

Praca stalowo-betonowej belki zespolonej z uwzględnieniem zarysowania płyty

Marek Łagoda¹, Krzysztof Śledziewski²

¹ *Instytut Badawczy Dróg i Mostów, e-mail: mlagoda@ibdim.edu.pl,*

² *Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: k.sledziewski@pollub.pl*

Streszczenie: Tematem referatu jest wpływ zarysowania płyty żelbetowej na pracę belki zespolonej typu stal-beton. W pracy poddano ocenie stan wiedzy w dziedzinie konstrukcji zespolonych, w szczególności konstrukcji statycznie niewyznaczalnych z betonem w strefach rozciąganych. Dodatkowo w dużym skrócie omówiono dotychczasową praktykę projektową. Oprócz tego opisano własne badania doświadczalne dźwigarów mostowych w postaci belek ciągłych, dwuprzęsłowych, które zostały wykonane przez autorów. Przedstawiono również propozycję dalszych prac z tego zakresu.

Słowa kluczowe: belka zespolona, zarysowanie, Eurokod, badania laboratoryjne

1. Wprowadzenie

Konstrukcje zespolone zaliczane są do najbardziej interesujących rozwiązań ustrojów nośnych w technice budowlanej. Wynika to bezpośrednio ze szczególnych wymagań odnośnie teorii tych konstrukcji jak i ich twórczego kształtowania. Części składowe przekroju poprzecznego wykonane są z różnych materiałów, o różnych cechach fizycznych, które współpracują ze sobą, dzięki zastosowaniu specjalnych łączników (opórek, sworzni, listew). Poszczególne elementy dobiera się w taki sposób, aby maksymalnie wykorzystać zarówno ich właściwości wytrzymałościowe jak i cechy użytkowe, w odniesieniu do ich usytuowania w konstrukcji. Typowym przykładem efektywnego wykorzystania właściwości różnych materiałów jest stalowy dźwigar współpracujący ze zbrojoną, betonową płytą pomostową w mostach jednoprzęsłowych.

Współcześnie największe korzyści widzi się w zastosowaniu konstrukcji zespolonych typu stal – beton. Są one głównie wykorzystywane przy budowie mostów, ale stosuje się je również w innych dziedzinach budownictwa, zwłaszcza w budownictwie przemysłowym.

Pomimo tego, że początki konstrukcji zespolonych datuje się zasadniczo na lata trzydzieste ubiegłego wieku [7] to można zauważyć, że w dotychczasowych badaniach skupiano się z reguły na określeniu nośności granicznej całego przekroju zespolonego, bądź też jego poszczególnych części składowych. Niewiele miejsca poświęcono natomiast zagadnieniu zachowania się zespolonej konstrukcji z zarysowaną płytą betonową. Podejście takie wynikało zarówno ze złożoności problemu jak i z powodu nie występowania rys w konstrukcjach o małej rozpiętości przęseł oraz małym udziale obciążeń użytkowych w stosunku do obciążeń całkowitych. Dodatkowo sprawę komplikował brak normy krajowej do projektowania mostów zespolonych. Choć, jak wspomniano, belki zespolone są stosowane także w innych konstrukcjach, to osiągają w nich znacznie mniejsze rozpiętości niż w przypadku mostów, stąd też problem zarysowania rozciąganej płyty żelbetowej w mostownictwie występuje w większym stopniu.

Znaczenie samego zagadnienia zarysowania w kontekście konstrukcji zespolonych jest wciąż tematem dyskusji. Niepodważalnym faktem jest ich występowanie, aczkolwiek bezpieczeństwo konstrukcji nie jest tu w żaden sposób zagrożone. W niektórych krajach europejskich, w tym w Polsce dopuszczone jest występowanie rys o szerokości 0,2 mm nawet w wilgotnym środowisku, przy ekspozycji elementu na sole odładzające [8]. Oczywiście jest to możliwe dzięki stosowaniu szeregu różnych zabiegów technologicznych [9], między innymi: właściwej pielęgnacji betonu, odpowiedniej kolejności betonowania, kontrolowaniu przemieszczeń pionowych nad podporami czy też podniesieniu wykonawczemu [22].

