

MARCIN DYBA*

WYMIAROWANIE NA ŚCINANIE ZGINANYCH
ELEMENTÓW STRUNOBETONOWYCH W UJĘCIU NORM:
PN-EN 1992-1-1:2008 I PN-B-03264:2002DESIGN FOR SHEAR OF FLEXURAL PRETENSIONED
ELEMENTS IN REFERENCE TO CODES:
PN-EN 1992-1-1:2008 AND PN-B-03264:2002

Streszczenie

W pracy podjęto tematykę projektowania na ścinanie elementów strunobetonowych zginanych według norm: PN-EN 1992-1-1:2008 i PN-B-03264:2002. Przedstawiono sposoby obliczania nośności przekroju na ścinanie, wyznaczania zbrojenia z uwagi na ścinanie oraz warunki jego prawidłowego konstruowania. Opracowano i zamieszczono procedury postępowania przy wymiarowaniu wedle wytycznych przytaczanych norm. Zaprezentowano i przeanalizowano wyniki obliczeń przykładowych elementów stropowych strunobetonowych.

Słowa kluczowe: ścinanie, strunobeton, konstrukcje sprężone

Abstract

The paper summarizes subject of design for shear of flexural pretensioned elements according to codes: PN-EN 1992-1-1:2008 and PN-B-03264:2002. It is considered how to calculate load capacity of cross section for shear, reinforcement for shear and conditions of its proper construction. Procedures are provided in reference to guidelines of the standards mentioned above. The results of calculations of sample pretensioned ceiling elements are presented and analyzed.

Keywords: gypsum, compressive strength, bending strength, softening coefficient, friction

* Mgr inż. Marcin Dyba, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Projektując strefę przypodporową elementu sprężonego strunobetonowego, należy uwzględnić kilka złożonych mechanizmów zniszczenia: ścinanie, pojawienie się rys ukośnych, zakotwienie cięgien w strunobetonie i powodowane przez nie rozciągające naprężenia poprzeczne przy czole belki.

Ścinanie występuje wtedy, gdy układ sił wewnętrznych redukuje się do wypadkowej stycznej do przekroju poprzecznego. Wypadkową tą nazywamy siłą poprzeczną lub tnącą.

W wyniku działania sił ścinających (poprzecznych) może dojść do zniszczenia elementu. Zniszczenie to jest związane z: rodzajem i wielkością obciążenia, sposobem jego przyłożenia, kształtem i wymiarami przekroju poprzecznego oraz właściwościami materiałowymi betonu i zastosowanego zbrojenia [1, 2].

Wyteżenie elementów prętowych w strefie przypodporowej jest rozważane przy założeniu płaskiego stanu naprężenia. Na podstawie badań stwierdzono, że istnieje możliwość uzyskania przestrzennego stanu naprężenia w przypadku stosowania silnego zbrojenia poprzecznego (strzemiona zamknięte), które może przeciwdziałać odkształceniom poprzecznym. Lokalne wystąpienie takiego stanu nie ma jednak znaczącego wpływu na nośność w strefie przypodporowej. Z tego względu dla obliczeń na ścinanie rozpatruje się płaski stan naprężenia określony trzema składowymi: σ_x , σ_y , τ_{xy} . Występowanie naprężeń stycznych wynika z faktu niepokrywania się naprężeń głównych z kierunkami układu współrzędnych ortogonalnych. W analizie elementów prętowych obciążonych równomiernie σ_x naprężenia prostopadłe do osi podłużnej są znikome w porównaniu z naprężeniami równoległymi, i w związku z tym mogą być pominięte przy wyznaczaniu naprężeń głównych

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

Wartości naprężeń normalnych i stycznych wyznaczamy z klasycznych wzorów mechaniki budowli

$$\sigma_x = \frac{M}{W} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \quad (4)$$

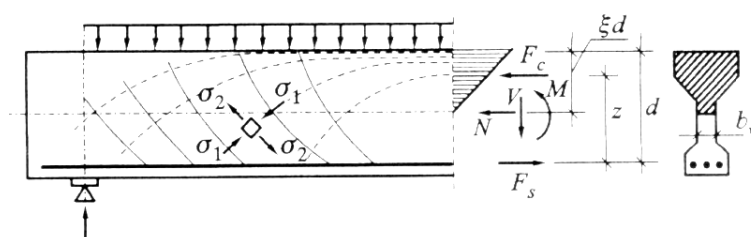
gdzie:

- M – moment zginający,
- V – siła ścinająca,
- W – wskaźnik wytrzymałości,
- S – moment statyczny,
- I – moment bezwładności,
- b – szerokość strefy ścinania w rozpatrywanym przekroju.

