

## **Streszczenie rozprawy doktorskiej**

# **DOŚWIADCZALNA I NUMERYCZNA ANALIZA ZACHOWANIA BELEK KABLOBETONOWYCH O ZMIENNYM MIMOŚRODZIE SPRĘŻENIA OBCIĄŻONYCH STATYCZNIE I DYNAMICZNE**

Autor: mgr inż. Anna Jancy

Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Stolarski

Tematyka rozprawy dotyczy opracowania nowej, kompleksowej metody modelowania numerycznego kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodku sprężenia z dokładną kalibracją modelu numerycznego względem badań doświadczalnych. Na podstawie modeli numerycznych dokonano symulacji statycznego zachowania belek we wszystkich fazach pracy do zniszczenia włącznie oraz prognozowania dynamicznej reakcji belek.

W rozprawie przedstawiono założenia projektowe realizacji badań doświadczalnych dwóch belek kablobetonowych ze zmiennym mimośrodem sprężenia obciążonych statycznie, opis harmonogramu realizacji badań doświadczalnych, wyników badań próbek materiałowych betonu, stali sprężającej oraz stali zbrojeniowej oraz opis wyników zależności siła obciążająca – przemieszczenie belek. Zwrócono uwagę na przebieg charakteru zniszczenia oraz zaobserwowane imperfekcje podczas badań doświadczalnych.

Opisano geometrię modeli numerycznych belek dwóch belek kablobetonowych ze zmiennym mimośrodem sprężenia oraz sposób ich podziału na elementy skończone w oprogramowaniu Hypermesh. W opisie doboru rozmiaru siatki elementów skończonych przedstawiono różnice podziału każdej z belek z uwagi na zróżnicowane mimośrodki sprężenia, bez wykorzystywania warunków symetrii układu. Każdy z elementów składowych belki kablobetonowej został zdefiniowany przy użyciu oddzielnych bryłowych elementów skończonych, bez sztucznego zwiększania sztywności belki poprzez lokalne nakładanie sztywności betonu oraz stali sprężającej i stali zbrojeniowej.

Przedstawiono opis wartości przyjętych parametrów modeli materiałowych stali sprężającej, elementów stalowych i betonu, w ścisłej korelacji z uzyskanymi wynikami statycznych badań doświadczalnych. Uwzględniono różne parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe oddzielnie dla statycznych oraz dynamicznych modeli materiałowych. Dla oddziaływań statycznych, model konstytutywny stali sprężającej jest zdefiniowany przez właściwości materiału w fazach sprężystej oraz plastycznej. Model został przedstawiony w formie cztero-liniowego wykresu zależności naprężenie – odkształcenie dostosowanego

do otrzymanej krzywej eksperymentalnej naprężenie – odkształcenie. Dla elementów stalowych, tj. prętów zbrojeniowych oraz zakotwień przyjęto model sprężysto – plastyczny z liniowym wzmocnieniem. Opisano parametry modelu materiałowego betonu wykorzystując model Concrete Damage Plasticity (CDP) z biblioteki oprogramowania Abaqus. W przyjętym modelu betonu uwzględniono wpływ efektów reologicznych - pełzania. Opisano przyjęte prawo ewolucji naprężeń w funkcji odkształcenia betonu. Wykorzystano model sprężysto-plastyczny z nieliniowym wzmocnieniem, liniowym osłabieniem i stałym naprężeniem resztkowym dla ściskania, natomiast dla rozciągania przyjęto model sprężysty z liniowym osłabieniem oraz stałym naprężeniem resztkowym. Opisano także proponowaną modyfikację parametru zniszczenia w modelu CDP uwzględniającą zniszczenie przy ściskaniu rozpoczynające się już od fazy nieliniowego wzmocnienia betonu. Przy oddziaływaniach dynamicznych, zastosowano modyfikacje modelu betonu z wykorzystaniem stałych wartości współczynników dynamicznych wzmocnienia wytrzymałości betonu na ściskanie. W modelowaniu elementów stalowych wykorzystano model materiałowy Johnsona-Cooka w celu określenia wzmocnienia dynamicznego granicy plastyczności stali ze względu na prędkość odkształcenia.

Do numerycznych analiz belek kablobetonowych zarówno dla oddziaływań statycznych, jak i dynamicznych wykorzystano jawną procedurę obliczeniową do rozwiązania równania równowagi dynamicznej za pomocą procedury Abaqus/Explicit. Szczegółowo opisano wpływ prędkości fali dylatacyjnej, krytycznego kroku czasowego i parametru tłumienia masowego na całkowite tłumienie oscylacji belek w rozwiązaniu statycznym oraz ograniczone tłumienie oscylacji belek w rozwiązaniu dynamicznym. W pracy opisano podejście do definiowania obciążenia w modelach numerycznych zarówno w zagadnieniu statycznym (z wykorzystaniem gładkich krzywych przyrastania amplitud obciążenia), jak i dynamicznym dla oddziaływania impulsu siły stałego oraz zmiennego w czasie.

