

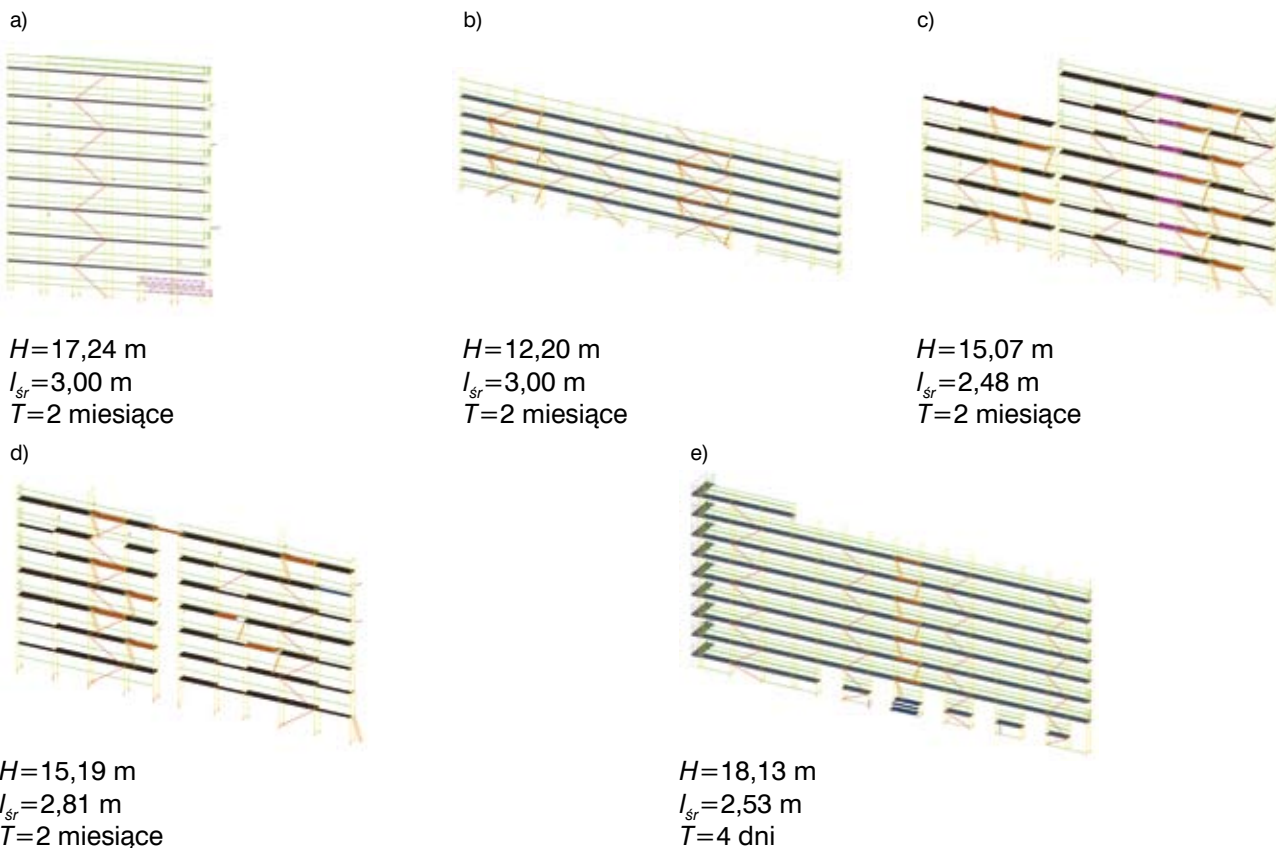
Wpływ niedokładności montażu rusztowań na bezpieczeństwo i wyężenie konstrukcji

Dr hab. inż. Ewa Błazik-Borowa, dr inż. Tomasz Lipecki, dr inż. Jarosław Bęc,
mgr inż. Aleksander Robak, mgr inż. Michał Pieńko,
mgr inż. Paulina Jamińska-Gadomska, Politechnika Lubelska

