

ASPEKTY TECHNICZNE WPLYWAJĄCE NA AWARYJNOŚĆ RUSZTOWAŃ BUDOWLANYCH

EWA BŁAZIK-BOROWA, e-mail: e.blazik@pollub.pl
Politechnika Lubelska

Streszczenie: W pracy omówiono zagadnienia techniczne, które wpływają na nośność konstrukcji rusztowań i na ich funkcjonowanie podczas prac budowlanych. W celu pokazania złożoności problemu przedstawiono przykład awarii rusztowania modułowego, które po zmontowaniu nie spełniało warunków stanu granicznego nośności i ostatecznie pod wpływem działania wiatru uległo awarii. Następnie omówiono takie problemy techniczne jak: ukształtowanie konstrukcji głównej rusztowania, układ stężeń, posadowienie rusztowania, nośność układu kotew, dokładność montażu, stan techniczny elementów i obciążenia. Wpływ omówionych odniesieniu do tego rusztowania określono stan wyężenia oraz częstości drgań własnych w następujących sytuacjach: rusztowanie o idealnej geometrii, rusztowanie z imperfekcjami, rusztowanie o idealnej geometrii z uwzględnieniem nierównomierności osiadania oraz rusztowanie z imperfekcjami z uwzględnieniem osiadania. Obliczenia komputerowe wykazały, że rusztowanie nie spełnia warunków stanu granicznego nośności oraz, że największe znaczenie dla nośności konstrukcji i jej prawidłowego funkcjonowania ma dokładność montażu rusztowania.

Słowa kluczowe: rusztowanie modułowe, rusztowanie fasadowe, stan techniczny, kształtowanie rusztowania, analiza statyczno-wyrzymałościowa

1. Wprowadzenie

Rusztowania budowlane są używane niemal na każdej budowie. Są to z jednej strony urządzenia techniczne, która mają zapewnić bezpieczeństwo pracowników budowlanych, ale są to również konstrukcje budowlane często dość wysokie i bardzo często o skomplikowanych kształtach. Elementy rusztowań są bardzo smukłe. Powoduje to, że elementy posiadają dużą nośność, gdy obciążenia są przekazywane osiowo, ale gdy rusztowanie jest zmontowane w taki sposób, że pojawiają się momenty zginające, to wtedy nośność całego układu drastycznie maleje.

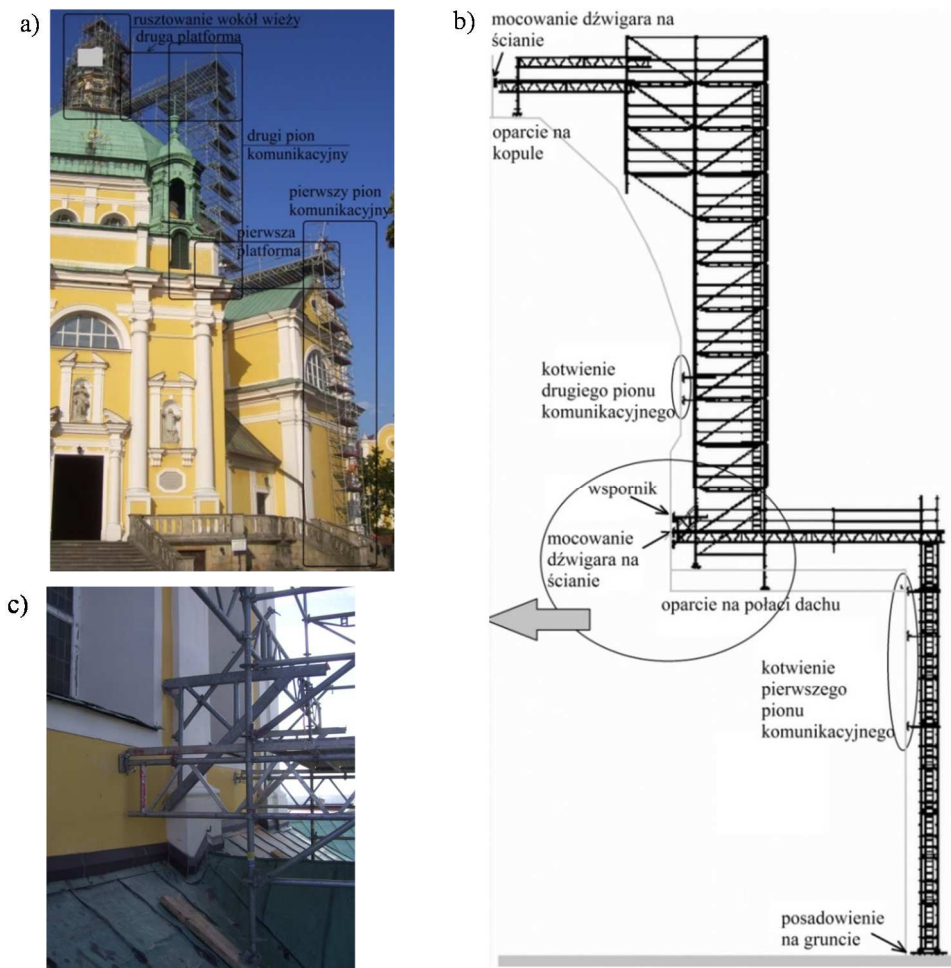
W pracy przedstawiono dwa przykłady rusztowań. Jedno z tych rusztowań uległo awarii a drugie nie uległo, co prawda awarii, ale konstrukcja nie spełniała warunków stanu granicznego nośności. Praca zawiera również ogólne omówienie czynników technicznych wpływających na awaryjność rusztowania. W tej części pracy wykorzystano między innymi wyniki badań rusztowań na 50 budowach, które zrealizowano w 2016 roku w ramach projektu „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” o akronimie ORKWIZ, finansowanego przez NCBiR w ramach PBS3 na podstawie umowy nr PBS3/A2/19/2015. Zakres i metodykę tych badań opisano w takich pracach, jak [1, 2].

2. Przykład awarii rusztowania

2.1. Opis rusztowania

Awaryje rusztowań budowlanych są opisane na przykład w takich pracach, jak [3, 4, 5, 6]. Są to awaryje, które z powodu ofiar i znacznych strat finansowych, były szeroko omawiane w mediach i wielu referatach na konferencjach. Natomiast o wielu awaryjach rusztowań, gdy

nie ma ofiar w ludziach, w ogóle opinia publiczna nie wie. Właśnie taki przykład zostanie zaprezentowany w tej części referatu. W 2010 roku podczas burzy runęły dwa rusztowania w województwie wielkopolskim. Jednym z tych rusztowań było rusztowanie przy obiekcie zabytkowym, które miało służyć jako pion komunikacyjny oraz konstrukcja pomostów roboczych podczas prac konserwacyjnych wieży. Zdjęcie tego rusztowania z okresu przed awarią pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Rusztowanie wokół obiektu zabytkowego: a) zdjęcie rusztowania przed awarią, b) schemat rusztowania, c) Szczegół oparcia pierwszej platformy na obiekcie

Konstrukcja rusztowania wykonana była z elementów systemu modułowego i można ją podzielić na pięć części:

- pierwszy pion komunikacyjny o wymiarach $0,73 \times 3,07 \times 20,0$ m,
- pierwsza platforma na wysokości 18,5 m o wymiarach $3,07 \times 12,0$ m,
- drugi pion komunikacyjny o wymiarach $3,07 \times 3,07 \times 22,0$ m,
- druga platforma na wysokości 38,5 m o wymiarach $3,07 \times 3,07$ m oraz $1,57 \times 6,0$ m,
- rusztowanie wokół wieży.

