

*dźwigary kablobetonowe, korozja stali sprężającej*Rafał SIENKO¹Rafał SZYDŁOWSKI²

BADANIE KABLOBETONOWYCH DŹWIGARÓW DACHOWYCH KBOS-18 W TRAKCIE SYMULACJI KOROZYJNEGO PĘKANIA CIĘGIEN

W pracy zaprezentowano fragment badań dźwigarów kablobetonowych KBOS-18 wbudowanych w przekrycie prefabrykowanej hali przemysłowej podczas symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających. Celem badań było określenie sposobu pracy dźwigarów poddanych tego typu oddziaływaniom oraz doświadczalna weryfikacja przyjętego modelu numerycznego.

Na wykresach pokazano wyniki badań przemieszczeń dźwigarów, odkształceń betonu oraz wydłużeń pasów dolnych dźwigarów w funkcji liczby zerwanych drutów sprężających, a także porównanie wyników doświadczalnych z rozwiązaniem teoretycznym.

1. Wstęp

W latach 50-tych ubiegłego wieku, w początkowym okresie rozwoju konstrukcji sprężonych w Polsce, zaprojektowano i przyjęto do powszechnego stosowania w budownictwie przemysłowym, typowe dźwigary kablobetonowe. Dźwigary te stanowiły główne elementy konstrukcji nośnej prefabrykowanych przekryć dachowych. Produkowano je o rozpiętościach 15, 18, 21 oraz 24m, a także 30 i 36m. Mogły być jednoczęściowe (KBO) lub składane z segmentów (KBOS). Pas górny tych dźwigarów miał kształt paraboliczny, natomiast pas dolny – kształt prostoliniowy. Kable sprężające $12\phi 5$, których liczba zależała od typu dźwigara, prowadzone były w kanałach wewnętrznych pasa dolnego, przy czym najczęściej nie stosowano żadnej osłonki kablowej poza strefą styków.

W okresie ok. 20 lat wzniesiono w Polsce kilkaset hal przemysłowych, w których wbudowane zostały dźwigary kablobetonowe. Obiekty te eksploatowano w bardzo różnych warunkach środowiskowych, przy zmiennej wilgotności powietrza oraz różnej zawartości agresywnych substancji chemicznych. Błędy popełnione na etapie projektowania oraz wykonawstwa hal, a także bagatelizowanie uszkodzeń – szczególnie pokrycia dachowego – powstałych w trakcie eksploatacji, doprowadziły do kilku katastrof budowlanych. Bezpośrednią przyczyną zniszczenia dźwigarów we wszystkich katastrofach była korozja stali sprężającej.

¹ mgr inż. Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

² mgr inż. Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

2. Dotychczasowe badania dźwigarów kablobetonowych

Prac badawczych, obejmujących swym zakresem dachowe dźwigary kablobetonowe, nie wykonano w Polsce wiele. Największe badania były przeprowadzone w latach 1965-1975 w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie [1, 2]. Ich podstawowym celem była analiza trwałości konstrukcji kablobetonowych z punktu widzenia zagrożenia korozją. Przebadano wiele sprężonych betonowych beleczek – elementów próbnych, które wystawiano na oddziaływanie, różnych pod względem agresywności w stosunku do stali i betonu, środowisk gazowych i cieklých. Wykonano przeglądy stanów technicznych wielu hal przemysłowych eksploatowanych w bardzo różnych warunkach środowiskowych, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów korozji stali sprężającej. Analizowano zagrożenia korozyjne powodowane występowaniem styków prefabrykatów w dźwigarach KBOS.

Ostatecznie, wyniki badań potwierdziły tezę, że elementy kablobetonowe są bardzo bezpiecznymi i trwałymi konstrukcjami, pod warunkiem właściwego ich zabezpieczenia przed wpływem agresywnego środowiska.

3. Zagrożenia korozyjne cięgien sprężających

W okresie wznoszenia obiektów, w których wbudowywane były dźwigary kablobetonowe, problematyka korozji stali sprężającej oraz właściwego jej zabezpieczania, była bardzo mało znana. Zarówno projektanci, wykonawcy jak i użytkownicy, nie zdawali sobie sprawy z wielkości zagrożenia. Bardzo powszechnymi błędami było:

- nieobetonowywanie zakotwień cięgien sprężających,
- brak osłonek kablowych,
- niepełna iniekcja cementowa kanałów,
- brak dodatkowych zabezpieczeń dźwigarów w przypadku silnie agresywnego środowiska wewnątrz hali,
- dopuszczanie do zalewania wodami opadowymi dźwigarów.

