

Prof. dr hab. inż. Krzysztof DYDUCH, *kdydych@imikb.wil.pk.edu.pl*
Mgr inż. Rafał SIENKO, *rsienko@imikb.wil.pk.edu.pl*
Politechnika Krakowska

MODEL PRACY KABLOBETONOWYCH DŹWIGARÓW DACHOWYCH KBOS W ŚWIETLE BADAŃ IN SITU DŹWIGARA KBOS-18

THE MODEL OF WORK FOR POST-TENSIONED PRESTRESSED CONCRETE ROOF GIRDERS
IN THE LIGHT OF IN-SITU TESTS OF KBOS-18 TYPE GIRDER

Streszczenie W referacie przedstawiono fragment wyników badań in situ dźwigarów kablobetonowych KBOS-18 wbudowanych w przekrycie prefabrykowanej hali. Wyniki pomiarów zaprezentowano na tle wyników analiz modeli teoretycznych. Pokazano również możliwość wykorzystania zaproponowanych modeli do obliczeń hal z dźwigarami KBOS o innych rozpiętościach. Na przykładzie dźwigarów KBOS-24 przeanalizowano wpływ świetlików dachowych na pracę konstrukcji przekrycia dachowego.

Abstract In the paper there is presented the part of in-situ tests results carried out on KBOS-18 type roof girders built-in into prefabricated hall. Results of measurements are given on the background of theoretical models analysis results. Possibilities of application of presented models for calculating the halls with KBOS girders of different span are also presented. On the example of KBOS-24 type girders the influence of roof skylights on the behaviour of roof structure is analysed.

1. Wstęp

W latach 50-tych zaprojektowano w Biurze Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego BISTYP, w zespole kierowanym przez prof. Wacława Zalewskiego, kablobetonowe dźwigary sprężone KBO i KBOS. Zespół autorski uzyskał na nie patent krajowy oraz otrzymał Nagrodę Ministra w 1957r.

Dźwigary kablobetonowe stanowiły główne elementy konstrukcji nośnej prefabrykowanych łupin przekryć dachowych hal przemysłowych. Produkowano je o rozpiętościach 15, 18, 21 oraz 24m, a także 30 i 36m [1]. Z uwagi na prototypowy charakter konstrukcji dźwigarów kablobetonowych przyjęto zasadę doświadczalnej weryfikacji nośności każdego typu dźwigara [2, 3]. W sumie przeprowadzono około 8 badań różnych typów dźwigarów. Analizy statyczno-wytrzymałościowe w badaniach prowadzono przy założeniu, że dźwigary pracują zgodnie ze schematem łuku ze ściąganiem lub kratownicy.

W okresie od 1956 do 1966r. wzniesiono w Polsce ok. 850 obiektów z zastosowaniem ponad 10 000 dźwigarów. Pewne usterki projektowe [4, 5] i dość częsty brak należytej staranności przy produkcji dźwigarów oraz ich montażu, a przede wszystkim nie przestrzeganie podstawowych zasad właściwego utrzymania hal w trakcie ich użytkowania, doprowadziło w

wielu przypadkach do zaniżenia stanu technicznego dźwigarów kablobetonowych. W latach sześćdziesiątych, w krótkim odstępie czasu, miało miejsce pięć katastrof budowlanych [5, 6]. Bezpośrednią przyczyną katastrof była obecność chlorków i wilgoci w otoczeniu kabli sprężających, co w konsekwencji doprowadziło do szybkiego rozwoju wżerowej korozji stali sprężającej i zerwania kabli po 1- 5 lat od wbudowania dźwigarów w konstrukcję. W roku 1966 przeprowadzono kompleksową kontrolę prawie wszystkich konstrukcji kablobetonowych. Z opracowanego raportu [5, 7] wynika, że stan techniczny około 45% konstrukcji kablobetonowych budził zastrzeżenia. W 32% badanych konstrukcji stwierdzono brak obetonowania zakotwień, w 12% występowały zarysowania pasa dolnego. W wielu konstrukcjach stwierdzono jedynie częściową iniekcję cementową kanałów kablowych lub nawet całkowity jej brak.

