

Zagadnienie ścinania w żelbetowych belkach zespolonych o przekroju teowym

Łukasz Jabłoński

*Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Lubelska, l.jablonski@pollub.pl*

Streszczenie: Artykuł przedstawia dane literaturowe dotyczące zagadnienia ścinania w belkach żelbetowych zespolonych o przekroju teowym – ich pracy w strefach przypodporowych oraz styku. Na wstępie przedstawiono gdzie w praktyce budowlanej występują elementy zespolone o przekroju teowym. Następnie przeanalizowano sposoby ustalania parametrów geometrycznych (według zaleceń normowych [12,14]) przekrojów teowych w belkach monolitycznych oraz belkach zespolonych ze stykiem nierozwarstwionym lub zarysowanym. W celu opanowania istoty zagadnienia przestudiowano literaturę [6,7,8,9] oraz normy [12,13] w zakresie ścinania w strefach przypodporowych oraz między środkiem a półką jednorodnych przekrojów teowych. Przechodząc do rozpoznania *meritum* zagadnienia skoncentrowano się na: ścinaniu w styku między prefabrykatem a betonem monolitycznym, pracy stref przypodporowych zginanych belek zespolonych oraz uzupełniono wiadomości o ścinaniu w stropach gęsto żebrowych [3,5,12,14,15,16]. Na zakończenie zrelacjonowano najistotniejsze badania w aspekcie ścinania i pracy styku belek zespolonych o przekroju teowym [3,4,10,11] oraz wyprowadzono wnioski dla badań własnych.

Słowa kluczowe: żelbetowe belki zespolone, ścinanie, praca podporowa, przekrój teowy.

1. Wprowadzenie

Konstrukcyjne elementy zespolone powstają w wyniku celowego dobrania i połączenia elementów składowych wykonanych z materiałów o różnych parametrach wytrzymałościowo-odkształceniowych tak, aby zoptymalizować cechy użytkowe uzyskanego elementu. W całkowitej nośności elementu zespolonego ma udział każdy z elementów składowych.

Żelbetowe elementy zespolone łączą ponadto zalety prefabrykatów i betonu monolitycznego, uciążliwego ustrój. Jednakże, powszechnie występujące żelbetowe elementy belkowe i płytowo-belkowe składające się z prefabrykatów uzupełnionych betonem monolitycznym, postrzegane są jako zespolone głównie w opracowaniach teoretycznych. Ze względu na to, że wiele zagadnień pracy statycznej takich elementów jest jeszcze nierozpoznanych, w praktyce projektowej często pomija się fakt zespolenia, przyjmując, że całe obciążenie przejmuje albo prefabrykat albo beton monolityczny. Jednym z mało rozpoznanych zagadnień jest, tzw. ścinanie w belkach zespolonych o przekroju teowym – ich praca w strefach przypodporowych oraz w styku.

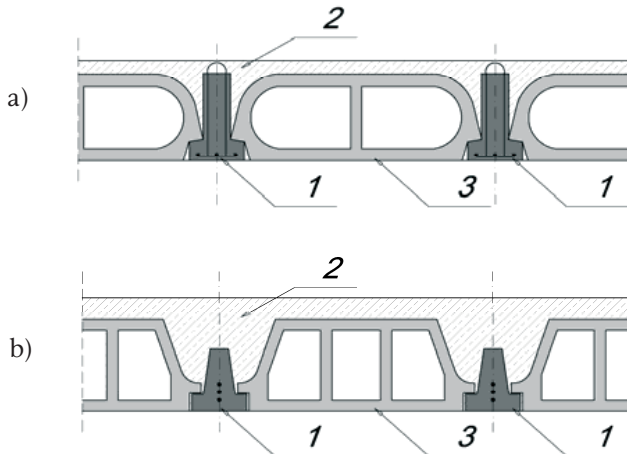
Poniżej przedstawione zostaną dane literaturowe dotyczące tego zagadnienia, jako pierwszy etap prac własnych.

2. Żelbetowe elementy zespolone o przekrojach teowych w praktyce budowlanej

Elementy zespolone o przekroju teowym występują najczęściej w konstrukcjach stropów, stropodachów i mostów.

Stropami o teowych, zespolonych elementach belkowych są popularne stropy gęstożebrowe, składające się z (Rys. 1):

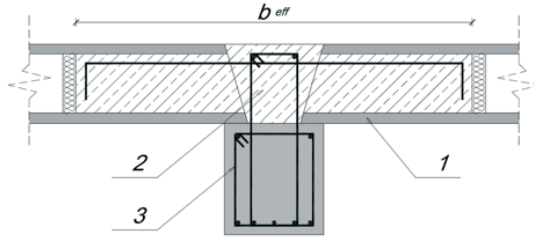
1. prefabrykowanego - żelbetowego lub sprężonego żebra, będącego głównym elementem belki zespolonej (stanowi on zwykle część środknika i pas dolny belki zespolonej),
2. betonu monolitycznego (tzw. nadbetonu) stanowiącego półkę górną belki zespolonej, czasem też uzupełnienie jej środknika,
3. pustaków, wypełniających przestrzeń pomiędzy żebrami.



Rys. 1. Przykładowe zespolone stropy gęstożebrowe (opis w tekście): a) strop DZ, b) strop z belką sprężoną RECTOR [17].

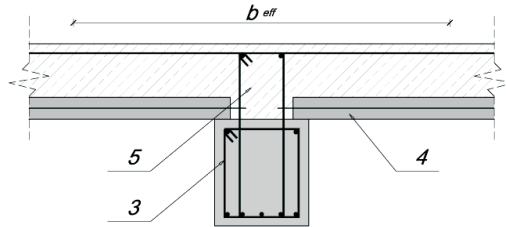
Fig. 1. Examples of composite rib-and-slab floor (legend in text): a) DZ floor, b) RECTOR floor with prestressed concrete beam [17].

Belki zespolone powstają też w konstrukcjach stropów, gdy na prefabrykowanej lub monolitycznej belce oparte są stropy prefabrykowane lub półprefabrykowane, monolityzowane wieńcem. Przykładem są belki, na których oparto płyty kanałowe (Rys. 2) lub też płyty stropu deskowego potocznie nazywanego „filigran” (Rys. 3).



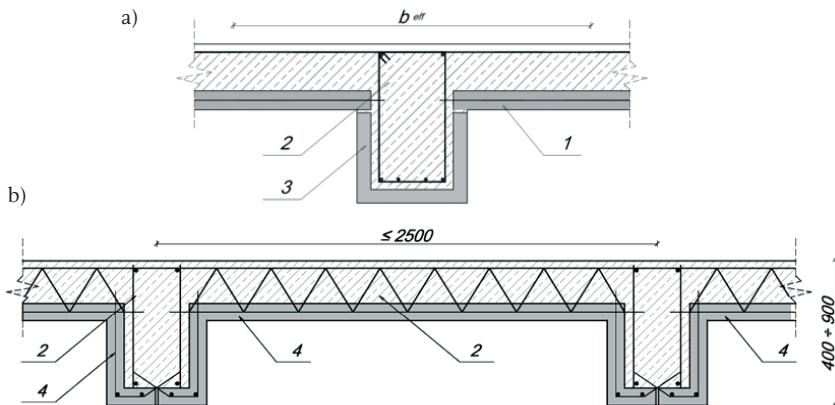
Rys. 2. Belka zespolona o przekroju teowym utworzona przez prefabrykowaną lub monolityczną belkę oraz monolityczny wieniec i częściowo wypełnione betonem monolitycznym fragmenty płyt kanałowych 1 – płyta wielokanałowa, 2 – beton uzupełniający (wieniec i częściowe wypełnienie kanałów), 3 – belka stropowa.

