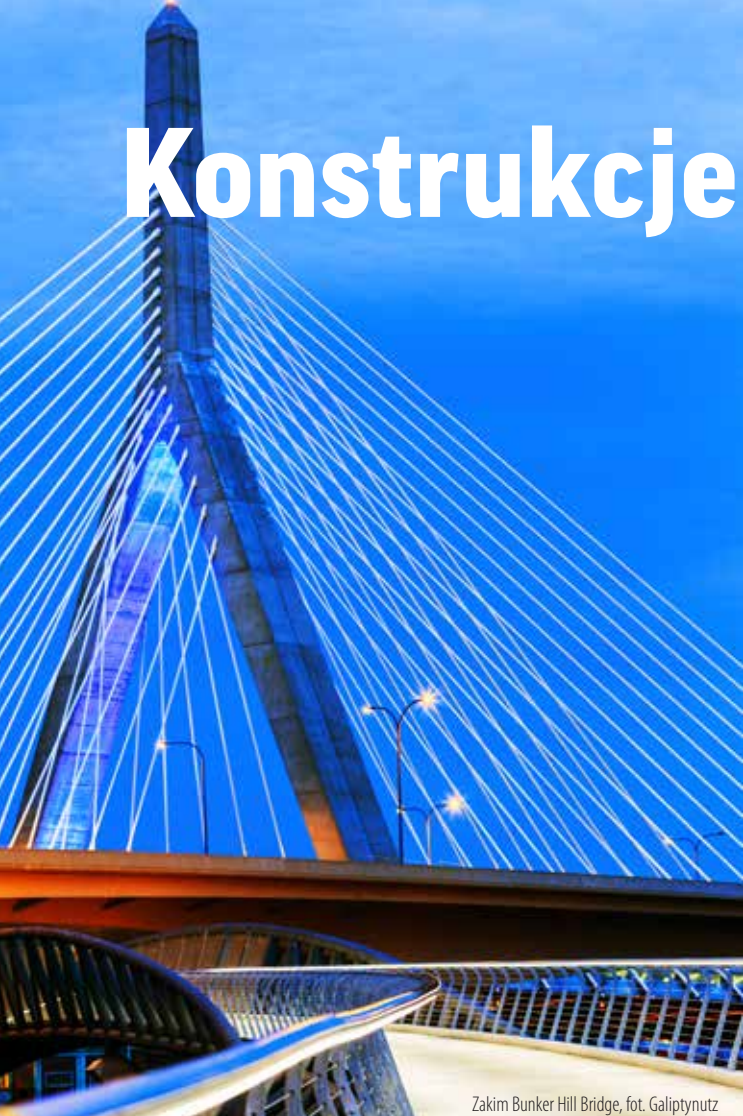


Konstrukcje sprężone

Cz. 3. Stany graniczne nośności przekrojów sprężonych

tekst: **dr inż. PIOTR GWOŹDZIEWICZ**, Pracownia Konstrukcji Sprężonych, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Krakowska

Po omówieniu koncepcji sprężania konstrukcji w pierwszej części opracowania („Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2014, nr 5 [56], s. 58–63) oraz przedstawieniu metod obliczania siły sprężającej w drugiej części („Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2014, nr 6 [57], s. 90–95) w niniejszej części autor opisuje metody obliczania stanów granicznych nośności. Weryfikacja warunków nośności jest warunkiem niezbędnym w projektowaniu elementów konstrukcyjnych z betonu.



Zakim Bunker Hill Bridge, fot. Galiptynutz

1. Metoda stanów granicznych nośności w odniesieniu do przekrojów z betonu sprężonego

Stosowana w Polsce od lat 70. XX w. i przewidziana w aktualnej normie Eurokod 2 (PN-EN 1992-1-1:2004 + AC:2010 [1]) zasada projektowania elementów konstrukcyjnych z betonu zakłada wykorzystanie metody stanów granicznych (SG). W ramach tej metody rozróżnia się stany graniczne nośności i stany graniczne użyteczności, które odpowiednio opisują sytuacje utraty nośności (zniszczenia) oraz przekroczenia pożądaných cech użytkowych elementu. Wszystkie wartości parametrów materiałowych oraz obciążeń, omawiane w poprzednich częściach niniejszego opracowania, mają być ustalane zgodnie z zasadami tej metody. Zadaniem projektanta jest wykazanie, że:

- dla wszelkich mogących wystąpić sytuacji związanych ze zniszczeniem materiału, we wszystkich reprezentatywnych przekrojach spełniona jest nierówność stanu granicznego nośności:
 $E_d \leq R_d$
- dla wszystkich mogących wystąpić sytuacji związanych z przekroczeniem

akceptowalnych cech użytkowych spełniona jest nierówność stanu granicznego użyteczności:

$$E_d \leq C_d$$

W powyższych sformułowaniach E_d oznacza efekt oddziaływań (w SGN – siła wewnętrzna, w SGU – wielkość ugięcia lub szerokości rysy), R_d – maksymalną siłę wewnętrzną, jaką może przenieść przekrój w SGN, C_d – maksymalną akceptowalną wartość ugięcia lub szerokości rysy. Do odpowiedzialności projektanta należy w pierwszej kolejności wytypowanie wszystkich mogących wystąpić stanów granicznych, a następnie ich weryfikacja.

