

Reduced Order Modelling of Steel Beams and Columns for Analysis against Accidental Actions

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Carles Colomer Segura

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Associate Professor Dr. ir. Jean-François Demonceau

Tag der mündlichen Prüfung: 4. November 2016

Schriftenreihe Stahlbau - RWTH Aachen

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Gründer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Sedlacek

Heft 80

Carles Colomer Segura

**Reduced Order Modelling of Steel Beams and
Columns for Analysis against Accidental Actions**

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

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 978-3-8440-4714-1

ISSN 0722-1037

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

Abstract

The analysis of structures undergoing explosion or impact has become a major concern for structural engineers, as the level of public awareness towards such accidental actions has increased greatly in the past years. In most of the imaginable risk scenarios, the building's columns are the first structural elements to be affected by the loading in form of a large concentrated energy input due to either a fast incoming pressure wave, in cases of explosion, or kinetic energy, in cases of a vehicle crash.

The energy applied to the column needs to be absorbed by transverse deformation, which in the case of steel members will most often lead to a residual damage state of the column. As key structural elements, columns are subjected to large compressive loading. Even moderate damage levels caused by the accidental action might cause complete column failure due to buckling and lead to catastrophic consequences. Therefore, the ability to accurately predict the damage on impulsively loaded structural elements and their residual resistance after damage is of major importance.

As an alternative to detailed FEM simulations, simplified design methods can offer a fast and effective way to obtain an initial assessment of the column response. Nevertheless, most existing simplified approaches lack the ability to address two decisive factors to properly assess the column response. Firstly, they cannot consider explicitly the influence of mechanical and inertial longitudinal boundary conditions. Additionally, they lack an analytical approach to evaluate the residual compressive resistance of the damaged column.

In order to overcome the aforementioned drawbacks of the existing models, a new approach of model reduction of beam elements has been developed at the Institute of Steel Structures of the RWTH Aachen University.

Using the same principles of energy equivalence common to existing reduced order models (ROM), a generalized methodology for the model reduction of beam elements has been derived, which overcomes the limitations of existing methods by explicitly considering in its analytical formulation: a) the coupled bending-membrane resisting behavior of the beam, b) arbitrary rotational boundary conditions, c) arbitrary longitudinal boundary conditions, d) arbitrary inertial boundary conditions (i.e. the presence of a head mass), and e) arbitrary loading states in transverse and longitudinal directions. For the derivation of this ROM, a detailed analysis of the energetic state equations of beam elements is performed.

In a next step, an analytical and a numerical solution methodology are proposed to calculate the ROM in explosive and impact loading scenarios. Due to the explicit inclusion of geometric nonlinear effects in the formulation of the model, the obtained results show the ability of the model to capture the effects of inertial

restraining due to a head mass and the activation of membrane forces during the process. The focus of the analysis is placed put on determining the maximum and residual transverse deformation, the displacement of the head mass, and the maximum and minimum axial forces present in the column.

The energy equations used for the definition of the ROM provide the analytical solution to the energetic state of a column undergoing an arbitrary deformation with the consideration of geometric nonlinear effects. These equations open the possibility of analytically addressing the complex problem of the determination of the residual strength of a damaged column undergoing an arbitrary residual deformation. This result is of great importance for the assessment of the robustness of the structure in its damaged state.

A small-scale experimental weight drop set-up has been constructed and used to impact small beam elements under variation of mechanical and inertial boundary conditions. The performed experimental campaign is used to validate the theoretical and numerical results of this work.

In the final chapter, the findings of the study and their repercussions for the design of structures undergoing accidental action are presented. Finally, an outlook for possible further investigations on this topic is given.