Należy jednak pamiętać, że w mostach zespolonych, zarówno tych tradycyjnych jak i nowoczesnych, część elementów poddana jest naprężeniom rozciągającym, które powodują powstawanie zarysowań. Przy określeniu sił w betonowych elementach rozciąganych, w stanie granicznej nośności, użyteczności, oraz w celu sprawdzenia na zmęczenie, należy uwzględnić efekty zarysowania betonu i zmianę sztywności przy rozciąganiu betonu pomiędzy rysami. Zarysowanie betonu ma istotny wpływ na sztywność przekroju zespolonego. W wyniku powstałych rys w betonie może dojść do przecięcia przekroju stalowego momentem zginającym. Z kolei wzrost wartości momentu zginającego powoduje przyrost siły normalnej w stali zbrojeniowej pasa betonowego. Zmiana sztywności ustroju nośnego wiąże się z redystrybucją momentów zginających na długości belki ciągłej. Problem zachowania się zespolonej konstrukcji z zarysowaną płytą betonową jest skomplikowany i przez to nie do końca rozpoznany. Z tego powodu sztywność rozciąganego betonu pomiędzy rysami nie jest często uwzględniana w projektowaniu konstrukcji inżynierskich. Podejście takie może prowadzić do nieracjonalnej oceny nośności konstrukcji zespolonej oraz stanów granicznych użyteczności.

2. Praktyka projektowa

Projektanci mostowi dotychczas przy obliczaniu mostów zespolonych rzadko uwzględniali sztywność zarysowanej płyty pomostu pod wpływem naprężeń rozciągających. W ten sposób znacznie zmniejszana była teoretyczna trwałość i obliczeniowa sztywność konstrukcji mostu. Takie podejście, podyktowane było w dużej mierze brakiem normy krajowej. To, co wynikało z tradycji i przenoszenia zasad z norm stalowej i betonowej zostało obecnie zastąpione przez przepisy techniczne zawarte w Eurokodzie 4 [23].

Nowe, europejskie normy projektowania mostów zespolonych bardzo istotnie różnią się od dotychczas obowiązującej w Polsce praktyki projektowania. W tej chwili jedna z nowych, podstawowych zasad zakłada, że przewidywany czas pracy mostu stałego wynosi 100 lat, ale z uwzględnieniem obowiązku odpowiedniego utrzymywania i konserwacji obiektu. Oczywiście nie dla wszystkich elementów konstrukcji mostu, nie mówiąc już o elementach wyposażenia, możliwe jest zapewnienie stuletniej żywotności. W takim przypadku projekt powinien przewidzieć ich wymianę bez większych zakłóceń w normalnym użytkowaniu obiektu. Ponadto elementy konstrukcyjne, do których mocowane jest wyposażenie, muszą być tak projektowane, aby uszkodzenie wyposażenia nie powodowało zniszczenia nośnej konstrukcji mostu, do której jest ono przymocowane.

W trakcie projektowania obiektów należy sprawdzać sytuacje obliczeniowe w kolejności ich występowania, od momentu rozpoczęcia montażu. Efekty oddziaływań (siły wewnętrzne, naprężenia, odkształcenia itp.) określa się przy stosowaniu ogólnej analizy sprężystej lub analizy nieliniowej z uwzględnieniem wpływu deformacji, gdy ich efekty są znaczące (powyżej 10% wartości). Zakłada się, że efekty oddziaływań można

obliczać na podstawie globalnej analizy sprężystej, nawet wtedy, gdy nośność przekroju obliczana jest przy założeniu nieliniowości fizycznych materiałów lub kiedy projektant dopuszcza uplastycznienie przekroju. Przy projektowaniu mostów zespolonych najczęściej uzyskiwane były przekroje klasy czwartej. W świetle eurokodów możemy projektować przekroje wyższych klas. Nawet klasy pierwszej, co pozwoli nam w konsekwencji stosować analizę lokalną sprężysto – plastyczną, a nawet lokalną analizę plastyczną. Globalną analizę plastyczną można stosować, jeśli elementy wykazują wystarczającą zdolność obrotową, wymaganą ze względu na redystrybucję momentów zginających oraz pod warunkiem, że można zapewnić stabilność elementów w miejscach przegubów plastycznych. Analizę sztywno-plastyczną można stosować, jeśli efekty towarzyszące deformacjom (np. efekty drugiego rzędu) są pomijalnie małe.

