

Stosowanie hipotezy kumulacji uszkodzeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączenia ścinanego w kontekście badań

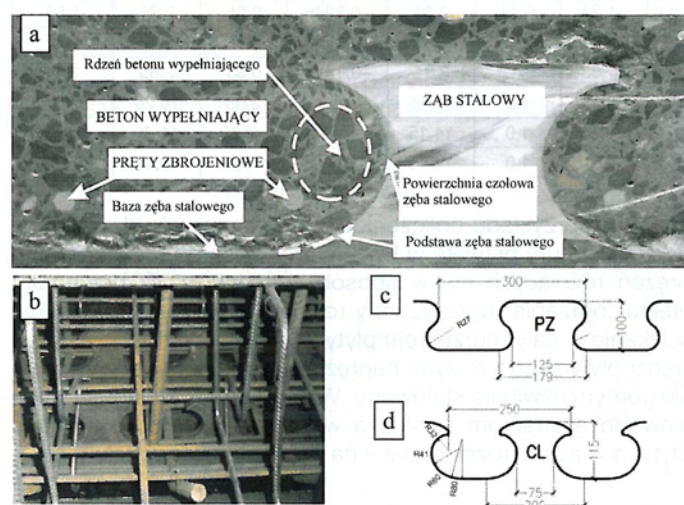
W obiektach mostowych budowanych w technologii VFT-WIB® oraz w prototypowych przęsłach obiektów kolejowych są obecnie w Europie stosowane **połączenia ścinane typu composite dowels**. Takie rozwiązanie zastosowano w wybudowanym w Polsce w 2010 r. moście kolejowym w ciągu dwutorowej linii 61 Kielce – Fosowskie, stanowiącego przeprawę nad rzeką Łososiną [6]. Pod względem techniczno-ekonomicznym rozwiązanie to wydaje się atrakcyjniejsze niż klasyczne dźwigary obetonowane. Zasadnicze kwestie dotyczące projektowania i wytwarzania nowego rodzaju zespolenia zostały już rozwiązane. Ostatnie prace badawcze dotyczyły trwałości zmęczeniowej połączenia. Problem ten, w miarę prowadzonych badań, stał się coraz bardziej klarowny, a uzyskiwane wyniki doświadczeń, potwierdzając czysto teoretyczne z początku założenia, pozwoliły na postawienie tezy, która po udowodnieniu stanowić ma podstawę projektowania z uwzględnieniem zmęczenia. Ponieważ zmęczenie jest często decydującym kryterium, a stosowane obecnie zasady projektowania są na korzyść bezpieczeństwa, określenie odpowiednich procedur jest istotne również z uwagi na obniżenie kosztów konstrukcji.

Podstawową kwestią do wyjaśnienia było, czy jest poprawne stosowanie hipotezy kumulacji uszkodzeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej, co pozwala ostatecznie ująć problem w ramy procedur projektowania. W przypadku łączników sworznowych z główką podejście takie jest stosowane, chociaż nie do końca odpowiada ono rzeczywistej pracy konstrukcji i nie musi być na korzyść bezpieczeństwa, co potwierdzono badaniami. Podstawowy problem polega na tym, że układ naprężeń, powstający na styku stal-beton, w połączeniu ścinanym, może zmieniać się wraz ze zwiększeniem liczby cykli obciążenia – tak jest w przypadku sworzn z główką. Jeżeli ten układ naprężeń jest stały lub zmienia się nieznacznie w całym okresie eksploatacji konstrukcji, to mogą być stosowane klasyczne podejścia. Na tym zagadnieniu skupiono się w niniejszym artykule. Na rysunku 1 przedstawiono nazewnictwo połączenia ścinanego composite dowels oraz rozważane kształty zębów.

