

Analiza nośności stalowych pomostów rusztowań

Aleksander Robak

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: a.robak@pollub.pl*

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono metody modelowania numerycznego oraz komputerową analizę statyczną stalowych pomostów umieszczanych na rusztowaniach. Głównym problemem poruszonym w opracowaniu jest pokazanie sposobu tworzenia modeli pojedynczej płyty pomostowej oraz określenie przydatności poszczególnych modeli w różnych sytuacjach projektowych. Dodatkowo dokonano porównania wyników otrzymanych z analizy liniowej oraz z analizy uwzględniającej nieliniowość materiałową.

Słowa kluczowe: rusztowania, modele numeryczne, obliczenia statyczne, metoda elementów skończonych

1. Wprowadzenie

Rusztowania budowlane są konstrukcjami tymczasowymi powszechnie używanymi podczas prac budowlanych. W związku z tym, że są to elementy masowo produkowane, to każde nawet nieznaczne zmniejszenie przekrojów elementów konstrukcyjnych powoduje znaczne oszczędności. Oczywiście jest to wykorzystywane przez producentów, którzy dążą do zmniejszenia kosztów. Niestety efektem tego jest także zmniejszenie nośności. Natomiast zadaniem konstruktora jest zaprojektowanie konstrukcji, która przy możliwie najmniejszym zużyciu materiału uzyska założoną nośność. Pomosty rusztowań są elementami, których stosowanie jest niezbędne, bo to właśnie po pomostach poruszają się robotnicy budowlani, czyli użytkownicy rusztowań i właściwie zaprojektowanie pomostów decyduje o bezpieczeństwie ludzi. Jednak pomosty mają także inne znaczenie, tzn.: łączą inne elementy konstrukcyjne rusztowań oraz usztywniają konstrukcję w płaszczyźnie poziomej. Skomplikowane kształty płyt pomostowych utrudniają modelowanie tej części rusztowań w obliczeniach komputerowych i wymuszają stosowanie układów zastępczych. W pracy zostanie przedstawionych kilka modeli numerycznych pomostów oraz ich zastosowanie w ocenie nośności pomostów lub całego rusztowania budowlanego.

Przed przystąpieniem do prezentacji metod budowania modeli numerycznych pomostów i ich zastosowania warto wspomnieć, że problematyka pracy statycznej rusztowań jest rzadko spotykana w literaturze. Autor znalazł zaledwie kilka prac dotyczących badań wytrzymałościowych (por. [1, 2, 3, 4]) lub analiz przyczyn katastrof (por. [5, 6, 7]). I tak np. w pracy [7], gdzie badano nośność wzniesionych konstrukcji we wschodnich regionach USA, stwierdzono, że 32% rusztowań groziła katastrofą. Ponadto w pracy tej stwierdzono, że nie ma korelacji pomiędzy złym stanem rusztowania, regionem, w którym jest wznoszone rusztowanie, wymiarami rusztowań czy liczbą użytkowników. Pokazuje to jak małą wagę przywiązuje się do tego rodzaju konstrukcji, jednocześnie narażając ludzkie życie.

2. Modele numeryczne pomostów

Pomosty w rusztowaniach są elementami, które w płaszczyźnie pionowej pracują jak belki swobodnie podparte. Każdy element nośny jest oparty na poziomych ryglach za pomocą specjalnie wykształconych zaczepów, które zapewniają przegubowe połączenie tych elementów z rusztowaniem. Pomosty są elementami bezpośrednio przenoszącymi wszystkie obciążenia użytkowe, przekazując je na elementy konstrukcyjne rusztowania. Pomosty mają też duże znaczenie w tworzeniu sztywności rusztowania w płaszczyznach poziomych. W poniższym opracowaniu opisano tworzenie modeli numerycznych na przykładzie pomostów stalowych firmy ALTRAD MOSTOSTAL. Dokładny opis tego typu pomostów został umieszczony w pracy [8].

