

Politechnika Świętokrzyska

Kielce, listopad 2016

Wydział Budownictwa i Architektury

Katedra Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych

Doktorant: **Mgr inż. Kamil Bacharz**

Promotor: **Dr hab. Inż. Barbara Goszczyńska, Prof. PŚk**

Tytuł rozprawy:

**„Problem nośności na ścinanie strefy przypodporowej belek żelbetowych w aspekcie badań doświadczalnych i norm”**

## STRESZCZENIE

Zagadnienie nośności na ścinanie w konstrukcjach żelbetowych, mimo iż od wielu lat jest przedmiotem badań i analiz, w dalszym ciągu pozostaje kwestią nie do końca rozpoznaną. Wyrazem tego niech będą proponowane zmiany w Eurokodzie 2 oraz stosowanie do wykonawstwa elementów żelbetowych betonów i stali o wyższej wytrzymałości. Stąd też istnieje ciągła konieczność rozszerzania i uzupełniania wiedzy dotyczącej tego zagadnienia, co ma istotne znaczenie dla praktyki inżynierskiej.

Celem pracy było porównanie wyników eksperymentalnej nośności na ścinanie belek żelbetowych z nośnością wyznaczoną na podstawie wybranych norm różniących się: przyjętym modelem obliczeniowym, podejściem do oszacowania siły poprzecznej powodującej zarysowanie strefy przypodporowej, a także uwzględnianiem w nośności na ścinanie betonu po zarysowaniu strefy przypodporowej:

- krajowych: PN-B-03264:1984– opartej na teorii nośności granicznej Boriszańskiego oraz opartych na zmodyfikowanym modelu kratownicowym Mörscha PN-B-03264:2002 i PN-EN-1992-1-1:2008 (Eurokod2) wnoszącej inne wzory empiryczne obliczenia siły poprzecznej rozdzielającej przypadek przekroju bez zbrojenia na ścinanie i ze zbrojeniem,
- zagranicznych: niemieckiej DIN-1045-1:2008– opartej na modelu kratownicowym z podanym sposobem przyjęcia kąta nachylenia krzyżulców ściskanych, amerykańskiej ACI-318(14)– uwzględniającej nośność betonu rozciąganeego po zarysowaniu oraz PreNormie– wprowadzającej zmiany dotyczące poziomów dokładności projektowania i uwzględnienia betonu rozciąganeego po zarysowaniu.

Na podstawie przeglądu literatury, zapisów normowych oraz wstępnych wyników badań laboratoryjnych sformułowano następujące tezy:

- program obciążania, schemat statyczny, kształt i wymiary przekroju belki mają wpływ na eksperymentalną nośność strefy przypodporowej belek żelbetowych,
- kąt nachylenia ściskanych krzyżulków betonowych  $\theta$ , który przyjmuje się, że w przybliżeniu odpowiada, co do wartości kątowi nachylenia rys ukośnych  $\beta_r$  powstały w strefie ścinania, mieści się w zakresie podawanym przez normy bazujące na modelu kratownicowym,
- kąt  $\theta$  jest zależny od sposobu i szerokości podparcia belki,
- proponowana w normach wartość  $\operatorname{ctg} \theta$  w zakresie 1-3 nie wynika bezpośrednio z kąta nachylenia krzyżulków ściskanych, jest raczej parametrem korygującym teoretyczne wartości nośności ścinania do wartości rzeczywistych,
- przyjęcie zbyt małych wartości  $\operatorname{ctg} \theta$  wpływa na niedoszacowanie siły rozciągającej od ścinania w zbrojeniu podłużnym, co może się przyczynić do zbyt małego przekroju prętów kotwionych na podporze i zbyt małej długości ich zakotwienia,
- całkowita nośność ścinania strefy przypodporowej belek żelbetowych w całym procesie obciążania, również po zarysowaniu, wynika zarówno z nośności zbrojenia poprzecznego, jak i nośności betonu.

