

**STOSOWANIE HIPOTEZY KUMULACJI USZKODZEŃ
DO WYZNACZANIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
POŁĄCZENIA ŚCINANEGO TYPU COMPOSITE DOWELS
W KONTEKŚCIE ZREALIZOWANYCH BADAŃ**

Tomasz KOŁAKOWSKI¹, Maciej KOŻUCH², Ernest KUBICA²,
Wojciech LORENC², Sławomir ROWIŃSKI²

¹ Europrojekt Gdańsk Sp. z o.o.

² Politechnika Wrocławska

Summary

Application of theory of cumulation of damages (Palmgren – Miner sum) for determination of fatigue durability of composite dowels shear connection in steel - concrete composite beams is presented. One must take into account stress distribution within steel dowel as well as change of this stress pattern with increased number of cycles. Analyses were carried out in relation to extended tests of composite beams under cyclic loads. The tests led to occurrence of fatigue cracks in steel dowels.

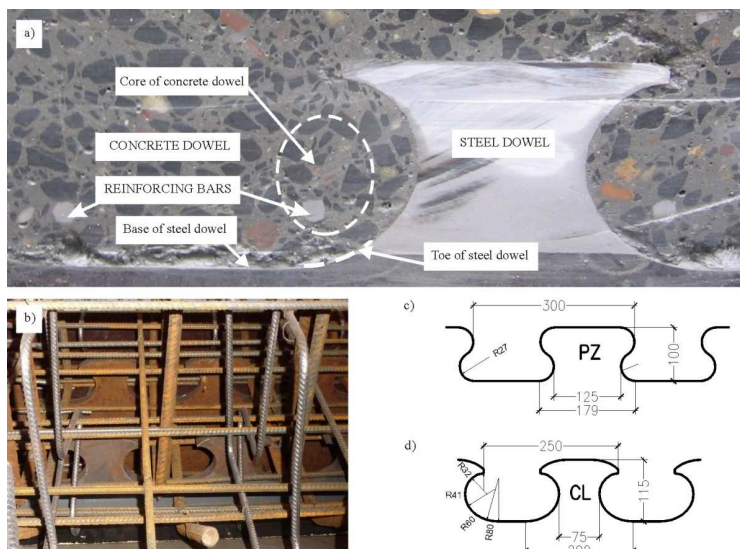
Słowa kluczowe: hipoteza Palmgren – Minera, zespolenie composite dowel, zmęczenie, badania doświadczalne, belki zespolone

1. WSTĘP

Połączenie ścinane typu composite dowels jest obecnie stosowane w Europie w obiektach mostowych budowanych w technologii VFT-WIB® oraz w prototypowych przęsłach obiektów kolejowych w zupełnie innej (nowej) technologii. Wybudowanie w Polsce w 2010 roku mostu kolejowego w ciągu dwutorowej linii 61 Kielce-Fosowskie w km 23.093 stanowiącego przeprawę nad rzeką Łososiną potwierdziło, że w kontekście kryteriów techniczno-ekonomicznych rozwiązanie to wydaje się atrakcyjniejsze aniżeli klasyczne dźwigary obetonowane. Zasadnicze kwestie dotyczące projektowania i wytwarzania nowego rodzaju zespolenia zostały już rozwiązane. Ostatnie prace badawcze dotyczyły problemu trwałości zmęczeniowej połączenia. Pierwotnie bardzo skomplikowany problem, w miarę prowadzonych badań, stawał się coraz bardziej klarowny a uży-

skiwane 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 dla obniżenia kosztów konstrukcji.

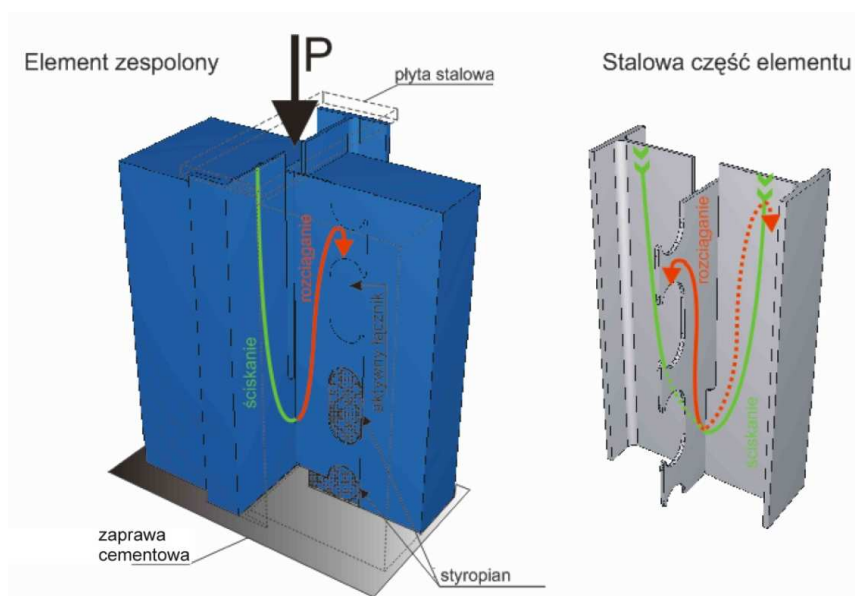
Podstawową kwestią do wyjaśnienia było, czy poprawnym jest stosowanie hipotezy kumulacji uszkodzeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej, co pozwala ostatecznie ująć problem w ramy powszechnie stosowanych procedur projektowania. W przypadku szeroko stosowanych łączników sworzniowych z główką, podejście 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 wzrostem liczby cykli obciążenia – tak jest w przypadku sworzni z główką. Jeżeli ten układ naprężeń jest stały, lub zmienia się nieznacznie w całym okresie eksploatacji konstrukcji, mogą być stosowane klasyczne podejścia. Na tym zagadnieniu skupiono się w niniejszym referacie. Na rys. 1 przedstawiono ogólnie stosowane połączenia ścinane oraz kształty zębów rozważane w niniejszym referacie.



