

Arkadiusz Madaj, Wojciech Siekierski, Iwona Jankowiak, Krzysztof Ziopaja

Inżynierii Lądowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechnika Poznańska

Współczesne problemy budownictwa mostowego

Contemporary problems in bridge construction

Streszczenie

Budownictwo mostowe jest inspiracją do działalności naukowo-badawczej i wdrożeniowej. Odzwierciedlają to zainteresowania i osiągnięcia pracowników Zakładu Budowy Mostów i Dróg Kolejowych. Badania zagadnień związanych z pracą statyczną, nośnością i trwałością konstrukcji mostowych prowadzone są równoległe z działalnością nakierowaną na wprowadzanie do inżynierii mostowej rezultatów tych badań.

Abstract

Bridge construction inspires scientific research and implementation activities. This is reflected in the interests and achievements of the employees of the Division of Bridges and Railway Engineering. Research on issues related to the static behaviour, load-bearing capacity and durability of bridge structures is conducted in parallel with activities aimed at introducing the results of this research into bridge engineering.

1. Wszechstronna działalność w dziedzinie budownictwa mostowego

(Arkadiusz Madaj)

Praktyczne wdrażanie i propagowanie nowych technologii i metod wzmacniania konstrukcji betonowych. Corocznym podsumowaniem tych prac było organizowanie konferencji ogólnopolskich, na których omawiano te zagadnienia. Do tej pory odbyło się 29 konferencji. Efektem tych badań jest również monografia o zasięgu ogólnopolskim (wydawnictwo WKiŁ – do tej pory cztery wydania dotyczące metodologii badań (diagnostyki) oraz sposobów napraw i wzmacniania konstrukcji mostowych).

Prowadzenie badań *in situ* w celu potwierdzenia skuteczności wzmacniania konstrukcji za pomocą sprężenia zewnętrznego. Ocena wpływu zarysowania konstrukcji sprężonych na stany graniczne nośności i użyteczności. Badania eksperymentalne i teoretyczne nad redystrybucją sił w statycznie niewyznaczalnych konstrukcjach sprężonych i wpływem zespolenia (iniekcji) cięgien sprężających na tworzenie się przegubu plastycznego, jego „sztywnością” i opisem matematycznym przegubu plastycznego umożliwiającym stosowanie zaproponowanego modelu przegubu plastycznego do analizy stanów granicznych nośności i użyteczności betonowych konstrukcji sprężonych (praca doktorska mgr inż. Katarzyny Mossor).

Rozwijanie badań analitycznych nad przyczynami korozji mostowych konstrukcji sprężonych. Opracowywanie zaleceń dotyczących diagnozowania przyczyn korozji mostowych konstrukcji sprężonych (korozji kabli sprężających) i sposobów zapobiegania im.

Prowadzenie badań nad stanami granicznymi nośności i użyteczności mostów zespolonych stalowo-betonowych. Prace nad zagadnieniami redystrybucji sił wewnętrznych w ciągłych belkach zespolonych – w zakresie sprężystym i pozasprężystym. Opracowanie modelu betonu rozciąganego w mostach zespolonych stalowo-betonowych. Udział w opracowaniu projektu i następnie badaniach *in situ* mostu zespolonego o najdłuższym zrealizowanym w Polsce przęśle o tzw. podwójnym zespoleniu.

Wdrażanie do praktyki projektowej eurokodów, zwłaszcza EC2 (konstrukcje betonowe) i EC 4 (konstrukcje zespolone stalowo-betonowe). Efektem tego są monografie o zasięgu ogólnopolskim dotyczące projektowania mostowych konstrukcji betonowych i zespolonych stalowo-betonowych (Wydawnictwo WKiŁ). Aktywny udział w KT 251 Polskiego Komitetu Normalizacji.

Aktywna działalność na rzecz Poznania w zakresie infrastruktury komunikacyjnej, w tym sprawowanie nadzoru naukowego nad realizacją inwestycji mostowych. Prace w jury konkursów na kładki dla pieszych.

Aktywny udział w pracach Wielkopolskiej Izby Inżynierów Budownictwa (komisja ds. szkoleń, komisja ds. uprawnień budowlanych).

Działalność na rzecz środowiska mostowców – wieloletni przewodniczący oddziału Wielkopolskiego Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej, członek Krajowej Rady i Zarządu ZMRP, przewodniczący ZMRP.

Współinicjator powstania oraz sekretarz redakcji czasopisma „Archives of Institute of Civil Engineering”.

Rozwijanie współpracy z czołowym producentem europejskim konstrukcji gruntowo-powłokowych ViaCon dotyczącej wdrażania do budownictwa komunikacyjnego nowych generacji konstrukcji z blach falistych, w tym współpraca przy projektowaniu największych konstrukcji tego typu na świecie. Opracowanie pierwszej w Polsce monografii na temat projektowania i wykonywania konstrukcji z blach falistych. Konsekwencją współpracy z firmą ViaCon było zorganizowanie trzech międzynarodowych konferencji (o zasięgu ogólnosiwiatowym – każdorazowo udział ponad 150 uczestników) dotyczących konstrukcji podatnych z blach falistych (główny organizator – przewodniczący komitetu organizacyjnego).

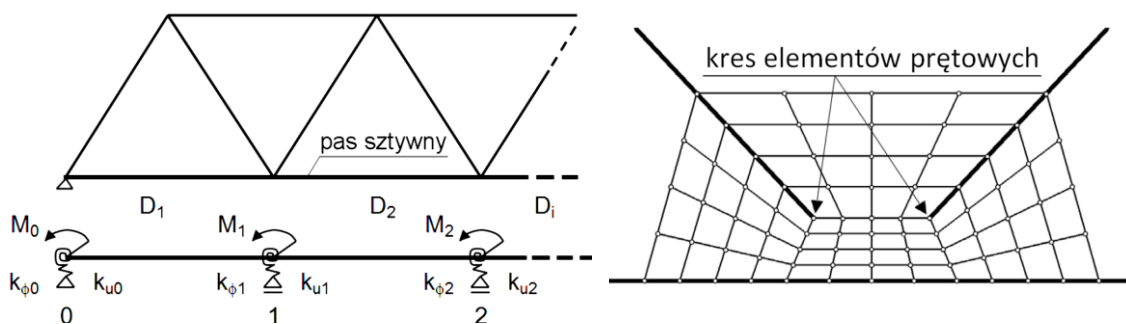
Opracowanie ponad 200 publikacji (wybrane [1-11]). Autorstwo kilkuset ekspertyz.

