

dr inż. Damian Szczech^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8357-2877

prof. dr hab. inż. Renata Kotynia¹⁾

ORCID: 0000-0002-7247-1229

Analysis of the effect of variable parameters on the shear capacity of elements reinforced with FRP bars

Analiza wpływu parametrów zmiennych na nośność na ścinanie elementów zbrojonych prętami FRP

DOI: 10.15199/33.2024.11.02

Abstract. This paper presents an analysis of variable parameters on the shear capacity of elements reinforced with FRP bars: longitudinal reinforcement ratio; transverse reinforcement ratio; axial stiffness of reinforcement; shear slenderness; concrete compressive strength; spacing of stirrups; depth; shape of beam cross-section; inclination of transverse reinforcement and bond behaviour of stirrups.

Keywords: shear; FRP; shear strength, variable parameters.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę parametrów zmiennych na nośność na ścinanie elementów zbrojonych prętami FRP: stopnia zbrojenia podłużnego; stopnia zbrojenia poprzecznego; sztywności osiowej zbrojenia; smukłości ścinania; wytrzymałości betonu na ściskanie; rozstawu strzemion; wysokości użytecznej; kształtu przekroju poprzecznego belki; nachylenia zbrojenia poprzecznego oraz przyczepności strzemion.

Słowa kluczowe: ścinanie; FRP; nośność na ścinanie, parametry zmienne.

Shear in concrete elements is a very complex phenomenon that, despite many studies, is still under discussion. The origin of this problem is the occurrence of simultaneous shear and bending in the support zones of concrete beams. The shear issue becomes even more complicated when the longitudinal and transverse reinforcement is made of composite bars, which, due to their anisotropic structure and linear-elastic material characteristics, cooperate differently in shear stress transfer than steel reinforcement.

A large number of experimental and analytical studies have been carried out to date on the shear resistance of beams, longitudinally and transversely reinforced with composite bars. We analysed more than 35 experimental papers, from which 191 elements were extracted for evaluation. A literature review of shear tests on beams reinforced longitudinally and transversely with FRP bars was described by the authors in [1]. On the basis of extraneous tests, the following variable parameters were analysed for their influence on the shear capacity: longitudinal reinforcement ratio ρ_l , transverse reinforcement ratio ρ_t , axial stiffness of reinforcement $\rho \cdot E$, shear slenderness a/d , compressive strength of concrete f_c , stirrup spacing s , depth d , shape of beam cross-section, lope of transverse reinforcement and bond behaviour of stirrups.

Ścinanie w elementach betonowych jest zjawiskiem bardzo złożonym, które pomimo wielu badań nadal pozostaje przedmiotem dyskusji. Źródłem tego problemu jest wystąpienie jednoczesnego ścinania i zginania w przypodporowych strefach belek betonowych. Zagadnienie ścinania staje się jeszcze bardziej skomplikowane, gdy zbrojenie podłużne i poprzeczne wykonane jest z prętów kompozytowych, które ze względu na anizotropową budowę i liniowo-sprężystą charakterystykę materiałową inaczej współpracują w przenoszeniu naprężeń ścinających niż zbrojenie stalowe.

Przeprowadzono dotychczas wiele badań doświadczalnych i analitycznych dotyczących nośności belek, zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami kompozytowymi na ścinanie. Przeanalizowaliśmy ponad 35 prac doświadczalnych, z których wyodrębniono 191 elementów poddanych ocenie. Przegląd literatury dotyczącej badań na ścinanie belek zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami FRP autorzy opisali w [1]. Na podstawie badań obcych dokonano analizy wpływu na nośność na ścinanie następujących parametrów zmiennych: stopnia zbrojenia podłużnego ρ_l ; stopnia zbrojenia poprzecznego ρ_t ; sztywności osiowej zbrojenia $\rho \cdot E$, smukłości ścinania a/d ; wytrzymałości betonu na ściskanie f_c ; rozstawu strzemion s ; wysokości użytecznej d ; kształtu przekroju poprzecznego belki, nachylenia zbrojenia poprzecznego oraz przyczepności strzemion.

¹⁾ Lodz University of Technology, Department of Concrete Structures

^{*)} Correspondence address: damian.szczech@p.lodz.pl

Longitudinal reinforcement ratio

The longitudinal reinforcement ratio ρ_l determined as the ratio of the area of the longitudinal reinforcement A_{sl} divided by the product of the beam width b_w and the useful height of the beam cross-section d (formula 1), is a parameter that significantly affects the shear resistance of concrete beams reinforced with composite bars.

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \quad (1)$$

Zhao [2] showed that the longitudinal reinforcement ratio ρ_l influences the nominal shear capacity of beams V_n [2]. Various studies have analysed how the longitudinal reinforcement ratio ρ_l affects two components of resistance: the contribution of concrete shear capacity V_c and the contribution of stirrup shear capacity V_f .

Several researchers have confirmed that the reinforcement ratio ρ_l is related to the shear capacity of concrete V_c in a non-linear manner [2 – 5]. Studies by El-Sayed [6] and Gross [3] have shown that the longitudinal reinforcement ratio affects V_c through the position of the neutral axis in a non-linear manner. An increase in the longitudinal reinforcement ratio ρ_l results in a decrease in crack height and crack opening width [3]. Reducing the crack height increases the shear capacity by increasing the height of the concrete compressive zone, and reducing the crack opening width increases the friction in the crack created from shear [6]. Razaqpur [3] and Gross [4] proved that the degree of longitudinal reinforcement is related to $\sqrt[3]{V_c}$. This relationship is described in the Canadian standard CSA S806-02 [7]. Nehdi [5] determined the relationship between the longitudinal reinforcement ratio ρ_l , and the contribution to the shear capacity of concrete V_c using a numerical optimisation technique, in the power of 0.3.

Tottori justified on the basis of his own research that the longitudinal reinforcement ratio ρ_l does not affect the shear capacity of the transverse reinforcement V_f [8]. Rao's research [9] showed that the shear capacity of a beam is directly proportional to the square root of the ratio of longitudinal reinforcement ρ_l . The guidelines of the Japanese JSCE standard [10] developed a method of calculating the maximum stirrup strain to determine the resistance of the transverse reinforcement V_f , which depends on $\sqrt{\rho_l}$.

Figure 1 shows the variation of the normalised shear capacity of concrete $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d \cdot E_f$ as a function of the longitudinal reinforcement ratio ρ_l , based on the collected experimental database. It can be observed that an increase in the degree of longitudinal reinforcement increases the she-

Stopień zbrojenia podłużnego

Stopień zbrojenia podłużnego ρ_l , wyznaczany jako stosunek pola powierzchni zbrojenia podłużnego A_{sl} podzielony przez iloczyn szerokości belki b_w i wysokości użytecznej przekroju belki d (wzór 1), jest parametrem istotnie wpływającym na nośność na ścinanie belek betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi.

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \quad (1)$$

Zhao [2] wykazał, że stopień zbrojenia podłużnego ρ_l wpływa na nominalną nośność belek na ścinanie V_n [2]. W różnych badaniach analizowano, w jaki sposób stopień zbrojenia podłużnego ρ_l wpływa na dwie składowe nośności: udział nośności betonu w nośności na ścinanie V_c i udział nośności strzemiion na ścinanie V_f .

