
DISSERTATION

ENTWICKLUNG EINER HOCHFREQUENTEN PRÜFMETHODE
FÜR DAUERSCHWINGVERSUCHE

DOCTORAL THESIS

DEVELOPEMENT OF A HIGH CYCLE FATIGUE TESTING
METHOD

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Bernd Köberl

Referent: o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, M.Eng.
Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau, Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/212, 1040 Wien, Österreich

Koreferent: Univ.Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Institut für Massivbau der RWTH Aachen
Mies van der Rohe Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland

Kurzfassung

Nicht immer kann mit der rechnerischen Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Tragkonstruktionen das Auslangen gefunden werden. Für große Bauteile, wie zum Beispiel Schrägkabel oder Spannglieder, wird ein ausreichender Widerstand gegen ein Ermüdungsversagen experimentell bestimmt. Richtlinien und Normen regeln den jeweiligen Versuchsablauf, in der Regel muss der Prüfkörper zwei Millionen Mal einer vorgegebenen Spannungsamplitude standhalten. Diese Dauerschwingversuche werden meist mit servo-hydraulisch gesteuerten Prüfvorrichtungen durchgeführt, die erzielbare Prüffrequenz ist jedoch gering, meist im Bereich von einem Lastzyklus pro Sekunde. Ein Dauerschwingversuch mit zwei Millionen Lastwechseln und einer Prüffrequenz von einem Hertz dauert demnach 23 Tage. Der Betrieb des Hydraulikaggregates und die Kühlung des Hydrauliköls erfordern für die Versuchsdauer einen sehr hohen Energieeinsatz.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens am Institut für Tragkonstruktionen an der Technischen Universität Wien. Die Prüfmethode nutzt den Resonanzeffekt positiv aus und ermöglicht dadurch wesentlich schnellere Prüfzeiten und gleichzeitig einen wesentlich geringeren Energieeinsatz als bekannte servo-hydraulisch betriebene Versuchseinrichtungen. Erste Versuche mit glatten Stahlstangen ($\varnothing 6-8\text{ mm}$) in einem vertikalen und horizontalen Versuchsrahmen deuteten das große Potential der Prüfmethode an. Die erfolgreiche Akquisition von Forschungsmitteln und die Unterstützung der TU-Wien machten die Errichtung einer Prüfvorrichtung für statische und dynamische Versuche an zugbeanspruchten Bauteilen bis 20.000 kN möglich. Der Reaktionsrahmen, eine 150 Tonnen schwere und 16 m lange Spannbetonkonstruktion, wurde so konzipiert, dass auch eine zusätzliche Anwendung als Aufspannfeld für Biegeversuche gegeben war.

Der Bau der Prüfanlage erfolgte im eigenen Versuchslabor des Instituts, das begrenzte Platzangebot hatte einen aufwändigen Bauablauf zur Folge. Zunächst wurde die Geschosdecke im Erdgeschoß entfernt und das Kellergeschoß abgebrochen. Dort wurde die nötige Lagerung und Fundamentierung für den Prüfraum geschaffen. Der Prüfraum wurde auf einer Rüstung im Erdgeschoß hergestellt und im Anschluss daran mit Litzenhebern in das Kellergeschoß abgesenkt.

Nach dem Bereitstellen und Einbau der erforderlichen Stahleinbauten konnte mit ersten Dauerschwingversuchen an einem Spannsystem für interne Vorspannung mit Verbund begonnen werden. Versuche an drei Prüfkörpern mit neun Spannstahlilitzen zu je 150 mm^2 zeigten die Funktionsfähigkeit der neuen Prüfmethode. Bei einer Prüffrequenz von $20,45\text{ Hz}$ konnte ein dynamischer Vergrößerungsfaktor von rund 2000 erreicht werden.

Im Vorfeld und im Anschluss an die durchgeführten Versuche erfolgten analytische und numerische Berechnungen welche sehr gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Ergebnissen zeigten. Es zeigte sich, dass die Versuche mit einfachen Grundlagen der Dynamik sehr genau beschrieben werden können. Die numerischen Untersuchungen erlaubten das Aufspüren von unerwünschten benachbarten Eigenfrequenzen in den jeweiligen Versuchsaufbauten.

Am Ende der Arbeit wird die Anwendbarkeit von Dauerschwingversuchen an Biegeträgern aus Stahlbeton erforscht. Die Auslegung von Versuchskörpern für einen konkreten Anwendungsfall von nachträglich verstärkten Stahlbetonteilen mit Aufbeton wird gezeigt. Dabei wird besonders auf den Abfall der Steifigkeit beim Übergang in den Zustand II eingegangen. Analytische und numerische Modelle dienen zur Abschätzung der zu erwartenden Prüffrequenz.

Die am Institut für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien zur Verfügung stehende Prüfvorrichtung ermöglicht für zugbeanspruchte Bauteile, wie z.B. Schrägkabel, Prüffrequenzen zwischen 20 und 40 Hz bei einer Oberlast von 10.000 kN . Statische Zugversuche können bis zu einer Last von 20.000 kN durchgeführt werden. Der Energieeinsatz für Dauerschwingversuche kann im Vergleich zu bestehenden Anlagen um den Faktor 1000 gesenkt werden.

Abstract

Fatigue is one of the leading causes of failure in mechanical components and structures subjected to cycling loading. The testing of structural components e. g. stay cables for stay cable bridges under cyclic loading constitutes one of the most important fields of experimental mechanics. The testing of specimens with 2 to 20 million load cycles is only feasible for small specimens but not for large structural bridge elements. Usually conventional servo-hydraulic testing machines are used thus the testing time and energy consumption increase dramatically in regard to specimen size. The achievable testing frequency for stay cables or tendons is lower than one cycle per second and the time to carry out two million load cycles amounts to approximately 23 days.

This doctoral thesis describes a new approach to the testing of large structural elements by taking advantage of the resonance effect. Testing frequencies from 20 up to 40 Hz will be possible and the energy consumption can be decreased dramatically. This new approach affords the opportunity to carry out fatigue tests on large specimens under conditions close to the loading condition of a structure during its lifetime, e.g. low stress amplitudes and many millions of load cycles. First experiments on rods made of steel ($\varnothing 6-8\text{ mm}$) showed the high potential of the development.

A research fund and the support of Vienna University of Technology allowed the construction of a testing set-up for dynamic fatigue tests. The reaction frame, a prestressed reinforced concrete structure with deadweight of 150 tons, was built on a framework on the ground floor of the laboratory and was then lowered into the basement by means of hydraulic strand lifting units. The multifunctional reaction frame can also be used for bending tests.

First tests on tendons (9 strands 150 mm^2) were performed and proved the efficiency and high potential of the new development. The testing frequency was 20,45 Hz and the dynamic magnification factor due to resonance amounted to 2000. Corresponding analytical and numerical calculations to describe the behaviour of the testing set-up were carried out, too.

The last chapter of the thesis deals with the determination of the application of the new method for fatigue bending tests on reinforced concrete slabs. The fatigue behaviour of a new bridge remediation method will be tested. For that purpose specimens had to be designed by means of numerical and analytical models.

The testing set-up at the Institute for Structural Engineering at Vienna University of Technology provides the possibility of dynamic fatigue tests on specimens subjected to tension with upper loads up to 10.000 kN and static load tests up to 20.000 kN . Depending on the specimen, the testing of large components can be carried out 20 to 40 times faster than with the conventional servo-hydraulic testing procedure. At the same time, energy requirements drop to a fraction (1/1000 or less) of the energy used in a conventional test.