Obecnie, po około czterdziestu latach użytkowania hal w bardzo różnych warunkach środowiskowych, może dojść do występowania korozji stali sprężającej w dźwigarach prowadzącej w skrajnych przypadkach do zrywania poszczególnych drutów, bądź całych kablów.

4. Potrzeba przeprowadzenia badań doświadczalnych

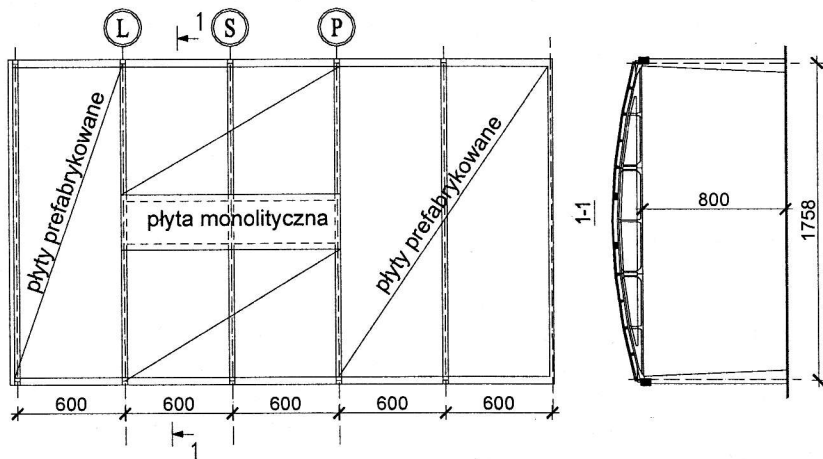
Badania występowania korozji cięgien sprężających dźwigary oraz stopnia jej zaawansowania w eksploatowanych obiektach są trudne do wykonania z praktycznego punktu widzenia. Mała średnica drutów (5mm), duża liczba kablów oraz zbrojenia miękkiego powodują, że wykorzystanie istniejących metod badawczych, pomimo ich różnorodności, jest bardzo ograniczone.

Podczas wykonywania przeglądów technicznych hal z wbudowanymi dźwigarami kablobetonowymi, w wykonywanych odkrywkach do kablów, stwierdzano wielokrotnie brak napięcia pojedynczych drutów. Z drugiej strony zaawansowana korozja bloków kotwiących cięgna wzbudzała wątpliwości co do pewności zakotwień. W konsekwencji pojawiły się pytania, w jaki sposób zachowuje się konstrukcja przekrycia podczas korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających lub poślizgów zakotwień oraz czy istnieje redystrybucja sił pomiędzy sąsiadującymi dźwigarami.

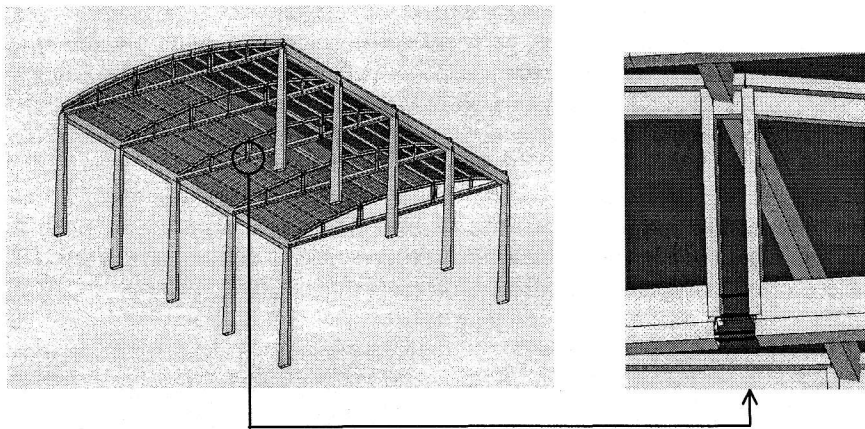
Podjęto więc próbę analizy numerycznej modelu konstrukcji hali w trakcie korozyjnego zrywania pojedynczych drutów oraz całych kablów sprężających. Rozważania teoretyczne należało jednak zweryfikować podczas badań poligonowych. Takie badania wykonano w hali

eksploatowanej przez ponad 40-ści lat w Zakładach Azotowych w Tarnowie-Mościcach S.A. Badania zostały przeprowadzone w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2002-2004 jako projekt badawczy.