2. Analiza pracy statycznej przęseł kratownicowych z pasem sztywnym (Wojciech Siekierski)

Przęsła kratownicowe z pasem sztywnym stają się typowym rozwiązaniem konstrukcyjnym. Dzieje się tak między innymi za sprawą możliwości oferowanych przez współczesne metody analizy konstrukcji, w szczególności metodę elementów skończonych. Mimo to wciąż powstają metody analityczne, które – choć obciążone zwykle uproszczeniami – ułatwiają projektowanie i doraźną ocenę rozkładu sił wewnętrznych, nośności lub sztywności.

Ponieważ ustrój dźwigara kratownicowego z pasem sztywnym można traktować jako belkę wzmocnioną kratownicą, opracowano analityczną metodę modelowania pasa sztywnego jako belki ciągłej, zamocowanej na podporach sprężystych na obrót i na przesuw w kierunku pionowym [12]. Dodatkowo uwzględniono możliwość mimośrodowych połączeń w węzłach pasa sztywnego (rys. 1). Wyniki analizy rzeczywistego dźwigara mostowego, przeprowadzone wg zaproponowanej metody oraz metody elementów skończonych, wykazały zadowalającą zgodność. Przedstawiona metoda analityczna może być wykorzystana na etapie wstępnego projektowania konstrukcji.

W związku z faktem, że pas sztywny przejmuje obciążenia z poprzecznicy międzywęzłowych, rozkład i wartości momentów zginających są zasadniczo odmienne od spotykanych w dźwigarach kratownicowych połączonych z poprzecznicami jedynie w węzłach teoretycznej siatki kratownicy. Wpływa to na rozkład naprężeń w blachach węzłowych, za których pośrednictwem z pasem sztywnym połączone są krzyżulce. Ten problem analizowano m.in. w [13].



Rys. 1. Schemat statyczny pasa sztywnego jako belki ciągłej na podporach sprężystych, z uwzględnieniem mimośrów w węzłach pasa sztywnego [12]

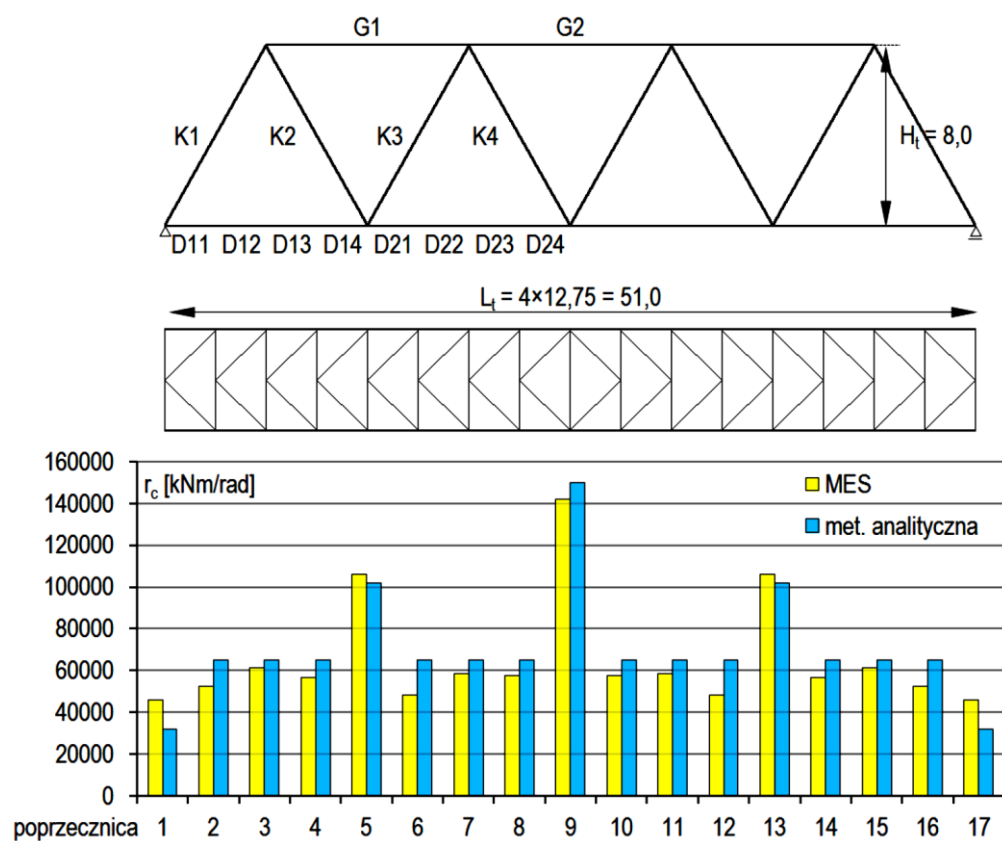
Rys. 2. Schemat fragmentu modelu dźwigara kratownicowego utworzonego z elementów prętowych z modelem blachy węzłowej z elementów powłokowych [14]

W konsekwencji przeprowadzonych badań opracowano metodę efektywnego modelowania dźwigara kratownicowego z uwzględnieniem blach węzłowych [14]. Polega ona na zastąpieniu, w modelu utworzonym z elementów prętowych, łączenia tych elementów w bezwymiarowych węzłach łączeniem za pośrednictwem elementów powłokowych reprezentujących blachy węzłowe, z uwzględnieniem ich rzeczywistych wymiarów (rys. 2). Dzięki temu możliwe jest oszacowanie poziomu naprężeń w blachach węzłowych.

