



Wojciech Chruściel *
Przemysław Więch**

BADANIA ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH O PRZEKROJU PIERŚCIENIOWYM

W artykule przedstawiono metody badań elementów żelbetowych o przekroju pierścieniowym. Opisano stanowiska badawcze, metody pomiaru odkształceń na betonie i stali oraz podano wyniki badań dotyczące zbadanych elementów. W podsumowaniu wskazano podstawowe warunki przyjęcia odpowiedniej metody badawczej.

1. Wstęp

Elementy żelbetowe mimośrodowo ściskane o przekroju pierścieniowym są często stosowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym w budownictwie. Przykładami tego rodzaju elementów mogą być wieże telekomunikacyjne i widokowe, kominy przemysłowe, słupy oświetleniowe [1], [2], żerdzie elektroenergetyczne [3], [4], słupy. W wyniku działania obciążeń i wpływów zewnętrznych w przekrojach rozpatrywanych elementów występują siły wewnętrzne w postaci momentu zginającego M i siły podłużnej N , wywołujące naprężenia normalne σ .

Badania elementów o przekroju pierścieniowym w warunkach laboratoryjnych prowadzone są dwiema metodami:

1) element ustawiony w pozycji poziomej i obciążony siłą w wierzchołu (najczęstszy schemat badawczy dla żerdzi wirowanych) [2], [5–9],

2) element ustawiony w pozycji pionowej i obciążony mimośrodowo [10].

W opracowaniu opisano metody badań oraz uzyskane wyniki dotyczące elementów o przekroju pierścieniowym badanych metodą pierwszą i drugą.

* dr inż. – Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych ITB

** jw.

2. Badania sprężonych żerdzi elektroenergetycznych

Zaplanowano badania dwóch żerdzi elektroenergetycznych poddanych zginaniu. Z uwagi na znaczną długość przedmiotowych słupów ($L = 9$ m) testy przeprowadzane były w pozycji horyzontalnej. Badania żerdzi elektroenergetycznych o utwierdzonej dolnej części wykonywane są na ogół przy jedno- lub dwupunktowym oparciu części zasadniczej. Ze względu na znaczną masę elementów – około 1,2 tony, wyniki tego rodzaju doświadczeń obarczone są istotnymi błędami.

Metodyka badań polegająca na kompensacji masy części wspornikowej za pomocą swobodnych wieszaków pozwala na uniknięcie błędów oraz zarysowań występujących przy zastosowaniu metody tradycyjnej.

W wykonywanym badaniu wytrzymałościowym wykorzystano żerdzie elektroenergetyczne typu E9/6 o znamionowej sile wierzchołkowej 6 kN i długości 9 m.

Dostarczone elementy do badań pochodziły z przemysłowej wytwórni sprężonych, strunobetonowych żerdzi z betonu wirowanego. Siła sprężająca, według danych producenta, wynosiła 50 kN dla jednego drutu.

Dokładne oględziny poszczególnych elementów doświadczalnych nie wykazały występowania żadnych rys ani uszkodzeń mechanicznych. Przed badaniem wykonano inwentaryzację wymiarową, która obejmowała kontrolne pomiary długości elementów, średnice zewnętrzne przekroju poprzecznego oraz grubość ścianki na obydwu końcach.

Żerdzie, zgodnie z deklaracją zgodności, zostały wykonane z betonu wirowanego klasy C40/50, o ustalonych właściwościach.

Dostarczone elementy zazbrojone były stalą sprężającą oraz stalą miękką.

Stal sprężającą stanowiło 10 drutów o średnicy 7,5 mm każdy, wytrzymałości charakterystycznej 1670 MPa oraz module sprężystości 205 GPa.

Stal miękka miała postać 4 prętów o średnicy 8 mm, długości 4 m, klasy A-IIIN, granicy plastyczności 500 MPa oraz wytrzymałości charakterystycznej na rozciąganie 550 MPa.

Zbrojenie poprzeczne stanowiła spirala z drutu gładkiego zimnowalcowanego o średnicy 3,5 mm, klasy A-IIIN.

2.1. Opis badań żerdzi elektroenergetycznych

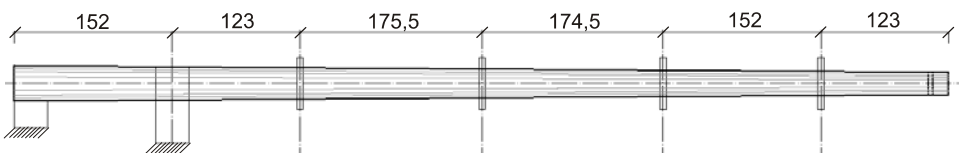
Stanowisko do badań żerdzi elektroenergetycznych ustawiono na stendzie w Laboratorium Badań Wytrzymałościowych Instytutu Techniki Budowlanej. Część odziomkowa była zamocowana w specjalnie do tego celu przygotowanych uchwytach (fot. 1 i 2), na długości 1,75 m. Ciężar wspornikowej części żerdzi był zrównoważony grawitacyjnie, za pomocą ciężarów. Całe obciążenie rozłożono na czterech swobodnych wieszakach (rys. 1 i 2, fot. 3).



