

Wzmocnienie żelbetowej konstrukcji przekrycia hali produkcyjnej

Zginane elementy żelbetowe o niewystarczającej nośności wzmocnia się, zazwyczaj stosując ciągną sprężającą, taśmy z włókien węglowych, zewnętrzne ciągną bez przyczepności itp. Wybór odpowiedniej metody wzmocnienia zależy od możliwości technologicznych, rodzaju wzmocnianego elementu, jego przekroju poprzecznego, dostępności do elementu (w przypadku belki do pasa dolnego i strefy podporowej), niedoboru nośności oraz preferencji projektanta. W artykule przedstawiono wzmocnienie konstrukcji przykrycia hali z zastosowaniem zewnętrznych stalowych cięgien bez przyczepności, prętów sprężających, węglowych taśm wstępnie naprężanych i mat z włókna węglowego.

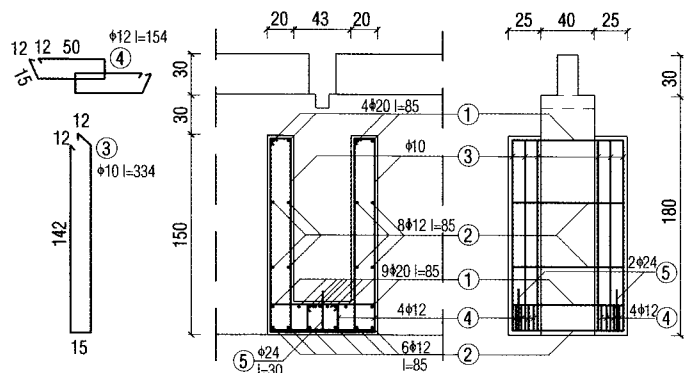
Opis konstrukcji i ocena stanu technicznego

Analizowana hala produkcyjna została zaprojektowana w 1997 roku. Przyjęto rozwiązanie konstrukcyjne zapewniające uzyskanie możliwie dużej przestrzeni wewnętrznej, umożliwiającej dowolne usytuowanie linii technologicznych. Wzniesiono halę trójnawową o całkowitej długości 150,6 m, z jedną dylatacją poprzeczną. Rozpiętość skrajnych naw w osiach podpór wynosi 27,3 m, natomiast nawy środkowej 25,4 m. Zastosowano konstrukcję słupowo-ryglową, w której głównymi elementami nośnymi w kierunku poprzecznym są rozstawione co 7,5 m prefabrykowane dźwigary strunobetonowe jedno- i dwuspadowe o rozpiętości 27,0 m i dwuspadowe 25,0 m, a w kierunku podłużnym – prefabrykowane dźwigary żelbetowe o przekroju poprzecznym 0,4 × 1,8 m i rozpiętości 15,0 m. Dźwigary żelbetowe oparto bezpośrednio na słupach, natomiast dźwigary strunobetonowe przemiennie na słupach i w środku rozpiętości belek żelbetowych (rys. 1). Obciążenia konstrukcji dachu są przekazywane na dźwigary strunobeto-

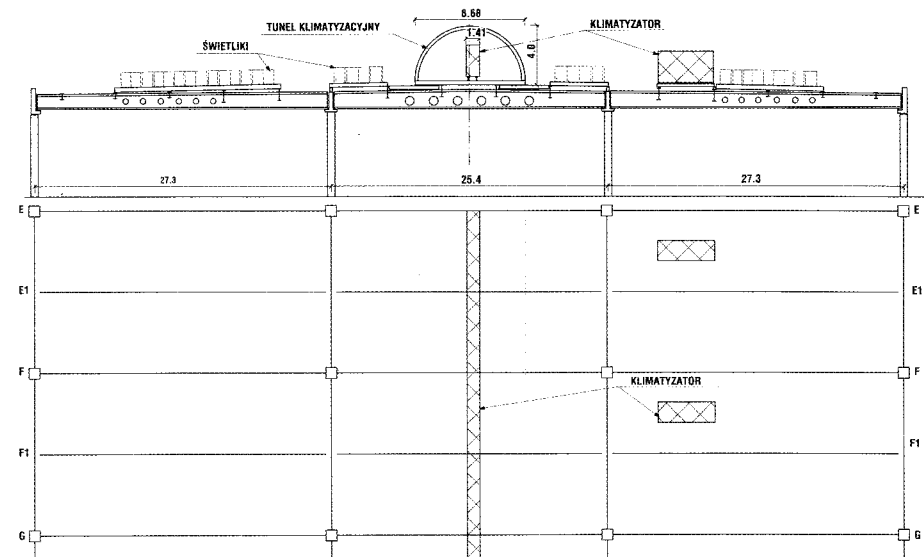
nowe za pomocą czterech (lub pięciu) belek stalowych rozmieszczonych wzdłuż długości dźwigarów. Oparcie belek strunobetonowych na dźwigarach żelbetowych stanowią obustronne żelbetowe wsporniki korytkowe (siodelka) w kształcie litery U (rys. 2).

