



Badanie i wyznaczenie naprężeń przyczepności betonu do stali zbrojeniowej

PIOTR SMARZEWSKI*, ADAM STOLARSKI

*Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Sanitarnej,
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38 D
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W niniejszej pracy opisano czynniki mające wpływ na przyczepność betonu do stali zbrojeniowej. Przedstawiono podstawowe metody badania i wyznaczania naprężeń przyczepności. Zaprezentowano wyniki badań belek żelbetowych z wycięciem. Wyniki te były podstawą porównania kilku sposobów wyznaczania granicznych naprężeń przyczepności.

Słowa kluczowe: mechanika konstrukcji, konstrukcje żelbetowe, belki, naprężenia przyczepności
Symbole UKD: 624.04

1. Wstęp

Stal zbrojeniowa decyduje o nośności strefy rozciąganej konstrukcji żelbetowej. Duże znaczenie ma również współpraca betonu i stali w przejmowaniu zewnętrznego obciążenia. Pod wpływem przyłożonego obciążenia pręt stalowy i otaczający go beton ulegają temu samemu odkształceniu, co zapobiega nieciągłości odkształceń i rozdzieleniu materiałów. W stali zbrojeniowej moduł sprężystości, granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie są znacznie wyższe niż w betonie, co zwiększa nośność rozciąganej strefy żelbetowego elementu konstrukcyjnego.

Mechanizm współpracy między betonem a stalą zbrojeniową stanowi o istocie żelbetu. Współpraca ta jest zapewniona między innymi dzięki przyczepności, tj. zdolności do przeciwstawienia się wzajemnemu przemieszczeniu stali i otaczającego ją betonu.

Przyczepność zależy głównie od następujących czynników:

- adhezji, czyli wzajemnej reakcji chemicznej przyległych warstw betonu i zbrojenia,
- docisku betonu do pręta stalowego w wyniku skurczu wysychającego betonu,
- ścinania połączenia pomiędzy żeberkami pręta stalowego i betonem,
- tarcia nierówności i żeberk pręta o beton wywołanego przez przesmyczenia prętów rozciąganych,
- odporności na poślizg wywołanej przez tarcie zależne od naprężenia rozciągającego,
- wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie,
- mechanicznego zakończenia prętów poprzez pętle lub haki na odpowiedniej długości zakotwienia,
- średnicy i kształtu pręta oraz układu zbrojenia.

Indywidualny udział poszczególnych czynników w nośności styku jest trudny do ilościowego określenia. W wielu pracach badano doświadczalnie wpływ różnych czynników na przyczepność:

- geometrii i rozmieszczenia zbrojenia, a w szczególności:
 - względnej powierzchni żeberk (Rehm [22], Karlsson [14]),
 - poprzecznego odkształcenia rozciąganych prętów z uwzględnieniem współczynnika Poissona (Gambarova [7]),
 - podłużnego odkształcenia prętów (Mayer, Eligehausen [17]),
 - ułożenia prętów w deskowaniu i kierunku betonowania (Martin, Noakowski [16]),
- długości zakotwienia z uwzględnieniem efektu skali (Soroushian, Choi [24]; Bazant, Li, Thoma [2]),
- rodzaju powierzchni pręta (Morgan [18]) i warunków środowiska z uwzględnieniem:
 - oddziaływania niskiej (Van der Veen [28]) i wysokiej temperatury (Schneider [25]),
 - korozji zbrojenia wywołanej migracją chlorków, siarczanów, dwutlenku węgla i tlenu (Cabrera, Ghoddoussi [3]),
 - powierzchni pręta zardzewiałej, galwanizowanej, smarowanej lub ocynkowanej (Esfahani, Rangan [6], Hamad, Itani [11], Hamad, Mike [12]),
- stanu naprężeń w otaczającym betonie, a przede wszystkim:
 - naprężenia rozciągającego prostopadłego do połączenia na zakład (Reuter, Eligehausen [23]),
 - docisku poprzecznego (Gambarova, Rosati [9]) i naprężenia rozciągającego prostopadłego na długości zakotwienia (Nagatomo, Kaku [19]),

- charakteru obciążenia:
 - zmęczenia (Tepfers [26], Eligehausen [4]),
 - obciążenia cyklicznego (Eligehausen, Popov, Bertero [5]),
- warunków konstrukcyjnych:
 - otuliny betonowej (Gambarova, Rosati, Schumm [10]),
 - ograniczenia poprzecznych odkształceń betonu w sąsiedztwie pręta zbrojeniowego (Huang, Engström, Magnusson [13], Gambarova, Plizzari, Rosati, Russo, Coronelli [8]).

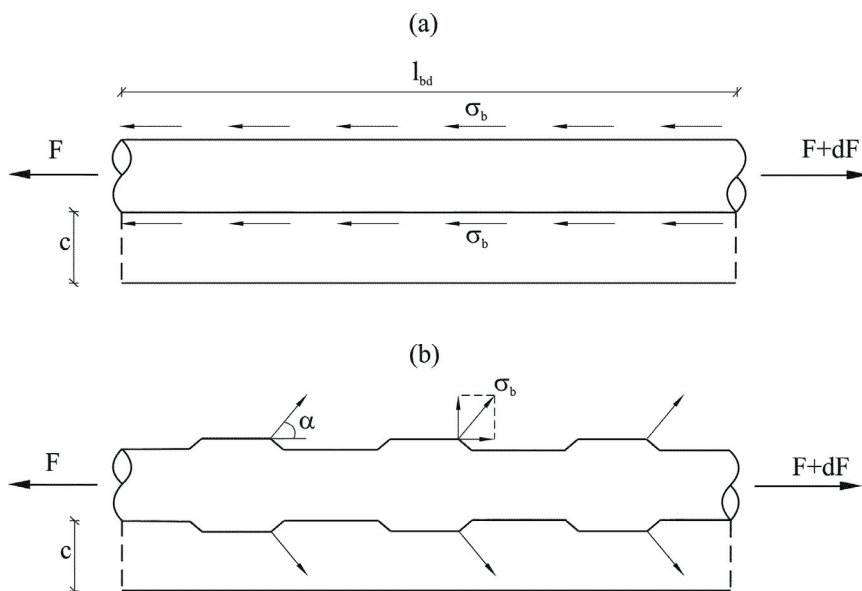
Przegląd ten wskazuje na złożoność problematyki badania naprężeń przyczepności betonu i stali zbrojeniowej w elementach żelbetowych. Jakkolwiek wiele badań poświęcono określeniu przyczepności, mnogość istotnych czynników decydowała o tym, że nie udało się sformułować uniwersalnego modelu opisu tego zjawiska umożliwiającego jednoznaczne wyznaczanie naprężeń przyczepności.