3. Przegląd wybranych prac analitycznych i badawczych

Praktycznie od początku stosowania betonu w budownictwie pojawiały się prace dotyczące powstawania rys w żelbecie. Pierwsze badania przeprowadzone były na elementach rozciąganych przez Considéra [5], który ustalił związki o charakterze jakościowym między ilością i rodzajem zbrojenia a szerokością i rozstawem rys oraz wielkością siły rysującej. Problemem tym zajmowało się również wielu innych badaczy, zarówno w przypadku elementów rozciąganych jak i zginanych przekrojów, m.in. Bukowski [4], Godycki – Ćwirko [12]. Jednakże to Saliger [35] i Muraszow [32] podali najbardziej rozpowszechnione rozwiązania dotyczące zarysowania w elementach żelbetowych.

Wspomniany wyżej Saliger zakłada rozkład naprężeń w betonie i stali w strefie rozciąganej betonu jako funkcję sinusoidalną. Ponadto przyjął, że w miejscu rysy naprężenie w betonie jest równe zero, a między rysami zmienne ale mniejsze od wytrzymałości betonu na rozciąganie. Z kolei Muraszow za podstawę do obliczeń stanu zarysowania przyjął założenie, że przy większych obciążeniach elementy zginane pracują zarysowane, tj. znajdują się w fazie II pracy belki żelbetowej, żelbet uważa się za materiał sprężysto – plastyczny, a odkształcenia plastyczne rosną wraz z odkształceniami sprężystymi.

Większość dotychczasowych prac i badań dotyczących zarysowania płyty w stalowo – betonowych belkach zespolonych skupia się głównie na sposobie obliczania szerokości oraz rozstawu powstałych rys. Przykładem takich prac są [16] czy też [33], w których rozpatrywano stan zarysowania wywołany obciążeniem zewnętrznym, natomiast pominięto wpływ naprężeń własnych. Kolejną interesującą pozycją z tego zakresu jest [10]. W tej pracy podano sposób obliczania rozstawu rys, których bezpośrednią przyczyną powstania było wystąpienie skurczu, pęcznienia i różnicy temperatur.

Z kolei w [14] autor zaproponował wzory na rozstaw i szerokość rys, w których uwzględniono poślizg zbrojenia w płycie betonowej przez wykorzystanie stopnia zespolenia belki stalowej z płytą, niezależnie od zastosowanych łączników względem płyty. Sposób obliczania zarysowania uzależnił od położenia osi obojętnej przekroju zespolonego, a także od czynników wywołujących zarysowanie płyty.

Dokonano również porównania niektórych metod obliczeniowych i ich weryfikację doświadczalną przekroju żelbetowego w celu sprawdzenia, czy któryś ze znanych sposobów obliczania rys wywodzący się z żelbetu można odnieść bezpośrednio do płyt żelbetowych w belkach zespolonych, oraz które z rozwiązań teoretycznych dają najbliższe rzeczywistym wyniki. Zestawienie takie można znaleźć w [11].

Wśród prac dotyczących zarysowania belek zespolonych znajdują się również takie, które przedstawiają zagadnienie pracy konstrukcji, uwzględniającej zarysowanie rozciąga-

nej płyty betonowej. Do tej grupy prac należy zaliczyć [26]. Tym zagadnieniem zajął się również Gómez Navarro [13], który przedstawił własną propozycję modelu liniowego po zarysowaniu, opisującą zależność moment – krzywizna w przekroju podporowym.

Istotnym problemem w odniesieniu do zarysowania płyty, również słabo rozpoznany, jest podatność zespolenia. Przy czym przemieszczenie płyty żelbetowej względem belki stalowej w wyniku odkształcenia łączników i zerwania przyczepności płyty do belki stalowej występuje przede wszystkim w elementach, w których zastosowano łączniki wiotkie, a w szczególności w przypadku powszechnie stosowanych łączników sworzniowych. Jarek w [15] na podstawie wyników badań oraz analiz belek zespolonych o zespoleniu niepełnym stwierdził, że stan zarysowania elementów zespolonych zależy w znacznej mierze od stopnia zespolenia. Im wyższy stopień zespolenia tym rozstaw i szerokość rys były mniejsze. Najmniejsze rozstawy rys i maksymalne szerokości występowały w belkach z zespoleniem niepodatnym.

Podatność zespolenia w przypadku łączników wiotkich jest dość dobrze rozpoznana w zakresie nośności połączenia. Przykładem mogą tu być prace [2, 18] czy też [24, 25]. W szczególności interesujące są te ostatnie, w których to autor, w [25], na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych i opracowanych wyników badań podał metodę obliczania stanu granicznego podatności łączników. Wiązało się to z określeniem wpływu podatności łączników na rozkłady sił wewnętrznych i odkształceń w konstrukcji zespolonej oraz na jej sztywność. Dodatkowo na podstawie przedstawionych badań określił nośność i charakter pracy zespolenia sprężystego w różnych warunkach obciążeń.