Fot. 1. Widok podpory części odziomkowej
Photo 1. View of part of pole support



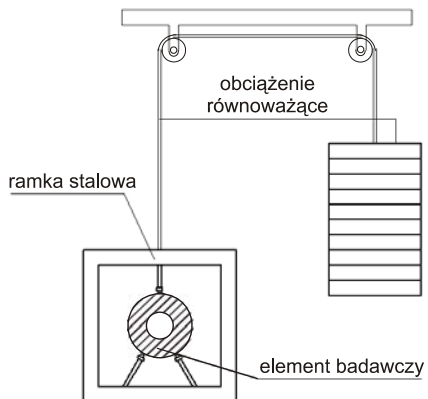
Fot. 2. Widok podpory części odziomkowej
Photo 2. View of part of pole support



Rys. 1. Rozstaw wieszaków do kompensacji obciążenia
Fig. 1. Spacing of hangers for load compensation



Fot. 3. Widok żerdzi z wieszakami
Photo 3. View of the pole with hangers



Rys. 2. Schemat wieszaka
Fig. 2. Scheme of the hanger

Badanie żerdzi na zginanie przeprowadzono przy użyciu siły skupionej przyłożonej 0,17 m od jej wierzchołka. Przyrost obciążenia przeprowadzony był za pomocą suwnicy łańcuchowej ręcznej, a jego pomiar realizowano z zastosowaniem siłomierza typu CL-14 o zakresie 50kN i dokładności pomiaru $\pm 1,0\%$ wartości mierzonej, firmy ZE-PWN, z częstotliwością 5 Hz (fot. 3).

Podczas obciążania żerdzi prowadzony był pomiar przemieszczeń pionowych w dwóch punktach – miejscu przyłożenia siły (0,17 m od wierzchołka) oraz 3,3 m od wierzchołka, za pomocą czujników linkowych (fot. 5 i 6). Dodatkowo prowadzono kontrolę przemieszczeń poziomych i pionowych w przekroju przypodporowym (fot. 4) za pomocą czujników indukcyjnych LVDT o zakresie pomiarowym ± 5 mm i ± 25 mm. Oprócz pomiaru siły oraz przemieszczeń na powierzchni betonu oraz stali sprężającej naklejono foliowe tensometry elektrooporowe o bazie 50 mm i 6 mm w celu pomiaru odkształceń. Rejestracja obciążeń, przemieszczeń i odkształceń odbywała się za pomocą systemu akwizycji danych MGCplus firmy HBM.

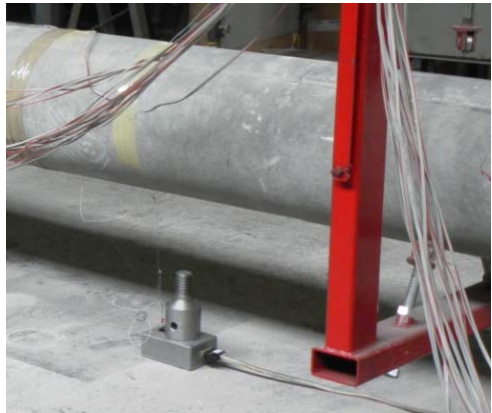


*Fot. 4. Czujniki przemieszczeń w przekroju przy podporze
Photo 4. Displacement sensors in support section*

*Fot. 5. Czujnik przemieszczeń
w miejscu przyłożenia siły*
*Photo 5. Displacement sensor at the point
of force application*



*Fot. 6. Czujnik przemieszczeń w odległości
3,3 m od wierzchołka*
*Photo 6. Displacement sensor at a distance
of 3,3 m from the top of the pole*

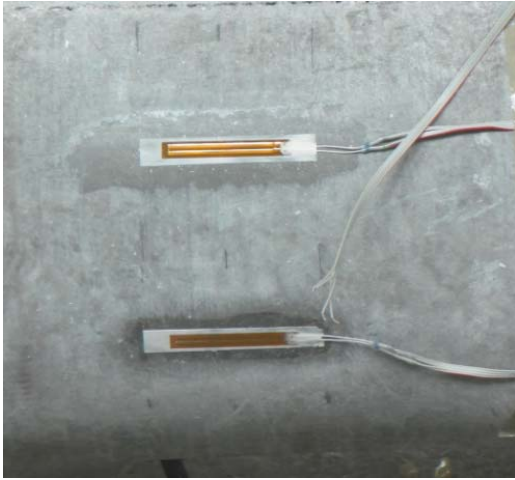


Tensometry elektrooporowe naklejono w trzech przekrojach żerdzi:

- 6 tensometrów typu K-LY41-50/120 o bazie pomiarowej 50 mm na betonie w przekroju oddalonym o 2,18 m od szerszej części słupa,
- 6 tensometrów K-LY41-50/120 o bazie pomiarowej 50 mm na betonie w przekroju oddalonym o 3,87 m od szerszej części słupa,
- tensometry K-LY41-6/350 o bazie pomiarowej 6 mm na stali sprężającej w przekroju oddalonym o 5,65 m od szerszej części słupa.

