

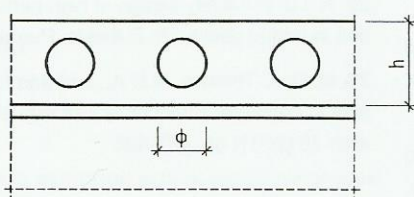
Ocena wpływu efektu skali na właściwości wytrzymałościowe betonu w łącznikach listwowych

Evaluation of scale effect on concrete strength in strip connectors

1. Wstęp

Beton jest materiałem, którego właściwości wytrzymałościowe zależą między innymi od kształtu i wymiarów elementu badawczego oraz rodzaju i czasu działania obciążenia. Na ogół jednak wszystkie właściwości wytrzymałościowe określa się na podstawie wyników badań doraźnych wytrzymałości na ściskanie, przeprowadzanych na elementach znormalizowanych (kostki sześcienne lub walce). Jednak porównywanie wytrzymałości betonu określanych na elementach różnych kształtów i wymiarów następcza w dalszym ciągu duże kłopoty (1).

W przypadku łączników listwowych (rysunek 1) elementów zespolonych typu stal-beton problem wytrzymałości betonu jest jeszcze bardziej skomplikowany. Beton w otworach listew pracuje podobnie jak nity w połączeniach elementów stalowych. Oznacza to, że przenosi on siły ścinające działające wzdłuż dwóch płaszczyzn bocznych listew oraz siły docisku działające w ich otworach. Pierwsze z wymienionych sił powodują powstawanie naprężeń ścinających (ściananie bezpośrednie), natomiast drugie naprężeń docisku. Należy w tym miejscu podkreślić, że badanie wytrzymałości betonu na ściananie bezpośrednie oraz na docisk nie jest znormalizowane.



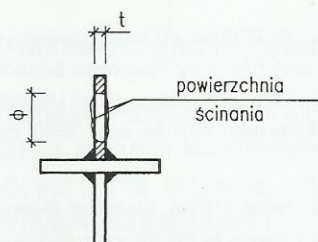
Rys. 1. Łącznik listwowy

Fig. 1. Strip connector

1. Introduction

The strength characteristics of concrete depend on the shape and sizes of the test specimens, and type and duration of loading. Generally, however, all strength characteristics are determined on the basis of results of immediate tests of compressive strength, run on standardized specimens (cubes or cylinders). Still, the comparison of concrete strength determined on elements of different shapes and dimensions presents serious difficulties (1).

In case of strip connectors (Fig. 1) of steel-concrete composite elements the problem of concrete strength is even more complicated. In the strip holes concrete operates like rivets in steel elements joints. This means that it transfers the shearing forces acting along two lateral surfaces of the strips and bearing forces operating in their holes. The former ones cause shear stress (direct shear), while the latter ones cause bearing stress. It should be pointed out that testing concrete direct shear and bearing shear is not normalised.



Even if the principles of testing concrete direct shear strength f_{ctb} and bearing strength f_{cud} were defined in a norm, there would still remain the problem of the effect of scale to solve. The standard test specimens for determination of concrete strength characteristics

are 150÷300 mm in size, the dimensions of holes in strips usually have the diameter of only $\phi = 20\div45$ mm, and thickness of the strips themselves is $t = 12\div20$ mm.

The carrying capacity of strip connectors is exhausted due to:

- exceeding concrete direct shear strength,
- exceeding concrete bearing strength, or

Wyczerpanie nośności łączników listwowych następuje wskutek:

- przekroczenia wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie,
- przekroczenia wytrzymałości betonu na docisk, lub
- ścięcia stalowej listwy między otworami (przekroczenie wytrzymałości stali na ścinanie).

Wynika stąd, że znajomość właściwości wytrzymałościowych betonu jest bardzo ważna przy ocenie nośności łączników listwowych.

W artykule przedstawiono wyniki badań własnych w zakresie wpływu efektu skali na wartości wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie f_{ctb} i docisk f_{cud} przy obliczaniu łączników listwowych. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ wymiarów listew i otworów na wartości f_{ctb} i f_{cud} . Podane propozycje zostały opracowane na podstawie wyników własnych badań doświadczalnych.

2. Uwagi na temat wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie oraz docisk

Wytrzymałość betonu na ścinanie bezpośrednie f_{ctb} nie jest jednoznacznie zdefiniowana. Badania tej cechy wytrzymałościowej betonu nie obejmuje również norma PN-88/B-06250 (2), ani inne normy lub instrukcje. Tym samym nie ma jednoznacznie określonych kształtów i wielkości elementów badawczych do określania tej cechy betonu. Powszechnie wiadomo, że wytrzymałość betonu na ścinanie bezpośrednie jest znacznie większa od wytrzymałości betonu na ścinanie, przyjmowanej na poziomie wytrzymałości na rozciąganie. Znalazło to odzwierciedlenie w nie obowiązujących już normach do obliczania konstrukcji betonowych: PN-56/B-03260 (3) oraz PN-58/B-03261 (4).

Późniejsze normy: PN-76/B-03264 (5) (zastępująca PN-56/B-03260 (3)) oraz PN-91/S-10042 (6) (zastępująca normę PN-58/B-03261 (4)), a także Eurocode EC 2 (7, 8) w ogóle nie wprowadziły pojęcia wytrzymałości betonu na rozciąganie. Uboga jest również literatura na ten temat. Poza tym otrzymuje się duże zróżnicowanie wytrzymałości betonu na ściskanie bezpośrednie przy korzystaniu z wzorów przeliczeniowych podanych przez różnych autorów (9).