Weryfikacja stanów granicznych nośności przekrojów sprężonych ma za zadanie wykazać, że przyjęte w projektowaniu wymiary geometryczne elementów, wielkości siły sprężającej oraz przewidywane obciążenia wraz z ich możliwymi kombinacjami pozwalają na bezpieczną pracę elementów przez cały okres użytkowania z akceptowalnym prawdopodobieństwem. Proces projektowy elementów sprężonych wymaga przyjęcia w pierwszym etapie założeń dotyczących ilości

stali sprężającej oraz jej wstępnego wycięcia, a następnie – w drugim etapie obliczeń – wszechstronnej ich weryfikacji.

2. Stan graniczny nośności elementów sprężonych na zginanie

Sprawdzenie warunku nośności na zginanie przekroju elementu sprężonego polega na określeniu wartości obciążenia, jaka może doprowadzić do zniszczenia (nośności), a następnie porównania tak określonej wartości z momentem zginającym występującym w przekroju pod obliczeniową kombinacją obciążeń dla stanów granicznych nośności.

Analizę SGN na zginanie prowadzi się przy następujących założeniach:

- przekrój płaski przed odkształceniem pozostaje płaski po odkształceniu (zasada płaskich przekrojów Bernoulliego);
- odkształcenia sąsiadujących włókien różnych materiałów są równe (zasada zszycia);
- naprężenia rozciągające w betonie – jeśli występują – są pomijane;
- zależności odkształcenie – naprężenie w materiałach w przekroju są zgodne z przyjętą zależnością konstytutywną

(przy projektowaniu według [1] są to zależności podane tamże);

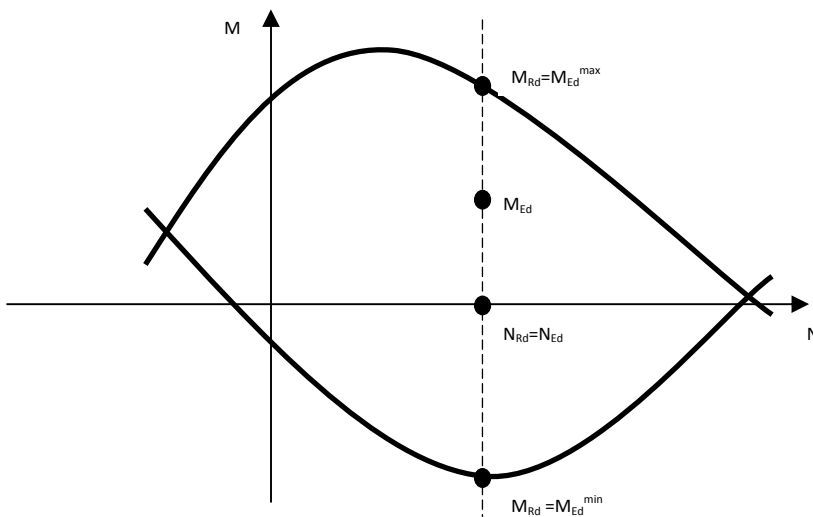
- stan graniczny występuje, jeżeli linia odkształcenia przekroju przechodzi przynajmniej przez jedną wartość granicznego odkształcenia materiału (zwykle betonu lub stali zbrojeniowej); graniczne odkształcenia wynoszą $\epsilon_{su} = 10\text{‰}$ dla stali i $\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$ lub $\epsilon_{cu} = 2\text{‰}$ dla betonu we włóknach skrajnych lub odległych o $3/7 h$ od krawędzi przekroju, odpowiednio.

Zginany przekrój sprężony jest obciążony siłą normalną i momentem zginającym. Jego zniszczenie występuje zatem wskutek działania wektora obciążenia, który prowadzi do przekroczenia dopuszczalnego wyężenia materiału z uwagi na naprężenia normalne. Dla ustalonej wartości siły normalnej można określić dwie przeciwne wartości graniczne momentu zginającego. Jednoczesne działanie siły podłużnej i momentu zginającego można przedstawić przy użyciu wykresu interakcji tych działań, którego przykład przedstawiono na rycinie 1. Niszczące wartości wektora obciążenia tworzą granicę obszaru dopuszczalnych obciążeń. Jeżeli wartość momentu zginającego wywołanego obciążeniami znajduje się między wartościami granicznymi, to warunek stanu granicznego nośności na zginanie uważa się za spełniony.

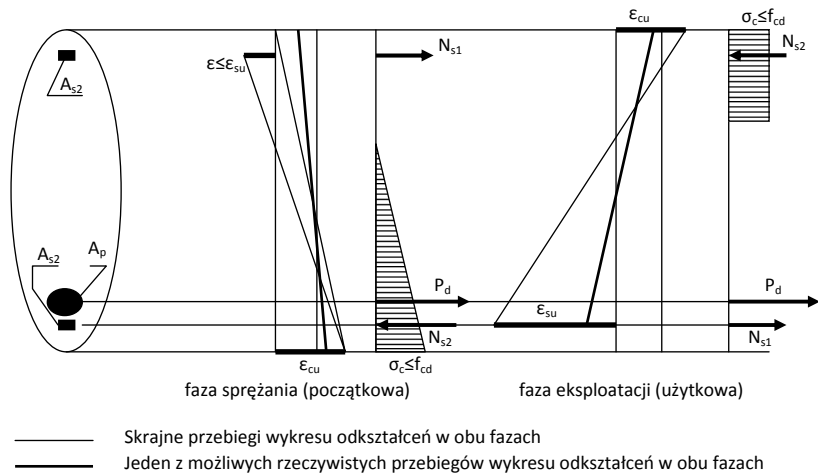
Weryfikację SGN na zginanie można przeprowadzić na jednym z dwóch poziomów dokładności: metodą ogólną lub metodą uproszczoną.

