

WPLYW PARAMETRÓW STYKU NA PRACĘ STATYCZNĄ ŻELBETOWYCH BELEK ZESPOLONYCH O PRZEKROJU TEOWYM

Streszczenie

Przedmiotem rozprawy są zagadnienia pracy statycznej żelbetowych elementów zespolonych w strefach przypodporowych oraz w styku pod obciążeniem doraźnym. Skoncentrowano się w szczególności na elementach belkowych o przekroju teowym analizując wpływ położenia styku, uogólnionej przyczepności oraz zbrojenia zszywającego na ich pracę statyczną. Rozprawa ma charakter pracy teoretyczno-doświadczalnej. Do jej realizacji wykorzystano badania doświadczalne przeprowadzone w skali półtechnicznej, metody analityczne mechaniki konstrukcji oraz analizy numeryczne.

W ramach rozprawy doktorskiej przeanalizowano stan wiedzy w zakresie żelbetowych konstrukcji zespolonych. Opisano i usystematyzowano zjawiska występujące w styku wpływające na jego pracę statyczną, najczęściej stosowane w praktyce modele obliczeniowe nośności styku, konstrukcje zespolone o przekroju teowym z punktu widzenia praktyki budowlanej oraz dokonano przeglądu dotychczasowych badań nad przedmiotowymi elementami. Podkreślono, że brak jest badań i analiz elementów zespolonych o przekroju teowym, w szczególności uwzględniających postać zarysowania styku w strefie przypodporowej oraz, że poszukiwane są charakterystyki sztywnościowe wpływające na zmianę rozkładu sił wewnętrznych i ogólną ich nośność. Zwrócono również uwagę na brak precyzyjnych danych dotyczących parametrów styku przyjmowanych do obliczeń oraz jego modelowania numerycznego, zwłaszcza zagadnień kontaktu oraz kohezji.

Badania i analizy własne, zostały zaprogramowane w oparciu o stwierdzone braki. Za punkt wyjścia przyjęto pracę Halickiej (*Halicka 2007*). Za cel postawiono uzupełnienie i poszerzenie podejścia autorki a w szczególności stwierdzenie, czy założenia i wnioski sformułowane dla elementów zespolonych o przekroju prostokątnym są ważne dla elementów o przekroju teowym, a więc czy można je uogólnić na wszystkie belkowe elementy zespolone.

Przebadano modelowe belki z różnie usytuowanym i różnie ukształtowanym stykiem. Przyjęto teowy przekrój poprzeczny, uwzględniając współpracę płyty z żebrzem w przenoszeniu obciążeń. Zastosowano trzy warianty lokalizacji styku (licząc od spodu belki): $\frac{3}{4}$ wysokości (pomiędzy półką a środkiem), $\frac{1}{2}$ wysokości i $\frac{1}{4}$ wysokości oraz trzy warianty ukształtowania styku: z przyczepnością i zbrojeniem, z przyczepnością bez zbrojenia oraz zbrojone ze zlikwidowaną przyczepnością. We wszystkich przypadkach badano: siłę niszczącą, siłę rysującą, ugięcie i przemieszczenie wzajemne na końcach belki, odkształcenia w zbrojeniu głównym i poprzecznym oraz inwentaryzowano zarysowanie. Wyniki posłużyły w analizach parametrycznych przeprowadzonych w oparciu o metodologię *fib Model Code 2010*. Stwierdzono wpływ geometrii przekroju poprzecznego oraz różnicy modułów sprężystości łączonych betonów na rozkład naprężeń stycznych. Ponadto, położenie i sposób kształtowania przyczepności styku wpływa na obraz zarysowania belki zespolonej i w konsekwencji jej mechanizm zniszczenia. Badania i analizy własne potwierdziły wniosek Halickiej (w stosunku do przekrojów prostokątnych), że w przypadku belki zespolonej ze zbrojeniem poprzecznym nie można oddzielnie rozpatrywać nośności styku oraz nośności na ścinanie w strefie przypodporowej. Rozpatrywana winna być nośność na ścinanie w strefach podporowych, ale w sposób pozwalający na uwzględnienie istnienia styku. W przypadku stosowania metodologii

