

## **Numerical forecast of fibre reinforced concrete ductility during dynamical stretching**

**Author: Robert Osiński, M.Sc. Eng.**  
**Supervisor: Grzegorz Bąk, Prof. Ph.D.**

Keywords: fibre reinforced concrete, fibre reinforced concrete ductility, strain waves method, concrete specimen splitting, Michaelis (eight type) concrete specimens axial stretching

Previous available literature presented only results of fibre reinforced concrete (FRC) experimental researches according to European Standards. Those experimental researches mainly concerned to appoint an equivalent flexural strength and an residual flexural strength, appointed during very slow balks bending loaded in kinematics steered press. Continual deformation called fibre reinforced concrete ductility determinate by balks deflection was noticed.

Co-operation hooked ended steel fibres with loaded very quickly (without kinematic steering), mainly stretching concrete was modelling in doctor's thesis. Concrete specimen splitting and Michaelis (eight type) concrete specimens axial stretching were taken to check the fibre reinforced concrete.

Numerical forecast of fibre reinforcement concrete reaction was compiled based on strain waves method proposed by Z. Szcześniak. It is used the differential discretisation using explicit integration scheme, which is built step by step time to describe the propagation of expansion waves and distortion waves. Algorithm considers heterogeneity of concrete and random distribution of fibres. Fibres are described by length 50 mm, diameter 0,7 mm, strength 1352MPa. An assumption was made that fibres carry only longitudinal forces. Forces are determinate by moving of discrete element of concrete matrix. Relocation of the ends of fibres is the same as moving of discrete element of concrete matrix in which the ends are located. Fibre's adhesion to concrete matrix is omitted.

Maximum fibre extension 3,5% was experimentally appointed. In description of stretch concrete the model of "diffuse crack" is used. Concrete limiting extension is set as multiplicity of concrete limiting extension under uniaxial stretch  $\varepsilon_{ct}^{gr} = 0,01\%$ . In evolution of "diffuse crack" it is supposed that elastic unloading is possible according to degrade elastic law. When strain is bigger than the concrete limiting extension of "diffuse crack" a resistance of concrete matrix on the perpendicular direction to crack sets to zero. Global differential model decreases. During numerical forecast, it was possible to appoint a crack only on the microstructure level (not macrostructure) according to crack's mechanics. The crack concrete specimen splitting was maximum micrometres range. Analysed model was destroyed by the quasi linear clamp of dynamic load right to Brazilian method. In deformation 2 stages were visible

- 1) works of concrete matrix according to method of “diffuse crack”,
- 2) stretched fibres reaction in “diffuse crack”.

The consequence such reaction is that fibres' stress when the concrete matrix works are very low and depend on localisation very much. Fibres braked when the extension was much, much bigger.

It was necessary to modify the algorithm to execute numerical forecast for direct axial stretching. Diagonal cracks appeared on the length of specimen 0,07x0,07x0,14 m. It was necessary to check the effort in the different cross-sections to decide where the crack was destructive. Numerical analysis showed global deformation of the specimens on the macrostructure level - range tenth of millimetres. Fibre reinforced concrete ductility was safety appreciated as multiplicity of concrete limiting extension  $\varepsilon_{ct}^{gr} = 0,01\%$  in depending on fiber reinforcement stage. It was also visible 2 stages in deformation and great loss of resistance between stages.

It is difficult to give an opinion concerning on equivalent flexural strength and an residual flexural strength based on results of numerical forecast. Numerical forecast confirmed bigger quality of fibre reinforced concrete deformation.

## **„Prognoza numeryczna ciągliwości fibrobetonu przy dynamicznym rozciąganiu”**

**Autor: mgr inż. Robert Osiński**  
**Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Bąk**

Słowa kluczowe: fibrobeton, ciągliwość, metoda fal naprężeń, rozłupywanie kostek, rozciąganie ósemek typu Michaelisa.

W dotychczasowych pracach dostępnych w literaturze koncentrowano się na prezentacji i interpretacji wyników badań doświadczalnych betonu zbrojonego włóknami stalowymi według procedur normowych. Dotyczyły one głównie wyznaczania wytrzymałości ekwiwalentnej i rezydualnej, które wykazywał fibrobeton w strefie rozciąganej tzw. beleczek w badaniach na zginanie. Przy ściśle ustalonych procesach obciążania statycznego, wywoływanego prasami o sterowaniu kinematycznym uzyskiwano wyraźny zanik efektów kruchego pęknięcia betonu w strefie rozciąganej. Stwierdzano kontynuinalną reakcję deformacyjną badanych elementów, określaną jako ciągliwość, ograniczoną ugięciem beleczki.

W rozprawie podjęto próbę modelowania współdziałania fibrów stalowych z zakotwieniami haczykowatymi z betonem wyteżonym przy dominacji rozciągania, pod działaniem obciążeń narastających z dużą prędkością, a więc bez sterowania kinematycznego. Za sytuacje charakteryzujące się dominacją rozciągania wybrano rozłupywanie kostki sześcienniej oraz bezpośrednie rozciąganie próbek o kształcie zbliżonym do ósemek Michaelisa.

Prognozy numeryczne zachowania się fibrobetonu opracowano na podstawie metody fal naprężeń zaproponowanej przez Z. Szcześniaka. W metodzie jest wykorzystywana dyskretyzacja różnicowa, budowana z kroku na krok czasowy do opisu propagacji fal dylatacyjnych i dystorsyjnych, przy wykorzystaniu jawnego schematu całkowania równań względem czasu. Do algorytmu wprowadzono modyfikacje polegające na losowym określeniu niejednorodności betonu i losowego rozkładu przestrzennego fibrów. Założono, że fibry o długości 50mm, średnicy 0,7mm i wytrzymałości 1352MPa przenoszą tylko siły wzdłużne. Siły te są wzbudzane przemieszczeniami tych elementów dyskretnej matrycy betonowej, w których znajdują się zakotwienia każdego z fibrów. Zaniedbano przyczepność fibrów do matrycy betonowej. Doświadczalnie ustalono, że zdolności odkształceniowe fibrów określa odkształcenie na zerwanie 3,5%. W opisie zachowania betonu rozciąganego wykorzystano model „rysy rozmytej” z określeniem jej granicznych odkształceń jako odpowiednią krotność odkształcenia granicznego betonu przy jednoosiowym rozciąganiu  $\varepsilon_{ct}^{gr} = 0,01\%$ . W ewolucji „rysy rozmytej” przewidziano możliwe

odciążenia sprężyste według prawa zdegradowanej sprężystości. Po przekroczeniu odkształceń granicznych „rysy rozmyte” zanika lokalny opór matrycy betonowej na kierunku prostopadłym do rysy. Globalny model różnicowy zmniejsza stopień dyskretyzacji. Z analiz numerycznych wyprowadzono wnioski, że możliwe było wyznaczenie rysy o szerokości właściwej skali mikrostruktury według koncepcji mechaniki pęknięcia, a nie makrostruktury. Rysa rozłupująca kostkę sześcienną osiągała maksymalne szerokości rzędu mikrometrów i analizowany model dyskretny ulegał zniszczeniu wywołowanemu efektami docisku quasi liniowego obciążenia dynamicznego, właściwego metodzie brazylijskiej. Wyniki wskazywały, że przy takim sposobie obciążania dynamicznego nie ujawnia się mechanizm ciągłego zniszczenia fibrobetonu. W reakcji deformacyjnej dostrzegany był wyraźny podział na stadia:

- 1) do wyczerpania założonych zdolności odkształceniowych matrycy betonowej według „rys rozmytej”,
- 2) reakcji samych włókien wyłożonych na rozciąganie w powstałej „rysie rozmytej”.

Konsekwencją takiej reakcji jest fakt, że naprężenia w włókienach przy odkształceniach w betonie właściwym jego zdolnościom odkształceniowym są niewielkie i silnie zależą od ich usytuowania. Natomiast włókna ulegały zerwaniu przy wielokrotnie większym odkształceniu.

Prognozy numeryczne przeprowadzone w celu wyznaczenia oporu fibrobetonu na bezpośrednie rozciąganie próbki o skończonej długości wymagały modyfikacji algorytmu. W tym przypadku rysy poprzeczne pojawiały się na długości próbki o długości 0,14m, ewoluując w jej przekrojach poprzecznych 0,07x0,07m. Konieczne było śledzenie wyężenia tych przekrojów do rozstrzygnięcia, w którym z nich wystąpi rysa niszcząca. Analizy numeryczne wykazały globalne deformacje rozciąganej próbki na poziomie makrostruktury – dziesiąte części mm. Ciągłość oszacowano bezpiecznie jako krotność odkształcenia granicznego betonu  $\varepsilon_{ct}^{gr} = 0,01\%$ , w zależności od stopnia uzbrojenia betonu włókienami. I w tym przypadku stwierdzono dwu stadiowość reakcji fibrobetonu na rozciąganie, z silnym załamaniem się wytrzymałości na granicy tych stadiów.

Z wyników numerycznych obydwu sposobów analiz badania oporu fibrobetonu na rozciąganie trudno formułować oceny w kategoriach wytrzymałości ekwiwalentnej i rezydualnej. Prognozy numeryczne potwierdziły zwiększone właściwości deformacyjne fibrobetonu.