Według Mohra $f_{ctb} = 0,5 \sqrt{f_c f_{ct}}$, natomiast według Mörscha wytrzymałość ta jest dwukrotnie większa: $f_{ctb} = \sqrt{f_c f_{ct}}$. Pośrednią wartość proponował Seybold: $f_{ctb} = 0,75 \sqrt{f_c f_{ct}}$ (10). We wzorach tych f_c oznacza wytrzymałość betonu na ściskanie, natomiast f_{ct} wytrzymałość betonu na rozciąganie. Przyjmując dla uproszczenia $f_{ct} = 0,1 f_c$ otrzymamy dla podanych propozycji: $f_{ctb} = (0,158 \text{ do } 0,316) f_c$; średnio $0,237 f_c$. W podanym przedziale mieszczą się również propozycje innych autorów. Tak dużą rozbieżność wartości wytrzymałości można częściowo wytłumaczyć tym, że autorzy poszczególnych propozycji określali je na podstawie wyników badań doświadczalnych przeprowadzonych na różnych, niezunifikowanych elementach.

- shear of the steel strip between the holes (exceeding steel shear strength).

It follows that it is important to know concrete strength characteristics to be able to evaluate strip connectors carrying capacity.

The article presents the results of the author's research on the effect of scale on concrete direct shear strength f_{ctb} and bearing strength f_{cud} when designing strip connectors. Particular attention was focused on the effect of the dimensions of strips and holes on the values of f_{ctb} and f_{cud} . The suggested proposals, too, have been worked out on the basis of the results of the author's research.

2. Remarks on concrete direct shear and bearing strength

Concrete direct shear strength f_{ctb} is not specifically defined. Testing of this strength of concrete is not covered by PN-88/B-06250 norm (2) or other norms and instructions. This means that the shapes and dimensions of test specimens for determination of this feature are not specified either. It is common knowledge that concrete direct shear strength is significantly larger than concrete shear strength, adopted on the level of tensile strength. This was reflected in concrete structures design norms PN-56/B-03260 and PN-58/B-03261, no longer valid (4).

Neither did later norms PN-76/B-03264 (5) (replacing PN-56/B-03260 (3)) and PN-91/S-10042 (6) (replacing PN-58/B-03261 (4)), or Eurocode EC 4 (7, 8) introduce the term of concrete tensile strength at all. Besides, serious discrepancy in concrete direct compressive strength results when calculation formulae given by different authors are used (9).

According to Mohr $f_{ctb} = 0.5 \sqrt{f_c f_{ct}}$, while according to Mörsch this strength is twice as large: $f_{ctb} = \sqrt{f_c f_{ct}}$. An intermediate value was proposed by Seybold: $f_{ctb} = 0.75 \sqrt{f_c f_{ct}}$ (10). In these formulae f_c refers to concrete compressive strength, while f_{ct} to concrete tensile strength. Assuming for simplification's sake $f_{ct} = 0.1 f_c$ we receive for the given proposals: $f_{ctb} = (0.158+0.316) f_c$; an average $0.237 f_c$. The quoted range also includes suggestions by other researchers. Such substantial discrepancy of the values of strength can be partly accounted for by the fact that the authors determined them on the basis of the results of experiments run on different, not standardised test specimens.

Despite a large range of concrete direct shear strength they have not been confirmed by the results of experiments on perforated strips. On the basis of (11, 12) concrete direct shear strength can be adopted as $f_{ctb} = 1.235 f_c$. It is an overestimated value because it also incorporates concrete adhesion to structural steel. The value $f_{ctb} = 0.75 f_c$ given in [3] is also slightly overestimated:

Similar discrepancies as in case of $f_{ctb} = 1.235 f_c$ are found also in the suggestions of defining concrete bearing strength (9). For a small bearing area as related to the concrete specimen dimen-

Pomimo bardzo dużego zakresu wartości wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednio nie znalazły one potwierdzenia w wynikach badań doświadczalnych perforowanych listew. Na podstawie prac (11,12) wytrzymałość betonu na ścinanie bezpośrednio w listwach można przyjmować równą $f_{ctb} = 1,235 f_c$. Jest to wytrzymałość zawyżona, gdyż ujmuje również przyczepność betonu do stali konstrukcyjnej. Nieznacznie zawyżona jest także wartość podana w pracy (9), w której zaproponowano przyjmowanie $f_{ctb} = 0,75 f_c$.

Podobne rozbieżności jak w przypadku $f_{ctb} = 1,235 f_c$ występują także w propozycjach określania wytrzymałości betonu na docisk (9). Przy małej powierzchni docisku w stosunku do wymiarów przynależnej objętości betonu można przyjmować - według norm obecnie obowiązujących oraz wcześniejszych - wartość maksymalną $f_{cud} = \omega f_c = m_d f_c = (2 \text{ do } 4) f_c$. Jednak nawet największa z tych wartości zdaje się być zaniżona. Oczywiście czym mniejsza jest powierzchnia docisku, tym większa jest wartość wytrzymałości f_{cud} .