Celem niniejszej pracy jest: (1) prezentacja badań doświadczalnych przeprowadzonych na elementach belkowych z wycięciem; (2) wyznaczenie granicznych naprężeń przyczepności na podstawie mierzonych wydłużeń pręta zbrojeniowego; (3) analiza porównawcza wyników naprężeń przyczepności wyznaczonych na podstawie różnych zależności analitycznych i empirycznych zaczerpniętych z literatury.

2. Mechanizm zniszczenia przyczepności

Klasyczną koncepcję przyczepności oparto na zjawisku adhezji chemicznej. Utratę przyczepności wywołaną przez zniszczenie strefy przylegania uważano za graniczną wytrzymałość wiązania. Słuszność założonej teorii potwierdzono badaniami przyczepności metodą wyciągania z próbki betonowej osiowo zakotwionego gładkiego pręta stalowego.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat rozkładu naprężeń przyczepności wzdłuż pręta zbrojeniowego na długości zakotwienia wyciąganego pręta. Promieniste naprężenia ściskające wywołują powstanie naprężeń rozciągających w betonie i rys podłużnych wzdłuż styku dwóch materiałów. Rodzaj badania i przyjęta koncepcja nośności połączenia okazały się niewłaściwe w belce, w której pręty żebrowane usytuowane są blisko powierzchni. Proces niszczenia przyczepności w tym przypadku ma charakter postępujący i jest spowodowany podłużnym zarysowaniem w wyniku działania naprężeń ściskających rozchodzących się promieniście pod kątem α . Zniszczenie przyczepności następuje w chwili, gdy rysy powstaną na długości zakotwienia pręta. Powyższą teorię przedstawił Östlund [21]. Z kolei Tepfers [26] i Losberg, Olsson [15] stwierdzili, że istotny wpływ na przyczepność betonu do stali ma całkowita długość rozrywania i wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{ct, sp}$.



Rys. 1. Schemat rozkładu naprężeń przyczepności wzdłuż pręta zbrojeniowego na długości zakotwienia: a) pręt gładki; b) pręt żebrowany

Całkowite zniszczenie przyczepności ma charakter etapowy, a jego mechanizm zależy od wielu czynników. Po przyłożeniu rosnącej siły rozciągającej do gładkiego pręta zbrojeniowego osadzonego w betonie pod pewnym obciążeniem następuje zerwanie przyczepności związanej z adhezją chemiczną i z tarcieniem. W wyniku powstania rysy zostaje przerwana ciągłość odkształceń obu materiałów (tzw. przyczepność pierwotna) i pojawia się względny poślizg. Dalsze zwiększanie obciążenia sprzyja powstawaniu kolejnych rys rozchodzących się promieniście od pręta i propagujących się przez otulinę betonową, aż do chwili, gdy nastąpi jej rozerwanie.

W przypadku pręta żebranego równocześnie ujawnia się przyczepność wtórna polegająca na przejmowaniu siły przez beton mechanicznie zazębiający się między żeberkami. Głównymi przyczynami poślizgu prętów żebranych są lokalne zarysowania, kruszenie i poprzeczne pęknięcie otuliny. Zniszczenie przyczepności związane jest ze ścinaniem betonowych wsporników wzdłuż pręta i z lokalizacją rys prostokątnych, które wywołują obojętność kawałków betonu blisko obciążonego końca zakotwionego pręta.

3. Metody badania przyczepności

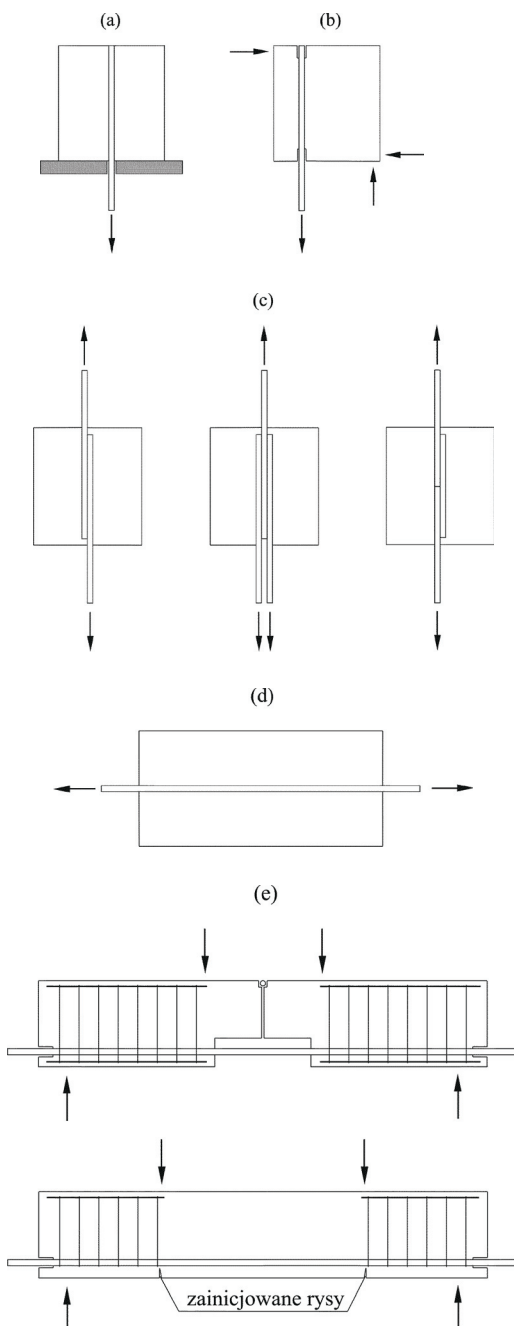
Na rysunku 2 przedstawiono schematyczne wybrane metody badania naprężeń przyczepności.