Przedstawiony stan naprężeń utrzymuje się do chwili zarysowania. Po zarysowaniu stan ten jest zależny od wielu różnych czynników, między innymi: od przyczepności zbrojenia i jego ukształtowania, stopnia zbrojenia i innych. Zarysowanie ma również wpływ na zmianę trajektorii naprężeń głównych (zwłaszcza w strefie rozciąganej przekroju). Przyjmuje się, że beton strefy rozciąganej po zarysowaniu (w II fazie) nie przyjmuje naprężeń rozciągających w żadnym przekroju – nawet pomiędzy rysami – co w konsekwencji powoduje, iż naprężenia te są zależne od naprężeń stycznych (ścinających – τ_{xy}) nachylonych do osi belki pod kątem 45° .

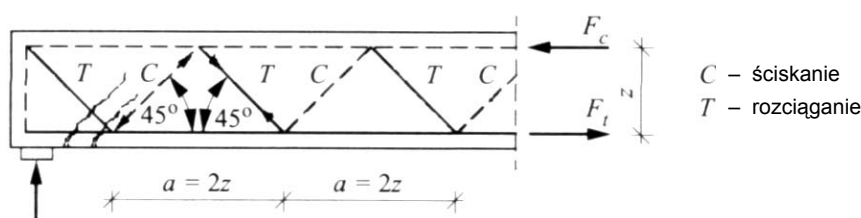
Teoretyczne i praktyczne podstawy projektowania strefy przypodporowej elementów żelbetowych opracował na początku XX wieku E. Mörsch [1, 3, 4].

Podstawą jego teorii jest przebieg trajektorii naprężeń głównych w strefie przypodporowej zgodny z rysunkiem 1, a zarazem zgodny z obrazem zarysowania obserwowanym w praktyce. Dla celów rozważań przyjął on (jako pierwszy) model kratownicowy w obliczeniach na ścinanie.



Rys. 1. Trajektorie naprężeń głównych w strefie podporowej zarysowanej belki zginanej [1]

Fig. 1. Trajectories of principal stress in support zone of cracked bending beam [1]



Rys. 2. Kratownica Mörsch'a [5]

Fig. 2. Mörsch truss [5]

Założenia klasycznego schematu kratownicy zastępczej:

- strefę ścinania stanowi statycznie wyznaczalna kratownica,
- strefę ścinania można odwzorować kilkoma takimi kratownicami,
- kratownica składa się z pasa górnego, dolnego i nachylonych krzyżulców,
- pasy kratownicy: górny ściskany – betonowy i dolny rozciągany – zbrojenie główne są do siebie równoległe,
- krzyżulce ściskane betonowe – myślowo wydzielone – są nachylone pod stałym kątem równym 45° ,

- kąty nachylenia krzyżulców rozciąganych – zbrojenia na ścinanie są również stałe i również wynoszą 45° ,
- siła w ściskanym pasie betonowym jest równa (co do wartości bezwzględnej) sile rozciągającej w pasie dolnym dla dowolnego przekroju.

Strefa ściskana betonu w przekroju stanowi pas górny, zbrojenie dolne rozciągane odpowiednio pas dolny. Krzyżulce rozciągane są to strzemiona ukośne lub pręty odgięte. Krzyżulce ściskane są wyodrębnione przez zarysowanie ukośne elementu (przekroczenie przez naprężenia główne wytrzymałości betonu na rozciąganie).

2. Ścinanie w ujęciu normy Eurokod 2 [6]

Obecnie funkcjonująca w normie PN-EN 1992-1-1:2008 (w skrócie EC2) modyfikacja schematu kratownicowego polega głównie na przyjęciu zmienności nachylenia krzyżulców ściskanych, jak i rozciąganych, oraz dopuszczeniu modelu kratownicy wielokrotnie statycznie niewyznaczalnej. Dla celów praktyki inżynierskiej powszechne zastosowanie ogranicza się do możliwości przyjęcia zmienności kąta nachylenia ukośnych ściskanych i rozciąganych krzyżulców kratownicy. Kąt nachylenia ściskanych krzyżulców betonowych można przyjąć z zakresu: $26,6\text{--}45,0^\circ$. Kąt nachylenia rozciąganych krzyżulców modelujących zbrojenie na ścinanie musi być większy niż 45° (i nie większy niż 90°).

Model zakłada [1, 6, 7] występowanie rys na odcinku strefy przypodporowej, na którym działa moment zginający i siła poprzeczna. Przyjmuje się, że rysy przebiegają od krawędzi rozciąganej do zbrojenia głównego prostopadle, a dalej ukośnie w wyniku działania ukośnych głównych naprężeń rozciągających wywołanych siłą poprzeczną.

