowe, metodyka badań, komplementarne metody nieniszczące.

ABSTRACT: The article presents the developed methodology for testing post-tensioned concrete elements using complementary non-destructive electromagnetic, ultrasonic and hammer tomography methods. This methodology is useful primarily in the field of testing the position of prestressing cables in post-tensioned concrete elements and testing the tightness of filling cable channels with cement grout. Its usefulness for practice was supported by the exemplary results of the research of a large-size post-tensioned concrete girder in a trefoil building, presented in the article.

Keywords: cable concrete elements, methodology, complementary non-destructive testing.

Pierwsze zastosowania konstrukcji kablobetonowych w Polsce datują się na lata 50. ubiegłego wieku, natomiast apogeum zastosowań miało miejsce w latach 60. i 70. tamtego stulecia [1, 2]. Pomimo że w kolejnych dekadach zainteresowanie tymi konstrukcjami wyraźnie zmalało, są one sporadycznie stosowane współcześnie [3]. W okresie największego zainteresowania konstrukcjami kablobetonowymi stosowano je przede wszystkim w mostownictwie, ale znanych jest również wiele zastosowań w budownictwie kubaturowym [4]. Były to przeważnie wielkowymiarowe dźwigary o dużej rozpiętości. Dla mostownictwa wykonywano je w zakładzie prefabrykacji, a w budynkach w miejscu wbudowania. Wiek wielu z tych konstrukcji, nadal eksploatowanych, jest bliski lub przekroczył już 50 lat. Pomimo tego, że są one poddawane okresowym przeglądom, wynikającym z przepisów prawa budowlanego, wraz z upływem czasu powstaje w stosunku do nich coraz więcej pytań i wątpliwości co do ich rzeczywistego stanu technicznego warunkującego dalsze bezpieczne użytkowanie i trwałość. Na problem ten uczuliła katastrofa wiaduktu kablobetonowego we Włoszech w 2018 roku [5]. Wątpliwości te dotyczą przede wszystkim niedostępnych

dla wizualnej oceny kabli sprężających, które są przecież kluczowe dla zapewnienia nośności i bezpieczeństwa użytkowania danego obiektu. Brakuje wiedzy m.in. w zakresie zgodności ich wykonania z projektem, w tym przede wszystkim rzeczywistego położenia kabli sprężających w przekroju elementu i możliwych ich przesunięć na etapie wykonawczym w pionie i poziomie oraz względem osi symetrii. Nie wiadomo, czy szczelne jest wypełnienie kanałów kablowych iniektem mającym za zadanie nie dopuścić do korozji stali, z której kable sprężające zostały wykonane.

Wiedza w tym zakresie ma duże znaczenie dla wiarygodnego prognozowania nośności, trwałości, podejmowania właściwych działań co do ich utrzymania, celowości działań modernizacyjnych. Zdaniem autorów, wiedza ta powinna być pozyskiwana na drodze badawczej, z wykorzystaniem właściwie dobranych metod nieniszczących [6-8]. Brakuje jednak w literaturze metodyki takich badań.

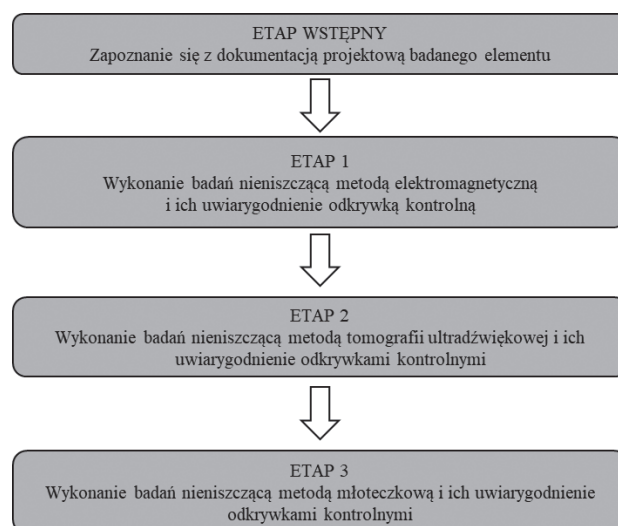
Autorzy podjęli się wypełnienia tej luki w literaturze i opracowali kilkietapową metodykę badań z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących, bazując

na wiedzy i doświadczeniu zdobytym podczas diagnozowania wielkowymiarowych dźwigarów kablobetonowych. Metodykę wzbogacono przykładem zastosowania. Zamierzeniem autorów jest podzielenie się tą wiedzą z badaczami, którzy staną przed problemem diagnozowania konstrukcji kablobetonowych.

Metodyka badań

Opracowaną czteroetapową metodykę, której schemat ogólny przedstawiono na rysunku 1, a schemat szczegółowy na rysunku 2, opisano poniżej. Metodykę rozpoczyna etap wstępny, w ramach którego należy zapoznać się z dokumentacją projektową badanego elementu kablobetonowego. W ramach etapu 1. należy wykonać badania metodą elektromagnetyczną [6], polegające na zlokalizowaniu w badanym elemencie kablobetonowym zbrojenia tradycyjnego w postaci stalowych prętów zbrojeniowych podłużnych i poprzecznych. Znajomość położenia tych prętów jest ułatwieniem dla badań prowadzonych w etapie 2., metodą tomografii ultradźwiękowej. Do badań elektromagnetycznych należy użyć jednego z dostępnych na rynku urządzeń, np. Profemetra. Badaniom należy poddać wszystkie dostępne powierzchnie elementu, a uzyskane rezultaty nanieść na element i na dokumentację rysunkową. Etap 1. kończy odkrywka kontrolna uwiarygadniająca badania nieniszczące.

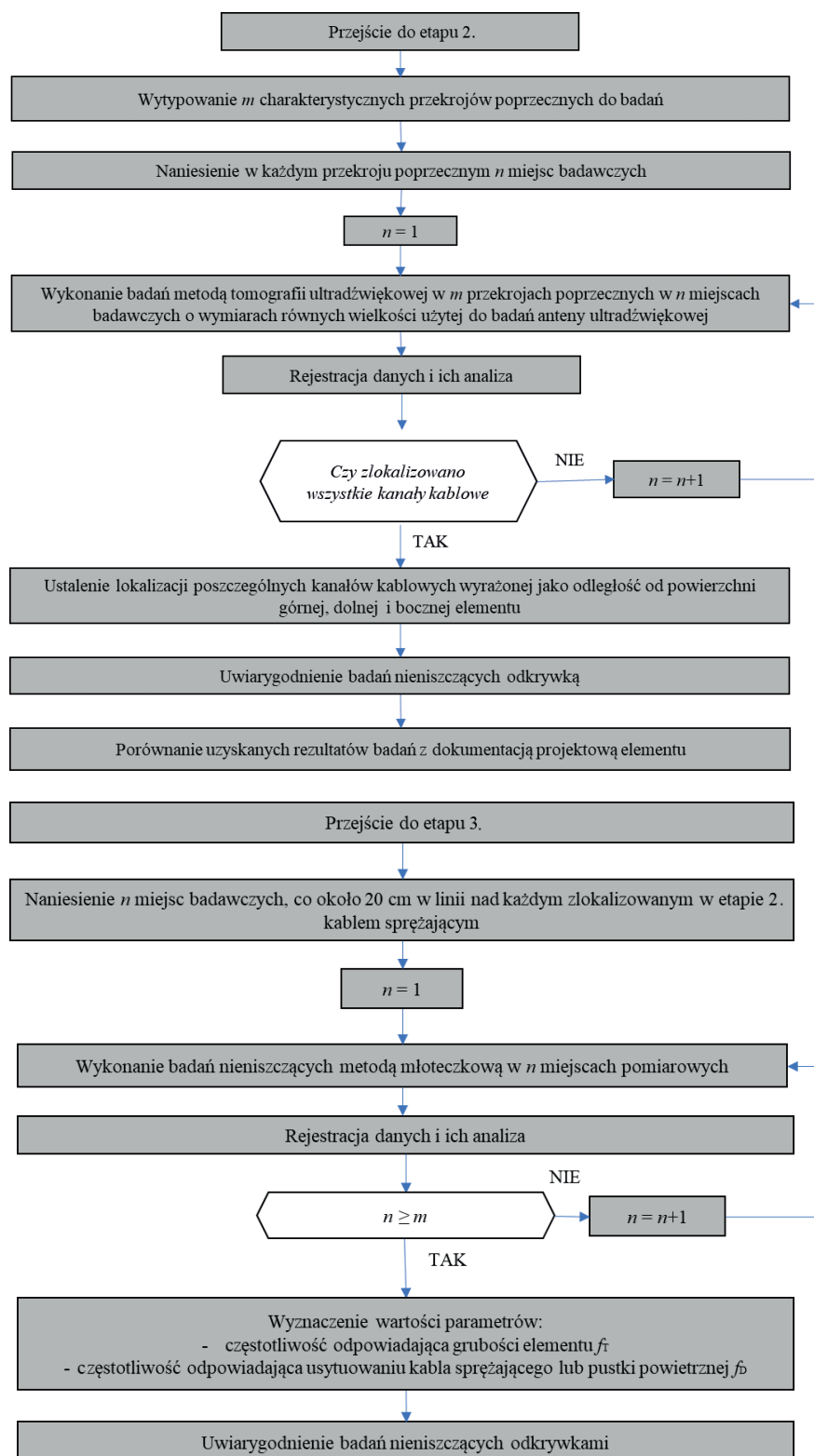
W etapie 2. należy wykorzystać metodę tomografii ultradźwiękowej [9], do zlokalizowania przedbiegu kanałów kablowych i umieszczonych w nich kabli sprężających, do oceny jakości obetonowania kanałów kablowych iniektem cementowym i zlokalizowania w ich obrębie ewentualnych pustek powietrznych spowodowanych nieobetonowaniem. Do tego celu należy użyć tomografu ultradźwiękowego. W skład tomografu wchodzi specjalna wielogłowicowa antena ultradźwiękowa i komputer wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym zapis danych i przedstawienie ich w postaci graficznego obrazu. Obecnie na rynku dostępnych jest kilka typów tomografów ultradźwiękowych, różniących się głównie wielkością anteny. Największa z nich ma 48 niezależnych głowic ultradźwiękowych, niewymagających stosowania środka sprzęgającego z powierzchnią betonu, dostosowujących się do nierówności powierzchni dzięki teleskopowemu zamocowaniu. Głowice te wzbudzają i następnie wprowadzają do betonu sygnały ultradźwiękowe oraz odbierają je i przetwarzają. Dzięki specjalistycznemu oprogramowaniu odebrane sygnały ultradźwiękowe są zapisywane cyfrowo i na tej podstawie jest tworzony obraz graficzny wnętrza betonu w postaci wielobarwnego zobrazowania. Badanie polega na przestawianiu anteny ultradźwiękowej na kolejne miejsca badawcze, w kierunku prostopadłym do jego długości wzdłuż szerokości albo wysokości elementu kablobetonowego. Jeśli badana jest powierzchnia górna albo dolna, to jest to szerokość, a w przypadku badania powierzchni bocznych jest to wysokość elementu. Wybór powierzchni do badań (górna, boczna) zależy od rodzaju badanego elementu i jego schematu statycznego. Do ustalenia przebiegu kanałów kablowych wystarczające



Rys. 1. Ogólny schemat metodyki badania elementów kablobetonowych z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących

jest wykonanie badań w m charakterystycznych przekrojach poprzecznych badanego elementu, w jednym przekroju w środku rozpiętości i w 4–5 przekrojach po lewej i prawej stronie, licząc od środka rozpiętości. W każdym przekroju należy wykonać badania w n miejscach badawczych. Wielkość miejsca badawczego jest równa wielkości użytej do badań anteny ultradźwiękowej, np. 500 na 100 mm. Wzbudzanie, odbieranie i przetwarzanie sygnałów akustycznych oraz tworzenie obrazu graficznego następuje w każdym miejscu badawczym. Tok postępowania ilustruje rysunek 2. Jeżeli zakres badań obejmuje również ocenę jakości obetonowania kanałów kablowych iniektem cementowym, to należy ponadto wykonać badania w strefach między przekrojami poprzecznymi, przedstawiając antenę ultradźwiękową wzdłuż każdego zlokalizowanego wcześniej kanału kablowego. Następnie należy uwiarygodnić rezultaty badań nieniszczących za pomocą odkrywki kontrolnej. Etap ten kończy porównanie uzyskanych rezultatów z dokumentacją projektową badanego elementu.

W etapie 3. do badań szczelności wypełnienia kanałów kablowych iniektem cementowym należy wykorzystać metodę młoteczkową (impact-echo) [10]. W metodzie tej w skład aparatury badawczej wchodzi głowica pomiarowa z zestawem specjalnych wzbudników stalowych oraz komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem. Metoda bazuje na wzbudzeniu i wprowadzeniu do badanego elementu, w poszczególnych punktach badawczych, fali sprężystej za pomocą wzbudnika umieszczonego na głowicy pomiarowej. Za pomocą tej samej głowicy dokonuje się odbioru powracającej fali sprężystej. Miejsca badawcze n należy rozmieścić w liniach nad zlokalizowanymi w etapie 2. kanałami kablowymi na całej ich długości, co około 20 cm. Odebraną przez głowicę w każdym miejscu pomiarowym falę sprężystą należy następnie poddać przetworzeniu przez specjalistyczne oprogramowanie, za pomocą transformaty Fouriera. Graficznym obrazem tego przetworzenia jest widmo amplitudowo-częstotliwościowe fali sprężystej, które następnie jest poddawane analizie.



Rys. 2. Szczegółowy schemat metodyki badania elementów kablobetonowych z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących – etap 2. i 3.

Na podstawie tej analizy w uzyskanym widmie wyróżnia się częstotliwość dominującą f_T odpowiadającą grubości badanego elementu oraz częstotliwość f_D odpowiadającą odbiciu się fali sprężystej od kabla sprężającego albo od pustki powietrznej, jeżeli pustka taka w danym miejscu badawczym istnieje. Brak szczelnego wypełnienia iniekt-cementowym kanału kablowego stanowi taką pustkę.

Badania kończy wykonanie odkrywek kontrolnych uwiarygadniających rezultaty uzyskane metodami nieniszczącymi. Wykonanie odkrywek wiąże się z otwarciem kanału kablowego w miejscu badawczym, w którym stwierdzono brak szczelnego wypełnienia iniekt-cementowym, oraz w celach porównawczych w miejscu badawczym niebudzącym wątpliwości.

Przykład zastosowania metodyki

W przykładzie zaprezentowano rezultaty badań jednego z czterech wielkogłównych dźwigarów kablobetonowych stanowiących konstrukcję wieńczącą żelbetonowy trzon w budynku trzonolinowym. Do dźwigarów tych podwieszono stropy budynku. Schemat konstrukcji z pokazanym profilem i wymiarami pojedynczego dźwigara ilustruje rysunek 3.

Dźwigar sprężono ośmioma zsolidaryzowanymi z betonem krzywoliniowymi kablami systemu BBRV (Birkenmeier, Brandestini, Roß, Vogt) [1]. Każdy kabel składał się z wiązki kołowej 72 drutów sprężających o średnicy 6 mm każdy, umieszczonych w osłonie rurowej gufrowanej o średnicy 60 mm, wykonanej z blachy stalowej. Formę kołową wiązki zapewniono za pomocą wewnętrznej spirali usztywniającej. Po sprężeniu kabli wprowadzono ciśnieniowo do wewnątrz osłony rurowej iniekt cementowy, mający za zadanie wypełnić wszystkie puste przestrzenie, otulić druty stalowe i zabezpieczyć je przed korozją.

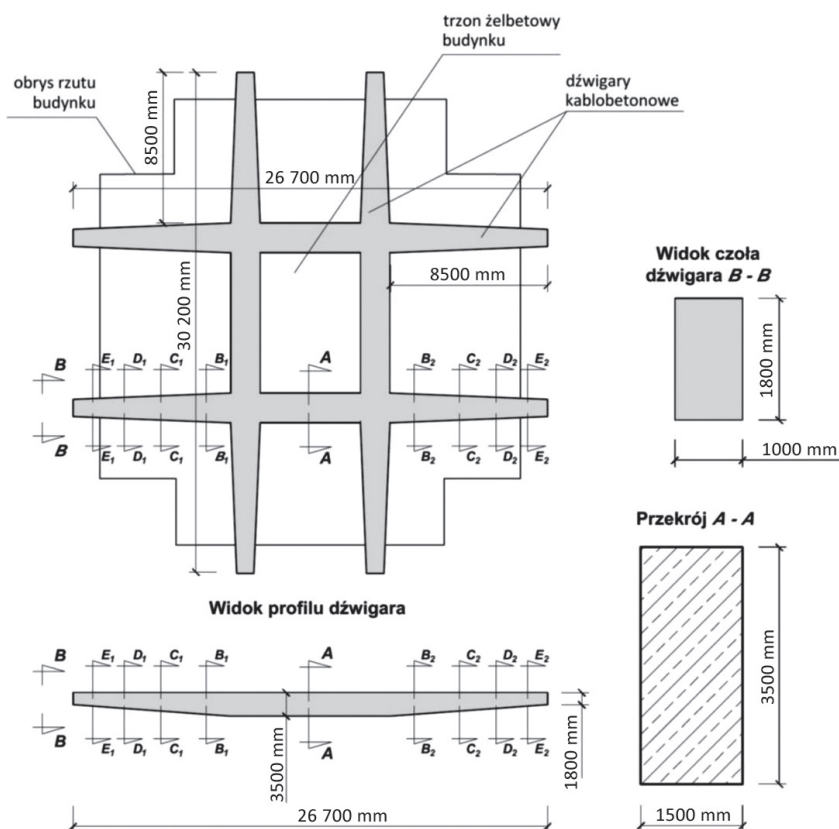
Celem badań było:

- zlokalizowanie kabli sprężających;
- ustalenie ich rozmieszczenia w przekroju poprzecznym dźwigara i porównanie tego rozmieszczenia z projektem;
- określenie ewentualnych przesunięć poszczególnych kabli w pionie i w poziomie w stosunku do ich zaprojektowanego położenia;
- ustalenie, czy iniekt cementowy szczelnie wypełnia kanały kablowe.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących wg zaprezentowanej wyżej

metodyki, w siedmiu przekrojach poprzecznych dźwigara zaznaczonych na rysunku 3. Natomiast na rysunkach 4 pokazano przykładowo rezultaty badań uzyskane w przekroju środkowym A-A.

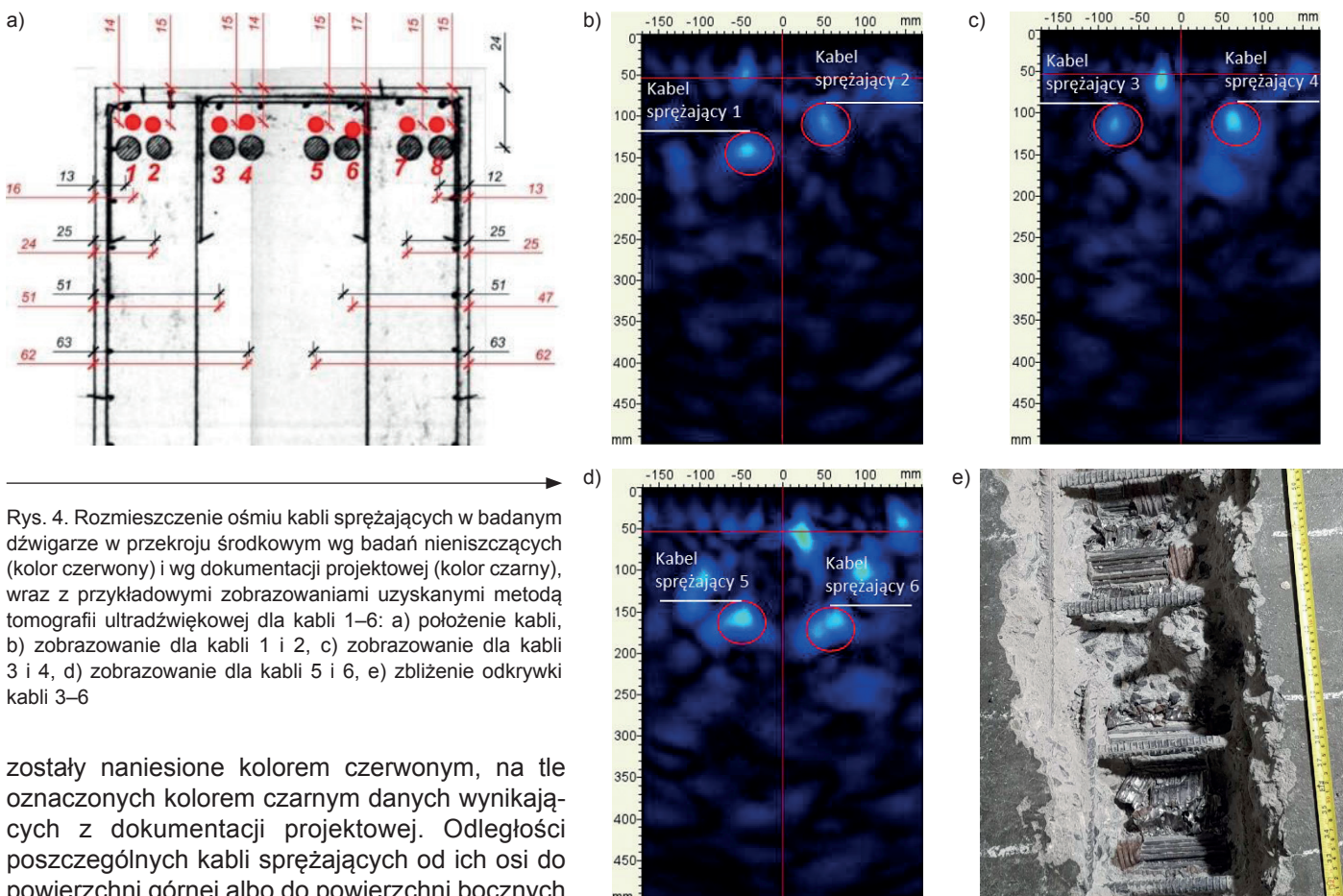
I tak na rysunku 4 zamieszczono wyniki badań uzyskane z wykorzystaniem metody tomografii ultradźwiękowej. Na rysunku 4a rezultaty badań nieniszczących



Rys. 3. Schemat badanej konstrukcji wieńczącej żelbetowy trzon budynku trzonolinowego składającej się z czterech dźwigarów kablobetonowych

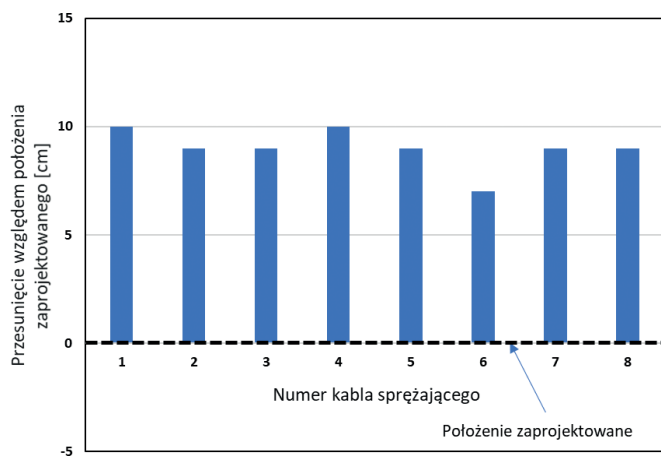
dźwigara zwymiarowano na tym samym rysunku w centymetrach, również kolorami czerwonym i czarnym. Porównanie wymiaru podanego kolorem czerwonym z wymiarem podanym kolorem czarnym pozwala określić dla każdego kabla sprężającego przesunięcie w centymetrach, w pionie i w poziomie w stosunku do położenia zaprojektowanego. Z analizy rysunku 4 wynika, że kable sprężające jest osiem i wszystkie wykazują przesunięcie w górę w stosunku do położenia projektowanego. Wartości przesunięć nie przekraczają 10 cm, co ilustruje rysunek 5.

Z kolei na rysunkach 6 i 7 zamieszczono rezultaty badań szczelności wypełnienia iniektem cementowym kanałów kablowych, uzyskane metodą młoteczkową. Rezultaty badań przeprowadzone tą metodą wykazały, że wypełnienie kanałów kablowych jest generalnie szczelne, ale sporadycznie występują miejsca wykazujące brak pełnej szczelności. Na dowód tego na rysunkach 6 i 7 zostały pokazane dwa widma amplitudowo-częstotliwościowe będące wynikiem przetworzenia przez transformatę Fouriera widma amplitudowo-czasowego fali sprężystej, najpierw wzbudzanej w betonie za pomocą specjalnego stalowego wzbudnika,

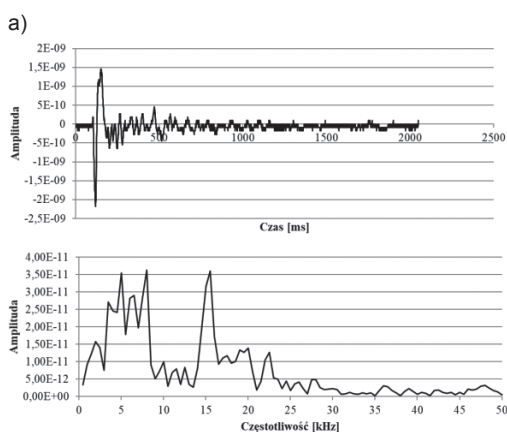


Rys. 4. Rozmieszczenie ośmiu kabli sprężających w badanym dźwigarze w przekroju środkowym wg badań nieniszczących (kolor czerwony) i wg dokumentacji projektowej (kolor czarny), wraz z przykładowymi zobrażowaniami uzyskanymi metodą tomografii ultradźwiękowej dla kabli 1–6: a) położenie kabli, b) zobrażowanie dla kabli 1 i 2, c) zobrażowanie dla kabli 3 i 4, d) zobrażowanie dla kabli 5 i 6, e) zbliżenie odkrywk kabli 3–6

zostały naniesione kolorem czerwonym, na tle oznaczonych kolorem czarnym danych wynikających z dokumentacji projektowej. Odległości poszczególnych kabli sprężających od ich osi do powierzchni górnej albo do powierzchni bocznych

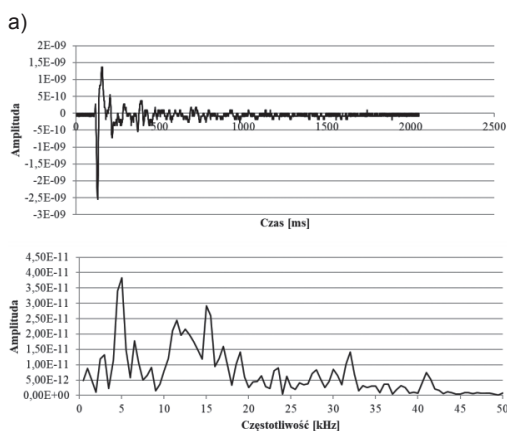


Rys. 5. Graficzna ilustracja wartości przesunięć poszczególnych kabli sprężających w górę, w stosunku do położenia zaprojektowanego



Rys. 6. Kanał kablowy, w którym wypełnienie iniektem cementowym nie jest szczelne: a) widmo amplitudowo-częstotliwościowe uzyskane metodą młoteczkową, b) widok otwartego kanału kablowego

a następnie odebranej przez głowicę odbiorczą. Widmo pokazane na rysunku 6a dotyczy miejsca badanego, w którym brakuje szczelnego wypełnienia iniektem cementowym, co potwierdziła wykonana w tym miejscu odkrywka kontrolna pokazana na rysunku 6b. Natomiast widmo pokazane na rysunku 7a dotyczy miejsca badanego, w którym jest szczelne wypełnienie iniektem, co potwierdziła wykonana w tym miejscu odkrywka pokazana na rysunku 7b.



Rys. 7. Kanał kablowy ze szczelnym wypełnieniem iniektem cementowym: a) widmo amplitudowo-częstotliwościowe uzyskane metodą młoteczkową, b) widok otwartego kanału kablowego

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano metodykę badań elementów kablobetonowych, z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących elektromagnetycznej tomografii ultradźwiękowej i młoteczkowej. Zaprezentowano również przykład wykorzystania tej metodyki w badaniach wielkowymiarowego dźwigara kablobetonowego wchodzącego w skład konstrukcji wieńczącej żelbetowy trzon budynku trzonolinowego. Rezultaty badań nieniszczących tego dźwigara uwiarygodniono odkrywkami, pokazującymi przydatność metod wykorzystanych w opracowanej metodyce.

Autorzy mają nadzieję, że zamieszczona w referacie metodyka badań oraz zaprezentowane w przykładzie rezultaty będą przydatne badaczom, którzy staną przed problemem diagnozowania konstrukcji i elementów kablobetonowych.

PIŚMIENICTWO

- [1] Kaufman S., Olszak W., Eimer Cz.: Konstrukcje sprężone. Arkady, Warszawa 1965.
- [2] Sierko R.: Konstrukcje kablobetonowe. XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk 2010.
- [3] Szydłowski R., Łobuzek B.: Współczesne rozwiązania kablobetonowych konstrukcji sprężonych. XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk 2018, s. 317 – 388.
- [4] Hoła J., Sadowski Ł., Czarnecki S., Hoła A.: Diagnostyka kablobetonowych ustrojów nośnych budynku trzonolinowego metodami nieniszczącymi. XVII Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego. Kielce-Cedzyna 2022, s. 261 – 275.
- [5] Invernizzi S., Montagnoli F., Carpinteri A.: Fatigue assessment of the collapsed XXth Century cable-stayed Polcevera Bridge in Genoa, *Procedia Structural Integrity*, vol. 18, 2019, pp. 237-244.
- [6] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych – Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [7] Hoła J., Runkiewicz L.: Zasady wykonywania ekspertyz konstrukcji żelbetowych. W: Diagnostyka obiektów budowlanych – zasady wykonywania ekspertyz. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020, s. 133 – 163.
- [8] Hoła J., Sadowski Ł.: Wiarygodność metod nieniszczących stosowanych w diagnostyce obiektów budowlanych. W: Diagnostyka obiektów budowlanych – Część 2. Badania i oceny elementów i obiektów budowlanych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021, s. 463 – 494.
- [9] Sanderson T., Freese K., Liu Z.: Concrete bridge deck overlay assessment using ultrasonic tomography, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, 2022, e00878.
- [10] Jaeger B.J., Sansalone M.J., Poston R.W. (1996): Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the impact-echo method. *Structural Journal*, 93(4), pp. 462-473.