

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

Sandra Stelmasik
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska

Idea sprężenia jest następująca: w układ konstrukcji wprowadzamy taki układ sił, który będzie przeciwny do tego, jaki wywołują siły masowe i obciążenia zewnętrzne. Innymi słowy jest to wprowadzenie w część rozciąganą elementu, w miejsce naprężeń rozciągających, naprężeń ściskających. Rozwiązanie to ma wiele zalet. Dzięki niemu efektywność wykorzystania betonu jest znacznie większa niż w żelbecie. Poprzez ściśnięcie elementu sprawiamy, że beton wcześniej niepracujący bierze udział w zwiększeniu nośności konstrukcji. Ponadto, zmniejszając zużycie materiału, możemy osiągać większe rozpiętości przęseł. Konstrukcja staje się bardziej ekonomiczna. Dodatkowo jesteśmy w stanie zdecydowanie zmniejszyć ugięcia projektowanego elementu.

W konstrukcjach sprężonych działają znaczne siły wewnętrzne oraz naprężenia niezależnie od obciążeń zewnętrznych. Nawet w elemencie nieobciążonym znajdującym się na podłożu siła sprężająca wywołuje natychmiastowe wygięcie elementu oraz powstanie znacznych sił wewnętrznych. Z tego powodu zbrojenie sprężające nosi nazwę zbrojenia czynnego.

Istnieje kilka sposobów sprężania. Wyróżniamy sprężanie:

- termiczne,
- za pomocą pras sprężających,
- za pomocą cięgien (kabli/strun) sprężających.

Dalsze omówienie tematyki związanej ze stratami sprężania zostanie odniesione do technologii napinanych cięgien. Jest to metoda najczęściej stosowana w mostownictwie.

MOSTY SPRĘŻONE

analiza strat sprężania

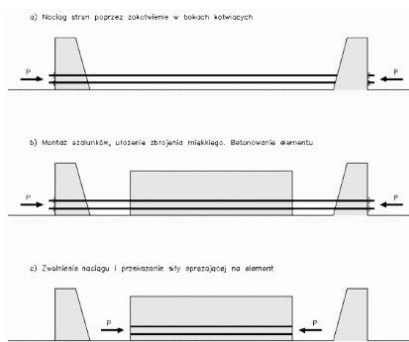
Celem artykułu jest uświadomienie młodym projektantom zagadnień procesu projektowania mostów sprężonych. Odpowiednie oszacowanie strat sprężania należy do bardzo istotnych elementów projektu konstrukcji sprężonej.

TECHNOLOGIE SPRĘŻANIA KONSTRUKCJI ZA POMOCĄ CIĘGIEN

Wyróżniamy dwie technologie sprężania za pomocą cięgien sprężających: strunobeton oraz kablobeton. Metody te różnią się sposobem napinania cięgien oraz sposobem wprowadzania siły sprężającej. Wybór metody ma istotny wpływ na sposób obliczeń strat sprężania. Poszczególne składowe brane pod uwagę w wyznaczaniu ostatecznej wartości strat sprężania są zależne od wyboru technologii.

Strunobeton

W tej technologii potrzebne są elementy mocno utwierdzone w podłożu, tj. bloki oporowe. Pomiędzy nimi odbywa się naciąganie liny na tzw. torach naciągowych – następuje wprowadzenie energii w sploty cięgien. W następnej kolejności sploty zostają obetonowane.



Rys. 2. Poszczególne fazy produkcji elementu strunobetonowego [4]

Rozpoczyna się czas oczekiwania na osiągnięcie przez beton odpowiedniej wytrzymałości. Po jej uzyskaniu sploty cięgien zostają przecięte. W wyniku tego energia z bloków oporowych zostaje przekazana na wykonywany element – zaczyna ściskać beton. W ten sposób doprowadza się do sprężenia konstrukcji. Siła w elemencie zostaje przekazana przez siłę: tarcia, adhezji oraz przez siłę dodatkową (wynikającą ze współczynnika Poissona). Innym sposobem wykonania strunobetonu jest wykorzystanie form samonośnych. Strunobeton jest wykorzystywany do wytwarzania elementów prefabrykowanych.