Rusztowanie było oparte na gruncie, na konstrukcji dachu i na wspornikach stalowych, kotwionych do obiektu powyżej pierwszej platformy (rys. 1b i 2). Konstrukcja była kotwiona do obiektu w następujący sposób:

- pierwszy pion komunikacyjny za pomocą sześciu kotew,
- pierwsza platforma za pomocą oparcia na ścianie, które blokowało ruch w kierunku pionowym oraz ruch poziomy, ale tylko, gdy dźwigar opierał się o obiekt (rys. 2),
- drugi pion komunikacyjny za pomocą czterech kotew,
- druga platforma za pomocą oparcia na ścianie.



Rys. 2. Zniszczone rusztowanie modułowe

Silny wiatr był bezpośrednią przyczyną awarii, ale szczegółowa analiza pracy konstrukcji pokazała, że nośność konstrukcji nie gwarantowała bezpieczeństwa pracownikom a awaria nie nastąpiła wcześniej, bo rusztowanie było dopiero oddane do użytkowania i nie wykonywano jeszcze na nim prac budowlanych.

2.2. Analiza przyczyn awarii rusztowań

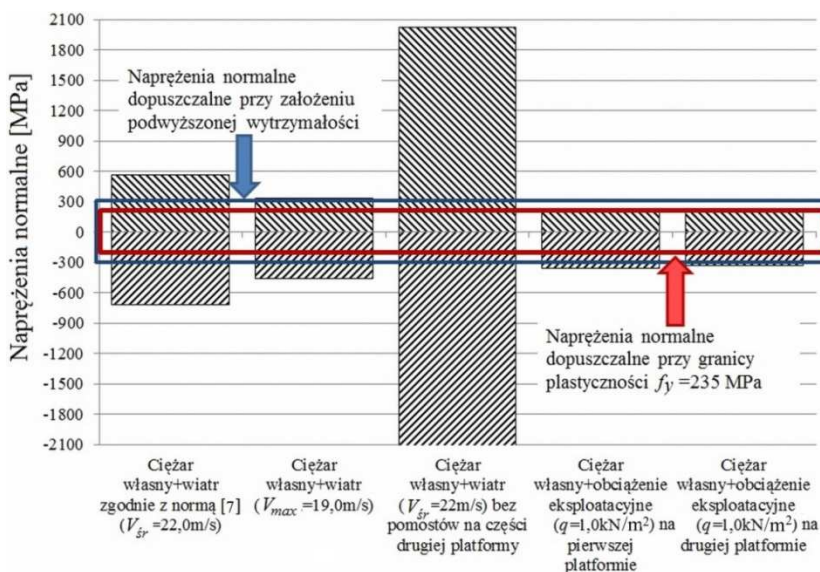
Jak napisano w poprzednim podpunkcie główną przyczyną awarii rusztowania był wiatr o dużej prędkości porywów. Średnia prędkość wiatru, zanotowana na stacji meteorologicznej Leszno-Strzyżewice oddalonej od miejsca katastrofy o 40 km, wynosiła zaledwie 2 m/s, ale porywy wiatru osiągały prędkość 19 m/s. Przepływ wokół kopuły spowodował podniesienie niezabezpieczonych pomostów i zrzucenie ich na dach oraz poza obiekt. Następnie drugi pion komunikacyjny i druga platforma rusztowania zostały przekrzywione tak, jak pokazano to na rys. 2. Znaczna część elementów w innych fragmentach rusztowania także uległa zniszczeniu a spadające pomosty zniszczyły zabytkową dachówkę.

W odniesieniu do omawianego rusztowania wykonano statyczne obliczenia w zakresie sprężysto-liniowym i wyznaczono naprężenia normalne bez uwzględniania możliwości utraty stateczności konstrukcji zgodnie ze wzorem:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_2}{W_2} + \frac{M_3}{W_3} \quad (1)$$

gdzie: N – siła normalna, M_2 i M_3 – momenty zginające względem 2-ej i 3-ej osi lokalnego układu współrzędnych, A – pole przekroju, W_2 i W_3 – wskaźniki wytrzymałości względem 2-ej i 3-ej osi lokalnego układu współrzędnych.

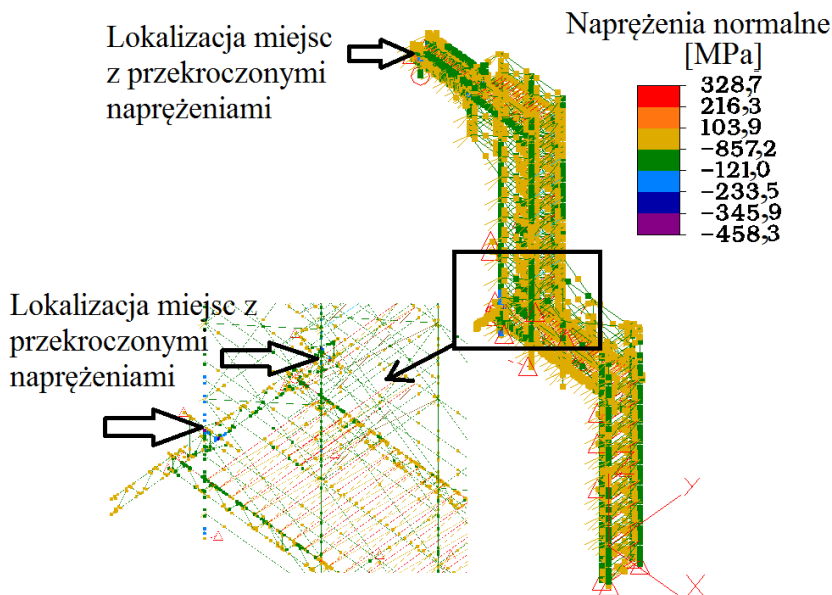
Na rysunku 3 zestawiono ekstremalne wartości naprężeń normalnych w odniesieniu do pięciu wariantów obciążenia. W celu pokazania znaczenia kolejnych obciążeń i porównania odpowiedzi konstrukcji na ich działanie, przedstawiono wyniki z obliczeń liniowych, w których założono, że konstrukcja pracuje w zakresie liniowo-sprężystym także poza granicą plastyczności, co oczywiście nie jest zgodne z prawami fizyki. Jak widać we wszystkich wariantach naprężenia normalne zostały przekroczone. Z obliczeń komputerowych wynika, że naprężenia zostały przekroczone głównie w dźwigarze, opierającym się na wspornikach oraz w stojakach, do których przykręcony był dźwigar (rys. 4). Z powodu utraty nośności w tym miejscu konstrukcja się obróciła tak, jak to pokazano na rys. 2.



Rys. 3. Zestawienie ekstremalnych naprężeń normalnych w rusztowaniu modułowym

Przekroczenie nośności konstrukcji wynikało między innymi ze zbyt małej liczby kotwień konstrukcji do obiektu. Ponadto mocowanie dźwigarów platform na ścianach blokowało jedynie przesuw pionowy. W poziomie dźwigary pierwszej i drugiej platformy mogły się odsuwać od ściany. Dźwigar, podtrzymujący drugi pion komutacyjny, był oparty na wspornikach. Takie rozwiązanie jest dopuszczalne, ale należy pamiętać, że jeżeli wsporniki są odsunięte od słupków, to dźwigary są poddane zginaniu, które może spowodować nawet dwukrotny wzrost wyczerpania w stosunku do układu standardowego podanego w katalogach. Kolejny problem, na który nie zwrócono uwagi podczas montażu, to zginanie stojaków, umieszczonych na podstawkach uchylnych na połaci. Jeżeli podstawki nie są stężone rurami, to przesuwają się po połaci pod wpływem ciężaru a elementy stojaków oprócz sił pionowych przenoszą momenty zginające. Należy również stwierdzić, że liczba punktów kotwienia do ścian obiektu była zbyt mała.