2.1. Metoda ogólna

Metoda ogólna nawiązuje ściśle do wyżej opisanych założeń stanu granicznego



Ryc. 1. Wykres interakcji siły podłużnej i momentu zginającego w przekroju sprężonym



Ryc. 2. Odkształcenia przekroju sprężonego w stanie granicznym nośności na zginanie

nośności na zginanie. Zasadniczym jej elementem jest analiza wykresu odkształcenia przekroju w stanie granicznym, który na swoim przebiegu w przekroju przecina przynajmniej jeden punkt odpowiadający wartości odkształcenia granicznego materiału. Na podstawie wykresu odkształcenia przekroju, uwzględniając zależności $\sigma - \epsilon$, wyznacza się naprężenia poszczególnych materiałów, a następnie sprawdza równowagę sił w przekroju. Jeżeli warunek równowagi sił nie jest spełniony, dokonuje się korekty przebiegu wykresu odkształcenia, który jednak nadal musi wykazywać osiągnięcie przez przynajmniej jeden materiał odkształceń granicznych.

Powyższy diagram (ryc. 2) przedstawia początkowy przebieg odkształcenia przekroju sprężonego w dwóch zasadniczych sytuacjach: początkowej i użytkowej.

Ważniejsze przyjęte na rycinie oznaczenia:

- A_c – pole przekroju betonowego
- A_p – pole przekroju cięgien sprężających

A_{s1}, A_{s2} – pole przekroju zwykłego zbrojenia bardziej i mniej rozciąganego pod wpływem obciążeń

h – wysokość przekroju

d_p, d_s – wysokość użyteczna przekroju, odpowiednio z uwagi na stal sprężającą oraz na stal zwykłą

ϵ_c – odkształcenie skrajnego ściskanego włókna betonu

$\epsilon_{s1}, \epsilon_{s2}$ – odkształcenie zbrojenia zwykłego

x – wysokość strefy ściskanej

ϵ_{pm} – trwałe odkształcenia stali sprężającej

$\Delta \epsilon_p$ – przyrost odkształcenia stali sprężającej odpowiadający redukcji naprężeń ściskających w otaczającym betonie od wartości wywołanej trwałym sprężeniem i obciążeniem długotrwałym do wartości zgodnej z wykresem odkształcenia w chwili zniszczenia przekroju.

W obliczeniach nośności sprężonych elementów zginanych można przyjąć, że przy ustalonej wartości siły podłużnej (siła sprężająca) do ustalenia pozostaje graniczna wartość momentu zginającego. Można w tym celu posłużyć się odpowiednią procedurą obliczeniową.

Tok obliczeniowy nośności na zginanie, opisany m.in. w [2], wymaga następujących działań:

1. Przyjęcie wstępnego przebiegu wykresu odkształcenia przekroju wraz z założeniem odkształceń krawędziowych betonu ϵ_c i stali ϵ_{s1} .
2. Wyliczenie wysokości strefy ściskanej x .
3. Wyliczenie częściowych przyrostów odkształceń stali sprężającej w SGN: $\Delta \epsilon_p$ oraz $\Delta \epsilon_p'$.
4. Określenie naprężeń w stali zwykłej σ_{s1} .
5. Wyliczenie przyrostu naprężeń w stali sprężającej odpowiadającego wzrostowi

odkształceń stali sprężającej w chwili osiągnięcia przez przekrój stanu granicznego nośności na zginanie.

6. Wyliczenie wypadkowej siły normalnej dla materiałów w przekroju odpowiadającej założonemu wykresowi odkształcenia – N_{Rd} .

7. Porównanie wyliczonej siły normalnej N_{Rd} z siłą zewnętrzną P_d i w razie potrzeby korekta przebiegu wykresu odkształcenia przekroju. Zwykle przyjmuje się tolerancję wyników na poziomie do 5% mniejszej z wartości. Po przyjęciu skorygowanego przebiegu wykresu odkształceń obliczenia należy wykonać ponownie.

8. Na podstawie zadowalającej zgodności wartości N_{Rd} i P_d dla tego samego diagramu odkształcenia wyznacza się moment sił wewnętrznych względem pasywnego zbrojenia rozciąganego, który jest przyjmowany jako nośność przekroju na moment zginający M_{Rd} . Nierówności $M_{Rd} \geq M_{ED}$ potwierdza spełnienie warunku nośności przekroju na zginanie.