Kablobeton

Technologia ta zakłada w pierwszej kolejności wykonanie bloku betonowego, wewnątrz którego zostaje pozostawiony kanał. W jego miejsce po stwardnieniu betonu i uzyskaniu przez niego odpowiedniej wytrzymałości wprowadzamy kable sprężające. W tym celu zakładamy bloki kotwiące – elementy, które pozwolą zakotwić cięgna, oraz prasę – za jej pomocą kable zostaną naciągnięte. Po naciągnięciu cięgien i zwolnieniu prasy siła sprężająca zostaje przekazana na element betonowy – cięgno spręża beton.

STRATY SPRĘŻANIA – PRZYCZYNY I CHARAKTERYSTYKA

Nie jesteśmy w stanie dokładnie wyznaczyć wartości strat. Projektant może je jedynie oszacować. Ustalenie trafnej wartości strat prowadzi do skutecznego sprężenia konstrukcji. Straty sprężania powodują zmianę wartości siły wywieranej na konstruk-

Rys. 1. Sprężenie ustroju nośnego [3]



cję. Siła ta ulega zmniejszeniu i w wyniku tego jest mniejsza od siły nominalnej – siły wywołanej przez urządzenie do sprężania.

Wyróżniamy straty powstające w procesie sprężania oraz te będące efektem procesów fizykochemicznych zachodzących w betonie i stali sprężającej.

Na powstawanie strat istotny wpływ ma sposób sprężania.

Główny podział strat został ustalony na podstawie czasu, jaki upływa od powstania elementu oraz wprowadzenia siły sprężającej do chwili rozpatrywania wyężenia konstrukcji. Zgodnie z tym kryterium straty

dzielimy na doraźne oraz opóźnione (reologiczne). Kluczowy jest tu moment zakotwienia cięgien. To on jest barierą pomiędzy tymi dwoma rodzajami strat. Straty doraźne rozpatrujemy do momentu zakotwienia cięgien. Wynikają z wykonawstwa i technicznych warunków naciągu. Nie mogą przekroczyć akceptowalnej różnicy pomiędzy wielkością dopuszczalnej początkowej i trwałej wartości naprężeń w cięgniach. Straty reologiczne wystąpią po zakotwieniu cięgien. Są związane z cechami materiałów. Po zakończeniu procesów reologicznych siła sprężająca ma stałą wartość. Zaniedbujemy wzrost siły ze względu na wydłużenie elementu poprzez jego ugięcie, ponieważ dla elementów niezarysowanych zmiana siły nie przekracza 5% jej wartości.

Straty doraźne

Straty doraźne powstają do momentu zakotwienia cięgien. Wynikają z procesu sprężania. Z tego powodu ich wyznaczenie należy do technologa. Projektant ma za zadanie ich oszacowanie oraz uwzględnienie wpływu strat na zmniejszenie siły sprężającej podczas programowania naciągu. Dzięki temu pozyskuje wiedzę na temat wartości siły, z jaką należy napiąć cięgno, by w krytycznym przekroju zrealizować siłę przyjętą w procesie projektowania jako tzw. siłę początkową. Strat doraźnych nie uwzględniamy w analizie nośności konstrukcji. Pomimo tego musimy je oszacować, aby ustalić, czy sprężanie konstrukcji jest technicznie możliwe. Może się bowiem okazać, że ich wartość będzie na tyle duża, że uniemożliwi zre-

alizowanie planowanej siły sprężającej, która po uwzględnieniu strat reologicznych pozwoli na uzyskanie wymaganej trwałej siły sprężającej.

