

Stan awaryjny trybuny stadionu w Zielonej Górze wywołany synchronicznym tańcem kibiców

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde, dr hab. inż. Magdalena Rucka,
mgr inż. Karol Grębowski, Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Nowa trybuna K stadionu żużlowego w Zielonej Górze została wybudowana w latach 2009–2010. W lipcu 2010 roku nastąpiło oddanie jej do użytkowania. Trybuna ma konstrukcję żelbetową. Belki siedziskowe opierają się na belkach żelbetowych (rys. 1), które są głównymi elementami nośnymi. Pochyła belka wolnopodparta, znajdująca się w dolnej części trybuny jest połączona przegubowo z górną belką wolnopodpartą ze wspornikiem. Główne belki nośne wsparte są na fundamentach za pośrednictwem podkładek elastomerowych. Do zakończeń wsporników belek głównych przymocowane są stalowe słupy zadaszenia. Dach, którego całkowita rozpiętość wynosi 12 metrów, wykonany jest z dźwigarów drewnianych. Stalowa blacha trapezowa przymocowana jest do płatwi drewnianych.

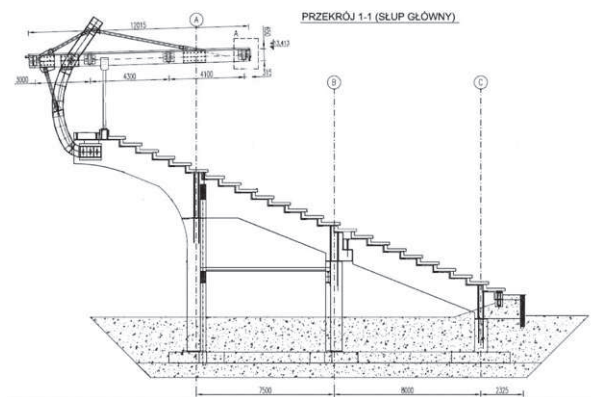
Trybuna użytkowana jest w specyficzny sposób ze względu na fakt, iż mecze żużlowe należą do sportów wzbudzających ogromne emocje wśród kibiców. Jedną z form wyrażania emocji przez kibiców na stadionie w Zielonej Górze jest taniec zwany „Labado”. W tańcu tym kibice kładą ręce na barki sąsiada i wykonują równoczesne podskoki w rytm śpiewanej piosenki zawierającej słowa „...tańczymy labado, labado ...”. Rytm, do którego śpiewana jest piosenka i wykonywany taniec, wybijany jest

na bębnach przez animatorów wspierających kibicowanie. Kibice rozpoczynają taniec powolnym podskokami, a po około 30 sekundach ich rytm podskoków stabilizuje się i wywołuje pionową siłę periodyczną o częstotliwości bliskiej 2,2 Hz. W 2010 roku zauważono, że taniec kibiców wywołuje wzmożone drgania konstrukcji, co wywołało dyskusję o bezpieczeństwie użytkowania nowej trybuny. Badania ukierunkowane na ocenę szkodliwości drgań zostały wykonane w latach 2010–2011 przez zespół z Uniwersytetu Zielonogórskiego [1], [2], a następnie w latach 2011–2012 przez zespół z Politechniki Gdańskiej [3], [4], [5].

