Lehrstuhl für Baumechanik der Technischen Universität München

Plastic Shape Functions of Plate Systems –

Reducing Modal DOF for Stochastic Nonlinear Dynamics of Large Scale Plate Systems

Yuh-Luen Lin

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-U. Bletzinger

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Grundmann, em.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. G.H. Müller
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M.B. Bischoff,
   Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 25.09.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 16.02.2007 angenommen.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baumechanik

Band 2

Yuh-Luen Lin

Plastic Shape Functions of Plate Systems

Reducing modal DOF for stochastic nonlinear dynamics
of large scale plate systems

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.: München, Techn. Univ., Diss., 2007

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 978-3-8440-1175-3
ISSN 1864-1806

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

Plastic Shape Functions of Plate Systems –

Reducing modal DOF for stochastic nonlinear dynamics
of large scale plate systems

Abstract

Plate systems which excited by stochastic dynamic loadings with the consideration of the material non-linearity is investigated. To describe the arisen plastifications, a 2D hysteretic material model is used. In order to reduce the number of modal degrees of freedom in the numerical analysis within the time domain as by the elastic dynamics, the plastic shape functions are introduced, which are specifically fitted to the plastic parts of curvatures resulted from the yielding and are systematically developed by means of the FEM. Due to the high reduction capability, $10,000$ Monte-Carlo-Simulations can be performed for instance on a flat slab with about $30,000$ FE-DOF.

Keywords

Plate system, flat slab, 2D hysteretic material model, FEM, BFS/Schäfer plate element, modal extension, Plastic Shape Function, stochastic dynamics, Monte Carlo Simulation

Plastische Formfunktionen der Plattensysteme –

Reduzieren modale DOF für stochastische nichtlineare Dynamik
der großen Plattensysteme

Zusammenfassung

Untersucht werden Platten unter stochastischen dynamischen Anregungen mit Berücksichtigung der Material-Nichtlinearität. Zur Beschreibung der auftretenden Plastizierungen wird ein 2D hysteretisches Materialmodell verwendet. Um die Anzahl der modalen Freiheitsgrade der numerischen Analyse im Zeitbereich ähnlich wie in der elastischen Dynamik reduzieren zu können, werden "Plastische Formfunktionen" eingeführt, die speziell den plastischen Krümmungsanteilen angepasst sind und mittels FEM systematisch entwickelt werden. Das hohe Reduktionspotential ermöglicht z.B. 10.000 Monte-Carlo-Simulationen an einer Flachdecke mit ca. 30.000 FEM-Freiheitsgraden.

Schlüsselwörter

Plattensystem, flache Decke, 2D hysteretische Materialmodell, FEM, BFS/Schäfer Plattenelement, modale Erweiterung, Plastische Formfunktionen, stochastische Dynamik, Monte Carlo Simulation

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Baumechanik der Technischen Universität München während meiner selbständigen Tätigkeit in den Jahren 2002-2006.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Grundmann danke ich herzlich für die fachliche Unterstützung und die Diskussionsbereitschaft während der Ausarbeitung. Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Müller und Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bischoff gilt mein Dank für die zahlreiche Anregungen und die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. K.-U. Bletzinger danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Allen meinen Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die freundliche Arbeitsatmosphäre und die Hilfsbereitschaft, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Kai Müller. Ich möchte auch den Leuten danken, die mir hier in Deutschland geholfen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihren steten Rückhalt und ihr Verständnis für meine lange Abwesenheit in der vergangenen Jahre.

Meiner Frau danke ganz herzlich ich für ihre Begleitung und ihre Unterstützung.