2.2. Metoda uproszczona

Mniej dokładne, ale jednocześnie szybsze i prostsze obliczenia można prowadzić metodą uproszczoną sprawdzenia stanu granicznego nośności na zginanie. Jej zastosowanie jest ograniczone do betonów klas nie wyższych od C45/55. Oparta na tych samych założeniach, co metoda ogólna, metoda ta przyjmuje następujące uproszczenia:

- w analizie wyężenia przekroju odstępkuje się od poszukiwania diagramu odkształcenia,
- wyężenie betonu i stali zbrojenia zwykłego przyjmuje się jako równe wartościom ich wytrzymałości,
- wysokość strefy ściskanej przyjmuje się, rozwiązując równanie równowagi sił w przekroju:

$$f_{pd} \cdot A_{p1} + f_{yd} \cdot A_{s1} = f_{cd} \cdot S_{cc,eff} + \sigma_{p2} \cdot A_{p2} + f_{yd} \cdot A_{s2}$$

- sprawdzenie nośności na zginanie sprowadza się do porównania działającego momentu od obciążeń z „nośnością przekroju” wyznaczoną jako moment sił wewnętrznych w przekroju liczony względem stali rozciąganej według relacji:

$$M_{sd} \leq M_{Rd} = f_{cd} \cdot S_{cc,eff} + \sigma_{p2} \cdot A_{p2} \cdot (d - a_2) + f_{yd} \cdot A_{s2}$$

Metoda uproszczona wymaga zdecydowanie mniejszego nakładu obliczeń. Jednocześnie przyjęcie naprężeń w materiałach na poziomie ich obliczeniowej

wytrzymałości może być niezgodne z rzeczywistym ich poziomem, związanym z możliwą postacią odkształcenia przekroju. Wartości nośności na zginanie uzyskiwane przy zastosowaniu tej metody mają zwykle charakter zachowawczy.

3. Stany graniczne nośności na ścinanie elementów z betonu sprężonego

Weryfikacja nośności na ścinanie elementów sprężonych przebiega według tych samych zasad, jakie obowiązują dla elementów żelbetowych. Podstawowy warunek stanu granicznego nośności przyjmuje dla ścinania postać:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Siła poprzeczna V_{Ed} , jaka może wystąpić w przekroju wskutek działających obciążeń, nie może przekroczyć nośności przekroju na ścinanie V_{Rd} .

Określenie położenia rozważanego przekroju odbywa się według ogólnych reguł dla ścinania w żelbecie, określonych w [1]. W przekrojach projektowanych jako sprężone jest to najczęściej przekrój w sąsiedztwie podparcia oraz tam, gdzie szerokość środka jest najmniejsza. Sposób określenia położenia przekroju rozważanego z uwagi na ścinanie jest określony w Eurokodzie 2. Przy braku sił skupionych przekrojem rozważanym w strefie przypodporowej jest zwykle przekrój odległy o d (wysokość użyteczna przekroju) od krawędzi podpory.

W elemencie sprężonym z przebiegiem ciągu wypadkowego nachylonym o kąt α względem osi elementu siła poprzeczna, która działa w przekroju wskutek obciążeń $V_{Ed,stat}$, może być obliczeniowo zmniejszona o wartość pionowej składowej siły sprężającej w tym przekroju. Ostatecznie nośność sprawdza się z uwagi na zredukowaną wartość siły poprzecznej:

$$V_{Ed} = V_{Ed,stat} - P_d \sin \alpha$$

Nośność odcinka ścinania określa się odpowiednio dla występującej fazy pracy: przed zarysowaniem lub po zarysowaniu. Zarysowanie odcinka ścinania jest skutkiem przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie betonu wskutek głównych naprężeń rozciągających pochodzących od obciążeń.

Warunek nośności dla fazy przed zarysowaniem odpowiada pracy litego przekroju betonowego i wymaga sprawdzenia dwóch warunków:

- nośności na siłę poprzeczną z uwagi na naprężenia rozciągające w betonie

- nośności na siłę poprzeczną z uwagi na naprężenia ściskające w betonie.

Niespełnienie pierwszego z warunków oznacza przejście przekroju do fazy po zarysowaniu.

Nośność na ścinanie z uwagi na naprężenia rozciągające w betonie określa się z warunku:

$$V_{Rd,c} = [(0,18/\gamma_c)k(100\rho_l f_{ck})^{0,333} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

przy zachowaniu warunku

$$V_{Rd,c} \geq [0,035k^{1,5} f_{ck}^{0,5} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

W powyższych zależnościach przyjęto następujące oznaczenia:

γ_c – materiałowy współczynnik bezpieczeństwa dla betonu

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie

$$k_1 = 0,15$$

$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 f_{cd}$ – naprężenia w betonie wywołane siłą podłużną

b_w, d – wymiary: szerokość i wysokość użyteczna przekroju; szerokość przekroju na wysokości środka ciężkości przekroju powinna być skorygowana z uwagi na obecność cięgien sprężających według zasad:

przy średnicy kanału metalowego $\phi > \frac{b_w}{8}$ i wypełnieniu kanału cementem przyjmuje się $b_{w,nom} = b_w - 0,5 \sum \phi$, przy czym $\sum \phi$ przyjmuje się na najbardziej niekorzystnym poziomie

przy dowolnej średnicy kanału metalowego bez iniekcji, zainiektowanego kanału z tworzyw sztucznych oraz dla cięgien bez przyczepności przyjmuje się $b_{w,nom} = b_w - 1,2 \sum \phi$, przy czym $\sum \phi$ przyjmuje się na najbardziej niekorzystnym poziomie; współczynnik 1,2 w ostatnim wzorze można zmniejszyć do 1,0 pod warunkiem stosowania zbrojenia zapobiegającego rozłupaniu krzyżulców betonowych

A_{sl} – pole przekroju zbrojenia rozciąganego, które sięga co najmniej na odległość $l_{bd} + d$ poza rozważany przekrój w kierunku podpory, przy czym d oznacza użyteczną wysokość przekroju, a l_{bd} – obliczeniową długość zakotwienia zbrojenia podłużnego.