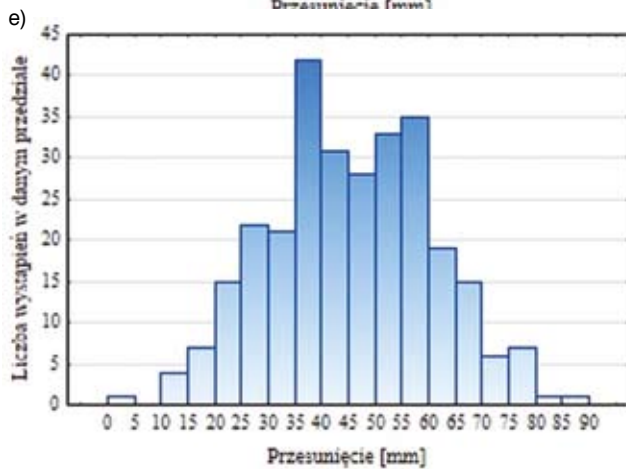
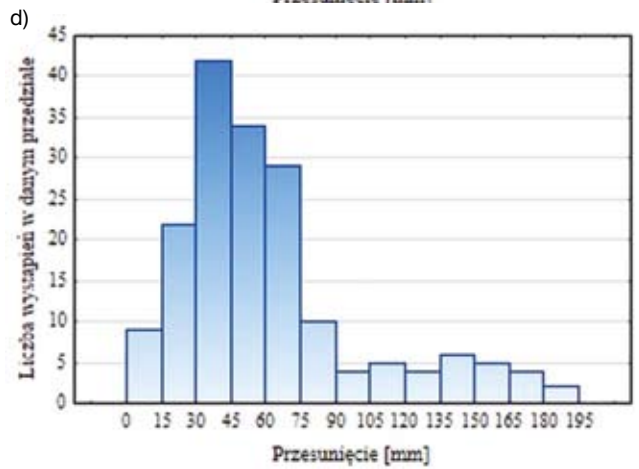
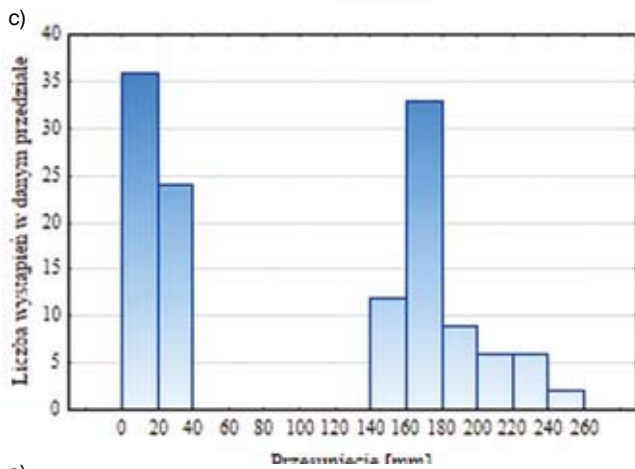
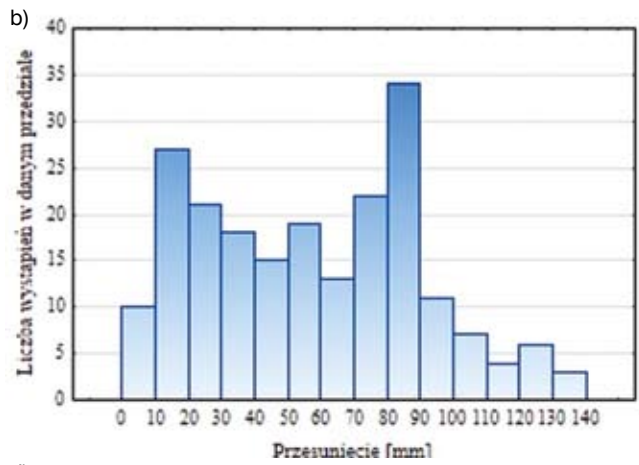
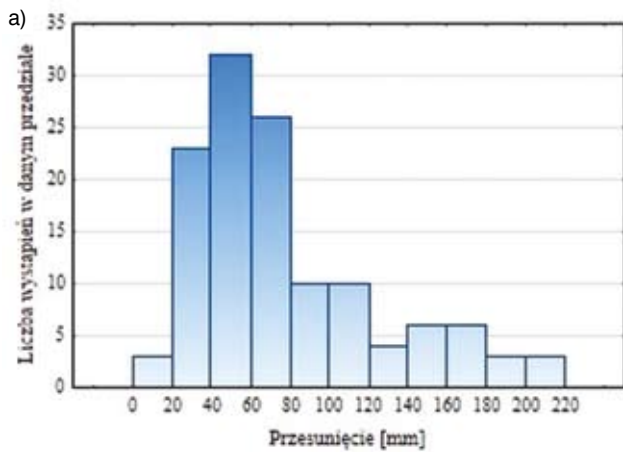
1. Wprowadzenie