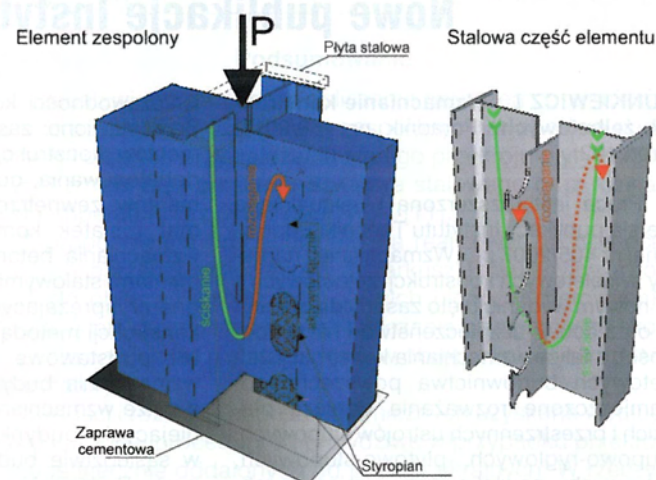
Badania NPOT

W ramach projektu [4] zaprojektowano elementy typu NPOT – zmodyfikowaną formę klasycznych elementów POST, na których badano trwałość zmęczeniową połączenia typu composite dowel. Modyfikacja modelu polegała na tym, aby ścinanie zębów uzyskać w warunkach globalnego rozciągania blachy, z której te zęby są wycięte. W ten sposób warunki pracy elementu możliwe dobrze odpowiadały warunkom w zginanej momentem dodatnim belce swobodnie podpartej, przy czym sztywność badanego elementu umożliwiła uzyskanie dużej częstotliwości przyłożenia obciążenia.

Na rysunku 2 przedstawiono zasadę pracy elementów NPOT. Po wykonaniu doświadczeń i rozcięciu elementów, w przypadku kształtu PZ, nie zauważono przylegających do



Rys. 1. Geometria i części składowe połączenia ścinanego composite dowels: a) nazewnictwo, b) elementy stalowe połączenia przed zabetonowaniem, c) geometria kształtu PZ, d) geometria kształtu (M) CL



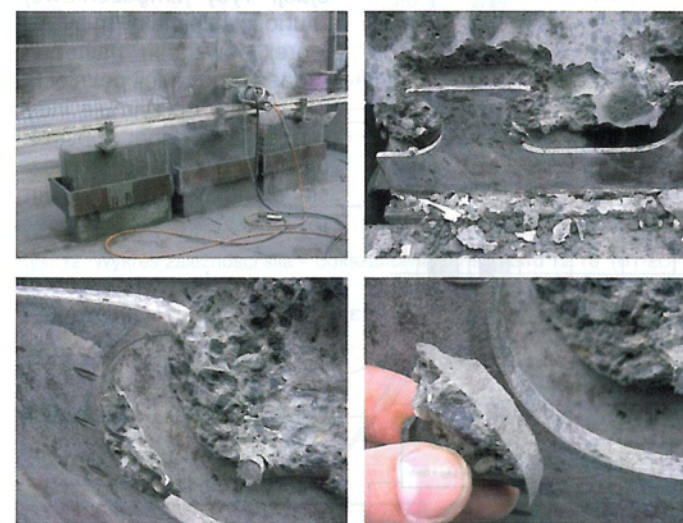
Rys. 2. Schemat próby NPOT

stali fragmentów betonu, jednak trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy jest to efekt samego kształtu, czy faktu, że nastąpiło pęknięcie i zmienił się model pracy konstrukcji, czy też po prostu jest to efektem odlupania w trakcie rozciągania. Niemniej, w przypadku kształtu CL (który ma kształt powierzchni czołowej taki sam, jak MCL) oraz w przypadku kształtu SA (o podobnym kształcie powierzchni czołowej) stwierdza się, że adhezja występowała. Pozwala to wysunąć wniosek, że w zakresie sił, jakim były poddawane modele NPOT, tj. przy amplitudzie 80 kN na ząb, adhezja, a zatem profil naprężeń na styku stal-beton, nie ulega zmianie w trakcie badania.