Siła ścinająca jest odprowadzana na podporę dzięki mechanizmowi kratownicowemu. Ukośny zastrzał betonowy przejmuje siłę z pasa górnego i sprowadza do dolnego, gdzie zbrojenie porzeczne ponownie ją przekazuje do pasa górnego. Szybkość odprowadzania siły w kierunku podpory zależy od kątów nachylenia krzyżulców ściskanych i zbrojenia poprzecznego. Dla bardziej płaskich krzyżulców i małego nachylenia strzemion szybkość ta będzie większa. Odpowiednio dla stromych krzyżulców i stromego zbrojenia – mniejsza. W elemencie ze zbrojeniem poprzecznym składającym się wyłącznie ze strzemion prostopadłych rolę przekazywania siły na podporę spełniają tylko krzyżulce betonowe.

Projektując strefę przypodporową ze względu na ścinanie (wywołane obciążeniami zewnętrznymi) elementów strunobetonowych, należy mieć na uwadze zbrojenie sprężające tych elementów. Wpływ tego zbrojenia na nośność powinien zostać włączony z uwzględnieniem długości transmisji (przekazania sprężenia z ciągnien na beton) i długości dyspersji (odcinka, poza którym przyjmuje się, że rozkład naprężeń normalnych w betonie jest liniowy).

Sposób wymiarowania na ścinanie belki strunobetonowej zmienia się na długości elementu razem z pojawieniem się zarysowania oraz w pobliżu strefy zakotwień. Z tego względu możemy zdefiniować trzy strefy (nazwy od autorów [7]):

- strefa A (*anchorage*) – strefa zakotwienia (od czoła elementu do przekroju, w którym przecina się linia prowadzona pod kątem 45° od krawędzi podpory z osią belki),
- strefa U (*uncracked*) – strefa niezarysowana od naprężeń normalnych,
- strefa C (*cracked*) – strefa zarysowana od naprężeń normalnych.

W strefie A największa siła poprzeczna (siła przy podporze) powinna być mniejsza od nośności na ścinanie ograniczonej przez zmiażdżenie ściskanych krzyżulców betonowych.

W strefie U obliczeniowa siła poprzeczna jest porównywana do granicznej siły poprzecznej (obliczeniowej nośności na ścinanie elementu bez zbrojenia na ścinanie) określonej dla elementów sprężonych niezarysowanych. Jeżeli jest od niej mniejsza, nie trzeba obliczać zbrojenia na ścinanie. W przeciwnym przypadku zbrojenie poprzeczne wyznacza się jak dla elementów żelbetowych.

W strefie C obliczeniową nośność na ścinanie elementu bez zbrojenia na ścinanie określa się analogicznie jak dla elementu żelbetowego, dodatkowo uwzględniając wpływ siły sprężającej na naprężenia normalne na poziomie środka ciężkości przekroju. W przypadku gdy siły poprzeczne w tej strefie są mniejsze od nośności na ścinanie, nie ma potrzeby obliczania zbrojenia na ścinanie. Natomiast gdy siły są większe, pole przekroju potrzebnego zbrojenia obliczamy tak jak w strefie U. Dla elementów projektowanych na pełne sprężenie (z warunkiem braku zarysowania) strefa C nie występuje.

Ze względu na ścinanie obliczenia należy prowadzić w przekroju oddalonym w odległości d od lica podpory. W przypadku gdy zbrojenie na ścinanie nie jest potrzebne obliczeniowo, to pomimo tego należy zastosować minimalne zbrojenie na ścinanie. W elementach, w których możliwa jest poprzeczna redystrybucja obciążeń (płyty pełne, żebrowe, kanałowe) oraz które nie wpływają w istotny sposób na nośność i stateczność konstrukcji (np. nadprożach do 2,00 m), można nie stosować minimalnego zbrojenia na ścinanie.

3. Ścinanie według normy polskiej PN-B-03264 [8]

Polska norma PN-B-03264:2002 (w skrócie PN) od dnia 1 kwietnia 2010 r., w świetle najnowszych warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, nie jest już przywoływana do stosowania.

Poprzednie wersje normy PN oparte były m.in. na teorii granicznego stanu zniszczenia Boriszańskiego (w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku).

Norma PN oparta jest na tym samym modelu kratownicowym, jak omówiona powyżej norma EC2.

Zakłada się, że element składa się ze strefy ściskanej, strefy rozciąganej (zbrojenia podłużnego) i strefy ścinania położonej pomiędzy wypadkowymi sił F_c i F_t , jak oznaczono na rys. 2. Strefa ścinania składa się ze ściskanych betonowych krzyżulców i z rozciąganego zbrojenia poprzecznego. Możliwość doboru kątów nachylenia krzyżulców jest podobny jak w modelu kratownicy według normy EC2. Kąt nachylenia krzyżulców betonowych można przyjąć z zakresu: $26,6\text{--}45,0^\circ$. Kąt nachylenia zbrojenia na ścinanie musi być większy niż 45° (a zarazem nie większy niż 90°).

