

RAFAŁ SIENKO, RAFAŁ SZYDŁOWSKI*

BADANIA ZMIAN SIŁ W CIĘGNACH PRZEKRYCIA DACHOWEGO POD WPŁYWEM ODDZIAŁYWANIA W POSTACI FALI AKUSTYCZNEJ

RESEARCH OF FORCES CHANGES IN TENDONS OF ROOF UNDER THE SOUND-WAVE INFLUENCE

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu fali akustycznej generowanej w hali widowiskowo-sportowej na zmiany sił w cięgnach sprężających przekrycia dachowego. Pomiary wykonano w istniejącym obiekcie wzniesionym w latach 60. XX wieku, symulując rzeczywiste oddziaływanie akustyczne zestawem głośnikowym przy różnych poziomach natężenia dźwięku oraz długości fali.

Słowa kluczowe: pomiar sił w kablach sprężających, fala akustyczna

Abstract

The article presents the results of tests, aimed for determining the influence of the acoustic wave, generated in the performance and sport hall, on the changes of forces in the tendons elements of the roof. The measurements have been realized in the existing object, build in the sixties of the 20th century, by simulating the actual acoustic influence with use of loudspeaker system at various sound intensity levels and wave lengths.

Keywords: measurement of forces in the tendons, acoustic wave

* Dr inż. Rafał Sienko, dr inż. Rafał Szydłowski, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

1. Wstęp

Hala Główna „Spodek” w Katowicach (rys. 1) jest jedną z największych hal widowiskowo-sportowych w Polsce.

Na widowni może jednocześnie zasiadać ok. 11,5 tys. osób. Obiekt został zaprojektowany przez zespół projektowy z Biura Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego z Warszawy: architekci: Maciej Gintowt, Maciej Krasiński oraz konstruktorzy: Andrzej Żurawski, Aleksander Włodarz i Waław Zalewski [1].



Rys. 1. Widok Hali Głównej „Spodek” od strony przekrycia dachowego

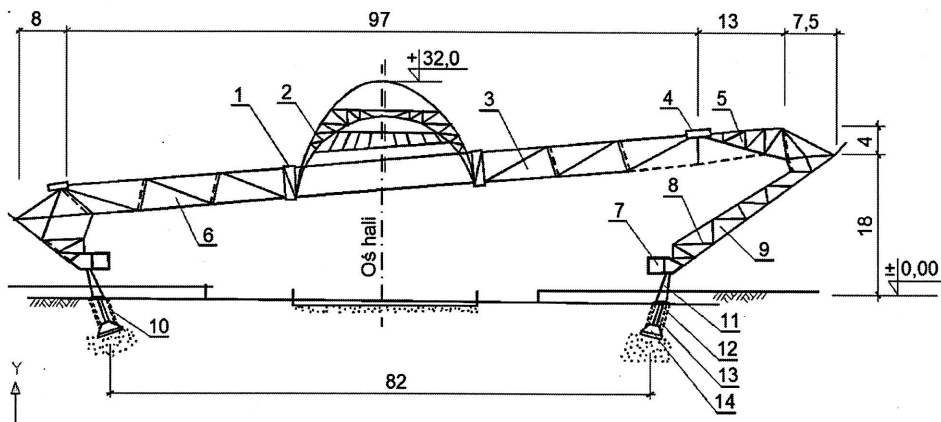
Fig. 1. The view of the main hall from the roof

Budowa prowadzona była w latach 60. ubiegłego wieku, a obiekt zaczęto użytkować w 1971 roku. W 2011 r. przeprowadzono remont, w ramach którego wymieniono elewację z płyt azbestowo-cementowych oraz dokonano modernizacji nagłośnienia hali. Wprowadzenie nowych, wysokowydajnych urządzeń emitujących dźwięk, szczególnie o niskiej częstotliwości, stwarzało ryzyko, że odpowiedź konstrukcji przekrycia dachowego może objawiać się istotnymi wartościami przemieszczeń. Zaplanowano zatem badania, w ramach których prowadzono pomiary parametrów fizycznych związanych z pracą konstrukcji w warunkach oddziaływania fali akustycznej.