Miejsca klejenia tensometrów na betonie zostały zeszlifowane mechanicznie. Następnie przy użyciu kleju X60 firmy HBM wykonano montaż czujników odkształceń (fot. 7).

W celu założenia tensometrów na stali sprężającej odkuto warstwę betonu, a następnie na oczyszczone druty naklejono, przy użyciu kleju M-Bond 200 firmy Vishay, tensometry foliowe o bazie 6 mm (fot. 8 i 9).



Fot. 7. Tensometry naklejone na powierzchni betonowej
Photo 7. Strain gauges pasted on the surface of concrete



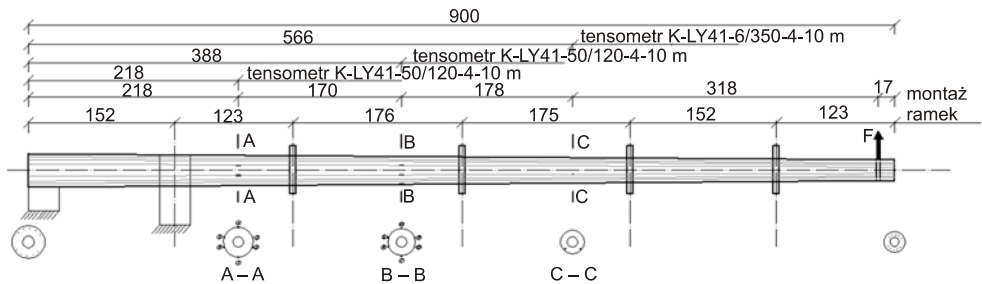
Fot. 8. Tensometr elektrooporowy naklejony na stali sprężającej – szczegół
Photo 8. Strain gauge pasted on prestressing steel – detail



Fot. 9. Tensometry elektrooporowe naklejone na stali sprężającej – widok ogólny
Photo 9. Strain gauges pasted on prestressing steel - general view

2.2. Wyniki badań żerdzi elektroenergetycznych

W trakcie badań żerdź obciążona była w sposób ciągły, aż do zniszczenia. Na rysunku 3 przedstawiono schemat badawczy żerdzi, a na fotografiach: widok ogólny elementu przygotowanego do testu (fot. 10), widok żerdzi po zniszczeniu oraz szczegóły zniszczenia (fot. 11–13). Zniszczenie nastąpiło w przekroju oddalonym o 0,8 m od krawędzi podpory (fot 11).



Rys.3. Schemat badawczy żerdzi
 Fig. 3. Research scheme of tested pole



Fot. 10. Widok ogólny żerdzi
 Photo 10. General view of the pole



Fot. 11. Zniszczenie żerdzi w strefie przy podporowej
 Photo 11. Destruction of the pole in support area



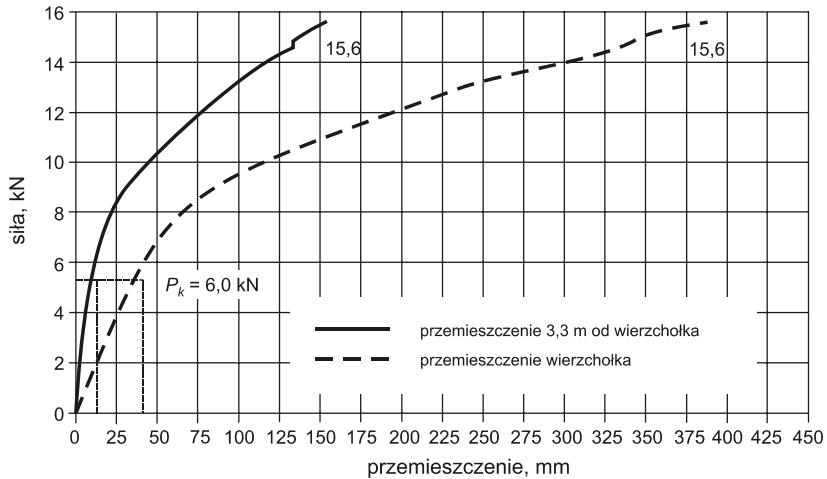
Fot. 12. Widok żerdzi po zniszczeniu (siła 15,6 kN)
 Photo 12. View of the pole after destruction (Force 15,6 kN)



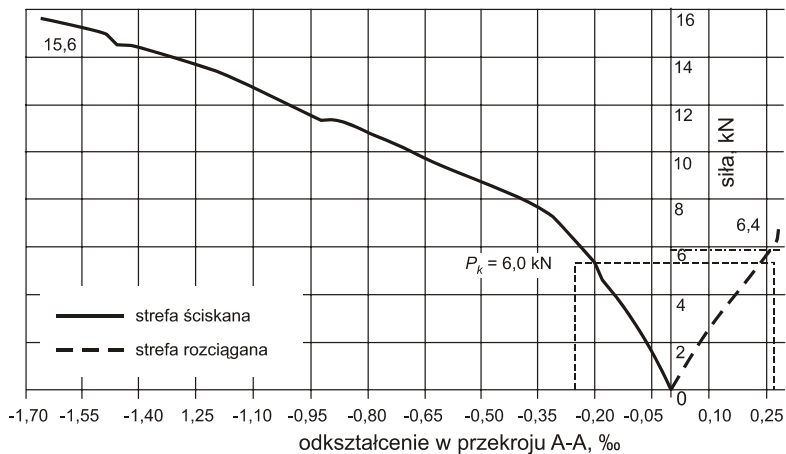
Fot. 13. Zarysowania żerdzi w strefie przy podporowej
 Photo 13. Cracks of the pole in support area

