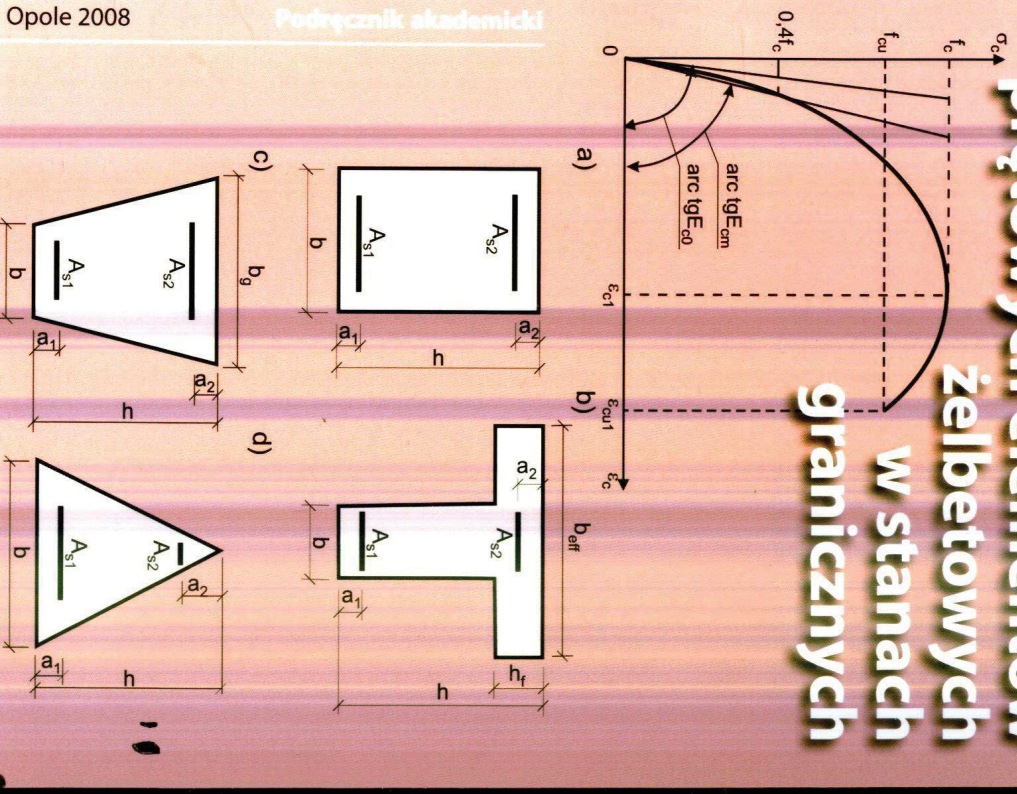


Edward Matek

Obliczanie prętowych elementów żelbetonowych w stanach granicznych

Opole 2008

Podręcznik akademicki



Ponieważ $M_{sdl} = 325 \text{ kNm} < M_{rd} = 333,44 \text{ kNm}$, warunek nośności (5.15) jest spełniony.

5.3. OBLICZANIE PRZEKROJÓW ELEMENTÓW ŚCISKANYCH

5.3.1. Mniejszość początkowy oraz wpływ smukłości elementu i obciążenia długotrwałego

W przekroju poprzecznym elementu mimośrodowo ściskanego występuje obliczeniowy moment zginający M_{sdl} i siła podłużna ściskająca N_{sdl} , które w obliczeniach zastępuje się siłą N_{sdl} działającą na mimośrodku konstrukcyjnym $e_c = M_{sdl} / N_{sdl}$ odmierzanym od osi ciężkości elementu, wyznaczanej dla jego betonowej części (z pominięciem zbrojenia). W przypadku gdy w obliczeniach nośności uwzględni się wpływ smukłości elementu, mimośród e_c – zgodnie z zaleceniami normy [N1] – należy określać następująco:

- a) jeżeli element występuje w układzie ramowym o węzłach nieprzesuwanych:
 - przy prostoliniowym rozkładzie momentów zginających wzdłuż elementu (rys. 5.11a) – jako

$$e_c = \left| \frac{0,6 M_{sdl} + 0,4 M_{2sdl}}{N_{sdl}} \right| \geq \left| \frac{0,4 M_{sdl}}{N_{sdl}} \right| \quad (5.53)$$

- przy krzywoliniowym rozkładzie momentów zginających wzdłuż elementu (rys. 5.11b, c) – jako

$$e_c = \left| \frac{M_{2sdl}}{N_{sdl}} \right| \quad (5.54)$$

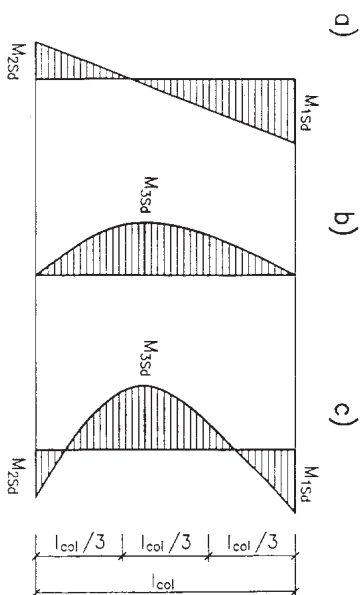
gdzie:

- M_{sdl}, M_{2sdl} – wartości algebraiczne momentów zginających, występujących na końcach elementu, przy czym $|M_{sdl}| \geq |M_{2sdl}|$,
- ekstremalna wartość momentu zginającego, występująca na środkowym odcinku równym $1/3$ długości elementu,

b) jeżeli element występuje w układzie ramowym o węzłach przesuwnych – jako

$$e_c = \left| \frac{M_{\text{sd}}}{N_{\text{sd}}} \right| \quad (5.55)$$

gdzie M_{sd} jest ekstremalną wartością momentu zginającego na całej długości elementu.



Rys. 5.11. Umięscowienie obliczanych przekrojów w elementach mimośrodowo ścisanych podpartych na końcach nieprzesuwnie w kierunku prostoliniowym do osi elementu, przy następującym rozkładzie momentów zginających: a) prostoliniowym, b) krzywoliniowym jednakoowego znaku, c) krzywoliniowym o zmiennych znakach

Przykład osiowego ścisania elementu (przy $M_{\text{sd}} = 0$) jest bardzo trudny do zrealizowania w praktyce, nawet w warunkach laboratoryjnych. Stąd też można przyjąć, że wszystkie elementy zaprojektowane przy założeniu ich osiowego ścisania, w rzeczywistości będą pracowały jako elementy ścisane mimośrodowo. Praktycznie nie do uniknięcia są bowiem przykładowe mimośrodowo niezamierzone e_a podłużnej siły ścisającej, powodowane na przykład różnicowaniem cech wytrzymałościowych betonu i stali czy też odchyleniami od założonego kształtu elementu (początkowa krzywizna) lub od założonego usytuowania elementu w konstrukcji.

Wartość niezamierzonego mimośrodu przypadkowego e_a , przyjmuje się zgodnie z normą [N1] jako równą największej spośród następujących wartości:

$$e_a = \frac{l_{\text{col}}}{600}$$

– w ustrojach szkieletowych o węzłach nieprzesuwnych oraz w ustrojach ścianowych, gdzie l_{col} jest odległością między punktami podparcia elementu, a w przypadku elementu wspornikowego – jego długością,

$$e_a = \frac{l_{\text{col}}}{600} \left(1 + \frac{1}{n} \right)$$

– w ustrojach szkieletowych o węzłach przesuwnych w elementach n-tej kondygnacji licząc od góry,

$$e_a = \frac{h}{30}$$

– przy czym h jest wysokością przekroju mierzoną w kierunku równoległym do płaszczyzny obciążenia,

$$e_a = 10 \text{ mm}$$

– w konstrukcjach monolitycznych oraz prefabrykowanych ścian i powłok,

$$e_a = 20 \text{ mm}$$

– w konstrukcjach prefabrykowanych, z wyjątkiem ścian i powłok.

W normie europejskiej EC2 [N17] czynniki ujmowane w normie polskiej [N1] za pomocą mimośrodu niezamierzonego e_a nazywane są imperfekcjami geometrycznymi. Według [N17] wpływ imperfekcji na konstrukcję można m.in. ujmować także za pomocą mimośrodu wyrażonego wzorem

$$e_1 = \theta_1 l_0 / 2 \quad (5.56)$$

w którym szanse imperfekcje reprezentowane są przez obciążeniowe nachylenie elementu ścisane

$$\theta_1 = \alpha_1 \alpha_m / 200 \quad (5.57)$$

gdzie:

$$\alpha_1 = 2\sqrt{l} \quad \text{oraz} \quad 2/3 \leq \alpha_1 \leq 1 \quad \text{– współczynnik redukcyjny wysokości elementu}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + l/m)} \quad \text{– współczynnik uwzględniający liczbę elementów}$$

l – przemieszczenia długości lub wysokości elementu w [m],

m – liczba pionowych elementów, w których uwzględnia się wpływ

imperfekcji; np. $m = 1$ w przypadku elementu wyizolowanego z konstrukcji;

Według normy polskiej [N1], mimośród początkowy siły podłużnej ścisającej N_{sd} , odmierzany od środka ciężkości przekroju betonowej części elementu, należy określać wg następującego wzoru:

$$e_0 = e_c + e_a \quad (5.58)$$

w którym e_c i e_a są mimosłobodami wyznaczanymi jak wyżej.

Natomiast wpływ smukłości na nośność ściskanego elementu żelbetonowego uwzględnia się w obliczeniach drogi zwiększenia mimosłodu początkowego e_0 do wartości e_{0st} wg zależności:

$$e_{0st} = \eta e_0 \quad (5.59)$$

Współczynnik zwiększający η , wynikający z uwzględnienia tzw. efektów II rzędu rozumianych przez normę [N1] jako powiększenie mimosłodu początkowego na skutek ugięcia się elementu, wyznacza się ze wzoru:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N_{st}}{N_{crit}}} \quad (5.60)$$

Występująca we wzorze (5.60) wielkość N_{st} jest klasyczną siłą culerowską adaptowaną do prętowych elementów żelbetonowych, które między innymi przenoszą także obciążenia długotrwałe. Wzór określający tę siłę jest następujący

$$N_{crit} = \frac{9}{I_0} \left[\frac{E_{cm} I_c}{2 k_n} \left(\frac{0,11}{0,1 + e_0/h} + 0,1 \right) + E_c I_s \right] \quad (5.61)$$

We wzorze tym I_c oznacza moment bezwładności przekroju betonowej części elementu względem jego środka ciężkości O_c (patrz rys. 5.12), I_s – moment bezwładności całego zbrojenia względem tego samego środka ciężkości O_c (przy wyiniarowaniu można na wstępie obliczeń przyjąć $I_s \approx 0,03 I_c$), zaś I_0 jest długością obliczeniową elementu.

Występujący we wzorze (5.61) iloraz e_0/h powinien spełniać warunki

$$e_0/h \geq 0,50 - 0,01 I_0/h - 0,01 f_{ctd} \geq 0,05 \quad (5.62)$$

przy czym wartość f_{ctd} podstawić należy w tych wzorach w MPa.

Wpływ długotrwałego obciążenia elementu wyraża we wzorze (5.61) współczynnik określany wzorem

$$k_n = 1 + 0,5 \frac{N_{st,lt}}{N_{st}} \phi(\infty, I_0) \quad (5.63)$$

w którym

$N_{st,lt}$ – siła podłużna ściskająca spowodowana działaniem długotrwałej części obciążenia obliczeniowego,

$\phi(\infty, I_0)$ – końcowy współczynnik pełzania betonu wg tabelicy A.1 w normie [N1].

Nośność żelbetonowego elementu ściskanego, z uwzględnieniem wpływu smukłości i obciążenia długotrwałego, należy sprawdzić w przypadku, gdy smukłość elementu $\lambda = I_0/i > 25$ (1 – promień bezwładności przekroju betonowej części elementu, rozpatrywany w kierunku równoległym do płaszczyzny obciążenia). W przypadku nieuwzględniania wpływu smukłości współczynnik $\eta = 1,0$.

Norma europejska [N17] wpływ smukłości, albo inaczej: efektów drugiego rzędu, nakazuje uwzględniać dla elementów prętowych, których smukłość λ jest co najmniej równa wartości granicznej λ_{lim} określonej wzorem podanym w [N17]. Procedura uwzględniania tego wpływu jest bardziej skomplikowana od przedstawionej wyżej propozycji normy polskiej [N1] i opiera się ona bądź to na określaniu tzw. nominalnej sztywności elementu albo też na szacowaniu jego nominalnej krzywiźnie.

5.3.2. Wpływ wielkości mimosłodu na charakter zniszczenia przekroju

Badania eksperymentalne wykazały, że charakter zniszczenia przekroju żelbetonowego mimosłodowo ściskanego zależy od wielkości mimosłodu na jakim działa siła podłużna ściskająca oraz od ilości zbrojenia znajdującego się w sekcji i rozciąganej stronie przekroju. Stąd też w teorii konstrukcji żelbetonowych rozróżnia się dwa następujące podstawowe przypadki mimosłodowego ściskania, wyróżziane przez normę [N1] w zależności od względnej efektywnej wysokości ξ_{eff} strefy ściskanej i jej wartości granicznej ξ_{lim} (tabl. 5.1) w rozpatrywanym przekroju elementu:

A. Przypadek dużego mimosłodu – gdy $\xi_{eff} \leq \xi_{lim}$, co jest równo-

znaczne z przypadkiem $X_{crit} \leq X_{crit,lim} = \xi_{crit,lim} d$ (patrz rys. 5.12) - w którym zniszczenie przekroju następuje na skutek osiągnięcia przez zbrojenie rozciągane obliczeniowej granicy plastyczności stali f_{st} .

