ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: BUDOWNICTWO z.89 Nr kol. 1482

Krzysztof GROMYSZ

ANALIZA NAPRĘŻEŃ NORMALNYCH W ZGINANYCH DWUPOZIOMOWYCH POŁĄCZENIACH ZBROJENIA NA ZAKŁAD

Streszczenie. W referacie analizuje się naprężenia normalne w zginanych elementach żelbetowych, w których wykształtowano dwupoziomowe połączenia zbrojenia na zakład oraz w odpowiednich elementach ze zbrojeniem ciągłym cechujących się taką samą wysokością użyteczną. Wykazano, że w elementach, w których wykształtowane jest dwupoziomowe połączenie zbrojenia na zakład, oś obojętna przekroju jest położna niżej niż w odpowiednich elementach ze zbrojeniem ciągłym. Pociąga to za sobą powstanie w elementach z wykształtowanym połączeniem zbrojenia krzywoliniowego wykresu naprężeń normalnych i zwiększenie naprężeń w dolnych włóknach w stosunku do odpowiednich elementów ze zbrojeniem ciągłym. Dwupoziomowe połączenie zbrojenia na zakład występuje na przykład w połączeniach poprzecznych zespolonych stropów deskowych oraz praktycznie we wszystkich łączonych na zakład siatkach zbrojeniowych.

NORMAL PRESSURE ANALYSIS IN TWO LAYER LAP SPLICES LOADED WITH BENDIG MOMENT

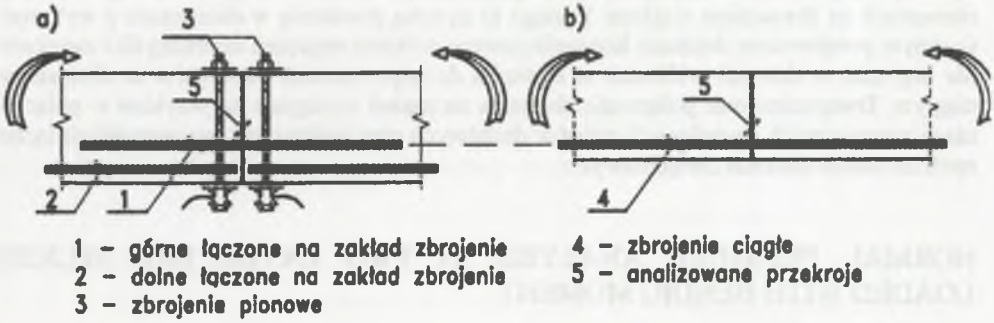
Summary. Normal pressure in vertical section of bending two layer lap splices are taken under consideration. Analysis is made assuming elastic material behavior. Results obtained after calculating two layer lap splices are compared to results obtained after calculating adequate elements with continual reinforcement. It's proved, that neutral axis of vertical section in elements with lapped bars is lower than in adequate elements with continual reinforcement. This cause, that pressure in bottom part of analyzed section in element with lapped bars is higher than calculated in tradition way.

1. Problem badawczy

Badania zginanych dwupoziomowych połączeń zbrojenia na zakład (łączone pręty znajdują się w pionowej odległości) wskazują, że nośność takiego połączenia ulega wyczerpaniu szybciej, niż wynika to z analizy normowej zginanego przekroju żelbetowego. Oznacza to, że osiągnięcie granicy plastyczności przez stal w zginanym przekroju, w którym wykształtowano dwupoziomowe połączenie zbrojenia na zakład, następuje szybciej niż w odpowiednich

elementach ze zbrojeniem ciągłym. Zjawisko takie obserwowano w badaniach połączeń poprzecznych zespolonych stropów deskowych, w których występuje dwupoziomowe połączenie zbrojenia na zakład [1]. Badania [2] przeprowadzone na monolitycznych modelach odniesienia połączeń poprzecznych zespolonych stropów deskowych wskazują, że zaniżenie to wynosi 9 %. Podobne zjawisko występuje także praktycznie we wszystkich łączonych na zakład siatkach zbrojeniowych, gdzie pionowa odległość między łączonymi na zakład prętami równa się średnicy zbrojenia poprzecznego.