Fig. 2. T-sectional composite beam create by precast or cast in place beam and cast in place rim and partially filled hollow-core slabs: 1 – hollow-core slab, 2 – cast in place component (rim and hollow core slab's partially filling), 3 – floor beam.



Rys. 3. Belka zespolona o przekroju teowym utworzona przez prefabrykowaną lub monolityczną belkę oraz płyty prefabrykowane stropu deskowego „filigran” i beton uzupełniający: 3 – belka stropowa, 4 – płyta stropu deskowego, 5 – beton monolityczny.

Fig. 3. T-sectional composite concrete beam create by precast or cast in place beam and precast board of “filigran” floor and cast in place component: 3 – floor beam, 4 – slab of board floor, 5 – cast in place component.

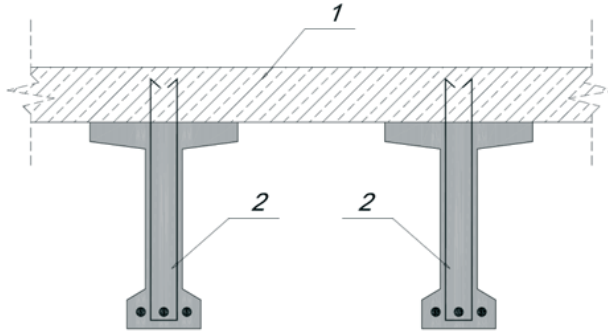


Rys. 4. Stropy zespolone z prefabrykatami traktowanymi jako „deskowanie tracone” [9]: a) z rozdzielnymi prefabrykatami kształtującymi belkę i płytę, b) z prefabrykatami scalonymi (strop ABE): 1 – prefabrykowany element płytowy stropu, 2 – beton uzupełniający, 3 – prefabrykowana u-kształtna belka, 4 – prefabrykat scalony typu ABE.

Fig. 4. Composite floors with prefabricated unit as a “lose boarding” [9]: a) with separate precast beam and slab unit, b) with self-contained unit (ABE floor): 1 – precast slab component, 2 - cast in place component, 3 – precast U-beam, 4 – ABE type self-contained unit.

Mniej popularne są stropy zespolone, w których prefabrykaty stanowią „deskowanie tracone” zarówno płyt jak i belek. W stropach takich prefabrykaty mogą być rozłącznymi „deskowaniami traconymi” płyty i belki (Rys. 4a), lub scalonymi elementami płytowo-belkowymi (Rys. 4b) [9].

Zespolone elementy belkowe występują również w mostownictwie. Przykład zespolonych belek mostowych pokazano na Rys. 5 [1].



Rys. 5. Zespolone elementy mostowe [1]: 1 – płyta monolityczna, 2 – dźwigar prefabrykowany.
Fig. 5. Bridge composite elements [1]: 1 – cast in place slab, 2 – precast girder.

3. Przekrój teowy i jego parametry geometryczne

3.1. Ustalenie parametrów geometrycznych jednorodnego przekroju teowego

Sprawdzając stan graniczny nośności na zginanie żeber (belek) w stropie płyto-żebrowym, zgodnie z EC2 [12], w przypadku obciążenia momentami dodatnimi, uznaje się, że część płyty przylegająca bezpośrednio do żebra współpracuje z nim w przenoszeniu tych momentów, tworząc przekrój teowy. Na szerokości pasma płyty współpracującego z żebrzem naprężenia przyjmują wartość stałą. Szerokość płyty współpracującej z żebrzem (tzw. szerokość efektywna) określona jest z warunku jednakowych ugięć płyty stropowej pracującej w kierunku prostopadłym do żeber i żebra współpracującego z pasmem płyty o zastępczej szerokości.

Na długości odcinka belki o niezmiennym znaku momentu zginającego – l_0 , przy założeniu równomiernych naprężeń, przyjmuje się stałą wartość szerokości współpracującej (Rys. 6b). Efektywna szerokość b_{eff} zależy od szerokości środniczki b_w , rozpiętości przęsła, rodzaju podparcia i obciążenia (Rys. 6a):

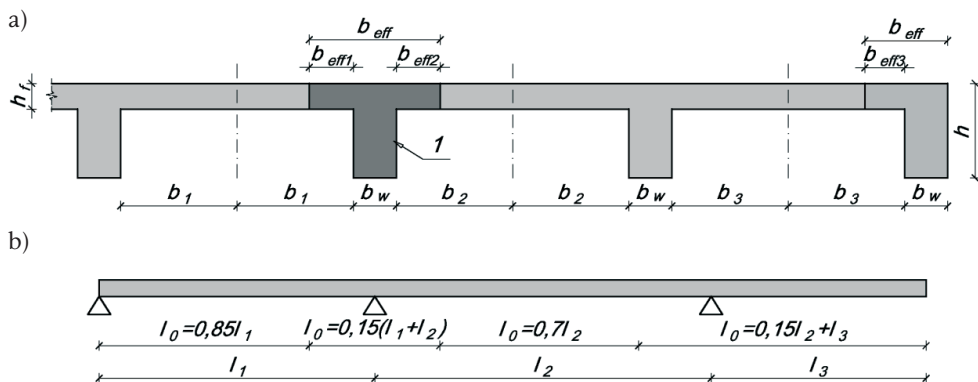
$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \quad (1)$$

przy czym szerokość efektywna po jednej stronie środniczki jest równa:

$$b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \quad (2)$$

gdzie: l_0 – odległość między punktami zerowymi momentów, b_i – połowa rozpiętości płyty w świetle podpór.

W przypadku, gdy obciążenia siłami skupionymi są większe niż pozostałe całkowite obciążenia belki, szerokość współpracującą należy zmniejszyć o 20%.



Rys. 6. Określenie szerokości współpracującej w belkach teowych [8]: a) oznaczenia, b) długość l_0 między punktami zerowych momentów: 1 - przekrój teowy

Fig. 6. Cooperate width definition of T-sectional beams [8]: a) notations, b) length l_0 between zero points of bending moment: 1 – T-section.

3.2. Ustalenie parametrów geometrycznych zespolonego przekroju teowego

3.2.1. Elementy zespolone z niezarysowanym stykiem

Elementy zespolone winny być tak projektowane, aby w styku między prefabrykatem i betonem monolitycznym zapewnić współpracę. Współpraca ta jest pełna, jeśli styk między prefabrykatem a betonem monolitycznym pozostaje niezarysowany aż do zniszczenia elementu [3]. W takim przypadku do określania szerokości efektywnej można stosować wyrażenia (1) i (2).

