

ARTEM CZKWIANIANC*, JAN KOZICKI**, TADEUSZ URBAN***

ŻELIWNE BELKI W XIX-WIECZNYCH BUDYNKACH PRZEMYSŁOWYCH

CAST-IRON GIRDERS IN INDUSTRIAL BUILDINGS FROM THE NINETEENTH-CENTURY

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania dwóch żeliwnych dźwigarów z obiektu przemysłowego zbudowanego w XIX w. - budynku przędzalni fabryki Poznańskiego w Łodzi. Budynek jest aktualnie modernizowany z zachowaniem oryginalnej konstrukcji pochodzącej z wieku XIX. Celem badań belek żeliwnych było określenie ich nośności a badania przeprowadzone zostały w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Łódzkiej.

Słowa kluczowe: obiekt przemysłowy, dźwigary żeliwne, nośność, badania

Abstract

The paper presents an investigation of two cast-iron girders from the end of the nineteenth-century. The length of each girder was 5.95 m. Girders served as the main load bearing floor beams in Poznanski spinning factory in Lodz.

At present, building of farmer spinning factory is modernised with the preservation of the unique construction from the end of the nineteenth-century. The main object of this investigation was an estimation of allowable load bearing capacity of these cast-iron girders.

Investigations were made in Civil Engineering Laboratory of Technical University in Lodz. Laboratory is accredited by PC A, certification No AB536.

Keywords: industrial object, cast-iron girders, bearing capacity, experimental researches

* Prof. dr hab. inż. – Politechnika Łódzka

** Doc. dr inż. – Politechnika Łódzka

*** Dr hab. inż. – Politechnika Łódzka

1. Wstęp

Przełom XVIII i XIX wieku to początki rewolucji przemysłowej, która wymagała budowy nowych, niespotykanych na dotychczasową skalę, obiektów przemysłowych. Do 1780 roku podstawową formą konstrukcji wielokondygnacyjnych budynków przemysłowych i magazynowych są stropy drewniane, których belki są rozpięte pomiędzy murowanymi ścianami podpartymi dodatkowo dwoma lub trzema rzędami słupów również drewnianych. Rozpiętość belek pomiędzy słupami i ścianami wynosiła od 3 do 4 m. Ta szkieletowa konstrukcja nie była odporna na ogień. Pożary w fabrykach zagrażały nie tylko robotnikom, ale również wytwarzanym drogim materiałom, maszynom i samym budynkom. Łatwopalne materiały, takie jak włókna bawełny lub kurz, w połączeniu z oparami oleju używanego do smarowania maszyn, z otwartym płomieniem lamp oświetlenia i czasami z iskrami wytwarzanymi przez metalowe maszyny, stwarzały środowisko sprzyjające eksplozywnemu wybuchowi pożarów.

Szkieletowa konstrukcja stwarzała dodatkowo nowy rodzaj zagrożenia, który nie występował w budynkach z murowanymi ścianami nośnymi, polegający na rozprzestrzeniającej się katastrofie. Zniszczenie lokalne jednego słupa na dolnej kondygnacji powodowało zawalenie się wszystkich kondygnacji znajdujących się powyżej. Taki wypadek miał miejsce w marcu w 1791 roku w londyńskiej fabryce „Albion Flour Mill” zaprojektowanej przez Samuela Wyatta i uchodzącej wówczas za wybitny obiekt przemysłowy.