Podczas badania, przy obciążeniu przekraczającym znamionową siłę wierzchołkową $P_k = 6$ kN, zarejestrowano pojawienie się zarysowań w przekroju A-A, w strefie przy-
podporowej.

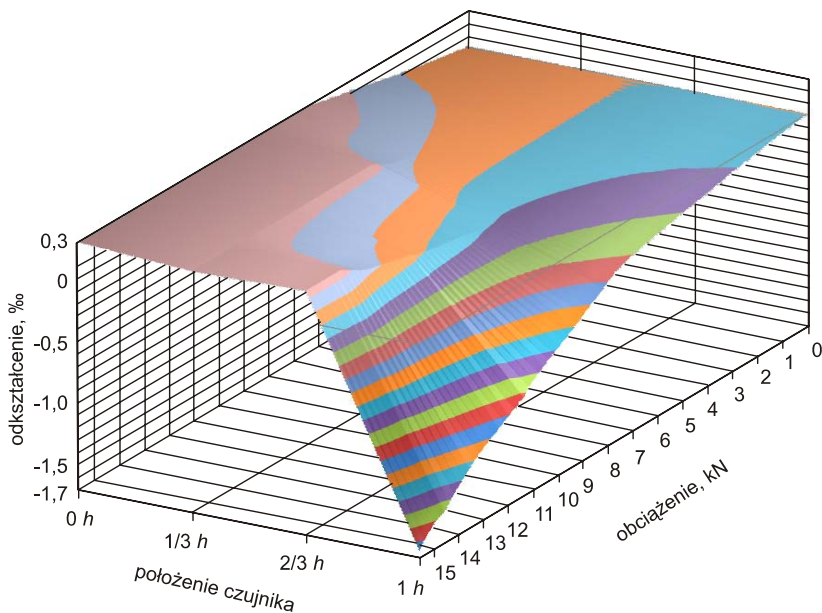
Na wykresach przedstawiono zmierzone przemieszczenia pionowe w funkcji przyłożonego obciążenia (rys. 4), odkształcenia na betonie w przekroju przy podporze (A-A) (rys. 5 i 6) oraz w przekroju oddalonym od podpory (B-B) (rys. 7 i 8).



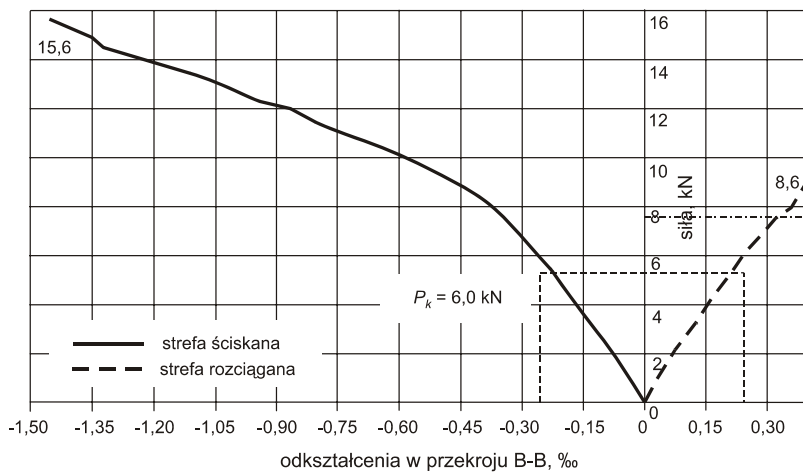
Rys. 4. Przemieszczenia pionowe w funkcji przyłożonego obciążenia
Fig. 4. Vertical displacement in function of applied load



