

Metody wyznaczania wartości naprężenia przyczepności pomiędzy betonem a stalą zbrojeniową

Mgr inż. Magda Kijania, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Przyczepność jest to wzajemne przekazywanie sił pomiędzy prętami zbrojeniowymi a betonem. Znajomość tego zjawiska pozwala na precyzyjne określenie rozkładu odkształceń stali i betonu, a tym samym na określenie przebiegu odkształceń i zarysowania konstrukcji żelbetowej.

Istnieją trzy sposoby wyznaczenia granicznego naprężenia przyczepności. Pierwszy z nich to badania eksperymentalne, za pomocą których otrzymujemy rzeczywistą wartość przyczepności. Drugi – to metody analityczne opisane w różnego rodzaju pozycjach literaturowych. Wzory te wyprowadzone są na podstawie badań doświadczalnych i służą do wyliczenia naprężenia przyczepności np. podczas wymiarowania zbrojenia w elementach żelbetowych. Ostatni sposób to zaawansowane analizy numeryczne przeprowadzane w programach obliczeniowych. W artykule zaprezentowane zostaną wszystkie trzy sposoby.

2. Naprężenia przyczepności

Od samego początku istnienia konstrukcji żelbetowych zagadnienie przyczepności było przedmiotem licznych badań. Badano zarówno zjawisko przyczepności, jak i czynniki wywołujące przyczepność. Wyróżniamy trzy najistotniejsze czynniki: adhezja, tarcie stali o beton wywołane skurczem betonu oraz mechanizm ząbkowania wywołany nierównomierną strukturą powierzchni stali.

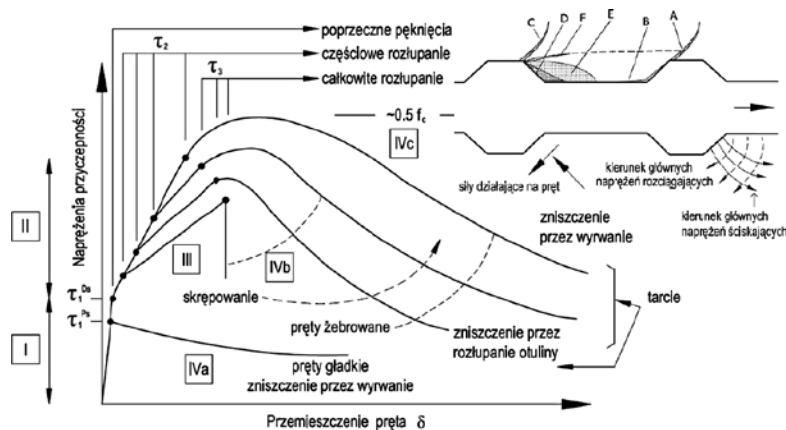
Rozkład naprężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta względem betonu charakteryzują cztery etapy (rys. 1). W etapie I (element niezarysowany) odkształcenia stali i betonu są sobie równe. Dzieje się tak na skutek występowania więzi międzycząsteczkowych adhezji między betonem a stalą. W etapie tym

występuje przyczepność pierwotna. Zostają osiągnięte maksymalne naprężenia przyczepności prętów gładkich i dochodzi do zniszczenia elementu (etap IVa – zerwanie przyczepności dla pręta gładkiego). Dla prętów żebrowanych etap ten kończy się w momencie przesuwu zbrojenia względem betonu i pojawienia się pierwszych mikrorys (rys. 1 oznaczenie A i B).

W momencie wejścia w II etap (pierwsze zarysowanie) następują nieodwracalne zniszczenia w elemencie. Tworzą się kolejne rysy (C), a pręt coraz bardziej przesuwa się względem betonu.

W etapie III dochodzi do pierwszego kruszenia się betonu pod żeberkami pręta (D-E). Wskutek zwiększenia naprężeń w stali następuje przewężenie pręta. Zniszczenie betonu przed czołem żebra powoduje powstanie i rozwój rys podłużnych równoległych do osi zbrojenia (F). Ten etap wyężenia odpowiada w praktyce osiągnięciu maksymalnej wartości naprężeń przyczepności dla prętów żebrowanych.