Rusztowania budowlane są jednym z ważniejszych obiektów technicznych na większości budow. Ich stosowanie ma na celu zapewnienie dostępu pracownikom do stanowisk pracy na wysokości i w miejscach trudno dostępnych. Między innymi ze względu na specyfikę wykorzystania rusztowań są one bardzo często czynnikiem materialnym, który jest wymieniany w kartach statystycznych wypadków na budowach. Jednak do wypadków na rusztowaniach i sytuacji potencjalnie niebezpiecznych dochodzi też z powodu stanu samej

konstrukcji. Oczywiście sprawą jest, że zły stan techniczny poręczy czy pomostów zagraża bezpieczeństwu użytkowników, ale również bardzo duże znaczenie dla bezpieczeństwa ma przygotowanie podłoża pod rusztowanie i dokładność geometrii montażu rusztowania. Właśnie wpływ tych dwóch czynników na wybrane aspekty bezpieczeństwa pracy na rusztowaniu zostanie poddany analizie w niniejszym opracowaniu. Zapewnienie bezpieczeństwa będzie analizowane na podstawie nośności konstrukcji rusztowania, która określa nam możliwość prawidłowej pracy samej konstrukcji i możliwość jej awarii, oraz częstości drgań własnych



Rys. 1. Schematy rusztowań: a) P05, b) P06, c) P07, d) P08, e) W07; gdzie: H – wysokość rusztowania, l_{sr} – średni rozstaw ram, T – czas pomiędzy montażem a badaniami



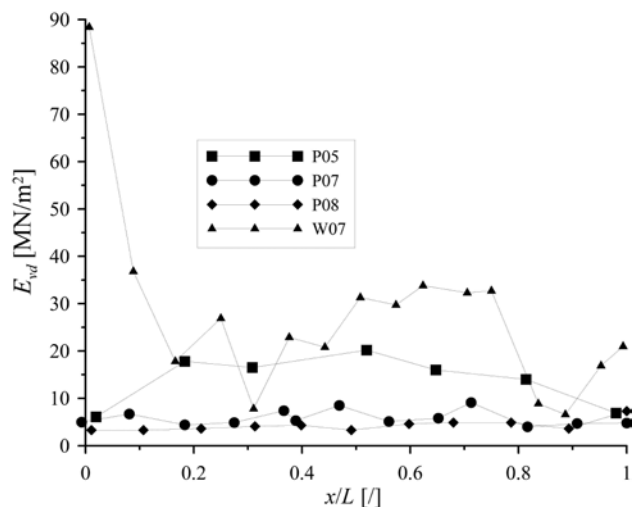
Rys. 2. Histogramy rozkładu imperfekcji rusztowań: a) P05, b) P06, c) P07, d) P08, e) W07

konstrukcji, które zawierają informacje o podatności konstrukcji na drgania wywołane przez użytkowników, a w szczególności drgania wywołane przede wszystkim przez osoby poruszające się na rusztowaniu.

2. Metodyka badawcza i wyniki badań

2.1. Badania rusztowań na budowie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań pięciu rusztowań, wykorzystywanych na budowach na terenie całej Polski w 2016 roku. Schematy analizowanych rusztowań z podstawowymi danymi pokazane są na rysunku 1. Dokładny zakres badań rusztowań i ich użytkowników opisano w takich pracach, jak [1], [2], [3], [4] i [5].



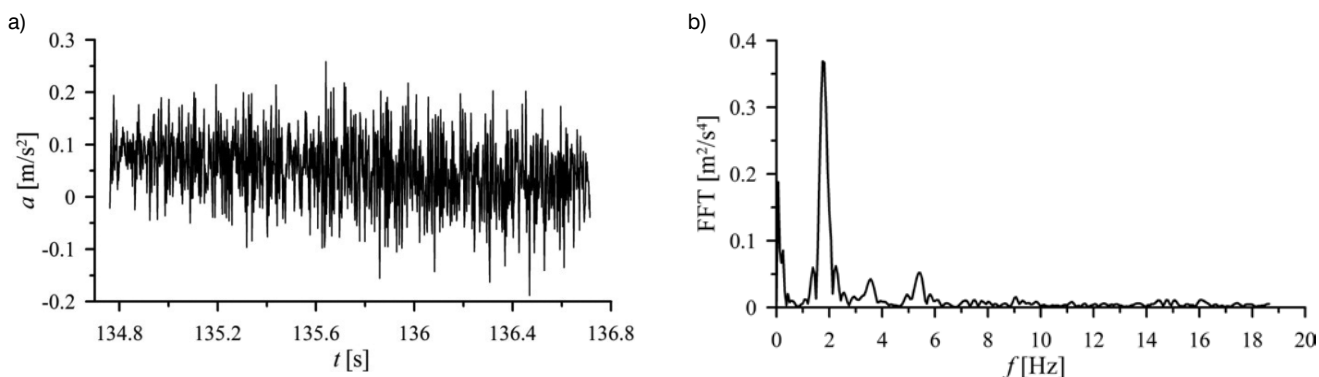
Rys. 3. Rozkład dynamicznego modułu sprężystości E_{vd} wzdłuż rusztowań; rusztowanie P06 było posadowione na podłożu utwardzonym

Spośród wszystkich wykonywanych badań w niniejszej pracy wykorzystano pomiary geodezyjne rusztowań, pomiary przyspieszeń wybranych punktów rusztowania i pomiary dynamicznego modułu sprężystości podłoża, wykonane za pomocą sondy dynamicznej.