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

2. BADANIA NPOT

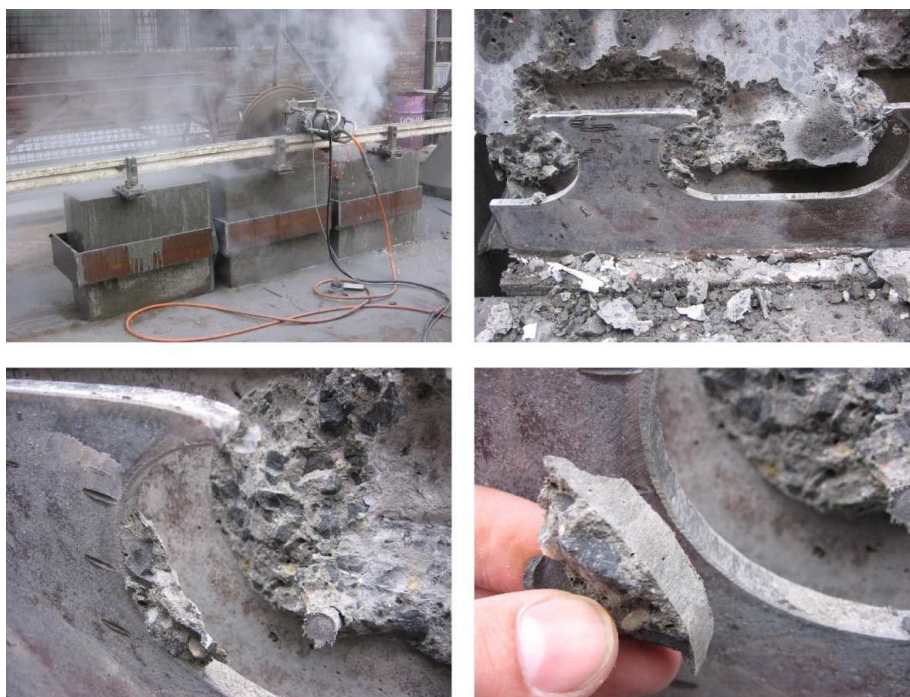
W ramach projektu [4] zaprojektowano elementy typu NPOT – zmodyfikowaną formę klasycznych elementów POST – na których badano trwałość zmęczeniową połączenia typu composite dowel. Modyfikacja modelu polegała na tym, aby ścinanie zębów uzyskać w warunkach globalnego rozciągania blachy, z której te zęby są wycięte. W ten sposób warunki pracy elementu możliwie blisko odpowiadały tym w zginanej momentem dodatnim belce swobodnie podpartej, przy czym sztywność badanego elementu pozwoliła na uzyskanie dużej częstotliwości przyłożenia obciążenia. Na rys. 2 przedstawiono ogólnie zasadę pracy elementów NPOT.



Rys. 2. Schemat próby NPOT

Po wykonaniu doświadczeń i rozcięciu elementów, w przypadku kształtu PZ, nie zauważono przylegających do 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 odłupania w trakcie rozcinania. Tak czy owak, 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 kohezja występowała. Pozwala to wysunąć wniosek, że w zakresie sił jakim

poddawane były modele NPOT, tj. przy amplitudzie 80kN na ząb, kohezja, a zatem profil naprężeń na styku stal-beton, nie ulega zmianie w trakcie badania.



