

Pomiar sił sprężających w elemencie kablobetonowym

mgr inż. Rafał Walczak, Politechnika Krakowska, dr hab. inż. Wit Derkowski, prof. uczelni, Politechnika Krakowska, Linnaeus University

1. Wprowadzenie

W celu przeprowadzenia analizy bezpieczeństwa istniejącej konstrukcji sprężonej jest wymagana znajomość wielkości sił sprężających w poszczególnych cięgnach, między innymi dlatego, że sprężenie zapobiega zarysowaniu lub redukuje szerokość rys, co ogranicza ekspozycje na czynniki zewnętrzne i zwiększa trwałość konstrukcji w trudnych warunkach środowiskowych. Ponadto określenie aktualnej wielkości sił sprężających jest niezbędne przy diagnostyce okresowej obiektów oraz przy projektowaniu napraw i wzmocnień konstrukcji, np. wynikających z potrzeby zwiększenia dopuszczalnych obciążeń. Siły w kablach sprężających mogą być określone na drodze obliczeń, jeżeli znane są parametry zastosowanej stali sprężającej i betonu, technologia produkcji oraz sprężenia elementu (czas sprężenia, początkowe siły naciągu), jak i historia użytkowania elementu (obciążenia/przeciążenia, wilgotność powietrza, temperatura). Na podstawie tych informacji możliwe jest oszacowanie strat doraźnych oraz reologicznych sił sprężających. Procedury obliczenia strat zawarte są np. w EC2 [1], MC2010 [2] czy ACI 318 [3]. Tak oszacowane wartości sił sprężających mogą niestety odbiegać od wartości rzeczywistych, z uwagi na dość znaczne uproszczenia stosowane w normie przy uwzględnianiu skomplikowanych zjawisk wpływających na wielkość strat. Wysoki stopień niepewności oszacowania dotyczy zwłaszcza strat opóźnionych, które w praktyce projektowej analizujemy podejściem uproszczonym [2]. W związku z powyższym podejmowane są próby określenia rzeczywistej

wielkości sił sprężających drogą eksperymentalną [4–13]. W niniejszym artykule zestawiono wybrane metody pomiaru sił sprężających oraz przedstawiono badanie siły sprężającej w kablobetonowej prefabrykowanej belce podsuwnicowej eksploatowanej przez ponad 55 lat.

2. Metody pomiaru sił sprężających

Istnieje szereg metod pomiaru sił sprężających, które z uwagi na rejestrowaną wielkość fizyczną możemy podzielić na: metody wibracyjne (pomiar przyspieszenia), metody impedancyjne (pomiar oporu elektrycznego), metody akustoelastyczne (pomiar prędkości rozchodzenia się fali), metody elastomagnetyczne (pomiar przenikalności magnetycznej) oraz metody bazujące na pomiarze odkształcenia.

Metodę pomiaru należy adekwatnie dobrać, uwzględniając przedmiot oraz zakres koniecznych badań. Czynniki wpływające na zakres stosowania poszczególnych metod pomiarowych [14] zebrano w tabeli 1. Zastosowano skalę, w której oznaczenie „+ + +” reprezentuje najbardziej pożądaną, a „+” najmniej pożądaną właściwość danej metody.

W praktyce inżynierskiej najpowszechniej stosowane są metody elastomagnetyczne (głównie w konstrukcjach wantowych i zastosowaniach geotechnicznych) oraz metody odkształceniowe.

W przypadku metod pomiaru sił sprężających bazujących na pomiarze odkształceń można wyróżnić badania niszczące, seminiszczące oraz nieniszczące (dopuszczające zarysowanie użytkowanej konstrukcji):

Tabela 1. Porównanie metod kontroli sił sprężających

	Metody				
	Wibracyjne	Impedancyjne	Elasto-magnetyczne	Akusto-elastyczne	Odkształceniowe
Czułość pomiaru	+	++	+++	+	+++
Wpływ czynników środowiska	++	++	+++ ¹	? ²	+++ ¹
Łatwość wykonania pomiaru	+++	+++	+	+++	+++
Możliwość zastosowania in situ	+	+++ ³	+++ ³	+++ ⁴	+++
Lokalny lub globalny pomiar siły sprężającej	Globalny	Globalny ⁵	Lokalny	Globalny	Lokalny