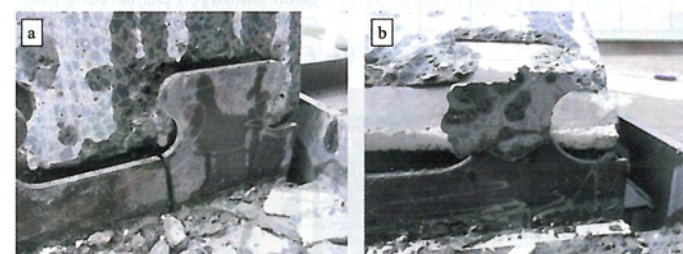
Próbka uległa zniszczeniu po 1,4 mln cykli. Przyjmując bezpiecznie proponowaną do projektowania kategorię zmęczeniową krawędzi jako 125 MPa, otrzymuje się liczbę cykli do zniszczenia wynoszącą około 300 tysięcy, co można wyznaczyć ze wzoru

$$N = \exp \left(\ln(2 \cdot 10^6) - 3 \ln \left(\frac{\Delta \sigma_1}{125} \right) \right)$$

To z jednej strony pozwala wnioskować, że próbka była poddawana obciążeniom większym niż powstające od obciążenia zmęczeniowego w realnej konstrukcji, a z drugiej strony zastanawiająco duża jest jej trwałość, co wskazuje na fakt przenoszenia części obciążenia przez adhezję i tarcie (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Ilustracja stanu połączenia ścinanego kształtu CL po badaniach cyklicznych prób NPOT

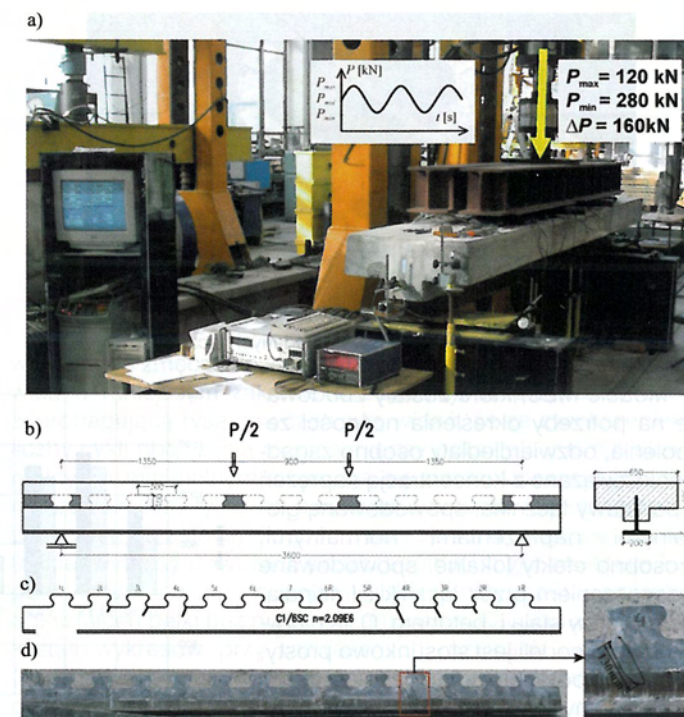


Rys. 4. Zmęczeniowe pęknięcia próby o kształcie PZ w próbach NPOT: a) w połączeniu PZ z brakiem adhezji b) w połączeniu CL bez pęknięcia i z występującą adhezją

Wyniki analizy elementów NPOT są obiecujące w kontekście oczekiwanej, zadowalającej trwałości zmęczeniowej, rozpatrując łącznie wpływ charakterystyki samej krawędzi zęba stalowego oraz tarcia i adhezji. Ujęcie tych wpływów łącznie prowadzi do wniosku, że układ naprężeń nie zmienia się wraz z liczbą cykli. Problem w tym, że w konstrukcji w formie belki wpływ tarcia i adhezji oraz efekty trójosiowego ściskania betonu są inne. Aby rozwiązać problem, przeprowadzono badania belek z docelowym kształtem wycięcia, tj. MCL. Wykonano badania belek ze średnicami grubości 10 mm, analizując zbliżone do realnych oraz zawyżone obciążenia cykliczne. W ramach prac nad dopuszczeniem nowego zespolenia do stosowania w konstrukcjach Kolei Niemieckich (DB) wykonano odrębne badania (Seidl, Mensinger) konstrukcji, w których grubość średnicy przekraczała 20 mm. Wyniki opublikowano w drugiej części artykułu [2], dotyczącej trwałości zmęczeniowej.