W pracy [9] na podstawie [27] podano wzory na wartość poślizgu. Zostały one wyprowadzone na podstawie teorii „ścislej” pręta zespolonego, której założenia pozwalają oddzielnie rozpatrywać układ sił dla części betonowej i dla części stalowej [6]. Podano wzory dla czterech przypadków różniących się między sobą rodzajem obciążenia i zespolenia. Rozpatrzono belki swobodnie podparte przy obciążeniu równomiernie rozłożonym oraz obciążeniem siła skupioną. Dla każdego rodzaju obciążenia rozważano przypadek zespolenia częściowego z poślizgiem na końcach belki oraz zespolenia pełnego przy braku poślizgu na całej długości belki. Niestety wzory te są dość skomplikowane i przez to problematyczne do powszechnego stosowania w praktyce inżynierskiej.

Jednym z ważniejszych zagadnień w zakresie konstrukcji zespolonych jest również ocena wpływu zarysowania płyty żelbetowej na ugięcie belek zespolonych. Niestety literatura dotycząca tej problematyki nie jest zbyt obszerna, co akurat wiąże się z mniejszym zainteresowaniem jakie do niedawna przywiązywano do stanów granicznych użytkowalności konstrukcji zespolonych w porównaniu ze stanem granicznym nośności.

Wpływ zarysowania płyty na ugięcie belek zespolonych jest ważny przynajmniej z dwóch powodów. Pierwszy z nich, który de facto można traktować jako formalny, dotyczy rzecz jasna sprawdzenia ugięcia i porównania go z normowym. Drugi powód jest nie mniej ważny i dotyczy określenia podniesienia wykonawczego, tj. tzw. odwrotnej strzałki ugięcia.

Propozycję uwzględniania zarysowania płyty przy obliczaniu ugięć przedstawiono w [3]. Autor swoją metodę uzależnił od wartości działającego momentu zginającego oraz od momentu rysującego. Natomiast w pracy [1] dokonano analizy wpływu zarysowania płyty na zmianę wartości ugięć belek zespolonych ciągłych dwuprzęsłowych.

Należy w tym miejscu podkreślić, iż wpływ zarysowania płyty żelbetowej w strefie momentów ujemnych na wartość ugięć belki zespolonej ciągłej związany jest ze zmianą sztywności dźwigara w obszarze rys. Przyjęcie stałej sztywności przekroju zespolonego jest uproszczeniem, które może prowadzić w niektórych przypadkach do znacznych niedokład-

ności w obliczaniu ugięć. Jest to problem podobny do występującego przy obliczaniu belek żelbetonowych [21].

W pracy [20] podano zależność między krzywizną a momentem zginającym oraz siłą normalną w płycie betonowej. Wykazano, że nieciągłości związane są z zarysowaniem przekroju i zmniejszeniem się współpracy betonu ze stalą zbrojeniową. W konsekwencji efektem są lokalne, skokowe spadki sztywności, które nie powodują jednak skokowych zmian krzywizny belki. Wynika to ze współdziałania betonu rozciąganego ze stalą zbrojeniową na odcinkach bezpośrednio przylegających do rysy. Sztywność belki zespolonej w strefie momentów zginających rozciągających płytę jest więc zmienna na odcinku pomiędzy rysami.

Znajomość sztywności jako funkcji wyężenia jest wymagana nie tylko do oszacowania przemieszczeń (ugięć) konstrukcji ale również obliczenia rozkładu sił wewnętrznych w konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych i redystrybucji sił wewnętrznych, będących skutkiem zmian sztywności przy zmieniającym się obciążeniu.

Zagadnieniami sztywności zespolonych belek stalowo – betonowych i związanymi z nią zjawiskami zajął się Madaj, który począwszy od 1994 r. rozpoczął publikację swoich prac na ten temat [28, 29, 30]. Ukoronowaniem jego badań była rozprawa [31].