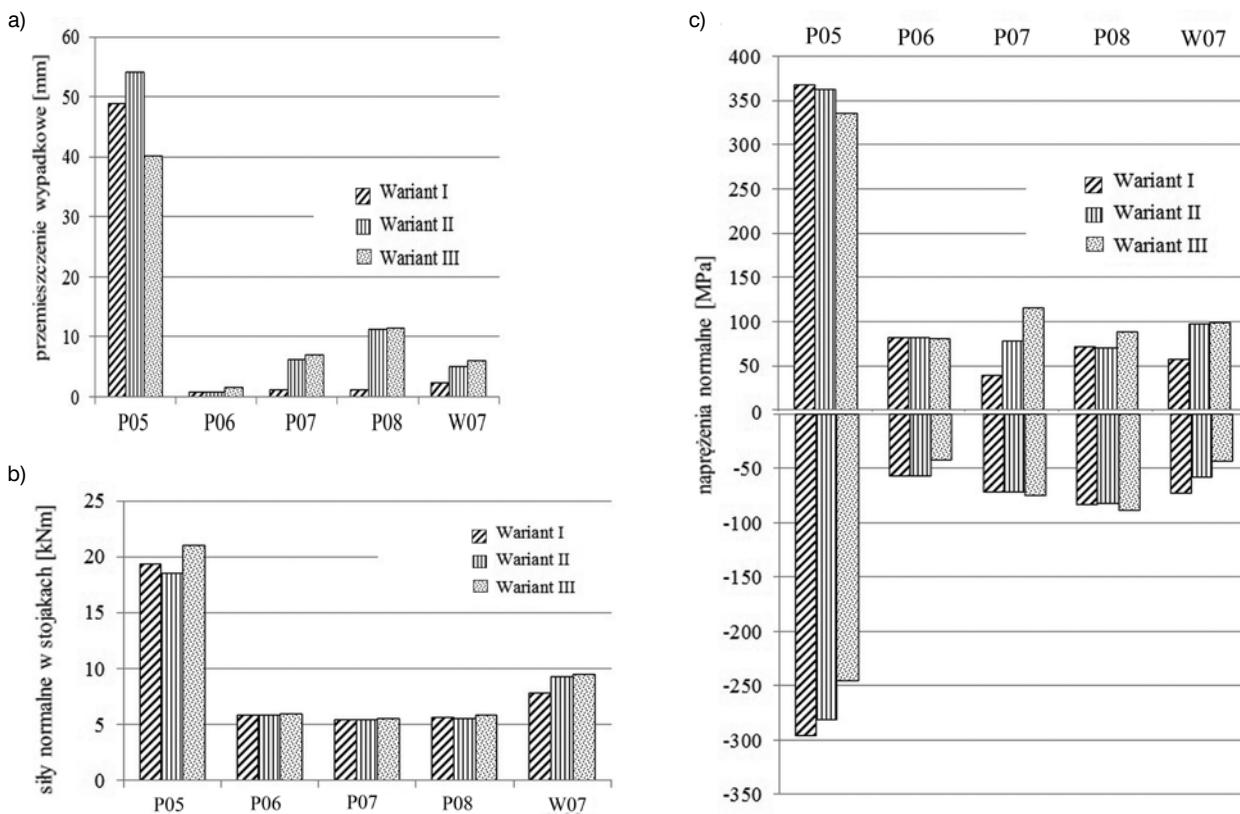
Pomiary geodezyjne zostały wykonane tachimetrami. Pomiary geometrii rusztowania polegały na wyznaczeniu punktów w osi słupków. Realizowano to poprzez pomiar dwóch punktów A i B na obwodzie słupka. Następnie na podstawie współrzędnych tych punktów z równania okręgu, przechodzącego przez dwa punkty, wyznaczano środek okręgu, który jest punktem

leżącym w osi słupka. Minimalna liczba punktów, które mierzone na rusztowaniu, to liczba słupków w całym rusztowaniu plus liczba słupków na jednym poziomie. Na rysunku 2 pokazano histogramy rozkładów odchyłek położenia połączeń ram od położenia w idealnej geometrii.

