



Doctoral Thesis

Numerical modelling and capacity design of earthquake-resistant reinforced concrete walls

Author(s):

Linde, Peter

Publication Date:

1993

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000887859> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 10124

Numerical Modelling and Capacity Design of Earthquake-Resistant
Reinforced Concrete Walls

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Peter Linde
Tekn.Lic. LTH

born July 18, 1959
in Malmö
Citizen of Sweden

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hugo Bachmann, examiner
Prof. Dr. Edoardo Anderheggen, co-examiner

1993

ABSTRACT

Reinforced concrete structural walls constitute an important unit for the resistance of buildings against seismic action. In order to successfully design structures against earthquakes, it is therefore of interest to develop a numerical model which simulates the typical behaviour of these units. This thesis is concerned with numerical models intended to be used in analysis of complete buildings, with focus on capacity designed multi storey buildings.

A major part of the thesis is devoted to the development of a new macro model which simulates the highly nonlinear behaviour of structural walls based upon relatively simple kinematics and physical behaviour. The formulation of a macro element is presented.

As a complement to the macro model, a micro model is derived with which it is attempted to treat the behaviour of the different material components of a structural wall in a relatively detailed manner, yet also based upon physical observations.

The models are implemented into a general finite element code and extensive tests are presented including comparisons with experimental data.

An important part of the thesis deals with the capacity design of structural walls. Performance checks are carried out on capacity designed walls by means of the newly developed macro model.

It is shown that the dynamic curvature demand in the plastic hinge may be different than suggested in the existing capacity design procedure, when varied over different wall aspect ratios. It is further shown that during nonlinear time history analysis flexural yielding may frequently take place in the upper storeys of the wall which are intended to remain elastic, when the existing capacity design procedures are used. It is also shown that the dynamic shear forces may be larger than anticipated by existing capacity design assumptions.

An improved distribution of flexural strength over the height of the wall is proposed, which clearly reduces the risk of unintended yielding in the upper storeys.

Keywords: capacity design; ductility; dynamic structural analysis; earthquake-resistant structures; finite elements; flexural strength; hysteresis; reinforced concrete; shear strength; standards; stiffness; strength; structural analysis; structural design; walls

Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung numerischer Modelle für die Simulation des Verhaltens mehrstöckiger Stahlbetontragwände in Gebäuden, insbesondere kapazitätsbemessener Tragwände unter der Einwirkung von Erdbeben. Nach der Einführung und einer Uebersicht über bisherige Arbeiten auf diesem Gebiet werden zwei grundsätzlich verschiedene Modelle zur Weiterentwicklung ausgewählt.

Das erste der beiden Modelle, das sogenannte Makromodell, befasst sich mittels nichtlinearer Federn direkt mit dem Querschnittsverhalten der Tragwand. Es wurde eine effiziente und verständliche Version dieses Modelltyps entwickelt, wobei der Erfüllung einfacher kinematischer Bedingungen besondere Beachtung geschenkt wurde. Globale Hystereseregeln basieren im wesentlichen auf dem physikalischen Verhalten, wurden jedoch auch durch empirische Beobachtungen erweitert. Für die Steifigkeitsmatrix eines Makroelementes wurde ein geschlossener Ausdruck hergeleitet.

Das zweite Modell, Mikromodell genannt, basiert auf der Kontinuumsmechanik und auf nichtlinearen Stoffgesetzmodellen. Dieser Modelltyp wurde unter Berücksichtigung der wesentlichsten Effekte des Verhaltens von Stahlbeton entwickelt. Wie beim Makromodell wurden der Entwicklung sowohl das physikalische Verhalten als auch empirische Beobachtungen zugrunde gelegt. Die verschiedenen Anteile der Materialmodulmatrix für den Verbundwerkstoff Stahlbeton wurden in verständlicher Weise hergeleitet.

Die beiden Modelle wurden programmiert und in einem gegebenen Finite Elemente Programm implementiert. Die Benutzerfreundlichkeit der beiden Modelle wird durch die User Element und die User Material Optionen sichergestellt. Mit Hilfe der detaillierten Angaben in den Anhängen A und B ist es möglich, die beiden Modelle problemlos anzuwenden.

Sowohl mit dem Makro- als auch mit dem Mikromodell wurden numerische Testserien durchgeführt, die dazu dienten, die Zuverlässigkeit der Modelle aufgrund von Daten statischer Versuche zu überprüfen sowie die Einflüsse der Modellparameter abzuschätzen. Da keine geeigneten Versuchsdaten von dynamischen Beanspruchungen mehrstöckiger Tragwände zur Verfügung standen, dienten die Ergebnisse dynamischer Berechnungen mit dem Mikromodell als Vergleichsbasis für das Makromodell.