Znaczne wydłużenia uplastycznionych stalowych prętów rozciąganych powodują powstanie szybko powiększających się rys w betonie strefy rozciąganej i związane z tym przesunięcie się osi obciążenia ku ściskanej krawędzi przekroju. Tym samym naprężenia obliczeniowe w betonie

strefy ścisłkanej osiągną graniczną wartość f_{ed} , a w stali znajdującej się w tej strefie obliczeniową granicę plastyczności f_{yd} .

B. Przypadek małego mimośrod gdy $\xi_{ef} > \xi_{ef,lim}$, co jest równoznaczne z przypadkiem $x_{ef} > x_{ef,lim} = \xi_{ef,lim} d$ (patrz rys. 5.15) – w którym zmniejszenie przekroju następuje na skutek osiągnięcia przez beton obliczeniowej wytrzymałości f_{ed} w pobliżu ścisłkanej krawędzi przekroju, a nośność zbrojona rozciągającego lub mniejsze ścisłkanej jest w pełni wykorzystana.

W niniejszym podrzdziale, zgodnie z podejściem normy [N1], utrzymano jednolicie powyższą klasyfikację przypadków mimośrodowego ścisłkanej opartą na wartościach ξ_{ef} i $\xi_{ef,lim}$ stosując we wzorach te własne wielkości zamiast x_{ef} i $x_{ef,lim}$. Ponadto, uwzględniając, że większość spotykanych w praktyce prętowych elementów żelbetonowych mimośrodowo ścisłkanych, ma przekrój prostokątny, w rozdziale tym rozpatruje się tylko prostokątne przekroje mimośrodowo ścisłkane.

5.3.3. Przekrój prostokątny mimośrodowo ścisłkany – duży mimośród

W obliczeniach przekrojów elementów żelbetonowych mimośrodowo ścisłkanych siłą podłużną działającą na mimośrodek e_{0a} względem osi ciężkości betonowej części elementu, zarzyczą trudno jest na wstępnie precyzyjnie określić przypadek mimośrodowego ścisłkanej. W związku z tym, zawsze na początku obliczeń zakładamy, że mamy do czynienia z przypadkiem dużego mimośrod i całkowity mimośród e_{0a} siły podłużnej wyznaczamy wg zależności (5.59). Dopiero w trakcie obliczeń może się okazać, że założenie było błędne i faktycznie zachodzi przypadek małego mimośrod. Parametry geometryczno-wytrzymałowe obliczane przekroju określamy w sposób identyczny jak w elementach zginanych (podrozdział 5.2).

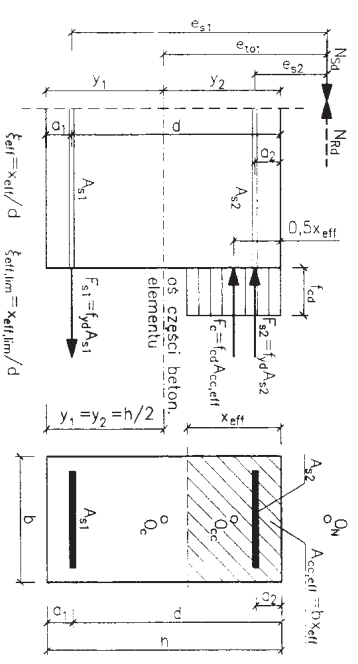
Jeżeli w obliczeniach uwzględnia się wpływ smukłości elementu, to na etapie wymiarowania nie znana jest wartość momentu bezwładności I_s zbrojona we wzorze (5.61) określającym N_{ed} . Wtedy można wstępnie przyjąć $I_s \approx 0,03 I_c$, jeżeli moment bezwładności $I_{s,mov}$ obliczony po wymiarowaniu i doborze zbrojona różni się od początkowej wartości więcej niż o 5%, to we wzorze (5.61) należy przyjąć $I_s = I_{s,mov}$ i cały tok wymiarowania powtórzyć od początku.

Poleżebne w obliczeniach mimośrod siły podłużnej względem osi ciężkości przekrojów zbrojeń A_{s1} i A_{s2} (rys. 5.12) wynoszą odpowiednio

$$c_{s1} = c_{ed} + y_1 - a_1 \quad (5.64)$$

$$c_{s2} = |c_{ed} - y_2 + a_2| \quad (5.65)$$

przy czym w przypadku przekroju prostokątnego położenie osi ciężkości elementu wynosi $y_1 = y_2 = 0,5h$ (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Rozkład granicznych naprężeń i sił wewnętrznych w przekroju żelbetonowym prostokątnym mimośrodowo ścisłkany w przypadku dużego mimośrod (punkt O_c oznacza środek ciężkości przekroju betonowej części elementu, zaś O_{ce} – środek ciężkości strefy ścisłkanej przekroju)

5.3.3.1. Wymiarowanie zbrojona niesymetrycznego

Celem obliczeń jest wyznaczenie pól przekrojów: A_{s1} zbrojona rozciągającego i A_{s2} zbrojona ścisłkanej, w zadanym przekroju prostokątnym (rys. 5.12) mimośrodowo ścisłkany obliczeniową siłą podłużną N_{ed} działającą na mimośrodek e_{0a} przy czym przekrój ten znajduje się w elemencie wykonanym z betonu o znanej klasie B, uzbrojonym w obu strefach przekroju prętami ze stali o znanej klasie A.

W rozpatrywanym przypadku dużego mimośrod, oprócz A_{s1} i A_{s2} , niewiadomą pozostaje też względna efektywna wysokość ξ_{ef} strefy ścisłkanej, której wartość w związku z tym musimy z góry przyjąć, gdyż dysponujemy tylko dwoma równaniami równowagi uogólnionych sił w przekroju. Przyjmujemy zatem jej graniczną wartość, tj. $\xi_{ef} = \xi_{ef,lim}$ i poszukiwane

pole przekroju zbrojenia ściskanego wyznaczamy (z równania równowagi momentów zapisanego względem osi ciężkości przekroju zbrojenia A_{s1}) jako

$$A_{s2} = \frac{N_{sdl} \epsilon_{s1} - f_{cd} b d^2 \xi_{\text{eff,lim}} (1 - 0,5 \xi_{\text{eff,lim}})}{f_{yd} (d - a_2)} \quad (5.66)$$

Jeżeli $A_{s1} \leq 0$, to zmniejszamy wymiary przekroju betonu i powtarzamy obliczenia. Natomiast w przypadku przeciwnym ($A_{s2} > 0$), dobieramy średnicę i liczbę prętów zbrojeniovych ściskanych o przekroju $A_{s2,prov}$ spełniającym następujące warunki, wynikające z przepisów normy [N1]

$$A_{s2,prov} \geq \begin{cases} A_{s2} & \text{w rozstawie } \leq 400 \text{ mm - w elem. prelabryk;} \\ 2 \phi 10 & \text{w rozstawie } \leq 400 \text{ mm - w elem. monolit.} \end{cases} \quad (5.67)$$

Rozmieszczenie tych prętów w przekroju oraz określenie $a_{2,prov}$ odbywa się w sposób identyczny jak w przekroju zginanym podwójnie zbrojonym (patrz podrozdział 5.2.2).

Jeżeli uda się tak dobrać pręty zbrojeniove, aby $A_{s2,prov} \approx A_{s2}$, to pole przekroju zbrojenia rozciągającego obliczamy ze wzoru (otrzymanego z równania równowagi sił):

$$A_{s1} = \frac{f_{cd} b d \xi_{\text{eff,lim}} + f_{yd} A_{s2,prov} - N_{sdl}}{f_{yd}} \quad (5.68)$$

(gdzie ze wzoru (5.68) otrzymany ujemną wartość A_{s1} ($A_{s1} < 0$), to oznacza to, że zaobchdzi przypadek małego mimośrodru i dalsze obliczenia należy poprowadzić wg procedury opisanej w podrozdziale 5.3.4. Natomiast w przypadku gdy $A_{s2,prov} > A_{s2}$, to znaczy, gdy stręła ściskana nie będzie w pełni wykorzystana, najpierw obliczamy wartość sprowadzonego do postaci bezwymiarowcy momentu zginającego (wynikającego z równania równowagi momentów zapisanego względem osi ciężkości przekroju zbrojenia rozciągającego)

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{N_{sdl} \epsilon_{s1} - f_{yd} A_{s2,prov} (d - a_{2,prov})}{f_{cd} b d^2} \quad (5.69)$$

a następnie względną efektywną wysokość stręły ściskanej ξ_{eff} (względne położenie umowncy osi obojętnej) według (5.6).

Jeżeli $2a_{2,prov} / d \leq \xi_{\text{eff}} \leq \xi_{\text{eff,lim}}$, to pole przekroju zbrojenia rozciągającego obliczamy z zależności (otrzymanej z równania równowagi sił)

$$A_{s1} = \frac{f_{cd} b d \xi_{\text{eff}} + f_{yd} A_{s2,prov} - N_{sdl}}{f_{yd}} \quad (5.70)$$

a gdy $\xi_{\text{eff}} < 2a_{2,prov} / d$, ze wzoru (otrzymanego z równania równowagi momentów zapisanego względem osi ciężkości przekroju zbrojenia ściskanego, przy przyjęciu $\xi_{\text{eff}} = 2a_{2,prov} / d$)

$$A_{s1} = \frac{N_{sdl} \epsilon_{s2}}{f_{yd} (d - a_{2,prov})} \quad (5.71)$$

Dobór prętów zbrojeniovych rozciąganych i związane z tym określanie pola $A_{s1,prov}$ oraz wielkości $a_{1,prov}$ i d_{prov} odbywa się w sposób analogiczny jak w podrozdziale 5.2.1, dotyczącym przekroju zginanego. W przypadku konieczności powiększenia obliczeń związanych z wymiarowaniem, gdy $d_{prov} < d$, należy tu dodatkowo określić $\epsilon_{s1,prov}$ i $\epsilon_{s2,prov}$ według wyrażen (5.64) i (5.65) wprowadzając do nich $a_{1,prov}$ i $a_{2,prov}$ zamiast a_1 i a_2 .

Zbrojenie rozciągane musi spełniać następujące warunki, wynikające z przepisów normy [N1]

$$A_{s1,prov} \geq \begin{cases} A_{s1} & \text{w rozstawie } \leq 400 \text{ mm - w elem. prelabryk;} \\ 2 \phi 12 & \text{w rozstawie } \leq 400 \text{ mm - w elem. monolit.} \end{cases} \quad (5.72)$$

Ponadto należy sprawdzić, czy przyjęte zbrojenie sumaryczne mieści się w następujących granicach wyznaczonych przez normę [N1]:

$$0,04bh \geq A_{s1,prov} + A_{s2,prov} \geq A_{s,amin} = \max(0,15 \frac{N_{sdl}}{f_{yd}}, 0,003bh) \quad (5.73)$$

5.3.3.2. Wymiarowanie zbrojenia symetrycznego

Elementy żelbetowe ściskane na dużym mimośrodku zbroi się symetrycznie ($A_{s1} = A_{s2}$ oraz $a_1 = a_2$) jedynie w wyjątkowych sytuacjach, np. w słupach ram, których przekroje mogą być obciążone momentami zginającymi o różnych znakach i zbliżonych wartościach bezwzględnych.

W obliczonym przekroju o zadanych parametrach geometryczno-wytrzymałościowych wyznaczamy najpierw względną efektywną wysokość strefy ściskanej (otrzymaną z równania równowagi sił)

$$\xi_{\text{ef}} = \frac{N_{\text{sd}}}{f_{\text{cd}} b d} \quad (5.74)$$

Jeżeli $\xi_{\text{ef}} > \xi_{\text{ef,lim}}$, to dalsze obliczenia należy poprowadzić jak dla przypadku małego mimośrodów (patrz podrozdział 5.3.4.2).

Jeżeli natomiast $2a_s/d \leq \xi_{\text{ef}} \leq \xi_{\text{ef,lim}}$, to pole przekroju zbrojeń wyznaczamy ze wzoru (wynikającego z równania równowagi momentów względem osi ciężkości przekroju zbrojenia rozciąganego):

$$A_{\text{st}} = A_{\text{st}2} = \frac{N_{\text{sd}} e_{\text{st}} - f_{\text{cd}} b d^2 \xi_{\text{ef}} (1 - 0,5 \xi_{\text{ef}})}{f_{\text{td}} (d - a_s)} \quad (5.75)$$

a gdy $\xi_{\text{ef}} < 2a_s/d$, to pole to wyznaczamy z następującej zależności (otrzymanej z równania równowagi momentów względem osi ciężkości przekroju zbrojenia ściskanego, przy przyjęciu $\xi_{\text{ef}} = 2a_s/d$):

$$A_{\text{st}} = A_{\text{st}2} = \frac{N_{\text{sd}} e_{\text{st}2}}{f_{\text{td}} (d - a_s)} \quad (5.76)$$

Zasady doboru i rozmieszczenia zbrojenia pozostają tu takie same jak w przypadku zbrojenia niesymetrycznego (podrozdział 5.3.3.1).

