

Krzysztof GROMYSZ

SIŁY W ZBROJENIU PIONOWYM W DWUPOZIOMOWYM POŁĄCZENIU ZBROJENIA NA ZAKŁAD. CZĘŚĆ II – ANALIZA

Streszczenie. Poniżej analizuje się wyniki badań zaprezentowane w części I referatu. Uzyskane wyniki zostały porównane z istniejącymi propozycjami obliczania sił w zbrojeniu pionowym w dwupoziomowych połączeniach zbrojenia na zakład. Na podstawie analizy uzyskanych wyników zaproponowano własne sposoby obliczania sił w zbrojeniu pionowym w dwupoziomowych połączeniach na zakład.

FORCE IN VERTICAL REINFORCEMENT IN TWO-LAYER LAP SPLICES. PART II – ANALYSIS

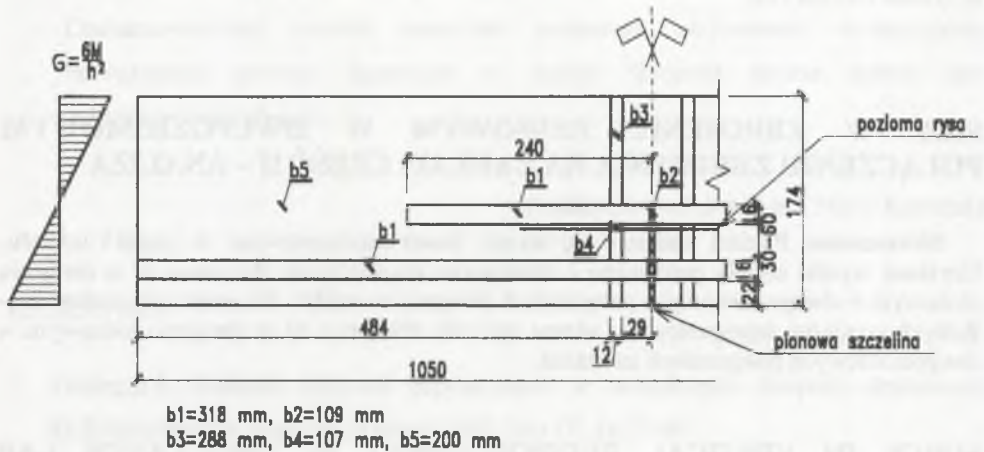
Summary. In this part of article results obtained in the first part are taken under consideration. Test results are compared with existing propositions calculating force in vertical reinforcement in that kind of splice. Basing on test results own propositions of force calculating are presented.

1. Istniejące propozycje na obliczanie wartości siły w zbrojeniu pionowym

W [1] przeprowadzono obliczenia podobnego do przedstawionego w [2] dwupoziomowego połączenia zbrojenia na zakład (model z rysą poziomą). W obliczeniach tych założono tarczowy charakter pracy połączenia oraz model ciała liniowo sprężystego. W osi modelu od dołu wykształcono pionową szczelinę szerokości 2.5 mm. W kolejnych etapach obciążenia z końca pionowej szczeliny rozwijano w obu kierunkach poziomą rysę. Rysa ta przyjmowała długość od 0 do 70 mm.

Poniżej powtórzono te obliczenia zakładając sprężysty model materiału, ($E=36000$ MPa, $\nu = 0.167$). Przyjęto także stałą długość wydzielonego poziomego zarysowania wynoszącego $s_{cr,H} = 150$ mm. Zauważono bowiem, że długość poziomego zarysowania nie jest istotna dla otrzymanych wartości sił w zbrojeniu pionowym, o ile rysa przejdzie przez to zbrojenie. Przyjęty do obliczeń model, z podaniem grubości oraz przyjętym sposobem obciążenia, przedstawiono na rys. 1. Uzyskane z modelu z rysą wartości siły w zbrojeniu pionowym,