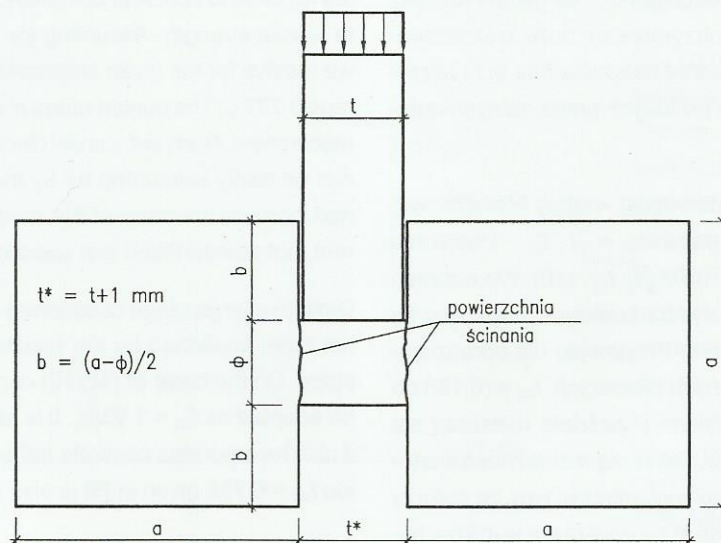
Wpływ wielkości powierzchni docisku na wartość f_{cud} określają między innymi wzory normowe (5, 6). Odnoszą się one jednak do wymiarów powierzchni docisku o jeden rząd większych niż wymiary powierzchni docisku w listwach perforowanych. Oznacza to, że powierzchnia docisku w listwach jest o dwa rzędy mniejsza niż w innych elementach konstrukcji budowlanych i inżynierskich.

3. Badania doświadczalne własne

3.1. Elementy badawcze i metodyka badań

Badania własne wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednio f_{ctb} przeprowadzono na elementach, których wymiary przedstawiono na rysunku 2. Były to dwie kostki sześciennie połączone monolitycznie walcem o średnicy i szerokości odpowiadającej otworowi w listwach perforowanych stosowanych w konstrukcjach zespolonych. Cały element badawczy był betonowany jednocześnie.

Długości boków kostek wynosiły $a = 10 \text{ cm}$ oraz $a = 15 \text{ cm}$. Odpowiadały one kostkom do badania wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie (przez rozłupywanie) i w takim celu były wykorzystywane w drugim etapie badań. Po zakończeniu badania na ścinanie bezpośrednio zawsze jedna kostka była użyta do określania wytrzymałości betonu na ściskanie, a druga na rozciąganie (przez rozłupywanie).



Rys. 2. Elementy do badania wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednio
Fig. 2. Test specimens for concrete direct shear strength tests

sions the maximum value of $f_{cud} = \omega f_c = m_d f_c = (2-4) f_c$ can be adopted, following norms currently valid and earlier ones. However, even the highest of these values seems to be underestimated. Obviously, the smaller the bearing area, the higher the value of f_{cud}

The effect of bearing area value on the value of f_{cud} is defined by formulae specified in norms (5, 6). However, they refer to bearing area sizes larger by a factor than the bearing area sizes in perforbonds. This means that the bearing area in strips is smaller by two factors than in other elements of building and engineering structures.

3. The author's experimental tests

The tests on concrete direct shear strength f_{ctb} were run on specimens whose dimensions have been shown in Fig. 2. The specimens were two cubes connected monolithically by a cylinder of diameter and width matching the hole in the perforbonds used in composite structures. The whole test specimen was concreted simultaneously.

The lengths of cubes sides were $a = 10 \text{ cm}$ and $a = 15 \text{ cm}$. They corresponded to the cubes used for tests on concrete compressive and tensile (by splitting) strengths and to this aim they were used at the second stage of tests. After the direct shear test was completed one cube was used for determination of concrete compressive strength, the other one - tensile strength (by splitting).

Due to this test methodology concrete direct shear, compressive and tensile strengths were determined for each element (and so for the same concrete). This made it easier to find dependencies between the tested strength characteristics of the same concrete. Concrete of three classes was used in the tests, namely B30, B40 and B50.

The shape and dimensions of the cylinder (reduction of area between the cubes) were: $\phi = 20, 30$ and 40 mm . Dimension t (clear distance equal to width of reduction between cubes) was: $t = 13, 17$ and 21 mm . This corresponded to the perforbond thickness $t = 12, 16$ and 20 mm , respectively. The difference of 1 mm was used to eliminate (or at least minimise) the friction of the specimen transferring the load during test.

The loads on the cylinder connecting the cubes were transferred by steel elements of thickness equal to width t , and the diameter of the loading

Dzięki tak przyjętej metodyce badań dla każdego elementu (a zatem dla tego samego betonu) określano wytrzymałość betonu na ścinanie bezpośrednie, ściskanie i rozciąganie. Ułatwiło to znalezienie zależności między wymienionymi cechami wytrzymałościowymi tego samego betonu. W badaniach przyjęto beton trzech klas: B30, B40 i B50.

Kształt i wymiary walca (przewężenia między kostkami) miały wymiary: $\phi = 20, 30$ i 40 mm. Wymiar t^* (odległość w świetle kostek równa szerokości przewężenia) wynosił: $t^* = 13, 17$ i 21 mm. Odpowiadało to grubości listew odpowiednio $t = 12, 16$ i 20 mm. Różnica 1 mm była przyjęta w celu eliminacji (a przynajmniej minimalizacji) tarcia elementu przekazującego obciążenie podczas badania.

Obciążenia na walec łączący kostki były przekazywane poprzez elementy stalowe, których grubość była równa szerokości t , a powierzchnia obciążająca miała taką samą średnicę jak średnica walca (przewężenia) ϕ . Odzwierciedlało to dobrze warunki obciążenia na ścinanie bezpośrednie betonu w otworach listew perforowanych.