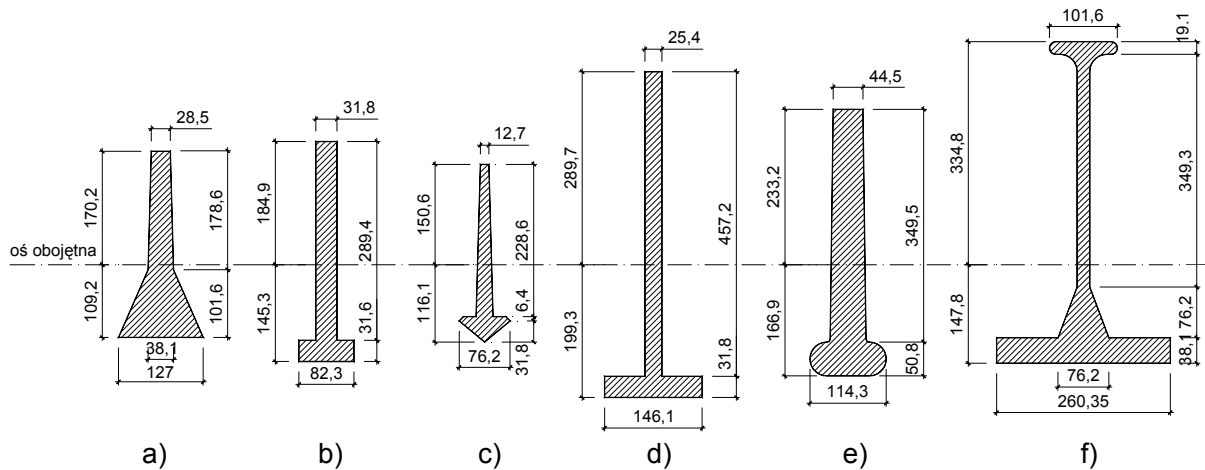
Niszczycielskie działanie pożarów, jak również naciski firm ubezpieczeniowych spowodowały poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych odpornych na pożar. W 1789 r. angielski inżynier W. Jessop opatentował kształt żeliwnej belki w formie brzucha ryby („fish-belly”), który nawiązywał do wykresów momentów zginających w belce swobodnie opartej. Dociekania jego wynikały raczej z praktycznych doświadczeń niż naukowych rozważań, co było powszechną praktyką w tych czasach.

Inaczej do problemu podszedł Eaton Hodgkinson, angielski matematyk, którego celem było stworzenie modelu belki zginanej poddanej poprzecznemu obciążeniu. Zakładał on, że za pomocą tego modelu można byłoby przewidywać wielkości ugięć i obciążeń granicznych dla dowolnego kształtu przekroju poprzecznego belki. Model ten powinien uwzględniać wyłącznie fizyczne właściwości materiału (sztywność – moduł Younga i wytrzymałość), wielkość obciążeń i wymiary belki. Ambicją jego było wyeliminowanie jakichkolwiek empirycznych parametrów. W pracach swych Hodgkinson wykorzystał osiągnięcia swych wielkich poprzedników, do których należy zaliczyć: Galileusza, Hooke’a, Mariotte’a, Eulera, Coulomba, Younga i Naviera.

W praktyce pierwszą żeliwną belkę w budynku zastosował Charles Bage (1751÷1822) w 1796 r. Od tego momentu wielu inżynierów angielskich poszukiwało optymalnego kształtu belki minimalizującego zużycie materiału. Z pośród zastosowanych wówczas belek, na szczególną uwagę zasługuje zaprojektowana przez angielskiego wynalazcę, konstruktora i przemysłowca Williama Fairbairna (1789÷1874), który wykorzystując teoretyczne prace Hodgkinsona zmniejszył zużycie żeliwa od 20 do 30% w stosunku do ówczesnie stosowanych rozwiązań. W belce tej oprócz niesymetrycznego przekroju z dużą dolną półką, mamy po raz pierwszy zastosowaną półkę górną przewidzianą na efekt zwirzenia.

2. Opis konstrukcji budynku

Budynek dawnej przędzalni fabryki Poznańskiego w Łodzi był zbudowany w końcu XIX w. Jest to obiekt o pięciu kondygnacjach naziemnych, częściowo podpiwniczony, ze ścianami murowanymi i stropami odcinkowymi wspartymi na żeliwnych dźwigarach i ścianach zewnętrznych. Żeliwno-stalowy szkielet budynku pokazano na rys. 2. Stanowią go żeliwne słupy usytuowane na siatce 6 na 3,27 m, dźwigary żeliwne o rozpiętości 6 m i stalowe żebra o przekroju poprzecznym w kształcie szyny kolejowej w rozstawie co około 0,86 m. Żebra te opierają się na żeliwnych podciągach w specjalnie ukształtowanych gniazdach na obu jego bokach. Widok fragmentu stropu od dołu pokazano na rys. 3. Na rysunku 4 pokazano detal oparcia żeliwnych dźwigarów na słupach. Stop nad najwyższą kondygnacją był bez stalowych zeber. Ceglane łuki o rozpiętości 3,27 m wspierały się bezpośrednio na żeliwnych stopkach podciągów. Rozpór z tych łuków przejmowany był przez stalowe ściągi biegnące prostopadłe do osi dźwigarów. Na rysunku 5 pokazano konstrukcję szkieletu najwyższej kondygnacji po wyburzeniu ceglanych łuków.