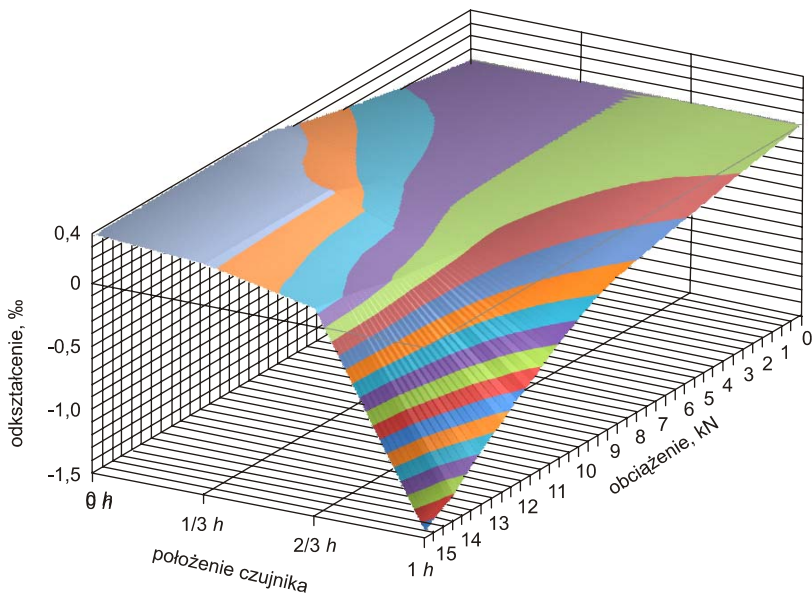
Rys. 5. Odkształcenia w przekroju A-A w funkcji przyłożonego obciążenia
Fig. 5. Strains in A-A section in function of applied load



Rys. 6. Odkształcenia w przekroju A-A w funkcji przyłożonego obciążenia oraz położenia tensometrów
 Fig. 6. Strains in A-A section in function of applied load and position of strain gauges



Rys. 7. Odkształcenia w przekroju B-B w funkcji przyłożonego obciążenia
 Fig. 7. Strains in B-B section in function of applied load



Rys. 8. Odkształcenia w przekroju B-B w funkcji przyłożonego obciążenia oraz położenia tensometrów
 Fig. 8. Strains in B-B section in function of applied load and position of strain gauges

Dla maksymalnej siły równej 15,6 kN zmierzono odkształcenia w strefie ściskanej analizowanych przekrojów. Ze względu na zarysowanie betonu przy siłę niewiele przekraczającej znamionową siłę wierchołkową, odkształcenia w tej strefie mierzone były do siły równej 6,4 kN. Wartości odkształceń w charakterystycznych punktach przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Odkształcenia w przekrojach
 Table 1. Strains in sections

Przekrój	Siła kN	Odkształcenia w strefie ściskanej, ‰	Odkształcenia w strefie rozciąganej, ‰
A - A	6,0	- 0,25	+ 0,26
	6,4	- 0,27	+ 0,28
	15,6	- 1,66	b/d
B - B	6,0	- 0,26	+ 0,24
	6,4	- 0,28	+ 0,26
	15,6	- 1,66	b/d

Po odciążeniu żerdzi elektroenergetycznej przystąpiono do weryfikacji siły sprężającej w elemencie. Do tego celu posłużyły tensometry naklejone w przekroju C-C na stali sprężającej. Uzyskane wyniki zamieszczono w tablicy 2. Porównując wartości sił sprężających z danymi uzyskanymi od dostawcy można wnioskować, iż niższe wartości sił w żerdzi spowodowane są stratami krótkotrwałymi i długotrwałymi, które mogą sięgać około 40% wartości początkowej siły.

Tablica 2. Weryfikacja siły sprężającej
Table 2. Verification of prestressing force

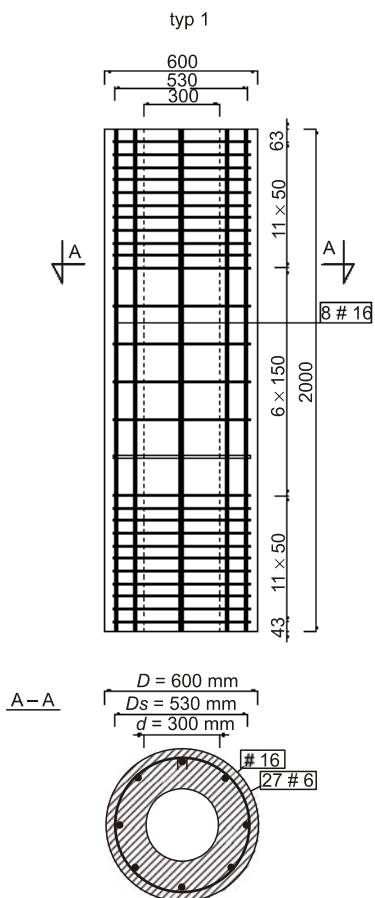
Tensometr	Odształcenia			Średnica drutu	Siła wynikowa	Siła deklarowana
	początkowe	po przecięciu	wynikowe			
S1	- 1418	- 4066	- 2648	7,5 mm	23,4 kN	52 kN
S2	- 480	- 4359	- 3879	7,5 mm	34,3 kN	52 kN

3. Program badań słupów żelbetowych o przekroju pierścieniowym

W celu optymalnego doboru wymiarów słupów do technicznych możliwości ich zbadania w laboratorium, zaprojektowano słupy żelbetowe o przekroju pierścieniowym o średnicy zewnętrznej $D = 600$ mm i średnicy wewnętrznej $d = 300$ mm oraz wysokości 2,0 m (rys. 9).