W odniesieniu do pomostów zespolonych przęseł kratownicowych z pasem sztywnym dokonano analizy numerycznej skutków pęknięć poprzecznic w eksploatowanym moście kolejowym [15]. Zadanie to było inspiracją do opracowania analitycznej metody szacowania stopnia zamocowania poprzecznic w dźwigarze kratownicowym [16], którą można stosować do doraźnej oceny nośności. W przypadku analizowanych przęseł metoda analityczna i metoda elementów skończonych dały zbliżone oszacowanie stopnia zamocowania. Zauważono, że w grupie poprzecznic węzłowych i grupie poprzecznic międzywęzłowych stopień zamocowania zmienia się w niewielkim zakresie.

Korzystając z wyników badań przęseł mostowych pod próbnym obciążeniem statycznym, określono analityczną metodę szacowania sztywności przy zginaniu przęseł kratownicowych z pasem sztywnym i pomostem zespolonym typu stal (poprzecznic) – beton [17]. Uwzględniono deformację poprzecznic na odcinkach niezespolonych oraz podatność na ścinanie związaną z układem zakratowania. W przypadku analizowanych przęseł uzyskano wyraźne różnice wartości stopnia zamocowania między poprzecznicami z grupy węzłowych (połączonych z węzłami dźwigara w przęśle) i grupy międzywęzłowych (rys. 3). Na tej podstawie opracowano metodą szacowania częstości drgań własnych przęseł kratownicowych o wspomnianej wcześniej konstrukcji [18]. Wyniki obliczeń wykazały zadowalającą zgodność z wynikami pomiarów pod próbnym obciążeniem dynamicznym.

W ramach analizy pracy statycznej przęseł kratownicowych z pasem sztywnym opracowano także metodę analityczną szacowania efektów skurczu płyty betonowej pomostu zespolonego w przęśle kolejowym [19].



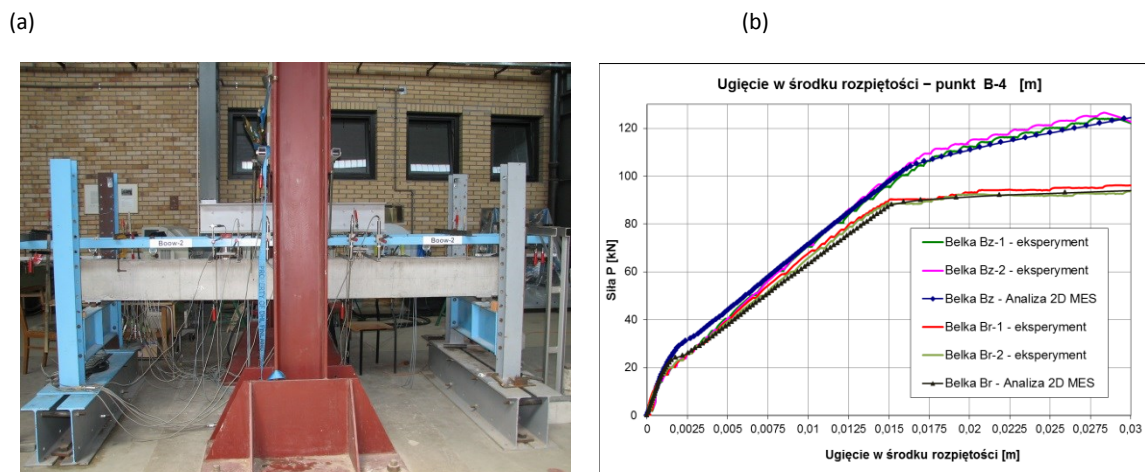
Rys. 3. Rozkład stopnia zamocowania poprzecznic w dźwigarze kratownicowym z pasem sztywnym w przęśle kolejowym z pomostem zespolonym

3. Modelowanie wzmocnienia dźwigarów mostowych za pomocą taśm węglowych (Iwona Jankowiak)

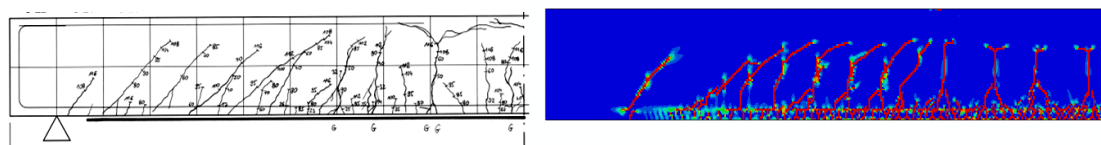
Jednym ze sposobów zwiększenia nośności konstrukcji może być zastosowanie taśm z włókien węglowych (CFRP). Wzmocnienie polega na mocowaniu (doklejaniu) materiałów kompozytowych do powierzchni wzmocnianej konstrukcji. Stosuje się dwa sposoby mocowania taśm: tzw. sposób bierny lub czynny, czyli bez lub z wcześniejszym napięciem taśmy przed jej aplikacją na konstrukcji. Wzmocniane w przedstawiony sposób mogą być zarówno belki żelbetowe [20, 21, 22, 24], jak i stalowo-betonowe dźwigary zespolone [23]. W przypadku belek żelbetowych, dzięki użyciu materiałów z włókien

węglowych, można zwiększyć ich nośność tak na zginanie, jak i na ścinanie, w zależności od miejsca, ilości i konfiguracji naklejanych taśm. Natomiast w przypadku dźwigarów zespolonych wzmocnienie może być aplikowane na płycie betonowej w strefie działania momentów powodujących jej rozciąganie, co również wpływa na poprawę nośności na zginanie całego dźwigara. W obu przypadkach aplikacja materiałów kompozytowych wpływa na zmianę układu rys i zmniejszenie ich szerokości, co znacznie poprawia trwałość konstrukcji.