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

Odnosząc się do proponowanego obecnie do projektowania podejścia [1] wyznaczono naprężenia na poziomie 226 MPa. Przyjmując, na podstawie badań, liczbę cykli 1.4 mln i bezpiecznie proponowaną obecnie do projektowania kategorię zmęczeniową krawędzi jako 125 MPa, otrzymuje się liczbę cykli do zniszczenia na poziomie około 300 tysięcy, co można wyznaczyć ze wzoru (1).

$$N = \exp\left(\ln(2 \cdot 10^6) - 3 \cdot \ln\left(\frac{\Delta\sigma_1}{125}\right)\right) \quad (1)$$

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

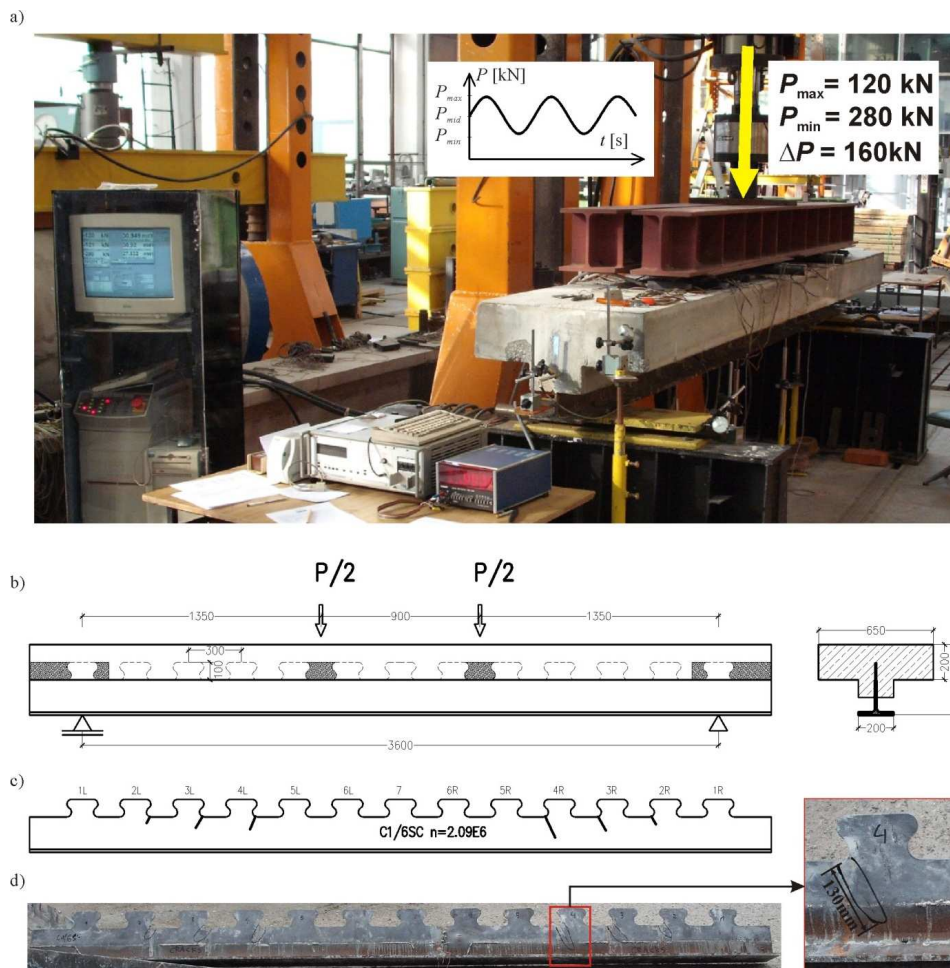


Rys. 4 Próby NPOT: zmęczeniowe pęknięcie próby o kształcie PZ w połączeniu z brakiem kohezji oraz kształt CL bez pęknięcia i z występującą kohezją

Wyniki analizy elementów NPOT są obiecujące w kontekście oczekiwanej, zadowalającej, trwałości zmęczeniowej, rozpatrując łącznie wpływ charakterystyki samej krawędzi zęba stalowego oraz tarcia i kohezji. 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 kohezji oraz efekty trójosiowego ściskania betonu prezentują się inaczej. Aby rozwiązać problem, przeprowadzono badania belek z docelowym kształtem wycięcia, tj. MCL. Wykonano badania belek ze średnikami o grubości 10mm, analizując zbliżone do realnych oraz zawyżone obciążenia cykliczne [5]. W ramach prac nad dopuszczeniem nowego zespoleń do stosowania w konstrukcjach realizowanych dla Kolei Niemieckich (DB) wykonano odrębne badania (Seidl, Mensinger) konstrukcji w których grubość średnika przekraczała 20 mm, wyniki opublikowano w drugiej części artykułu [2], dotyczącej trwałości zmęczeniowej.