Kilku badaczy potwierdziło, że stopień zbrojenia ρ_l jest powiązany z nośnością betonu na ścinanie V_c w sposób nieliniowy [2 – 5]. Badania przeprowadzone przez El-Sayed [6] oraz Grossa [3] wykazały, że stopień zbrojenia wpływa na V_c przez położenie osi obojętnej w sposób nieliniowy. Wzrost stopnia zbrojenia podłużnego ρ_l powoduje zmniejszenie wysokości zarysowania i szerokości rozwarcia rys [3]. Zmniejszenie wysokości zarysowania zwiększa nośność na ścinanie przez wzrost wysokości strefy ściskanej betonu, a zmniejszenie szerokości rozwarcia rysy zwiększa tarcie w rysie powstałej od ścinania [6]. Razaqpur [3] i Gross [4] dowiedli, że stopień zbrojenia podłużnego jest związany z $\sqrt[3]{V_c}$. Zależność ta została opisana w normie kanadyjskiej CSA S806-02 [7]. Nehdi [5] określił zależność pomiędzy stopniem zbrojenia podłużnego ρ_l , a udziałem w nośności betonu na ścinanie V_c techniką optymalizacji numerycznej, w potęgze 0,3.

Tottori na podstawie badań własnych uzasadnił, że stopień zbrojenia podłużnego ρ_l nie wpływa na nośność na ścinanie zbrojenia poprzecznego V_f [8]. Badania Rao [9] wykazały, że nośność belki na ścinanie jest wprost proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego ze stopnia zbrojenia podłużnego ρ_l . W wytycznych normy japońskiej JSCE [10] opracowano sposób obliczania maksymalnego odkształcenia

strzemiion do wyznaczenia nośności zbrojenia poprzecznego V_f , który zależy od $\sqrt{\rho_l}$.

Na rysunku 1 przedstawiono zmianę znormalizowanej nośności betonu na ścinanie $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d \cdot E_f$ w zależności od stopnia zbrojenia podłużnego ρ_l , na podstawie zebranej bazy danych doświadczalnych. Można zaobserwować, że wzrost stopnia zbrojenia podłużnego wpływa na zwiększenie nośności beto-

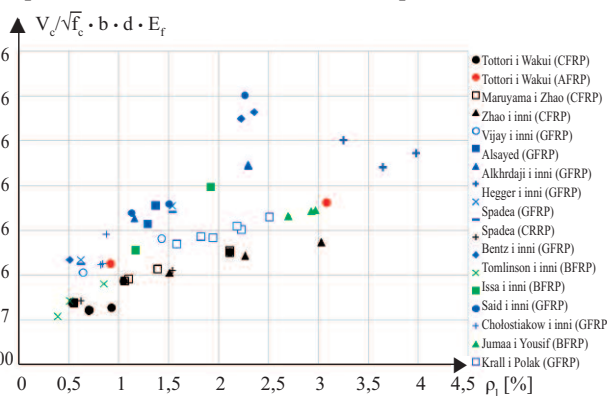


Fig. 1. Normalized shear strength of concrete as a function of the longitudinal reinforcement ratio

Rys. 1. Znormalizowana wytrzymałość betonu na ścinanie w funkcji stopnia zbrojenia podłużnego

ar capacity of the concrete, which is in agreement with analyses reported in the literature.

Transverse reinforcement ratio

Transverse reinforcement ratio ρ_t is determined as the ratio of the area of the transverse reinforcement A_{st} the product of the transverse reinforcement spacing s , the beam width b_w and the sine of the angle of the reinforcement to the longitudinal beam axis $\sin \alpha$ (formula 2).

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$

Most models and design guidelines take into account the linear effect of the transverse reinforcement ratio ρ_t on the shear resistance of the transverse reinforcement V_f . This is confirmed by studies carried out by Nagasaka [11]. Study also showed that the shear capacity of the transverse reinforcement increases to a greater extent when carbon FRP bars (CFRP) are used instead of glass FRP bars (GFRP). Only Nehdi [5] proposed a different approach taking into account the square root of the product of the degree of transverse reinforcement and the tensile capacity of the transverse reinforcement $0,5/\sqrt{\rho_f} \cdot f_{fv} \cdot b \cdot d$.

The separation of the contribution of the concrete resistance V_c from the contribution of the transverse reinforcement V_f to the total shear resistance of the element V_{tot} is cumbersome and requires additional assumptions on the resistance of the concrete part or the separation of the shear resistance of the stirrups.

Figure 2 shows the relationship between the transverse reinforcement ratio ρ_t and the shear resistance of the transverse reinforcement V_f . To determine the shear resistance of the stirrups, the shear resistance of the concrete V_c was calculated using the equation $2,5 \cdot \beta \cdot \Phi_c \cdot f_{cr} \cdot b \cdot d_v$ [7], and then subtracted from the total nominal shear resistance ($V_n - V_c$). From the analysis of the database, it can be concluded that the shear capacity of the stirrups V_f increases non-linearly as the ratio of transverse reinforcement ρ_t increases up to a value of 0,75%. Above this value of reinforcement ratio $\rho_t = 0,75\%$ there are too few test results to adequately describe the relationship between the resistance V_f and reinforcement ratio ρ_t .

A higher degree of transverse reinforcement increases the concrete’s confinement and its contribution to shear load transfer, as well

na ścinanie, co jest zgodne z analizami przedstawianymi w literaturze.

Stopień zbrojenia poprzecznego

Stopień zbrojenia poprzecznego ρ_t wyznaczany jest jako stosunek pola powierzchni zbrojenia poprzecznego A_{st} do iloczynu rozstawu zbrojenia poprzecznego s , szerokości belki b_w i sinusa kąta nachylenia zbrojenia do podłużnej osi belki $\sin \alpha$ (wzór 2).

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$

Większość modeli i wytycznych projektowych uwzględnia liniowy wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego ρ_t na nośność zbrojenia poprzecznego na ścinanie V_f . Potwierdzają to badania przeprowadzone przez Nagasakę [11]. Badania te wykazały również, że nośność zbrojenia poprzecznego na ścinanie wzrasta w większym stopniu, gdy zamiast prętów szklanych (GFRP) stosuje się pręty węglowe (CFRP). Jedynie Nehdi [5] zaproponował inne podejście uwzględniające pierwiastek kwadratowy z iloczynu stopnia zbrojenia poprzecznego i nośności zbrojenia poprzecznego na rozciąganie $0,5/\sqrt{\rho_f} \cdot f_{fv} \cdot b \cdot d$.

Rozdzielenie udziału nośności betonu V_c od udziału zbrojenia poprzecznego V_f w nośności całkowitej elementu na ścinanie V_{tot} jest kłopotliwe i wymaga dodatkowych założeń dotyczących nośności części betonowej bądź wyodrębnienia nośności strzemion na ścinanie.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność między stopniem zbrojenia poprzecznego ρ_t a nośnością zbrojenia poprzecznego na ścinanie V_f . W celu określenia nośności strzemion na ścinanie obliczono nośność betonu na ścinanie V_c przy użyciu równania $2,5 \cdot \beta \cdot \Phi_c \cdot f_{cr} \cdot b \cdot d_v$ [7], a następnie odjęto ją od całkowitej nośności nominalnej na ścinanie ($V_n - V_c$). Na podstawie analizy bazy danych można wysnuć wnioski, że nośność na ścinanie strzemion V_f wzrasta nieliniowo wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia poprzecznego ρ_t do wartości 0,75%. Powyżej tej wartości stopnia zbrojenia $\rho_t = 0,75\%$, wyników badań jest za mało, aby właściwie opisać zależność między nośnością V_f a stopniem zbrojenia ρ_t .