Do tego doszedł fakt, że pomosty nie były zabezpieczone przed podniesieniem. Po podniesieniu pomostów przez wiatr zmniejszyła się sztywność pozioma rusztowania a konstrukcja straciła całkowicie możliwość przenoszenia obciążeń. Naprężenia normalne w elementach przekroczyły granicę plastyczności stali i nastąpiła awaria.



Rys. 4. Naprężenia normalne przy działaniu wiatru z porywami o prędkości maksymalnej $V_{max}=19$ m/s

Omawiana konstrukcja jest przykładem nietypowego rusztowania. Każde takie rusztowanie powinno być sprawdzone poprzez wykonanie dla niego obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. W tym przypadku montażyści uznali, że wystarczy zastosować rozwiązania, z którymi się spotkali w projektach i na podstawie własnej oceny stwierdzili, że rusztowanie jest prawidłowo zmontowane. Niestety fakty zweryfikowały ich ocenę.

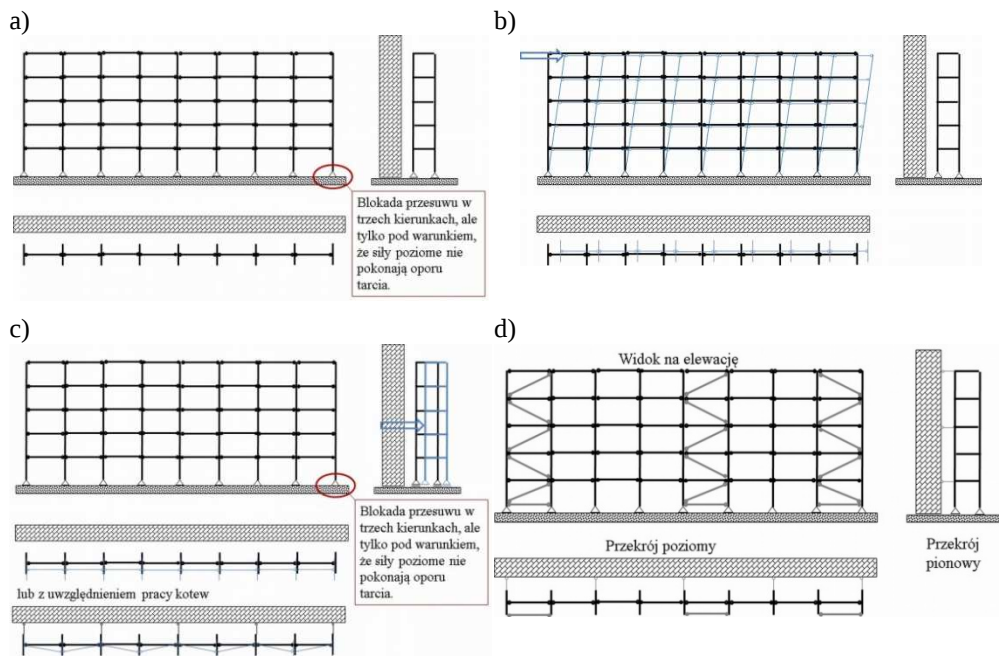
Przyczyną bezpośrednią katastrofy był silny wiatr. Jednak szczegółowa analiza pokazuje, że rusztowanie nie spełniało także warunków nośności przy obciążeniu eksploatacyjnym, a więc nie spełniłoby swojej podstawowej funkcji zabezpieczenia ludzi podczas prac. Można stwierdzić, że silny wiatr uratował przyszłym użytkownikom rusztowania życie a przyczyną katastrofy budowlanej była nieprawidłowa konstrukcja rusztowania. Można było uniknąć katastrofy budowlanej, gdyby wcześniej konstrukcja została poddana analizie statyczno-wytrzymałościowej.

4. Czynniki techniczne wpływające na awaryjność rusztowań

4.1. Zasady funkcjonowania rusztowania jako układu prętowego

W poprzednim punkcie opisano rusztowanie nietypowe o skomplikowanym kształcie wokół obiektu zabytkowego. Te same problemy występują także w rusztowaniach o znacznie prostszych geometriach. Jednak przed przystąpieniem do omawiania poszczególnych czynników technicznych, jakie wpływają na awaryjność rusztowania, na przykładzie rusztowań fasadowych zostaną zaprezentowane podstawowe zasady funkcjonowania rusztowań jako układów prętowych.

Na rys. 5 pokazano ideę budowy rusztowań fasadowych. Główną konstrukcję rusztowania stanowi układ ram i pomostów (rys. 5a). Ramy po połączeniu ze sobą i przy założeniu, że ich połączenia są sztywne, tworzą w przekroju pionowym płaski statycznie niewyznaczalny układ prętowy. Pomiędzy ramami a podłożem są podstawki, które powinny zapewnić blokadę przesuwu w trzech kierunkach. W praktyce podstawki, ustawione na podkładach, blokują w pełni ruch w kierunku pionowym w dół i to pod warunkiem prawidłowej nośności podłoża. Rusztowanie może być podniesione do góry w kierunku pionowym, np. przez wiatr a w przypadku zbyt małego tarcia podkładów lub podstawek o podłożu, może dojść do przesunięcia fragmentu rusztowania w kierunku poziomym (rys. 5c).

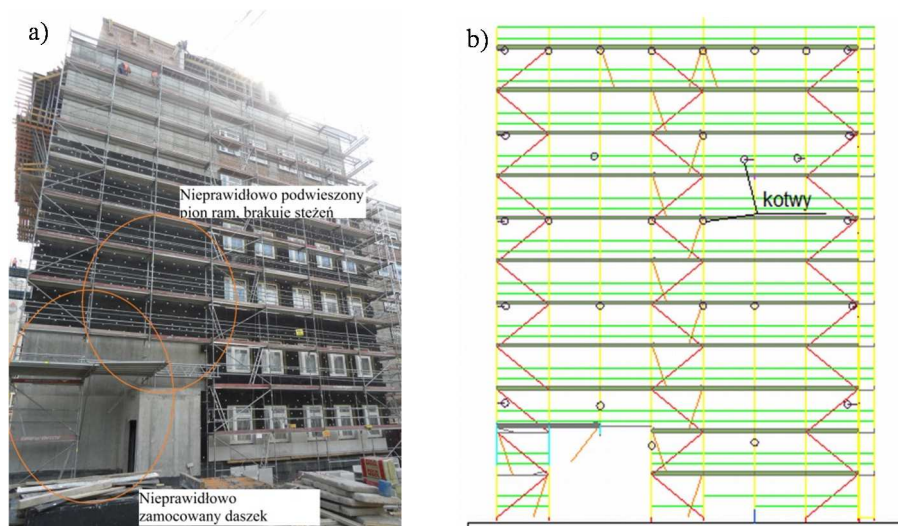


Rys. 5. Schemat pracy rusztowania: a) główna konstrukcja rusztowania, b) ruch głównej konstrukcji rusztowania bez usztywnień (stężenia i kotwy) wzdłuż elewacji, c) ruch głównej konstrukcji rusztowania bez usztywnień prostopadłe do elewacji, d) pełna konstrukcja rusztowania.

