



MIESZKO KUŻAWA, *mieszko.kuzawa@pwr.wroc.pl*

JAN BIEN, *jan.bien@pwr.wroc.pl*

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

ANALIZA POPRZECZNYCH ŻEBER POŚREDNICH DŹWIGARÓW BLACHOWNICOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM USZKODZEŃ

ANALYSIS OF INTERMEDIATE TRANSVERSE STIFFENERS OF PLATED GIRDERS WITH THE PRESENCE OF DEFECTS

Streszczenie W artykule przedstawiono wybrane rezultaty analizy pośrednich żebrow poprzecznych dźwigarów blachownicowych z uwzględnieniem uszkodzeń, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES). Zaprezentowano ogólne procedury analiz rozpatrywanych elementów, które wykorzystują rezultaty liniowo-sprężystej analizy bifurkacyjnej (LBA) oraz analizy geometrycznie i fizycznie nieliniowej z imperfekcjami (GMNIA).

Abstract In presented paper selected results of analysis of bridge plated girders intermediate transverse stiffeners with the presence of defects, performed by means of Finite Elements Method (FEM), are presented. General procedures of evaluation of investigated elements, which utilize the results of linear buckling analysis (LBA) and geometrically as well as materially nonlinear analysis with imperfections (GMNIA), are shown.

1. Wprowadzenie

W Polsce przęsła stalowe złożone z dźwigarów blachownicowych stanowią około 28% ogólnej liczby przęseł mostów kolejowych. Eksploatowane w naszym kraju kolejowe obiekty inżynierskie to budowle w znacznej części zaawansowane wiekowo, których kondycję obniżają liczne uszkodzenia. Blisko 45% obiektów kolejowych (około 8000 sztuk) jest w wieku około 100 lat, a jedynie około 15% konstrukcji – poniżej 40 lat [1].

Najczęstsze uszkodzenia dźwigarów blachownicowych, w tym żebrow usztywniających, to ubytki materiału, jak również nadmierne deformacje będące skutkiem wykołowania się taboru lub przewozu ładunków przekraczających wymiary skrajni (np. w wyniku niekontrolowanego przemieszczenia się ładunku w trakcie transportu – rys. 1). Uszkodzenia poprzecznych żebrow pośrednich powodowane są także uderzeniami pojazdów samochodowych w przęsła – przeważnie w konsekwencji przejazdu ponadnormatywnych gabarytowo pojazdów lub ładunków, co może prowadzić do awarii, a nawet katastrof.

Ocena nośności przęseł z uwzględnieniem uszkodzeń pośrednich żebrow poprzecznych dźwigarów blachownicowych jest złożonym zagadnieniem analizowanym z reguły przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES) do przeprowadzenia liniowo-sprężystej analizy bifurkacyjnej (LBA) oraz analizy geometrycznie i fizycznie nieliniowej z imperfekcjami (GMNIA). Wyniki analiz mają na celu akwizycję wiedzy dotyczącej określenia wpływu uszkodzeń pośrednich żebrow poprzecznych na nośność graniczną przy ścinaniu blachownicowych dźwigarów przęseł mostowych.

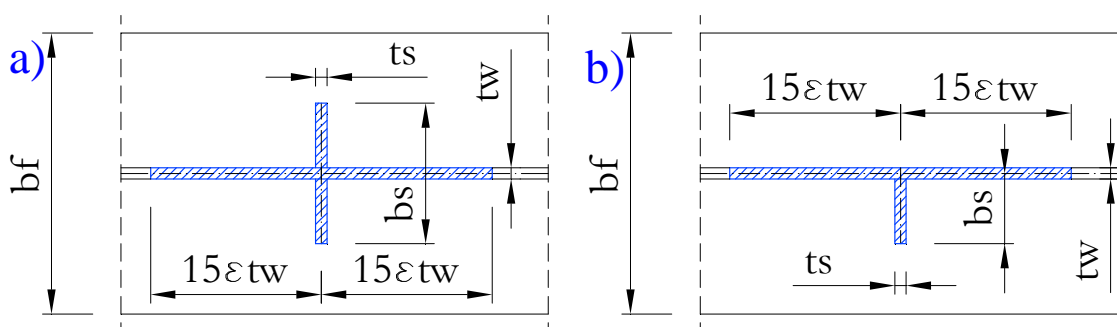


Rys. 1. Charakterystyczne uszkodzenia żeber poprzecznych wywołane uderzeniami pojazdów poruszających się po obiekcie [2]