2. Opis konstrukcji obiektu

Konstrukcja przekrycia dachowego „Spodka” została zaprojektowana jako linowo-prętowa i jako taka była jednym z pierwszych na świecie tego rodzaju obiektów budowlanych [1, 2]. Bardzo ciekawą konstrukcją jest również fundament obiektu, którego zadaniem jest zabezpieczenie budowli przed deformacjami podłoża gruntowego spowodowanymi uszkodzeniami górnictwami.

Dach hali składa się z części linowo-prętowej, kratownicowej i kopuły. Linowo-prętową część dachu, złożoną ze 120 promienistych dźwigarów (rys. 2), rozpięto pomiędzy stalowym pierścieniem zewnętrznym o przekroju skrzynkowym opartym na wspornikach żebier i przestrzennym, kratowym pierścieniem wewnętrznym, na którym wsparto kopułę.



Rys. 2. Schematyczny przekrój poprzeczny przez konstrukcję przekrycia dachowego: 1 – stalowy pierścień wewnętrzny, 2 – kopuła, 3 – kondygnacja techniczna, 4 – stalowy pierścień zewnętrzny, 5 – wsporniki kratowych żebier obudowy, 6 – dźwigar linowo-prętowy, 7 – żelbetowy, sprężony pierścień fundamentowy, 8 – żelbetowe pierścienie obudowy, 9 – żebra stalowe, 10 – obudowa wahaczy, 11 – słupy krzyżakowe, 12 – pierścień pośredni, 13 – słupy wahaczowe, 14 – stopy fundamentowe

Fig. 2. The roof structure cross-section: 1 – steel inner ring, 2 – dome, 3 – technical floor, 4 – steel external ring, 5 – cantilever of truss ribs of enclosure, 6 – rope-rod girder, 7 – prestressed concrete foundations ring, 8 – RC rings of enclosure, 9 – steel ribs, 10 – swingarm enclosure, 11 – cruciform columns, 12 – intermediate ring, 13 – swingarm columns, 14 – foundations footings

Linowo-prętowy dźwigar o rozpiętości 36 m został wykonany w formie płaskiej kratownicy, w której pas dolny i górny oraz krzyżulce wykonano z kabli sprężających. Rozwiązanie to jest nowatorskim na skalę światową, gdyż do tej pory stosowano w tego typu konstrukcjach wiszących proste ciągnia nośne i usztywniające. Geometrię dźwigara zapewniają stalowe słupki rozporowe wykonane z dwóch kątowników $80 \times 80 \times 8$ mm połączonych w taki sposób, że w przekroju słupek jest kwadratem. Dźwigar wykonany jest z dziewięciu kabli nośnych, z których każdy uformowany jest w postaci 18 drutów $\phi 5$ mm oraz dwóch kabli usztywniających w układzie $9\phi 5$ mm. W strefie zakotwienia kable $18\phi 5$ mm są podzielone na dwie wiązki. Każda wiązka na obu jej końcach zamocowana jest w zakotwieniach główkowych po 9 drutów $\phi 5$ mm w każdym zakotwieniu.

Praca konstrukcji przekrycia jest analogiczna do zachowania się koła rowerowego. Obciążenia grawitacyjne powodują rozciąganie dolnych cięgien kratownicy. Górne ciągnia pełnią funkcję napinającą. W przypadku oddziaływania ssania wiatru znaki sił w cięgnach odwracają się.

W bardzo ciekawy sposób konstrukcja została przygotowana na oddziaływanie szkód górniczych. W trakcie deformacji gruntu dochodzić będzie do zmiany położenia pierścienia fundamentowego w stosunku do konstrukcji obiektu. Przegubowo zamocowane w fundamentach słupy wahaczowe będą mogły się przemieszczać, nie generując w części nadziemnej istotnych sił przekrojowych.

Złożona forma dźwigara nośnego oraz pochylenie połąci dachowej wymagały rozwiązania wielu problemów [3]. W pierwszym rzędzie należało dokonać wyboru odpowiedniego zakotwienia dla poszczególnych drutów w linach. Ostatecznie, z trzech koncepcji, wybrano zakotwienia główkowe. Do zamocowania 120 dźwigarów linowych potrzeba było wykonać 4800 szt. zakotwień w układzie $9\phi 5$ mm oraz 43 200 szt. główek na poszczególnych drutach lin. Należy zwrócić uwagę, że technologię formowania główek, sposób prefabrykacji kabli i dźwigarów na budowie, technologię naciągu oraz pomiaru sił w poszczególnych kablach opracowano w Politechnice Krakowskiej. Sam naciąg również wykonany był przez pracowników Politechniki Krakowskiej.