Kurzfassung

Die Analyse von Tragwerken unter außergewöhnlichen Einwirkungen wie Explosion oder Anprall hat in den letzten Jahren an großer Bedeutung gewonnen und ist immer häufiger ein Bestandteil der Planung von Bauwerken geworden. In den meisten vorstellbaren Gefährdungsszenarien werden eine oder mehrere Gebäudestützen mit einer hohen Anprallenergie belastet. Sei es in Form einer Stoßdruckwelle aus einer Explosion oder in Form kinetischer Energie aus einem anprallenden Fahrzeug: die Stützen werden in den meisten Szenarien von der Belastung direkt erfasst.

Die in die Stütze eingeleitete Energie muss in Form von Verformungen als Dehnungsenergie absorbiert werden. Hierfür bietet der Werkstoff Stahl durch seine Duktilität gute Absorptionseigenschaften, die wiederum zu einer verbleibenden plastischen Formänderung der Stütze führen können. In ihrer Haupttragfunktion stehen Stützen unter einer hohen axialen Druckbelastung. In dieser Situation können kleine seitliche plastische Formänderungen schnell ein Knickversagen der Stütze verursachen und ein globales Strukturversagen initiieren. Aus diesem Grund sind Methoden zur zutreffenden Prognose der Stützenschädigung und deren residualen Tragfähigkeit von entscheidender Bedeutung.

Als Alternative zu detaillierten Finite Elemente Simulationen stellen vereinfachte Berechnungsansätze einen schnellen und effektiven Weg dar, um eine erste Schätzung der Stützenantwort zu bekommen. Nichtsdestotrotz bieten die meisten vereinfachten Ansätze keine Möglichkeit, zwei entscheidende Faktoren in der Stützenantwort zu bewerten: Einerseits wurde bislang der Einfluss der mechanischen Randbedingungen in Längsrichtung, einschließlich Trägheitseffekte, auf das Tragverhalten in Biegerichtung der Stütze nicht in detaillierter analytischer Form untersucht. Andererseits fehlte ein Ansatz, um die residuale Tragfähigkeit der beschädigten Stütze analytisch abzuschätzen.

Um diese wichtigen Aspekte in einer geschlossenen analytischen Form zu behandeln, wurde ein neuer Ansatz zur Modelreduktion von Balkenelementen innerhalb dieser Arbeit entwickelt.

Auf der gemeinsamen Grundlage von anderen vereinfachten Ansätzen in Form von Modellen reduzierter Ordnung (reduced order model oder ROM im Englischen), wurde eine generalisierte Methodik zur Modelreduktion von Balkenelementen abgeleitet. Hierbei wurde eine neue analytische Formulierung erarbeitet, die eine Berücksichtigung von: a) dem gekoppelten Biege-Membran Tragverhalten des Balkens, b) beliebigen Rotationsrandbedingungen, c) beliebigen Randbedingungen in Längsrichtung, d) beliebige Trägheitsrandbedingungen (z.B. eine Kopfmass am Balkenende) und e) beliebigen Belastungszuständen in lateraler und in Längsrichtung, möglich macht.

In einem nächsten Schritt werden eine analytische und eine numerische Lösungsmethodik vorgeschlagen, um das ROM in einem Explosions- oder Anprallszenario zur Prognose der Stützenantwort anzuwenden. Dank der expliziten Berücksichtigung von nicht-linearen Aspekten in der Modellformulierung, ist das ROM in der Lage, den Einfluss der effektiven Längseinspannung, verursacht durch eine Kopfmasse, erfolgreich zu erfassen. Der vorgeschlagene Lösungsweg führt auf die Prognose der wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Stützenantwort, nämlich die maximale und residuale bzw. plastische seitliche Verformung, die Quantifizierung der Verschiebung der Kopfmasse und der maximalen und minimalen axialen Kräfte in der Stütze.

Die im ROM zugrundeliegenden energetischen Gleichungen werden in einem weiteren Untersuchungsschritt angewendet, um eine analytischen Lösung zur Resttragfähigkeit der beschädigten Stütze abzuleiten. Dieses Ergebnis ist von großer Bedeutung, um die Robustheit der Struktur nach der Schädigung der Stütze zu bewerten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Fallturmvorrichtung konstruiert, um kleinskalierte Balkenelemente unter Variation von mechanischen und Trägheitsrandbedingungen zu prüfen. Die durchgeführten Anprallexperimente dienen dazu, die theoretischen und numerischen Ergebnisse dieser Arbeit zu validieren.

