70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego

dr inż. Mieszko Kużawa^{1)*)} prof. dr hab. inż. Jan Bień¹⁾

Ocena nośności granicznej przy ścinaniu mostowych dźwigarów blachownicowych z uwzględnieniem deformacji

The ultimate shear load capacity assessment of bridge plate girders with deformations

DOI: 10.15199/33.2015.10.14

Streszczenie. W artykule zaproponowano kompleksową metodykę nieliniowej analizy i oceny nośności granicznej blachownicowych dźwigarów mostowych z uwzględnieniem deformacji ich elementów składowych. Poprawność metodyki analiz numerycznych zweryfikowano doświadczalnie przy wykorzystaniu wyników laboratoryjnych badań nośności granicznej dźwigarów blachownicowych.

Słowa kluczowe: most, dźwigary blachownicowe, MES, badania doświadczalne, uszkodzenia, stateczność.

Polsce przęsła o konstrukcji stalowej stanowią ok. 50% ogólnej liczby przęseł mostów kolejowych oraz 20% ogólnej liczby przęseł mostów drogowych. Najczęściej występujące rozwiązania konstrukcyjne stosowane w mostach stalowych to przęsła złożone z dźwigarów blachownicowych. W związku z zaawansowanym wiekiem pogarsza się kondycja determinowana narastającymi uszkodzeniami elementów konstrukcyjnych. Wymusza to konieczność ograniczeń w eksploatacji [1, 2, 5].

W artykule zaproponowano kompleksową metodykę modelowania i nieliniowej analizy blachownicowych przęseł mostów kolejowych i drogowych z uwzględnieniem deformacji elementów, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES). Ten typ uszkodzeń mostowych dźwigarów blachownicowych bardzo często występuje i jest to efekt wstępnych deformacji technologicznych oraz uderzeń pojazdów w trakcie eksploatacji obiektów. Poprawność zaproponowanej metodyki analiz numerycznych zweryfikowano doświadczalnie, wykorzystując wyniki badań nośności granicznej dźwigarów blachownicowych przeprowadzonych w laboratorium Uniwersytetu w Lublanie, opisanych szczegółowo w pracy [8].

Kompleksowa analiza efektów uszkodzeń

Procedury analiz. Kompleksowa analiza zachowania się mostowych dźwigarów blachownicowych z uszkodzeniami w kolejnych fazach obciążenia, aż do zniszczenia, a w szczególności wyznaczenie ich nośności granicznej, nie jest łatwym zadaniem. Pojawia się problem utraty statecz-

48

(Oryginalny artykuł naukowy)

Abstract. The paper presents the methodology for nonlinear analysis and the ultimate shear capacity assessment of bridge plate girders with deformations. For the validation of proposed numerical procedures of applied methodology the theoretically determined values are compared to results of the experimental load tests.

Keywords: bridge, plate girders, FEM analysis, experimental, defects, stability.

ności, redystrybucji sił wewnętrznych w przekrojach dźwigara, co wymaga rozwiązania zagadnienia nieliniowego zarówno w sensie fizycznym, jak i geometrycznym. Proponowaną ogólną procedurę nieliniowych analiz MES dźwigarów blachownicowych w kolejnych fazach pracy aż do zniszczenia pokazano na rysunku 1. Uwzględnia ona możliwość analizy efektów uszkodzeń konstrukcji w postaci deformacji elementów składowych dźwigarów. Opracowana metodyka wymaga zastosowania:

 liniowo-sprężystej analizy bifurkacyjnej (LBA – Linear Buckling Analysis), która służy do wyznaczania wartości własnych (obciążeń krytycznych i postaci wyboczenia). Jej podstawą jest teoria zginania elementów cienkościennych



Rys 1. Schemat nieliniowych analiz MES dźwigarów blachownicowych z uszkodzeniami w kolejnych fazach pracy [6]

Fig. 1. Flow chart of nonlinear FEM analyses of bridge plate girders with initial defects, in consecutive phases of girder behaviour until failure [6]

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Autor do korespondencji: e-mail: mieszko.kuzawa@pwr.edu.pl

70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego

i małe ugięcia, przy założeniu liniowo-sprężystych właściwości materiału;

 analizy geometrycznie i fizycznie nieliniowej (GMNA - Geometrically and Materially Nonlinear Analysis). Przyrostowa analiza wykorzystująca teorię zginania elementów cienkościennych o idealnej geometrii i dużych ugięciach, oparta jest na nieliniowej sprężysto-plastycznej charakterystyce materiału;

• analizy fizycznie i geometrycznie nieliniowej z imperfekcjami (GMNIA - Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections). Przyrostowa analiza oparta jest na teorii dużych ugięć i założeniu nieliniowej sprężysto-plastycznej charakterystyki materiału, uwzględniającej w sposób jawny imperfekcje geometryczne w postaci niezamierzonych odchyłek kształtu powierzchni środkowej elementu cienkościennego.