Obszerne badania konstrukcji kablobetonowych przeprowadzono w Instytucie Techniki Budowlanej w latach 1965-75 [4, 8]. Efektem tych prac było opracowanie instrukcji oceny stanu technicznego dźwigarów [9]. Badania te kontynuowano w latach 1984-89.

Po prawie 50-ciu latach pracy dźwigarów i to często w niekorzystnym środowisku (obiekty przemysłu celulozowego i chemicznego) oraz w następstwie zawilgacania przez opady stref zakotwienia kabli i styków pasa dolnego, może pojawić się korozja kabli sprężających. Zbyt przybliżone schematy statyczne pracy dźwigarów, niewłaściwa interpretacja wyników badań, a zwłaszcza ugięcie dźwigarów, brak badań stanu korozji stali i badań chemicznych iniekcji kabli może prowadzić z jednej strony do decyzji o wzmocnieniu dźwigarów lub rozbiórki obiektu, a z drugiej – niedoceniań postępującego w czasie stanu zagrożenia [12].

2. Cel i zakres prowadzonych badań

Model pracy dźwigara stanowiącego główny element konstrukcji nośnej przekrycia dachowego winien uwzględniać kolejne etapy jej wykonania i obciążenia oraz pracę powłoki po związaniu nadbetonu. I tak:

- w czasie sprężania dźwigara, jego montażu i układaniu na nim płyt żebrowych, dźwigar pracuje jako ustrój statycznie niewyznaczalny w postaci łuku ze ściąganiem lub ramy płaskiej,
- po związaniu nadbetonu zespalaającego dźwigar z płytami prefabrykowanymi, ustrój pracuje jako krótka powłoka wypukła. Dla tego etapu pracy przyjęto model przestrzenny (3D), do którego analizy stosowano programy Diana i robot Millennium.

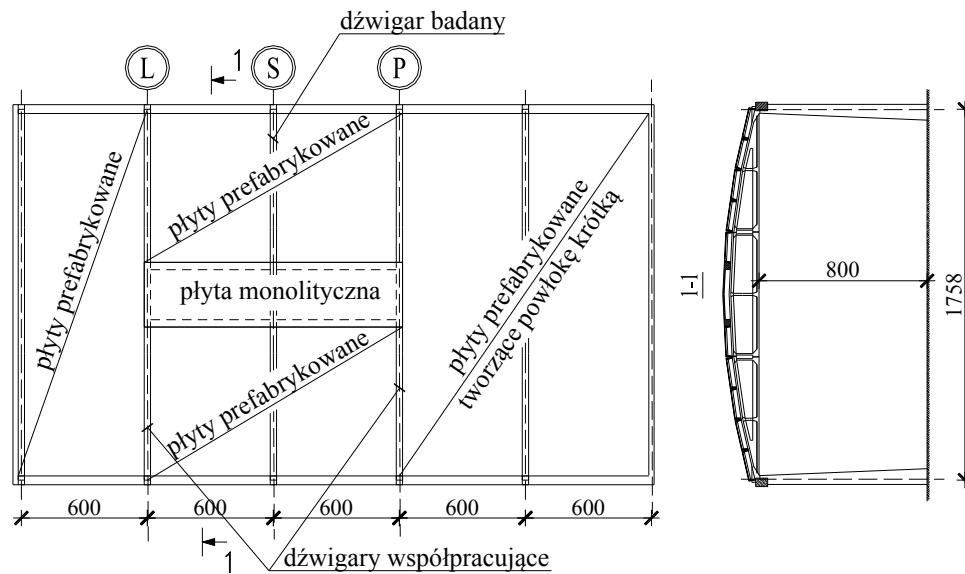
Zaproponowany model przestrzenny całej hali, w którym uwzględnia się współpracę pomiędzy płytami dachowymi i dźwigarami kablobetonowymi zastosowano do analizy pracy konstrukcji pod dodatkowymi obciążeniami oraz w trakcie pęknięcia cięgien sprężających wywołanego korozją stali.