W elementach sprężonych jednoprzęsłowych projektowanych bez zbrojenia na

ściananie i niezarysowanych przez ścinanie nośność na ścinanie z uwagi na naprężenia rozciągające w betonie w fazie pierwszej zależy bezpośrednio od wytrzymałości betonu na rozciąganie:

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_l \sigma_{cp} f_{ctd}}$$

W powyższym wzorze wykorzystano następujące oznaczenia:

I – moment bezwładności; b_w – według opisu podanego wyżej;

S – moment statyczny części przekroju powyżej osi obojętnej względem tej osi

$$\alpha_1 = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1,0$$

– dla strunobetonu l_x oznacza rzędną rozpatrywanego przekroju od początku odcinka, na którym sprężenie przekazuje się na beton, natomiast l_{pt2} oznacza całkowitą długość takiego odcinka;

$$l_{pt2} = 1,2 \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pmo}}{f_{bpt}};$$

gdzie współczynnik przyjmuje wartości: 1,0 przy stopniowym zwalnianiu naciągu i 1,25 przy nagłym zwalnianiu naciągu, a współczynnik przyjmuje wartości 0,25 dla ciągów o kołowym przekroju poprzecznym i 0,19 dla splotów trzydrutowych i siedmiodrutowych

ϕ – nominalna średnica pręta

σ_{pmo} – naprężenie w ciągnię natychmiast po zwolnieniu naciągu

f_{bpt} – naprężenie przyczepności na odcinku zakotwienia

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta f_{ctd}(t)$$

Współczynnik przyczepności ma wartość 2,7 dla drutów nagniatanych i 3,2 dla spotów trzy- i siedmiodrutowych, a współczynnik osiąga wartości 1,0 przy dobrych warunkach przyczepności i 0,7 w pozostałych przypadkach.

(1): pojęcie „dobre warunki przyczepności” oznacza wszystkie, poza kotwieniem prętów w strefie powyżej 250 mm od dolnej krawędzi dla przekrojów o wysokości powyżej 250 mm, w przekrojach o wysokości ponad 600 mm; złe warunki kotwienia w strefie 300 mm od górnej krawędzi,

$f_{ctd}(t)$ – wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie w chwili zwolnienia naciągu

$$f_{ctd}(t) = 0,7 \alpha_{ct} f_{ctm}(t) / \gamma_c$$

– dla innych elementów sprężonych $\alpha_1 = 1,0$

σ_{cp} – naprężenie podłużne w betonie na poziomie środka ciężkości elementu,

wywołane działającą siłą podłużną oraz sprężeniem [MPa]

f_{ctd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie.

W przypadku, jeżeli obciążenie skupione w strefie przypodporowej jest przyłożone do elementu w odległości $0,5d \leq a_v \leq 2d$ od podpory, a zbrojenie podłużne jest odpowiednio zakotwione w podporze, to udział tego obciążenia w sprawdzeniu nośności $V_{Rd,c}$ można zredukować, mnożąc go przez $\beta = \frac{a_v}{2d}$

Nośność na ścinanie z uwagi na naprężenia ściskające w betonie zależy wprost od wytrzymałości betonu na ściskanie, a także od wymiarów przekroju. Określa się ją z warunku:

$$V_{Rd,max} = 0,5 b_w d v f_{cd}$$

gdzie v – współczynnik redukcji wytrzymałości betonu wskutek zarysowania wywołanego ścinaniem,

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

przy czym f_{ck} jest wyrażona w MPa.

Warunek nośności dla strefy ścinania dla fazy po zarysowaniu odpowiada pracy kratownicy złożonej ze ściskanych krzyżulców betonowych, rozciąganych wieszaków (strzemion), ściskanego pasa górnego oraz rozciąganego pasa dolnego. Udział siły sprężającej w tej strefie jest uwzględniany wyłącznie poprzez redukcję siły poprzecznej od obciążeń, a stal sprężająca nie występuje w warunkach nośności. W obliczeniach stawia się dodatkowo ograniczenie kąta nachylenia krzyżulców betonowych θ w postaci (wartość według [1]):

$$1,0 \leq \cot \theta \leq 2,0$$

Osiągnięcie stanu granicznego nośności z uwagi na ścinanie może mieć postać zerwania zbrojenia poprzecznego, może też wystąpić uplastycznienie lub wyrwanie niedostatecznie zakotwionego w strefie podporowej rozciąganego zbrojenia podłużnego. Zniszczenie tej strefy może też nastąpić wskutek zmiażdżenia betonu w ukośnych ściskanych krzyżulcach betonowych.

Dla odcinka ścinania, w którym zbrojenie poprzeczne jest prostopadłe do osi elementu, warunki nośności mają następującą postać:

– dla zbrojenia poprzecznego

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

gdzie nośność na siłę poprzeczną z uwagi na zerwanie zbrojenia poprzecznego:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta,$$

– dla ukośnych krzyżulców ściskanych

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

gdzie nośność na siłę poprzeczną z uwagi na zmiażdżenie betonu ściskanego:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