Większy stopień zbrojenia poprzecznego zwiększa skrupowanie betonu oraz jego udział w przenoszeniu obciążeń ścinających, a także ogranicza propaga-

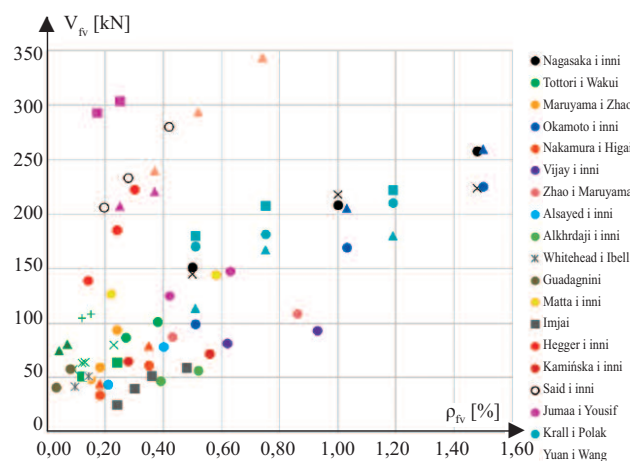


Fig. 2. Normalized shear strength of transverse reinforcement as a function of the transverse reinforcement ratio (the colour indicates the test program, and the different markers indicate the variable parameters within a single program)

Rys. 2. Znormalizowana wytrzymałość zbrojenia poprzecznego na ścinanie w funkcji stopnia zbrojenia poprzecznego (kolor określa program badawczy, a różne znaczki parametry zmienne w ramach pojedynczego programu)

as reducing the propagation of shear-induced cracking and improving the aggregate interlocking mechanism.

Jumaa [12] compared the experimental shear capacity of transverse reinforcement V_f and presented that only CNR-DT 203/2006 [13] and CSA S806-12 [7] present the least conservative capacity values for small beams, while calculations according to the other standards, give large underestimates of the capacity. The level of conservatism according to all the standards considered increases as the depth of the beam d increases.

Axial stiffness of the reinforcement

Axial stiffness of the reinforcement $\rho_l \cdot E$ is determined by the product of the degree of longitudinal reinforcement ρ_l and the Young’s modulus of elasticity E . The lower the axial stiffness of the bar, the greater the tensile strain in the longitudinal reinforcement bars. This, in turn, causes a reduction in the compression zone, which results in a higher value of shear crack opening, as well as a reduction in the proportion of the concrete shear capacity V_c . Zhao [2] found that increasing the stiffness of the longitudinal reinforcement improves the properties of stirrups. In another study, El-Sayed et al [6] found that the shear capacity of concrete is a function of the longitudinal stiffness and as the axial stiffness of the reinforcement increases, the shear capacity of concrete also increases.

Figure 3 shows the variation of the normalised shear capacity of concrete $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$ as a function of the axial stiffness of the reinforcement $\rho_l \cdot E$. This relationship can be described as an increasing power function, which is in accordance with current standards and guidelines [5, 7, 10, 14, 15].

The graph in Figure 4 shows the dependence of the load capacity of the transverse reinforcement V_f on the axial stiffness of the longitudinal reinforcement $\rho_l \cdot E$. As can be seen from the test results, increasing the longitudinal stiffness of the reinforcement, whether by increasing the area of the longitudinal reinforcement or its elastic modulus, **increased the load capacity of the transverse reinforcement.**

cję zarysowania powstałego wskutek ścinania i poprawia mechanizm ząbienia się kruszywa. Jumaa [12] porównał doświadczalną nośność na ścinanie zbrojenia poprzecznego V_f w świetle wielu norm i przedstawił, że jedynie normy CNR-DT 203/2006 [13] i CSA S806-12 [7] prezentują najmniej konserwatywne wartości nośności w przypadku małych belek, podczas gdy obliczenia wg pozostałych norm dają duże niedoszacowanie nośności. Poziom zachowawczości wg wszystkich rozpatrywanych norm zwiększa się wraz ze wzrostem wysokości użytecznej belki d .

Sztywność osiowa zbrojenia

Sztywność osiową zbrojenia $\rho_l \cdot E$ określa się iloczynem stopnia zbrojenia podłużnego ρ_l i modułu sprężystości Younga E . Im mniejsza sztywność osiowa pręta, tym większe odkształcenia rozciągające w prętach zbrojenia podłużnego. To z kolei powoduje zmniejszenie strefy ściskania, co skutkuje większą wartością rozwarcia rys ścinających, a także zmniejszenie udziału nośności betonu na ścinanie V_c . Zhao [2] stwierdził, że zwiększenie sztywności zbrojenia podłużnego poprawia właściwości strzemion. W innym badaniu El-Sayed i inni [6] stwierdzili, że nośność betonu na ścinanie jest funkcją sztywności podłużnej i wraz ze wzrostem sztywności osiowej zbrojenia zwiększa się również nośność betonu na ścinanie.

Na rysunku 3 przedstawiono zmianę znormalizowanej nośności betonu na ścinanie $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$ w zależności od osiowej sztywności zbrojenia $\rho_l \cdot E$. Zależność tę można określić, jako rosnącą funkcję potęgową, co jest zgodne z aktualnymi normami i wytycznymi [5, 7, 10, 14, 15].

Wykres na rysunku 4 obrazuje zależność nośności zbrojenia poprzecznego V_f w zależności od sztywności osiowej zbrojenia podłużnego $\rho_l \cdot E$. Jak można zauważyć na podstawie wyników przeprowadzonych badań, zwiększenie sztywności podłużnej zbrojenia, czy to przez zwiększenie powierzchni zbrojenia podłużnego, czy jego modułu sprężystości, **zwiększyło nośności zbrojenia poprzecznego.**

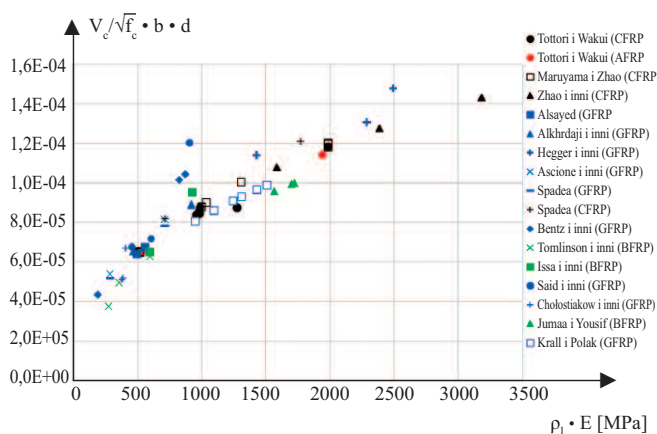


Fig. 3. Normalized shear strength of concrete as a function of axial stiffness of reinforcement
Rys. 3. Znormalizowana wytrzymałość betonu na ścinanie w funkcji sztywności osiowej zbrojenia

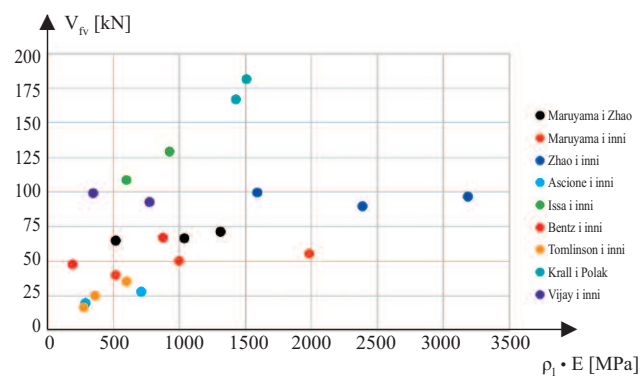


Fig. 4. Shear strength of transverse reinforcement as a function of axial stiffness of reinforcement
Rys. 4. Wytrzymałość zbrojenia poprzecznego na ścinanie w funkcji sztywności osiowej zbrojenia

Nagasaka [11] showed that, irrespective of the type of stirrups, for the same amount of transverse reinforcement, beams reinforced longitudinally with composite bars showed a lower shear capacity than beams reinforced longitudinally with steel bars. The reason for this can be attributed to the different stiffness of the composite and steel bars. The type of stirrups used (carbon, glass, hybrid) had no effect on the differences in cracking or on the load-bearing capacity of the elements. According to the authors, stirrups affect the bearing capacity of diagonal concrete cross-struts by restraining the concrete due to the significant axial stiffness of the stirrups. The relationship between degree of reinforcement and reinforcement stiffness $\sqrt{\rho_w} \cdot E_w$ is approximately linear.

