

Strefa zakotwień kabli sprężających – problemy technologiczne i projektowe

Mgr inż. Piotr Owerko, dr inż. Marek Salamak, Politechnika Śląska

1. Wprowadzenie

Konstrukcje z betonu sprężonego stanowią dużą część nowo projektowanych obiektów mostowych w naszym kraju. Sprężenie pozwala na osiągnięcie większych smukłości elementów nośnych oraz zmniejszenia zużycia podstawowych materiałów. Dodatkowo, otwierają się możliwości zastosowania nowoczesnych technologii wykonania jak nasuwanie czy betonowanie nawisowe, które znacznie skracają czas budowy i pozwalają zredukować koszty. Jednak przy stosowaniu sprężania zarówno projektant, jak i wykonawca muszą wziąć pod uwagę pewne dodatkowe problemy i utrudnienia, które nie występują w przypadku konstrukcji żelbetowych albo stalowych. Jednym z nich jest odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie strefy zakotwień. Wymagania odnośnie stopnia i sposobu zbrojenia w połączeniu z precyzją geometrycznego zamocowania bloków oporowych często generują trudności przy rozprowadzeniu i wibrowaniu mieszanki betonowej, co niestety czasami skutkuje dość uciążliwymi awariami. W czasie procesu sprężania nierzadko dochodzi do zniszczenia betonowej strefy pod płytą oporową ciągną i wciśnięciu głowicy do wnętrza konstrukcji.

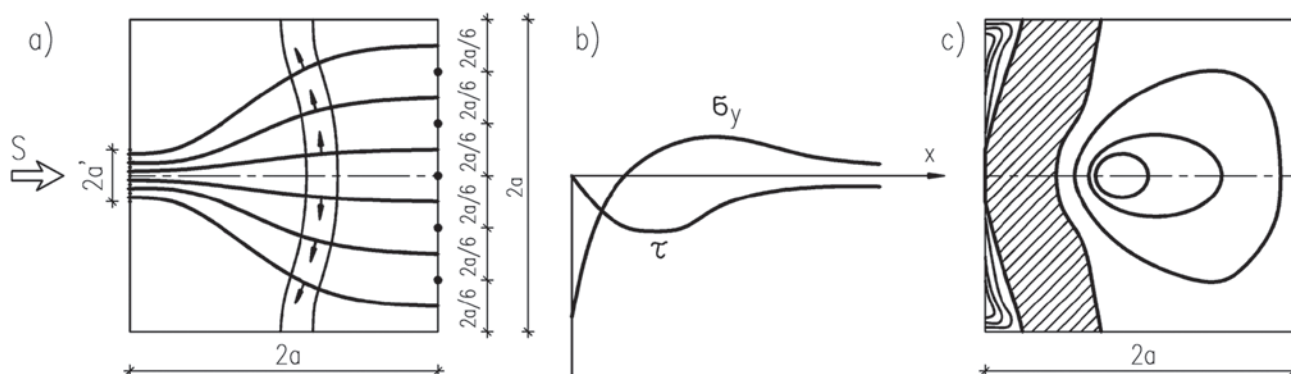
Choć problem ten znany jest od wielu lat, to wciąż przydarza się na wielu budowach w naszym kraju. Zebrane przez autorów przypadki pokazują, że jest on niestety bagatelizowany, a sugerowane przez dostawców systemu sprężania, zbrojenie strefy zakotwień może oka-

zać się nie wystarczające przy bardziej złożonych przypadkach pracy tej strefy.

