

DISS. ETH Nr. 13741

**Pseudodynamische Versuche an Tragwerken  
mit großen Steifigkeitsänderungen  
und mehreren Freiheitsgraden**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
Klaus Thiele  
Dipl.-Ing., Technische Hochschule Darmstadt, Deutschland  
M.E.Sc., University of Western Ontario, London, Kanada  
geboren am 17.6.1967  
in Darmstadt, Deutschland.

Angenommen auf Antrag von  
Professor Dr. Hugo Bachmann, Referent  
Professor Dr. Marc Badoux, Korreferent  
Professor Dr. Ekkehard Fehling, Korreferent

2000

# Kurzfassung

Die Pseudodynamik ist eine moderne und effiziente Versuchstechnik zur Ermittlung der Antwort einer Struktur unter starker dynamischer, insbesondere unter Erdbebeneinwirkung. Mit dieser Technik wurden weltweit bereits zahlreiche verschiedene Versuche durchgeführt. Diese schließen Versuche an mehrstöckigen Gebäuden im Maßstab 1:1, Versuche an skalierten Strukturelementen von Gebäuden und Brücken, sowie dreidimensionale Versuche ein.

Die Effizienz der Pseudodynamik zeigt sich darin, dass mit verhältnismäßig geringem Aufwand das dynamische Verhalten eines Versuchskörpers untersucht werden kann. Dies ist sonst nur mit technisch hochwertiger und nur in relativ wenigen Labors der Welt vorhandenen Erdbebensimulatoren, auch Rütteltische genannt, möglich. Dagegen lassen sich pseudodynamische Versuche grundsätzlich mit Mitteln durchführen, die in vielen Labors des Bauingenieurwesens vorhanden sind.

Trotzdem werden pseudodynamische Versuche oft als zu kompliziert und zu aufwendig angesehen. Dabei zeigt die aktuelle Forschung im Erdbebeningenieurwesen, dass Versuche mit Berücksichtigung dynamischer Einflüsse eine sehr wertvolle Hilfe zur Beurteilung und Vorhersage des Verhaltens von Strukturen mit großen plastischen Verformungen bei dynamischer Einwirkung sind.

Auch für den Fall großer Steifigkeitsänderungen, wie sie bei Stahlbetonbauteilen durch Rissebildung und starkes Fließen der Bewehrung auftreten, und für mehrere Freiheitsgrade, wurden bisher schon verschiedene Versuche durchgeführt, vor allem in San Diego (USA), Ispra (Italien) und Tsukuba (Japan). Trotzdem gibt es bisher kaum Veröffentlichungen, welche die Pseudodynamik für diese Anwendung aufbereiten. Daher wird in dieser Arbeit, basierend vor allem auf Publikationen von P. B. Shing, M. Nakashima und O. S. Bursi, die Pseudodynamik systematisch aufgearbeitet. Anhand eigener Versuche wird die Wirkung von numerischen und experimentellen Parametern sowie von Fehlern, die durch den Algorithmus oder durch experimentelle Ungenauigkeiten auftreten können, untersucht.

Im Zentrum der Arbeit steht eine Anleitung zur Durchführung pseudodynamischer Versuche an Strukturen mit großen Steifigkeitsänderungen und mehreren Freiheitsgraden. Ein bekannter ausgewählter Algorithmus wird durch leichte Modifikation an diese Randbedingungen angepasst. Sämtliche Parameter werden aufgeführt, diskutiert und für die Anwendung vorbereitet. Die entwickelte Anleitung lässt sich aber ohne weiteres auf Versuchskörper mit geringeren Steifigkeitsänderungen und mit beispielsweise nur einem Freiheitsgrad anwenden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf pseudodynamischen Vorversuchen, die am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der ETH Zürich durchgeführt wurden und zur Vorbereitung von pseudodynamischen Versuchen an Stahlbetontragwänden mit drei Freiheitsgraden [Thiele et al. 2000] dienten. Diese sind Teil des Forschungsprojektes "Stahlbetontragwerke unter zyklischer dynamischer und statischer Einwirkung" in dem, für den in der Praxis tätigen Ingenieur, Methoden entwickelt werden sollen, um Stahlbetontragwandgebäude für die Einwirkung Erdbeben einfach und zuverlässig zu bemessen und konstruktiv durchzubilden.