Yang [16] showed that the stiffness of the longitudinal and transverse reinforcement, and thus the overall stiffness of the member, affected the development of shear transfer mechanisms, as well as the cracking pattern of the beams. The use of longitudinal bars with higher stiffness (CFRP, $E = 124$ GPa), resulted in cracking beams with a smaller crack angle than for the same beams reinforced with bars with lower stiffness (GFRP, $E = 46$ GPa). In the lower stiffness GFRP bars, twice as much reinforcement deformation was recorded (> 0.01) as in the higher stiffness CFRP bars (0.005). Similar relationships were observed by Chołostiakow et al [17] and they reported maximum transverse reinforcement deformations with values ranging from 0.009 to 0.0168 for GFRP bars and from 0.0068 to 0.0135 for CFRP reinforcement. In a beam reinforced with GFRP bars, a maximum crack opening width of 1 mm was recorded, while 0.4 mm was recorded with CFRP bars.

Shear slenderness ratio

Another parameter affecting the shear resistance of an element is the shear slenderness ratio (a/d), which is expressed as the ratio of the position of the loading force from the support axis a to the depth d . Nagasaka and Zhao [11] showed that an increase in the shear slenderness a/d results in a decrease in the nominal shear resistance V_n . Nagasaka observed an almost linear downward trend in shear resistance. Zhao showed that the higher the shear slenderness, the lower the strain in the stirrups, which reduces the shear resistance. According to Razaqpur [4], the shear capacity of concrete is proportional to the inverse of the shear slenderness ratio d/a , as a function of $(d/a)^{1/3}$. Similarly, Nehdi [5] described this relationship as $(d/a)^{0.3}$. Figure 5 shows the normalised shear resistance $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$ as a function of the shear

Nagasaka [11] wykazał, że bez względu na rodzaj strzemion, przy tej samej ilości zbrojenia poprzecznego, belki zbrojone podłużnie prętami kompozytowymi wykazywały mniejszą nośność na ścinanie niż belki zbrojone podłużnie prętami stalowymi. Przyczyny należy upatrywać w różnej sztywności prętów kompozytowych i stalowych. Rodzaj zastosowanych strzemion (węglowe, szklane, hybrydowe) nie miał wpływu na różnice w zarysowaniu ani na nośność elementów. Zdaniem autorów, strzemiona mają wpływ na nośność ukośnych krzyżulców betonowych, krępując beton z powodu znacznej osiowej sztywności strzemion. Zależność między stopniem zbrojenia a sztywnością zbrojenia $\sqrt{\rho_w} \cdot E_w$ jest w przybliżeniu liniowa.

Yang [16] wykazał, że sztywność zbrojenia podłużnego i poprzecznego, a przez to ogólna sztywność elementu, miała wpływ na rozwój mechanizmów przenoszenia sił ścinających, a także na obraz zarysowania belek. Użycie prętów podłużnych o większej sztywności (CFRP, $E = 124$ GPa) spowodowało zarysowania belek o mniejszym kącie pochylenia rys niż w przypadku takich samych belek zbrojonych prętami o mniejszej sztywności (GFRP, $E = 46$ GPa). W prętach o mniejszej sztywności GFRP zarejestrowano dwukrotnie większe odkształcenia zbrojenia ($> 0,01$) niż w przypadku prętów o większej sztywności CFRP (0,005). Podobne zależności zaobserwowali Chołostiakow i inni [17] i podali maksymalne odkształcenia zbrojenia poprzecznego o wartościach od 0,009 do 0,0168 w przypadku prętów GFRP oraz od 0,0068 do 0,0135 zbrojenia CFRP. W belce zbrojonej prętami GFRP odnotowano maksymalną szerokość rozwarcia rys 1 mm, a prętami CFRP 0,4 mm.

Smukłość ścinania

Kolejnym parametrem wpływającym na nośność elementu na ścinanie jest smukłość ścinania (a/d), która wyrażona jest stosunkiem położenia siły obciążającej od osi podpory a do wysokości użytecznej przekroju d . Nagasaka i Zhao [11] wykazali, że wzrost smukłości ścinania a/d powoduje zmniejszenie nominalnej nośności na ścinanie V_n . Nagasaka zaobserwował niemal liniową tendencję spadkową nośności na ścinanie. Zhao wykazał, że im większa smukłość ścinania, tym mniejsze jest odkształcenie w strzemionach, co zmniejsza nośność na ścinanie. Według Razaqपुरa [4] nośność betonu na ścinanie jest proporcjonalna do odwrotności stosunku smukłości ścinania d/a , jako funkcja $(d/a)^{1/3}$. Podobnie Nehdi [5] opisał tę zależność jako $(d/a)^{0.3}$. Na rysunku 5 przedstawiono znormalizowaną nośność na ścinanie $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$ w funkcji smukłości ścinania a/d . Jak

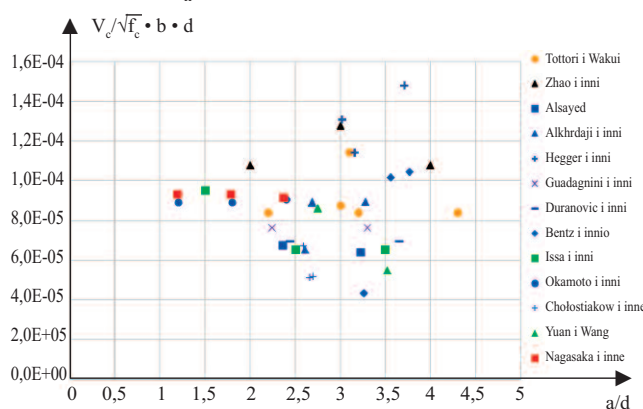


Fig. 5. Normalized shear strength of concrete as a function of shear slenderness

Rys. 5. Znormalizowana wytrzymałość betonu na ścinanie w funkcji smukłości ścinania

slenderness a/d . As can be observed, **the shear resistance decreases non-linearly with increasing shear slenderness a/d** , which is consistent with both descriptions of the relationship as a power function. **Shear slenderness has a direct influence on the shear stress transfer mechanism.** In curved beams where the $a/d > 2,5$ the arch effect has a significant influence on the shear resistance. Then part of the shear force is transferred directly to the support, resulting in an increase in the shear resistance of the beam. The influence of shear slenderness on the type of failure was confirmed by Yang's study [16], in which elements with a shear slenderness of 2,8 failed in a shear-compression manner, while elements with a slenderness of 3,5 failed in a shear-tension manner.

Maranan's research [18] showed that the shear capacity and initial stiffness of the beam increased with decreasing shear slenderness. Beams with the highest shear slenderness showed large scratches in the area of maximum moment, which penetrated into the diagonal concrete diagonal, resulting in a reduction in the shear capacity of the beam and excessive deflection.