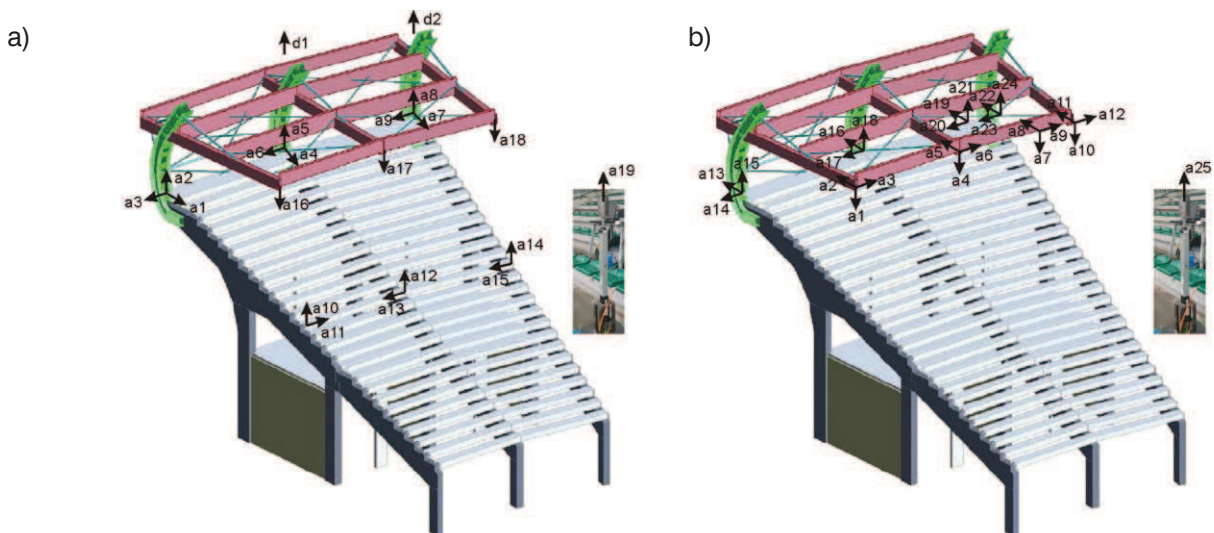
Celem niniejszej pracy jest przedstawienie przyczyn nadmiernej wrażliwości dynamicznej konstrukcji trybuny na wymuszenia tańcem kibiców oraz opisanie procesu wzmacniania konstrukcji obiektu i jego wpływu na charakterystyki dynamiczne konstrukcji.

2. Badania konstrukcji w latach 2010–2011

Przedmiotem ekspertyzy [1] była ocena stanu technicznego trybuny, wykonanie badań dynamicznych oraz ocena szkodliwości drgań. W trakcie przeglądu konstrukcji zauważono spękania głównych belek konstrukcji trybuny, o rozwarości od 0,1 do 0,3 mm i długości do 50 cm, biegnących pionowo i ukośnie od górnej części belek żel-



Rys. 1. Badana trybuna stadionu żużlowego oraz przekrój przez trybunę



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych: a) stan po wzmocnieniu I; b) stan po wzmocnieniu II

betowych. W wyniku pomiarów zidentyfikowano pierwszą częstotliwość drgań własnych jako 2,45 Hz. Maksymalną amplitudę drgań końca drewnianego dachu zarejestrowano podczas zawodów i wynosiła ona od +35 do -28 mm [1]. Ekspertyza kończy się wskazaniem konieczności wzmocnienia węzła podporowego stalowej konstrukcji wsporczej dachu z uwagi na nadmierne drgania.

W kolejnym etapie prac [2] dokonano weryfikacji poprawności konstrukcyjnej wykonanego wzmocnienia trzech ram nośnych zadaszenia. Wzmocnienie to będzie w dalszej części pracy określane jako wzmocnienie I. Wzmocnienie I wykonano w formie podparcia drewnianych dźwiarów dachowych za pomocą słupów stalowych (rys. 1) z założeniem przestrojenia konstrukcji w taki sposób, by częstotliwość drgań własnych przesunąć z 2,45 Hz do ok. 4 Hz [2]. W wyniku badań dynamicznych pomierzono, iż pierwsza częstotliwość drgań własnych wynosi 4,9 Hz. Zauważono także prążek o częstotliwości 3,2 Hz co zostało określone jako: „...fakt ten budzi niepokój, gdyż jest to wartość zbyt bliska granicznej wartości dopuszczalnej normowo dla tej konstrukcji (3,0 Hz)” [2].

3. Badania konstrukcji w latach 2011–2012

Pomimo wykonania zaleconego w [1] i [2] wzmocnienia, wątpliwości dotyczące wrażliwości dynamicznej obiektu zostały sformułowane przez projektanta obiektu. Zespół z Politechniki Gdańskiej przeprowadził kompleksowe badania dynamiki trybuny na bazie wymuszeń środowiskowych z użyciem wzbudnika elektrodynamicznego oraz wzbudzeniem synchronicznym tańcem kibiców. Pomiaru wykonano w dwóch etapach: w stanie po wzmocnieniu I (trzy słupkami stalowymi) oraz w stanie po wzmocnieniu II (ciągnami zamocowanymi w obrębie połaci dachowych).