¹ możliwa kompensacja lub kalibracja zapewnia stabilny pomiar niezależnie od czynników środowiska

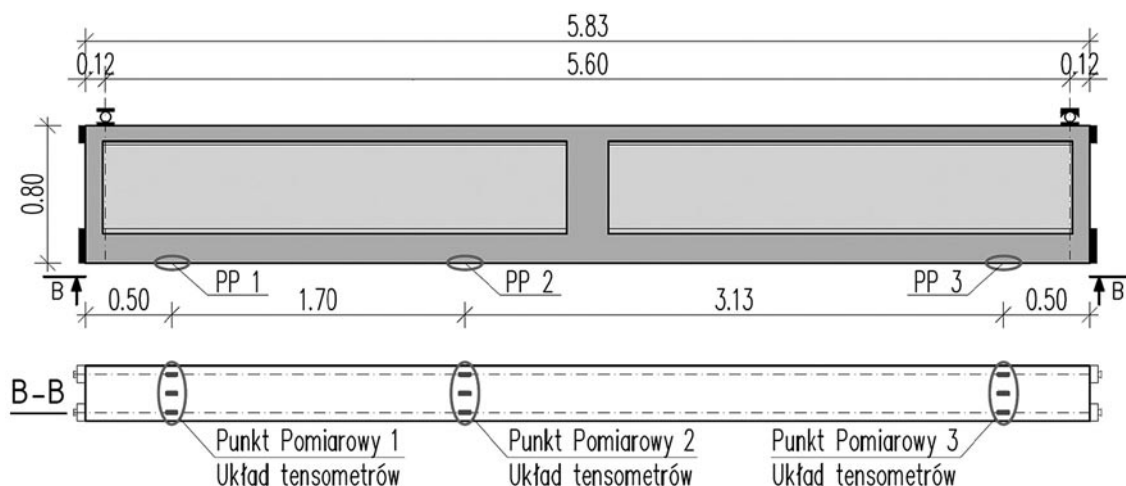
² wpływ czynników środowiska nie został wystarczająco zbadany dla metod akustoelastycznych

³ wykonalne po wcześniejszej kalibracji

⁴ wykonalne przy zastosowaniu tłumienia

⁵ możliwość lokalnego pomiaru siły jedynie w okolicy zakotwienia cięgien

Rys. 1. Schemat stanowiska do badania siły sprężającej



- metoda niszcząca:
 - metoda cięcia kabla – siła sprężająca jest obliczana na podstawie pomiaru odkształceń przecinanego, wcześniej odsonionego, kabla sprężającego [5];
- metody seminiszczące:
 - metoda cięcia otuliny betonowej – siła sprężająca jest obliczana na podstawie zmian odkształceń powierzchni bloku betonowego na możliwie jak najkrótszym odcinku między dwoma równoległymi cięciami otuliny betonowej, rejestrowanych tensometrycznie [6, 7],
 - metoda wiercenia otworu w betonie, w okolicy zbrojenia sprężającego – siła sprężająca jest obliczana na podstawie zmian odkształceń powierzchni betonu rejestrowanych tensometrycznie w bezpośrednim sąsiedztwie wywierczonego otworu [6],
 - metoda obciążenia kabla – wcześniej odsoniony kabel sprężający poddaje się obciążeniu prostopadłemu do jego osi, a siła sprężająca obliczana jest na podstawie wielkości siły odginającej i przemieszczenia kabla [9];
- metoda nieniszcząca:
 - metoda odpowiedzi konstrukcji – siła sprężająca jest obliczana na podstawie określenia wielkości momentu rysującego lub momentu dekompresji (przy ponownym otwieraniu rysy), powodowanego kontrolowanym obciążeniem zewnętrznym [6–8].

Do zastosowania niektórych metod wymagana jest znajomość materiałowych parametrów mechanicznych, np. do wyznaczenia siły sprężającej na podstawie momentu rysującego jest niezbędna znajomość rzeczywistej wytrzymałości betonu na rozciąganie, co w przypadku konstrukcji wciąż użytkowanych może być trudne. Dodatkowo pewną wątpliwość może budzić pytanie, którą wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie należy wykorzystać w obliczeniach (wytrzymałość przy osiowym rozciąganiu czy przy zginaniu, wytrzymałość średnią, minimalną czy charakterystyczną)? Przy metodzie bazującej na momencie dekompresji eliminujemy niepewność tego parametru, a ponadto umożliwia ona wielokrotne przeprowadzenie pomiaru.