Analizą oraz badaniami objęto jednonawową halę z wbudowanymi dźwigarami typu KBOS-18. Rzut obiektu oraz jego przekrój poprzeczny pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Rzut oraz przekrój poprzeczny badanej hali



Rys. 2. Przestrzenny model hali z dźwigarami KBOS-18 oraz widok rozkutego styku dźwigara S przed przecięciem cięgien

5. Model teoretyczny przekrycia dachowego

W oparciu o przeprowadzone obserwacje oraz analizy teoretyczne [3], przyjęto do rozważań przestrzenny model (rys. 2) całej hali z wbudowanymi dźwigarami kablobetonowymi. Model, zbudowany w programie Robot Millennium, zakładał pełną współpracę wszystkich elementów przekrycia dachowego w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Konstrukcja traktowana była więc jako powłoka paraboliczna z żebrami

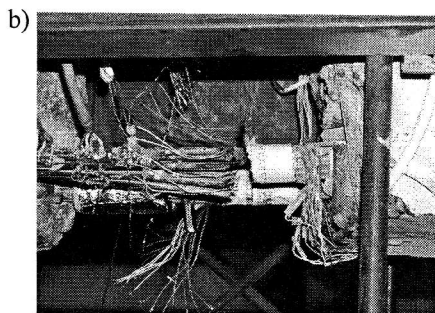
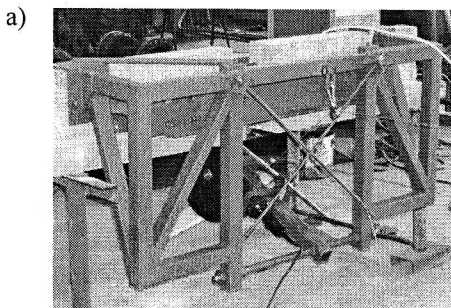
w postaci dźwigarów kablobetonowych, a nie jako zestaw płaskich ram, dla których prefabrykowane płyty dachowe stanowią jedynie obciążenie zewnętrzne. Przyjęcie takiego modelu, zdaniem autorów, daje pełniejsze odwzorowanie rzeczywistego zachowania się obiektów z wbudowanymi dźwigarami KBO lub KBOS.

Zbudowany model pozwalał na swobodne sterowanie wielkością siły sprężającej oraz ilością zbrojenia sprężającego w rozkutmym styku, co umożliwiło odwzorowanie poszczególnych etapów symulacji korozji stali sprężającej. W rozważaniach teoretycznych uwzględniono historię obciążeń, technologię wznoszenia konstrukcji, a także zmienność sprężenia w czasie.

6. Badania pracy dźwigarów w trakcie symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających

Przeprowadzone badania miały na celu obserwację sposobu pracy konstrukcji w trakcie symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających. Przerwanie ciągłości poszczególnych drutów w sposób kontrolowany było zadaniem stosunkowo trudnym z technicznego punktu widzenia. Zastosowana metoda, z jednej strony nie mogła powodować zagrożenia dla zespołu badaczy, z drugiej strony zrywanie poszczególnych drutów musiało następować stopniowo oraz w taki sposób, by liczba przeciętych drutów mogła być znana. Rozważono kilka sposobów, między innymi metody chemiczne, elektryczne i pirotechniczne. Ostatecznie została zastosowana technika mechanicznego, zdalnie sterowanego, stopniowego przecinania cięgien sprężających. Jako awaryjną metodę, przyjęto elektryczne podgrzewanie przekroju poprzecznego całych kabli do temperatury, przy której w znaczący sposób obniżała się wytrzymałość stali na zrywanie. Aby uzyskać dostęp do cięgien, należało rozkuć fragment pasa dolnego dźwigara S oraz zabezpieczyć go przed zaciśnięciem pod wpływem siły sprężającej. Konstrukcja wzmacniająca równocześnie nie mogła ograniczać swobodnego wydłużania pasa dolnego. Na rys. 3a pokazano specjalnie skonstruowane urządzenie do przecinania drutów oraz konstrukcję stalową wzmacniającą pas dolny w trakcie próby cięcia wykonanej na modelu fragmentu dźwigara.

