

Rafał SIENKO*
Politechnika Krakowska

BADANIE, ANALIZA NUMERYCZNA I WZMACNIANIE TYPOWYCH KABLOBETONOWYCH DŹWIGARÓW DACHOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono sposoby badania stanu technicznego typowych kablobetonowych dźwigarów dachowych, opisano modele numeryczne zastosowane do weryfikacji obliczeniowej nośności konstrukcji przekrycia dachowego oraz zaproponowano nowe rozwiązanie wzmocnienia dźwigarów o rozpiętościach 15-24 m poprzez sprężenie ich kablami bezprzyczepnościowymi, kotwionymi w specjalnym systemie zakotwień. Zastosowany system pozwala na doprężenie pasa dolnego nie tylko w czasie naprawy, ale również w dowolnym okresie ich dalszej eksploatacji.

RESEARCH, NUMERICAL ANALYSIS AND STRENGTHENING OF POST-TENSIONED PRESTRESSED CONCRETE ROOF GIRDERS

Summary. This paper deals about researching methods of post-tensioned prestressed concrete roof girders' durability degree. Numerical models of girders, which were applied to verify load capacity, were described. The new solution of strengthening of structure in the means of supplemental prestressing of girders with rectilinear unbounded tendons anchored in a specially designed anchorage system was proposed. This solution gives the possibility of adjustment of the prestressing force, not only during the reparation, but also during further exploitation.

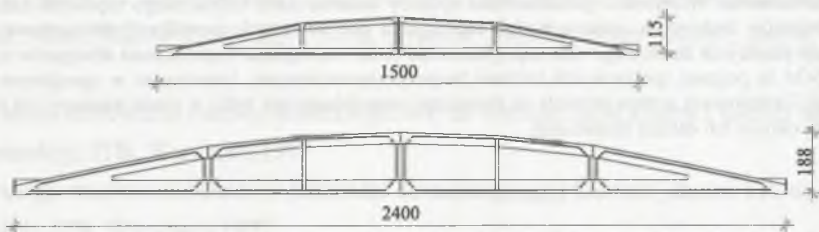
1. Wstęp

W latach pięćdziesiątych wprowadzono w Polsce do powszechnego stosowania w budownictwie przemysłowym lekkie prefabrykowane dachowe dźwigary kablobetonowe KBO i KBOS sprężone kablami o zakotwieniach stożkowych [1]. Pas górny tych dźwigarów miał kształt paraboliczny dostosowany do linii przebiegu momentu, natomiast pas dolny - kształt prostoliniowy. Kable sprężające 12 ϕ 5, których liczba zależała od typu dźwigara, prowadzone były w kanałach wewnętrznych pasa dolnego. Po sprężeniu cięgien otwory wypełniane były iniekcją z zaczynu cementowego. Produkowano dźwigary o rozpiętościach 15, 18, 21 oraz

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Dyduch.

24 m. Mogły być one jednoczęściowe (KBO) lub składane z segmentów (KBOS). Na rys.1 przedstawiono przykładowo widok dźwigarów KBOS-15 i KBOS-24.

W bardzo krótkim czasie wzniesiono w Polsce setki hal z zastosowaniem dźwigarów kablobetonowych jako elementów nośnych konstrukcji dachu. Niestety, wspaniała idea rozwiązania konstrukcyjnego nie zawsze miała właściwe rozwiązania technologiczne [2]. W następstwie kilku katastrof budowlanych, w wyniku których zniszczeniu uległy kablobetonowe dźwigary łukowe, zaniechano stosowania elementów kablobetonowych jako konstrukcji nośnej przekryć dachowych.



