

KRZYSZTOF ŻÓŁTOWSKI, BARTOSZ WASILEWSKI*

ANALIZA PRACY NIETYPOWEGO ZAKOTWIENIA WANT – BADANIA LABORATORYJNE

CASE STUDY OF MODIFIED STAY CABLE'S ANCHORAGE – LABORATORY TESTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania modelowe nietypowego rozwiązania strefy zakotwień want. Porównano je z typowym rozwiązaniem stosowanym w systemach obecnych na rynku. Przedstawiono wyniki badania wielkości sił przyczepności pomiędzy stalą a betonem w zakotwieniu wanty, nośności detali oraz zachowania się całego zakotwienia.

Słowa kluczowe: badania laboratoryjne, mosty, zakotwienia want

Abstract

The paper shows the case study of modified stay cable's anchorage in concrete base. The idea of modification is the introduction of additional rings on the formwork tube to improve the composite action between steel and concrete.

Comparison between tested anchorage and typical element used in commercial systems is discussed. Composite force between steel and concrete in stay cable's anchorage is presented. Influence of introduced ring on load capacity and behavior of entire anchorage is discussed.

Keywords: Bridges, laboratory tests, stay cable's anchorage

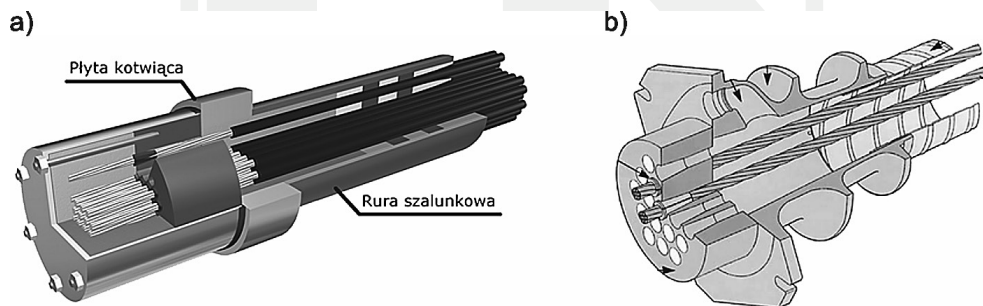
* Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG, mgr inż. Bartosz Wasilewski, Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska.

1. Wstęp

W mostach podwieszonych jednym z kluczowych elementów konstrukcji są zakotwienia want, gdyż przekazują one stosunkowo duże siły z want w pomost przez niewielką powierzchnię docisku. W obiektach z pomostem stalowym strefy te konstruowane są za pomocą odpowiednio ukształtowanych zeber i przepon. Dzięki temu można względnie łatwo wprowadzić siłę z wanty w pomost. Natomiast w mostach z pomostami betonowymi mamy do czynienia z trudniejszą sytuacją, gdyż strefa zakotwienia jest zwykle stosunkowo niewielka i do tego osłabiona przez dukt. Dlatego prawidłowa ocena wyężenia betonu w strefie bezpośredniego docisku jest niezwykle istotna.

2. Opis badanego rozwiązania

Typowe zakotwienie wanty w konstrukcji betonowej, spotykane w wielu systemach powieszzeń składa się ze sztywnej płyty oporowej wykonanej z blachy stalowej o grubości co najmniej kilkudziesięciu milimetrów oraz stosunkowo wiotkiej rury, której jedyną rolą jest funkcja szalunku traconego (rys. 1a). Natomiast głowica kabla sprężającego, oprócz płyty oporowej, posiada często kilka dodatkowych pierścieni rozmieszczonych wokół pobocznic (rys. 1b). Ich zadaniem jest rozproszenie siły sprężającej na większy obszar. Rozwiązanie to było inspiracją do próby stworzenia zmodyfikowanego zakotwienia want wprowadzonego przez projektantów na Moście Rędziańskim w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia [5]. Ideę modyfikacji przedstawiono na rysunku 2. Polega ona na zastosowaniu konstrukcyjnej rury szalunkowej z rozmieszczonymi na jej długości dodatkowymi pierścieniami oporowymi. Projektant wprowadził pierścienie, licząc na ich udział w rozproszeniu skoncentrowanej siły na większy obszar. Redystrybucja obciążenia może mieć korzystny wpływ na problematykę kształtowania zakotwień. Ze względu na kluczową rolę zakotwień want lub kabli zewnętrznych typu extradosed, postanowiono przeanalizować efekty zastosowania pierścieni odcciążających na rurach szalunkowych zakotwień. Głównym elementem pracy są badania laboratoryjne na specjalnie zaprojektowanych modelach (rys. 3a, b). Bada-

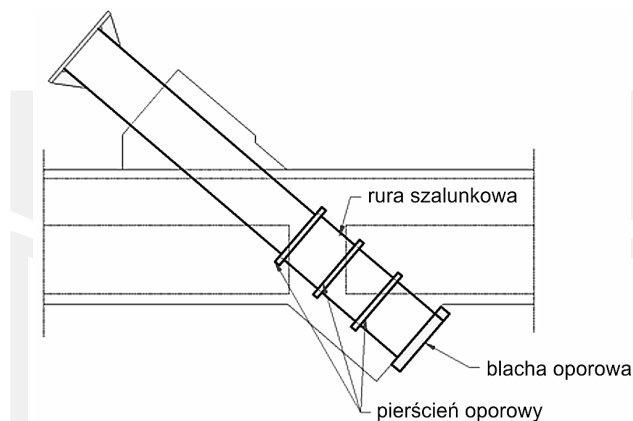


Rys. 1. a) Typowe zakotwienie bierne want [1], b) typowe zakotwienie kabla sprężającego [3]