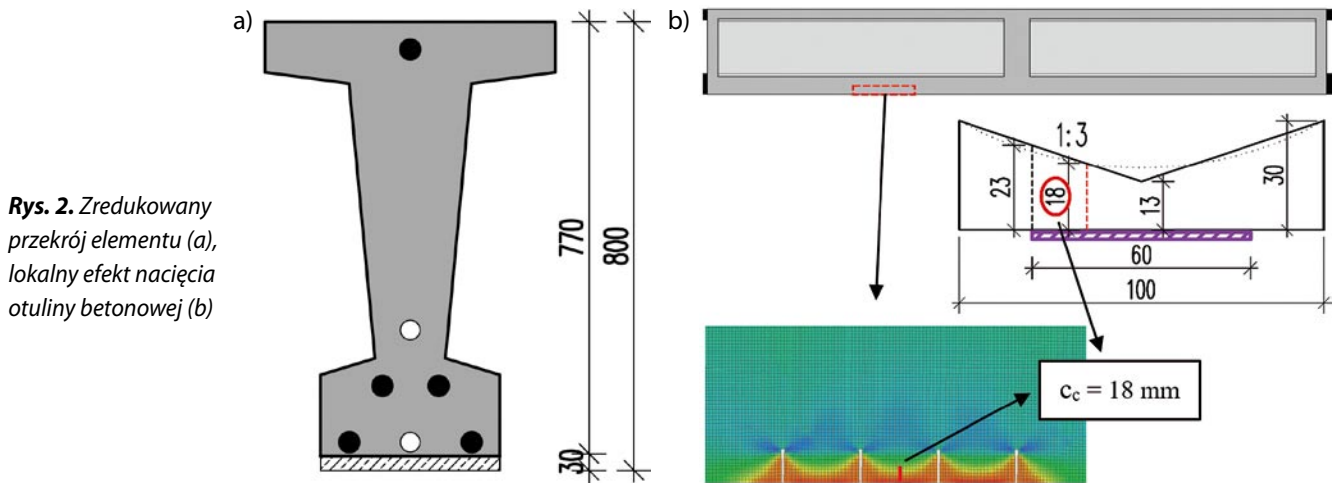
3. Określenie siły sprężającej w elemencie kablobetonowym

Określenie siły sprężającej wykonano w typowej, prefabrykowanej, kablobetonowej belce podsuwnicowej o przekroju dwuteowym, zdemontowanej z hali przemysłowej po ponad 55 latach eksploatacji. Belka ta odpowiada typowi KBP 80/6, zgodnie z katalogiem Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego [15]. W belce zastosowano pierwszy wariant zbrojenia sprężającego, który przewiduje jeden górny oraz cztery dolne prostoliniowe kable sprężające 12 Φ 5 mm ze stali II gatunku o wytrzymałości nominalnej 15000 at. (1471 MPa w przeliczeniu na jednostki SI). Kable sprężające zakotwiono w stalowych zakotwieniach stożkowych o wymiarach 100x100 mm. Według dokumentacji projektowej kable sprężające zostały naprężone do wartości 10000 at., co w przeliczeniu na jednostki SI daje 981 MPa. Zatem początkowa siła naciągowa pojedynczego kabla została zaprojektowana na około 230 kN.

Stanowisko badawcze dla badań metodą seminiszczącą i niszczącą przedstawiono na rysunku 1. Na dolnej powierzchni półki dolnej belki wydzielono trzy obszary pomiarowe, oznaczone kolejno PP1 – PP3. W celu uzupełnienia niniejszej analizy siłę sprężającą oszacowano również na podstawie obliczeń strat siły sprężającej metodą normową zawartą w Eurokodzie 2 [1].

3.1. Pomiar siły sprężającej metodą cięcia otuliny betonowej

W pierwszym etapie badania siły sprężającej w dolnych kablach przedmiotowej belki, we wszystkich punktach pomiarowych zainstalowano tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 60 mm, które rejestrowały odkształcenia na powierzchni betonu w bezpośrednim sąsiedztwie kabli sprężających. Następnie nacinano otulinę betonową z obu stron tensometrów na głębokość ~30 mm za pomocą piły tarczowej. Wydzielony w ten sposób blok otuliny betonowej o szerokości 100 mm lokalnie utracił naprężenia ściskające, będące efektem sprężenia (rys. 3a).