Ogółem badania zasadnicze doraźnej wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie przeprowadzono na 156 elementach. Przed badaniem zasadniczym przeprowadzono badania wstępne, których celem było testowanie stanowiska badawczego. Wyników badań wstępnych nie uwzględniano w dalszych analizach.

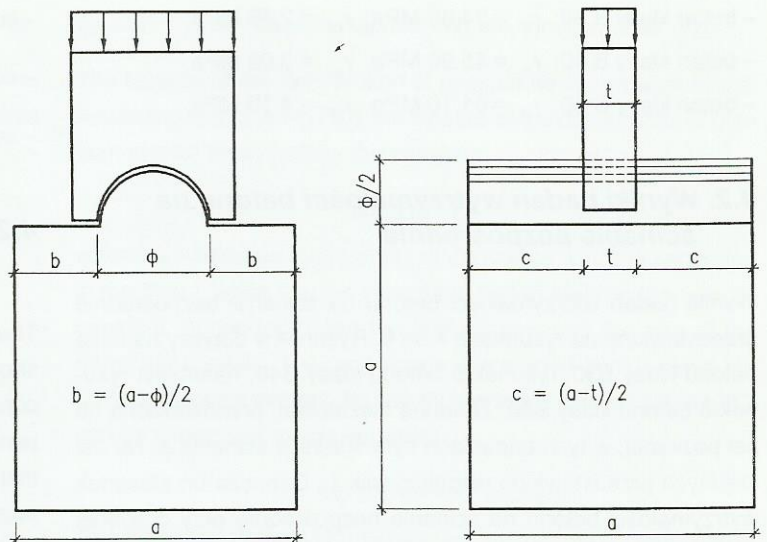
Badania własne wytrzymałości betonu na docisk f_{cud} przeprowadzono na elementach przestawionych na rysunku 3. Były to kostki sześciennie o boku $a = 15$ cm, z dodatkową wypukłością w kształcie półkola o średnicy odpowiadającej otworom w listwach perforowanych. Siła docisku była przekazywana przez element stalowy o wycięciu również w kształcie półkola, o takiej samej średnicy jak wypukłość na kostce betonowej. Grubość elementu stalowego do przekazywania docisku była równa grubości listwy t .

Dzięki przyjętemu kształtowi elementów badawczych i elementu, za którego pośrednictwem przekazywano obciążenie, otrzymano wytrzymałości betonu na docisk, które można wykorzystywać bezpośrednio do obliczania nośności łączników listwowych. Celowi temu służyło także przyjęcie takich parametrów badawczych jak grubość listew t , średnica otworów ϕ oraz klasa betonu. Do badań wytrzymałości betonu na docisk przyjęto te same parametry listew oraz klasy betonu co w badaniach wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie. Łącznie zbadano 144 elementy. W poszczególnych seriach badano po 3 do 6 elementów.

4. Wyniki badań i ich analiza

4.1. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych betonu

Z badań wytrzymałościowych betonów, z których wykonano elementy badawcze, otrzymano następujące średnie wytrzymałości betonu na ściskanie \bar{f}_c oraz na rozciąganie \bar{f}_{ct} :



Rys. 3. Elementy do badania wytrzymałości betonu na docisk

Fig. 3. Test specimens for concrete bearing strength tests

surface was the same as that of cylinder (reduction) ϕ . This reflected well the conditions of concrete direct shear loading in the holes of the perfobonds.

The principal tests on concrete ultimate shear strength were run on the total of 156 test specimens. The principal tests were preceded by preliminary tests to check the test stand. The results of the preliminary tests were disregarded in further analyses.

The tests on concrete bearing strength f_{cud} were run on test specimens shown in Fig. 3. These were cubes of a side $a = 15$ cm with an additional half-round bulge of diameter matching the holes in the perforated strips. The bearing force was transferred by a steel element with a half-round cut, of the same diameter as the bulge on the concrete cube. The thickness of the element transferring the bearing force was equal to the perfobond thickness t .

Due to the shape of the test specimens and the element transferring the load concrete bearing strength was obtained which can be used directly in calculating the carrying capacity of the strip connectors. To this aim the values of the following test parameters were adopted: strip thickness t , hole diameter ϕ and concrete class. For concrete bearing strength tests the same parameters of strips and concrete class as in tests on concrete direct shear strength were adopted. In all, 144 specimens were tested, 3-6 specimens in particular series.

4. Test results and their analysis

4.1. Results of tests on concrete strength characteristics

During the tests on strength characteristics of the concretes from which the test specimens were made the following values of concrete mean compressive strength \bar{f}_c and tensile strength \bar{f}_{ct} were obtained:

- beton klasy B 30: $\bar{f}_c = 34,80$ MPa, $\bar{f}_{ct} = 2,36$ MPa,
- beton klasy B 40: $\bar{f}_c = 45,96$ MPa, $\bar{f}_{ct} = 3,08$ MPa,
- beton klasy B 50: $\bar{f}_c = 61,10$ MPa, $\bar{f}_{ct} = 4,10$ MPa.

4.2. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie

Wyniki badań wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie przedstawiono na rysunkach 4 do 6. Rysunek 4 dotyczy badania betonu klasy B30, rysunek 5 betonu klasy B40, natomiast rysunek 6 betonu klasy B50. Zmienną niezależną, przedstawioną na osi poziomej, w tych badaniach była średnica ścinania ϕ . Na osi rzędnych przedstawiono współczynnik λ_t . Oznacza on stosunek wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie przy dowolnej średnicy ścinania ϕ do wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie przy średnicy ścinania $\phi = 20$ mm. Stąd dla $\phi = 20$ mm mamy zawsze $\lambda_t = 1,00$.