Rys. 1. Przekroje belek żeliwnych stosowanych w wielokondygnacyjnych budynkach przemysłowych w Anglii w latach 1796÷1834:

- Castle Foregate 1796 – Charls Bage, długość przęsła - 2,90 m, rozpiętość łuku sklepień ceglanych – 3,20 m,
- Salford 1800 – Boulton & Watt, długość przęsła – 4,27 m, rozpiętość łuku – 2,74 m,
- Belper North Mill 1803 – William Strutt, długość przęsła – 2,74 m, rozpiętość łuku – 2,13 m,
- Armley Mill 1823, przęsło belki – 6,78 m, rozpiętość łuku – 2,59 m,
- Carll Mills 1824, przęsło belki – 7,62 m,
- Orrell's Mill 1834, William Fairbairn, przęsło belki - 7,62 m, rozpiętość łuku – 2,79 m.

Fig. 1. Cast-iron girders cross-sections used for multi-storey industrial buildings in England within the years 1796÷1834



Rys. 2. Żeliwno – stalowy szkielet budynku
Fig. 2. Cast-iron and steel skeleton of building

Budynek znajdujący się obecnie w kompleksie Manufaktura w Łodzi jest w trakcie modernizacji. Stąd zaszła potrzeba wykonania sprawdzających badań niszczących w celu określenia nośności konstrukcji stropu. Ponieważ konstrukcja stropodachu była przewidziana do demontażu to nadarzyła się okazja do wykonania badań niszczących jej elementów.



Rys. 3. Widok stropu
Fig. 3. View of the floor



Rys. 4. Detal oparcia żeliwnych dźwigarów na słupie
Fig. 4. Detail of the support zone of cast-iron girders over the column

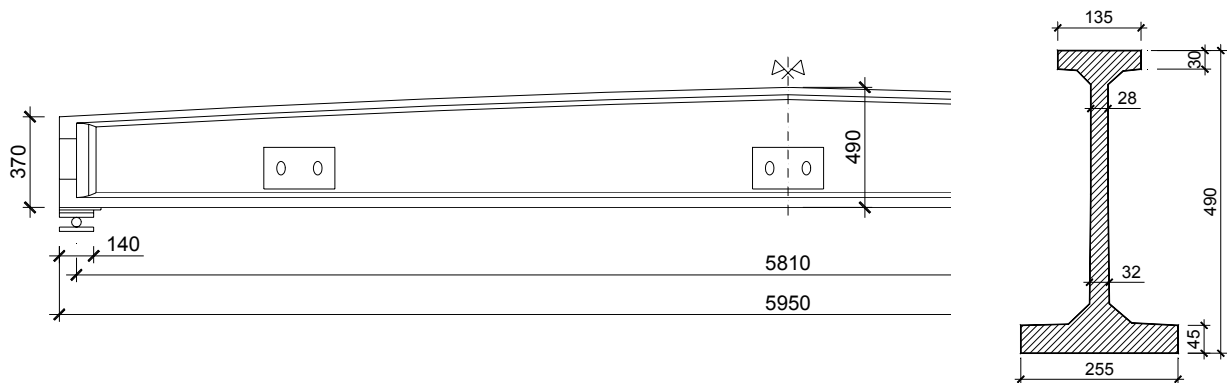


Rys. 5. Szkielet konstrukcji piątej kondygnacji
Fig. 5. Skeleton of the structure of the fifth floor

3. Opis badań

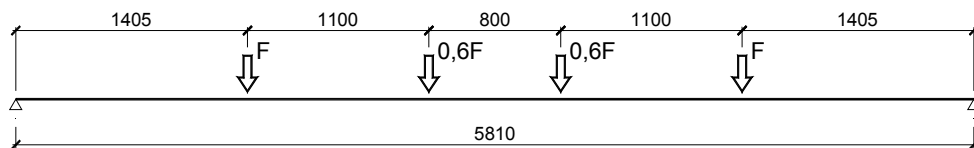
Badania przeprowadzono na dwóch belkach, których podstawowe wymiary pokazano na rys. 6. Przyjęty schemat statyczny belki jednoprzęsłowej podpartej na dwóch podporach rolkowych, z zablokowanym przesuwem jednej z nich pokazano na rys. 7. Jako obciążenie przyjęto cztery siły skupione. Rozmieszczenie sił na długości belki i ich wartości przyjęto przy założeniu, że wykres momentów zginających będzie odpowiadał wykresowi momentów od obciążenia równomiernie rozłożonego. Oś rolkowych podpór usytuowano 70 mm od czoła dźwigara, zatem rozpiętość belki była równa 5,81 m.

