Strength and deformations of structural concrete subjected to in-plane shear and normal forces

Doctoral Thesis**Author(s):**

Kaufmann, Walter

Publication date:

1998

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001945805>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 12711

Strength and Deformations of Structural Concrete Subjected to In-Plane Shear and Normal Forces

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Walter Hans Jakob Kaufmann
Dipl. Bauingenieur ETH
born 2 March 1967
citizen of Wildhaus, SG

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Peter Marti, examiner
Dr. Christopher T. Morley, coexaminer

1998

Abstract

This thesis aims at contributing to a better understanding of the load-carrying and deformational behaviour of structural concrete subjected to in-plane shear and normal forces. Simple, consistent physical models reflecting the influences of the governing parameters are developed on whose basis (i) a realistic assessment of the deformation capacity of structural concrete subjected to in-plane loading is possible, (ii) the limits of applicability of the theory of plasticity to structural concrete can be explored, and (iii) current design provisions can be critically reviewed, supplemented and harmonised.

In the first part of this thesis relevant properties of concrete and reinforcement are examined, basic aspects of the theory of plasticity and its application to structural concrete are summarised, previous work on plane stress in structural concrete is reviewed, and fundamental aspects of the behaviour of cracked concrete membranes are investigated.

In the second part a new model for cracked, orthogonally reinforced concrete panels subjected to a homogeneous state of plane stress is presented. The cracked membrane model combines the basic concepts of original compression field approaches and a recently developed tension chord model. Crack spacings and tensile stresses between the cracks are determined from first principles and the link to limit analysis methods is maintained since equilibrium conditions are expressed in terms of stresses at the cracks rather than average stresses between the cracks. Both a general numerical method and an approximate analytical solution are derived and the results are compared with previous theoretical and experimental work. Simple expressions for the ultimate load of reinforced concrete panels in terms of the reinforcement ratios and the cylinder compressive strength of concrete are proposed, the influences of prestressing and axial forces are examined and basic aspects of the behaviour of uniaxially reinforced panels are discussed.

In the third part the behaviour of beams in shear is examined, focusing on simplified models for girders with flanged cross-section. For regions where all static and geometric quantities vary only gradually along the girder axis a procedure is presented that allows carrying out load-deformation analyses of the web, accounting for tension stiffening of the stirrups and the variation of the principal compressive stress direction over the depth of the cross-section. The results are compared with typical design assumptions and with previous work, justifying the usual design assumption of a uniform uniaxial compressive stress field in the web. Discontinuity regions characterised by abrupt changes of static quantities are analysed using the practically relevant case of the support region of a constant-depth girder with flanged cross-section as an illustrative example. Fan-shaped discontinuous stress fields with variable concrete compressive strength are examined and a method that allows checking whether the concrete stresses are below the concrete compressive strength throughout the fan region is presented. The results are compared with typical design assumptions and with previous experimental work. A previously suggested design procedure for support regions is supplemented and justified.

The fourth part summarises and discusses the results obtained in the first three parts of this thesis and concludes with a set of recommendations for future research.

Kurzfassung

Diese Dissertation soll zu einem besseren Verständnis des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbeton unter ebener Beanspruchung beitragen. Es werden einfache und konsistente physikalische Modelle entwickelt, welche die massgebenden Einflüsse erfassen und auf deren Basis (i) eine realistische Beurteilung des Verformungsvermögens von Stahlbeton im ebenen Spannungszustand möglich ist, (ii) die Grenzen der Anwendbarkeit der Plastizitätstheorie auf Stahlbeton erforscht und (iii) gängige Bemessungsvorschriften kritisch beurteilt, ergänzt und harmonisiert werden können.

Im ersten Teil werden relevante Eigenschaften von Beton und Bewehrung untersucht, Grundzüge der Plastizitätstheorie und ihrer Anwendung auf Stahlbeton zusammengefasst, frühere Arbeiten über Stahlbeton im ebenen Spannungszustand erörtert und das Verhalten von gerissenen Betonscheibenelementen analysiert.

