

Alina Kliszczewicz
Jakub Mames

WYMIAROWANIE PRZEKROJU KABLOBETONOWEGO W OPARCIU O METODĘ STANÓW GRANICZNYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę projektowania przekrojów kablobetonowych z uwzględnieniem stanów granicznych zgodnie z wymogami przyszłej normy PN/B-03264.

1. Wstęp

Używane dotychczas metody wymiarowania przekroju sprężonego [1] były dostosowane do wymogów normy PN-66/B-03320 [2]. Podstawą wymiarowania było wykorzystanie naprężeń dopuszczalnych, a po dobraniu przekroju należało sprawdzić współczynniki bezpieczeństwa na zarysowanie i zniszczenie.

Wprowadzony do próbnego stosowania projekt nowej normy "Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone" [4] oparty jest na metodzie stanów granicznych i wymaga sprawdzenia projektowanej konstrukcji sprężonej w stanach granicznych nośności, ugięcia i zarysowania. Projekt nowej normy wyeliminował pojęcie naprężeń dopuszczalnych dla betonu^{x)}.

W tej sytuacji dezaktualizują się dotychczasowe metody wymiarowania. W niniejszej pracy podano technicznie sprawną metodę wymiarowania przekroju kablobetonowego, opartą w całości na metodzie stanów granicznych w ujęciu projektu nowej normy [4]^{xx)}.

^{x)} Autorzy nie zajmują w tym miejscu stanowiska co do poprawności takiego ujęcia, chociaż wydaje się ono wątpliwe.

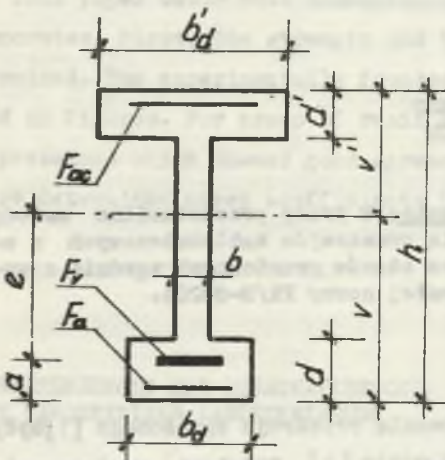
^{xx)} W trakcie druku projekt nowej normy został skierowany do ponownego opracowania. Niezależnie od sformułowania przepisów szczegółowych nowa norma konstrukcji z betonu będzie oparta na metodzie stanów granicznych i proponowana metoda wymiarowania zachowa swoją przydatność.

2. Geometria przekroju kablobetonowego

Pole przekroju - F_b

Moment bezwładności - J

Wskaźniki wytrzymałości $W' = \frac{J}{v}$; $W = \frac{J}{v}$



Rys. 1

Przy wymiarowaniu przekroju kablobetonowego uwzględnienie współpracy stali jest nieistotne. Wszystkie cechy geometryczne odnosić będziemy do przekroju betonu. Ukształtowanie geometryczne i konstrukcyjne przekroju nie zależą od przyjętej metody wymiarowania i w związku z tym stosunki wymiarowe i wartości wskaźników geometrycznych ustalone dotychczas [1] nie ulegają zmianie.

Tak więc przyjmiemy bez zmiany:

- wskaźnik wydajności

$$\varrho = \frac{J}{v \cdot v' \cdot F_b} \quad (0,45 \leq \varrho \leq 0,55), \quad (1)$$

- wskaźnik tężości

$$\beta = \frac{F_b}{h^2} \quad (0,18 \leq \beta \leq 0,30). \quad (2)$$

3. Podstawowe wymagania nowej normy

W celu łatwiejszego zrozumienia tekstu przytoczono poniżej niektóre przepisy nowej normy w zakresie potrzeb niniejszej pracy.

3.1. Konstrukcje projektowane metodą stanów granicznych należy sprawdzać w stadium użytkowym A oraz w stadium początkowym B.

W stadium A należy uwzględnić wszystkie obciążenia stałe, najniekorzystniejsze obciążenia zmienne oraz sprężenie wstępne zmniejszone o straty reologiczne, natomiast przy sprawdzaniu konstrukcji w stadium B należy uwzględnić sprężenie wstępne bez strat reologicznych oraz obciążenie ciężarem stałym w chwili sprężenia.