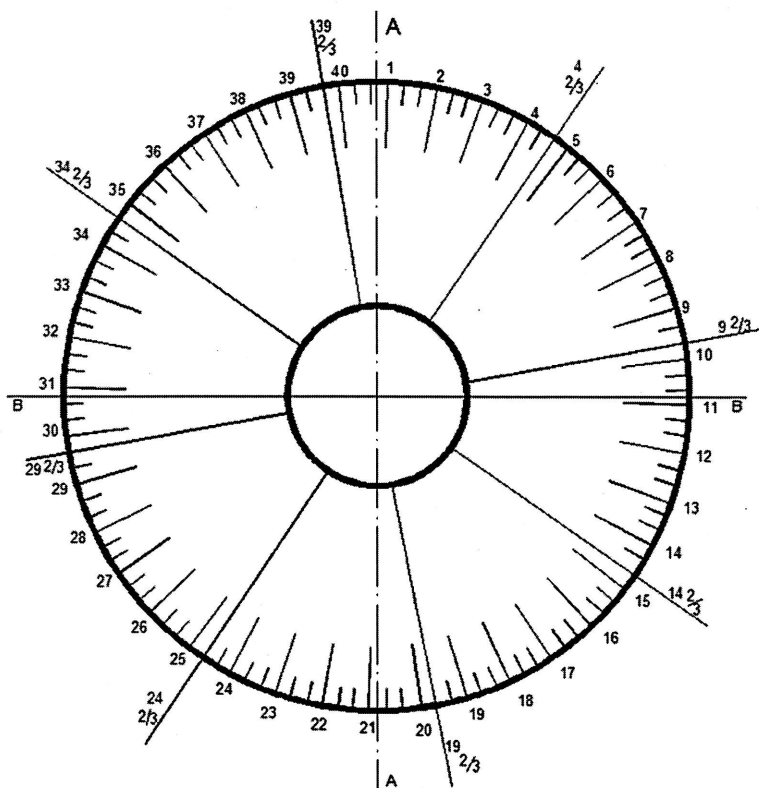
Cięgna zakotwiono w pierścieniu kopuły w sposób bierny (bez możliwości realizacji naciągu). Siły w konstrukcję przekrycia wprowadzano przez zakotwienia czynne zamontowane w stalowym pierścieniu zewnętrznym. Zakotwienia te umożliwiały wstępny naciąg oraz pomiar i regulację siły w kablach w poszczególnych fazach montażu przekrycia hali. Wiązki drutów przebiegające w pasach górnych i dolnych oraz krzyżulcach obudowane zostały blachą ocynkowaną, tworząc rynny o przekroju prostokątnym. Rynny w celu zabezpieczenia kabli przed korozją wypełniono kompozycją bitumiczną. Kompozycją tą zostały zabezpieczone również zakotwienia bierne oraz kable przebiegające na szerokości pierścienia stalowego w obrębie zakotwień czynnych. Konstrukcja głowicy czynnej wraz z zakotwieniami została wypełniona betonem zwykłym, który stanowi jednocześnie element nośny głowicy. Osiem



Rys. 3. Widok zakotwień czynnych przystosowanych do kontroli siły w poszczególnych kablach dźwigarów dachowych

Fig. 3. The view of anchorages adopted to control the force

spośród 120 głowic czynnych zostało wykonanych w sposób umożliwiający prowadzenie w dowolnym momencie pomiarów sił naciągu w poszczególnych kablach (w zasadzie połówkach kabli) danego dźwigara. Na rys. 3 widoczne jest jedno z zakotwień czynnych przystosowanych do realizacji pomiarów kontrolnych. Na rys. 4 pokazano osie tych dźwigarów, w których prowadzone są badania sił naciągu ($4 \frac{2}{3}$; $9 \frac{2}{3}$; $14 \frac{2}{3}$; $19 \frac{2}{3}$; $24 \frac{2}{3}$; $29 \frac{2}{3}$; $34 \frac{2}{3}$; $39 \frac{2}{3}$).