Podczas przeglądu konstrukcji i inwentaryzacji uszkodzeń stwierdzono:

- liczne zarysowania belek żelbetowych o rozpiętości 15 m,
- rysy pionowe w miejscu połączenia sioდეłek z dźwigarem, rysy poziome na pionowych ścianach sioდეłek i w poziomie oparcia dźwigarów strunobetonowych oraz rysy pionowe na spodniej części sioდეłka (rys. 3),
- znaczące zarysowania (rysy prostopadłe i ukośne) belek dwuspadowych w nawie środkowej; średni rozstaw rys oceniono na 145 mm, a rozwartość rys prostopadłych do 0,4 mm i ukośnych do 0,6 mm.



Rys. 2. Zbrojenia wspornika korytkowego (sioდეłka)



Rys. 1. Przekrój poprzeczny i fragment rzutu poziomego hali produkcyjnej

Dźwigary strunobetonowe w nawach skrajnych nie wykazywały uszkodzeń.

Na podstawie odkrywek stwierdzono, że:

- dźwigary jedno- i dwuspadowe w nawach skrajnych są belkami strunobetonowymi, sprężonymi splotami 7 φ 5 mm (rys. 4),
- dźwigary dwuspadowe (nawa środkowa) nie są belkami strunobetonowymi (rys. 6); strzemia stanowią pręty ze stali żebrowanej średnicy φ 6 mm, rozstawione co 0,1 m; na podstawie badań nieniszczących beton zakwalifikowano do klasy B55 (według obecnych oznaczeń C45/55).

Na podstawie dokumentacji stwierdzono, że dolna część sioდეłek została zbrojona 6 prostymi prętami φ 12 mm w poziomie włókien dolnych i 9 prętami

prostymi ϕ 20 mm w poziomie włókien górnych (por. rys. 2). Takie rozwiązanie nie zapewniało zachowania wymaganej długości zakotwienia prętów prostych.

Wyniki analiz obliczeniowych

Przeprowadzone analizy statyczno-wytrzymałościowe belek, wykonane z uwzględnieniem działających obciążeń, przy

przyjęciu zbrojenia na podstawie projektu i odkrywek, wykazały niedobór nośności na ścinanie dźwigarów żelbetonowych podłużnych (15 m) oraz niedobór nośności na zginanie i ścinanie dźwigarów poprzecznych nawy środkowej (25 m). Maksymalne wartości obliczeniowe sił przekrojowych wraz z wynikami obliczeń nośności przedstawiono w tablicy. Przekroczenia nośności zaznaczono czcionką pogrubioną.

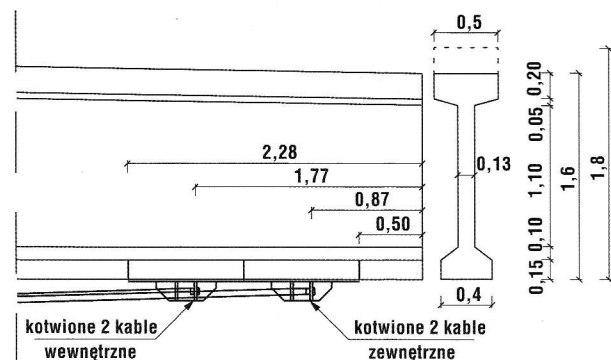
Wyniki obliczeń nośności dźwigarów

Dźwigar	M_{Sd} kN-m	M_{Rd} kN-m	M_{Sd}/M_{Rd}	V_{Sd} kN	V_{Rd} kN	V_{Sd}/V_{Rd}
Podłużny (15 m)	3544	3643	0,98	573	343	1,67
Poprzeczny (27 m)	2360	2670	0,64	319	345	0,92
Poprzeczny (25 m)	2813	2262	1,24	353	215	1,64