Compressive strength of concrete

The contribution of the concrete compressive capacity V_c to the shear capacity was found to depend on the concrete compressive strength f_c . When comparing concrete with a compressive strength $f_c < 60$ MPa and concrete with a high compressive strength ($f_c \geq 60$ MPa) it was found that the contribution increases as the compressive strength of the concrete increases [6]. For the effect of concrete compressive strength in the normalised shear capacity in the form $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$ it was observed that for high strength concrete V_c decreases with increasing f_c . The mechanical explanation for this phenomenon is due to the lower shear friction in high-strength concrete, as scratches will propagate through the aggregate in the concrete. Figure 6 shows the normalised shear strength of concrete in relation to the compressive strength of concrete. Unfortunately, the scatter in the results is too large to determine this relationship accurately. A precise determination of the influence of the concrete strength on the load-bearing capacity of the element would involve the elimination of variable parameters.

In Said's [19] study of the influence of concrete strength, it was observed that as the compressive strength of concrete increases from 25 MPa to 45 MPa and to 70 MPa, the shear capacity of beams increases by 49% and 104%, respectively. The results of Jumaa [12] indicate that the pro-

można zaobserwować, **nośność na ścinanie maleje nieliniowo wraz ze wzrostem smukłości ścinania a/d** , co jest zgodne z obydwojoma opisami zależności jako funkcji potęgowej. **Smukłość ścinania ma bezpośredni wpływ na mechanizm przenoszenia naprężeń ścinających.** W belkach krępych, w których stosunek $a/d > 2,5$ znaczący wpływ na nośność ba ścinanie ma efekt łukowy. Wówczas część siły ścinającej przekazywana jest bezpośrednio na podpore, co skutkuje zwiększeniem nośności belki na ścinanie. Wpływ smukłości ścinania na rodzaj zniszczenia potwierdziły badania Yanga [16], w których elementy o smukłości ścinania 2,8 niszczyły się w sposób ścinająco-ściskający, natomiast elementy o smukłości 3,5 w sposób ścinająco-rozciągający.

Badania Maranana [18] wykazały, że nośność na ścinanie oraz sztywność początkowa belki zwiększają się wraz ze zmniejszaniem smukłości ścinania. Belki o największej smukłości ścinania wykazywały duże zarysowania w obszarze maksymalnego momentu, które przenikając do ukośnego krzyżulca betonowego, powodowały zmniejszenie nośności belki na ścinanie i nadmierne ugięcie.

Wytrzymałość betonu na ściskanie

Stwierdzono, że udział nośności betonu na ściskanie V_c w nośności na ścinanie zależy od wytrzymałości betonu na ściskanie f_c . Porównując beton o wytrzymałości na ściskanie $f_c < 60$ MPa i beton o wytrzymałości na ściskanie $f_c \geq 60$ MPa stwierdzono, że udział ten zwiększa się wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie [6]. W przypadku wpływu wytrzymałości betonu na ściskanie w znormalizowanej nośności na ścinanie w postaci $V_c/\sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$ zaobserwowano, że w przypadku betonu o dużej wytrzymałości V_c maleje wraz ze wzrostem f_c . Mechaniczne wyjaśnienie tego zjawiska wynika z mniejszego tarcia przy ścinaniu w betonie o dużej wytrzymałości, ponieważ zarysowania będą w nim propagować przez kruszywo. Na rysunku 6 przedstawiono znormalizowaną wytrzymałość betonu na ścinanie w zależności od wytrzymałości betonu na ściskanie. Niestety rozrzut wyników jest zbyt duży, aby dokładnie ocenić tę zależność. Precyzyjne określenie wpływu wytrzymałości betonu na nośność elementu wiązałoby się z wyeliminowaniem parametrów zmien-

nych.

W badaniach wpływu wytrzymałości betonu Said'a [19] zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie z 25 MPa do 45 MPa i do 70 MPa nośność na ścinanie belek zwiększa się odpowiednio o 49 i 104%. Wyniki badań Jumaa [12] wskazują, że udział beto-

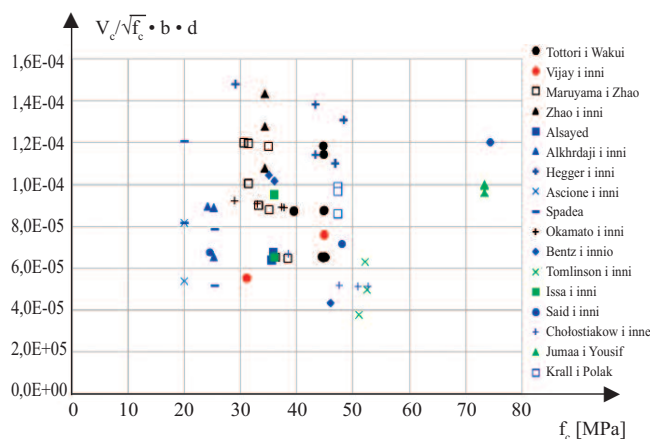


Fig. 6. Normalized shear strength of concrete as a function of concrete compressive strength

Rys. 6. Znormalizowana wytrzymałość betonu na ścinanie w funkcji wytrzymałości betonu na ściskanie

portion of concrete V_c as a component of shear capacity, slightly affects the shear capacity if the elements are reinforced with stirrups.

Stirrups spacing

The stirrups spacing s positively influences the shear resistance of the beam. **Reducing the stirrups spacing s increases both the proportion of concrete shear resistance V_c , and the resistance of the transverse reinforcement V_r [20].** The shear resistance of the concrete is higher because a smaller stirrups spacing increases the concrete restraint and raises the cracking moment of the beam. A smaller stirrups spacing significantly increases the shear resistance of the element due to the greater number of transverse bars in the support zone of the beam.

Figure 7 shows the relationship between the normalised shear resistance $V_{fv}/(d \cdot A_{fv} \cdot E_{fv})$ and the inverse of stirrups spacing $1/s$. **The stirrups spacing is inversely proportional to the shear resistance (s^{-1}), so that stirrups compaction induces a linear increase in shear resistance.**

Jumaa's research [12] proved that a reduction in stirrups spacing from $d/2$ to $d/3$ resulted in a reduction in crack opening width in the shear zone, primarily for 300 mm and 500 mm high beams [12]. The average crack reduction in the shear zone for small (300 mm), medium (500 mm) and large (700 mm) beams was 37%, 24.5% and 4%, respectively.

Depth of beam

The effect of the depth of beams without stirrups on shear has been considered in most standards (CAN/CSA S806-12, CNR-DT 203, JSCE) [7, 10, 13, 14] and in many models confirmed by experimental studies [21 ÷ 24]. Studies have shown that the increase in shear resistance due to the size effect is at the level of 26 – 50%, with a depth of 200 – 1000 mm [12]. This clearly confirms the effect of the size effect on the shear resistance of concrete beams whose effective useful height is greater than 300 mm [24], and the width of shear crack opening in large-size beams can be greater than in smaller-size beams [21].

The reduction in the contribution of concrete to the shear resistance with increasing the effective member height in steel-reinforced beams and slabs has been confirmed in studies [25 – 28]. This phenomenon is mainly due to the increased width of diagonal crack opening as the depth increases [29]. The issue of the influence of the depth is also crucial in the

nu V_c , jako składowa nośności na ścinanie, nieznacznie wpływa na nośność na ścinanie, jeżeli elementy są zbrojone strzemionami.

Rozstaw strzemion

Rozstaw strzemion s korzystnie wpływa na nośność belki na ścinanie. **Zmniejszenie rozstawu strzemion s zwiększa zarówno udział nośności betonu na ścinanie V_c , jak i nośność zbrojenia poprzecznego V_r [20].** Nośność betonu na ścinanie jest większa, ponieważ mniejszy rozstaw strzemion zwiększa skrupowanie betonu i podnosi moment zarysowania belki. Mniejszy rozstaw strzemion znacznie zwiększa nośność elementu na ścinanie ze względu na większą liczbę prętów poprzecznych w strefie podporowej belki.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność między znormalizowaną nośnością na ścinanie $V_{fv}/(d \cdot A_{fv} \cdot E_{fv})$ i odwrotnością rozstawu strzemion $1/s$. **Rozstaw strzemion jest odwrotnie**

proporcjonalny do nośności na ścinanie (s^{-1}), co sprawia, że zagęszczenie strzemion wywołuje liniowy przyrost nośności na ścinanie.

