Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 117 (1999)

Heft: 45

Artikel: Anisotrope Gummilager für die Erdbebenisolation von Brücken: Versuche am Rütteltisch

Autor: Burtscher, Stefan L. / Dorfmann, Luis

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79820

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

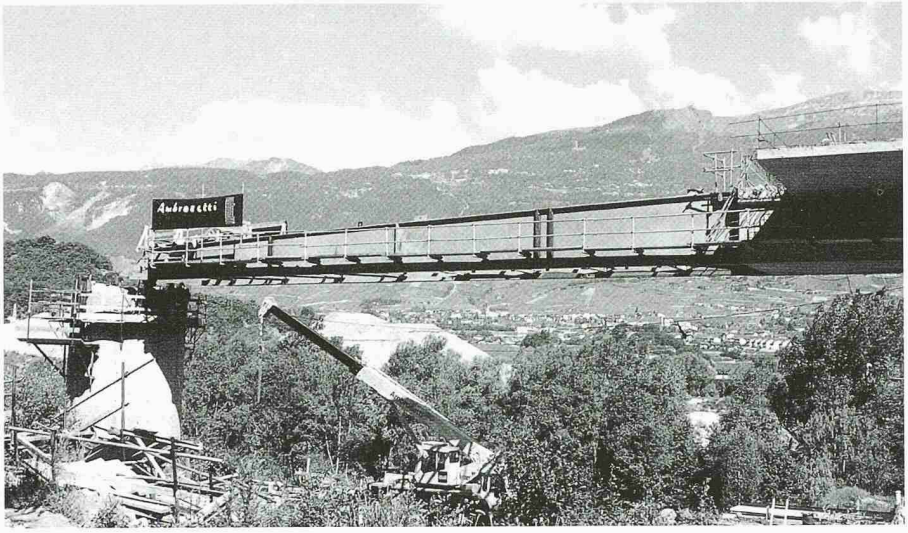
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 29.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch



9
Vorbauschnabel

Am Bau Beteiligte

Bauherr:
Etat du Valais, DTEE SRCE, section routes nationales Valais Romand

Planer:
Communauté d'étude pour le viaduc Ile Falcon: SD Ingénierie Dénériaz et Pralong Sion SA (Federführung), Bureau d'ingénieurs SA, Sierre, M+S Andermatten SA, Sion, Vincent Mangeat SA, Nyon (architecte)

Experte:
Prof. Renaud Favre, EPF Lausanne

Unternehmen:
Ambrosetti SA, Genève, Zschokke SA, Sion

Auskragung auf der Unterseite des Kastens nicht zum Vornherein für das Taktschiebeverfahren prädestiniert schien, ermöglichten die notwendige Sorgfalt, die detaillierte Beschreibung der gewünschten Ausrüstungen und das Vorschreiben strenger Anforderungen bei der Ausschreibung - vor allem aber ein kompetentes und motiviertes Team - dennoch seine Ausführung. Wie bei jedem grossen Bauwerk hängt der Erfolg von der vollständigen Zusammenarbeit zwischen Bauherrn, Planern, Experten und Ausführenden ab.

Adresse des Verfassers:
Claude Pralong, dipl. Ing. ETHZ SIA, SD Ingénierie SA, Place Chauderon 3, 1003 Lausanne

Stefan L. Burtscher, Luis Dorfmann, Wien

Anisotrope Gummilager für die Erdbebenisolation von Brücken

Versuche am Rütteltisch

Die Erdbebenisolation ist eine effektive Methode, die Sicherheit von Bauwerken zu erhöhen. Um die dynamischen Charakteristiken von Brücken besser berücksichtigen zu können, wurden bewehrte Elastomerlager so modifiziert, dass sie unterschiedliche Steifigkeiten in den beiden horizontalen Hauptrichtungen aufweisen. Unter realistischen Bedingungen wurde ein Brückenmodell im Massstab 1:6 mit herkömmlichen und den anisotropen Lagern getestet. Als Belastung wurden harmonische Schwingungen, das Northridge-Beben (1994) und ein Erdbeben aus Taiwan verwendet.