Im zweiten Teil wird ein neues Modell für gerissene, orthogonal bewehrte Betonscheibenelemente unter homogener ebener Beanspruchung vorgelegt. Das Gerissene Scheibenmodell kombiniert die Grundkonzepte der Druckfeldtheorie und eines unlängst entwickelten Zuggurtmodells. Rissabstände und Zugspannungen zwischen den Rissen werden von mechanischen Grundprinzipien abgeleitet, und die Verbindung zu Traglastverfahren bleibt erhalten, da Gleichgewicht in Spannungen an den Rissen – und nicht in mittleren Spannungen zwischen den Rissen – formuliert wird. Ein allgemeines numerisches Verfahren sowie eine analytische Näherungslösung werden hergeleitet und die Resultate mit früheren theoretischen und experimentellen Arbeiten verglichen. Einfache Ausdrücke für die Traglast in Funktion der Bewehrungsgehalte und der Zylinderdruckfestigkeit des Betons werden angegeben, der Einfluss von Vorspannung und Normalkräften wird untersucht und Grundzüge des Verhaltens von einachsig bewehrten Elementen werden diskutiert.

Im dritten Teil wird das Verhalten schubbeanspruchter profilierter Träger anhand vereinfachter Modelle untersucht. Für Bereiche, in welchen alle statischen und geometrischen Grössen entlang der Trägerachse nur allmählich variieren, wird ein Verfahren hergeleitet, welches Last-Verformungsanalysen des Steges unter Berücksichtigung des Verbundes der Bügel und der Variation der Hauptdruckspannungsrichtung über die Querschnittshöhe ermöglicht. Die Resultate werden mit gängigen Bemessungsannahmen und früheren Arbeiten verglichen, und es wird gezeigt, dass die übliche Annahme eines homogenen einachsigen Druckspannungsfeldes im Steg gerechtfertigt ist. Diskontinuitätsbereiche mit sprunghaft veränderlichen statischen Grössen werden anhand des Auflagerbereichs eines parallelgurtigen profilierten Trägers untersucht. Fächerförmige diskontinuierliche Spannungsfelder mit veränderlicher Betondruckfestigkeit werden analysiert, und ein Verfahren wird hergeleitet, mit welchem überprüft werden kann, ob die Spannungen im gesamten Fächerbereich unterhalb der Betondruckfestigkeit liegen. Die Resultate werden mit gängigen Bemessungsannahmen und früheren Arbeiten verglichen. Ein früher vorgeschlagenes Bemessungsverfahren für Auflagerbereiche wird ergänzt und seine Berechtigung wird nachgewiesen.

Im vierten Teil werden die Resultate zusammengefasst und diskutiert sowie eine Reihe von Möglichkeiten für weiterführende Forschungsarbeiten aufgezeigt.

Résumé

Cette thèse vise à contribuer à une meilleure compréhension de la capacité portante et du mode de déformation du béton armé soumis à des sollicitations membranaires par efforts normaux et tranchants. Des modèles simples, consistants et tenants compte des paramètres principaux sont développés, permettant (i) d'évaluer de façon réaliste la capacité de déformation des structures en béton armé soumises à des sollicitations membranaires, (ii) d'explorer les limites de l'application de la théorie de la plasticité au béton armé, et (iii) de réviser, compléter et harmoniser les règles de dimensionnement contemporaines.

La première partie examine les propriétés essentielles du béton et de l'acier, récapitule les bases de la théorie de la plasticité et de son application au béton armé, discute les études antérieures sur le sujet du béton armé soumis à des sollicitations membranaires et étudie les aspects fondamentaux du comportement des membranes fissurées en béton.

La seconde partie présente un nouveau modèle pour les panneaux fissurés en béton à armature orthogonale soumis à des sollicitations membranaires homogènes. Le modèle de la membrane fissurée combine les concepts de base des modèles de champ de compression et d'un modèle de membrure en traction récemment développé. Les espacements des fissures et les contraintes entre les fissures sont déterminés à partir des principes mécaniques de base et le lien aux concepts de l'analyse limite est maintenu en exprimant l'équilibre en termes des contraintes aux fissures, plutôt qu'en termes des contraintes moyennes entre les fissures. Une méthode numérique générale et une solution analytique approximative sont développées et les résultats sont comparés aux études théoriques et expérimentales précédentes. Des expressions simples pour la charge limite en fonction des taux d'armature et de la résistance du béton à la compression sur cylindre sont proposées, les influences de la précontrainte et de forces normales sont examinées et le comportement des panneaux armés unidirectionnellement est examiné.