3. BELKI Z ŁĄCZNIKAMI O KSZTAŁCIE PZ

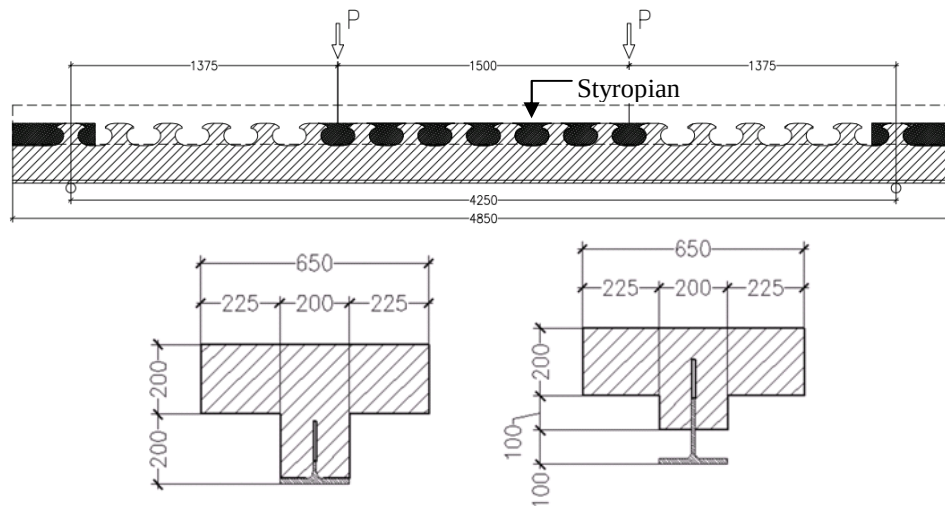
Pęknięcia, które zaobserwowano w trakcie badań [4] pod obciążeniem cyklicznym, posłużyły jako podstawa do podjęcia prac nad trwałością zmęczeniową [3]. Pierwotnie rozpatrywany kształt wycięcia, w formie puzzla, został ostatecznie zastąpiony kształtem MCL, o większej trwałości zmęczeniowej. W ramach projektu [3] 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.



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

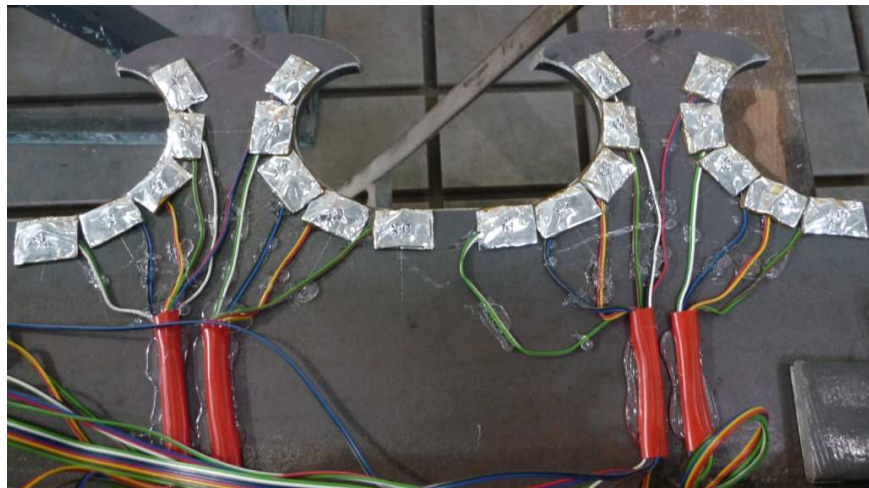
4. BADANIA BELEK W SKALI NATURALNEJ

W ramach realizowanego 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).



Rys. 6. Schemat statyczny i geometria badanych belek

W belkach, badanych pod obciążeniem statycznym, na szeroką skalę zastosowano tensometrię elektrooporową celem pomiaru odkształceń, przede wszystkim w łącznikach stalowych i późniejszej kalibracji modeli MES. Rozmieszczenie tensometrów na łącznikach przedstawione jest na rys. 7.

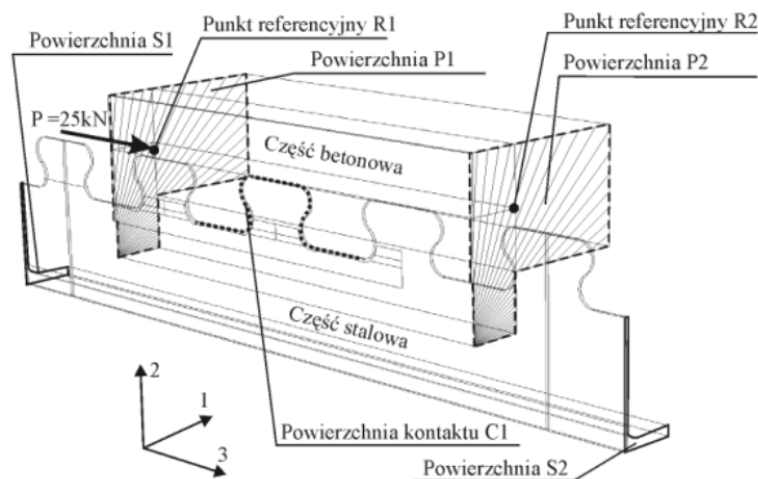


Rys. 7. Układ tensometrów na badanych łącznikach

Badania statyczne belek realizowane były w ten sposób, aby najpierw belkę obciążyć w zakresie 5 – 40% jej szacowanej nośności granicznej (nie powodowało to wg obliczeń przekroczenia granicy plastyczności stali w żadnym