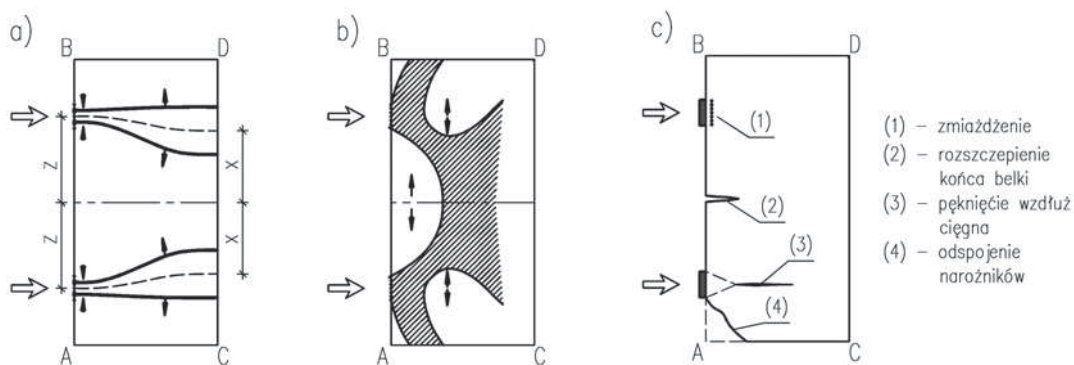
2. Złożony stan naprężeń w strefie zakotwień

2.1. Podstawy teoretyczne

Punktem wyjścia do pokazania rozkładu naprężeń w strefie zakotwień niech będzie prostokątny element sprężony jednym ciągnem w sposób centryczny. Jest to przypadek klasyczny wykorzystywany przez wielu badaczy (Mörsch [13], Magnel [14], Guyon [1], Lenchow i Sozen [11]). Przeprowadzona analiza metodami numerycznymi [3] pokazała, że klasyczne podejście Guyona [1] jest najbliższe modelowi MES. Guyon wyprowadził wyrażenia opisujące naprężenia w postaci szeregów Fouriera. Zgodnie z zasadą de Saint-Venanta, w miarę oddalania się od zakotwienia, rozkład naprężeń staje się coraz bardziej równomierny (rys. 1a). Kształt linii izostatycznej posiada dwie krzywizny. Na długości tej drugiej, gdzie druga pochodna jest ujemna, występują naprężenia rozciągające σ_y nazywane wgłębnyymi. Przybliżony rozkład tych naprężeń oraz towarzyszących im naprężeń stycznych przedstawiony został na rysunku 1b. Rozkład ten uzależniony jest od stosunku a' do a . Wyniki pokrywają się z doświadczeniami przeprowadzonymi metodą elastooptyczną przez Tesara [12]. Rozkład izobar pokazany na rysunku 1c (obszar zakreskowany oznaczający ściskania) wskazuje, że naprężenia rozciągające pojawiają się również w bezpośredniej bliskości czoła elementu. Są to tak



Rys. 1. Strefa zakotwień przy pojedynczym obciążeniu: a) linie izostatyczne, b) rozkład naprężeń, c) izobary naprężeń [2]



Rys. 2. Strefa zakotwień przy wielokrotnym obciążeniu: a) linie izostatyczne, b) izobary naprężeń, c) potencjalne miejsca awarii [2, 4]

zwane naprężaniem przyczołowe. Należy jednak dodać, że ze względu na ich stosunkowo mały zasięg, wartości odpowiadających im sił nie są duże.

W przypadku występowania kilku sił na czole elementu (rys. 2) sytuacja komplikuje się. Oprócz naprężeń rozciągających wzdłużnych (możliwość powstania rysy wzdłuż osi ciągną) i przyczołowych zewnętrznych (możliwość odspojenia narożników), pojawiają się rozciągania mogące rozszczepić końcówkę belki (rys. 2c), które można nazwać przyczołowymi wewnętrznymi. Wynika to z przesunięcia wektora siły sprężającej w przekroju AB w stosunku do wypadkowej siły odpowiadającej w przekroju CD (rys. 2a). Na tego typu zagrożenie najbardziej narażone są elementy z ciągnami wyraźnie podzielonymi na grupy: dolną i górną w pionie lub lewą i prawą w poziomie.