Podjmując decyzję o wzmocnieniu konstrukcji, powinno się to zrobić w sposób najbardziej efektywny – biorąc pod uwagę zarówno stany graniczne nośności, jak i użyteczności. Jednym ze sposobów określenia najbardziej skutecznego sposobu wzmocnienia jest zastosowanie metod numerycznych. Wymaga to jednak opracowania poprawnego modelu obliczeniowego, który został wcześniej pozytywnie zweryfikowany badaniami laboratoryjnymi. Oprócz porównania rzeczywistych nośności badanych elementów z nośnościami otrzymanymi w analizach numerycznych można porównać również wykresy przedstawiające ścieżki obciążenia (ugięcia) belek (rys. 4) czy rzeczywiste układy zarysowania elementów, które mogą być porównane z mapami przedstawiającymi rozkłady odpowiednich parametrów reprezentujących uszkodzenie struktury materiału. Przykładem takiego parametru może być np. parametr uszkodzenia materiału wskutek rozciągania d_t (rys. 5). Tylko takie sprawdzone modele i całe procedury modelowania mogą zostać wykorzystane w badaniach parametrycznych do oceny skuteczności wzmocnienia dźwigarów z zastosowaniem bardziej złożonych sposobów i układów materiałów wzmocniających, a nie te, które były testowane laboratoryjnie (rys. 6). Takie analizy parametryczne mogą być również wykorzystane we wstępnej analizie przypadków, które byłyby bardzo kosztowne i trudne do realizacji w warunkach laboratoryjnych. Przykładem mogą być tu przypadki używania taśm CFRP wstępnie naprężanych do wzmocnienia zarówno belek żelbetowych [21], jak i płyt rozciąganych stalowo-betonowych dźwigarów zespolonych [23]. Analizy parametryczne dają dodatkowo szansę, dzięki możliwości wcześniejszego rozważenia wielu przypadków, na właściwe przygotowanie się do planowanych badań na elementach w skali rzeczywistej.



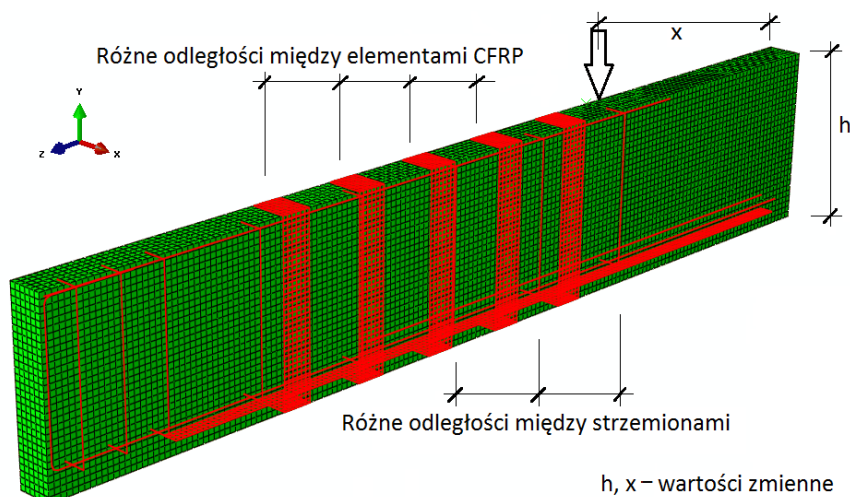
Rys. 4. (a) belka żelbetowa na stanowisku podczas badania (bierna metoda wzmocnienia taśmami CFRP) [20], (b) porównanie wyników MES z wynikami laboratoryjnymi: wykres ugięcia środka belki bez wzmocnienia oraz belki wzmocnionej taśmami CFRP



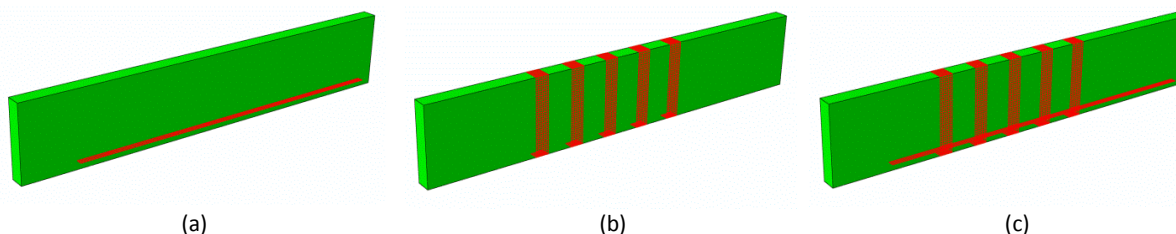
Rys. 5. Porównanie zarysowania belek wzmocnionych taśmą CFRP z wynikami analiz MES dla modelu o siatce 5 mm – układ zarysowania z badań i mapa parametru uszkodzenia d_t dla obciążenia $P = 120$ kN [20]

Doświadczenia uzyskane przy badaniach eksperymentalnych na elementach w skali rzeczywistej oraz w analizach numerycznych mogą być wykorzystane w ogólnej ocenie efektywności wzmocnienia taśmami CFRP różnych elementów konstrukcyjnych pracujących w rzeczywistych konstrukcjach. W przypadku belek żelbetowych analizy parametryczne mogą dotyczyć zarówno dużej różnorodności i zmienności

elementów wzmacnianych (tzn. różnych przypadków belek o zmiennych gabarytach, różnym stopniu zbrojenia i jego układzie), jak i różnych ilości oraz układu elementów wzmacniających (rys. 6 i rys. 7). W każdym z powyższych przypadków analizowanych numerycznie możliwe jest również zaaplikowanie taśm pracujących biernie (bez wstępnego naciągu), jak i czynnie (w tym dodatkowo z różnym stopniem wstępnego naprężenia taśmy przed jej aplikacją) [21]. Ponadto jest przy tym możliwe uzyskanie nie tylko informacji na temat finalnej postaci zniszczenia elementu wzmocnionego, ale również dotyczących miejsca inicjacji i charakteru propagacji rysy, która mogła zapoczątkować proces ostatecznego uszkodzenia elementu [22].