Badania Jumaa [12] dowiodły, że zmniejszenie rozstawu strzemion z $d/2$ do $d/3$ spowodowało zmniejszenie szerokości rozwarcia rys w strefie ścinania, przede wszystkim w przypadku belek o wysokości 300 i 500 mm [12]. Średnie zmniejszenie rys w strefie ścinania w przypadku małych (300 mm), średnich (500 mm) i dużych (700 mm) belek wynosiło odpowiednio 37%, 24,5% oraz 4%.

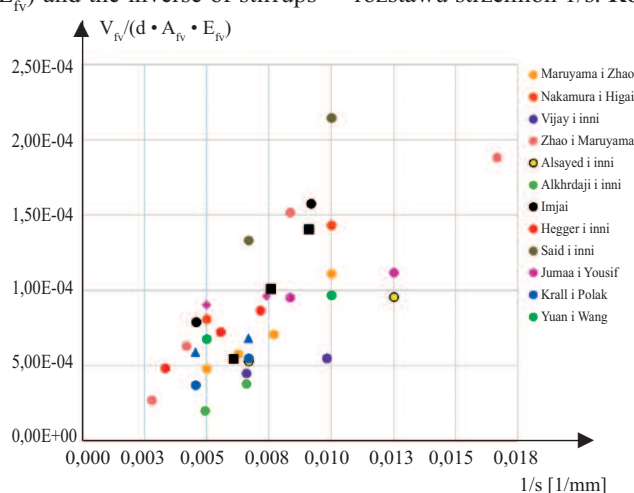


Fig. 7. Normalized shear strength of transverse reinforcement as a function of stirrup spacing

Rys. 7. Znormalizowana wytrzymałość zbrojenia poprzecznego na ścinanie w funkcji rozstawu strzemion

Wysokość użyteczna

Wpływ wysokości belek bez strzemion na ścinanie został uwzględniony w większości norm (CAN/CSA S806-12, CNR-DT 203, JSCE) [7, 10, 13, 14] i w wielu modelach potwierdzonych badaniami doświadczalnymi [21 ÷ 24]. Badania dowiodły, że wzrost nośności na ścinanie spowodowany efektem skali (*size effect*) jest na poziomie 26 – 50%, przy wysokości użytecznej belki 200 – 1000 mm [12]. Potwierdza to wyraźnie wpływ efektu skali na nośność na ścinanie belek betonowych, których efektywna wysokość użyteczna jest większa niż 300 mm [24], a szerokość rozwarcia rys ścinających w belkach wielkowymiarowych może być większa niż w belkach o mniejszych wymiarach [21].

Zmniejszanie udziału betonu w nośności na ścinanie przy zwiększaniu wysokości użytecznej elementu w belkach i płytach zbrojonych stalą zostało potwierdzone w badaniach [25 – 28]. Zjawisko to wynika przede wszystkim z większej szerokości rozwarcia rys ukośnych w miarę zwiększania efek-

design of concrete elements reinforced with FRP composite bars, in which deeper and wider cracks are caused by the relatively low modulus of elasticity of the bending and shear reinforcement, as well as the negligible effect of the dowel action.

The size effect in beams longitudinally reinforced with FRP bars without transverse reinforcement is much greater than in beams longitudinally reinforced with steel bars [12]. The effect of element size on shear capacity depends on the fibre type of the composite reinforcement. **The results of tests on reinforced concrete elements reinforced with FRP bars, indicate a large influence of the depth, commonly understood as the size effect, on the shear resistance of concrete** [23, 24, 29, 30]. The size effect is large primarily in beams without web reinforcement and is mitigated by the presence of shear reinforcement [31]. The authors of the study observed a reduction in shear resistance of at least 24% in beams with depth of about 880 mm and a ratio of longitudinal GFRP reinforcement of 0.59% and 0.89%. Sections with 2.7 times the amount of transverse reinforcement showed a slight difference in the compressive strength of the concrete [29]. A study by Chołostiakow et al [17] confirmed that crack spacing is a function of depth, with higher crack spacing confirmed in beams with higher useful heights.

Shape of the beam cross-section

In addition to the useful height of the beam, the shape of the cross-section can also influence the shear capacity of beams. Attention to the influence of cross-section geometry was drawn by Ibell and Burgoyne [32]. The contribution of the compression cross-strut in reinforced concrete elements is greater the greater the stiffness of the cross-section, and therefore the greater the width of the beam, the greater the force absorbed by the concrete and the smaller the contribution of the transverse reinforcement [33]. Analysing the state of the art, it was noted that to date few studies have been carried out on T-beams to be able to investigate the influence of the width of the compression zone [20, 34, 35].

Inclination of the transverse reinforcement

The results of Spadea [36] confirmed that the inclined stirrups experienced greater deformation than the vertical stirrups in the same beam. Similarly, Fakharifar [37] used inclined reinforcement from handmade stirrups, which also proved that such stirrups more effectively restrained the diagonally scratched shear region. A more extensive study of the effect of sloped transverse reinforcement on shear capacity was carried out by Yuan and Wang [38], who used handmade stirrups in the form of a carbon fibre strip. The shear resistance of beams with stirrups inclined at 45°, 90°/65° and 60° were 1.19, 1.22 and 1.26 times that of beams with vertical stirrups, respectively, with stirrups inclined at 60° showing the highest shear resistance. The

tywnej wysokości użytecznej przekroju [29]. Zagadnienie wpływu wysokości użytecznej przekroju ma również zasadnicze znaczenie w projektowaniu elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP, w których głębsze i szersze rysy spowodowane są względnie małym modułem sprężystości zbrojenia zginającego i ścinającego, a także znikomym oddziaływaniem klockowania zbrojenia.

Efekt skali w belkach zbrojonych podłużnie prętami FRP bez zbrojenia poprzecznego jest znacznie większy niż w belkach zbrojonych podłużnie prętami stalowymi [12]. Wpływ wymiarów elementu na nośność ścinania zależy od rodzaju włókien zbrojenia kompozytowego. **Wyniki badań elementów żelbetowych zbrojonych prętami FRP wskazują na duży wpływ wysokości użytecznej przekroju, powszechnie rozumianego jako efektu skali, na wytrzymałość betonu na ścinanie** [23, 24, 29, 30]. Efekt skali jest duży przede wszystkim w belkach bez zbrojenia środnika i łagodzi go obecność zbrojenia na ścinanie [31]. Autorzy badań zaobserwowali zmniejszenie nośności na ścinanie o co najmniej 24% w belkach o efektywnej wysokości użytkowej ok. 880 mm i stopniu zbrojenia podłużnego GFRP na poziomie 0,59 i 0,89%. W przekrojach z 2,7 razy zwiększoną ilością zbrojenia poprzecznego stwierdzono nieznaczną różnicę wytrzymałości betonu na ściskanie [29]. Badania Chołostiakowa i innych [29] potwierdziły, że rozstaw rys jest funkcją wysokości belki, przy czym większy rozstaw rys potwierdzono w belkach o większej wysokości użytecznej.