Dobór odpowiedniego przekroju poprzecznego elementu określono na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych z uwzględnieniem dostępnych maszyn wytrzymałościowych. Po ustaleniu przekroju słupów wysokość elementów dobrano tak, aby uniknąć wpływu smukłości na wyniki badań. Przyjętą wysokość elementów zweryfikowano numerycznie, stosując analizę wyboczeniową, według której uzyskano siłę krytyczną o wartości około 96 000 kN. Zakładając, że słupy zostały zaprojektowane na maksymalną siłę pionową około 3500 kN, efekty związane z wpływem smukłości można pominąć.

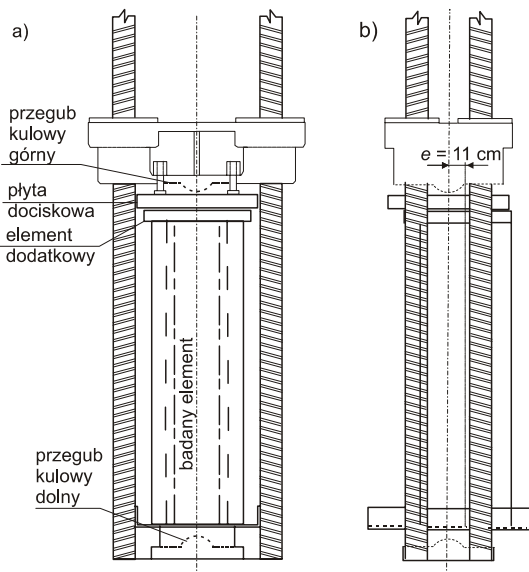
Na podstawie wstępnych badań słupów próbnych stwierdzono konieczność wzmocnienia strefy przyglowicowej. Wykonane próby wzmocnienia wykazały, iż najskuteczniejszą metodą jest zabezpieczenie górnej i dolnej części słupa matami z włókien węglowych. Aby uniknąć zaburzeń, odształcenia w betonie i stali były mierzone poza strefami objętymi wzmocnieniem, a części elementu oklejone matami traktowano jako głowice słupa.



Rys. 9. Przekrój poprzeczny
słupa pierścieniowego
Fig. 9. Cross section of annular
column

3.1. Opis badań słupów żelbetowych o przekroju pierścieniowym

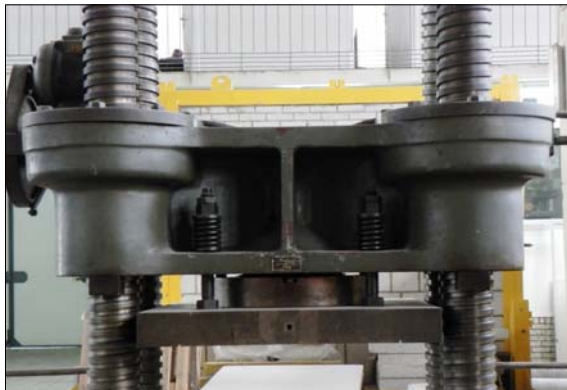
Badania elementów słupów żelbetowych o przekroju pierścieniowym przeprowadzono w Laboratorium Badań Wytrzymałościowych Zakładu Konstrukcji i Elementów Budowlanych ITB. Do testów użyto maszyny wytrzymałościowej firmy Alfred J. Amsler & Co o zakresie 5000 kN (rys. 10 i 11, fot. 16) oraz wysokości 7 m, wyposażonej w dwa przeguby kulowe (fot. 14 i 15), za pomocą których zrealizowano założony schemat statyczny. Obciążanie słupów odbywało się w pozycji pionowej, w jakiej były betonowane, a jego przyrost był ciągły, aż do momentu zniszczenia próbki. Przeszacowania mierzono za pomocą czujników indukcyjnych LVDT o zakresie $\pm 5 \text{ mm}$, $\pm 10 \text{ mm}$, $\pm 25 \text{ mm}$. Rejestracja obciążeń, przemieszczeń i odkształceń odbywała się za pomocą systemu akwizycji danych MGCplus firmy HBM.



Rys. 10 a,b. Szkice stanowiska badawczego
 Fig. 10 a,b. Research scheme of tested column