Rys. 6. Model numeryczny ćwiartki belki z definicją parametrów zmiennych rozpatrywanych w analizie parametrycznej [24]

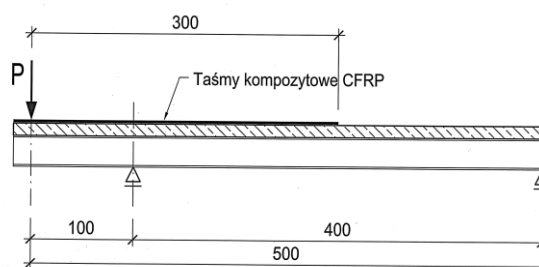


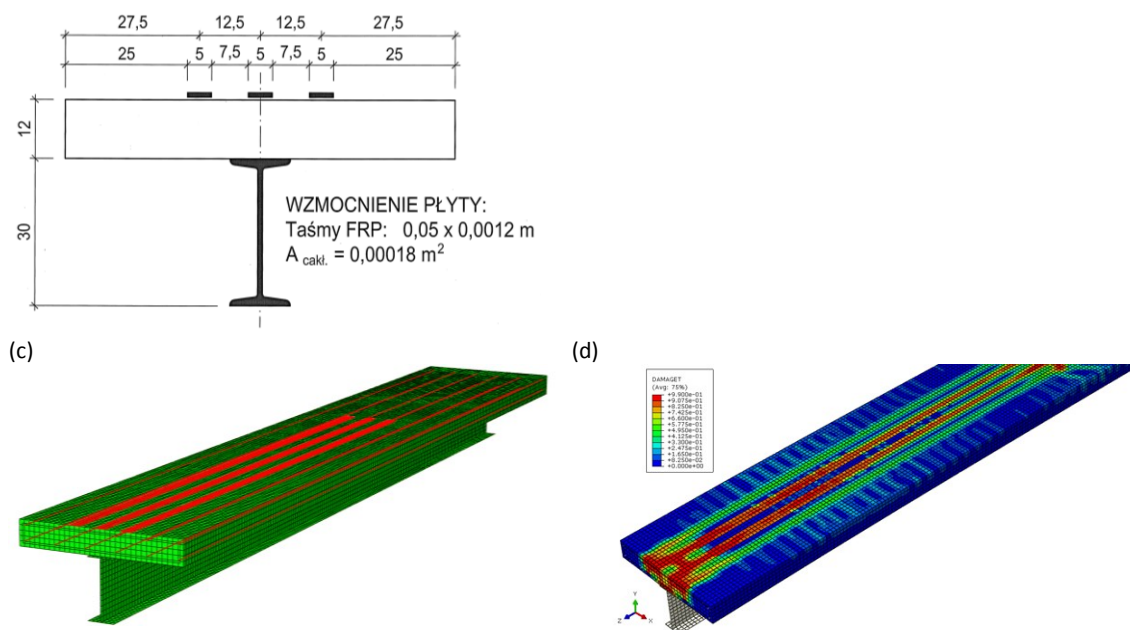
Rys. 7. Różne przypadki wzmocnienia belki żelbetowej taśmami kompozytowymi (wszystkie elementy wzmacniające są pokazane kolorem czerwonym na modelu numerycznym ¼ belki) [24]

Analizy numeryczne na wcześniej zweryfikowanych doświadczalnie modelach dostarczają również dużej wiedzy o zachowaniu się belek zespolonych w układach ciągłych, gdzie wzmacniane taśmami węglowymi mogą być płyty pracujące w strefie rozciąganej (rys. 8). Taśmy mogą być aplikowane na płycie w różnych układach i w różnej ilości, co w sposób znaczący wpływa na efektywność tego typu wzmocnienia belki zespolonej. Również w tym przypadku taśmy mogą być przyklejane do powierzchni wzmacnianych bez naciągu lub ze wstępnym naciągiem [23].

(a)

(b)





Rys. 8. (a) przekrój poprzeczny belki zespolonej z układem taśm CFRP, (b) widok z boku na analizowaną belkę zespoloną, (c) model numeryczny belki ze wskazanym zbrojeniem i wzmacniającymi płytę taśmami CFRP, (d) mapa rozkładu parametru zniszczenia d_t na płycie rozciąganej wzmacnionej taśmami wstępnie naprężonymi [23]

Niezwykle istotnym elementem efektywnej analizy parametrycznej jest poprawnie opisany i zdefiniowany model numeryczny. We wszystkich przeprowadzonych analizach wykorzystano zaawansowany pakiet programów MES Abaqus. Do opisu betonu zastosowano model betonu plastycznego ze zniszczeniem CDP (ang. Concrete Damage Plasticity) z uwzględnieniem opisu betonu rozciąganego wykorzystującego energię pękania. Założono, że beton zbrojony przenosi naprężenia rozciągające także po zarysowaniu („tension stiffening”). Materiał, z którego wykonano taśmy kompozytowe typu CFRP, zamodelowano materiałem o właściwościach liniowo-sprężystych aż do zniszczenia. Ponadto przyjęto dla taśm model ciała izotropowego i homogenicznego, ponieważ cechy materiału taśmy w kierunku poprzecznym mają niewielki (wręcz pomijalny) wpływ na zachowanie się wzmacnianych nimi elementów. Zaniedbano w analizie obecność warstwy kleju między taśmami kompozytowymi a powierzchnią betonu, zakładając idealną przyczepność taśmy do betonu (brak poślizgu i odrywania). W przypadku dźwigarów zespolonych założono, że stal konstrukcyjna spełnia wymagania materiału liniowo-sprężysto-