Metoda obliczeń z zastosowaniem umówionego schematu kratownicowego z normy PN wprowadza następujące definicje obliczeniowych nośności na ścinanie w elementach żelbetowych i sprężonych [5, 8, 9, 10]:

- $V_{Rd.1}$ – nośność obliczeniowa na ścinanie ze względu na rozciąganie betonu powstające przy ścinaniu w elemencie niemającym poprzecznego zbrojenia na ścinanie,
- $V_{Rd.2}$ – nośność obliczeniowa na ścinanie ze względu na ściskanie betonu powstające przy ścinaniu w elemencie zginanym,

$V_{Rd.2.red}$ – nośność $V_{Rd.2}$ w elemencie dodatkowo obciążonym siłami ściskającymi,
 $V_{Rd.3}$ – nośność obliczeniowa na ścinanie ze względu na rozciąganie poprzecznego zbrojenia na ścinanie.

Definiuje się również rodzaje odcinków ze względu na ścinanie:

- odcinki I rodzaju – ze zbrojeniem konstrukcyjnym,
- odcinki II rodzaju – wymagające obliczania zbrojenia poprzecznego oraz sprawdzania szerokości rozwarcia rys ukośnych.

Sprawdzenie stanu granicznego nośności na ścinanie elementów strunobetonowych polega na wykazaniu, że spełnione są następujące warunki:

- na odcinkach I rodzaju

$$V_{sd} \leq V_{Rd.1} \quad (5)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd.2.red} \quad (6)$$

gdzie:

V_{sd} – siła poprzeczna (ścinająca) wywołana obciążeniem obliczeniowym,

- na odcinkach II rodzaju

$$V_{sd} \leq V_{Rd.2.red} \quad (7)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd.3} \quad (8)$$

Nośność na ścinanie elementów strunobetonowych należy określać z uwzględnieniem wpływu siły podłużnej od sprężenia określonej dla najniekorzystniejszego przypadku. W przypadku cięgien odgiętych pod kątem do obliczeń należy przyjmować zredukowaną wartość siły poprzecznej. Wpływ siły podłużnej od sprężenia na nośność powinien zostać włączony z uwzględnieniem zakotwienia cięgien.

Ze względu na ścinanie wymiarowanie należy prowadzić w przekroju oddalonym w odległości d od lica podpory. Zbrojenie poprzeczne na odcinakach I i II rodzaju powinno spełniać wymagania minimalnego stopnia zbrojenia poprzecznego ze względu na ścinanie. W których konstrukcja zapewnia poprzeczne przekazywanie sił wewnętrznych i nieobciążonych znaczącymi siłami podłużnymi rozciągającymi (płyty pełne i z kanałami), wymagania wprowadzenia minimalnego zbrojenia poprzecznego mogą zostać pominięte.

4. Algorytm wymiarowania na ścinanie według EC2

Procedura wymiarowania zbrojenia strzemionami prostopadłymi w elemencie zginanym strunobetonowym z prostoliniowymi trasami cięgien według EC2 [1, 6, 7]. Oznaczenia do wzorów zgodnie z normą [6].

1. Dane do obliczeń:

$$V_{Ed}, A_{cs}, h, d, b_w, S, I_{cs}, P_d, A_p, l_{pl2}, f_{cd}, f_{ctd}, f_{ck}, f_{ywd}, f_{ywk}$$

Oznaczenia symboli:

- V_{Ed} – wartość obliczeniowa siły poprzecznej ścinającej,
- A_{cs} – sprowadzone pole przekroju,
- h – wysokość przekroju,
- d – wysokość użyteczna przekroju,
- b_w – najmniejsza szerokość strefy rozciąganej przekroju,
- S – moment statyczny pola,
- I_{cs} – moment bezwładności przekroju sprowadzonego,
- P_d – obliczeniowa siła sprężająca,
- A_p – pole przekroju cięgien sprężających,
- l_{pl2} – wartość obliczeniowa długości transmisji,
- f_{cd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie,
- f_{ctd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe,
- f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu,
- f_{ywd} – obliczeniowa granica plastyczności zbrojenia na ścianie,
- f_{ywk} – charakterystyczna granica plastyczności zbrojenia na ścianie.

2. Czy element zarysowany w strefie obliczania zbrojenia na ścinanie?

a) Tak – strefa C (zarysowana). Obliczyć

$$k = \min \left(1, 0 + \sqrt{\frac{200}{d}}, 2, 0 \right) \quad (9)$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_C} \quad (10)$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{\frac{2}{3}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

gdzie:

- k – współczynnik,
- $C_{Rd,c}$ – współczynnik,
- γ_C – współczynnik częściowy dla betonu,
- v_{\min} – współczynnik,

$$k_1 = 0,15 \quad (12)$$

$$\sigma_{cp} = \min \left(\frac{P_d}{A_{cs}}, 0,2 \cdot f_{cd} \right) \quad (13)$$

gdzie:

- k_1 – współczynnik,
- σ_{cp} – naprężenie ściskające w betonie od siły podłużnej i sprężania,

$$\rho_L = \min\left(\frac{A_p}{A_{cs}}, 0,02\right) \quad (14)$$

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (15)$$

$$z = 0,9 \cdot d \quad (16)$$

gdzie:

- ρ_L – stopień zbrojenia podłużnego rozciąganego,
- v – współczynnik,
- z – ramie sił wewnętrznych,

$$V_{Rd.c1} = \left(C_{Rd.c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d \quad (17)$$

$$V_{Rd.c2} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (18)$$

$$V_{Rd.c} = \max(V_{Rd.c1}, V_{Rd.c2}) \quad (19)$$

gdzie:

- $V_{Rd.c1}$ – nośność obliczeniowa na ścinanie,
- $V_{Rd.c2}$ – nośność obliczeniowa na ścinanie,
- $V_{Rd.c}$ – obliczeniowa nośność na ścianie elementu bez zbrojenia na ścinanie.

b) Nie – strefa U (niezarysowana). Obliczyć

$$l_x = d \quad (20)$$

$$\alpha_l = \min\left(\frac{l_x}{l_{pl2}}, 1,0\right) \quad (21)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{P_d}{A_{cs}} \quad (22)$$

gdzie:

- l_x – odległość przekroju od punktu początkowego odcinka, na którym sprężenie przekazuje się z cieżien na beton,
- α_l – stosunek,

$$V_{Rd.c} = \frac{I_{cs} \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_l \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} \quad (23)$$

gdzie:

- $V_{Rd.c}$ – obliczeniowa nośność na ścianie elementu bez zbrojenia na ścinanie w obszarach niezarysowanych.

3. Sprawdzenie warunku nośności przekroju niezbrojonego z uwagi na ścinanie

$$V_{Ed} \leq V_{Rd.c} \quad (24)$$

a) Tak (warunek spełniony). Element nie wymaga zbrojenia na ścinanie. Przyjąć strzemią konstrukcyjne. Obliczyć w strefie A:

Przyjąć: $\theta, \alpha_{cw} = 1,00$

$$V_{Rd.max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \quad (25)$$

gdzie:

- θ – kąt nachylenia betonowych krzyżulców ściskanych do osi belki,
- α_{cw} – współczynnik zależny od stanu naprężeń w pasie ściskany,
- $V_{Rd.max}$ – nośność na ścinanie ograniczona przez zmiążdżenie ściskanych krzyżulców betonowych.

Sprawdzenie warunku nośności ściskanych krzyżulców betonowych

$$V_{Ed} \leq V_{Rd.max} \quad (26)$$

KONIEC

b) Nie (warunek niespełniony). Element wymaga obliczeń zbrojenia na ścinanie.

Przyjąć: A_{sw}, θ i obliczyć

$$s_{II} = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot z \cdot \cot(\theta) \quad (27)$$

gdzie:

- A_{sw} – pole przekroju zbrojenia pionowego na ścinanie (strzemię),
- s_{II} – obliczeniowo konieczny rozstaw strzemię prostokątnych,

$$V_{Rd.s} = \frac{A_{sw}}{s_{II}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta) \quad (28)$$

gdzie:

- $V_{Rd.s}$ – nośność na ścinanie pionowego zbrojenia na ścinanie.

Na podstawie σ_{cp} (22) dobrać odpowiednio α_{cw} .

$$V_{Rd.max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \quad (29)$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd.s}, V_{Rd.max}) \quad (30)$$

Sprawdzenie warunku nośności przekroju zbrojonego ze względu na ścinanie

$$V_{Ed} \leq V_{Rd.c} \quad (31)$$

a1) Tak (warunek spełniony). Przyjąć rozmieszczenie strzemion. Obliczyć zasięg odcinka obliczania zbrojenia na ścinanie. Uwzględnić warunki konstrukcyjne.

Przyjąć: $\alpha_{cw} = 1,00$ i obliczyć w strefie A

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \quad (32)$$

Sprawdzenie warunku nośności ściskanych krzyżulców betonowych

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (33)$$

KONIEC

b1) Nie (warunek niespełniony). Zmiana danych wejściowych. Ponowne obliczenia na ścinanie.

5. Algorytm wymiarowania na ścinanie według PN

Procedura wymiarowania zbrojenia strzemionami prostokątnymi w elemencie zginanym strunobetonowym z prostoliniowymi trasami cięgien według PN [5, 8, 9, 10]. Oznaczenia do wzorów zgodnie z normą [8].