Madaj przedstawił interesujący sposób obliczania belek zespolonych związany z oszacowaniem sztywności chwilowej przekroju zespolonego. Do określenia sztywności przyjął metodę elementów skończonych z wykorzystaniem elementów pasmowych, dokonując podziału przekroju zespolonego na pasma prostopadłe do płaszczyzny zginania i przyporządkowując każdemu pasmu związek konstytutywny naprężenie – odkształcenie. Sposób ten, jako jeden z nielicznych, dokładnie opisuje zmianę sztywności przekroju zespolonego przez zdefiniowanie sztywności chwilowej. Aczkolwiek zaproponowany sposób obliczania, zwłaszcza dla najczęściej występującego w praktyce zespolenia podatnego, jest dość skomplikowany i tym samym trudny do stosowania w praktyce inżynierskiej. Oprócz tego w pracy [29] dokonał analizy zależności między krzywizną belki a sztywnością, dla dwóch wybranych przekrojów zespolonych z rozciąganą płytą żelbetową. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że sztywność zmniejsza się wraz z wyężeniem już w zakresie odkształceń sprężystych. Wyraźny wpływ na zaobserwowane zjawiska miał stopień zbrojenia płyty.

Również ciekawy opis sztywności na zginanie dźwigara zespolonego podatnie, typu stal – beton można znaleźć w [17]. Najważniejszym elementem zaproponowanej koncepcji jest odejście od założenia o równości krzywizn, które ogranicza rozpatrywania do przypadku równoległości kątów pochylenia przekrojów poprzecznych łączonych elementów w dźwigarze zespolonym. Dodatkowym atutem, poza możliwością wprowadzenia momentu bezwładności przekroju poprzecznego dźwigara z połączeniem podatnym, jest poziom prowadzonej analizy w zakresie odkształceń.

Analiza skutków zarysowania płyty w belkach zespolonych ze szczególnym uwzględnieniem redystrybucji sił wewnętrznych w belkach ciągłych została omówiona w pracach [29, 19]. Autorzy stwierdzają, że sztywność przekroju do chwili zarysowania płyty jest praktycznie stała. Dopiero zwiększenie obciążenia do wartości powodującej przekroczenie odkształceń, odpowiadających wytrzymałości betonu na rozciąganie wprowadza zmiany w pracy belki. W trakcie badań doświadczalnych wyraźny spadek sztywności zaobserwowano w chwili powstania pierwszej rysy, co objawiło się gwałtownym wzrostem krzywizny. Efektem zaburzenia krzywizn lokalnych były znacznie szybsze przyrosty ugięć niż przed zarysowaniem. Po zarysowaniu płyty, zmierzona wartość krzywizny mieściła się pomiędzy wartościami obliczonymi przy założeniu, że sztywność belki odpowiada sztywności części

stalowej, a wartościami obliczonymi z uwzględnieniem współpracy rozciąganego betonu ze zbrojeniem, i była około 15% większa od sztywności przekroju stalowego. Stabilizacja rozkładu sztywności następowała, gdy zmniejszała się liczba nowo powstałych rys.

Zarysowanie płyty powoduje dość duże zmniejszenie momentów podporowych (około kilkanaście procent) oraz względnie niewielkie zwiększenie momentów przęsłowych (około kilka procent). Na podstawie opisanych wcześniej badań w pracy [19] autorzy stwierdzili również, że w zakresie obciążeń eksploatacyjnych następuje stabilizacja rozkładu sztywności i nie obserwuje się redystrybucji momentów zginających w belce.

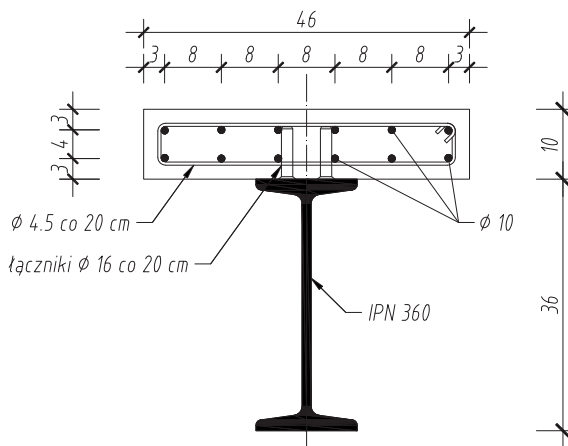
4. Opis badań własnych

Przeprowadzone rozpoznanie literaturowe wskazuje, iż problem zarysowania płyt żelbetowych w belkach zespolonych typu stal – beton nie jest nowy. Niemniej jednak zagadnienie to było traktowane do tej pory nie dość dokładnie, a główny nacisk kładziono na nośność elementów [9, 14]. Znalazło to swoje odzwierciedlenie również w obecnie obowiązującej normie do projektowania konstrukcji zespolonych [34]. Aczkolwiek propozycje przedstawione w Eurokodzie 4 cz. 2 wprowadziły nowe tendencje w ujęciu tego zagadnienia, przy czym wymagają one dalszych uściśleń i weryfikacji doświadczalnych, zwłaszcza w zakresie belek ciągłych.