Siły rozciągające nie są jedynym zagrożeniem w strefie zakotwień. Sprawdzenia wymaga również docisk płyty oporowej do betonu, który może doprowadzić do lokalnego zmiażdżenia. Jeszcze inny problem stanowią naprężenia styczne w płaszczyźnie łączącej krawędź łóżyska i końce ciągn, które z kolei mogą spowodować ukośne ścięcie narożników dźwigara (rys. 2c).

2.2. Zagrożenia i dobór zbrojenia strefy zakotwień

Tabela 1 zawiera zestawienie wspomnianych potencjalnych zagrożeń w strefie zakotwień. Jak na tak mały element jest ich dość dużo i dlatego omawianego tu zagadnienia nie należy bagatelizować. I to zarówno na etapie projektowym jak i wykonawczym.

W latach osiemdziesiątych przeprowadzono eksperyment [15], w którym wzięło udział kilku projektantów reprezentujących różne kraje. Poproszono ich o wyznaczenie sił rozciągających oraz potrzebnego zbrojenia

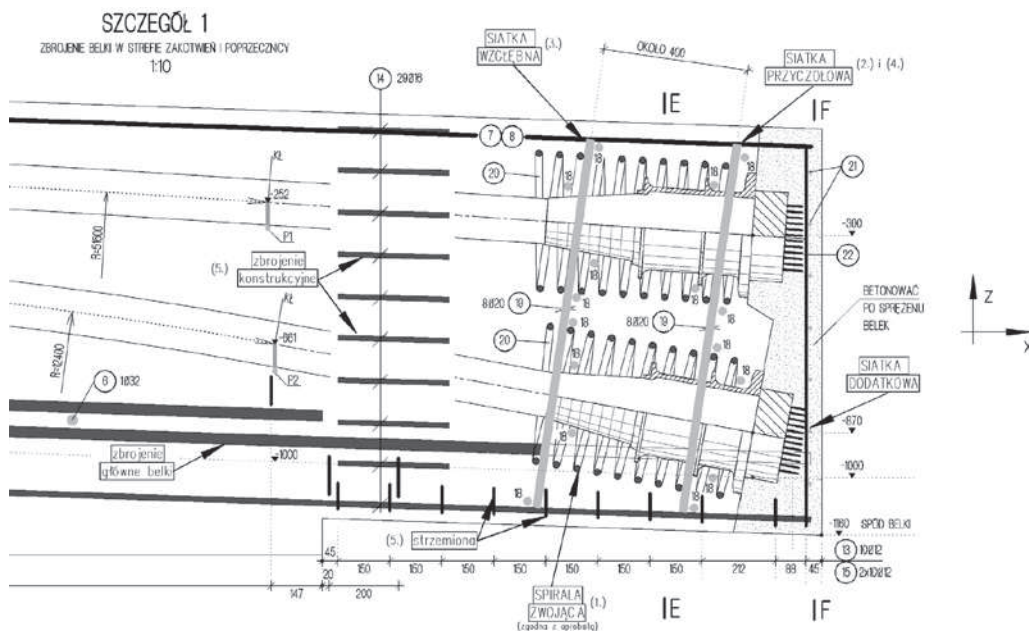
do zabezpieczenia typowej strefy zakotwień. Przykład dotyczył kablobetonowego dźwigara z sześcioma blokami oporowymi. Mieli oni do tego wykorzystać swoje krajowe normy i wytyczne. Okazało się, że otrzymane wyniki różniły się od siebie nawet dziesięciokrotnie. Na niespójność różnych wytycznych dotyczących omawianego zagadnienia wskazuje się również w monografii [3]. Wprowadzenie ujednoliconych norm europejskich [9][10] poprawiło sytuację w tej materii, ale okazuje się, że zawarte tam zapisy są nieraz bardzo zbyt mało opisowe. W przypadku obliczania strefy zakotwień odnosi się jedynie ogólnie do naprężeń rozciągających, które mogą spowodować pęknięcia i odpryski betonu, ale poza tym nie ma tak szczegółowego podziału tych naprężeń jak zasugerowano to w tabeli 1 albo w monografiach [2][4]. Nie ma też dokładnych porad dotyczących lokalizacji i rodzaju zbrojenia.