Ze względów praktycznych i dla zachowania większej przejrzystości prezentowanych wyników dla średnic $\phi = 30$ i 40 mm podano w formie pionowej grubszej linii zakres zmian wartości współczynnika λ_t . Wartości skrajne oznaczono krótkimi liniami poziomymi. Wartości średnie zaznaczono krzyżykami i przez nie poprowadzono linie regresji. W przypadku betonu klasy B40 uzyskano regresję praktycznie liniową, natomiast w przypadku betonu klasy B30 i B50 krzywoliniową, ale zbliżoną – zwłaszcza dla betonu klasy B30 – do liniowej.

W badaniach wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednie efekt skali był realizowany przez średnicę ścinania ϕ . Przyjęto przy tym średnice miarodajne dla łączników listwowych stosowanych w realnych konstrukcjach budowlanych i inżynierskich. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że w skrajnych przypadkach obniżenie wytrzymałości betonu wynosi średnio od 9 do 14%, a w przypadkach ekstremalnych dochodzi do 23%.

4.3. Wyniki badań wytrzymałości betonu na docisk

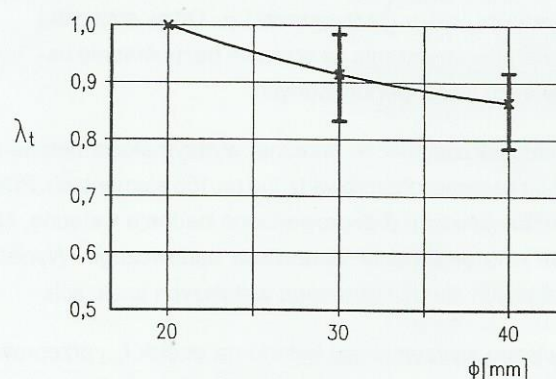
Szerzej efekt skali można ująć w badaniach wytrzymałości betonu na docisk. W tych badaniach zmiennymi niezależnymi, reprezentującymi efekt skali, może być oprócz średnicy ϕ także grubość listwy t oraz powierzchnia docisku A_d . Wpływ poszczególnych parametrów na wytrzymałość betonu na docisk przedstawiono odpowiednio na kolejnych rysunkach 7 do 9, 10 do 12 oraz 13 do 15.

Na osi rzędnych przedstawiono współczynnik λ_d . Oznacza on stosunek wytrzymałości betonu na docisk przy dowolnej wartości rozpatrywanego parametru (ϕ , t , A_d) do wartości wytrzymałości betonu na docisk przy minimalnej wartości danego parametru przyjętej w badaniach ($\phi = 20$ mm, $t = 12$ mm, $A_d = 240$ mm²). Dodatkowy symbol w indeksie dolnym (ϕ , t , A) oznacza do jakiego parametru odnosi się współczynnik λ_d .

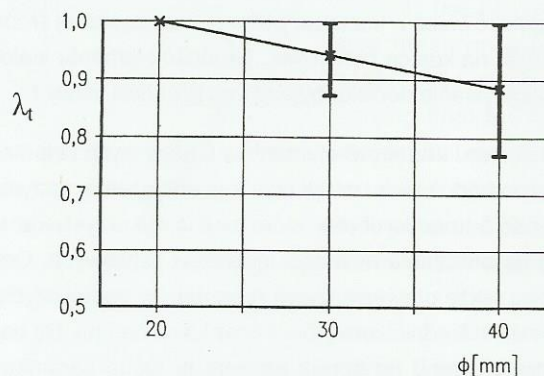
- concrete class B 30: $\bar{f}_c = 34.80$ MPa, $\bar{f}_{ct} = 2.36$ MPa,
- concrete class B 40: $\bar{f}_c = 45.96$ MPa, $\bar{f}_{ct} = 3.08$ MPa,
- concrete class B 50: $\bar{f}_c = 61.10$ MPa, $\bar{f}_{ct} = 4.10$ MPa.

4.2. Results of tests on concrete direct shear strength

The results of tests on concrete direct shear strength have been shown in Figs 4+6. Fig. 4 refers to concrete class B 30, Fig. 5 concrete class B 40, while Fig. 6 concrete class B 50. The independent variable, shown on the horizontal axis, was the shear diameter ϕ . On the axis of ordinates ratio λ_t was presented. It denotes the ratio of concrete direct shear strength at any shear diameter ϕ to concrete direct shear strength at shear diameter $\phi = 20$ mm. Hence for $\phi = 20$ mm we always have $\lambda_t = 1.00$.