W referacie przeanalizowano naprężenia normalne w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład, posługując się sprężystym modelem pracy połączenia. Uzyskane wyniki odniesiono do odpowiednich, cechujących się taką samą wysokością użyteczną przekroju, elementów ze zbrojeniem ciągłym. Analizowane zagadnienie, z przyjętym w referacie nazewnictwem, przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Analizowane elementy: a) element z dwupoziomowym połączeniem zbrojenia na zakład, b) odpowiedni element ze zbrojeniem ciągłym

Fig.1. Types of elements taken under consideration: a) element with two layer lap splices b) adequate element with continual reinforcement

2. Charakter pracy i model połączenia

Pod wpływem narastającego obciążenia w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład pojawia się pionowa rysa biegnąca przez środek połączenia. Rysa ta sięga górnego łączonego na zakład zbrojenia. Następnie pod dalej narastającym obciążeniem, w chwili wystąpienia w górnym łączonym na zakład zbrojeniu siły określonej wzorem (1), wzdłuż tego zbrojenia rozwija się poziome zarysowanie obejmujące całą długość zakładu. Wyczerpanie nośności połączenia, przy pionowej odległości między łączonymi prętami równej i większej od 30 mm, następuje przez poziome rozerwanie elementu na wysokości górnego łączonego na zakład zbrojenia.

$$N_{cr} = f_{ct} \frac{\left(c+\frac{\phi}{2}\right)^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{\left(c+\frac{\phi}{2}\right)^2 + \left(\frac{\phi}{2}\right)^2} \frac{2\pi\phi}{\kappa_2 \operatorname{ctgh} \frac{\kappa l_b}{2}} \tag{1}$$

gdzie:

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

W [3] wykazano, że zarysowanie poziome rozwijające się na wysokości górnego łączonego na zakład zbrojenia przenosi naprężenia prostopadłe do swojej płaszczyzny . W [3] zaproponowano także, aby w modelu obliczeniowym do określania siły w zbrojeniu pionowym, w rozważnym połączeniu (por. rys. 1), w płaszczyznę wydzielania się poziomego zarysowania wprowadzić elementy. Grubości tych elementów mają odpowiadać wielkości naprężeń przenoszonych przez zarysowanie. W odległości „x" od środka połączenia i w chwili występowania siły N_g w górnym łączonym na zakład zbrojeniu (por. [3]) proponuje się określać grubość elementów w zarysowaniu ze wzoru (2).

$$b_z(x, N_g) = b_0\left(-\frac{N_g - N_{g,cr}}{N_{g,02} - N_{g,cr}} e^{-0.1444x} + 1\right) \tag{2}$$

gdzie:

$$b_0 = 6.5\ mm$$

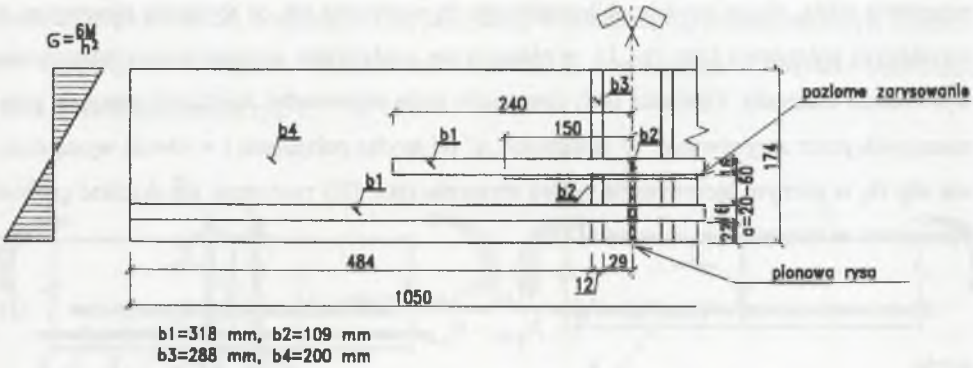
Zakładając otulinę zbrojenia c = 22 mm, średnicę łączonego na zakład zbrojenia ϕ 16 mm, długość zakładu l_b = 240 mm, siłę w górnym łączonym na zakład zbrojeniu powodującą rozerwanie elementu $N_{g,02}$ = 152.54 kN oraz wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ct} = 2.54 MPa i kostkową na ściskanie $f_{c,cube}$ = 35.49 MPa, wzór na grubość elementów w poziomym zarysowaniu sprowadza się do zależności określonej równaniem (3).