-plastycznego ze wzmocnieniem izotropowym. Zbrojenie podłużne i strzemiona wprowadzono w elementy betonowe płyty i belek jako elementy typu „embedded” (elementy osadzone w betonie będącym elementem typu „host”). Na podstawie wcześniejszych analiz zwalidowano numerycznie sposób połączenia płyty betonowej z górną półką belki stalowej w dźwigarze zespolonym oraz zdefiniowano warunki kontaktu płyty z półką stalową, uwzględniając w tym schemat statyczny belki (tzn. to, czy płyta jest ściskana, czy rozciągana). Przeanalizowano również różne sposoby obciążania oraz podparcia modeli numerycznych tak, aby były one jak najbardziej zbliżone do warunków rzeczywistej pracy elementu podczas badań. W przypadku analiz elementów wzmacnianych czynnie zaniedbano wpływ sposobu zakotwienia naprężanych taśm mocowanych do powierzchni górnej płyty, w związku z czym przeanalizowano tylko ogólny efekt sprężenia taśm na pracę belki zespolonej.

4. Diagnostyka obiektów inżynierskich z wykorzystaniem nowych metod pomiarowych

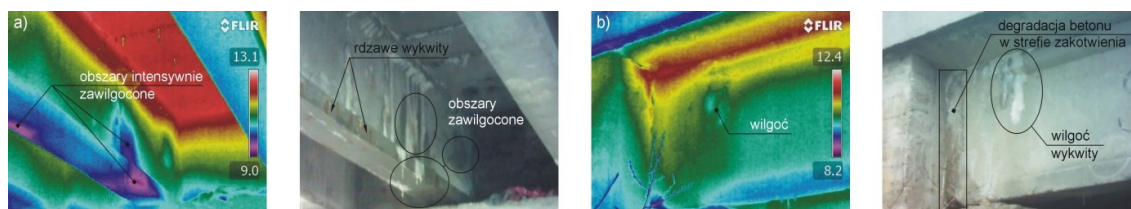
(Krzysztof Ziopaja)

Problematyka badań diagnostycznych konstrukcji mostowych, wykrywania ich potencjalnych uszkodzeń, ocena stanu technicznego i przydatności do użytkowania tych obiektów to ważne wyzwanie naukowe zarówno w kontekście doświadczalnym, jak i teoretycznym [25]. Celem wykonanych badań było znalezienie ewidentnego związku pomiędzy rozkładem temperatury na powierzchni elementu (rejestrowanym kamerą na podczerwień) a ukrytymi, wewnętrznymi defektami, które mogą być związane np. z korocją, zmęczeniem, koncentracją naprężeń

w konstrukcjach stalowych czy zawilgoceniem, nieciągłością, pustkami lub delaminacją w konstrukcjach betonowych. Ze względu na znaną, małą czułość pola temperatury na zaburzenia, które są generowane przez niewielkie uszkodzenia, zwiększenie skuteczności metody upatruje się w dodatkowej obróbce matematycznej rejestrowanego sygnału, np. za pomocą dwuwymiarowej dyskretnej transformacji falkowej. Wykorzystuje się naturalne zmiany rozkładu temperatury badanych obiektów (tzw. termografia pasywna) oraz zewnętrzne źródła ciepła (np. promienniki podczerwieni, lampy halogenowe, prądy wirowe) powodujące wymuszony przepływ ciepła w ciele (tzw. termografia aktywna¹).

Badania zostały podzielone na trzy części. Pierwsza część związana jest z symulacjami numerycznymi przepływu ciepła wykonywanymi w środowisku FEM za pomocą programu Abaqus Standard. Druga część badań dotyczy eksperymentów laboratoryjnych prowadzonych na modelowych próbkach małych rozmiarów zawierających symulacje defektów. Ostatnia, trzecia część badań ma postać pomiarów in situ rozkładu temperatury w rzeczywistych obiektach mostowych.

Na podstawie przeprowadzonych pilotażowych pomiarów in situ konstrukcji mostów betonowych stwierdzono, że miejsca występowania osadów chemicznych (skutek korozji ługującej), pomiary stykowe tych miejsc, nie wykazują różnic temperatury w miejscach z osadami chemicznymi i bez tych osadów. W przypadku występowania delaminacji² jest inaczej. Mamy tutaj do czynienia z naturalną termografią aktywną związaną z dobowymi cyklami zmian temperatury i gradientami temperatury wywołanymi przez te zmiany – stąd można na obrazach termalnych obserwować delaminację. Innym spostrzeżeniem jest możliwość identyfikowania miejsc, gdzie występuje zawilgocenie (rys. 9). Ciekawostką jest możliwość ujawnienia wewnętrznej struktury konstrukcji przęsła, co może mieć znaczenie w określaniu lokalizacji wewnętrznych kanałów, pustek i ich wzajemnych granic (rys. 10).

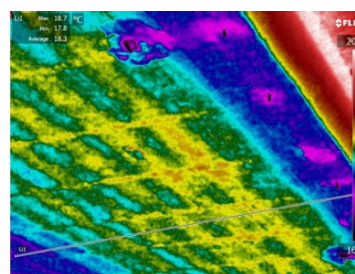


Rys. 9. Wiadukt Kurlandzka (Poznań) – termografia pasywna (termogram i fotografia) dla: a) belki typu WBS, b) belki skrajnej w miejscu podparcia na przyczółku



Warunki badań i aparatura:

- czas trwania pomiarów 19:40+21:40
- f=1,0Hz (rejestracja co 1s)
- wilgotność RH=48+62%
- temperatura powietrza 26,3+21,2 °C



Rys. 10. Most Chrobrego (Poznań) – termografia pasywna wykorzystująca naturalne zmiany dobowe temperatury (widok stanowiska, przykład termogramu spodu ustroju nośnego przęsła skrajnego)