Osiowa metoda wyciągania pręta „pull-out” jest zalecana przez ASTM jako podstawowa metoda badania przyczepności (rys. 2a). Może być ona stosowana tylko do badań porównawczych betonów o różnych właściwościach lub do oceny jakości styku betonu i prętów stalowych o zróżnicowanej powierzchni i długości zakotwienia. Ograniczenia związane są z innym stanem naprężeń w betonie w próbce badanej metodą „pull-out” i w rzeczywistej konstrukcji. W próbie wyciągania pręta beton jest ściskany, a pręt rozciągany, podczas gdy w belkach i płytach zarówno pręt, jak i otaczający beton są poddane tym samym naprężeniom. Mimośrodową metodę „pull-out” przedstawioną na rysunku 2b opracowano w celu lepszego odwzorowania rozkładu naprężeń przyczepności w belkach. Metody wrywania pręta i metody nakładkowe „lap test” (rys. 2c) są przeważnie stosowane w badaniach przyczepności w strefie zakotwienia, połączeń na zakład lub w celu uwzględnienia naprężeń normalnych występujących na końcach belek.

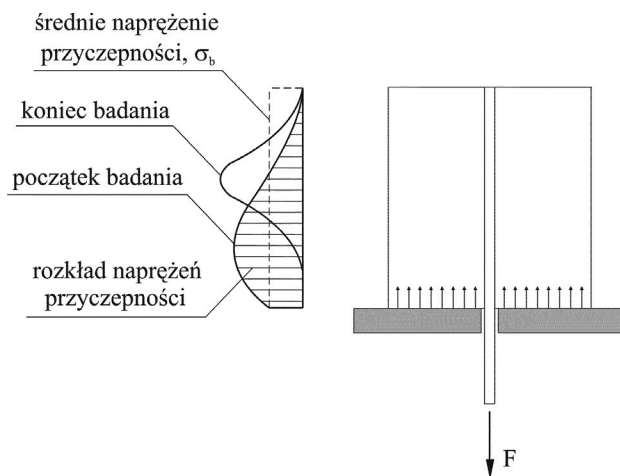
W metodzie „embedded-rod test”, czyli rozciągania osiowo osadzonego pręta, liczba rys, ich szerokość i rozstaw na różnych poziomach obciążenia są miarą rozkładu naprężeń przyczepności. Model zilustrowany na rysunku 2d lepiej odwzorowuje postępujący rozwój szerokości rysy w belkach, który prowadzi ostatecznie do poślizgu pręta i zniszczenia elementu. Naprężenia w stali (maksymalne w rysie, minimalne w połowie odległości pomiędzy rysami) są głównym parametrem w analizie odkształceń zarysowanych zbrojonych belek betonowych. Ustalenie ich jest niezbędne w analizie szerokości rys oraz ugięć elementów żelbetowych. Naprężenia betonu w rysach są zerowe, ale pomiędzy nimi beton ma udział w przenoszeniu naprężeń rozciągających. Próbę można uznać za podstawową metodę badania średniego naprężenia przyczepności i całkowitego poślizgu prętów zbrojeniowych pomiędzy rysami w obszarze występowania stałego momentu w belkach betonowych poddanych obciążeniom użytkowym.

Metody badania belek służą do pomiaru naprężeń przyczepności, które odnoszą się do rozciągania przy zginaniu z uwzględnieniem ścinania (rys. 2e). Strzemiona stawiają opór poprzecznym odkształceniom betonu otaczającego pręt. Zapobiegają one tym samym zarysowaniu elementu, powiększając wartość wytrzymałości przyczepności i jednocześnie odzwierciedlają rzeczywiste warunki pracy elementu konstrukcyjnego.

Niezależnie od przyjętej metody badania powinna ona modelować w sposób jak najbardziej dokładny rzeczywisty stan elementu konstrukcyjnego i odzwierciedlać cechy przyczepności elementu w różnych warunkach obciążenia. Rozkład naprężeń przyczepności w próbie osiowego wyciągania pręta pokazano na rysunku 3.

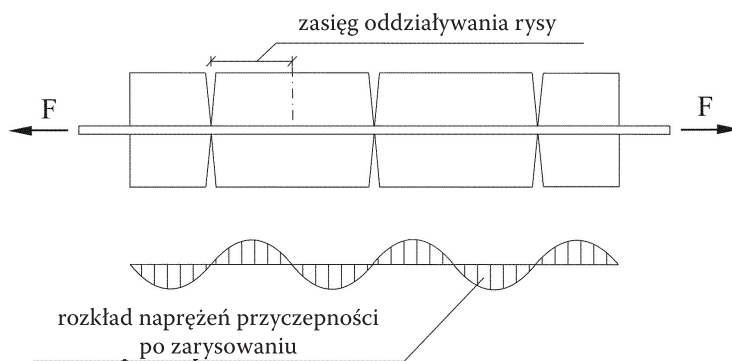


Rys. 2. Metody badania przyczepności: a) próba osiowa „pull-out”; b) próba mimośrodowa „pull-out”; c) różne próby „lap test”; d) próba osiowo osadzonego rozciąganego pręta „embedded-rod test”; e) różne próby zginanych belek — „beam test”



Rys. 3. Rozkład naprężeń przyczepności w metodzie osiowej „pull-out”

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład naprężeń przyczepności w próbie rozciągania osiowo pręta obetonowanego. Ilość, szerokość i rozstaw rys na różnych etapach obciążenia są miarą rozwoju naprężeń przyczepności. Rozkład naprężeń dokładniej odwzorowuje zachowanie belek jako postępujący proces zarysowania, który prowadzi do przyrostu szerokości rys pierwotnych, pojawienia się rys wtórnych, poślizgu pręta zbrojeniowego i ostatecznie do zniszczenia belki.