Rys. 1. Widok dźwigarów kablobetonowych KBOS-15 i KBOS-24

Fig. 1. View of precast post-tensioned prestressed concrete girders KBOS-15 and KBOS-24

Przyczyny koniecznych wzmocnień dachowych dźwigarów kablobetonowych [2]

Na obniżenie stopnia trwałości dźwigarów kablobetonowych ma wpływ wiele czynników, które można podzielić na trzy podstawowe grupy:

a) błędy konstrukcyjne. Należy tu zaznaczyć, że obliczenia statyczno-wytrzymałościowe były wykonywane zgodnie z uproszczonym schematem statycznym, którego rozwiązanie dawało dość bezpieczne wyniki. Błędne natomiast były często rozwiązania technologiczne, jak: podwieszanie rurociągów do pasów dolnych, złe rozwiązania odwodnienia połaci powodujące zalewanie strefy zakotwień itp.;

b) błędy wykonawcze. Do najczęściej występujących błędów tego typu należą m.in.: ubytki i zbyt słaba zaprawa w stykach segmentów dźwigarów, brak iniekcji lub niepełne wypełnienie kanałów kablowych, nieobetonowanie zakotwień kabli, wadliwe oparcie dźwigarów na słupach, stosowanie zbyt grubych wylewek w pokryciach połaci dachowych;

c) błędy eksploatacyjne. Użytkownicy bardzo często nie przeprowadzali okresowych kontroli dźwigarów. Szczególnie zaniedbywane były pokrycia dachowe, których naprawa najczęściej sprowadzała się do nałożenia nowej warstwy papy i lepiku, co powodowało dodatkowe zwiększenie obciążenia. Lekceważone było zabezpieczenie dźwigarów przed szkodliwym

wpływem agresywnego środowiska zmieniającego się wraz ze zmianą wykorzystania hali, co prowadziło do korozji kabli. Proces niszczenia stali sprężającej może być wywołany bezpośrednim oddziaływaniem czynnika korozyjnego na odsłonięte fragmenty cięgien (np. przy nieobetonowanych zakotwieniach) lub pośrednio – poprzez infiltrację substancji agresywnych wewnątrz pozbawionej właściwości ochronnych otuliny betonowej. Zjawisko korozji potęgowane jest dodatkowo wpływem wad materiałowych, takich jak: zanieczyszczenie w procesie produkcji, wtrącenia niemetaliczne, różnice w składzie chemicznym itp. oraz wielkością naprężeń, jakim poddana jest stal sprężająca [3].

Sposoby badania stanu technicznego dźwigarów kablobetonowych

Najczęściej ocena stanu technicznego dźwigarów polega na ocenie wizualnej oraz odpowiednich pomiarach, do których należą:

- obserwacja i ocena, czy wystąpiły zarysowania w pasie dolnym i ewentualny pomiar szerokości rys,
- badanie wytrzymałości betonu dźwigarów i zaprawy w stykach segmentów,
- kontrola zakotwień,
- kontrola stopnia wypełnienia kanałów kablowych zaczynem cementowym,
- kontrola stopnia korozji stali sprężającej oraz właściwości ochronnych betonu,
- pomiar ugięć pasa dolnego dźwigarów, ew. pomiar odkształceń elementów dźwigara.

Dotychczasowe metody wzmocnień

W trakcie prowadzonej kontroli stanu technicznego dźwigarów kablobetonowych w kilku zakładach przemysłowych południowej Polski stwierdzono występowanie zarysowania zaprawy wypełniającej styki dolnych pasów dźwigarów, bardzo dużą korozję zakotwień kabli z uwagi na ich nieobetonowanie oraz przyrost ugięć w czasie. W jednej z hal stan techniczny dźwigarów budził tak duże zastrzeżenia, że podjęto decyzję o natychmiastowym ich wzmocnieniu. Ponieważ produkcja prowadzona w hali nie mogła zostać przerwana ze względów technologicznych, szukano metody wzmocnienia uszkodzonych dźwigarów pozwalającej na jej wykonanie praktycznie bez przestoju w zakładzie oraz dającej gwarancję bezawaryjnej pracy konstrukcji w dalszych latach eksploatacji.