Weryfikację doświadczalną przestrzennego modelu pracy dźwigarów KBOS-18 przeprowadzono w Zakładach Azotowych w Tarnowie-Mościcach S.A. w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2002-2004. Rzut, przekrój poprzeczny oraz oznaczenie dźwigarów w badanej hali pokazano na rys. 1.

W niniejszej pracy przedstawiono:

- badania i analizę zarysowania dźwigarów przy przyjęciu modelu przestrzennej pracy konstrukcji dachu,
- analizę ugięć dźwigarów „S” i „L” i wydłużenia ich pasów dolnych przy zrywaniu drutów kabli sprężających w dźwigarze „S”,
- próbę zaadaptowania przestrzennego modelu pracy powłoki w celu określenia stanu wyężenia pasów górnych i dolnych oraz przemieszczeń w dźwigarach KBOS-15, KBOS-18 i KBOS-24. Dla tego ostatniego typu dźwigara przeanalizowano również wpływ świetli-

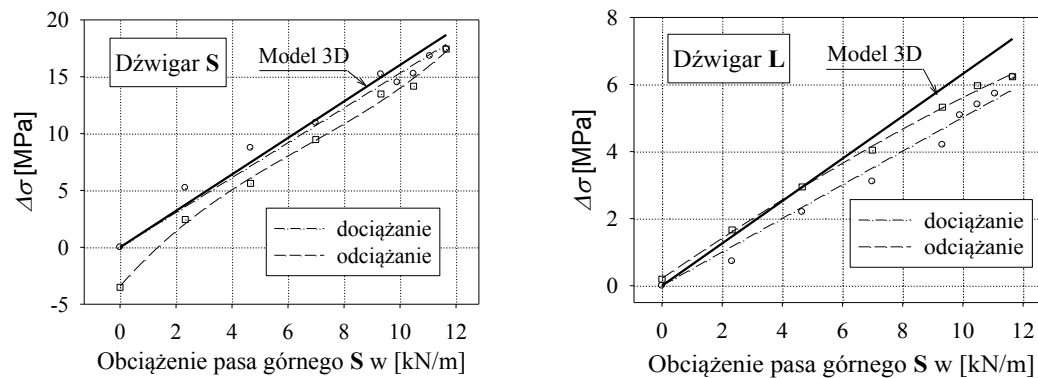
ka gąsienicowego na pracę konstrukcji przekrycia.



Rys. 1 Rzut oraz przekrój poprzeczny badanej hali. L, S, P – dźwigary badane (wymiary podano w [cm])

