ETH zürich

ETH Library

Numerical and Experimental Analysis of Earthquake Protection Systems based on Elastomeric Spheres

Doctoral Thesis

Author(s):
Reyes, Sergio

Publication date:
2024

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000699146

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. 30601

Numerical and Experimental Analysis of Earthquake Protection Systems based on Elastomeric Spheres

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Sergio Ignacio Reyes Arriagada
Master in Engineering Sciences, Pontificia Universidad Católica de Chile

born on *11.11.1993*

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Michalis Vassiliou
Prof. Dr. Dimitrios Konstantinidis
Prof. Dr. Marcial Blondet
Prof. Dr. Eleni Chatzi
Prof. Dr. Juan Carlos de la Llera
Prof. Dr. Nicos Makris
Prof. Dr. Eduardo Miranda
Prof. Dr. Bozidar Stojadinovic

2024

Abstract

Since ancient times, earthquakes have been associated with concepts such as destruction, death, and loss. Nowadays, their connotation is not so different, but engineers have arguably made paramount efforts to allow humanity to live in safer constructions by creating structural design standards and proposing new technologies. In the last century, several earthquake protection technologies have been proposed to protect constructions against ground motions, which can be broadly classified into energy dissipation systems and seismic isolation systems. The first consists of providing structures supplemental damping through additional structural fuse elements that absorb energy when the structure is deformed, thus relieving part of the seismic demand on other more important structural elements, such as columns. The second consists of providing a relatively flexible interface between the structure and its foundations, which allows large deformations under earthquake ground motions and reduces the seismic demands on the isolated part of the structure.

While these technologies have been widely adopted and validated for high-importance structures where an improved performance level (e.g., continuity of operation) is desired, their implementation in normal structures is still limited because sometimes it is more expensive than the traditional earthquake-resistant prescriptive design. This makes these technologies prohibitive in developing countries where following structural design codes is unaffordable, causing disproportionate casualties and damages when major earthquakes strike. This problem also extends to other types of industrial structures and equipment that exhibit a high collapse rate during seismic events, such as electrical transmission equipment, stainless steel storage tanks, and vibratory machinery, among many others. In all these structures, the prescriptive design has been shown to be insufficient to ensure an acceptable level of performance, and the use of widely implemented earthquake protection systems is sometimes an economically inviable solution.

In an effort to make earthquake protection technologies more affordable, this dissertation presents the experimental and numerical studies of a rolling seismic isolation system based on elastomeric spheres that has the potential to be less expensive than other protection systems for specific applications. The system consists of spheres made of a hard thermoplastic polyurethane (Shore A hardness of 95) to support the structure's weight and provide the rolling mechanism. The restoring force can be gravity-induced (e.g., friction pendulum systems) or provided

with additional elements (e.g., springs). These spheres are massively produced with or without a steel core as a commodity for ball-check valves, with standardized manufacturing procedures, low material properties variability, and meeting the ASTM D2000 standard and the ROSH and REACH compliances. However, this material has not been properly characterized for structural applications. Moreover, the rolling behavior of the system is more complex than that of a rigid rolling ball: it creeps under the vertical weight and adopts an apparently permanent oblong shape, which affects the lateral force-deformation relationship of the isolation system.

The research involved a detailed mechanical characterization of the thermoplastic material and its validation against experimental tests for its use in finite element simulations to understand the system's rolling behavior and energy dissipation mechanism. Uniaxial tensile and compressive samples were extracted directly from one of the spheres and tested under complex loading protocols to trigger several nonlinear phenomena simultaneously. A constitutive modeling approach was proposed based on the parallel rheological framework and calibrated against the uniaxial tests. The results showed that this material strongly exhibited all the typical nonlinearities expected in this type of polymer, such as the Mullins effect, hysteresis, relaxation, and rate-dependence. The Mullins effect can be accurately described using the Ogden-Roxhburg model, while all other mentioned phenomena can be represented through independent viscoelastic mechanisms representing the rate-dependence of the material at different timescales. The constitutive model was implemented in MSC Marc software and validated against experimental tests involving cyclic compression tests on a solid cylinder, solid sphere, and sphere with a steel core, all made of the same nominal material.

The validated model was used to perform further analyses on the behavior of a rolling sphere with and without a steel core. It was found that during creep, most deformation is concentrated towards the center of the sphere, while during rolling, most energy dissipation comes from the material being deformed close to the surface. Therefore, the benefits of including a steel core in the sphere are threefold: (1) eliminates the oblong shape caused by creep, making the force-deformation relationship more bilinear; (2) maintains an acceptable level of energy dissipation despite the replacement of almost all the elastomeric material by steel, and (3) increases the vertical load capacity of the system. However, the steel core has to be large enough since these benefits were not observed for a 100 mm diameter sphere and a steel core size of 50 mm. For steel cores of 80- and 90-mm diameter, the system's behavior is nearly bilinear with a rolling resistance coefficient close to 0.03 for a vertical load of 8kN. This rolling isolation system is an affordable

solution for lightweight structures, particularly for one- or two-story masonry or reinforced concrete structures, low-rise timber buildings, and industrial equipment.