$$b_z(x, N_g) = 6.5\left(-\frac{N_g - 36}{116} e^{-0.1444x} + 1\right) \tag{3}$$

3. Obliczenia numeryczne

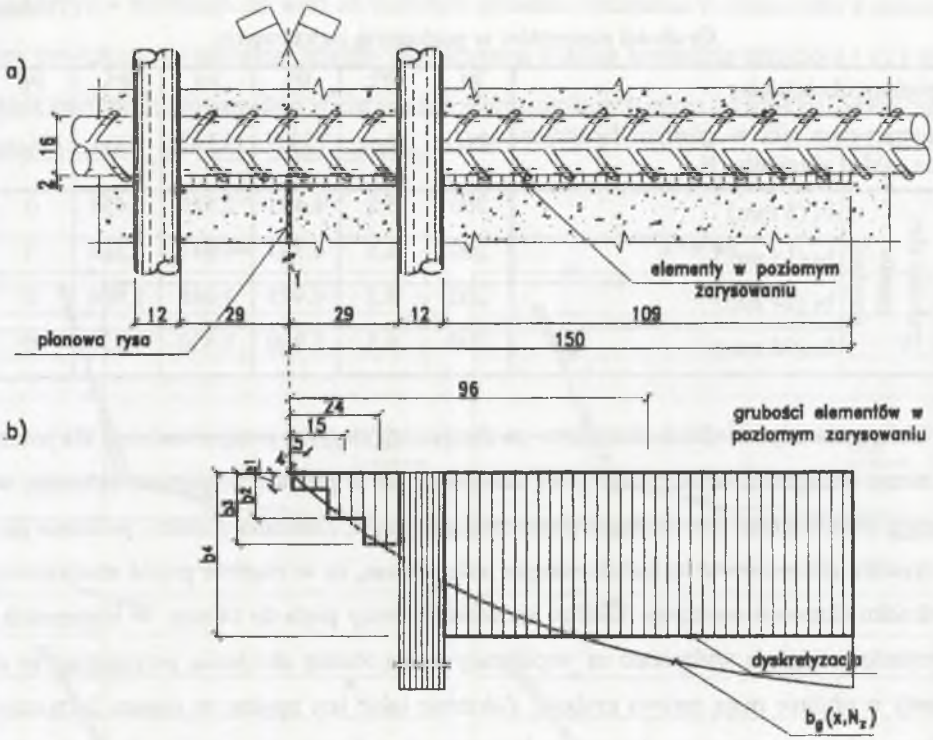
W obliczeniach przyjęto sprężysty model materiału, dla którego założono E = 36000 MPa, ν = 0.166, oraz iloraz modułu sprężystości stali do modułu sprężystości betonu równy 5.69. Przekroje prętów występujących w połączeniu sprowadzono do prostokątów o wysokościach odpowiadających średnicy zbrojenia. W środku górnego łączonego na zakład zbrojenia założono lokalne przewężenie do średnicy 14 mm.

Obliczenia przeprowadzono dla pięciu modeli dwupoziomowych połączeń zbrojenia różniących się pionową odległością między łączonymi na zakład prętami oraz dla odpowiadających pięciu elementów ze zbrojeniem ciągłym. W odpowiadających elementach z połączeniem na zakład i ze zbrojeniem ciągłym wysokości użyteczne przekrojów były takie same. Pionową odległość w świetle między łączonymi na zakład prętami oznaczono przez „a". Wartość zmiennego parametru „a" w poszczególnych elementach wynosiła: 20, 30, 40, 50 i 60 mm. Badany model z dwupoziomowym połączeniem zbrojenia na zakład i przyjęte grubości przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Przyjęty do obliczeń model elementu z połączeniem
Fig.2. Model of element with two layer lap splice

Zgodnie z założeniami modelu zaproponowanego w [3] przyjęto, że po wystąpieniu w górnym łączonym na zakład zbrojeniu siły $N_{g,cr}$, poziome zarysowanie może być reprezentowane przez elementy o grubości b_z wyznaczonej za pomocą wzoru (3). W obliczeniach założono również, że elementy reprezentujące zarysowanie znajdują się na styku dolnej powierzchni górnego łączonego na zakład zbrojenia i betonu, co przedstawiono na rys. 3a. Ze względu na ograniczenia zastosowanego do obliczeń programu, ciągłą funkcję opisującą zmiany grubości elementów w zarysowaniu zastąpiono funkcją o skokowym charakterze, przyjmując na długości zarysowania cztery grubości (b_1, b_2, b_3 i b_4), co przedstawia rys. 3b. Długość zarysowania ograniczono do 15 cm. Zauważono bowiem, że dalsze przedłużanie zarysowania pozostaje bez wpływu na otrzymywane wyniki obliczeń.



