

PRZYCZYNY TECHNICZNE

awarii rusztowań

Część 4.



dr hab. inż.
Ewa Błazik-Borowa
prof. PL
Politechnika Lubelska

Jak stwierdzono w zakończeniu trzeciej części, analizując przydatność rusztowania i jego awaryjność, można każdy z problemów kształtowania rusztowania rozpatrywać oddzielnie, ale wydaje się, że najlepszym podejściem jest analiza rusztowania jako całej konstrukcji z rzeczywistą geometrią i posadowieniem.

W tej części artykułu zostanie przedstawiony przykład analizy statyczno-wytrzymałościowej rusztowania na przykładzie rusztowania fasadowego zinwentaryzowanego podczas badań w ramach projektu *Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych* finansowanego przez NCBiR w ramach PBS3 na podstawie umowy nr PBS3/A2/19/2015.

Inwentaryzacja rusztowania

Wpływ czynników technicznych na możliwość wystąpienia awarii zostanie zaprezentowany na przykładzie rusztowania ramowego pokazanego na rys. 1. Rusztowanie składa się z siedmiu modułów i jedenastu poziomów roboczych. Wymiary rusztowania wynoszą: długość 18,30 m, szerokość 0,732 m i wysokość 23,29 m. Stężenia rusztowania są rozmieszczone prawidłowo, tzn. w skrajnych polach i jednym środkowym polu, w którym jest również umieszczony pion komunikacyjny. Ze względu na wejście do budynku w rusztowaniu zamontowano zadaszenie. Wejście do budynku wymusiło też podwieszenie jednej płaszczyzny ramek na dźwigarach stalowych.

Rusztowanie jest posadowione na podłożu o nierównomiernym zagęszczeniu o niskich wartościach dynamicznego modułu odkształcenia E_d w zakresie od ok. 9 MPa do ok. 20 MPa. Na rys. 1. wskazano błędy w konstrukcji, tzn. brak stężeń rozprowadzających obciążenie z podwieszonej płaszczyzny ram na płaszczyznę ram oparte na gruncie oraz brak podparcia konstrukcji wsporczej zadaszenia. Ponadto układ kotew jest układem nietypowym. Do zakotwienia rusztowania użyto 29

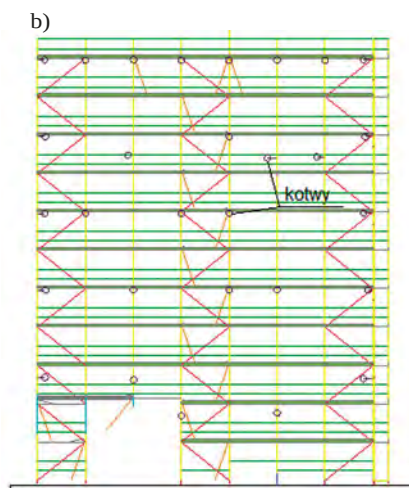
kotew. Na jedenaście poziomów roboczych na czterech poziomach nie ma kotew.

Z inwentaryzacji rusztowania wynika, że geometria rusztowania odbiega od założeń. Na rys. 2. pokazano rozkład imperfekcji geometrycznych d , czyli różnic pomiędzy rzeczywistym i idealnym położeniem punktów połączeń ram. Maksymalna stwierdzona imperfekcja na rusztowaniu wynosi 8 cm i jest położona na wysokości 22 m. Jednak w większości przypadków wartości imperfekcji nie są większe niż 4 cm.

Inwentaryzacja rusztowania obejmowała również określenie obciążeń rusztowania. Maksymalna średnia 10-minutowa prędkość wiatru w okresie eksploatacji rusztowania wynosiła ok. 7 m/s, a porywy wiatru osiągały wartość 14 m/s. Maksymalne wartości obciążeń eksploatacyjnych przypadających na jeden pion, jakie stwierdzono podczas badań na budowie w ciągu pięciu dni, to 1 kN/m², czyli połowa obciążenia klasy 3. według normy [1]. Podczas tygodniowych badań nie stwierdzono zewnętrznych wymuszeń dynamicznych.