Fot. 16. Maszyna wytrzymałościowa
 Photo 16. Testing machine



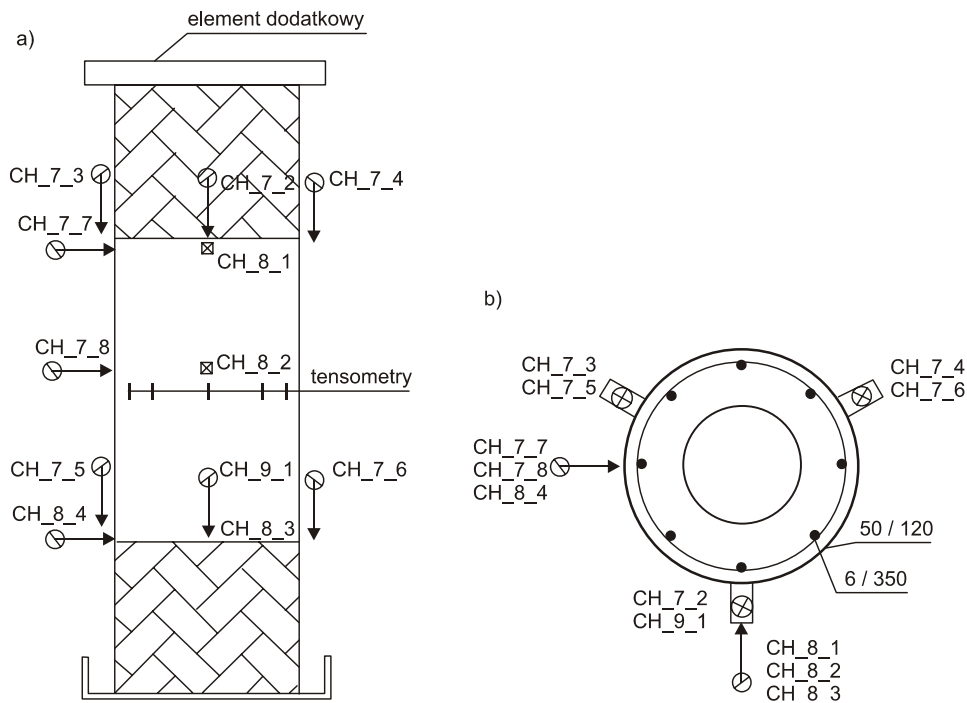
Fot. 14. Przegub górny
 Photo 14. Top hinge



Fot. 15. Przegub dolny
 Photo 15. Bottom hinge

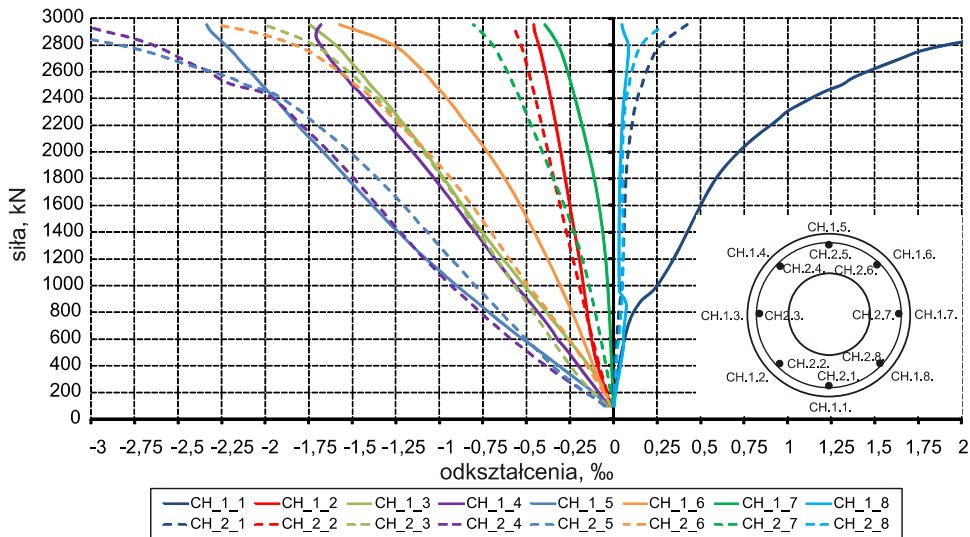
3.2. Wyniki badań słupów żelbetowych o przekroju pierścieniowym

Słupy wzmocniono w strefie przyglowicowej za pomocą mat z włókna węglowego, na długości 50 cm w dolnych i górnych częściach słupów. Rozmieszczenie czujników indukcyjnych do pomiaru przemieszczeń oraz tensometrów elektrooporowych do pomiaru odkształceń przedstawiono na rysunku 11 a i b.

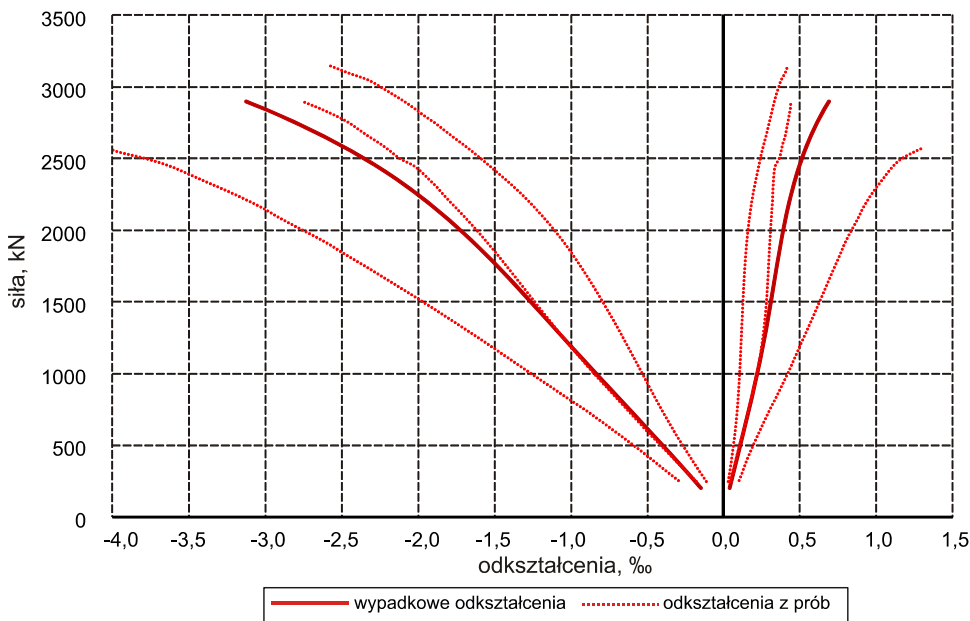


Rys. 11a: Schemat stanowiska badawczego słupów; b – widok z góry
 Fig. 11a: Research scheme of tested column; b – top view