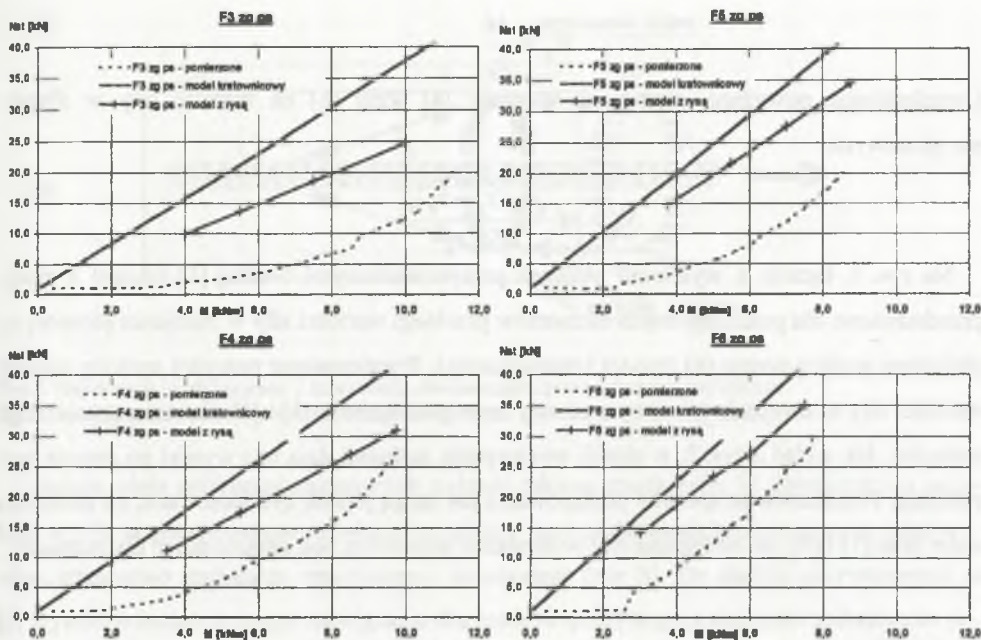
wraz z wartościami pomierzonymi na modelach oraz z wartościami obliczeń opisanych poniżej, przedstawiono na rys. 2.



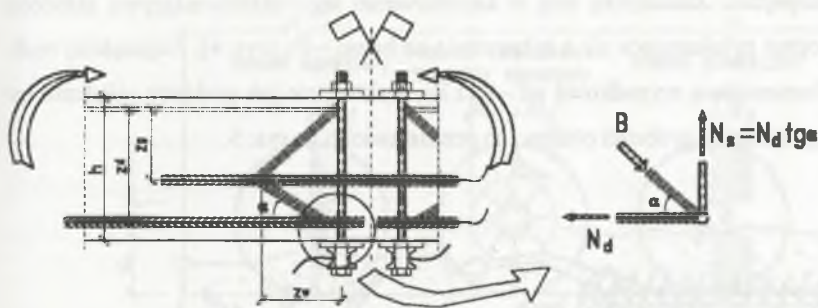
Rys.1. Przyjęty do obliczeń model elementu z rysą
 Fig.1. Calculation model with crack

W [3] zakłada się, że przekazywanie sił od naprężeń normalnych (sił osiowych i momentu zginającego) między elementami o skokowo zmiennej grubości odbywa się za pomocą wydzielonych prętów. W pracy [4] adaptowano ten model zakładając, że zbrojenie pionowe jest słupkiem w tym modelu. W pracy [4] za [3] założono (rys. 3):

- ramię sił wewnętrznych jest równe iloczynowi średniej geometrycznej ramion sił wewnętrznych przez przyjęty współczynnik 1.5 (wzór 1),
- kąt pochylenia ściskanego krzyżulca betonowego jest stały (wzór 2),
- wartość siły w dolnym łączonym na zakład zbrojeniu jest wyrażona za pomocą wzoru (3), a wartość siły w zbrojeniu pionowym wzorem (4),
- dodatkowo w [4] przyjęto zależność na siłę w górnym łączonym na zakład zbrojeniu określoną za pomocą wzoru (5).