2. Wymiarowanie żeber poprzecznych wg EN 1993-1-5

Sprawdzając nośność (nośność przekroju i stateczność całego elementu) żeber, jako efektywne pole przekroju przyjmuje się pole przekroju żebra brutto wraz z efektywnymi odcinkami środnika, których długość z każdej strony żebra jest ograniczona do $15 \varepsilon t_w$ i nie przekracza połowy odległości od żebra sąsiedniego (rys. 2). Norma [3] zakłada, że żebra poprzeczne mają pełnić funkcję sztywnego podparcia dla sąsiednich paneli z żebrami lub bez żeber podłużnych. Zatem powinny być w stanie przenosić obciążenia w poszczególnych fazach obciążenia aż do pełnego wykształcenia się pola ciągnięć ukośnych w sąsiednich panelach, a następnie osiągnięcia nośności granicznej dźwigara przy ścinaniu.

Aby pośrednie żebra poprzeczne mogły skutecznie spełniać funkcję sztywnego podparcia dla paneli dźwigara, powinny być spełnione poniżej opisane warunki. Żebro traktuje się jako element swobodnie podparty i obciążony poprzecznie wskutek wstępnej sinusoidalnej imperfekcji o strzałce $w_o = \min(a_i, h_w)/300$ (rys. 3), gdzie a_i – wymiary podłużne sąsiednich paneli.

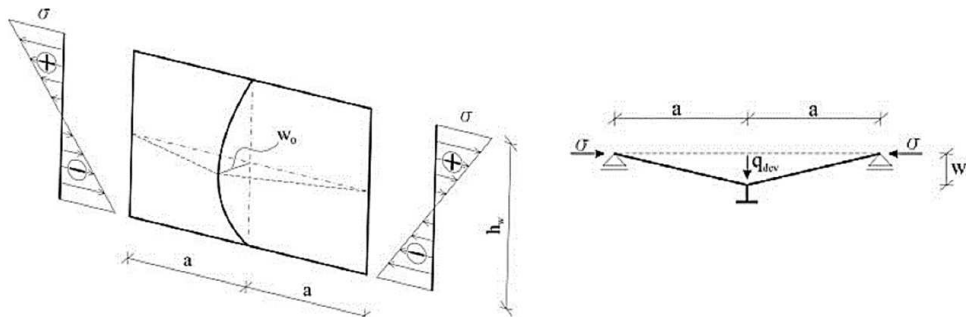


Rys. 2. Efektywne pola przekroju poprzecznych żeber pośrednich: a) dwustronnych, b) jednostronnych

Przy założeniu, że żebra poprzeczne są sztywne (nie doznają ugięć) i proste (ich wymiary spełniają tolerancje wykonawcze wg normy [4]), rozpatrywane żebro poprzeczne powinno być zdolne do przeniesienia sił od imperfekcji tj. sił wynikających ze wzajemnego odchylenia sąsiednich paneli ściskanych, a także ewentualnych obciążeń zewnętrznych oraz siły podłużnej równej:

$$V_{Ed} - V_{cr} = V_{ED} - \frac{1}{\lambda_w} f_{yw} h_w t_w / (\sqrt{3} \gamma_{M1}), \quad (1)$$

gdzie: V_{Ed} – obliczeniowa siła poprzeczna w rozpatrywanym przekroju, V_{cr} – krytyczna siła poprzeczna, $\bar{\lambda}_w$ – smukłość względna przy ścinaniu, γ_{M1} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa w stosunku do nośności, który w przedstawionych analizach przyjęto równy 1.



Rys. 3. Model obliczeniowy żeber poprzecznych wg EN 1993-1-5 [3]

Stosując analizę sprężystą II rzędu należy wykazać, że spełnione są następujące kryteria stanu granicznego nośności: maksymalne naprężenie w żebrze nie przekracza wartości f_y/γ_{M1} oraz ugięcie żebra nie przekracza wartości $h_w/300$. Jeśli nie stosuje się zaawansowanych metod analizy, to stateczność żeber o przekroju otwartym ze względu na wyboczenie skrętne uzyskuje się spełniając warunek:

$$\frac{I_T}{I_o} \geq \frac{f_y}{E}, \quad (2)$$

gdzie: I_T jest momentem bezwładności przekroju żebra przy skręcaniu swobodnym (St. Venanta), a I_o jest biegunowym momentem bezwładności przekroju żebra względem punktu styczności ze środkiem.