5.3.3.3. Nośność przekroju

Nośność wyznaczamy zwykle dla przekroju istniejącego (lub tuż po jego zaprojektowaniu, gdy $d_{\text{pnov}} < d$), o znanych parametrach geometryczno-wytrzymałościowych oraz zbrojeniu rozciągającym i ściskającym mającym pola przekroju $A_{\text{st,pnov}}$ i $A_{\text{sc,pnov}}$ założonym w odległościach $a_{\text{t,pnov}}$ i $a_{\text{s,pnov}}$ od najbliższych krawędzi, a także znanej wysokości użytkowej $d_{\text{upov}} = h - a_{\text{t,pnov}}$ (patrz rys. 5.12, przy uwzględnieniu w nim $d_{\text{t,pnov}}$, $a_{2\text{pnov}}$, d_{pnov} , $e_{\text{st,pnov}}$, $e_{\text{sc,pnov}}$, $A_{\text{st,pnov}}$ oraz $A_{\text{sc,pnov}}$ zamiast a_t , a_s , d , e_{st} , e_{sc} , A_{st} oraz A_{sc}). Po obliczeniu mimośrodu e_{st} według wzoru (5.59), rzeczywiście mimośrody $e_{\text{st,pnov}}$ i $e_{\text{sc,pnov}}$ siły podłużnej ściskającej N_{sd} względem osi ciężkości przekroju zbrojeń ściskanego A_{sc} i rozciąganego A_{st} , wyznaczamy na podstawie zależności

(5.64) i (5.65) wstawiając w nich $a_{\text{t,pnov}}$ i $a_{\text{s,pnov}}$ zamiast a_t i a_s . Przedstawiona niżej procedura obliczeniowa dotyczy wspólnie obu sposobów zbrojeń: niesymetrycznego i symetrycznego.

Postępowanie zgodne z zaleceniami zawartymi w normie [N1] wymaga sprawdzenia tzw. warunków nośności, czyli wyznaczenia obliczeniowej nośności przekroju na zginanie przy mimośrodowym ściskaniu (rys. 5.12)

$$M_{\text{RkI1}} = N_{\text{Rd}} e_{\text{st,pnov}} \quad (5.77)$$

lub

$$M_{\text{RkI2}} = N_{\text{Rd}} e_{\text{sc,pnov}} \quad (5.78)$$

i porównania jej z eksploatacyjnym obciążeniem obliczeniowym przekroju w postaci momentu wywołanego obliczeniową siłą mimośrodowo ściskającą (rys. 5.12)

$$M_{\text{SdI1}} = N_{\text{sd}} e_{\text{st,pnov}} \quad (5.79)$$

lub

$$M_{\text{SdI2}} = N_{\text{sd}} e_{\text{sc,pnov}} \quad (5.80)$$

W związku z tym najpierw wyznaczamy względną efektywną wysokość strefy ściskanej (z równania równowagi sił w przekroju)

$$\xi_{\text{ef}} = \frac{N_{\text{sd}} + f_{\text{td}} (A_{\text{st,pnov}} - A_{\text{sc,pnov}})}{f_{\text{cd}} b d_{\text{pnov}}} \quad (5.81)$$

Jeżeli $\xi_{\text{ef}} > \xi_{\text{ef,lim}}$, to dalsze obliczenia należy prowadzić jak dla przypadku małego mimośrodu (patrz podrozdział 5.3.4.3).

Jeżeli natomiast $2a_{\text{s,pnov}}/d_{\text{pnov}} \leq \xi_{\text{ef}} \leq \xi_{\text{ef,lim}}$, to nośność przekroju na zginanie przy mimośrodowym ściskaniu na dłużym mimośrodzie obliczamy ze wzoru (wynikającego z równania równowagi momentów zapisanego względem osi ciężkości przekroju zbrojenia rozciąganego)

$$M_{\text{RdI}} = f_{\text{cd}} b d_{\text{pnov}}^2 \xi_{\text{ef}} (1 - 0,5 \xi_{\text{ef}}) + f_{\text{td}} A_{\text{sc,pnov}} (d_{\text{pnov}} - a_{\text{s,pnov}}) \quad (5.82)$$

a stan graniczny nośności sprawdzamy z warunku

$$M_{\text{SdI}} \leq M_{\text{RdI}} \quad (5.83)$$

Jeśli zaś $\xi_{\text{crit}} < 2a_{2,\text{pnw}}/d_{\text{pnw}}$, to nośność wyznaczamy ze wzoru (wynikającego z równania równowagi momentów zapisanego względem osi ciężkości przekroju zbrojenia ścisłego, przy przyjęciu $\xi_{\text{tr}} = 2a_{2,\text{pnw}}/d_{\text{pnw}}$:

$$M_{\text{rd2}} = f_{\text{yd}} A_{\text{s1,pnw}} (d_{\text{pnw}} - a_{2,\text{pnw}}) \quad (5.84)$$

a stan graniczny nośności sprawdzamy według warunku

$$M_{\text{rd2}} \leq M_{\text{krd2}} \quad (5.85)$$

Alternatywny, tradycyjny 14j, sposób wyznaczania nośności wynika z oczywistego faktu, że w stanie równowagi granicznej siła podłużna N_{sd} obciążająca przekroj i siła N_{rd} stanowiąca reakcję przekroju na to obciążenie, muszą się znajdować na tym samym poziomie (rys. 5.12), a więc działają one na tym samym miodrodku $e_{\text{s1,pnw}}$ lub $e_{\text{s2,pnw}}$. W związku z tym sprawdzanie stanu granicznego nośności można sprowadzić do jednego (tylko warunku

$$N_{\text{sd}} \leq N_{\text{rd}} \quad (5.86)$$

w którym N_{sd} jest obliczeniową siłą podłużną obciążającą przekroj, a N_{rd} - obliczeniową nośnością przekroju z uwagi na siłę podłużną ścisłąjąca.

Przy takim podejściu względna efektywna wysokość strefy ścisłanej przekroju określamy z równania równowagi momentów zapisanego względem punktu O_N (rys. 5.12) przyłożenia siły podłużnej N_{sd} (także N_{rd}), jako

$$\xi_{\text{crit}} = (1 - k_e) + \sqrt{(1 - k_e)^2 + \frac{2 l_{\text{sd}} (A_{\text{s1,pnw}} e_{\text{s1,pnw}} \pm A_{\text{s2,pnw}} e_{\text{s2,pnw}})}{f_{\text{rd}} b d_{\text{pnw}}^2}} \quad (5.87)$$

gdzie:

$$k_e = e_{\text{s1,pnw}} / d_{\text{pnw}} \quad (5.88)$$

We wzorze (5.87) należy przyjmować w liczniku ulamka pod pierwiastkiem znak „plus”, gdy siła N_{sd} znajduje się pomiędzy osiami ciężkości przekrojów zbrojenia $A_{\text{s1,pnw}}$ i $A_{\text{s2,pnw}}$, to znaczy gdy $e_{\text{s1,pnw}} < d_{\text{pnw}} - a_{2,\text{pnw}}$, zaś w przeciwnym przypadku, to znaczy gdy $e_{\text{s1,pnw}} > d_{\text{pnw}} - a_{2,\text{pnw}}$, znak „minus”.

Obliczeniową nośność przekroju z uwagi na siłę podłużną określa się w tym sposobie następująco:

- dla przypadku gdy $2a_{2,\text{pnw}}/d_{\text{pnw}} \leq \xi_{\text{crit}} \leq \xi_{\text{crit,lim}}$ nośność η_e obliczamy z równania równowagi sił w przekroju jako

$$N_{\text{rd}} = f_{\text{td}} b d_{\text{pnw}} \xi_{\text{crit}} + f_{\text{yd}} (A_{\text{s2,pnw}} - A_{\text{s1,pnw}}) \quad (5.89)$$

- dla przypadku gdy $\xi_{\text{crit}} < 2a_{2,\text{pnw}}/d_{\text{pnw}}$, nośność η_e wyznaczamy z zależności

$$N_{\text{rd}} = \frac{M_{\text{rd2}}}{e_{\text{s2,pnw}}} \quad (5.90)$$

w której M_{rd2} wyraża się zależnością (5.84).

Przykład 5.9. Wymiarowanie niesymetrycznie zbrojonego przekroju prostokątnego w monolitycznym elemencie ścisłym na dużym miodrodku:

Dane: $M_{\text{sd}} = 240 \text{ kNm}$; $N_{\text{sd}} = 315 \text{ kN}$; $N_{\text{sd,lim}} = 200 \text{ kN}$; beton klasy B25; stal klasy A-II

Przyjęto: $\alpha_{\text{cc}} = 1.0$; $f_{\text{td}} = 13.3 \text{ MPa}$ oraz $f_{\text{ct,lim}} = 30 \text{ GPa}$ (z tabl. 3.2);

$f_{\text{yd}} = 310 \text{ MPa}$ (z tabl. 3.4); $F_s = 200 \text{ GPa}$; $\xi_{\text{crit,lim}} = 0.55$

(z tabl. 5.1); $b = 0.25 \text{ m}$; $h = 0.55 \text{ m}$; 2 pełne warstwy prętów

rozciąganych $\phi = 18 \text{ mm}$ i 1 warstwę prętów ścisłanych

$\phi = 14 \text{ mm}$ oraz szerzonioma $\phi_s = 6 \text{ mm}$; klasę ekspozycji XC2

(tabl. 2.3); $e_{\text{min}} = 20 \text{ mm}$ (tabl. 2.4); $\Delta e = 5 \text{ mm}$; $\phi(\sigma_s, \sigma_c) = 2.0$;

$l_0 = l_{\text{cat}} = 6.0 \text{ m}$, konstrukcję monolityczną o wylach nie-przesuwanych

Obliczamy kolejno:

- odległość osi ciężkości zbrojenia A_{s1} od rozciąganej krawędzi przekroju (rys. 5.2 i 5.12)

$$a_1 = e_{\text{min}} + \Delta e + \phi_s + \phi + 0.5 s_1 = 0.020 + 0.005 + 0.006 + 0.018 + 0.5 \cdot 0.020 = 0.059 \text{ m},$$

- odległość osi ciężkości zbrojenia A_{s2} od ścisłanej krawędzi przekroju

$$(rys. 5.2 i 5.12)$$

$$a_2 = e_{\text{min}} + \Delta e + \phi_s + 0.5 \phi = 0.020 + 0.005 + 0.006 + 0.5 \cdot 0.014 = 0.038 \text{ m},$$

- niezamierzony miodrodek przypadkowy

$$e_3 = \max(l_{\text{cat}}/600 = 6.0/600 = 0.01 \text{ m}; h/30 = 0.55/30 = 0.018 \text{ m}; 0.01 \text{ m}) = 0.018 \text{ m},$$

- miodrodek konstrukcyjny wg (5.54)

$$e_4 = M_{\text{sd}} / N_{\text{sd}} = 240/315 = 0.762 \text{ m},$$

- miodrodek początkowy wg (5.58)

$$e_0 = e_3 + e_4 = 0.762 + 0.018 = 0.78 \text{ m}.$$

Ponieważ smukłość elementu $\lambda = l_0/h = 6,0/0,55 = 10,91 > 7$, zatem musimy uwzględnić w obliczeniach wpływ tej smukłości. W tym celu najpierw sprawdzamy warunek (5.62)

$$e_0/h = 0,78/0,55 = 1,42 > 0,50 - 0,01 l_0/h - 0,01 f_{cd} = 0,50 - 0,01 \cdot 6,0/0,55 - 0,01 \cdot 13,3 = 0,26 > 0,05,$$

a następnie obliczamy:

$$- \text{współczynnik uwzględniający długość oraz obciążenia wg (5.63)}$$

$$k_{lit} = 1 + 0,5 \frac{N_{sdlit}}{N_{sdl}} \varphi(\infty, t_0) = 1 + 0,5 \cdot \frac{200}{315} \cdot 2,0 = 1,635,$$

- moment bezwładności przekroju betonu

$$I_c = b h^3 / 12 = 0,25 \cdot 0,55^3 / 12 = 0,003466 \text{ m}^4,$$

- moment bezwładności przekroju całej stali zbrojenkowej przyjmujemy w przybliżeniu jako

$$I_s \approx 0,03 I_c = 0,03 \cdot 0,003466 \text{ m}^4 = 0,000104 \text{ m}^4,$$

- siłę krytyczną wg (5.61)

$$N_{crit} = \frac{9}{l_0^2} \left[\frac{E_{cm} I_c}{2 k_{lit}} \left(\frac{0,11}{0,1 + \frac{e_0}{h}} + 0,1 \right) + E_s I_s \right] =$$

$$= \frac{9}{6,0^2} \left[\frac{30 \cdot 10^3 \cdot 0,003466}{2 \cdot 1,635} \left(\frac{0,11}{0,1 + \frac{0,78}{0,55}} + 0,1 \right) + 200 \cdot 10^6 \cdot 0,000104 \right] =$$

$$= 6570,94 \text{ kN},$$

- współczynnik zwiększający wg (5.60)

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N_{sdl}}{N_{crit}}} = \frac{1}{1 - \frac{315}{6570,94}} = 1,050,$$

- mimośród całkowity wg (5.59)

$$e_{tot} = \eta e_0 = 1,050 \cdot 0,78 = 0,819 \text{ m}.$$

Następnie obliczamy:

- wysokość użyteczną przekroju

$$d = h - a_1 = 0,55 - 0,059 = 0,491 \text{ m}.$$

- położenie osi ciężkości elementu

$$y_1 = y_2 = 0,5h = 0,5 \cdot 0,55 = 0,275 \text{ m},$$

- mimośrod y siły podłużnej wg (5.64) i (5.65)

$$e_{s1} = e_{tot} + y_1 - a_1 = 0,819 + 0,275 - 0,059 = 1,035 \text{ m},$$

$$e_{s2} = |e_{tot} - y_2 + a_2| = |0,819 - 0,275 + 0,038| = 0,582 \text{ m},$$

- pole przekroju zbrojenia ścisłego wg (5.66)

$$A_{s2} = \frac{N_{sdl} e_{s1} - f_{cd} b d^2 \xi_{critmin} (1 - 0,5 \xi_{critmin})}{f_{yd} (d - a_2)} =$$

$$= \frac{315 \cdot 1,035 - 13300 \cdot 0,25 \cdot 0,491^2 \cdot 0,55 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,55)}{310000 \cdot (0,491 - 0,038)} = 0,0000455 \text{ m}^2.$$

Przyjmujemy, stosownie do warunku (5.67), 2 pręty o średnicy 14 mm w I warstwie o łącznym polu przekroju $A_{s2,prov} = 2 \cdot \pi \cdot 0,014^2 / 4 = 0,000308 \text{ m}^2$

oraz $a_{2,prov} = a_2 = 0,038 \text{ m}^2$.