Rys.3. Sposób przyjęcia grubości elementów w poziomym zarysowaniu
Fig.3. Thickness of elements placed in horizontal crack

Obliczenia elementów z połączeniem przeprowadzono dla sześciu poziomów obciążenia. W poziomie pierwszym (P1) założono, że wystąpiła pionowa rysa przechodząca przez górne łączone na zakład zbrojenie. Poziom drugi (P2) odpowiada sytuacji, w której w górnym łączonym na zakład zbrojeniu wystąpiła siła $N_{g,cr}$ i nastąpiło poziome zarysowanie. Trzeci i czwarty poziom obciążenia (P3) i (P4) odpowiada występowaniu w górnym łączonym na zakład zbrojeniu odpowiednio sił: 75 kN i 113 kN. W piątym poziomie obciążenia (P5) założono występowanie w górnym łączonym na zakład zbrojeniu siły $N_{g,02}$ = 152.43 kN. Oznacza to, że połączenie pracuje w stanie granicznym nośności. Szósty poziom obciążenia (P6) odpowiada sytuacji, w której nastąpiło całkowite poziome rozerwanie połączenia (elementy w zarysowaniu mają zerową grubość), lecz element przenosi jeszcze obciążenie. Taka sytuacja w badaniach oczywiście nie może wystąpić, lecz dopuszczono ją na potrzeby niniejszej analizy. Grubości elementów w poziomym zarysowaniu pod poszczególnymi poziomami obciążenia zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Grubości elementów w poziomym zarysowaniu

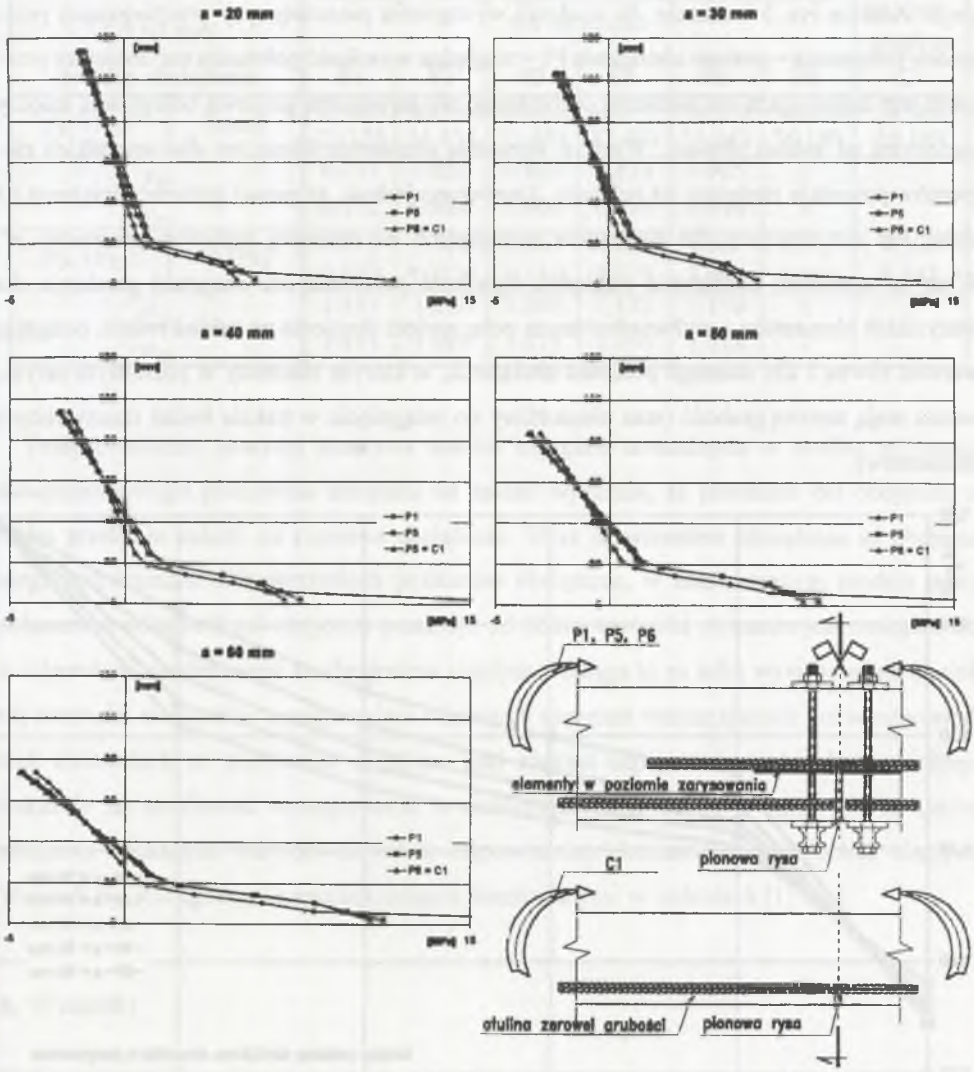
poziom obciążenia		P1	P2	P3	P4	P5	P6
sumaryczna siła w górnym łączonym na zakład zbrojeniu (N_g)		$<N_{g,cr}$	$N_{g,cr}$	75 kN	113 kN	$N_{g,02}$	$>N_{g,02}$
grubości elementu (rzędne)	b_1 (5 mm)	200	6.5	4.493	2.510	0.453	0
	b_2 (15 mm)	200	6.5	4.763	3.047	1.266	0
	b_3 (24 mm)	200	6.5	4.975	3.468	1.904	0
	b_4 (96 mm)	200	6.5	5.960	5.430	4.870	0