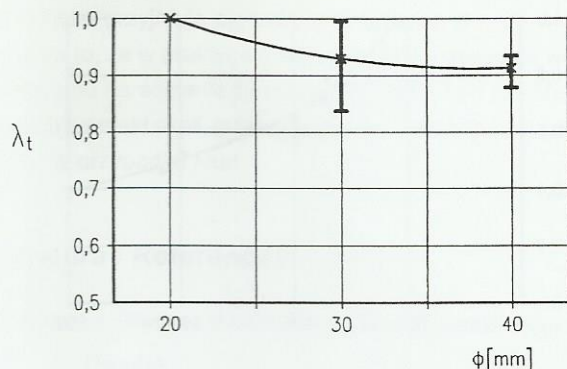


Rys. 4. Wytrzymałość na ścinanie bezpośrednie betonu klasy B30
Fig. 4. Direct shear strength for concrete class B 30



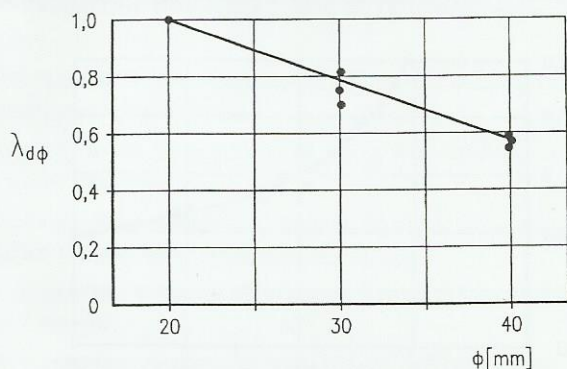
Rys. 5. Wytrzymałość na ścinanie bezpośrednie betonu klasy B40
Fig. 5. Direct shear strength for concrete class B 40

For practical reasons and to make the presentation of results for $\phi = 30$ and 40 mm clearer the range of variations of ratio λ_t has been shown in the form of a vertical line in bold. The extreme values have been denoted with short horizontal lines. The mean values have been marked with crosses and through them the regression line has been passed. For concrete class B 40 the regression was practically linear, while for concrete classes B 30 and B 50 it was curvilinear, but close to, especially for B 30, linear.



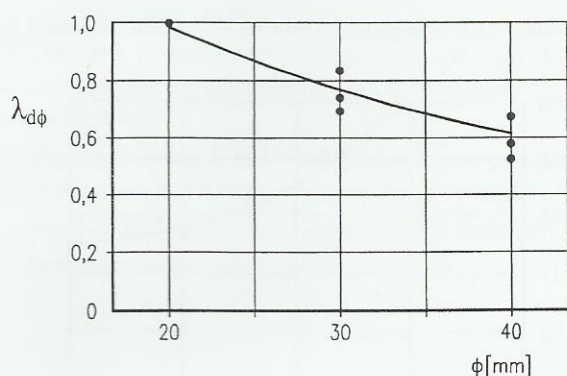
Rys. 6. Wytrzymałość na ścinanie bezpośrednio betonu klasy B50

Fig. 6. Direct shear strength for concrete class B 50



Rys. 7. Wpływ średnicy otworu φ na wytrzymałość na docisk betonu B30

Fig. 7. Effect of hole diameter φ on bearing strength of concrete B 30



Rys. 8. Wpływ średnicy otworu φ na wytrzymałość na docisk betonu B40

Fig. 8. Effect of hole diameter φ on bearing strength of concrete B 40

Na rysunkach 7 do 15 wyniki badań zaznaczono kropkami. Każda z nich oznacza wartość średnią z 3 do 6 elementów badanych w danej serii. Rysunki 7, 10 i 13 dotyczą betonu klasy B30, rysunki 8, 11 i 14 betonu klasy B40, natomiast rysunki 9, 12 i 15 betonu klasy B50. Łatwo zauważyć, że w przypadku, gdy parametrami były średnica docisku ϕ lub grubość listwy t , uzyskano regresję w przybliżeniu liniową. Tylko w przypadku powierzchni docisku $A_d = \phi t$ uzyskano regresję wyraźnie krzywoliniową.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że wpływ efektu skali w przypadku wytrzymałości na docisk jest znacznie większy niż w przypadku wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednio. W zakresie rozpatrywanych średnic ϕ oraz grubości listw t uzyskano obniżenie wytrzymałości o około 40%, nato-

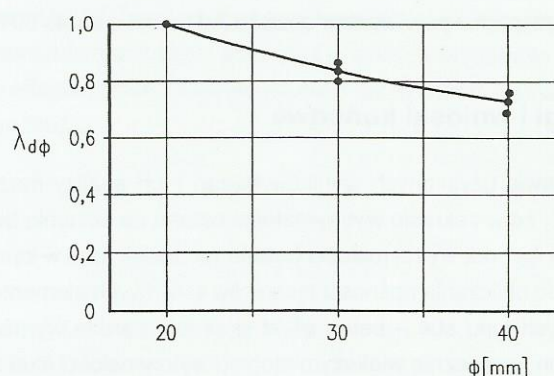
In the tests on concrete direct shear strength the effect of scale was realised by shear diameter ϕ . The diameters proper for strip connectors used in real building and engineering structures have been adopted. On the basis of the obtained results it can be stated that the concrete strength is lowered by 9 to 14% on average, and in extreme cases even by 23%.

4.3. Results of tests on concrete bearing strength

The effect of scale can be approached more broadly in tests on concrete bearing strength. In these tests, besides diameter ϕ , which represents the effect of scale, also strip thickness t and bearing area A_d are independent variables. The influence of particular parameters on concrete bearing strength has been shown in Figs 7÷9, 10÷12 and 13÷15.