Rys. 4. Rozkład naprężeń przyczepności w metodzie „embedded-rod”

4. Wyznaczanie naprężeń przyczepności

Obliczenia długości zakotwienia i połączenia prętów na zakład można przeprowadzać na dwa sposoby. Pierwszy polega na wyznaczeniu granicznych naprężeń przyczepności i jest zalecany przez obowiązującą polską normę dotyczącą projektowania konstrukcji betonowych, żelbetowych i sprężonych. Drugi polega na wyznaczeniu na podstawie półempirycznych wzorów nośności kotwionego zbrojenia. Takie podejście jest preferowane w przepisach amerykańskich ACI [1].

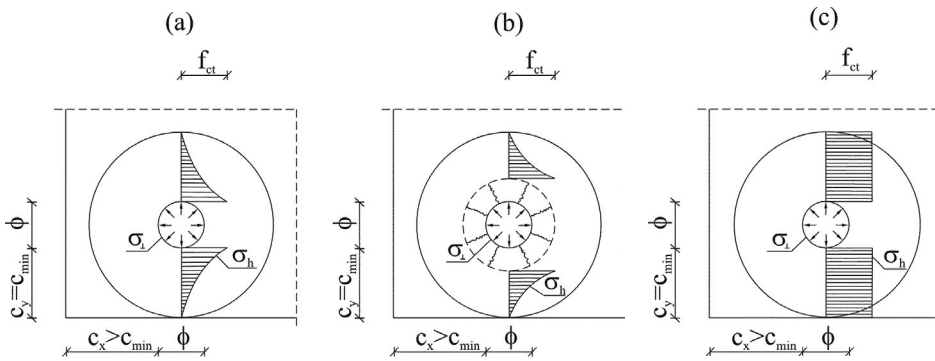
Pod obciążonym siłą rozciągającą prętem żebrowanym pojawia się docisk do betonu. Reakcja żeberka nachylona pod kątem α w kierunku działania siły wyciągającej rozkłada się na składową równoległą i prostopadłą do osi pręta. Składowa równoległa reakcji jest przejmowana przez naprężenia przyczepności σ_{\parallel} (rys. 1b). Wartością maksymalną tej składowej są graniczne naprężenia przyczepności f_{bd} , które są przede wszystkim wynikiem ścięcia połączenia między prętem zbrojeniowym i otaczającym betonem. Natomiast składowa prostopadła generuje promieniste naprężenia działające równomiernie wokół pręta σ_{\perp} . Naprężenia te są odpowiedzialne za rozrywanie otuliny betonowej. Wartości składowych zależą od kąta α . Kształt żeberka powinien wywierać wpływ na siły rozchodzące się promieniście od występów i pomniejszać siłę rozszczepiającą, a maksymalnie powiększać przyczepność. Składowa σ_{\perp} odpowiada ciśnieniu hydrostatycznemu działającemu od wewnątrz na otulinę, którą stanowi rozciągany pierścień betonowy o średnicy równej minimalnej grubości otuliny i średnicy wewnętrznej równej średnicy zbrojenia ϕ . W otulinie pod wpływem naprężeń prostopadłych σ_{\perp} powstaje złożony układ naprężeń, w którym ciśnienie σ_h równoważone przez wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ct} decyduje o nośności. Tepfers [27] rozważał równowagę stanu naprężeń dla trzech modeli: sprężystego, sprężysto-kruchego i plastycznego (rys. 5). Graniczne naprężenia przyczepności f_{bd} wyznaczane są dla poszczególnych modeli wg następujących wzorów:

$$\text{model sprężysty:} \quad f_{bd} = f_{ct} \frac{(c + \phi/2)^2 + (\phi/2)^2}{(c + \phi/2)^2 - (\phi/2)^2}, \quad (1)$$

$$\text{model sprężysto-kruchy:} \quad f_{bd} = f_{ct} \frac{(c + \phi/2)}{1,664\phi}, \quad (2)$$

$$\text{model plastyczny:} \quad f_{bd} = f_{ct} \frac{2c}{\phi}, \quad (3)$$

gdzie: c — grubość otuliny betonowej;
 ϕ — średnica pręta stalowego.



Rys. 5. Modele pracy otuliny betonowej: a) sprężysty; b) sprężysto-kruchy; c) plastyczny

Zależność między naprężeniem przyczepności i poślizgiem $\sigma_b - \delta$ jest podstawowym równaniem charakteryzującym zakotwienie pręta zbrojeniowego w betonie. Postępujący poślizg pręta zbrojeniowego w belce i redystrybucję naprężeń przedstawiono schematycznie na rysunku 6.

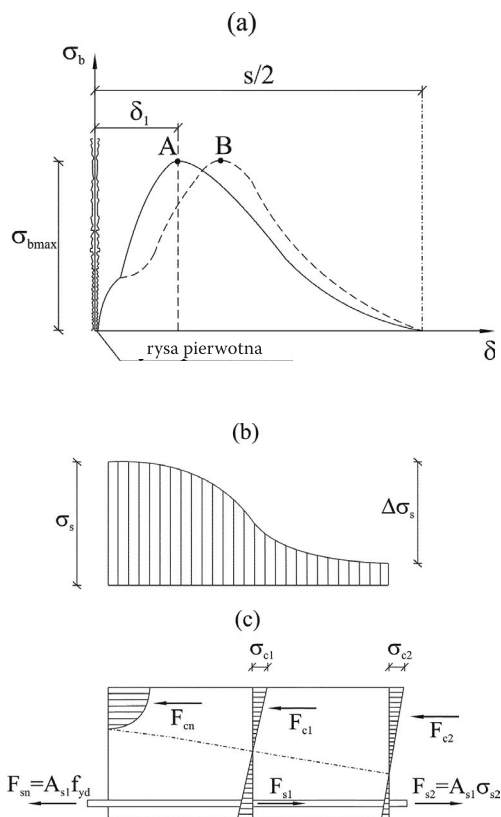
Gdy przyczepność na długości poślizgu pręta δ_1 jest większa od wytrzymałości na rozciąganie betonu, to powstają w tym obszarze nowe rysy i rozwija się nowy rozkład naprężeń dookoła poprzednio powstałej rysy. Wartość graniczna naprężenia przyczepności $\sigma_{b \max}$ na rysunku 6a przemieszcza się w prawo z punktu A do punktu B, mijając środkową linię pomiędzy dwoma potencjalnymi rysami, aż druga rysa uformuje się w pewnej odległości s od rysy pierwotnej. Ważne jest, aby odpowiednio dobrać długość prętów i zmniejszyć zarysowanie oraz poślizg zbrojenia. Zbrojenie powinno wtedy osiągać pełną wytrzymałość na rozciąganie równą granicznemu naprężeniu przyczepności przy umownym nieniszczącym całkowitym wydłużeniu.