1. Dane:

$$V_{sd}, A_{cs}, h, d, b_w, P_d, A_p, l_{bpl}, f_{cd}, f_{ctd}, f_{ck}, f_{ywd}, f_{ywk}$$

Oznaczenia symboli:

- V_{sd} – siła poprzeczna (ścinająca) wywołana obciążeniem obliczeniowym,
- A_{cs} – sprowadzone pole przekroju,
- h – wysokość przekroju,
- d – wysokość użyteczna przekroju,
- b_w – obliczeniowa szerokość strefy ścinania,
- P_d – obliczeniowa wartość siły sprężającej,
- A_p – pole przekroju cięgien sprężających,
- l_{bpl} – obliczeniowa długości zakotwienia cięgien sprężających,
- f_{cd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie,
- f_{ctd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie,
- f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie,
- f_{ywd} – obliczeniowa granica plastyczności zbrojenia poprzecznego na ścianie,
- f_{ywk} – charakterystyczna granica plastyczności zbrojenia poprzecznego na ścianie.

2. Obliczyć

$$k = \max(1, 6 - d, 1, 0) \quad (34)$$

gdzie:

- k – współczynnik,

$$\rho_L = \min\left(\frac{A_p}{b_w \cdot d}, 0,02\right) \quad (35)$$

gdzie:

ρ_L – stopień zbrojenia podłużnego,

$$l_x = d \quad (36)$$

$$P_x = P_d \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{l_x}{l_{bpd}}\right)^3\right) \quad (37)$$

$$N_{pd} = P_x \quad (38)$$

gdzie:

l_x – odległość przekroju od punktu początkowego odcinka, na którym sprężenie przekazuje się z cięgien na beton,

P_x – siła od sprężenia pomniejszona z uwagi na przekazanie sprężenia na beton,

N_{pd} – siła podłużna od sprężenia,

$$\sigma_{cp} = \min\left(\frac{N_{pd}}{A_{cs}}, 0,2 \cdot f_{cd}\right) \quad (39)$$

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (40)$$

$$z = 0,9 \cdot d \quad (41)$$

gdzie:

σ_{cp} – naprężenie w betonie wywołane siłą sprężającą,

v – współczynnik,

z – ramie sił wewnętrznych,

$$V_{Rd.1} = (0,35 \cdot k \cdot f_{ctd} \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_L) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (42)$$

3. Sprawdzenie warunku

$$V_{sd} \leq V_{Rd.1} \quad (43)$$

a) Tak (warunek spełniony). Odcinek I rodzaju. Obliczyć

$$V_{Rd.2} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (44)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{pd}}{A_{cs}} \quad (45)$$

Na podstawie σ_{cp} (45) dobrać odpowiednio α_c .

$$V_{Rd.2.red} = \alpha_c \cdot V_{Rd.2} \quad (46)$$

Sprawdzenie warunku nośności odcinka I rodzaju:

$$V_{sd} \leq V_{Rd.2.red} \quad (47)$$

a1) Tak (warunek spełniony). Uwzględnić warunki konstrukcyjne.

KONIEC

a2) Nie (warunek niespełniony). Zmiana danych wejściowych. Ponowne obliczenia.

b) Nie (warunek nie spełniony). Odcinek II rodzaju.

Przyjąć: A_{sw} , θ i obliczyć

$$V_{Rd.2} = v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \frac{z \cdot \cot(\theta)}{1 + (\cot(\theta))^2} \quad (48)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{pd}}{A_{cs}} \quad (49)$$

Na podstawie σ_{cp} (45) dobrać odpowiednio α_c .

$$V_{Rd.2.red} = \alpha_c \cdot V_{Rd.2} \quad (50)$$

Obliczyć i przyjąć

$$s_{II} = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot z \cdot \cot(\theta) \quad (51)$$

gdzie:

A_{sw} – pole przekroju zbrojenia pionowego na ścinanie (strzemion),

s_{II} – obliczeniowo konieczny rozstaw strzemion prostopadłych,

$$V_{Rd.3} = \frac{A_{sw}}{s_{II}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta) \quad (52)$$

Sprawdzenie warunków nośności odcinka II rodzaju

$$V_{sd} \leq V_{Rd.2.red} \quad (53)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd.3} \quad (54)$$