3. Analiza zarysowania dźwigara KBOS-18

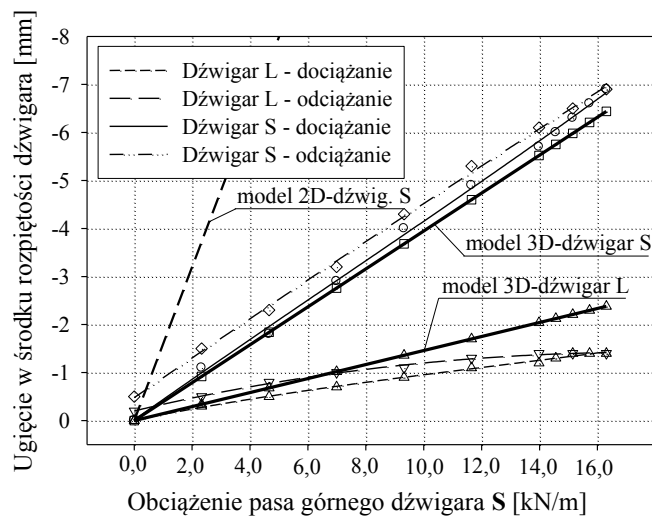
Badania pojawienia się rys w pasie dolnym dźwigara „S” prowadzono przy narastającym obciążeniu pionowym dźwigara. Do pasa górnego badanego dźwigara S podwieszono stalowe koryto napełniane wodą. Równocześnie z obserwacją rys prowadzono pomiar rozwarcia styków oraz wydłużenia pasów dolnych trzech badanych dźwigarów „S”, „L” i „P”. Mierzono odkształcenia betonu dźwigarów, a także płyt dachowych. Rejestrowano odkształcenia stali wybranych drutów kabli sprężających w dźwigarze „S” oraz obserwowano przemieszczenia pionowe i poziome środków rozpiętości badanych dźwigarów. Pierwsza rysa o rozwarości ok. 0,1mm pojawiła się w styku pasa dolnego w dźwigarze „S” przy obciążeniu pasa górnego ok. 13,4 kN/m. Odpowiadało to sile rozciągającej pas dolny przy schemacie 3D równej około 715kN. Na rys. 2 przedstawiono zmiany naprężeń w stali sprężającej w jednym z dolnych kabli obciążanego dźwigara „S” i współpracującego „L” w trakcie obciążenia do zarysowania i odciążenia.



Rys. 2 Wykresy zależności obciążenie – naprężenie w kablach sprężających dla dźwigarów „S” i „L” w trakcie obciążenia do zarysowania dźwigara „S” i odciążenia

Na rys. 3 porównano ugięcie dźwigarów „S” i „L” uzyskane w badaniach z wielkościami

obliczonymi przy przyjęciu modelu przestrzennego i modelu płaskiego.

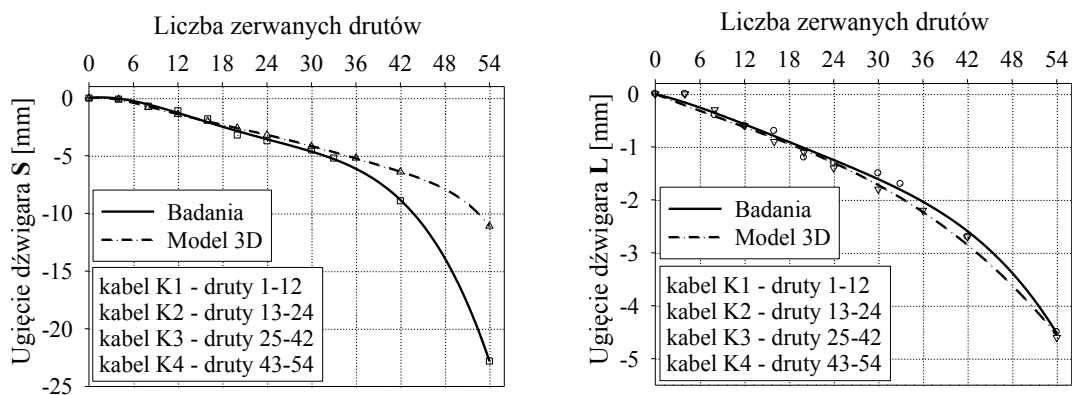


Rys. 3 Ugięcie środków rozpiętości dźwigarów „S” i „L” w trakcie obciążeń pasa górnego dźwigara „S” uzyskane w trakcie pomiarów oraz z rozwiązania modelu płaskiego oraz przestrzennego

4. Badania pracy dźwigarów KBOS-18 w trakcie symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających

Przeprowadzone badania miały na celu analizę pracy dźwigara „S” w trakcie symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających. Zrywanie poszczególnych drutów w kablach następowało stopniowo i w sposób całkowicie kontrolowany. Zastosowano mechaniczne, zdalnie sterowane przecinanie cięgien w rozkutmym styku pasa dolnego, przy równoczesnym zabezpieczeniu styku przed zaciśnięciem pod wpływem siły sprężającej. Konstrukcja zabezpieczająca pozwalała jednocześnie na swobodne wydłużanie się pasa dolnego przy spadającej sile sprężającej w trakcie przecinania poszczególnych drutów.