Ponieważ $A_{s2,prov} = 0,000308 \text{ m}^2 > A_{s2} = 0,0000441 \text{ m}^2$, strefa ścisłana przekroju nie będzie w pełni wykorzystana i w związku z tym obliczamy dalej:

$$- \text{współczynnik bezwymiarowy wg (5.69)}$$

$$N_{sdl} e_{s1} - f_{sd} A_{s2,prov} (d - a_{2,prov}) =$$

$$= \frac{315 \cdot 1,035 - 310000 \cdot 0,000308 \cdot (0,491 - 0,038)}{f_{cd} b d^2} = 0,353,$$

- względną efektywną wysokość strefy ścisłej przekroju wg (5.6)

$$\xi_{eff} = 1 - \sqrt{1 - 2 \xi_{crit}} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,353} = 0,458.$$

Ponieważ

$$2 a_{2,prov} / d = 2 \cdot 0,038 / 0,491 = 0,155 < \xi_{crit} = 0,458 < \xi_{critmin} = 0,55,$$

wycięcie pole przekroju zbrojenia rozciągającego obliczamy wg (5.70)

$$A_{s1} = \frac{f_{cd} b d \xi_{eff} + f_{sd} A_{s2,prov} - N_{sdl}}{f_{yd}} =$$

$$= \frac{13300 \cdot 0,25 \cdot 0,491 \cdot 0,458 + 310000 \cdot 0,000308 - 315}{310000} = 0,001704 \text{ m}^2.$$

Przyjmujemy, stosownie do warunku (5.72), 7 prętów o średnicy 18 mm ($f_h = 5$ prętów w pierwszej, dolnej warstwie i 2 pręty w warstwie drugiej) i łącznym polu przekroju $A_{s1,prov} = 7 \cdot \pi \cdot 0,018^2 / 4 = 0,001781 \text{ m}^2$. Odległość osi ciężkości przekroju tego zbrojenia od rozciąganej krawędzi przekroju,

wyznaczona wg wzoru (5.9), wynosi $a_{1,graw} = 0,051$ m, a wynikająca siła przyczyniasta wysokość użyteczna przekroju $d_{graw} = h - a_{1,graw} = 0,55 - 0,051 = 0,499$ m. Ponieważ $d_{graw} = 0,499$ m jest większe od przyjętego na wstępie $d = 0,491$ m, korekta obliczeń jest zbędna (patrz przykład 5.1).

Sprawdźmy, wg (5.73), czy pole przyjętego zbrojenia mieści się w granicach wyznaczonych przez normę [N1]:

$$0,04bh = 0,04 \cdot 0,25 \cdot 0,55 = 0,0055 \text{ m}^2 > A_{s,graw} + A_{s,graw} = 0,001781 + 0,000308 = 0,002089 \text{ m}^2 > A_{s,min} = \max(0,15 \frac{N_{sdl}}{f_{ctd}} = 0,15 \cdot \frac{315}{310000} = 0,000152 \text{ m}^2; 0,003bh = 0,003 \cdot 0,25 \cdot 0,55 = 0,000413 \text{ m}^2)$$

$$= 0,000413 \text{ m}^2)$$

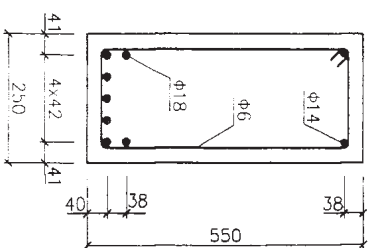
Obliczamy nową wartość momentu bezwładności dla całego przyjętego zbrojenia

$$I_{s,graw} = A_{s1,graw} (0,5h - a_{1,graw})^2 + A_{s2,graw} (0,5h - a_{2,graw})^2 = 0,001781 \cdot (0,5 \cdot 0,55 - 0,051)^2 + 0,000308 \cdot (0,5 \cdot 0,55 - 0,038)^2 = 0,0001067 \text{ m}^4$$

$$\text{Ponieważ } I_{s,graw} / I =$$

$$= 0,0001067 / 0,0001040 = 1,026 < 1,05$$

(błąd mniejszy od 5%, patrz podrozdział 5.3.3), nie zachodzi konieczność ponownego obliczania wartości siły krytycznej N_{crit} i korygowania całych obliczeń.



Rys. 5.13. Przekrój prostokątny niesymetrycznie zbrojonego elementu mimośrodowo ściskanego na duży mimośród, obliczony w przykładzie 5.9

Przykład 5.10. Wyznaczenie nośności i sprawdzenie warunku nośności dla niesymetrycznie zbrojonego przekroju prostokątnego w mono- i dwukierunkowym stanie ściskania na duży mimośród.

Obliczeniu przeprowadza się dla następujących danych z przykładu 5.9: $M_{sdl} = 240$ kNm; $N_{sdl} = 315$ kN; $N_{sdl} = 200$ kN; beton klasy B25; stal klasy A-II; $b = 0,25$ m; $h = 0,55$ m; $c_1 = 0,018$ m; $a_{1,graw} = 0,051$ m; $a_{2,graw} = 0,038$ m; $A_{s1,graw} = 0,001781 \text{ m}^2$; $A_{s2,graw} = 0,000308 \text{ m}^2$; $l_0 = l_{cd} = 6,0$ m, konstrukcja monolityczna o węzłach nieprzesuwanych.

Przyjęto: $\alpha_{cc} = 1,0$; $f_{cd} = 13,3$ MPa oraz $E_{cm} = 30$ GPa (z tabl. 3.2); $f_{td} = 310$ MPa (z tabl. 3.4); $E_s = 200$ GPa; $\xi_{crit,lim} = 0,55$ z tabl. 5.1); $\phi(\epsilon_s, l_0) = 2,0$.

Weding sposobu proponowanego przez normę [N1] obliczamy kolejno:

- mimośród konstrukcyjny wg (5.54)
 $e_c = M_{sdl} / N_{sdl} = 240 / 315 = 0,762$ m,

- mimośród początkowy wg (5.58)

$$e_0 = e_c + e_g = 0,762 + 0,018 = 0,78 \text{ m.}$$

Ponieważ słabość elementu $\lambda = l_0 / h = 6,0 / 0,55 = 10,91 > 7$, zatem musimy uwzględnić w obliczeniach wpływ tej słabości. W tym celu najpierw sprawdzamy warunek (5.62)

$$c_u / h = 0,78 / 0,55 = 1,42 > 0,50 - 0,01 l_0 / h = 0,01 f_{td} = 0,01 \cdot 310 = 0,31 < 0,50 - 0,01 \cdot 6,0 / 0,55 = 0,01 \cdot 13,3 = 0,26 > 0,05,$$

a następnie obliczamy: - współczynnik uwzględniający długotrwałość obciążenia wg (5.63)

$$k_{tr} = 1 + 0,5 \frac{N_{sdl}}{N_{sdl}} \phi(\epsilon_s, l_0) = 1 + 0,5 \cdot \frac{200}{315} \cdot 2,0 = 1,635,$$

- moment bezwładności przekroju betonu

$$I_c = bh^3 / 12 = 0,25 \cdot 0,55^3 / 12 = 0,003466 \text{ m}^4,$$

- moment bezwładności przekroju całej stali zbrojenowej

$$I_s = A_{s1,graw} (0,5h - a_{1,graw})^2 + A_{s2,graw} (0,5h - a_{2,graw})^2 = 0,001781 \cdot (0,5 \cdot 0,55 - 0,051)^2 + 0,000308 \cdot (0,5 \cdot 0,55 - 0,038)^2 = 0,0001067 \text{ m}^4,$$

- siłę krytyczną wg (5.61), która obliczona w sposób analogiczny jak w przykładzie 5.9, wynosi $N_{crit} = 6706,00$ kN.

- współczynnik zwiększający wg (5.60)

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{1}{N_{sdl}}} = \frac{1}{1 - \frac{315}{6706,00}} = 1,049,$$

- mimośród całkowity wg (5.59)

$$e_{ed} = \eta \cdot e_0 = 1,049 \cdot 0,78 = 0,818 \text{ m.}$$

Następnie obliczamy:

- wysokość użytkowa przekroju

$$d_{prow} = h - a_{1prow} = 0,55 - 0,051 = 0,499 \text{ m,}$$

- położenie osi ciężkości elementu

$$y_1 = y_2 = 0,5h = 0,5 \cdot 0,55 = 0,275 \text{ m,}$$

- mimośrod y siły podłużnej wg (5.64) i (5.65)

$$e_{s1prow} = e_{ed} + y_1 - a_{1prow} = 0,819 + 0,275 - 0,051 = 1,042 \text{ m,}$$

$$e_{s2prow} = |e_{ed} - y_2 + a_{2prow}| = |0,818 - 0,275 + 0,038| = 0,581 \text{ m,}$$

- względną efektywną wysokość strefy ściskanej wg (5.81)

$$\xi_{ed} = \frac{N_{sdl} + F_{vd} (A_{s1prow} - A_{s2prow})}{F_{ed} b d_{prow}} = \frac{315 + 310000 \cdot (0,001781 - 0,000308)}{13300 \cdot 0,25 \cdot 0,499} = 0,465$$

Ponieważ zachodzi przypadek 2 a₁prow / d_{prow} = 2 · 0,038 / 0,499 = 0,152 <

< ξ_{ed} = 0,465 < ξ_{ed,lim} = 0,55, to obliczeniową nośność przekroju na zginanie przy mimośrodowym ściskaniu na dużym mimośrodku obliczamy ze wzoru (5.82)

$$M_{kdl} = f_{cd} b d_{prow}^2 \xi_{ed} (1 - 0,5 \xi_{ed}) + f_{yd} A_{s2prow} (d_{prow} - a_{2prow}) = 13300 \cdot 0,25 \cdot 0,499^2 \cdot 0,465 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,465) + 310000 \cdot 0,000308 \cdot (0,499 - 0,038) = 339,59 \text{ kNm,}$$

a warunek nośności zapisujemy wg (5.79) i (5.83) jako

$$M_{kdl} = N_{sdl} e_{s1prow} = 315 \cdot 1,042 = 328,23 \text{ kNm} < M_{kdl} = 339,59 \text{ kNm,}$$

stwierdzając, że został spełniony.

Wielkości obliczeniowe [4] obliczamy kolejno:

- wielkości: e₀, e₀, e₀/h, k₀, l_e, l_e, N_{sdl}, η, e_{ed}, d_{prow}, e_{s1prow}, oraz e_{s2prow} - w sposób identyczny jak w przedstawionym wyżej sposobie, proponowanym przez normę [N1].

- współczynnik wg (5.88)

$$k_c = e_{s1prow} / d_{prow} = 1,042 / 0,499 = 2,088,$$

- względną efektywną wysokość strefy ściskanej wg (5.87), wstawiając znak „minus” pod pierwiastkiem gdyż e_{s1prow} = 1,042 m > d_{prow} - a_{2prow} = 0,499 - 0,038 = 0,461 m

$$\xi_{ed} = (1 - k_c) + \sqrt{(1 - k_c)^2 + \frac{2 f_{yd} (A_{s1prow} e_{s1prow} \pm A_{s2prow} e_{s2prow})}{F_{ed} b d_{prow}^2}} = (1 - 2,088) + \sqrt{(1 - 2,088)^2 + \frac{2 \cdot 310000 \cdot (0,001781 \cdot 1,042 - 0,000308 \cdot 0,581)}{13300 \cdot 0,25 \cdot 0,499^2}} = 0,474,$$

Ponieważ zachodzi przypadek 2 a₁prow / d_{prow} = 2 · 0,038 / 0,499 = 0,152 <

< ξ_{ed} = 0,474 < ξ_{ed,lim} = 0,55, to obliczeniową nośność przekroju z uwagi na siłę podłużną ściskającą obliczamy ze wzoru (5.89)

$$N_{kdl} = f_{cd} b d_{prow} \xi_{ed} + f_{yd} (A_{s2prow} - A_{s1prow}) = 13300 \cdot 0,25 \cdot 0,499 \cdot 0,474 + 310000 \cdot (0,000308 - 0,001781) = 329,82 \text{ kN,}$$

a warunek nośności zapisujemy wg (5.86) jako

$$N_{kdl} = 315 \text{ kN} < N_{kdl} = 329,82 \text{ kN, stwierdzając, że został spełniony.}$$

Przykład 5.11. Wymiarowanie symetrycznie zbrojonego przekroju prostokątnego w monolitycznym elemencie ściskany na dużym mimośrodku.