W dotychczasowych metodach wzmocnień dźwigarów stosowano [2, 4, 5]:

- odciążenie dźwigarów poprzez usunięcie części niekonstrukcyjnych warstw przekrycia dachowego,

- wzmocnienie dźwigara kablobetonowego dwoma dźwigarami stalowymi, kratowymi,
- zamianę na konstrukcję żelbetową,
- zastosowanie ściąągów z prętów lub płaskowników ze stali zwykłej,
- doprężenie z zastosowaniem kabli prętowych,
- doprężenie z zastosowaniem kabli z drutów lub splotów ze stali sprężającej.

Niektóre z tych metod mogą budzić kontrowersje, a nawet są błędne. Trzeba bowiem w pełni zdawać sobie sprawę z pracy statycznej dźwigara przy obciążeniach i zrywaniu poszczególnych cięgien oraz odpowiedzieć na pytanie, czy zaproponowane wzmocnienie będzie zawsze skuteczne.

2. Analiza obliczeniowa dźwigarów

W przedstawionej pracy przeprowadzono szczegółową analizę statyczno-wytrzymałościową dźwigarów KBO i KBOS dla trzech przyjętych modeli numerycznych. Do obliczeń, które wykonywane były w programie ROBOT 97, zastosowano dwa modele płaskiej ramy:

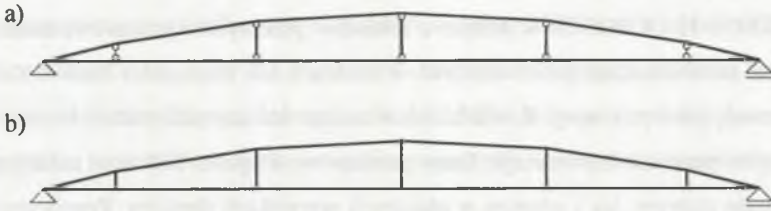
- a) ramę „przegubową” proponowaną w publikacji [1], w której słupki połączone są z pasami dźwigara w sposób przegubowy – (rys.2a),
- b) ramę „sztywną”, gdzie słupki przenoszą momenty na pas dolny i górny – (rys.2b). Model ten, zdaniem autora, bardziej odpowiada rzeczywistej konstrukcji dźwigara, ponieważ często, wbrew zaleceniom projektantów, stosowano pełne utwierdzenie słupków w pasach.

W obu przypadkach siła sprężająca została zamodelowana w postaci siły skupionej przyłożonej na początku i końcu dźwigara na pewnym mimośrodku. W obliczeniach uwzględniono fazowość pracy konstrukcji (zmienna geometria ze względu na zespolenie z nadbetonem). Badano także wpływ zarówno doprężenia konstrukcji, jak i spadku stopnia sprężenia od zrywania poszczególnych kabli.

- c) przestrzenny model numeryczny hali z dźwigarami kablobetonowymi.

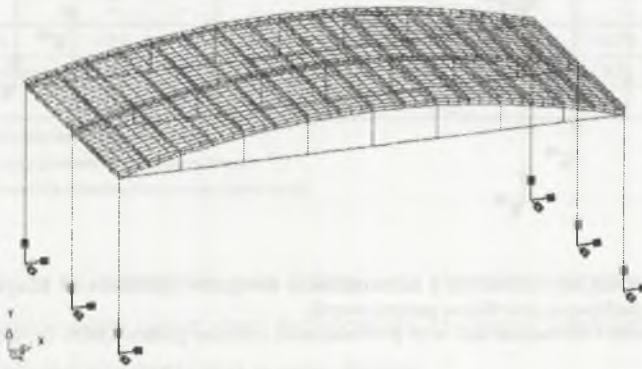
Przekrycie hal przemysłowych, w których dźwigary kablobetonowe są głównymi elementami nośnymi, stanowią w większości żelbetowe płyty żebrowe oparte na dźwigarach i zespolone z pasem górnym poprzez nadbeton. Równocześnie istnieje zespolenie samych płyt dachowych między sobą na całej rozpiętości dźwigara. Jeśli nie ma nieciągłości nadbetonu w

dźwigarze, wydaje się w pełni uzasadnione zamodelowanie dachu jako wycinka powłoki, w której pasy górne dźwigarów stanowią jej żebra, zaś pasy dolne pracują jako ściągi.