W przypadku sztywnych żeber poprzecznych moment bezwładności I_s ich przekroju efektywnego powinien spełniać warunki:

$$I_{s,min} \geq 1.5h_w^3t_w^3/a^2, \text{ gdy } a/h_w < \sqrt{2} \quad (3)$$

$$I_{s,min} \geq 0.75h_w^3t_w^3, \text{ gdy } a/h_w \geq \sqrt{2} \quad (4)$$

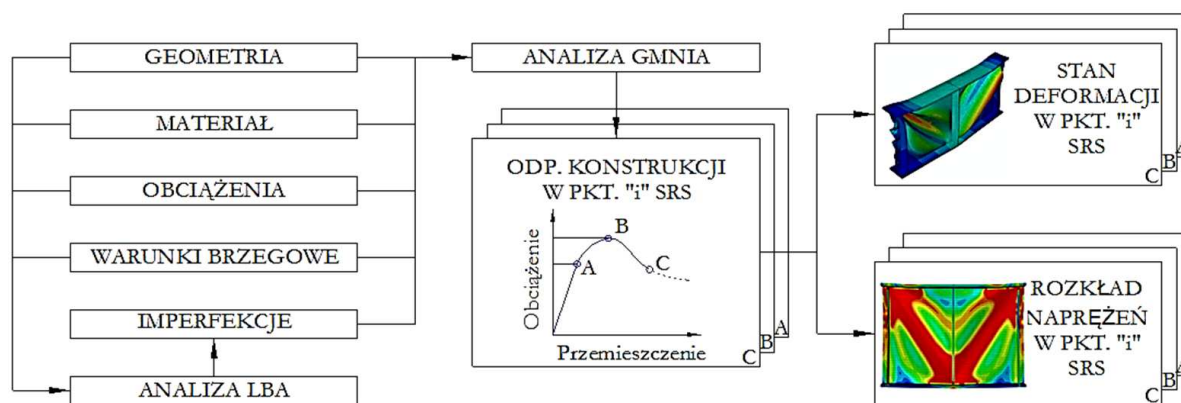
3. Procedura i zakres analiz GMNIA

Sposób projektowania poprzecznych żeber pośrednich w dźwigarach blachownicowych wg normy [3] nie pozwala na realną ocenę wyężenia poszczególnych przekrojów żeber, jak również na precyzyjną ocenę stateczności całego elementu. Sytuacja jest jeszcze trudniejsza w przypadku oceny nośności poszczególnych przekrojów żeber poprzecznych oraz ich stateczności w obiektach eksploatowanych, często posiadających uszkodzenia tych elementów konstrukcyjnych.

Jako rozwiązanie tego problemu zaproponowano procedurę określenia wpływu uszkodzeń na nośność przy ścinaniu dźwigarów blachownicowych oraz przydatności do użytkowania żeber poprzecznych z wykorzystaniem wyników uzyskanych przy użyciu numerycznych

analiz geometrycznie i fizycznie nieliniowych z imperfekcjami (GMNIA) oraz ogólnych zasad wymiarowania elementów ściskanych i zginanych zgodnie z zaleceniami normy [3]. Przeprowadzone analizy numeryczne umożliwiły badanie pracy konstrukcji we wszystkich fazach – sprężystej, nadkrytycznej, nośności granicznej i zniszczenia, z uwzględnieniem zastępczych imperfekcji geometrycznych poszczególnych elementów dźwigarów oraz sprężysto-plastycznej (bilinearnej) charakterystyki materiału z izotropowym wzmocnieniem.

Ogólną metodykę [6] analiz dźwigarów blachownicowych w kolejnych fazach obciążenia aż do zniszczenia przedstawiono na rys. 4. Modele numeryczne MES na potrzeby analiz LBA i GMNIA dźwigarów blachownicowych, które przeprowadzone zostały w systemie Abaqus, budowano z elementów powłokowych typu S4R – czterowęzłowych o sześciu stopniach swobody w każdym węźle, ze zredukowanym całkowaniem [5]. Obciążenia konstrukcji modelowano stosując wymuszenia kinematyczne przy użyciu więzi typu Coupling oferowanych przez system Abaqus [7]. Analizy przeprowadzono metodą iteracyjną przy użyciu algorytmu Newtona–Raphsona.