Kształt przekroju poprzecznego belki

Poza wysokością użyteczną belki, także kształt przekroju poprzecznego może wpływać na nośność belek na ścinanie. Uwagę na wpływ geometrii przekroju zwrócili Ibell i Burgoyne [32]. Udział krzyżulca ściskanego w elementach żelbetowych jest tym większy, im większa jest jego sztywność, a zatem im większa szerokość belki, tym większą siłę przejmuje beton i tym mniejszy jest udział zbrojenia poprzecznego [33]. Analizując stan wiedzy, zauważono, że dotychczas niewiele badań wykonano na belkach teowych, aby móc zbadać wpływ szerokości strefy ściskanej [20, 34, 35].

Nachylenie zbrojenia poprzecznego

Wyniki badań Spadea [36] potwierdziły, że w pochyłonych strzemionach wystąpiły większe odkształcenia niż w strzemionach pionowych w takiej samej belce. Podobnie Fakharifar [37] zastosował nachylone zbrojenie z ręcznie wykonanych strzemion, co również dowiodło, że takie strzemiona skuteczniej krępowały zarysowany ukośnie obszar ścinania. Szersze badania wpływu nachylenia zbrojenia poprzecznego na nośność ścinania przeprowadzili Yuan i Wang [38], którzy wykorzystali własnoręcznie przygotowane strzemiona w formie taśmy z włókien węglowych. Nośności na ścinanie belek ze strzemionami pochyłonymi pod kątem 45°, 90°/65° i 60° były odpowiednio 1,19, 1,22 i 1,26 razy większe niż belki ze strzemionami pionowymi, przy czym największą nośność na ścinanie wykazywały strzemiona na-

inclination of the stirrups resulted in an increase in the load corresponding to the maximum allowable crack width in the range 110 – 189%, while also improving the ratio of cracking load to failure load. Inclined stirrups are more effective in improving performance, compared to vertical stirrups with half the spacing [38]. Similarly, Demir [39] showed that the use of diagonal shear reinforcement is beneficial in increasing the load carrying capacity of beams, especially those where the shear slenderness ratio a/d is less than 4.0.

Bond behaviour of stirrups

Ibell and Burgoyne [32] showed that the bond behaviour of the bar to the concrete, including the location of the adhesion section and the reinforcement, have a great influence on the shear behaviour of FRP reinforcement. Similar results were confirmed by Vijay [40] showing that shear failure of beams occurred due to the loss of bond behaviour of FRP bars, before the full capacity of the stirrups was reached. Shehata's study [41] shows that shear deformation is also affected by the adhesion characteristics of the transverse reinforcement.

The issue of bond behaviour of composite bars to concrete has been investigated in extensive in own research [42 – 45]. **On the basis of the results obtained, it was found that the type of bars, their geometry (shape and diameter), the configuration of the reinforcement (reinforcement concrete cover, arrangement in reinforcement layers) and the surface (covering with sand of different grain sizes, ribbing by means of braiding of variable types, spacing and shape of ribs, grooving of bars) significantly affect the bond behaviour of bars to concrete, both longitudinal and transverse reinforcement, and thus may determine the shear resistance of the element.**

Summary

The analysis of the variable parameters showed that the shear resistance increases with an increase in the transverse reinforcement ratio. The longitudinal reinforcement ratio ρ_l also significantly affects the shear resistance and is related in a non-linear way to the contribution of the concrete shear resistance V_c . Increasing the axial stiffness by increasing the longitudinal reinforcement ratio or its modulus of elasticity increases the load capacity of the transverse reinforcement. The increase in shear resistance decreases non-linearly with increasing shear slenderness ratio a/d . Decreasing the stirrup spacing s increases both the contribution of the shear resistance of the concrete V_c , and the resistance of the transverse reinforcement V_f . In addition, shear resistance is also influenced by the depth, the shape of the beam cross-section, the inclination of the stirrups and their bond behaviour to the concrete.

A review of the literature shows that the influence of some parameters has not been clearly described, and that the fact that several variable factors are influenced at the same

chylone pod kątem 60° . Pochylenie strzemion skutkowało zwiększeniem obciążenia odpowiadającego maksymalnej dopuszczalnej szerokości rozwarcia rys w zakresie 110 – 189%, a jednocześnie poprawiło stosunek obciążenia rysującego do obciążenia niszczącego. Pochylone strzemiona skuteczniej poprawiają właściwości użytkowe w porównaniu ze strzemionami pionowymi o rozstawie połowę mniejszym [38]. Podobnie Demir [39] wykazał, że zastosowanie ukośnego zbrojenia na ścinanie korzystnie wpływa na zwiększenie nośności belek, szczególnie tych, w których smukłość ścinania a/d jest mniejsza niż 4.0.

Przyczepność strzemion

Ibell i Burgoyne [32] wykazali, że przyczepność pręta do betonu, w tym lokalizacja odcinka przyczepności zbrojenia mają ogromny wpływ na zachowanie się zbrojenia FRP na ścinanie. Podobne wyniki potwierdził Vijay [40], wykazując, że do uszkodzenia belek na ścinanie dochodziło z powodu utraty przyczepności prętów FRP przed osiągnięciem pełnej nośności strzemion. Z badań Shehaty [41] wynika, że na odkształcenie przy ścinaniu ma wpływ także charakterystyka przyczepności zbrojenia poprzecznego. Zagadnienie przyczepności prętów kompozytowych do betonu zbadaliśmy w obszernych badaniach własnych [42 – 45]. **Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że rodzaj prętów, ich geometria (kształt i średnica), konfiguracja zbrojenia (otulina zbrojenia, układ w warstwach zbrojenia) oraz sposób wykończenia powierzchni (pokrycie piaskiem o różnej wielkości ziarna, ożebrowanie za pomocą oplotu o zmiennych rodzajach, odstęp i kształcie żeber, ryflowanie prętów) istotnie wpływają na przyczepność prętów do betonu, zbrojenia zarówno podłużnego, jak i poprzecznego, a tym samym może decydować o nośności elementu na ścinanie.**

Podsumowanie

Analiza parametrów zmiennych pokazała, że nośność na ścinanie zwiększa się wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia poprzecznego FRP. Stopień zbrojenia podłużnego ρ_l również istotnie wpływa na nośność na ścinanie i jest powiązany w sposób nieliniowy z udziałem nośności betonu na ścinanie V_c . Zwiększenie sztywności osiowej przez zwiększenie stopnia zbrojenia podłużnego, czy jego modułu sprężystości zwiększa nośność zbrojenia poprzecznego. Wzrost nośności na ścinanie maleje nieliniowo wraz ze wzrostem smukłości ścinania a/d . Zmniejszenie rozstawu strzemion zwiększa zarówno udział nośności betonu na ścinanie V_c , jak i nośność zbrojenia poprzecznego V_f . Ponadto na nośność na ścinanie wpływają także: wysokość użyteczna przekroju; kształt przekroju poprzecznego belki; nachylenie strzemion i ich przyczepność do betonu.

Z przeglądu literatury wynika, że wpływ niektórych parametrów nie został jednoznacznie opisany, a fakt jednoczesnego wpływu kilku czynników zmiennych nie pozwala na precyzyjne wyodrębnienie poszczególnych parametrów. Istnieje

time does not make it possible to extract the individual parameters precisely. There is therefore a need for more experimental studies with analysis and precise description of their results.

Received: 13.05.2024
Revised: 02.08.2024
Published: 25.11.2024

je więc potrzeba przeprowadzenia większej liczby badań doświadczalnych z wnikliwą analizą i precyzyjnym opisem ich wyników.

Artykuł wpłynął do redakcji: 13.05.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.08.2024 r.
Opublikowano: 25.11.2024 r.