Fig. 1. a) Typical stay cable anchorage [1], b) Typical post-tensioned cable anchorage [3]

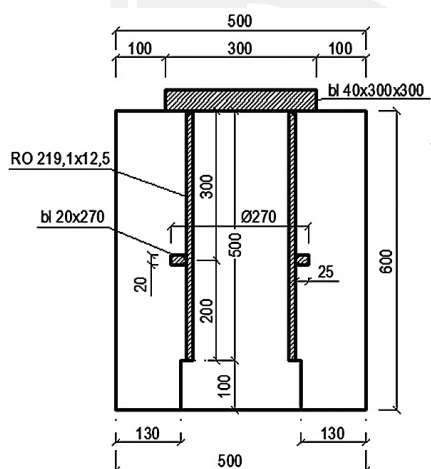
nia poprzedzono studium projektowym opartym na analizach MES. Posługiwano się uproszczonymi modelami przy założeniu osiowej symetrii elementu oraz obciążenia. Przyjęto liniowy związek σ - ϵ dla materiałów i nieliniową charakterystykę elementów kontaktowych pomiędzy elementem stalowym i korpusem betonowym. Uwzględniono spiralne zbrojenie obwodowe. Wykonano dwa modele numeryczne – jeden do oszacowania wielkości naprężeń w całej konstrukcji (rys. 4a) oraz drugi służący do określenia rozkładu naprężeń w betonie pod pierścieniem oporowym oraz wyznaczenia miejsc montażu tensometrów powyżej i poniżej pierścienia (rys. 4b).

Obciążenia przykładano jako zespół sił skupionych.



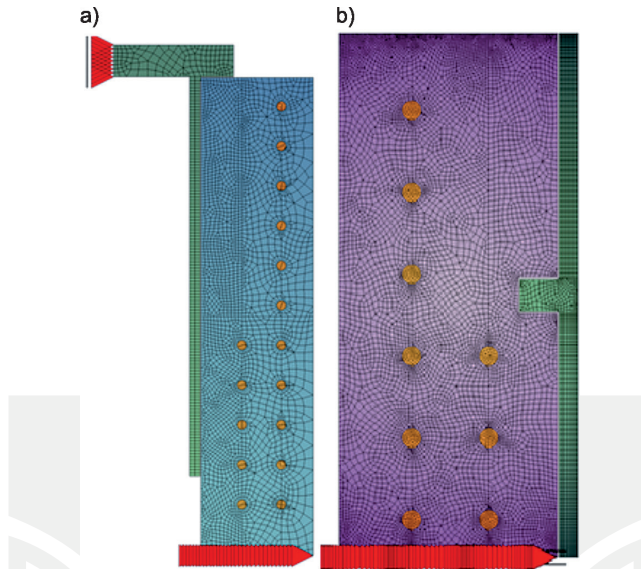
Rys. 2. Zakotwienie wank zastosowane w Moście Rędzińskim

Fig. 2. Stay cable anchorage in Rędziński Bridge



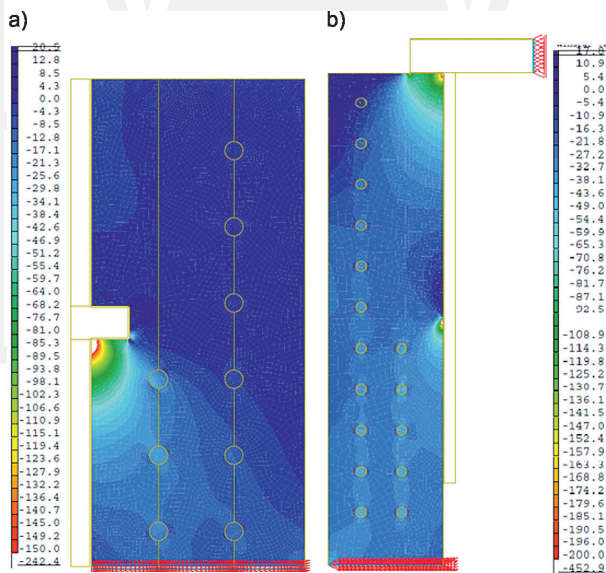
Rys. 3. Modele zaprojektowane do badań: a) rysunek, b) model podczas badań

Fig. 3. Tested specimens: a) drawing, b) specimen unded test



Rys. 4. Wykonane modele MES SOFiSTiK: a) cały element, b) strefa przypierścieniowa