Um über die Erdbebensicherheit eines Bauwerks etwas aussagen zu können, muss das Tragwerksverhalten bei Bebenerregungen untersucht werden. An Standorten hoher Seismizität oder bei Bauwerken, die besonderen Sicherheitsansprüchen im Katastrophenfall genügen müssen, sind oft besondere Konstruktionsprinzipien notwendig. Eine effiziente Methode hierfür stellt die Erdbebenisolierung dar [1]. Das Prinzip ist einfach und besteht im Wesentlichen darin, dass das gesamte Bauwerk durch Isolatoren vom Boden entkoppelt wird. Es entsteht dadurch ein neues System, und das Bauwerk verhält sich nahezu wie ein starrer Körper. Die Kräfte aus den Bodenbewegungen werden in etwa gleichmässig über die Höhe verteilt, und einzelne Bauteile werden weniger stark beansprucht. Typische Beschleunigungen bei Erdbeben haben vorherrschende Schwingungszeiten von 0,1 bis 1 Sekunde (10 bis 1 Hz) und sind am grössten bei Schwingungszeiten von 0,2 bis 0,6 Sekunden. Bauwerke mit Eigenfrequenzen in diesem Bereich sind besonders gefährdet.

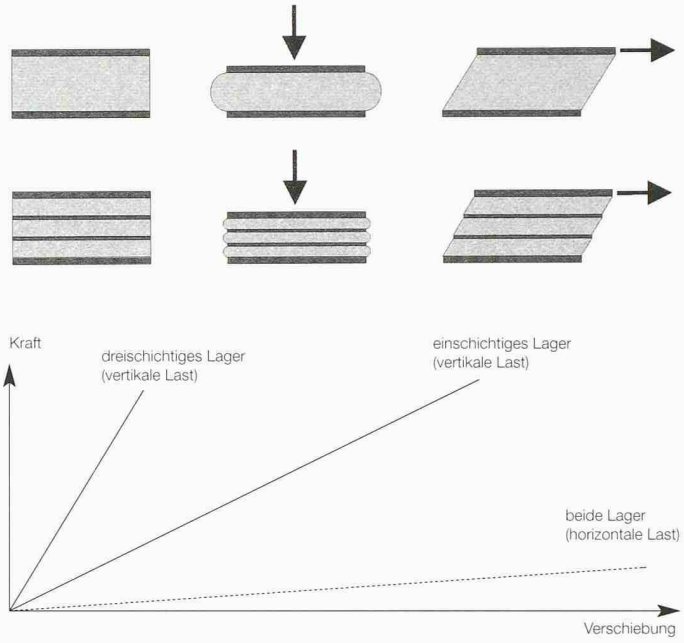
Ein weiterer Vorteil der Erdbebenisolierung ist, dass die Eigenfrequenzen des Bauwerks verändert und damit Resonanzprobleme vermieden werden können. Die Sicherheit eines Gebäudes wird dadurch wesentlich erhöht. Die höheren Kosten für die Erdbebenisolation schützen Menschenleben und amortisieren sich bei zukünftigen Erdbeben. Seit 30 Jahren werden hauptsächlich Gummilager als Isolatoren für die Erdbebenisolation verwendet [2]. Diese Lager wurden schon in vielen Labors statisch und dynamisch untersucht. Bei den letzten grossen Erdbeben in Kalifornien und Japan wurden sie auch hohen Erdbebenlasten ausgesetzt, wobei wiederum festgestellt werden konnte, dass das Prinzip der Erdbebenisolierung gut funktioniert und dass sich Gummilager als Isolatoren gut eignen.