Na rysunku 1 założono, że l_{bd} jest obliczeniową długością zakotwienia pręta osadzonego w betonie poddanego czystemu wyciąganiu siłą F . Jeżeli ϕ jest średnicą pręta, σ_b jest średnim naprężeniem przyczepności, a σ_s jest naprężeniem w pręcie zbrojeniowym poddanym osiowemu wyciąganiu lub naprężeniem w zbrojeniu rozciągającym w belce zginanej, to siła wyciągająca na długości zakotwienia wynosi:

$$dF = \sigma_b \pi \phi l_{bd} \quad (4)$$

i jest równa sile rozciągającej przekrój poprzeczny pręta zbrojeniowego:

$$dF = \frac{\pi \phi^2}{4} \sigma_s \quad (5)$$



Rys. 6. Redystrybucja naprężeń przy poślizgu zbrojenia: a) rozkład naprężenia przyczepności; b) naprężenia w prętach zbrojeniowych; c) rozkład naprężeń normalnych w przekroju poprzecznym belki

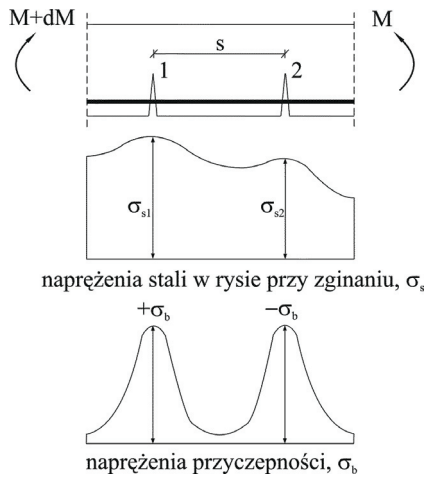
Z równości wyrażeń (4) i (5) wynika średnie naprężenie przyczepności:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_s \phi}{4l_{bd}}. \quad (6)$$

Na rysunku 7 przedstawiono schemat zmiany naprężenia przyczepności na długości pręta zbrojeniowego w belce w zależności od zmiennego momentu przęsłowego. Jeżeli z jest ramieniem pary sił F wywołanych przez moment M , to można zapisać, że $F = M/z$. Pomiedzy przekrojami zarysowanymi 1 i 2 odległymi o $dx = s$, obowiązują zależności:

$$dF = dM / z, \quad (7)$$

$$dF = \sigma_b u dx. \quad (8)$$



Rys. 7. Naprężenia przyczepności wzdłuż rozciąganego pręta zbrojeniowego przy zginaniu

Z równości wyrażeń (7) i (8) wynika:

$$\frac{dM}{dx} = \sigma_b u z. \quad (9)$$

Ponieważ występuje zależność:

$$\frac{dM}{dx} = V, \quad (10)$$

wartość średnich naprężeń przyczepności odpowiadających zniszczeniu w elementach zginanych wyznaczamy następująco:

$$\sigma_b = \frac{V}{uz}, \quad (11)$$

gdzie: V — siła poprzeczna;
 u — obwód wszystkich prętów;
 z — ramię sił wewnętrznych.

Wartości średnie naprężeń przyczepności w belkach można również obliczać na podstawie empirycznej zależności podanej w pracy Oranguna, Jirsa, Breana [20]:

$$\sigma_b = \left(1,22 + 3,23 \frac{c}{\phi} + 53 \frac{\phi}{l_{bd}}\right) \sqrt{f_c} \text{ [psi]} \quad (12)$$

lub na podstawie zmodyfikowanej teorii Tepfersa [27]:

$$\sigma_b = 2,695 \frac{\frac{c}{\phi} + 0,5}{\frac{c}{\phi} + 3,6} \sqrt{f_c}. \quad (13)$$

Wyrażenia (6) i (11) zostaną wykorzystane w celu wyznaczenia naprężenia przyczepności na podstawie wyników badań doświadczalnych i porównane z wartościami naprężeń wyznaczonymi na podstawie wyrażen (12) i (13) otrzymanych wg [20] i [27].

5. Badanie naprężeń przyczepności w belkach

Badanie naprężeń przyczepności betonu do stali zbrojeniowej wykonano na dwóch jednoprzęsłowych, wolnopodpartych belkach żelbetowych. Na powierzchni zabetonowanego pręta w miejscu umocowania tensometru na znacznym obszarze występuje zmiana warunków przyczepności. W badaniach zastosowano wycięcia w tych obszarach belek betonowych w celu uniknięcia koncentracji naprężeń. Stałymi parametrami w badaniach były wymiary, zbrojenie, wiek elementów i skład mieszanki betonowej. Natomiast jako zmienny parametr, przyjęto rozstaw sił poprzecznych. Sposób podparcia, obciążenia, wymiary i rozmieszczenie zbrojenia belek przedstawiono na rysunku 8.