Obliczenia odpowiednich elementów ze zbrojeniem ciągłym przeprowadzono dla jednego poziomu obciążenia, oznaczonego (C1), zakładając, że w połowie rozpiętości elementu występuje pionowa rysa przechodząca przez zbrojenie ciągłe. Założono ponadto, podobnie jak w przypadku elementów z wykształtowanym połączeniem, że w ciągłym pręcie zbrojeniowym w środku elementu występuje lokalne zaniżenie średnicy pręta do 14 mm. W elementach ze zbrojeniem ciągłym wyłączono ze współpracy dolną otulinę zbrojenia, przyjmując, że elementy w otulinie mają zerową grubość. Założenie takie jest zgodne ze stanem faktycznym. Obserwacje poczynione na elementach badawczych wskazują, że podczas gdy otulina betonowa elementów ze zbrojeniem ciągłym ulega znacznemu pionowemu zarysowaniu, otulina betonowa elementów ze zbrojeniem ciągłym pozostaje praktycznie niezarysowana. Wynika to ze znacznej różnicy wysokości elementów oraz z występowania w elementach z wykształtowanym połączeniem praktycznie dwóch warstw zbrojenia (górne i dolne łączone na zakład zbrojenie).

Ze względu na liniowość zagadnienia (do analizy przyjęto sprężyste modele elementów) obciążenie we wszystkich poziomach stanowi jednostkowy moment zginający. Poszczególne poziomy obciążenia różnią się więc między sobą jedynie grubością elementów umieszczonych w wydzielającym się poziomym zarysowaniu. Takie podejście do sposobu obciążania elementów w znaczny sposób ułatwi analizę uzyskanych wyników.

Na rys. 4, dla wybranych poziomów obciążenia w elementach z połączeniem (P1, P5, P6) i jednego poziomu obciążenia w odpowiednich elementach ze zbrojeniem ciągłym (C1), przedstawiono zbiorczo dla wszystkich elementów otrzymane wartości naprężeń normalnych w przekroju przez środek elementu. Należy zwrócić uwagę, że otrzymane wartości naprężeń dla szóstego poziomu obciążenia elementów z wykształtowanym połączeniem (P6) i wartości naprężeń uzyskane dla odpowiednich elementów ze zbrojeniem ciągłym (C1) pokrywają się.