Szczególną uwagę zwrócono na pomiar ugięć dźwigarów oraz wydłużeń ich pasów dolnych. Ugięcia wywoływane były działaniem obciążeń stałych i zrywanych drutów kabli sprężających aż do przecięcia wszystkich cięgien w pasie dolnym dźwigara „S”. Na rys. 4 pokazano zależność ugięcia dźwigarów „S” i „L” od liczby zerwanych drutów.

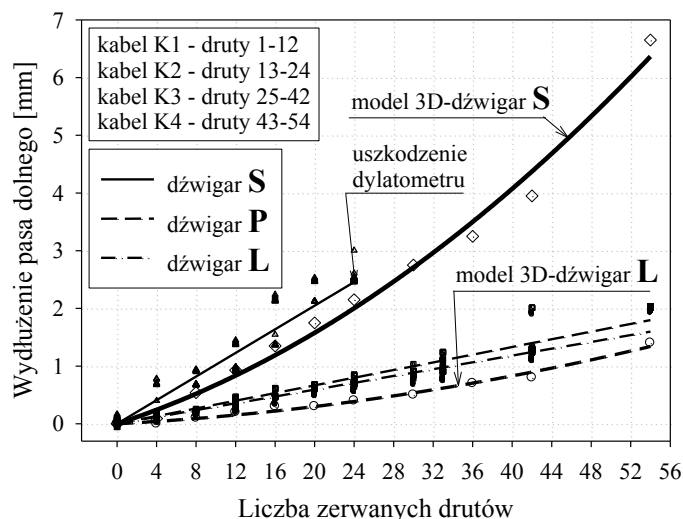


Rys. 4 Przemieszczenie środków rozpiętości dźwigarów S i L w trakcie symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających – wyniki z badań oraz rozwiązanie modelu przestrzennego

Przecięcie jednego kabla sprężającego pas dolny dźwigara „S” spowodowało jego ugięcie o 1,1mm, natomiast zerwanie dwóch z czterech kabli – przemieszczenie w dół o wartości zaledwie 3,4mm.

Ugięcia dźwigarów „L” i „P” wahały się w granicach 30 do 40% (w zależności od liczby pękniętych drutów) ugięć dźwigara „S”.

Rys. 5 obrazuje wydłużenie pasów dolnych dźwigarów S i L w zależności od liczby zerwanych drutów. Różnice pomiędzy wynikami pomiarów doświadczalnych a obliczeniami teoretycznymi wahaają się w granicach od 10 do 25%.



Rys. 5 Wydłużenie pasów dolnych dźwigarów S i L w zależności od liczby zerwanych drutów

5. Przykłady wykorzystania opracowanego modelu przestrzennego do obliczeń numerycznych typowych dźwigarów dachowych KBOS

Dźwigary kablobetonowe typu KBO i KBOS o rozpiętościach 15, 18, 21 i 24m mają cechy wspólne, pozwalające na wykorzystanie skonstruowanego modelu pracy dźwigara KBOS-18 potwierzonego przez badania in situ. Wszystkie dźwigary mają analogiczny kształt, a stosunek ich wysokości do rozpiętości wynosi 0,068. Pasy górne i dolne dźwigarów zmieniają swoje gabaryty wraz ze wzrostem rozpiętości. Liczba kabli zależna jest od typu dźwigara. Również wyteżenia poszczególnych elementów dźwigarów dla wszystkich ich typów są zbliżone. W tablicach 1 i 2 przedstawiono obliczone siły podłużne w pasach dolnym i górnym dźwigara oraz w płytach dachowych, a także przemieszczenia wyznaczone z analizy modelu przestrzennego dla dźwigarów KBOS-15 i KBOS-24. Te właśnie typy dźwigarów wzmacniali autorzy przez doprężenie zewnętrznymi ciągnami bezprzyczepnościowymi z uwagi na zupełną korozję zakotwień kabli [10, 11].