Rys.2. Istniejące propozycje obliczeń siły w zbrojeniu pionowym
 Fig.2. Existing propositions of calculating force in vertical reinforcement



Rys.3. Kratownicowy model pracy zbrojenia pionowego
 Fig.3. Calculating force in vertical reinforcement according to truss model

$$z_w = 1.5 \cdot \sqrt{z_g(z_d - z_g)} \tag{1}$$

$$\tan \alpha = \frac{z_d - z_g}{z_w} \tag{2}$$

$$N_d = N_g \frac{z_g}{z_d} \tag{3}$$

$$N_s = N_d \tan \alpha \tag{4}$$

$$N_g = \frac{M}{z_g} \quad (5)$$

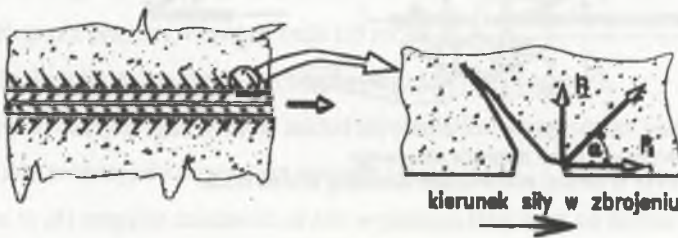
Uwzględniając powyższe, otrzymano w pracy [4] wzór (6) na wartość siły w zbrojeniu pionowym.

$$N_{st} = M \frac{\sqrt{z_g(z_d - z_g)}}{1.5z_d z_g} \quad (6)$$

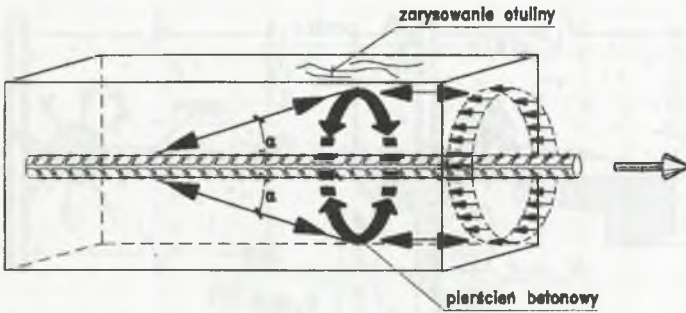
Na rys. 2, łącznie z wynikami obliczeń przeprowadzonymi według [1] (model z rysa), przedstawiono dla poszczególnych elementów przebiegi wartości siły w zbrojeniu pionowym, obliczone według wzoru (6) (model kratownicowy). Przedstawione powyżej sposoby analizy wartości siły w zbrojeniu pionowym zostały zaproponowane w [1] i [4] dla stanu granicznego nośności. Jak widać z rys. 2, w chwili wyczerpania nośności dają one wyniki po stronie bezpiecznej. Przedstawione sposoby postępowania nie mogą jednak być stosowane, co podkreśla autor prac [1] i [4], do obliczania siły w zbrojeniu pionowym pod narastającym obciążeniem.

2. Analiza siły w zbrojeniu pionowym

Jak powszechnie wiadomo, kotwione żebrowane zbrojenie wywołuje w otulinie betonowej złożony układ naprężeń. Zasadniczą rolę w kształtowaniu tego układu odgrywa składowa prostopadła naprężeń przekazująca się z żebrowania na beton – P_{\perp} (rys. 4). Najczęściej otulinę betonową, równoważącą wypadkową sił – P_{\perp} i P_{\parallel} , traktuje się jak poddany ciśnieniu hydrostatycznemu pierścień o grubości otuliny, co przedstawiono na rys. 5.

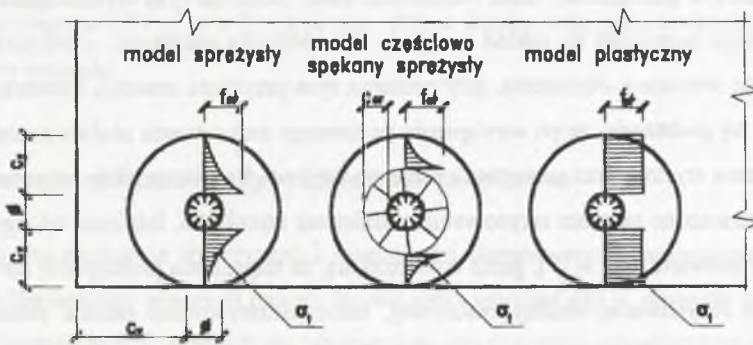


Rys.4. Oddziaływanie żebrowania na otulinę betonową
Fig.4. Rib acting against concrete



Rys.5. Naprężenia przekazywane z zbrojenia równoważone przez betonowe pierścienie
Fig.5. Bond forces balanced by concrete rings

Istnieje wiele rozwiązań opisujących nośność takiego pierścienia. W literaturze (na przykład w [5]) są prezentowane rozwiązania, między innymi dla modelu niespękanego plastycznego, częściowo spękanego sprężystego i sprężystego (rys. 6). Do analizy przytoczonych w [2] wyników badań przyjęto rozwiązanie dla modelu sprężystego z dalszymi założeniami poczynionymi w [6]. Według tego modelu rozerwanie otuliny nastąpi przy wystąpieniu na długości zbrojenia naprężeń przyczepnościowych określonych wzorem (7).