Rys. 2. Płaskie model numeryczne dźwigara kablobetonowego KBOS-15
Fig. 2. 2D numerical models of post-tensioned prestressed girder KBOS-15

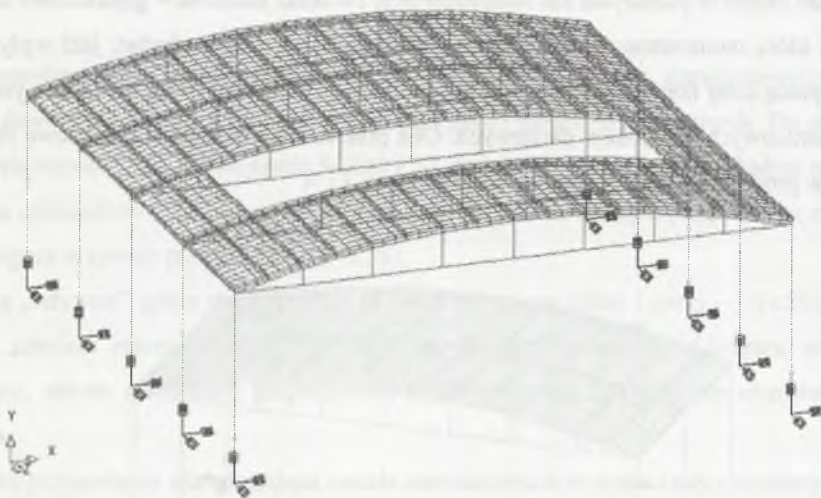
Bardzo często w przekroju hal stosowane były świetliki dachowe – gąsienicowe lub kaleńnicowe, które montowano zamiast części płyt dachowych. Chcąc zbadać, jaki wpływ mają one na pracę całej konstrukcji hali, zbudowano model, w którym uwzględniono występowanie gąsienicowych świetlików dachowych. Oba przestrzenne modele obliczeniowe skonstruowano w programie DIANA opartym na MES – rys.3 i 4



Rys. 3. Przestrzenny model hali żelbetowej z zastosowaniem dźwigarów KBOS-24
Fig. 3. 3D numerical model of concrete hall with post-tensioned concrete girders KBOS-24

3. Weryfikacja doświadczalna modeli numerycznych

W trakcie doprężania dźwigarów, w jakim autor brał udział podczas wzmocnienia hal z dźwigarami KBOS-15 i KBOS-24 w jednym z zakładów przemysłowych, prowadzono jednocześnie pomiar przemieszczeń pasów dolnych w środkach ich rozpiętości zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej. Równocześnie badano zmianę odkształceń betonu w charakterystycznych punktach konstrukcji. Bazy pomiarowe długości 200 mm naklejone były zarówno na pasie dolnym, jak i górnym w okolicach wszystkich słupków. Pomiarami objęto również płyty dachowe w pasie bezpośrednio przyległym do dźwigarów. Każdy punkt pomiarowy składał się z czterech baz.



Rys. 4. Przestrzenny model hali żelbetowej z zastosowaniem dźwigarów KBOS-24, w którym uwzględniono występowanie dachowych świetlików gąsienicowych

Fig. 4. 3D numerical model of concrete hall with post-tensioned concrete girders KBOS-24, where apply roof's skylights

W tabl. 1 zamieszczono porównanie wyników obliczeń numerycznych oraz wyników pomiarów przeprowadzonych w trakcie doprężania dźwigarów KBOS-24.