Analizy przeseł blachownicowych, zgodnie z proponowana metodyka, przeprowadzane są w kolejnych fazach pracy mostowych dźwigarów blachownicowych: liniowo-spreżystej, nadkrytycznej (nieliniowo-sprężystej lub/i sprężysto--plastycznej), nośności granicznej i zniszczenia. Podstawowym wynikiem analiz są Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS) całego układu konstrukcyjnego oraz deformacje i napreżenia obliczone w poszczególnych punktach modelu obliczeniowego dźwigara we wszystkich fazach obciążenia. Maksymalna wartość obciążenia odczytana z wykresu ŚRS jest nośnością graniczną konstrukcji.

Modele materiału, geometrii i elementy skończone. W liniowych zagadnieniach, m.in. wartości własnych (LBA) wystarczy przyjęcie sprężystych stałych materiałowych. W analizie GMNA i GMNIA zastosowano sprężysto-plastyczny model materiału, ze wzmocnieniem izotropowym, o charakterystyce bilinearnej. W prowadzonych badaniach pominięto efekty, związane z prędkością odkształcenia (lepkością) czy rzeczywistym utwardzeniem materiału, przy którym należałoby rozpatrywać wzmocnienie kinematyczne. W rozwiązaniach zagadnień z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej zastosowano kryteria uplastycznienia Hubera-Misesa.

Na potrzeby analizy zagadnień stateczności oraz nośności granicznej dźwigarów blachownicowych modele numeryczne MES budować należy z elementów powłokowych - 4-węzłowych prostokątnych elementów z liniową interpolacją odkształceń wewnątrz elementu oraz 1 punktem całkowania (np. w systemie Abaqus) oznaczonych jako S4R. Te elementy bowiem są mało wrażliwe na problemy numeryczne, tzw. blokady ścinania (zakleszczenia, ang. shear locking) przy całkowaniu pełnym oraz do powstawania form pasożytniczych deformacji (formy zero-energetyczne, ang.: spurious zero-energy modes) w przypadku całkowania zredukowanego [3, 4, 7, 9].

Algorytm analiz nieliniowych oraz modelowanie warunków brzegowych i obciążeń. Typowy schemat warunków brzegowych oraz symbole oznaczeń parametrów geometrycznych elementów składowych modelu obliczeniowego dźwigara blachownicowego pokazano na rysunku 2. Na przykładzie dźwigara dwupanelowego, który szczególnie umożliwia analizę efektów powodowanych przez dominujące siły poprzeczne, przedstawiono graficzną ilustrację obciążenia w postaci zastosowanego wymuszenia kinematycznego. Modele dźwigarów poddawane są wymuszeniom kinematycznym definiowanym w punkcie referencyjnym powodującym równomierne przemieszczenie całego przekroju dźwigara. Wymuszone przemieszczenie przekroju jest realizowane przy użyciu elementów interakcyjnych typu Coupling [7], a analizy przeprowadza się metodą iteracyjną z wykorzystaniem algorytmu Newtona-Raphsona. W procesie stopniowo zwiększanego wymuszenia kinematycznego w punkcie (węźle) referencyjnym powstaje reakcja. Jej wartość stanowi miarę nośności dźwigara (jego zdolności do przenoszenia obciążeń) przy określonym stanie jego deformacji. Pozwala to na przeprowadzanie analiz zachowania się konstrukcji w poszczególnych fazach pracy aż osiągnięcia nośności granicznej, jak również w fazie zniszczenia.



Rys. 2. Warunki brzegowe oraz parametry geometryczne dźwigara (a) wraz z graficzną ilustracją wymuszenia kinematycznego (b) Fig. 2. Boundary conditions and geometric parameters of girder (a) and graphic illustration of kinematic excitation (b)

Doświadczalna weryfikacja numerycznych procedur określania nośności granicznej dźwigarów blachownicowych

Wyniki badań doświadczalnych dźwigarów blachownicowych przeprowadzonych w laboratorium Uniwersytetu w Lublanie [8] porównano z uzyskanymi przez nas wynikami analiz teoretycznych. Miało to na celu weryfikację zastosowanej metodyki analiz numerycznych. Kompleksowa kontrola dotyczyła procedur analiz, sposobu modelowania konstrukcji, doboru elementów skończonych, uwzględniania efektów imperfekcji geometrycznych, strukturalnych i technologicznych, założeń dotyczących warunków brzegowych podparcia i obciążenia, modelu materiału, a także przyjętych algorytmów obliczeniowych.