3.2. Przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności przyjmujemy do obliczeń obciążenia obliczeniowe zgodnie z aktualnie obowiązującymi normami obciążeń [3].

Warunkiem nośności dla stadium A jest:

$$M_I^A \leq R_b S_b + R_{ac} \cdot S_{ac}, \quad (3)$$

względnie

$$M_I^A \leq R_{vo} \cdot F_v \cdot z_v + R_a \cdot F_a \cdot z_a, \quad (4)$$

przy czym spełniony musi być warunek rzutów sił wewnętrznych

$$R_{vo} \cdot F_v + R_a \cdot F_a = R_b \cdot F_{bc} + R_{ac} \cdot F_{ac} \quad (5)$$

W powyższych wzorach symbolem R oznaczone zostały wytrzymałości obliczeniowe materiału.

Nośność strefy ściskanej betonu ograniczona jest warunkiem

$$\frac{S_b}{S_o} \leq \eta, \quad (6)$$

przy spełnieniu którego nie jest potrzebne zbrojenie ściskane.

3.3. Przy sprawdzaniu stanu granicznego ugięć przyjmujemy do obliczeń obciążenia normowe. Sprawdzenie polega na porównaniu ugięcia kon-

struktury pod łącznym działaniem wszystkich obciążeń krótko- i długotrwałych z wartościami uznanyymi za dopuszczalne

$$f = f_1 + (f_2 - f_v) (1 + \varphi) \leq f_{\text{dop}}, \quad (7)$$

gdzie:

- f_1 - ugięcie od obciążenia krótkotrwałego,
- f_2 - ugięcie doraźne od obciążenia długotrwałego,
- f_v - ugięcie doraźne od siły sprężającej,
- φ - współczynnik pełzania betonu.

Ujęcie takie, podytkowane chęcią ujednolicenia przepisów, jest dla elementów sprężonych wadliwe. Należy powrócić do koncepcji dotychczasowej normy i ograniczyć oddzielnie ugięcia dodatnie (w dół) i ujemne (w górę):

$$f' = (f_2 - f_v) (1 + \varphi) \leq f'_{\text{dop}} \quad (8)$$

oraz

$$f = f_1 \leq f_{\text{dop}} \quad (9)$$

3.4. Stan graniczny zarysowania konstrukcji sprężonej stałą wysoko-wartościową sprawdza się jedynie na pojawienie rys prostopadłych do osi elementu, dla 1 kategorii rysoodporności pod wpływem obciążeń obliczeniowych, zaś dla 2 kategorii rysoodporności - pod wpływem obciążeń normowych.

Stan graniczny zarysowania w stadium A sprawdza się z warunku

$$M_{\text{III}}^A \leq W(\sigma_{\text{bv}} + 2,5 R_{\text{bz}}), \quad (10)$$

gdzie:

- σ_{bv} - naprężenie w betonie na krawędzi rozciąganej, wywołane siłą sprężającą po stratach,
- R_{bz} - wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie.

4. Założenia metody wymiarowania

Proponowana metoda wymiarowania zginanego przekroju kablobetonowego opiera się na następujących założeniach:

- a) podstawą wymiarowania jest stadium użytkowe A; po zwymiarowaniu przekroju sprawdzamy go na stany graniczne w stadium początkowym B i w razie potrzeby dokonujemy korekty;
- b) metoda wymiarowania powinna zapewnić bezpieczeństwo we wszystkich stanach granicznych;
- c) ukształtowanie geometryczne przekroju uznamy za poprawne, jeśli wartości stosunków wymiarowych i wskaźników ξ oraz β będą się mieścić w granicach ustalonych dotychczasową praktyką;
- d) będziemy lokować wypadkowy kabel sprężający na maksymalnym dostępnym mimośrodku ($e = v - a$).

Przy zadanych obciążeniach i rozpiętości oraz przy dobranych przez projektanta materiałach konstrukcyjnych zagadnienie sprowadza się do wyznaczenia czterech wielkości określających przekrój sprężony, a mianowicie:

- efektywnej siły sprężającej N_v ,
- pola przekroju F_b ,
- wysokości przekroju h ,
- oraz położenia środka ciężkości przekroju v .

Do dyspozycji mamy cztery warunki:

- 1) nośności strefy rozciąganej (4)
- 2) nośności strefy ściskanej (6)
- 3) ugięcia (8) (9)
- 4) rysoodporności (10).