Dodatkowo w procesie projektowania konstrukcji mostowych obecnie coraz większy nacisk kładzie się na konieczność uwzględnienia czynników ekonomicznych oraz stosowanie coraz dokładniejszych metod obliczeniowych, mających na celu zbliżenie rzeczywistych wartości naprężeń występujących w konstrukcji do wartości zakładanych w obliczeniach. Zwiększający się udział obciążeń użytkowych w stosunku do obciążeń całkowitych oraz stosowanie nowych metod montażu konstrukcji powodują, że prawidłowe uwzględnienie sztywności zarysowanego betonu w płycie stało się niezbędne przy analizie belek zespolonych.

4.1. Elementy badawcze

Autorzy przeprowadzili badania pod obciążeniem statycznym dźwigarów, które wykonano w postaci belek ciągłych, dwuprzęsłowych o przekroju poprzecznym pokazanym na rysunku 1. Długość całkowita każdego elementu badawczego wynosiła 7,00 m, a rozpiętości podporowe 2x3,00 m (rys.2).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny badanych belek z rozmieszczeniem zbrojenia głównego

Płytę żelbetową wykonano z betonu klasy C 25/30 i zazbrojono prętami gładkimi. Jako zbrojenie podłużne zastosowano pręty ϕ 10 mm ułożone w dwóch warstwach: górą i dołem na całej długości płyty po 6 prętów w rozstawie co 8 cm. Natomiast w kierunku poprzecznym płyty ułożono strzemiona ϕ 4,5 mm w rozstawie co 20 cm. Przykład zbrojenia elementów badawczych pokazano na rysunku 1. Ze względu na ograniczenia wynikające z budowy stendu badawczego szerokość płyty nie mogła przekraczać 50 cm.

Jako dźwigar stalowy, zastosowano profil walcowany IPN 360, który na całej długości połączono z płytą żelbetową za pomocą dwu rzędów łączników kołkowych. Łączniki o średnicy ϕ 16 mm i wysokości 75 mm przyspawano do pasa górnego belki w rozstawie co 20 cm. Taki sposób połączenia miał zapewnić niepodatność zespolenia w całym zakresie obciążenia.

4.2. Program badań

Badania belek przeprowadzono w Ośrodku Badań Mostów, filia „Kielce” należącego do Instytutu Badawczego Dróg i Mostów. Badania podzielono na dwa etapy. Pierwszym etapem były badania wstępne, których głównym celem było określenie cech wytrzymałościowych betonu, z którego została wykonana płyta elementu badawczego. Wykonano badania na podstawie, których określono moduł sprężystości betonu oraz wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie. Badania cech materiałowych wykonano na elementach normowych. Na próbkach sześciennych o boku 150 mm zbadano wytrzymałość betonu na ściskanie po 3, 7, 14 i 28 dniach od chwili wykonania. Wyznaczono także wytrzymałość betonu na rozciąganie metodą przez rozłupywanie. Wartość modułu sprężystości badanego betonu określono podobnie jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie, na walcach normowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Dodatkowe dane dotyczące zastosowanego betonu otrzymano z zakładu produkcyjnego, który dostarczył mieszankę betonową.



Rys. 2. Widok na element badawczy w trakcie badań

Drugim etapem były badania zasadnicze, które miały na celu rozpoznanie natury zjawisk zachodzących w konsekwencji rozciągania płyty podczas zginania belki zespolonej w warunkach laboratoryjnych. Badania właściwe obejmowały pomiary: ilości, rozstawu i szerokości rys, propagacji rys w czasie, przemieszczeń pionowych w osi podłużnej belek (w tym przemieszczenia nad podporami), ugięć belek w miejscu przyłożenia sił oraz kąt obrotu na końcach belek.