jej punkcie) 25 cyklami obciążenia, a dopiero potem obciążyć ją aż do zniszczenia.

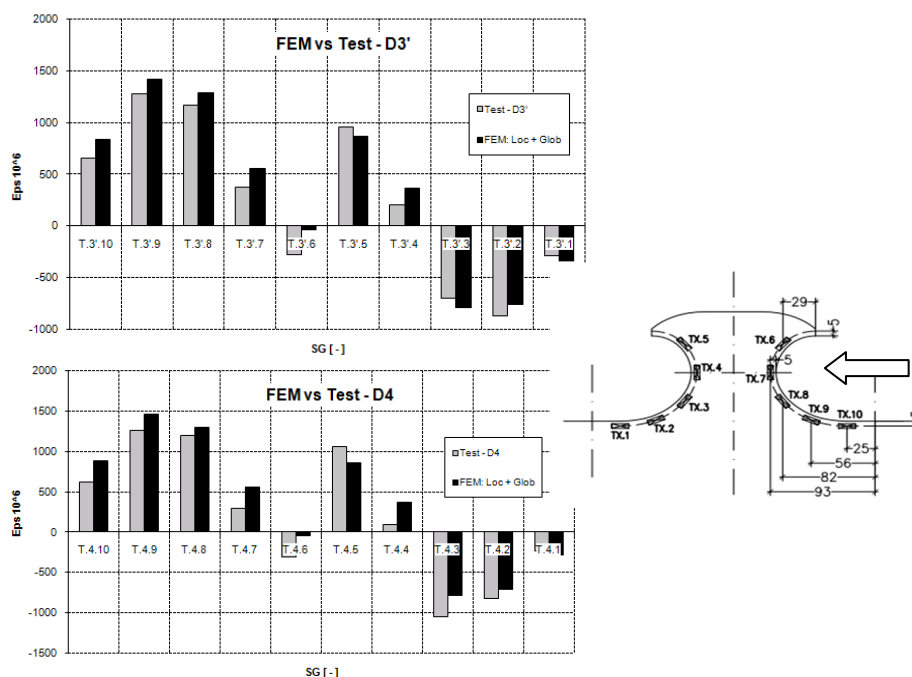
Modele MES, które zostały zbudowane na potrzeby określenia nośności zespolenia, odzwierciedlały osobno zagadnienia związane z koncentracją naprężeń u podstawy łącznika, spowodowaną globalnymi naprężeniami normalnymi, a osobno efekty lokalne, spowodowane przenoszeniem przez łącznik sił ścinających między stalą i betonem. O ile pierwszy z tych modeli jest stosunkowo prosty, ponieważ odzwierciedla blachę wyciętą w pożądany sposób (kształt łącznika), obciążoną osiowo, o tyle drugi z nich jest modelem dość złożonym, bo musi uwzględniać zagadnienia kontaktowe między stalą i betonem, więc z definicji musi być modelem nieliniowym (ogólny zarys na rys. 8).



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

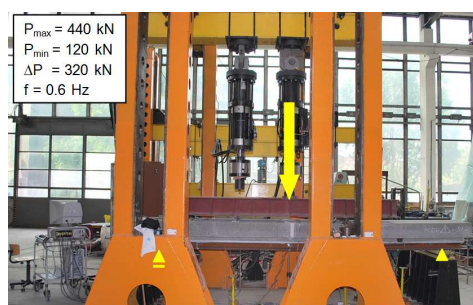
Zbieżność odkształceń w poszczególnych punktach łącznika (tensometry T1 – T10), uzyskanych z modeli MES (czarne słupki) w porównaniu z badaniami doświadczalnymi (szare słupki), przedstawiona jest schematycznie na rys. 9.

Uzyskana zbieżność jest zadowalająca, a w kluczowych dla zmęczenia regionach podstawy łącznika, od strony działania sił ścinających, odkształcenia określone w modelach MES są na korzyść bezpieczeństwa, więc są akceptowalne z punktu widzenia stosowania ich w projektowaniu.