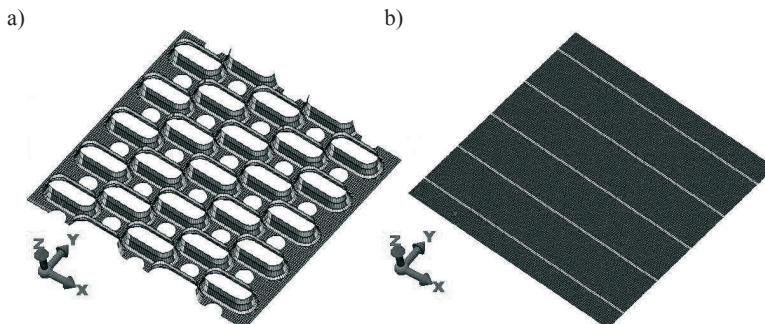
2.1. Opis modeli numerycznych pomostów

Wykonanie prawidłowego modelu płyty, w którym zostałyby uwzględnione wszystkie szczegóły geometrii płyty, wymaga stworzenia modelu o bardzo wielu elementach powłokowych, a więc węzłów i stopni swobody. Taki model nie będzie przydatny w praktyce, ponieważ obliczenia nawet najprostszych przypadków obciążenia w zakresie obliczeń liniowych będą długotrwałe, a obliczenia nieliniowe są już niemożliwe do wykonania w rozsądnym czasie. Ponadto zbyt duży model jednego pomostu nie pozwoli na uwzględnienie współpracy kilku pomostów, tworzących jeden pomost roboczy a tym bardziej nie można stosować go w całym rusztowaniu. W związku z tym w pracy zaproponowano kilka modeli:

- model nr 1 – przestrzenny model jednego pomostu, w którym blachę perforowaną zastąpiono modelem płytowo-prętowym;
- model nr 2 – uproszczony model płaski, w którym wykorzystane są elementy powłokowe i prętowe;
- model nr 3 – układ prętów kratowych, używany tylko do modelowania sztywności pomostów w poziomie i nie przenoszących obciążeń użytkowych.

2.2. Budowa modelu nr 1

Pierwszym etapem budowy modelu dokładnie było stworzenie dokładnego modelu wycinka blachy perforowanej. W celu wyznaczenia zastępczych charakterystyk geometrycznych i materiałowych blachy, porównywano przemieszczenia odczytywane z modelu dokładnego wycinka blachy (Rys. 1a) z przemieszczeniami modelu zastępczego (Rys. 1b) dążąc do tego, aby różnica ugięć pomiędzy tymi dwoma modelami była jak najmniejsza.



Rys. 1.. Model numeryczny wycinka blachy perforowanej: a) Model dokładny, b) Model zastępczy

W tym celu model ze sztywnym zamocowaniem z jednej strony obciążono siłami, przyłożonymi na jednej krawędzi modelu o wypadkowej wartości równej 1,0 kN. Przyjęto dwa przypadki obciążeń, przedstawiające pracę blachy w dwóch kierunkach. W pierwszym przypadku obciążenie przyłożono na krawędzi wspornika, równoległej do długości płyty pomostowej. W drugim przypadku obciążenie przyłożono na krawędzi wspornika, która jest prostopadła do długości płyty pomostowej. Kolejnym krokiem było poprawienie właściwości materiałów przekroju zastępczego. W tym celu porównywano przemieszczenia otrzymane z jednakowo obciążonego modelu dokładnego i uproszczonego. W kolejnych krokach obliczeń korygowano wartości właściwości materiału modelu zastępczego w celu osiągnięcia jak najmniejszej różnicy przemieszczeń. Pozwoliło to na uzyskanie właściwości materiału w modelu zastępczym, szukanych dla pierwszego przypadku obciążenia. Z analizy wyników obliczeń oraz wizualnej oceny kształtu perforacji, wynika, że płyty nie można traktować, jako izotropowej. Dlatego w celu uzyskania zgodności przemieszczeń w modelach blachy, jednocześnie dla obu przypadków obciążenia, do modelu płytowego dodano elementy prętowe, które zwiększają sztywność modelu w kierunku prostopadłym do długości płyty pomostowej. Właściwości materiału elementów prętowych także zostały ustalone metodą iteracyjną. Ostateczne wartości charakterystyk materiałowych i przekroju zestawiono w tab. 1.

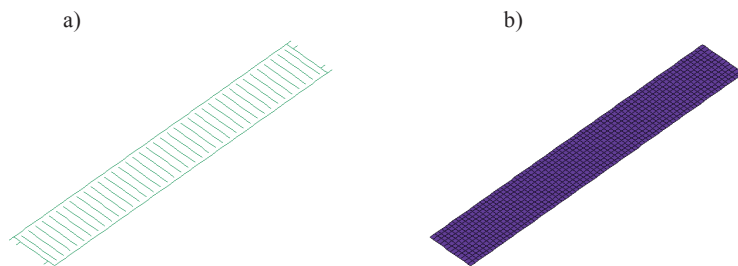
Tabela 1. Charakterystyki geometryczne i materiałowe elementów prętowych

Lp.	Charakterystyki przekroju		Właściwości materiału	
1	A [mm ²]	0,1	Gęstość objętościowa [N/mm ³]	$7,85 \cdot 10^{-5}$
2	I_s [mm ⁴]	0,1	Moduł Younga [N/mm ²]	$3,2 \cdot 10^5$
3	I_x [mm ⁴]	0,1	Współczynnik Poissona	0,3
4	I_y [mm ⁴]	27,0		

Pozostałe fragmenty modelu pomostu zostały zamodelowane elementami powłokowymi, a połączenia spawane uchwytów i pomostu elementami trójwymiarowymi.

2.3. Budowa modelu nr 2

Opisany powyżej model niestety zawiera znaczną liczbę stopni swobody, co powoduje, że nie można go wykorzystać w modelu pełnych pomostów roboczych, składających się z kilku płyt pomostowych. W związku z tym opracowano model nr 2, w którym zaczepy, blachę przednią i boki płyty pomostowej zamodelowano, jako elementy prętowe. Środkową blachę zamodelowano elementami płytowo-prętowymi takimi jak w modelu nr 1 (Rys. 2).



Rys. 2. Elementy tworzące model nr 2 a) element ramowe, b) elementy płytowe

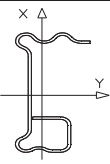
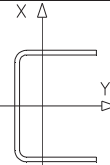
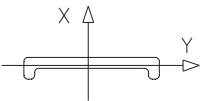
Właściwości materiałowe przyjęto tak jak dla stali, czyli gęstość objętościową $\gamma=7,85 \cdot 10^{-5}$ N/mm³, moduł Younga $E=2,0 \cdot 10^5$ N/mm², współczynnik Poissona 0,3. Pierwszym krokiem było wyznaczenie wstępnych charakterystyk elementów prętowych, polegające na przyjęciu charakterystyk geometrycznych przekrojów poszczególnych części

plyty pomostowej. Następnie w celu wyznaczenia ostatecznych charakterystyk geometrycznych elementów modelu nr 2 porównywano przemieszczenia, otrzymane z jednakowo obciążonego modelu nr 1 i nr 2. Metoda ta jest metodą iteracyjną i polegała na korygowaniu wartości momentów bezwładności elementów prętowych dążąc do tego, aby różnica ugięć pomiędzy tymi dwoma modelami była jak najmniejsza. W celu stworzenia jak najbardziej uniwersalnego modelu analizowano trzy przypadki obciążenia:

- obciążenie równomiernie rozłożone na całej powierzchni o wartości 2,0 kN/m²;
- obciążenie w środku jej rozpiętości na długości jednego metra o wartości 6,0 kN/m²;
- obciążenie na jednym z boków pomostu na szerokości jednego metra o wartości 6,0 kN/m².

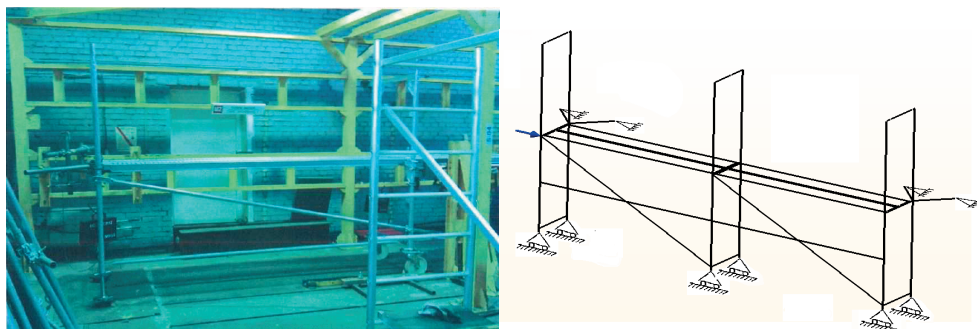
Pierwszym etapem było obciążenie modelu dokładnego i uproszczonego według trzech przypadków obciążeń opisanych powyżej. Następnie porównano przemieszczenia odczytane ze środka ciężkości boku płyty pomostowej w modelu dokładnym z odpowiadającymi im przemieszczeniami na boku modelu uproszczonego. Kolejnym krokiem było wyznaczenie ostatecznych właściwości materiału w elementach modelu uproszczonego. Polegało to na korygowaniu wartości momentów bezwładności elementów prętowych dążąc do tego, aby różnica ugięć pomiędzy tymi dwoma modelami była jak najmniejsza. W tab. 2 zestawiono wstępnie przyjęte oraz ostateczne charakterystyki przekroju elementów prętowych tworzących model nr 2.

Tabela 2. Charakterystyki geometryczne elementów prętowych w modelu nr 2 płyty pomostowej o wymiarach 3072 mm × 320 mm.

Bok blachy środkowej	Wstępne charakterystyki geometryczne		Ostateczne charakterystyki geometryczne	
	A [mm ²]	259,0	A [mm ²]	259,4
	I_s [mm ⁴]	191,0	I_s [mm ⁴]	191,2
	I_x [mm ⁴]	20095,0	I_x [mm ⁴]	20095,3
	I_y [mm ⁴]	185470,0	I_y [mm ⁴]	316100,0
Błacha przednia	Wstępne charakterystyki geometryczne		Ostateczne charakterystyki geometryczne	
	A [mm ²]	174,0	A [mm ²]	174,0
	I_s [mm ⁴]	241,0	I_s [mm ⁴]	241,0
	I_x [mm ⁴]	25007,0	I_x [mm ⁴]	25007,0
	I_y [mm ⁴]	61127,0	I_y [mm ⁴]	61127,0
Zaczepek	Wstępne charakterystyki geometryczne		Ostateczne charakterystyki geometryczne	
	A [mm ²]	232,0	A [mm ²]	232,0
	I_s [mm ⁴]	170,0	I_s [mm ⁴]	170,0
	I_x [mm ⁴]	222,0	I_x [mm ⁴]	222,0
	I_y [mm ⁴]	170,0	I_y [mm ⁴]	150,0

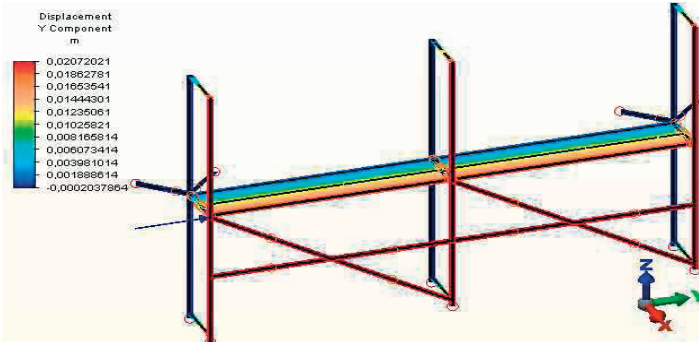
2.4. Budowa modelu nr 3

Jak już wcześniej wspomniano dokładnych modeli płyt pomostowych rusztowań nie można zastosować w całej konstrukcji. Nawet model nr 2 ze względu na liczbę tworzących go elementów pozwala na obliczenia zaledwie kilkunastu płyt jednocześnie. Dlatego w obliczeniach statycznych rusztowań stosować należy model, który będzie oddawał sztywność poziomą płyty oraz jej ciężar, a naprężenia w konstrukcji samej płyty pomostowej w przypadku nietypowych obciążeń należy rozpatrywać osobno dla poszczególnych modułów rusztowania. Model płyty pomostowej nr 3, który mógłby być wykorzystywany w obliczeniach statycznych rusztowań, wykonano z czterech elementów prętowych kratowych. Do weryfikacji modelu rusztowania z układem elementów kratowych zamiast płyt pomostowych wykorzystano wyniki badań, które zostały udostępnione przez firmę ALTRAD MOSTOSTAL. Badanie polegało na obciążeniu modułu rusztowania siłą przyłożoną w płaszczyźnie pomostów. Obciążenie wywierano za pośrednictwem siłownika hydraulicznego. Pomiar sił dokonywany był za pomocą czujnika siły zamocowanego do końca tłoczyska siłownika. Przesunięcia stojaków zewnętrznych rejestrowano za pomocą 3 czujników przemieszczeń. Zmontowany moduł posadowiony był na podporach przesuwnych. Od strony przyściennej stanowiska skrajne stojaki zostały zamocowane do ściany oporowej stanowiska za pomocą łączników kotwiących zmontowanych w układzie „V”. Na rys. 5 pokazano stanowisko badawcze oraz schemat statyczny badania. Efektem badań było określenie sztywności poziomej układu, której wartość, uzyskana jako wartość średnia z 6 prób, wyniosła 0,402kN/mm.



Rys. 3. Stanowisko badawcze (na podstawie danych udostępnionych przez ALTRAD MOSTOSTAL) oraz schemat statyczny badania

Na podstawie przeprowadzonych badań stworzono dwa modele rusztowania. W pierwszym płyty pomostowe zastąpiono modelem nr 2. Wartości przemieszczeń, uzyskane z analizy numerycznej przeprowadzonej na tym modelu przy sile równej 8,0 kN, przedstawiono na rys 4.

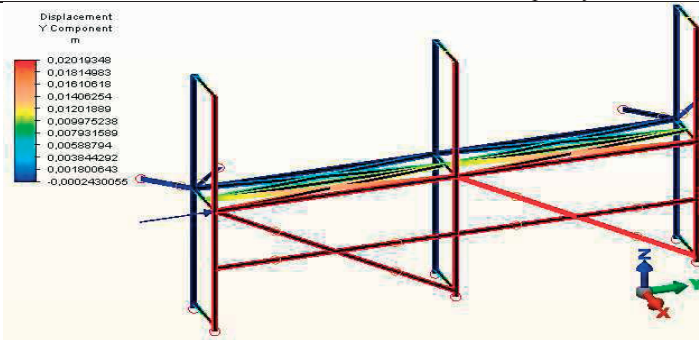


Rys. 4. Przemieszczenia układu z siłą przyłożoną wzdłuż rusztowania z modelem pomostów nr 2

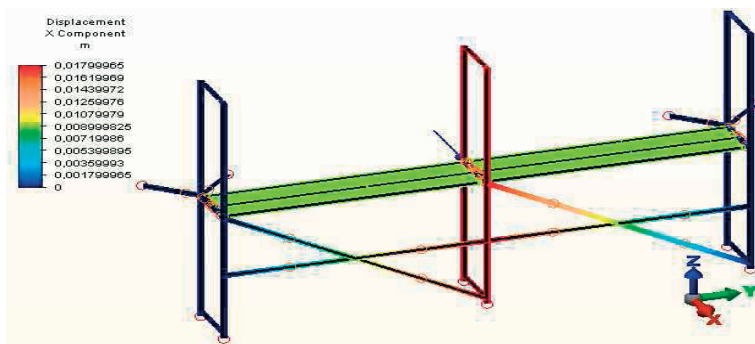
Jak widać uzyskano dużą zgodność wyników, gdyż sztywność układu z analizy numerycznej wyniosła $0,396 \text{ kN/mm}$. Natomiast w drugim modelu każdy pomost zastąpiono czterema prętami kratownicowymi, dwoma równoległymi do siebie oraz dwoma krzyżującymi się. W tym układzie o sztywności decyduje pole przekroju poprzecznego w elementach krzyżujących się. Dzięki temu można w łatwy sposób dopasować sztywności do tych uzyskanych z badania oraz z analizy, w której użyto model nr 2 pomostu. Po ustaleniu przekroju elementów krzyżujących się, pole powierzchni elementów równoległych zostało tak dobrane, aby ciężar wszystkich prętów kratowych odpowiadał rzeczywistemu ciężarowi pomostów. Charakterystyki elementów tworzących model nr 3 zestawiono w Tab. 3

Tabela 3. Charakterystyki geometryczne i materiałowe elementów kratownicowych tworzących model nr.3