Przeanalizujemy na przykład sposób obliczenia docisku głowicy do betonu. W starej normie mostowej [7] obliczeniową siłę sprężającą w ciągnie porównuje się do obliczeniowej siły oporu betonu na docisk, uwzględniając przy tym pole rozkładu docisku. W starej normie ogólnobudowlanej [8] warunek jest podobny, ale do siły przenoszonej przez beton dodaje się nośność zbrojenia w postaci siatek lub uzwojenia. Natomiast w normach europejskich [9][10] występuje zapis, że naprężenia docisku pod płytami zakotwień należy sprawdzać zgodnie z odpowiednią europejską aprobatą techniczną (np. [16][17]). Dzięki temu stosuje się zbrojenie, które najbardziej pasuje do wybranego systemu sprężenia i zostało przebadane eksperymentalnie na potrzeby wydania aprobaty.

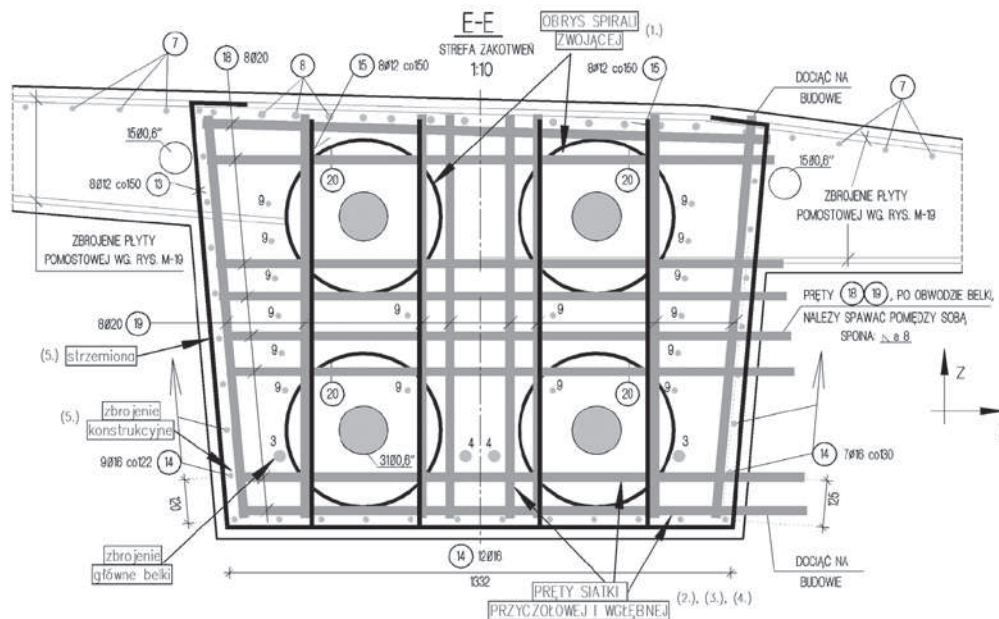
Wyznaczenie zbrojenia zabezpieczającego przed efektem działania naprężeń rozciągających wzdłużnych,

Tabela 1. Wybrane zagrożenia strefy zakotwień (zbrojenie pokazano na rysunkach 3 i 4)

Lp.	Zagrożenie	Rodzaj naprężenia i lokalizacja	Zbrojenie zabezpieczające
1	Docisk bloku kotwiącego i zmiażdżenie betonu	Ściskające pod zakotwieniem	Siatki w płaszczyźnie YZ lub/i spirale
2	Rozłupanie zgodne z kierunkiem działania siły sprężającej	Rozciągające wzdłużne	Siatki w płaszczyźnie YZ i/lub spirale
3	Rozszczepienie końca belki	Rozciągające przyczołowe	Siatka przyczołowa w płaszczyźnie YZ
4	Ukośne odspojenie naroży belki	Rozciągające przyczołowe	Siatka przyczołowa w płaszczyźnie YZ
5	Ukośne ścinanie narożników belki w sąsiedztwie łóżysk	Styczne wzdłuż krawędzi łóżyska i bloków kotwiących	Siatka w płaszczyźnie XY