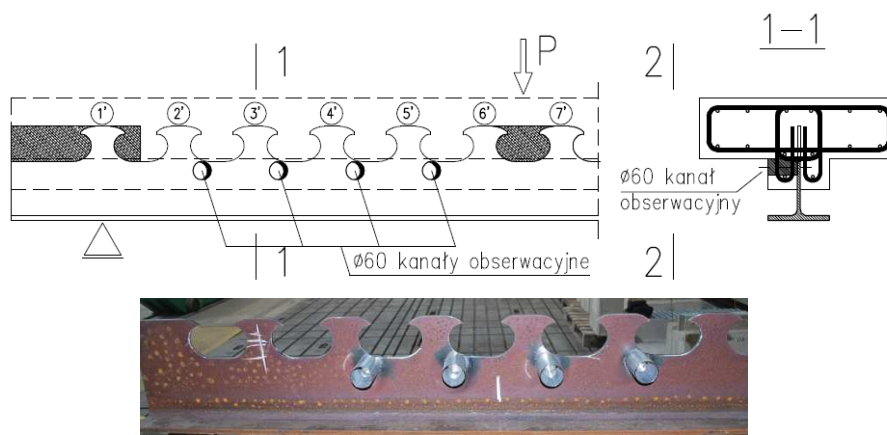
Rys. 9. Wartości odkształceń w zębach stalowych pomierzone podczas badań i obliczone za pomocą MES

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



Rys. 10. Stanowisko badawcze belek obciążanych cyklicznie

W belce zastosowano, u podstawy łączników, rury osłonowe, tworzące kanały obserwacyjne. Przez te kanały, w czasie trwania badań cyklicznych, prowadzono pomiar kamerą termowizyjną dużej czułości i częstotliwości odczytów, dzięki której obserwowano propagację pęknięcia zmęczeniowego. Sposób rozmieszczenia rur oraz miejsca wbudowania zostały przedstawione na rys. 11.

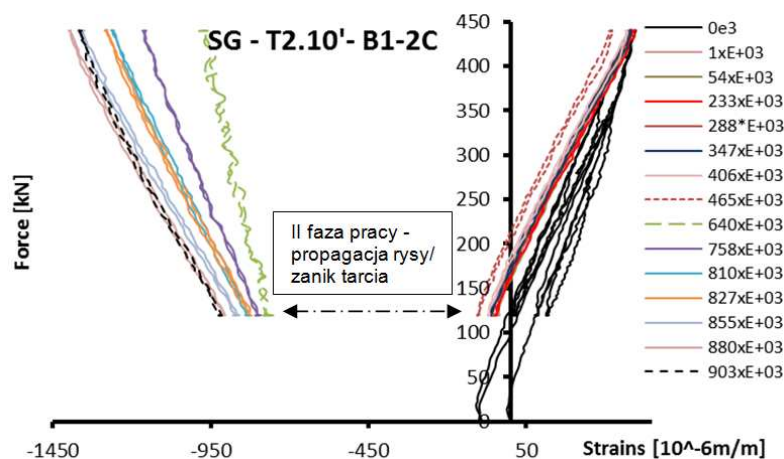


Rys. 11. Rozmieszczenie kanałów obserwacyjnych w wybranej belce

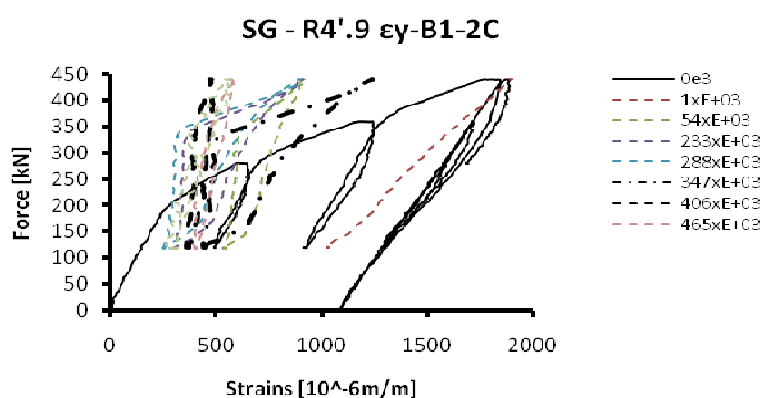
Pęknięcie zaobserwowano przy liczbie cykli $N=320\,000$. Rysa propagowała aż do zerwania pasa dolnego i utraty nośności belki ($N=952\,000$ cykli). Po raz pierwszy udało się więc uzyskać taki mechanizm zniszczenia belki z „wysokim średnikiem”, a także po raz pierwszy uzyskano pęknięcia zmęczeniowe w połączeniu o kształcie MCL.

Trudno jest jednoznacznie określić moment inicjacji rysy zmęczeniowej. Długość minimalną rysy, po powstaniu której następuje proces propagacji pęknięcia, określa się i przyjmuje indywidualnie dla typu konstrukcji. Tutaj wstępnie rozważa się długość $a_{\min}=0,1$ mm [6].