fib Model Code 2010 stwierdzono niespójności polegające na różnym podejściu do obliczania składnika przyczepności w stykach sztywnych i niesztywnych oraz niekonsekwentne stosowanie wytrzymałości charakterystycznych i obliczeniowych. Głównym problemem w analizach parametrycznych było obliczenie naprężeń rysujących styk. Zastosowanie modeli normowych wymagało określenia wartości odpowiednich współczynników (parametrów styku) oraz poznania stanu naprężeniowego panującego w styku w chwili zarysowania, a nie w chwili osiągnięcia nośności styku.

Pomocą w rozwiązaniu w/w problemów okazała się analiza numeryczna wykonana w oprogramowaniu ABAQUS. Umożliwiła ona prześledzenie pracy modelu odwzorowującego badane laboratoryjnie belki zespolone, uwzględniającego niezbędne i szczególnie interesujące parametry styku na każdym kroku obciążania aż do zniszczenia włącznie. W analizie opisano przyjęte hipotezy wytrzymałościowe materiałów, założenia i budowę modelu oraz uzyskane wyniki, koncentrując się na szukanych parametrach styku. Uwzględniono różnego typu nieliniowości związane z materiałami, geometrią, kontaktami oraz oddziaływaniem kohezyjnym w styku łączonych powierzchni. Model wykalibrowano na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i uzyskano brakujące dane pozwalające w pełni opisać pracę styku w złożonym stanie naprężeń. Stwierdzono, że największy wpływ na odpowiedź modelu kształtowanego z przyczepnością ma przemieszczenie w styku δ a jego wartość powinna być przyjmowana w przedziale 0,05÷0,1 mm jako stały parametr materiałowy. Naprężenia przyczepności t^o oraz współczynnik tarcia μ również mają znaczący wpływ na odpowiedź modelu. Ich właściwy dobór prowadzi do zbieżności wyników analizy numerycznej i badań laboratoryjnych. Analizy numeryczne pozwoliły wyodrębnić przedział wielkości składnika adhezji w nośności styku w złożonym stanie naprężeń wynoszący ok. 70-90% wytrzymałości na rozciąganie f_{ctm} słabszego z łączonych betonów oraz określić charakterystyki podatnościowe styków (sztywnych i podatnych) w różnych fazach pracy, przed zarysowaniem, z lokalnym zarysowaniem oraz w chwili występowania maksymalnych naprężeń stycznych.

Uzyskane w trakcie badań laboratoryjnych i analiz numerycznych dane, w oparciu o sposób obliczania nośności styku przyjęty w *fib Model Code 2010* stanowiły podstawę do opracowania zaleceń do projektowania żelbetowych belek zespolonych. W oparciu o klasyfikację mechanizmów zniszczenia (*Halicka 2007*) i relacje między siłami powodującymi zarysowanie strefy podporowej a siłami rysującymi styk stworzono algorytm obliczania nośności stref przypodporowych belek zespolonych. Weryfikacja algorytmu obliczeniowego na wynikach badań własnych umożliwiła określenie wartości współczynników potrzebnych do wyznaczenia naprężeń rysujących styk o powierzchni szorstkiej. Na tej podstawie zaproponowano wartości uogólnione, które mogą być wykorzystywane w projektowaniu żelbetowych belek zespolonych.

INFLUENCE OF SURFACE PARAMETERS ON STATIC PERFORMANCE OF CONCRETE COMPOSITE T-SHAPED BEAMS

Summary

The performance of the support zone and interface of the concrete composite elements under the short-term static load is the subject of the thesis. The influence of the interface location, the generalized adhesion and the joining stirrups of the t-shaped beams are taken under consideration. Thesis has a theoretical and an experimental character. Laboratory tests are carried out in semi-technical scale, mechanical structure analyses and numerical analyses are used.