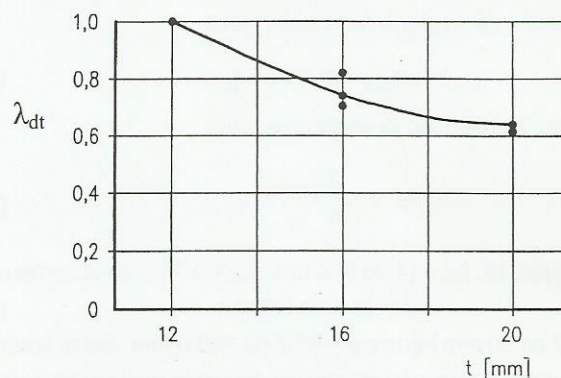
Ratio λ_d is presented on the ordinate axis. It denotes the ratio of concrete bearing strength at any value of the given parameter (ϕ , t , A_d) to the value of that strength at the minimal value of the given parameter adopted for the tests ($\phi = 20$ mm, $t = 12$ mm, $A_d = 240$ mm²). The additional symbol in the lower superscript (ϕ , t , A) points to which parameter ratio λ_d refers.

In Figs 7÷15 the results of tests have been marked with dots, each of which denotes a mean value from 3÷6 specimens tested in a given series. Figures 7, 10 and 13 refer to concrete class B 30,



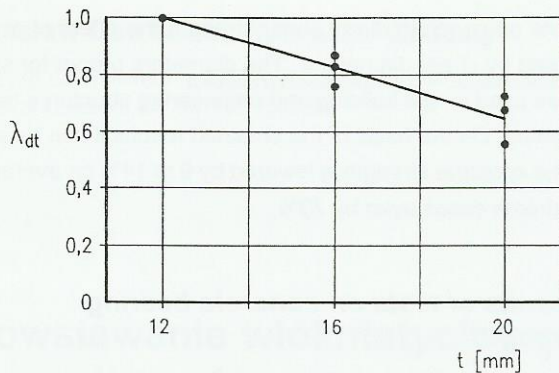
Rys. 9. Wpływ średnicy otworu φ na wytrzymałość na docisk betonu B50

Fig. 9. Effect of hole diameter φ on bearing strength of concrete B 50

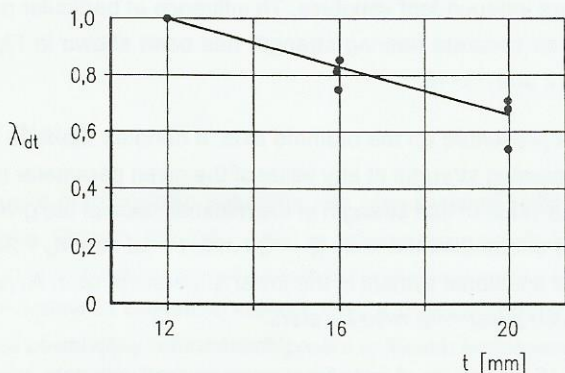


Rys. 10. Wpływ grubości listwy t na wytrzymałość na docisk betonu B30

Fig. 10. Effect of strip thickness t on bearing strength of concrete B 30



Rys. 11. Wpływ grubości listwy t na wytrzymałość na docisk betonu B40
Fig. 11. Effect of strip thickness t on bearing strength of concrete B 40



Rys. 12. Wpływ grubości listwy t na wytrzymałość na docisk betonu B50
Fig. 12. Effect of strip thickness t on bearing strength of concrete B 50

miast w przypadku powierzchni docisku A_d nawet o około 60%.

5. Uwagi i wnioski końcowe

Na podstawie uzyskanych wyników badań i ich analizy można stwierdzić, że w zakresie wytrzymałości betonu na ścinanie bezpośrednio f_{ctb} oraz wytrzymałości betonu na docisk f_{cud} w zastosowaniu do obliczania nośności łączników listwowych elementów zespolonych typu stal – beton efekt skali jest bardzo wyraźny. Dotyczy on w znacznie większym stopniu wytrzymałości f_{cud} niż wytrzymałości f_{ctb} .

Na podstawie prac (9, 13) można przyjąć, że nośność łączników listwowych ze względu na ścinanie betonu jest równa nośności tych łączników ze względu na docisk, jeżeli:

$$> \phi t f_{cud} = 0,5 \pi \phi^2 f_{ct} < \quad [1]$$

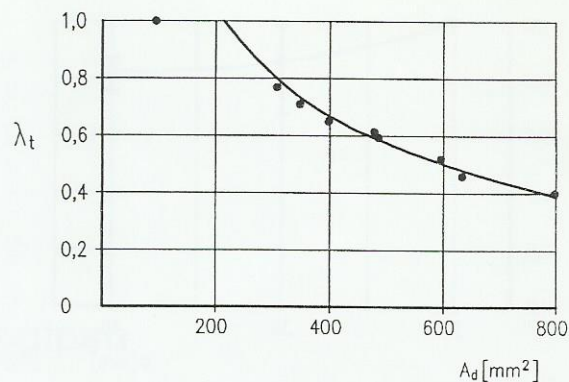
Oznacza to, że równość ta występuje, gdy:

$$> \phi = \frac{2 f_{cud} t}{\pi f_{ct}} < \quad [2]$$

Jeżeli przyjmując, że: $f_{cud} = (4 \text{ do } 8) f_c$ oraz $f_{ctb} = 0,75 f_c$, to otrzymamy:

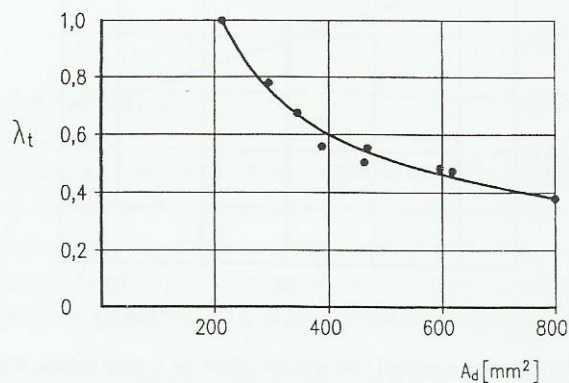
$$> \phi = (3,4 \text{ do } 6,8) t < \quad [3]$$

Przy $t = 12 \text{ do } 20 \text{ mm}$ będzie $\phi = 40,8 \text{ do } 136,0 \text{ mm}$. Jeżeli średnica jest większa o nośności łączników decyduje wytrzymałość betonu na docisk, jeżeli mniejsza to decyduje wytrzymałość betonu na ścinanie bezpośrednio.