Rys. 4. Schemat analiz mostowych dźwigarów blachownicowych w kolejnych fazach obciążenia

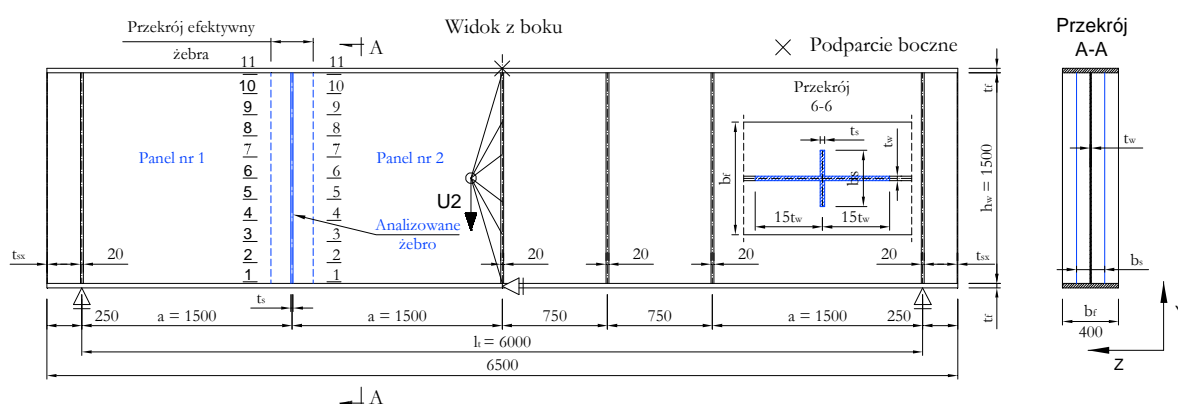
Zastosowano sprężysto-plastyczny model materiału z niewielkim wzmocnieniem izotropowym, zaniebując zagadnienia związane z prędkością odkształcenia (lepkością). W rozwiązaniach zagadnień z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej wykorzystano warunek uplastycznienia Hubera–Misesa.

4. Wybrane wyniki analiz GMNIA konstrukcji nieuszkodzonych

Analizie poddano 32 swobodnie podparte dźwigary blachownicowe o rozpiętości teoretycznej 6 m, o zróżnicowanych parametrach geometrycznych: h_w , t_w , t_f , b_s i t_s (tab. 1). Ukształtowanie analizowanych konstrukcji i oznaczenia ww. symboli przedstawiono na rys. 5. Modele numeryczne analizowanych konstrukcji poddano wymuszeniom kinematycznym przy użyciu analizy GMNIA, zgodnie ze schematem obciążenia pokazanym na rys. 5. Docelową wartość wymuszenia kinematycznego dla poszczególnych modeli, $U = 20$ mm, uzyskiwano średnio w około 40 etapach. Pozwoliło to na ocenę globalnego zachowania się globalnego konstrukcji, jak i poszczególnych jej elementów w poszczególnych charakterystycznych fazach pracy: sprężystej, nadkrytycznej sprężystej sprężysto-plastycznej, nośności granicznej i zniszczenia. Wybrane wyniki analiz konstrukcji nieuszkodzonych przedstawiono w zależności od parametru smukłości środników dźwigarów blachownicowych h_w/t_w , form wstępnych deformacji konstrukcji oraz postaci jej zniszczenia.

Wstępne deformacje zastosowane w analizach GMNIA wyznaczono jako superpozycję wybranych składowych form wyboczeniowych uzyskanych z analizy LBA, pokazanych na rys. 6.

