

Wpływ imperfekcji na pracę statyczno-wytrzymałościową typowego rusztowania

Ewa Błazik-Borowa¹, Jakub Gontarz²

¹ Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: ¹e.blazik@pollub.pl, ²j.gontarz@pollub.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki obliczeń statycznych nieliniowych w odniesieniu do typowego rusztowania budowlanego w przypadku, gdy jest ono eksploatowane. W badaniach analizowano wpływ wielkości imperfekcji oraz ich lokalizacji. Stwierdzono, że niedoskonałości geometryczne powodują wzrost sił wewnętrznych, przy czym największy wzrost zachodzi w elementach najniżej zlokalizowanych. Ponadto większe naprężenia uzyskano, gdy imperfekcje zamodelowano jako regularne przesunięcia pomostów w poziomie, niż w przypadku, gdy ułożono je zgodnie z formą wybożenia.

Słowa kluczowe: rusztowania budowlane, imperfekcje, metoda elementów skończonych, nieliniowość geometryczna w analizie statycznej

1. Wprowadzenie

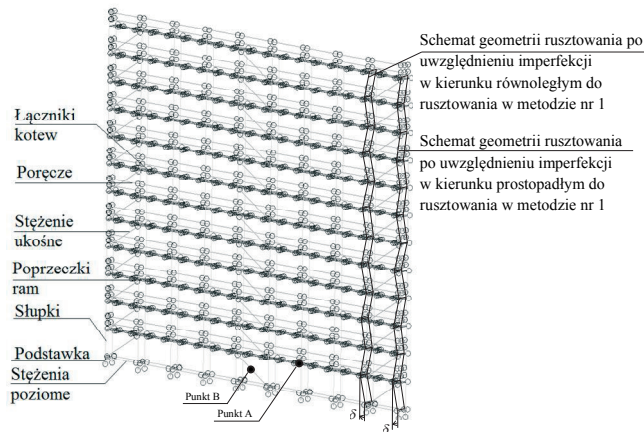
W związku z tym, że konstrukcje budowlane nigdy nie mają idealnej geometrii, to w analizie statyczno-wytrzymałościowej należy uwzględniać wpływ imperfekcji geometrycznych. Rusztowania budowlane są specyficznymi konstrukcjami stalowymi, ponieważ są one wielokrotnie składane z elementów systemowych. Połączenia elementów stwarzają możliwość obrotu elementów a więc wprowadzają dodatkowe niekorzystne zmiany w geometrii konstrukcji. Dlatego zalecenia, opisujące sposób uwzględniania imperfekcji dla ramowych konstrukcji stalowych, zamieszczone w Eurokodzie 3 [1], są w normie rusztowaniowej PN-EN 12811 [2] uściślone, np. poprzez wskazanie sposobu obliczania obrotu elementów w miejscach ich łączenia. W przypadku rusztowań o możliwości wystąpienia imperfekcji decyduje też sam producent rusztowań, który umieszcza szczegółowe informacje o dopuszczalnych odchyłkach podczas montażu oraz, w niektórych przypadkach, informuje o konieczności kontroli stanu technicznego. Ten ostatni aspekt jest ciągle nie unormowany i zakłada się, że elementy rusztowania są systematycznie kontrolowane a ich geometria jest niemal idealna.

W artykule [3] przedstawiono badania lokalnych imperfekcji łukowych i globalnych imperfekcji przechyłowych w rusztowaniach na różnych budowach na terenie Australii. Średnie zanotowane odchylenie węzłów, czyli imperfekcje globalne wyniosły 1,6 mm/m, natomiast maksymalne 2,8 mm/m. Wielkości te były liczone jako iloraz wychylenia do wysokości konstrukcji czyli np. przy wysokości rusztowania równej około 24,0 m, która według norm europejskich jest traktowana jako maksymalna wysokość typowego rusztowania. Oznacza to, że średnie wychylenie z płaszczyzny może wynieść 38,4 mm a maksymalne wychylenie nawet 67,2 mm. Według normy europejskiej [2] przy trzpieniu o długości co najmniej 150 mm dla ram fasadowych można przyjąć wychylenie równe 5,0 mm/m, ale tylko na długości równej wysokości jednego słupka czyli najczęściej

odchylenie wyniesie 10,0 mm przy wymiarze słupka równym 2,0 m. Jest to więc znacznie mniejsza wartość niż imperfekcje stwierdzone w pracy [3].

W normach [1] i [2] zaproponowano dwie metody kształtowania geometrii, uwzględniającej imperfekcje:

- uwzględnienie przesunięć węzłów na poziomie pomostów, przy czym przesunięcia kolejnych pomostów należy skierować w przeciwną stronę a kierunek przesunięć powinien być zgodny z obciążeniem poziomym, którym jest najczęściej wiatr [2] (dalej metoda będzie nazywana metodą nr 1, rys.1),
- przyłożenie imperfekcje zgodnie z formą wybozczenia [1] (dalej metoda będzie nazywana metodą nr 2).