Bezpośrednie rozwiązanie układu czterech nieliniowych równań ze względu na cztery niewiadome byłoby kłopotliwe, nie dawałoby szybkich wyników i pozbawiłoby projektanta możliwości natychmiastowej ich korekty. Zesztą jawne wykorzystanie warunku ugięć, przepisane tylko dla elementów stropowych i belek podsuwnicowych, wymagałoby wprowadzenia znaków równości do nierówności (8) i (9), co byłoby niezgodne z logiką projektowania. Decydujące będą warunki nośności i rysoodporności, na-

tomiast warunek ugięć pozostanie w dalszym ciągu poboczny, istotny jedynie w przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych.

5. Tok postępowania

5.1. Szacujemy wysokość przekroju

$$\hat{h} = \left(\frac{1}{25} \div \frac{1}{20} \right) l$$

w zależności od rozpiętości l , obciążeń i warunków lokalnych.

5.2. Szacujemy pole przekroju

$$\hat{F}_b = \beta h^2$$

wprowadzając h z p. 5.1 i przyjmując współczynnik tężości

$$\beta = 0,2 \div 0,25.$$

5.3. Obliczamy moment zginający od ciężaru własnego

$$M_g = \hat{F}_b \frac{l^2}{8}$$

5.4. Obliczamy momenty zginające obciążające przekrój w stanach granicznych.

W stanie granicznym nośności

$$M_I^A = n_g M_g + n_g M_{\Delta g} + n_p M_p,$$

gdzie: n_g i n_p są odpowiednimi współczynnikami przeciążenia [3];
w stanie granicznym zarysowania

$$M_{II}^A = M_I^A \text{ dla 1. kategorii rysoodporności}$$

$$M_{III}^A = M_g + M_{\Delta g} + M_p \text{ dla 2. kategorii rysoodporności.}$$

5.5. Przyjmujemy konstrukcyjnie przekrój F_a zbrojenia zwykłego w strefie rozciąganej. Bez obawy popełnienia większego błędu można wstępnie przyjmować $F_a = 0$.

5.6. Z warunku (4) obliczamy

$$F_v = \frac{M_1^A}{z_v R_{v0}} - F_a \frac{R_a z_a}{R_v z_v}$$

Po wprowadzeniu związków

$$R_{v0} = m_v R_v$$

oraz

$$z_v \approx z_a = \zeta h_0 = \zeta (1 - \alpha) h$$

otrzymamy

$$F_v = \frac{M_1^A}{\zeta (1 - \alpha) h R_v m_v} - F_a \frac{R_a}{R_v m_v}$$

Na podstawie nagromadzonego materiału empirycznego można zaproponować:

dla belek wysokich $\zeta = 0,9$ $\alpha = 0,1$,

dla belek niskich $\zeta = 0,85$ $\alpha = 0,12$

oraz ogólnie $m_v = 1$.

Otrzymujemy stąd

dla belek wysokich

$$F_v = \frac{M_1^A}{0,8 h R_v} - F_a \frac{R_a}{R_v} \quad (11)$$

dla belek niskich

$$F_v = \frac{M_1^A}{0,75 h R_v} - F_a \frac{R_a}{R_v} \quad (12)$$

5.7. Pomijając zbrojenie miękkie F_{ac} w strefie ściskanej możemy napisać

$$S_b = \frac{M_1^A}{R_b}.$$

Z warunku (6) nośności strefy ściskanej otrzymamy

$$S_o = \frac{S_b}{\psi} = \frac{M_1^A}{\psi R_b}.$$

Wielkość S_o oznacza moment statyczny użytecznej części przekroju względem osi przechodzącej przez środek ciężkości zbrojenia rozciąganego, ale wobec wykorzystania mimośrodowo można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że jest to moment statyczny całego przekroju betonowego względem tejże osi

$$S_o \approx F_b (v - a).$$

Stąd

$$F_b = \frac{M_1^A}{\psi R_b (v - a)} \quad (13)$$

oraz

$$v = \frac{M_1^A}{\psi R_b F_b} + a.$$

Po uwzględnieniu związku $F = \beta h^2$ otrzymamy

$$\hat{v} = \frac{M_1^A}{\psi R_b \beta h^2} + a. \quad (14)$$

Orientacyjnym warunkiem poprawnego ukształtowania przekroju jest

$$\frac{\hat{v}}{h} = 0,45 \div 0,65,$$

a w węższych granicach

$$\frac{v}{h} = 0,5 \div 0,6.$$

5.8. Z warunku rysoodporności (10) otrzymujemy

$$\begin{aligned} M_{III}^A &= W \left(\frac{m_4 N_v}{F} + \frac{m_4 N_v e}{W} + 2,5 R_{bz} \right) = \\ &= W \left(\frac{m_4 N_v v'g}{W} + \frac{m_4 N_v e}{W} + 2,5 R_{bz} \right) = \\ &= m_4 N_v [v'g + (v-a)] + 2,5 W R_{bz}. \end{aligned} \quad (15)$$