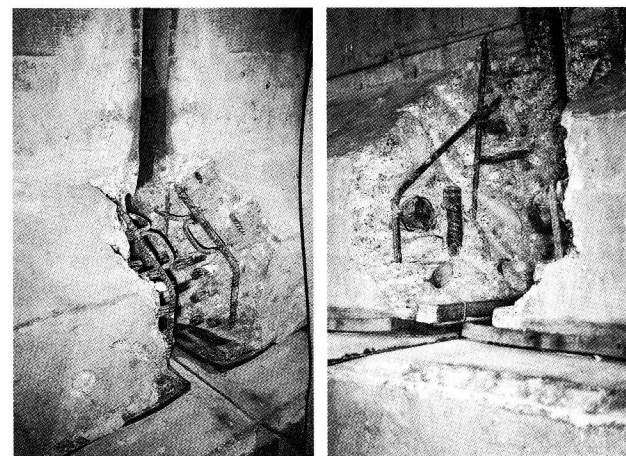
Na podstawie analiz oraz oceny stanu technicznego stwierdzono, że konstrukcja nośna hali znajduje się w stanie awaryjnym i konieczne jest pilne wzmocnienie wszystkich dźwigarów poprzecznych i podłużnych nawy środkowej.

Wzmocnienie dźwigarów dwuspawkowych poprzecznych (25 m)

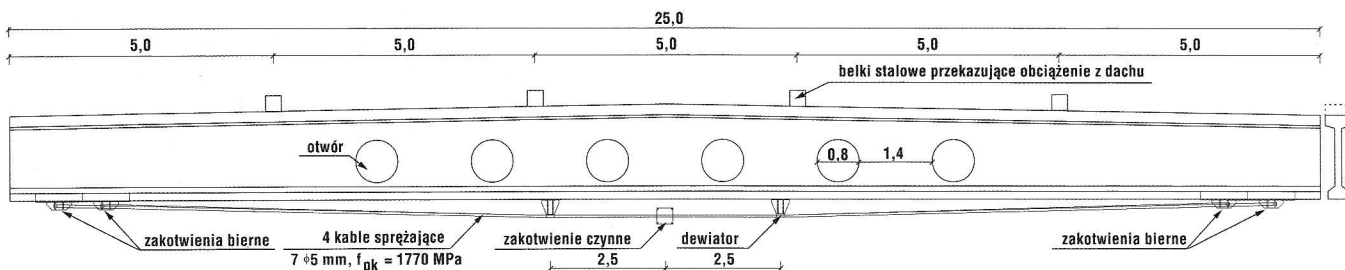
Rozważano dwie wersje wzmocnienia dźwigarów za pomocą cięgien sprężających. W pierwszej przewidywano zamocowanie zakotwień na środku dźwigara w strefie podporowej, a w drugiej – umieszczenie cięgien poniżej pasa dolnego. Ze względu na cienki środnik i konieczność prowadzenia cięgien z boku środnika, co wymagałoby znacznego rozbudowania strefy zakotwień, wybrano drugą wersję (rys. 5). Wzmocnienie każdego dźwigara stanowią cztery cięgna 7ϕ 5 mm bez przyczepności, wyprowadzone z zakotwień biernych usytuowanych w strefie podporowej dźwigara i zamocowane w zakotwieniu czynnym w środku jego rozpiętości (rys. 6). Takie rozwiązanie było konieczne ze względu na brak możliwości przyłożenia pras naciągowych na końcu dźwigara. Mimośród cięgien sprężających uzyskano za pomocą dwóch dewiatorów stalowych, umożliwiających odgięcie trasy cięgien o 270 mm od linii prostej łączącej zakotwienia bierne. Wszystkie elementy stalowe zamocowane na dźwigarze były ocynkowane. Średnia długość cięgien między zakotwieniami biernymi wynosiła 22,1