Fig. 4. FEM models: a) one specimen, b) ring – zone



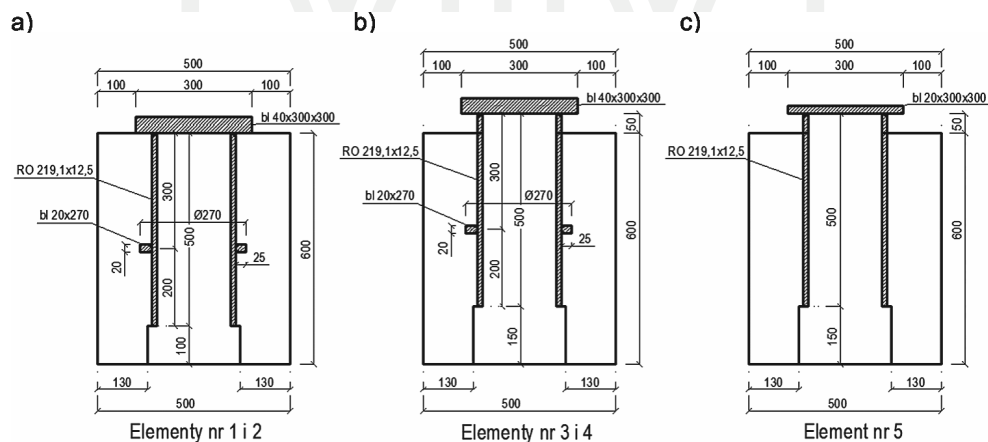
Rys. 5. Rozkład głównych naprężeń ściskających w badanych elementach: a) strefa przypierścieniowa – obciążenie 2000 kN, b) cały element – obciążenie 5000 kN

Fig. 5. Principal compression stresses: a) ring zone – load is 2000 kN, b) specimen – load is 5000 kN

Na rysunku 5 pokazano rozkłady minimalnych naprężeń w korpusie betonowym (naprężenia w części stalowej pominięto w celu polepszenia czytelności). Oba modele obciążono przez część stalową. W modelu strefy przypierścieniowej zadano obciążenie o wartości 2000 kN przyłożone do rury stalowej, natomiast model całej konstrukcji obciążono siłą wypadkową 5000 kN przyłożoną do blachy oporowej. W obu modelach można zauważyć znaczne przekroczenie wytrzymałości wynoszącej dla betonu C50/60 $f_{ck} = 50$ MPa.

W modelu całego elementu (rys. 5b) naprężenia te są znacznie przekroczone w całej strefie pod płytą oporową i przy pierścieniu oporowym. Również w modelu szczegółowym strefy przypierścieniowej (rys. 5a) pokazano wielkość obszaru pod pierścieniem, gdzie naprężenia przekraczają f_{ck} . Obliczenia numeryczne pokazały, że istotnym czynnikiem określającym poziom naprężeń w betonie pod płytą główną i w okolicy pierścienia oporowego jest przyczepność (tarcie) między rurą szalunkową i betonem.

W wyniku analiz numerycznych zaprojektowano i wykonano modele testowe. Zwiększono grubość rury szalunkowej w stosunku do rozwiązania typowego (zastosowano rurę o grubości ścianki 12,5 mm), a w odległości 300 mm od płyty oporowej wykonano pierścień oporowy o szerokości 25 mm. Wykonano cztery takie modele, z których dwa (nr 1 i nr 2) przeznaczono do badań nośności zakotwienia (rys. 6a), a dwa (nr 3 i nr 4) do badań nośności pierścienia oporowego (rys. 6b). Dodatkowo wykonano jeden model (nr 5) przeznaczony do badań wielkości sił przyczepności pomiędzy stalą a betonem. Był on pozbawiony pierścienia oporowego (rys. 6c).



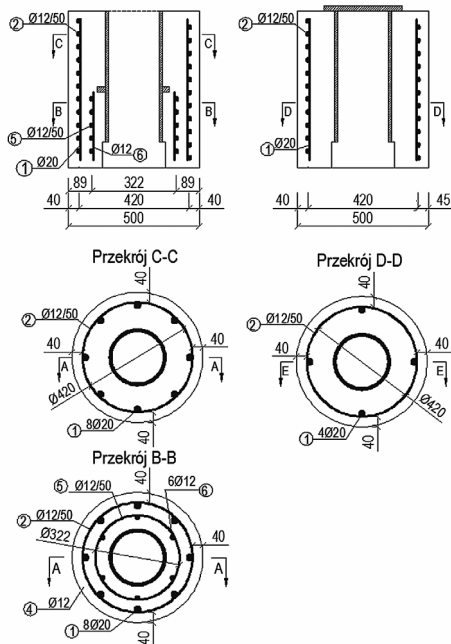
Rys. 6. Elementy przeznaczone do badań laboratoryjnych

Fig. 6. Tested specimens

Części stalowe wykonano ze stali S355, a korpusy żelbetowe z jednej partii betonu C50/60. Korpusy były wzmocnione zbrojeniem spiralnym $\Phi 12$ mm ze stali B500SP (rys. 7). Powierzchnia rury była surowa po piaskowaniu.

Do pomiaru naprężeń w rurach stalowych użyto tensometrów elektrooporowych. W modelach przeznaczonych do badań nośności (nr 1–4) umieszczono po 12 tensometrów na rurze