Wyróżniamy straty doraźne związane z [1]:

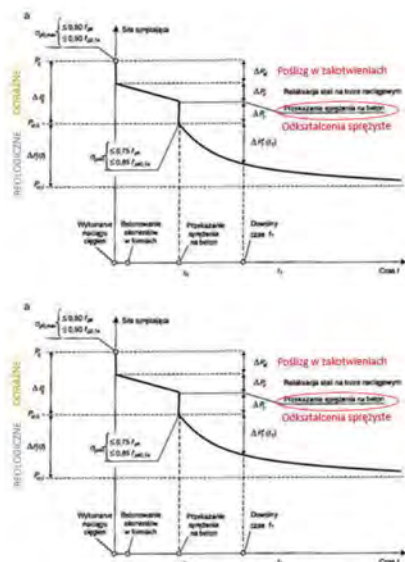
- oporami wewnętrznymi urządzeń naciągowych,
- stratami w urządzeniach i uchwytach,
- tarciami w kanałach kablowych lub na dekiatorach,
- odkształceniami sprężystymi betonu lub form samonośnych,
- różnicą temperatur konstrukcji sprężanej (formy) i kabli sprężających,
- częściową relaksacją cięgien,
- odkształceniami styków.

Opory wewnętrzne urządzeń naciągowych

Straty te związane są z tarciami ruchomych części pras. Określa się je poprzez różnicę siły naciągu wynikającą z iloczynu ciśnienia i pola czynnej powierzchni tłoka prasy oraz siły efektywnej naciągu cięgna, zależnej od sprawności urządzenia. Wartość tych strat musi być znana, chociaż nie ma istotnego wpływu na proces sprężania. Powinna być podana przez producenta pras. Uzyskuje się ją poprzez pomiar efektywnej wartości naciągu w porównaniu z siłą nominalną.

Straty w urządzeniach i uchwytach

Występują w zakotwieniach, w których kotwienie następuje w wyniku tarcia pomiędzy cięgniami a elementami bloku kotwiącego. Ich skutkiem jest zmniejszenie wydłużenia kabla oraz siły sprężającej.



Rys. 3. Straty sprężania dla kablobetonu i strunobetonu [1]

W wyniku braku kontaktu naciąganego ciężna z betonem lub dewiatorem następuje poślizg ciężna, co skutkuje równomiernym spadkiem naprężeń. Wartość straty w zakotwieniach jest związana z wartością przemieszczenia względem zakotwienia. Podaje ją producent. Wpływ tej straty łagodzi pojawienie się tarcia odwrotnego. W takim przypadku energia sprężysta jest równoważona przez siłę tarcia.

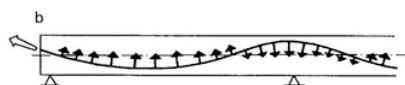
Strata ta występuje jedynie na określonym odcinku. Jego wyznaczenie różni się w zależności od kształtu trasy przebiegu kabla. Odcinek, na którym należy uwzględnić straty, obliczamy inaczej dla tras prostoliniowych oraz krzywoliniowych. Strata ma różną wartość na długości elementu. Im bliżej zakotwienia, tym większa jest jej wartość. Można z tego wynioskować, że na jej wielkość ma również wpływ schemat statyczny konstrukcji. W przypadku belek ciągłych wpływ tej straty jest niewielki w porównaniu z belkami jednolub dwuprzęsłowymi.

$$\Delta P_{st} = 2a_p \frac{x_0 - x}{x_0^2} E_s A_p$$

$$x_0 = \frac{r}{\mu} \ln \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{a_p \mu E_s A_p}{P_0 r}}}$$

Tarcie w kanałach kablowych lub na dewiatorach

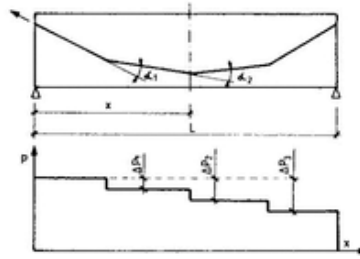
Straty od tarcia na zakrzywieniach trasy są powodowane poprzez składową prostopadłą powodującą docisk do kanału. Efektem tego jest pojawienie się siły normalnej zmniejszającej wartość naciągu. Można z tego wynioskować, że na wielkość strat znaczący wpływ ma kształt kanału kablowego. Im bardziej zakrzywiony przebieg trasy kabla, tym składowa pionowa jest większa i co z tego wynika, spodziewamy się wystąpienia większej straty.