Ze względu na występowanie znacznej liczby hal, w której zainstalowane są świetliki dachowe, podjęto próbę analizy ich wpływu na sposób pracy całej konstrukcji. Rozważaniom teoretycznym poddano halę z wbudowanymi dźwigarami KBOS-24, w której część płyt dachowych zastąpiono tzw. świetlikiem gąsienicowym.

Stalowe trójkątne konstrukcje świetlików oparte były na nadbetonie dźwigarów, a ich długość wynosiła 18m. Świetliki rozmieszczone były w co trzecim polu międzydźwigarowym.

W tabl. 3 zestawiono wyniki obliczeń dla modelu „h24” z pełnym przekryciem dachowym oraz model „h24swg”, w którym uwzględniono osłabienie powłoki świetlikiem dachowym. W odpowiednich kolumnach podano przyrosty sił podłużnych, momentów, odkształceń

i przemieszczeń w środku rozpiętości pasa dolnego dźwigara środkowego, spowodowanych poszczególnymi oddziaływaniami.

Tablica 1 Wartości sił podłużnych w pasach dolnym i górnym dźwigara KBOS-15 oraz w płytach dachowych dźwigara „środkowego” i dźwigarów „sąsiednich” wyznaczone z analizy modelu przestrzennego

Dźwigar środkowy „S”				
Oddziaływanie	pas dolny ¹⁾ ΔN_x [kN]	pas górny ²⁾ ΔN_x [kN]	plyty dach. ³⁾ ΔN_x [kN/m]	przemieszcz. ⁴⁾ Δu_z [mm]
Zerwanie jednego kabla	- 123,0	+ 7,6	+ 23,0	- 2,7
Zerwanie dwóch kabli	- 251,0	+ 19,1	+ 46,0	- 5,5
Wzmocnienie 2x75kN środkowego dźwigara	+ 94,3	+ 2,5	- 16,0	+ 2,1
Dźwigary sąsiednie „L” i „P”				
Oddziaływanie	pas dolny ¹⁾ ΔN_x [kN]	pas górny ²⁾ ΔN_x [kN]	plyty dach. ³⁾ ΔN_x [kN]	przemieszcz. ⁴⁾ Δu_z [mm]
Zerwanie jednego kabla	- 29,8	- 21,3	- 1,0	- 1,0
Zerwanie dwóch kabli	- 60,5	- 43,3	- 2,0	- 2,0
Wzmocnienie 2x75kN środkowego dźwigara	+ 23,4	+ 16,8	0,0	+ 0,7

Tablica 2 Wartości sił podłużnych w pasach dolnym i górnym dźwigara KBOS-24 oraz w płytach dachowych dźwigara „środkowego” i dźwigarów „sąsiednich” wyznaczone z analizy modelu przestrzennego

Dźwigar środkowy „S”				
Oddziaływanie	pas dolny ¹⁾ ΔN_x [kN]	pas górny ²⁾ ΔN_x [kN]	plyty dach. ³⁾ ΔN_x [kN/m]	przemieszcz. ⁴⁾ Δu_z [mm]
Zerwanie jednego kabla	- 110,0	+ 8,7	+ 4,5	- 1,9
Zerwanie dwóch kabli	- 220,0	+ 17,3	+ 9,0	- 3,8
Wzmocnienie 4x75kN środkowego dźwigara	+ 256,0	+ 1,95	- 10,5	+ 3,0
Dźwigary sąsiednie „L” i „P”				
Oddziaływanie	PD ¹⁾ ΔN_x [kN]	PG ²⁾ ΔN_x [kN]	plyty dach. ³⁾ ΔN_x [kN]	przemieszcz. ⁴⁾ Δu_z [mm]
Zerwanie jednego kabla	- 40,5	- 16,6	+ 1,0	- 0,6
Zerwanie dwóch kabli	- 84,1	- 34,9	+ 1,5	- 1,1
Wzmocnienie 4x75kN środkowego dźwigara	+ 100,0	+ 42,4	- 1,2	+ 0,9