Rys. 3. Zbrojenie strefy zakotwień – przekrój podłużny



Rys. 4. Zbrojenie strefy zakotwień – przekrój poprzeczny

w normie [7] sprowadza się do założenia, że ma ono przenieść około jedną trzecią siły oporu betonu na docisk. Uwzględnia się przy tym pole docisku bezpośredniego i pole rozkładu docisku. Ścisła procedura obliczania tego przypadku podana jest w monografii [4]. Siłą jaką ma przenieść zbrojenie jest iloczynem siły charakterystycznej zrywającej ciągnio i pewnego współczynnika c_1 . Z kolei umiejscowienie siatki w przekroju podłużnym uzależnione jest od innego współczynnika c_2 . Obie wielkości c_1 i c_2 są stabelaryzowane w odniesieniu do wymiarów płyty oporowej i wysokości bloku zastępczego przy każdym ciągnięciu. Metoda ta daje lepsze rezultaty przy bardziej równomiernym rozłożeniu zakotwień na powierzchni czołowej belki. Filozofia wyodrębniania bloku zastępczego odpowiadającego konkretnemu ciągnięciu wykorzystana jest również w normie

europejskiej [9], a obszary te nazwano pryzmami regularności. Ich wielkość uzależniona jest od wymiarów płyty kotwiącej, wytrzymałości betonu w czasie naciągu oraz maksymalnej siły w ciągnięciu. Eurokod [10] natomiast narzuca stosowanie modeli typu ST, czyli modeli kratownicowych.

Jeśli chodzi o naprężenia przyczółowe wewnętrzne (rozczepienie belki między ciągniami), to monografia [4] sugeruje, aby zabezpieczenie końca dźwigara zapewnić przy pomocy zbrojenia siatką wzdłuż całego przekroju poprzecznego. Pole tego zbrojenia wyznacza się wychodząc od uproszczonego przypadku tarczy kwadratowej obciążonej dwoma siłami skupionymi. Są one przyłożone do górnej i dolnej części tarczy. Po przeciwnej stronie odpowiada im obciążenie równomiernie rozłożone na całej wysokości przekroju. Naprężenia przyczółowe



Rys. 5.
Uszkodzenie strefy zakotwień spowodowane niewystarczającą ilością zbrojenia



Rys. 6.
Ta sama strefa zakotwień po częściowym odkuciu

zewewnętrzne (odspojenie narożnika) powinno być przenoszone również za pomocą siatek, a ich pole przekroju ma zapewnić przeniesienie co najmniej 3% maksymalnej siły charakterystycznej w ciągnie. Odpowiada to zależności podanej w eurokodzie [10] przy obliczaniu obciążonej strefy przymy regularności.

W normie [7] przewidziano jeszcze możliwość powstania naprężeń stycznych w płaszczyźnie łączącej krawędź łożyska i końce cięgien. Projektowane na tę ewentualność zbrojenie to najczęściej siatka w płaszczyźnie poziomej, której wymiary zależą od nachylenia płaszczyzny ścinania i reakcji w łożysku.

2.3. Przykład zbrojenia strefy zakotwień

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykład projektu wykonawczego strefy zakotwień w betonowym ściągę mostu łukowego. Przeniesienie siły rozporu możliwe było przez zastosowanie sprężenia czterema dużymi cięgnami po 31 splotów każdy. W tym przypadku projektant wiedział jaki system sprężenia będzie zastosowany. Ułatwiło to tworzenie dokładnego rysunku całej strefy zakotwień oraz dobór zbrojenia z odpowiedniej aprobaty technicznej, przy uwzględnieniu rozkładu naprężeń w całym przekroju, a nie tylko lokalnie pod poszczególnymi zakotwieniami. Układ zbrojenia skomplikowało konieczne poszerzenie się belek w strefie końcowej. Wkładki wynikające z obliczeń strefy zakotwień opisano komentarzami w ramkach.