Rys. 5. Zakotwienia bierne na dźwigarze dwuspawkowym



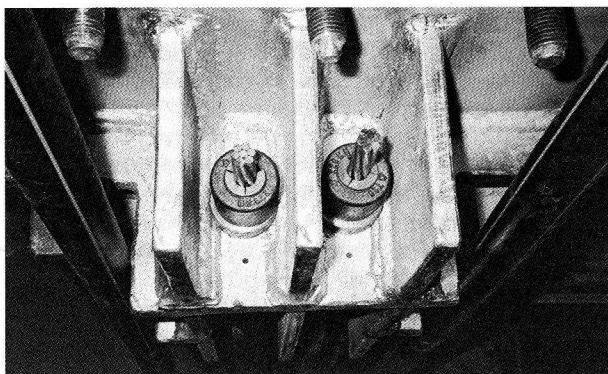
Rys. 4. Odkrytki: a) splotów sprężających w dźwigarze rozpiętości 27 m, b) zbrojenia zwykłego w dźwigarze rozpiętości 25 m (widziane w lustrze)



Rys. 6. Trasy cięgien sprężających na długości dźwigara dwuspawkowego oraz rozmieszczenie zakotwień i dewiatorów cięgien

m. Ciężna ocynkowane w osłonce z polietylenu zostały wprowadzone do zewnętrznej osłonki polietylenowej. Zastosowanie splotów ocynkowanych pozwoliło na rezygnację z iniekcji cementowej. Projektowana siła naciągu każdego ciężna wynosiła 200 kN.

W celu ułatwienia montażu na dużej wysokości, zakotwienie biernie zostało zaprojektowane z dwóch niezależnych elementów stalowych, każdy o masie około 80 kg. Łączna długość obu elementów stalowych zakotwienia biernego wynosiła 1,80 m, krawędź pierwszego elementu usytuowano w odległości 0,50 m od końca belki. W każdym elemencie zakotwiono po dwa ciężna. Przekrój poprzeczny zakotwienia ma kształt litery U, obejmującej powierzchnię dolną i dwie powierzchnie boczne pasa dolnego dźwigara. Na dolnej powierzchni blachy poziomej zaprojektowano układ stalowych żeberk równoległych i prostopadłych do osi belki (rys. 7). Tak ukształtowane żeberka stalowe tworzą gniazda, w których osadzano zakotwienia szczękowe pojedynczych splotów sprężających. Z uwagi na odchylenie trasy ciężgien zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej, pod każdym zakotwieniem szczękowym zastosowano podkładkę stalową o odpowiednim kącie nachylenia.



Rys. 7. Zakotwienia biernie ciężgien sprężających

Przekazanie siły sprężającej z zakotwienia na beton pasa dolnego dźwigara uzyskano dzięki zastosowaniu kotew klejanych Fisher Highbond FHB II M20 × 210/50 oraz kleju konstrukcyjnego Sikadur-30. Zastosowano kotwy zarówno o osi pionowej, jak i poziomej. Na ich rozmieszczenie w dużej mierze wpłynęła obecność silnego zbrojenia pasa dolnego dźwigara w postaci 6 prętów ϕ 28 mm. Kotwy pionowe wklejano w trzech rzędach wzdłuż osi belki, w rozstawie poprzecznym do osi belki wynoszącym 120 mm i w rozstawie podłużnym co 300 mm. Oś kotew poziomych usytuowano na wysokości 70 mm od dolnej krawędzi belki. Zastosowano po 3 kotwy w rozstawie 300 mm, po obu stronach każdego elementu zakotwienia stalowego. Osie kotew pionowych i poziomych były przesunięte względem siebie o 150 mm. Dodatkowo dolna powierzchnia belki oraz obie powierzchnie boczne w miejscach kontaktu z elementem stalowym zostały skute w celu zwiększenia przyczepności i zespolone z zakotwieniem za pomocą warstwy kleju konstrukcyjnego Sikadur-30.

W przypadku belek dylatacyjnych zastosowano sprężenie w postaci dwóch splotów typu 7 ϕ 5 mm. Z uwagi na brak dostępu do jednej z powierzchni bocznych pasa dolnego dźwigara, zwiększono długość zakotwienia z 900 do 1200 mm i skorygowano układ kotew klejanych. Kotwy pionowe Fisher Highbond FHB II M20 × 210/50 wklejano w trzech rzędach wzdłuż osi belki, w rozstawie poprzecznym do osi belki równym 120 mm i w rozstawie podłużnym – kolejno co 200, 200, 300, 200 mm. W układzie poziomym zastosowano 4 kotwy wklejane na jednej powierzchni bocznej w rozstawie 200, 250, 250 mm.

