

Querkraftwiderstand und Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten

Abhandlung
zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
Thomas Jäger
Dipl. Bauingenieur ETH/HTL
geboren am 05. Oktober 1973
Bürger von Pfäfers-Vättis SG

angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Peter Marti, Referent
Prof. Dr. Jürg Dual, Korreferent

Kurzfassung

Stahlbetonplatten gehören zu den wichtigsten und am häufigsten verwendeten Tragelementen bei der Betonbauweise. Allerdings wurde das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten mit und ohne Querkraftbewehrung bislang noch unzureichend erforscht. Insbesondere stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Plattendicke sowie Abweichungen der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtungen von den Bewehrungsrichtungen auf den Querkraftwiderstand und das Verformungsvermögen haben. Zudem interessiert der minimal erforderliche Querkraftbewehrungsgehalt, mit welchem der Massstabeffekt bei dicken Platten eliminiert und ein duktiler Biegeversagen sichergestellt werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojekts "Verformungsvermögen von Massivbautragwerken" wurde zur Abklärung dieser Fragen am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich ein umfangreiches Versuchsprogramm an Stahlbetonplatten mit und ohne Querkraftbewehrung durchgeführt. Die gewonnenen experimentellen Erkenntnisse bilden die Grundlage für das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Erweiterte Sandwichmodell.

Im ersten Teil werden die relevanten Eigenschaften von Stahl und Beton eingeführt sowie das Zusammenwirken von Stahl und Beton anhand des Zuggurtmodells behandelt. Im weiteren wird hinsichtlich Querkrafttragverhalten eine einfache lineare Schubspannungs-Rissöffnungsbeziehung zur Beschreibung der Rissverzahnung im Plattenkern vorgeschlagen.

Im zweiten Teil werden die Theorie des plastischen Potentials und die beiden Grenzwertsätze der Plastizitätstheorie erläutert. Im weiteren werden die für die Beschreibung des Betons geeignete modifizierte Fließbedingung von Coulomb sowie die Grundlagen von statischen und kinematischen Diskontinuitäten dargestellt.

Im dritten Teil wird ein Überblick über die heute üblichen Bemessungsverfahren für Stahlbetonplatten gegeben. Nach einem Abriss der statischen und kinematischen Beziehungen werden die Normalmomenten-Fließbedingung und das Sandwichmodell vorgestellt, wobei lediglich orthogonal bewehrte Plattenelemente betrachtet werden. Insbesondere wird auf die vorhandenen Bemessungsverfahren für die verschiedenen Scheibenelemente des Sandwichmodells eingegangen, und die für die Rissbildung sowie das Trag- und Verformungsverhalten massgebenden Dicken der Sandwichdeckel werden definiert.

Der vierte Teil stellt den Hauptteil dieser Arbeit dar. Mit dem Erweiterten Sandwichmodell wird ein allgemeines mechanisches Modell zur Beschreibung des Tragwiderstands und des Verformungsvermögens von Stahlbetonplatten mit und ohne Querkraftbewehrung unter allgemeinst möglicher Beanspruchung vorgestellt. Dem Plattenkern werden spannungsbehaftete rotierende Risse zugeschrieben, und die Querkraftabtragung wird in einen Beton- und einen Bewehrungsanteil aufgeteilt. Im Gegensatz zur Normalmomenten-Fließbedingung wird bezüglich Biegeverhalten der für das Trag- und Verformungsverhalten relevante Einfluss von Abweichungen der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtungen von den Bewehrungsrichtungen erfasst. Hinsichtlich der Beschreibung des Querkrafttragverhaltens erlaubt das Erweiterte Sandwichmodell eine allgemeine Behandlung der Hauptquerkraftabtragung sowie die Erfassung der durch die Querkraftbeanspruchung verursachten Schiebungen im Plattenkern, und die experimentell gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Massstabeffekt sowie einer Abweichung der Hauptquerkraftrichtung von den Biegebewehrungsrichtungen werden bestätigt. Ein Vergleich von experimentellen Resultaten mit theoretischen Vorhersagen nach dem Erweiterten Sandwichmodell zeigt im allgemeinen sowohl bezüglich Tragwiderstand als auch bezüglich Verformungsvermögen eine gute Übereinstimmung.

Im fünften und letzten Teil werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und entsprechende Folgerungen formuliert. Abschliessend wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungstätigkeiten gegeben.

Abstract

Reinforced concrete slabs are among the most important and most frequently used structural concrete members. However, the shear strength and the deformation capacity of reinforced concrete slabs with and without transverse reinforcement have not yet been investigated in a sufficient way. In particular, the questions whether the slab thickness as well as deviations of the principal shear and moment directions from the directions of the in-plane reinforcement influence the shear strength and the deformation capacity, so far remained unanswered. Also of interest is the minimum transverse reinforcement ratio that eliminates the size effect in thick slabs, leading to ductile failures. Within the framework of the research project “Deformation Capacity of Structural Concrete” an extensive series of tests on reinforced concrete slab specimens with and without transverse reinforcement was conducted at the Institute of Structural Engineering of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich. The test results served as a basis to develop the extended sandwich model described in this thesis.

In the first part of the thesis, relevant steel and concrete properties are introduced and the interaction between steel and concrete is treated with the so-called tension chord model. Concerning the behaviour in shear, a simple linear shear stress-crack width relationship is suggested to describe the shear transfer in the cracked core.

The second part of the thesis addresses important aspects of the theory of plasticity. After an explanation of the theory of the plastic potential and the theorems of limit analysis, the modified Coulomb yield criterion, suitable to describe the concrete behaviour, as well as the basics of static and kinematic discontinuities are discussed.

In the third part of the thesis an overview of the common design procedures for reinforced concrete slabs is given. The static and kinematic relationships are summarised and the normal moment yield criterion as well as the sandwich model for orthogonally reinforced concrete slab elements are presented. In particular, different design methods for reinforced concrete elements in plane stress are introduced with regard to the design of the covers and the core of the sandwich. The thickness of the covers, having a major influence on the strength and the deformation capacity as well as the crack width, is defined.

With the so-called extended sandwich model the fourth part of the thesis introduces a new general mechanical model to describe the strength and the deformation capacity of reinforced concrete slabs with and without transverse reinforcement. The cracks in the core are assumed to be rotating and capable of transferring shear stresses, resulting in the total shear resistance being subdivided into a concrete and a steel contribution. Unlike the normal moment yield criterion, the extended sandwich model permits to consider the significant influences on the flexural behaviour of deviations of the principal shear and moment directions from the the in-plane reinforcement directions. Regarding shear strength, the extended sandwich model allows a general treatment of the principal shear force and the shear strains in the core can be calculated. The experimental evidence relating to size effects as well as to deviations of the principal shear direction from the in-plane reinforcement directions is confirmed. A comparison of experimental data and theoretical predictions according to the extended sandwich model generally shows a good agreement regarding both strength and deformation behaviour.

In the fifth part of the thesis, the main results are summarised, conclusions are drawn and future research projects are suggested.