Jak pokazano na rys. 5b i 5c, rusztowanie, składające się tylko z ram i pomostów przy ograniczonej roli podstawek jako blokad ruchu, jest układem geometrycznie zmiennym. Dlatego, w celu zrealizowania konstrukcji zdolnej do przenoszenia obciążeń, w rusztowaniu montowane są stężenia a cała konstrukcja blokowana jest za pomocą kotwienia do ścian (rys. 5d). Wstawienie stężeń ma na celu stworzenie statycznie niewyznaczalnych fragmentów konstrukcji lub inaczej mówiąc przy bardzo dużym uproszczeniu „sztywnych brył”, pomiędzy którymi są wstawiane fragmenty konstrukcji, mogące się dość swobodnie przemieszczać w pionie i poziomie. Ruch w kierunku poziomym blokowany jest za pomocą kotwów. Ramy pomiędzy sztywniejszymi fragmentami konstrukcji mają możliwość ruchu w kierunku pionowym, co zabezpiecza konstrukcję przed powstaniem dodatkowych naprężeń w przypadku osiadania tych ram. Jednocześnie jedna płaszczyzna ram powinna być posadowiona na jednym podkładzie. Ma to na celu zabezpieczenie stojaków jednej płaszczyzny przed dodatkowymi wyważeniami, spowodowanymi nierównomiernym osiadaniem dwóch słupków tej samej ramy. Taka budowa rusztowań pozwala również na stosowanie uproszczeń w obliczeniach statycznych, polegających

na wykonywaniu obliczeń tylko dla układów płaskich, jakie powstają w przekrojach pionowych rusztowania (rys. 5d).

Ten idealny układ występuje rzadko i wystarczy wstawienie np. daszka ochronnego (rys. 6), aby zaburzyć podstawowy schemat pracy rusztowania i doprowadzić do przekroczenia warunków stanu granicznego nośności. Oczywiście na stan naprężeń w elementach konstrukcji i jej funkcjonowanie ma również wpływ dokładność montażu rusztowania. Te aspekty będą omówione w kolejnym podpunkcie.



Rys. 6. Rusztowanie fasadowe nr 1: a) zdjęcie rusztowania z zaznaczonymi błędami, b) schemat rusztowania z zaznaczonymi kotwami

4.3. Czynniki techniczne wpływające na funkcjonowanie rusztowań

Głównym zadaniem rusztowań budowlanych jest zapewnienie bezpieczeństwa jego użytkownikom podczas prac na wysokości lub w miejscach o utrudnionym dostępie. Wypełnienie tego wymogu wymaga spełnienia wielu warunków, opisanych w takich pracach jak [8, 9, 10, 11], i pogrupowanych w zestawy czynników prawno-społeczno-ekonomicznych, środowiskowych, technicznych, organizacyjnych i ludzkich. W tej pracy są omówione jedynie czynniki techniczne. Ta grupa czynników jest szczególna, ponieważ wpływa na bezpieczeństwo ludzi poprzez wpływ na pracę konstrukcji rusztowania i możliwość wystąpienia jej awarii.

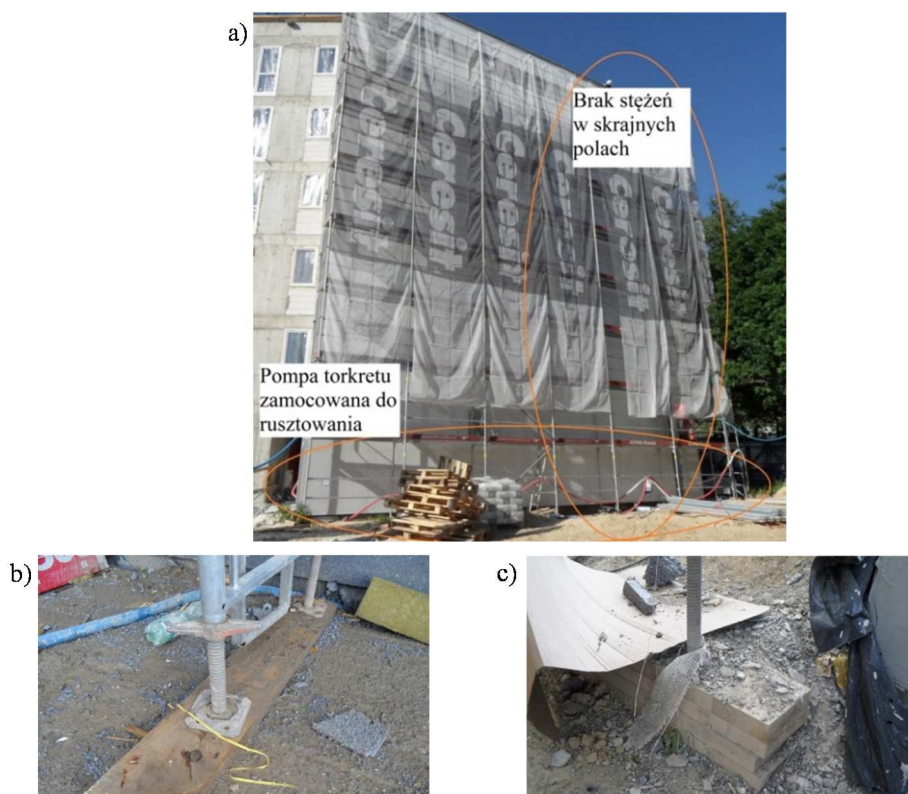
Jak pokazano w p. 3 i podpunkcie 4.3 praca rusztowania zależy między innymi od:

- ukształtowanie konstrukcji głównej rusztowania,
- układu stężeń,
- posadowienia rusztowania, w tym nośności podłoża i stabilności podkładów,
- nośności układu kotew,
- dokładności montażu, a w szczególności dokładności realizacji geometrii rusztowania i połączeń oraz zabezpieczanie pomostów przed podniesieniem,
- stanu technicznego elementów,
- wielkości obciążeń, a w szczególności działania wiatru i obciążenia eksploatacyjnego.

W rusztowaniu przede wszystkim należy prawidłowo dobrać rozstawy ram tak, aby przeniosły wszystkie obciążenia. Czym rusztowanie wyższe lub czym obciążenie jest bardziej nierównomiernie rozłożone, tym te rozstawy powinny być mniejsze. W praktyce z przyczyn

ekonomicznych na budowach dąży się do stosowania rozstawu ok. 3 m czyli możliwie największego. Z kształtowaniem konstrukcji rusztowań wiąże się montaż stężeń. Stężenia powinny być montowane zawsze w skrajnych polach, odległości pomiędzy polami ze stężeniami nie powinny być większe niż 10 m a na każdym poziomie powinny być co najmniej dwa stężenia. Niestety z badań rusztowań na budowach wynika, że w ponad 50% przypadków stężenia są nieprawidłowo zamontowane. Najczęściej skrajne pola rusztowań są bez stężeń tak, jak to pokazano na rys. 7a.

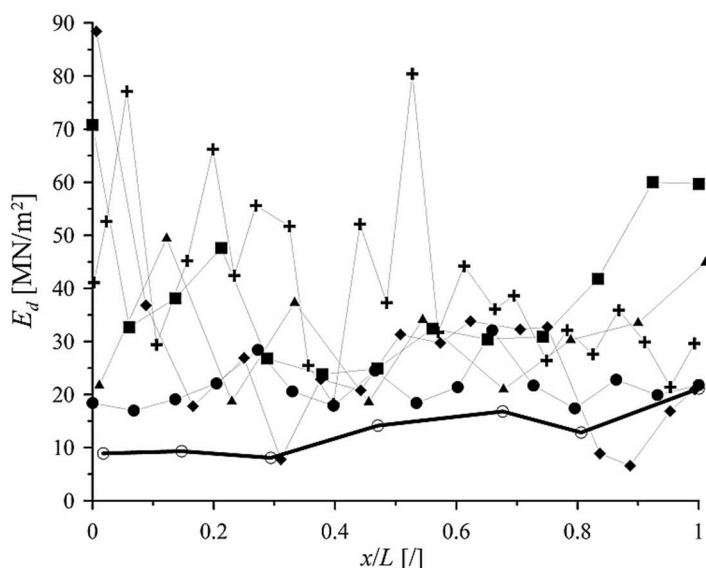
Na rys. 7 pokazane jest również posadowienie rusztowania. Na rys. 7b pokazane jest prawidłowe posadowienie, tzn. podkład jest ustawiony prostopadle do elewacji i obie podstawki ramy są umieszczone na tym podkładzie. Na rys. 7c jest pokazany inny sposób ustawienia ramy. Zestaw podkładów, na którym postawiono rusztowanie, wygląda dość stabilnie, ale poszczególne elementy mogą się przesuwac co nie daje gwarancji przeniesienia sił poziomych. Dodatkowo podkłady są obciążone ciężarem gruntu oraz obciążeniami statycznymi i dynamicznymi, wywołanymi maszynami budowlanymi, przekazywanymi na ten grunt.



