

# **Reinforced Concrete Beams Subjected to Reversed Cyclic Shear**

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

genehmigte Dissertation

von  
Reza Vojoudi Mehrabani

aus  
Tabriz, Iran

2017

1. Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Viktor Sigrist

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Starossek

Tag der mündlich Prüfung: 15. August 2017

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH

Heft 15

**Reza Vojoudi Mehrabani**

**Reinforced Concrete Beams  
Subjected to Reversed Cyclic Shear**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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 978-3-8440-5501-6

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](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Foreword**

In current design codes, reinforced concrete structures are expected to withstand seismic actions by energy dissipation with the formation of plastic hinges and inelastic deformations, respectively. Such deformations are accompanied by longitudinal strains and axial elongations that substantially increase during reversed cyclic loading. This is because of the inelastic response of reinforcement and concrete and the so-called "contact stress effect" which prevent a complete deformation recovery.

Elongation and longitudinal strains in plastic hinge regions influence the concrete resistance in shear as well as the inelastic deformations and the rotation capacity up to flexural failure, respectively. Several researchers have studied the pertinent phenomena, however, most of the derivations are based on empirical relations from experimental data. Contrarily, the doctoral thesis of Reza Vojoudi Mehrabani presents a physical-mechanical model for predicting the axial strain distribution and the beam elongation by using the Generalized Stress Field Approach and the Cracked Membrane Model, both of which are based on the stress field analysis method. This results in a computer based calculation procedure.

The model is well substantiated by phenomenological observations and a comparison with data taken from the (relatively few) specific tests that have been carried out worldwide. A parametric study and a discussion of practical applications complete the work. Overall, the present investigation contributes to the state of knowledge and is a valuable supplement of the current literature. It should be of special interest for engineers working in the field of seismic design of concrete structures.

Lucerne (Switzerland), 2017

Prof. Dr. Viktor Sigrist



## Abstract

Generally, earthquake-resistant structures should satisfy various criteria in order to withstand an event. These include the ability to overcome large inelastic deformations without significant strength deterioration and to dissipate seismic energy by forming plastic hinges with inelastic deformations. In recent years, the quantification of the deformation capacity in terms of geometrical and mechanical characteristics of the members has been given ever greater importance for seismic design of new structures and for seismic evaluation of existing structures.

Thus, the present research aims at providing an appropriate understanding toward inelastic behavior of reinforced concrete (RC) beams subjected to reversed cyclic (seismic) shear. Moreover, it tries to determine the plastic deformation capacity and to develop a new physical-mechanical model for evaluating the general behavior of plastic hinges that is suitable for practical use. Flexural yielding in the plastic hinge regions of the reinforced concrete beams leads to a complex strain state and to an axial elongation of the member. As a result, the shear strength and deformation capacity of the plastic hinges are affected. In this thesis a strain based model is proposed that predicts the axial strain distribution by using the tension chord model and the crack membrane model on the basis of a stress field analysis.

By doing so the Generalized Stress Field Approach (GSFA) is extended for the case of plastic hinges and reversed cyclic shear. A new method to define the inclination angle of the stress bands and to predict the required axial strains at shear failure is introduced. The bond shear stress-slip model for concrete and reinforcing bars is modified, and the flexural and shear deflection components of the members are considered separately. The shear displacements are also decomposed into two categories: displacements caused by sliding of the diagonal web cracks and displacements due to the shear force. Furthermore, the deformation capacity of the plastic hinge is predicted based on the initial failure mechanism.

The research includes an extensive parametric study to identify the main parameters of the deformation capacity for reversed cyclic plastic hinges, thereby exploiting the proposed tool. In this parametric study the significance of various factors such as the steel type, the mechanical reinforcement ratio, the shear span-to-depth ratio, the fixed-end rotation, the loading type, and the member size on the deformation characteristics of plastic hinges is assessed, and further insight into the structural behavior is achieved. Furthermore, an attempt is made to determine a rational relation between reversed cyclic and monotonic deformations. In comparison to monotonic loading, substantial degradation of deformation capacity occurs when the failure of the RC beam is governed by bar rupture. However, no significant variations arise for concrete crushing failures. Eventually, the analysis is extended to different structural conditions, and a novel simplified deformation capacity model is provided for both, monotonic and reversed cyclic RC plastic hinges to be used in practical application.

The verification of the main model as well as of the simplified procedure is achieved by comparison with experimental data obtained from literature. Hence, another objective of this research is to contribute to the current state of knowledge and complement the available models.

## Kurzfassung

Tragwerke, die für eine Beanspruchung infolge Erdbeben ausgelegt werden, müssen diverse Kriterien erfüllen, damit die Standsicherheit gewährleistet ist. Hierzu zählt auch, großen plastischen Verformungen ohne wesentliche Festigkeitsreduktion zu widerstehen und die infolge des Erdbenereignisses frei werdende Energie durch die Bildung plastischer Gelenke zu dissipieren. In den vergangenen Jahren hat die rechnerische Bestimmung des Verformungsvermögens auf Basis geometrischer und mechanischer Eigenschaften der Bauteile bei der Erdbebenbemessung von Neubauten sowie der seismischen Beurteilung von bestehenden Strukturen immer mehr an Bedeutung gewonnen. Daher besteht zurzeit unter anderem das Forschungsziel, ein vertieftes Verständnis des plastischen Verhaltens von Stahlbetonstrukturen unter zyklischer Querkraftbelastung zu gewinnen. Die Ermittlung des plastischen Verformungsvermögens ist für diese Fälle noch nicht abschließend geklärt. Ebenso besteht der Bedarf, neue physikalisch-mechanische Modelle zur Beschreibung des allgemeinen Verhaltens von plastischen Gelenken zu entwickeln und anhand dieser die zurzeit gültigen Bemessungsregeln zu beurteilen. Im Falle zyklischer Belastung führt das Fließen der Längsbewehrung zu einem komplexen Dehnungszustand und einer axialen plastischen Verformung des Balkens. Diese Verlängerung des Balkens beeinflusst die Querkrafttragfähigkeit. Diese Arbeit schlägt ein dehnungsbasiertes Berechnungskonzept zur Bestimmung der axialen Verlängerung auf Basis des „Zuggurtmodells“ und des „Gerissene-Scheibe-Modells“ vor.