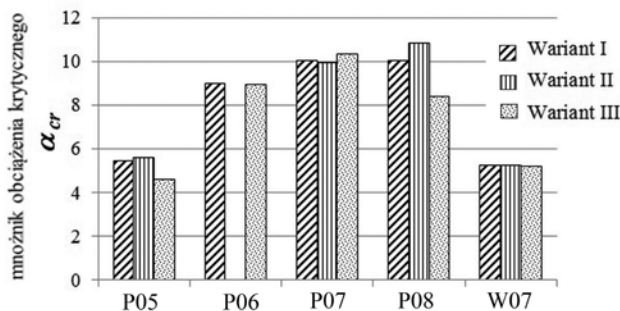
Pomiary dynamicznego modułu ściśliwości podłoża E_{vd} wykonano za pomocą płyty dynamicznej ZORN ZFG3000. Pomiary wykonywano przy każdej ramie, dzięki czemu uzyskano wykresy modułu wzdłuż rusztowania. Wykresy modułu E_{vd} w przypadkach, gdy rusztowanie stało na podłożu gruntowym, pokazano na rysunku 3.



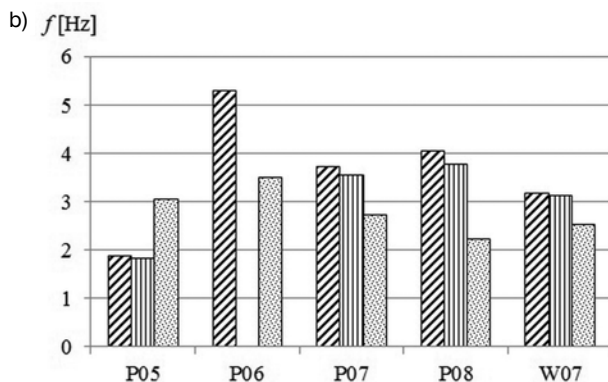
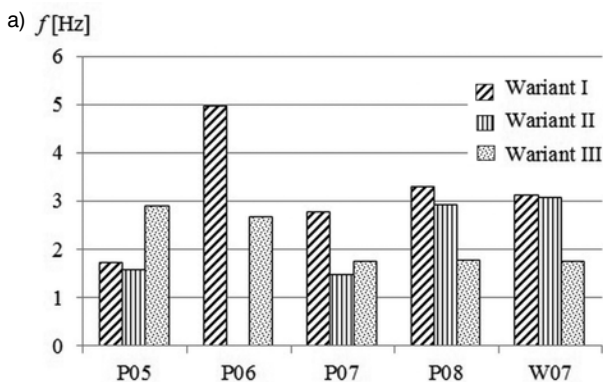
Rys. 4. Wyniki pomiarów przyspieszeń: a) zmiany przyspieszeń, b) FFT z przebiegu przyspieszeń



Rys. 5. Porównanie wybranych wyników liniowych obliczeń statycznych: a) przemieszczenia wypadkowe, b) siły normalne w najniższych stojakach, c) ekstremalne naprężenia normalne



Rys. 6. Porównanie mnożników obciążenia krytycznego α_{cr}



Rys. 7. Porównanie wartości częstotliwości drgań własnych f : a) pierwsza częstota drgań własnych, b) druga częstota drgań własnych

Pomiary przyspieszeń drgań wykonano za pomocą zestawu: analizator sygnału Brüel & Kjær Pulse 3053-B-12, dwa akcelerometry trójosiowe 4506B-003 i dwa akcelerometry jednoosiowe 4508. Na podstawie zmian przyspieszeń w czasie wykonywano analizę FFT, której efektem są wykresy z pikami dla częstotliwości drgań swobodnych rusztowania. Na rysunku 4 pokazano przykładowy przebieg czasowy przyspieszeń oraz FFT dla tego przebiegu.

Zaprezentowane wyniki badań posłużą między innymi do budowy modeli numerycznych rusztowań, omówionych w następnym podpunkcie.

2.2. Analizy numeryczne

W odniesieniu do każdego z rusztowań wykonano trzy rodzaje analiz: liniową analizę statyczną i stateczności dla rusztowania obciążonego ciężarem własnym i obciążeniem użytkowym zgodnie z klasą 3 według normy [6] oraz wyznaczenie częstotliwości drgań własnych. Każda z analiz była przeprowadzona dla następujących wariantów:

- wariant I – rusztowanie o idealnej geometrii, na podłożu o nieskończenie dużej sztywności oraz nienaruszonym kotwieniu w ścianie,
- wariant II – rusztowanie o idealnej geometrii, na podłożu o podatności przyjętej na podstawie badań

podłoża sondą dynamiczną oraz nienaruszonym kotwieniu w ścianie,

- wariant III – rusztowanie o geometrii rzeczywistej, zmierzonej na budowie, na podłożu o nieskończenie dużej sztywności oraz z pozostałymi podporami dobranymi na podstawie porównania wyników obliczeń częstotliwości drgań własnych i pomiarów tego parametru na rzeczywistym rusztowaniu.

