

Rafał SIENKO*
Politechnika Krakowska

WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA WIELKOŚCI SIŁY RYSUJĄCEJ PAS DOLNY DŹWIGARÓW „PRZEPOŃ” KBOS-18

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę teoretyczną mającą na celu określenie wielkości siły rysującej pas dolny dźwigarów KBOS-18. Przyjęte modele pracy dźwigara zostały zweryfikowane w trakcie przeprowadzonych badań doświadczalnych w skali naturalnej na użytkowanym od kilkudziesięciu lat obiekcie.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CRACKING FORCE MAGNITUDE FOR BOTTOM BELT OF DIAPHRAGM-GIRDERS KBOS-18

Summary. This paper presents theoretical analysis aiming at determination of the cracking force magnitude for bottom flange of girders KBOS-18. Considered models have been verified during experimental research in the structure that has been used for a few dozen years.

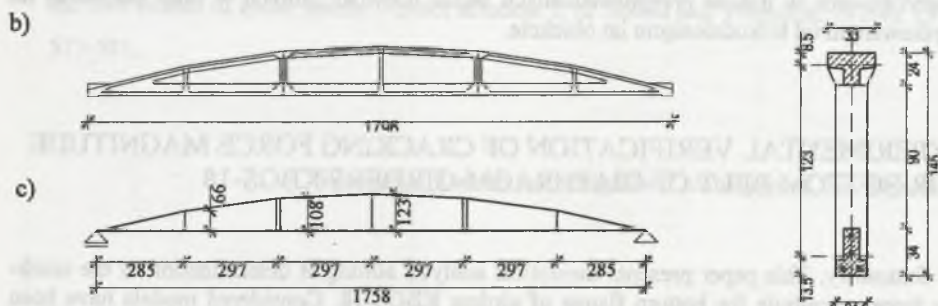
1. Wstęp

Kalobetonowe dźwigary dachowe KBO i KBOS o rozpiętościach 15, 18, 21 i 24 m były powszechnie stosowane w Polskim budownictwie przemysłowym w latach 50. i 60. ubiegłego wieku. Zostały zaprojektowane w Biurze Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego w Warszawie przez zespół w składzie: W. Zalewski, Z. Zieliński, S. Kuś, A. Włodarz. Dźwigary stanowiły główną konstrukcję nośną prefabrykowanych, żelbetowych przekryć dachowych. Kable sprężające $12\phi 5$ lub $18\phi 5\text{mm}$, których liczba zależała od typu dźwigara, prowadzone były w kanałach wewnętrznych pasa dolnego. Po sprężeniu cięgien otwory wypełniane były iniekcją z zaczynu cementowego. Dźwigary produkowano jako jednoczęściowe (KBO) lub składane z segmentów (KBOS).

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

Biorąc pod uwagę długość okresu użytkowania, zmieniające się środowisko wewnątrz hal oraz różne niedociągnięcia na etapie projektu, wykonawstwa oraz eksploatacji, obiekty te, podobnie jak inne odpowiedzialne konstrukcje inżynierskie, wymagają przeprowadzania systematycznych kontroli ich stanu technicznego. Jedną z metod oszacowania stopnia wyteżenia konstrukcji jest obserwacja pojawienia się rys oraz pomiar ich szerokości. Ze względu na możliwość wnikania agresywnych substancji przez uszkodzoną otulinę betonową powstawanie zarysowań jest szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji sprężonych, jakimi są dźwigary KBO i KBOS. Problem jest szczególnie ważny, gdyż kable sprężające zgodnie z projektem nie były prowadzone w osłonkach.

Na rys. 1 pokazano widok i przekrój dźwigara typu KBOS-18 oraz jego płaski model przyjęty do obliczeń numerycznych. Wymiary podano zgodnie z przeprowadzoną inwentaryzacją. Różnią się one nieznacznie od przyjętych w oryginalnym projekcie [4].



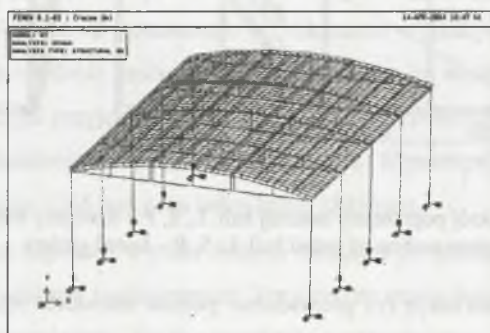
Rys. 1. Widok i przekrój dźwigara kablobetonowego KBOS-18 oraz jego płaski (2D) model
Fig. 1. View and cross section of prestressed concrete girder KBOS-18 and its 2D model

2. Modele teoretyczne

Dźwigary dachowe KBO i KBOS stanowią element konstrukcji prefabrykowanych przetrzyć dachowych. Do chwili zmonolityzowania z płytami dachowymi pracują jako ustroje płaskie. Po ułożeniu płyt żebrowych oraz wykonaniu nadbetonów konstrukcja przekrycia staje się przestrzenną powłoką paraboliczną ze swoistymi przeponami w postaci dźwigarów kablobetonowych. W związku z takim sposobem pracy konstrukcji należy w analizie obliczeniowej rozważyć zarówno stopniowe narastanie obciążeń, jak i zmianę geometrii w czasie, związaną z zespoleniem przekroju pasów górnych dźwigarów z nadbetonami i żebrami płyt dachowych, a także monolityzację cięgien sprężających z przekrojem pasa dolnego. Należy również

uwzględnić zmianę siły sprężającej w czasie spowodowaną relaksacją stali i pełzaniem betonu.

Analizę teoretyczną prowadzono opierając się na dwóch modelach. Model płaski (2D) pojedynczego dźwigara pokazano na rys. 1, natomiast model przestrzenny (3D) uwzględniający pełną współpracę wszystkich elementów konstrukcji przekrycia – na rys. 2.

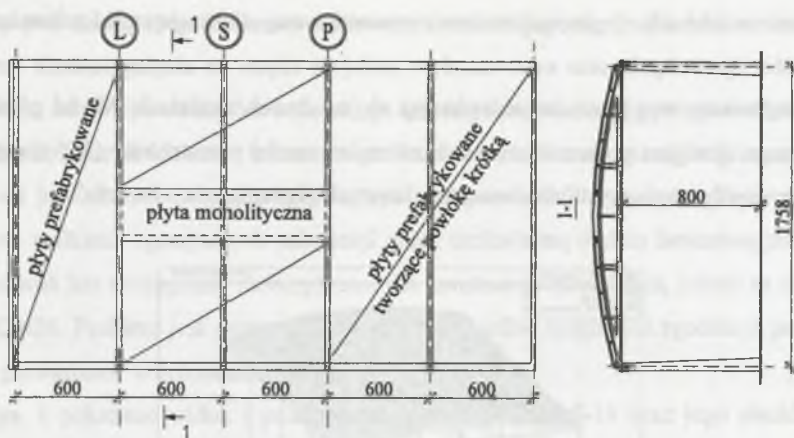


Rys. 2. Model 3D hali z wbudowanymi dźwigarami kablobetonowymi-przeponami KBOS-18
Fig. 2. View of 3D model hall with prestressed concrete girders-diaphragms KBOS-18

3. Doświadczalne wyznaczenie wielkości siły rysującej

Szczegółowe badania, mające na celu określenie rzeczywistego modelu pracy dźwigarów, przeprowadzono na istniejącej jednonawowej hali z wbudowanymi dźwigarami typu KBOS-18. Rzut hali oraz jej przekrój poprzeczny pokazano na rys. 3. Geometria hali została uzyskana w oparciu o szczegółową inwentaryzację. W części środkowej przekrycia część płyt dachowych użytkownik zastąpił płytą monolityczną o średniej grubości 6 cm.

Badania pojawienia się rys w pasie dolnym dźwigara S prowadzono przy narastającym obciążeniu pionowym dźwigara. Obciążenie to realizowano przez podwieszenie do pasa górnego dźwigara S stalowego koryta napełnianego wodą.



Rys. 3. Rzut oraz przekrój poprzeczny badanej hali. L, S, P – dźwigary badane
 Fig. 3. Elevation and cross section of tested hall. L, S, P – tested girders

Równocześnie z obserwacją rys prowadzono pomiar rozwarcia styków oraz wydłużenia pasów dolnych trzech badanych dźwigarów, 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 dźwigarów L, P i S. Pierwsza rysa pojawiła się w styku pasa dolnego dźwigara S przy napełnieniu koryta wodą do poziomu ok. 0,80 m, co odpowiadało równomiernemu obciążeniu pasa górnego ok. 13,4 kN/m. Zarysowanie początkowo obejmowało dolną powierzchnię pasa dolnego oraz jego boki do wysokości ok. 50 mm. W miarę zwiększania obciążenia następował wzrost rozwarości rys na powierzchni dolnej i dalszy rozwój uszkodzeń na powierzchniach bocznych pasa dolnego dźwigara S. Ze względu na duże niebezpieczeństwo spowodowane ewentualnym zawaleniem się hali nie planowano doprowadzenia dźwigara do zniszczenia. Koryto napełniono wodą do poziomu 112 cm (ok. 18,0 kN/m), a następnie dźwigar odciążono. Wszystkie rysy zostały całkowicie zamknięte.

4. Analiza obliczeniowa zarysowania dźwigarów

Przeprowadzono analizę obliczeniową zarysowania pasa dolnego dźwigara KBOS-18. Obliczenia wykonywano zgodnie z [1]. Przyjęto następujące założenia:

- najbliższymi przekrojami pasa dolnego dźwigara są styki elementów prefabrykowanych (por. rys. 1),

- pominięto wpływ przyczepności zaprawy wypełniającej styk na wielkość siły rysującej ($f_{ctm} = 0$ MPa),
- charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe przekrojów elementów dźwigarów, płyt dachowych, słupów i wieńców przyjęto na podstawie przeprowadzonej inwentaryzacji oraz wykonanych badań wytrzymałościowych,
- siłę sprężającą przyjęto na podstawie pomiaru naciągu cięgien po zdemontowaniu dźwigarów. Wielkość sił pomierzono w kilkunastu wybranych drutach siłomierzem Proseq. Średnia wielkość naciągu była ok. 8% niższa od wartości wyliczonej na podstawie siły naciągu przyjętej zgodnie z normą PN-57/B-03320. Konstrukcje z betonu sprężonego. Obliczenia statyczne i projektowanie. W przekroju pasa dolnego znajdują się trzy kable $12\phi 5$ mm oraz jeden kabel $18\phi 5$ mm,
- zachodzi zmiana naprężeń w pasie dolnym związana ze spadkiem siły sprężającej powodowanej zjawiskami reologicznymi. Przyjęto, że straty doraźne siły sprężającej zachodzą przed zespoleniem kabli z przekrojem pasa dolnego, natomiast straty reologiczne dotyczą przekroju sprowadzonego (zespolonego),
- przekrój pasa dolnego w styku elementów prefabrykowanych obciążony jest zewnętrzną siłą podłużną usytuowaną mimośrodowo w stosunku do jego środka ciężkości.

4.1. Model płaski (2D)

Wielkość siły rysującej pas dolny dźwigara obliczono jak dla elementu mimośrodowo rozciąganego, przy założeniu charakterystyk przekroju poprzecznego oraz wielkości siły sprężającej i sił przekrojowych wyznaczonych w miejscu styku prefabrykatów. Korzystając ze wzoru:

$$N_{cr} = \frac{\sigma_{cpl} - |\sigma_{cpll}|}{\frac{e_o}{W_{cs}} + \frac{1}{A_{cs}}} \quad (1)$$

gdzie:

σ_{cpl} – naprężenie w betonie na dolnej krawędzi pasa dolnego wywołane siłą sprężającą po stratach doraźnych, obliczone dla przekroju osłabionego otworami na kable A_{cs1} ;

σ_{cpII} – naprężenie w betonie na dolnej krawędzi pasa dolnego wywołane stratami opóźnionymi siły sprężającej, obliczone dla przekroju sprowadzonego A_{cs} (z uwzględnieniem stali sprężającej i miękkiej);

e_o – wypadkowy mimośród względem środka ciężkości przekroju A_{cs} siły rozciągającej wywołanej stałymi obciążeniami zewnętrznymi oraz korytem stalowym wypełnionym wodą do poziomu 0,8 m;

W_{cs} – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego sprowadzonego A_{cs} obliczony dla dolnych włókien pasa,

wyznaczono wartość siły rysującej jako $N_{cr} = 662$ kN. Rozwiązanie modelu płaskiej bezprzegubowej ramy pozwoliło określić wielkość siły rozciągającej pas dolny wywołanej obciążeniami zewnętrznymi działającymi na pas górny dźwigara. Analizowano wszystkie obciążenia stałe oraz ciężar koryta napełnionego do poziomu, przy którym nastąpiło zarysowanie dźwigara S podczas badań (0,8 m). Pas górny dźwigara przyjęto jako zespolony z nadbetonem. Otrzymano siłę podłużną $N_{sd} = 942$ kN. Wielkość tej siły jest ok. 42% większa od obliczonej siły rysującej.