Przedstawione w pracy analizy oparto na wynikach badań doświadczalnych **17** belek żelbetowych obciążanych do zniszczenia na skutek ścinania o zróżnicowanych czynnikach, które zgodnie z przeglądem literatury mają wpływ na zachowanie stref przypodporowych. Belki różniły się: wielkością i kształtem przekroju, konstrukcją zbrojenia podłużnego i poprzecznego, schematem statycznym, sposobem podparcia oraz programem obciążania, w tym zmiennego cyklicznie. W obliczeniach uwzględniano rzeczywiste charakterystyki materiałowe betonu i stali oraz wymiary przekrojów elementów wraz z rozmieszczeniem prętów zbrojeniowych określone w badaniach towarzyszących.

Wykonane badania pozwoliły na określenie obciążeń niszczących oraz obrazu zarysowania stref przypodporowych. Obraz ten wykorzystano zarówno do określenia szerokości jak i kąta nachylenia rys ukośnych  $\beta_r$ , odpowiadającemu kątowi nachylenia betonowych krzyżulków ściskanych  $\theta$ . Rejestrowany był także typ niszczenia, według klasyfikacji podanej przez prof. Godyckiego. Ze względu na przyjęte różnice pomiędzy badanymi belkami, zbiorczą analizę wszystkich elementów oparto na naprężeniach ścinających obliczonych na podstawie uzyskanych z badań niszczących sił ścinających.

Na podstawie analiz porównawczych potwierdzono opisany w literaturze znaczący wpływ zróżnicowania elementów na analizowane wartości nośności doświadczalnej. Stwierdzono także wpływ czynników różnicujących belki na uzyskiwane rzeczywiste wartości kąta nachylenia rys ukośnych  $\beta_r$ .

Podczas badań zwracano uwagę na obraz zniszczenia powodowanego dominującą siłą ścinającą i porównywano go z typami niszczenia podanymi przez prof. Godyckiego. Analizowano także

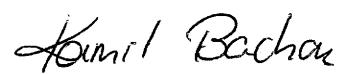
zależność pomiędzy uzyskiwanymi z badań wartościami nośności na ścinanie oraz kąta  $\theta$ , a statyczną niewyznaczalnością elementu i programem obciążenia, co nie jest uwzględniane w normach. Stwierdzono, że elementy hiperstatyczne wykazują mniejszą ność niż elementy statycznie wyznaczalne obciążane zarówno cyklicznie jak i monotonicznie. Dodatkowo inny jest ich typ niszczenia, jak i kąt nachylania krzyżulców ściskanych  $\theta$ , który zależy od sposobu podparcia belek.

Wykazano także znaczne różnice pomiędzy wartościami naprężen ścinających, odpowiadającym nośnością na ścinanie, które wyznaczone zostały na podstawie wybranych norm, a naprężeniami ścinającymi uzyskiwanymi na podstawie nośności doświadczalnych. Zauważono, że największe różnice występują w przypadku stosowania norm opartych na zmodyfikowanej analogii kratownicowej, na podstawie których, po przekroczeniu nośności na ścinanie przekroju betonowego, za nośność strefy przypodporowej przyjmowana jest nośność zbrojenia poprzecznego. Natomiast mniejsze różnice otrzymano w przypadku norm uwzględniających pracę betonu po zarysowaniu strefy przypodporowej. Miało to miejsce, zarówno w przypadku uwzględniania współpracy wynikającej jedynie z zazębiania betonu w rysie (PreNorma jak i dodatkowo efektu np. klocowania (norma amerykańska). Przy zastosowaniu normy amerykańskiej wyniki obliczeń nośności na ścinanie elementów hiperstatycznych obciążanych cyklicznie były w dużej mierze zgodne z doświadczalnymi.

Reasumując stwierdzono, że cel pracy został osiągnięty, a postawione tezy zostały udowodnione.