Rys. 4. Docisk kabla na krzywoliniowym odcinku [1]

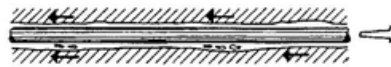
Z powodu występującej w kanałach kablowych siły tarcia przeciwnej do kierunku ruchu kabla spodziewamy się wzrostu straty wraz z oddalaniem się od miejsca zakotwienia czynnego. Dlatego w przypadku stosowania długich kabli zaleca się naciąg dwustronny. Pozwala to znacząco zniwelować wartość strat. Zaleca się projektowanie kabli krótkich. Dodatkowo należy unikać projektowania kabli o zakrzywionych osiach, ponieważ zakrzywienie kanału kablowego wpływa na wartość. Jest to istotne w konstruk-

cjach strunobetonowych, w których możemy mieć do czynienia z ciężnami odjętymi. W takim przypadku wystąpi tarcie na dewiatorach (w miejscach, w których ciężna zmieniają kierunek).



Rys. 5. Strata siły sprężającej na załamaniach trasy ciężna [1]

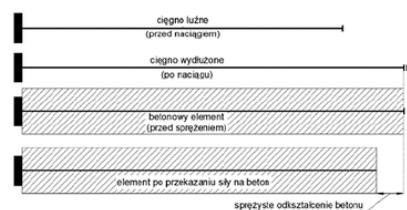
Na wielkość strat od tarcia ma również wpływ składowa wynikająca z niedoskonałości (pofalowania) trasy kabla. W teorii kabel jest prosty. W rzeczywistości podczas procesu betonowania rura staje się podatna, może dojść do pofalowania kabla. W wyniku tego pojawiają się miejsca styków ciężni z osłoną, co powoduje powstanie dodatkowej siły tarcia podczas przemieszczania się ciężni w kanale kablowym. Na wielkość strat ma wpływ sztywność kanału. Jest ona odwrotnie proporcjonalna do wartości strat.



Rys. 6. Niedoskonałość kanału kablowego [1]

Odształcenia sprężyste betonu lub form samonośnych

Strata ta jest wywołana skrótem bloku betonowego w wyniku poddania go działaniu siły normalnej. W strunobetonie ta sytuacja jest oczywista i mniej skomplikowana niż w kablobetonie. Z powodu przecięcia wszystkich ciężni w tym samym czasie odształcenie dla każdego z nich będzie miało taką samą wartość. W przypadku kablobetonu jest inaczej. Kable przecinamy po kolei. W wyniku tego napięcie każdego kolejnego kabla skutkuje skróceniem elementu i wywołuje zmniejszenie siły sprężającej w zakotwionym uprzednio ciężnie. Dzieje się tak, ponieważ przekazanie siły naciągu powoduje skrócenie warstw betonu na wysokości ciężna i tym samym skrócenie ciężna.



Rys. 7. Mechanizm powstawania spadku siły spowodowanego odształceniem sprężystym betonu [2]

Różnica temperatur konstrukcji sprężanej i kabli sprężających

Występuje tylko w elementach strunobetonowych. Przyczyną jej powstania jest obróbka termiczna przyspieszająca dojrzewanie betonu. W jej wyniku powstają okresowe różnice temperatur między ciężnem a konstrukcją oporową. Wahania temperatur prowadzą do zmiany długości ciężna. Ogrzanie powoduje jego odprężenie, wydłużenie, natomiast ostudzenie prowadzi do skrócenia ciężna. Ostatecznie nie ma możliwości odzyskania straconej części naciągu.

Częściowa relaksacja ciężni

Strata ta dotyczy elementów strunobetonowych. Powstaje od chwili naciągu ciężni do czasu zabetonowania ciężni i zwolnienia naciągu. Wpływ na jej powstawanie mają:

- procesy technologiczne i zabiegi przyspieszające dojrzewanie betonu,
- rodzaj stali sprężającej,
- poziom naprężeń,
- temperatura ciężni podczas ogrzania elementu.

Odształcenia styków

Występują w kablobetonowych konstrukcjach składanych z prefabrykowanych segmentów.

Dotyczą styków, które wypełniane są zaprawą. Zależą od szerokości styku i stopnia zagęszczenia betonu. Obecnie styki wykonywane są z dużą dokładnością z użyciem kilkumilimetrowej warstwy zaprawy klejowej. Dzięki temu straty od tak znikomych odształceń można pominać.