Belki z łącznikami o kształcie PZ

Pęknięcia, które zaobserwowano w trakcie badań [4] pod obciążeniem cyklicznym (rys. 5), posłużyły jako podstawa do



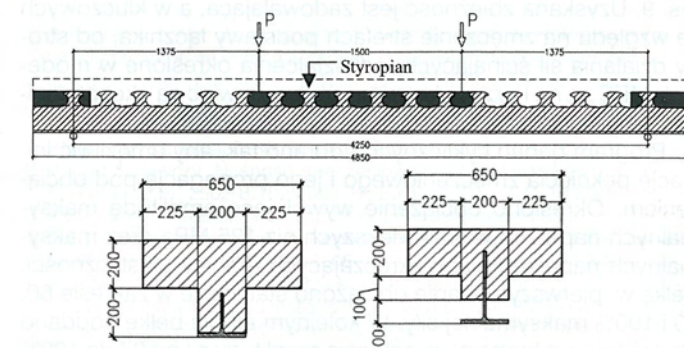
Rys. 5. Badania belki o kształcie PZ: a) widok stanowiska, b) schemat belki, c) pęknięcia zmęczeniowe po 2 milionach cykli obciążenia, d) część stalowa po badaniach

podjęcia prac nad trwałością zmęczeniową [3]. Pierwotnie rozpatrywany kształt wycięcia, w formie puzła, został ostatecznie zastąpiony kształtem MCL, o większej trwałości zmęczeniowej. W ramach projektu [4] opracowano metody i warsztat pracy, pozwalające modelować sprawnie zjawiska i szacować trwałość zmęczeniową. Proponowane podejście zweryfikowano badaniami kształtu PZ. Wyniki badań [4] przedstawiono jako punkt wyjścia i odniesienia do analizy belek z łącznikami o kształcie MCL.

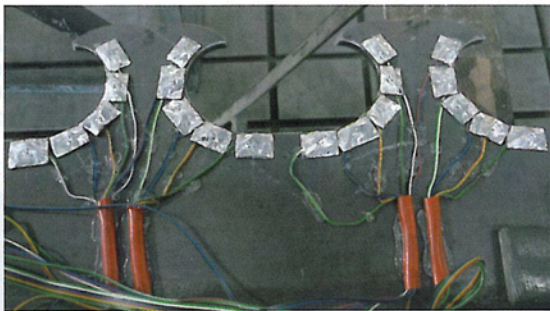
Badania belek z łącznikami o kształcie MCL

W ramach projektu [3], w laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej poddano badaniom belki o długości teoretycznej 4,25 m, obciążane statycznie i cyklicznie. Rozróżniono belki ze średnikiem niskim oraz wysokim (rys. 6). W belkach badanych pod obciążeniem statycznym na szeroką skalę zastosowano tensometrię elektrooporową do pomiaru odkształceń, przede wszystkim w łącznikach stalowych i późniejszej kalibracji modeli MES. Rozmieszczenie tensometrów na łącznikach przedstawiono na rys. 7.

Badania statyczne belek realizowano tak, aby najpierw belkę obciążyć w zakresie 5÷40% jej szacowanej nośności granicznej (nie powodowało to według obliczeń przekroczenia granicy plastyczności stali w żadnym jej punkcie) 25 cyklami obciążenia, a dopiero potem obciążyć ją aż do zniszczenia.