W prowadzonych badaniach zaobserwowano rysę o długości około 13 mm. Należy przyjąć, iż jest to etap propagacji rysy, do momentu osiągnięcia wartości długości krytycznej. Moment pojawienia rysy oraz jej propagacji na stalowym łączniku zaobserwować można również na wykresach z pomiarów czujników elektrooporowych. W przedziale cykli $465 \times 10^3 \div 640 \times 10^3$ nastąpił duży przyrost (skok) odkształceń (rys. 12), spowodowany albo wzrostem długości rysy, albo zanikiem sił tarcia. Na rys. 13 przedstawiono przebieg i kształt pętli, które w przedziale $347 \times 10^3 \div 406 \times 10^3$ zanikają i przybierają regularny kształt, zbliżony do wykresów na rys. 14. Planowane jest precyzyjne rozcięcie przebadanej belki pozwalające określić stan betonu w obrębie strefy ścinającej zęba, co umożliwi zbadać pracę zęba na styku stal - beton.



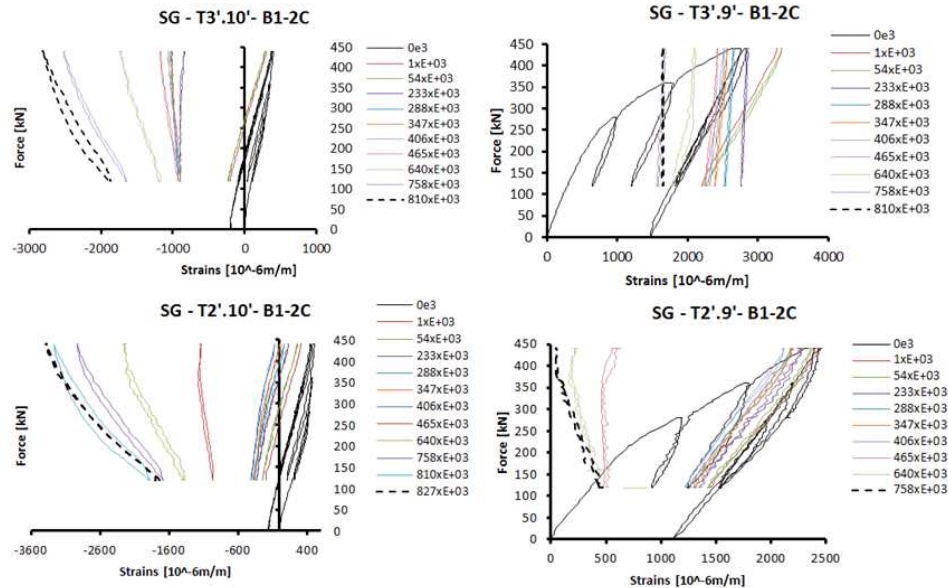
Rys. 12. Wykres zależności siła – odkształcenie dla tensometru T2.10' (B1-2C)



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

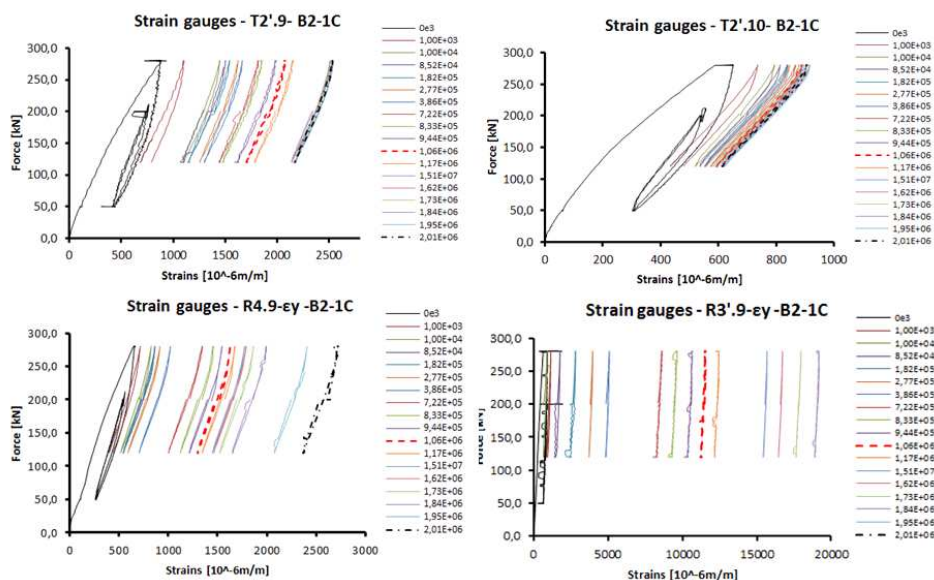
W praktyce inżynierskiej często stosuje się hipotezę liniowego sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera, która pozwala obliczyć obciążenie zastępcze o stałej amplitudzie, równoważne pod względem uszkodzenia elementu obciążeniu rzeczywistemu. Hipoteza ta jest opisana za pomocą krzywych wytrzymałości zmęczeniowych Wöhlera, które w sytuacji niezmiennego układu naprężeń w zębach, wraz ze wzrostem liczby cykli, można by wykorzystać przy obliczaniu wytrzymałości zmęczeniowej połączenia ścinanego composite dowels typu MCL. Z przeprowadzonych na dużą skalę badań doświadczalnych można wnioskować, iż układ naprężeń w obszarze zęba nie ulega zmianie, lub jeżeli ulega, to w niewielkim stopniu. Na rys. 14 przedstawiono wykresy z pomiarów, za pomocą tensometrów, dla belki, która w wyniku pojawienia się i