Straty opóźnione/reologiczne

Straty reologiczne wystąpią po zakotwieniu ciężni. Należy je uwzględnić w konstrukcyjnym projektowaniu elementów. Można je zredukować poprzez odpowiednie zabiegi technologiczne. Ma to związek z reologicznymi właściwościami betonu, w zależności od: składu betonu, sposobu jego pielęgnacji oraz zastosowanego rodzaju cementu. Ich oszacowanie jest zadaniem projektanta. Przebiegają samoistnie po zakotwieniu ciężni. Należy je ustalić z możliwie dużą dokładnością. Zabiegi technologiczne w procesie sprężania nie mają na nie wpływu.

Wielkość strat opóźnionych decyduje o wartości: początkowej siły sprężającej oraz końcowej siły sprężającej. Są one wykorzystywane w dwóch podstawowych stadiach projektowania konstrukcji: początkowym i użytkowym.

Na oszacowanie strat reologicznych mają wpływ [1]:

- właściwości reologiczne stali sprężającej,
- rodzaj betonu i jego właściwości rozpatrywane w funkcji zmian odształceń w czasie,
- warunki środowiskowe,
- czas, który upłynął od wykonania kon-

struktury do chwili przekazania pełnej siły sprężającej,

- poziom naprężeń w stali i w betonie po sprężeniu.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń określono spodziewane wartości strat opóźnionych w zależności od wybranej technologii sprężania konstrukcji. Procentowo przedstawiają się one następująco:

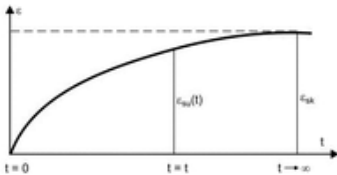
- kablobeton 12–18%,
- strunobeton 15–22%.

Wyróżniamy straty reologiczne spowodowane:

- skurczem betonu,
- pęczaniem betonu,
- relaksacją stali.

Skurcz betonu

Jest to efekt zmniejszenia się objętości betonu spowodowany wysychaniem i zmianami fizykochemicznymi. Odształcenia od skurczu zanikają w czasie. Nie jest to związane z naprężeniami. Interesuje nas wartość odształceń od chwili przyłożenia siły sprężającej. Z tego powodu większe straty od skurczu występują w strunobetonie, ponieważ siła sprężająca zostaje wcześniej przyłożona właśnie w tej technologii.



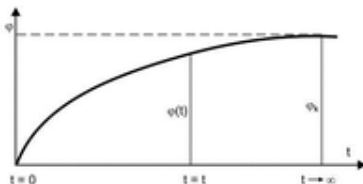
Rys. 8. Zmiana odształceń od skurczu w czasie [1]

Pęczanie betonu

Należy do procesów długotrwałych. Przy niezmiennym się obciążeniu dochodzi do przyrostu odształceń. Do pęczania betonu nie dojdzie pod wpływem obciążeń krótkotrwałych. Musi wystąpić stałe działanie obciążenia.

Pęczanie betonu zależy od [1]:

- rodzaju betonu,
- wytrzymałości betonu na ściskanie (wyższa klasa – mniejsze pęczanie),
- wytrzymałości betonu w chwili jego obciążenia (późniejsze obciążenie – mniejsze pęczanie),
- naprężeń w betonie (mniejsze naprężenia – mniejsze pęczanie),
- warunków eksploatacji konstrukcji i wilgotności betonu (mniejsza wilgotność – mniejsze pęczanie).



Rys. 9. Wykres funkcji pęczania [1]

Relaksacja stali

Jest procesem długotrwałym. Można ją zdefiniować jako zjawisko odwrotne do pęczania betonu. W wyniku działania stałych odształceń zmniejszają się naprężenia, co doprowadza do zmniejszenia siły sprężającej w ciągu sprężającym. Relaksacja zależy od rodzaju stali. W strunobetonie częściowo zaliczamy ją do strat doraźnych, ponieważ zachodzi jeszcze przed zakotwieniem cięgien w betonie.