Szczegółowe zasady określania szerokości efektywnej stropów gęstożebrowych podano w normach dotyczących takich stropów [14]. W przypadku, gdy żebra są zespolone z udziałem prefabrykatów żelbetowych lub sprężonych, szerokości te należy ustalać następująco:

a) w stropach z płytą monolityczną układaną nad prefabrykatami i z niewspółpracującym wypełnieniem (pustakami) b_{eff} jest równe odległości między osiami sąsiadujących prefabrykatów (Rys. 7a),

b) w stropach zespolonych, w których pustaki współpracują z belkami i uzupełniającym betonem, przy czym współpraca ta nie jest poparta wynikami badań (Rys. 7b, c):

$$b_{eff} = b_0 + 0,33b_1 \quad (3)$$

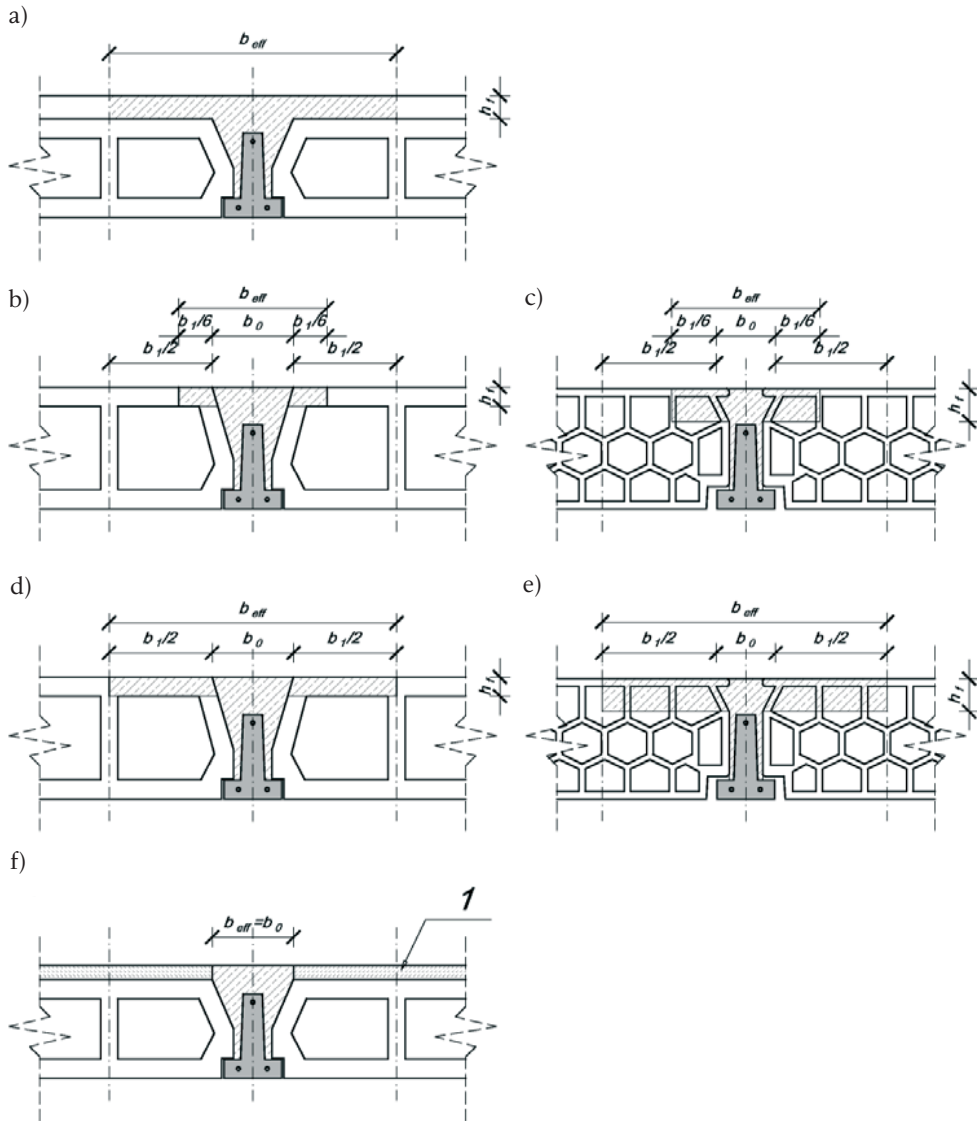
c) w stropach zespolonych, w których pustaki w pełni współpracują z belkami i uzupełniającym betonem, co jest potwierdzone badaniami (Rys. 7d, e):

$$b_{eff} = b_0 + b_1 \quad (4)$$

d) w stropach, w których beton uzupełniający wypełnia jedynie przestrzeń między pustakami (Rys. 7f):

$$b_{eff} = b_0 \quad (5)$$

We wzorach (3÷5) b_o oznacza szerokość betonu uzupełniającego mierzoną w poziomie górnej krawędzi pustaka, a b_1 – szerokość górnej krawędzi pustaka współpracującego.



Rys. 7. Sposób określania szerokości współpracującej b_{eff} w stropach gęstożebrowych o żebrach zespolonych (opis w tekście): 1 – warstwa wyrównująca [9].

Fig. 7. Method for cooperate width definition b_{eff} of rib-and-slab floor (legend in text): 1 – set off layer [9].

3.2.2. Szerokość efektywna belek zespolonych w przypadku zarysowania styku

W pracy [3] dokonano klasyfikacji mechanizmów zniszczenia belki zespolonej. Najbardziej korzystnym jest model belki quasi-monolitycznej, gdy zapewniona

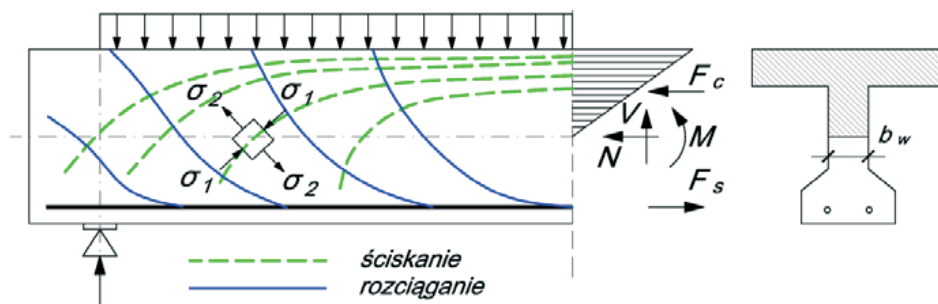
jest pełna współpraca w styku (zasady określania szerokości efektywnej w takim przypadku podano w p. 3.2.1).

Jednak przy niedostatecznej przyczepności, styk może ulec zarysowaniu. Może być ono lokalne lub może zająć na dłuższym odcinku (delaminacja). Delaminacja oznacza, że elementy składowe – prefabrykat i beton monolityczny zaczynają pracować oddzielnie i do takiej sytuacji nie należy dopuścić już na etapie projektowania poprzez odpowiednie kształtowanie parametrów styku [3]. Natomiast sytuacja lokalnego zarysowania styku jest dopuszczalna, choć po lokalnym zarysowaniu zmienia się szerokość rozwarcia rysy ukośnej i nośność strefy przypodporowej na ścinanie [3]. Brak jest danych literaturowych, jak fakt lokalnego zarysowania należy uwzględnić obliczając szerokość efektywną belki.