Analiza statyczno-wytrzymałościowa

W odniesieniu do rusztowania opisanego w poprzednim punkcie wykonano obliczenia komputerowe. Wykonano analizy statyczne, analizy stateczności i wyznaczono drgania własne w odniesieniu do rusztowania o idealnej geometrii, rusztowania o idealnej geometrii z uwzględnieniem osiadania, rusztowania o geometrii uwzględniającej niedokładności montażu (imperfekcje) oraz rusztowania o geometrii uwzględniającej niedokładności osiadania. Analizy statyczne wykonano w odniesieniu do pięciu wariantów obciążenia:



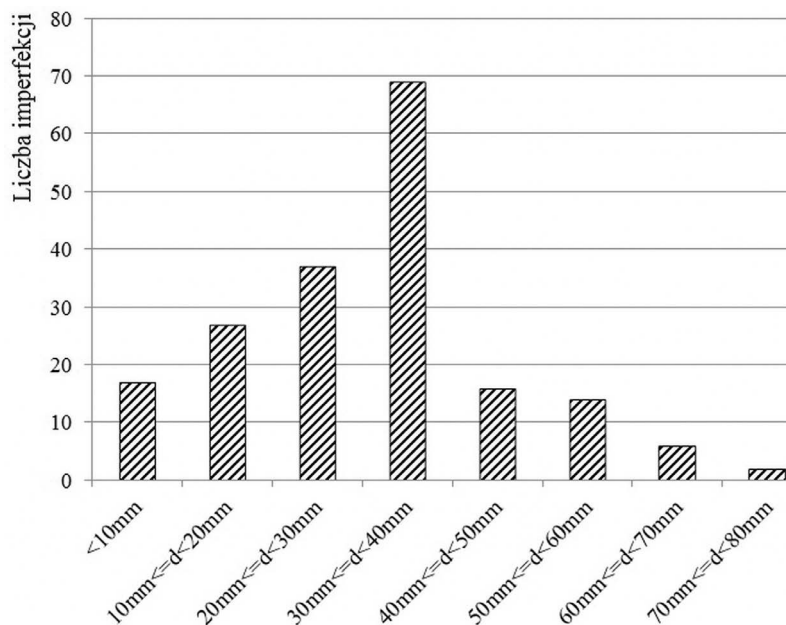
Rys.1. Rusztowanie fasadowe nr 1:
a) zdjęcie rusztowania z zaznaczonymi błędami, b) schemat rusztowania z zaznaczonymi kotwami

- wariant I – charakterystyczne obciążenie eksploatacyjne klasy 3. według normy [1],
- wariant II – charakterystyczne obciążenie eksploatacyjne klasy 3. z wiatrem działającym prostopadle do elewacji według normy [1],
- wariant III – charakterystyczne obciążenie eksploatacyjne klasy 3. z wiatrem działającym równoległe do elewacji według normy [1],
- wariant IV – charakterystyczne działanie wiatru o kierunku prostopadłym do elewacji według normy [2],
- wariant V – charakterystyczne działanie wiatru o kierunku równoległym do elewacji według normy [2].