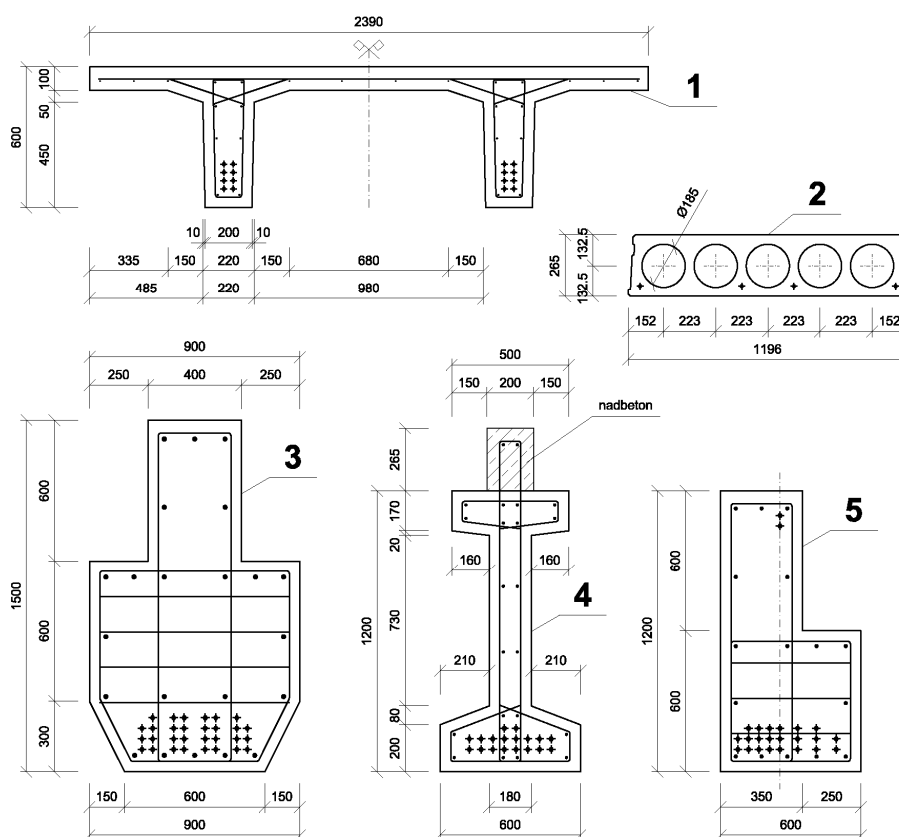
b1) Tak (warunki spełnione). Ustalić zasięg odcinka II rodzaju. Przyjąć rozmieszczenie strzemion. Uwzględnić warunki konstrukcyjne.

KONIEC

b2) Nie (warunki niespełnione). Zmiana danych wejściowych. Ponowne obliczenia.

6. Analiza wymiarowania zbrojenia według przedstawionych procedur

Analizę przeprowadzono na podstawie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych różnych elementów strunobetonowych konstrukcji stropu międzypiętrowego budynku parkingu. Przekroje poprzeczne zwymiarowanych elementów przedstawia rysunek 3. Obliczenia oraz szczegółowy tok postępowania zamieszczono w rozdziale 7 pracy [11].



Rys. 3. Wymiary przekroju, zbrojenie zwykłe i sprężające: 1 – płyta typu TT, 2 – płyta kanałowa typu HC, 3 – belka typu RT, 4 – belka typu I zespolona, 5 – belka typu RL

Fig. 3. Dimensions of the cross section, reinforcement and prestressing steel: 1 – double tee (slab TT), 2 – hollow core slab (slab HC), 3 – girder type RT (inverted T shape beam), 4 – composite girder type I (I shaped beam), 5 – girder type RL (L shaped beam)

Wszystkie pozycje projektowano indywidualnie. Dane materiałowe do obliczeń:

- beton konstrukcyjny: B50 (C40/50), nadbeton: B30 (C25/30),
- sploty: Y 1860 S7 ϕ 12.5 (poz. 1, 2 z rys. 3), Y 1770 S7 ϕ 15.7 (poz. 3, 4, 5 z rys. 3),
- stal zwykła: RB 500 W.

Obliczenia statyczne poszczególnych elementów przeprowadzono dla schematu statycznego jednoprzęsłowej belki wolnopodpartej.

Dla celów analizy przyjęto następujące założenia (uproszczenia):

- siły obliczeniowe ścinające wyznaczone wyłącznie według norm PN-EN (Eurokod),
- elementy projektowane na pełne sprzężenie (brak zarysowania),
- jako zbrojenie na ścinanie stosowano wyłącznie strzemiona prostopadłe.

Otrzymane wyniki z obliczeń zestawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1

Nośność przekroju bez udziału zbrojenia poprzecznego

Element	Siła ścinająca [kN]		Norma	Nośność na ścinanie [kN]	Iloraz EC2 / PN [%]
	oś podpory	do obliczeń			
HC (poz. 2 z rys. 3)	55,53	52,27	EC2	141,96	134,4
			PN	105,65	
I (poz. 4 z rys. 3)	778,02	667,97	EC2	497,07	155,8
			PN	318,94	
I (poz. 4 + nadbeton)	1000,32	823,94	EC2	560,16	153,6
			PN	364,89	
TT (poz. 1 z rys. 3)	229,64	216,26	EC2	419,52	144,5
			PN	290,29	
RT (poz. 3 z rys. 3)	1663,48	1365,82	EC2	1137,15	152,7
			PN	744,50	
RL (poz. 5 z rys. 3)	848,76	728,76	EC2	694,53	136,4
			PN	509,19	

Tabela 2

Wyniki obliczeń zbrojenia na ścinanie (strzemiona prostopadłe)