Ponieważ oceniając stan techniczny dźwigarów musimy postawić sobie pytanie, jaki jest stan naprężeń w pasie dolnym oraz czy wszystkie kable są naprężone, prowadząc analizę numeryczną modelowano również zrywanie poszczególnych kabli. Ze względu na pozytywną weryfikację doświadczalną modelu trójwymiarowego bez świetlików, można sądzić, że w

wyniku symulacji zrywania kabli również otrzymamy wyniki zbliżone do rzeczywistego zachowania się konstrukcji przekrycia. Obliczenia wykazały, iż spadek siły sprężającej w środkowym dźwigarze, spowodowany np. korozyjnym pęknięciem jednego cięgna, powoduje ugięcie pasa dolnego w środku jego rozpiętości w dół o ok. 3,6 mm (co jest wielkością bardzo małą w porównaniu np. z $1/600 L = 40$ mm). Zmniejszeniu ulegają również naprężenia mierzone na dolnej krawędzi pasa dolnego o ok. 1,60 MPa, które po zsumowaniu z naprężeniami istniejącymi w pasie dolnym dadzą w wyniku naprężenia ściskające na poziomie 1,04 MPa.

Tablica 1
Porównanie wyników analizy numerycznej i pomiarów – opis w tekście

		Δu_z [mm]**		ΔN_x [kN]		ΔM_y [kNm]		$\Delta \sigma_x$ [MPa]*		$\Delta \epsilon_x$ [-]* $\times 10^4$	
		składowa	suma	składowa	suma	składowa	suma	składowa	suma	składowa	suma
Stan przed dopięciem	Model płaski	- 9,1	- 9,1	+ 384,6	+ 384,6	- 4,11	- 4,11	+ 5,18	+ 5,18	+ 1,49	+ 1,49
	Model przestrzenny	- 3,6	- 3,6	+ 230,0	+ 230,0	- 5,48	- 5,48	+ 2,64	+ 2,64	+ 0,76	+ 0,76
	Pomiary	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Zerwanie jednego kabla	Model płaski	- 5,0	- 14,1	- 197,3	+ 187,3	- 2,09	- 6,20	- 3,30	+ 1,88	- 0,95	+ 0,54
	Model przestrzenny	- 1,9	- 5,5	- 110,0	+ 120,0	+ 0,40	- 5,08	- 1,60	+ 1,04	- 0,46	+ 0,30
	Pomiary	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Zerwanie dwóch kabli	Model płaski	- 10,1	- 19,2	- 394,6	+ 10,0	- 4,18	- 8,29	- 6,60**	- 1,42**	- 1,90**	- 0,41**
	Model przestrzenny	- 3,8	- 7,4	- 220,0	+ 10,0	+ 0,80	- 4,68	- 3,20**	- 0,56**	- 0,92**	- 0,16**
	Pomiary	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Dopięcie 4x75kN	Model płaski	+ 7,7	- 1,4	+ 289,2	+ 673,8	+ 4,85	+ 0,74	+ 5,11	+ 10,29	+ 1,47	+ 2,96
	Model przestrzenny	+ 4,4	+ 0,8	+ 223,0	+ 453,0	+ 2,03	- 3,45	+ 3,68	+ 6,32	+ 1,06	+ 1,82
	Pomiary	3,6 - 4,8	--	--	--	--	--	+ 3,61	--	+ 1,04	--

* - wartości na dolnej krawędzi przekroju pasa dolnego

** - wartości obliczone w osi pionowej przekroju pasa dolnego

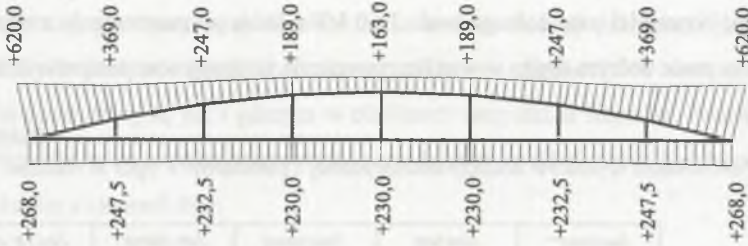
*** - wartości ujemne oznaczają przemieszczenie pasa dolnego w dół

Okazuje się, że mierząc ugięcia pasa dolnego oraz obserwując zarysowania betonu, nie jesteśmy w stanie w pełni ocenić stanu technicznego dźwigarów kablobetonowych, a przede wszystkim wielkości siły sprężającej w pasie dolnym.

4. Przestrzenny charakter pracy przekrycia dachowego z kablobetonowymi dźwigarami dachowymi

Na podstawie wykonanych obliczeń numerycznych oraz analizy wyników pomiarów stwierdzono, że praca łukowego, kratowego dźwigarą kablobetonowego jest jakościowo inna, niż praca łuku ze ściągiem. Spowodowane jest to przede wszystkim przestrzenną pracą całej

konstrukcji hali (rys.3). Ze względu na znaczną sztywność płyt dachowych i wzajemne powiązanie elementów przekrycia dachowego, zarówno siły wprowadzane poprzez sprężenie do pasa dolnego, jak i siły pochodzące od obciążeń zewnętrznych rozkładają się pomiędzy pasem dolnym, pasem górnym a płytami dachowymi.



Rys. 5. Rozkład siły podłużnej N_x [kN] na długości pasów w dźwigarze KBOS-24 w trakcie pracy konstrukcji przed doprężeniem

Fig. 5. Longitudinal force N_x [kN] in a top and bottom flange of post-tensioned girder KBOS-24 before strengthening of structure

Na rys. 5 pokazano rozkład sił podłużnych na długości pasów dolnego i górnego dźwigara KBOS-24 podczas normalnej pracy konstrukcji (przed jej wzmocnieniem). Założono tutaj występowanie pełnej siły we wszystkich cięgnach sprężających. Analizując rozkład sił zarówno w dźwigarach, jak i w płytach dachowych zauważamy, że zarówno przeważająca część powłoki, jak i pasy dolne i górne dźwigarów podlegają ścisaniu. Taki rozkład sił w konstrukcji powoduje znaczne odciążenie pasa dolnego.

5. Metoda wzmocnienia dźwigarów kablobetonowych

Przy wyborze koncepcji wzmocnienia dźwigarów kablobetonowych przyjęto zasadę, iż wzmocnienie projektuje się tylko jeden raz i to na pełną siłę sprężającą w dźwigarze, zaś realizacja siły sprężającej przebiegać może etapami w czasie, w zależności od zachowania się dźwigara, z możliwością dowolnego doprężenia poszczególnych kabli.

Zaprojektowano doprężenie dźwigarów poprzez kontrolowane sprężenie ich pasa dolnego zewnętrznymi kablami L15,5 o trasie prostoliniowej, rozłożonymi symetrycznie po obydwu stronach pasa dolnego [6, 7]. Ciężna te posiadają czterostopniową ochronę przed korozją – osłonkę polietylenową wewnętrzną, wypełnioną smarem o właściwościach antykorozyjnych oraz osłonkę PE zewnętrzną wypełnioną zaczynem cementowym (iniekcją). Zapewniają one również możliwość zmiany siły naciągu w dowolnym momencie, co uniezależnia nośność

dźwigarów od stanu istniejących kabli. Przyjęto zasadę pokrywania się mimośrodków cięgien sprężających istniejących w dźwigarze i kabli doprężających. Ze względu na prostoliniową trasę i znikome tarcie na długości, zaprojektowano jednostronny naciąg kabli, stosując z jednej strony system zakotwień czynnych, a z drugiej zakotwienia bierne.