Przedmiotem badań po wzmocnieniu I była wybrana sekcja trybuny stadionu żużlowego o numerze K4 (rys. 2). Wyboru trybuny dokonano z uwzględnieniem informa-

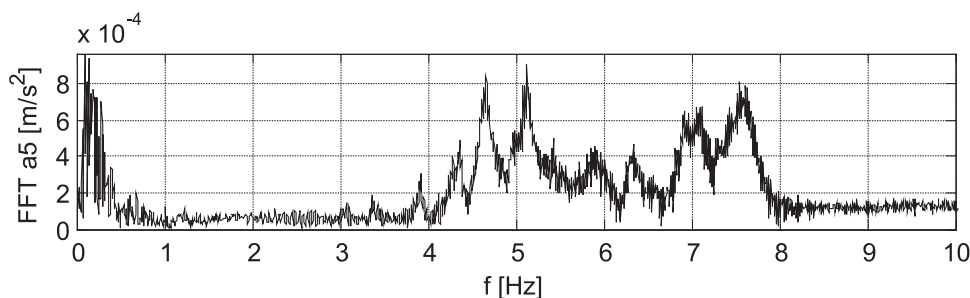
cji dotyczących badań dynamicznych przeprowadzonych przez zespół z Uniwersytetu Zielonogórskiego. Pomiaru drgań przeprowadzono w 9 punktach konstrukcji, w trzech z nich badano przyspieszenia w kierunku pionowym, w kolejnych trzech badano przyspieszenia w dwóch kierunkach, zaś w trzech ostatnich punktach mierzono przyspieszenia trzykierunkowo, co dało łącznie 18 pomiarów przyspieszeń konstrukcji rozmieszczonych jak na rysunku 2a. Kierunek 19 to przyspieszenie mierzone na ruchomej masie wzbudnika (tylko podczas testów harmonicznym). Do pomiarów użyto akcelerometry trójosiowe PCB T356B18 oraz przenośny system do pomiaru oraz analizy drgań LMS SCADAS. Dodatkowo wykonywano pomiary przemieszczeń za pomocą czujników indukcyjnych w punktach a5 i a8 (na końcu dwóch belek betonowych) oznaczonych odpowiednio symbolami d1 i d2. Wpływ rzeczywistych sił dynamicznych generowanych przy tańcu „Labado” zrealizowano dzięki kibicom, którzy na prośbę władz klubu przyszli wziąć udział w pomiarach. W badaniach kibice zaprezentowali dwie formy aktywnego kibicowania: tzw. „Szkocję” i taniec „Labado”. „Robiąc” Szkocję kibice wykonują pojedyncze podskoki na uderzenie bębna zaczynając bardzo wolno, a kończąc niesynchronicznymi podskokami. W tańcu „Labado” wyraźna jest druga faza, w której występują synchroniczne skoki o stałej częstotliwości prawie wszystkich kibiców. W badaniach udział wzięło około 400-450 osób. Najniekorzystniejsze ustawienie, w którym tańczący kibice znajdują się na dole trybuny oraz na górnej części trybuny (4 rzędy nad częścią wspornikową) pokazane jest na rysunku 3. Przy takim ustawieniu, maksymalne pomierzone przemieszczenia dynamiczne końca wspornika betonowego wyniosły 5 mm, a maksymalne amplitudy drgań swobodnej krawędzi zadaszenia osiągnęły wartość 12 mm. Drganiom trybuny towarzyszyły efekty akustyczne spowodowane zderzeniami prętów stężeń połaciowych oraz kolizjami innych peryferyjnych elementów wyposażenia stadionu. W przypadku, gdy kibice tań-



Rys. 3. Testy dynamiczne z udziałem kibiców (najniekorzystniejsze ustawienie, kibice tańczą „Labado” na dolnej i najwyższej, wspornikowej części trybuny)