Jak widać na rysunkach, zakotwienia rozłożono możliwie równomiernie. I to zarówno na wysokości jak i szerokości przekroju. Podane w tabeli 1 zagrożenia oraz towarzyszące im wymagania odnośnie zbrojenia, w powiązaniu

z pozostałymi wkładkami konstrukcyjnymi, a zwłaszcza strzemionami, mogą spowodować duże zagęszczenie prętów w bezpośrednim sąsiedztwie bloków oporowych cięgien (rys. 3 i 4). Tak jest również i w tym przypadku, ale na rysunku usunięto obrazy strzemion i prętów podłużnych, aby poprawić ich czytelność.

3. Przypadki uszkodzeń strefy zakotwień

Prawidłowe zaprojektowanie i wykonie stref zakotwień cięgien nie jest proste. Dlatego niestety, zdarzają się przypadki ich uszkodzeń. Rysunki 5 i 6 przedstawiają skutki zbyt słabego zbrojenia betonu pod głowicami cięgien. W czasie sprężania zostały one wciśnięte w zmiażdżony betonowy korpus belki na głębokość ponad 2 cm. Po odkuciu (rys. 6) widać brak siatki przyczółkowej, która byłaby zabezpieczeniem przed zniszczeniem betonu strefy zakotwień i przesunięciem bloków oporowych.

Innym zagrożeniem zasygnalizowanym w tabeli 1 jest zjawisko wciągania głowic w beton z pustkami. Wynika ono najczęściej z niewłaściwego rozprowadzenia i zawibrowania mieszanki betonowej. Może to być spowodowane zbyt dużym zagęszczeniem zbrojenia w rejonie zakotwienia. Rysunek 7 przedstawia przykład takiego właśnie przypadku. Bezpośrednio po awarii ujawniły się widoczne na zdjęciu pustki, których miejsce zajęła płyta oporowa. Naprawa polegała na rozkuciu uszkodzonego elementu i wypełnieniu z użyciem żywicy epoksydowej.

Na rysunku 8 widać przypadek uszkodzenia, w którym doszło do lokalnego pęknięcia części płyty pomostowej.



Rys. 7.
Uszkodzona strefa zakotwień przed i po wprowadzeniu programu naprawczego



Rys. 8.
Ukośne pęknięcie powstałe podczas sprężania przy głowicy cięgna

Spowodowane to było prawdopodobnie niedostateczną ilością zbrojenia przyczołowego i lekkim przekręceniem głowicy w stosunku do czoła elementu.

4. Propozycje i sugestie zmniejszające ryzyko uszkodzenia

4.1. Uwagi na etapie projektowania

Odpowiednie zaprojektowanie strefy zakotwień jest punktem wyjścia do właściwego jej wykonania. Projektant musi tu uwzględnić złożony stan naprężeń. Często układ cięgien i geometria przekroju nie pozwala na równomierne rozprowadzenie zakotwień na całej powierzchni czołowej dźwigara. Sytuacja może się jeszcze bardziej skomplikować w przypadku dużego skosu przęsła. Klasyczne przykłady z literatury niestety mają ograniczone zastosowanie w takich przypadkach. Konieczne jest wówczas wykonanie dodatkowego modelu obliczeniowego tego elementu, z którego można uzyskać trajektorię i wartości naprężeń głównych do wymiarowania zbrojenia.

