

dr inż. Rafał Tews¹⁾

Stany graniczne nośności i użytkowania stalowo-betonowych belek z częściowym zespoleniem

Ultimate limit states and serviceability limit states steel-concrete beams with partial shear connection

DOI: 10.15199/33.2015.05.18

(Artykuł przeglądowy)

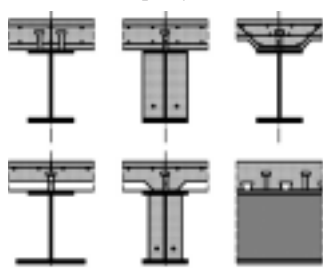
Streszczenie. W artykule omówiono sposób określania obliczeniowej plastycznej nośności przekroju belki zespolonej przy częściowym zespoleniu. Przedstawiono sposób dokładnego obliczenia nośności przekroju dla danego stopnia zespolenia. Jednocześnie pokazano, możliwe do zastosowania w obliczeniach inżynierskich, podejścia uproszczone, dające dobre oszacowanie nośności. Przedstawiono także sposób wyznaczenia przemieszczeń belki częściowo zespolonej. Zastosowanie przedstawionych w artykule zależności pokazano na przykładach.

Słowa kluczowe: konstrukcje zespolone, częściowe zespolenie, plastyczna nośność przekroju.

Zgodnie z definicją podaną w PN-EN 1994-1-1 [1] belka zespolona to element zespolony poddany głównie zginaniu. W tym przypadku mamy do czynienia z zespoleniem stalowego żebra w postaci kształtownika walcowanego lub spawanego z płytą betonową (rysunek 1). Norma [1] zaleca stosowanie pełnego zespolenia. Jednak w przypadku belek stosowanych w budynkach dopuszcza wystąpienie częściowego zespolenia.

Stan graniczny nośności

Ogólne wymagania stanu granicznego nośności. Obliczeniową nośność przekroju belki zespolonej na zginanie wyznacza się, zależnie od klasy stalowego żebra, zgodnie z PN-EN 1993-1-1. Oznacza to, że belki z kształtownikami klasy 1 i 2 oblicza się, stosując teorię sztywno-plastyczną, natomiast w przypadku obecności kształtowników klasy 3 i 4 w zakresie sprężystej ich pracy [2]. Wykorzystując kształtowniki walcowane jako żebra stalowe, najczęściej stosuje się do obliczeń model plastyczny. Główne założenia dla tego modelu zostały przedstawione w normie [1] i mogą być użyte do określania nośności belek z pełnym lub częściowym zespoleniem.



Rys. 1. Typowe przekroje poprzeczne belek zespolonych wg [1]
Fig. 1. Typical cross sections of composite beams according to [1]

Częściowe zespolenie belki.

Częściowe zespolenie belek jest dozwolone pod warunkiem stosowania łączników zespalających o odpowiedniej ciągliwości. Szczegółowe wymagania podano w normie [1] w pkt 6.6.1.2. Stosując łączniki spełniające te kryteria, należy zadbać o zapewnienie minimalnego stopnia zespolenia, wynoszącego:

$$\eta = N_c / N_{c,f} \geq 0,4 \quad (1)$$

¹⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; e-mail: rtews74@utp.edu.pl

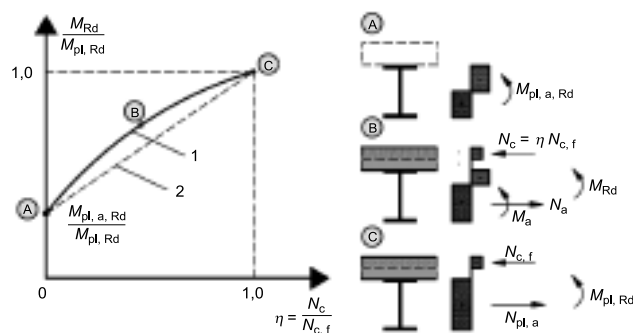
Abstract. In the article there is the methods of computing plastic bending resistance of beam with partial shear connection are presented. The accurate method of computing plastic bending resistance for given degree of shear connection is described. The article contains the simplification method, that is possible to use in engineering calculations, that gives good estimation of bending resistance. There is also presented the method of deflection computing for beams with partial shear connection. Application of presented formulas was shown on examples.

Keywords: composite structures, partial shear connection, plastic bending moment resistance.

gdzie: N_c – maksymalna siła przenoszona przez łączniki; $N_{c,f}$ – siła graniczna w płycie betonowej.