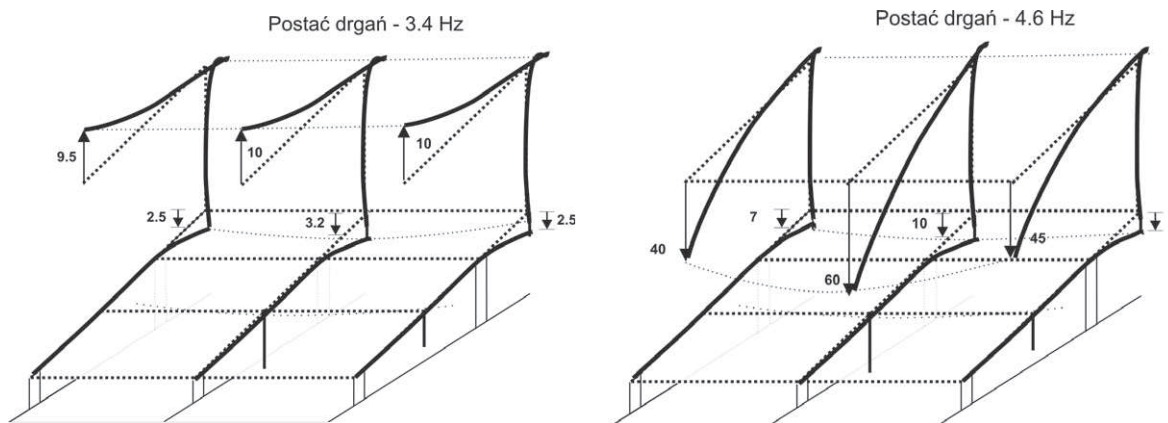
czyli „Labado” w dolnej i środkowej strefie trybuny (rzędy od 1 do 21) to pomierzone maksymalne przemieszczenia wniosły: 0,51 mm dla wspornika betonowego i 1,3 mm dla swobodnej krawędzi zadaszania. Dominujące częstotliwości z jakimi drgał wspornik betonowy to 2,2 Hz oraz 4,4 Hz dla zadaszania.

Obciążenie harmoniczne wzbudzano za pomocą wzbudnika sił harmonicznymi dostosowanego do pracy na żelbetonowej konstrukcji trybun. Wzbudnik znajdował się nad osią belki żelbetonowej oraz w 1/2 rozpiętości między belkami. Dla pomiarów wzbudnikiem wymuszenie harmoniczne przykładane było w formie sinusoidy o płynnie regulowanej częstotliwości od 1 Hz do 8 Hz, co umożliwiło wzbudzenie całego zakresu częstotliwości z zakresu potencjalnie wzbudzanych przez kibiców.



Rys. 4.

Sygnał pomiarowy w dziedzinie częstotliwości drgań pionowych końca wspornika betonowego (w kierunku a5, stan po wzmocnieniu I)

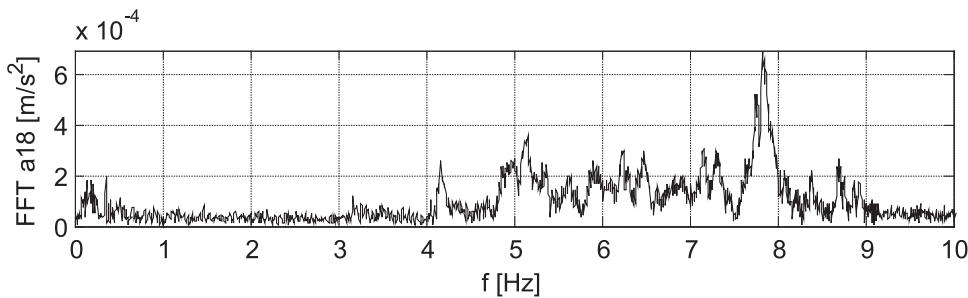


Rys. 5. Eksperymentalnie wyznaczone postaci drgań dla 3,4 Hz oraz 4,6 Hz (stan po wzmocnieniu I)

