

Dissertation Nr. 7006 *ex B*

Unelastisches Verhalten zyklisch verformter Stahlbetonbalken

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines

DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH



vorgelegt von

MARCO ROSSI

Dipl. Bauing. ETH

geboren am 20. Mai 1950

von Thalwil (Kanton Zürich)

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. Bruno Thürlimann, Referent

Prof. Dr. Hugo Bachmann, Korreferent

1982

Zusammenfassung

Die Tragsicherheit dynamisch belasteter Konstruktionen hängt ausser von den Belastungscharakteristiken insbesondere vom Tragwiderstand, der Duktilität und dem Dissipationsvermögen der einzelnen Bauteile ab. In der vorliegenden Arbeit werden Methoden entwickelt, die eine einfache Untersuchung dieser Eigenschaften für zyklisch und progressiv verformte Stahlbetonbalken erlauben. Die in Wirklichkeit vorhandene Interaktion zwischen Tragwiderstand und Belastung wird nicht untersucht. Den Berechnungen liegen die Annahmen der klassischen Balkentheorie zugrunde.

Im Teil II wird einleitend das Verhalten von Stahl und Beton dargestellt. Nach einer kurzen Zusammenstellung der allgemein gültigen Gleichgewichtsbedingungen und kinematischen Relationen sind einige einachsige Stoffgesetze angegeben, welche zur Beschreibung der zyklischen Eigenschaften von Stahlbetonbalken verwendet werden können. Der Anwendungsbereich der einzelnen Stoffidealisationen wird diskutiert.

Zur numerischen Erfassung des Verhaltens von Tragelementen kann die Methode der Finiten Elemente herangezogen werden. Der Teil III enthält einige Begriffe dieser Methode, soweit sie für diese Arbeit relevant sind. Für Stahlbetonbalken werden anschliessend die Hypothesen und die sich daraus ergebenden Konsequenzen der Balkentheorie diskutiert. Mittels Computerberechnungen wird dann auf der Grundlage der klassischen Balkentheorie das Verhalten von Stahlbetonquerschnitten bei zyklischen und progressiven Verformungen untersucht. Damit lassen sich einerseits für das Verhalten massgebende Phänomene aufzeigen, andererseits werden die in dieser Arbeit verwendeten Modelle untereinander und mit Versuchsergebnissen verglichen.

Einzelne Aspekte der vorangehenden Parameterstudie sind mittels speziell einfacher Stoffgesetze analytisch näher untersucht. Der Einfluss einer "verschmierten" Rissbildung auf die Steifigkeitsentwicklung kann bei Vernachlässigung der Betonzugfestigkeit mit elastischen Stoffgesetzen erfasst werden. Zur Beschreibung der Maximalwiderstände wird starr-ideal plastisches Materialverhalten herangezogen. Eine Näherungslösung für die Bestimmung der Hysterese-Schleifen und des Dissipationsvermögens ermöglicht die Beurteilung des Verhaltens zyklisch beanspruchter Balken. Der Einfluss entfestigender Betoneigenschaften ist im letzten Kapitel dieses Teils behandelt. Mittels starr-plastischer Stoffgesetze (Stahl: ideal plastisch; Beton: entfestigend plastisch) sind Momenten-Verformungs-Beziehungen und Momenten-Normalkraft Interaktionsgleichungen hergeleitet. Das entwickelte Modell erlaubt die Bestimmung der Maximalduktilität von Stahlbetonquerschnitten.

Die in dieser Arbeit verwendeten Modelle zur Ermittlung der Hysterese-Form (Kapitel 10) und des Einflusses der Betonentfestigung (Kapitel 11) lassen sich direkt für die Bemessung und Beurteilung des Verhaltens von Stahlbetonquerschnitten verwenden.

Im Teil IV sind zu Beginn einige Probleme der Modellierung von Stabtragwerken mit unelastischem Materialverhalten untersucht. Es zeigt sich, dass die Resultate der klassischen Balkentheorie besonders für entfestigendes Materialverhalten vorsichtig interpretiert werden müssen. Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse einer numerischen Parameterstudie an einfachen Rahmen dargestellt. Mittels vereinfachter analytischer Berechnungen wird dann der

Einfluss verschiedener Verschiebungsmechanismen von Rahmensystemen und der Materialentfestigung diskutiert und mit numerischen Berechnungen verglichen.

Ueberlegungen zur Anwendung der Resultate der vorliegenden Arbeit sowie Anregungen zu weiteren Forschungsarbeiten sind im Teil V skizziert. Im besonderen werden Gedanken zu einem möglichen - zu den bisherigen Verfahren alternativen - Bemessungsvorgehen dargelegt.

Summary

Besides the loading characteristics the safety of dynamically loaded structures is influenced mainly by the strength, the ductility and the energy dissipation capacity of the individual structural members. The aim of this thesis is to develop simple models in order to evaluate these properties for cyclically loaded reinforced concrete beams. No interaction of the structural properties and the loading is taken into account. The calculations are based on the classical beam theory.

In Part II the behavior of reinforcing steel and concrete is presented and the equilibrium conditions and the kinematical relations briefly reviewed. Some uniaxial constitutive relationships, which can be used to describe the cyclic properties of reinforced concrete beams, are given. The range of utilization is discussed.