Im Allgemeinen sind Gummilager so aufgebaut, dass sie eine hohe vertikale und eine niedere horizontale Steifigkeit aufweisen. Dazu werden Stahlplatten horizontal zwischen die einzelnen Gummischichten einvulkanisiert. Die Stahlplatten wirken als Zugarmierung und erhöhen die vertikale Steifigkeit, beeinflussen die hori-

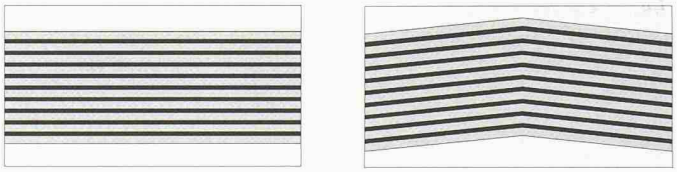
zontale Steifigkeit aber nicht (Bild 1). Durch den transversal isotropen Aufbau ist die Steifigkeit in den horizontalen Hauptrichtungen gleich und daher für Gebäude gut geeignet.

Die dynamischen Eigenschaften von Brückentragwerken sind in Längs- und Querrichtung stark unterschiedlich und es ist daher von Vorteil, Isolatoren mit unterschiedlichen Steifigkeiten in den beiden horizontalen Hauptrichtungen zu verwenden. Im Forschungsprojekt «Highly Adaptable Rubber Isolating Systems» [3] wurde die Idee verfolgt, die Erdbebenisolation für Brückentragwerke mit Gummilagern zu optimieren, um die Sicherheit von Brücken bei Bebenerregung zu erhöhen. Ein Ziel war dabei, die transversalen Schwingungen in Amplitude und Dauer zu reduzieren. Dafür ist es einerseits notwendig, die transversale Steifigkeit des Isolators zu erhöhen und anderseits eine hohe Dämpfung zu erreichen. Die hohe Dämpfung wurde im Wesentlichen durch die Verwendung eines speziellen Gummis ermöglicht, der in Abhängigkeit von Temperatur und Dehnung eine Dämpfung von 15 bis 20% aufweist.

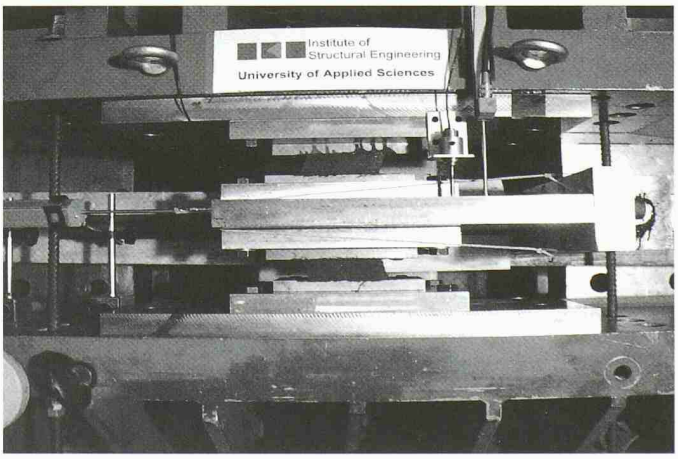
Die transversale Steifigkeit wird dadurch erhöht, dass die Stahlplatten in dieser Richtung nicht wie bei herkömmlichen Lagern flach, sondern V-förmig eingebaut werden. Dabei bleibt die Steifigkeit in der longitudinalen Richtung gleich wie bei einem herkömmlichen flachen Lager (Bild 2). Durch diese einfache geometrische Modifikation entsteht ein anisotropes Lager. Mit der Variation des Neigungswinkels kann die Steifigkeit an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. In einer umfangreichen Studie wurden Gummilager dieser Bauart statischen und dynamischen Versuchen unterzogen. Im Folgenden werden ein transversal isotropes und ein anisotropes Gummilager (Neigungswinkel 5°) unter dynamischer Belastung verglichen. Dabei wurde ein in den vier Eckpunkten gelagertes Brückenmodell auf einem Rütteltisch unterschiedlichen dynamischen Belastungen unterworfen.