Zbrojenie elementów nr 1-4 Zbrojenie elementu nr 5
Przekrój A-A Przekrój E-E



Rys. 7. Zbrojenie korpusów betonowych

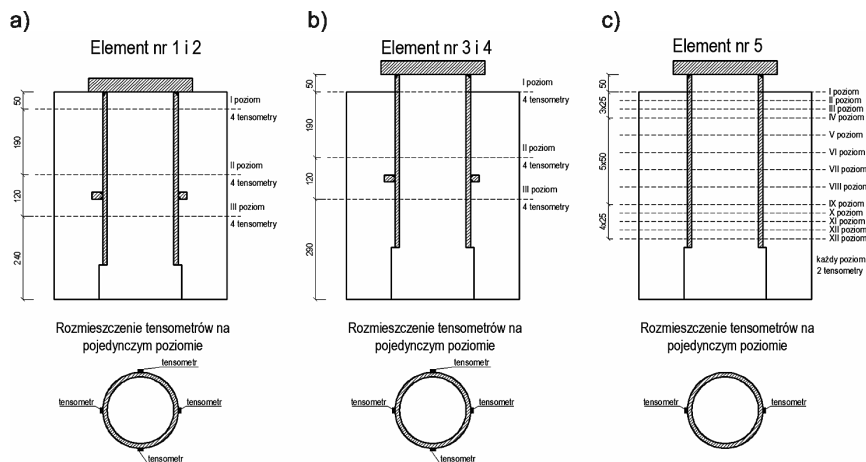
Fig. 7. Concrete body's reinforcement



Rys. 8. Maszyna wytrzymałościowa wykorzystywana przy badaniach

Fig. 8. Testing machine

mierzących naprężenia w kierunku podłużnym (rys. 9a i b) rozmieszczonych na 3 poziomach (4 tensometry na każdym poziomie). W modelu przeznaczonym do badań przyczepności umieszczono 26 tensometrów mierzących naprężenia w kierunku podłużnym, rozmieszczonych na 13 poziomach (rys 9c).



Rys. 9. Rozmieszczenie tensometrów w badanych elementach

Fig. 9. Location of strain gauges in the specimens

Badane elementy zostały obciążane za pomocą przyrostu siły. Podczas obciążania elementów nr 1 i 2 co 100 kN był dokonywany pomiar naprężeń. Dla elementów nr 3 i 4 ten krok wynosił 50 kN, a dla elementu nr 5 – 20 kN. Badania prowadzono w laboratorium Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu Politechniki Gdańskiej z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej w+b walter+bai ag 102/5000-HK4.

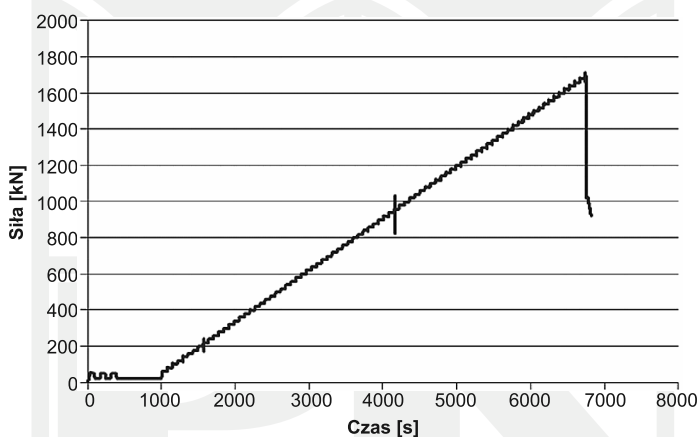
3. Przyczepność stali i betonu

Jak już wcześniej wspomniano, istotnym czynnikiem, który znacząco wpływa na sposób pracy zakotwienia, jest przyczepność między stalą i betonem. Dotychczas w rozpoznanej przez autorów literaturze nie natrafiono na wyniki przyczepności stalowej rury o dużej średnicy umieszczonej w betonie. W zakresie badań przyczepności pomiędzy rurami stalowymi a betonem dostępne są badania przeprowadzone dla słupów CFST [2]. Wyniki tych badań wykorzystano do wcześniejszych analiz numerycznych nośności zakotwienia [4]. Na podstawie wyników podanych w [2] oszacowano sumaryczną wielkość przyczepności w badanych elementach na ok. 400 kN. W celu sprawdzenia tych założeń przebadano model nr 5 (rys. 6c i 9c). Podczas badania prowadzono pomiary rozkładu naprężeń w rurze, aby ustalić rozkład sił przyczepności wzdłuż pobocznic rury. Historia obciążenia elementu została pokazana na rys. 11.

Jak można zauważyć na rys. 11, oszacowana na 400 kN nośność elementu okazała się większa o ponad 400%. Na rys. 12 przedstawiono zależność pomiędzy obciążeniem a przemieszczeniem blachy oporowej w modelu nr 5.



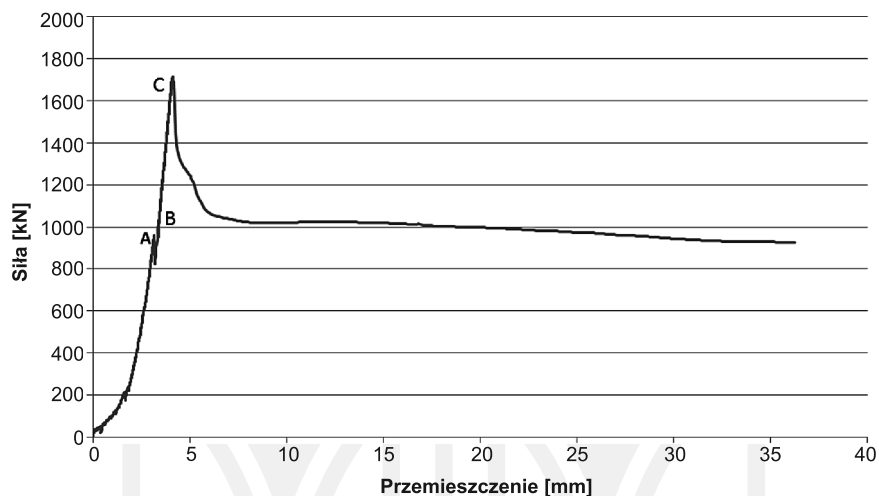
Rys. 10. Element nr 5 – rura stalowa
Fig. 10. A steel pipe – specimen no. 5