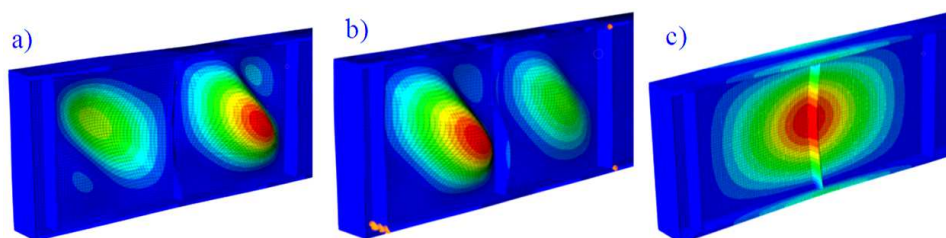
Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS) dla modeli o różnych parametrach smukłości h_w/t_w pokazano na rys. 7. Najmniejszą wartość obciążenia granicznego otrzymano dla modeli z żebrami poprzecznymi pośrednimi o szerokości $b_s = 100$ mm i o wartościach parametrów smukłości $h_w/t_w = 185$. Dla dźwigarów o smukłości $h_w/t_w = 185$ wartość obciążenia granicznego była mniejsza od średniej wartości obciążenia granicznego uzyskanej dla pozostałych dźwigarów o około 9,38% dla $t_s/t_w = 0.5$ i 2.14% dla $t_s/t_w = 0.8$. Dla pozostałych modeli różnice w obliczonych wartościach obciążenia granicznego nie przekraczały 1.5%. Należy zauważyć, że w fazie zniszczenia, dla modeli z żebrami o szerokości większej niż 100 mm, spadek wartości obciążenia granicznego wraz ze wzrostem wymuszenia kinematycznego jest niewielki, a żebra poprzeczne pomimo lokalnych deformacji i miejscowych uplastycznień przekrojów przenoszą obciążenia od pól ciągnięć ukośnych zlokalizowanych w sąsiednich panelach. Dla modeli o $b_s = 100$ mm spadek obciążenia granicznego jest dużo bardziej gwałtowny w wyniku globalnej utraty stateczności żeber pośrednich.



Rys. 5. Geometria analizowanego dźwigara [mm]

Tablica 1. Podstawowe parametry geometryczne dźwigarów

$h_w = a$ [mm]	h_w/t_w [-]	t_f/t_w [-]	b_s [mm]	t_s/t_w [-]
1500	[100, 125, 150, 185]	4	[100, 200, 300, 400]	[0.5, 0.8]

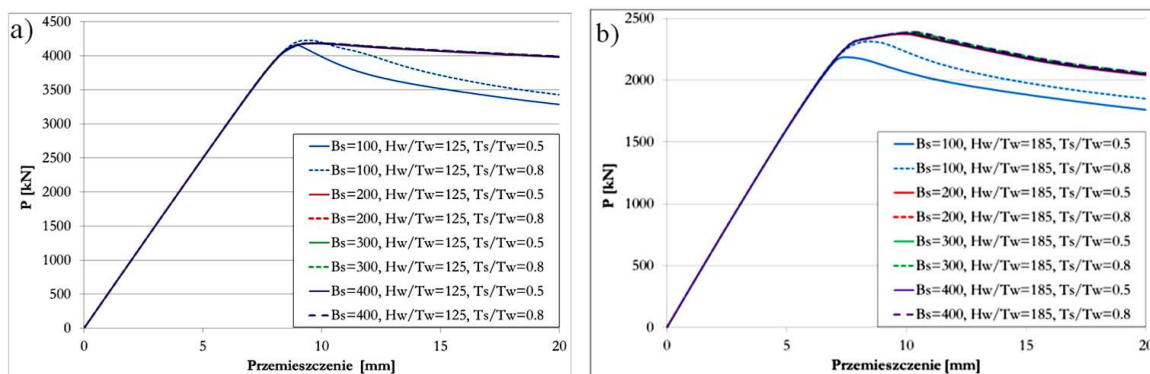


Rys. 6. Wybrane składowe form wstępnych deformacji dźwigarów: a) forma 1, b) forma 2, c) forma 3