Rys. 7. Rusztowanie fasadowe nr 2: a) całe rusztowanie, b) prawidłowe ustawienie ram na podkładach, c) ustawienie ram na podkładach, które są obciążone dodatkowo gruntem

Z posadowieniem rusztowań związany jest stan podłoża. Bardzo często rusztowania stawiane są na podłożu utwardzonym np. kostce brukowej, betonie. Takie podłoża gwarantują, że nie nastąpi osiadanie ram konstrukcji. W przypadku, gdy rusztowanie jest ustawione bezpośrednio na gruncie, podłoże powinno być odpowiednio przygotowane, tzn. zagęszczone i wyprofilowane. Z badań wynika, że podłoża gruntowe zwykle nie są prawidłowo przygotowane

a przed wszystkim nie są zagęszczane. Na rys. 8 pokazano wykresy dynamicznego modułu ściśliwości E_d dla 6 przykładowych rusztowań. Jak widać na rysunku, dla przypadku najbardziej niekorzystnego wartości maksymalne wartości modułu E_d są 9-krotnie większe od wartości minimalnej. Na 50 przebadanych rusztowań w odniesieniu do 23 stwierdzono, że można przyjąć, że podłoże zapewnia równomierne osiadanie, ale były to sytuacje, gdy rusztowanie było postawione na podłożu betonowym lub z kostki. Gdy rusztowanie było postawione na podłożu gruntowym, to ilorazy wartości minimalnej do maksymalnej modułu ściśliwości mieściły się w przedziale od 0,1 do 0,9. Takie różnice w zagęszczeniu gruntu powodują, że powstają bardzo duże różnice osiadań pomiędzy poszczególnymi ramami. Rusztowania dzięki swojej budowie zwykle nie są wrażliwe na tak duże różnice. Jednak, gdy nierównomierne osiadania dotyczą ram stężonych, gdzie osiadanie doprowadza do „zawieszenia” płaszczyzny ram na innych płaszczyznach ram lub podstawki są postawione na dwóch oddzielnych podkładach, to wtedy już może dojść do powstania dodatkowych wytyżeń w elementach rusztowania.



Rys. 8. Zmiany dynamicznego modułu okształcenia E_d gruntu wzdłuż elewacji budynku; x – odległość punktu pomiarowego od pierwszego stojaka rusztowania, L – długość rusztowania; pogrubiona linia – wyniki dla rusztowania nr 1 z rys. 6.

Analiza posadowień rusztowań na 50 budowach pokazuje, że rusztowania są również źle ustawiane na podkładach. Na 50 przebadanych rusztowań tylko w 20 przypadkach ustawienie rusztowań na podkładach można było potraktować jako prawidłowe. Główne błędy to stawianie stojaków jednej ramy na oddzielnych podkładach, używanie podkładów węższych niż podstawki, ustawianie podkładów na innych elementach-podkładach, nie ustawianie podstawek ram w osiach, używanie spękanych podkładów drewnianych, ustawianie podstawek bezpośrednio na podłożu, ustawianie dwóch podstawek na podkładzie składającym się z dwóch równoległych elementów.

Bardzo duże znaczenie dla prawidłowej pracy rusztowania ma kotwienie. Zgodnie z zaleceniami normy [13] rusztowanie powinno być kotwione w odstępach w pionie co 4 m i w poziomie w okolicach co drugiego połączenia ramek (rys. 9a). Kotwienia powinny być ustawione w szachownicę. W praktyce realizacja tych zaleceń jest bardzo trudna, ponieważ kotwienia nie

można wykonać w okolicach okien, w wielu materiałach okładzinowych, pustych przestrzeniach układów szkieletowych itp. Konsekwencją tego, że obszar elewacji, w którym można umieszczać kotwy jest ograniczony, łączniki kotew są często montowane do słupków w znacznej odległości od pomostów tak, jak to pokazano na rys. 9b. Taki sposób montażu wywołuje przy obciążeniach poziomych momenty zginające w słupkach, czego efektem jest wzrost wyężenia oraz zwiększenie możliwości wystąpienia utraty stateczności. W związku z tym, że często tylko w taki sposób można przykotwić rusztowanie do budynku, w tej pracy nie oceniano kotew pod kątem ich układu a jedynie pod kątem jakości ich montażu, ich nośności i obciążeń, przekazywanych na kotwy z rusztowania. Rusztowanie z nietypowym układem kotew powinno być zawsze sprawdzone za pomocą obliczeń statyczno-wytrzymałościowych.



Rys. 9. Przykłady realizacji kotwienia rusztowań

Siła, wyrywająca kotwy, powinna być większa niż podana w dokumentacji technicznej rusztowania dla danego układu kotew, rozwiązania konstrukcyjnego i zastosowanej osłony rusztowania. Jeżeli w dokumentacji technicznej rusztowania nie ma podanej siły wyrywającej kotwy, to siła wyrywająca kotwy zgodnie z Rozporządzeniem [12] powinna być większa niż 2,5 kN. Zespół badawczy projektu ORKWIZ wykonywał pomiary siły wyrywającej kotwy na budowach za pomocą siłomierza BUK-02p. Z badań wynika, że siła wyrywająca kotew zależy oczywiście przede wszystkim od materiału, w którym jest montowana. W przypadku takich materiałów jak beton komórkowy i pustaki ceramiczne zwykle uzyskiwane siły wyrywające są mniejsze niż 2,5 kN. Natomiast cegła pełna i beton raczej gwarantują, że zakotwienie rusztowania w tych materiałach spełni swoją rolę. Siły wyrywające kotwy ze ścian zależą także od jakości wykonania kotwienia, na przykład w betonie o wyższej klasie wytrzymałości kotwienie może być słabsze, ponieważ trudniej jest w nim wykonać dokładny otwór.

Częstym błędem przy realizacji kotwienia jest stosowanie długich kotew o długości tak dobranej, aby oczka kotew wystawały po założeniu wszystkich warstw elewacyjnych (rys. 9c) lub nie montowanie łącznika i kotwy w jednej linii tak, jak jest to pokazane na rys. 9d. Niestety takie kotwienie nie spełnia swojej roli, polegającej na blokowaniu ruchu ram w poziomie.

Takie rusztowania są podatne również na wszelkiego rodzaju obciążenia dynamiczne, w tym dynamiczne działanie wiatru oraz poruszanie się pracowników po pomostach. Doprowadza to do dyskomfortu użytkowników rusztowania.