4. Ścinanie w przekrojach przypodporowych jednorodnych belek o przekroju teowym

4.1. Ścinanie w jednorodnych przekrojach teowych

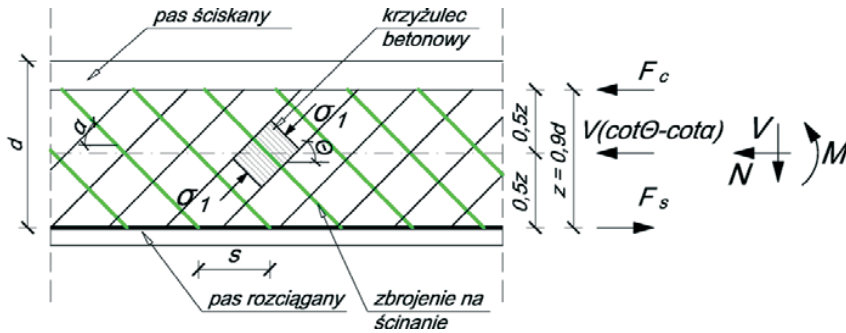
Problem tzw. ścinania w belkach żelbetowych występuje głównie w strefach przypodporowych, gdzie wartość siły poprzecznej jest największa oraz w miejscach występowania znacznych sił skupionych. Wiąże się to z występowaniem w tych strefach głównych naprężeń rozciągających (Rys. 8) [7].



Rys. 8. Trajektorie naprężeń głównych w zginanej belce swobodnie podpartej [7].

Fig. 8. Stress lines in simple-supported bending beam [7].

O ile w środku rozpiętości belki naprężenia główne mają kierunki zgodne z osiami belki, to przy podporach kierunki te są nachylone do osi (Rys. 8). Konsekwencją jest powstanie, w miarę wzrostu obciążenia, rysy ukośnych w okolicach podpory. Do chwili powstania rysy ukośnej naprężenia wywołane ściskaniem przenoszone są przez beton oraz zbrojenie podłużne. Po powstaniu rysy ukośnej, schemat pracy i trajektorie naprężeń ulegają zmianie. W klasycznych modelach zakłada się, że główną rolę zaczynają odgrywać strzemiona, pręty odgięte oraz beton ściskany. Pomija się natomiast wpływ betonu w strefie rozciąganej pomiędzy rysami oraz odkształceń poprzecznych zbrojenia. Istotę zachowania się elementu przy ścinaniu prezentują tzw. modele kratownicowe elementów ścinanych (Rys. 9) [7].



Rys. 9. Model kratownicowy elementów ścinanych [12].

Fig. 9. Truss model of shearing elements [12].

Podstawowym parametrem wpływającym na nośność belki teowej na ścinanie jest szerokość średnika b_w . Występuje ona w normowych wyrażeniach opisujących zarówno nośność betonowych krzyżulców rozciąganych:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (6)$$

jak i nośność betonowych krzyżulców ściskanych:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta - \tan \theta} \quad (7)$$

w których: f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna wyrażona w [MPa], d – wysokość użyteczna przekroju, ρ_l – stopień zbrojenia przekroju, k , k_1 , $C_{Rd,c}$ – współczynniki pomocnicze określone wg EC2[12], σ_{cp} – naprężenia ściskające od siły normalnej N_{Ed} , b_w – najmniejsza szerokość strefy rozciąganej przekroju, α_{cw} – współczynnik zależny od stanu naprężeń w pasie ściskany, v_1 – współczynnik redukcji wytrzymałości betonu zarysowanego przy ścinaniu, z – ramię sił wewnętrznych, θ – kąt nachylenia ściskanych krzyżulców betonowych do osi belki,

Sposób ustalania szerokości średnika b_w podano na rys. 10 [12]. Dodatkowe zalecenia dotyczą ustalania szerokości średnika w belkach sprężonych. Są one następujące:

- gdy średnik zawiera zainiektowane kanały z osłonami metalowymi o średnicy $\varphi > b_w/8$, to nośność na ścinanie wylicza się na podstawie nominalnej grubości średnika:

$$b_{w,nom} = b_w - 0,5 \sum \varphi \quad (8)$$

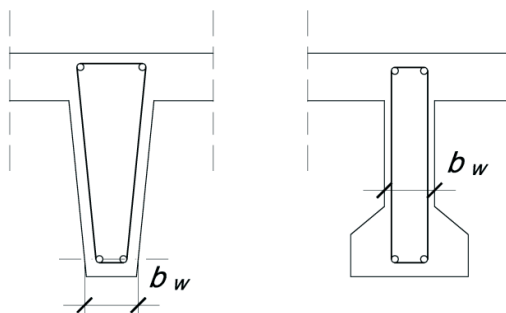
- gdy średnik zawiera zainiektowane kanały z osłonami metalowymi o średnicy $\varphi \leq b_w/8$, to

$$b_{w,nom} = b_w \quad (9)$$

- jeśli średnik zawiera nie iniektowane kanały, kanały zainiektowane z osłonami z tworzyw sztucznych lub cięga bez przyczepności to:

$$b_{w,nom} = b_w - 1,2 \sum \varphi \quad (10)$$

gdzie φ – zewnętrzna średnica kanału, a $\Sigma\varphi$ określana jest na najbardziej niekorzystnym poziomie.

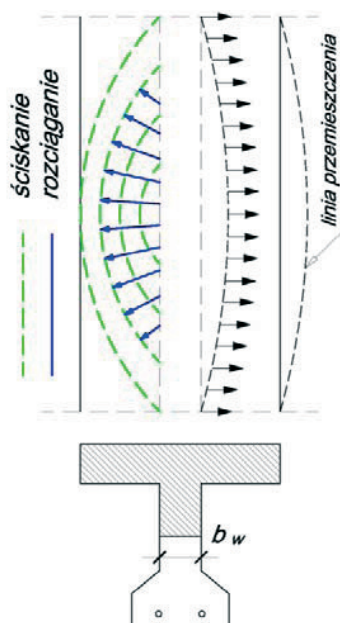


Rys. 10. Ustalanie szerokości środnika przy sprawdzaniu przekroju teowego na ścianie według EC2 [12].

Fig. 10. Method for web's width definition in vertical shear verification according to EC2 [12].

4.2. Ścinanie między środnikiem a półką

W elementach o przekroju teowym kombinacja siły poprzecznej i momentu zginającego powoduje powstawanie naprężeń ścinających między środnikiem a półką. Trajektorie naprężeń głównych i linie przemieszczenia półki pokazano na Rys. 11.