PROGRAMOWANIE SPRĘŻENIA

W procesie programowania sprężenia dążymy do ustalenia wartości siły, z jaką należy napiąć poszczególne cięgna. Wyznaczamy ją, aby móc zastosować obliczoną, wymaganą siłę sprężającą. Siła, z jaką naciągniemy poszczególne cięgna:

- musi gwarantować realizację trwałej siły sprężającej w okresie przewidywanej eksploatacji konstrukcji ($t = \infty$),
- nie może doprowadzić do zerwania cięgna w czasie sprężania,
- musi być równa wymaganej sile nominalnej powiększonej o przewidywane straty reologiczne,
- musi być podana w projektach konstrukcji.

WIELKOŚĆ STRAT SPRĘŻANIA – PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Wartość strat uzyskano dla mostu sprężonego zaprojektowanego w ramach przedmiotu mosty betonowe. Tematem projektu jest pomost sprężony wolnopodparty o rozpiętości teoretycznej przęsta wynoszącej 22,5 m. Klasa betonu zastosowana w projekcie wynosi C40/50.

Projektowana budowla jest mostem drogowym, z szerokością jezdni między krawężnikami wynoszącą 7,0 m. Na zewnątrz od jezdni znajduje się jeden chodnik o szerokości użytkowej 2,50 m. Po dokonaniu ob-

liczeń zaproponowano 5 splotów o średnicy 15,7 mm w technologii kablobetonu. Zastosowano naciąg dwustronny (rys. 10.).

Przedstawione procentowe wartości strat zostały odniesione do wartości początkowej siły sprężającej, która wyniosła 19 000 kN.

Wartości strat obliczono dla pokazanych na rysunku 11. przekrojów elementu. Z powodu dwustronnego naciągu kabli uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach dla połowy rozpiętości dźwigara.

Straty doraźne

Na wykresach I–IV przedstawiono procentowy rozkład strat na długości elementu.

Straty reologiczne

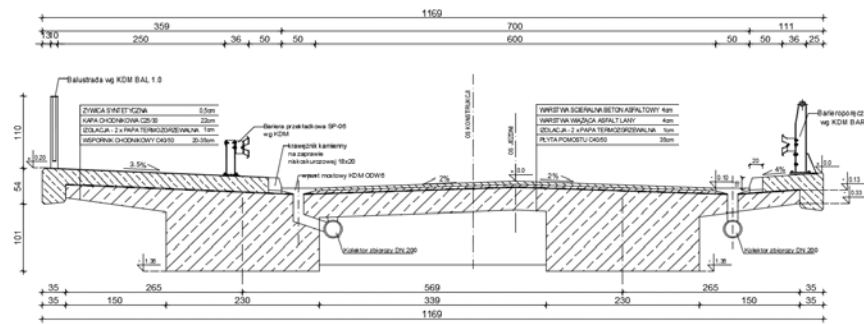
Wartości strat opóźnionych są wyznaczone za pomocą jednego wzoru, który uwzględnia wpływ zarówno skurczu i pęczania betonu, jak również relaksacji stali.

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = A_p \Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{\epsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p A_p}{E_{cm} A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2\right) [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)]}$$

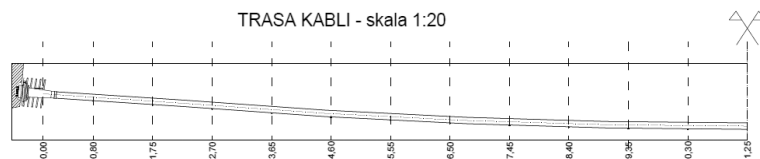
Wyniki uzyskane w projekcie

Przedstawione na wykresach V–VII wyniki obrazują zmianę poszczególnych strat na długości elementu. Możemy zaobserwować, jaki mają procentowy udział w początkowej sile sprężającej oraz jak duży wpływ ma zmiana parametrów, np. zastosowanej klasy betonu. Wyniki uzyskano tylko dla elementu jednoprzęsłowego, wolnopodpartego. W przypadku elementu ciągłego lub z naciągiem jednostronnym rozkład strat różniłby się od przedstawionego.