W ostatnim wariantcie założono, że pod wpływem obciążeń nastąpiło zagęszczenie gruntu pod podkładami i w związku z tym podczas dalszej eksploatacji rusztowania brak jego dalszego osiadania. Samo osiadanie jest uwzględnione w obliczeniach statycznych w przemieszczeniach, siłach wewnętrznych i naprężeniach normalnych w elementach poprzez dodanie do wyni-

ków obliczeń z wariantu III różnicy wyników wariantów II i I, czyli efektu osiadania konstrukcji.

Wynikiem liniowych analiz statycznych są między innymi przemieszczenia (rys. 5a), siły normalne w stojakach (rys. 5b) i naprężenia normalne (rys. 5c). Wynikiem analizy stateczności są wartości mnożników krytycznych obciążenia (rys. 6), przy których nastąpi wyboczenie spowodowane obciążeniem charakterystycznych. Natomiast wynikiem analizy dynamicznej są formy i częstotliwości drgań własnych (rys. 7).

3. Analiza rusztowań w świetle ich funkcji

W trakcie projektowania rusztowania należy je ukształtować w taki sposób, aby spełniało przepisy, w tym rozporządzenie [7], warunki stanów granicznych i wymagania techniczne, podane w normach. Rozporządzenie [7] zawiera głównie informacje o samym kształtowaniu rusztowania. Te informacje przed wprowadzeniem rozporządzenia [7] zawierały normy PN-M [12], [13] i [14]. Wymienione normy podawały bardzo szczegółowo zasady montażu rusztowań, np. dotyczące dopuszczalnych niedokładności montażu, ale wiele zasad podanych w normach PN-M stała się nieaktualna po wprowadzeniu norm PN-EN [6], [8], [9], [10] i [11]. Zakres tych ostatnich norm pokazuje, że autorzy norm umożliwiają wykorzystanie

nowoczesnych narzędzi informatycznych i przekazały wiele kompetencji projektantom. To może tłumaczyć, dlaczego niektórych wymagań nie zamieszczono w nowym zestawie norm. Nie zmienia to faktu, że zalecenia z norm PN-M są przydatne. Należy jedynie pamiętać, że wiele zagadnień z norm PN-M jest podanych już w innej formie w zestawie norm PN-EN i rozporządzeniu [7] i mogą być nieaktualne, np. warianty obciążeń. Oprócz wymienionych norm podczas projektowania należy również stosować Eurokody. Zbierając informacje ze wszystkich wymienionych opracowań, można wymienić następujące wymagania, które mają spowodować, że rusztowanie będzie spełniało swoją funkcję:

- warunek 1 – nośność podłoża, która jest większa od 0,1 MPa i większa od nacisku podkładów na podłoże,
- warunek 2 – dopuszczalne maksymalne odchyłki rusztowania zgodne z instrukcją rusztowania lub na przykład dla rusztowań ramowych według normy PN-M [7] odchyłki powinny być mniejsze niż 15 mm dla rusztowań o wysokości do 10 m i 25 mm dla rusztowań powyżej wysokości 10 m,
- warunek 3 – spełnienie warunków stanu granicznej nośności, czyli występowanie sił wewnętrznych mniejszych niż dopuszczalne według odpowiedniego Eurokodu,
- warunek 4 – stateczność konstrukcji mierzona mnożnikiem (współczynnikiem) obciążenia krytycznego α_{cr} większa od 1 według PN-EN [9].

Z analizy pracy rusztowań wynika, że są jeszcze dwa aspekty ich bezpiecznego funkcjonowania, o których nie wspomina się we wcześniej wymienionych opracowaniach i są to:

- równomierność zagęszczenia podłoża,
- pierwsza częstotliwość drgań własnych większa niż 3 Hz.

Z punktu widzenia projektanta konstrukcja rusztowania powinna przede wszystkim spełniać warunki stanu granicznej nośności. Spośród badanych rusztowań tylko rusztowanie P05 nie spełniło wymagań stanów granicznych. Maksymalne naprężenia wystąpiły w dźwigarze stalowym i przekroczyły wartość dopuszczalną $f_y = 280$ MPa. W pozostałych rusztowaniach naprężenia mieszczą się w granicach od -100 MPa do 100 MPa.