Abschließend werden alle Ergebnisse und deren Anwendbarkeit für die Bewertung von Tragwerken unter außergewöhnlichen Lasteinwirkungen dargestellt und weiterführende Aspekte für mögliche Forschungsarbeit zusammengefasst.

Contents

1. Introduction	1
2. Plastic Behavior of Beams	7
2.1. Introduction	7
2.2. Assumed Plastic Behavior	8
2.3. Structural Capacities for Plastic Design	9
3. On the Reduced Order Modelling of Beam Elements	15
3.1. Introduction	15
3.2. On the Energetic Behavior of an Arbitrary Deformed Beam	17
3.2.1. Consideration of Geometrical Nonlinearities	18
3.2.2. External Work	21
3.2.3. Kinetic Energy	22
3.2.4. Strain Energy	23
3.2.5. Summary	24
3.3. On the Energetic Behavior of the Proposed ROM	26
3.3.1. Consideration of Geometrical Nonlinearities	27
3.3.2. External Work	28
3.3.3. Kinetic Energy	28
3.3.4. Strain Energy	29
3.3.5. Summary	30
3.4. Dynamically Equivalent ROM	31
3.4.1. Simple Case: Biggs Approach	33
3.4.2. General Case: Dynamic Transverse Loading with Stationary Longitudinal Loading	33
3.5. On the Calculation of Derivated Magnitudes	36
3.5.1. General Dynamic Properties	37
3.5.2. Dynamic Support Transverse Reactions	37
3.5.3. Dynamic Membrane Response	39
3.6. Summary and Recommendations for Usage	40
3.6.1. Normalizing Equations	41
3.6.2. Tables for Usage	44
4. Analysis of the Proposed ROM	46
4.1. Introduction	46

4.2.	Analytical Solution	47
4.2.1.	Behavioral Assumptions for Explosive Loading	48
4.2.2.	Behavioral Assumptions for Impact Loading	50
4.2.3.	Estimation of the Maximum and Residual Transverse De- formation	52
4.2.4.	Estimation of Transverse Reaction Forces	55
4.2.5.	Estimation of Longitudinal Reaction Forces	57
4.2.6.	Including the Effects of a Head Mass in the Analysis	63
4.3.	Numerical Solution	66
4.3.1.	Differential Equation of Motion for Systems with Non-Conserving Mass	67
4.3.2.	Derivation of an Explicit Iteration Algorithm	68
4.3.3.	Practical Implementation	70
4.4.	Validation	72
5.	On the Stability of Damaged Columns	76
5.1.	Introduction	76
5.2.	Analytic Derivation by Energetic Principles	78
5.3.	Robustness of the Remaining Structure	83
6.	Experimental Investigations	87
6.1.	Introduction	87
6.2.	Experimental Set-Up	87
6.2.1.	Mechanical System	88
6.2.2.	Measuring System	90
6.2.3.	Test specimens	91
6.3.	Experimental Campaign	93
6.4.	Results and Analysis	94
6.4.1.	Study A: Effect of the Head Mass	97
6.4.2.	Study B: Effect of the Longitudinal Restraintment	100
7.	Conclusions	102
	Bibliography	105
	List of symbols	110
A.	Experimental Results	112
B.	Comparative Studies	163
C.	Validation of the Numerical and Analytical Model	177
C.1.	Summary of the Validation of Case 1	178
C.2.	Summary of the Validation of Case 2	181

C.3. Detailed Validation of Case 1	184
C.4. Detailed Validation of Case 2	209
D. Tables for Usage	234
D.1. Distributed Loading	235
D.2. Point Loading at Mid Height	244
D.3. Point Loading at Vehicle Height	253