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia dźwigarów ze wskazaniem dźwigarów, w których mogą być prowadzone pomiary kontrolne

Fig. 4. The roof girders arrangement. The ones with force control possibility are marked

Górne pasy dźwigarów leżą w płaszczyźnie dachu, natomiast dolne wyznaczają płaszczyznę tzw. dolnego przekrycia zwaną także stropem technicznym. Przestrzeń zawarta między tymi płaszczyznami stanowi kondygnację techniczną hali.

Elementy nośne pokrycia dachowego stanowią płyty warstwowe z azbestocementowymi okładzinami mocowanymi do drewnianych ramek z rdzeniem styropianowym. Płyty te wsparto bezpośrednio na górnych pasach wiązarów linowo-prętowych, a w polu nad pierścieniem kratowym – na płatwiach.

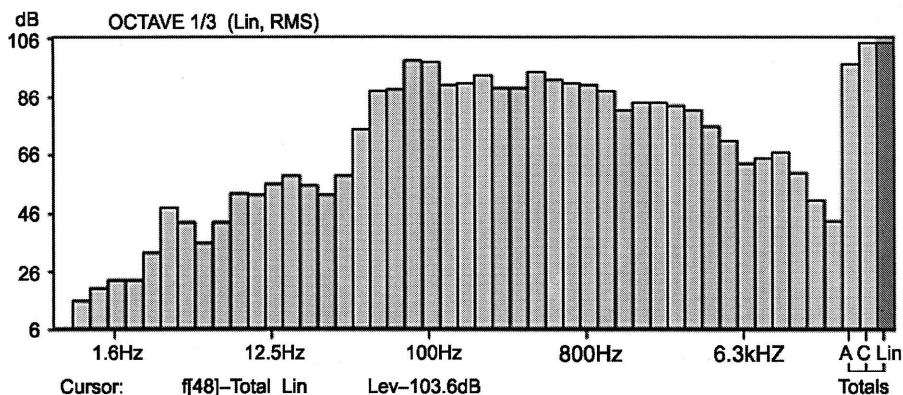
3. Pomiar zmian sił w wybranych kablach sprężających

W celu oceny wpływu fali akustycznej generowanej przez urządzenia nagłośnienia obiektu na stan bezpieczeństwa konstrukcji przekrycia dachowego przeprowadzono dynamiczny pomiar zmian sił w czterech kablach sprężających zlokalizowanych w głowicach przystosowanych do takiego pomiaru podczas symulowanego oddziaływania akustycznego. Na świecie badania takie wykonywane są stosunkowo rzadko. Autorom nie są znane żadne międzynarodowe wytyczne projektowania konstrukcji dachowych narażonych na oddziaływanie fali akustycznej.

Halę nagłaśniano na bardzo wysokich poziomach ciśnienia akustycznego (100 dB). Zadawano wymuszenia akustyczne ze wszystkich głośników stanowiących główne nagłośnienie hali, sterowane z generatora skaningowego wibrometru laserowego PSV-400 firmy Polytec. Generowano tzw. szum biały, szum różowy, *burst chip* oraz muzykę rozrywkową. Obciążenie ciśnieniem akustycznym sterowane było przez pracowników Zakładu Akustyki Technicznej i Techniki Laserowej Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach.

Na rysunku 5 pokazano przykładowo wartości poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości dla nagłośnienia typu „głośna muzyka”. Do pomiaru wytypowano cztery z ośmiu tego typu zakotwień o numerach 39 2/3; 34 2/3; 29 2/3; 24 2/3 (por. rys. 4).

Ze względu na duże odległości pomiędzy głowicami kotwiącymi i możliwość wystąpienia błędów pomiarowych związanych z transmisją sygnału na duże odległości, przygotowano 4 niezależne zestawy pomiarowe złożone z przetwornika siły, wzmacniacza pomiarowego oraz komputera przenośnego.