Rys. 11. Historia obciążenia elementu nr 5
Fig. 11. Loading history – specimen no. 5

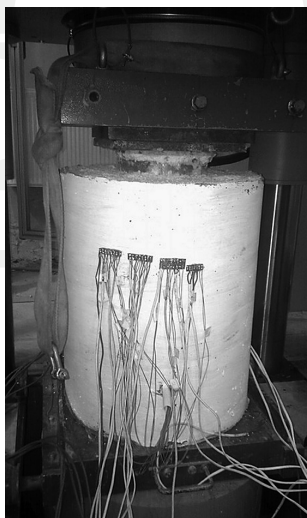
Należy zauważyć, że przemieszczenie, które widzimy na wykresie (rys. 12), na odcinku od 0 kN do 1700 kN wynika wyłącznie z dopasowania się elementu do prasy i jego sprężystego skrócenia. Nieduży wzrost przemieszczeń występujący w pobliżu punktu A, związany jest wyłącznie z ułożeniem się przegubu prasy ściskającej element. Dowodzą tego wykresy naprężeń w rurze stalowej przedstawione na rys. 14. Pierwszy wykres (rys. 14a) przedstawia rozkład naprężeń przy obciążeniu 900 kN (rys. 12, punkt A). Widzimy na nim dużą różnicę w pomierzonych naprężeniach pomiędzy lewą a prawą stroną rury, co świadczy o mimośrodowym obciążeniu badanego elementu. Wykres drugi (rys. 14b) przedstawia rozkład naprężeń już po obserwowanym na rys. 12 dopasowaniu – przy obciążeniu 1000 kN (rys. 12, punkt B).

Widoczne jest wyrównanie się naprężeń pomiędzy lewą a prawą stroną rury, co świadczy, iż teza o wcześniejszej blokadzie przegubu była słuszna. Na rys. 14c przedstawiono wykresy naprężeń tuż przed początkiem poślizgu pomiędzy rurą stalową a betonem, przy obciążeniu 1680 kN (rys. 12, punkt C). Poślizg ten występuje dopiero w momencie utraty nośności i gwałtownego spadku siły w badanym elemencie (z 1709 kN do ok. 1000 kN).



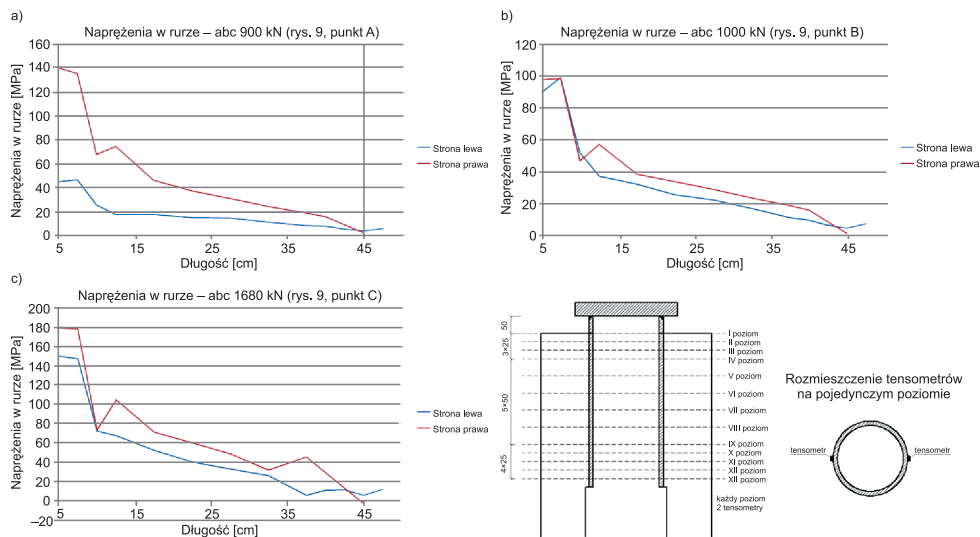
Rys. 12. Zależność P- δ dla elementu nr 5

Fig. 12. P- δ curve – specimen no. 5



Rys. 13. Element nr 10 podczas badania

Fig. 13. A specimen no. 10 under test



Rys. 14. Rozkład naprężeń wzdłuż poboczniczy rury stalowej w punktach wg rys. 9

Fig. 14. Longitudinal stresses – steel pipe, specimen no. 5

Na wykresach widać, że największe zmniejszenie się naprężeń (a co za tym idzie również największy transfer siły ze stali do betonu) następuje na długości pierwszych 5 cm powierzchni kontaktu (czyli ok. 0,25 średnicy rury), co jest porównywalne z wynikami uzyskanymi dla słupów CFST wg [2].