W obu powyższych wzorach występuje wartość kąta nachylenia ukośnych krzyżulców z betonu θ oraz długość ramienia sił wewnętrznych w przekroju z . A_{sw} oraz s oznaczają odpowiednio pole przekroju pojedynczego strzemiona oraz rozstaw strzemion, b_w to minimalna szerokość przekroju. Współczynniki korygujące: α_{cw} – zależny od stanu naprężeń w pasie ściskanym oraz v_1 – redukcyjny dla wytrzymałości betonu zarysowanego przy ścinaniu przyjmuje się:

$$\alpha_{cw} = \begin{cases} 1,0 & \text{dla konstrukcji niesprężonych} \\ 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} & \text{dla } 0 < \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd} \\ 1,25 & 0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} < 0,5 f_{cd} \\ 2,5 \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \right) & 0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd} \end{cases}$$

$$v_1 = \begin{cases} 0,6 & \text{dla } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \\ 0,9 - \frac{f_{ck}}{200} & \text{dla } f_{ck} > 60 \text{ MPa} \end{cases}$$

Warunek konstrukcyjny, aby zbrojenie podłużne było odpowiednio zakotwione za przekrojem odległym od rozważanego miejsca o co najmniej d , należy weryfikować zgodnie z zasadami ustalania długości zakotwienia prętów.

Powierzchnia przekroju zbrojenia poprzecznego w strefie ścinania nie powinna ponadto przekraczać ograniczenia związanego z maksymalnym wyęzieniem betonu:

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} v_1 f_{cd}$$

W elementach zbrojonych strzemionami ukośnymi lub prętami odgiętymi nośność na ścinanie określa się z uwzględnieniem kąta nachylenia zbrojenia poprzecznego α :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}$$

Przy zbrojeniu ukośnym na ścinanie ograniczenie maksymalnego wyężenia betonu ma postać:

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{1}{2} \frac{\alpha_{cw} v_1 f_{cd}}{\sin \alpha}$$

Poza przeciążeniem betonu na ściskanie i zbrojenia poprzecznego na rozciąganie, nośność graniczna strefy ścinania elementu sprężonego może zostać osiągnięta także wskutek przeciążenia zbrojenia w pasie rozciągającym. Powierzchnia zbrojenia jest zwykle określona z warunku nośności na zginanie i ukształtowana zgodnie z konstrukcyjnymi zasadami konstrukcji zbrojenia w zakresie doprowadzania zbrojenia do podpór. Tak określone zbrojenie podłużne może się okazać zbyt słabe dla siły rozciągającej od zginania, powiększonej o rozciąganie w pasie kratownicy zastępczej. Dodatkową siłę rozciągającą określa się z wzoru:

$$\Delta F_{td} = 0,5V_{Ed}(\cot \theta - \cot \alpha),$$

o ile łączna siła rozciągająca wywołana zginaniem i rozciąganiem w zbrojeniu nie przekroczy siły jak dla momentu maksymalnego na długości belki:

$$F_d = \frac{M_{Ed}}{z} + \Delta F_{td} \leq \frac{M_{Ed,max}}{z}$$

Warunki związane z weryfikacją nośności połączenia półki ściskanej i środka w przekroju na styku obu elementów oraz połączenia między betonami ułożonymi w różnych terminach sprawdza się identycznie jak dla elementów żelbetowych.

4. Stan graniczny nośności elementów sprężonych z uwagi na skręcanie

Skręcanie elementów sprężonych z betonu występuje w konstrukcjach prętowych o zakrzywionej osi lub obciążonych niesymetrycznie. W każdym przypadku wyężenie elementu jest złożone z różnych sił wewnętrznych, jednak pracę elementu z uwagi na skręcanie rozpatruje się odrębnie, a następnie ustala ewentualny łączny wpływ różnych oddziaływań.

Stan odkształcenia przy skręcaniu może dla elementów wiotkich oznaczać wystąpienie nadmiernych odkształceń, które należy uwzględnić w obliczeniach konstrukcji jako całości.

W zakresie odkształceń skręcanie elementów o przekroju poprzecznym innym niż kołowy lub pierścieniowy prowadzi do deplanacji przekroju. Odształcenia elementu skręcanego, włączając w nie również

deplanację (spaczenie) przekroju, są w ścisłym związku z polem naprężeń. Dla uproszczenia obliczeń przeważnie przyjmuje się, że główne naprężenia ściskające i rozciągające tworzą z osią elementu kąt równy 45°. Z rozwiązań szczegółowych wynika, że największe wartości naprężeń występują na zewnętrznej krawędzi przekroju. Stąd inicjowane zarysowanie elementu, wywołane przekroczeniem wytrzymałości betonu na rozciąganie. Przebieg rys wywołanych rozciąganiem od skręcania jest charakterystyczny: na zewnętrznej powierzchni belki stanowią one linie spiralnie otaczające oś elementu. Jeżeli element nie posiada wystarczającego zbrojenia poprzecznego lub podłużnego, chwila powstania rys spiralnych może być chwilą jego zniszczenia.

Wytrzymałość betonu na rozciąganie może być przekroczona wskutek działania momentu skręcającego samodzielnie lub łącznie z momentem zginającym lub siłą poprzeczną. Obliczenia prowadzi się dla każdego z obciążeń oddzielnie.

Obliczenia nośności litego elementu na skręcanie prowadzi się przy założeniu zastąpienia elementu pełnego przekrojem cienkościennym. Takie podejście w sposób oczywisty zapewnia dodatkowy zapas bezpieczeństwa prowadzonych obliczeń w porównaniu ze ścisłym rozwiązaniem pracy elementu litego. Nośność na moment skręcający dla elementu z betonu określa się z wzoru:

$$T_{Rd1} = \frac{2v f_{cd} t A_k}{\operatorname{tg} \theta + \operatorname{ctg} \theta}$$

W powyższym wzorze t oznacza grubość przekroju zastępczego, którą można określić z wzoru: $6 \frac{A}{7 2c}$ (c – otulina); A_k – pole figury wyznaczonej przez linię środkową przekroju zastępczego.