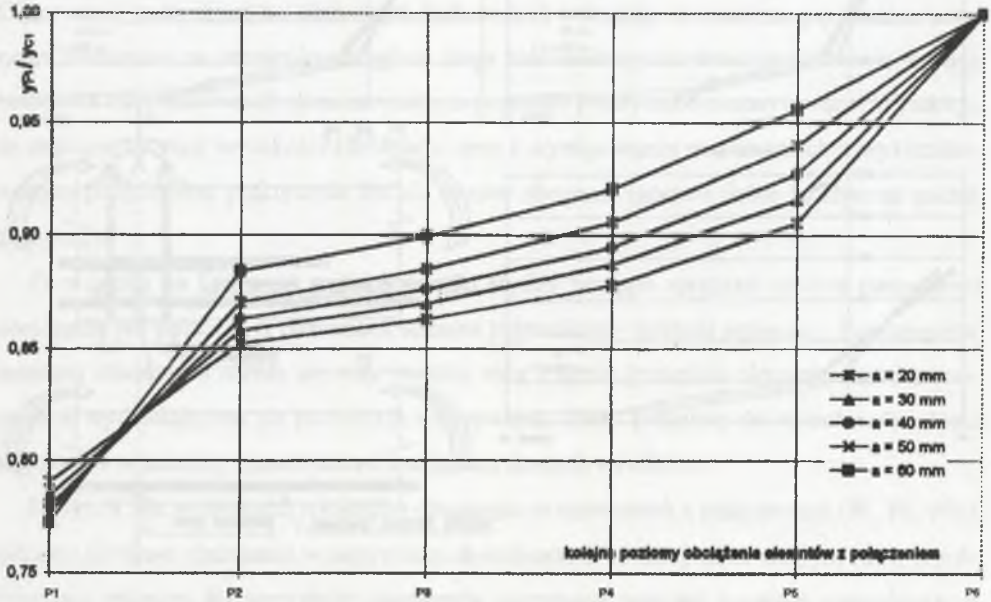
Analiza rys. 4 wykazuje, że wraz ze wzrostem poziomu obciążenia w elementach z połączeniem powiększa się odległość między osią obojętną a dolną krawędzią przekroju (y_{P_i}) oraz maleją naprężenia rozciągające w elementach reprezentujących górne łączone na zakład pręty zbrojeniowe (σ_{P_i}) – cztery dolne elementy.



Rys.4. Naprężenia normalne w przekroju przez połączenia dla poziomów obciążenia P1, P2 i P6 oraz naprężenie normalne w przekroju przez elementy ze zbrojeniem ciągłym (C1)

Fig.4. Normal pressure distribution in vertical section in case of elements with splices (P1, P2, P6) and in case of elements with continual reinforcement (C1)

Można także zauważyć, że przy mniejszych poziomach obciążenia znacznie pogłębia się nieliniowość rozkładu naprężeń normalnych w analizowanym przekroju przez połączenie. Rysunek 5 przedstawia iloraz wysokości położenia osi obojętnej przekroju w elemencie z połączeniem (y_{Pi}) do wysokości położenia osi obojętnej w odpowiednim elemencie ze zbrojeniem ciągłym (y_{Ci}). Iloraz ten nazwano względną wysokością położenia osi obojętnej przekroju. Analiza rys. 5 wskazuje, że w chwili wystąpienia pionowej rysy przebiegającej przez środek połączenia - poziom obciążenia P1 - względna wysokość położenia osi obojętnej przekroju jest najmniejsza dla elementu cechującego się największą pionową odległością między łączonymi na zakład prętami. Wraz ze wzrostem obciążenia iloraz ten dla wszystkich elementów pozostaje mniejszy od jedności. Zauważono jednak, że ponad poziom obciążenia P1 iloraz ten jest mniejszy dla elementów cechujących się mniejszą wartością parametru „a". Wraz ze wzrostem obciążenia względna wysokość położenia osi obojętnej przekroju dla wszystkich elementów z wykształtowanym połączeniem zbrojenia na zakład rośnie, osiągając wartość równą 1 dla szóstego poziomu obciążenia, w którym elementy w poziomym zarysowaniu mają zerową grubość (stan niemożliwy do osiągnięcia w trakcie badań rzeczywistych elementów).