Przedstawione badania wskazują, że przyczepność pomiędzy rurą stalową i betonem jest bardzo istotnym zagadnieniem przy projektowaniu analizowanego zakotwienia want. Podsumowaniem badań są następujące wnioski:

- Rozkład naprężeń wzdłuż poboczniczy rury nie sprzyja przeniesieniu siły w głąb konstrukcji, ponieważ największa część siły jest przekazywana na stosunkowo krótkim odcinku (0,25 średnicy rury) położonym tuż przy czole elementu.
- Pewnym zaskoczeniem jest wielkość siły, jaka może być przeniesiona przez przyczepność. Nośność badanego elementu wyniosła 1709 kN, co stanowi ok. 60% nośności charakterystycznej rury zastosowanej w badanym elemencie.
- Nie można odnieść wprost do analizowanego rozwiązania badań słupów CFST. Prawdopodobnie skurcz betonu zmniejsza przyczepność w słupach CFST, natomiast w analizowanym zakotwieniu działanie skurczu jest przeciwnie.

4. Badanie nośności pierścienia oporowego

Podczas projektowania modeli wyznaczono teoretyczną nośność badanego rozwiązania wg [6]. Czynnikiem, który ma zasadniczy wpływ na jej wielkość jest stosunek powierzchni docisku A_d do powierzchni rozdziału A_r . Norma [6] zaleca przyjęcie dla takiego układu

$A_r = A_d$. Przy założeniu, że naprężenia pod pierścieniem oporowym rozkładają się równomiernie, charakterystyczną nośność pierścienia wyznaczamy wg zależności

$$N = \alpha_d \cdot R_d \cdot A_d + k \cdot R_{au} \cdot A'_a \quad (1)$$

gdzie:

- R_d – wytrzymałość betonu na docisk,
- α_d – współczynnik równomierności docisku,
- A_d – powierzchnia docisku,
- K – współczynnik zależny od rodzaju zbrojenia,
- A'_a – pole przekroju zbrojenia na docisk,

$$A'_a = \frac{\pi \cdot d_r \cdot A_u}{c} \quad (2)$$

gdzie:

- d_r – średnica uzwojenia,
- A_u – pole przekroju pojedynczego zwoju spirali zbrojeniowej,
- c – skok spirali zbrojeniowej.

Pole przekroju zbrojenia na docisk wyznaczone zgodnie z wzorem (2) wynosi $A'_a = 22,86 \text{ cm}^2$, lecz ilość zbrojenia, którą przyjmujemy do obliczeń nośności ograniczamy do $A'_a = 5,28 \text{ cm}^2$ zgodnie z warunkiem:

$$0,2 \cdot \alpha_d \leq \frac{k \cdot A'_a \cdot R_{au}}{R_d \cdot A_d} \leq 1,75 - \alpha_d \quad (3)$$

gdzie:

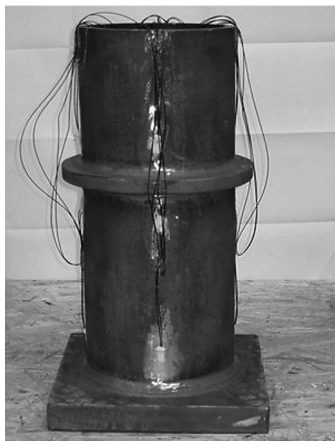
- R_{au} – wytrzymałość stali uzwojenia na rozciąganie.

Nośność pierścienia oporowego wyznaczona wg powyższej procedury wynosi:

$$N = 1 \cdot 45 \text{ MPa} \cdot 191,72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 + 2,5 \cdot 490 \text{ MPa} \cdot 5,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 1509 \text{ kN} \quad (4)$$

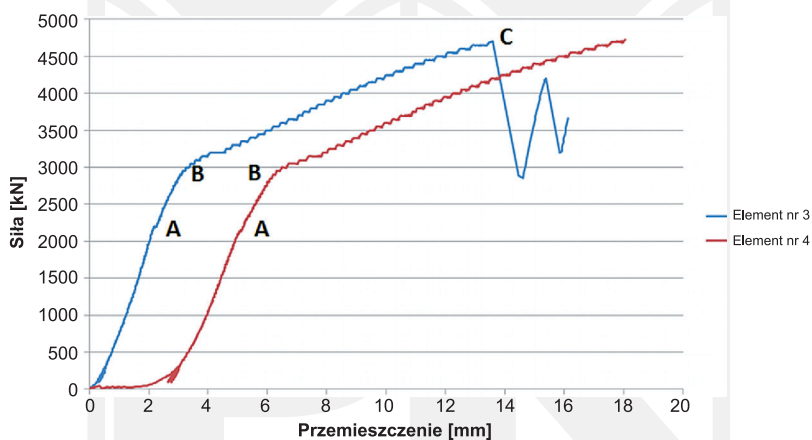
Wg autorów przy wyznaczaniu nośności na docisk takich elementów konstrukcji, jak analizowany pierścień dociskowy można przyjąć znacznie większą powierzchnię rozdziału A_r , gdyż rura szalunkowa blokuje odkształcenia betonu w kierunku środka modelu, co skutkuje znacznym zwiększeniem wytrzymałości betonu na docisk. Podczas projektowania modeli przyjęto powierzchnię rozdziału A_r dwukrotnie szerszą od powierzchni docisku A_d . Nośność pierścienia oporowego wyznaczona przy takim założeniu wynosi $N = 2241 \text{ kN}$.

Do badania nośności pierścienia oporowego przeznaczono modele nr 3 i 4. W tych modelach płyta oporowa została oddylatowana od korpusu betonowego szczeliną o szerokości 50 mm (rys. 6b). Dzięki temu całą siłę z części stalowej na beton przenosi pierścień oporowy oraz przyczepność między stalą i betonem. Modele obciążono przyrostem siły i rejestrowano naprężenia pionowe w płaszczu rury co 50 kN. Historię testów pokazano na wykresach (rys. 16 i 18).