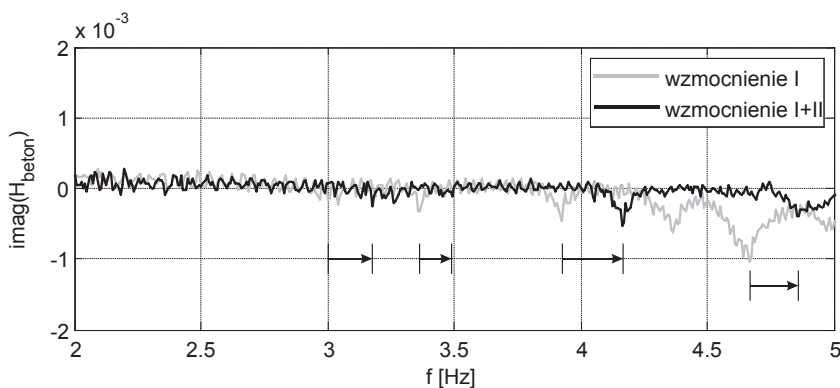
Wyniki analizy w dziedzinie częstotliwości przykładowego sygnału w punkcie znajdującym się na końcu wspornika betonowego po wzmocnieniu I widoczne są na rysunku 4. Uśredniając wyniki pomiarowe, w badanym przedziale 2 Hz do 5 Hz, uzyskano strefy rezonansowe w pobliżu częstotliwości: 3,0 Hz, 3,4 Hz, 3,9 Hz, 4,4 Hz oraz 4,6 Hz. Przykładowe postaci drgań odpowiadające częstotliwościom 3,4 Hz oraz 4,6 Hz pokazano na rysunku 5. Kierunki i wartości przemieszczeń dla poszczególnych stopni swobody pokazane są za pomocą wektorów i wartości liczbowych. Stwierdzono, że postać drgań własnych, odpowiadająca częstotliwości 4,6 Hz, posiada dominujący wpływ na całkowite amplitudy drgania dachu. Uzyskane wyniki stref rezonansowych w okolicach 3,0 Hz i 3,4 Hz są bliskie częstotliwości 3,2 Hz pomierzonej w ekspertyzie [2]. Przykładowy sygnał pomierzony na końcu wspornika betonowego konstrukcji po wzmocnieniu II pokazuje rysunek 6. Analiza transformat Fouriera sygnałów pomiarowych wskazuje na obecność następujących stref częstotliwości rezonansowych konstrukcji: 3,15 Hz, 3,45 Hz, 4,15 Hz, 4,8 Hz. Rysunek 7 przedstawia porównanie eksperymentalnych funkcji transmitancji widmowych dla konstrukcji po wykonaniu wzmocnień I i II. Poszczególne strefy rezonansowe zostały przesunięte w kierunku wyższych częstotliwości.

4. Analiza numeryczna przestrzennego wzmocnienia konstrukcji trybuny

Wzmocnienie I, wykonane w formie dodatkowych słupów stalowych łączących wspornik betonowy z drewnia-



Rys. 6.
 Sygnał pomiarowy w dziedzinie częstotliwości drgań pionowych końca wspornika betonowego (w kierunku a18, stan po wzmocnieniu I + II)

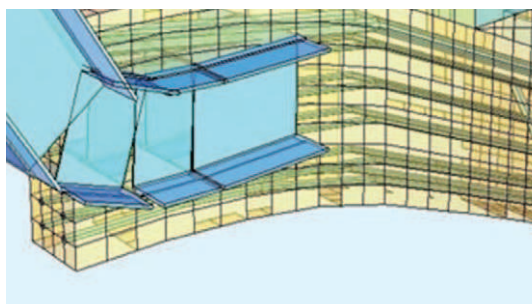
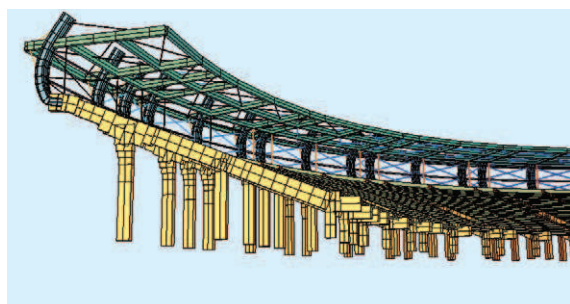


Rys. 7.
 Eksperymentalne funkcje przejścia dla końca wspornika betonowego w pomiarach po wzmocnieniu I oraz po wzmocnieniu I + II

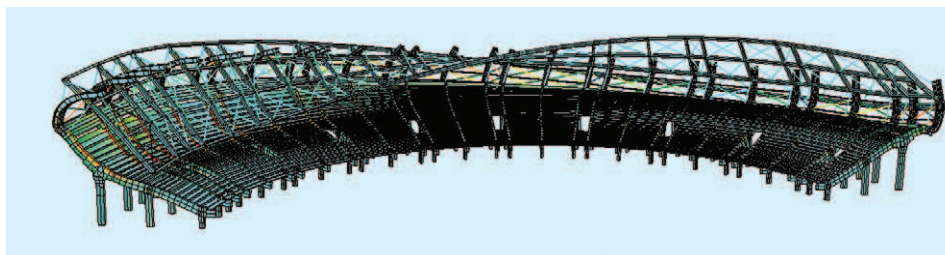
nym dźwigarem zadaszenia, znacząco wzmocniło konstrukcję zmniejszając amplitudy drgań obiektu. Jednak, ze względów funkcjonalnych dodatkowe słupy zostały zamocowane relatywnie blisko głównych słupów oraz z powodów konstrukcyjnych dolne połączenie dodatkowych słupów zostało wykonane w taki sposób, aby nie była przenoszona siła rozciągająca. Celem przedstawionej analizy numerycznej jest sprawdzenie efektywności wzmocnienia konstrukcji poprzez wprowadzenie dodatkowych stężeń połączeniowych i stężeń pionowych. Rozwiązanie to wybrano spośród 9 rozważanych wariantów dodatkowego wzmocnienia obiektu. Model MES trybuny z dodatkowymi stężeniami połączeniowymi i stężeniami pionowymi pokazany jest na rysunku 8. Belkowy Model MES wykonany został na bazie dokumentacji projektowej obiektu. Podstawowe parametry modelu zostały wyznaczone na bazie szczegółowych modeli z zastosowaniem elementów bryłowych, w których uwzględniono położenie prętów zbrojeniowych (rys. 8) i szczegóły podparcia belek takie jak podkładki elastomerowe i kotwy. W modelach uwzględniono zarysowanie elementów betonowych poprzez obniżenie wartości modułu sprężystości betonu. Parametry modeli MES aktualizowano na bazie danych pomiarowych uzyskanych z pomiarów in situ.