Przy konstruowaniu należy pamiętać, że zbrojenie dodatkowe w postaci siatek ma stanowić odpowiednie uzupełnienie wkładek wynikających z propozycji zawartych w aprobaty technicznych (np. [16][17]), a nie ich dublowanie. Trzeba tu podkreślić, że nie tylko niedostateczna ilość zbrojenia, ale również jego przewymiarowanie może doprowadzić do awarii. Zbyt duże zagęszczenie niepotrzebnego zbrojenia utrudnia bowiem rozprowadzenie i wibrowanie mieszanki betonowej (rys. 7).

Ważna, choć nie związana bezpośrednio z obliczeniami strefy zakotwień, jest kwestia zbrojenia podłuż-

nego rozdzielczego. Szczególnie dotyczy to mostów betonowanych segmentami. Należy dążyć do stosowania mniejszych średnic prętów. Pozwala to wykonawcy na stosunkowo łatwe ich odginanie, tworząc w ten sposób swobodny dostęp z prasą sprężającą do głowicy cięgna. Nieumiejętne odginanie wkładek większych średnic może doprowadzić do uszkodzeń powierzchni czołowych betonu. Dodatkową zaletą cieńszych prętów jest możliwość szybszej budowy deskowania ścian czołowych, w których osadzone są bloki oporowe.

4.2. Rady praktyczne dla wykonawców

Prawidłowe i dokładne wykonanie strefy zakotwień w warunkach budowy jest sporym wyzwaniem. Wynika to z dużego skomplikowania i zagęszczenia zbrojenia, jak również z trudnego deskowania ściany czołowej. Występuje tam często dużo uskoków i skosów służących do tworzenia gniazd pod kolejne głowice. Szczególnie ważne wydaje się tu dobre zapoznanie się wykonawcy z zaleceniami aprobaty technicznej danego systemu sprężenia (np. [16][17]). Wszystkie przewidziane wkładki zbrojeniowe muszą być wbudowane i ustawione zgodnie z projektem i specyfikacją. Niestety z uwagi na kolizje zbrojenia (zwłaszcza poprzecznego) ze zbrojeniem głowic, założenie spirali we właściwym miejscu jest bardzo trudne. Pracy nie ułatwiają też przewidywane przez niektóre systemy dodatkowe ramki o wymiarach zbliżonych do spiral. Umieszcza się je pomiędzy zwojami, ale mimo to, trzeba zapewnić współosiowość tych wkładek z osią cięgna. Należy mieć też na uwadze odpowiednie ustawienie bloków kotwiących. Muszą one być prostopadłe do powierzchni czołowej deskowania.

Osobnym problemem jest dobór właściwej konsystencji mieszanki betonowej użytej w strefie zakotwień. Z uwagi na koncentrację zbrojenia w tym rejonie, wartość stożka opadowego powinna wynosić 13 do 15 cm. Rzecz jasna, nie każdy węzeł betoniarski może zapewnić odpowiednie parametry betonu przy takiej konsystencji. Nieraz specyfikacja techniczna na danym kontrakcie zabrania wykorzystywania takich mieszanek. W efekcie zdarza się, że wykonawca nie jest w stanie odpowiednio rozprowadzić i zawibrować betonu, co prowadzi do wspomnianych już wcześniej awarii. Dobrym wyjściem z sytuacji może być ścisła współpraca pomiędzy technologiemi danego węzła, inspektorem nadzoru inwestorskiego a wykonawcą. Można wówczas ustalić parametry mieszanki pasujące do konkretnego przypadku. Należy również zwrócić szczególną uwagę na proces wibrowania w rejonie bloków kotwiących i ewentualnie zdecydować się na stosowanie dodatkowych buław wibrujących o mniejszych średnicach.