Ciężna wykonano ze stali ocynkowanej o $f_{pk} = 1770$ MPa i module sprężystości 190 GPa. Naciąg realizowano dwiema pra-

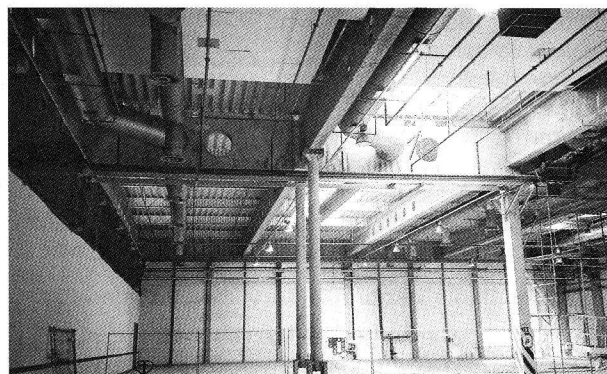
sami hydraulicznymi. Skutkowało to koniecznością dokonywania licznych przełożeń pras naciągowych na różne ciężna z dwóch stron zakotwienia czynnego w celu wyrównania siły sprężającej w każdym ciężnie. Ciężna były zamocowane w zakotwieniach szczękowych (por. rys. 7). Po zakończeniu naciągu ciężgien, zakotwienia zostały zabezpieczone ocynkowanymi kołpakami stalowymi mocowanymi do konstrukcji oporowej zakotwień. Puste przestrzenie pod kołpakami wypełniono smarem. Wszystkie rysy o rozwarości większej niż 0,2 mm zostały przed sprężeniem zainiektowane żywią epoksydową.

Wzmocnienie dźwigarów żelbetowych podłużnych (15 m)

Wszystkie dźwigary zostały wzmocnione dwiema taśmami z włókien węglowych (CFRP) o przekroju poprzecznym 50 × 1,2 mm i długości 11,30 m. Zastosowano taśmy niskomodułowe, o module sprężystości nie mniejszym niż 165 GPa. Każda z taśm została wstępnie naciągnięta siłą 60 kN. Przyjęto, że taśmy będą naciągane jednostronnie.

W celu odciążenia konstrukcji podczas jej wzmacniania, usunięto wodę z instalacji tryskaczowej oraz częściowo zdemontowano podwieszane do belek płyty pochłaniające dźwięki. Z uwagi na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa hali do momentu podwieszenia wsporników korytkowych, pośrednie belki poprzeczne (dźwigary jednospadowe i dwuspadowe) zostały podparte tymczasowymi słupami z rur stalowych (rys. 8). Słupy te na czas wzmacniania umożliwiały odciążenie dźwigarów podłużnych przez wprowadzenie siły 100 kN w każdym słupie. W wyniku odciążenia maksymalny obliczeniowy moment zginający został zmniejszony o 40% w stosunku do wartości ekstremalnej (uwzględniającej obciążenie śniegiem).

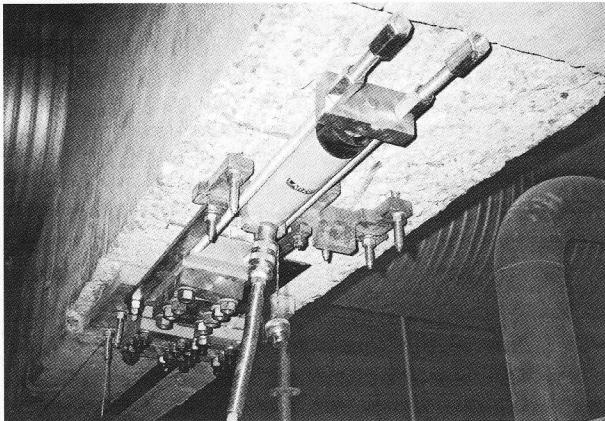
W analizie siły sprężającej przyjęto, że w zakotwieniach nie występuje poślizg taśm, a strata siły spowodowana tarciem taśm o trasie prostoliniowej, z naniesioną warstwą świeżego kleju, jest pomijalna. Zmniejszenie siły sprężającej wskutek tak odkształceń sprężystych betonu, jak i wpływu zjawisk reologicznych w materiałach było pomijalnie małe (siła jest wprowadzana po około 10 latach od zabetonowania, a relaksacja taśm CFRP przy tym stopniu wyężenia praktycznie nie występuje). W sytuacji obliczeniowej „po wzmocnieniu” przyjęto założenie, że element wzmocniony wstępnie naprężanymi taśmami z włókien węglowych jest elementem żelbetowym z dodatkowym zbrojeniem zewnętrznym, a w osi tego zbrojenia przyłożona została siła ściskająca. Analizę pracy takiego elementu w stanie granicznym nośności przeprowadzono metodą odkształceniową, zakładając, że w najbardziej wyężonym przekroju beton w strefie ściskanej, stal zbrojeniowa lub taśma CFRP osiągnie swoją graniczną odkształcalność. W analizie odkształceń przekroju uwzględniono wyężenie elementu w chwili wzmacniania. Całkowite odkształcenie w taśmie CFRP, będące sumą odkształcenia początkowego powstałego w trakcie naciągu taśmy ϵ_{L0} i przyrostu odkształceń powstałego w wyniku przyłoże-



Rys. 8. Widok konstrukcji hali i podpór tymczasowych odciążających dźwigary podłużne (15 m)

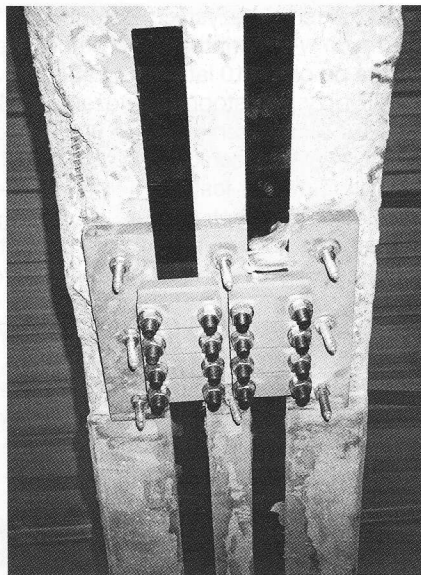
nia późniejszych obciążeń $\Delta\epsilon_L$, nie może przekroczyć obliczeniowej wartości granicznego wydłużenia podanego przez producenta (z uwzględnieniem częściowego współczynnika bezpieczeństwa). Dodatkowo, na podstawie wniosków z badań krajowych i zagranicznych, wprowadzono ograniczenie przyrostu odkształceń w taśmie $\Delta\epsilon_L$ do 0,5%. W wyniku zastosowanego wzmocnienia uzyskano zwiększenie nośności obliczeniowej przekroju.

Naciąg i kotwienie taśm zaprojektowano według „polskiego systemu sprężania” opracowanego przez dr. hab. inż. Marka Łagodę. W strefach zakotwień taśm (rys. 9 i 10) zaprojektowano wnęki do umieszczenia bloków oporowych tak, aby płyta podstawy zakotwienia tworzyła z powierzchnią dolną belki jedną płaszczyznę. Podstawę zakotwienia zamocowano za pomocą kleju i dodatkowo ośmioma kotwami chemicznymi M12. Zakotwienia stałe taśm sprężających zostały zaprojektowane indywidualnie.



Rys. 9. Podczas naciągu taśm CFRP

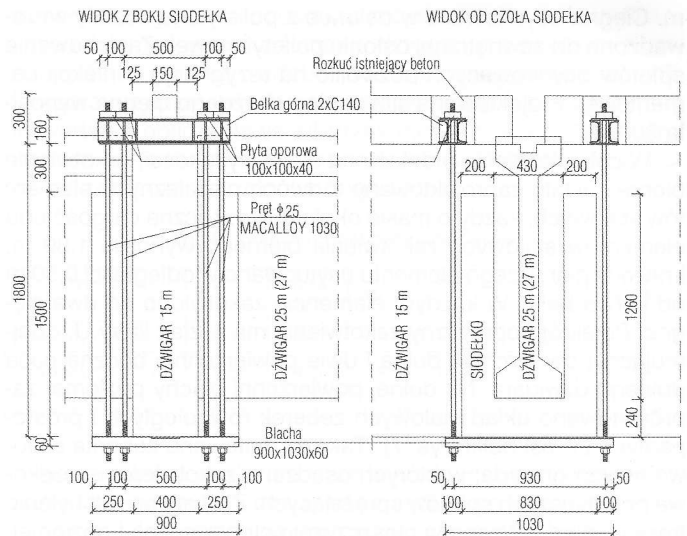
Do wprowadzenia siły naciągowej wykorzystano siłownik hydrauliczny oparty na elemencie oporowym przykręconym do belki za zakotwieniem czynnym. Taśma była stopniowo naprężana i mocowana w 4 etapach, w zakotwieniu ruchomym od strony czynnej oraz w zakotwieniu stałym od strony biernej. Po wprowadzeniu docelowej siły, taśma od strony czynnej została ostatecznie zamocowana w zakotwieniu stałym, a szczęki naciągowe (zakotwienie ruchome) zostały zdemontowane. Demontaż odbywał się w ściśle określonej kolejności tak, aby stopniowo zmniejszać docisk taśmy. Ostatecznie, luźne końcówki taśmy przyklejono do konstrukcji. Naciąg taśm wykonał zespół IBDiM. Strefy ścinania wzmocniono przez doklejenie mat CFRP.