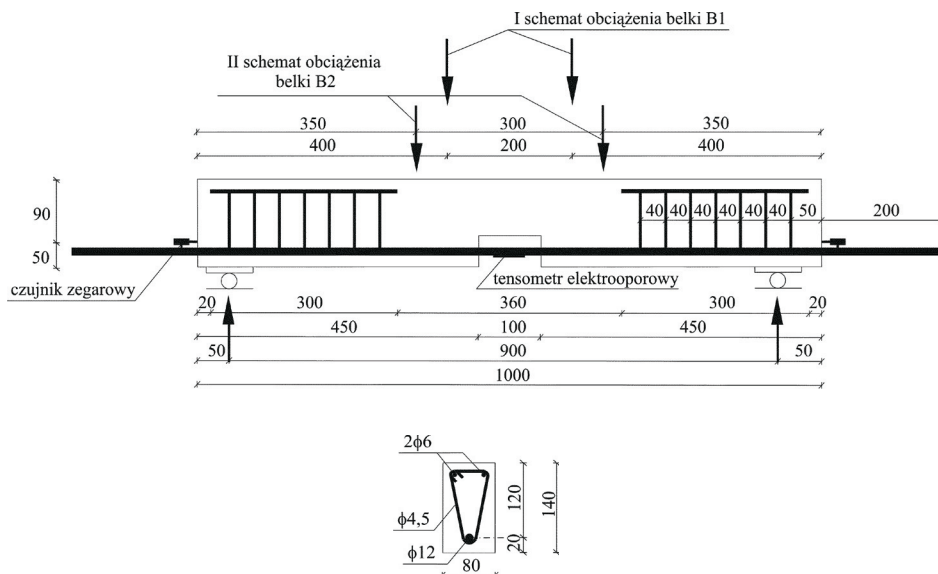
Dla każdej belki wykonano po dwie partie elementów badawczych. Każda partia badawcza składała się z: jednej belki podstawowej o wymiarach 1000×140×80 mm, trzech kostek sześciennych 100×100×100 mm do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie f_{cm} , dwóch beleczek 500×100×100 mm do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} metodą centrycznego obciążenia punktowego i jednego walca ϕ 150×300 mm do badania modułu sprężystości E_{cm} .

Elementy zaprojektowano ze zwykłego betonu konstrukcyjnego. Belki i próbki kontrolne wykonano z mieszanki betonowej o składzie ilościowym przedstawionym w tabeli 1.

W belkach zastosowano mieszankę o tym samym składzie. Kruszywo dobrano tak, że otrzymano uziarnienie, dla którego krzywa przesiewu znajdowała się w środku pola między granicznymi krzywymi normowymi. Mikrokrzemionkę stosowano jako dodatek w ilości 10% masy cementu i korygowano odpowiednio ilość wody przy stosowaniu superplastyfikatora. Elementy dojrzewały w wodzie w temperaturze około 20°C. W chwili badania wiek belek wynosił 28 dni.

Pręt zbrojenia głównego wykonano ze stali klasy A-III, a pręty montażowe i strzemiona — ze stali klasy A-0.

Belkę **B-1** obciążano dwiema siłami poprzecznymi w rozstawie 200 mm, a belkę **B-2** dwiema siłami w rozstawie 300 mm. Ustalono przyrost etapu obciążenia



Rys. 8. Schemat stanowiska badawczego — przekroje, wymiary i układ zbrojenia belek

TABELA 1

Skład mieszanki betonowej dla jednej partii elementów

Materialy	Ilość składnika
Cement portlandzki CEM I 32,5 [kg]	19,25
Mikrokrzemionka [kg]	1,95
Superplastyfikator [l]	0,395
Kruszywo otoczkowe o $d_g < 16$ mm [kg]	30,5
Kruszywo otoczkowe o $d_g < 10$ mm [kg]	15,3
Piasek [kg]	15,15
Woda [l]	6,0

co 2 kN. Aby dokładnie uchwycić moment zarysowania, założono małe przyrosty obciążenia doraźnego mierzone przy pomocy siłomierza dynamometrycznego. Po zarysowaniu zrezygnowano z części etapów pośrednich i obciążano belki z przyrostem siły z krokiem przyrostu obciążenia co 6 kN aż do zniszczenia. Dla każdego etapu obciążenia dokonywano odczytów za pomocą mostka tensometrycznego, kontrolowano kolejność pojawiania się rys i na czujnikach zegarowych sprawdzano poślizg pręta zbrojeniowego na ścianach bocznych belek. Na podstawie odczytów na mostku tensometrycznym obliczono odkształcenia stali zbrojeniowej, które posłu-

żyły do obliczenia naprężeń w pręcie stalowym w środku rozpiętości potrzebnych do ustalenia wartości granicznych naprężeń przyczepności.

6. Analiza wyników badania belek

W tabeli 2 zestawiono wyniki badania właściwości betonu na próbkach. Badania obejmowały wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie f_{cm} , rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} oraz modułu sprężystości E_{cm} .

TABELA 2
Wyniki w badaniach właściwości betonu

Oznaczenie belki	Wiek betonu [dni]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [MPa]
B-1	28	46,3	7,1	32 800
B-2	28	45,0	7,0	33 130

W tabeli 3 zestawiono podstawowe wyniki badania belek: siły rysujące F_{cr} , siły F , dla których na podstawie pomierzonych wydłużeń ustalono naprężenia w stali zbrojeniowej i naprężenia przyczepności, siły F_{δ} , dla których zarejestrowano poślizg pręta względem betonu na czole elementu, siły niszczące F_u i graniczne naprężenia przyczepności σ_b obliczone na podstawie wzorów analitycznych (6) i (11) oraz wzorów empirycznych (12) i (13) przedstawionych odpowiednio w pracach Oranguna, Jirsa, Breena [20] i Tepfersa [27].