Rys. 2. Zredukowany przekrój elementu (a), lokalny efekt nacięcia otuliny betonowej (b)

Tabela 2. Charakterystyki geometryczne przekroju sprowadzonego – podstawowy i zredukowany

Charakterystyki przekroju sprowadzonego	h	A_{cs}	S_{cs}	v_{cs}	v'_{cs}	I_{cs}	z_{cp}^1	z_{cp}^2
	[mm]	[cm ²]	[cm ³]	[mm]	[mm]	[cm ⁴]	[mm]	[mm]
Przekrój podstawowy	800	2018	85036	421	379	1504682	316	329
Przekrój zredukowany	782	1960	81455	415	367	1403834	328	317

Tabela 3. Obliczenia rzeczywistej siły sprężającej – nacięcie otuliny betonowej

Numer tensometru		PP1-1	PP1-3	PP2-1	PP2-2	PP2-3	PP3-1	PP3-2	PP3-3	Odchylenie standardowe	Wartość średnia
$\Delta \epsilon_a$	[$\mu\epsilon$]	253	316	243	220	218	199	255	243	33	243
P_{mt}	[kN]	802,3	1002,1	770,6	697,6	691,3	631,0	808,6	770,6	104,3	771,8
P_{mt}^1	[kN]	160,5	200,4	154,1	139,5	138,3	126,2	161,7	154,1	20,9	154,4
$\sigma_{p,mt}$	[MPa]	681	851	654	592	587	536	686	654	89	655

Obliczenia siły sprężającej bazowały na założeniu, że w przekroju z naciętą otuliną betonową czynny przekrój elementu ulega zmianie. W konsekwencji charakterystyki geometryczne przekroju sprowadzonego również zostały zredukowane (rys. 2 oraz tab. 2). Wysokość, na której zredukowano efektywny przekrój elementu uzasadniono (rys. 2b) numerycznie oraz analitycznie (zakładając rozchodzenie się naprężeń w betonie niezbrojonym z nachyleniem 1:3). Wybrane wykresy zmian odkształceń zarejestrowanych podczas badania metodą cięcia otuliny betonowej przedstawia rysunek 4a. Pomierzone wartości zmiany odkształcenia betonu $\Delta \epsilon_a$ oraz wyniki obliczeń siły sprężającej P_{mt} na podstawie pomiarów wykonanych w badaniach seminiszcujących zawarto w tabeli 3. Wartość siły P_{mt}^1 reprezentuje uśrednioną siłę naciągu pojedynczego kabla sprężającego 12Φ5, natomiast $\sigma_{p,mt}$ średnią wartość naprężenia rozciągającego w stali sprężającej.

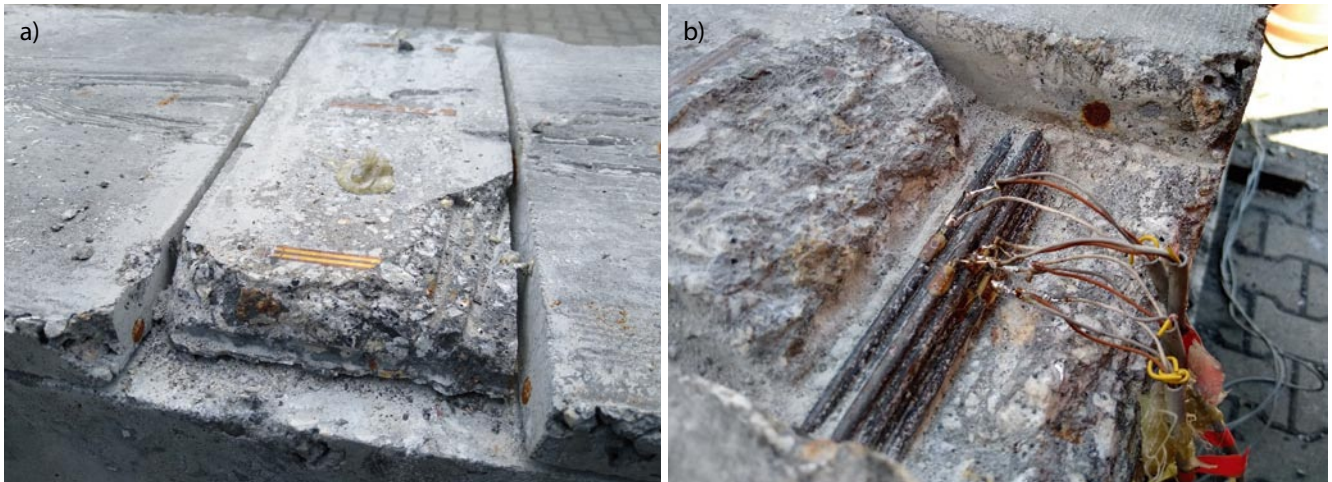
3.2. Pomiar siły sprężającej metodą cięcia kabla