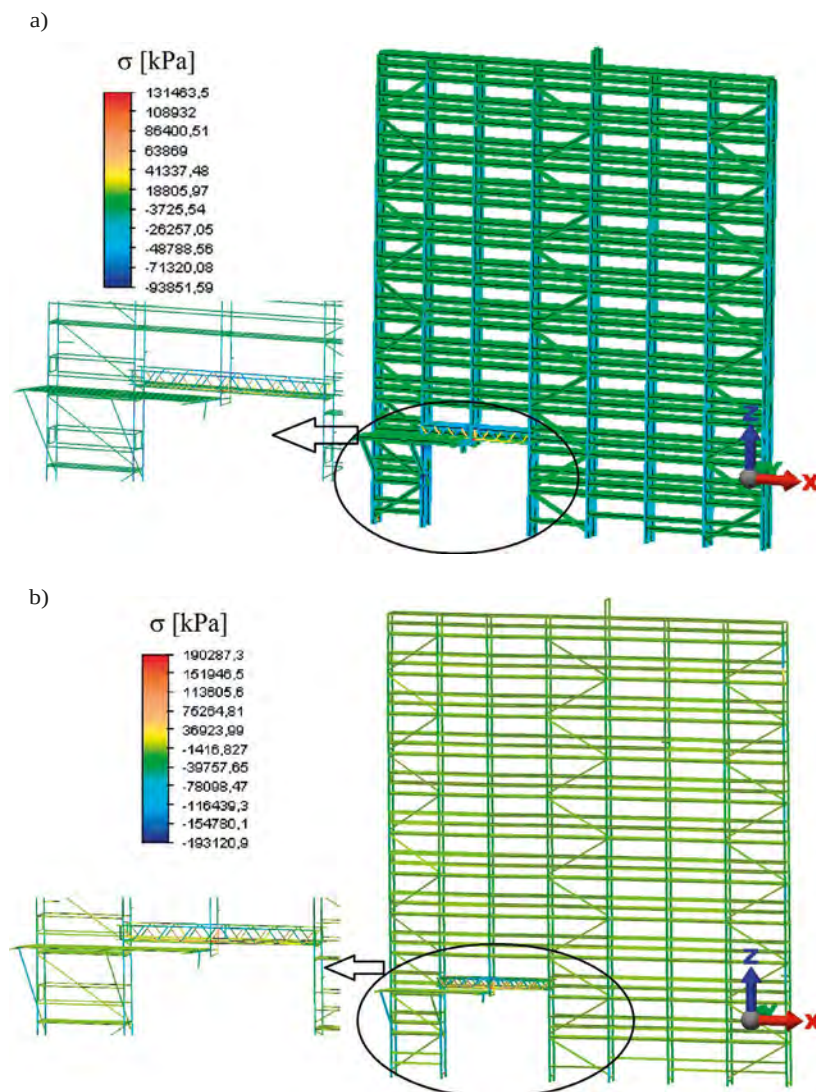
W odniesieniu do trzech pierwszych wariantów wykonano również analizę stateczności.

Na rys. 3. pokazano dwa przykładowe rozkłady naprężeń normalnych w elementach rusztowania. Już na tych dwóch rysunkach widać, że w rusztowaniu z rzeczywistą geometrią naprężenia normalne wzrastają o 50% w stosunku do rusztowania idealnego. Dokładniejsze analizy pokazano na rys. 4., tzn. wpływ imperfekcji i nierówności zagęszczenia podłoża na siły normalne w podstawkach, siły normalne w kotwach, naprężenia normalne w elementach dźwigarów, współczynnik obciążenia krytycznego (współczynnik, przez jaki należy przemnożyć obciążenie w celu zwiększenia jego wartości do wartości powodującej wyboczenie konstrukcji) i częstości drgań własnych. Jak widać, najbardziej niebezpieczne dla konstrukcji rusztowania są imperfekcje, czyli niedokładności wykonania montażu poszczególnych ram. Nierównomierne osiadanie podłoża, jak napisano wcześniej, nie wpływa na pracę poszczególnych elementów, ale może spowodować podwieszenie konstrukcji na kotwach. I faktycznie naprężenia w kotwach z powodu ich zginania tylko przy obciążeniu eksploatacyjnym bez ciężaru własnego w obliczeniach osiągnęły w konstrukcji wartości maksymalne ok. 300 MPa. Po uwzględnieniu faktu, że dolne kotwy zostały poddane także obciążeniu ciężarem własnym konstrukcji, w kotwach uzyskuje się naprężenia normalne o wartości 850 MPa. Wysokie naprężenia normalne uzyskane w obliczeniach wynikają głównie z długości kotew, które osiągają wartości 28 cm. W praktyce naprężenia te nie zostaną osiągnięte. Znajdzie jedną z następujących sytuacji: albo naprężenia osiągną wartość granicy plastyczności i w kotwie powstanie przegub plastyczny, albo – w przypadku słabego materiału, z którego wykonana jest ściana – nastąpi ścięcie tegoż materiału. W obu sytuacjach kotwa przestanie pełnić swoją funkcję.