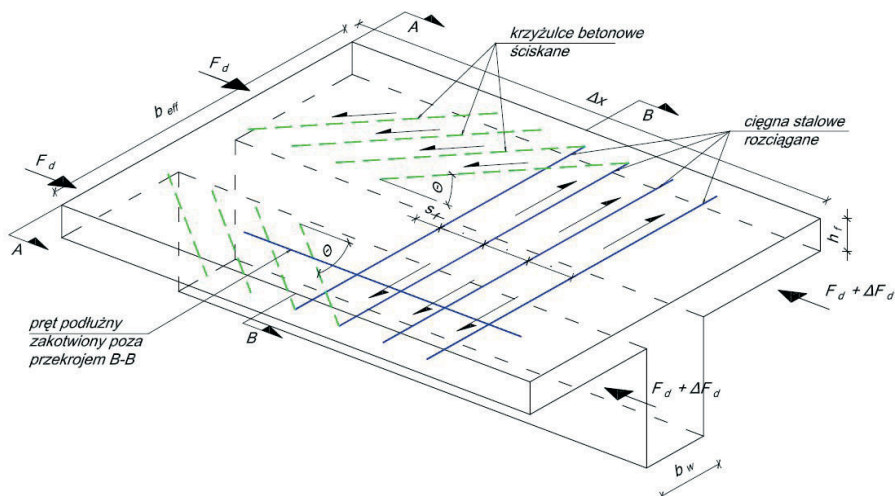


Rys. 11. Trajektorie naprężeń głównych w półce belki żelbetowej [7].

Fig. 11. Stress lines of concrete beam flange [7].

Widoczne jest, że płyta ma tendencję do odpajania się od środnika, czemu powinno przeciwdziałać dodatkowe zbrojenie płyty ułożone prostopadle do osi belki. W celu rozwiązania tego problemu przyjmuje się model kratownicy zastępczej

czej, w której półkę traktuje się jak zespół ściskanych krzyżulców betonowych połączonych cięgnami w postaci zbrojenia rozciąganego (Rys. 12) [7].



Rys. 12. Model kratownicowy ścinania między półką a środnikiem belki żelbetowej [11].
Fig. 12. Truss model of shearing between flange and web concrete beam [11].

Model obliczeniowy [12,8] przyjęty jest tak jak w przypadku ścinania belek o przekroju prostokątnym. Wymagane jest zatem, aby w krzyżulcach betonowych umownej kratownicy zostały spełnione warunki stanu granicznego nośności na ściskanie, natomiast w krzyżulcach stalowych na rozciąganie. Aby właściwie zabezpieczyć styk belki z płytą, należy ponadto doprowadzić do spełnienia warunków dotyczących minimalnego stopnia zbrojenia. W belkach teowych rolę krzyżulców stalowych spełniają zwykle strzemiona, a w stropach płytowo-belkowych – zbrojenie górne płyty nad belką [7].

W celu określenia warunków nośności wg EC2 [12], rozpatruje się podłużne naprężenia styczne v_{Ed} w płaszczyźnie styku między jedną stroną półki i środnikiem, których wartość określa się przez zmianę nominalnej siły podłużnej ΔF_d na długości Δx rozpatrywanej części półki zgodnie ze wzorem:

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f \Delta x} \quad (11)$$

gdzie: h_f – grubość półki w miejscu połączenia ze środnikiem, Δx – rozpatrywana długość, ΔF_d – zmiana siły normalnej na długości Δx .

Za maksymalną wartość Δx można przyjmować połowę odległości pomiędzy przekrojem, w którym moment jest równy zero, a przekrojem, w którym moment przyjmuje wartość maksymalną. Jeżeli występują obciążenia skupione, to odległość Δx nie powinna przekroczyć odległości między tymi obciążeniami.

Zmiana nominalnej siły podłużnej jest równa:

$$\Delta F_d = \frac{M_{Ed}}{z} \frac{b_{eff,1}}{b_{eff}} \quad (12)$$

gdzie: M_{Ed} – moment występujący w rozważanym przekroju w połowie odcina x , $b_{eff,v}/b_{eff}$ – stosunek określający proporcjonalną siłę przypadającą na jedną stronę żebra, z – ramię sił wewnętrznych.

Jeżeli naprężenia v_{Ed} nie przekraczają $0,4f_{ctm}$, to dodatkowe zbrojenie – poza potrzebnym ze względu na zginanie, nie jest wymagane. W przeciwnym przypadku należy przewidzieć dodatkowe zbrojenie zespalające półki ze środkami żebra, którego przekrój na jednostkę długości można określić ze wzoru:

$$\frac{A_{sf} f_{yd}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta} \quad (13)$$

gdzie: θ – kąt nachylenia ściskanych krzyżulców betonowych do osi belki, f_{yd} – obliczeniowa granica plastyczności zbrojenia zespalającego, A_{sf} – pole przekroju zbrojenia zespalającego, s_f – rozstaw zbrojenia zespalającego.

Zmiażdżeniu ściskanych krzyżulców w półce zapobiega się, spełniając warunek:

$$v_{Ed} \leq v f_{cd} \sin \theta \cos \theta \quad (14)$$

gdzie: v – współczynnik redukcji wytrzymałości betonu zarysowanego przy ścinaniu, f_{cd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie.

5. Ścinanie w strefach przypadkowych belek zespolonych

5.1. Ścinanie w styku między prefabrykatem a betonem monolitycznym

Istnienie w belce zespolonej styku elementów składowych jest istotnym czynnikiem wpływającym na pracę statyczną i nośność elementów zespolonych. Styk jako strefa nieciągłości betonowania jest najsłabszym miejscem w elemencie. Jako taki narażony jest na zarysowania pod wpływem występujących tu naprężeń ścinających, co wpływa na możliwość spełnienia stanów granicznych nośności i użytkowości belki jako całości. Dlatego w EC2 [12] zalecono sprawdzenie dodatkowego stanu granicznego - stanu granicznego nośności styku. Stan ten, zapisany jest za pomocą wyrażenia:

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi} \quad (15)$$

w którym naprężenia styczne w styku v_{Edi} nie mogą przekroczyć nośności tego styku v_{Rdi} .

Naprężenia w styku są wprost proporcjonalne do siły poprzecznej v_{Ed} działającej w analizowanym przekroju:

$$v_{Edi} = \beta \frac{V_{Ed}}{z b_i} \quad (16)$$

gdzie: β – stosunek siły podłużnej działającej na przekrój poprzeczny nowego betonu do całej siły podłużnej, działającej w rozważanym przekroju, V_{Ed} – siła poprzeczna, b_i – szerokość płaszczyzny zespolenia, z – ramię sił wewnętrznych w przekroju zespolonym.

Nośność styku traktuje się jako jednostkową, wyrażoną w jednostkach naprężeń. Uwzględnia ona wytrzymałość betonu na rozciąganie, charakter powierzchni łączonych materiałów, tarcie oraz zjawisko „shear friction”:

$$v_{Rdt} = cf_{ctd} + \mu\sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (17)$$

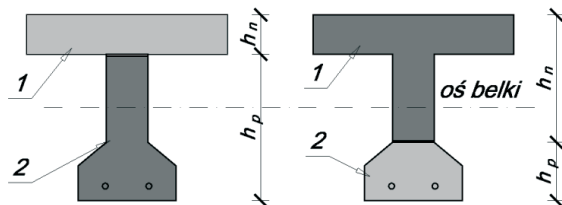
gdzie: c i μ – współczynniki zależne od szorstkości płaszczyzny styku, f_{ctd} – obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie betonu, σ_n – naprężenia normalne do powierzchni styku, ρ – stopień zbrojenia styku, α – kąt nachylenia zbrojenia sztywającego do powierzchni styku, f_{yd} – obliczeniowa granica plastyczności zbrojenia sztywającego.