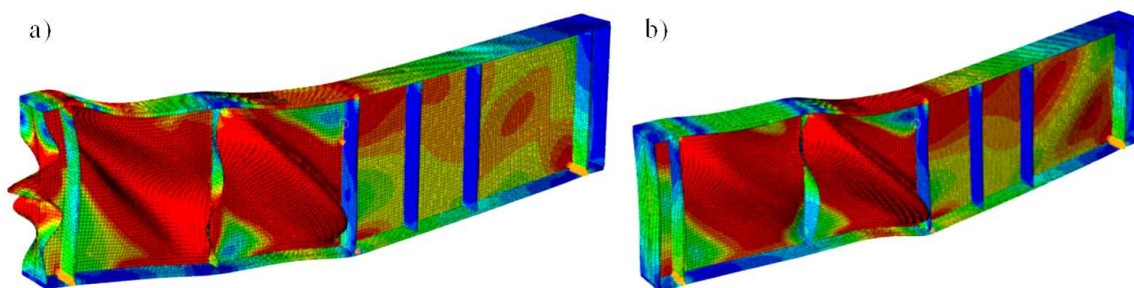
Na rys. 8 przedstawiono deformacje i rozkłady naprężeń zredukowanych Misesa dla modeli A i B dźwigarów o parametrach $b_s = 300$ i $h_w/t_w = 150$ w fazie zniszczenia. W modelu A zaimplementowano formy 1 i 3 wstępnych deformacji dźwigarów, a w modelu B formy 2 i 3 wstępnych deformacji dźwigarów, które pokazano na rys. 7.

Na rys. 9 przedstawiono rozkład sił osiowych w przekroju efektywnym w poszczególnych fazach obciążenia dla modeli A i B. Rozkłady i wartości sił w poszczególnych fazach pracy zależą od parametru smukłości h_w/t_w , poziomu wykształcenia pól ciągnięć ukośnych

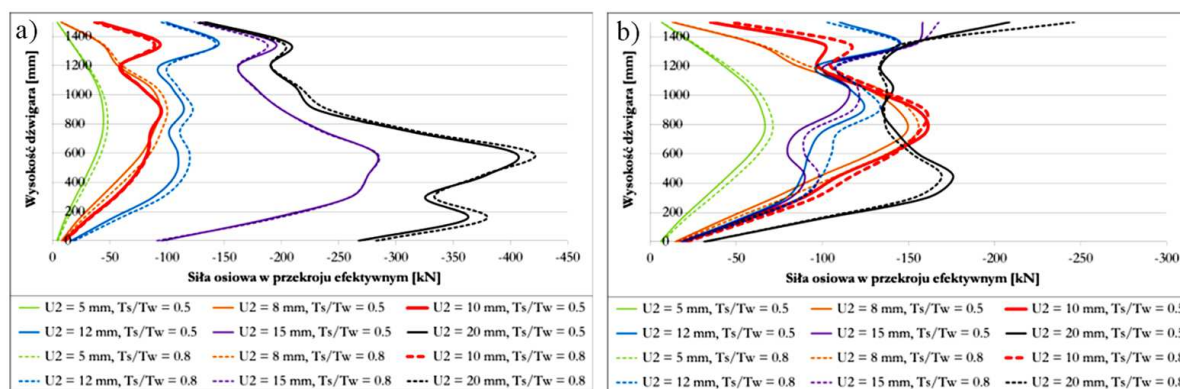
w sąsiednich panelach – stanu naprężeń i deformacji w sąsiednich panelach, a przede wszystkim od form wstępnych deformacji elementów składowych konstrukcji. W fazie nośności granicznej, dla układu wstępnych deformacji skierowanych w jednym kierunku, w panelach nr 1 i nr 2, uzyskano niemal dwukrotnie większe wartości sił podłużnych niż dla układu wstępnych deformacji skierowanych w kierunkach przeciwnych w panelach nr 1 i nr 2.



Rys. 7. Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS) dla modeli o różnych parametrach smukłości: a) $h_w/t_w = 125$, b) $h_w/t_w = 185$