Rys.6. Modele rozkładu naprężeń w betonowych pierścieniach
Fig.6. Distribution of tensile ring stresses in elastic, partly cracked elastic and plastic stages

$$u_{cr} = f_{ct} \frac{\left(c + \frac{\phi}{2}\right)^2 + \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{\left(c + \frac{\phi}{2}\right)^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2} \quad (7)$$

Zakładając za [6], że rozkład naprężeń przyczepnościowych po długości pręta jest wyrażony wzorem (8) poniżej, przyrównano do siebie równania (7) i (8) i wyprowadzono zależność na siłę powodującą zarysowanie otuliny (9).

$$u(x) = -\frac{N_g \kappa_2}{2\pi\phi} \cdot \frac{\cosh \kappa_2 x}{\sinh \frac{\kappa_2 l_b}{2}} \quad (8)$$

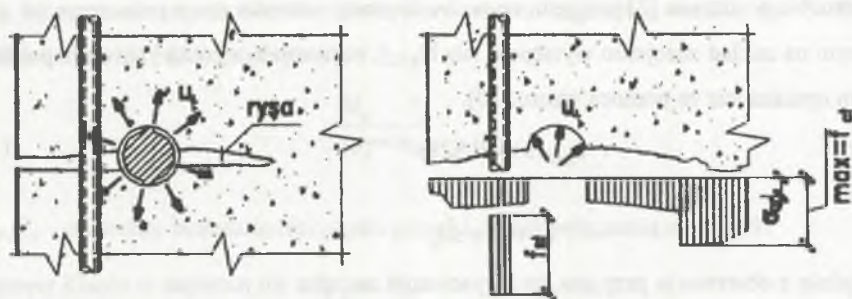
gdzie

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{\pi\phi K}{A_s E_s}}, \quad K = 2.4 f_{c,cube} [MN/m^3] \quad (9)$$

$$N_{cr} = f_{ct} \frac{\left(c + \frac{\phi}{2}\right)^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{\left(c + \frac{\phi}{2}\right)^2 + \left(\frac{\phi}{2}\right)^2} \frac{2\pi\phi}{\kappa_2 \operatorname{ctgh} \frac{\kappa_2 l_b}{2}}$$

Dla otuliny $c=22$ mm, $l_b = 240$ mm i średnich wytrzymałości betonu z przebadanych elementów ($f_{ct\phi} = 2.54$ MPa i $f_{c,cube} = 35.49$ MPa) siła wywołująca poziome zarysowanie elementu na wysokości górnego łączonego na zakład zbrojenia (obserwacje w [2]), wyznaczona wzorem (9), wynosi 18.27 kN. Odpowiada to sumarycznej sile w łączonych na zakład górnych prętach zbrojeniowych wynoszącej 36.54 kN. Wartość ta generalnie pokrywa się z obserwacjami wystąpienia poziomego zarysowania obserwowanymi w prezentowanych badaniach – [2] wartość $N_{g,crH}$.

Wartości sił w zbrojeniu pionowym obliczone według modelu z rysą są większe od wartości pomierzonych (por. rys. 2). Różnica między wartościami pomierzonymi a obliczonymi jest największa w początkowej fazie obciążenia, kiedy pozioma rysa wydzielająca się w poziomie górnego łączonego na zakład zbrojenia ma niewielką szerokość, zmniejsza się natomiast wraz ze wzrostem obciążenia, gdy pozioma rysa przybiera znaczną rozwartość. Wnioskuje się na tej podstawie, że po wystąpieniu poziomego zarysowania otulina betonowa przenosi naprężenia styczne oraz naprężenia prostopadłe do zarysowania, przy czym większe naprężenia przenoszone są przez zarysowanie o mniejszej szerokości. Istnienie takiego zjawiska jest również potwierdzone w [7], gdzie stwierdza się, że naprężenia prostopadłe do rysy przenosi, oprócz zarysowanej otuliny betonowej, także niezarysowana otulina betonowa oraz zbrojenie pionowe. Założony rozkład naprężeń normalnych w rejonie zarysowanej otuliny przedstawiono na rys. 7.