1) przyrosty sił osiowych w pasie dolnym dźwigara

2) przyrosty sił osiowych w pasie górnym dźwigara

3) przyrosty sił membranowych w płytach dachowych w sąsiedztwie dźwigara w środku jego rozpiętości

4) przyrosty przemieszczeń środka rozpiętości pasa dolnego dźwigara

Tablica 3 Porównanie wyników obliczeń uzyskanych w oparciu o model „h24” z pełnym przekryciem dachowym oraz model „h24swg” z przekryciem osłabionym świetlikiem dachowym (dźwigar podświetlikowy).

		Pas dolny dźwigara KBOS-24			
		ΔN_x [kN]	ΔM_z [kNm]	$\Delta \epsilon_x$ [-] ⁽¹⁾ $\times 10^{-4}$	Δu_y [mm] ⁽³⁾
Obciążenia stałe	Model - "h24"	+ 230,0	- 5,48	+ 0,76	- 3,6
	Model - "h24swg"	+ 543,0	+ 0,52	+ 2,39	+ 5,0
Zerwanie jednego kabla	Model - "h24"	- 110,0	+ 0,40	- 0,46	- 1,9
	Model - "h24swg"	- 145,0	- 0,53	- 0,65	- 3,2
Zerwanie dwóch kabli	Model - "h24"	- 220,0	+ 0,80	- 0,92 ⁽²⁾	- 3,8
	Model - "h24swg"	- 291,0	- 1,09	- 1,31 ⁽²⁾	- 6,4
Dopreżenie 4x75kN	Model 3D - "h24"	+ 223,0	+ 2,03	+ 1,06	+ 4,4
	Model - "h24swg"	+ 299,2	+ 4,28	+ 1,49	+ 6,7

(1) wartości na dolnej krawędzi przekroju pasa dolnego w środku jego rozpiętości, „-” oznacza rozciąganie

(2) wartości obliczone w osi pionowej przekroju pasa dolnego

(3) wartości ujemne oznaczają przemieszczenie pasa dolnego w dół

Przeanalizowano również wpływ wzmocnienia dźwigara podświetlikowego poprzez sprężenie zewnętrznymi cięgnami bezprzyczepnościowymi.

6. Wnioski

1. Badania w skali naturalnej hali z wbudowanymi dźwigarami KBOS-18 pozwoliły na zwerifikowanie modelu pracy tego typu konstrukcji. Pomimo niskiej jakości nadbetonów oraz zapraw wypełniających styki płyt dachowych, konstrukcja przekrycia dachowego pracowała w pełnym zakresie obciążeń zrealizowanych podczas badań [16] jako krótka wypukła powłoka paraboliczna z żebrami wzmocniającymi utworzonymi z dźwigarów kablobetonowych.
2. Wyznaczenie wielkości siły rysującej pas dolny dźwigara dodatkowo potwierdziło słuszność przyjęcia modelu przestrzennego jako najlepiej opisującego pracę konstrukcji. Siła uzyskana w trakcie badań wynosiła $N_{cr} = 664$ kN i była zaledwie 7,80% niższa od siły obliczonej w modelu przestrzennym.
3. Analizę pracy dźwigarów KBO i KBOS należy prowadzić uwzględniając w obliczeniach etapową pracę konstrukcji, przyjmując zmienną wartość obciążeń i siły sprężającej w czasie oraz zmianę charakterystyk geometrycznych pasa dolnego związaną z zespoleniem cięgien sprężających z betonem.
4. Uwzględnienie przestrzennej pracy konstrukcji przekrycia dachowego powoduje wzrost obliczeniowej nośności dźwigarów w porównaniu z modelami płaskimi. Zapas ten jest szczególnie ważny, jeżeli w wyniku korozji może dochodzić do zrywania cięgien spręża-

jących w poszczególnych dźwigarach. Zostanie on jednak w znaczny sposób ograniczony w przypadku przerwania ciągłości powłoki świetlikami dachowymi.