Dane: M_{sdl} = 300 kNm; N_{sdl} = 350 kN; beton klasy B20; stal klasy A-II

Przyjęto: α_{cc} = 1,0; f_{cd} = 10,6 MPa (z tabl. 3.2); f_{yd} = 310 MPa

(z tabl. 3.4); ξ_{ed,lim} = 0,55 (z tabl. 5.1); b = 0,25 m; h = 0,55 m;

2 pełne warstwy prętów rozciąganych i ściskanych φ = 18 mm

oraz strzemiąca φ_s = 6 mm; klasę ekspozycji XC1 (tabl. 2.3);

e_{0,im} = φ = 18 mm (tabl. 2.4); Δc = 7 mm; l₀ · l_{sd} = 3,5 m,

konstrukcję monolityczną o węzłach nieprzesuwanych

Obliczamy kolejno:

- odległość osi ciężkości przekrojów zbrojeń A_{s1} i A_{s2} od najbliższych krawędzi przekroju (rys. 5.2 i 5.12)

$$a_1 = a_2 = e_{0,im} + \Delta c + \phi_s + \phi + 0,5s_1 = 0,018 + 0,007 + 0,006 + 0,018 + 0,5 \cdot 0,020 = 0,059 \text{ m,}$$

- niezamierzony mimośród przyładkowy

$$e_d = \max(l_{sd} / 600 = 3,5 / 600 = 0,0058 \text{ m}; h / 30 = 0,55 / 30 = 0,018 \text{ m}; 0,01 \text{ m}) = 0,018 \text{ m.}$$

- mimośród konstrukcyjny wg (5.54)
 $e_c = M_{sd} / N_{sd} = 300/350 = 0,857$ m,
 - mimośród początkowy wg (5.58)
 $e_0 = e_c + e_a = 0,857 + 0,018 = 0,875$ m.
- Ponieważ smukłość elementu $\lambda = l_0 / h = 3,5 / 0,55 = 6,36 < 7$, zatem nie musimy uwzględniać wpływu tej smukłości w obliczeniach. Przyjmujemy więc $\eta = 1,0$ i obliczamy dalej:

- mimośród całkowity wg (5.59)
 $e_{tot} = \eta e_0 = 1,0 \cdot 0,875 = 0,875$ m,
 - wysokość użyteczną przekroju
 $d = h - a_1 = 0,55 - 0,059 = 0,491$ m,
 - położenie osi ciężkości elementu
 $y_1 = y_2 = 0,5 \cdot h = 0,5 \cdot 0,55 = 0,275$ m,
 - mimośrodowy siły podłużnej wg (5.64) i (5.65)
 $e_{s1} = e_{tot} + y_1 - a_1 = 0,875 + 0,275 - 0,059 = 1,091$ m,
 $e_{s2} = |e_{tot} - y_2 + a_2| = |0,875 - 0,275 + 0,059| = 0,659$ m,
- względną efektywną wysokość strępy ściskanej wg (5.74)

$$\xi_{crit} = \frac{N_{sd}}{f_{rd} b d} = \frac{350}{10600 \cdot 0,25 \cdot 0,491} = 0,269.$$

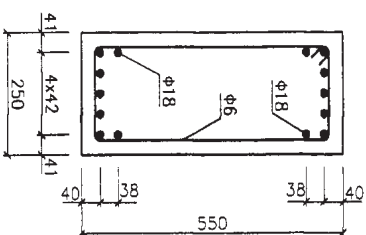
Ponieważ $2a_2 / d = 2 \cdot 0,059 / 0,491 = 0,240 < \xi_{crit} = 0,269 < \xi_{crit,max} = 0,55$, więc pola przekrojów zbrojeń obliczamy wg (5.75)

$$A_{s1} = A_{s2} = \frac{N_{sd} e_{s1} - f_{ctd} b d^2 \xi_{crit} (1 - 0,5 \xi_{crit})}{f_{yd} (d - a_2)} =$$

$$= \frac{350 \cdot 1,091 - 10600 \cdot 0,25 \cdot 0,491^2 \cdot 0,269 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,269)}{310000 \cdot (0,491 - 0,059)} = 0,001741 \text{ m}^2.$$

Przyjmujemy po obu stronach przekroju, stosownie do warunku (5.72), 7 prętów o średnicy 18 mm ($n_1 = 5$ prętów w pierwszej warstwie oraz $n_2 = 2$ pręty w warstwie drugiej) i łącznym polu przekroju $A_{s1,prov} = A_{s2,prov} = 7 \cdot \pi \cdot 0,018^2 / 4 = 0,001781 \text{ m}^2$.

Odległość osi ciężkości przekrojów zbrojeń od najbliższych krawędzi przekroju elementu, wyznaczona wg wzoru (5.9), wynosi $a_{1,prov} = a_{2,prov} = 0,051$ m, a wynikająca stąd rzeczywista wysokość użyteczna przekroju $d_{prov} = h - a_{1,prov} = 0,55 - 0,051 = 0,499$ m.



Rys. 5.14. Przekrój prostokątny symetrycznie zbrojony elementu mimośrodowo ściskanego na dużym mimośrodku, obliczony w przykładzie 5.11

Ponieważ $d_{prov} = 0,499$ m jest większe od przyjętego na wstępie $d = 0,491$ m, korekta obliczeń jest zbędna (patrz przykład 5.1).

Sprawdzamy, wg (5.73), czy pole przyjętego zbrojenia mieści się w granicach wyznaczonych przez normę [N1]:

$$0,04bh = 0,04 \cdot 0,25 \cdot 0,55 = 0,0055 \text{ m}^2 > A_{s1,prov} + A_{s2,prov} = 0,001781 + 0,001781 = 0,003562 \text{ m}^2 > A_{s,min} = \max(0,15 \frac{N_{sd}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{350}{310000} = 0,0001694 \text{ m}^2; 0,003bh = 0,003 \cdot 0,25 \cdot 0,55 = 0,0004125 \text{ m}^2) = 0,0004125 \text{ m}^2.$$

Uwaga: W przykładzie 5.11 nie podano sposobu wyznaczania nośności przekroju zwympiarowanego i sprawdzania warunku nośności, gdyż sposób ten jest identyczny z przedstawionym w przykładzie 5.10.

5.3.4. Przekrój prostokątny mimośrodowo ściskany – mały mimośród

Schemat obliczeniowy przekroju przedstawiono na rys. 5.15.

Do procedury obliczeń dotyczącej przypadku małego mimośrodu wprowadzono w normie [N1] współczynnik K_s sterujący naprężeniami σ_{s1} w zbrojeniu A_{s1} , rozciągającym lub mniej ściskającym (rys. 5.15 b, c) wg zależności

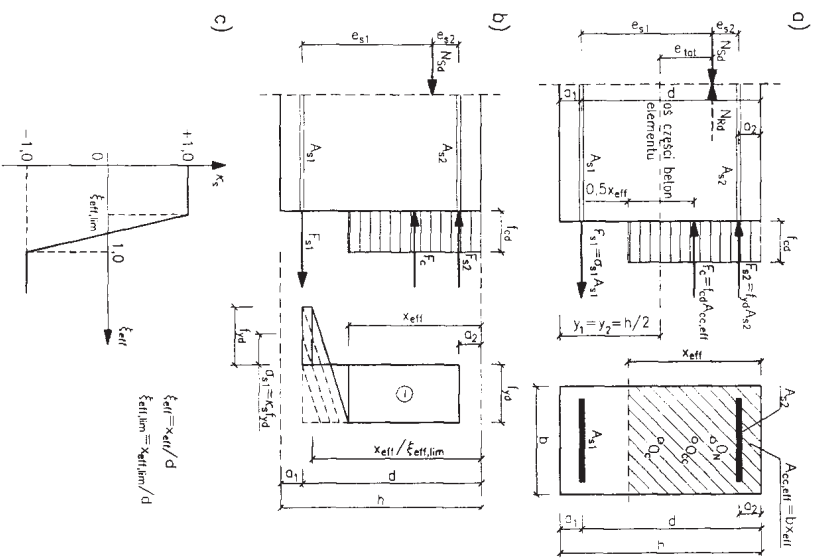
$$\sigma_s = K_s \cdot f_{yd} \quad (5.91)$$

Współczynnik K_s wyrażony równaniem (5.3), którego wykres pokazano na rys. 5.15c, zależy od względnej efektywnej wysokości ξ_{eff} strefy ściskanej przekroju co – jak wykazały badania eksperymentalne – jest zgodne z rzeczywistym rozkładem sił, jaki ma miejsce w chwili wyczerpania nośności przekroju ściskanego z małym mimośrodem. Zniszczenie takiego przekroju zaczyna się bowiem zawsze od strony zbrojenia ściskanego o polu przekroju A_{s2} . Naprężenia σ_{s1} występujące w zbrojeniu o polu przekroju A_{s1} przy $\xi_{\text{eff}} = \xi_{\text{eff,lim}}$, osiągają wartość graniczną $\sigma_{s1} = f_{yd}$, natomiast gdy ξ_{eff} przekracza wartość graniczną $\xi_{\text{eff,lim}}$, następuje nagły stopniowy spadek wartości naprężeń rozciągających, a następnie – po osiągnięciu wartości ξ_{eff} , przy której naprężenia σ_{s1} są równe zeru – stopniowy wzrost naprężeń ściskających do wartości $\sigma_{s1} = -f_{yd}$, przy $\xi_{\text{eff}} = 1$ (patrz rys. 5.15c).

Jak wynika ze wzoru (5.3) w przypadku małego mimośrodu rozróżnia się trzy jego odmiany:

- odmiana I** – gdy $\xi_{\text{eff,lim}} < \xi_{\text{eff}} < 1$ to znaczy w przekroju występuje mała strefa rozciągana,
- odmiana II** – gdy $1 \leq \xi_{\text{eff}} \leq h/d$ to znaczy cały przekrój użyteczny (o wysokości d) lub rzeczywisty (o wysokości h) jest nierównomiernie ściskany,
- odmiana III** – gdy $\xi_{\text{eff}} > h/d$ to znaczy cały przekrój jest równomiernie ściskany.

W przekroju mimośrodowo ściskanim na małym mimośrodu najczęściej przyjmuje się minimalną ilość zbrojenia rozciągającego lub mniej ściskającego, w związku z czym w powyższych odmianach występuje d_{min} zamiast d (patrz podrozdział 5.3.4.1).



Rys. 5.15. Oznaczenia wielkości geometrycznych, sił i naprężeń w przekroju żelbetowym prostokątnym mimośrodowo ściskanim w przypadku małego mimośrodu: a) układ granicznych sił wewnętrznych i naprężeń w betonie strefy ściskanej; b) rozkład naprężeń σ_s w całym stali zbrojenowej znajdujący się w przekroju wynikający z założeń 5.1e i 5.1f; c) wykres funkcji $K_s = f(\xi_{\text{eff}})$ współczynnika sterującego naprężeniami σ_{s1} w stali rozciąganej lub mniej ściskanej, wg zależności (5.3)

W obliczeniach dotyczących przypadku małego mimośrodowo zawsze na wstępie zakłada się istnienie odmianny I, gdyż na podstawie wartości mimośrodowo ϵ_{s1} siły podłużnej N_{s1} wytypowanie prawidłowej odmianny mimośrodowego ściskania jest praktycznie niemożliwe.

W przekroju żelbetowym prostokątnym mimośrodowo ściskany na małym mimośrodku (rys. 5.15) przedstawione równania równowagi, sprwadzone do postaci bezwymiarowej, przedstawiają się następująco:

– równanie równowagi momentów względem osi ciężkości przekroju zbrojenia A_{s1} :

$$\xi_{\text{ef}} \left(1 - 0,5 \xi_{\text{ef}} \right) + \frac{f_{yd} A_{s2} \left(1 - \frac{a_2}{d} \right)}{f_{cd} b d} - \frac{N_{s1} \epsilon_{s1}}{f_{cd} b d^2} = 0 \quad (5.92)$$

– równanie równowagi momentów względem osi ciężkości przekroju zbrojenia A_{s2} :

$$-\xi_{\text{ef}} \left(0,5 \xi_{\text{ef}} - \frac{a_2}{d} \right) + k_s \frac{f_{yd} A_{s1} \left(1 - \frac{a_2}{d} \right)}{f_{cd} b d} + \frac{N_{s1} \epsilon_{s2}}{f_{cd} b d^2} = 0 \quad (5.93)$$

– równanie równowagi sił w przekroju:

$$-\xi_{\text{ef}} + \frac{1}{f_{cd} b d} \left(k_s f_{yd} A_{s1} - f_{yd} A_{s2} + N_{s1} \right) = 0 \quad (5.94)$$

Mimośród ϵ_{s1} występujący w równaniu (5.92) wyznacza się z zależności (5.64), a mimośród ϵ_{s2} występujący w równaniu (5.93) z zależności (5.65).

5.3.4.1. Wymiarowanie zbrojenia niesymetrycznego

Przypadek małego mimośrodu wyłania się z obliczeń rozpoczynanych zawsze na wstępie jak dla przypadku dużego mimośrodu, gdy otrzymamy z nich $A_{s1} < 0$ lub $\xi_{\text{ef}} > \xi_{\text{ef,lim}}$ (podrozdział 5.3.3.1). W przypadku tym, najpierw przyjmujemy, że pole przekroju zbrojenia rozciągającego lub mniej ściskanego A_{s1} jest równe minimalnej wartości $A_{s1,\text{min}}$, którą proponuje się przyjmować jako równą połowie minimalnego przekroju $A_{s,\text{min}}$ wymaganego przez normę [N1], czyli

$$A_{s1} = A_{s1,\text{min}} = \max \left(0,075 \frac{N_{s1}}{f_{yd}}; 0,0015 b h \right) \quad (5.95)$$

Po doborze prętów zbrojeniowych o polu przekroju $A_{s1,\text{prov}} \geq A_{s1}$ wyznaczamy $a_{1,\text{prov}}$ (jak w podrozdziale 5.2.1), $d_{\text{prov}} = h - a_{1,\text{prov}}$ oraz $\epsilon_{s1,\text{prov}}$ wg (5.64).