Rys.7. Naprężenia prostopadłe do zarysowania w rejonie kotwionego pręta

Fig.7. Distribution of vertical pressure in cracking zone

Na podstawie wyników badań [8] założono, że przy długości zakładu rzędu 15ϕ oraz wytrzymałości betonu na ściskanie wynoszącej około 30 MPa, cała długość łączonego na zakład pręta jest wciągana w przenoszenie sił od początku obciążenia. Oznacza to, że badane przedstawione w [2] połączenia osiągały nośność w chwili wyczerpania możliwości przenoszenia przez poziome zarysowanie naprężeń normalnych. Przyjęto dalej, że przy zastosowanym w badaniach uziarnieniu stosu okruszowego i średnicy łączonego na zakład zbrojenia, zarysowanie poziome przestaje przenosić naprężenia prostopadłe do niego, gdy osiągnie szerokość równą 0.83 mm. Szerokość 0.83 mm jest średnią szerokością poziomego zarysowania pomierzoną na elementach F3 zg ps 4 F6 zg ps (por. [2]) w środku połączenia w chwili utraty przez te elementy nośności.

3. Propozycje obliczania siły w zbrojeniu pionowym

Poniżej, na podstawie spostrzeżeń i wiadomości literaturowych zamieszczonych w p.2, podjęto próbę budowy własnych modeli do obliczania wartości siły w zbrojeniu pionowym.

Jak wykazano w p. 2, płaszczyzna wyznaczona zarysowaniem rozwijającym się na wysokości górnego łączonego na zakład zbrojenia przenosi naprężenia normalne. Postuluje się zatem, aby z tej płaszczyzny nie usuwać elementów, jak czyniono to w [1], a wprowadzić w nią elementy o odpowiednich parametrach. Elementy te powinny charakteryzować się sztywnością odpowiednią dla przenoszonych przez dany wycinek zarysowania naprężeń normalnych. Przy doborze szerokości elementów występujących w płaszczyźnie poziomego zarysowania proponuje się następujący sposób postępowania.

Zakłada się, że wartość naprężeń normalnych przenoszonych przez płaszczyznę wyznaczoną zarysowaniem zależy od rozwartości zarysowania ujawniającego się na powierzchni

elementu. Na podstawie [2] przyjęto, że w chwili utraty nośności przez połączenie (w górnym łączonym na zakład zbrojeniu występuje siła $N_{g,02}$), rozwartość tego zarysowania po długości zakładu opisana jest za pomocą wzoru (10).

$$c_{crH}(x) = 0.828e^{-0.1444x} \quad (10)$$

gdzie:

$$0 \leq x \leq l_b$$

Zgodnie z obserwacją przyjęto, że zarysowanie zaczyna się rozwijać w chwili wystąpienia w górnym łączonym na zakład zbrojeniu siły $N_{g,cr}$ i rozwija się aż do osiągnięcia nośności przez badane połączenie. Dalej na podstawie wyników zamieszczonych w [2] założono, że występuje liniowy związek między rozwartością zarysowania a wartością siły w górnym łączonym na zakład przecie w zakresie sił $N_{g,cr} - N_{g,02}$. Rozwartość poziomego zarysowania obserwowanego po długości zakładu w odległości x od środka połączenia i przy danej wartości siły N_g w środku górnego łączonego na zakład zbrojenia opisuje zależność (11).

$$c_{crH}(x, N_g) = \left(\frac{N_g - N_{g,cr}}{N_{g,02} - N_{g,cr}} \right) 0.828e^{-0.1444x} \quad (11)$$

gdzie:

$$N_{g,cr} \leq N_g \leq N_{g,02}$$

Czyniąc założenie, że grubość elementu zastępującego zarysowaną otulinę zależy w sposób liniowy od rozwartości zarysowania oraz że w chwili wystąpienia zarysowania grubość elementu w rysie wynosi b_0 , a w chwili utraty nośności przyjmuje zerową grubość, otrzymano wyrażenie na zastępczą grubość elementu w zarysowaniu w odległości x od środka połączenia i w chwili występowania w środku łączonego na zakład górnego zbrojenia siły N_g (12):

$$b_x(x, N_g) = b_0 \left(- \frac{N_g - N_{g,cr}}{N_{g,02} - N_{g,cr}} e^{-0.1444x} + 1 \right) \quad (12)$$