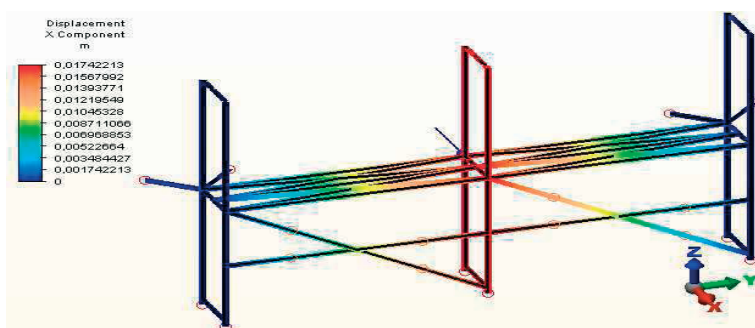
Elementy:	Charakterystyki przekroju		Właściwości materiału	
Równoległe	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$5,65 \cdot 10^{-4}$	Gęstość objętościowa $[\text{kN/m}^3]$	7,85
Krzyżujące się	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$3,10 \cdot 10^{-6}$	Moduł Younga $[\text{kN/m}^2]$	$2,0 \cdot 10^8$
			Współczynnik Poissona	0,3



Rys. 5. Przemieszczenia układu z siłą przyłożoną wzdłuż rusztowania z modelem pomostu nr 1



Rys. 6. Przemieszczenia układu z siłą przyłożoną prostopadłe do rusztowania z modelem pomostu nr 2



Rys. 7. Przemieszczenia układu z siłą przyłożona poprzecznie do długości rusztowania z wykorzystaniem modelu pomostu nr. 1

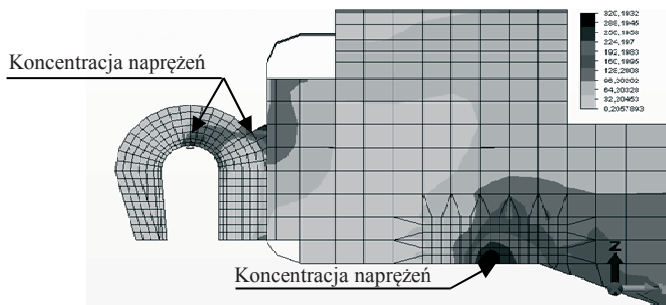
W opisanych modelach sprawdzono także efekt działania siły, przyłożonej prostopadłe do długości rusztowania. Po porównaniu wartości przemieszczeń z obu jednakowo obciążonych modeli numerycznych także stwierdzono bardzo dużą zgodność wyników (Rys. 6 i Rys. 7). Po porównaniu otrzymanych wyników stwierdzono, że tak przyjęty model bardzo dobrze odwzorowuje sztywność poziomą rusztowania i może być wykorzystywany w obliczeniach statycznych rusztowań.

3. Badanie nośności pomostów

Modele pojedynczych płyt pomostowych nr 1 i nr 2 mogą zostać wykorzystane do analizy wytrzymałości pomostów w przypadkach nietypowych, których nie obejmują zalecenia normowe. Dzięki uproszczeniom, zastosowanym w modelu nr 2, można było zamodelować cały pomost roboczy, składający się z dziewięciu płyt pomostowych, na którym możliwe jest przeprowadzenie obliczeń liniowych w poszukiwaniu najbardziej niekorzystnego położenia rozpatrywanego obciążenia.

W celu wyznaczenia maksymalnych wartości i rozkładu naprężeń w płycie pomostowej, w modelu nr 2 odczytano przemieszczenia z najbardziej wytrzymałej płyty, i przeniesiono je na model nr 1 w postaci wymuszeń przyłożonych w środku ciężkości boków płyty pomostowej. Dopiero tak obciążony model dokładny można było poddać końcowej analizie i sformułować wnioski, dotyczące naprężeń w płytach. Zgodnie z przewidywaniami największe naprężenia występują w uchwytach i w miejscu łączenia blachy czołowej i bocznej. Jednak wartości tych naprężeń są zawyżone z powodu miejscowych osobliwości numerycznych i z powodu zastosowania obliczeń liniowych.