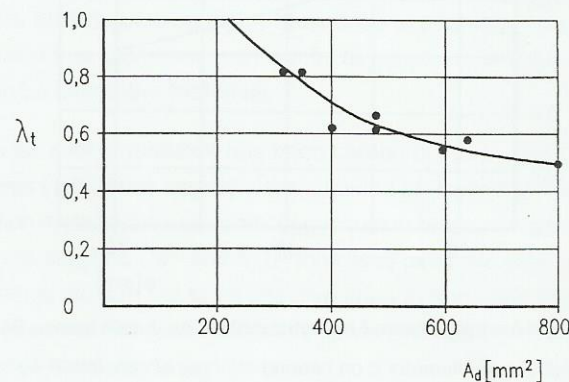
Rys. 13. Wpływ powierzchni docisku A_d na wytrzymałość na docisk betonu B30

Fig. 13. Effect of bearing area A_d on bearing strength of concrete B 30



Rys. 14. Wpływ powierzchni docisku A_d na wytrzymałość na docisk betonu B40

Fig. 14. Effect of bearing area A_d on bearing strength of concrete B 40



Rys. 15. Wpływ powierzchni docisku A_d na wytrzymałość na docisk betonu B50

Fig. 15. Effect of bearing area A_d on bearing strength of concrete B 50

Figures 8, 11 and 14 to class B 40, Figures 9, 12 and 15 to class B 50. As can be easily seen, when the parameters adopted were bearing diameter ϕ of strip thickness t , the regression was approximately linear. Only in case $A_d = \phi t$ the regression was clearly curvilinear.

On the basis of the obtained results it can be stated that in case of bearing strength the effect of scale is much larger than in case of direct shear strength. In the range of the analysed diameters ϕ and strip thickness t the values were lowered by about 40%, for

W praktyce przyjmuje się otwory w listwach $\phi = 30$ do 40 mm. Oznacza to, że w praktyce o nośności listew decyduje wytrzymałość betonu na ścinanie bezpośrednio f_{ctb} . Jest to korzystne ze względu na efekt skali, gdyż okazał się on dla f_{ctb} znacznie mniejszy niż w przypadku f_{cud} .

Literatura / References

1. K. Furtak, J. Śliwiński, Materiały budowlane w mostownictwie, WKiŁ, w druku.
2. PN-88/B-06250.
3. PN-56/B-03260. Betonowe i żelbetowe konstrukcje mostowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
4. PN-58/B-03261. Konstrukcje żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-76/B-03264. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
6. PN-91/S-10042. Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie.
7. Eurocode No. 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures; Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.
8. Eurocode No. 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures; Part 2: Bridges.
9. K. Furtak, Mosty zespolone, PWN, Warszawa-Kraków 1999.
10. T. Godycki-Ćwirko, Mechanika betonu, Arkady, Warszawa.
11. F. Leonhardt, W. Andrä, H-P. Andrä, W. Haare, Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbeton 12 (1987).
12. F. Leonhardt, W. Andrä, H-P. Andrä, W. Havre, R. Saul, Zur Bemessung durchlaufender Verbundträger bei dynamischer Belastung, Der Bauingenieur 62, 1987.
13. K. Furtak, M. Sobczyk, K. Wąchalski, Nowa generacja łączników w mostach zespolonych, Inżynieria i Budownictwo 5 (1998).
14. PN-82/B-03300. Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Belki zespolone krępe.

the value of bearing area A_d the reduction was as high as 60%.

5. Final remarks and conclusions

On the basis of the analysis of the obtained results it can be stated that in the range of concrete direct shear strength f_{ctb} and bearing strength f_{cud} as applied in calculating the carrying capacity of steel-concrete composite strip connectors the effect of scale was very clear. It relates to strength f_{cud} to a larger extent than to strength f_{ctb} .

Following [3, 4] it can be assumed that strip connectors carrying capacity as related to concrete shear is equal to the carrying capacity of these connectors as related to bearing if:

$$t > \phi \frac{f_{cud}}{f_{ct}} = 0,5 \pi \phi^2 f_{ct} \cdot t < \quad [1]$$

It means that the equality above takes place when:

$$t > \phi = \frac{2}{\pi} \frac{f_{cud}}{f_{ct}} t < \quad [2]$$

If we assume that $f_{cud} = (4+8)$ and $f_{ctb} = 0.75f_c$, then we obtain:

$$t > \phi = (3,4 \text{ do } 6,8) t < \quad [3]$$

At $t = 12+20$ mm, we will have $\phi = 40.8+136.0$ mm. If the diameter is larger, what decides of the connectors carrying capacity is concrete bearing strength; if it is smaller, concrete direct shear strength is decisive.

In practice the holes in strips of $\phi = 30+40$ mm are adopted. This means that in practice what decides of the strips carrying capacity is concrete direct shear strength f_{ctb} , which is favourable in view of the effect of scale, because it turned out to be much smaller for f_{ctb} than for f_{cud} .