Rys. 15. Elementy nr 3, 4 – rura stalowa

Fig. 15. A steel pipe – specimen no. 3, 4



Rys. 16. Zależność P-δ dla elementów nr 3 i 4

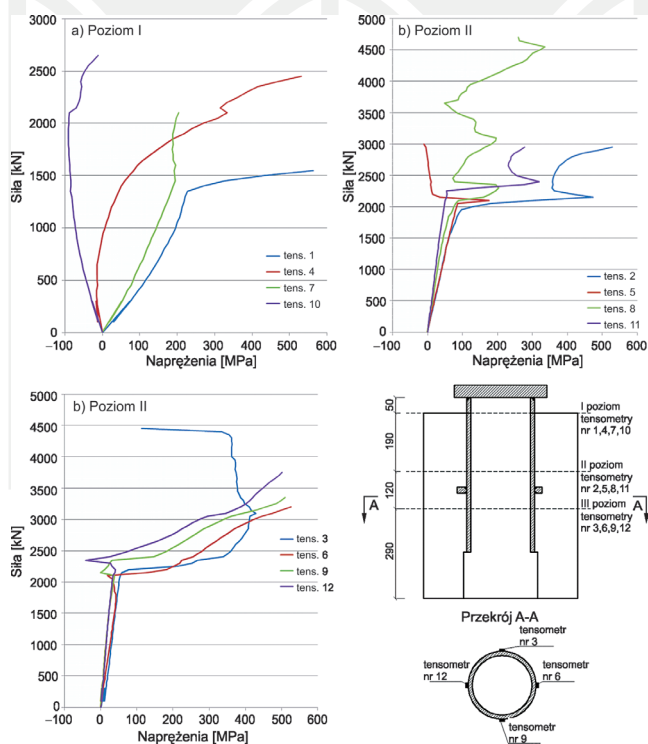
Fig. 16. P-δ curve – specimen no. 3, 4

Do zniszczenia modeli doszło przez uplastycznienie rury stalowej na górnym odcinku przy obciążeniu ok. 3000 kN (rys. 16, punkt B), a następnie przez pęknięcie zbrojenia spiralnego korpusu betonowego (tylko element nr 3 – rys. 16 punkt C). Nie doszło do zniszczenia ani pierścienia oporowego, ani betonu w jego otoczeniu. Na wykresach naprężeń pionowych w płaszczu rury (rys. 18b, c) widać, iż przy obciążeniu ok. 2000 kN następuje spadek sztywności związany prawdopodobnie z zerwaniem przyczepności między płaszczem rury i betonem. W tej fazie zostały zniszczone tensometry. Moment ten jest również widoczny na wykresie P-δ dla obu elementów (rys. 16 punkt A). W dalszej fazie prawdopodobnie pracuje tylko pierścień oporowy. Świadczy o tym spadek sztywności połączenia.



Rys. 17. Elementy nr 3 – widok elementu zniszczonego

Fig. 17. Destroyed specimen no. 3



Rys. 18. Naprężenia w elemencie nr 4

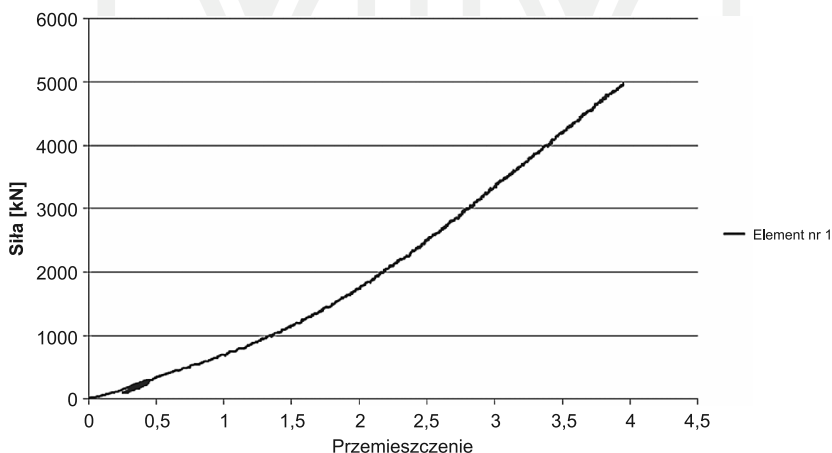
Fig. 18. Longitudinal stresses – steel pipe, specimen no. 3

Wnioski z badania:

- W badaniu potwierdzono istotny udział przyczepności płaszcza rury do betonu. Wyniki w tej kwestii są zbieżne z badaniem na modelu nr 5.
- Badania pokazały wysoką nośność uzyskaną dzięki pierścieniowi (znacznie większą od projektowanej), ale niestety również obniżoną sztywność połączenia po zerwaniu przyczepności.
- Ze względu na uplastycznienie rury pod tłokiem maszyny wytrzymałościowej nie udało się określić granicy nośności pierścienia.