5. Dźwigary kablobetonowe KBO i KBOS są trwałymi elementami konstrukcyjnymi, jednak z uwagi na długość okresu ich eksploatacji w różnych warunkach środowiskowych oraz błędy popełnione na etapie montażu, a przede wszystkim nie przestrzeganie podstawowych zasad właściwego utrzymania hal w trakcie ich użytkowania, korozja stali sprężającej może prowadzić do powstawania stanów awaryjnych tych konstrukcji. Niewłaściwa interpretacja wyników badań oraz przyjmowanie zbyt uproszczonych schematów statycznych może prowadzić do podejmowania zbyt pochopnych decyzji o wzmocnieniach lub nawet rozbiórkach hal. Z drugiej strony – niedocenywanie procesów degradacji betonu, braki iniekcji cementowej i korozja stali sprężającej oraz uproszczone metody oszacowania nośności dźwigarów mogą być przyczyną awarii hal z wbudowanymi dźwigarami kablobetonowymi.

Literatura

1. Katalog Projektów Konstrukcji Sprężonych, wyd. III uzupełnione, Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego, Warszawa 1957.
2. Kuś S.: Prace naukowo-badawcze w dziedzinie konstrukcji i obciążeń, Wydawnictwo BISTYP, Warszawa 1986.
3. Zieliński A.: Prefabrykowane betonowe dźwigary sprężone, Wyd. Arkady, Warszawa 1962.
4. Han Z. i inni: Trwałość kablobetonowych konstrukcji dachowych. Analiza i ocena procesu ich destrukcji oraz efektywność stosowanych zabezpieczeń. Praca naukowo-badawcza NH-22, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1990.
5. Han Z.: Analiza wyników uzyskanych z akcji kontroli obiektów o konstrukcji kablobetonowej w Polsce, Prace ITB, Warszawa 1970.
6. Kuś S.: 50 lat zmagania o trwałość konstrukcji sprężonych, Przegląd Budowlany 12/2004.
7. Han Z., Frączek G., Kowalczyk R.: Sprawozdanie z akcji kontrolnej obiektów o konstrukcji kablobetonowej (maszyn.), ITB, Warszawa 1967.
8. Han Z.: Badania kablobetonowych dźwigarów dachowych wykonane w Instytucie Techniki Budowlanej, Inżynieria i Budownictwo nr 6/1991, str. 230-233.
9. Instrukcja ITB nr 125. Wytyczne badania konstrukcji kablobetonowych w obiektach eksploatowanych, Warszawa ITB 1972.
10. Dyduch K., Sieńko R.: Nowe rozwiązania wzmocnień typowych kablobetonowych dźwigarów dachowych o rozpiętościach 15-24m, XX Konferencja Naukowa „Awaryje Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje 2001.
11. Dyduch K., Sieńko R.: Numerical analysis and strengthening of typical post-tensioned prestressed concrete arch-shaped roof girders, 1st All-Russia Conference on Concrete and Reinforced Concrete, Moscow 2001.
12. Sympozjum Naukowo-Techniczne: Trwałość i niezawodność żelbetowych sprężonych dźwigarów dachowych, Płock 1994, Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie.
13. Dyduch K., Sieńko R.: Wybrane wyniki weryfikacji doświadczalnej pracy kablobetonowych dźwigarów dachowych KBOS-18, Pięćdziesiąta Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZiTb „KRYNICA 2004”, Warszawa-Krynica 2004.