Przykładowa pierwsza postać drgań własnych wyznaczona numerycznie pokazana jest na rysunku 9. Analiza dynamiczna pokazała, że w przedziale od 2,9 Hz do 5 Hz znajduje się co najmniej 15 częstości drgań własnych. Taka duża liczba częstości drgań własnych jest naturalna dla przestrzennej konstrukcji wykonanej z powtarzających się elementów. Założeniem wzmocnienia II jest wymuszenie przestrzennej pracy konstrukcji i oddalenie od siebie częstości drgań własnych znajdujących się w strefie 4,3 Hz – 4,7 Hz, tak aby wyeliminować zjawisko dudnienia, charakterystyczne dla wzbudzenia dwóch bardzo bliskich sobie częstości drgań własnych.

Na rysunku 10 pokazano wizualizacje drgań wykonane przy obciążeniu trybuny synchronicznie tańczącym tłumem ludzi znajdującym się w rzędach 22–25 całego obiektu. Zastosowane obciążenie dynamiczne jest funkcją periodyczną składającą się z fazy kontaktu (impuls sinusoidalny) i fazy lotu (brak obciążenia). Funkcja obciążenia skaczącym tłumem nie jest ujęta w przepisach normowych. Całkowanie równań ruchu przeprowadzono metodą Newmarka-Wilsons. Rysunek 10a pokazuje, na rzucie z góry, relacje amplitud drgań stopni swobody obiektu w przypadku, gdy stężenia połączeniowe



Rys. 8.
 Modele trybuny w formalizmie metody elementów skończonych



Rys. 9.
Pierwsza, numeryczna postać drgań własnych trybuny ze wzmocnieniem I i II

we i pionowe zamocowane są zgodnie z projektem czyli co dwa pola. Rysunku 10b przedstawia charakter drgań dla stężeń zainstalowanych w każdym polu zadaszenia. Zainstalowanie stężeń powoduje usztywnienie konstrukcji dachu i zmianę przestrzennego charakteru jego drgań. Obliczona amplituda drgań od synchronicznego tańca kibiców na całym obiekcie w rzędach 22–25 wyniosła 3,6 mm na końcu wspornika betonowego i 5 mm na swobodnym końcu zadaszenia. Metoda wzmocnienia II powoduje nieznaczną redukcję drgań wsporników betonowych oraz znaczące zmniejszenie amplitud drgań swobodnego końca zadaszenia. Warunkiem poprawnej pracy stężeń jest obecność wstępnej siły sprężającej, która gwarantuje poprawną pracę stężeń w trakcie drgań. Redukcja amplitud drgań wsporników betonowych jest problematyczna, ponieważ to one przejmują główną część sił dynamicznych generowanych przez kibiców tańczących praktycznie bezpośrednio na nich.