W kolejnym etapie badania przedmiotowej belki kablo-betonowej przeprowadzono pomiar metodą cięcia kabla. W każdym z trzech punktów pomiarowych, po odkuciu

wstępnie naciętej otuliny betonowej w badaniu seminiszcującym i oczyszczeniu zewnętrznych drutów kabli sprężających z iniekcji cementowej, bezpośrednio na powierzchni drutów naklejono tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 5 mm (rys. 3b). Po zabezpieczeniu tensometrów przecięto druty w obu dolnych kablach.

W badaniu tym siłę sprężającą określono w wyniku bezpośredniej rejestracji zmiany odkształceń opomiarowanych drutów w trakcie ich przecinania. Dokładność wyznaczenia siły sprężającej zależy przede wszystkim od znajomości modułu sprężystości stali sprężającej – w obliczeniach przyjęto wartość $E_p = 194 \text{ GPa}$, uzyskaną w badaniach drutów sprężających wyciętych po badaniu [16]. Należy zaznaczyć, że w przypadku kabli sprężających składających się z grupy równoległych cięgien (w tym przypadku drutów) naciąg poszczególnych cięgien może być zróżnicowany. Dlatego istotne jest wykonywanie pomiaru na dużej liczbie drutów danego kabla.

Wybrane wykresy zmian odkształceń zarejestrowanych podczas badania metodą cięcia kabla przedstawia rysunek 4b. Obliczenia siły sprężającej P_{mt} i P_{mt}^1 oraz naprężenia $\sigma_{p,mt}$



Rys. 3. Element z naciętą otuliną betonową po badaniu seminiszczącym (a), tensometry na powierzchni drutów przygotowane do badania niszczącego (b)

Tabela 4. Obliczenia rzeczywistej siły sprężającej – przecięcie kabla

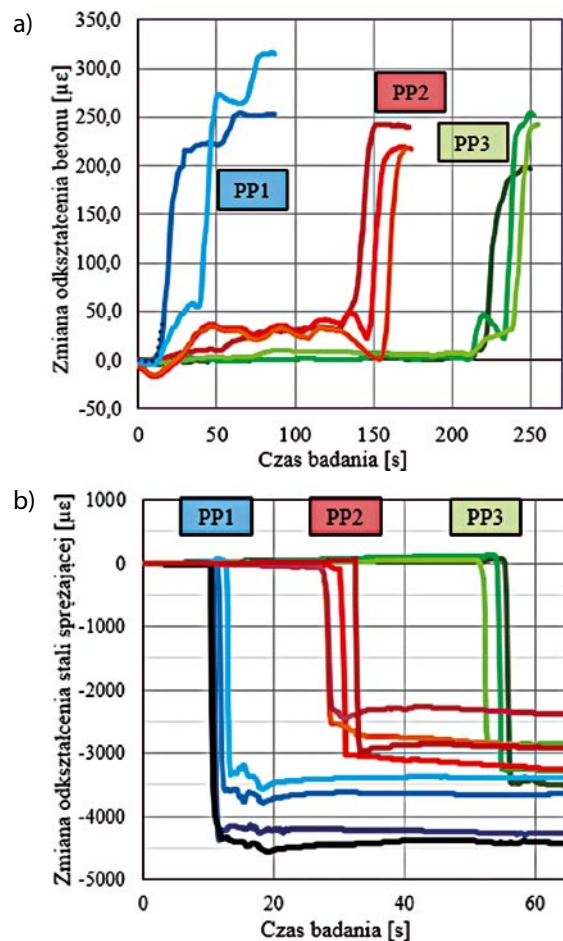
Nr opomiarowanego drutu	$\Delta\epsilon_b$ [$\mu\epsilon$]	P_{mt} [kN]	P_{mt}^1 [kN]	$\sigma_{p,mt}$ [MPa]
1	3574	816,8	163,4	693
2	3305	755,4	151,1	641
3	2913	665,8	133,2	565
4	4367	998,1	199,6	847
5	4551	1040,1	208,0	883
6	3784	864,8	173,0	734
7	3566	815,0	163,0	692
8	3292	752,4	150,5	639
9	3044	695,7	139,1	591
10	3808	870,3	174,1	739
11	4118	941,2	188,2	799
12	3724	851,1	170,2	722
Odchylenie standardowe	479	109,6	21,9	93
Wartość średnia	3671	838,9	167,8	712