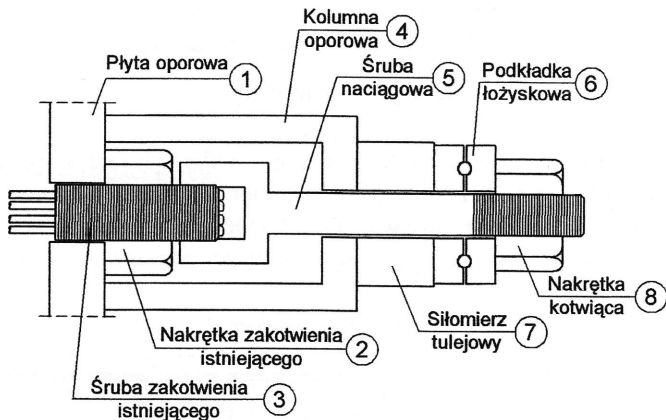
Rys. 5. Wartości poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości dla nagłośnienia typu „głośna muzyka”

Fig. 5. The level of acoustic pressure as a function of frequency for “loud music” voice type

Jako przetworniki siły wykorzystano tulejowe siłomierze HBM C6A o zakresie nominalnym 150 kN stanowiące wyposażenie Zakładu Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej. Działanie siłomierzy polega na zmianie odkształcenia rury grubościenniej (tulei),

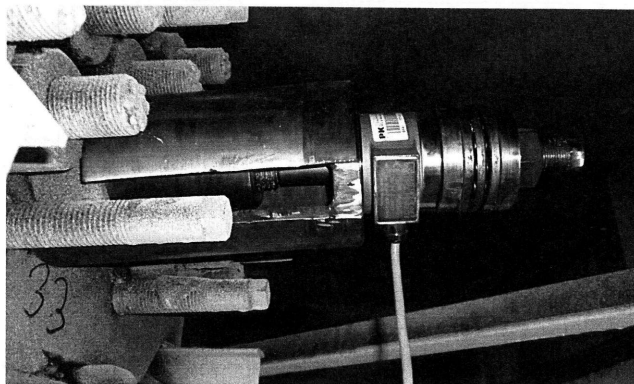
na której zamocowane są tensometry elektrooporowe. Pozwalają one na ciągły zapis siły i jej zmian z rozdzielczością 0,01 kN i dokładnością rzędu 0,1% zakresu nominalnego. Są one powszechnie wykorzystywane w badaniach konstrukcji sprężonych w skali naturalnej, jak i w badaniach laboratoryjnych. Przetworniki podłączono przez wzmacniacze pomiarowe SPIDER 8 produkcji firmy HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) do komputerów przenośnych.

Każdy z siłomierzy zainstalowano przez specjalnie wykonane kolumny stalowe (poz. 4 – rys. 6). Przez siłomierze poprowadzono śruby naciągowe (5), nakręcone uprzednio na elementy gwintowane istniejących zakotwień (3). Dokonano naciągu śruby (5) aż do momentu



Rys. 6. Przekrój elementów kotwiących kabel sprężający (9 drutów $\phi 5$ mm) z zamontowanym siłomierzem

Fig. 6. The prestressed tendon (9 $\phi 5$ mm) anchorage element cross-section with the force gauge



Rys. 7. Widok zainstalowanych elementów pomiarowych na głowicy zakotwienia czynnego

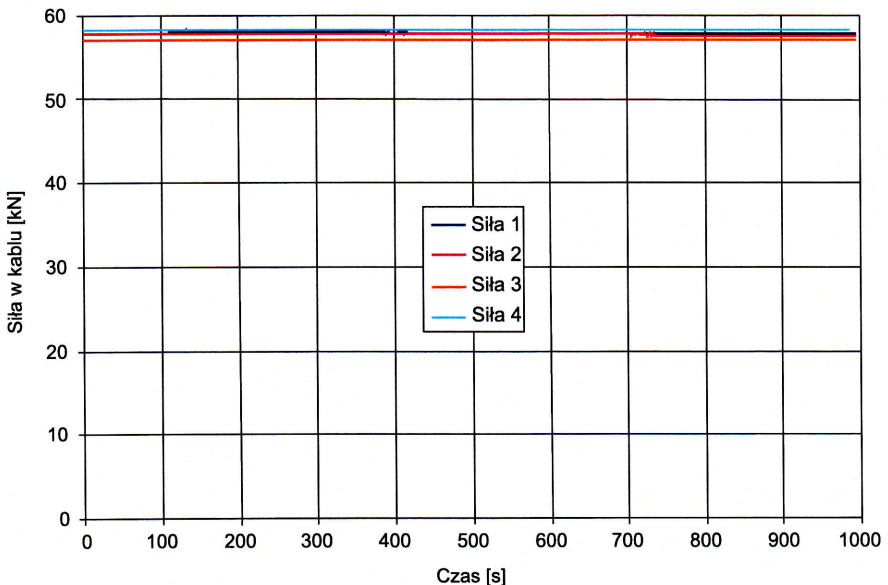
Fig. 7. The view of force gauge mounted at the active anchorage