Kolejnym czynnikiem, który także decyduje o funkcjonalności rusztowania, jest stan techniczny elementów. Na 50 przebadanych rusztowań stwierdzono, że 9 rusztowań nie posiada uszkodzeń, 39 posiada elementy uszkodzone a 2 rusztowania zmontowane są z elementów o bardzo dużym stopniu zużycia. Na rys. 10 pokazano przykładowe uszkodzenia, wpływające na nośność konstrukcji a na rys. 11 uszkodzenia, które zmniejszają bezpieczeństwo użytkowników rusztowania. Uszkodzeniami, które negatywnie wpływają na nośność rusztowania są: uszkodzenia stężeń w formie wygięcia z płaszczyzny, uszkodzenia dolnych poprzeczek ram, polegające na wygięciu tych elementów lub wręcz wycięciu, uszkodzenia blach węzłowych ram oraz uszkodzenia pomostów. Pomosty są elementami w najgorszym stanie technicznym. W trakcie badań stwierdzono, że większość pomostów ma uszkodzenia. Występowanie tych ostatnich uszkodzeń oznacza, że rola pomostów w tworzeniu sztywności poziomej jest ograniczona. W efekcie poszczególne płaszczyzny ram pracują oddzielnie i w przypadku braku kotwienia mogą być poddane zginaniu np. od działania wiatru a kolejne ramy rusztowania mogą być skręcane. Taka sytuacja wystąpiła właśnie podczas awarii rusztowania, omówionej w p. 2.



Rys. 10. Przykłady uszkodzeń elementów rusztowań, wpływających na nośność konstrukcji

Problem niedokładnego montażu, którego efektem są obroty ram na połączeniach a co za tym idzie przesunięcia ich połączeń, nazywane w tej pracy imperfekcjami, został opisany w pracy [15]. W pracy [15] przeanalizowano wzajemne przesunięcia poziomów ram o wartościach do 4 cm. Ten zakres został wybrany na podstawie literatury, np. pracy [17], gdzie podaje się, że zbadane maksymalne wychylenia z pionu rusztowań w Australii wyniosły ok. 6,72 cm oraz po wzięciu pod uwagę, że zgodnie z normą [16] dopuszczalna różnica przesunięć dwóch kolejnych poziomów ram wynosi 2 cm. W pracy potwierdzono, że imperfekcje na poziomie 4 cm mogą w przypadku typowego rusztowania (typowego według normy [16]) spowodować, że stan graniczny nośności nie zostanie spełniony z powodu zginania elementów rusztowania, które do tego nie są przystosowane. Poza wzrostem naprężeń normalnych w zginanych elementach powstaje inny negatywny efekt tj. nierównomierne rozłożenie sił na podłoże. Jeżeli do tego dojdzie ustawienie podstawek na oddzielnych podkładach, to ramy są dodatkowo obciążane

z powodu nierównomiernego osiadania. Dlatego wydaje się, że problem niedokładności montażu rusztowania jest największym zagrożeniem dla konstrukcji rusztowań. Zwłaszcza, że z badań zespołu ORKWIZ wynika, że w Polsce imperfekcje w rusztowaniach mogą znacznie przekroczyć 15 cm.



Rys. 11. Przykłady uszkodzeń elementów rusztowań, wpływających głównie na bezpieczeństwo pracowników

Z badań w ramach projektu ORKWIZ wynika również, że obciążenia zarówno eksploatacyjne jak i środowiskowe w zasadzie nie przekraczają charakterystycznych wartości normowych. Obciążenia eksploatacyjne w dwóch przypadkach na 50 przebadanych rusztowań osiągnęły wartości normowe. Natomiast obciążenia środowiskowe, stwierdzane na budowach, są zwykle znacznie mniejsze. Jednak należy pamiętać, że badania obejmowały zaledwie krótki okres a obciążenia środowiskowe wymagają długiego okresu badań. Normowe wartości działania wiatru odpowiadają czasowi powrotu 50 lat.

Rzeczywiste działanie wiatru na elementy rusztowań różni się znacząco od zaleceń normowych, co zostało pokazane np. w pracy [14]. Dotyczy to zarówno wartości, jak kierunków działania obciążenia. Gdy budynek ma pełną elewację, to siły od wiatru, działające na stojaki przy narożach budynku, są poddawane obciążeniom kilkukrotnie wyższym niż normowe. Dalsze stojaki są zwykle poddawane obciążeniom równoległym do elewacji budynku. Sytuacja się zmienia, gdy zostanie założona siatka ochronna. Tutaj działanie wiatru jest zwykle prostopadłe do elewacji i oczywiście siły przekazywane na kotwy są znacznie większe niż w sytuacji, gdy siatka nie jest montowana. Zarówno w sytuacji z siatką ochronną jak i bez siatki negatywny wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji ma dynamiczne działanie wiatru, które obecnie jest zagadnieniem niezbadanym, ale potwierdzonym awariami rusztowań, których jest często bezpośrednią przyczyną.

Z badań zespołu ORKWIZ wynika także, że rusztowania są poddawane obciążeniom dynamicznym, wywołanym przez pompy torkretowe, zsypy, urządzenia na rusztowaniach, itp. Te zagadnienia wymagają znacznie szerszych badań i nie zostały ujęte w niniejszej pracy.

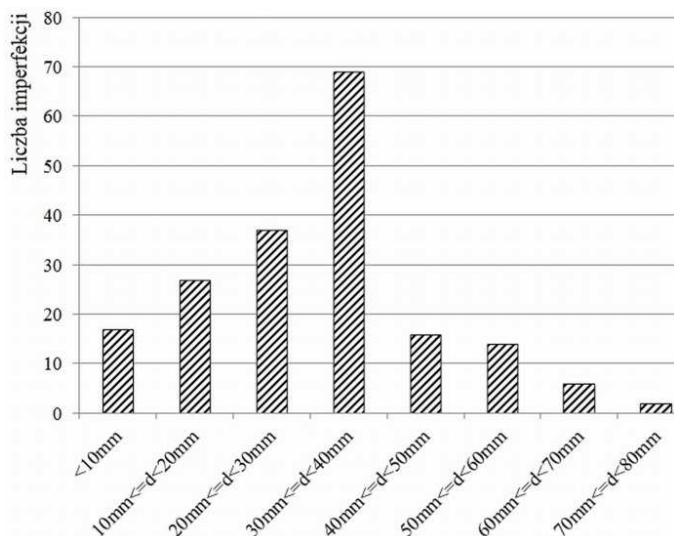
5. Analiza funkcjonowania przykładowego rusztowania fasadowego

Analizując przydatność rusztowania i jego awaryjność, można każdy z elementów wymienionych w poprzednim punkcie analizować oddzielnie, ale wydaje się, że lepszym podejściem jest analiza rusztowania jako całej konstrukcji z rzeczywistą geometrią i posadowieniem. Poniżej zostanie przedstawiony przykład analizy statyczno-wytrzymałościowej rusztowania na przykładzie rusztowania, pokazanego na rys. 6. 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. Wykres dynamicznego modułu odkształcenia E_d gruntu wzdłuż elewacji budynku jest pokazany za pomocą pogrubionej krzywej łamanej na rys. 8. Na rys. 6 wskazano błędy w konstrukcji, tzn. brak stężeń rozpraszających obciążenie z podwieszonej płaszczyzny ram na płaszczyzny 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. 12 pokazano rozkład imperfekcji geometrycznych d czyli różnic pomiędzy rzeczywistym i idealnym położeniem punktów połączeń ram. Maksymalna stwierdzona imperfekcja na rusztowaniu wynosi 8,0 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 1,0 kN/m² czyli połowa obciążenia klasy 3 według normy [16]. Podczas tygodniowych badań nie stwierdzono zewnętrznych wymuszeń dynamicznych.