Przedstawiono wyniki statycznych analiz numerycznych wraz z analizą porównawczą do zależności siła - przemieszczenie otrzymanej na podstawie badań doświadczalnych. Szczegółowo opisano przebieg zniszczenia betonu w modelach numerycznych w porównaniu do wyników badań doświadczalnych w zależności od zastosowanego mimośrodowo sprężenia belek. W pracy zawarto dyskusję wpływu imperfekcji na wyniki analiz numerycznych.

Opisano wyniki analiz dynamicznych obu belek pod oddziaływaniem obciążenia impulsem siły stałym oraz zmiennym w czasie z uwzględnieniem parametru tłumienia masowego. Przeprowadzono analizę porównawczą wpływu wartości zwiększonej wytrzymałości betonu na ściskanie z wykorzystaniem współczynnika wzmocnienia wytrzymałości dynamicznej na charakterystykę przebiegu przemieszczenia w czasie

dla obu rodzajów oddziaływań impulsowych. Zawarto szczegółowy opis przebiegu zniszczenia belek podczas oddziaływania obciążenia krótkotrwałym impulsem siły zmiennym w czasie. Została także przedstawiona analiza porównawcza wpływu mimośrodowego sprężenia w belkach na wyniki zmienności przemieszczenia w czasie.

Doświadczalnie oraz numerycznie potwierdzono zróżnicowany wpływ mimośrodowego sprężenia belek kablobetonowych na ich nośność, przemieszczenie i rozkład obszarów zniszczenia betonu przy oddziaływaniach statycznych. Opracowanie w pełni trójwymiarowego modelu numerycznego całej belki kablobetonowej bez wykorzystywania warunków symetrii układu, umożliwiło kontrolę poprawności zachowania modelu numerycznego belki, kontrolę stabilności rozwiązania dynamicznego oraz obserwację wpływu niesymetrycznie indukowanych imperfekcji na zachowanie modelu belki. Wykorzystanie oddzielnych, bryłowych elementów skończonych do modelowania numerycznego każdego z elementów składowych belek kablobetonowych przy odpowiednim zdefiniowaniu warunków współpracy pomiędzy nimi, umożliwiło symulację zniszczenia jakościowo zbliżoną do wyników badań doświadczalnych. Stwierdzono, że jawna metoda rozwiązania równania równowagi dynamicznej przy zastosowaniu procedury Abaqus/Explicit jest efektywną metodą rozwiązania zagadnienia numerycznego dla belek kablobetonowych ze zróżnicowaną, krzywoliniową trasą kabla sprężającego pod obciążeniem statycznym i dynamicznym.

Modele numeryczne belek kablobetonowych obciążonych dynamicznie wykazały pewne specyficzne różnice wpływu mimośrodowego sprężenia na zmienność przemieszczenia w czasie, wartość przemieszczenia trwałego oraz nośność dynamiczną definiowaną jako największą początkową wartość obciążenia impulsowego, dla której można określić trwałe przemieszczenie belki w procesie ruchu, w zależności od rodzaju oddziaływania impulsem siły. W prognozie numerycznej oddziaływań impulsu siły stałego w czasie, belki kablobetonowe, niezależnie od przyjętego mimośrodowego sprężenia, wykazały mniejszą nośność w stosunku do nośności osiągniętej w doświadczalnych badaniach statycznych. Przy oddziaływaniu krótkotrwałego impulsu siły zmiennego w czasie, nośność dynamiczna w modelach numerycznych belek kablobetonowych została osiągnięta przy początkowej wartości obciążenia impulsowego znacznie przekraczającej ich nośność statyczną.

Przedstawiono perspektywy dalszych badań, które obejmują analizę imperfekcji wykonawczych belek kablobetonowych, weryfikację zachowania modelu numerycznego przy innych mechanizmach zniszczenia belki kablobetonowej, wprowadzenie parametru zniszczenia w modelu materiałowym stali, wprowadzenie własnego modelu konstytutywnego betonu oraz wykonanie badań doświadczalnych belek kablobetonowych pod działaniem krótkotrwałego impulsu siły zmiennego w czasie.

## **Summary of the doctoral dissertation**

# **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF POST-TENSIONED CONCRETE BEAMS WITH VARIABLE PRESTRESSING ECCENTRICITY UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS**

Author: mgr inż. Anna Jancy

Promoter: prof. dr hab. inż. Adam Stolarski

The subject of the dissertation concerns the development of a new, comprehensive method of numerical modelling of post-tensioned concrete beams with variable prestressing eccentricity with precise calibration of the numerical model in relation to experimental tests. On the basis of numerical models, the static behaviour of the beams was simulated in all phases until post-critical state was reached, and dynamic reaction of the beams was predicted.

The thesis presents design assumptions of two post-tensioned concrete beams with variable prestressing eccentricity experimental tests under static loading, a description of the experimental test schedule, tests results of the material samples for concrete, prestressing steel and reinforcing steel as well as description of the beam results for loading force – displacement relationship. Attention was paid to the concrete damage process and observed imperfections noticed during experimental tests.