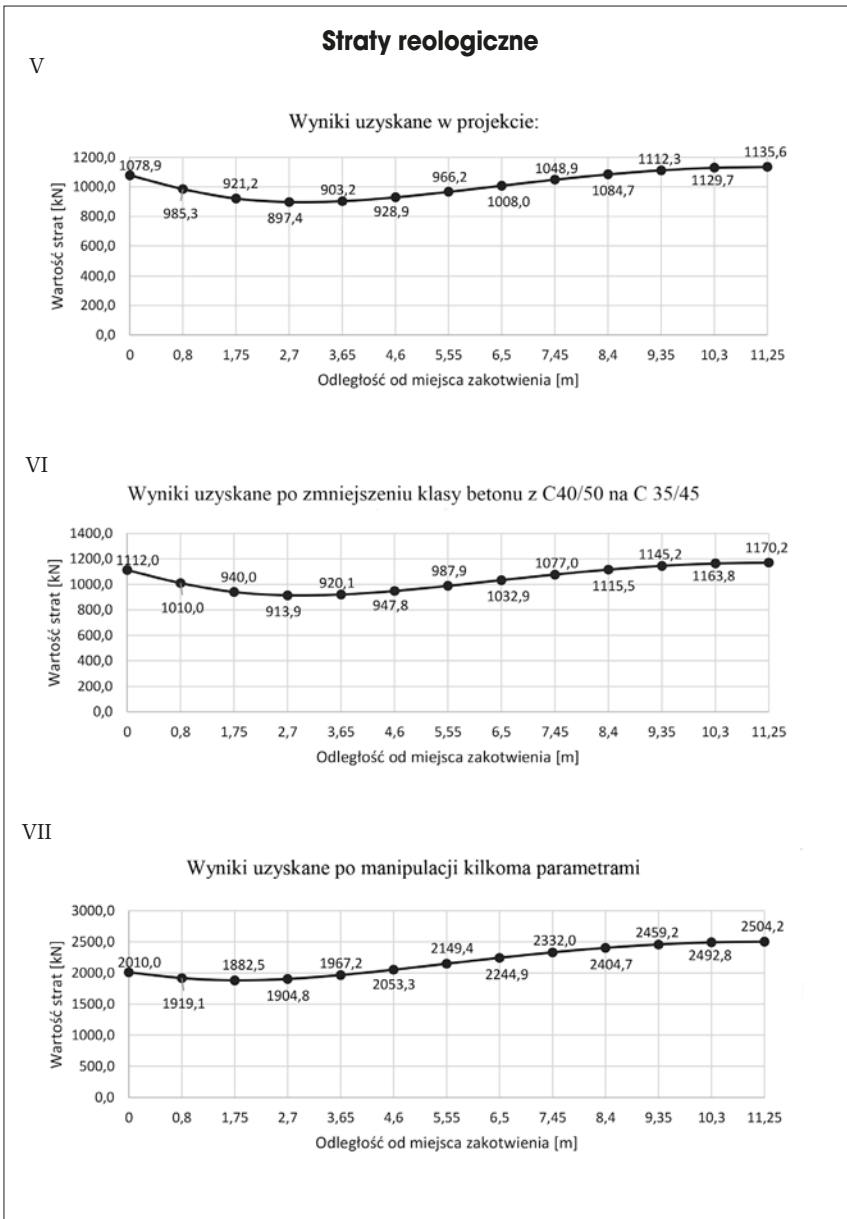
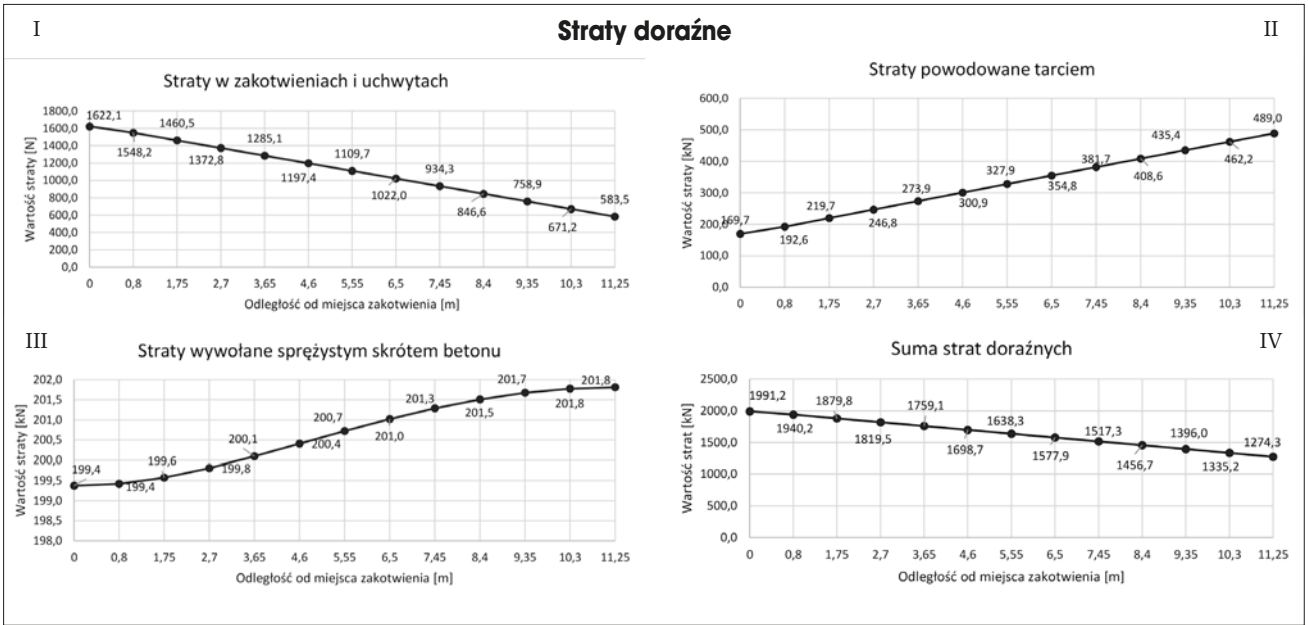
Pokazano również początkowe wyniki strat reologicznych, które nie mieszczą się w granicach przewidywanych: 12–18%. Jest to celowy zabieg mający na celu pokazanie, jak obliczone wartości strat w wyniku nie do koń-