Badania przeprowadzono w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. Widok stanowiska badawczego z jedną z badanych belek pokazano na rys. 8.



Rys. 6. Dźwigar żeliwny - podstawowe wymiary

Fig. 6. Cast-iron girder – basic dimensions



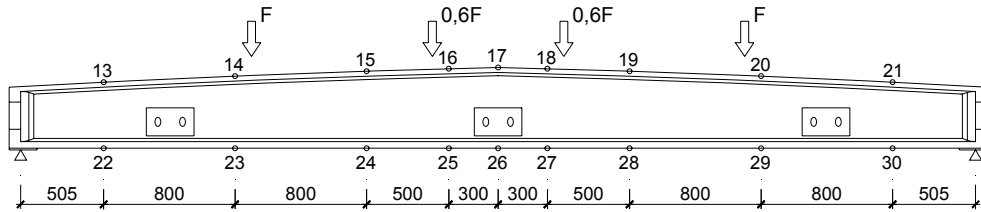
Rys. 7. Schemat statyczny belki

Fig. 7. Static scheme for the beam



Rys. 8. Stanowisko badawcze w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej

Fig. 8. Laboratory stand at the Civil Engineering Laboratory of Technical University in Lodz



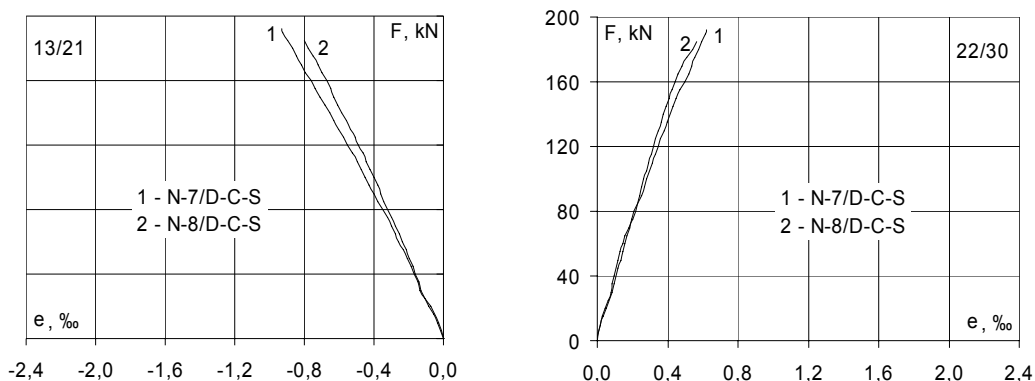
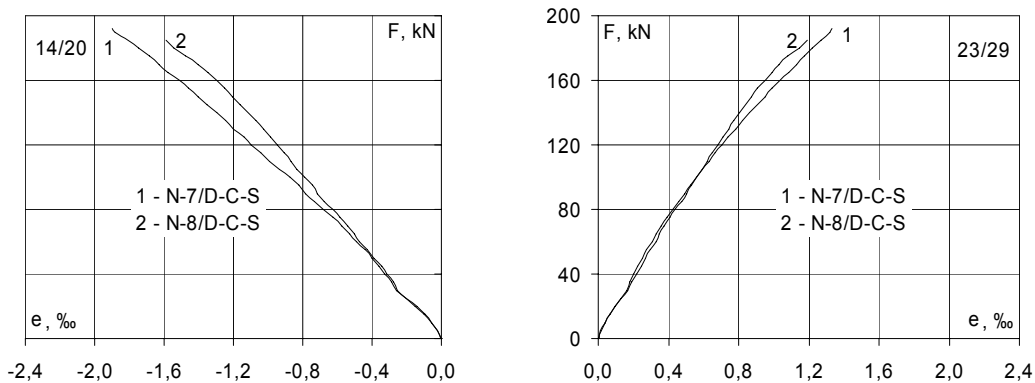
Rys. 9. Rozmieszczenie czujników elektrooporowych do pomiarów odkształceń