1
Erhöhung der vertikalen Steifigkeit von Gummilagern durch Bewehrung



2
Transversal isotropes und anisotropes Gummilager



3
Versuchsaufbau bei den statischen Versuchen

Skalierung des Versuchs am Rütteltisch

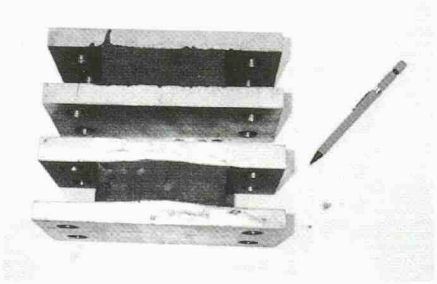
Während eines starken Erdbebens verhält sich das Tragwerk physikalisch und geometrisch in hohem Masse nicht linear. Es ist schwierig, alle diese Effekte in einer numerischen Simulation richtig zu erfassen, weshalb Versuche nötig sind, um ein solches Verhalten gut studieren zu können. Üblicherweise werden statische und dynamische Versuche durchgeführt. Bei den statischen Versuchen werden die Last-Ver-

Grösse	Einheiten	Skalierungsfaktor
Länge L	L	λ_L
Kraft F	$M\,L\,t^{-2}$	$\lambda_F = \lambda_M\,\lambda_a$
Elastizitätsmodul E	$M L^{-1}\,t^{-2}$	$\lambda_E = \lambda_F / \lambda_L^2$
Poissonsche Zahl v	Dimensionslos	
Dichte ρ	$M\,L^{-3}$	$\lambda_\rho = \lambda_M / \lambda_L^3$
Zeit t	T	λ_t
Masse M	M	$\lambda_M = \lambda_L^3\,\lambda_\rho$
Spannung σ	$F\,L^{-2}$	$\lambda_\sigma = \lambda_F / \lambda_L^2$
Frequenz f	t^{-1}	$\lambda_f = 1 / \lambda_t$
Geschwindigkeit v	$L\,t^{-1}$	$\lambda_v = \lambda_L / \lambda_t$
Beschleunigung a	$L\,t^{-2}$	$\lambda_a = \lambda_L / \lambda_t^2$

4
Bestimmungsgrössen mit Einheiten und deren Skalierungsfaktoren

Parameter	Skalierfaktoren
Masse M	$\lambda_M = \lambda_L^2 = (1/6)^2$
Zeit t	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_L} = 1/\sqrt{6}$
Länge L	$\lambda_L = 1/6$
Spannung σ	$\lambda_\sigma = 1$
Beschleunigung a	$\lambda_a = \lambda_L/\lambda_t^2 = 1$
Geschwindigkeit v	$\lambda_v = \lambda_L/\sqrt{\lambda_L} = 1/\sqrt{6}$
Kraft F	$\lambda_F = \lambda_L^2 = (1/6)^2$
Steifigkeit K	$\lambda_K = \lambda_L = 1/6$
Frequenz f	$\lambda_f = 1/\sqrt{\lambda_L} = \sqrt{6}$
Dichte ρ	$\lambda_\rho = 1$

6
Skalierungsfaktoren für die Artificial-Mass-Methode ($\lambda_L = 1/6$)



7
Gummilager für den Versuch am Rütteltisch

schiebungskurve, die Schersteifigkeit, die Bruchfestigkeit und die dissipierte Energie der Gummilager bestimmt. Bei diesen Versuchen muss eine konstante vertikale Kraft (Eigengewicht der Brücke) aufgebracht und die Verdrehung des Lagers behindert werden. Es hat sich als zweckmässig erwiesen zwei Lager, wie in Bild 3 angeordnet, zu testen [3, 4].

Dynamische Versuche werden meist auf einem Rütteltisch durchgeführt oder durch pseudodynamische Methoden näherungsweise simuliert. Die Versuche am Rütteltisch sind sehr wirklichkeitsnah, da der Versuchsaufbau dem der fertigen Konstruktion entspricht und die Bodenbewegungen ihren Charakteristiken entsprechend aufgebracht werden können. Es kann auch ein tatsächlich aufgetretenes Erdbeben verwendet werden, um den Tisch zu steuern und das Verhalten eines Tragwerks zu untersuchen.