5. Badanie kompletnego zakotwienia

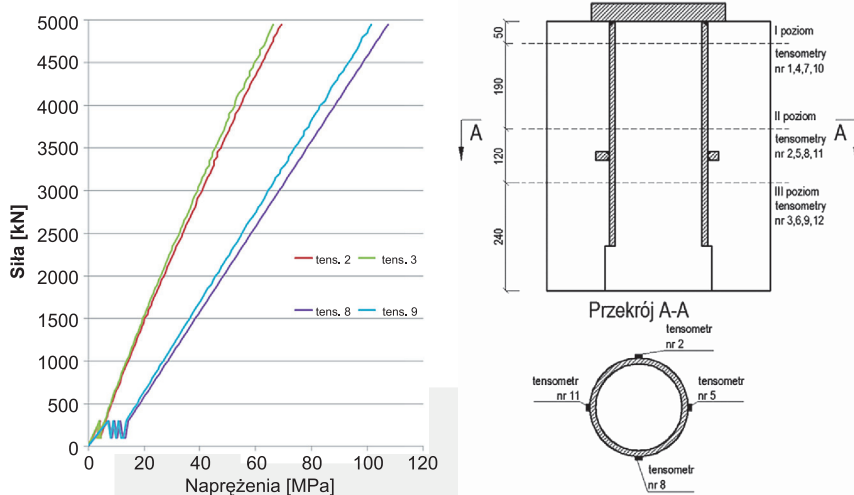
Do badania kompletnego zakotwienia przeznaczono elementy nr 1 i 2. Obciążono je do maksymalnej siły generowanej przez maszynę wytrzymałościową (5000 kN). Przy maksymalnym obciążeniu nastąpiło wyłącznie drobne zarysowanie ich powierzchni. Po odciążeniu rysy te zmniejszyły się lub zamknęły. Nie doszło do trwałych uszkodzeń konstrukcji. Na rys. 19 na przykładzie elementu nr 2 możemy zaobserwować, iż zależność między siłą a przemieszczeniem jest praktycznie liniowa, co skłania do wniosku, że zakotwienie nie wyczerpało swojej nośności pod przyłożonym obciążeniem. Niestety zbadanie go aż do zniszczenia było niemożliwe z powodu braku odpowiedniej prasy.



Rys. 19. Zależność P- δ dla elementu nr 2

Fig. 19. P- δ curve, specimen no. 2

Na podstawie wyników pomiarów naprężeń dla odpowiadających sobie tensometrów na poziomie II i III (rys. 20) można stwierdzić, że niestety pierścień oporowy nie uczestniczy w znaczącym stopniu w przekazywaniu siły z rury do korpusu betonowego. Mimo to nośność zakotwienia okazała się wyższa niż przypuszczano na podstawie wstępnych wyliczeń teoretycznych.



Rys. 20. Naprężenia w elemencie nr 2 – wybrane tensometry z poziomu II i III

Fig. 20. Longitudinal stresses – steel pipe, specimen no. 2

6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników badań można wysunąć kilka istotnych wniosków:

- Siły przyczepności pomiędzy stalą a betonem, gdy obetonowany jest wielkowymiarowy element stalowy, są kilkukrotnie większe niż w wypadku odwrotnym, takim jak słup CFST (przy identycznych wymiarach elementu stalowego). Jest to najprawdopodobniej efekt działania skurczu betonu, który zmniejsza przyczepność w słupach CFST, natomiast w analizowanym zakotwieniu działa przeciwnie.
- Badanie elementów 3 i 4 potwierdza nośność pierścienia oporowego wyliczoną teoretycznie, przy założeniu, iż powierzchnia rozdziału A_r jest co najmniej 2 razy większa od powierzchni bezpośredniego docisku A_d (wskazania normowe zalecają przyjęcie $A_r = A_d$). Obliczenia teoretyczne zawierają rezerwę nośności.
- W wyniku badania elementów 1-2 okazało się, że pierścień oporowy praktycznie nie uczestniczy w przenoszeniu obciążeń, ponieważ nie występuje utrata przyczepności płaszcz rury do betonu.
- Dodatkowe pierścienie oporowe zastosowane w badaniach tworzą połączenie o małej sztywności w relacji do przyczepności i podatności całego elementu. Można by spowodować większą efektywność złącza przez wprowadzenie warstwy separującej na płaszcz rury (likwidując przyczepność) z jednoczesnym zwiększeniem wymiarów pierścienia.

Literatura

- [1] *Freyssinet HD Stay cables*, Freyssinet Polska Sp. z o.o.
- [2] Roeder Ch.W., Cameron B., Brown C.B., *Composite action in concrete filled tubes*, Journal of structural engineering, May 1998, 477-484.
- [3] *Konstrukcje sprężone System C*, Freyssinet Polska Sp. z o.o.
- [4] Żółtowski K., Romaszewicz T., Wasilewski B., *Wybrane problemy teoretyczne związane z projektowaniem i budową Mostu Rędzńskiego we Wrocławiu*, Wrocławskie Dni Mostowe, Obiekty mostowe na autostradach i drogach ekspresowych, Wrocław, 26–27 listopada 2009.
- [5] Biliszczyk J., Onysyk J., Barcik W., Prabucki P., Sułkowski M., Szczepański J., Toczkiwicz R., Tomiczek M., Tukendorf A., Tukendorf K., *Most podwieszony w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia – Projekt*, Wrocławskie Dni Mostowe, Obiekty mostowe na autostradach i drogach ekspresowych, Wrocław, 26–27 listopada 2009.
- [6] PN-91 S-10042 Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Projektowanie.