The numerical evaluation of the behavior of structural members can be realized using the Finite Element method. Part III contains the basic concepts of this method, as far as they are relevant to the present investigation. The hypotheses and the resulting consequences of the beam theory are subsequently discussed. Based on the classical beam theory, investigations on cyclically and progressively loaded cross-sections are then carried out numerically. Thereby, on one hand, the governing phenomena can be demonstrated and, on the other hand, different models compared with each other and with experimental results.

Some aspects of the preceding parameter study are examined analytically using simple material properties. The influence of "smeared" cracks on the stiffness can be taken into account in the elastic material behavior, neglecting the tensile strength of concrete. The calculation of the ultimate strength is done with rigid-ideal plastic constitutive relationships. An approximative model for the evaluation of the hysteresis-loops and the energy dissipation reflects the main aspects of cyclically loaded beams. The influence of strain softening in concrete is discussed in the last chapter of this part. With a rigid-plastic model (steel: ideal plastic; concrete: softening) moment-curvature characteristics and moment-normal force interaction curves are derived. This model allows for the determination of the maximum ductility of reinforced concrete cross-sections.

For design and for the understanding of the behavior of reinforced concrete members subjected to cyclic loads, direct practical use can be made of these rigid-plastic models (chapters 10 and 11).

Part IV starts with some difficulties encountered in modelling inelastic structures. It is shown that the results obtained by using the beam theory have to be carefully checked, especially if softening characteristics are involved. In the following chapter a numerical parameter study on frames is carried out. Subsequently, the influence of different deformation mechanisms for framed structures and material softening are discussed with a simplified analytical model. These results are compared with numerical calculations.

Considerations on the application of the present investigations as well as suggestions for future research are outlined in Part V. In particular, some ideas on a possible design procedure - differing from the usual methods - are put forward.

Résumé

La sécurité des structures porteuses sollicitées par des charges dynamiques dépend - à part des caractéristiques des charges - surtout de la résistance ultime, de la ductilité et de la capacité dissipative des structures porteuses individuelles. Le but du travail présenté est de développer des modèles qui permettent d'étudier le comportement des poutres en béton armé soumises à des sollicitations cycliques et progressives. On ne tient pas compte de l'interaction de la résistance et des charges. Les calculs sont basés sur la théorie des poutres.

Dans la partie II, on présente le comportement des barres d'armature et du béton. Après avoir brièvement rappelé les conditions d'équilibre et les relations cinématiques on donne quelques indications sur des lois de comportement uniaxiales, qui sont utilisées pour l'évaluation des propriétés cycliques des poutres en béton armé. L'application des modèles est discutée.

Le calcul numérique du comportement des structures porteuses peut être exécuté avec la méthode des éléments finis. La partie III contient les notions de cette méthode, utilisées pour ce travail. Pour des poutres en béton armé les hypothèses de la théorie des poutres et leurs conséquences sont discutées. A l'aide de la théorie classique des poutres, on étudie numériquement le comportement des sections en béton armé soumises à des sollicitations cycliques ou progressives. Ainsi, on peut d'une part constater les phénomènes principaux, et d'autre part comparer les résultats obtenus à l'aide des différents modèles avec ceux déterminés expérimentalement.

Quelques aspects de l'étude paramétrique précédente sont étudiés analytiquement à l'aide de lois de comportement simples. L'influence d'une fissuration nominale sur la rigidité peut être modélisée avec des caractéristiques élastiques en négligeant la résistance à la traction du béton. Pour calculer les résistances ultimes on idéalise les matériaux rigides-parfaitement plastiques. Une solution approximative pour le calcul des cycles d'hystérésis et de la capacité dissipative permet de juger le comportement des poutres soumises à des déformations cycliques. L'influence de la branche descendante du béton est traitée dans le dernier chapitre de cette partie. Avec des lois de comportement rigide-plastiques (armature: parfaitement plastique; béton: branche plastique descendante) les caractéristiques moment-courbure et l'interaction moment-effort normal sont dérivées. Avec ce modèle on arrive à déterminer la ductilité maximale d'une section en béton armé.

Les modèles proposées dans le chapitre 10 (parfaitement plastique) et dans le chapitre 11 (branche plastique descendante) peuvent être utilisés directement pour le dimensionnement.

Dans la partie IV on analyse d'abord quelques problèmes de la modélisation des structures porteuses composées de poutres dans le domaine inélastique. La conclusion de ces réflexions est qu'il faut interpréter très prudemment les résultats de la théorie classique des poutres, surtout si on tient compte des branches descendantes des matériaux. Dans le chapitre suivant les résultats d'une étude numérique de paramètres effectuée pour des cadres simples sont présentés. Avec un calcul analytique approximatif, on discute l'influence des mécanismes et de la branche descendante des matériaux. Les résultats analytiques sont comparés

avec des solutions numériques.

Dans la partie V on expose des réflexions sur l'application des résultats présentés et on fait des propositions pour des investigations futures. On présente aussi des idées concernant le développement possibles d'une nouvelle méthode de dimensionnement.