A centered steel core benefits the system in two aspects: it reduces vertical deformations while increasing vertical-loading capacity and improves the rolling mechanism's behavior. However, the centeredness of the steel core is not easily achieved during the manufacturing process, compromising the performance of the whole isolation system. Thus, an accurate and fast estimation of the core eccentricity will allow an early assessment of spheres to be applied as a seismic isolation device. Four non-invasive methods for estimating the core eccentricity of the spheres are evaluated (X-ray Computed Tomography, Camera-Based motion tracking, Tilt tests, and Average Period Estimation); of which all except X-ray Computed Tomography use the system's equation of motion to estimate the core eccentricity. All methods agreed well with the results of the Computed Tomography, identifying the core eccentricity with mean errors below 12%. This shows that these methods are good candidates for developing an easy, fast, and reliable prequalification procedure for these spheres.

Zusammenfassung

Seit dem Altertum werden Erdbeben mit Begriffen wie Zerstörung, Tod und Verlust in Verbindung gebracht. Heutzutage ist die Konnotation nicht viel anders, aber die Ingenieure haben wohl größte Anstrengungen unternommen, um der Menschheit ein Leben in sichereren Konstruktionen zu ermöglichen, indem sie Normen für die Baukonstruktion geschaffen und neue Technologien vorgeschlagen haben. Im letzten Jahrhundert wurden verschiedene Erdbebenschutztechnologien zum Schutz von Bauwerken gegen Bodenbewegungen vorgeschlagen, die sich grob in Energiedissipations- und seismische Isolationssysteme einteilen lassen. Ersteres besteht darin, den Bauwerken eine zusätzliche Dämpfung durch zusätzliche strukturelle Sicherungselemente zu verleihen, die Energie absorbieren, wenn sich das Bauwerk verformt, und so einen Teil der seismischen Beanspruchung anderer, wichtigerer Strukturelemente, wie z. B. Säulen, zu mindern. Die zweite besteht darin, eine relativ flexible Schnittstelle zwischen dem Bauwerk und seinen Fundamenten zu schaffen, die große Verformungen bei Erdbebenbewegungen zulässt und die seismischen Anforderungen an den isolierten Teil des Bauwerks verringert.

Während diese Technologien für wichtige Bauwerke, bei denen ein verbessertes Leistungsniveau (z. B. Kontinuität des Betriebs) erwünscht ist, weithin angenommen und validiert wurden, ist ihre Anwendung bei normalen Bauwerken nach wie vor begrenzt, da sie mitunter teurer ist als die herkömmliche erdbebensichere Bauweise nach Vorschrift. Dies macht diese Technologien in Entwicklungsländern unerschwinglich, in denen die Einhaltung von Bauvorschriften unerschwinglich ist, was bei schweren Erdbeben zu unverhältnismäßig vielen Opfern und Schäden führt. Dieses Problem erstreckt sich auch auf andere Arten von Industriebauten und -ausrüstungen, die bei seismischen Ereignissen eine hohe Einsturzrate aufweisen, wie z. B. elektrische Übertragungsanlagen, Lagertanks aus rostfreiem Stahl und Vibrationsmaschinen, um nur einige zu nennen. Bei all diesen Bauwerken hat sich gezeigt, dass die vorgeschriebene Konstruktion nicht ausreicht, um ein akzeptables Leistungsniveau zu gewährleisten, und die Verwendung von Erdbebenschutzsystemen, die in großem Umfang eingesetzt werden, ist eine wirtschaftlich nicht tragfähige Lösung.

In dem Bestreben, Erdbebenschutztechnologien erschwinglicher zu machen, werden in dieser Dissertation die experimentellen und numerischen Studien

eines rollenden seismischen Isolationssystems auf der Grundlage von Elastomerkugeln vorgestellt, das möglicherweise weniger kostspielig ist als andere Schutzsysteme. Das System besteht aus einem rollenden Isolationssystem, bei dem Kugeln aus einem harten thermoplastischen Polyurethan (Shore-A-Härte von 95) das Gewicht des Bauwerks tragen und den Rollmechanismus bilden. Die Rückstellkraft kann durch die Schwerkraft (z.B. Reibungspendelsysteme) oder durch zusätzliche Elemente (z.B. Federn) erzeugt werden. Diese Kugeln werden in großen Mengen mit oder ohne Stahlkern als Rohstoff für Kugelrückschlagventile hergestellt, wobei die Herstellungsverfahren standardisiert sind, die Materialeigenschaften nur geringfügig variieren und die Norm ASTM D2000 sowie die ROSH- und REACH-Vorschriften erfüllt werden. Für strukturelle Anwendungen ist dieses Material jedoch nicht ausreichend charakterisiert worden. Darüber hinaus ist das Rollverhalten des Systems komplexer als das einer starren Rollkugel: Es kriecht unter dem vertikalen Gewicht und nimmt eine scheinbar dauerhafte längliche Form an, was das Verhältnis zwischen Seitenkraft und Verformung des Isolationssystems beeinflusst.