Rys.5. Iloraz wysokości położenia osi obojętnej w przekroju przez element z połączeniem do wysokości położenia osi obojętnej w przekroju przez element ze zbrojeniem ciągłym pod wzrastającym obciążeniem

Fig.5. Quotient: high of neutral axis in elements with lapped bars to the same high in adequate elements with continual reinforcement under increasing load

Uzyskane wyniki obliczeń w tabelarycznej formie, dla dwóch skrajnych elementów charakteryzujących się najmniejszą i największą wartością parametru „a" przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Wybrane wyniki obliczeń dla zmiennego parametru a = 20 i 60 mm

a = 20 mm a = 60 mm		elementy z dwupoziomowym połączeniem zbrojenia na zakład						elementy ze zbroj. ciągłym
poziom obciążenia		P1	P2	P3	P4	P5	P6	C1
y_{Pi} (y_{C1})	[mm]	43.380 27.175	46.776 31.134	47.352 31.655	48.175 32.403	49.674 33.642	54.868 35.189	54.868 35.189
$\frac{y_{Pi}}{y_{C1}}$		0.791 0.772	0.853 0.884	0.863 0.900	0.878 0.921	0.905 0.956	1 1	
σ_{Pi} (σ_{Ci})	[MPa]	5.619 9.852	5.154 9.2926	5.063 9.186	4.926 9.019	4.667 8.699	4.203 8.543	4.203 8.543
$\frac{\sigma_{Pi}}{\sigma_{Ci}}$		1.337 1.153	1.226 1.088	1.205 1.075	1.172 1.056	1.110 1.018	1 1	

Przeprowadzona powyżej sprężysta analiza naprężeń normalnych w środku zginanego dwupoziomowego połączenia zbrojenia na zakład wykazała, że położenie osi obojętnej w takim przekroju zależy od poziomu obciążenia. Wraz ze wzrostem obciążenia oś obojętna ulega podniesieniu. Dla wszystkich poziomów obciążenia, w analizowanym modelu pracy połączenia, odległość osi obojętnej przekroju od dolnej krawędzi elementu jest mniejsza niż w odpowiednim elemencie ze zbrojeniem ciągłym. Pociąga to za sobą występowanie na dolnej krawędzi elementów z połączeniem większych naprężeń rozciągających niż w odpowiednich elementach ze zbrojeniem ciągłym. Taki rozkład naprężeń normalnych w przekroju wskazuje na możliwość występowania w elementach badawczych w łączonym na zakład zbrojeniu większych wartości sił niż w odpowiednim elemencie ze zbrojeniem ciągłym. Wniosek ten jest zgodny ze spostrzeżeniami zanotowanymi w badaniach [1] i [2].

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza naprężeń normalnych w dwupoziomowych połączeniach zbrojenia na zakład i w odpowiednich elementach ze zbrojeniem ciągłym, charakteryzujących się taką samą wysokością użyteczną przekroju, pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Odległość osi obojętnej od dolnej krawędzi elementu w przyjętym modelu obliczeniowym w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład zależy od poziomu obciążenia i jest większa dla większych poziomów obciążenia.
2. Odległość osi obojętnej od dolnej krawędzi elementu w elementach z połączeniem jest mniejsza pod każdym poziomem obciążenia od tej odległości w odpowiednich elementach ze zbrojeniem ciągłym.

LITERATURA

1. Gromysz K.: Badania połączeń poprzecznych w zespolonych stropach deskowych, XLII Konferencja Naukowa Krynica 1997, tom IV, ss. 79-86.
2. 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, ss. 73-84.
3. Gromysz K.: Siły w zbrojeniu pionowym w dwupoziomowym połączeniu zbrojenia na zakład. Część II – analiza. ZN Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo 89, Gliwice 2000.

Recenzent: Prof.dr hab. inż. Mieczysław Król

Abstract

Tests performed on transverse joints in combined slab flours show that loaded with bending moment two layer lap splices (spliced bars are in vertical distance) lose their capacity earlier than one can predict. The upper horizontal lapped reinforcement yields earlier than in regular elements (elements with continual reinforcement) loaded with bending moment. Analysis presented in this paper take under consideration two kind of elements. First – elements contained lapped bars, second – corresponding elements with continual reinforcement. Calculations are carried according to own model. It's proved, that neutral axis of vertical section in elements with lapped bars is lower than in adequate elements with continual reinforcement. This cause, that pressure in bottom part of analyzed section in element with lapped bars is higher than in elements with continual reinforcement.