# Abstract

The pseudodynamic testing method is an efficient experimental technique to determine the dynamic response of a structure under strong seismic impact. A variety of pseudodynamic tests have been conducted, including tests on full-sized multi storey structures, tests on scaled structural elements of buildings and bridges as well as three-dimensional tests.

The efficiency of pseudodynamic tests is based on the relatively modest effort it requires to obtain the dynamic response of a structure. Other techniques for this type of experiment include technically high-quality earthquake simulators, so called shake tables. They are available only in relatively few laboratories in the world. However, pseudodynamic tests can be carried out with means that are available in many civil engineering laboratories.

Nevertheless, pseudodynamic tests are often considered being too complicated and requiring too much effort. Yet the current research in earthquake engineering shows that dynamic tests are necessary to describe and predict the dynamic behavior of structured with large plastic deformations.

Up to now, several tests have been conducted with specimens exhibiting large changes in stiffness due to concrete cracking and steel yielding, particularly in San Diego (USA), Ispra (Italy) and Tsukuba (Japan). But so far, there are hardly any publications preparing the pseudodynamic testing method for these conditions. To fill this gap, this work systematically works up the pseudodynamic testing method, mainly based on publications of P. B. Shing, M. Nakashima and O. S. Bursi. Using results of own tests, the influence of numerical and experimental parameters, as well as the effects of due to the algorithm or due to experimental inaccuracy are examined.

The center of the work are instructions to conduct pseudodynamic tests with large changes in stiffness and multiple degrees of freedom. A chosen algorithm is slightly modified for an improved behavior under these conditions. All parameters are specified, discussed, and recommendations for their application are given. The results of this work refer to test specimens with the mentioned properties. However, they can also be applied to specimens with simpler properties, e.g. small changes in stiffness or a single degree of freedom.

The tests conducted for this work were pilot tests that were used to prepare pseudodynamic tests on structural RC walls with three degrees of freedom [Thiele et al. 2000]. They are part of the research project "reinforced concrete structures under cyclic, dynamic and static action" at the Institute of Structural Engineering (IBK) at the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETH). The scope of this project is to develop simple and reliable methods for the practical engineer to design RC wall buildings against earthquakes.

## Résumé

La méthode d'essai pseudodynamique est une technique expérimentale efficace pour déterminer la réponse dynamique d'une structure soumise à un violent séisme. De nombreux essais ont déjà été effectués avec cette méthode. Ils comprennent des essais grandeur nature de bâtiments à plusieurs étages, des essais en modèle réduit d'éléments de structure de bâtiments et de ponts ainsi que des essais en trois dimensions.

L'avantage des essais pseudodynamiques réside dans la relative modestie des moyens que la méthode requiert pour examiner la réponse dynamique d'une structure. Pour ce type d'essai, les autres techniques utilisent des simulateurs de séismes, les tables vibrantes, que peu de laboratoires dans le monde possèdent. En revanche les essais pseudodynamiques peuvent être effectués avec l'équipement usuel des laboratoires de génie civil.

Les essais pseudodynamiques sont pourtant souvent considérés comme étant trop compliqués et astreignants. Les travaux de recherche actuels dans le domaine de l'ingénierie parasismique montrent cependant que des essais dynamiques sont nécessaires pour décrire et prévoir le comportement dynamique des structures soumises à de grandes déformations plastiques.

Plusieurs essais avec d'importantes variations de rigidité dues à la fissuration du béton et à la plastification de l'acier ont déjà été effectués, en particulier à San Diego (USA), à l'ISPRA (Italie) et à Tsukuba (Japon). Toutefois, peu de publications traitent de l'application de la méthode à ces conditions extrêmes. Pour combler cette lacune, ce travail adapte la méthode pseudodynamique en se basant avant tout sur les publications de P. B. Sching, M. Nakashima et O. S. Bursi. Les résultats d'essais effectués par l'auteur ont été utilisés pour examiner l'influence des paramètres expérimentaux et numériques ainsi que les effets des erreurs engendrées par l'algorithme ou par les imprécisions expérimentales.