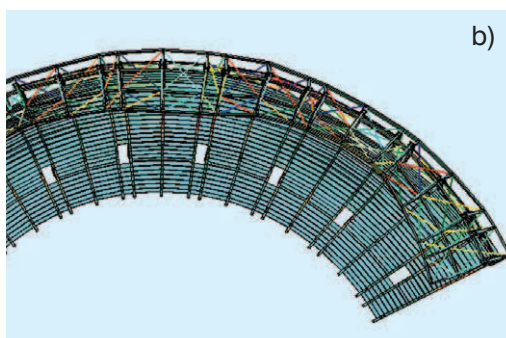
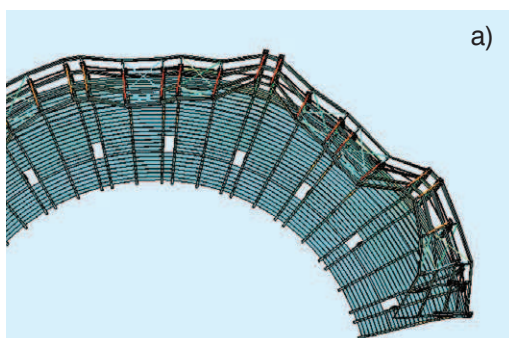
5. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i numerycznych trybuny stadionu żużlowego w Zielonej Górze. Powodem podjęcia badań były nadmierne drgania trybuny, w szczególności pionowe oscylacje swobodnego końca zadaszenia. Konstrukcja została wzmocniona w dwóch etapach. Wzmocnienie I zrealizowano przez dodanie stalowych słupów łączących wsporniki betonowe z drewnianymi dźwigarami zadaszenia, a wzmocnienie II stanowiły stężenia pionowe słupów stalowych oraz stężenia połaciowe na wszystkich polach konstrukcji zadaszenia. Zastosowane wzmocnienia znacząco ograniczyły amplitudy drgań konstrukcji trybuny, umożliwiając jej bezpieczne użytkowanie. Zastosowanie formy architektonicznej konstrukcji, skutkującej schematem statycznym, w którym na końcu

wspornika betonowego trybuny zamocowany jest wspornikowy słupek stalowy konstrukcji dachu, a na nim zamocowane są pracujące jak wsporniki dźwigary zadaszenia (rys. 1) musi skutkować wrażliwością na obciążenia dynamiczne przyłożone do części wspornikowej belek betonowych. Obiekty sportowe muszą zapewniać swobodę zachowania się kibiców zebranych na trybunach, a wszystkie ich możliwe tańce i sposoby dopingowania swojej ulubionej drużynie muszą być uwzględnione w procesie projektowania i realizacji. W przypadku trybuny stadionu żużlowego w Zielonej Górze najsukurszczniejszym rozwiązaniem eliminującym problem drgań byłoby podparcie końców wsporników żelbetonowych w formie słupów zamocowanych w podłożu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Marcinowski J., Dyszak W., Błażejowski P., Gil J., Wiśniewski T., Drzewiecki M., Ekspertyza techniczna: ocena szkodliwości drgań zadaszenia stadionu żużlowego przy ulicy Wrocławskiej w Zielonej Górze. Uniwersytet Zielonogórski 2010
- [2] Marcinowski J., Dyszak W., Błażejowski P., Gil J., Wiśniewski T., Drzewiecki M., Ekspertyza techniczna: próba wzbudzenia drgań swobodnych konstrukcji zadaszenia trybuny podpartej słupami nie przenoszącymi rozciągania. Uniwersytet Zielonogórski 2011
- [3] Wilde K., Rucka M., Rutkowski T., Orzeczenie techniczne dotyczące eksperymentalnego określenia częstotliwości drgań własnych konstrukcji żelbetonowej stadionu żużlowego w Zielonej Górze, Politechnika Gdańska 2011
- [4] Wilde K., Rucka M., Rutkowski T., Żelazkiewicz J., Ekspertyza techniczna dotycząca eksperymentalnego określenia formy drgań własnych konstrukcji trybuny stadionu żużlowego w Zielonej Górze z uwzględnieniem oddziaływań grupy kibiców, Politechnika Gdańska 2011
- [5] Wilde K., Rucka M., Rutkowski T., Grębowski R., Ekspertyza techniczna dotycząca eksperymentalnego określenia częstości i postaci drgań własnych wzmocnionej konstrukcji trybuny stadionu żużlowego w Zielonej Górze, Politechnika Gdańska 2012
- [6] Wilde K., Rucka M., Eksperymentalna analiza modalna stadionu w Zielonej Górze. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 276, z. 58, 421–428, 2011 (57 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB)



Rys. 10.
Rzut z góry dachu trybuny obciążonej synchronicznym skokami ludzi z pokazaniem amplitud drgań: a) konstrukcja z wzmocnieniem I; b) konstrukcja z wzmocnieniami I + II