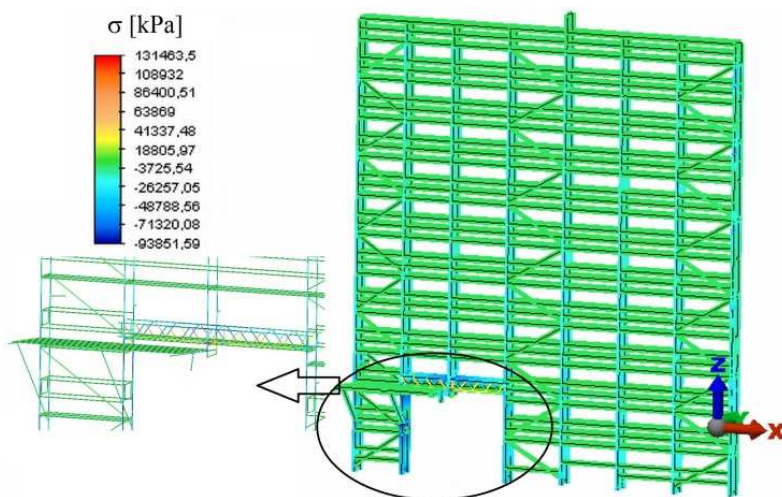
Rys. 12. Rozkład imperfekcji w rusztowaniu fasadowym nr 1

W odniesieniu do tego rusztowania 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 montażu (imperfekcje) z uwzględnieniem osiadania. Analizy statyczne wykonano w odniesieniu do pięciu wariantów obciążenia:

- wariant I – charakterystyczne obciążenie eksploatacyjne klasy 3 według normy [16],
- wariant II – charakterystyczne obciążenie eksploatacyjne klasy 3 z wiatrem działającym prostopadłe do elewacji według normy [16],
- wariant III – charakterystyczne obciążenie eksploatacyjne klasy 3 z wiatrem działającym równoległe do elewacji według normy [16],
- wariant IV – charakterystyczne działanie wiatru o kierunku prostopadłym do elewacji według normy [7],
- wariant V – charakterystyczne działanie wiatru o kierunku równoległym do elewacji według normy [7].

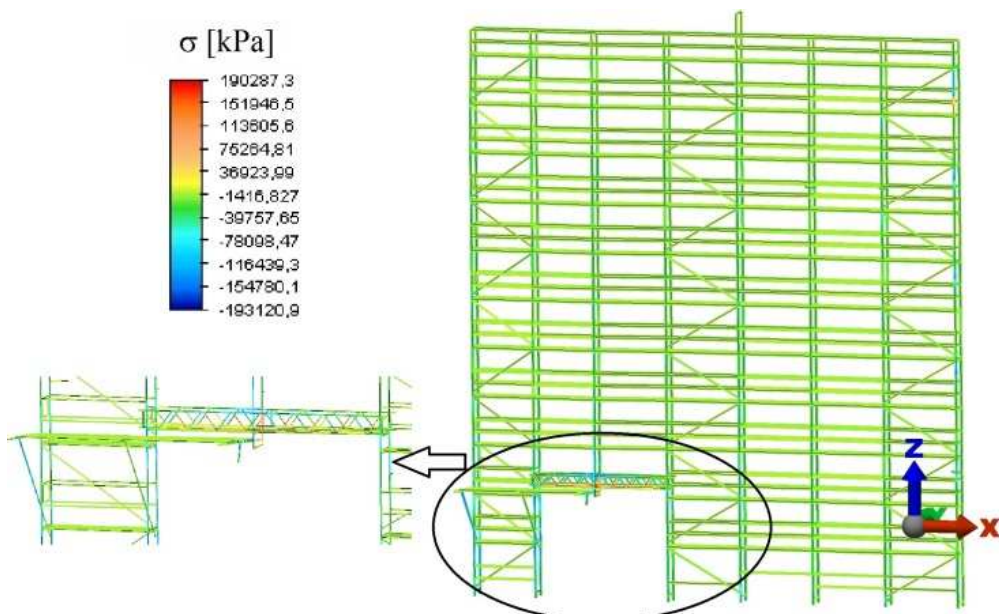
W odniesieniu do trzech pierwszych wariantów wykonano również analiz stateczności.

Na rys. 13 i 14 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 dalszych rysunkach, tzn. wpływ imperfekcji i nierównomierności zagęszczenia podłoża na siły normalne w podstawkach, siły normalne w kotwach, naprężenia normalne w elementach dźwigarów, wartości obciążenia krytycznego 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.



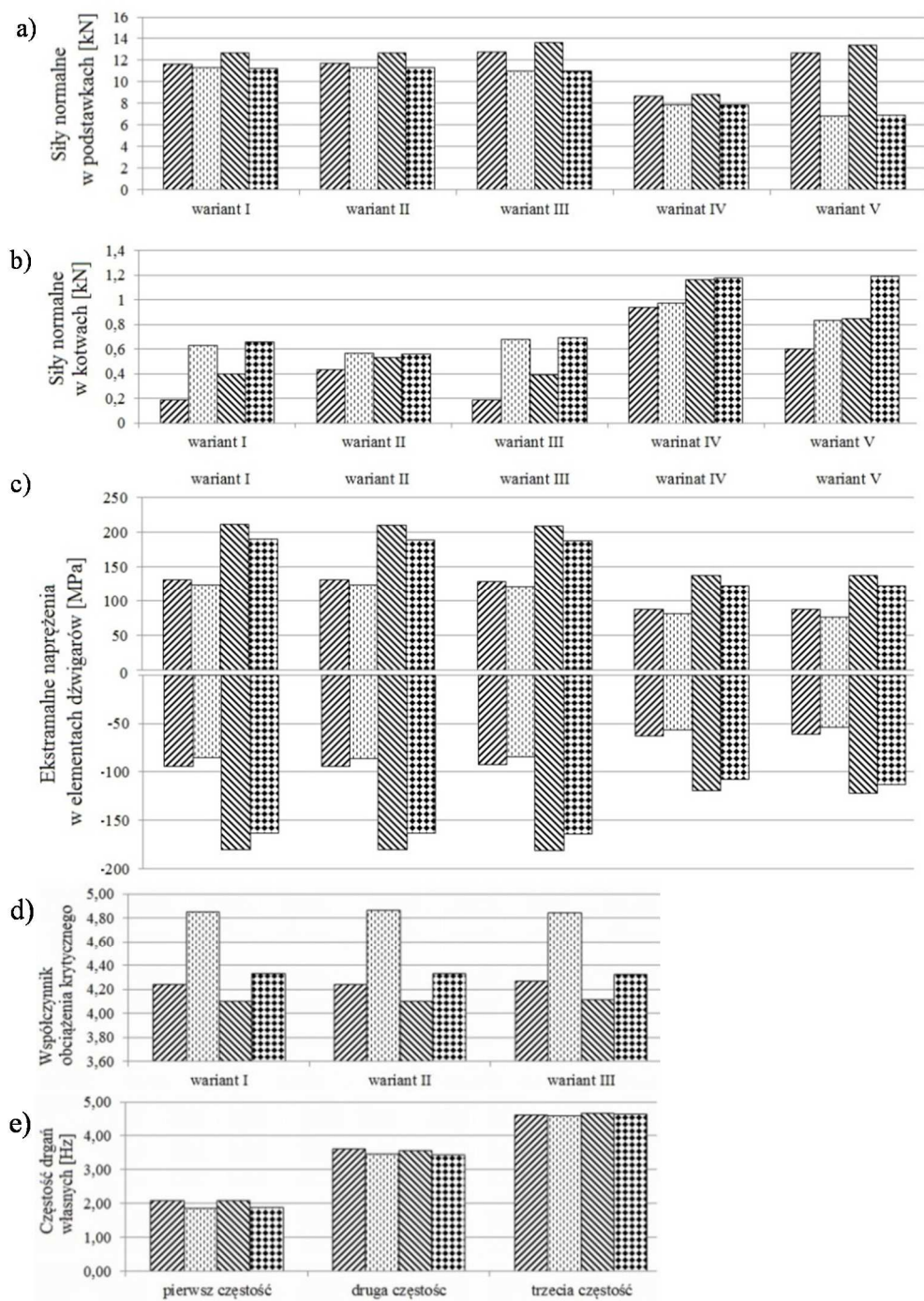
Rys. 13. Naprężenia normalne [kPa] w elementach rusztowania fasadowego nr 1 o idealnej geometrii