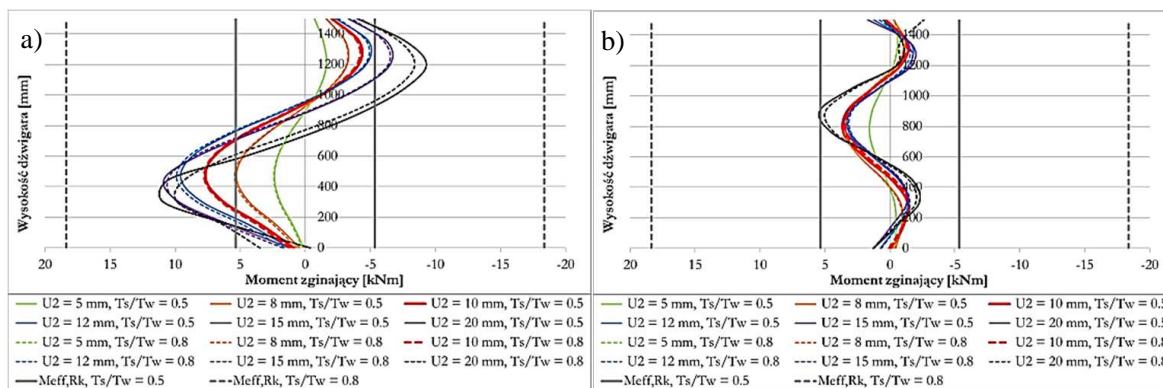
Rys. 8. Deformacje i rozkład naprężeń zredukowanych Misesa dla różnych wariantów modelu o parametrach $b_s = 300$, $h_w/t_w = 150$: a) model A, b) model B



Rys. 9. Siła osiowa w przekroju efektywnym w poszczególnych fazach obciążenia dla różnych wariantów modelu o parametrach $b_s = 300$, $h_w/t_w = 150$: a) model A, b) model B

Analizując rozkład momentów zginających (rys. 10), których wektor jest równoległy do osi podłużnej dźwigara, zauważyć można, że dla modelu A – z przeciwnie skierowanymi wstępnymi deformacjami w panelach nr 1 i nr 2, ma on kształt pełnej sinusoidy, z tym że jedno ekstremum jest wyraźnie większe od drugiego. Dla jednakowo skierowanych wstępnych deformacji (model B) uzyskany rozkład ma kształt 1.5 sinusoidy, a ekstremalne momenty

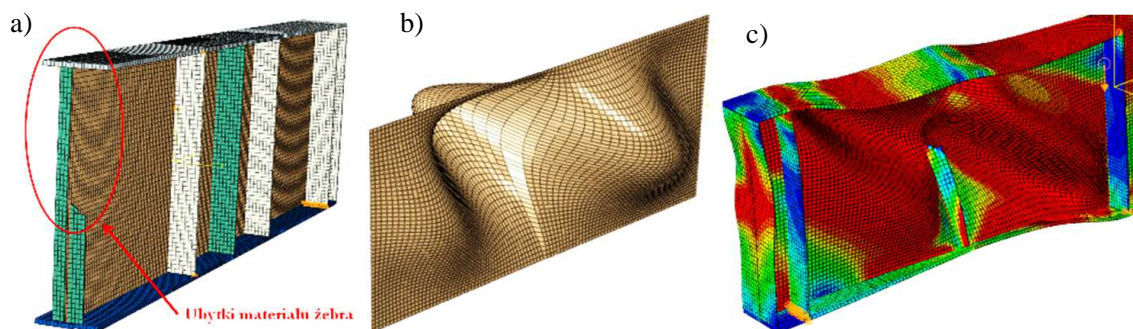
zginające zlokalizowane są w okolicach połowy wysokości dźwigara. W porównaniu do modeli z przeciwnie skierowanymi deformacjami dla modeli z jednakowo skierowanymi wstępnymi deformacjami uzyskano średnio o około połowę mniejsze wartości momentów zginających w fazie nośności granicznej dźwigara. Biorąc pod uwagę, że momenty zginające są kluczowe w aspekcie wyęźnienia żeber, układ zastosowanych imperfekcji ma istotne znaczenie w przeprowadzanych analizach.



Rys. 10. Momenty zginające w przekroju efektywnym w poszczególnych fazach obciążenia dla różnych wariantów modelu o parametrach $b_s = 300$, $h_w/t_w = 150$: a) model A, b) model B