określonych na podstawie pomierzonych zmian odkształceń $\Delta\epsilon_b$, przedstawiono w tabeli 4.

3.3. Obliczenia siły sprężającej w kablu na podstawie danych projektowych

Obliczenia obecnie istniejącej siły sprężającej wykonano w oparciu o założenie, że wszystkie kable zostały naciągnięte z jednakową siłą, podaną w dokumentacji projektowej elementu typowego. Straty siły sprężającej obliczono na podstawie p. 5.10 Eurokodu 2 [1]. Podstawowe założenia przyjęte przy obliczeniach strat siły sprężającej zestawiono w tabeli 6.

Należy pamiętać, że końcowa wartość strat siły sprężającej bardzo zależy od założeń obliczeniowych. Na przykład w wypadku krótkich elementów strata siły spowodowana poślizgiem cięgien w zakotwieniu ma bardzo istotny udział



Rys. 4. Wybrane wyniki pomiarów tensometrycznych: a) metoda seminiszcząca, b) metoda niszcząca

w całkowitych stratach. Wielkość jednoczesnego poślizgu drutów zakotwionych stożkiem stalowym wynosi około 3–6 mm, w zależności od dokładności dobicia stożka kotwiącego [17]. W pracy tej potwierdzono, że poślizgi 3-milimetrowe występowały w przypadku realizacji sprężenia przy dużej dokładności prac, co jest szczególnie wymagane w krótkich elementach kablobetonowych. W przypadku

Tabela 5. Obliczenia strat siły sprężającej

	Wartość całkowita	Wartość dla A_{p1}^1	Wartość dla A_{p2}^2	Wartość uśredniona ³	Zmiana względem P_0
P_0 – początkowa siła naciągowa kabli	1155,3 kN	924,2 kN	231,1 kN	231,1 kN	-
ΔP_μ – strata w wyniku tarcia cięgien o kanał kablowy	4,4 kN	3,5 kN	0,9 kN	0,9 kN	< 1%
ΔP_{sl} – strata w wyniku poślizgu cięgien w zakotwieniach	122,4 kN (244,9 kN)*	98,0 kN	24,4 kN	24,5 kN	11%
ΔP_c – strata wywołana odkształceniem sprężystym betonu	18,0 kN	18,8 kN	- 0,8 kN	3,6 kN	2%
P_{m0} – siła sprężająca po stratach doraźnych	1010,5 kN	803,9 kN	206,6 kN	202,1 kN	13%
ΔP_{c+s+r} – straty opóźnione	163,5 kN	144,2 kN	19,3 kN	32,7 kN	14%
$P_{mt}(t_{50})$ – siła sprężająca po stratach całkowitych	847,0 kN	659,7 kN	187,3 kN	169,4 kN	27%

* wartość obliczona przy założeniu długości poślizgu kabla w zakotwieniu 6 mm; dla dalszej analizy założono długość poślizgu 3 mm – wartość spodziewana

¹ wartość dla dolnych kabli sprężających 4x 12Φ5 $A_{p1} = 942 \text{ mm}^2$

² wartość dla górnego kabla sprężającego 1x 12Φ5 $A_{p2} = 236 \text{ mm}^2$

³ wartość uśredniona dla pojedynczego kabla sprężającego 12Φ5 $A_p = 236 \text{ mm}^2$