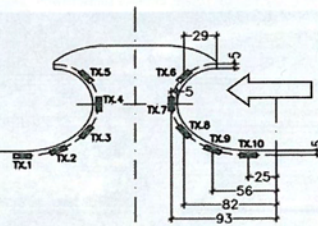
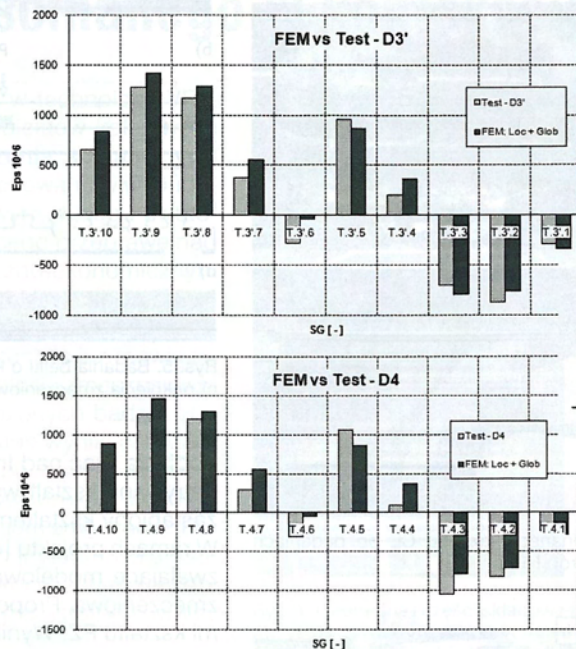


Rys. 6. Schemat statyczny i geometria badanych belek

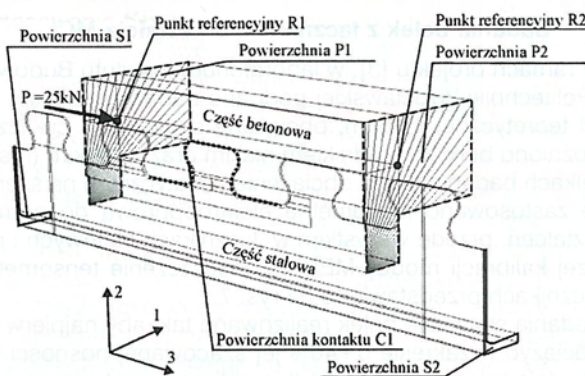


Rys. 7. Układ tensometrów na badanych łącznikach

Modele MES, które zostały zbudowane na potrzeby określenia nośności zespolenia, odzwierciedlały osobno zagadnienia związane z koncentracją naprężeń u podstawy łącznika, spowodowaną globalnymi naprężeniami normalnymi, a osobno efekty lokalne, spowodowane przeniesieniem przez łącznik sił ścinających między stalą i betonem. O ile pierwszy z tych modeli jest stosunkowo prosty, ponieważ odzwierciedla blachę wyciętą w pożądanym sposobie (kształt łącznika), obciążoną osiowo, o tyle drugi z nich jest modelem dość złożonym, bo musi uwzględniać zagadnienia kontaktowe między stalą i betonem. Dlatego z definicji musi być modelem nieliniowym (ogólny zarys na rys. 8). Zbieżność odkształceń w poszczególnych punktach łącznika (tensometry T1 ÷ T10), uzyskanych z modeli MES (czarne słupki) w porównaniu z badaniami doświadczalnymi (szare słupki), zilustrowano schematycznie na



Rys. 9. Wartości odkształceń w zębach stalowych pomierzone podczas badań i obliczone za pomocą MES