Przeprowadzone badania obejmowały elementy wykonane z tej samej klasy betonu i tego samego gatunku stali. Ponieważ nośność na ścinanie w dużej mierze zależy od tych cech materiałowych, zachodzi konieczność prowadzenia dalszych prac badawczych i analiz. Są one istotne zwłaszcza przy modyfikacji modeli obliczeniowych, które mają lepiej odwzorowywać rzeczywistą pracę strefy przypodporowej ścinańnych belek żelbetowych. Szczególnie przyjęcie koncepcji szacowania nośności elementu na ścinanie jako sumy nośności betonu i zbrojenia poprzecznego w całym zakresie obciążenia wymaga dalszych badań z uwzględnieniem betonu o niskiej i przeciętnej wytrzymałości, a także stali o mniejszej ciągliwości. Opierając się na wynikach przedstawionych w pracy badania powinny być prowadzone na belkach statycznie niewyznaczalnych obciążanych cyklicznie z uwzględnieniem przekroju prostokątnego i teowego.

Biorąc pod uwagę przedstawione zależności i potrzeby analizy zagadnienia nośności strefy ścinanej belek żelbetowych, w dalszym programie badań zaplanowano dokładniejsze rozeznanie rzeczywistych trajektorii naprężen głównych jako czynnika wpływającego na przyjmowaną podczas obliczeń wartość kąta nachylenia ściskanych krzyżulców betonowych  $\theta$ . Będzie to możliwe dzięki zastosowaniu podczas badań optycznego systemu pomiarowego typu ARAMIS o większej dokładności. Dodatkowo powinny być wykonane badania belek żelbetowych z niepełnym zakotwieniem zbrojenia podłużnego, ale o zwiększonej, w celu poprawy warunków przyczepności betonu do stali, grubości otuliny.



The title of dissertation:

***„The problem of shear capacity of reinforced concrete beams support zone in terms of experimental testing and standards”***

## SUMMARY

The problem of shear capacity of reinforced concrete, although for many years was the subject of research and analysis, remains a matter of not fully recognized. It is reflected in proposed changes to the Eurocode 2 and the use of high-strength steel and concrete in reinforced concrete structures.

Hence, there is a continuing need to expand and complement the knowledge on this issue, which is important for engineering practice.

The aim of the study was to compare the results of the experimental shear capacity of reinforced concrete beams with a load capacity determined on the basis of selected standards. Chosen standards were differed by: an adopted computational models, an approach to estimate the lateral force causing the crack of support zone, as well as taking into account the shear capacity of concrete in cracked support zone. They also could be into two groups:

- domestic: PN-B-03264: 1984 - based on the theory of limit load according to Boryszansky, and based on a Mörsch modified truss model standards PN-B-03264:2002 and PN-EN-1992-1-1: 2008 (Eurocode 2) which introduces other empirical formulas to calculate the shear force separating sections with and without shear reinforcement,
- foreign: German DIN-1045-1:2008 - based on a Mörsch modified truss model with additionally given method to calculate the angles of compressed concrete struts  $\theta$ , American standard ACI-318(14) - taking into account the carrying capacity of stretched concrete after cracking and PreNorm - introducing changes in the levels of precision design calculations and also inclusion of stretched concrete capacity after cracking.

Based on the literature review, the rules specified by standards and preliminary laboratory results the following theses have been formulated:

- a load program, static scheme, shape and dimensions of the beam cross section affect the experimental carrying shear capacity of the support zone of reinforced concrete beams,
- the angle  $\theta$  of compressed concrete struts, which is assumed as approximately corresponding to the value of the inclination angle of the diagonal crack  $\beta_r$  created in the shear zone, is in the range given by the standards-based on truss model,
- the angle  $\theta$  depends on the manner and the width of the beams support,
- the proposed in standards  $\cot \theta$  value in the range of 1-3 does not result directly from the angle  $\theta$  of compressed concrete struts, is rather correcting parameter of theoretical shear capacity values to actual shear capacity,

- assumption of too small values of  $\cot \theta$  affects the underestimation of tensile shear strength in the longitudinal reinforcement, which can contribute to too small area of reinforced bars anchored on the support zone and insufficient length of their anchorage,
- total share capacity of the support zone of reinforced concrete beams in the whole process of loading, even after appearance of the cracks results both from the capacity of transverse reinforcement and capacity of the concrete.

Analysis presented in the paper were based on the results of experimental studies of 17 reinforced concrete beams. Tested beams were loaded to failure due to shear taking into account different factors, which according to the literature review have an impact on the behavior of support zones of reinforced concrete beams. These factors were: size, shape of beams cross-sectional, construction of longitudinal and transverse reinforcement, static scheme, support width, and loading program, including cyclic loading. The calculation was made with the actual material characteristics of concrete and steel, of the elements, together with the location of rebar in elements cross-section set out in the accompanying research.

Performed research allowed to determine the ultimate loads and the image of the cracks in the support zone. These images were used to determine both the width and the inclination angle  $\beta_r$  of diagonal cracks, corresponding to the inclination angle  $\theta$  of compressed concrete struts. The type of destruction was also recorded, according to the classification given by prof. Godycki. Due to the adopted differences between tested beams, a collective analysis of all elements was based on the shear stresses calculated on the basis of destructive shear forces obtained from the study.

On the basis of comparative analyses a significant impact on the diversity of elements to the experimental capacity was confirmed as described in the literature. It was also found that the different factors impact on the obtained actual value of the angle of inclination for diagonal cracks  $\beta_r$ .

During the study attention was drawn to the image of the failure caused by the dominant shear force and compared it with the types of destruction given by prof. Godycki. It was also analyzed the relationship between the shear capacities obtained from the test and the  $\theta$  angle, the statically indeterminate of elements static and load program, which is not included in the standards. It has been found that the statically indeterminate elements have less load capacity than such elements statically determinate load; both periodically and monotonically. In addition, another was the type of destruction, and the angle of diagonal compression struts  $\theta$ , which depends on the beams support.

Also a significant differences between experimental shear capacity and capacity calculated based on the selected standards was shown. It was noted that the largest differences occur in the case of the use of standards based on a modified truss analogy, on the basis of which, after crossing the shear capacity of the concrete section, the bearing capacity of the support zone is assumed as capacity of transverse reinforcement. Smaller differences were obtained in the case of standards which take into account the concrete capacity even after cracking of support zone. This occurred both when only the cooperation

between reinforcement and concrete was considerate as meshing concrete in crack (PreNorm) and also when effects as dowel action of the longitudinal reinforcement was considerate (American standard). Only the calculations of shear capacity based on American standard for statically indeterminate elements were largely in line with experimental ones.

It can be concluded that the objective of the work has been achieved, and the thesis have been proven

The studies included elements made of the same class of concrete and steel. Since the shear resistance largely depends on the characteristics of the material, there is a need to conduct further research and analysis. They are especially important for modification of computational models which have better imitate the actual work of support zone of reinforced concrete beams. Particularly acceptance of the concept of estimating the shear capacity of the reinforcement concrete beams as the sum of the load of concrete, and transverse reinforcement in the entire load range, requires further investigations because of the concrete of low and average-strength and steels of lower ductility. Based on the results presented in the paper further studies should be conducted on the statically indeterminate beams loaded periodically, taking into account the rectangular and T section.

Taking into account the dependencies and needs to analysis the issue of reinforced concrete beams shear capacity, it is scheduled in a further research program an accurate understanding of the trajectory of principal stresses as a factor affecting on taken during calculations value of the angle of concrete compression struts  $\theta$ .

This will be possible by using an optical measurement system of the type ARAMIS during testing. In addition, the study should be made of reinforced concrete beams with incomplete anchorage of longitudinal reinforcement, but with increased coatings thickness, in order to improve the adhesion of concrete to steel.

*Kamil Bachar*