Fig. 9. Arrangement of gauges for strain measurements

Podczas badań prowadzono pomiary przemieszczeń (jedynie dla belki N-8/D-C-S) oraz pomiary odkształceń w skrajnych włóknach charakterystycznych przekrojów pasa górnego i dolnego. Pomiary te wykonywano za pomocą czujników indukcyjnych o zakresie do 50 mm. Pomiar odkształceń był prowadzony za pomocą tensometrów elektrooporowych o bazie 5 mm i oporności 350 Ω . Usytuowanie tensometrów elektrooporowych na pasie górnym i dolnym pokazano na rys. 9. Obciążenie było realizowane ze stałym przyrostem siły z prędkością 1 kN/8 s, przy czym dla kontroli zachowania się dźwigara stosowano krótkie przerwy w obciążaniu przy siłach 30, 60, 90, 120, 150 i 180 kN.

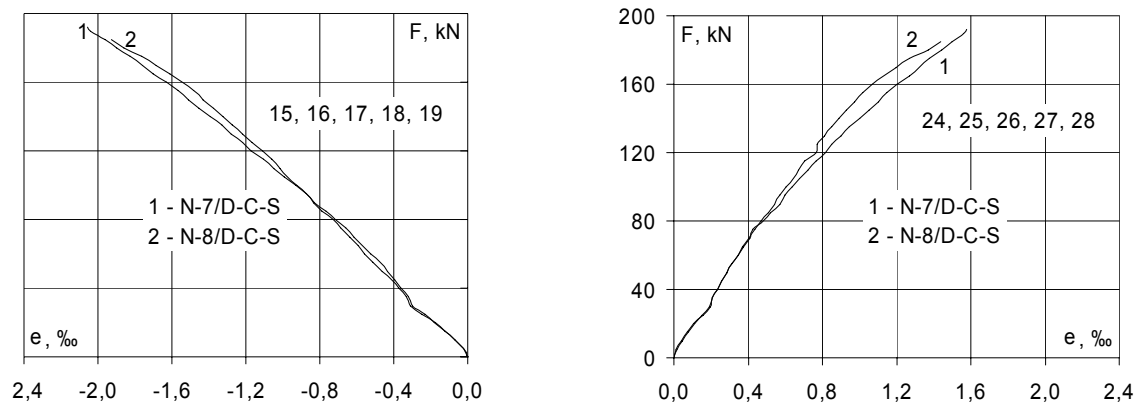
4. Analiza wyników badań

Pomiary odkształceń były prowadzone w przekrojach symetrycznie rozstawionych w odniesieniu do środka rozpiętości dźwigara. Ze wstępnej analizy wyników okazało się, że w odpowiadających sobie przekrojach zależności siła – odkształcenie są prawie jednakowe. Przyjęto zatem do analizy wartości uśrednione. Na rysunku 10 pokazano wartości odkształceń w przekroju usytuowanym w odległości 0,505 m od podpory. Wartości odkształceń pod obciążeniem niszczeniowym wynosiły około 0,8 ‰ w pasie górnym (ściskanie) i około 0,6 ‰ w pasie dolnym (rozciąganie).

Rys. 10. Zależność $F - \varepsilon$ (przekrój 0,505 m)Fig. 10. Relationship $F - \varepsilon$ (cross-section 0,505 m)Rys. 11. Zależność $F - \varepsilon$ (przekrój 1,305 m)Fig. 11. Relationship $F - \varepsilon$ (cross-section 1,305 m)

Na rysunku 11 pokazano wartości odkształceń w przekroju usytuowanym w odległości 1,305 m od podpory. W dźwigarze N-8/D-C-S odkształcenia przy zniszczeniu w tym przekroju były równe 1,6 ‰ w pasie górnym i 1,2 ‰ w pasie dolnym, w dźwigarze N-7/D-C-S wynosiły odpowiednio 1,9 ‰ (ściskanie) i 1,3 ‰ (rozciąganie).

Odkształcenia pomierzone na pozostałych bazach zarówno w pasie górnym, jak i dolnym, tzn. na całym środkowym odcinku dźwigara równym ponad 1,6 m były dla danego poziomu wyężenia prawie jednakowe. Dlatego postanowiono uśrednić pomiary z czujników usytuowanych na tym odcinku dla obu belek, a wyniki tego zabiegu pokazano na rys. 12. Charakter tych zależności jest wyraźnie krzywoliniowy, co świadczy o zmiennym, malejącym w miarę wzrostu odkształceń, module sprężystości żeliwa. Zniszczenie elementu następowało przy odkształceniach w strefie ściskanej równych dla dźwigara N-7/D-C-S - 2,1 ‰, a dla dźwigara N-8/D-C-S - 1,8 ‰, w strefie rozciąganej odpowiednio 1,6 ‰ i 1,4 ‰.