zwolnienia nakrętki (2). Od tego momentu siła sprężająca w kablu przenoszona była na płytę oporową (1) przez nakrętkę kotwiącą (8), podkładkę łożyskową (6), siłomierz tulejowy (7) oraz kolumnę oporową (4). Na rys. 7 pokazano widok zainstalowanych elementów pomiarowych na głowicy zakotwienia czynnego podczas badania.

Rejestracja siły podczas oddziaływania fali akustycznej została uruchomiona po upływie ok. 20 minut od zwolnienia nakrętek kotwiących w celu ustabilizowania się wskazań siłomierzy. Wartości sił, przy jakich prowadzono pomiary, mieściły się w przedziale 56–58 kN. Zostały one celowo powiększone w stosunku do rzeczywistych wartości sił naciągu w celu zwiększenia wrażliwości opomiarowanej wiązki drutów na zmiany siły wywołanej oddziaływaniem fali akustycznej.

4. Wyniki pomiarów

Rejestrację zmian sił w kablach podczas trwania oddziaływania akustycznego prowadzono przez ponad 15 minut. Przebieg sił w czasie pomiarów przedstawiono graficznie na wykresie (rys. 8). Największe chwilowe wahania sił wyniosły 0,03 kN, co stanowi ok. 0,05% wartości sił naciągu. Należy podkreślić, że są to wartości mieszczące się w zakresie błędów pomiarowego.



Rys. 8. Zmiany wartości sił w kablach zarejestrowane podczas trwania oddziaływania fali akustycznej

Fig. 8. The tendons force changes registered during the impact of the acoustic wave

5. Wnioski

Przeprowadzone badania zmian sił w wybranych kablach sprężających dźwigarów dachowych miały na celu określenie wpływu fali akustycznej generowanej przez urządzenie nagłośnienia obiektu na stan bezpieczeństwa konstrukcji przekrycia dachowego. Pomiarzy te były jedynie niewielką częścią badań przeprowadzonych na szeroką skalę przez pracowników Głównego Instytutu Górnictwa i obejmujących pomiary przemieszczeń, przyspieszeń drgań i zmian przechyłów elementów konstrukcji.

Określenie zmian sił polegało na bezpośrednim, dynamicznym pomiarze tych sił z wykorzystaniem przetworników elektrooporowych. Badania wykazały, że zmiany sił podczas różnego typu oddziaływań akustycznych generowanych przez zestawy głośnikowe nie przekroczyły 0,03kN, co stanowi zaledwie 0,05% wartości sił statycznych, jakimi napięte są kable sprężające.

Przeprowadzone badania pokazały, że występujące podczas normalnego użytkowania obiektu oddziaływania typu akustycznego nie mają istotnego wpływu na zmianę wyężenia konstrukcji przekrycia dachowego.

Literatura

- [1] Ż ó r a w s k i A., *Ewolucje projektu konstrukcyjnego Wojewódzkiej Hali Widowiskowo-Sportowej w Katowicach*, Inżynieria i Budownictwo nr 10/1969.
- [2] K u ś S., *O konstrukcjach Profesora Wacława Zalewskiego*, Inżynieria i Budownictwo nr 2/1997.
- [3] L i b u r a S., *Wyniki badań oraz doświadczenia z realizacji sprężonych konstrukcji inżynierskich*, Inżynieria i Budownictwo nr 4–5/2000.