W przekroju złożonym z kilku części o kształcie prostokątnym podział momentu skręcającego pomiędzy częściami opiera się na sztywności skręcania każdej z nich określonej jak dla fazy przed zarysowaniem.

Dodatkowe siły podłużne, jakie powstają w elemencie skręcanym, muszą być przeniesione przez odpowiednie zbrojenie. Wielkość siły rozciągającej wyznacza się z wzoru:

$$N_v = \frac{\tau}{\operatorname{tg} \theta} t u_k,$$

gdzie naprężenie tnące można określić na podstawie zależności:

$$\tau = \frac{T}{2A_k t}$$

Dla elementów sprężonych siłę rozciągającą przenoszą dwa rodzaje zbrojenia: zwykłe i sprężające, a siła rozciągająca jest w równowadze z siłą ściskającą krzyżulce ściskane:

$$N_v = A_{sl} f_{yld} + A_p f_{pd} = \frac{T_{Rd2} u_k}{2A_k} \operatorname{ctg} \theta$$

Dla przypadku czystego skręcania moment skręcający powinien spełnić warunek nośności z uwagi na ściskanie ukośne betonu i rozciąganie zbrojenia poprzecznego:

$$T_{Sd} \leq T_{Rd1} = \frac{2 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot t \cdot A_k}{\cot \theta + \tan \theta}$$

oraz

$$T_{Sd} \leq T_{Rd2} = 2 \cdot A_k \cdot f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot \cot \theta$$

W przypadku jednoczesnego działania momentu skręcającego i siły poprzecznej, z uwagi na ten sam sposób wyężenia materiału wywoływany tymi działaniami, ich sumaryczny efekt musi być rozpatrywany łącznie. W tym celu określić należy nośność z uwagi na każde z działań oddzielnie T_{Rd1} , $V_{Rd,max}$, a następnie ocenić, czy sumaryczne wyężenie nie przekracza dopuszczalnego poziomu 1,0:

$$\left(\frac{T_{Ed}}{T_{Rd1}} \right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right)^2 \leq 1$$

Jednoczesne działanie momentu skręcającego i momentu zginającego weryfikuje się oddzielnie dla każdego z obciążeń.

5. Nośność strefy zakotwień

Strefa zakotwień nie jest wymieniana jako obszar, dla którego należy przeprowadzić analizę w ramach stanów granicznych nośności, jednak jej uszkodzenie może w istotny sposób obniżyć bezpieczeństwo i trwałość obiektu. Uszkodzenia strefy zakotwień mogą wystąpić na skutek przyłożenia poprzez zakotwienie kabli znacznych sił skupionych na beton. Prawdopodobieństwo takich uszkodzeń jest wyższe wówczas, gdy z uwagi na pożądane tempo postępu prac podejmowana jest próba naciągu kabli przed uzyskaniem przez beton docelowej wytrzymałości.

Uszkodzenie strefy zakotwień występuje wskutek działania skupionych sił w zakotwieniach. W wielu dokumentach i zaleceniach przyjęto, że weryfikacja warunków nośności strefy zakotwień

powinna się odbywać przy założeniu siły w ciągnie równej jego całkowitej nośności. Uszkodzenie betonu w strefie zakotwień jest skutkiem przekroczenia wytrzymałości betonu na rozciąganie, a jego postacią są rysy i pęknięcia czoła konstrukcji.

Zważywszy zwykłe przebiegi trajektorii naprężeń głównych w strefie zakotwień, rozróżnia się następujące typy uszkodzeń:

1. soczewkowe pęknięcia pod zakotwieniem wewnątrz betonu na skutek rozciągania w kierunku poprzecznym do kierunku działania siły nacisku,

2. pęknięcia powierzchni betonu pomiędzy grupami zakotwień,

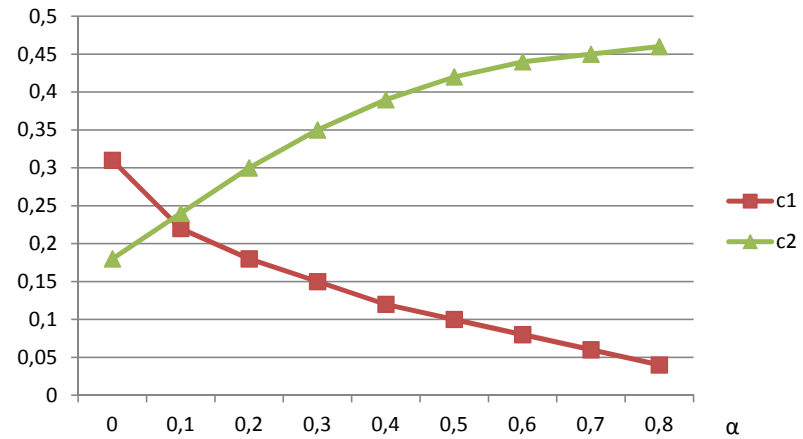
3. odłupanie naroży elementu.