Pomiaru liczby przeciętych drutów dokonywano przy pomocy zestawu obwodów elektrycznych zainstalowanego na każdym z kabli. Zastosowany system kontroli pozwalał na precyzyjne, zdalne sterowanie urządzeniem do przecinania cięgien sprężających. Rys. 3b przedstawia widok zerwanych wszystkich drutów pierwszego kabla.



Rys. 3. a) Widok urządzenia do zdalnego, kontrolowanego przecinania cięgien sprężających oraz konstrukcji wzmacniającej pas dolny, b) widok przeciętych drutów pierwszego kabla

W trakcie badań prowadzono pomiar następujących wielkości:

- pomiar temperatury. Mierzona była temperatura powietrza nad dachem hali oraz wewnątrz obiektu, a także temperatura betonu pasa dolnego i górnego dźwigara S oraz płyt dachowych w jego obrębie. Rejestrowano również zmiany nagrzania pokrycia papowego;
- pomiar odkształceń betonu tensometrami o bazie 50mm w 26 punktach badawczych umiejscowionych na pasach dolnych i górnych dźwigarów oraz płytach dachowych;
- pomiar odkształceń pojedynczych drutów sprężających. Realizowano go poprzez zastosowanie tensometrów o bazie 5mm;
- pomiar wydłużenia całych pasów dolnych trzech badanych dźwigarów L, S i P oraz rozwartości wszystkich styków. Zmianę rejestrowano specjalnymi dylatometrami tensometrycznymi;
- pomiar przemieszczeń pionowych oraz poziomych dźwigarów przy zastosowaniu techniki geodezyjnej oraz przemieszczeniomierzy indukcyjnych.

Odczyty poszczególnych wielkości wykonywano po 10min. od przecięcia danej liczby drutów, przyjmując, że jest to wystarczająco długi czas na dostosowanie się konstrukcji do zmienionej nośności jednego z pasów dolnych dźwigarów.

W trakcie całego badania zachowanie się konstrukcji rejestrowane było przez sześć kamer statycznych, trzy kamery obrotowe oraz jedną przenośną kamerę cyfrową. Posługiwanie się kamerami oraz ich zdalne sterowanie było konieczne z uwagi na znaczne zagrożenie bezpieczeństwa ludzi znajdujących się w obrębie badanych dźwigarów.

7. Porównanie wyników badań z modelem teoretycznym

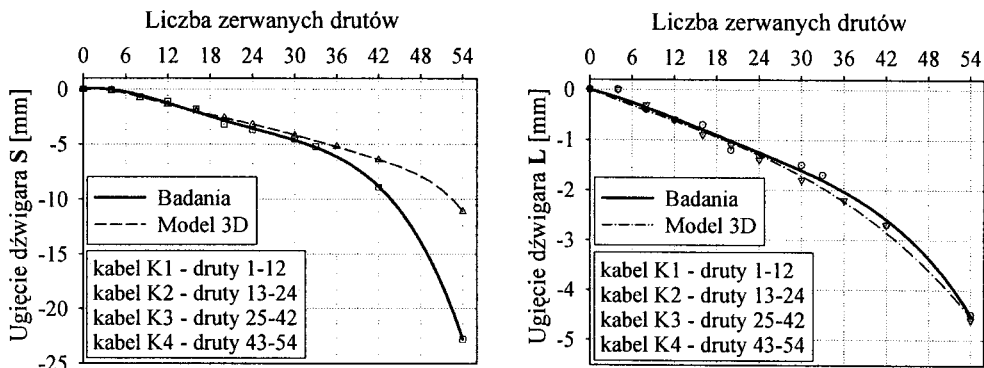
Odwzorowanie rzeczywistej pracy konstrukcji składającej się z elementów prefabrykowanych, monolityzowanych betonami i zaprawami o często bardzo niskiej wytrzymałości, nie jest zadaniem prostym. Ostateczną weryfikacją poprawności przyjętego modelu, mogą być dopiero badania doświadczalne.

Na rys. 4 pokazano porównanie wyników przemieszczeń środków rozpiętości pasów dolnych dźwigara S oraz jednego z dźwigarów sąsiednich L uzyskanych z badań z rozwiązaniem teoretycznym modelu przestrzennego. Wielkość ugięć przedstawiono w funkcji liczby przeciętych drutów. Zgodność modelu z rzeczywistą konstrukcją dla dźwigarów sąsiednich (typu L) jest w całym zakresie oddziaływania bardzo wysoka. Teoretyczne przemieszczenia pasa dolnego dźwigara S dopiero po zerwaniu dwóch cięgien (24 druty) odbiegają od wyników badań. Jest to spowodowane rozwojem zjawisk nieliniowych zachodzących w istniejącej konstrukcji, trudnych do uchwycenia w modelu.