5.2. Ścinanie w strefach przypodporowych belek zespolonych

Praca statyczna belek zespolonych uzależniona jest od dwóch podstawowych czynników.

Wiodącym czynnikiem jest tu różnica cech łączonych materiałów, wpływająca na rozkład naprężeń na wysokości elementu i w konsekwencji na wartości sił wewnętrznych, szerokość rys i ugięcia. Prace badawcze analizujące zespolenie dwóch betonów o różnym module sprężystości potwierdzają wpływ zespolenia na pracę statyczną elementu zarówno w środku rozpiętości jak i w strefach przypodporowych [3].

Drugim czynnikiem jest istnienie styku między łączonymi elementami składowymi. Występujące tu naprężenia ścinające i fakt, że jest to strefa słabsza niż łączone elementy powoduje, że styk jest potencjalnym miejscem zarysowania, zmniejszającego nośność i możliwość spełnienia stanów granicznych użytkowości belki zespolonej [3].



Rys. 13. Zasada rozpatrywania elementów przy sprawdzaniu ścinania w elementach zespolonych wg [13]; 1 – nadbeton, 2 – prefabrykat.

Fig. 13. Element consideration rule in shear verification of composite elements [13]; 1 – cast in place component, 2 – precast component.

Dotychczas brak jest jasnych uregulowań normowych dotyczących obliczania nośności na ścinanie w strefach przypodporowych elementów zespolonych. Ogólnie stosowano zasadę, że całą siłę ścinającą przenosi jeden ze składników przekroju zespolonego o nośności na ścinanie obliczanej zgodnie z normą PN [13,5]: gdy płaszczyzna styku znajdowała się powyżej głównej osi belki, w projektowaniu na ścinanie rozpatrywano jedynie element dolny, gdy płaszczyzna styku znajdowała się poniżej osi – element górny (Rys. 13) [5].

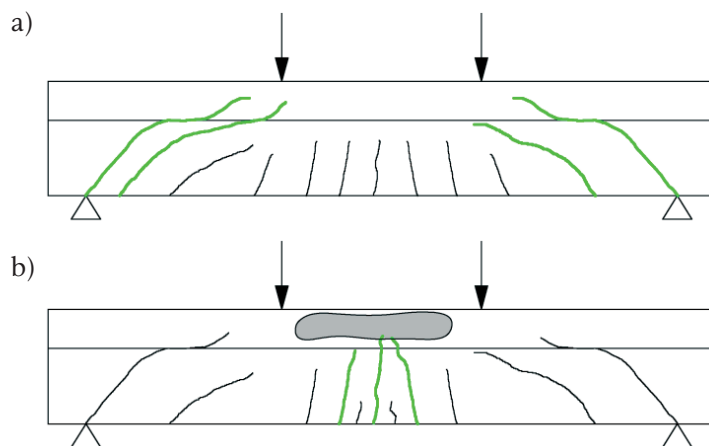
Odmienne zalecenia co do obliczania żelbetowych elementów zespolonych na ścinanie zawarto w normie ACI [16], w której wymaga się aby element zachował niezależnie:

- poziomą nośność na ścinanie w styku, równoznaczną z brakiem delaminacji,
- pionową nośność na ścinanie sprawdzaną według ogólnych zasad w/w normy dotyczących ściennia tak, jakgdyby cały przekrój był monolityczny [16].

W normie EC2 [12] uznano nośność styku za stan graniczny, co oznacza przyjęcie założenia, że osiągnięcie nośności styku równoznaczne jest z osiągnięciem nośności belki, bez analizowania stanów pośrednich. W pracy [3] wykazano jednakże, że istotna dla pracy belki jest faza zarysowania styku – zarysowanie to bowiem, nawet jeśli występuje lokalnie, zwiększa szerokość rozwarcia rys ukośnych redukując nośność belki na ścinanie.

W pracy [3] dokonano analizy mechanizmów zniszczenia zespolonych belek żelbetowych i stwierdzono, że już na etapie projektowania należy niedopuszczać sytuacji, kiedy najpierw pojawia się rysa w styku, a dopiero później rysa ukośna. To właśnie w takich belkach możliwe jest zniszczenie przez przekroczenie nośności styku. Zalecono natomiast, aby dopuszczać jedynie dwa przypadki:

- belki quasi-monolitycznej, w której zniszczenie następuje jak w belce monolitycznej na zginanie lub ścinanie bez zarysowania styku,
- belki, w której styk podlega lokalnemu rozwarstwieniu, a zniszczenie następuje przez przekroczenie nośności na zginanie lub ścinanie, przy czym nośność na ścinanie jest mniejsza niż w belkach quasi-monolitycznych.



Rys. 14. Obraz zniszczenia belki z lokalnie rozwarstwionym stykiem według [3]: a) zniszczenie w wyniku przekroczenia nośności na ścinanie w strefach przypodporowych, b) zniszczenie w wyniku przekroczenia nośności na zginanie.

Fig. 14. Destruction image of beam with locally delaminated contact surface [3]: a) failure in vertical shear mode of support zone, b) failure in flexure of midspan.

Podstawowym kryterium zapewniającym zniszczenie zgodne z jednym z wyżej wymienionych przypadków jest według [3] wzajemna relacja siły rozwarstwiającej styk $V_{Rd,j(cr)}$ i siły powodującej powstanie rys ukośnych $V_{Rd,w(cr)}$ zapisana w postaci warunku:

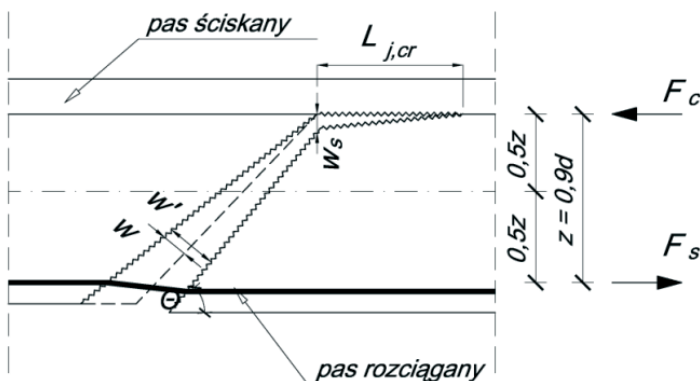
$$V_{Rd,w(cr)} \leq V_{Rd,j(cr)} \quad (18)$$

gdzie $V_{Rd,w(cr)}$ – siła poprzeczna, przy której powstaje pierwsza rysa ukośna, $V_{Rd,j(cr)}$ – siła poprzeczna, przy której wystąpi rozwarstwienie styku.