Rys. 12. Zależność $F - \epsilon$, wartości średnie (środkowy odcinek dźwigara)

Fig. 12. Relationship $F - \epsilon$ - mean values (middle section of girder)

Moduł sprężystości żeliwa można było określić na podstawie pomierzonych odkształceń. Taką analizę przeprowadzono zarówno dla naprężeń ściskających (strefa ściskana), jak i rozciągających (strefa rozciągana). Z pomiarów wykonanych dla odcinka środkowego belek (rys. 12) wynika, że moduł sprężystości zarówno przy rozciąganiu, jak i ściskaniu wynosi około 100 GPa. To oszacowanie potwierdziły badania przeprowadzone na próbkach z belek żeliwnych pobranych po zniszczeniu elementów (tabl. 1). Materiał do badań wytrzymałościowych pobrano ze środków dźwigarów.

T a b e l a 1

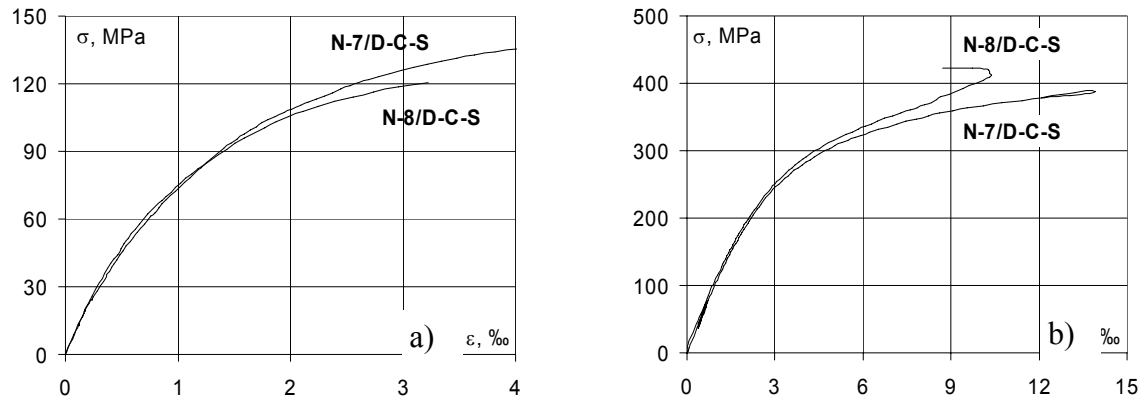
Wyniki badań wytrzymałościowych żeliwa

Dźwigar	Próba rozciągania			Próba ściskania		
	Wytrzymałość [MPa]		Moduł sprężystości [GPa]	Wytrzymałość [MPa]		Moduł sprężystości [GPa]
	wyniki	średnia		wyniki	średnia	
N-7/D-C-S	136	132	100	532	536	100
	124			544		
	136			530		
N-8/D-C-S	124	123	100	510	516	100
	121			516		
	125			524		

Wytrzymałość żeliwa na rozciąganie badano na próbkach walcowych o \varnothing 16 mm z przewężeniem w części środkowej do 13 mm. Długość części przewężonej wynosiła 130 mm, a całej próbki 290 mm. Zależność $\sigma - \epsilon$ określono na podstawie pomiarów tensometrycznych. Na dwóch próbkach (po jednej z każdego dźwigara) w części środkowej naklejono po dwa tensometry elektrooporowe o bazie 5 mm.

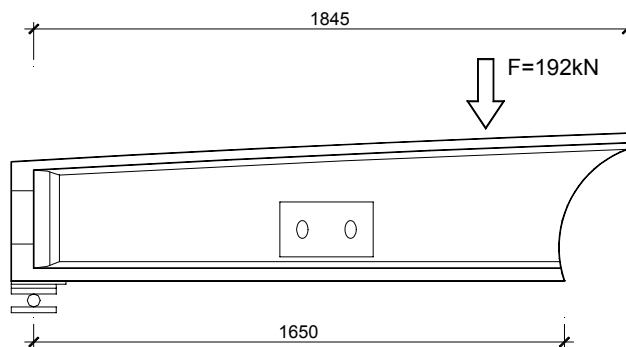
Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-57/H-04320 („Próba statyczna ściskania metali”). Próbę zwykłą wykonano na walcach o stosunku $h/d = 1,5$ (wysokość próbki $h = 37,5$ mm, średnica $d = 25$ mm). Zależność $\sigma - \varepsilon$ przy ściskaniu określono na próbkach o średnicy 25 mm i wysokości 200 mm ($h/d = 8$). Pomiar odkształceń przeprowadzono za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych przyklejonych w połowie wysokości próbki i równomiernie rozmieszczonych na obwodzie.