6. Podsumowanie

Problem oceny stanu technicznego żelbetowych hal z wbudowanymi dachowymi dźwigarami kablobetonowymi jest obecnie bardzo istotny. Po przeszło czterdziestu latach eksploatacji w dużej części dźwigarów ujawniły się pewne błędy konstrukcyjne, wykonawcze oraz eksploatacyjne. Pomiar ugięć oraz obserwacja zarysowań, jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, nie wystarczają, aby w pełni oszacować zapas bezpieczeństwa pozostający w konstrukcji. Duża sztywność przestrzenna hal z dźwigarami kablobetonowymi powoduje, iż ich praca jest jakościowo inna niż praca łuku ze ściągiem. Wszystkie elementy przekrycia dachowego współpracują między sobą tworząc rodzaj powłoki z poprzecznymi żebrami usztywniającymi.

W przypadku znacznego spadku nośności dźwigarów należy podjąć decyzję o możliwości dalszej eksploatacji konstrukcji. Wymiana całego przekrycia dachowego jest przedsięwzięciem bardzo drogim, a często niewykonalnym, z uwagi na konieczność wstrzymania procesu produkcji w hali. Jedyną logiczną alternatywą jest wzmocnienie dźwigarów, które należy przeprowadzić w taki sposób, aby zapewniało ono pełne bezpieczeństwo konstrukcji w trakcie dalszej eksploatacji. Zaproponowana metoda naprawy przez doprężenie bezprzyczepnościami cięgnami zewnętrznymi z możliwością regulacji siły sprężającej w czasie daje pełną gwarancję dalszej bezawaryjnej pracy dźwigarów. Czterokrotna ochrona antykorozyjna cięgien pozwala na zastosowanie tego systemu w prawie każdych warunkach środowiskowych.

LITERATURA

1. Zieliński A.: Prefabrykowane betonowe dźwigary sprężone, Wyd. Arkady, Warszawa 1962.
2. Sympozjum Naukowo-Techniczne: Trwałość i niezawodność żelbetowych sprężonych dźwigarów dachowych, Płock 1994.

3. Ściślewski Z.: Korozja i ochrona zbrojenia, Wyd. Arkady, Warszawa 1981.
4. Ziobroń W., Libura St.: Wybrane metody rekonstrukcji dachowych dźwigarów kablobetonowych, Inżynieria i Budownictwo nr 3, 1995.
5. Łapko A., Kosior M.: Analiza racjonalnych technik wzmocnienia kablobetonowych dźwigarów dachowych, Przegląd Budowlany nr 2, 1997.
6. Dyduch K., Sieńko R.: Nowe rozwiązanie wzmocnień typowych kablobetonowych dźwigarów dachowych o rozpiętościach 15-24m, XX Konferencja Naukowa „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje 2001.
7. Dyduch K., Sieńko R.: Numerical analysis and strengthening of typical post-tensioned prestressed concrete arch-shaped roof girders, 1th All-Russia Conference on Concrete and Reinforced Concrete, Moscow 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko

Abstract

In Poland, in the fifties light, precast post-tensioned prestressed concrete roof girders KBO and KBOS, were introduced into a widespread use in industrial building. Unfortunately, the great idea of structural solution not always was equipped with appropriate technological solutions. The problem of estimation of technical state for RC halls with built-in post-tensioned prestressed concrete roof girders is nowadays very important. Measurements of deflections and observation of cracks, as it was proved by calculations, are not enough for estimation of the safety reserve existing in structure. For the case of significant decrease of girders' capacity it is necessary to make decision as to the possibility of further exploitation of structure. The exchange of the whole roof construction is very expensive or even impossible. Hence, logical alternative seems to be the strengthening of girders prestressing with the use of external tendons with the possibility of regulation of prestressing force. Numerical analysis for halls with built-in post-tensioned girders by considering plain and three-dimensional models was also carried out.