Rys. 10. Przekrój poprzeczny projektowanej konstrukcji



Rys. 11. Przebieg trasy kabla



ca odpowiednich założeń mogą się różnić od tych pożądaných. Odpowiednio wyznaczona wartość strat reologicznych jest bardzo ważna, ponieważ o tę wielkość zostaje pomniejszona początkowa siła sprężająca. W wyniku tego otrzymujemy końcową siłę sprężającą. Jest ona wykorzystywana do obliczeń w stadium nieużytkowym oraz użytkowym konstrukcji. ■

Bibliografia

1. Madaj Arkadiusz, Wołowicki Witold, Projektowanie mostów sprężonych. WŁK, Warszawa 2010.
2. Derkowski Wit, Surma Mateusz, Projektowanie konstrukcji sprężonych wg Eurokodu 2, „Builder” 2014, 54.
3. <http://obwodnicany.pl/galeria/postep-robot/item/654-sierpien-2016>.
4. http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materiały_i_technologie,artykul,konstrukcje_sprezone_podstawowe_różnice_miedzy_zalożeniami_tehnologicznymi_w_struno_i_kablobetonach,6966.
5. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguly ogólne i reguly dla budynków.
6. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Obliczenia i reguly konstrukcyjne.

Abstract. Prestressed bridges – an analysis of the compressing losses. This paperwork is concentrated on the analysis of the loss of the compressing as well as temporary and rheological losses. Compared and contracted grounds of their occurrence and share in several losses in reference to final value. Studies were conducted based on taking certain assumptions – more or less pertinent, agreeable to the engineering art. In consequence obtained comparison of the losses and summary, how they impact on the final value of the forces which are taken to dimensioning structures by the designers.
Keywords: loss of the compressing, temporary loss, rheological loss