Wartości odkształceń w skrajnych punktach przekrojów słupów zostały wyznaczone z odczytów poszczególnych tensometrów. Przykładowe wyniki odkształceń w poszczególnych punktach pomiaru na betonie i stali zamieszczono na rysunku 12. Wyniki zbiorcze ze wszystkich przebadanych elementów zostały przedstawione na rysunku 13.



Rys. 12. Odkształcenia w funkcji siły na powierzchni betonu i stali
 Fig. 12. Strains in function of force applied on the surface of concrete and steel



Rys. 13. Odkształcenia w skrajnych punktach przekroju
 Fig. 13. Strains in extreme points of cross section

Elementy badawcze niszczyły się w strefie środkowej w wyniku miażdżenia betonu w strefie ściskanej. Zaobserwowane zarysowania słupów oraz miejsce zniszczenia zobrazowano na fot. 17 i 18.



Fot. 17. Typowa forma zniszczenia słupów
Photo 17. Typical form of columns destruction



Fot. 18. Zniszczenie słupów w rozwinięciu
Photo 18. Column destruction in extension

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metody oraz wyniki badań elementów żelbetowych o przekroju pierścieniowym. Wskazano dwie różne metody prowadzenia badań elementów mimośrodowo ściskanych. Wybór metody zależy od dominującej składowej obciążenia oraz schematu statycznego, w jakim pracuje. W przypadku żerdzi wirowanych jest to obciążenie wiatrem oraz schemat utwierdzonego wspornika, natomiast

w przypadku słupów – obciążenia ze stropów lub belek przenoszone na fundamenty i schemat statyczny o dwóch podporach. O ile w przypadku żerdzi wirowanych podpora musi stanowić utwierdzenie, o tyle w przypadku słupów możemy wyróżnić swobodne podparcie na jednym/obu końcach lub utwierdzenie na jednym/obu końcach. W zależności od wykonanego w badaniu sposobu podparcia wpływ smukłości elementu będzie miał większe lub mniejsze znaczenie.

Bibliografia

- [1] Michałek J.: Słupy oświetleniowe z betonu. *Przegląd Budowlany*, 2011, 6, s. 45–49
- [2] Kubiak J., Łodo A.: Sprężone słupy oświetleniowe i oświetleniowo-trakcyjne. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne w budownictwie betonowym”. Wrocław – Szklarska Poręba 1994, s. 97–102
- [3] Chruściel W.: Analiza nośności żerdzi elektroenergetycznych z uwzględnieniem sytuacji wyjątkowych. Praca statutowa ITB nr NK-38, Warszawa 2011, maszyn., Biblioteka ITB,
- [4] Runkiewicz L.; Runkiewicz M.: Prefabrykowane strunobetonowe wieże wirobetonowe wysokości do 80 m. *Przegląd Budowlany*, 1998, 7–8, s. 23–25
- [5] Szczygielski A., Mazurczuk R.: Badania doświadczalne i weryfikacja obliczeniowa częściowo sprężonych żerdzi wirowanych na skręcanie połączone ze zginaniem i skręcaniem, *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 2007, 2 (142), s. 25–53
- [6] Kamiński M.: Badania elementów konstrukcyjnych o przekroju pierścieniowym z betonu wirowanego. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 1996
- [7] PN-EN 12843 Prefabrykowane betonowe maszty i słupy
- [8] Shalaby A.M., Fouad F.H., Albenese R.: Strength and deflection behavior of spun concrete poles. *PCI Journal Spring*, 2011, s. 55–77
- [9] Łodo A., Kubiak J., Michałek J.: Badania żerdzi wirowanych wyprodukowanych w zakładzie betoniarskim Henryk Migacz. Raport serii SPR nr 17/2002, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002
- [10] Chruściel W.: Uściślona metoda obliczania żelbetowego przekroju pierścieniowego mimośrodowo ściskanego; rozprawa doktorska, Biblioteka ITB, maszyn., Warszawa 2013; maszyn., Biblioteka ITB

TESTS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF ANNULAR CROSS – SECTION

Summary

In this article, the test methods of reinforced concrete elements of annular cross section are presented. Research schemes, methods of strain measurement on the surface of concrete and steel are described and the results of tested elements are given. In summary, the basic conditions for the adoption of an appropriate test method are stated.

Praca wpłynęła do Redakcji 11 XII 2013 r.