Oczywiście nie tylko duże wartości naprężeń normalnych w kotwach podważają to, że rusztowanie będzie prawidłowo funkcjonowało. Jak widać na rys. 3. i rys. 4., naprężenia normalne od charakterystycznych obciążeń osiągają wartości 210 MPa. Jeżeli uwzględnimy częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_p , który zgodnie z normą [1] dla wszystkich obciążeń rusztowań wynosi 1,5, to uzyskamy naprężenia o wartościach dochodzących do 315 MPa. Dodatkowo na podsta-



Rys. 2. Rozkład imperfekcji w rusztowaniu fasadowym



Rys. 3. Naprężenia normalne (kPa) w elementach rusztowania fasadowego: a) o idealnej geometrii, b) z uwzględnieniem imperfekcji i osiadania podłoża

wie uproszczonych analiz dynamicznych stwierdzono, że naprężenia mogą wzrosnąć w słupkach nawet o 130 MPa przy uwzględnieniu dynamicznego charakteru działania wiatru skierowanego równolegle do elewacji. Elementy dźwigarów, w których stwierdzono największe wyężenie, są wykonane ze stali St3S o podwyższonej wytrzymałości o obliczeniowej granicy plastyczności równej 280 MPa. Przy porównaniu tych wartości widać, że nawet bez uwzględnienia lokalnej utraty stateczności elementów ściskanych stan graniczny nośności nie jest spełniony. W przypadku tego rusztowania należy stwierdzić, że również stan graniczny użytkowania jest niespełniony. Niska częstość drgań własnych o wartości 2,06 Hz powoduje, że użytkownicy podczas poruszania się po konstrukcji mogą odczuwać dyskomfort.