The geometry of numerical models for two post-tensioned concrete beams with variable prestressing eccentricity and division into finite elements made in the Hypermesh program was described. In the description of the size selection of the finite element mesh, the differences in the division of each beam due to the different prestressing eccentricities are presented, without using the symmetry conditions of the system. Each of the post-tensioned concrete beam components was defined using separate solid finite elements, without artificially increasing the stiffness of the beam due to locally overlapping stiffnesses of concrete, prestressing steel and reinforcing steel.

A description of the parameter values for the material models of prestressing steel, steel elements and concrete in close correlation with the results of static experimental tests has been presented. Various strength and deformation parameters were taken into account separately for static and dynamic material models. For static actions, the constitutive model of the prestressing steel is defined by the material properties in the elastic and plastic phases. The model was presented in the form of a four-line stress-strain graph adapted to the obtained experimental stress-strain relationship. For steel elements, i.e. reinforcing bars and anchorages, an elastic-

plastic model with linear hardening was adopted. The parameters of the material model of concrete were described using the Concrete Damage Plasticity (CDP) model from the Abaqus software library. In the adopted concrete model, the influence of rheological effects - creep was taken into account. The adopted law of stress evolution as a function of concrete deformation was described. An elastic-plastic model with non-linear hardening, linear softening, and constant residual stress for was used compression, while an elastic material model with linear softening, and constant residual stress was adopted for tension. The proposed modification of the damage parameter in the CDP model is also described, taking into account the compression damage starting from the phase of non-linear concrete hardening. In the case of dynamic actions, modifications of the concrete model were applied, using constant values of dynamic strengthening coefficients of concrete compressive strength. In the modeling of the steel elements, the Johnson-Cook material model was used to determine the dynamic yield limit of the steel due to strain rate.

For numerical analyses of post-tensioned concrete beams for both static and dynamic actions, an explicit calculation procedure was used to solve the dynamic equilibrium equation using the Abaqus/Explicit procedure. The influence of the dilation wave velocity, the critical time step and the mass damping parameter on the total damping of beam oscillations in a static solution and the limited damping of beam oscillations in a dynamic solution, are described in detail. In the thesis was also described the approach to load defining in numerical models both in the static problem (using smooth load amplitude increment curves) and in the dynamic problem for the impact of a constant and time-varying force impulse.

The results of static numerical analyses are presented together with a comparative analysis to the force – displacement relationship obtained on the basis of experimental tests. The concrete damage process in comparison to the results of experimental tests was described in detail depending on prestressing eccentricities of the beams. The course of concrete damage in numerical models was described in detail in comparison to the results of experimental tests, depending on the applied eccentricity of prestressing the beams. The dissertation also includes a discussion of the influence of imperfections on the results of numerical analyses.

The results of dynamic analyses of both beams under the influence of a load with a constant and a time-varying force impulse, taking into account the mass damping parameter, are described. A comparative analysis of the influence of the value of the increased compressive strength of concrete with the use of the dynamic strength enhancement coefficient on the characteristics of the displacement course in time for both types of impulse actions was carried out. A detailed description of the damage process of the beams under the influence of a short-term time-varying force impulse is included. A comparative analysis of the influence of the

prestressing eccentricity in the beams on the results of the displacement variability over time was also presented.

The varied influence of the prestressing eccentricity of post-tensioned concrete beams on their load capacity, displacement and concrete damage distribution regions under static loading was confirmed experimentally and numerically. The development of a fully three-dimensional numerical model of the entire post-tensioned concrete beam without using the symmetry conditions of the system made it possible to control the correctness behaviour of the numerical model of the beam, control the stability of the dynamic solution and observe the impact of asymmetrically induced imperfections on the behaviour of the beam model. The use of separate, solid finite elements for numerical modeling of each components of post-tensioned concrete beams, with appropriate definition of the interaction conditions between them, made it possible to simulate the damage qualitatively similar to the results of experimental tests. It was found that the explicit method of solving the dynamic equilibrium equation using Abaqus/Explicit procedure is an effective method of solving the numerical problem for post-tensioned concrete beams with a varied, curvilinear prestressing tendon route under static and dynamic loads.

Depending on the type of impulse force action, numerical models of dynamically loaded post-tensioned concrete beams showed some specific differences in the influence of the prestressing eccentricity on the variability of the displacement in time, the value of the permanent displacement, and the dynamic load capacity defined as the largest initial value of the impulse load, for which permanent displacements of the beam in the motion process can be determined. In the numerical prognosis of the impact of the constant force impulse over time, the post-tensioned concrete beams, showed a lower load capacity in relation to the load capacity obtained in experimental static tests, regardless of the assumed prestressing eccentricity. Under the influence of a short-term time-varying force impulse, the dynamic load capacity in the numerical models of post-tensioned concrete beams was reached at the initial value of the impulse load significantly exceeding their static load capacity.

Prospects for further research are presented, which include the analysis of imperfections in the execution of post-tensioned concrete beams, verification of the numerical model behavior with other failure mechanisms of the post-tensioned concrete beam, introduction of the damage parameter in the steel material model, introduction of the own constitutive model of concrete, and carrying out experimental tests of post-tensioned concrete beams under the action of a short-term time-varying force impulse.