Następnie, z równania (5.93) – po założeniu istnienia odmianny I i podstawieniu w nim k_s wg (5.3) dla tej odmianny oraz wielkości: $A_{s1,\text{prov}}$, $a_{1,\text{prov}}$ oraz d_{prov} zamiast A_{s1} , a_1 oraz d – otrzymujemy następujący wzór określający względną efektywną wysokość strefy ściskanej przekroju

$$\xi_{\text{ef}} = P + \sqrt{P^2 + \frac{2 \left[N_{s1} \epsilon_{s2} \left(1 - \xi_{\text{ef,lim}} \right) + f_{yd} A_{s1,\text{prov}} \left(\frac{d_{\text{prov}} - a_2}{d} \right) \left(1 + \xi_{\text{ef,lim}} \right) \right]}{d_{\text{prov}}^2 \left(1 - \xi_{\text{ef,lim}} \right)}} f_{cd} b \quad (5.96)$$

w którym

$$P = k_a - \frac{2 f_{yd} A_{s1,\text{prov}} \left(\frac{d_{\text{prov}} - a_2}{d} \right)}{f_{cd} b d_{\text{prov}}^2 \left(1 - \xi_{\text{ef,lim}} \right)} \quad (5.97)$$

$$k_a = a_2 / d_{\text{prov}} \quad (5.98)$$

Kolejną czynnością – po obliczeniu wartości k_s wg (5.3) dla odmianny I – jest przeprowadzenie analizy wartości ξ_{ef} otrzymanej ze wzoru (5.96).

Jeżeli $\xi_{\text{ef,lim}} < \xi_{\text{ef}} < 1$, to mamy rzeczywście do czynienia z założoną na wstępie odmianną I mimośroduowego ściskania na małym mimośrodku i pole przekroju zbrojenia bardziej ściskanego wyznaczamy z równania (5.94) jako

$$A_{s2} = - \frac{\xi_{\text{ef}} f_{cd} b d_{\text{prov}}}{f_{yd}} + k_s A_{s1,\text{prov}} + \frac{N_{s1}}{f_{yd}} \quad (5.99)$$

Jeżeli $1 \leq \xi_{\text{ef}} \leq h / d_{\text{prov}}$, to mamy do czynienia z odmianną II mimośroduowego ściskania na małym mimośrodku i wtedy ponownie określamy względną efektywną wysokość strefy ściskanej przekroju z równania (5.93) przy przyjęciu w nim $k_s = -1$ otrzymując następujący wzór:

$$\xi_{\text{ef}} = k_a + \sqrt{k_a^2 + \frac{2 \left[N_{s1} \epsilon_{s2} - f_{yd} A_{s1,\text{prov}} \left(\frac{d_{\text{prov}} - a_2}{d} \right) \right]}{f_{cd} b d_{\text{prov}}^2}} \quad (5.100)$$

w którym k_s wyznacza się ze wzoru (5.98). Pole A_{s2} przekroju zbrojenia bardziej ścisiskanego obliczamy ze wzoru (5.99), przyjmując w nim $k_s = -1$.

Jeżeli natomiast $\xi_{\text{ef}} > h/d_{\text{prow}}$, to zaadoptuj odmianną III minimalnego ścisiskania na małym minimalnym i wtedy pole przekroju zbrojenia mniej ścisiskanego wyznaczamy ponownie z równania (5.93) – po przyjęciu w nim $k_s = -1$ oraz $\xi_{\text{ef}} = h/d_{\text{prow}}$ – jako

$$A_{s1} = \frac{N_{\text{sl}} e_{s2} + f_{\text{cd}} b h (0,5h - a_2)}{f_{\text{yd}} (d_{\text{prow}} - a_2)} \quad (5.101)$$

Po dobraniu prętów zbrojeniovych o polu przekroju $A_{s1,\text{prow}}$ ustalamy nowe wartości $a_{1,\text{prow}}$ oraz d_{prow} i pole A_{s2} przekroju zbrojenia bardziej ścisiskanego wyznaczamy z zależności (5.99) z uwzględnieniem $k_s = -1$.

Dobór i rozmieszczenie w przekroju żelbetowym prętów zbrojeniovych o polu przekroju $A_{s2,\text{prow}}$, a także wyznaczanie $a_{2,\text{prow}}$ odbywa się z zachowaniem wymagań normy [N1], w sposób opisany w podrozdziale 5.3.3.1.

5.3.4.2. Wymiarowanie zbrojenia symetrycznego

Przy stosowaniu zbrojenia symetrycznego, czyli $A_{s1} = A_{s2}$ oraz $a_1 = a_2$, które znajduje szczególne uzasadnienie w przypadku ścisiskania na małym minimalnym, nie ma potrzeby rozróżniania odmiann II i III.

Względna efektywną wysokość ξ_{ef} strefy ścisiskanej przekroju określamy tu z równania (5.94), podstawiając w nim pole A_{s2} wyznaczone z równania (5.92) oraz uwzględniając, że $A_{s1} = A_{s2}$. Otrzymujemy w ten sposób następujące równanie trzeciego stopnia z niewiadomą ξ_{ef} :

$$\xi_{\text{ef}}^3 - (2 + \xi_{\text{ef,lim}}) \xi_{\text{ef}}^2 + \left[(1 + \xi_{\text{ef,lim}}) - \frac{a_2}{d} (1 - \xi_{\text{ef,lim}}) \right] + B \xi_{\text{ef}} - B \xi_{\text{ef,lim}} - C (1 - \xi_{\text{ef,lim}}) = 0 \quad (5.102)$$

w którym

$$B = \frac{2 N_{\text{sl}} e_{s1}}{f_{\text{cd}} b d^2} \quad (5.103)$$

$$C = \frac{N_{\text{sl}} (d - a_2)}{f_{\text{cd}} b d^2} \quad (5.104)$$

Realny i akceptowalny pierwiastek ξ_{ef} równania (5.102) najłatwiej i najszybciej można otrzymać metodą prób za pomocą kalkulatora. Po uzyskaniu ξ_{ef} przeprowadzamy analizę jego wartości.

Jeżeli $\xi_{\text{ef}} \leq \xi_{\text{ef,lim}}$, to wymiarowanie zbrojenia należy przeprowadzić jak dla przekroju dłuższego minimalności (podrozdział 5.3.3.1).

Jeżeli $\xi_{\text{ef,lim}} < \xi_{\text{ef}} < 1$, to pole przekroju zbrojenia symetrycznego obliczamy z równania (5.92) jako

$$A_{s1} = A_{s2} = \frac{N_{\text{sl}} e_{s1} - f_{\text{cd}} b d^2 \xi_{\text{ef}} (1 - 0,5 \xi_{\text{ef}})}{f_{\text{yd}} (d - a_2)} \quad (5.105)$$

Jeżeli natomiast $\xi_{\text{ef}} \geq 1$, to strefa ścisiskana obejmuje co najmniej cały przekrój użyteczny o wysokości d , a obie siły wypadkowe w zbrojeniach o polu przekroju A_{s1} i A_{s2} są jednakowe i ścisiskające. Wynika stąd, że spowodowane tymi siłami momenty zginające – zapisane względem prostej przechodzącej przez środek O_c ciężkości przekroju betonowego (rys. 5.15a) równoległe do osi obrotowej – równoważą się (ich suma jest równa zeru). W związku z tym – po przyjęciu dla uproszczenia, że cały przekrój rzeczywiście (o wysokości h) jest ścisiskany – równanie równowagi momentów zapisane względem ww. prostej przybiera postać:

$$N_{\text{sl}} e_{\text{im}} - f_{\text{cd}} b d^2 \xi_{\text{ef}} \left(0,5 \frac{h}{d} - 0,5 \xi_{\text{ef}} \right) = 0 \quad (5.106)$$

Akceptowalnym pierwiastkiem kwadratowego równania (5.106) jest

$$\xi_{\text{ef}} = \frac{h}{2d} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{8 N_{\text{sl}} e_{\text{im}}}{f_{\text{cd}} b h^2}} \right) \quad (5.107)$$

Jeżeli we wzorze (5.107) wyrażenie pod pierwiastkiem drugiego stopnia okaże się mniejsze od zera albo też $\xi_{\text{ef}} > h/d$, to oznacza to, że nie można wymiarować przekroju prostokątnego jako symetrycznie zbrojonego. W przeciwnym przypadku pola przekrojów zbrojenia symetrycznego oblicza się z równania (5.94) przy przyjęciu $k_s = -1$ – jako

$$A_{s1} = A_{s2} = \frac{N_{scl} - f_{yd} b d \xi_{ef}}{2 f_{yd}} \quad (5.108)$$

Dobór i rozmieszczenie prętów zbrojeniowych o polach przekroju $A_{s1,prov}$ i $A_{s2,prov}$ oraz wyznaczanie $a_{1,prov}$, $a_{2,prov}$ i d_{prov} odbywa się wg zasad przedstawionych w podrozdziale 5.3.4.1 dla zbrojenia niesymetrycznego.

5.3.4.3. Nośność przekroju

Nośność wyznaczamy zwykle dla przekroju istniejącego (lub tuż po jego zaprojektowaniu, gdy $d_{prov} < d$), o znanych parametrach geometryczno-wytrzymałościowych (patrz podrozdział 5.3.3.3 oraz rys. 5.15, przy uwzględnieniu w nim $a_{1,prov}$, $a_{2,prov}$, d_{prov} , $\epsilon_{s1,prov}$, $\epsilon_{s2,prov}$, $A_{s1,prov}$ oraz $A_{s2,prov}$ zamiast a_1 , a_2 , d , ϵ_{s1} , ϵ_{s2} , A_{s1} oraz A_{s2}).

Postępowanie zgodne z zaleceniami zawartymi w normie [N1] wymaga sprawdzenia tzw. warunku nośności, czyli wyznaczenia obliczeniowej nośności M_{kai} przekroju na zginanie przy mimośrodowym ściskaniu na małym mimośrodku (rys. 5.15a), według zależności (5.77) i porównania jej z obliczeniowym obciążeniem przekroju w postaci momentu M_{sni} spowodowanego obciążeniową siłą podłużną ściskającą (rys. 5.15a), według zależności (5.79).

Przed wyznaczeniem nośności M_{kai} wstępnie przyjmujemy istnienie odmianny I i określamy względną efektywną wysokość przekroju z równania (5.94), po wstawieniu w nim k_s wg (5.3) dla tej odmianny:

$$\xi_{ef} = \frac{(N_{scl} - f_{yd} A_{s1,prov} - f_{yd} A_{s2,prov}) (1 - \xi_{ef,lim}) + 2 f_{yd} A_{s1,prov}}{f_{cd} b d_{prov} (1 - \xi_{ef,lim}) + 2 f_{yd} A_{s1,prov}} \quad (5.109)$$

a następnie dokonujemy analizy otrzymanej wartości ξ_{ef} .

Jeżeli $\xi_{ef} \leq \xi_{ef,lim}$, to dalsze obliczenia należy prowadzić jak dla przypadku dużej mimośrodku (patrz podrozdział 5.3.3.3).

Jeżeli natomiast $\xi_{ef,lim} < \xi_{ef} < 1$, to mamy rzeczywiście do czynienia z odmianną I mimośrodowego ściskania na małym mimośrodku i nośność M_{kai} obliczamy z równania równowagi momentów zapisanego względem osi ciężkości przekroju zbrojenia A_{s1} (rys. 5.15):

$$M_{kai} = f_{cd} b d_{prov}^2 \xi_{ef} (1 - 0.5 \xi_{ef}) + f_{yd} A_{s2,prov} (d_{prov} - a_{2,prov}) \quad (5.110)$$

a stan graniczny nośności sprawdzamy z warunku (5.83), przy uwzględnieniu (5.79).

Jeżeli $1 \leq \xi_{ef} \leq h/d_{prov}$, to mamy do czynienia z odmianną II mimośrodowego ściskania na małym mimośrodku. Wtedy powtornie określamy względną efektywną wysokość strefy ściskanej z równania (5.94), uwzględniając w nim $k_s = -1$ oraz $A_{s1,prov}$ i $A_{s2,prov}$ zamiast A_{s1} i A_{s2} w efekcie czego otrzymujemy następujący wzór:

$$\xi_{ef} = \frac{N_{scl} - f_{yd} (A_{s1,prov} + A_{s2,prov})}{f_{cd} b d_{prov}} \quad (5.111)$$

Nośność M_{kai} przekroju określamy w tym przypadku również ze wzoru (5.110), a stan graniczny nośności sprawdzamy z warunku (5.83), przy uwzględnieniu (5.79).

Jeśli natomiast $\xi_{ef} > h/d_{prov}$, to zachodzi odmianna III mimośrodowego ściskania na małym mimośrodku, co oznacza, że sprawdzany przekrój nie jest w stanie przemieścić obliczeniowej siły N_{scl} .

W alternatywnym, tradycyjnym sposobie [4] sprawdzanie stanu granicznego nośności, z identycznych względów co wymienione w podrozdziale 5.3.3.3, można również sprowadzić do jednego (tylko) warunku, wyrażonego nierównością (5.86). Najpierw wstępnie zakładamy występowanie odmianny I i, po uwzględnieniu k_s dla tej odmianny, względną efektywną wysokość strefy ściskanej przekroju, podobnie jak w podrozdziale 5.3.3.3, określamy tu z równania równowagi momentów zapisanego względem punktu O_n (rys. 5.15a) przyłożenia siły podłużnej N_{scl} (także N_{kcl}), jako

$$\xi_{ef} = R + \sqrt{R^2 + R^* - \frac{2 f_{yd} (A_{s1,prov} \epsilon_{s1,prov} - A_{s2,prov} \epsilon_{s2,prov})}{f_{cd} b d_{prov}^2}} \quad (5.112)$$

gdzie:

$$R = \frac{a_n}{d_{prov}} - \frac{R^*}{2} \quad (5.113)$$

$$a_n = \epsilon_{s2,prov} + a_{2,prov} \quad (5.114)$$

$$R^* = \frac{4 f_{yd} A_{s1,prov} \epsilon_{s1,prov}}{(1 - \xi_{ef,lim}) f_{cd} b d_{prov}^2} \quad (5.115)$$

Nośność $N_{k,d}$ przekroju z uwagi na siłę podłużną ściskającą na małym mimośrodzie – czyli prawą stronę warunku (5.86) – określamy z równania równowagi sił w przekroju w zależności od wartości ξ_{gr} otrzymanej ze wzoru (5.112).