Na rysunku 13 pokazano zależności $\sigma - \varepsilon$ dla rozciągania i ściskania, które w obu przypadkach okazały się krzywoliniowe. Moduł sprężystości podany w tabl. 1 określono jako sieczny dla przedziału naprężeń od 0 do $0,4f_m$.



Rys. 13. Zależność $\sigma - \varepsilon$: a) dla rozciągania, b) dla ściskania
Fig. 13. Relationship $\sigma - \varepsilon$: a) for tension, b) for compression

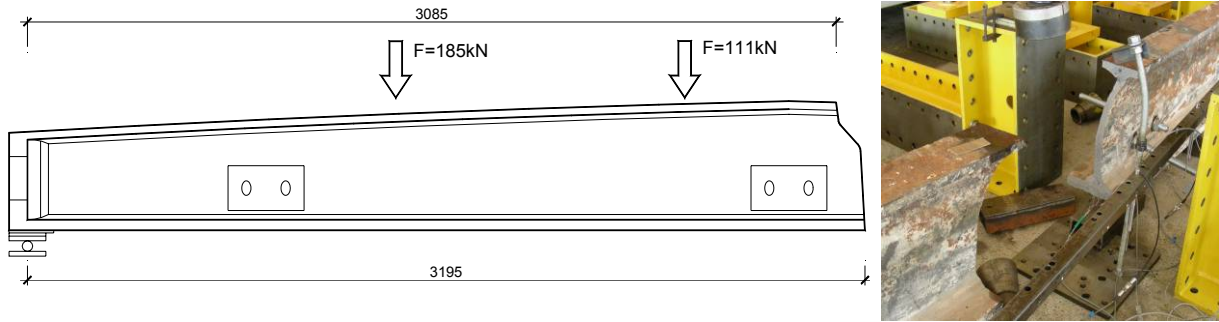
Dźwigar N-7/D-C-S uległ zniszczeniu przy sile $F = 192$ kN. Zniszczenie nastąpiło w przekroju usytuowanym w odległości 1,845 m od podpory. Obraz zniszczenia, wymiary elementu w przekroju zniszczenia pokazano na rys. 14.



Rys. 14. Dźwigar N-7/D-C-S – obraz zniszczenia
Fig. 14. Girder N-7/D-C-S – failure mode

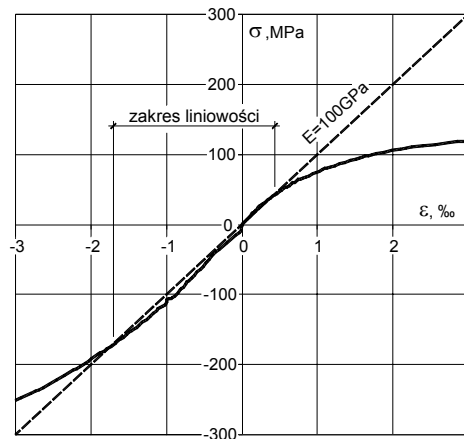
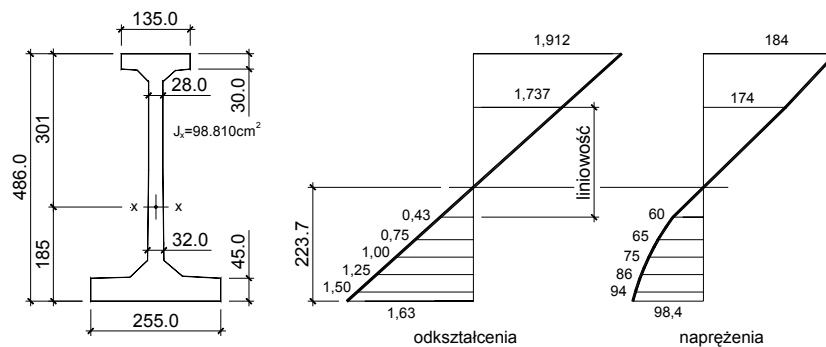
Dźwigar N-8/D-C-S uległ zniszczeniu przy sile $F = 185$ kN. Zniszczenie nastąpiło w przekroju usytuowanym w odległości 3,085 m od podpory. Obraz zniszczenia, wymiary elementu w przekroju zniszczenia pokazano na rys. 15.

Dźwigary zniszczyły się przy siłach $F = 192$ kN i 185 kN. Dla tych sił niszczących maksymalne momenty w środku rozpiętości wynoszą odpowiednio 564,5 kNm i 544 kNm, a odpowiednie obciążenie niszczące równomiernie rozłożone 134 kN/m i 129 kN/m, przy czym jest to obciążenie ponad ciężar własny dźwigara.



Rys. 15. Dźwigar N-8/D-C-S – obraz zniszczenia

Fig. 15. Girder N-8/D-C-S – failure mode

Rys. 16. Zależność $\sigma - \varepsilon$ dla żeliwa rozciąganego pobranego z dźwigara N-8/D-C-SFig. 16. Relationship $\sigma - \varepsilon$ in tension for cast-iron taken from girder N-8/D-C-S

Rys. 17. Analiza odkształceń i naprężeń w przekroju zniszczenia dźwigara N-8/D-C-S

Fig. 17. Strain and stress analysis in the failure cross-section of girder N-8/D-C-S

Na rysunku 16 pokazano zależność $\sigma - \varepsilon$ dla żeliwa rozciąganego pobranego z dźwigara o symbolu N-8/D-C-S. Widać na nim, że dla zakresu odkształceń $0,43 \div -1,74$ % zależność ta jest liniowa. Na rys. 17 pokazano analizę przekroju odpowiadającego pomiarom tensometrów 18/27, (przekrój zniszczenia) dźwigara w stanie granicznym. Na krawędzi rozciąganej odnotowano odkształcenia 1,63 %, a na krawędzi ściskanej 1,91 %. Przyjmując hipotezę płaskich przekrojów połączone te dwa skrajne punkty. Posługując się dalej zależnością $\sigma - \varepsilon$ z (rys. 16) ustalono przebieg naprężeń na wysokości dźwigara. Część środkowa przekroju zachowuje zakres pracy liniowej, a skrajne włókna belki znajdują się już w zakresie zależności $\sigma - \varepsilon$ nieliniowej. Miejsce zerowania się naprężeń położone jest wyżej od środka ciężkości przekroju. Ważną informacją wynikającą z badań belki N-8/D-C-S jest fakt, że nie osiągnięto wytrzymałości materiału na rozciąganie ($98,4 < 123$ MPa). Osiągnięte naprężenia wynoszą tylko około 80% wytrzymałości uzyskanej w próbie rozciągania. Fakt ten można tłumaczyć niejednorodnością

materiałową żeliwa. Na powierzchni dźwigarów można było zauważyć liczne imperfekcje wynikające z niedoskonałości procesu technologicznego (patrz rys. 18).



Rys. 18. Krawędź górnej półki dźwigara z widocznymi niedoskonałościami odlewniczymi

Fig. 18. Edge of the upper flange of girder with visible casting imperfections

5. Podsumowanie

Siły niszczące uzyskane z badań obu dźwigarów nie różniły się znacząco ($F = 192$ kN i 185 kN) choć przekroje zniszczenia usytuowane były w różnej odległości od osi podpory. Ta sytuacja jest konsekwencją celowego zaprojektowania i wykonania dźwigarów o zmiennej wysokości przekroju (krzywoliniowy pas górny przekroju dwuteowego).

Zniszczenie nastąpiło w sposób gwałtowny i nie było sygnalizowane znaczącym przyrostem ugięć. Obciążenie niszczące (równomiernie rozłożone, bez uwzględnienia ciężaru własnego) można oszacować na około 130 kN/m. Przy uwzględnieniu rozstawu dźwigarów wynoszącym $3,27$ m, można oszacować obciążenie krytyczne dla stropu na około 40 kN/m².

L i t e r a t u r a

Większość informacji historycznych przedstawionych w artykule zaczerpnięto z pracy:

- [1] A d d i s B., Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction. Phaidon Press Limited –2007, ss. 640.