Nach einem Kapitel, das den Tests zur Ueberprüfung der Zuverlässigkeit numerischer Modelle sowie den Tests bezüglich des Verhaltens eines kapazitätsbemessene Gebäudes

gewidmet ist, wird in einem weiteren Kapitel auf einige spezielle Probleme der Bemessung mit der Kapazitätsmethode eingegangen. Diese werden anhand der hier entwickelten numerischen Modelle erläutert.

Eine achtstöckige kapazitätsbemessene Tragwand wird mit Makroelementen modelliert und dynamisch berechnet. Die Wand wird insbesondere auf Krümmungsduktilitätsbedarf im plastischen Gelenk, auf Biegemoment- und Querkraftbedarf untersucht. Ein Vorschlag zu einer verbesserten Verteilung des Biegeverbandes über die Höhe der Wand wird vorgestellt.

7.2 Schlussfolgerungen

In der Einführung wurde bereits darauf hingewiesen, dass es schwierig ist, ein für alle Rechenaufgaben ideales Modell für Tragwände zu bilden.

Zur Ueberprüfung des Verhaltens kapazitätsbemessener Tragwände wird das Makromodell als besonders geeignet erachtet, und zwar aufgrund

- seines realistischen Hystereseverhaltens und
- seiner Fähigkeit, Querschnittsgrößen, insbesondere Schnittgrößen und Krümmungsduktilität, wiederzugeben, sowie
- wegen seines begrenzten Rechenaufwandes.

Die Zuverlässigkeitsüberprüfungen des Makromodelles wurden aufgrund von Versuchsdaten statischer Versuche durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass das Makromodell fähig ist, die wichtigsten Aspekte der statischen Versuche ohne wesentliche Parametermodifikationen zu simulieren.

Weil vom dynamischen Verhalten mehrstöckiger Tragwände keine geeigneten Versuchsdaten vorliegen, wurde ein Mikromodell entwickelt, das als Vergleichsbasis bei der Beurteilung dynamischer Berechnungen dienen soll, und das auch als zusätzliches Modell für detaillierte Berechnungen und unregelmässige Geometrie verwendet werden kann.

Das Makromodell, dessen Entwicklung hier beschrieben wird, ist in erster Linie gut verständlich. Vertiefte Kenntnisse der Mechanik kontinuierlicher Medien sind weder für das Verstehen des Modells noch für dessen Anwendung notwendig. Das Makromodell besteht aus der absolut notwendigen Anzahl Elemente, die für eine umfassende Beschreibung der grundlegenden kinematischen Bedingungen notwendig sind. Das Modell erweist sich als effizientes Werkzeug, insbesondere im Fall zyklischen und dynamischen Verhaltens. Der Grund dafür ist, dass die vergleichsweise wenigen Elemente das globale Verhalten direkt beeinflussen. Im weiteren ist der Einfluss von Parametermodifikationen auf das globale Verhalten meist gut vorhersehbar.

Das Makromodell, wie es implementiert und im Anhang A beschrieben wurde, ist weiter besonders benutzerfreundlich. Bezogen auf das Mikromodell ist die normalerweise beträchtlich kleinere Anzahl Freiheitsgrade ausschlaggebend bei umfassenden dynamischen Rechenaufgaben, die sich bei der Modellierung grosser Systeme stellen. Während das Makromodell ein realistisches globales Verhalten zeigt, ist es dagegen nicht in der Lage, genaue Informationen über lokalisierte Schäden wie Rissrichtungen und lokales Fliessen der Bewehrung zu ermitteln. Das Makromodell baut im weiteren auf Voraussetzungen wie gleichmässige Wandgeometrie und symmetrischer Wandquerschnitt auf und ist demzufolge auch nicht in der Lage, Abweichungen, wie z.B. Oeffnungen, zu erfassen.

Das Mikromodell zeigt, dass es auch möglich ist, ein relativ klares und einfaches Materialmodell für gleichmässig bewehrte Tragwände zu entwickeln. Es stellte sich heraus, dass es in den meisten Fällen genügt, nur die wichtigsten Phänomene des Verhaltens des Stahlbetons in die Betrachtung einzubeziehen, um realistische globale Ergebnisse zu erhalten. Es wurde weiter gezeigt, dass es gut möglich ist, die verschiedenen Anteile der Materialmodulmatrix in separater Form darzustellen. Die Interaktionseffekte zwischen Stahl und Beton können in einer klaren Weise modelliert und auf verschiedenen Stufen generalisiert werden. Der Hauptvorteil betreffend die Ergebnisse liegt für das Mikromodell darin, dass es viel Information über lokale Schäden geben kann, wie z.B. Rissrichtungen und lokales Fliessen der Bewehrung in verschiedenen Richtungen. Weiterhin können geometrische Abweichungen und Oeffnungen mit Leichtigkeit modelliert werden.