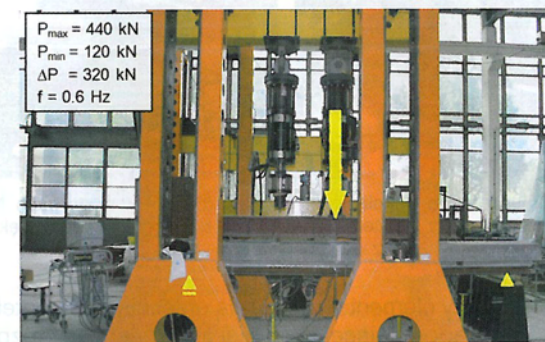
Rys. 8. Ogólna charakterystyka modelu numerycznego do wyznaczania efektów lokalnego ścinania stal-beton (na rysunku kształt PZ)

rys. 9. Uzyskana zbieżność jest zadowalająca, a w kluczowych ze względu na zmęczenie strefach podstawy łącznika, od strony działania sił ścinających, odkształcenia określone w modelach MES są na korzyść bezpieczeństwa, a więc są akceptowalne z punktu widzenia stosowania ich w projektowaniu.

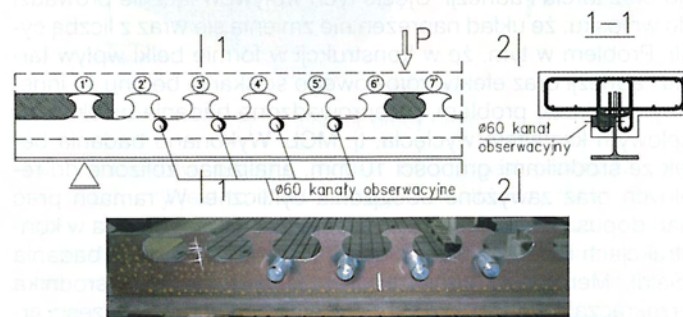
Program badań cyklicznych dobrano tak, aby umożliwić inicjację pęknięcia zmęczeniowego i jego propagację pod obciążeniem. Określono obciążenie wywołujące amplitudę maksymalnych naprężeń w stali większych niż 125 MPa oraz maksymalnych naprężeń nieprzekraczających granicy plastyczności. Belkę w pierwszym etapie obciążono statycznie w zakresie 60, 80 i 100% maksymalnej siły. W kolejnym etapie belkę poddano obciążeniu cyklicznemu w zakresie amplitudy sił od 27 do 100% wartości siły. Stanowisko badawcze pokazano na rys. 10.

W belce zastosowano, u podstawy łączników, rury osłonowe tworzące kanały obserwacyjne. Przez te kanały w czasie badań cyklicznych prowadzono pomiar kamerą termowizyjną dużej czułości i częstości odczytów, dzięki której obserwowano propagację pęknięcia zmęczeniowego. Sposób rozmieszczenia rur oraz miejsca wbudowania przedstawiono na rys. 11. Pęknięcie zaobserwowano przy liczbie cykli $N = 320\ 000$. Rysa propagowała aż do zerwania pasa dolnego i utraty nośności belki ($N = 952\ 000$ cykli). Po raz pierwszy udało się więc uzyskać taki mechanizm zniszczenia belki z „wysokim środkiem”, a także po raz pierwszy uzyskano pęknięcia zmęczeniowe w połączeniu o kształcie MCL. Trudno jest jednoznacznie określić moment inicjacji rysy zmęczeniowej.

Długość minimalną rysy, po której powstaniu następuje proces propagacji pęknięcia, określa się i przyjmuje indywidualnie w danej konstrukcji. Tutaj wstępnie rozważa się długość $a_{min} = 0,1\ mm$ [5].



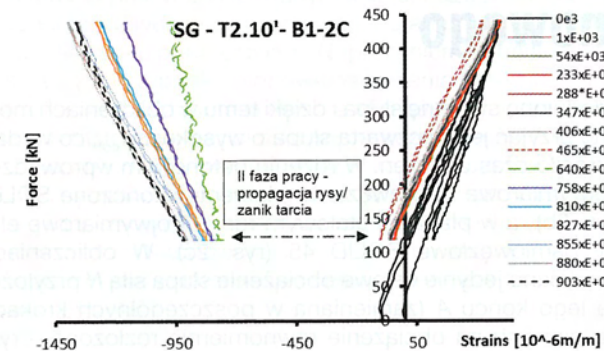
Rys. 10. Stanowisko badawcze belek obciążanych cyklicznie