Wyróżniamy dwa sposoby zniszczenia elementu z prętem żebrowanym: rozłupanie otuliny betonowej (etap IVb) oraz wyrwanie pręta zbrojeniowego (etap IVc). W przypadku etapu IVb występują niewielkie oddziaływania krępujące odkształcenia, więc zniszczenie przyczepności następuje przez propagację rys podłużnych równoległych do osi

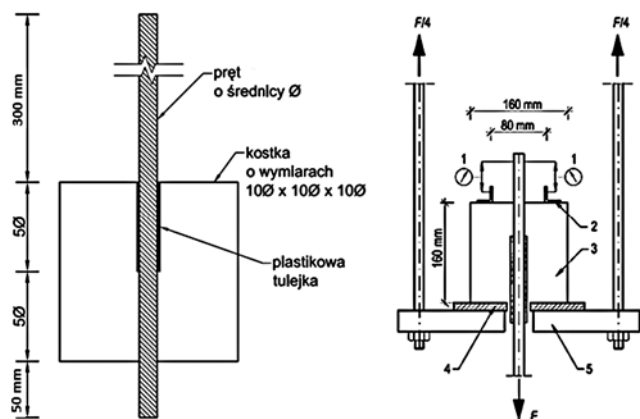


Rys. 1. Rozkład naprężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta względem betonu [15] wg [6] oraz mechanizm działania przyczepności

zbrojenia. Rysy te powodują pęknięcie otuliny. W etapie IVc mechanizm zniszczenia polega na ścięciu betonu w niedalekiej odległości od czoła żebra.

3. Badania doświadczalne

Najbardziej znaną metodą badania przyczepności jest metoda „pull-out”. Jest ona jedną z dwóch metod badań rekomendowanych przez instytut RILEM [18]. Schemat stanowiska oraz wymiary próbek badawczych pokazano na rysunku 2. W badaniach tych zakłada się, że zmiany odkształceń w stali po długości pręta mają rozkład liniowy (dla odcinka zakotwienia wynoszącego od trzech do pięciu średnic pręta rozkład naprężeń przyczepności jest stały [19]), dlatego też wartość przyczepności jest równa sile wrywającej pręt F podzielonej przez powierzchnię styku pomiędzy prętem a betonem.



Rys. 2. Schemat elementu badawczego próby pull-out oraz schemat stanowiska badawczego [18]

Jednakże badania te nie odzwierciedlają prawdziwej pracy konstrukcji. W badaniu tym beton jest ściskany, a pręt rozciągany, natomiast w elementach zginanych zarówno pręt jak i otaczający go beton są rozciągane. Bardzo krótki odcinek przyczepności uniemożliwia powstanie rys wewnętrznych, co prowadzi do zawyżonych, w porównaniu z elementami w skali naturalnej, wartości naprężeń przyczepności wtórnej. Dodatkowo otulina większa niż 3ϕ powoduje, że zniszczenie elementu nastąpi przez wyrywanie pręta z kostki betonowej. W rzeczywistości otuliny elementów są znacznie mniejsze i dużo bardziej prawdopodobny jest rozwój rys prowadzących do zniszczenia otuliny wskutek jej rozłupania.

Metoda ta ma jednak kilka dość istotnych cech pozytywnych. Badania prowadzone na takich elementach są dość proste do zrealizowania, wymagają jedynie pomiaru siły F i przemieszczenia pręta Δ . Prostota badań umożliwia prowadzenie ich na dużej liczbie próbek, w których zmiennymi mogą być inne czynniki wpływające na przyczepność. Uzyskane wyniki w postaci funkcji τ dość dobrze odpowiadają poszczególnym etapom działania sił przyczepności i są stosunkowo łatwe do zastosowania w analizach numerycznych.

4. Metody analityczne

Wartość przyczepności można również wyznaczyć analitycznie. Normy [17] i [14] podają, że wartość obliczeniowa granicznych naprężeń przyczepności f_{bd} dla prętów żebrowanych jest zależna od warunków betonowania η_1 , średnicy pręta η_2 i wartości obliczeniowej wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ctd} :

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd}$$

W najnowszej normie [15] dokonano zmian. Wartość ta zależna jest teraz od wytrzymałości średniej betonu na ściskanie f_{cm} oraz od przemieszczenia pręta względem betonowej kostki. Wzór na maksymalne naprężenia przyczepności jest następujący:

$$\tau_{b,max} = 2,5\sqrt{f_{cm}}$$

Niemiecka norma [4] podaje następujący wzór na wartość naprężenia przyczepności:

$$f_{bd} = \frac{2,25f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$$

W wyniku przeprowadzonych licznych badań i eksperymentów wyznaczono wiele innych wzorów analitycznych do wyznaczania wartości przyczepności. W pracy [7] przedstawiono zależność, opartą na koncepcji Tefersa [20]. Wartość przyczepności zależna jest zarówno od parametrów geometrycznych (wartość otuliny c , średnica zbrojenia ϕ i długość zakotwienia pręta l_d) oraz od wytrzymałości betonu na ściskanie f_c i rozciąganie f_{ct} .

$$\tau_b = u_c \frac{1 + \frac{1}{M}}{1,85 + 0,024\sqrt{M}} (0,88 + 0,12 \frac{c_{med}}{c_{min}})$$

$$M = \cosh\left(0,0022 l_d \sqrt{4,25 \frac{f_c}{\phi}}\right) u_c = 8,6 \frac{0,5 + \frac{c_{min}}{\phi}}{5,5 + \frac{c_{min}}{\phi}} f_{ct}$$

Kolejna zależność z pracy [21] wyraża wartość przyczepności jako funkcję zmiennych wartości średnicy pręta ϕ i otulenia zbrojenia c , a także wytrzymałości betonu na ściskanie f_c i rozciąganie f_{ct} . Wzór ten oparty jest na kryterium Coulomba.

$$\tau_b = \frac{\sqrt{f_{ct}}}{2} \left(1 + 0,3 \left(1 - \frac{f_{ct}}{f_c} \right) \left(2 \frac{c}{\phi} + 1 \right) \right) f_c$$

Przedstawiony w pracy [25] wzór zależny jest od tych samych wartości co poprzednie wyrażenie. Aby wyznaczyć przyczepność za pomocą tej zależności, należy posłużyć się brytyjskimi jednostkami miar (wymiały w calach [in.] i wytrzymałość na ściskanie betonu w funtach na cal kwadrat [psi]).

$$\tau_b = \frac{f_c^{0,25}}{\pi\phi l_d} (59,8 l_d (c_{min} + 0,5\phi) + 2350\pi \frac{\phi^2}{4}) \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9 \right)$$

Ostatnia grupa wzorów znajdująca się w pracach [2], [16], [3] oraz [8] ma bardzo podobną do siebie konstrukcję. Każde z proponowanych wyrażenia opisuje wartość przyczepności w zależności od wartości otuliny c ,

średnicy zbrojenia ϕ , długości zakotwienia l_d oraz od wytrzymałości betonu f_c . W trzech pierwszych wzorach należy używać brytyjskich jednostek miary.

$$\tau_b = \left(-0,879 + 0,324 \frac{c}{\phi} + 0,579 \frac{\phi}{l_d} \right) \sqrt{f_c}$$

$$\tau_b = \left(1,22 + 3,23 \frac{c}{\phi} + 53 \frac{\phi}{l_d} \right) \sqrt{f_c}$$

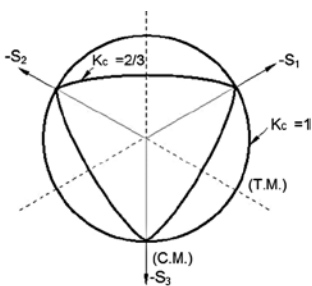
$$\tau_b = \left(3,5 + 3,4 \frac{c}{\phi} + 57 \frac{\phi}{l_d} \right) \sqrt{f_c}$$

$$\tau_b = \left(1,2 + 3 \frac{c}{\phi} + 50 \frac{\phi}{l_d} \right) \sqrt{f_c}$$

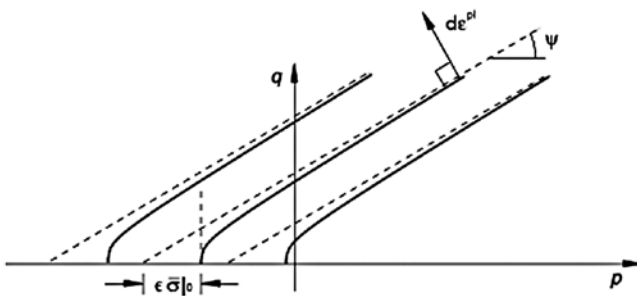
Jak widać, we wszystkich powyższych zależnościach wartość naprężenia przyczepności zależy od cech wytrzymałościowych betonu. Tylko w dwóch wzorach zależy ona od wytrzymałości betonu na rozciąganie a w pozostałych wzorach od wytrzymałości betonu na ściskanie. Jednakże w każdym przypadku wytrzymałość na ściskanie występuje pod pierwiastkiem. Pierwiastkując tą wartość otrzymujemy w przybliżeniu wytrzymałość betonu na rozciąganie.

5. Modelowanie numeryczne

W rozdziale tym przedstawiono sposób modelowania próby pull-out w programie ABAQUS. Próbę tę można odzwierciedlić poprzez dwa modele: model dokładny i model uproszczony. Opisany zostanie również szczegółowo dobór modelu materiałowego dla betonu Concrete Damage Plasticity (CDP).



Rys. 3. Powierzchnia zniszczenia w przekroju dewiatorowym w modelu CDP i powierzchnia potencjału plastycznego (definicja mimośrod ϵ i kąta dylatacji ψ) [1]



5.1. Model betonu

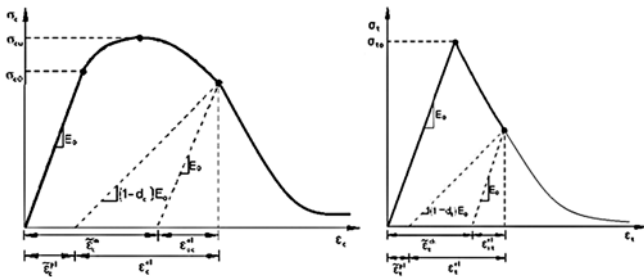
Model CDP używany w ABAQUSIE stanowi modyfikację hipotezy wyężeniowej Druckera-Pragera (D-P). Zakłada on powierzchnię zniszczenia w przekroju dewiatorowym, która nie musi być okręgiem i jest zdeterminowana przez parametr K_c .

Parametr K_c (rys. 3) jest interpretowany jako stosunek odległości pomiędzy osią hydrostatyczną i odpowiednio południkami ściskania i rozciągania w przekroju dewiatorowym. Stosunek ten jest zawsze większy niż 0,5. W przypadku założenia wartości równiej 1 przekrój dewiatorowy powierzchni zniszczenia staje się okręgiem (jak w klasycznym D-P). W pracy Majewskiego [12] zauważono, że zgodnie z wynikami eksperymentalnymi ta wartość dla średnich naprężeń normalnych równych zero wynosi około 0,6 i powoli wzrasta wraz ze spadkiem średniego naprężenia normalnego do wartości bliskiej jedności (dla dużych wartości bezwzględnych średniego naprężenia normalnego). Model CDP zaleca zakładać $K_c = 2/3$. Kształt ten zbliżony jest do kryterium wytrzymałościowego opisanego przez Willam'a i Warnke [23]. Jest to kryterium teoretyczne oparte na wynikach otrzymanych z badań trójosiowego ściskania. Kolejnym parametrem opisującym stan materiału jest punkt, w którym beton ulega zniszczeniu przy dwuosowym ściskaniu. σ_{bo}/σ_{co} (f_{bo}/f_{co}) jest stosunkiem wytrzymałości betonu w stanie dwuosowym do wytrzymałości betonu w stanie jednoosiowym. Podręcznik użytkownika ABAQUS [1] podaje, że zalecaną wartością jest 1,16 zgodnie z badaniami eksperymentalnymi przedstawionymi w pracy [11].

W modelu CDP powierzchnia potencjału plastycznego w płaszczyźnie południkowej ma kształt hiperboli. Kształt jest korygowany przez parametr zwany mimośrodem (Eccentricity). Jest to mała wartość dodatnia, która opisuje stopień przybliżania się hiperboli potencjału plastycznego do jej asymptoty (rys. 3). Mimośród może być opisywany jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie. Manual [1] zaleca przyjąć $\epsilon = 0,1$. Kiedy $\epsilon = 0$ powierzchnia w płaszczyźnie południkowej staje się prostą linią (jak w klasycznym D-P).

Ostatnim parametrem charakteryzującym zachowanie się betonu w złożonym stanie naprężenia jest kąt dylatacji (dilation angle) ψ definiujący powierzchnię potencjału plastycznego (rys. 3). Kąt dylatacji opisuje stosunek przyrostu odkształceń plastycznych objętościowych $d\epsilon_p^{pl}$ do przyrostu odkształceń plastycznych postaciowych $d\gamma_p$ ($\text{tg}\psi = d\epsilon_p^{pl}/d\gamma_p$). Dla wyznaczenia wartości potrzebna jest zatem znajomość wartości przyrostów odkształceń plastycznych w zaawansowanych stanach obciążenia. Analiza wyników eksperymentalnych [22] prowadzi do wniosku, że dla betonów kąt dylatacji w dużej mierze jest stały – niezależny od ścieżki obciążenia, o wartości $5^\circ \leq \psi \leq 15^\circ$. Spotykane czasami w literaturze, np. [9] i [10], twierdzenie, że kąt dylatacji może być utożsamiany z kątem tarcia wewnętrznego jest elementarnym błędem wynikającym z nierozróżniania pojęć powierzchni plastyczności i powierzchni potencjału plastycznego.

Zależność naprężenie – odkształcenie dla ściskanego betonu może być opisywana na podstawie badań w stanie jednoosiowego ściskania. Po otrzymaniu krzywej $\sigma - \epsilon$ należy ją wprowadzić do programu w sposób tabelaryczny. Wytrzymałość betonu na rozciąganie w jednoosiowym



Rys. 4. Wykres odkształcenie – naprężenie dla betonu ściśkanego (rys. lewy) i rozciąganego (rys. prawy) [1]

stanie naprężenia jest rzadko opisywana przez badanie bezpośredniego rozciągania z powodu problemów związanych z wykonaniem badania i dużą rozbieżnością wyników, niemniej istnieją na przykład dobrze udokumentowane badania [24]. Najczęściej stosuje się metody pośrednie, na przykład badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu lub przy zginaniu. Można wyznaczyć wytrzymałość betonu na rozciąganie również metodą analityczną, znajdującą się w normie [17].

5.2. Model uproszczony

Model uproszczony to taki, w którym pręt żebrowany jest zamodelowany jako pręt gładki, a pomiędzy betonem a stalą występuje połączenie w postaci elementów interfejsowych, odzwierciedlające przyczepność pomiędzy obydwo materialami. Połączenie to musi być wykalibrowane w taki sposób, aby model numeryczny odzwierciedlał wyniki badania doświadczalnego.

Model ten jest uproszczony, ponieważ nie ma konieczności odwzorowania pręta o rzeczywistym kształcie (wygenerowanie w programie modelu 3D pręta żebrowanego jest bardzo pracochłonne). Jednakże potrzebne są cechy połączenia interfejsowego. Można je uzyskać poprzez stworzenie modelu numerycznego, który będzie odzwierciedlał wcześniej wykonane badania doświadczalne. W tym celu konieczna jest wieloetapowa kalibracja cech charakterystycznych połączenia interfejsowego, aż do momentu uzyskania wyników odzwierciedlających wykonane badania. W dalszym etapie model ten może posłużyć przede wszystkim do przeanalizowania naprężeń przyczepności dla innych elementów (np. próbka z inną średnicą pręta). Kolejną zaletą jest również możliwość sprawdzenia, jak zachowuje się element betonowy w dowolnym miejscu wewnątrz próbki.

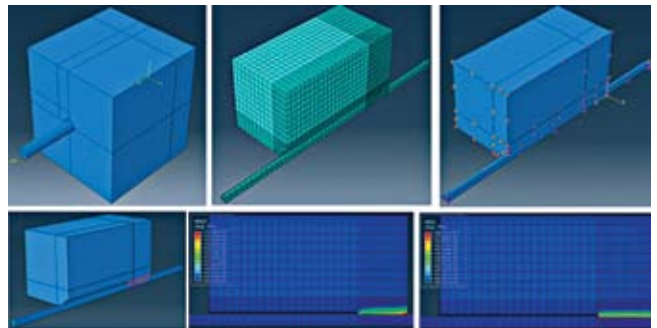
Próbkę modelujemy jako dwie osobne części modelu połączone elementami interfejsowymi. Pierwsza z nich to kostka betonowa o wymiarach $10\phi \times 10\phi \times 10\phi$. Druga to pręt gładki o średnicy ϕ i długości minimum 50ϕ . Obydwu częściom należy przypisać odpowiednie modele materiałowe, dla betonu sprężysty (Elastic) i plastyczny z kontynuinalną mechaniką uszkodzeń (Concrete Damage Plasticity (CDP)) oraz dla stali sprężysty (Elastic).

Każdą z części należy poddać dyskretyzacji, np. stosując elementy skończone o kształcie sześciątów. W celu sprawniejszego przeprowadzenia obliczeń należy

wykonać tylko ćwiartkę rzeczywistego modelu. Wygenerowane zostanie dużo mniej elementów skończonych i proces obliczeniowy będzie trwał dużo krócej, dlatego w programie należy wygenerować warunki brzegowe symetrii na ścianach wewnętrznych, zarówno dla części betonowej jak i stalowej. Warunek brzegowy zewnętrzny to podpora przegubowa powierzchniowa.

Obciążenie w programie należy zadać jako przemieszczenie liniowe (dzięki temu można również opisać zakres pokrytyczny). Przemieszczenie to można przyłożyć do punktu, który nie należy do elementu badawczego a następnie wygenerować przesuw pręta zgodnie z przesuwną punktu. Połączenie między elementami należy wygenerować za pomocą opcji Surface to Surface, które powinno być w odpowiedni sposób wykalibrowane.

Na rysunku 5 podano przykładowe wyniki własnych analiz numerycznych – odkształcenia plastyczne zredukowane betonu przy ścisaniu i odkształcenia plastyczne ekwiwalentne przy rozciąganiu.



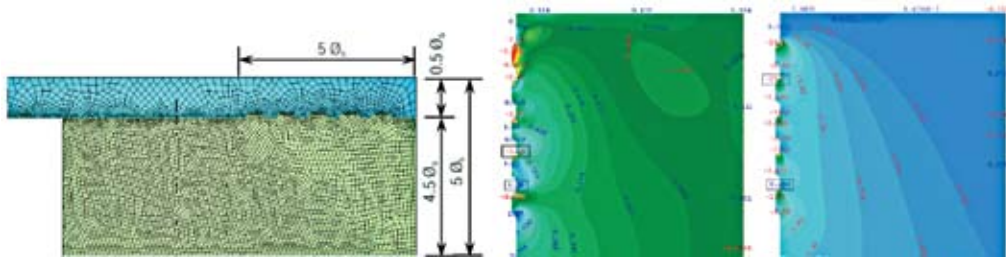
Rys. 5. Model, schemat dyskretyzacji, warunki brzegowe, sposób połączenia elementów oraz odkształcenia betonu rozciąganego i ściskanego

5.3. Model dokładny

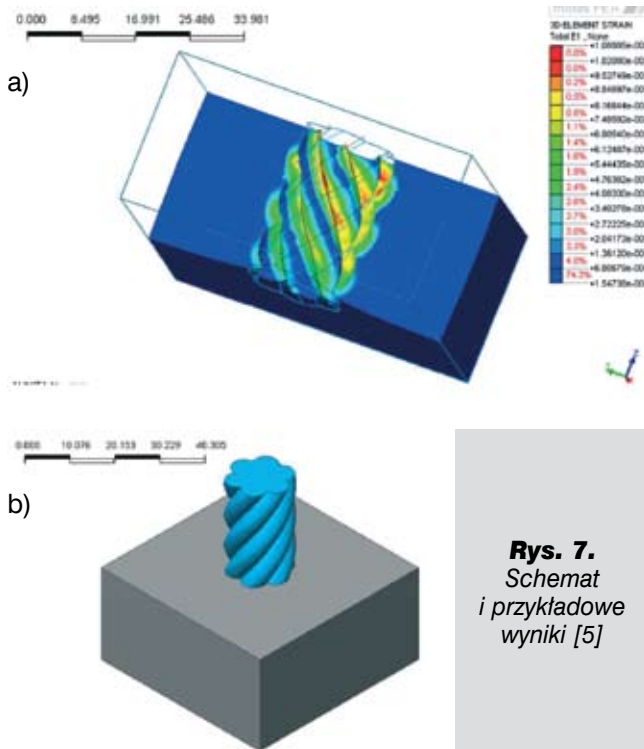
Model dokładny to taki, w którym pręt żebrowany ma rzeczywiste kształty (odpowiedni kształt i wielkość żeberk oraz ich rozstaw). Wykonuje się go analogicznie do modelu uproszczonego. Cechy materiałów, warunki brzegowe oraz obciążenie należy zadać w sposób identyczny jak opisano w pkt. 5.2. W modelu tym nie ma konieczności wykonywania specjalnego połączenia za pomocą funkcji. Oba elementy łączą się ze sobą poprzez zazębienie się betonu pomiędzy żeberkami pręta żebrowanego.

Taka analiza służy przede wszystkim do wyznaczania rzeczywistych naprężeń przyczepności za pomocą modelu numerycznego. Może on zastąpić badania doświadczalne, pod warunkiem, że będzie poprawnie wykonany. Dodatkowo modelując próbę pull-out metodami numerycznymi mamy możliwość zbadania, jak zachowuje się materiał (beton lub stal) w każdym dowolnym miejscu w próbce. Podczas przeprowadzania eksperymentów na próbkach rzeczywistych otrzymujemy tylko wartości siły w zależności od przemieszczenia pręta.

Podobne modele zostały zrealizowane i opisane w pracach [12] i [5]. Na rysunkach 6 i 7 znajdują się schematy i przykładowe wyniki.



Rys. 6.
Schemat i wymiary
elementów oraz
przykładowe
wyniki [13]



Rys. 7.
Schemat
i przykładowe
wyniki [5]

6. Podsumowanie

Znajomość zjawiska przyczepności pozwala nam na precyzyjne określenie rozkładu odkształceń stali i betonu, a tym samym na określenie przebiegu odkształcenia i zarysowania konstrukcji żelbetowych.

Przeprowadzone badania eksperymentalne podają nam rzeczywiste wartości naprężenia przyczepności, jednakże są one pracochłonne i nie zawsze da się je wykonać. Metody analityczne pozwalają na szybkie oszacowanie wartości naprężenia przyczepności. Niestety jest to tylko wartość przybliżona i zazwyczaj zaniżona, ale dzięki temu projektant zawsze stoi po stronie bezpiecznej przy wymiarowaniu.

Alternatywą dla badań eksperymentalnych jest poprawnie wykonany model numeryczny. Pozwala on nie tylko uzyskać dokładną wartość naprężenia przyczepności, ale również umożliwia wyciągnąć z badanego elementu znacznie więcej informacji niż uzyskalibyśmy z badań doświadczalnych. Aby wyniki te odzwierciedlały rzeczywiste zachowania elementów, każdy z parametrów modelu powinien być dokładnie opisany.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abaqus analysis user's manual, Version 6.9, Dassault Systèmes, 2009
- [2] Al-Jahdali, F.A., Wafa, F.F. and Shihata, S.A., Development length for straight deformed bars in high-strength concrete, ACI Special Publication (SP-149), p.507-522, 1994
- [3] Chapman, R.A. and Shah, S.P., Early-age bond strength in reinforced concrete, ACI Materials Journal 84 (6):501-510, 1987
- [4] DIN 1045:2001 Tregwerke aus Beton, Stahlbeton und Spanbeton Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [5] Dyba M., Wpływ parametrów technologicznych na przyczepność betonu wysokowartościowego do stalowych splotów sprężających, Praca doktorska, Politechnika Krakowska 2014
- [6] Dybel P., Wpływ składu i właściwości betonów wysokowartościowych na przyczepność do stalowych prętów zbrojeniowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska 2012
- [7] Esfahani M. R., Rangan B. V., Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC). ACI Structural Journal, Vol. 95, No. S10, 1998
- [8] Harajli, M.H.: Development/splice strength of reinforcing bars embedded in plain and fiber reinforced concrete, ACI Structural Journal 91 (5):511-520, 1994
- [9] Jankowiak I., Kryteria zniszczenia betonu poddanego obciążeniami quasi-statycznym i dynamicznym, Praca doktorska, Poznań 2011
- [10] Kmieciak P., Kamiński M., Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. XI, No. 3, Wrocław 2011
- [11] Kupfer H. B., Gerstle K. H., Behavior of concrete under biaxial stress, J. Eng. Mech. Div., ASCE, vol. 99, No. EM4, pp. 852-866, 1973
- [12] Majewski S., The mechanics of structural concrete in terms of elasto-plasticity, Silesian Polytechnic Publishing House, Gliwice 2003
- [13] Matthias S., Hegger J., Hude F., Schoening J., Hochfeste Bewehrung im Stahl-betonbau – Identifizierung von Anwendungsmöglichkeiten, Entwicklung von Bemessungs-grundlagen und Ermittlung des wirtschaftlichen Einsparpotentials, 2013
- [14] Model Code for Concrete Structures. CEB Bulletin d'Information No 195 and 196, First Draft, March 1990
- [15] Model Code, Final Draft – Volume 1. FIB Bulletin 65, 2012.
- [16] Orangun, C. O., Jirsa, J. O. and Breen, J. E., Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices. ACI Journal, Vol. 74, No. 3, 1977
- [17] PN – EN 1992-1-1:2004, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [18] RILEM/CEB/FIP, Technical recommendations for the testing and use of construction materials, E&FN Spon, U.K. 1983
- [19] Suwalski L. i inni, Budownictwo betonowe, Teoria betonu i żelbetu, Arkady, Warszawa 1964
- [20] Tepfers R., A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Publ. 73/2, 1973
- [21] Vandewalle L., Theoretical Prediction of the Ultimate Bond Strength Between a Reinforcement Bar and Concrete. Bond in Concrete: from Research to Practice, Riga 1992
- [22] Vermeer P. A., de Borst R., Non-associated plasticity for soils, concrete and rock, Heron, Vol. 29, No. 3, Delft, 1984
- [23] Willam K.J., Warnke E.P., Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete, Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy 1975
- [24] Woliński S., Właściwości betonu rozciąganego i ich zastosowania w nieliniowej mechanice pęknięcia betonu, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1991
- [25] Zuo J., Darwin D., Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars In Normal and High-Strength Concrete. ACI Structural Journal, Vol. 97, No. S65, 2000