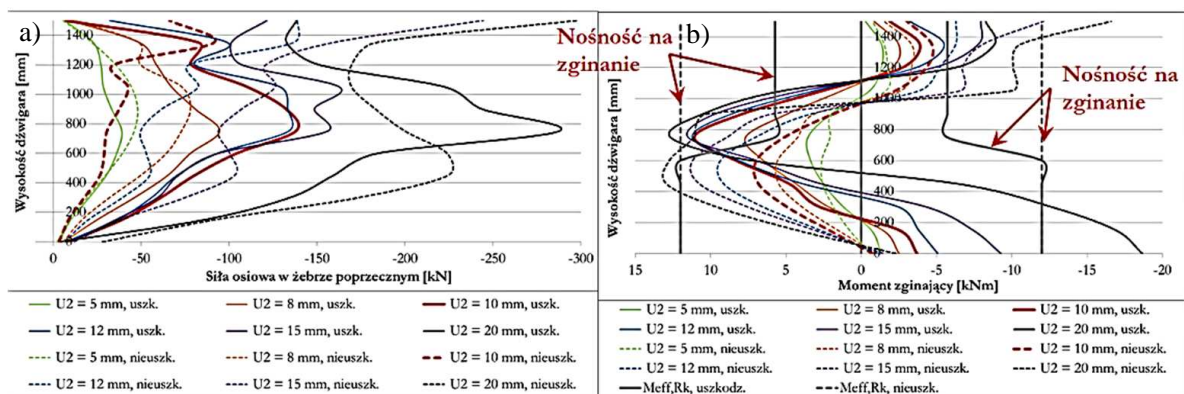
5. Wybrane wyniki analiz GMNIA konstrukcji uszkodzonych

Poniżej przedstawiono porównanie wyników analizy konstrukcji nieuszkodzonej oraz uszkodzonej w wyniku niekontrolowanego przemieszczenia się ładunku w trakcie transportu. Sposób dyskretyzacji modelu konstrukcji i uszkodzeń, zastępcze imperfekcje geometryczne paneli nr 1 i nr 2 oraz deformacje i rozkład naprężeń zredukowanych Misesa w fazie zniszczenia dla konstrukcji uszkodzonej pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Sposób dyskretyzacji modelu konstrukcji i uszkodzeń (a), zastępcze imperfekcje geometryczne paneli (b) oraz deformacje i rozkład naprężeń zredukowanych Misesa w fazie zniszczenia (c)

Scalone siły wewnętrzne w przekroju efektywnym, w poszczególnych fazach obciążenia, dla konstrukcji uszkodzonej i nieuszkodzonej porównano na rys. 12. W fazie nośności granicznej maksymalne wartości sił wewnętrznych na długości żebra, w konstrukcji uszkodzonej, są średnio dwukrotnie większe niż maksymalne wartości sił wewnętrznych w konstrukcji nieuszkodzonej. Natomiast nośność graniczna konstrukcji uszkodzonej jest o 6.16% mniejsza od nośności granicznej konstrukcji nieuszkodzonej.



Rys. 12. Scalone siły wewnętrzne w przekroju efektywnym w poszczególnych fazach obciążenia

4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że zaproponowana procedura umożliwi precyzyjną ocenę wpływu uszkodzeń poprzecznych żeber usztywniających na nośność przy ścinaniu dźwigarów blachownicowych. Opracowana metodyka stwarza możliwość zapobiegania awariom konstrukcji, a także unikania nieuzasadnionej wymiany konstrukcji ze względu na jej uszkodzenia. Oprócz doraźnych zastosowań do oceny kondycji indywidualnych konstrukcji przeseł mostowych prezentowany algorytm umożliwi akwizycję wiedzy na potrzeby opracowywanego narzędzia ekspertowego wspomagającego ocenę nośności blachownicowych przeseł mostów kolejowych z uszkodzeniami.

Literatura

1. Bień J.: Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji (monografia habilitacyjna), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002 r..
2. Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych, WKŁ, Wrocław, 2010 r.
3. EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements, European Committee for Standardization, Brussels, 2008.
4. EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures., European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
5. Chrościelewski J., Makowski J., Pietraszkiewicz W.: Statyka i dynamika powłok wielopłatowych; Nieliniowa teoria i metoda elementów skończonych, Wydawnictwo, Instytutu Podstawowych Problemów Techniki, PAN, 2004 r.
6. Kuźawa M., Bień J.: Nośność graniczna przy ścinaniu blachownicowych dźwigarów mostowych z uszkodzeniami, Raporty Inst. Inż. Łąd. P. Wroc., Ser. SPR nr 16, Wrocław, 2012 r.
7. Simulia: Abaqus Online Documentation: Version 6.10-EF2, In: Deassault Systemes, 2010 r.

Badania naukowe zostały wykonane w ramach realizacji Projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.