Oczywiście nie tylko duże wartości naprężeń normalnych w kotwach podważają to, że rusztowanie będzie prawidłowo funkcjonowało. Jak widać na rys. 14 i 16c naprężenia normalne od charakterystycznych obciążeń osiągają wartości 210 MPa. Jeżeli uwzględnimy częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_F , który zgodnie z normą [16] dla wszystkich obciążeń rusztowań wynosi 1,5, to uzyskamy naprężenia o wartościach dochodzących do 315 MPa. Dodatkowo na podstawie uproszczonych analiz dynamicznych stwierdzono, że naprężenia mogą wzrosnąć w słupkach nawet o 130 MPa przy uwzględnieniu dynamicznego charakteru działania wiatru, skierowanego równoległe do elewacji. Elementy dźwigarów, w których stwierdzono największe wyężenie, są wykonane ze stali St3S o podwyższonej wytrzymałości o obliczeniowej granicy plastyczności równej 280 MPa. Porównując te 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 częstota drgań własnych o wartości 2,06 Hz powoduje, że użytkownicy podczas poruszania się po konstrukcji mogą odczuwać dyskomfort.



Rys. 14. Naprężenia normalne [kPa] w elementach rusztowania fasadowego nr 1 z uwzględnieniem imperfekcji i osiadania podłoża

Podsumowując, do awarii opisywanego rusztowania nie doszło, ponieważ obciążenia rusztowania były znacznie mniejsze niż normowe. Jednak, gdyby 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.



Rys. 15. Porównanie wyników obliczeń rusztowania nr 1, – o idealnej geometrii, – o idealnej geometrii z osiadaniem podłoża, – z imperfekcjami, – z imperfekcjami z osiadaniem

6. Podsumowanie

W zaprezentowanych rusztowaniach stany graniczne nośności były przekroczone. W odniesieniu do obu rusztowań powinny być wykonane obliczenia statyczno-wytrzymałościowe. Pierwsze rusztowanie ma skomplikowaną geometrię i jest oczywiste, że jest rusztowaniem nietypowym. W przypadku drugiego rusztowania wysokość rusztowania i układ głównej konstrukcji może sugerować, że jest to typowe rusztowanie. Jednak układu kotew w rusztowaniu na rys. 6 nie można uznać za rozwiązanie typowe zgodnie z normą [16], dlatego całe rusztowanie też należy zaliczyć do rusztowań nietypowych. Wnioskiem, nasuwającym się na podstawie tych przykładów, jest to, że każde rusztowanie, co do którego są jakiejkolwiek wątpliwości co do zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, powinno zostać poddane analizie statyczno-wytrzymałościowej. Na etapie projektowania konstrukcji, za pomocą obliczeń komputerowych rusztowania można wyeliminować większość zagrożeń, wynikających z konieczności odejścia od typowego kształtu rusztowania.

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.

Informacje dodatkowe

W pracy wykorzystano między innymi wyniki badań prowadzonych 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. Autorka składa podziękowania za pomoc w realizacji badań dr hab. inż. Bożenie Hole, prof. PWR wraz z zespołem z Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, dr inż. Jackowi Szerowi wraz z zespołem z Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, dr inż. Krzysztofowi Czarnockiemu wraz z zespołem z Wydziału Zarządzania Politechniki Lubelskiej, dr hab. inż. Tomaszowi Lipeckiemu, dr inż. Jarosławowi Bęćowi, mgr inż. Aleksandrowi Robakowi, mgr inż. Michałowi Pieńko, mgr inż. Paulinie Jamińskiej-Gadomskiej oraz innym członkom zespołu Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej.

Literatura

1. Błazik-Borowa E., Czarnocki K., Hoła B., Szer J.: Projekt badawczy „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych”, Rusztowania, 1/2016 (40), 2016, s. 18–20.
2. Hoła B., Sawicki M., Szóstak M., Błazik-Borowa E., Czarnocki K., Szer J.: Badania rusztowań na placu budowy, Builder, grudzień 2016, 80–83.
3. Flaga K. Refleksje na temat katastrofy budowlanej przy budowie wiaduktu drogowego w Ogródzonej, Mat. konf. XXII KNT Awarie budowlane, 2005, s. 53–66.
4. Ignatowski P., Wrzosek M.: Rusztowania – bezpieczne narzędzie czy śmiertelne zagrożenie – przepisy i praktyka, Mat. konf. XXII KNT Awarie budowlane, 2011, s. 93–110.
5. Jarominiaka A. i Rosseta A.: Katastrofy i awarie mostów, WKŁ, Warszawa 1986.
6. Kałuziński D., Mańko Z.: Uszkodzenia rusztowań w czasie budowy nowych wiaduktów nad autostradą, Mat. konf. XXII KNT Awarie budowlane, 2007, s. 895–902.
7. PN-EN 1991-1-4: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.

8. Błazik-Borowa E., Szer J. : The analysis of the stages of scaffolding „life” with regard to the decrease in the hazard at building works, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, nr 2, vol. 15, 2015, s. 516–524.
9. Jagielski P., Szer J., Błazik-Borowa E.: Ocena bezpieczeństwa i zagrożeń użytkowników rusztowań budowlanych na świecie, *Materiały budowlane*, 9/2015 (517), s. 128–130.
10. Błazik-Borowa E. i inni: Bezpieczeństwo pracy w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2015.
11. Błazik-Borowa E., Szer J.: Podstawowe elementy modelu oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych na rusztowaniach, *Przegląd budowlany*, (10), 2016, s. 24–29.
12. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003 nr 47, poz. 401).
13. PN-EN 12810-1: Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych. Część 1: Specyfikacje techniczne wyrobów.
14. Jamińska P.: Analiza działania wiatru na układ budynek z rusztowaniem, *Budownictwo i Architektura*, 12(2), 2013, s. 111–118.
15. Błazik-Borowa E., Gontarz J.: The influence of the dimension and configuration of geometric imperfections on the static strength of a typical façade scaffolding, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 2016, s. 269–281.
16. PN-EN 12811-1: Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania.
17. Chandransu T., Rasmussen K.J.R.: Investigation of geometric imperfections and joint stiffness of support scaffold system, *Journal Of Constructional Steel Research*, 67, 2011, s. 576–579.

TECHNICAL ASPECTS AFFECTING FAILURE OF SCAFFOLDS

Abstract: The paper deals with technical aspects which influence the capacity bearing and functioning of scaffolds during construction. The complexity of the problem is presented in the example of failure of the modular scaffold which, after assembly, did not satisfy the conditions for the ultimate limit state and finally it failed due to an action of the wind. Next the author presented technical problems: formation of the main structure scaffolds, bracing sets, foundation scaffolds, load-bearing capacity of the anchors, the accuracy of assembly, technical state of the elements, loads. The impact of these factors on the possibility of scaffolds failure is illustrated with the example of a facade scaffold. For this scaffold the effort and the natural frequency were determined in the following situations: the structure with perfect geometry, the structure with imperfections, scaffold with perfect geometry, taking into account the inequality subsidence, and scaffolds with imperfections including inequality subsidence. Computer calculations 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 mounting the scaffold.

Keywords: modular scaffolds, facade scaffolds, technical state, design, static-strength analysis