Da es meist nicht möglich ist, den Versuch im Massstab 1:1 am Rütteltisch durchzuführen, muss ein verkleinertes Modell verwendet werden. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die auftretenden Effekte des wirklichen Bauwerks am Modell reproduziert werden. Es ist daher von besonderer Wichtigkeit, auf eine konsistente Skalierung aller physikalischen Grössen zu achten [5, 6, 7]. Die massgebende Grösse für die Skalierung ist meistens das geometrische Verhältnis von Modell und Original. Die charakteristische Längeneinheit L, mit dem dazugehörenden Skalierungsfaktor ist gegeben durch $\lambda = L_{Modell}/L_{Original}$. Die anderen Skalierungsfaktoren ergeben sich entsprechend und sind in Bild 4 angegeben.

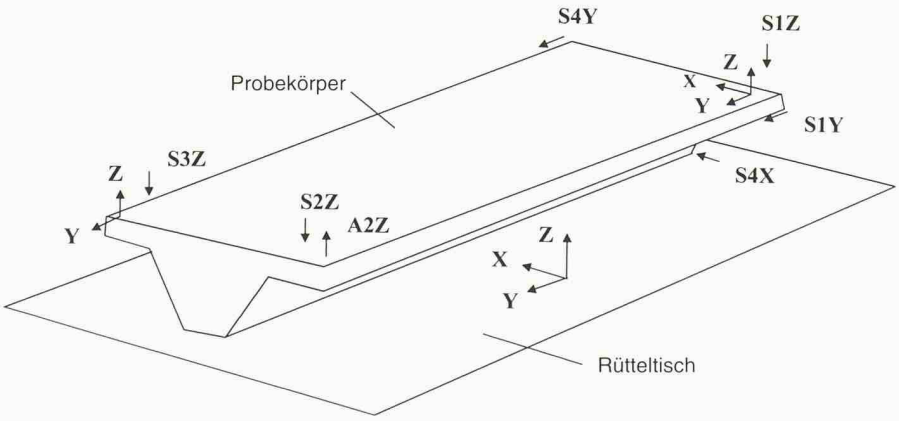
Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, den Versuch zu skalieren. Je nach Anforderung an den Versuch und die Randbedingungen des Tischs muss eine passende Skalierungsmethode gewählt werden. Für die Skalierung von dynamischen Versuchen wird meist eine dieser drei Methoden gewählt:

- Identische Spannungen
- Froudsche Zahl
- Artificial Mass

Bei der ersten Methode treten im Original und am Modell die gleichen Spannungen auf, wobei die Zeit gleich wie die Länge, die Masse jedoch mit der dritten Potenz skaliert wird (Bild 5). Die Folge kann sein, dass die Zeitdauer des gesamten Ereignisses so stark reduziert wird, dass die Reaktionszeiten des Tischs unterschritten werden. Diese Methode wird daher eher bei pseudodynamischen Versuchen angewandt.

Bei der Froudsche-Zahl-Methode wird die Zeit so skaliert, dass die Beschleunigungen im Original und im Modell gleich gross sind. Die Spannungen werden wie die Länge und die Masse mit der dritten Potenz skaliert. Dieser Zusammenhang wird meist bei Winduntersuchungen im Windkanal angewandt.

Bei der Artificial-Mass-Methode bleiben die Spannungen gleich. Der Unterschied zur Methode der identischen Spannungen besteht in der geringeren Reduktion von Zeitdauer und Masse.



8
Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Achsrichtungen, Weg- und Beschleunigungsaufnehmern

Versuchsaufbau

Taiwan High Speed Railway System plant derzeit eine rund 350 km lange Zugstrecke, deren Gleistrassee über weite Strecken auf einer Überführung mit einer mittleren Spannweite von 24 m verläuft. Es war gewünscht, dass bei einem stärkeren Beben keine grossen Schäden am Tragwerk entstehen und der Zugverkehr ohne Störungen weitergeführt werden kann. Das Konzept der Erdbebenisolierung mit V-förmigen Lagern wurde dafür vorgeschlagen, um die Eigenfrequenz zu verändern und zusätzlich die transversalen Verschiebungen, sowie die Schwingungsdauer zu verringern.