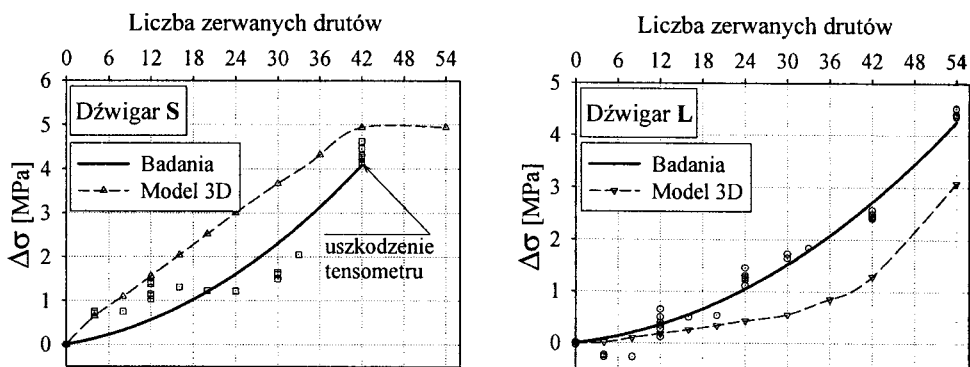
Należy zwrócić uwagę, że przemieszczenia obydwu dźwigarów spowodowane przecinaniem cięgien sprężających w rozkuty styku były stosunkowo niewielkie. Przecięcie jednego kabla sprężającego pas dolny dźwigara S spowodowało jego ugięcie o 1,1mm, natomiast zerwanie dwóch z czterech kabli – przemieszczenie w dół o wartości zaledwie 3,4mm. Ugięcia dźwigara sąsiedniego, w zależności od liczby pękniętych drutów, wahały się w granicach 30 do 40% ugięć dźwigara S. Takie zachowanie się konstrukcji wynika z wyraźnej współpracy sąsiednich dźwigarów w przenoszeniu obciążeń, czyli o typowo przestrzennym charakterze pracy całej konstrukcji.

Uzyskanie zbieżności wyników przyrostów odkształceń czy naprężeń uzyskanych z badań i obliczeń jest dość skomplikowane. Oszacowanie sił przyczepności pomiędzy cięgnami sprężającymi a iniekcją cementową i betonem jest bardzo trudne. Okazuje się, że istnienie tych sił lub ich brak w znaczący sposób wpływa na sposób pracy konstrukcji oraz wartości sił przekrojowych. W modelu teoretycznym przyjęto, że brak jest współpracy pomiędzy kablami i pasami dolnymi dźwigarów.

Na rys. 5 pokazano przyrosty naprężeń w betonie na krawędzi pasa dolnego w środku rozpiętości dźwigarów S i L spowodowane symulacją korozji cięgien sprężających. Wartości dodatnie oznaczają rozciąganie.



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



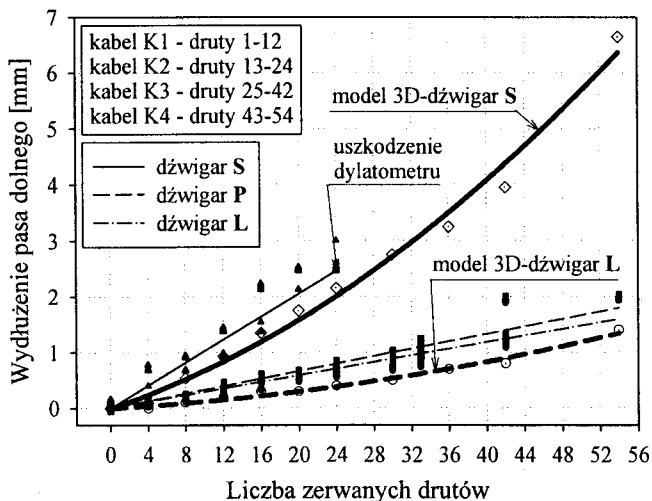
Rys. 5. Przyrosty naprężeń w betonie pasa dolnego dźwigarów S i L podczas symulacji korozji cięgien sprężających

Rys. 6 obrazuje wydłużenie pasów dolnych dźwigarów S i L w zależności od liczby zerwanych drutów. Różnice pomiędzy wynikami pomiarów doświadczalnych a obliczeniami teoretycznymi wahają się w granicach od 10 do 25%. Świadczy to o stosunkowo dobrej zgodności modelu z rzeczywistością, bardzo złożoną konstrukcją.