Obok warunku (1) norma wprowadza dodatkowe zapisy ograniczające minimalne zespolenie zależnie od rozpiętości belki i rodzaju zastosowanego kształtownika.

Plastyczna nośność na zginanie przekroju częściowo zespolonego. Stosując łączniki sworzniowe o odpowiedniej ciągliwości, nośność obliczeniową przekroju belki można określić z zastosowaniem teorii sztywno-plastycznej. Należy jednak pamiętać o ograniczeniu maksymalnej siły ściskającej w płycie betonowej, do wartości wynikającej z określonego wskaźnika zespolenia [1]. Zatem nośność obliczeniowa belki zależy od stopnia jej zespolenia. Tę zależność można zobrazować na wykresie (krzywa ABC) (rysunek 2). Zgodnie z normą [1] nośność belki przy częściowym zespoleniu można obliczać, stosując dwa podejścia. Pierwsze z nich obrazowane krzywą ABC (rysunek 2) można nazwać metodą dokładną, w anglojęzycznej literaturze nazywanej „equilibrium method”. Polega ona na budowaniu równań równowagi wypadkowych naprężeń w granicznym stanie pracy przekroju dla założonych warunków.

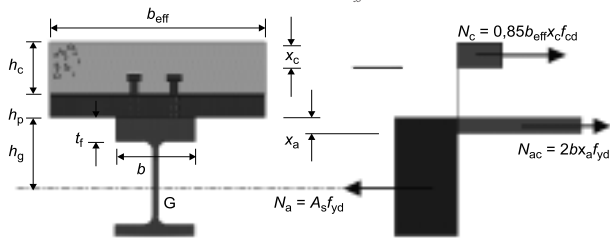


Rys. 2. Wykres zależności między nośnością obliczeniową a stopniem zespolenia

Fig. 2. The relationship between bending resistance and degree of shear connection

ków (rysunek 3). Z warunku równowagi wypadkowych naprężeń można wyznaczyć zasięg strefy ściskanej:

$$x_c = (N_c / 0,85b_{eff}f_{cd}) \quad (2)$$



Rys. 3. Rozkład naprężeń plastycznych w przekroju częściowo zespolonym wg [3]

Fig. 3. Plastic stress distribution for partial shear connection according to [3]

Zasięg naprężeń ściskających w pasie kształtownika można zapisać jako:

$$x_a = (N_a - N_c) / 2b f_{yd} \quad (3)$$

Obliczeniową nośność przekroju na zginanie określa się następująco:

$$M_{Rd} = N_a \left(\frac{h_g + h_c + h_p}{2} \right) - N_{ac} \left(\frac{x_a + h_c + h_p}{2} \right) - N_c \frac{x_c}{2} \quad (4)$$

gdzie: h_g – odległość do osi kształtownika; h_c – grubość płyty betonowej; h_p – wysokość fałdy blachy.

W przypadku kształtowników walcowanych zależność (8) można uprościć, wprowadzając założenie $x_a \ll h_c + h_p$. Otrzymuje się zatem:

$$M_{Rd} = N_a h_g + 0,85b_{eff} x_c f_{cd} \left(h_c + h_p - \frac{x_c}{2} \right) \quad (5)$$

Można też zastosować metodę uproszczoną, polegającą na liniowej interpolacji nośności między wartościami określonymi dla pełnego zespolenia i bez zespolenia. Opisuje to linia prosta AC (rysunek 2). W tym przypadku nośność obliczeniową można zapisać w postaci:

$$M_{Rd} = M_{a,Rd} + \frac{N_c}{N_{c,f}} (M_{pl,Rd} - M_{a,Rd}) \quad (6)$$

gdzie:

$M_{a,Rd}$ – plastyczna nośność na zginanie kształtownika;

$M_{pl,Rd}$ – plastyczna nośność na zginanie belki przy pełnym zespoleniu.