Die dynamischen Untersuchungen des Brückenmodells wurden auf dem Rüt-

9
Ergebnisse einachsiger harmonischer Erregung

		Beschleunigungsamplitude							
		0,5 m/s²		1,0 m/s²				2,0 m/s²	
Lager		x(trans.)	y(long.)	x	y	x	z	x	y
Isotrop	Eigenfrequenz	3,7 Hz	3,4 Hz	2,8 Hz	1,8 Hz	1,7 Hz	33 Hz	-	-
	Verschiebung	2,8 mm	3,5 mm	13 mm	18 mm	23 mm	-	-	-
Ansiotrop	Eigenfrequenz	5,8 Hz	2,7 Hz	3,5 Hz	1,9 Hz	2,7 Hz	33 Hz	1,6 Hz	1,5 Hz
(∢5°)	Verschiebung	0,8 mm	5 mm	6 mm	19 mm	9,5 mm	-	60 mm	75 mm

teltisch einer italienischen Firma durchgeführt. Der Rütteltisch hat die Abmessungen 4 × 4 m und kann über sechs Freiheitsgrade (drei Verschiebungen und drei Verdrehungen) gesteuert werden. Aus den Abmessungen des Tischs ergibt sich eine geometrische Skalierung von 1:6 bzw. $\lambda_L = 1/6$.

Für einen wirklichkeitsnahen Versuch ist es notwendig, die Spannungen und Beschleunigungen beizubehalten. Unter Berücksichtigung der Reaktionszeit des Tischs wurde die Arificial-Mass-Methode für die Skalierung verwendet. Die Werte der Skalierungsparameter sind in Bild 6 zusammengefasst.

Die Modellbrücke wurde im Massstab 1:6 mit einem Gesamtgewicht von 68 kN in Stahlbeton hergestellt. Die Gummilager mussten ebenfalls adäquat skaliert werden; es ergaben sich sieben Gummilagen zu 3 mm mit dazwischenliegenden einvulkanisierten 2 mm dicken Stahlblechen bei einer Fläche im Grundriss von 100 × 100 mm. Um die beiden Lagertypen vergleichen zu können, wurden nacheinander vier transversal isotrope Lager mit flachen Stahlplatten und vier anisotrope Lager mit einem Winkel von 5° eingebaut (Bild 7). Die wichtigsten Ziele der Untersuchung am Rütteltisch waren:

- Die Eigenfrequenzen des auf den Gummilagern befindlichen Brückentragwerks zu bestimmen
- Das Verhalten der Gummilager bei simulierten dreidimensionalen Bodenbewegungen zu untersuchen.

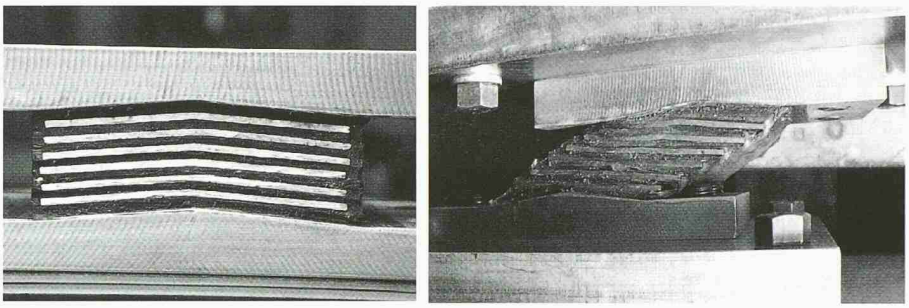
Um die Relativverschiebungen zwischen Modell und Rütteltisch sowie die absoluten Beschleunigungen des Modells aufzuzeichnen, wurde die Antwort des Brückentragwerks mit je sechs Weg- und Beschleunigungsaufnehmern aufgezeichnet. Die Anordnung der Aufnehmer ist in Bild 8 dargestellt.