Tabela 6. Założenia do obliczenia strat siły sprężającej

P_0 – początkowa siła naciągowa kabli	Początkowe naprężenie naciągowe według projektu KBP 80/6		$\sigma_{p,mt} = 981 \text{ MPa}$
ΔP_μ – strata w wyniku tarcia cięgien o kanał kablowy	– naciąg jednostronny – prostoliniowa trasa kabli – kanał kablowy bez osłonek		$\mu = 0,17$ $k = 0,008 \text{ rad/m}$
ΔP_{sl} – strata w wyniku poślizgu cięgien w zakotwieniach	$a_p = 3 \text{ mm}$	$(a_p^* = 6 \text{ mm})$	$x_0 > L$
ΔP_c – strata wywołana odkształceniem sprężystym betonu	– 5 operacji naciągowych – kolejność naciągu kabli według projektu – w chwili sprężenia $E_{cm0} = 0,85 E_{cm}$		$E_{cm} = 34,9 \text{ GPa}$ $E_{cm0} = 29,7 \text{ GPa}$
Założenia na potrzeby obliczenia efektów reologicznych	$t_0 = 10$ dni – czas sprężenia RH = 50% – wilgotność $h_0 = 157 \text{ mm}$ ($u = 2440 \text{ mm}$) $\alpha = 0$ – CEM 'N' $\rho_{1000} = 2,5\%$ – niska relaksacja		$\varphi(t_{50}, t_0) = 2,14$ $\epsilon_{cs} = 3,77 \cdot 10^{-4}$ $\Delta\sigma_{pr} = 9,6 \text{ MPa}$

Tabela 7. Zestawienie uzyskanych wartości pozostałej siły sprężającej

Metoda określenia siły	P_{mt} [kN]	P_{mt}^1 [kN]	$\sigma_{p,mt}$ [MPa]	Różnica w stosunku do metody niszczącej $\Delta_{p,mt}$ [%]
Obliczenia strat siły sprężającej wg EC2	847,0	169,4	719	1
Badanie metodą cięcia otuliny betonowej	771,8	154,4	655	8
Badanie metodą cięcia kabla	838,9	167,8	712	-

mocnego dobitcia stożka o poboczniczy profilowanej uzyskiwano dolne wartości poślizgu. Różnica wielkości straty siły spowodowanej poślizgiem wyznaczonej dla poślizgu równego 3 mm, w porównaniu do poślizgu 6 mm wynosi 122,5 kN (zmiana o 11% siły początkowej P_0).

Moduł sprężystości betonu w chwili sprężenia założono na poziomie 85% wartości uzyskanej z badań próbek betonowych wyciętych po badaniu siły (wartość średnia

$E_{cm} = 34,9 \text{ GPa}$ [16]). Procentowy przyrost modułu sprężystości betonu założono na podstawie badań betonu na kruzywach granitowych zawartych w pracy [18].

Wyniki obliczeń strat siły sprężającej przedstawiono w tabeli 5. Wartości strat zawarte w tabeli obliczono w przekroju środka rozpiętości belki, co w analizowanym elemencie w przybliżeniu reprezentuje średnią wartość strat (oraz siły sprężającej) na długości belki.

4. Podsumowanie

Uzyskane wartości średnie pozostałej siły sprężającej w kablach przedstawiono w tabeli 7. Jako wartość odniesienia założono wyniki uzyskane z najbardziej miarodajnej metody pomiarowej, tj. metody niszczącej, z uwagi na bezpośredni pomiar odkształceń stali sprężającej, a w konsekwencji najmniejszą liczbę parametrów zmiennych, wpływających na końcową wartość siły sprężającej.

Otrzymane wartości siły sprężającej są zbliżone dla każdej z użytych metod. Badania wykazały duże odchylenia standardowe wyników pomiarów metody niszczącej oraz seminiuszczącej (tab. 3 i 4). Należy jednak zaznaczyć, że niepewność wyniku pomiaru wynika zarówno z technologii poszczególnych metod pomiarowych, jak i z samej staranności wykonawstwa badanego elementu prefabrykowanego. Problem wpływu jakości wykonawstwa na nośność kabli typu Freyssineta był dogłębnie analizowany probabilistycznie w [19]. Autor wskazał staranność prowadzenia procesu sprężania jako podstawowy czynnik wpływający na równomierność naciągu poszczególnych drutów w kablach.

Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej obiecujący wydaje się być pomiar siły sprężającej metodą cięcia otuliny betonowej – w analizowanym przypadku otrzymany wynik różnił się o 8% w stosunku do pomiaru metodą cięcia kabla, natomiast jest to metoda seminiuszcząca możliwa do zastosowania in-situ bez konieczności wyłączenia badanego elementu z użytkowania. Niemniej jednak metoda ta wymaga dużej dokładności wykonania, a nacięcia otuliny betonowej muszą być wykonane z należytą starannością tak, aby nie uszkodzić zbrojenia – w szczególności cięgien sprężających.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 2008
- [2] Pre-norma Konstrukcji Betonowych fib Model Code 2010, t. 1, 2. Kraków, Wydawnictwo Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2014
- [3] ACI-318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Detroit: American Concrete Institute, 2002
- [4] Bagge N., Structural Assessment Procedures for Existing Concrete Bridges Experiences from failure tests of the Kiruna Bridge, PhD Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, 2017
- [5] Halsey J. T., Miller R., Destructive Testing of Two Forty-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams, PCI Journal, t. 41, 5/1996, str. 84–93, doi: 10.15554/pci.09011996.84.93
- [6] Azizinamini A., Keeler B. J., Rohde J., Mehrabi A. B., Application of a New Nondestructive Evaluation Technique to a 25-Year-Old Prestressed Concrete Girder, PCI Journal, t. 41, 3/1996, str. 82–95, doi: 10.15554/pci.05011996.82.95
- [7] Kukay B., Barr P. J., Halling M. W., Womack K., Determination of the Residual Prestress Force of In-Service Girders Using Non-Destructive Testing, Structures Congress 2010, str. 709–716, 2012, doi: 10.1061/41130(369)65
- [8] Garber D., Gallardo J., Deschenes D., Bayrak O., Experimental Investigation of Prestress Losses in Full-Scale Bridge Girders, ACI Structural Journal, t. 112, 2015, str. 553–564, doi: 10.14359/51687909
- [9] S. Civjan A., Jirsa J., Carrasquillo R., Fowler D., Instrument to evaluate remaining prestress in damaged prestressed concrete bridge girders, PCI Journal, t. 43, 2/1998, str. 62–69
- [10] Schweighofer A., Vill M., Kollegger J., Ermittlung der vorhandenen Spannkraft in 50 Jahre alten Brückenträgern und Vergleich der Verluste nach EC2, Beton-und Stahlbetonbau, t. 107, 2/2012, str. 96–105, doi: 10.1002/best.201100066
- [11] Czaderski C., Motavalli M., Determining the Remaining Tendon Force of a Large-Scale, 38-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Girder, PCI Journal, t. 51, 4/2006, str. 56–68
- [12] Pessiki S., Kaczinski M., Wescott H. H., Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams, PCI Journal, t. 41, 6/1996, str. 78–89, doi: 10.15554/pci.11011996.78.89
- [13] Bagge N., Nilimaa J., Elfgren L., In-situ methods to determine residual prestress forces in concrete bridges, Engineering Structures, t. 135, 2017, str. 41–52, doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.059
- [14] Abdel-Jaber H., Glisic B., Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures – An overview, Struct Control Health Monit, 2019, str. e2374, doi: 10.1002/stc.2374
- [15] BISTYP, Projekt typowych belek podsuwnicowych z betonu sprężonego, Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego, Warszawa, 1957
- [16] Walczak R., Derkowski W., Shear capacity tests of PC crane beams in uncertain prestressing tendons anchorage conditions, fib Congress 2022 [in press], Oslo, 2022
- [17] BISTYP, Zakotwienia w konstrukcjach sprężonych, Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego, Warszawa, 1955
- [18] Seruga A., Kańka S., Lisowicz T., Moduł sprężystości betonów na kruszywie granitowym w świetle badań doświadczalnych, Czasopismo Techniczne. Budownictwo, Z.4-B (R. 109, Z.21), 2012, str. 103–117
- [19] Ziobroń W., Statystyczna ocena nośności cięgien sprężających w konstrukcjach kablowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Katedra Budownictwa Żelbetowego, Kraków, 1964

V Międzynarodowa Konferencja Naukowa

ECCE 2022

Environmental challenges in civil engineering
Zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie

Opole, 26-28 Wrzesień 2022

e-mail: ecce2022@po.edu.pl

www: <https://ecce2022.po.edu.pl/>