Dobrą aproksymację nośności obliczeniowej belki zespolonej przy częściowym zespoleniu uzyskuje się, stosując zmodyfikowaną zależność opisującą nośność na zginanie przekroju stalowego z udziałem siły podłużnej [4]:

$$M_{Rd} = N_c \left(\frac{h_g}{2} + h_p + \frac{h_c}{2} \right) + 1,11 M_{a,Rd} \left(1 - \frac{N_c}{N_a} \right) \quad (7)$$

Zależność (7) uzyskano przy założeniu, że relacja pola przekroju pasa do całkowitego pola przekroju kształtownika wynosi około 0,4. W przypadku innych relacji korzystniej jest użyć następującej zależności podanej w [2]:

$$M_{Rd} = N_c \left(\frac{h_g}{2} + h_p + \frac{h_c}{2} \right) + \frac{1}{1 - 0,5 \frac{A_a - 2A_f}{A_a}} M_{a,Rd} \left(1 - \frac{N_c}{N_a} \right) \quad (8)$$

gdzie: A_a – pole przekroju kształtownika; A_f – pole przekroju pasa.

Stan graniczny użytkowania

Ugięcia belek zespolonych rosną, gdy wystąpi poślizg łączników sworzniowych. W przypadku elementów podpartych montażowo, z kształtownikami klasy 1 i 2, w których do zespolenia użyto łączników sworzniowych, przystos ugięcia z uwagi na częściowe zespolenie można wyrazić za pomocą zależności:

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1 + 0,5(1 - \eta) \left(\frac{\delta_a}{\delta_c} - 1 \right) \quad (9)$$

natomiast w przypadku elementów niepodpartych montażowo przystos ugięć określa się następująco:

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1 + 0,3(1 - \eta) \left(\frac{\delta_a}{\delta_c} - 1 \right) \quad (10)$$

gdzie:

η – wskaźnik zespolenia;

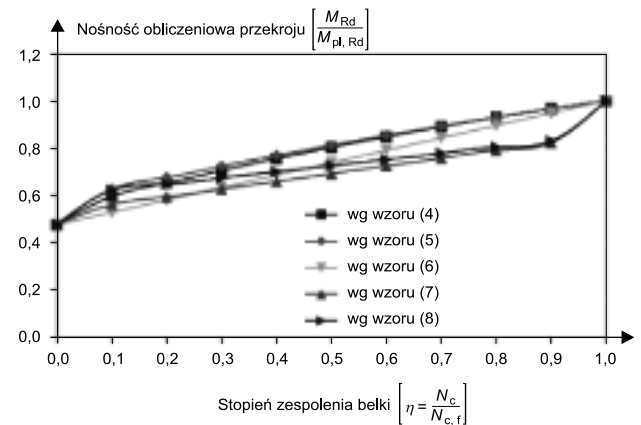
δ_a – ugięcie samego kształtownika stalowego;

δ_c – ugięcie belki zespolonej przy pełnym zespoleniu.

Różnica w zależnościach (9) i (10) wynika z większych sił w łącznikach sworzniowych w przypadku konstrukcji podpartych montażowo.

Analiza wybranych przypadków

Stosując zależności (4 ÷ 7), określono nośności belek z częściowym zespoleniem, dla różnych stopni zespolenia. W obliczeniach założono płytę pełną grubości $h_c = 120$ mm z betonu C20/25 oraz kształtowniki ze stali S275. Obliczenia przeprowadzono dla czterech typów kształtowników walcowanych. Na rysunku 4 przedstawiono wykres obrazujący zależność między nośnością obliczeniową przekroju M_{Rd} a stopniem zespolenia belki dla wybranego przypadku.



Rys. 4. Wykres zależności między nośnością M_{Rd} a stopniem zespolenia belki z kształtownikiem IPE 300

Fig. 4. The relationship between bending resistance and degree of shear connection in beam with steel section IPE 300

Wnioski

Przedstawione w artykule przykłady pokazują dobre, z punktu widzenia obliczeń inżynierskich, przybliżenie rzeczywistej nośności uzyskiwane przy zastosowaniu metod uproszczonych. Należy jednak zwrócić uwagę, że podawana w literaturze [3] zależność (7) w niektórych przypadkach prowadzi do zaniżenia nośności nawet poniżej bezpiecznej aproksymacji liniowej. Szczególnie fakt ten uwidacznia się dla belki z kształtownikami IPE i IPN przy stopniu zespolenia belki w granicach 0,7÷1,0.

Literatura

- [1] PN-EN 1994-1-1:2008 Eurokod 4: Projektowanie konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [3] Johnson R. P., Anderson D., Designers' guide to EN1994-1-1 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Thomas Telford, Wielka Brytania, 2004.
- [4] Schleich J. B., Mathieu J., Conan Y., Design Handbook for Braced Composite Steel-concrete Buildings according to Eurocode 4, ECCM, Luxembourg, 1999.

Otrzymano 30.01.2015 r.