Nośność podłoża żadnego z rusztowań, ustawionych na gruncie nie spełniła warunku 1. Nośność obliczeniowa podłoża wynosiła od ok. 50 kPa do ok. 80 kPa. Dodatkowo, jak widać na rysunku 3, rusztowania P05 i W07 są postawione na podłożu o różnym stopniu zagęszczenia. Co prawda w przypadku rusztowania P05 widać spadek naprężeń po uwzględnieniu osiadania, ale to jest tylko efekt „dostosowania się do sytuacji”. Osiadanie konstrukcji spowodowało przeniesienie obciążeń z najbardziej obciążonych pionów na sąsiednie pionowe ramy i na kotwienie, dzięki czemu nastąpiło zmniejszenie naprężeń w elementach dźwigara wcześniej najbardziej wyężonych, ale w innych pionach ram nastąpił znaczny wzrost naprężeń. W przypadku rusztowań

P07 i W07 z powodu osiadania naprężenia normalne wzrosły niemal dwukrotnie. Jak widać na rysunku 5a, osiadanie przede wszystkim powoduje znaczne przemieszczenia, które pojawiają się podczas eksploatacji. Wynikiem tego jest „zawieszenie” rusztowania na kotwieniu, które do tego nie jest przystosowane, i w konsekwencji często z tego powodu naruszone i nie spełniające swojej roli. Osiadanie podłoża wpływa również na częstości drgań, powodując ich nieznaczne zmniejszenie.

Jak widać na rysunku 2, żadne z rusztowań nie spełnia warunku 3. Odchylenia rusztowań od idealnej geometrii wynoszą nawet 26 cm (rys. 2c), a maksymalne odchylenie od pionu, uzyskane na rusztowaniu P05, to 18,5 cm. Po uwzględnieniu imperfekcji oraz faktu naruszenia pracy kotew okazuje się, że stan naprężeń i stateczność nie zmieniają się znacznie w przypadku analizowanych konstrukcji (przy większych rusztowaniach i w nieliniowej analizie statycznej ten wpływ będzie znacznie większy), ale doprowadzają do zmniejszenia częstości drgań własnych. To jest bardzo ważne ze względu na bezpieczeństwo pracy, ponieważ zbyt niska częstość powoduje szybkie zmęczenie pracowników i to tylko z powodu chodzenia po rusztowaniu. Obecnie nie ma badań dotyczących rusztowań, które dałyby odpowiedź na pytanie, jakie częstości drgań własnych są niewskazane dla rusztowań, ale z badań kładek dla pieszych wynika, że drgania wywoływane przez pieszych mieszczą się w zakresie od 1,4–2,4 Hz [15], a więc należy oczekiwać, że częstotliwości drgań własnych konstrukcji, spełniających rolę komunikacyjną, powinny wynosić co najmniej 3 Hz. Drugą konsekwencją zbyt niskich częstości drgań własnych, wywołanych przez użytkowników, są drgania konstrukcji, wzbudzone przez osoby poruszające się na rusztowaniu i w konsekwencji powodujące znaczący wzrost wyężenia konstrukcji. Jest to jednak temat na tyle obszerny, że w tej pracy nie podjęto się jego analizy. W badanych rusztowaniach w warunkach rzeczywistych wszystkie rusztowania miały częstotliwość drgań własnych mniejszą niż 3 Hz, a więc nie spełniały warunku 3.

Na zakończenie tego punktu warto też pokazać, jakie wartości przyjmuje mnożnik obciążenia krytycznego α_{cr} . We wszystkich rusztowaniach był większy od 5, czyli warunek 4 jest spełniony i oczywiście przyjmował różne wartości w zależności od wariantu obliczeń. Te zmiany nie były jednak tak znaczące jak w przypadku pozostałych parametrów, określających stan konstrukcji.

4. Podsumowanie

Podsumowując wyniki badań rusztowań na budowach, można stwierdzić, że analizowane rusztowania były w czterech przypadkach nieprawidłowo posadowione i wszystkie rusztowania podczas pomiaru miały geometrię odbiegającą znacznie od wymagań. Fakt nieprawidłowej geometrii nie oznacza nieprawidłowego