Brücke unter harmonischer Erregung

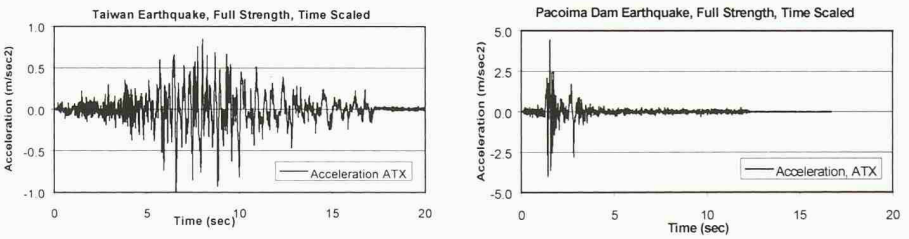
Zuerst wurden die Eigenfrequenzen des Systems in longitudinaler, transversaler und vertikaler Richtung bei jeweils konstanten Beschleunigungsamplituden von 0,5 m/s², 1,0 m/s² und 2,0 m/s² und einer Steigerung der Frequenz von 0,5 bis 40 Hz bestimmt. Die Erregungen wurden nacheinander in allen drei Koordinatenrichtungen aufgebracht, wobei es notwendig war, die Verschiebungsamplitude immer an die jeweilige Beschleunigungsamplitude anzupassen. Die Eigenfrequenzen und die gemessenen maximalen Verschiebungen wurden für das transversal isotrope und das anisotrope Gummilager ermittelt und sind in Bild 9 angegeben [3, 8].

Beim anisotropen Lager sind die geneigten Platten in Richtung der transversalen (x-)Achse angeordnet. Der Einfluss der höheren Steifigkeit ist an den Werten der Eigenfrequenz und der Verschiebung deutlich sichtbar. Die maximale Verschiebung wird bei gleicher Beschleunigung in transversaler Richtung um mehr als die Hälfte reduziert. In longitudinaler und vertikaler Richtung ist bei beiden Lagertypen kein Unterschied feststellbar.

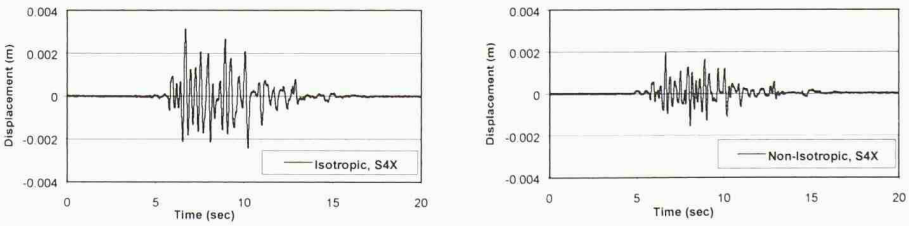
Im Weiteren wurde beobachtet, dass bei der Beschleunigungsamplitude von 2 m/s² die Steifigkeiten des anisotropen Gummilagers in longitudinaler und transversaler Richtung nahezu gleich werden.



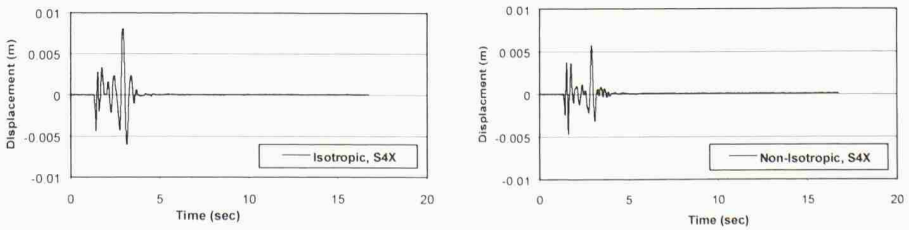
10
Gummilager unter grossen Scherverformungen



11
Transversale Komponente der beiden skalierten Erdbeben



12
Verschiebungsantwort in transversaler Richtung für das taiwanesische Erdbeben



13
Verschiebungsantwort in transversaler Richtung für das Northridge-Erdbeben

Das ist darauf zurückzuführen, dass bei grossen Verschiebungen die anfangs geneigten Stahlplatten nahezu flach werden (Bild 10). Ferner tritt wegen der hohen hydrostatischen Zugspannungen in den Gummischichten des Lagers Kavitation auf, was zusätzlich zur Schwächung des Materials beiträgt [9, 10].