W trakcie badań laboratoryjnych wykonano również pomiary nie będące bezpośrednio związane z zagadnieniem sztywności zarysowanego betonu jednak pozwalające na weryfikację wyników obserwacji i wyznaczenia bądź też sprawdzenia dodatkowych parametrów. Stąd też dokonano pomiaru poślizgu płyty żelbetowej względem dźwigara stalowego, pozwalające zweryfikować stopień zespolenia belki a także pomiar odkształceń zarówno samego dźwigara, jak i płyty, co z kolei pozwoliło określić rzeczywiste położenie osi obojętnej. Ponadto dokonano pomiarów odkształceń stali zbrojeniowej i betonu płyty w strefie tzw. momentów dodatnich (w przekroju „przez rysę” – w tym celu wykonano kształtowane wymuszenie rysy) oraz w strefie tzw. momentów ujemnych. Pomiary te pozwoliły zweryfikować naprężenia w badanym elemencie.

Obecnie wyniki badań doświadczalnych poddawane są analizie i zostaną opublikowane w dalszym terminie.

5. Podsumowanie

W konstrukcjach mostów zespolonych, zarówno tych tradycyjnych jak i nowoczesnych, część elementów poddana jest naprężeniom rozciągającym. Naprężenia rozciągające powodują powstawanie zarysowań. Mają one bardzo istotny wpływ na sztywność, a więc pracę dźwigarów zespolonych, co również przekłada się na trwałość konstrukcji mostowej. Uwzględnianie tego efektu w pomostach mostów zespolonych, zarówno drogowych jak i kolejowych, pozwoli na modelowanie w fazie projektowania konstrukcji bliższych rzeczywistości.

Przy czym dla stworzenia podstaw ścisłych analiz konstrukcji, konieczne jest jeszcze przeprowadzenie badań uwzględniających następujące zagadnienia:

- wysoki stopień podłużnego zbrojenia płyty betonowej (powyżej 3%),
- interakcję między stalową półką górną i zbrojeniem,
- zależność między zbrojeniem poprzecznym płyty i obrazem poprzecznego zarysowania,
- podatność zespolenia i zmniejszenie jego sztywności po zarysowaniu betonu,
- skurcz i pęcznienie betonu.

Autorzy pragną podziękować firmie Gotowski Budownictwo Komunikacyjne i Przemysłowe Sp. z o.o. za nieodpłatne udostępnienie materiałów do badań (belek stalowych). Badania laboratoryjne były współfinansowane w ramach środków statutowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wzwyższego nr S-50/B/2012.

