

Czego można nauczyć się, otwierając butelkę wina?

Można lepiej zrozumieć mechanikę wzmocnienia betonu włóknami¹

Kiedy zadają to pytanie słuchaczom moich wykładów, otrzymuję rozmaite odpowiedzi. Na ogół zupełnie różne od tej, której oczekuję. Ilustracje objaśniające tytułowe pytanie i sposób rozumowania prowadzący do uzyskania właściwej odpowiedzi pokazano na poniższym rysunku.

Wyciąganie korka za pomocą korkociągu



przyczepność odpowiednia



przyczepność słaba



przyczepność większa niż wytrzymałość osnowy



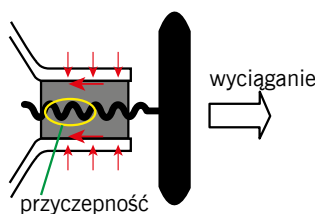
efekt wyciągnięcia korka

Rys. 1. Możliwe rezultaty wyciągnięcia korka z butelki

Wyciąganie korka z butelki za pomocą korkociągu kończy się na ogół oczekiwanym sukcesem, chociaż zdarzają się niepowodzenia, takie jak zilustrowano na obrazkach dwóch spośród trzech możliwych rezultatów. Kiedy korek jest słaby, a korkociąg raczej gładki, przyczepność między nimi jest zbyt słaba, aby pokonać opór zacisku korka. Kiedy korek jest słaby, a korkociąg mocno uźebrowany, przyczepność między nimi może być zbyt duża w stosunku do wytrzymałości korka i zamiast wyciągnięcia korka następuje jego zerwanie. Studiując możliwe przypadki, zróżnicowanie kształtu i długości korkociągu oraz zróżnicowanie wytrzymałości korka, można łatwo dojść do stwierdzenia, że pożądany efekt wyciągnięcia korka z butelki uzyskuje się przy odpowiednio dobranych parametrach materiałowych i kształcie korkociągu. Czynność wyciągnięcia korkociągu ułatwia wyobrażenie wyciągnięcia pojedynczego włókna z betonu, a właśnie to zjawisko fizyczne jest podstawą zrozumienia mechanizmu wzmocnienia betonu poprzez zbrojenie rozproszone.

Na poniższym schemacie wyciągnięcia korka z butelki pokazane zostały siły działające na korkociąg, korek i szyjkę butelki. Obok pokazano widok fragmentu splekanego elementu konstrukcji z fibrobetonu z włóknami stalowymi, poddanej rozciąganiu przy zginaniu.

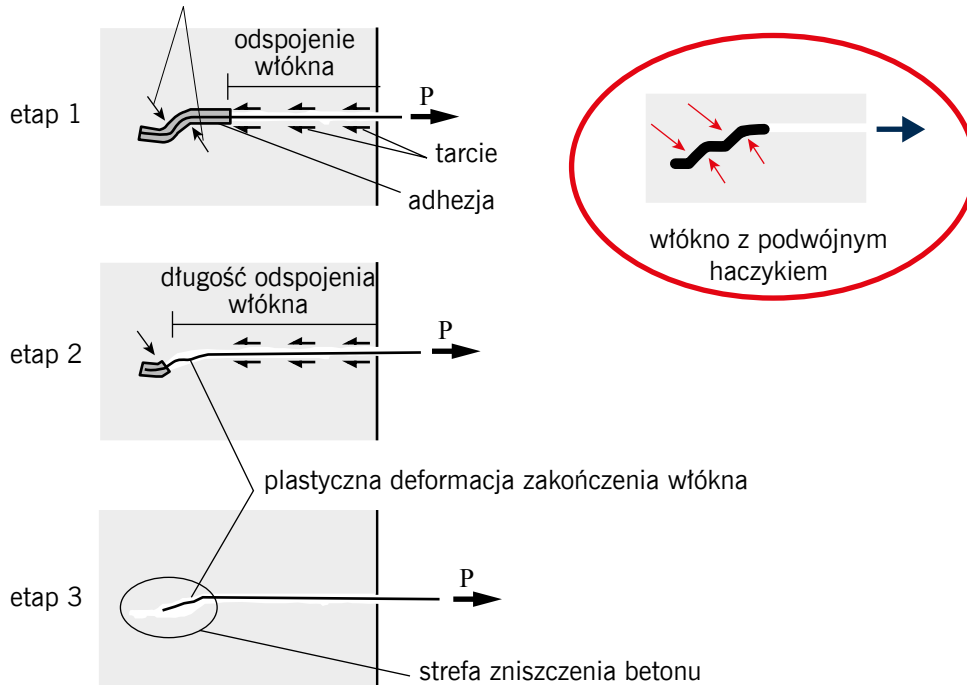
Rys. 2. Schemat wyciągnięcia korkociągu i widok włókien stalowych w zarysowanym betonie



Funkcje korkociągu i włókna wzmacniającego są oczywiście inne, ale w obu przypadkach kluczowym elementem skutecznego działania są właściwe proporcje wytrzymałości współpracujących materiałów oraz kształtu włókna (lub korkociągu), który decyduje o siłach docisku. Znaczące siły kontaktowe między włóknem i matrycą cementową pojawiają się wtedy, gdy matryca pęknie pod wpływem sił rozciągających, a włókno w tym miejscu przejmie przenoszenie tych sił. Powstaje więc sytuacja analogiczna do wyciągnięcia korkociągu: przeniesione obciążenie powoduje wyciągnięcie włókna z matrycy, jak schematycznie pokazano na rysunku poniżej. Obciążenie wyciągające włókno P nie może być zrównoważone poprzez naprężenia kontaktowe w zakresie sprężystym. Powstaje więc postępujące odpajanie włókna od matrycy i pojawia się tarcie między włóknem i matrycą na odcinku odspojonym (etap 1 na rysunku). Jednocześnie w miejscach zagięć włókna wzrastają siły docisku do matrycy. Przy wzrastającym rozwarciu pęknięcia (etap 2) zwiększa się odcinek odspojenia i w miejscu dużego docisku włókna do matrycy następuje plastyczna deformacja włókna i miejscowe zniszczenie matrycy cementowej. Dalszy wzrost rozwarcia pęknięcia (etap 3) prowadzi do całkowitego odspojenia włókna, uplastycznienia włókna w miejscach docisku do matrycy i w końcu do radykalnego zmniejszenia przeniesionego obciążenia przez włókno. Praca wykonana przez siłę zewnętrzną do zniszczenia odpowiada sumie energii rozproszonej w elementarnych mechanizmach zniszczenia w skali mikro (odspajanie, tarcie, uplastycznienie włókien i lokalne zniszczenie matrycy). Zatem siła przenoszona przez włókno będzie tym większa, im więcej energii będzie rozpraszane przez elementarne mechanizmy zniszczenia.

Proces plastycznej deformacji odgiętych końców włókien wymaga pracy proporcjonalnej do granicy plastyczności stali. Dlatego efektywność włókien ze stali o wysokiej wytrzymałości, charakteryzującej się tzw. długą półką plastyczną, jest najwyższa. Plastyczność stali zapewnia w skali mikro pożądaną w konstrukcjach nośnych kontrolowaną, czyli bezpieczną, charakterystykę materiałową pod działaniem obciążeń rozciągających. Takie zjawisko nie istnieje w przypadku włókien z tworzyw sztucznych, nawet tych nazywanych konstrukcyjnymi. Jednakże, aby wykorzystać w pełni plastyczność stali o wysokiej wytrzymałości i ciągliwości, matryca w otoczeniu włókna powinna być odpowiednio wytrzymała, by nie ulec wcześniejszemu skruszeniu. Z tego wynika konkretna obserwacja, że do wzmocnienia betonu o relatywnie wysokiej wytrzymałości potrzeba włókien ze stali o odpowiednio wysokiej wytrzymałości. Jednocześnie ich zakotwienie mechaniczne w matrycy cementowej musi być odpowiednio mocne, na co wpływa także kształt i liczba odgięć. Rysunek włókna o zakończeniu podwój-

mechaniczne zakotwienie zakończenia włókna w betonie

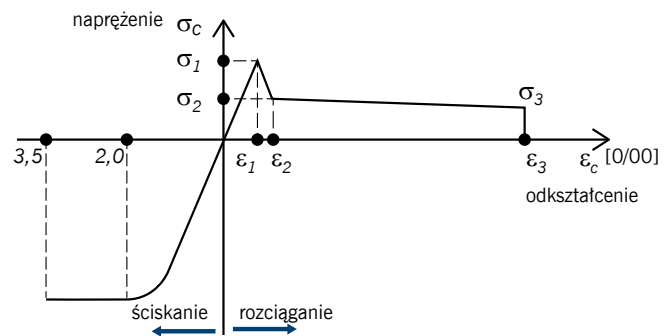


Rys. 3. Schematyczna ilustracja wyciągania włókien z betonu zarysowanego

nie haczykowanym (w czerwonej obwódce) wskazuje zwiększoną siłę zakotwienia w matrycy w porównaniu z włóknem o pojedynczym haczyku, zatem większą siłę przenoszoną przez włókno niecałkowicie odspojone, a w konsekwencji także zwiększoną energię uplastycznienia stali w czterech zagięciach, a nie w dwóch. Postęp w zakresie kształtów włókien, rodzajów stali, a także w zakresie projektowania betonu pod kątem podwyższenia wytrzymałości strefy kontaktu z włóknami pozostałby pewnie znany jedynie w wąskich kręgach, gdyby nie pojawił się nowy dokument normalizacyjny o uznaniu międzynarodowym. Mam tu na myśli normę wzorcową fib Model Code 2010², zasadniczo dotyczącą konstrukcji żelbetowych, ale zawierającą rozdział przedstawiający zasady wykorzystania fibrobetonu w konstrukcjach budowlanych. Zgodnie z normą zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych w betonie umożliwia:

- w stanie granicznym nośności: częściowe lub całkowite zastąpienie zbrojenia prętami
- w stanie granicznym użytkowania: redukcję rozwarcia rys i ich rozstawu, w konsekwencji wzrost odporności na agresję środowiska.

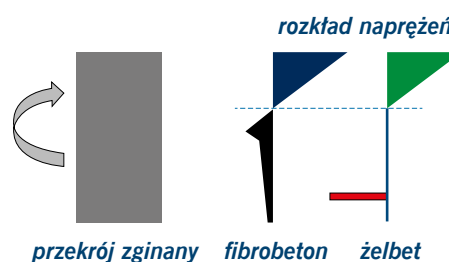
Fibrobeton do zastosowań w pełni konstrukcyjnych musi być zdefiniowany przez minimalne, gwarantowane właściwości mechaniczne, wpływające na charakterystykę konstytutywną. Przykład takiej charakterystyki (zależność między odkształceniem i naprężeniem) zgodnej z zaleceniami RILEM przedstawiono na poniższym rysunku. Charakterystyczne punkty części wykresu dotyczącego rozciągania wyznacza się na podstawie badań przy zginaniu i tzw. analizy odwrotnej. Im większa jest mechaniczna efektywność zbrojenia rozproszonego, tym większe będą wartości zasadniczych parametrów σ_1 , σ_2 i σ_3 opisujących kształt wykresu. Charakterystyka konstytutywna fibrobetonu jest wykorzystywana m.in. do wymiarowania grubości budowlanych elementów zginanych i ścinanych. Schemat rozkładu naprężeń w przekroju zginanej belki w stanie zarysowanym przedstawiono na rysunku poniżej, obok



rozkładu naprężeń przyjmowanego do obliczeń nośności elementów żelbetowych (czerwony słupki symbolizuje siłę rozciągającą przenoszoną przez pręty stalowe). Zawartość, jednorodność przestrzennego rozmieszczenia włókien, ich kształt i smukłość, wytrzymałość stali w odpowiedniej proporcji do wytrzymałości betonu decydują o charakterystyce konstytutywnej fibrobetonu. Dzięki temu technolog betonu ma bezpośredni wpływ na efektywność fibrobetonu jako materiału konstrukcyjnego, zarówno w stanie granicznym nośności, jak też w stanie granicznym użytkowania. Zapowiada się interesujący rozwój nowych, konstrukcyjnych zastosowań fibrobetonu w budownictwie ogólnym i przemysłowym.

prof. Michał A. Glinicki

Rys.4. Charakterystyka konstytutywna fibrobetonu zgodna z zaleceniami RILEM



Rys. 5. Schematyczny rozkład naprężeń w zarysowanym elemencie zginanym z fibrobetonu i z betonu zbrojonego prętami stalowymi

Przypisy

- ¹ Jest to kontynuacja tekstu „Nie wszystkie włókna są równe...” opublikowanego w „BTA” nr 2/2013.
- ² Wydana w roku 2013; tłumaczenie polskie wydane w roku 2014 przez Polski Cement