Jeżeli $\xi_{gr,lim} < \xi_{gr} < 1$, to rzeczywiście zachodzi odmiana I mimośrodowego ściskania na małym mimośrodku i nośność przekroju z uwagi na siłę podłużną ściskającą – po obliczeniu κ_s ze wzoru (5.3) dla tej odmiany – wyznaczamy z następującej zależności:

$$N_{k,d} = f_{cd} b d_{pov} \xi_{gr} + f_{yd} (A_{s2,pov} - \kappa_s A_{s1,pov}) \quad (5.116)$$

Jeżeli natomiast $1 \leq \xi_{gr} \leq h/d_{pov}$, to mamy do czynienia z odmianą II mimośrodowego ściskania na małym mimośrodku. Przyjmujemy zatem $\kappa_s = -1$ i ponownie określamy względną efektywną wysokość strefy ściskanej przekroju z następującej zależności (otrzymanej z równania równowagi momentów zapisanego względem prostej równoległej do osi obojętnej i przechodzącej przez punkt O_N przyłożenia siły podłużnej $N_{k,d}$ (także $N_{k,d}$) (rys. 5.15a):

$$\xi_{gr} = k_{an} + \sqrt{k_{an}^2 + \frac{2 f_{yd} (A_{s1,pov} e_{s1,pov} - A_{s2,pov} e_{s2,pov})}{f_{cd} b d_{pov}^2}} \quad (5.117)$$

w której a_n jest określane wg (5.114), zaś

$$k_{an} = a_n / d_{pov} \quad (5.118)$$

Nośność $N_{k,d}$ przekroju określamy w tym przypadku również ze wzoru (5.116) przy przyjęciu $\kappa_s = -1$. Stan graniczny nośności we wszystkich wyżej wymienionych przypadkach sprawdzamy z warunku (5.86).

Gdyby jednak okazało się, że $\xi_{gr} > h/d_{pov}$, to oznacza to, że zachodzi odmiana III mimośrodowego ściskania na małym mimośrodku, a sprawdzany przekrój nie jest w stanie przenieść obciążeniowej siły podłużnej $N_{k,d}$.

Przykład 5.12.

Wymiarowanie niesymetrycznie zbrojonego przekroju prostokątnego w monolitycznym elemencie ściskanym na małym mimośrodku:

Dane: $M_{k,d} = 150$ kNm; $N_{k,d} = 2500$ kN; beton klasy B30; stal klasy A-III.

Przyjęto: $\alpha_{sc} = 1,0$; $f_{td} = 16,7$ MPa (z tabl. 3.2); $f_{td} = 350$ MPa

(z tabl. 3.4); $\xi_{gr,lim} = 0,53$ (z tabl. 5.1); $b = 0,3$ m; $h = 0,5$ m;

I warstwą prętów ściskanych $\phi = 20$ mm i I warstwą prętów rozciąganych (lub mniej ściskanych) $\phi = 16$ mm oraz

strzemiona $\phi_s = 6$ mm; klasę ekspozycji XC3 (tabl. 2.3);

$c_{min} = \phi = 20$ mm (z tabl. 2.4); $\Delta c = 7$ mm; $\phi(\infty, l_0) = 2,0$;

$l_0 = l_{cal} = 3,2$ m; konstrukcję monolityczną o wężłach nieprzesuwanych

Obliczamy kolejno:

– odległość osi ciężkości zbrojenia A_{s1} od rozciąganej (lub mniej ściskanej) krawędzi przekroju (rys. 5.2 i 5.15)

$$a_1 = c_{min} + \Delta c + \phi_s + 0,5\phi = 0,020 + 0,007 + 0,006 + 0,5 \cdot 0,016 = 0,041$$
 m,

– odległość osi ciężkości zbrojenia A_{s2} od ściskanej krawędzi przekroju (rys. 5.2 i 5.15)

$$a_2 = c_{min} + \Delta c + \phi_s + 0,5\phi = 0,020 + 0,007 + 0,006 + 0,5 \cdot 0,020 = 0,043$$
 m,

– niezamierzony mimośród przyrządkowy

$$e_2 = \max(l_{cal} / 600 = 3,2 / 600 = 0,005 \text{ m}; h / 30 = 0,5 / 30 = 0,017 \text{ m}; 0,01 \text{ m}) = 0,017 \text{ m},$$

– mimośród konstrukcyjny wg (5.54)

$$e_s = M_{k,d} / N_{k,d} = 150 / 2500 = 0,06 \text{ m},$$

– mimośród początkowy wg (5.58)

$$e_0 = e_s + e_2 = 0,06 + 0,017 = 0,077 \text{ m}.$$

Ponieważ smukłość elementu $\lambda = l_0 / h = 3,2 / 0,50 = 6,4 < 7$, zatem nie musimy uwzględnić w obliczeniach wpływu tej smukłości. W związku tym przyjmujemy $\eta = 1,0$ i obliczamy dalej:

– mimośród całkowity wg (5.59)

$$e_{cal} = \eta e_0 = 1,0 \cdot 0,077 = 0,077 \text{ m},$$

– wysokość użyteczną przekroju

$$d = h - a_1 = 0,5 - 0,041 = 0,459 \text{ m},$$

– położenie osi ciężkości elementu

$$y_1 = y_2 = 0,5h = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ m},$$

– mimośrody siły podłużnej wg (5.64) i (5.65)

$$e_{y1} = e_{cal} + y_1 - a_1 = 0,077 + 0,25 - 0,041 = 0,286 \text{ m},$$

$$e_{y2} = |e_{cal} - y_2 + a_2| = |0,077 - 0,25 + 0,049| = 0,13 \text{ m}.$$

Po wstępnym przyjęciu przekroju dłużego miniosrodu i przeprowadzeniu dla takiego przypadku obliczeń wg wzorów (5.66) – (5.68) otrzymano $A_{sl} < 0$, co świadczy o tym, że faktycznie mamy do czynienia z przypadkiem małego miniosrodu. W związku z tym obliczamy pole przekroju zbrojenia rozciągającego lub mniej ścisłanego wg (5.95)

$$A_{sl} = A_{sl, \min} = \max \left(0,075 \frac{N_{sl}}{f_{yd}}, \frac{2500}{350000} \right) = 0,000356 \text{ m}^2; 0,0015bh =$$

$$= 0,0015 \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 0,000225 \text{ m}^2 = 0,000356 \text{ m}^2.$$

Przyjmujemy 3 pręty o średnicy 16 mm w I warstwie o łącznym polu przekroju $A_{sl,prov} = 3 \cdot \pi \cdot 0,016^2 / 4 = 0,000603 \text{ m}^2$ i $a_{1,prov} = a_1 = 0,041 \text{ m}$ oraz

$$d_{prov} = h - a_{1,prov} = 0,5 - 0,041 = 0,459 \text{ m i obliczamy dalej:}$$

– wielkość pomocniczą wg (5.98)

$$k_u = a_2 / d_{prov} = 0,043 / 0,459 = 0,0937.$$

– wielkość pomocniczą wg (5.97)

$$P = k_u \frac{2 f_{yd} A_{sl,prov} (d_{prov} - a_2)}{f_{ctd} b d_{prov}^2 (1 - \xi_{ef,lim})} =$$

$$= 0,0937 \frac{2 \cdot 350000 \cdot 0,000603 \cdot (0,459 - 0,043)}{16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459^2 \cdot (1 - 0,53)} = -0,260,$$

– względną efektywną wysokość stręły ścisłej wg (5.96)

$$\xi_{ef} = P + \sqrt{P^2 + \frac{2 \left[N_{sl} e_{sz} (1 - \xi_{ef,lim}) + f_{yd} A_{sl,prov} (d_{prov} - a_2) \right] (1 + \xi_{ef,lim})}{d_{prov}^2 (1 - \xi_{ef,lim}) f_{ctd} h}}$$

$$= -0,260 + \sqrt{(-0,260)^2 + \frac{2 \cdot \left[2500 \cdot 0,13 \cdot (1 - 0,53) + 350000 \cdot 0,000603 \cdot (0,459 - 0,043) \cdot (1 + 0,53) \right]}{16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459^2 \cdot (1 - 0,53)}} = 0,847.$$

Ponieważ $\xi_{ef,lim} = 0,53 < \xi_{ef} = 0,847 < 1$, to stwierdzamy, że zachodzi odmianna I miniosrodowego ścisłania na małym miniosrodzie (patrz podrozdział 5.3.4.1) i dla tej odmianny wyznaczamy:

– współczynnik wg (5.3)

$$k_s = \frac{2(1 - \xi_{ef})}{1 - \xi_{ef,lim}} - 1 = \frac{2 \cdot (1 - 0,847)}{1 - 0,53} - 1 = 0,349,$$

– pole przekroju zbrojenia ścisłanego ze wzoru (5.99)

$$A_{s2} = \frac{\xi_{ef} f_{ctd} b d_{prov}}{f_{yd}} + k_s A_{sl,prov} + \frac{N_{sl}}{f_{yd}} = \frac{0,847 \cdot 16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459}{350000} + \frac{0,001571 \text{ m}^2}{0,000603} + \frac{2500}{350000} = 0,001368 \text{ m}^2.$$

Przyjmujemy, stosownie do warunku (5.67), 5 prętów o średnicy 20 mm w I warstwie łącznym polu przekroju $A_{s2,prov} = 5 \cdot \pi \cdot 0,020^2 / 4 = 0,001571 \text{ m}^2$. Odległość osi ciężkości przekroju tego zbrojenia od ścisłanej krawędzi przekroju wynosi $a_{2,prov} = a_2 = 0,043 \text{ m}$, a ponieważ $d_{prov} = d = 0,459 \text{ m}$, korekta obliczeń jest zbędna (patrz przykład 5.1).

Sprawdzamy, wg (5.73), czy pole przyjętego zbrojenia mieści się w granicach wyznaczonych przez normę [N1]:

$$0,04bh = 0,04 \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 0,006 \text{ m}^2 >$$

$$> A_{sl,prov} + A_{s2,prov} = 0,001571 +$$

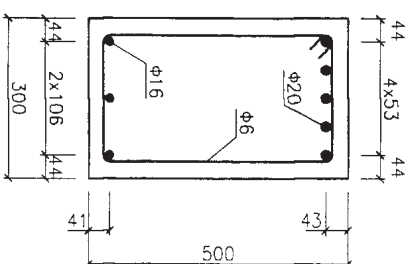
$$+ 0,000603 = 0,002174 \text{ m}^2 > A_{s, \min} =$$

$$= \max \left(0,15 \frac{N_{sl}}{f_{yd}}, 0,15 \cdot \frac{2500}{350000} \right) =$$

$$= 0,001071 \text{ m}^2; 0,003bh =$$

$$= 0,003 \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 0,000450 \text{ m}^2) =$$

$$= 0,001071 \text{ m}^2.$$



Rys. 5.16. Przekrój prostopadły niesymetrycznie zbrojonego elementu miniosrodowo ścisłanego na małym miniosrodzie, obliczony w przykładzie 5.12

Przykład 5.13. Wyznaczenie nośności i sprawdzenie warunku nośności dla niesymetrycznie zbrojonego prostokątnego przekroju w monolitycznym elemencie ściśkanym na małym mimośrodzie.

Obliczenia przeprowadza się dla następujących danych z przykładu 5.12.
 $M_{sd} = 150 \text{ kNm}$; $N_{sd} = 2500 \text{ kN}$; beton klasy B30c; stal klasy A-III; $b = 0,3 \text{ m}$; $h = 0,5 \text{ m}$; $e_0 = 0,17 \text{ m}$; $a_{1,prov} = 0,041 \text{ m}$; $a_{2,prov} = 0,043 \text{ m}$; $A_{s1,prov} = 0,000603 \text{ m}^2$; $A_{s2,prov} = 0,001571 \text{ m}^2$; $l_0 = l_{ed} = 3,2 \text{ m}$, konstrukcja monolityczna o węzłach nieprzesuwanych.