Element	Norma	Średnica strzemion [mm]	Obliczony rozstaw [cm]	Przyjęty rozstaw [cm]	Nośność strzemion [kN]	Zasięg strefy obliczania od osi podpory [m]
HC	EC2	–	–	–	–	–
	PN		–		–	
I	EC2	10	17,23	16	719,48	2,74
	PN		17,23		719,48	4,48
I (+ nadbeton)	EC2	10	17,42	16	896,84	3,34
	PN		17,42		896,84	4,83
TT	EC2	konst.	–	konst.	–	konst.
	PN		–		–	konst.
RT	EC2	12	15,05	15	1370,39	2,37
	PN		15,05		1370,39	4,14
RL	EC2	10	15,55	15	754,85	1,36
	PN		15,55		754,85	3,00

7. Wnioski

Nośność na ścinanie elementu bez zbrojenia na ścinanie obliczona według normy EC2 jest większa w stosunku do obliczonej według normy PN. Spowodowane jest to jej podniesieniem w procedurze wymiarowania zgodnie z EC2 dla elementów sprężonych niezarysowanych. Dla zwymiarowanych elementów stropowych stosunek nośności wg EC2 do PN wynosi od 134,4% do 155,8%. Wymiarując elementy strunobetonowe na ścinanie zgodnie z normą PN, ich nośność na działanie sił poprzecznych jest obliczana tak samo dla elementów niezarysowanych (projektowanych na superpełne i pełne sprężenie), jak i dla zarysowanych.

Nośność strzemion prostopadłych w ujęciu EC2 i PN jest identyczna. Procedury w obu normach są takie same. Przy wymiarowaniu elementów według EC2 występuje krótszy odcinek ścinania, na którym konieczne jest obliczanie zbrojenia poprzecznego. Wynika również z faktu uwzględnienia większej nośności na ścinanie w procedurze wymiarowania dla elementów sprężonych niezarysowanych.

Przy analizie porównawczej wyników należy mieć na uwadze, że otrzymane są dla sił wewnętrznych wyznaczonych według norm PN-EN (Eurokodów). Dlatego też dla procedury PN uzyskuje się nieco inne wartości rozstawu i zasięgu obliczania strzemion, niż miałyby to miejsce dla sił wewnętrznych określonych według norm PN-B.

Artykuł miał na celu dwa zasadnicze zadania. Pierwszym było przedstawienie algorytmów wymiarowania na ścinanie elementów strunobetonowych w ujęciu obowiązującej normy Eurokod 2 oraz niezalecanej już do stosowania normy PN. Drugim natomiast było ukazanie różnic w uzyskiwanych wynikach obliczeń na ścinanie dla obu podejść normowych na przykładach różnych elementów. Realizacja pierwszego założenia w obecnej sytuacji zmiany norm jest szczególnie ważna z punktu widzenia inżynierów – projektantów konstrukcji. W pracy podane są procedury postępowania przy projektowaniu dla typowych elementów strunobetonowych. Naświetlenie różnic w otrzymywanych rezultatach obliczeń na ścinanie dla elementów strunobetonowych niezarysowanych skłania do refleksji na temat rozważnego korzystania z norm. Zmiana normy z PN-B-03264 na Eurokod 2 nie jest ostateczną receptą na wszelkie dylematy inżynierów związane z osiągnięciem odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa pracy konstrukcji.

Literatura

- [1] Godycki-Ćwirko T., *Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2*, rozdział 7, Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne, Wrocław 2006.
- [2] Mianowski K.M., *Zagadnienie siły poprzecznej w belkach strunobetonowych*, Wyd. PWN, Warszawa 1971.
- [3] Godycki-Ćwirko T., *Ścinanie w żelbecie*, Arkady, Warszawa 1968.
- [4] Godycki-Ćwirko T., *Mechanika betonu*, Arkady, Warszawa 1982.
- [5] Łapko A., Jensen B. C., *Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych*, Arkady, Warszawa 2005.
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2. *Projektowanie konstrukcji z betonu*. Część 1-1: *Reguły ogólne i reguły dla budynków*, PKN, Warszawa 2008.

- [7] Knauff M., Golubińska A., Knyzak P., *Nośność na ścinanie i strefa zakotwienia w strunobetonie według Eurokodu 2*, Budownictwo nr 1052/2009, 63-79.
- [8] PN-B-03264:2002. *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*, PKN, Warszawa 2002.
- [9] Ajdukiewicz A., Mames J., *Konstrukcje z betonu sprężonego*, Polski Cement, Kraków 2008.
- [10] Dyduch K., Dyduch M., *Komentarz naukowy do „PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie”*. Wersja końcowa, rozdział 15, ITB, Warszawa 2004.
- [11] Dyba M., *Projekt wielopoziomowego parkingu o konstrukcji sprężonej prefabrykowanej*, praca magisterska, rozdział 7, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.