TABELA 3
Wyniki badań belek

Oznaczenie belki	F_{cr} [kN]	F [kN]	F_{δ} [kN]	F_u [kN]	σ_b wg (6) [MPa]	σ_b wg (11) [MPa]			σ_b wg (12) [MPa]	σ_b wg (13) [MPa]
					dla F	dla F	dla F_{δ}	dla F_u		
B-1	24,0	36,0	42,0	47,0	2,58	4,42	5,16	5,77	3,62	6,41
B-2	22,0	46,0	57,0	64,0	3,10	5,65	7,00	7,86	3,57	6,32

Wartości naprężeń przyczepności σ_b według wzorów (6) i (12) ustalono dla obliczeniowej długości zakotwienia $l_{bd} = 450$ mm. Naprężenia przyczepności ze wzoru (6) obliczono na podstawie zmierzonych wydłużeń, wyznaczonych odkształceń

pręta stalowego i następnie obliczonych dla nich naprężeń. W przypadku belki **B-1** wartość naprężenia przyczepności σ_b obliczono dla naprężenia w stali zbrojeniowej $f_s = 387,2$ MPa powstałego przy obciążeniu równym $F = 36$ kN. Natomiast w przypadku belki **B-2** wartość σ_b obliczono dla $f_s = 459,2$ MPa powstałego przy obciążeniu równym $F = 46$ MPa. Graniczne naprężenia przyczepności według wzoru (11) obliczono dla współczynnika $\zeta = 0,9$. Wartość ζ przyjęto na podstawie stopnia zbrojenia $\rho = 1,3\%$. We wzorach empirycznych Oranguna (12) i Tefpersa (13) naprężenia przyczepności σ_b obliczono, podstawiając wartości średnich wytrzymałości betonu na ściskanie f_{cm} z tabeli 2. Założono również grubość otuliny betonowej $c = 14$ mm.

Pierwsze rysy w belce **B-1** pojawiły się pod obciążeniem $F_{cr} = 24$ kN, a w belce **B-2** — pod obciążeniem $F_{cr} = 22$ kN. W obu przypadkach powstały w obszarze działania stałego momentu, gdzie wystąpiła największa koncentracja naprężeń wywołana zmianą wysokości przekroju poprzecznego elementu. W belce **B-1** przy obciążeniu $F_\delta = 42$ kN wystąpił poślizg pręta względem betonu na czole elementu o wartości 0,04 mm. Natomiast w belce **B-2** — poślizg o wartości 0,08 mm zaobserwowano przy obciążeniu $F_\delta = 57$ kN. Belka **B-1** uległa zniszczeniu na skutek powstania rysy ukośnej o znacznej szerokości, natomiast belka **B-2** zniszczyła się przez zmiżdżenie betonu w strefie ściskanej. Podłużne pręty zbrojeniowe w strefie ściskanej i strzemiąca silnie ograniczyły zasięg obszaru zniszczenia. Różnice w wynikach badania belek **B-1** i **B-2** wynikały z różnych rozstawów przyłożonych sił poprzecznych. W przypadku naprężeń przyczepności σ_b obliczonych na podstawie pomiarów doświadczalnych ze wzorów (6) i (11) rozrzuty wyników dla belek **B-1** i **B-2** wynosiły 20-36%. Natomiast, gdy σ_b ustalono na podstawie wzorów empirycznych (12) i (13), rozrzuty wyników były znikome i wynosiły około 1%. Tak duże różnice wyników w belce **B-1** powstały z powodu bardzo niekorzystnego rozkładu naprężeń i wczesnej utraty nośności przy ścinaniu.

Zgodnie z przewidywaniem, graniczne naprężenia przyczepności przy zginaniu dla belki **B-1** wyznaczone ze wzoru (11) były większe od średnich naprężeń przyczepności obliczonych według wzoru (6) na długości zakotwienia $l_{bd} = 450$ mm o około 71%. Dla belki **B-2** różnica wynosiła około 82%. Średnie wartości σ_b obliczone na podstawie empirycznego wzoru Oranguna (12) były większe od średnich wartości ze wzoru (6). Rozrzut wyników dla belki **B-1** wynosił 40%, a dla belki **B-2** — 15%. Rozrzuty wyników granicznych wartości σ_b obliczonych według wzoru Tefpersa (13) i wzoru (11) wynosiły odpowiednio 11% i 24%. Zaobserwowano również dobrą zgodność naprężeń przyczepności σ_b przedstawionych w tabeli 3 wyznaczonych ze wzorów (11) i (13) z wytrzymałością betonu na rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} przedstawioną w tabeli 2. Rozrzuty w tym przypadku wynosiły odpowiednio 12-23% i 11%.

7. Zakończenie

W niniejszej pracy przedstawiono badania doświadczalne przeprowadzone na modelach elementów belkowych z wycięciem. Przyjęta metoda badania odzwierciedla w sposób możliwie dokładny rzeczywiste warunki pracy żelbetowego elementu konstrukcyjnego, a uzyskane naprężenia przyczepności odnoszą się do rozciągania stali zbrojeniowej przy zginaniu z uwzględnieniem ścinania. Strzemiona w strefach przypodporowych stawiają opór poprzecznym odkształceniom betonu otaczającego rozciągane pręty zbrojenia podłużnego i tym samym ograniczają zarysowanie elementu, co zwiększa wartość wytrzymałości przyczepności betonu do stali zbrojeniowej.

Na podstawie uzyskanych wyników doświadczalnych wyznaczono graniczne naprężenia przyczepności betonu do rozciąganej stali zbrojeniowej przy wykorzystaniu zależności analitycznych i empirycznych. Obliczone wartości naprężeń przyczepności charakteryzują się znacznymi rozrzutami. Wartości granicznych naprężeń przyczepności otrzymane na podstawie analitycznego wzoru (6) i empirycznego wzoru Oranguna mogą być traktowane jako dolne oszacowanie naprężeń rzeczywistych. Ma to związek z zarejestrowanym mniejszym wydłużeniem pręta od wydłużenia granicznego, spowodowanym gwałtownym procesem uplastycznienia stali zbrojeniowej i zbyt dużym przyrostem obciążenia. Z kolei naprężenia przyczepności otrzymane na podstawie analitycznego wzoru (11) mogą być traktowane jako górne oszacowanie naprężeń rzeczywistych. Porównanie wyników obliczeń dla belek **B-1** i **B-2** wskazuje na fakt znacznego wpływu zasięgu oddziaływania maksymalnego momentu zginającego na otrzymane wartości naprężeń przyczepności.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.05.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] ACI-318-02, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, ACI Committee 318, Farmington Hills, Michigan, 2002.
- [2] Z. P. BAZANT, Z. LI, M. THOMA, *Identification of stress — slip law for bar or fiber pull-out by size — effect test*, ASCE — J. Eng. Mech., vol. 121, no. 5, 1995, 620-625.
- [3] J. G. CABRERA, P. GHODDOUSSI, *The effect of reinforcement corrosion on the strength of steel/concrete bond*, Proc. Int. Conf. Bond in Concrete: from Research to Practice, CEB/RTU Riga Technical University, Riga, Latvia, 1992, 10.11-10.24.
- [4] R. ELIGEHAUSEN, *Lapped splices of ribbed bars with straight ends*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, vol. 301, 1979.
- [5] R. ELIGEHAUSEN, E. P. POPOV, V. V. BERTERO, *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*, Report no. UCB/EERC 83-23, University of California at Berkeley, 1983.