Przyjęto: $\alpha_{cc} = 1,0$; $f_{cd} = 16,7 \text{ MPa}$ (z tabl. 3.2); $f_{yd} = 310 \text{ MPa}$ (z tabl. 3.4); $\xi_{s,lim} = 0,55$ (z tabl. 5.1);

Według sposobu proponowanego przez normę [N1] obliczamy kolejno:

- mimośród konstrukcyjny wg (5.54)
 $e_c = M_{sd} / N_{sd} = 150/2500 = 0,06 \text{ m}$,
- mimośród początkowy wg (5.58)
 $e_0 = e_c + e_a = 0,06 + 0,017 = 0,077 \text{ m}$.
- Pomęcz smukłość elementu $\lambda = l_0 / h = 3,2 / 0,50 = 6,4 < 7$, zatem nie musimy uwzględniać w obliczeniach wpływu tej smukłości. W związku z tym przyjmujemy $\eta = 1,0$ i obliczamy:
 - mimośród całkowity wg (5.59)
 $e_{tot} = \eta \cdot e_0 = 1,0 \cdot 0,077 = 0,077 \text{ m}$,
 - wysokość użytecznej przekroju
 $d_{prov} = h - a_{1,prov} = 0,5 - 0,041 = 0,459 \text{ m}$,
 - położenie osi ciężkości elementu
 $Y_1 = Y_2 = 0,5 \cdot h = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ m}$,
 - mimośrodowy siły podłużnej wg (5.64) i (5.65)
 $e_{s1,prov} = e_{tot} + Y_1 - a_{1,prov} = 0,077 + 0,25 - 0,041 = 0,286 \text{ m}$,
 $e_{s2,prov} = |e_{tot} - Y_2 + a_{2,prov}| = |0,077 - 0,25 + 0,043| = 0,13 \text{ m}$,
- względną efektywną wysokość strefy ściśkanej wg (5.109)

$$\xi_{s,eff} = \frac{[N_{sd} - f_{yd}(A_{s1,prov} + A_{s2,prov})](1 - \xi_{s,eff,lim}) + 2f_{yd}A_{s1,prov}}{f_{cd}bd_{prov}(1 - \xi_{s,eff,lim}) + 2f_{yd}A_{s1,prov}} =$$

$$\frac{[2500 - 350000 \cdot (0,000603 + 0,001571)] \cdot (1 - 0,53) + 2 \cdot 350000 \cdot 0,000603}{16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459 \cdot (1 - 0,53) + 2 \cdot 350000 \cdot 0,000603} = 0,825.$$

Ponieważ $\xi_{s,eff,lim} = 0,53 < \xi_{s,eff} = 0,825 < 1$, to stwierdzamy, że zachodzi odniana I mimośrodowego ściśkania na małym mimośrodku (patrz podrozdział 5.3.4.3) i ze wzoru (5.110) wyznaczamy nośność przekroju na zginanie przy mimośrodkowym ściśkaniu na małym mimośrodku

$$M_{RdI} = f_{cd} b d_{prov}^2 \xi_{s,eff} (1 - 0,5 \xi_{s,eff}) + f_{yd} A_{s2,prov} (d_{prov} - a_{2,prov}) =$$

$$= 16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459^2 \cdot 0,825 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,825) + 350000 \cdot 0,001571 \cdot (0,459 - 0,043) = 740,33 \text{ kNm},$$

a warunek nośności zapisujemy wg (5.79) i (5.83) jako

$$M_{sd} = N_{sd} e_{s1,prov} = 2500 \cdot 0,286 = 715,00 \text{ kNm} < M_{RdI} = 740,33 \text{ kNm},$$

stwierdzając, że został spełniony.

Według sposobu tradycyjnego [4] obliczamy kolejno:

- wielkości: e_c , e_0 , η , e_{tot} , d_{prov} , $e_{s1,prov}$, $e_{s2,prov}$ – w sposób identyczny jak w przedstawionym wyżej sposobie, proponowanym przez normę [N1],
- współczynnik wg (5.115)

$$R^* = \frac{4f_{yd}A_{s1,prov}e_{s1,prov}}{(1 - \xi_{s,eff,lim})f_{cd}bd_{prov}^2} = \frac{4 \cdot 350000 \cdot 0,000603 \cdot 0,286}{(1 - 0,53) \cdot 16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459^2} = 0,487,$$
- współczynnik wg (5.114)
 $a_n = e_{s2,prov} + d_{2,prov} = 0,13 + 0,043 = 0,173 \text{ m}$,
- współczynnik wg (5.113)
 $R = \frac{a_n}{d_{prov}} \cdot R^* = \frac{0,173}{0,459} \cdot 0,487 = 0,183,$
- względną efektywną wysokość strefy ściśkanej wg (5.112)

$$\xi_{s,eff} = R + \sqrt{R^2 + R^*} = \frac{2f_{yd}(A_{s1,prov}e_{s1,prov} - A_{s2,prov}e_{s2,prov})}{f_{cd}bd_{prov}^2} =$$

$$= 0,133 + \sqrt{0,133^2 + 0,487} = \frac{2 \cdot 350000 \cdot (0,000603 \cdot 0,286 - 0,001571 \cdot 0,129)}{16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459^2} = 0,857.$$
- Ponieważ $\xi_{s,eff,lim} = 0,53 < \xi_{s,eff} = 0,857 < 1$, to stwierdzamy, że zachodzi odniana I mimośrodowego ściśkania na małym mimośrodku (patrz podrozdział 5.3.4.3) i następnie dla tej odnianej ze wzoru (5.3) wyznaczamy współczynnik

$$k_s = \frac{2(1 - \xi_{s,eff})}{1 - \xi_{s,eff,lim}} - 1 = \frac{2 \cdot (1 - 0,857)}{1 - 0,53} - 1 = -0,391,$$

a następnie ze wzoru (5.116) nośność przekroju ze względu na siłę podłużną ściśkającą na małym mimośrodku

$$N_{\text{rd}} = f_{\text{cd}} b d_{\text{nov}} \xi_{\text{erf}} + f_{\text{st}} (A_{\text{sz2prw}} - K_s A_{\text{st1prw}}) =$$

$$= 16700 \cdot 0,3 \cdot 0,459 \cdot 0,857 + 350000 \cdot (0,001571 + 0,391 \cdot 0,000603) =$$

$$= 2603,12 \text{ kNm}$$

Warunek nośności zapisyujemy wg (5.86) jako

$$N_{\text{rd}} = 2500 \text{ kN} < N_{\text{rd}} = 2603,12 \text{ kN}, \text{ stwierdzając, że został spełniony.}$$

Przykład 5.14. Wymiarowanie symetryczne zbrojonego przekroju prostokątnego w monolitycznym elemencie ściskanym na małym mimośrodzie:

Dane: $M_{\text{sd}} = 160 \text{ kNm}$; $N_{\text{sd}} = 1700 \text{ kN}$; beton klasy B30; stal klasy A-II.

Przyjęto: $\alpha_{\text{ce}} = 1,0$; $f_{\text{cd}} = 16,7 \text{ MPa}$ (z tabl. 3.2); $f_{\text{sd}} = 310 \text{ MPa}$

(z tabl. 3.4); $\xi_{\text{erf,lim}} = 0,55$ (z tabl. 5.1); $b = 0,3 \text{ m}$; $h = 0,4 \text{ m}$.

1 warstwę prętów rozciąganych i ściskanych $\phi = 20 \text{ mm}$ oraz

strzemiąca $\phi_s = 6 \text{ mm}$; klasę ekspozycji XC2 (tabl. 2.3);

$c_{\text{min}} = \phi = 20 \text{ mm}$ (tabl. 2.4); $\Delta c = 5 \text{ mm}$; $l_0 = l_{\text{cd}} = 2,7 \text{ m}$.

konstrukcję monolityczną o węzłach nieprzesuwanych

Obliczamy kolejno:

– odległość osi ciężkości przekrojów zbrojeń A_{st1} i A_{sz} od najbliższych krawędzi przekroju (rys. 5.2 i 5.15)

$$a_1 = a_2 = c_{\text{min}} + \Delta c + \phi_s + 0,5\phi = 0,020 + 0,005 + 0,006 + 0,5 \cdot 0,020 = 0,041 \text{ m},$$

– niezamierzony mimośród przyładkowy

$$e_s = \max(l_{\text{sd}}/600 = 2,7/600 = 0,0045 \text{ m}; h/30 = 0,4/30 = 0,013 \text{ m}; 0,013 \text{ m}) = 0,013 \text{ m},$$

– mimośród konstrukcyjny wg (5.54)

$$e_c = M_{\text{sd}}/N_{\text{sd}} = 160/1700 = 0,094 \text{ m},$$

– mimośród początkowy wg (5.58)

$$e_0 = e_c + e_s = 0,094 + 0,013 = 0,107 \text{ m}.$$

Ponieważ smukłość elementu $\lambda = l_0/h = 2,7/(0,40) = 6,75 < 7$, zatem nie

musimy uwzględniać wpływu tej smukłości w obliczeniach. Przyjmujemy więc

$\eta = 1,0$ i obliczamy dalej:

– mimośród całkowity wg (5.59)

$$e_{\text{tot}} = \eta e_0 = 1,0 \cdot 0,107 = 0,107 \text{ m},$$

– wysokość użyteczną przekroju

$$d = h - a_1 = 0,4 - 0,041 = 0,359 \text{ m},$$

– położenie osi ciężkości elementu

$$y_1 = y_2 = 0,5h = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2 \text{ m},$$

– mimośrodowy siły podłużnej wg (5.64) i (5.65)

$$e_{\text{st}} = e_{\text{tot}} + y_1 - a_1 = 0,107 + 0,2 - 0,041 = 0,266 \text{ m},$$

$$e_{\text{sz}} = |e_{\text{tot}} - y_2 + a_2| = |0,107 - 0,2 + 0,041| = 0,052 \text{ m},$$

– współczynnik wg (5.103)

$$B = \frac{2 N_{\text{sd}} e_{\text{st}}}{f_{\text{cd}} b d^2} = \frac{2 \cdot 1700 \cdot 0,266}{16700 \cdot 0,3 \cdot 0,359^2} = 1,401,$$

– współczynnik wg (5.104)

$$C = \frac{N_{\text{sd}} (d - a_2)}{f_{\text{cd}} b d^2} = \frac{1700 \cdot (0,359 - 0,041)}{16700 \cdot 0,3 \cdot 0,359^2} = 0,837,$$

– względną efektywną wysokość strefy ściskanej z równania trzeciego stopnia wg (5.102)

$$\xi_{\text{erf}}^3 - (2 + \xi_{\text{erf,lim}}) \xi_{\text{erf}}^2 + \left[(1 + \xi_{\text{erf,lim}}) - \frac{a_2}{d} (1 - \xi_{\text{erf,lim}}) \right] + B \xi_{\text{erf}} -$$

$$- B \xi_{\text{erf,lim}} - C (1 - \xi_{\text{erf,lim}}) = 0,$$

$$\xi_{\text{erf}}^3 - (2 + 0,55) \xi_{\text{erf}}^2 + \left[(1 + 0,55) - (0,041/0,359) \cdot (1 - 0,55) + 1,401 \right] \xi_{\text{erf}} -$$

$$- 1,401 \cdot 0,55 - 0,837 \cdot (1 - 0,55) = 0,$$

jako następujący akceptowalny pierwiastek: $\xi_{\text{erf}} = 0,730$.

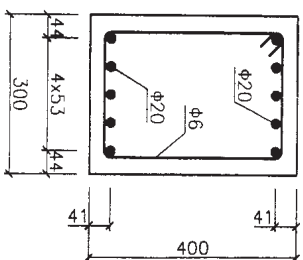
Ponieważ $\xi_{\text{erf,lim}} = 0,55 < \xi_{\text{erf}} = 0,730 < 1$, to pole przekroju zbrojenia symetrycznego obliczamy ze wzoru (5.105)

$$A_{\text{st}} = A_{\text{sz}} = \frac{N_{\text{sd}} e_{\text{st}} - f_{\text{cd}} b d^2 \xi_{\text{erf}} (1 - 0,5 \xi_{\text{erf}})}{f_{\text{sd}} (d - a_2)}$$

$$= \frac{1700 \cdot 0,266 - 16700 \cdot 0,3 \cdot 0,359^2 \cdot 0,730 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,730)}{310000 \cdot (0,359 - 0,041)} = 0,001551 \text{ m}^2.$$

Przyjmujemy w 1 warstwie po obu stronach przekroju, stosownie do warunku (5.72), 5 prętów o średnicy 20 mm i łącznym polu przekroju $A_{\text{st1prw}} = A_{\text{sz2prw}} = 5 \cdot \pi \cdot 0,02^2/4 = 0,001571 \text{ m}^2$.

Odległości osi warstw od najbliższych krawędzi przekroju wynoszą $a_{1,grw} = a_{2,grw} = 0,041$ m, a ponieważ rzeczywista wysokość użyteczna przekroju $d_{grw} = d$, korekta obliczeń jest zbędna (patrz przykład 5.1).



Krys. 5.17. Przekrój prostokątny symetrycznie zbrojony elementu mimośrodowo ściskanego na małym mimośrodzie, obliczony w przykładzie 5.14

Sprawdzamy, wg (5.73), czy pole przyjętego zbrojenia mieści się w granicach wyznaczonych przez normę [N1]:

$$0,04bh = 0,04 \cdot 0,3 \cdot 0,4 = 0,0048 \text{ m}^2 > A_{s1,grw} + A_{s2,grw} =$$

$$= 0,001551 + 0,001551 = 0,003102 \text{ m}^2 > A_{s,min} = \max \left(0,15 \frac{N_{sl}}{f_{yk}} =$$

$$= 0,15 \cdot \frac{1700}{310000} = 0,000823 \text{ m}^2 ; 0,003bh = 0,003 \cdot 0,3 \cdot 0,4 = 0,000360 \text{ m}^2 \right) =$$

$$= 0,000823 \text{ m}^2.$$

Uwaga: Sposobu wyznaczania nośności przekroju zwyntarowanego w przykładzie 5.14 i sprawdzania dla niego warunku nośności nie podano, gdyż jest on identyczny z przedstawionym w przykładzie 5.13.

5.4. SŁUPY UZWOJONE

Słupy uzwojone mają zazwyczaj przekrój kołowy (rys. 5.18) lub wieloboczny o większej liczbie boków. Według normy [N1], wpływ uzwojenia na nośność tych słupów może być uwzględniony w obliczeniach jedynie wtedy, gdy: