

Shear Design of Straight and Haunched Concrete Beams without Stirrups

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Vu Hong Nghiep

aus
Haiduong, Vietnam

2011

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günter A. Rombach
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Oliver Fischer

Tag der mündlichen Prüfung: 14.10.2011

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH

Heft 7

Vu Hong Nghiep

**Shear Design of Straight and Haunched
Concrete Beams without Stirrups**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0844-9

ISSN 1865-8407

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgments

First of all, I would like to express my deep gratitude to my supervisor, Professor Dr.-Ing. G. Rombach, for his guidance in the past four years. I would also thank my second dissertation reviewer, Professor Dr.-Ing. O. Fischer from the department of concrete structures at the TU München, for his valuable comments and suggestions. I also thank all members of the Institute of Concrete Structures of the Hamburg University (TUHH), especially testing staff, for all the valuable helps during my stay in Hamburg.

My thankfulness is also given to Mrs. Greta Gottwald who shows me the hospitality of the German people during my time in Germany.

The author appreciates the Vietnamese Government for the scholarship through Project 322 organized by the Vietnamese Ministry of Education as well as DAAD for the useful grant in the last four years.

Finally, I like to dedicate this work to my parents and all members of my Vu family in Vietnam. Their endless support was a great encouragement to me to finish this work.

Thank you so much.

Vorwort

Die Querkrafttragfähigkeit sowie die Querkraftbemessung von Stahlbetonbauteilen ohne Bügelbewehrung sind trotz langjährigen Forschungsaktivitäten und mehr als 2000 Versuchen weltweit bislang noch nicht zufriedenstellend geklärt. Da derzeit noch kein mechanisches, allgemein anerkanntes Modell existiert, basieren fast alle Bemessungsverfahren auf empirischen Ansätzen. Dies hat zu zahlreichen Modellen geführt, welche sich erheblich sowohl was die relevanten Einflussfaktoren als auch die Ergebnisse betrifft unterscheiden. Dieser Zustand ist auch für die Baupraxis nicht zufriedenstellend. Bei gevouteten Stahlbetonträgern, kommt noch der Einfluss eines geneigten Druckgurtes hinzu, welcher bislang weder experimentell noch mechanisch geklärt ist.

Herr Nghiep untersucht in seiner Forschungsarbeit die Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbalken ohne Bügelbewehrung. Schwerpunktmaßig widmet er sich *gevouteten Trägern*. Nach einer eingehenden Literaturrecherche führt er Versuche an 2x9 Stahlbetonbalken mit Voutenneigungen von 0° bis 10° und Schub schlankheiten von $a/d = 3$ und 5 durch. Hierbei zeigte sich, dass die Einfeldbalken mit konstanter Höhe im Allgemeinen im Bereich der Feldmitte versagten, während sich der kritische Schubriss bei gevouteten Trägern in der Nähe des Auflagers, d.h. im Bereich minimaler Querschnittshöhe, bildete. Letzteres steht im Gegensatz zu der derzeitigen Bemessungspraxis.

In Versuchen lassen sich nur wenige Parameter studieren und nur punktuell Werte messen. Daher studiert Herr Nghiep das Tragverhalten der Versuchsbalken mittels stofflich nichtlinearer Finite-Elemente-Berechnungen. Die FE-Simulationen liefern sehr gute Ergebnisse, sowohl was das Last-Verformungsverhalten als auch die Ausbreitung und den Verlauf der Biege- und Schubrisse betreffen. Aus den rechnerisch ermittelten Spannungsverläufen im gerissen Zustand folgert Herr Nghiep, dass signifikante Schubspannungen sowohl in der Druck- als auch in der ungerissenen Zugzone auftreten. Weiterhin ergeben die Berechnungen, dass die Schubspannung in der gerissenen Betonzugzone über die Trägerhöhe keineswegs konstant ist, wie von manchen Rechenansätzen angenommen. Die Rissreibung sowie die Dübelwirkung der Längsbewehrung haben nach seinen numerischen Untersuchungen einen vernachlässigbar kleinen Anteil am Querkraftabtrag.

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen und den FE-Berechnungen entwickelt Herr Nghiep zwei einfache Rechenmodelle zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ von Stahlbetonbalken mit konstantem und veränderlichem Querschnitt. Statistische Untersuchungen seines Modelles anhand von ca. 900 Versuchswerten zeigen, dass es trotz seiner Einfachheit sehr gute Ergebnisse liefert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die durchgeführten Versuche sowie die komplexen numerischen Untersuchungen von Herrn Nghiep wichtige neue Erkenntnisse zum Tragverhalten von Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung mit konstantem oder veränderlichem Querschnitt ergeben haben. Es sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig, um das Tragverhalten von Stahlbetonbalken besser zu verstehen und ein mechanisch begründetes Rechenmodell zu entwickeln.

Hamburg, 2010

Prof. Dr.-Ing. G. A. Rombach

Abstract

In spite of very long research activities with the first tests conducted by Mörsch in the 1920th, the design for shear of concrete members without transverse reinforcement is still not cleared. This may be demonstrated in the fact that most shear design procedures are not based on mechanical models but on empirical equations which show very big uncertainties. Thus very high safety factors have to be used. The problem of shear design exists primarily for slabs. In Germany numerous old concrete bridges show a lack of safety in transverse direction since the year 2001, when a new DIN-code was introduced. Furthermore the shear design principle of haunched concrete structures, as for example, cantilever slab of bridges, is hardly cleared, up to now.

This research work aims to improve the understanding of the shear behaviour, to identify the significant shear resistance mechanisms and finally to develop new shear design models for practical use which is valid for straight and haunched concrete beams without stirrups.

The essential, partially very different approaches known from the literature are analysed first and their accuracies are checked by a comparison with the test values from a shear database. Considerable differences appear between the arithmetic results and the test values.

To study the behaviour of concrete members under high shear loads an extensive test program with 18 reinforced concrete beams without web reinforcement of different shear slenderness and inclination of compression chord was conducted. These experiments focused on haunched beams. It appears that the existing approaches describe the influence of an inclined compression chord on the shear capacity only in an insufficient manner. In some cases the design according to the DIN- or EC-Code results in unsafe values.

To get a better understanding of the load-bearing mechanisms all tests are simulated by means of non-linear Finite Elements analysis with the programme ABAQUS. Very good agreement appears between the test results and those of FE-analysis including the load-deflection curves, the load bearing capacity and the crack patterns. Thus the developed numerical model can simulate the behaviour of reinforced concrete beams up to the ultimate limit state. The FE-analysis demonstrates that the shear forces are transferred in uncracked compression zone mainly. Therefore crack friction and dowel action plays no significant role on shear bearing capacity at the ultimate limit state. As a result of the FE-analysis and the test program, a shear resistance action of uncracked concrete part in the tension zone is firstly introduced to be one of the two main shear bearing actions of concrete structures without stirrups.

Based on the theoretical and experimental investigations an easy analytic model is developed for the estimation of the shear capacity of straight and haunched reinforced concrete beams without stirrups. It shows more accurate results than the known approaches.

Kurzfassung

Trotz langjähriger Forschungsaktivitäten, die ersten Versuche führte Mörsch 1920 durch, ist die Querkraftbemessung von Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung bislang unzureichend geklärt. Dies zeigt sich unter anderem darin, dass die meisten Bemessungsverfahren nicht auf einem mechanischen Modell sondern auf empirisch entwickelten Gleichungen basieren, welche sehr große Streuungen und damit sehr hohe Sicherheitsfaktoren aufweisen. Das Problem der Querkraftbemessung besteht vor allem bei Platten. So weisen zahlreiche Massivbrücken in Deutschland nach der seit dem Jahre 2001 gültigen Norm rechnerisch eine zu geringe Tragfähigkeit in Querrichtung auf. Weiterhin ist die Querkraftbemessung von gevouteten Trägern, wie Sie beispielsweise bei Fahrbahnplatten von Brücken auftreten, bislang kaum geklärt.

Diese Forschungsarbeit soll zu einem besseren Verständnis des Querkrafttragverhaltens von Stahlbetonbalken ohne Bügelbewehrung beitragen. Hierzu werden zunächst die wesentlichen aus der Literatur bekannten, teilweise sehr unterschiedlichen Rechenmodelle analysiert und deren Genauigkeit durch einen Vergleich mit den Versuchswerten aus einer Schubdatenbank bestimmt. Es zeigen sich erhebliche Streuungen zwischen den Rechen- und den Versuchsergebnissen.

Zum Studium des Tragverhaltens wurden umfangreiche Versuche mit insgesamt 18 Stahlbetonbalken ohne Bügelbewehrung unterschiedlicher Schubschlankheit durchgeführt. Hierbei lag der Schwerpunkt bei gevouteten Trägern. Es zeigt sich, dass die bestehenden Ansätze den Einfluss eines geneigten Druckgurtes auf die Querkrafttragfähigkeit nur unzureichend beschreiben. Teilweise ergeben sich auf der unsicheren Seite liegende Rechenwerte.