montażu. Może to być wynik zarówno błędów w montażu, jak i efekt osiadania podłoża, także i ostatecznie efekt drgań konstrukcji wywołanych przez użytkowników lub maszyny. Osiadanie podłoża ma negatywny wpływ na konstrukcję. Zwiększa znacznie wyężenie elementów i może z powodu przemieszczeń doprowadzić do zawieszania rusztowania na kotwach i nieznacznie zmniejszyć częstotliwości drgań własnych. Osiadanie podłoża oraz obciążenia dynamiczne doprowadzają do naruszenia kotwien w ścianie, a to w połączeniu z niedokładnością geometrii rusztowania doprowadza do znacznego zmniejszenia drgań własnych konstrukcji. Konsekwencją jest wzbudzenie drgań przez użytkowników i między innymi naruszenie geometrii samej konstrukcji i zwiększenie jej wyężenia, co jest zagadnieniem na oddzielną pracę i dlatego tutaj nie jest prezentowane. Rusztowanie powinno zapewnić komfort użytkownika i poczucie bezpieczeństwa. To może być zagwarantowane tylko poprzez konstrukcję o odpowiedniej sztywności posadowionej na odpowiednim podłożu. Dlatego podczas projektowania rusztowań analizy statyczno-wytrzymałościowe powinny być uzupełniane o analizy dynamiczne, w których powinna być sprawdzona częstota drgań własnych, a jej wielkość powinna zostać wpisana do przepisów BHP. Natomiast na budowach należy zwrócić większą uwagę na stan podłoża przed montażem rusztowania oraz stan kotwienia podczas użytkowania rusztowania.

Referat był prezentowany na I Konferencji Rusztowania

INFORMACJE DODATKOWE:

Artykuł jest wynikiem realizacji projektu badawczego „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań” finansowanego przez NCBiR w ramach PBS3 na podstawie umowy nr PBS3/A2/19/2015.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sumorek A., System do pomiarów obciążenia wiatrem rusztowań elewacyjnych. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 6 (4), 2016, str. 37–42
- [2] Hoła B., Sawicki M., Szóstak M., Błazik-Borowa E., Czarnocki K., Szer J., Badania rusztowań na placu budowy, Builder, grudzień 2016, str. 80–83
- [3] Błazik-Borowa E., Szer J., Podstawowe elementy modelu oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych na rusztowaniach, Przegląd budowlany, (10), 2016, str. 24–29
- [4] 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, str. 18-20
- [5] Jamińska-Gadomska P., Bęc J., Lipecki T., Robak A., Verification of the Façade Scaffolding Computer Model. Archives of Civil Engineering, 2017, in press
- [6] PN-EN 12811-1:2007. Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania
- [7] 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
- [8] PN-EN 12810-1. Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – część 1: Specyfikacje techniczne wyrobów
- [9] PN-EN 12810-2. Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – Część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji
- [10] PN-EN 12811-2. Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 2: Informacje o materiałach
- [11] PN-EN 12811-3. Tymczasowe urządzenia budowlane – Część 3: Obciążenia badawcze
- [12] PN-M-47900-1:1996. Rusztowania stojące metalowe robocze – Określenia, podział i główne parametry
- [13] PN-M-47900-2:1996. Rusztowania stojące metalowe robocze. Rusztowania stojakowe z rur
- [14] PN-M-47900-3:1996. Rusztowania stojące metalowe robocze – Rusztowania ramowe
- [15] Bachmann H., „Lively” Footbridges – a real challenge, Proc. of the 1st International Conference on Design and Dynamic Behavior of Footbridges – Footbridge 2002, OTUA, Paryż, 2002, str. 18–30

20 lat
PIGR

Polska Izba Gospodarcza Rusztowań informuje,
że w dniach 9-10 września br. w Płochocinie,
w siedzibie Partnera Merytorycznego Forum – firmy PERI,
odbędzie się FORUM RUSZTOWANIOWE.

PERI

Forum jest cyklicznym wydarzeniem, podczas którego przedstawiciele branży rusztowaniowej mogą się spotkać, wymienić doświadczeniami oraz wysłuchać referatów wygłoszonych podczas bloku seminaryjnego. Tradycyjnie Forum towarzyszy uroczysty finał Konkursu „Rusztowanie Roku” – będzie to już VI edycja, w której o nagrody w kategoriach rusztowanie, technologia i bezpieczeństwo oraz monter współzawodniczą Członkowie PIGR. Jest mi niezmiernie miło poinformować, że tegoroczne Forum Rusztowaniowe będzie jednocześnie okazją dla naszej Izby do świętowania 20-lecia działalności. Dla uczestników wydarzenia przewidziano ciekawe pokazy oraz atrakcyjną oprawę wieczoru. Forum Rusztowaniowe jest również okazją, aby podziękować Partnerom Izby za owocną współpracę.

W imieniu Organizatorów, z wyrazami szacunku
Dagmara Tyc, Dyrektor Polskiej Izby Gospodarczej Rusztowań

Firmy zainteresowane uczestnictwem zapraszamy do kontaktu: biuro@rusztowania-izba.org.pl