Rys. 1. Model obliczeniowy rusztowania z zaznaczonymi rodzajami elementów

W pracy wykonano analizy numeryczne dla dwóch wyżej wymienionych metod uwzględniania imperfekcji i na ich podstawie dokonano analizy wpływu wielkości i układu imperfekcji geometrycznych na pracę statyczną rusztowań budowlanych.

2. Opis analiz numerycznych

2.1. Opis modelu numerycznego rusztowania

Analiza numeryczna wpływu imperfekcji na pracę statyczną wykonano w odniesieniu do rusztowania fasadowego firmy ALTRAD MOSTOSTAL o wysokości 24,2 m (rys.1), które w normach [2, 4, 5] jest traktowane jako rusztowanie typowe. Szerokość rusztowania w osiach elementu wynosi 0,732 m a długość 27,648 m (9 modułów o rozstawie 3,072 m). Elementy rusztowania, które zamodelowano elementami prętowymi, wykonane są ze stali o następujących parametrach: gęstość objętościowa $\rho=7,87 \text{ t/m}^3$, moduł Younga $E=2,03 \cdot 10^8 \text{ kPa}$, współczynnik Poissona $\nu=0,29$ i obliczeniowej granicy plastyczności $f_y=290,0 \text{ MPa}$. Charakterystyki geometryczne tych elementów zestawiono w tab.1. Pomosty rusztowania z powodu skomplikowanego kształtu są zastąpione układem prętów kratowych, które zostały tak dobrane, aby oddać sztywność poziomą pomostów. Elementy kratowe o zastępczym przekroju $A=0,1 \text{ mm}^2$ i module Younga $E=3,2 \cdot 10^8 \text{ kPa}$ są wstawione w formie skratowanie i boków pomostu. W modelu zastosowano połączenia sztywne i przegubowe. Następujące połączenia przyjęto jako połączenia sztywne: podstawka-słupek ramy, słupek-słupek, poprzeczka ramy-słupek i łącznik kotwy-słupek. Połączenia przegubowe zlokalizowano na końcach stężeń i poręczcy. Warunki brzegowe zostały przyjęte na podstawie normy

[2], tzn. oparcie rusztowania na gruncie zamodelowano podporami przegubowymi, blokującymi przesuwu w trzech kierunkach, a mocowanie łączników kotwiących zamodelowano podporami, blokującymi przesuwu w płaszczyźnie poziomej.

W celu sprawdzenia wpływu imperfekcji na pracę statyczną rusztowania jego geometria jest zmieniana poprzez przesunięcia węzłów. W przypadku metody nr 1 węzły są tak przesuwane, aby uzyskać przesunięcia w poziomie pomiędzy poziomami poszczególnych pomostów (rys. 1), a w przypadku metody nr 2 przesunięcia węzłów są zgodne z formą wyboczenia, uzyskaną przy najniższym współczynniku obciążenia krytycznego α_{cr} .

Tabela 1. Charakterystyki geometryczne elementów rusztowania

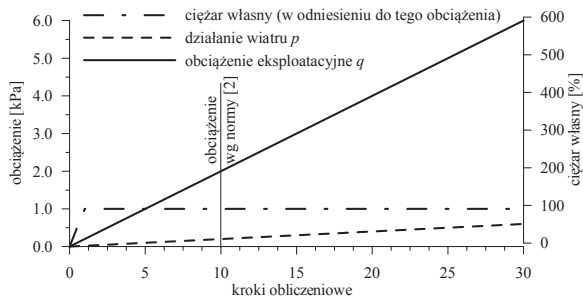
Nr	Rodzaj element	A [cm ²]	J_1 [cm ⁴]	J_2 [cm ⁴]	J_3 [cm ⁴]	W_2 [cm ³]	W_3 [cm ³]
1	Podstawka $\phi 38 \times 4$	4,273	12,519	6,259	6,259	3,294	3,294
2	Słupki ram $\phi 48.3 \times 2.7$	3,868	20,178	10,089	10,089	4,178	4,178
3	Poprzeczki ram o przekroju U	4,175	0,14573	12,751	17,027	4,558	7,095
Stężenie ukośne							
4	w płaszczyźnie pionowej $\phi 42.0 \times 2.7$	3,333	12,932	6,466	6,466	3,079	3,079
5	Poręcze $\phi 38.0 \times 2.7$	2,994	9,382	4,691	4,691	2,469	2,469
6	Łączniki kotew $\phi 48.3 \times 3.2$	4,534	23,171	11,586	11,586	4,797	4,797
7	Stężenie poziome $\phi 42.0 \times 2.7$	3,333	12,932	6,466	6,466	3,079	3,079

gdzie: A – pole przekroju, J_1 – sztywność przy skręcaniu, J_2 i J_3 – momenty bezwładności, W_2 i W_3 – wskaźniki wytrzymałości przy zginaniu.