Po uwzględnieniu relacji (13) otrzymamy

$$W = F_b g (h-v) = \frac{M_I^A g (h-v)}{2 R_b (v-a)}.$$

Wprowadzając tę wielkość do związku (15) otrzymamy po prostych przekształceniach wzór na potrzebną siłę sprężającą

$$N_v = \frac{M_{III}^A - 2,5 \frac{g (h-v) R_{bz}}{v'(v-a) R_b} M_I^A}{m_4 [(h-v)g + (v-a)]}. \quad (16)$$

Zgodnie z projektem nowej normy należy przyjmować współczynnik tolerancji siły sprężającej $m_4 = 0,9$.

Do wzoru (16) wstawiamy v oszacowane na podstawie związku (14).

5.9. Sprawdzianem trafności naszych założeń jest zgodność siły sprężającej N_v obliczonej z warunku rysoodporności (10) z siłą sprężającą obliczoną z warunku nośności (4)

$$N_v = \sigma_v \cdot F_v = 0,85 \cdot R_v \cdot F_v. \quad (17)$$

W przypadku niewielkich odchyłek wielkości siły sprężającej możemy doprowadzić do wymaganej zgodności, korygując F_a i zaokrąglając P_v do pełnych jednostek sprężających.

W przypadku wyraźnych rozbieżności poprawiamy obliczenia zmieniając stosownie wartości β, ν lub h .

5.10. Dla obliczonych v, F_b oraz $J = F_b \cdot g \cdot v(h-v)$ dobieramy wymiary przekroju betonowego (por. [1]).

5.11. Sprawdzamy szczegółowo wszystkie stany graniczne w stadium A i w stadium B. W razie potrzeby dozbieramy przekrój stałą miękką w strefie ściskanej.

6. Uwagi końcowe

W porównaniu z metodami dotychczas stosowanymi [1], [2], proponowana metoda oparta na projekcie nowej normy [4], prowadzi do szybszego uzyskania wyników. Stosowane wzory są stosunkowo proste, gdyż uniknięto tu równań kwadratowych. W każdej fazie wymiarowania istnieje możliwość ingerencji projektanta w kształtowanie przekroju.

Na podstawie przeliczonych przykładów można stwierdzić, że w zginanych przekrojach sprężonych wymiarowanych w oparciu o przepisy projektu nowej normy uzyskuje się oszczędności w stali sprężającej dochodzące do 10%, przy tym samym zużyciu betonu.

LITERATURA

1. Kaufman S., Olszak W., Eimer Cz.: Budownictwo Betonowe, t. III. Konstrukcje sprężone. Arkady, Warszawa 1965.
2. Polska Norma PN-66/B-03320. Konstrukcje z betonu sprężonego. Obliczenia statyczne i projektowanie.
3. Polska Norma PN-64/B-02009. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia stałe i zmienne.
4. Polska Norma PN/B-03264. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie (projekt).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО КАБЕЛЬЯ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Резюме

Проект Польской Нормы "Бетонные, железобетонные и предварительно напряженные конструкции разработан на основании метода предельных состояний и не содержит понятия допускаемых напряжений для бетона. В настоящей работе приведен способ проектирования предварительно напряженного сечения с обжатием на бетон, полностью оперт на методу предельных состояний в согласии с проектом новой нормы.

DIMENSIONING OF A POST - TENSIONED CROSS - SECTION BASED
UPON THE LIMIT STATE DESIGN

Summary

The draft of the Polish Code for "Concrete structures - plain, reinforced and prestressed" has been based upon the limit state design and has eliminated the notion of permissible stresses for concrete. In the paper a method is given for dimensioning a post - tensioned section, based entirely upon the limit state concept as prescribed in the draft of the new Code.