La troisième partie examine le comportement des poutres profilées dont seule l'âme résiste à l'effort tranchant, en utilisant des modèles simplifiés. Pour les régions où les grandeurs statiques et géométriques ne changent que graduellement le long de l'axe de la poutre une méthode permettant d'effectuer des analyses de charge-déformation de l'âme est présentée, tenant compte de la contribution du béton tendu et de la variation de la direction des contraintes principales de compression sur la hauteur de l'âme. Les résultats sont comparés aux hypothèses de calcul courantes et aux études antérieures, justifiant l'hypothèse habituelle d'un champ de compression uniaxial uniforme dans l'âme. Les régions de discontinuité avec changements brusques de grandeurs statiques sont analysées en utilisant une zone d'appui d'une poutre profilée de hauteur constante comme exemple illustratif. Des champs de contraintes discontinus en forme d'éventails avec résistance à la compression variable du béton sont examinés, et une méthode permettant de vérifier si les contraintes sont au-dessous de la résistance à la compression dans toute la région de l'éventail est présentée. Les résultats sont comparés aux hypothèses courantes de calcul et aux études antérieures. Une méthode de dimensionnement pour les zones d'appui suggérée antérieurement est complétée et justifiée.

La quatrième partie récapitule et discute les résultats obtenus et examine quelques possibilités pour des recherches ultérieures.

Riassunto

La presente tesi vuole contribuire ad una migliore comprensione della capacità portante e della deformazione del cemento armato sottoposto a forze piane normali e di taglio. Vi vengono sviluppati semplici e consistenti modelli fisici in considerazione dei parametri principali, tali da (i) permettere di valutare la capacità di deformazione del cemento armato soggetto ad uno stato di tensione piano; (ii) poter verificare i limiti di applicazione della teoria della plasticità sul cemento armato, e (iii) rivedere, completare ed armonizzare le attuali norme di dimensionamento.

Nella prima parte si esaminano le proprietà essenziali del calcestruzzo e dell'armatura, si riepilogano aspetti sostanziali della teoria della plasticità e della sua applicazione al cemento armato, si passano in rassegna precedenti studi sul cemento armato in stato di tensione piano e si indagano aspetti fondamentali riguardanti il comportamento di lastre di calcestruzzo fessurate.

Nella seconda parte viene presentato un nuovo modello per lastre di calcestruzzo fessurate e armate ortogonalmente, soggette ad uno stato di tensione piano e omogeneo. Nel modello di lastra fessurata si associano i concetti fondamentali dell'approccio originario mediante campi di compressione con un modello di corrente teso recentemente sviluppato. Le distanze tra le fessure e le tensioni tra le stesse vengono determinate partendo da principi meccanici di base; la relazione con i metodi dell'analisi limite è garantita dalla formulazione delle equazioni di equilibrio in termini di tensioni alle fessure, anziché di tensioni medie tra le stesse. Un metodo numerico generale ed una soluzione analitica approssimata vengono derivati e confrontati con precedenti studi teorici e sperimentali. Si propongono semplici espressioni per il carico limite di lastre in cemento armato in funzione del tasso d'armatura e della resistenza a compressione su cilindro del calcestruzzo, si esaminano l'influenza delle forze normali e di precompressione, e vengono infine discussi aspetti essenziali del comportamento di lastre armate in una sola direzione.

Nella terza parte è studiato con modelli semplificati il comportamento al taglio di travi profilate. Viene presentato un procedimento che consente di svolgere analisi di carico-deformazione dell'anima per regioni ove tutte le grandezze statiche e geometriche variano gradualmente lungo l'asse della trave, tenendo conto dell'aderenza delle staffe e della variazione di direzione delle tensioni principali lungo l'altezza della sezione. I risultati vengono comparati con le correnti ipotesi di dimensionamento e con precedenti studi, giustificando la consueta ipotesi di un campo di compressione uniassiale e uniforme nell'anima. Regioni discontinue, caratterizzate da improvvisi cambiamenti delle grandezze statiche, sono analizzate sulla scorta dell'esempio illustrativo della regione di appoggio di una trave profilata di altezza costante. Vengono esaminati campi di tensione discontinui a forma di ventaglio e con una variabile resistenza del calcestruzzo, e si presenta un metodo con cui è possibile la verifica delle tensioni nel calcestruzzo in rapporto alla sua resistenza su tutto il ventaglio. I risultati sono confrontati con le correnti ipotesi di dimensionamento e con studi sperimentali precedenti. Un metodo di dimensionamento per le regioni di appoggio viene completato e giustificato.

Nella quarta parte sono riassunti e discussi i risultati ottenuti e indicati vari possibili sviluppi a livello di ricerche successive.