4.3. Zastosowanie metod nieniszczących do identyfikacji pustek w rejonie zakotwień

Po zabetonowaniu konstrukcji, ale jeszcze przed jej sprężeniem jest czas, aby w przypadku wątpliwości odnośnie urabialności i skuteczności wibrowania betonu, zmniejszyć ryzyko uszkodzenia w rejonie bloków oporowych. Można do tego wykorzystać metody nieniszczące na przykład w postaci georadaru. Ta nieinwazyjna metoda badawcza pozwoliłaby stwierdzić czy w strefie zakotwień występują niebezpieczne pustki. Technika ta była z powodzeniem wykorzystywana do wykrywania styropianowych elementów symulujących pustki w eksperymentalnym bloku betonowym [6]. Trzeba jednak pamiętać, że metoda ta ma też swoje ograniczenia. Chodzi tu głównie o wymagany dobry dostęp do elementu i to najlepiej z dwóch stron. Zaburzenia może wprowadzać również duże skupienie zbrojenia. Należałoby więc sprawdzić w warunkach polowych czy stosowanie tej metody będzie rzeczywiście przydatne.

5. Podsumowanie

Projektowanie i wykonanie strefy zakotwień w mostach z betonu sprężonego jest zagadnieniem trudnym i wy-

magającym od wykonawcy dużej precyzji i doświadczenia. Niestety, mimo stosunkowo dobrego rozeznania problemu i wielu opisów tego zagadnienia w literaturze, wciąż zdarzają się awarie w trakcie sprężania. Widać z tego, że zarówno projektanci jak i wykonawcy muszą zwracać szczególną uwagę przy kształtowaniu tego elementu. Najczęstszą przyczyną jest pominięcie przez projektantów dodatkowego zbrojenia siatkami i bazowanie tylko na spiralach w sytuacjach, gdy okazuje się one być nie wystarczające. Z drugiej strony dochodzi często do przewymiarowania i zbyt dużego zagęszczenia zbrojenia wokół głowic kotwiących, co znacznie utrudnia wykonawcy właściwe rozprowadzanie mieszanki betonowej i wibrowanie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Guyon Y., Contraintes dans les pièces prismatiques soumises à des forces appliquées sur leur bases, au voisinage de ces bases, A. I. P. C. Mémoires, t. XI, Zürich 1951
- [2] Kaufman S., Olszak W., Eimer Cz., Budownictwo Betonowe, tom III, Arkady, Warszawa 1965
- [3] Breen J. E., Burdet O., Roberts C., Sanders D., Wollmann G., Ferguson P. M., Anchorage zone reinforcement in post-tensioned concrete girders, National Academy Press, Washington 1994
- [4] Ajdukiewicz A., Mames J., Konstrukcje z betonu sprężonego, Polski Cement. Kraków 2004
- [5] Madaj A., Wołowicki W., Mosty betonowe. Wymiarowanie i konstruowanie. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002
- [6] Topczewski Ł., Praktyczne zastosowania georadaru do inspekcji obiektów mostowych. Mosty 38–45, 2/2008
- [7] PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie
- [8] PN-B-03263 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone
- [9] PN-EN 1992-2:2005+AC:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczanie i reguły konstrukcyjne
- [10] PN-EN 1992-1-1:2004+AC2008 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [11] Lenschow R., Sozen M. A., Practical Analysis of the Anchorage Zone Problem in Prestressed Beams. ACI Journal, s. 1421–1437, nov. 1965
- [12] Tesar V., Détermination expérimentale des tensions dans les extrémités des pièces prismatiques munies d'une semi-articulation. A. I. P. C. Mémoires, t. I, Zürich 1932
- [13] Mörsch E., Über die Berechnung der Gelenkquader. Beton u. Eisen, nr 12, 1924
- [14] Magnel G., Le béton précontraint. Fecheyr. Gand 1953
- [15] Comité Euro-International du Béton, Anchorage Zones of Prestressed Concrete Members. No. 181, apr. 1987
- [16] Europejska Aprobata Techniczna ETA – 06/0147, 2006
- [17] Europejska Aprobata Techniczna ETA – 06/0226, 2007

www.przegladbudowlany.pl/archiwum



Archiwum od ręki
 archiwalne spisy treści
 na stronach www