- [6] R. ESFAHANI, V. RANGAN, *Bond between Normal Strength and High-Strength concrete (HSC) and Reinforcing Bars in Splices in Beams*, ACI Structural Journal, vol. 95, no. 3, May-June 1998, 272-280.
- [7] P. G. GAMBAROVA, *High-performance concrete: a review of the results obtained in Milan within the national project 1997-1999 "The safety of HPC structures"*, Studies and Research, vol. 22, 2001, 121-140.
- [8] P. G. GAMBAROVA, G. A. PLIZZARI, O. P. ROSATI, G. RUSSO, D. CORONELLI, *Bond of Reinforcement in Concrete. Chapter 1: Bond Mechanics Including Pull-out and Splitting Failures*, FIB — Fédération Internationale du Béton, Bulletin no. 10, Convener Ralejs Tefpers, 2000, 1-93.
- [9] P. G. GAMBAROVA, G. P. ROSATI, *Bond and splitting in reinforced concrete: test results on bar pull-out*, Materials and Structures, RILEM, vol. 29, 1996, 267-276.
- [10] P. G. GAMBAROVA, G. P. ROSATI, C. E. SCHUMM, *Bond and splitting in R/C: a vexing question*, ACI Int. SP no. 180, Bond and Development of Reinforcement. Proc. of the Int. Workshop of April 1997, ACI Spring Convention '97, Seattle, Washington, 1993, 23-43.
- [11] B. S. HAMAD, M. S. ITANI, *Bond Strength of Reinforcement in High-Performance Concrete: The Role of Silica Fume, Casting Position, and Superplasticizer Dosage*, ACI Materials Journal, vol. 95, no. 5, September-October 1998, 499-511.
- [12] B. S. HAMAD, J. A. MIKE, *Experimental Investigation of Bond Strength of Hot-Dip Galvanized Reinforcement in Normal- and High-Strength Concrete*, ACI Structural Journal, vol. 100, no. 4, July-August 2003, 465-470.
- [13] Z. HUANG, B. ENGSTRÖM, J. MAGNUSSON, *Experimental and analytical studies of the bond behavior of deformed bars in high-strength concrete*, 4 Int. Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete — BHP'96, Paris, France, 1996, 1115-1124.
- [14] D. KARLSSON, *Bond between strands and concrete in hollow — core slabs*, Nordic Seminar: Bond and Anchorage of Reinforcement in Concrete, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1985.
- [15] A. LOSBERG, P. OLSSON, *Bond Failure of Deformed Reinforcing Bars Based on the Longitudinal Splitting Effect of the Bars*, ACI Journal, Symposium Paper, vol. 76, January 1979, 5-18.
- [16] H. MARTIN, P. NOAKOWSKI, *Bond behavior in reinforced concrete*, Research Report IV, München Technical University, München, Germany, 1981.
- [17] U. MAYER, R. ELIGEHAUSEN, *Bond behavior of ribbed bars at inelastic steel strains*, Proc. 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Technical University of Budapest, Budapest, Hungary, 1998, 39-46.
- [18] E. MORGAN, *The effect of rust on reinforcement*, Concrete, no. 1, 1998, 25-27.
- [19] K. NAGATOMO, T. KAKU, *Bond behavior of deformed bars under lateral compressive and tensile stress*, Proc. Int. Conf. Bond in Concrete: from Research to Practice, CEB/RTU Riga Technical University, Riga, Latvia, 1992, 1.69-1.78.
- [20] O. C. ORANGUN, J. O. JIRSA, J. E. BREEN, *The Strength of Anchored Bars: A Re-Evaluation of Test Data on Development Length and Splices*, ACI Journal, March 1977, 114-122.
- [21] L. ÖSTLUND, *Influence of covering layer by deformed bars (Ks-steel) on the splitting risk*, Sweden, 1963.
- [22] G. REHM, *Evaluation criteria for high-bond rebars*, Festschrift Rüschi, 1969.
- [23] M. REUTER, R. ELIGEHAUSEN, *On the influence that the load introduction by means of fastening devices has on the load-bearing capacity of R/C members*, Bauingenieur, 67, 1992, 461-474.

- [24] P. SOROUSHIAN, K. B. CHOI, *Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete*, ACI Structural J., vol. 86, no. 2, 1989, 217-222.
- [25] U. SCHNEIDER, *Properties of Materials at High Temperatures: Concrete*, RILEM Committee 44-PHT, Publ. by Gesamthochschule, Kassel Universität, Kassel, Germany, 1985.
- [26] R. TEPFERS, *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Publ. 73/2, 1973.
- [27] R. TEPFERS, *Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars*, Magazine of Concrete Research, vol. 31, no. 160, February 1979, 3-12.
- [28] C. VAN DER VEEN, *Cryogenic bond behavior and tension stiffening*, Proc. Int. Conf. Bond in Concrete: from Research to Practice. CEB/RTU Riga Technical University, Riga, Latvia, 1992, 10.1-10.10.

P. SMARZEWSKI, A. STOLARSKI

Testing and determination of bond stresses between reinforcing steel and concrete

Abstract. The factors having influence on the bond stresses between concrete and reinforcing steel were described in the present paper. The basic methods of investigation and determination of the bond stresses were presented. The experimental results for the reinforced concrete beams with notch were discussed. These results were the basis for the comparison of several methods of determination of the limit bond stresses.

Keywords: mechanics of structures, reinforced concrete structures, beams, bond stresses

Universal Decimal Classification: 624.04