Multi-Frequency-Test

In weiteren Versuchen wurde das Brückenmodell nacheinander unterschiedlichen dreiachsialen Erdbebenerregungen zweier Erdbeben mit unterschiedlichen Charakteristiken ausgesetzt. Das erste hatte mit einer Dauer von zirka 50 Sekunden und einer maximalen Beschleunigung von 1 m/s^2 in Taiwan stattgefunden. Das zweite war das an der Messstelle Pacomina Dam aufgezeichnete Northridge-Beben von 1994. Dieses Beben unterscheidet sich vom taiwanesischen Beben durch seine sehr kurze Dauer, aber höherer Intensität: die maximale Beschleunigung betrug rund 4,5 m/s^2. Nach der Artificial-Mass-Methode wurden die aufgezeichneten Beschleunigungswerte beibehalten und nur der Zeitverlauf mit dem Faktor $\lambda_t = 1/\sqrt{6}$ skaliert.

Bild 11 stellt die transversale Komponente des skalierten taiwanesischen und Northridge-Erdbebens, das vom Rütteltisch auf das isolierte Brückentragwerk aufgebracht wurde, graphisch dar.

Die Verschiebungsantwort in transversaler Richtung zeigt für das anisotrope Lager eine deutliche Verbesserung für beide Erdbeben, wie in Bild 12 und 13 dargestellt. Dabei wurden alle Einheiten gemäss Bild 6 skaliert. In der longitudinalen Richtung ist erwartungsgemäss kein nennenswerter Unterschied festgestellt worden.

Folgerung

Es konnte in diesen Versuchen festgestellt werden, dass das anisotrope Lager die erste Eigenfrequenz gegenüber dem transversal isotropen Lager erhöht und die Verschiebung verringert. Das ist im Wesentlichen auf die höhere Steifigkeit zurückzuführen, die sich durch die V-förmigen Stahlplatten ergibt. Der Neigungswinkel der Stahlplatten beeinflusst die transversale Steifigkeit direkt. Damit hat der Ingenieur die Möglichkeit, die erforderliche Steifigkeit für eine dynamische Berechnung zu ermitteln und über den Neigungswinkel einzustellen.

Literatur

[1] *Skinner R.I., Robinson W.H. and McVerry G.H.*: An Introduction to Seismic Isolation. John Wiley & Sons Ltd., 1996

[2] Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibrations of Structures. Proceedings of the International Post-SMiRT Conference, Taormina, Italy, 1995

[3] HARIS (Highly Adaptable Rubber Isolating System). Final Technical Report. European Community, Contract Nr. BRPR-CT95-0072, Project Nr. Be-1258, 1999

[4] *Fuller K.N.G., Gough J., Pond T.J.*: High Damping Natural Rubber Compounds for Seismic Isolators: Properties and Specifications. International Conference on Structural Control, 1996

[5] *Baker W.E., Westing P.S. and Doge F.T.*: Similarity Methods in Engineering Dynamics. Hayden Book Company, Rochelle Park, N.J., 1978

[6] *Taylor E.S.*: Dimensional Analysis for Engineers. Clarendon Press, Oxford, UK, 1974

[7] *Krawinkler H., Mills R.S. and Moncarz P.D.*: Scale Modeling and Testing of Structures for Reproducing Response to Earthquake Excitation. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, California. Technical Report ENU75-20036, 1978

[8] *Chopra A.K.*: Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice Hall Inc., 1995

[9] *Burtscher S.L., Dorfmann L.*: Experimental and Computational Aspects of Cavitation in Natural Rubber. Constitutive Models for Rubber, A. Dorfmann and A. Muhr eds. Balkema Publishing, 1999

[10] *Gent A.N., Tompkins D.A.*: Nucleation and Growth of Gas Bubbles in Elastomers. Journal of Applied Physics, Vol. 40, Nr. 6, 1999

Adresse der Verfasser:
Stefan L. Burtscher, Institut für Stahlbeton- und Massivbau, Technische Universität Wien, *Luis Dorfmann*, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur, Wien