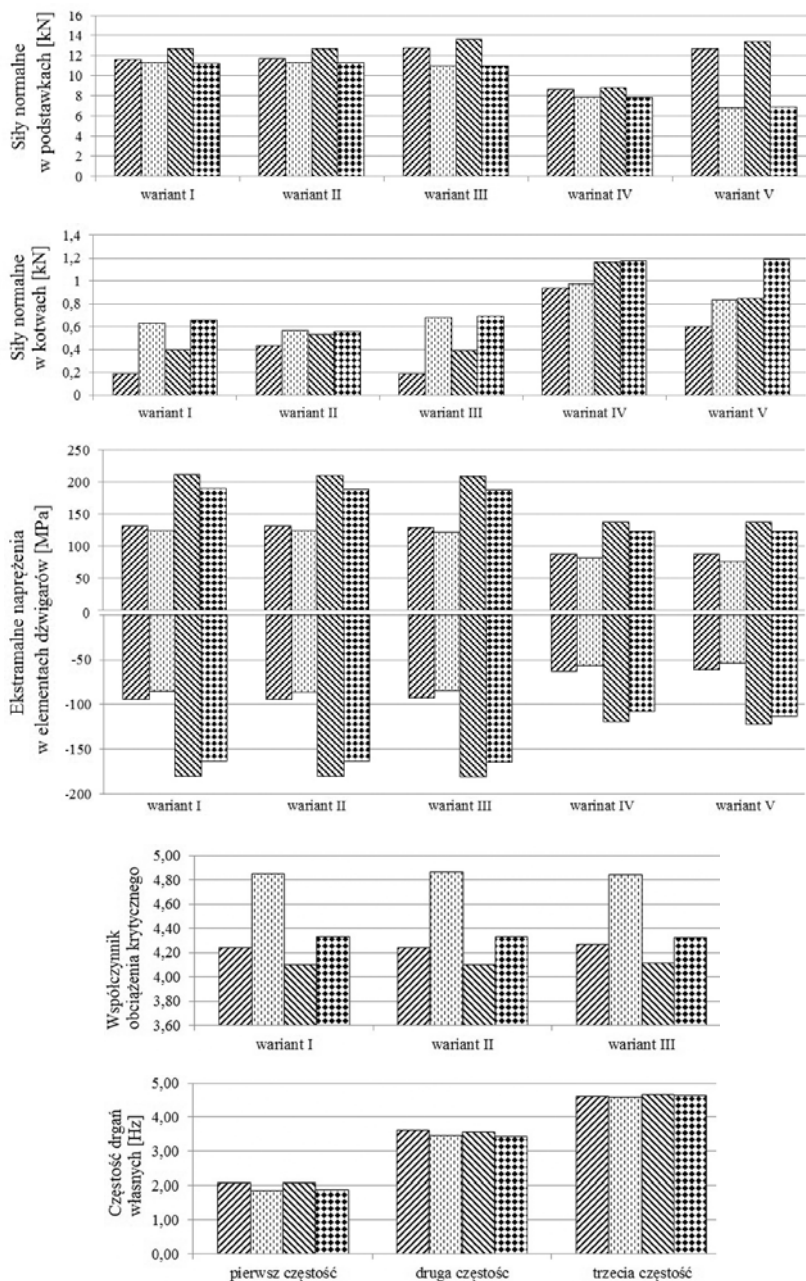
Podsumowanie

Do awarii opisywanego rusztowania nie doszło, ponieważ obciążenia rusztowania były znacznie mniejsze niż normowe. Gdyby jednak obciążenia były większe i osiągnęły wartości normowe lub byłyby to obciążenia dynamiczne o większych wartościach niż stwierdzone na budowie, niekoniecznie osiągających wartości normowe, to mogłoby dojść do miejscowych uszkodzeń elementów konstrukcji lub awarii rusztowania. Wnioskiem nasuwającym się po analizie przykładów zaprezentowanych w czterech częściach artykułu jest to, że każde nietypowe rusztowanie powinno zostać poddane analizie statyczno-wytrzymałościowej. Na etapie projektowania konstrukcji można za pomocą obliczeń komputerowych wyeliminować większość zagrożeń wynikających z konieczności zastosowania niestandardowych rozwiązań konstrukcyjnych w rusztowaniu. Takie obliczenia można wykonać za pomocą dowolnego programu komputerowego opartego na metodzie elementów skończonych. Oczywiście, tak jak w przypadku wszystkich analiz statycznych, należy prawidłowo opracować schemat statyczny, a to w przypadku rusztowań wymaga dużego doświadczenia.

Oczywiście wykonanie obliczeń nie zapewni bezpieczeństwa konstrukcji, jeżeli rusztowanie nie zostanie prawidłowo zmontowane. Na prawidłowe funkcjonowanie rusztowania ma wpływ przede wszystkim dokładność geometrii rusztowania. Istotne jest również prawidłowe przygotowanie podłoża, na którym posadowione jest rusztowanie, oraz wykonanie połączeń elementów. ■

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 12811-1: Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania.
- [2] PN-EN 1991-1-4: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.



Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń rusztowania nr 1,
 // - o idealnej geometrii, // - o idealnej geometrii z osiadaniem podłoża,
 // - z imperfekcjami, // - z imperfekcjami z osiadaniem

Abstract: The paper deals with technical aspects which influence the load-bearing capacity and the operation of scaffolds during a construction. The complexity of the problem is presented in the example of failure of a modular scaffold which, after assembly, did not satisfy the conditions for the ultimate limit state and finally it failed due to the wind action. Next the author presented the following technical problems: formation of the main structure of scaffolds, bracing sets, foundation of scaffolds, load-bearing capacity of the anchors, the accuracy of assembly, technical state of the elements, loads acting on scaffolds. The impact of these factors on the possibility of scaffolds failure is illustrated with an example of a facade scaffold. For this scaffold the effort and the natural frequencies were determined in the following situations: the structure with perfect geometry, the structure with imperfections, the scaffold with perfect geometry and taking into account the uneven ground subsidence, and the scaffold with imperfections and uneven subsidence included. The numerical analysis showed that the scaffold does not comply with conditions for the ultimate limit state and that the most important for the capacity of the structure and its proper functioning is the accuracy of the scaffold assembly.