In dieser Arbeit wird der Tragwiderstand mit Hilfe des Ansatzes der verallgemeinerten Spannungsfelder für den Fall von zyklischer Querkraftbelastung bestimmt. Hierbei wird eine neue Methode für die Definition der Druckfeldneigung und zur Beschreibung der axialen Dehnung verwendet. Die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung wird modifiziert und die Verformungen infolge Biegung und Querkraft werden getrennt ermittelt. Die Querkraftverformung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen: Ein Teil infolge Gleitung des Schubrisses und ein weiterer aus der Verformung infolge der Querkraftbelastung. Anschließend wird das Verformungsvermögen auf Basis des initialen Bruchmechanismus bestimmt.

Um die maßgebenden Parameter zu identifizieren, wird eine ausführliche Parameterstudie der Eingangsparameter durchgeführt. In dieser Studie werden der Einfluss der Stahlsorte, des mechanischen Bewehrungsgrads, der Schubslankheit, Einspannungen, der Art der Belastung und der Bauteilgröße auf die Verformungscharakteristik von plastischen Gelenken beurteilt. Des Weiteren wird ein Ansatz zur Verknüpfung von zyklischen und statischen Verformungen entwickelt. Im Vergleich zu einer statischen Belastung kann eine deutliche Verringerung des Verformungsvermögens für den Fall des Zerreißen der Bewehrung beobachtet werden. Für den Fall des Betonversagens ergibt sich diese Reduktion hingegen nicht. Schließlich wird die Berechnung auf verschiedene Strukturen ausgeweitet und ein neues vereinfachtes Modell zur Beschreibung des Verformungsvermögens bei statischer und zyklischer Belastung von plastischen Gelenken angegeben.

Die Überprüfung des Berechnungsmodells und des vereinfachten Modells erfolgte durch die Nachrechnung von aus der Literatur übernommenen Versuchen. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es, den Kenntnisstand aufzuzeigen und die zur Verfügung stehenden Modelle zu ergänzen.

## Table of Contents

### Abstract

### Kurzfassung

### Table of Contents

<b>1- Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1- Defining the Problem .....	1
1.2- Thesis Objectives .....	2
1.3- Structure of the Thesis .....	2
<b>2- Review of Literature</b> .....	<b>4</b>
2.1- Introduction .....	4
2.2- Cyclic behavior of reinforced concrete beams .....	4
2.2.1- Material properties .....	4
2.2.1.1- Concrete .....	4
2.2.1.2- Reinforcing steel .....	7
2.2.1.3- Composite action of concrete and reinforcing steel .....	9
2.2.2- Response of reinforced concrete beams subjected to cyclic loading .....	24
2.2.2.1- Flexural dominated plastic hinges .....	25
2.2.2.2- Shear dominated plastic hinges .....	28
2.2.2.3- Available models for analysis of plastic hinges .....	31
2.2.2.3.1- Inelastic deformation capacity and available models .....	32
<b>3- Physical-Mechanical Model for Analysis of Beams Subjected to Cyclic Loading</b> ....	<b>43</b>
3.1- Introduction .....	43
3.2- Stress field analysis .....	43
3.2.1- Discontinuous stress fields .....	44
3.3- Cracked membrane model .....	46
3.4- Generalized stress field approach .....	51
3.5- Inclination angle of stress bands in RC plastic hinges subjected to reversed cyclic loading .....	52
3.6- Flexural rotation .....	54
3.6.1- Modification of bond shear stress-slip relation .....	54
3.7- Shear displacement .....	57
3.7.1- Shear displacement components .....	57
3.7.2- Shear displacements of reversed cyclic plastic hinges .....	59
3.8- Longitudinal strains in the plastic hinge region .....	60
3.9- Verification of the proposed model .....	65
3.10- Deformation capacity of plastic hinges .....	80
3.10.1- Tensile bar fracture .....	80
3.10.2- Failure of concrete compression zone .....	81
3.10.3- Shear failure and ductility capacity of shear dominated plastic hinges .....	82
3.10.4- Verification .....	83
<b>4- Parametric Study and Practical Application of Proposed Method</b> .....	<b>89</b>

Table of Contents

4.1- Introduction .....	89
4.2- Parametric study .....	89
4.2.1- First series of simulations .....	89
4.2.1.1- Parameters choice .....	89
4.2.1.2- Simulation results .....	91
4.2.2- Second series of simulations .....	104
4.2.2.1- Parameters choice .....	104
4.2.2.2- Simulation results .....	104
4.3- Practical Application of Proposed Method .....	113
4.3.1- Simplified method .....	113
4.3.2- Modification of the model for beams within frames .....	116
4.3.3- Comparison to experimental results .....	116
<b>5- Conclusions and Recommendations .....</b>	<b>127</b>
<b>References .....</b>	<b>131</b>
<b>Notations .....</b>	<b>141</b>
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>153</b>