W obliczeniach liniowych zauważono, że płyty pomostowe właściwie pracują niezależnie od siebie. Obroty boków płyty są na tyle małe, że płyty nie opierają się o siebie wzajemnie. Fakt ten został wykorzystany do wyznaczenia naprężeń w płycie za pomocą obliczeń, w których wykorzystano nieliniowość materiału. Warunek plastyczności określany był na podstawie hipotezy wyężeniowej Hubera-Misesa Hencky'ego. Moduł sprężystości Young'a przyjęto jako równy 200 GPa a moduł wzmocnienia przyjęto jako stukrotnie mniejszy.



Rys. 8. Naprężenia zredukowane [MPa] – obliczenia uwzględniające nieliniowość materiałową

Do analizy wyników wzięto jeszcze pod uwagę naprężenia w środku rozpiętości płyty pomostowej, jednak przebieg naprężeń w tej strefie ma bardzo łagodny charakter a wartości maksymalne są znacznie mniejsze niż w wyżej wspomnianych miejscach. Jest to bardzo ważne, ponieważ w środkowej części zastosowano model, który odzwierciedlał prawidłowo jedynie przemieszczenia a warunek plastyczności jest sprawdzany dla naprężeń. W związku z tym, że naprężenia blachy środkowej są małe, to pracowała ona w zakresie liniowym i nie spowodowało to błędów.

4. Podsumowanie

Przedstawione przykłady analiz numerycznych pokazują, że ze względu na skomplikowany kształt pomostów istnieje konieczność stosowania modeli zastępczych, opracowanych poprzez wprowadzenie różnych poziomów uproszczeń, od uproszczeń kształtów do zastosowania czterech prętów kratowych, które zastępują jedynie sztywność pomostów. Podczas analizy poprawności budowy płyty pomostowej należy stosować zarówno model nr 1 i nr 2, ale w obliczeniach całego rusztowania niestety należy stosować znacznie większe uproszczenia, czyli model nr 3. Ponadto podczas wykonywania badań numerycznych nośności płyt warto skorzystać z obliczeń zarówno z liniowym jak i nieliniowym modelem materiału. Uproszczenia, zastosowane w modelu zmniejszają zakres jego stosowania. Dlatego czasami trzeba także korzystać z obliczeń liniowych, ale ze świadomością, że analiza nośności tylko na podstawie analizy liniowej przy nieprawidłowej interpretacji wyników obliczeń może doprowadzić do zaniżenia nośności pomostów.

Literatura

- 1 Weesner L.B., Jones H.L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding. *Engineering Structures* 23 (2001) 592–599.
- 2 Chan S.L., Zhou Z.H., Chen W.F., Peng J.L., Pan A.D. Stability analysis of semirigid steel scaffolding. *Engineering Structures* vol.17, 8 (1995) 568-574.
- 3 Peng J.L., Pan A.D., Rosovsky D.V., Chen W.F., Yen T., Chan S.L. High clearance scaffold systems during construction – II. Structural analysis and development of design guidelines. *Engineering Structures* vol. 18, 3 (1996) 258-267.

- 4 Yu W.K., Chung K.F., Chan S.L. Structural instability of multi-storey door-type modular steel scaffolds, *Engineering Structures* 26 (2004) 867–881.
- 5 Whitaker S.M., Graves R.J., James M., McCann P. Safety with access scaffolds: Development of a prototype decision aid based on accident analysis. *J. of Safety Research* 34 (2003) 249– 261.
- 6 Kines P. Case studies of occupational falls from heights: Cognition and behavior in context. *J. of Safety Research* 34 (2003) 263– 271.
- 7 Halperin K.M., McCann M. An evaluation of scaffold safety at construction sites. *J. of Safety Research* 35 (2004) 141– 150.
- 8 Robak A. Numeryczne badania wytrzymałości pomostów umieszczanych na rusztowaniach, *Budownictwo i Architektura* 8/2011 (2011) 67-81.

Capacity analysis of steel scaffolding decks

Aleksander Robak

*Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin
University of Technology, e-mail: a.robak@pollub.pl*

Abstract: The methods for numerical modelling and static computer analysis of steel decks fixed on scaffoldings are presented in this study. The main problem raised in the study is the presentation of the method of creating models of a single deck and determination of the suitability of every model for various project situations. Additionally, the comparison of the results obtained from a linear analysis and analysis with material nonlinearity is conducted.

Keywords: scaffolding, numerical models, static calculations, FEM method