8. Wnioski

Korozja cięgien sprężających jest podstawowym zagrożeniem dla konstrukcji kablobetonowych. Liczba czynników, które mogą spowodować powstanie ognisk korozyjnych jest bardzo duża, a wykrycie ich w istniejącym i użytkowanym obiekcie bardzo trudne. Większość awarii konstrukcji sprężonych na świecie wywołanych było zjawiskiem korozji.

Przeprowadzone badania w skali naturalnej istniejącej hali z wbudowanymi dźwigarami kablobetonowymi KBOS-18 w trakcie symulacji korozyjnego pęknięcia cięgien sprężających pozwoliły na zarejestrowanie sposobu pracy konstrukcji podczas całego procesu przerywania ciągłości kabli. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że przemieszczenia pasów dolnych dźwigarów powodowane pękaniem poszczególnych cięgien są wielkościami bardzo małymi.



Rys. 6. Wydłużenie pasów dolnych dźwigarów S i L w zależności od liczby zerwanych drutów

Zmniejszenie sprężenia jednego dźwigara aż o 25% wywołuje ugięcie jego pasa dolnego tylko o 1,1mm. Jest to wynikiem, z jednej strony znacznego udziału płyt dachowych w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych, z drugiej strony – redystrybucji sił na sąsiadujące dźwigary. Takie zachowanie się konstrukcji świadczy o typowo przestrzennym charakterze jej pracy. Dzięki temu można spodziewać się dość znacznych zapasów nośności w stosunku do rozwiązań uzyskiwanych z rozważań modeli płaskich [4]. Należy jednak podkreślić, że takie rozumowanie możemy odnieść tylko do obiektów, w których nie występują świetliki dachowe obejmujące znaczną powierzchnię połaci dachowej.

Model przestrzenny przyjęty do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych oraz założenie o współpracy wszystkich elementów konstrukcji w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych został potwierdzony wynikami uzyskanymi z badań. Pomimo bardzo niskiej wytrzymałości nadbetonu ułożonego na pasach górnych dźwigarów oraz zaprawy wypełniającej styki prefabrykowanych płyt dachowych, model konstrukcji, w prawie całym zakresie oddziaływania, dawał rozwiązania zgodne z pomiarami prowadzonymi na rzeczywistym obiekcie. Rozważania teoretyczne dotyczą konstrukcji „idealnej”: bez niedokładności wykonania, imperfekcji geometrii, czy zmieniających się właściwości materiałów w różnych częściach elementów konstrukcji. Przy tak złożonym obiekcie, uzyskanie pełnej zbieżności wyników obliczeń z wynikami doświadczalnymi nie jest możliwe. Zbudowanie poprawnych modeli hal z poszczególnymi typami dźwigarów kablobetonowych ma charakter bardzo praktyczny, pozwoli na dużo pełniejszą, a tym samym bezpieczniejszą, analizę tych konstrukcji.

- [1] Han Z.: Badania kablobetonowych dźwigarów dachowych wykonane w Instytucie Techniki Budowlanej. *Inżynieria i Budownictwo*. Nr 6/1991, s. 230-233.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Dyduch K., Sieńko R., Nowe rozwiązanie wzmocnień typowych kablobetonowych dźwigarów dachowych o rozpiętościach 15-24m, *Materiały konferencyjne XX Konferencji Naukowej „Awarie Budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje 2001.

RESEARCH OF POST-TENSIONED ROOF GIRDERS KBOS-18 DURING A CORROSION RUPTURE SIMULATION OF TENDONS

Summary

In this paper there has been presented a selection of tests' results carried out on the post-tensioned roof girders KBOS-18 working as a bearing elements of industrial hall during a corrosion ruptur simulation of prestressing tendons. The aim of those researches was to observe the girder behaviour at these type of load and experimental verification of numerical model of structure.

On the charts there have been presented changes of deflection, as well as stresses in concrete as a number of broken strands. There is also given a comparison between experimental and theoretical results.