2.2. Opis metodyki obliczeń i wariantów obliczeniowych

W ramach badań wykonano analizę stateczności układu o idealnej geometrii oraz wykonano analizy nieliniowe z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i materiałowej w odniesieniu do układów ze zmienioną geometrią, uwzględniającą imperfekcje. Jednak dla badanego zakresu obciążeń nie przekroczono granicy plastyczności, a więc nieliniowość materiałowa w praktyce nie ma znaczenia dla wyników badań, analizowanych w pracy.

Według normy [2] podczas sprawdzenia nośności konstrukcji rusztowania należy uwzględnić ciężar własny konstrukcji, działanie wiatru oraz obciążenie eksploatacyjne w dwóch różnych sytuacjach: rusztowanie jest eksploatowane przy dopuszczalnej prędkości wiatru i rusztowanie nie jest eksploatowane a podstawowe obciążenie konstrukcji to działanie silnego wiatru. W niniejszej pracy ograniczono analizę do pierwszej sytuacji, ale wykonano je nie tylko dla wartości normowych dla klasy 3 obciążenia wg normy [2] (ciężar własny według danych materiałowych, obciążenie eksploatacyjne na najwyższym poziomie pomostów równe $2,0 \text{ kN/m}^2$ i poniżej obciążenie pomostów równe $1,0 \text{ kN/m}^2$ oraz działanie wiatru przy założeniu ciśnienia równego $0,2 \text{ kN/m}^2$), ale również sprawdzono zachowanie konstrukcji w zakresie zmian obciążenia od zera do wartości stanowiących trzykrotność obciążeń normowych. Wykresy zmian obciążenia pokazano na rys. 2. Cały ciężar własny jest uwzględniony w pierwszym kroku, natomiast pozostałe dwa obciążenia wzrastają równomiernie z zachowaniem proporcji między nimi tak, aby osiągnąć dla kroku 10 wartości normowe.



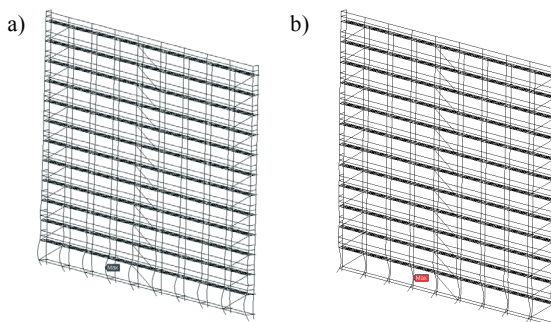
Rys. 2. Wykresy zmian obciążeń podczas obliczeń komputerowych

Sytuacja, w której rusztowanie jest eksploatowane, jest analizowana w dwóch wariantach, związanych z kierunkiem działania wiatru: wiatr działa wzdłuż rusztowania (wariant I) i w kierunku do niego prostopadłym (wariant II). W metodzie nr 1 kierunek wychyleń pomostów pokrywa się z kierunkiem działania wiatru. W obliczeniach analizowane są zmiany wartości wychYLEŃ δ (rys.1) od 0,0cm do 4,0cm. W metodzie nr 2 w przypadku różnych kierunków działań wiatru uzyskuje się różne formy wybożenia a to skutkuje także innym układem imperfekcji. Tutaj wyszukiwany jest węzeł o maksymalnym przesunięciu wypadkowym. Następnie geometria całego układu jest tak zmieniana, aby rusztowanie przyjęło kształt zgodny z formą wybożenia a przesunięcie wyznaczonego węzła δ zmieniało się od 0,0cm do 4,0cm. W analizach wyników będą porównywane obliczenia z obu metod modelowania imperfekcji przy tych samych maksymalnych wartościach δ , ponieważ podczas montażu rusztowań nie sprawdza się jak często występują imperfekcje, lecz ile wynosi maksymalne wychYLEŃIE rusztowania.

3. Analiza wyników obliczeń

3.1. Analiza stateczności

Analiza stateczności została wykonana w celu wyznaczenia formy wybożenia. Obciążenia w obliczeniach wyniosły odpowiednio: cały ciężar własny, ciśnienie wiatru na powierzchnię przyłożenia $q=0,1 \text{ kN/m}^2$ i obciążenie eksploatacyjne $p=1,0 \text{ kN/m}^2$.



Rys. 3. Formy wybożenia rusztowania: a) przy wietrze o kierunku działania wzdłuż rusztowania, b) przy wietrze o kierunku działania prostopadle do rusztowania

Na rys. 3 pokazano formy wybożenia w przypadku obu wariantów działania wiatru. W obu wariantach obciążenia wiatrem uzyskano zbliżony mnożnik obciążenia krytycznego równy $\alpha_{cr}=8.6$, ponieważ w sytuacji eksploatacji rusztowania, obciążenie pomostów ma największy wpływ na pracę konstrukcji. Na tym rysunku wskazano także węzły