W przypadku lokalnego zarysowania styku powstająca pod wpływem działania naprężeń rozwarstwiających rysa w styku może być traktowana jak fragment rysy ukośnej strefy podporowej. Po przekroczeniu określonej długości lokalnej L_{cr} propaguje ona w beton „nowy” pod kątem wynikającym ze stanu naprężeniowo-odkształceniowego. Wartość naprężeń stycznych przenoszonych przez rysę ukośną, w wyniku zazębienia kruszywa, zależy od szerokości jej rozwarcia „ w ” (im rozwarłość rysy większa tym wartość graniczna jest mniejsza) obliczanej jako iloczyn odkształceń ϵ i rozstawu między rysami ukośnymi $S_{r,max}$, zwiększonej o szerokość rozwarcia rysy w styku w_s (Rys. 15). Ostateczna szerokość rysy ukośnej jest równa [3]:

$$w' = w + \frac{w_s}{\cos \theta} \quad (19)$$

A zatem, jeśli styk rozwarstwi się lokalnie, następuje zwiększenie szerokości rysy ukośnej, w wyniku czego maleje efektywność zazębienia się kruszywa w rysie. Strzemioma stopniowo włączają się do współpracy, a wzrastająca szerokość rysy spowoduje ich uplastycznienie, co oznacza osiągnięcie nośności na ścinanie.



Rys. 15. Wpływ rozwarcia rysy w styku na szerokość rozwarcia rysy ukośnej [3].

Fig. 15. Influence horizontal to slant cracking [3].

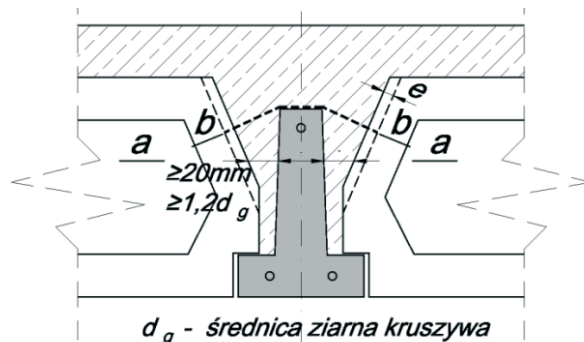
5.3. Ścinanie w stropach gęstożebrowych

Tradycyjnie, przy obliczaniu stropów gęstożebrowych zakładano, że siłę poprzeczną przejmuje jedynie prefabrykowana belka stropowa (bez uwzględnienia betonu uzupełniającego przy jej krawędziach) lub belka poszerzona o połowę grubości ścianki pustaka z obu stron w przypadku, gdy pustaki współpracowały w przenoszeniu naprężeń ściskających [9]. W normie [15] zalecono, aby do obliczeń nośności przyjmować szerokość belki, w domyśle – prefabrykowanej, w 1/3 wysokości liczonej od dołu przekroju.

Norma europejska [14] wymaga, aby nośności na ścinanie stropów z belkami prefabrykowanymi żelbetowymi i sprężonymi sprawdzać w dwóch przekrojach. W przekroju pierwszym ($a-a$), usytuowanym jak na Rys. 16, sprawdza się nośność

na ścinanie samej belki prefabrykowanej. Natomiast w przekroju drugim (*b-b*), przebiegającym poprzez styk belki i betonu uzupełniającego oraz najmniejszy odcinek łączący górną krawędź belki i ściankę pustaka, sprawdza się nośność na ścinanie betonu uzupełniającego. Szerokość przekroju *b-b* zwiększyć można o wartość $2e$, przy czym wartość e wynosi :

- 1 *cm*, gdy wypełnienie wykonano z współpracujących pustaków betonowych lub ceramicznych,
- 3 *cm*, gdy wypełnienie stanowią pełne elementy betonowe,
- 0 *cm*, inne przypadki (wypełnienie z tworzyw sztucznych).



Rys. 16. Ustalanie szerokości obliczeniowej żeber stropów gęstożebrowych przy sprawdzaniu na ścinanie według [14]: a-a przekrój, w którym sprawdza się nośność na ścinanie belki prefabrykowanej; b-b przekrój, w którym sprawdza się nośność na ścinanie betonu uzupełniającego.

Fig. 16. Method for web's width definition of rib-and-slab floor in vertical shear verification according to [14]: a-a section in shear verification of precast beam, b-b section in shear verification of cast in place component.

Nośność na ścinanie żeber stropów gęstożebrowych wg [14] zapisana jest w postaci wyrażenia:

$$V_{Rd,1} = 0,03 f_{ck} b z \quad (20)$$

w którym f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna odpowiednio prefabrykatu oraz betonu uzupełniającego, b – długość przekroju odpowiednio „a-a” i „b-b”, z – ramię sił wewnętrznych.

Jeśli spełniony jest warunek $V_{Ed} < V_{Rd,1}$ oraz zbrojenie dolne belek prefabrykowanych jest prawidłowo zakotwione na podporze, norma [14] pozwala na zastosowanie wyłącznie konstrukcyjnego zbrojenia poprzecznego belek wg zaleceń EC2 [12]. W przypadku, jeśli nośność $V_{Rd,1}$ została przekroczona konieczne jest zbrojenie poprzeczne żeber obliczone wg zasad EC2 [12].

Tu należy zwrócić uwagę, że w EC2 [12] podano zalecenia jedynie dla przekrojów monolitycznych, tak więc *de facto* obliczanie nośności na ścinanie belek w stropach gęstożebrowych jest obliczeniem elementu monolitycznego o ustalonej w określony sposób geometrii. W normie europejskiej dotyczącej stropów gęstożebrowych [14] nie wprowadzono konieczności sprawdzenia stanu granicznego nośności styku prefabrykowanych belek stropowych i nadbetonu, co oznacza nieścisłość założeń norm [12] i [14].

6. Dotychczasowe badania i analizy żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym uwzględniające ścinanie i pracę styku

W literaturze przedmiotu znaleźć można niewiele prac dotyczących zagadnienia ścinania w żelbetowych elementach zespolonych.

Najobszerniejszym opracowaniem podejmującym tematykę pracy stref podporowych belek zespolonych jest studium [3], jednak dotyczy ono głównie zginanych elementów o przekroju prostokątnym. Tym niemniej wyprowadzone tu wnioski można rozszerzyć na szerzej rozumiane zginane elementy zespolone. Dotyczy to w szczególności wniosku: „... strefy przypodporowe żelbetowych elementów zespolonych rozpatrywać należy kompleksowo z uwzględnieniem istnienia styku pomiędzy łączonymi elementami...”

Badania nośności na ścinanie i przemieszczenia w styku belek zespolonych składających się z prefabrykowanej belki w kształcie odwróconej litery *T* monolityzowanej betonem ze stropowymi płytami kanałowymi zrelacjonowano w pracy [10]. Autorzy traktowali płyty stropowe oparte na belce jako jej pośrednie obciążenie i porównywali zachowanie się tak obciążonej belki z analogiczną belką (o identycznych gabarytach, powstałą z zespolenia prefabrykatu i nadbetonu) obciążonej bezpośrednio. Przeprowadzono badania na czterech typach belek – pierwszy bez zbrojenia zszywającego, drugi i trzeci o stopniu zbrojenia równym 0,11% odpowiednio o strzemionach zamkniętych i otwartych oraz czwarty o stopniu zbrojenia równym 0,22% o strzemionach zamkniętych. Trzy pierwsze typy belek zniszczyły się przez rozwarstwienie styku łączonych elementów, pod większym obciążeniem niż w przypadku mniejszego stopnia zbrojenia zszywającego. W czwartej belce wystąpiła propagacja rysy ukośnej w strefę ściskania i wyczerpanie nośności betonu w strefie ściskania przez zginanie. Autorzy wykazali, że nośność na ścinanie obciążonych pośrednio belek jest niższa (od 3% do 11%) w stosunku do obliczonych według normy ACI [16]. Wykazali też, że kształt strzemion zszywających (to, czy są one zamknięte, czy otwarte) wpływa nieznacznie na nośność analizowanych belek na ścinanie, pod warunkiem prawidłowego ich zakotwienia w obydwu łączonych elementach.