Zu einem genaueren Studium der Beanspruchungen und der Tragmechanismen werden die Versuche mittels stofflich nichtlinearer Finite Elemente Berechnungen mit dem Programm ABAQUS simuliert. Es zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen Versuch und FE-Analyse. Dies trifft sowohl bei den Kraft-Weg-Verläufen, bei den Traglasten als auch bei den Rissbildern zu. Das entwickelte numerische Modell gibt somit das Verhalten von Stahlbetonbalken im Gebrauchs- und Grenzzustand zutreffend wieder. Die FE-Berechnungen zeigen, dass die Querkräfte im Wesentlichen in der ungerissen Druckzone übertragen werden und somit die Rissreibung im Grenzzustand der Tragfähigkeit keine wesentliche Rolle spielt. Die numerischen und experimentellen Untersuchungen haben weiterhin ergeben, dass die ungerissene Betonzugzone einen wesentlichen Anteil der Querkraft aufnimmt.

Basierend auf den theoretischen und experimentellen Untersuchungen wird ein einfaches analytisches Modell zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit von geraden und gevouteten Stahlbetonbalken ohne Bügelbewehrung entwickelt, was erheblich genauere Werte als die bekannten Ansätze liefert.

Table of Contents

Abstract

Kurzfassung

Table of Contents

1- Introduction	1
1.1- Problem Statement	1
1.2- Objectives of the Thesis	2
1.3- Structure of the Thesis	3
2- State of the Art	5
2.1- Introduction	5
2.2- Shear Behaviours of Concrete Members without Stirrups	5
2.2.1- Shear Transfer Mechanisms	8
2.2.2- Significant Factors for Shear Capacity	10
2.3- Mechanical Models	13
2.4- Empirical Models	26
2.5- Code Provisions	31
2.5.1- German Code DIN 1045-1 (2001).....	31
2.5.2- ACI Code 318-05 (2005)	32
2.5.3- CSA A23.3 (2004)	32
2.5.4- Swiss Code SN 262 (2003)	33
2.6- Shear Strength of Haunched Beams	33
2.7- Conclusions	37
3- Experimental Program	39
3.1- Objectives	39
3.2- Test Specimens	39
3.2.1- Material Properties	42
3.2.2- Fabrication of the Test Specimens	44
3.2.3- Data Acquisition System	44
3.3- Testing Procedure	45
3.3.1- Experimental Set-up	45
3.3.2- Loading Procedure	45

Table of Contents

3.4- Experimental Results	46
3.4.1- Behaviour of Test Beams until Failure	46
3.4.2- Results of Measurements	49
3.4.3- Crack Propagation	51
3.4.4- Shear Strength in Relation with Main Significant Factors	55
3.4.5- Test Results in Comparison with Shear Design Models of Codes	56
3.4.6- Test Results in Comparison with Shear Strength of 13 Models	59
3.5- Discussions and Conclusions	62
4- Nonlinear FEM Analysis	65
4.1- Introduction	65
4.2- Material Behaviour	65
4.2.1- Concrete Behaviour	67
4.2.2- Steel Behaviour	69
4.2.3- Interaction Behaviour between Reinforcing Steel and Concrete	70
4.3- Non FEM Analysis with ABAQUS	72
4.3.1- Damaged Plasticity Model for Concrete	72
4.3.2- Model for Steel	74
4.3.3- Explicit Dynamic Analysis	75
4.4- Test Verification	76
4.4.1- FEM Model	76
4.4.2- Results of the FEM-Analysis	79
4.5- Discussions and Conclusions	92
5- New Model Proposals	102
5.1- Introduction	102
5.2- Model Proposals	102
5.2.1- Shear Resistance Mechanisms Based on Stress Distribution at Critical Sections.....	102
5.2.2- Shear Strength Model for Straight Depth Concrete Beams	104
5.2.3- Shear Strength Model for Haunched Concrete Beams	108
5.2.4- Shear Database	112
5.3- Verification	115
5.3.1- Comparison with other Shear Strength Models	117

5.3.2- Comparison with Practical Codes	123
5.4- Discussions and Conclusions	127
6- Conclusions and Recommendations	134
Appendix A- Concrete Properties of Test Beams	137
Appendix B- Test Results	141
Appendix C- Test Results versus Design Shear Strength of Codes	196
Appendix D- Test Results versus Shear Strength of 13 Models	209
Appendix E- Crack Propagation of 18 Test Beams from NFEM Analysis	214
Appendix F- Shear Database of 14 Test Beams	237
References	239
Notation	257
Curriculum Vitae	