Poniżej, na rys. 8, przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych w sposób analogiczny jak w p. 1 niniejszego referatu, z tym że w płaszczyznę zarysowania wprowadzono elementy o grubościach określonych wzorem (12) – model z wypełnionym zarysowaniem. We wzorze tym przyjęto: $N_{g,cr}$ według wzoru (9), $N_{g,02}$ jako średnią siłę z elementów F3 zg ps + F6 zg ps w chwili utraty przez te elementy nośności, N_g jako pomierzoną wartość siły w górnym łączonym na zakład zbrojeniu pod danym momentem zginającym M , zaś b_0 równe 6.5 mm.

W referacie podjęto także próbę sformułowania analitycznego modelu pracy połączenia. Założono, że poziome zarysowanie dzieli dwupoziomowe połączenie zbrojenia na dwa ele-

menty, które przenoszą niezależnie zewnętrzny moment zginający według rys. 9. Przyjęto także założenia (13) i (14) (por. rys. 9).

$$\frac{M_g}{M_d} = \frac{I_g}{I_d} \quad (13)$$

gdzie:

I_g, I_d - momenty bezwładności części górnej i dolnej połączenia wg rys. 9.

$$M_g = N_{st} \times x \quad (14)$$

Występowanie naprężeń prostopadłych do zarysowania „odciążających” zbrojenie pionowe (por. rys. 7) uwzględniono przyjmując $x = \infty$ przy obciążeniu $M = 0$, zaś przy obciążeniu wywołującym utratę nośności przez połączenie $x = l_b$. Ostatecznie wzór na siłę w zbrojeniu pionowym przyjmuje postać (15):

$$N_{st} = \frac{M^2}{l_b} \frac{I_d}{(I_g + I_d)M_{02}} + N_1 \quad (15)$$

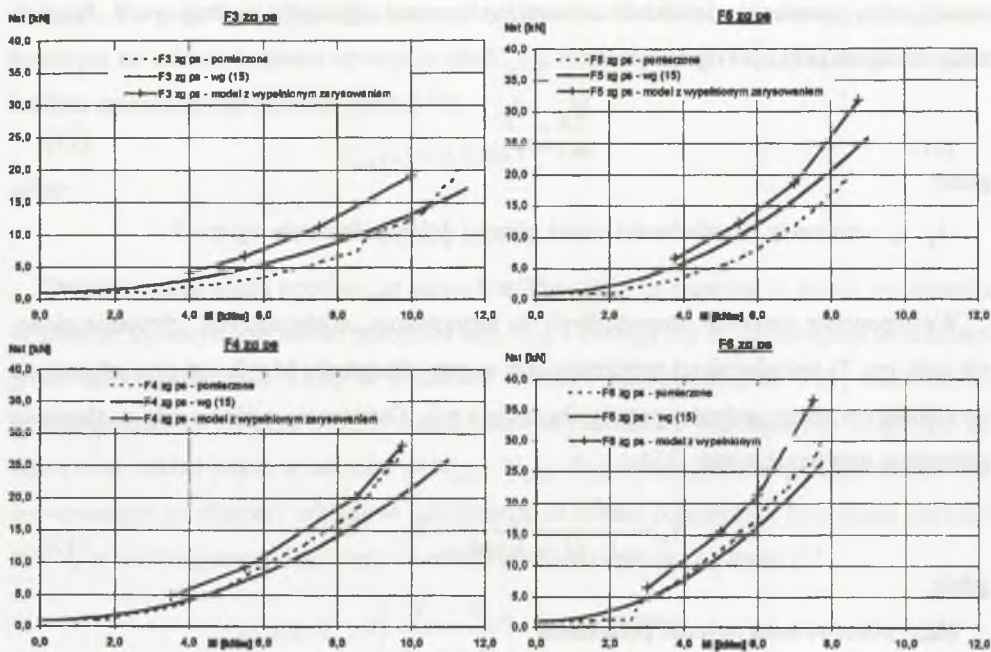
gdzie:

M_{02} – obserwowana nośność połączenia,

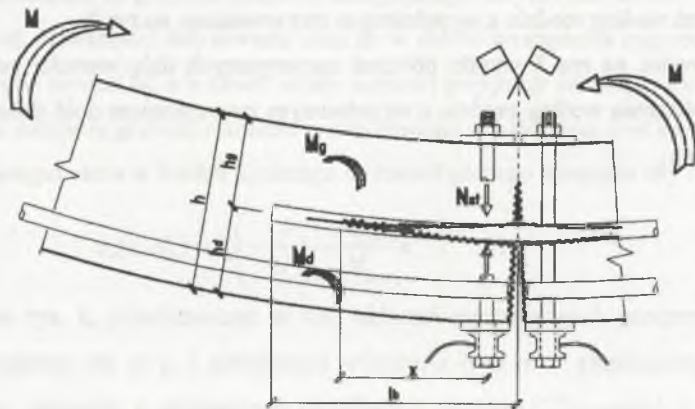
N_1 - wstępne sprężenie w strzemionach.

Otrzymane na podstawie wzoru (15) wartości siły w zbrojeniu pionowym w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład przedstawiono, łącznie z wynikami badań oraz z wynikami obliczeń według modelu z wypełnionym zarysowaniem, na rys 8.

Zaprezentowane na rys. 8 wyniki obliczeń numerycznych dają wartości po stronie bezpiecznej, a obliczenia według modelu z wypełnionym zarysowaniem dość dobrą zgodność z eksperymentem.



Rys.8. Wyniki obliczeń siły w zbrojeniu pionowym według propozycji własnych
 Fig.8. Force in vertical reinforcement calculated according to own propositions



Rys.9. Sposób obliczania siły w zbrojeniu pionowym
 Fig.9. Way of calculating force in vertical reinforcement

4. Wnioski

Analizując siłę w zbrojeniu pionowym w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład, należy uwzględnić przejmowanie naprężeń normalnych przez poziome zarysowanie wydzielające się wzdłuż łączonego na zakład zbrojenia położonego wyżej.

LITERATURA

1. Starosolski W.: Połączenia poprzeczne w zespolonych stropach płytowych, Problemy Naukowo – Badawcze Konstrukcji Inżynierskich. Sesja Naukowa z Okazji 70-lecia Urodzin Profesora Romana Ciesielskiego. Politechnika Krakowska. Monografia 194, Kraków 1995, s. 307-318.
2. Gromysz K.: Siły w zbrojeniu pionowym w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład. Część I ZN Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo z.89, Gliwice 2000.
3. Jennewein M., Schäfer K.: Standardisierte Nachweise von häufiben D-Bereichen, Deutscher Ausschus für Stahlbeton, Heft 430, Berlin 1992.
4. Starosolski W. Współpraca w kierunku poprzecznym deskowych stropów zespolonych typu 2k, Inżynieria i Budownictwo, 1997, 1, s.32-37.
5. Tepfers R.: Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, Magazine of concrete research, Vol. 31, 1979, No. 160, March, s. 3-12.
6. Tepfers R.: Lapped tensile reinforcement splices, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, 1982, No. ST1, January, s. 283-301.
7. Giuriani E., Plizzari G., Schumm C.: Role of stirrups and residual tensile strength of cracked concrete on bond, Journal of Structural Engineering, Vol. 117, 1991, No. 1, January, s. 1-19.
8. Gromysz K., Starosolski W.: Wpływ obecności zbrojenia pionowego na nośność połączeń poprzecznych w zespolonych stropach deskowych na podstawie badań modeli monolitycznych, V Konferencja Naukowa Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra 22-23 czerwca, 1999, s. 73-84.

Abstract

Calculating force in two layer lap splices remain still unsolved problem. Existing propositions of calculating force in this reinforcement exhibit values much larger than observed in tests. The reason that cause this discordant is the crack nature that develops along upper spliced reinforcement. Test realized by author proved existence of normal pressure in this crack that take strain of vertical reinforcement. There are given in this paper propositions regarding existence of pressure in crack. Existence of this pressure can be regarded by placing elements in crack surface or by extending the crack length.