Literature

- [1] Szczech D, Kotynia R. Badania na ścinanie belek zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami FRP. *Materiały Budowlane*. 2024; 4: 32 ÷ 36.
- [2] Zhao W, Maruyama K, Suzuki H. Shear behavior of concrete beams reinforced by FRP rods as longitudinal and shear reinforcement. *RILEM*. 1995.
- [3] Gross SP, Dinehart DW, Yost JR, Theisz PM. Experimental tests of high-strength concrete beams reinforced with CFRP bars. *Proc. of the ACMBBS*, 2004.
- [4] Razaqpur AG, Isgor BO, Greenaway S, Selley A. Concrete Contribution to the Shear Resistance of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members. *Jour. of Comp. for Constr.* 2004; 8(5): 452 – 460.
- [5] Nehdi M, El Chabib H, Saïd AA. Proposed shear design equations for FRP reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach. *Jour. of Mat. in Civil Eng.* 2007; 19 (12): 1033 – 1042.
- [6] El-Sayed AK, El-Salakawy EF, Benmokrane B. Shear Strength of FRP-Reinforced Concrete Beams without Transverse Reinforcement. *ACI Struct. Jour.* 2006; 103 (2): 235 – 2436.
- [7] CAN/CSA-S806-12 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association, 2012.
- [8] Tottori S, Wakui H. Shear capacity of RC and PC beams using FRP reinforcement. *Special Publ.* 1993; 138: 615 – 632.
- [9] Rao GA, Sundaresan R. Size Dependent Shear Strength Of Reinforced Concrete Deep Beams Based On Refined Strut-And-Tie Model. *Symp.* 2014; 300: 1 – 26.
- [10] JSCE. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. 1997.
- [11] Nagasaka T, Fukuyama H, Tanigaki M. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups. *Special pub.* 1993; 138: 789 – 81.
- [12] Jumaa GB, Yousif AR. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Constr. and Building Mat.* 2019; 209: 77 – 94.
- [13] CNR-DT-203/2006 Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. 2007.
- [14] ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute. 2015.
- [15] Tureyan AK, Frosch RJ. Shear tests of FRP-reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Struct. Jour.* 2002; 99(4): 427 – 434.
- [16] Yang F. Deformation Behaviour of Beams Reinforced with Fibre Reinforced Polymer Bars under Bending and Shear. *Diss. PhD.* Sheffield, 2015.
- [17] Cholostiakow S, Di Benedetti M, Pilakoutas K, Guadagnini M. Effect of Beam Depth on Shear Behaviour of FRP RC Beams. *J. of Comp. for Constr.* 10.1061, 2018.
- [18] Maranan G, Manalo A, Benmokrane B, Karunasena W, Mendis P, Nguyen TQ. Shear behaviour of geopolymer-concrete beams transversely reinforced with continuous rectangular GFRP composite spirals” *Comp. Struct.* 2018; 187.
- [19] Said M, Adam MA, Mahmoud AA, Shanour AS. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Constr. and Building Mat.* 2016; 102: 574 – 591.
- [20] Ahmed A, El-Salakawy EF, Benmokrane B. Performance Evaluation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Beams. *ACI Struct. Jour.* 2010; no. 107.
- [21] Hoult N, Sherwood EG, Bentz E, Collins MP. Does the use of FRP reinforcement change the one-way shear behavior of reinforced concrete slabs? *Jour. of Comp. for Constr.* 2008; 12 (2): 125 – 133.
- [22] Razaqpur A, Spadea S. Resistenza a taglio di elementi di calcestruzzo rinforzatti e staffe di FRP. *Proceedings, AIAS* 2010.
- [23] Alam MS, Hussein A. Size Effect on Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *Jour. of Comp. for Constr.* 2013; 17(4): 507 – 516.
- [24] Ashour AF, Kara IF. Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams. *Composites Part B Eng.* 2014; 60: 612 – 620.
- [25] Kani GNJ. How safe are our large reinforced concrete beams? *ACI Journal.* 1967; 64(3): 128 – 141.
- [26] Collins MP, Kuchma D. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings. *ACI Struct. Journal* 1999; 96(4): 482 – 490.
- [27] Frosch RJ. Behavior of large-scale reinforced concrete beams with minimum shear reinforcement. *ACI Struct. Journal.* 2000; 97(6): 814 – 820.
- [28] Lubell A, Sherwood T, Bentz E, Collins M. Safe shear design of large, wide beams. *Concrete Internat.* 2004; 26(1): 66 – 78.
- [29] Matta F, Nanni A, Galati N, Mosele F. Size effect on shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars. *Proc. of the 6th Inter. Conf. on FraMCoS-6.* 2007; 2: 17 – 22.
- [30] Bentz EC, Massam L, Collins MP. Shear strength of large concrete members with FRP reinforcement. *Jour. of Comp. for Constr.*, 637-646. 2010.
- [31] Matta F, El-Sayed AK, Nanni A, Benmokrane B. Size effect on concrete shear strength in beams reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI Struct. Journal.* 2013; 110(4): 617.
- [32] Ibell T, Burgoyne J. Use of Fiber-Reinforced Plastics Versus Steel for Shear Reinforcement of Concrete. *ACI Struct. Jour.* 1999; V. 96, No. 6: 997 1002.
- [33] Leonhardt F, Walther R. Shear Tests on Beams With and Without Shear Reinforcement. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.* 1962; 151(151): 83.
- [34] Szczech D, Kotynia R. Shear tests on GFRP reinforced concrete beams. 10th International Conference on AMCM. *MATEC Web od Conf. Vol.* 323. 2020.
- [35] Szczech D, Kotynia R. Effect of shear reinforcement ratio on the shear capacity of GFRP reinforced concrete beams. *Arch. of Civil Eng.* 2021; Volume 67, Issue 1.
- [36] Spadea S, Orr J, Nanni A, Yang Y. Wound FRP shear reinforcement for concrete structures. *Jour. of Comp. for Constr.* 2017; 21(5): 4017026.
- [37] Fakharifar M, Dalvand A, Sharbatdar MK, Chen G, Sneed L. “Innovative hybrid reinforcement constituting conventional longitudinal steel and FRP stirrups for improved seismic strength and ductility of RC structures”. *Frontiers of Struc. and Civil Eng.* 2016; 10 (1).
- [38] Yuan Y, Wang Z. Shear behavior of large-scale concrete beams reinforced with CFRP bars and handmade strip stirrups. *Comp. Struc.* 2019; 227.
- [39] Demir A, Caglar N, Ozturk H, Sumer Y. Nonlinear Finite Element Study on the Improvement of Shear Capacity in Reinforced Concrete T-Section Beams by an Alternative Diagonal Shear Reinforcement. *Eng.Struc.* 2016; 120: 158–165.
- [40] Vijay PV, Kumar SV, Ganga Rao HVS. Shear and ductility behavior of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *Proc. of the 2nd Inter. Conf. on ACMBBS-II*, 1996.
- [41] Shehata E, Morphy R, Rizkalla S. Fibre Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Members: Behaviour and Design Guidelines. *Can. Jour. of Civil Eng.* 2000; 27: 859 – 872.
- [42] Kotynia R, Szczech D, Kaszubska M. Bond Behavior of GRFP Bars to Concrete in Beam Test. *Proc. Eng.* 2017; 193: 401 – 408.
- [43] Szczech D, Kotynia R. Beam bond test of GFRP and steel reinforcement to concrete. *Arch. of Civil Eng.* 2018; Vol. 64, Issue 4.
- [44] Szczech D, Kotynia R. Badania przyczepności zbrojenia niemetalicznego do betonu. *Inżynier Budownictwa.* 2019; 75 nr 4: 176 – 180.
- [45] Szczech D, Kotynia R. Bond analysis of GFRP and steel reinforcement to concrete. *Fib 2019 Symp. – Concrete: Innovations in mat. design and struct.* Kraków 2019.