Rys. 10. Zakotwienie taśm CFRP po naciągu

Wzmocnienie wspornika korytkowego (siodelka)

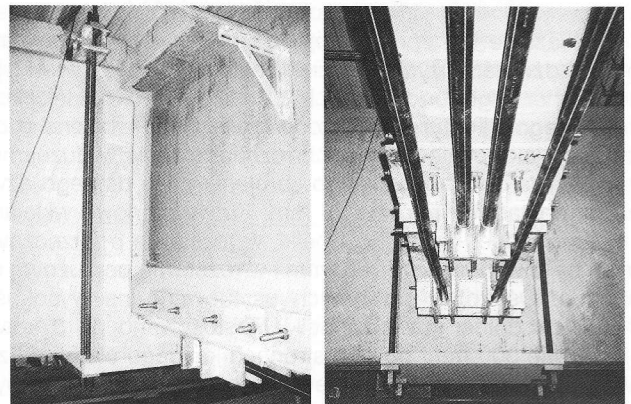
Pęknięcie siodelka wspornika korytkowego przekazującego obciążenie z dźwigarów poprzecznych (25 i 27 m) na dźwigary żelbetowe rozpiętości 15,0 m wzmocniono prętami sprężającymi Macalloy średnicy 25 mm oraz dodatkowymi elementami wspor-



Rys. 11. Konstrukcja wzmocnienia wspornika korytkowego (siodelka)

czymi. Rozwiązanie wzmocnienia oparcia dwóch dźwigarów na wspólnej belce podłużnej (15 m) przedstawiono na rys. 11.

Naciąg prętów, po uprzednim zgrubnym dokręceniu wszystkich nakrętek, wykonano wycechowanym kluczem dynamometrycznym, napinając najpierw po jednym pręcie w każdym narożu (począwszy od 2 prętów na jednej przekątnej), następnie pozostałe w narożnikach w podobnej kolejności. Siła naciągu jednego pręta wynosiła 25 kN. Po naciągu wykonano zabezpieczenie antykorozyjne wszystkich nie malowanych elementów stalowych. Przestrzeń między blachą stalową a dolną powierzchnią wspornika korytkowego wypełniono pod ciśnieniem zaczynem cementowym niskoskurczowym (rys. 12). Na rysunku 12 (część prawa) widać też zakotwienia bierne cięgien na dźwigarze dwuspadkowym.



Rys. 12. Wzmocnienie wspornika korytkowego (siodelka) prętami Macalloy

Uwagi końcowe

Zastosowane wzmocnienie konstrukcji przykrycia hali produkcyjnej przez sprężanie taśmami kompozytowymi, cięgnami zewnętrznymi i prętami Macalloy umożliwiło znaczące zwiększenie nośności wzmocnianych elementów oraz poprawę warunków stanów granicznych użytkowości. Takie rozwiązanie umożliwiło w krótkim czasie zrealizowania wzmocnienia elementów konstrukcyjnych hali, z ograniczoną ingerencją w konstrukcję nośną i instalacje znajdujące się w hali. W ciągu 3 miesięcy wzmocniono 21 dźwigarów poprzecznych i 20 podłużnych, wraz ze wspornikami korytkowymi, przy częściowym wyłączeniu produkcji. Cały remont był podzielony na 4 etapy, wynikające z istnienia 4 linii produkcyjnych, które w okresie wyłączenia z produkcji były konserwowane.