propagacji rysy uległa zniszczeniu. Dla porównania, na rys. 15, zestawiono wykresy dla belki zachowującej nośność (inny program badań, mniejsze obciążenia).



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

Przedstawione wyniki wskazują na inną pracę stalowego łącznika, w przypadku belki z propagującą rysą, oraz belki, dla której rys zmęczeniowych nie zaobserwowano (belka pracowała w mniejszym zakresie obciążenia). W przypadku belki z propagującą rysą zmęczeniową widoczne jest, że wraz z przyrostem cykli obciążenia różnice między odkształceniem 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 dla poszczególnych cykli zmieniają kąt pochylenia). Inaczej sytuacja wygląda dla pomiarów odkształceń w przypadku belki bez rys zmęczeniowych. Kąt pochylenia oraz kształt wykresów dla rozważanych różnic odkształceń (maks. – min.) nie ulegają zmianie, jedynie równolegle się przesuwały. Na podstawie tych obserwacji można wyciągnąć wniosek, że zarówno dla belek niezarysowanych jak i zarysowanych, lecz gdy rysa nie przekracza pewnej granicznej długości, stan naprężeń 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.



Rys. 15. Wykres zależności siła – odkształcenie dla belki B2C

Pozostają wciąż kwestie związane zarówno z maksymalną (graniczną) długością rysy, która nie zmienia układu naprężeń, jak i sprawa dotycząca przyczyn równoległego przesuwania wykresów, wraz ze wzrostem 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.

4. 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 układ naprężeń w połączeniu, niezależny od liczby cykli obciążenia.

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

LITERATURA

1. Barthelémy J., Hechler O., Lorenc W., Seidl G., Viefhues E., *Premiers résultats du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle*. Construction métallique, CTICM, 2009, vol. 46, no 3, pp. 3-26.
2. Barthelémy 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): G. Seidl, E. Viefhues, J. Barthelémy, I. Mangerig, R. Wagner, W. Lorenc, M. Kozuch, J.-M. Franssen, D. Janssen, J. Ikäheimonen, R. Lundmark, O. Hechler, N. Popa. Research Fund for Coal and Steel, Contract No. RFSR-CT-2006-00030. 01/07/2006 – 30/06/2009.
5. *Raporty nr 1S, 2S, 1C oraz 2C z badań doświadczalnych belek ...*: M.Kozuch, S.Rowiński, Raporty wewnętrzne Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej w ramach projektu badawczego „Nośność zmęczeniowa ciągłych łączników otwartych” [3].
6. *Abschlussbericht Institutsbericht-Nr. 169/2006 des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau und Instituts für Massivbau der RWTH Aachen*, M. Feldmann, J. Hegger, O. Hechler, S. Rauscher, Aachen 2007.

STOSOWANIE HIPOTEZY KUMULACJI USZKODZEŃ DO WYZNACZANIA
TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ POŁĄCZENIA ŚCINANEGO TYPU COMPOSITE
DOWELS W KONTEKŚCIE ZREALIZOWANYCH BADAŃ.

S t r e s z c z e n i e

Przedstawiono problem zastosowania hipotezy kumulacji uszkodzeń (sumowanie Palmgren-Minera) do wyznaczania trwałości zmęczeniowej zespolenia typu composite dowels, w zespolonych belkach stalowo-betonowych w kontekście układu naprężeń w zębach stalowych oraz zmiany tego układu wraz z ze wzrostem liczby cykli. Analizy teoretyczne przeprowadzono w odniesieniu do wykonanych ostatnio szerokich badań belek zespolonych, pod obciążeniami cyklicznymi, prowadzącymi do powstania pęknięć o charakterze zmęczeniowym. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań. Poddano również dyskusji zjawiska napotkane w czasie prowadzenia badań, których właściwa interpretacja jest konieczna do poprawnego opisu zmęczenia w połączeniu ścinanym typu composite dowel w belkach zespolonych stalowo-betonowych.