4.2. Model przestrzenny (3D)

Analogiczne obliczenia powtórzono dla modelu przestrzennego hali z dźwigarami KBOS-18. Analizę prowadzono korzystając w pierwszej fazie pracy konstrukcji z modelu płaskiego. Po zmonolityzowaniu nadbetonów z płytami dachowymi obliczenia wykonywano opierając się na modelu przestrzennym. Model ten uwzględnia pełną współpracę wszystkich elementów przekrycia dachowego, dzięki temu sztywność konstrukcji jest znacznie większa niż sztywność pojedynczego płaskiego dźwigara. Znaczna część sił przekrojowych przenoszona jest przez płyty dachowe, co powoduje obliczeniowo odciążenie pasa dolnego. Siła rozciągająca pas dolny obliczona przy takich założeniach osiągnęła wartość $N_{sd} = 716$ kN, natomiast siła rysująca wynosi $N_{cr} = 664$ kN. W tym przypadku siła N_{sd} jest większa od siły N_{cr} ok. 7,8%.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne istniejącej hali z wbudowanymi dźwigarami kablobetonowymi typu KBOS-18 miały na celu weryfikację rozważań teoretycznych. Analiza płaskiej ramy bezprzegubowej i jej porównanie z badaniami „in situ” wykazała, że model ten obciążony jest istotnymi uproszczeniami. Siła rozciągająca w pasie dolnym, odpowiadająca obciążeniom, które wywołały zarysowanie rzeczywistej konstrukcji, jest większa od obliczonej siły rysującej. Oznacza to, że zgodnie z modelem 2D rysy powinny się pojawić dużo wcześniej.

Analiza modelu przestrzennego pozwala w dokładniejszy sposób opisać pracę konstrukcji całej hali [2], [3]. Pomimo bardzo niskiej jakości zaprawy wypełniającej styki płyt dachowych i bardzo słabego nadbetonu obciążenia zewnętrzne przejmowane są przez wszystkie elementy konstrukcji przekrycia dachowego. Taki sposób pracy hali powoduje spadek wyężenia pasów dolnych dźwigarów, co skutkuje wzrostem nośności konstrukcji jako całości. Siła rozciągająca pas dolny otrzymana z rozwiązania modelu przestrzennego, poddane oddziaływaniom identycznym z przyjętymi w trakcie badań, różni się od obliczonej siły rysującej jedynie o 7,8%. Świadczy to o dobrej zgodności przyjętego modelu z rzeczywistym zachowaniem się konstrukcji.

Obserwacja wystąpienia zarysowania pasów dolnych dźwigarów kablobetonowych KBO i KBOS jest bardzo dobrą metodą weryfikacji stanu technicznego elementów sprężonych. W przypadku elementów stykowych (KBOS) najsłabszym ogniwem pasa dolnego jest styk prefabrykatów. Jeżeli styki nie były klejone zaprawą epoksydową, prawdopodobieństwo pojawienia się rysy w jednym ze styków jest największe. W dźwigarach jednoczęściowych (KBO) określenie miejsca powstania pierwszych rys jest dużo trudniejsze. Obserwacja pojawienia się uszkodzeń pasów dolnych w postaci zarysowań jest często utrudniona z uwagi na znaczne wysokości obiektów, w które wbudowane są dźwigary. Bardzo mała rozwartość rysy wyklucza jej obserwację z poziomu posadzki hali. Należy jednak zwrócić uwagę, że wszelkie uszkodzenia otuliny betonowej prowadzące do zmniejszenia jej szczelności są bardzo niebezpieczne dla cięgien sprężających. Korozja stali była do tej pory jedyną przyczyną awarii kilku obiektów z kablobetonowymi dźwigarami dachowymi [4].

LITERATURA

1. PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
2. Dyduch K., Sieńko R.: Numerical analysis and strengthening of typical post-tensioned prestressed concrete arch-shaped roof girders, Proc. 1th All-Russia Conference on Concrete and Reinforced Concrete, Moscow 2001, s. 696-703.
3. 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.
4. Katalog Projektów Konstrukcji Sprężonych, wyd. III uzupełnione, Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego, Warszawa 1957.
5. Kuś S.: Prace naukowo-badawcze w dziedzinie konstrukcji i obciążeń, Wydawnictwo BISTYP, Warszawa 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Kuś