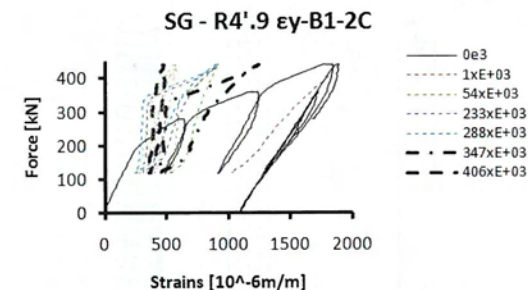
Rys. 11. Rozmieszczenie kanałów obserwacyjnych w wybranej belce

W prowadzonych badaniach zaobserwowano rysę długości około 13 mm. Należy przyjąć, że jest to etap propagacji rysy, do momentu osiągnięcia wartości długości krytycznej. Moment

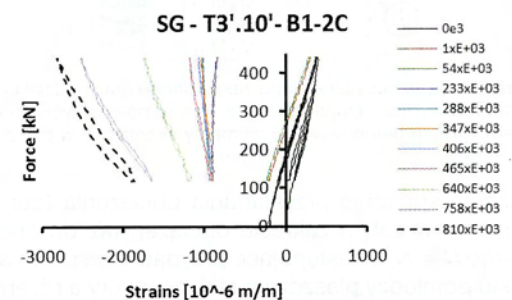
pojawienia się rysy oraz jej propagacji na stalowym łączniku można zaobserwować również na wykresach z pomiarów czujników elektrooporowych. W przedziale cykli $465\ 000 \div 640\ 000$ nastąpiło duże zwiększenie (skok) odkształceń (rys. 12), spowodowany albo zwiększeniem długości rysy, albo zanikiem sił tarcia. Na rysunku 13 przedstawiono przebieg i kształt pętli, które w przedziale $347\ 000 \div 406\ 000$ zanikają i przybierają regularny kształt, zbliżony do wykresów na rys. 14.



Rys. 12. Wykres zależności siła - odkształcenie tensometru T2.10' (B1-2C)



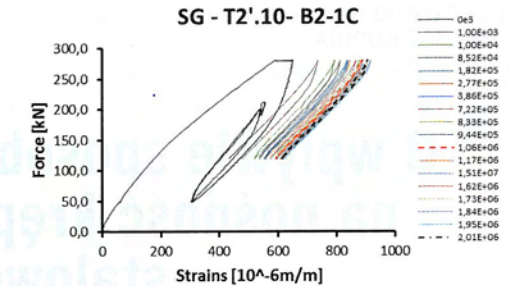
Rys. 13. Wykres zależności siła - odkształcenie rozety R4' 9 (B1-2C)



Rys. 14. Wykres zależności siła - odkształcenie belki B1-2C

W praktyce inżynierskiej często stosuje się hipotezę liniowego sumowania uszkodzeń zmęczeniowych *Palmgren-Minera*, która pozwala obliczyć obciążenie zastępcze o stałej amplitudzie, równoważne pod względem uszkodzenia elementu obciążeniu rzeczywistemu. Hipoteza ta jest opisana za pomocą krzywych wytrzymałości zmęczeniowych *Wöhlera*, które w sytuacji niezmiennego układu naprężeń w zębach, wraz ze zwiększeniem liczby cykli, można by wykorzystać w obliczaniu wytrzymałości zmęczeniowej połączenia ścinanego composite dowels typu MCL. Z przeprowadzonych na dużą skalę badań doświadczalnych można wnioskować, że układ naprężeń w obszarze zęba nie ulega zmianie lub jeżeli ulega, to w niewielkim stopniu. Na rysunku 14 przedstawiono wykres z pomiarów za pomocą tensometrów dotyczący belki, która w wyniku pojawienia się i propagacji rysy uległa zniszczeniu. W celu porównania, na rys. 15 pokazano wykres w odniesieniu do belki zachowującej nośność (inny program badań, mniejsze obciążenia).