Pierwszy z wymienionych sposobów zniszczenia jest głównym obiektem zaleceń w zakresie zbrojenia biernego, przekazywanych przez producenta systemu sprężania. Należy podkreślić, że każdy rodzaj zakotwień kabli sprężających – pochodzący od określonego producenta – na swój sposób obciąża strefę zakotwień, prowokując specyficzny rozkład naprężeń. Stąd wynika konieczność określenia dla każdego typu zakotwień stosownego zbrojenia wgłębnego, zarówno w zakresie jego mocy (średnica pręta), jak i geometrii (średnica spirali i dodatkowych wkładek lub innego zbrojenia oraz ich skok / rozstaw). Z punktu widzenia nośności strefy zakotwień na siły rozciągające wgłębne, podawane przez producenta parametry mają charakter zaleceń minimalnych. Analiza statyczna strefy zakotwień pozwala określić wymaganą ilość oraz rozkład zbrojenia wgłębnego tej strefy również według zasad ogólnych, które zakładają ortogonalny układ zbrojenia.

Projektowanie zbrojenia wgłębnego strefy zakotwień w postaci alternatywnej dla wkładek zalecanych przez dokumentację systemu sprężania opiera się na teorii Guyona (opisanej m.in. w [3]) lub metodzie Strut-and-Tie. Metody te pozwalają wyznaczyć wielkości oraz lokalizacje wypadkowych wgłębnych sił rozrywających.

Metoda Guyona pozwala wyznaczyć poszukiwane wielkości na podstawie współczynników c_1 i c_2 , których wielkość zależy od proporcji pomiędzy szerokością obciążonej powierzchni (szerokość zakotwienia a) i szerokością obszaru rozdziału obciążenia h . Wykres przedstawiony na rycinie 3 ilustruje przebieg wartości współczynników w zależności od α , gdzie $\alpha = a/h$.

Siła wewnętrzna rozrywająca ma wartość zależną od wartości siły przykładanej do powierzchni betonu F_d . Dla utrzymania



Ryc. 3. Wartości współczynników c_1 i c_2 do określania sił wgłębnych w strefie zakotwień

odpowiedniego bezpieczeństwa elementu z uwagi na ewentualne błędy wykonawcze lub awarie urządzeń siłę tę przyjmuje się jako równą pełnej nośności kabla. Określa się siły dla dwóch prostopadłych kierunków w przekroju, y i z . Siła wgłębna rozciągająca dla kierunku y jest wówczas określana z uwzględnieniem liczby kabli w jednej linii n z wzoru:

$$N_y = c_1 n F_d$$

a głębokość występowania wypadkowej siły rozrywającej określa się dla tego kierunku jako $b_y = c_2 h$. Dla kierunku z obliczenia wykonuje się analogicznie. Potrzebną powierzchnię zbrojenia określa się przy założeniu stosunkowo wysokiego wyężenia stali zbrojeniowej, według [3] może to być 90% jej nośności. Obliczona w ten sposób powierzchnia dla obu kierunków pozwala ukształtować siatki ortogonalne, które z uwagi na lokalizację wypadkowych sił powinny mieć zmienny kształt w zależności od ich lokalizacji.

Stosowanie zbrojenia spiralnego o wymiarach zgodnych z zaleceniami dokumentacji systemu pozwala zrezygnować z obliczeń zbrojenia wgłębnego. Należy jednak podkreślić, że zalecenia producenta wymagają określonej wytrzymałości betonu pod zakotwieniem. Priorytet szybkiego postępu robót może w praktycznym przypadku prowadzić do skrócenia okresu dojrzenia betonu przed sprężeniem. Taka decyzja może mieć negatywny wpływ na nośność strefy pod zakotwieniami.

Rozciąganie betonu pomiędzy grupami zakotwień wymaga każdorazowo zaprojektowania odpowiedniego zbrojenia tej strefy. Zakłada się, że siła rozciągająca o kierunku linii łączącej grupy zakotwień koncentruje się przy powierzchni betonu, stąd odpowiednie zbrojenie ma postać siatek przypowierzchniowych. Rozciąga-

jąca siła określana jest według Guyona z wzoru:

$$N_{cy} = 0,42 \frac{0,5h - a}{h - a} (nF_d + mF_d)$$

gdzie n i m są liczbą zakotwień w każdej z grup.

Zbrojenie z uwagi na odłupanie naroża przekroju w sąsiedztwie zakotwień określone jest dla siły określonej z wzoru

$$N_n = 0,03nF_d$$

Zbrojenie to powinno być ułożone w niewielkiej odległości od powierzchni betonu, powinno wzmacniać naroże na całej szerokości grupy zakotwień i być odpowiednio zakotwione poza strefą naprężeń narożnych.

Uszkodzenia strefy zakotwień występują w zasadzie wyłącznie w chwili sprężania, ale dostęp ograniczony do powierzchni betonu powoduje, że ewentualne uszkodzenia wgłębne betonu mogą być niewidoczne. Jest to dodatkowy argument przemawiający za utrzymaniem warunku minimalnej wytrzymałości betonu na ściskanie, podanej w dokumentacji systemu w chwili naciągu kabli.

Literatura

[1] PN-EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Eurokod 2. *Projektowanie konstrukcji z betonu*. Cz. 1-1. *Reguły ogólne i reguły dla budynków*.

[2] *Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006.

[3] Ajdukiewicz A., Mames J.: *Konstrukcje z betonu sprężonego*. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Kraków 2008.