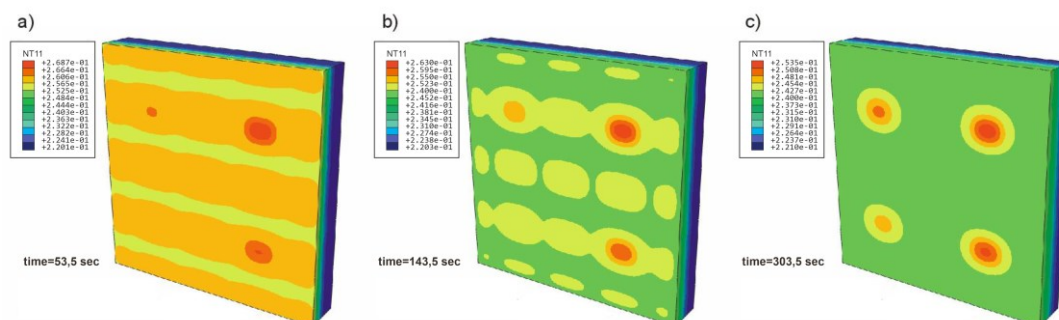
Analizy numeryczne wykazują wiele zalet, które można wykorzystać przed planowaniem badań laboratoryjnych i przed przystąpieniem do właściwych testów polowych. Modelowanie niestacjonarnego przepływu ciepła w środowisku FEM programu Abaqus Standard pozwala na wprowadzanie wielu modyfikacji samego modelu, modelu uszkodzenia, jak i modelu oddziaływania cieplnego. Oprócz analizy jakościowej możliwa jest weryfikacja ilościowa, co uwydatnia poszczególne cechy modelu oraz ich wpływ na prowadzone testy i ich rezultaty. Ważną zaletą jest możliwość poddawania sygnału dodatkowej

¹ IRT – InfraRed Thermography (termografia w podczerwieni).

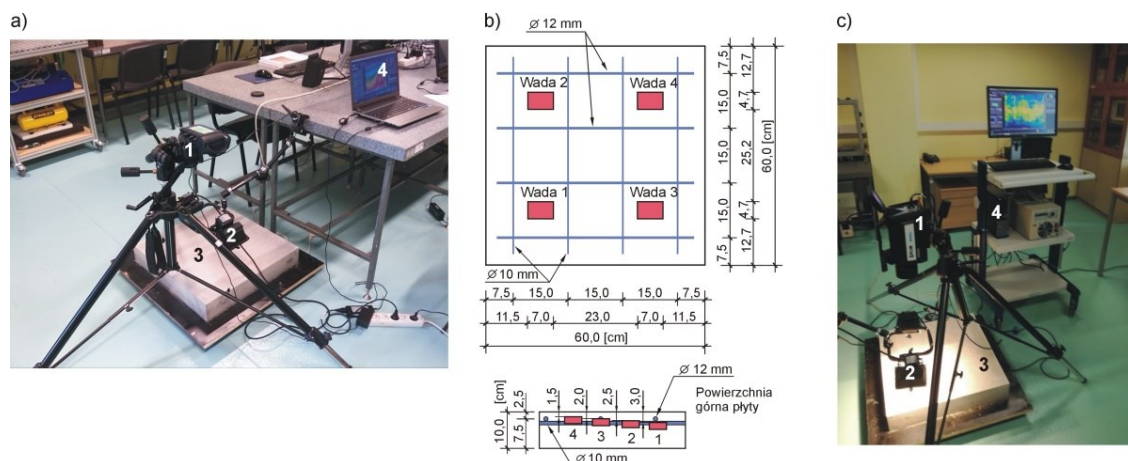
² Wywołanej przez korozję siarczanową, karbonatyzację i/lub korozję zbrojenia.

obróbce matematycznej, np. za pomocą dwuwymiarowej dyskretnej transformacji falkowej lub STFT³, w celu uwypuklenia obszarów zaburzeń temperatury wywołanych przez modele uszkodzeń (rys. 11).

Badania laboratoryjne realizowano w pracowni Instytutu Technologii Mechanicznej Wydziału Inżynierii Mechanicznej oraz w hali badawczej Instytutu Inżynierii Lądowej Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu. Wszystkie eksperymenty dotyczyły próbek betonowych ze zbrojeniem lub bez zbrojenia (rys. 12). Badania eksperymentalne służą przede wszystkim walidacji praktycznego zastosowania IRT z użyciem różnych źródeł ciepła (promienników podczerwieni, lamp halogenowych, prądów wirowych) do lokalizowania i identyfikacji takich uszkodzeń, jak: pustki wewnętrzne, delaminacje czy korozja prętów zbrojeniowych [27].



Rys. 11. Wykresy rozkładów temperatury na powierzchni modelu żelbetowej płyty z symulowanymi uszkodzeniami: a), b), c) regularne poziome zaburzenia rozkładu temperatury są efektem odbicia fali cieplnej na styku siatki zbrojenia i betonu płyty (efekt nieuzyskany w testach laboratoryjnych)



Rys. 12. Stanowisko do termografii aktywnej: 1 – IR kamera, 2 – lampa halogenowa 2 × 150 W, 3 – płyta żelbetowa, 4 – komputer: a) widok stanowiska (FLIR T620), b) dane geometryczne żelbetowej płyty z lokalizacją siatki zbrojenia i wewnętrznych wad, c) widok stanowiska (FLIR X6540 SC) [26]

Podsumowując, zastosowanie termografii w podczerwieni do rutynowych inspekcji mostów jest możliwe i ma swoje podstawy. Zrealizowane analizy numeryczne, badania laboratoryjne i badania in situ [28] demonstrują duże trudności w potencjalnym wykrywaniu uszkodzeń elementów konstrukcyjnych rzeczywistego obiektu. Rozwój tej metody diagnostycznej należy łączyć z pokonaniem lub złagodzeniem poniżej przedstawionych problemów związanych z:

- niesprzyjającymi warunkami atmosferycznymi (umiarkowany lub silny wiatr, opady, promieniowanie słoneczne, zamglenie),
- dużymi odległościami między punktem obserwacji a konstrukcją, które wpływają na rozdzielczość geometryczną i pogorszenie rozdzielczości temperaturowej,
- rozmiarami rzeczywistych elementów konstrukcji mostu wpływającymi na charakter zjawisk wymiany ciepła (np. duża pojemność cieplna elementów betonowych wydłuża czas ich relaksacji przy zmianach temperatury otoczenia, duża grubość otulin prętów zbrojenia itp.).

³ STFT – Short Time Fourier Transform.

Literatura

- [1] Madaj A., Wołowicki W., Budowa i utrzymanie mostów, WKŁ 1995, 2002, 2007, 2013.
- [2] Madaj A., Wołowicki W., Mosty betonowe, WKŁ 1998, 2002.
- [3] Madaj A., Wołowicki W., Projektowanie mostów betonowych, WKŁ 2010.
- [4] Karlikowski J., Madaj A., Wołowicki W., Mosty zespolone stalowo-betonowe: zasady projektowania wg PN-EN 1994-2, WKŁ 2015.
- [5] Janusz L., Madaj A., Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo, WKŁ 2007, 2009.
- [6] Janusz L., Madaj A., Gruntowo-powłokowe konstrukcje z blach falistych. Projektowanie, wykonawstwo i utrzymanie, WKŁ 2019.
- [7] Madaj A., Wołowicki W., Elementy diagnostyki i utrzymania mostów, WPP 1991.
- [8] Madaj A., Ścieżki równowagi statycznej zginanego przekroju zespolonego typu beton-stal, WPP 1994.
- [9] Madaj A., Wołowicki W., Żelbetowe konstrukcje mostowe. Wymiarowanie, WPP 1995.
- [10] Karlikowski J., Madaj A., Wołowicki W., Mostowe konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Zasady projektowania, WKŁ 2003, 2007.
- [11] Madaj A., Doraźna nośność i sztywność na zginanie zespolonych belek stalowo-betonowych, WPP 2005.
- [12] Siekierski W., Analysis of rigid flange of bridge truss girder, „The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering” 2015, vol. 10(2), pp. 159-165, DOI: 10.3846/bjrbe.2015.20.
- [13] Siekierski W., Analysis of gusset plate of contemporary bridge truss girder, „The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering” 2016, vol. 11(3), pp. 188-196, DOI: 10.3846/bjrbe.2016.22.
- [14] Siekierski W., An efficient method for analysis of service load stresses in bridges gusset plates, „Engineering Structures” 2015, 84, pp. 152-161, DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.029.
- [15] Apanas L., Karlikowski J., Siekierski W., Ocena skutków pęknięć poprzecznic w celu określenia warunków tymczasowej eksploatacji kolejowego przęsła kratownicowego, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2018, pp. 7-18, ISSN: 1897-4007.
- [16] Siekierski W., Analysis of rotational end restraint for cross beams of railway through truss bridges, „Steel and Composite Structures” 2020, vol. 35, no. 1, pp. 29-41, DOI: 10.12989/scs.2020.35.1.029.
- [17] Siekierski W., Equivalent moment of inertia of a truss bridge with steel-concrete composite deck, „Structural Engineering and Mechanics” 2015, vol. 55, no. 4, pp. 801-813, DOI: 10.12989/sem.2015.55.4.801.
- [18] Siekierski W., An analytical method to estimate the natural bending frequency of the spans of railway through truss bridges with steel-and-concrete composite decks, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit” 2016, vol. 230, no. 8, pp. 1908-1918, DOI: 10.1177/0954409715618691.
- [19] Siekierski W., Analysis of concrete shrinkage along truss bridge with steel-concrete composite deck, „Steel and Composite Structures” 2016, vol. 20, no. 6, pp. 1237-1257, DOI: 10.12989/scs.2016.20.6.1237.
- [20] Jankowiak I., Analysis of RC beams strengthened by CFRP strips – experimental and FEA study, „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2012, 12, pp. 376-388, ISSN: 1644-9665 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2012.06.010>).
- [21] Jankowiak I., Madaj A., Load carrying capacity of RC beams strengthened by pre-tensioned CFRP strip, „Recent Advances in Computational Mechanics” 2014, pp. 95-101, ISBN: 978-1-138-02482-3 (Hbk + CD-ROM), ISBN: 978-1-315-77548-7 (e-book, PDF).
- [22] Jankowiak I., XFEM analysis of intermediate crack debonding of FRP strengthened RC beam, „Advances in Mechanics – Theoretical, Computational and Interdisciplinary Issues” 2016, ISBN: 978-1-138-02906-4 (Hbk), ISBN: 978-1-315-64506-3 (e-book, PDF).
- [23] Jankowiak I., Madaj A., Numerical Analysis of effectiveness of strengthening concrete slab in tension of the steel-concrete composite beam using pretensioned CFRP strips, „Civil and Environmental Engineering Reports (CEER)” 2017, 27(4), pp. 5-15, DOI: 10.1515/ceer-2017-0046.
- [24] Jankowiak I., Case study of flexure and shear strengthening of RC beams by CFRP using FEA, „AIP Conference Proceedings” 2018, 1922, 130004, <https://doi.org/10.1063/1.5019134>.
- [25] Ziopaja K., Różański L., Możliwości zastosowania termografii w podczerwieni do diagnostyki obiektów mostowych, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2017, 24, s. 387-410.
- [26] Różański L., Ziopaja K., Detection of material defects in reinforced concrete slab using active thermography, „Measurement Automation Monitoring” 2017, no. 3, vol. 63, pp. 82-85.
- [27] Różański L., Ziopaja K., Identification of the reinforcement bars in concrete samples using eddy currents thermography, „Measurement Automation Monitoring” 2019, vol. 65, no. 2, pp. 55-59.
- [28] Różański L., Ziopaja K., Applicability analysis of IR thermography and discrete wavelet transform for technical conditions assessment of bridge elements, „Quantitative InfraRed Thermography Journal” 2019, vol. 16, no. 1, pp. 87-110.