Analiza dźwigarów blachownicowych w nieliniowych fazach pracy. Schemat ideowy stanowiska badawczego i podstawowe wymiary analizowanej konstrukcji pokazano na rysunku 3. Rozpatrywana konstrukcja została ukształtowana i obciążona w taki sposób, aby dominującymi siłami wewnętrznymi były siły poprzeczne i momenty zginające powodujące zniszczenie w wyniku interakcji tych sił. Przeprowadzono testy obciążeniowe S0 i SC (rysunek 3). Pełne



Fig. 3. Test stand and basic dimen-49

70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego

obciążenie dźwigara przekazywane z siłownika hydraulicznego na dźwigar zostało zrealizowane w ok. 10 fazach. Podczas badań prowadzono ciągły pomiar odkształceń i deformacji w obrębie paneli SC i S0 oraz siły obciążenia.

Badaną konstrukcję odwzorowano przy użyciu modelu geometrii klasy e², p³, czyli złożonego z elementów dwuwymiarowych (e²) usytuowanych w przestrzeni trójwymiarowej (p³), a analizy numeryczne, z zastosowaniem teorii dużych przemieszczeń i małych odkształceń przeprowadzono przy wykorzystaniu systemu Abaqus [7]. Wartości imperfekcji geometrycznych z pomiarów w przypadku testu SC pokazano na rysunku 4a, a dyskretny model obliczeniowy na rysunku 4b.



Rys. 4. Imperfekcje geometryczne (deformacje) panelu SC: a) wartości pomierzone [7]; b) dyskretyzacja w modelu obliczeniowym autorów

Fig. 4. Geometric imperfections (deformations) of panel SC: a) measured values [7]; b) discretization in computational model created by authors

Na rysunku 5 porównano Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS) uzyskane w wyniku badań doświadczalnych (a) oraz na drodze analiz numerycznych (b). Otrzymano bardzo dużą zgodność wyników. Na rysunku 6 pokazano mapy przemieszczeń prostopadłych do płaszczyzny środkowej środnika w panelu SC w fazie zniszczenia. Obliczone deformacje w obrębie analizowanych paneli wykazują dużą zgodność





50

Rys. 5. Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS): a) wyniki badań doświadczalnych [7]; b) wyniki analiz numerycznych autorów Fig. 5. Static stability paths (SSP): a) experimental results [7]; b) results of numerical analyses carried out by authors



Rys 6. Przemieszczenia prostopadłe do płaszczyzny środkowej środnika w panelu SC (test SC), przy maksymalnym przemieszczeniu pionowym U = 70 mm: a) wartości pomierzone [7]; b) wartości obliczone przez autorów Fig. 6. Displacements perpendicular to central plane of web in panel SC (test SC), at maximum vertical displacement U = 70 mm: a) measured values [7]; b) values calculated by authors

z deformacjami pomierzonymi zarówno w stanie sprężystoplastycznym, plastycznym, jak i w fazie zniszczenia. Mechanizm zniszczenia jest spowodowany zarówno dużym zginaniem w obrębie analizowanego panelu, na co wskazują lokalne wyboczenia w obrębie subpanelu górnego, jak również dużym ścinaniem, na co wskazuje dobrze wykształcone pole ciągnień ukośnych w dolnym subpanelu.

Podsumowanie

Porównanie wyników badań eksperymentalnych i teoretycznych upoważnia do stwierdzenia, że zastosowana metodyka umożliwia efektywną nieliniową analizę zachowania się dźwigarów blachownicowych przy ścinaniu oraz przy interakcji zginania i ścinania, z uwzględnieniem uszkodzeń w postaci deformacji konstrukcji. Uważamy, że zaproponowana metodyka analiz będzie mogła być wykorzystywana w procedurach oceny nośności eksploatowanych konstrukcji, z uszkodzeniami w postaci nadmiernych deformacji.

Literatura

[1] Bień J. Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych, WKŁ, Warszawa 2010.

[2] Bień J., Modelling of structure geometry in Bridge Management Systems, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. XI, No. 3, 2011, s. 519 – 532.

[3] Braes D. Finite Elemente. Theorie, schnelle Löser and Anwendungen in der Elastizitatstheorie, Springer, Berlin 1992.

[4] Chrościelewski J., Makowski J., Pietraszkiewicz W. Statyka i dynamika powłok wielopłatowych; Nieliniowa teoria i metoda elementów skończonych, Wydawnictwo Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN 2004.

[5] Helmerich R., Bień J., 100 Jahre Kaiser/Grunwaldzki-Brücke in Wrocław (Polen), Stahlbau, Vol. 81, No. 2, 2012, s. 156 – 159.

[6] Kużawa M. Nośność graniczna przy ścinaniu blachownicowych dźwigarów mostowych z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń (rozprawa doktorska), Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Nr PRE-1/2013.

[7] SIMULIA, Abaqus Online Documentation: Version 6.10-EF2, IDS Dassault Systèmes 2010.

[8] Sinur F. Behaviour of longitudinally stiffened plate griders subjected to bending-shear interaction, Doctoral Thesis, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana 2011.

[9] Witkowski W. Synteza sformułowania nieliniowej mechaniki powłok podlegających skończonym obrotom w ujęciu MES, Monografia 111, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.

Przyjęto do druku: 19.08.2015 r.