

# **Badania doświadczalne i numeryczne belek betonowych zbrojonych płaskimi siatkami o kratownicowym układzie prętów**

Autor: mgr inż. Jacek Zychowicz  
Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Stolarski

Podstawowym celem pracy były badania doświadczalne belek żelbetowych zbrojonych hiperstatycznymi układami kratownicowych siatek z prętów stalowych oraz opracowanie metody numerycznej analizy elementów ze zbrojeniem kratownicowym.

W toku realizacji planu badawczego pracy wykonano badania doświadczalne belek żelbetowych z zastosowaniem kratownicowego układu zbrojenia poprzecznego oraz belek zbrojonych tradycyjnie strzemionami przy założeniu jednakowego układu prętów podłużnych w obu rodzajach belek.

Przeprowadzono badania wstępne na modelach belki ze zbrojeniem kratownicowym o rozpiętości 1.0 m i przekroju poprzecznym 0.1 m × 0.15 m. Uzyskano większą nośność, mniejsze ugięcie przy równoważnej sile, bardziej równomierne zarysowanie o mniejszych szerokościach rys oraz większą „ciągliwość” elementu przy zniszczeniu niż w elementach zbrojonych tradycyjnie. Wyniki wstępnych badań doświadczalnych były inspiracją do zgłoszenia wniosku patentowego pt. „System płaskich siatek o kratownicowym układzie prętów do zbrojenia betonu” i uzyskania patentu w 2016 r.

Po analizie badań wstępnych wykonano badania większych belek, zbliżonych skalą do stosowanych w budownictwie. Wykonano badania nośności i ugięć oraz przeprowadzono analizę rozkładu zarysowania belek zginanych ze zbrojeniem tradycyjnym oraz badania belek zginanych z zastosowaniem kratownicowego układu zbrojenia o różnym stopniu zbrojenia podłużnego 2 x 0.27 % oraz 2 x 1.07 %. Wykonano analizę porównawczą badań doświadczalnych. Wyniki badań belek potwierdziły tezę o wyższym stopniu jednorodności żelbetowych elementów zginanych zbrojonych kratownicowym układem zbrojenia. Belki charakteryzowały się bardziej równomiernym rozkładem naprężeń, równomiernym i rozproszonym zarysowaniem o mniejszych szerokościach rys oraz wyższą nośnością i mniejszym ugięciem przy równoważnym obciążeniu w porównaniu z elementami zbrojonymi zbrojeniem tradycyjnym. Dla belek o niskim stopniu zbrojenia podłużnego (2 × 0.27 %), zbrojenie kratownicowe zapewniło zwiększenie nośności o 95 %. Dla belek wyższym stopniu zbrojenia podłużnego (2 × 1.07 %), zbrojenie kratownicowe umożliwiło zwiększenie nośności o 12 % w stosunku do nośności belki zbrojonej tradycyjnie. Wykazano,

że wpływ trwałego skratowania poprzecznego prętów na nośność belek jest większy przy mniejszym stopniu zbrojenia podłużnego. Analizie poddano również ugięcia belek. Wyniki badań ugięcia przy równym obciążeniu wskazały na niższe wartości ugięcia dla belek zbrojonych kratownicowo w stosunku do belek zbrojonych tradycyjnie.

Opracowano nową metodę numerycznej analizy obliczeniowej elementów ze zbrojeniem poprzecznym w postaci siatek kratownicowych z wykorzystaniem kratowniczowego modelu belki i zastępczego modelu materiału. Zastąpiono kompozycję dwóch tradycyjnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych: betonu i stali zbrojeniowej poprzez modelową kratownicę o cechach geometrycznych zgodnych z kratownicowym układem zbrojenia, której pręty są zbudowane z jednorodnego materiału zastępczego. Opracowano model jednorodnego materiału zastępczego prętów kratownicy stanowiącego modyfikację właściwości stali zbrojeniowej przez uwzględnienie naprężenia przyczepności w betonie współpracującym na obwodzie pręta zbrojeniowego. Przeprowadzono obliczenia numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania systemowego metody elementów skończonych Abaqus, w którym wprowadzono wyznaczone parametry modeli obliczeniowych – kratownicy i materiału zastępczego.

Wyniki analizy numerycznej porównano z wynikami badań doświadczalnych belek zbrojonych kratownicowo. Uzyskano zadowalającą zgodność nośności modelu numerycznego z nośnością belek badanych doświadczalnie. Wykazano zależność nośności modelu obliczeniowego od sposobu obciążenia. Stwierdzono, że obliczeniowa nośność modelu rośnie przy rozłożeniu obciążenia na większą liczbę węzłów. Rozważano różne sposoby podparcia belek. Wykazano zależność ugięcia belek od podatności przesuwnej węzłów podporowych. Ugięcia maksymalne modelu obliczeniowego rosną ze wzrostem podatności podpór. Ze wzrostem podatności podpór maleje sztywność modelowej kratownicy. Wzrost ugięcia ze wzrostem podatności podpór uzyskano zarówno dla małego jak i wyższego stopnia zbrojenia podłużnego.

Celowe jest prowadzenie dalszych badań doświadczalnych elementów żelbetowych z zastosowaniem zbrojenia kratowniczowego w innych rodzajach elementów, np. w elementach mimośrodowo ściskanych, takich jak słupy z dużym i małym mimośrodem oraz w elementach płytowych. Planowane są badania elementów zginanych zbrojonych kratownicowo z zastosowaniem innego niż masowy równoważnik zbrojenia poprzecznego oraz badania z zastosowaniem większego spektrum stopni zbrojenia podłużnego.

# **Experimental and numerical analysis of concrete beams reinforced with plane mesh of truss arrangement of bars**

Author: Jacek Zychowicz,  
M. Sc. Eng. Supervisor: Prof. Adam Stolarski, Ph.D., D.Sc

The main goal of the work was the experimental analysis of concrete beams reinforced with hyperstatic truss systems made of steel rods and the development of the method of numerical analysis of elements with truss reinforcement.

In the course of the research work plan, experimental tests of reinforced concrete beams with the use of truss transverse reinforcement system and beams reinforced traditionally with stirrups with the assumption of the same arrangement of longitudinal bars in both beam types were made.

Initial tests were carried out on beam models with truss reinforcement with a span of 1.0 m and a cross-section of 0.1 m × 0.15 m. Higher load capacity, less deflection with equivalent force, more even scratches with smaller scratches widths and greater "ductility" of the element in destruction than in traditionally reinforced elements were obtained. The results of preliminary experimental studies were an inspiration to filing a patent application entitled "System of flat gratings with truss system for concrete reinforcement" and obtaining a patent in 2016.

After the analysis of preliminary tests, larger beams were tested, similar in scale to those used in construction. Load capacity and deflection tests were carried out and analysis of the scratch distribution of bending beams with traditional reinforcement and bending beams using a truss reinforcement system with various levels of longitudinal reinforcement  $2 \times 0.27\%$  and  $2 \times 1.07\%$  were performed. A comparative analysis of experimental studies was made. The beam test results confirmed the thesis of a higher degree of homogeneity of reinforced concrete bending elements reinforced with a truss reinforcement system. The beams were characterized by a more uniform distribution of stresses, uniform and dispersed scratches with smaller crack widths and a higher bearing capacity and less deflection at equivalent load compared to reinforced elements with traditional reinforcement. For beams with a low degree of longitudinal reinforcement ( $2 \times 0.27\%$ ), truss reinforcement provided an increase in the load capacity by 95%. For beams with a higher degree of longitudinal reinforcement ( $2 \times 1.07\%$ ), truss reinforcement made it possible to increase the load capacity by 12% in relation to the load-bearing capacity of a traditionally reinforced beam. It was

shown that the effect of permanent cross-bending of rods on the load-bearing capacity of beams is larger with a smaller degree of longitudinal reinforcement. Beam deflections were also analyzed. The results of deflection tests at equal load indicated lower deflection values for truss reinforced beams in relation to traditionally reinforced beams.

A new method of numerical computational analysis of elements with transverse reinforcement using a truss beam model and a substitute material model was developed. The composition of two traditionally used construction materials has been replaced: concrete and reinforcing steel by a truss model with geometrical features consistent with a truss reinforcement system where rods are made of a homogeneous substitute material. A model of a homogeneous substitute material of truss bars was developed, which is a modification of the reinforcing steel's properties by taking into account the adhesion stress in the concrete on the circumference of the reinforcing bar. Numerical calculations were carried out using the Abaqus system software of the finite element method, in which the determined parameters of the calculation models - truss and substitute material - were introduced.

The results of the numerical analysis were compared with the results of experimental tests of truss-reinforced beams. Satisfactory correspondence between the load bearing capacity of the numerical model and the load capacity of the beams tested experimentally was obtained. The relationship between the load capacity of the calculation model and the load method was shown. It was found that the computational load capacity of the model increases when the load is distributed over a larger number of nodes. Various ways of supporting the beams were considered. The relationship between deflection of beams and sliding ability of support nodes has been demonstrated. The maximum deflections of the calculation model increase with the increase in susceptibility of supports. With increasing susceptibility of supports, the stiffness of the model grid decreases. The increase of deflection with the increase of susceptibility of supports was obtained for both small and higher degree of longitudinal reinforcement.

It is advisable to conduct further experimental research on reinforced concrete elements using truss reinforcement in other types of elements, e.g. in eccentrically compressed elements, such as columns with large and small eccentricities and in plate elements. It is planned to study truss-reinforced bending elements with the use of a transverse reinforcement other than mass equivalent, and testing using a larger spectrum of longitudinal reinforcement.