Przedstawione wyniki wskazują na inną pracę stalowego łącznika w przypadku belki z propagującą rysą oraz belki,



Rys. 15. Wykres zależności siła - odkształcenie belki B2-1C

w której rys zmęczeniowej nie zaobserwowano (belka pracowała w mniejszym zakresie obciążenia). W przypadku belki z propagującą rysą zmęczeniową widać, że ze zwiększeniem liczby cykli obciążenia różnice między odkształceniami maksymalnym i minimalnym zmieniają się bardzo niewiele (prawie niezauważalnie) tylko do pewnego momentu (do osiągnięcia przez rysę określonej długości), po czym zmieniają się diametralnie (wykresy dotyczące poszczególnych cykli zmieniają kąt pochylenia). Inaczej sytuacja wygląda w przypadku pomiarów odkształceń belki bez rys zmęczeniowych. Kąt pochylenia oraz kształt wykresów przy rozważaniach o różnicach odkształceń (maksimum - minimum) nie ulegają zmianie, jedynie równolegle się przesuwają. Na podstawie tych obserwacji można wyciągnąć wniosek, że zarówno w przypadku belek niezarysowanych, jak i zarysowanych, gdy rysa nie przekracza pewnej granicznej długości, stan naprężenia w obrębie stalowego łącznika nie ulega zmianie. Zatem w takich przypadkach można stosować hipotezę kumulacji uszkodzeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączenia ścinanego typu composite dowels w belkach zespolonych. Pozostają wciąż kwestie związane zarówno z maksymalną (graniczną) długością rysy, która nie zmienia rozkładu naprężeń, jak i sprawa dotycząca przyczyn równoległego przesuwania wykresów wraz ze zwiększeniem liczby cykli. Być może wiąże się to z uszkodzeniem czujników elektrooporowych albo ze zmianą właściwości pomiarowych czujników wraz ze zwiększającą się liczbą cykli. Nie wyklucza się jednak innych przyczyn.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz mając na uwadze stosowane obecnie procedury projektowania konstrukcji ze względu na zmęczenie, autorzy proponują, aby stosować hipotezę kumulacji uszkodzeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączenia ścinanego typu composite dowels i tym samym zakładać rozkład naprężeń w połączeniu niezależny od liczby cykli obciążenia.

Pozostałe kwestie dotyczące trwałości zmęczeniowej proponuje się uwzględnić obecnie zgodnie z [1], a po zakończeniu prac w ramach [3] zostaną one ostatecznie zweryfikowane.

PIŚMIENICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Barthelemy J., Hechler O., Lorenc W., Seidl G., Viehues E.: Premiers résultats du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle. „Construction Métallique”, CTICM, 2009, vol. 46, no 3.
- [2] Barthelemy J., Lorenc W., Mensinger M., Rauscher S., Seidl G.: Zum Tragverhalten von Verbunddübeln, Teil 1: Tragverhalten unter statischer Belastung. „Stahlbau”, 80 (2011), Heft 3.
- [3] Projekt badawczy „Nośność zmęczeniowa ciągłych łączników otwartych”. Numer umowy: 2502/B/T02/2009/37, 2009.10.21 – 2011.10.20.
- [4] PreCo-Beam: Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission. Final Report (2009). Research Fund for Coal and Steel. Contract No. RFSR-CT-2006-00030. 01/07/2006 – 30/06/2009.
- [5] Abschlussbericht Institutsbericht Nr. 169/2006 des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau und Instituts für Massivbau der RWTH Aachen, 2007.
- [6] Kolakowski T., Kosecki W., Lorenz W., Rabięga J., Seidl G.: Prefabrykowane dźwigary zespolone stalowo-betonowe WFT-WIB do budowy prześel mostów drogowych i kolejowych. „Inżynieria i budownictwo”, nr 7-8/2011.