Krzysztof Śledziwski jest uczestnikiem projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- 1 Aribert J. M., Raoul J., Terperea O. Test and Analyses of a Bridge Continuous Beam. Conference Report: Composite Construction - Conventional and Innovative, Innsbruck, 1997.
- 2 Barańczak J., Bryś G. Wpływ podatności złączy na stan przemieszczeń i naprężenia w belkach zespolonych. II Konferencja Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra, (1989) 33-38.
- 3 Bujňák J. Navrhovanie oceľobetónových trámov. SvF Žilinska Univerzita, Žilina, 1997.
- 4 Bukowski B. Morfologia rys w konstrukcjach żelbetowych i betonowych. Archiwum Inżynierii Łądowej, Tom III, zeszyt 4, 1959.
- 5 Considér A. Influence des pressions latérales sur la resistance des solides a l'ecrasement. Le Génie Civil, nr 5, 1904.
- 6 Czudek H. Konstrukcje zespolone w mostownictwie metalowym. Wydawnictwo PW, Warszawa, 1969.
- 7 Czudek H. Stan wiedzy w zakresie konstrukcji zespolonych. V Konferencja Naukowa - Konstrukcje zespolone, Zielona Góra, (1999) 7-28.
- 8 Ducret J.-M., Lebet J.-P. Behaviour of Composite Bridges during Construction. Structural Engineering International, Vol. 9, No. 3, (1999) 212-218.
- 9 Furtak K. Mosty zespolone. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Kraków, 1999.
- 10 Furtak K., Łącki J. Analiza naprężeń termiczno – skurczowych w zespolonych belkach mostowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 3, (1997) 155-158.
- 11 Furtak K., Musialik E. Analiza wybranych metod obliczania rozstawu i rozwarcia rys w belkach żelbetowych. Czasopismo Techniczne, nr 3-B, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2001.
- 12 Godycki - Ćwirko T. Z badań nad rysami w zginanych elementach żelbetowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 2, (1961)
- 13 Gómez Navarro M. Concrete cracking in the deck slabs of steel - concrete composite bridges. Thèse No. 2268, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2000.
- 14 Jarek B. Zarysowanie płyty żelbetowej w belkach zespolonych typu stal - beton. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2004.
- 15 Jarek B. Zarysowanie belek zespolonych typu stal - beton o zespoleniu niepełnym. Konferencja Konstrukcje Zespolone, T VIII, Zielona Góra, (2008) 149-158.
- 16 Johnson R. P. Composite Structures of Steel and Concrete. Beams, Columns, Trames and Application in Building. Grand Technical Books, London, 1975.
- 17 Karaś S. Sztywność na zginanie dźwigara zespolonego podatnie typu stal-beton. Mosty, nr 1, (2011) 32-38.
- 18 Karlikowski J. Ocena podatności zespolenia na podstawie badań mostu drogowego. II Konferencja Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra, (1989) 89-95.
- 19 Karlikowski J., Madaj A., Wołowicki W. Badanie skutków zarysowania płyty w belkach zespolonych. Inżynieria i Budownictwo, nr 7, (2002) 381-383.
- 20 Kindmann R. Composite Girders, IABSE Short Course. IABSE reports, vol. 61, Brussels, 1990.
- 21 Kuczyński W. Konstrukcje betonowe. Kontynualna teoria zginania żelbetu. PWN, Warszawa, 1971.
- 22 Łągoda G., Łągoda M. Technologie stosowane przy budowie mostów zespolonych. II Konferencja Konstrukcje zespolone, Zielona Góra, (1989) 113-119.
- 23 Łągoda G., Łągoda M. Projektowanie mostów zespolonych w świetle PN-EN 1994 -2. Materiały Budowlane, Nr 4, (2010) 45-49.
- 24 Łągoda M. Podatność zespolenia w konstrukcjach mostowych. Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa, Nr 2, 1980.
- 25 Łągoda M. Stan graniczny podatności łączników w mostowych konstrukcjach zespolonych. Praca doktorska, IBDiM, Warszawa, 1981.
- 26 Łągoda M., Śledziwski K. Wpływ zarysowania betonu na pracę belki zespolonej ciągłej typu stal – beton. Przegląd Spawalnictwa, nr 3, (2011) 31-35.
- 27 Łącki J. Nośność zespolenia żelbetowej płyty z dźwigarem stalowym. Maszynopis, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Krakowska, Kraków, 1998.

- 28 Madaj A. Sztywność giętna stalowo – betonowego przekroju zespolonego z rozciąganą częścią betonową. Konferencja Naukowo – Techniczna „Mosty Zespolone”, Kraków, (1998) 233-242.
- 29 Madaj A. Redystrybucja sił w ciągłej belce zespolonej stalowo – betonowej. V konferencja naukowa „Konstrukcje zespolone”, Zielona Góra, (1999) 169-180.
- 30 Madaj A. Sztywność zginania stalowo – betonowych belek zespolonych: teoria i badania. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budownictwo Lądowe, nr 45, (2001) 81-105.
- 31 Madaj A. Doraźna nośność i sztywność na zginanie zespolonych belek stalowo – betonowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2005.
- 32 Muraszow W.J. Trieszczinoustojcziwost, zeszkost i procznost żeliezobetonu. Maszstroizdat, 1950.
- 33 Pechar J., Bures J., Schindler A. Kovove mosty. SNTL, ALFA, Praha, 1990.
- 34 PN-EN 1994-2 Eurokod 4: Projektowanie konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych. Część 2: Reguły ogólne i reguły dla mostów.
- 35 Saliger R. Der Stahlbetonbau. Verl. Deuticke, Wiedeń, 1956.

Operation of a steel-concrete composite beam considering slab cracking

Marek Łagoda¹, Krzysztof Śledziwski²

¹ Road and Bridge Research Institute, e-mail: mlagoda@ibdim.edu.pl

² Department of Road and Bridge, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: k.sledziwski@pollub.pl

Abstract: The theme of the paper is the effect of scratching of reinforced concrete slab on the work of a steel-concrete composite beam. The paper evaluates the state of knowledge in the field of composite structures, in particular, statically indeterminate structures with concrete in tension zones. Additionally, in a nutshell, it describes the current practice of design. Moreover, experimental studies were described on continuous beams that were made by the authors. A proposal for further work on this topic was also presented.

Keywords: composite beam, scratch, Eurocode, laboratory tests