Einige der schwerwiegenden Nachteile des Mikromodells liegen darin, dass es i.a. keine Querschnittsgrössen wie Schnittkräfte und Krümmungsduktilität wiedergibt, und dass es meistens verhältnismässig rechenintensiv ist, was insbesondere bei der Lösung umfangreicher dynamischer Probleme wesentlich ist. Im weiteren gilt auch, dass wenn das Mikromodell nicht als eine Black Box benützt werden soll, so muss der Anwender gewisse grundlegende Kenntnisse der nichtlinearen und orthotropen Mechanik besitzen.

Die durchgeführten Ueberprüfungen bezüglich des Verhaltens kapazitätsbemessener Tragwerke deuten darauf hin, dass während einer nichtlinearen dynamischen Berechnung mit den heutigen Empfehlungen der Methode der Kapazitätsbemessung ein gutmütiges Strukturverhalten erreichbar ist.

Die Ergebnisse der Zeitverlaufsberechnungen deuten allerdings darauf hin, dass hinsichtlich der Bemessung noch einige weitergehende Ueberlegungen anzustellen sind. Der dynamische Krümmungsduktilitätsbedarf im plastischen Gelenk, als Funktion der Wand schlankheit und der gewählten Verschiebeduktilität, unterscheidet sich von den bisherigen Angaben der Methode der Kapazitätsbemessung. Die bisher übliche Verteilung von Biegekapazität kann problematisch sein, und die heutigen Bemessungsempfehlungen

ermöglichen nicht immer eine Lösung auf der sicheren Seite. Dies ist insbesondere der Fall bei ausgeprägt schlanken Tragwänden. Durch eine Energiestudie wurde gezeigt, dass in einer flexiblen Wand in den oberen Stockwerken im Vergleich zum plastischen Gelenk mehr Energie dissipiert wird als in einer gedrunenen und daher steifen Wand. Der kurz beschriebene Vorschlag zur einer verbesserten Verteilung der Biegebewehrung scheint für das gezeigte Beispiel gut zu funktionieren, sollte aber noch genereller getestet werden.

Im weiteren ist zu erwähnen, dass die aus der Zeitverlaufsberechnung resultierende maximale Querkraft am Wandfuss die in den Empfehlungen der Methode der Kapazitätsbemessung angegebenen Werte deutlich übersteigt.

7.3 Ausblick

Die in diesem Bericht entwickelten Modelle erscheinen nur in einer grundlegenden Form, die einfache Vergleiche zu Versuchsergebnissen und gewisse Schätzungen des Verhaltens eines Tragwandkragarmes ermöglichen. Der Zweck dieser Modelle, in einer erweiterten Perspektive gesehen, ein Werkzeug darzustellen für Bemessungsunterstützung und für Berechnungen von gegebenen grossen Strukturen, konnte innerhalb des Rahmens dieser Arbeit noch nicht vollständig realisiert werden.

Es wird deshalb empfohlen, die notwendigen Modifikationen vorzunehmen und eine weitere Entwicklung dieser Modelle durchzuführen, so dass das Modellieren von komplizierteren Tragwänden, wie sie in reellen Gebäuden gefunden werden, künftig realisierbar wird. Besonders gedacht wird an Tragwände

- mit Koppelung zu Rahmensystemen,
- mit Koppelungsriegeln (gekoppelte Tragwände),
- ausgebildet als dreidimensionale Kerne, wie z.B. Treppenhäuser und Liftschächte.

Hinsichtlich der Verteilung der Biegekapazität von kapazitätsbemessenen Tragwänden, sollte eine umfassende Parameterstudie durchgeführt werden. Es sollte versucht werden, die effektive nichtlineare Momentenverteilung durch experimentelle und weitere numerische Studien zu bestätigen. Insbesondere sollten Wände mit verbesserter Biegekapazitäts-Verteilung durch nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen analysiert werden.

Die grössere Amplifikation der Querkräfte, die aus den Zeitverlaufsberechnungen resultierte, sollte durch eine weitere Parameterstudie überprüft werden. Ebenso sollten dynamische Versuche durchgeführt werden, die es erlauben, die Querkraft an der Wand zu messen, was bei den häufig vorkommenden komplizierten gemischten Wand-Rahmen Versuchskörpern nicht möglich ist.