Le but du travail est d'établir un mode d'emploi pour la réalisation d'essais pseudodynamiques avec de grandes variations de rigidité et plusieurs degrés de liberté. Un algorithme connu a été légèrement adapté pour ces conditions. Tous les paramètres sont identifiés et discutés. Des recommandations pour leur utilisation sont également formulées. Les résultats de ce travail s'appliquent tel quel à des essais plus simples avec des variations de rigidité modérées et un seul degré de liberté.

Les essais effectués pour ce travail constituaient les essais préliminaires pour préparer des essais pseudodynamiques à trois degrés de liberté avec des parois en béton armé. Ces essais font partie du projet de recherche "Structures porteuses en béton armé soumises à des sollicitations cycliques, dynamiques et statiques" de l'Institut de Statique et Structures (IBK) de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich (EPFZ). Le but de ce projet est de développer pour l'ingénieur praticien des méthodes simples et sûres pour le dimensionnement parasismique des parois en béton armé.

## Riassunto

Le prove pseudodinamiche sono un'efficace tecnica sperimentale per determinare la risposta dinamica di una struttura sottoposta ad un'azione sismica intensa. Con questa tecnica, a livello mondiale, sono già state eseguite svariate prove: ad esempio su edifici multipiano in scala 1:1, su elementi strutturali in scala ridotta sia di edifici che di ponti, nonché prove con sollecitazione tridimensionale della struttura.

Uno dei vantaggi fondamentali delle prove pseudodinamiche consiste nel determinare la risposta dinamica della struttura analizzata in modo poco dispendioso, a differenza, per esempio, delle prove dinamiche su tavola vibrante che necessitano di un impianto di prova che pochi istituti di ricerca al mondo possono permettersi. Tuttavia e anche se al giorno d'oggi la ricerca sismica indica chiaramente che prove sperimentali sono indispensabili per cogliere il comportamento dinamico di strutture seriamente impegnate nel loro dominio plastico, quelle pseudodinamiche vengono spesso considerate ancora eccessivamente complesse e dispendiose.

Prove pseudodinamiche su strutture in calcestruzzo armato a più gradi di libertà e che in seguito alla fessurazione del calcestruzzo e allo snervamento dell'acciaio d'armatura presentano una variazione importante della loro rigidità sono già state eseguite in passato, soprattutto a San Diego (USA), a Ispra (Italia) e a Tsukuba (Giappone). Ciononostante non esiste praticamente letteratura che si soffermi sulla tecnica da adottare per la prova pseudodinamica di queste strutture. Al fine di colmare tale lacuna il presente lavoro rivede la tecnica delle prove pseudodinamiche in modo sistematico, basandosi su pubblicazioni di P. B. Shing, M. Nakashima e O. S. Bursi. L'influsso di parametri numerici e sperimentali, nonché l'effetto di imprecisioni sia algoritmiche che sperimentali, vengono studiati facendo capo a prove proprie.

La parte centrale del lavoro consiste in un "manuale d'istruzione" per l'esecuzione di prove pseudodinamiche su strutture a più gradi di libertà e con variazioni di rigidità importanti. Per queste prove è stato scelto un algoritmo esistente, robusto e affermato, che ha dovuto essere modificato in modo da garantirgli un comportamento ottimale in queste situazioni. Nel manuale vengono identificati e discussi tutti i parametri fondamentali per una buona riuscita delle prove e vengono elaborate indicazioni in merito alla loro scelta. Va da sé che queste indicazioni possono venir utilizzate anche nell'ambito di prove su strutture più semplici, per esempio ad un solo grado di libertà o quasi-elastiche.

I risultati del presente lavoro si basano su una serie di prove pseudodinamiche preliminari atte a preparare quelle su pareti di calcestruzzo armato con tre gradi di libertà [Thiele et al. 2000]. Tali prove sono state svolte all'Istituto d'Ingegneria Strutturale (IBK) del Politecnico Federale di Zurigo (ETH) nell'ambito del progetto di ricerca "Elementi strutturali in calcestruzzo armato sotto azione ciclica dinamica o statica. Scopo del progetto di ricerca è quello di fornire all'ingegnere progettista degli strumenti che gli permettano di progettare edifici con pareti di controvento in CA per l'azione sismica in modo semplice ma efficace.