Zagadnienie współpracy płyt kanałowych z belkami prefabrykowanymi podjęto także w pracy [4]. Zawarto tu opis planowanych badań, mających jednak na celu nie ocenę nośności na ścinanie, a jedynie określenie stopnia zespolenia oraz szerokości współpracującej kanałowych płyt stropowych z prefabrykowanym podciągami żelbetowym. Podczas analizy literatury nie natrafiono na kontynuację tematu, a w szczególności na relacje z tych badań.

Badania strunobetonowych dźwigarów SBSFF – 90/18, stanowiących podstawowe elementy nośne zespolonych przekryć dachowych zrelacjonowano w pracy [11]. W pierwszych badaniach zniszczenie dźwigarów w przekroju ukośnym przy podporze poprzedzone było rozwarstwieniem styku, co przypisano nieprawidłowemu zakotwieniu zbrojenia poprzecznego. Po zmianie zbrojenia poprzecznego poprzez poprawienie zakotwienia zniszczenie nastąpiło przez wyczerpanie nośności strefy ściskanej dźwigarów. Wyprowadzono wniosek, że prawidłowo kształtując styk i jego zbrojenie uzyskać można pełną redystrybucję sił wewnętrznych w teowych zginanych elementach zespolonych i ich quasi-monolityczne zachowanie bez względu na historię obciążenia.

7. Wnioski dla badań własnych

Pomimo tego, że zginane betonowe elementy zespolone są często stosowane w praktyce, brak jest ścisłych reguł dotyczących obliczania ich na ścinanie.

Rozbieżności występują nawet w zaleceniach normowych: norma ACI [16] zaleca sprawdzanie nośności na ścinanie takich elementów jak elementów monolitycznych, podczas gdy norma dotycząca belek stropów gęstożebrowych wymaga, aby siła ścinająca były przenoszona niezależnie przez prefabrykat i beton uzupełniający.

Niewiele jest danych literaturowych na temat ścinania w elementach zespolonych o przekroju teowym, zarówno, jeśli chodzi o relacje z badań jak i o analizy teoretyczne. W świetle wyników analiz [3] dotyczących ścinania betonowych belek zespolonych o przekroju prostokątnym, można postawić hipotezę, że podobne zależności występują w przypadku elementów o przekroju teowym, a więc, że można dopuścić lokalne zarysowanie styku pod warunkiem uwzględnienia wynikającej stąd redukcji nośności na ścinanie. Udowodnienie takiej hipotezy wymagać będzie:

- badań laboratoryjnych na belkach zespolonych o przekroju teowym, w których szczególna uwaga zostanie zwrócona na określenie siły rysującej styk i jej relacji do siły powodującej rysę ukośną oraz nośności na ścinanie,
- analizy numerycznej badanych belek uwzględniającej parametry styku,
- analizy numerycznej przypadków występujących w praktyce (stropy gęstożebrowe, płyty kanałowe na podciągach), również w aspekcie ścinania między środkiem a półką.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A., Mames J., *Konstrukcje z betonu sprężonego*, Polski Cement, Kraków 2004.
- [2] Dyduch K., Ajdukiewicz A., *Konstrukcje zespolone w budownictwie ogólnym i przemysłowym*, Materiały V Konferencji naukowej „Konstrukcje zespolone”, Zielona Góra 1999, str. 29-48.
- [3] Halicka A., *Studium stanu naprężeń i odkształceń w płaszczyźnie styku i strefie przyporowej elementów zespolonych z udziałem betonów skurczowych i ekspansywnych*, Wydawnictwo uczelniane, Lublin 2007.
- [4] Jarząbek L., Kłapoć M., Marcinowski J., *Stopień zespolenia prefabrykowanych płyt stropowych z podciągami. Program badań i wstępne symulacje numeryczne*, Materiały T.VII „Konstrukcje zespolone”, Zielona Góra, str. 179-189.
- [5] Król M., Halicka A., Tur W., *Konstrukcje zespolone z udziałem betonu zwykłego i ekspansywnego*, Wydawnictwo uczelniane, Lublin 1997.
- [6] Łapko A., Jansen B. CH., *Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych*, Arkady, Warszawa 2005.
- [7] Praca zbiorowa: *Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2* (pod redakcją Majewskiego Z.), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006.
- [8] Starosolski W., *Konstrukcje Żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych tom 1*, wydanie 13, PWN, Warszawa 2011.
- [9] Starosolski W., *Konstrukcje Żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych tom 2*, wydanie 13, PWN, Warszawa 2011.

- [10] Tan K. H., Guan L. W., Lu X., Lim T. Y., *Horizontal Shear Strenght of Indirectly Loaded Composite Concrete Beams*, ACI Structural Journal/July-August 1999 str. 533-538.
- [11] Wilczyński R., *Konstrukcje Zespólone*, ITB, str. 193-207.
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008 *Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
- [13] PN-B-03264, 2002: *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [14] PN-EN 15037-1:2008(U) *Prefabrykaty z betonu. Belkowo-pustakowe systemy stropowe. Część 1: Belki (org.)*.
- [15] PN-54/B-03300: *Stropy żelbetowe gęstożebrowe betonowane na miejscu budowy. Wymagania konstrukcyjne i zasady obliczeń statycznych*.
- [16] ACI 318-02, ACI-318R-02: *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- [17] *Przewodnik projektanta systemu stropowego Rectobeton*; materiały firmowe Rector Polska 2010.

Shear problem of T-sectional composite reinforced concrete beams

Łukasz Jabłoński

*Lublin University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture
e-mail: l.jablonski@pollub.pl*

Abstract: The article presents data available in the literature concerning shear problem of composite concrete T-beams - their running in support zone and contact surface. To begin with presented where are in the civil engineering T-sectional composite elements. Following made an analysis of method for geometric buckling (according to standards [12,14]) T-sections of monolithic and composite beams without and with cracked contact surfaces. There were also literature [6,7,8,9] and standards [12,13] studies in field of support zone and between flange and web shearing solid T-beams in order to know the matter. In the essence of problem concentrated on: horizontal shearing in contact surface between precast and cast in place components, running support zone of bending composite beams and complete rib-and-slab floors' sharing data [3,5,12,14,15,16]. At the end reported the most important researches in shearing and running contact surface of composite T-beams [3,4,10,11] also draw a conclusions to my own work.

Keywords: composite reinforced concrete beam, shear, support running, T-sectional cross.