München, im März 2007 Yuh-Luen Lin

Contents

Notation

Abbreviation

2D-HMiPSP	two-dimensional hysteretic model in principal stress plane
DMCS	direct Monte-Carlo simulation
DOF	degrees of freedom
ESL	equivalent statistical linearization
MCS	Monte-Carlo simulation
MDOF	multi degrees of freedom
NSD	nonlinear stochastic dynamics
PSF	plastic shape function
SDOF	single degree of freedom
VYD	value of yielding determinate of the 2D-HMiPSP

Latin Alphabet

$B_{x,i}, B_{y,i}, B_{xy,i}$	interpolation functions of curvatures
$\mathbf{C}_e$	element damping matrix
E	Young's modulus
E^t	tangential stiffness or post-yielding strength
f_B	body force
f_S	surface force
f_T	D'Alembert's inertial force
$F(\sigma_{ij})$	yield function
G	shear modulus
h	thickness of plate
$H(t)$	Heaviside function
$\mathbf{H}_{ex}, \mathbf{H}_{ey}, \mathbf{H}_{exy}$	vectors of accessory hysteretic equations
J_1', J_2', J_3'	invariants of deviatoric stress tensor
K^P	plastic modulus
K_b	bending stiffness of the plate
$\mathbf{K}_e$	element stiffness matrix of elasticity
$\mathbf{K}_{ex}, \mathbf{K}_{ey}, \mathbf{K}_{exy}$	element stiffness matrices of hysteresis
m_x, m_y, m_{xy}	bending and twisting moments per unit length
$\tilde{M}_p$	plastic limit of moment
$\tilde{M}_y$	elastic limit of moment

$\mathbf{M}_e$	element mass matrix
$N(x,y)$	shape function of deflection
$\tilde{N}(x,y)$	interpolation functions of variable Y
$\tilde{\mathbf{p}}(t)$	vector of stochastic loading process
$\bar{p}(x,y,t)$	dynamic area load
$\bar{\mathbf{P}}_e(t)$	equivalent element nodal forces
S_{ij}	deviatoric stress components
$\mathbf{S}$	deviatoric stress tensor
$\mathbf{S}(\omega)$	spectral density function
$u(x,y,z)$	elongations of plate in x-direction
δU	vector of virtual displacement
$v(x,y,z)$	elongations of plate in y-direction
$w(x,y,t)$	deflections of plate
w_i^*	generalized degree of freedom
$\mathbf{w}_e$	vector of the nodal deformations
$\ddot{\mathbf{w}}_e$	vector of nodal accelerations
$\delta W, \delta W_i, \delta W_e$	total, internal and external virtual work
Y	hysteretic variable for moment-curvature correlations
$\mathbf{Y}_{ex}, \mathbf{Y}_{ey}, \mathbf{Y}_{exy}$	vectors of hysteretic variables
z	hysteretic variable of nonlinear restoring forces

Greek Alphabet

α	ratio of post-yielding to preyielding stiffness
$\boldsymbol{\alpha}^h$	hardening parameters
δ_{ij}	Kronecker delta
ϵ_Y	yield strain
ϵ_{ij}	strain components
ϵ'_{ij}	deviatoric strain components
$\boldsymbol{\epsilon}$	strain tensor
$\tilde{\kappa}_p$	plastic limit of curvature
$\tilde{\kappa}_y$	elastic limit of curvature
$\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$	bending and twisting curvatures
ν	Poisson's ratio
μ_G, β_G	coefficients of Gumbel-distribution
μ_S, σ_S	mean and standard deviation of simulation results
ω_i	natural frequency
$\psi(x,y)$	rotation angles of cross-sections of plate
ϕ_i	eigenvector
$\psi_p, \tilde{\psi}_p$	plastic shape function, orthogonalized
$\mathbf{\Phi}$	mode-shape matrix
ρ	density of material
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	principal stresses
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	plane stresses in Cartesian coordinate
σ_Y, σ_Y^0	yield stress, initial yield stress
σ_{ij}	stress components

θ	principal stress angle
$\tilde{\theta}$	principal strain angle
θ_m	equally distributed random phase angle between $[0..2\pi]$
$\boldsymbol{\sigma}$	stress tensor
τ_Y	yield stress of pure shear
ξ	hysteretic variable for stress-strain correlations
ζ_i	damping ratio
æ	element damping coefficient