The current state of knowledge of the concrete composite structures is analyzed. The phenomena in the interface influencing the static performance of composite elements are identified and described. The models of the interface load capacity calculation most often used in the standards, the concrete composite t-shaped constructions according to engineering point of view and the laboratory examination of such elements are presented. The lack of tests and analysis of the t-shaped elements, especially, including the failure mechanism in the support zone is underlined. Stiffness characteristics of the interfaces are searched for. Also, the lack of precise interface parameters data, which are taking into consideration the calculation and the numerical analyses including contact and cohesive behavior in particular are noted.

On the basis of the lacks mentioned and the Halicka's previous works (*Halicka 2007*) the laboratory tests are carried out. The purpose of the investigations is to complete and extrapolate the author's conclusion corresponding to the rectangular cross section composite element to the t-shaped elements, therefore to the all concrete composite beams.

The composite beams with the variously arranged and located interface are tested. Geometry of the t-shaped cross section are adopted, assuming the cooperation of the flange and the web in load carrying. Three interface locations: in the distance of $\frac{3}{4}$ height (between flange and web), $\frac{1}{2}$ height and $\frac{1}{4}$ height from the bottom edge and three variants of interface preparation: with adhesion and joining stirrups, with adhesion and without joining stirrups and reinforced with broken adhesion are used. Digitized parameters are: ultimate load, cracking load, deflection and components displacement, strain of the reinforcement and the crack pattern. On the basis of the results and the *fib Model Code 2010* methodology, the parametric study is carried out. The influence of cross section geometry and the difference of modulus of elasticity of concrete parts on tangential stress distribution are stated. What is more, the influence of the interface location and preparation on the crack pattern and failure mechanism are observed. Finally, by the parametric analyses and laboratory tests, the Halicka's conclusion (relate to rectangular sections) stating that the interface resistance and the shear resistance of the support zone cannot be consider separately, in case of the composite beam with transverse reinforcement is confirmed. The shear resistance of the support zone including the interface existence should be considered. As the result of the *fib Model Code 2010* methodology analysis, the inconsistencies of the adhesion component calculation and characteristic and design values of strengths using in standards formulas are noticed. The main problem in the parametric analyses is to calculate the value of stress causing the interface cracking. Utilization of the standard model requires knowledge of the interface parameters data and the stress conditions corresponding to the interface crack, not to the moment of the ultimate load.

The numerical analyses, performed using the ABAQUS software, constitutes the solution of the problem. Tracking of the necessary and most interesting parameters on each step of the static performance of the numerical model of the beams which were tested in laboratory is enabled. The material strength hypothesis, analysis assumptions, model build and results of simulations in terms of the interface parameters are presented. Some nonlinearity effects related with material strengths, geometry, contacts and cohesion in the interface are included. The model is calibrated on the basis of the laboratory tested beams, then the parameters looked for are read. Key impact on the response of the beam with interface adhesion model has the separation displacement at failure δ^f , which should be assumed in the scope of 0,05 - 0,1 mm, not as the constant concrete parameter. The damage initiation stress t^o and friction coefficient μ have also significant impact on the FEM model response. The appropriate selection of the values leads to the high correspondence of the numerical response to the laboratory tests results. The adhesion component in the interface resistance equal to 70-90% of concrete tensile strength f_{ctm} of the weakest concrete part, and the interface stiffness characteristics (rigid and plastic) in various stages of performance, before cracking, with local cracking and in the moment of maximum shear stress are extracted using numerical analyses.

The recommendations for design of the concrete composite beams, t-shaped in particular, are developed on the basis of the laboratory test, numerical analyses and the interface resistance calculation of the *fib Model Code 2010* methodology. Additionally, algorithm for calculation of the shear resistance in the support zone of composite beams is created, which is based on the failure mechanism classification (*Halicka 2007*) and the relations between forces causing transverse and interface cracking. The cracking shear stress necessary to calculate the interface parameters for the rough surface are verified on laboratory tests results using the author's algorithm. On the basis of these calculations the generalized values of interface parameters which can be used for the design of the concrete composite beams are proposed.