Die Forschungsarbeiten umfassten eine detaillierte Charakterisierung des thermoplastischen Materials und seine Validierung anhand von experimentellen Tests für die Verwendung in Finite-Elemente-Simulationen, um das Rollverhalten des Systems und den Mechanismus der Energiedissipation zu verstehen. Einachsige Zug- und Druckproben wurden di-rekt aus einer der Kugeln entnommen und unter komplexen Belastungsprotokollen getestet, um mehrere nichtlineare Phänomene gleichzeitig auszulösen. Es wurde ein konstitutiver Modellierungsansatz vorgeschlagen, der auf dem parallelen rheologischen Rahmen basiert und anhand der einachsigen Tests kalibriert wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass dieses Material alle typischen nichtlinearen Phänomene aufweist, die man bei dieser Art von Polymer erwartet, wie den Mullins-Effekt, Hysterese, Relaxation und Ratenabhängigkeit. Der Mullins-Effekt kann mit dem Ogden-Roxhburg-Modell genau beschrieben werden, während alle anderen genannten Phänomene durch unabhängige viskoelastische Mechanismen dargestellt werden können, die die Ratenabhängigkeit des Materials auf verschiedenen Zeitskalen darstellen. Das konstitutive Modell wurde in der Software MSC Marc implementiert und anhand von experimentellen Tests validiert, die zyklische Druckversuche an einem massiven Zylinder, einer massiven Kugel und einer Kugel mit Stahlkern umfassten, die alle aus demselben nominellen Material bestanden.

Das validierte Modell wurde verwendet, um weitere Analysen zum Verhalten einer Rollkugel mit und ohne Stahlkern durchzuführen. Es wurde fest-

gestellt, dass sich beim Kriechen die meiste Verformung auf das Zentrum der Kugel konzentriert, während beim Walzen die meiste Energie durch die Verformung des Materials in der Nähe der Oberfläche freigesetzt wird. Daher hat die Aufnahme eines Stahlkerns in die Kugel drei Vorteile: (1) die durch das Kriechen verursachte längliche Form wird beseitigt, wodurch die Kraft-Verformungs-Beziehung bilinearer wird; (2) es wird ein akzeptables Maß an Energiedissipation beibehalten, obwohl fast das gesamte Elastomermaterial durch Stahl ersetzt wird, und (3) die vertikale Tragfähigkeit des Systems wird erhöht. Der Stahlkern muss jedoch groß genug sein, da diese Vorteile bei einer Kugel mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Stahlkerngröße von 50 mm nicht erreicht wurden. Für Stahlkerne mit 80 und 90 mm Durchmesser ist das Verhalten des Systems nahezu bilinear mit einem Rollwiderstandskoeffizienten von nahezu 0,03 für eine vertikale Last von 8 kN. Dieses Rollisolationssystem ist eine erschwingliche Lösung für Leichtbaukonstruktionen, die besonders für ein- oder zweigeschossige Mauerwerks- oder Stahlbetonkonstruktionen, niedrige Holzgebäude und Industrieanlagen interessant ist.

Ein zentrierter Stahlkern ist in zweierlei Hinsicht vorteilhaft für das System: Er reduziert die vertikalen Verformungen bei gleichzeitiger Erhöhung der vertikalen Belastbarkeit und verbessert das Verhalten des Rollmechanismus. Allerdings ist die Zentrierung des Stahlkerns während des Herstellungsprozesses nicht einfach zu erreichen, was die Leistung des gesamten Isolationssystems beeinträchtigt. Eine genaue und schnelle Schätzung der Exzentrizität des Kerns ermöglicht daher eine frühzeitige Bewertung von Kugeln, die als seismische Isoliervorrichtung eingesetzt werden sollen. Es wurden vier nicht-invasive Methoden zur Schätzung der Kernexzentrizität der Kugeln bewertet (Röntgen-Computertomographie, kamerabasierte Bewegungsverfolgung, Kipptests und Schätzung der durchschnittlichen Periode), von denen alle außer der Röntgen-Computertomographie die Bewegungsgleichung des Systems zur Schätzung der Kernexzentrizität verwenden. Alle Methoden stimmten gut mit den Ergebnissen der Computertomografie überein und ermittelten die Kernexzentrizität mit mittleren Fehlern unter 12 %. Dies zeigt, dass diese Methoden gute Kandidaten für die Entwicklung eines einfachen, schnellen und zuverlässigen Präqualifikationsverfahrens für diese Kugeln sind.