

鉛プラグ入り積層ゴムの実大高速試験

田中 良一 中村 佳也
馮 徳民 佐々木康人

概 要

長周期地震動は2003年十勝沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震で観測され、今後想定される巨大海溝型地震の際に震源近傍や震源から離れた地域において発生が予測される。長周期地震動は振幅が大きく継続時間が長い特徴を有しており、超高層建物や免震建物はこれまでの想定を上回る変形を受ける可能性がある。

代表的な免震装置である鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)は、長周期地震動による大きな変形を受けた場合、主に鉛の温度が上昇する影響で装置の特性が変化すると考えられることから、実速度、大変形を受けた場合の特性を把握するため実大高速試験を実施した。得られた試験結果の概要は以下のとおりである。

- (1) 高速大歪試験(最大水平せん断歪300%、最大速度1000 mm/s)においても荷重-変形関係は安定していた。
- (2) LRBの降伏荷重 Q_d は累積入力エネルギーの増加に伴い低下した。
- (3) 加振試験後30分程度経過すると装置の特性は試験前の状態に戻った。

Full-Scale High Speed Test of Lead Rubber Bearing

Abstract

Long period ground motions were observed in the 2003 Tokachi-oki Earthquake and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Such ground motion will also occur in future great earthquakes such as the anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough.

Long period ground motion usually has characteristics of long duration time and large amplitude. There is the possibility that this ground motion causes unexpected large deformation of seismic isolation devices. It can be surmised that this will cause changes to the properties of lead rubber bearings (LRB). Therefore, it is necessary to study the behavior of isolation devices at real deformation with real velocity.

This paper presents the results of full-scale and high speed tests of lead rubber bearings (LRB) which are one of most popular isolation devices. The outline of the results is as following,

- (1) Stable hysteresis loops of the load-deformation relationship were observed even in test with real high speed and real large deformation (300% shear strain with a peak velocity of 1000 mm/s).
- (2) The yield load of LRB (Q_d) decreases with the increasing hysteretic input energy.
- (3) The Q_d value resumed to its original value about half an hour after the test.

キーワード: 鉛入り積層ゴム、高速試験、
実大試験、累積入力エネルギー

§1. はじめに

2003 年十勝沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震では震源から離れたサイトにおいても長周期地震動が観測された。2016 年には国土交通省より長周期地震動への対策に関する技術的助言が通知されるなど近年長周期地震動対策への切迫性が高まっている。長周期地震動は周期の長い地震動が長時間継続する特徴があることから、免震建物はこれまでの想定を上回る大きな変形を生じる可能性があり、大変形時の免震装置の性能を把握することは重要である。既往の研究^{2),3)}においても、免震装置は加振により特性が変化することが報告されている。このため、代表的な免震装置である鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)の実大試験体を用いた高速大歪試験を実施した。本稿では試験概要および結果について報告する。

§2. 試験機および試験概要

2.1 試験機仕様

試験には 2015 年に中国の武漢海潤工程設備 (HIRUN) に設置された大型圧縮せん断試験機¹⁾(写真 1)を使用した。試験機の仕様を表 1 に示す。アクチュエータによって最大速度で最長 12 間秒間加振する能力を有している。



写真 1 大型圧縮せん断試験機

表1 試験機仕様

	上下方向	水平方向
最大荷重 (MN)	50	±6
最大変形 (mm)	±60	±600
最大速度 (m/s)	0.06	1.0

2.2 試験概要

(a) 試験体

試験体は図1に示す株式会社高環境エンジニアリングが販売しているLRB製品(国土交通大臣認定番号MVBR-0559)のゴム外形800 mmの実大試験体であり、表2に示すゴム総厚200 mm(Hタイプ)と、二次形状係数5(Sタイプ)の2タイプとした。

(b) 試験条件および計測概要

表3に高速大歪試験の概要を示す。試験は圧縮せん断試験で、鉛直荷重は基準面圧とし、最大速度は1000 mm/sとした。計測は水平荷重、水平変位、鉛プラグ上下面の温度および下フランジプレートの表面温度について行った。上下フランジプレートと試験機取付盤との間には厚さ8 mmのテフロン系断熱板(熱伝導率:0.25W/m/K)を設置した。

加振サイクルは図2に示す3サイクルの正弦波加振とし、加振中の特性値(二次剛性Kd、降伏荷重Qd)は最大振幅の0~50 %の変形の数値を用いて、半サイクル毎に図2の○印の時刻で評価した。水平荷重については慣性力と摩擦力の補正を行った。試験結果の温度補正は雰囲気温度のみで行い、試験に伴う鉛プラグの温度上昇に対する補正は行っていない。各試験の間隔は30分程度の時間をあけ、鉛プラグ上下面の温度が安定した状態でを行った。

(c) 基本性能

表4に試験体の基本性能として、設計値、製造メーカーでの出荷試験結果および本試験機で行った標準試験(最大速度10 mm/s)の結果を示す。

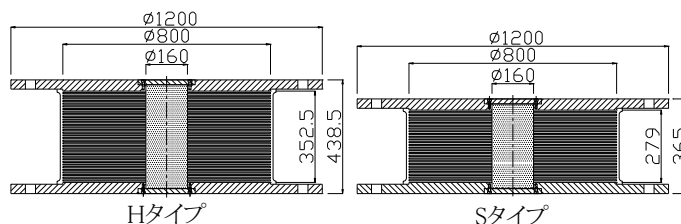


図1 LRB試験体(MVBR-0559)

表2 試験体概要

試験体タイプ	ゴム外径(mm)	鉛径(mm)	ゴム総厚(mm)	内部鋼板総厚(mm)	S2	S1	基準面圧(Mpa)
Hタイプ	800	160	199.5 (5.7 mm × 35)	153 (4.5 mm × 34)	4.01	35.1	10
Sタイプ			162 (6.0 mm × 27)	117 (4.5 mm × 26)	4.94	33.3	15

※ゴム種類: G0.392 (共通)

表3 高速大歪試験概要

試験体	Hタイプ	Sタイプ	
最大速度 (mm/s)	1000	1000	
最大水平せん断歪 (%)	200	200	300
最大水平変位 (mm)	400	324	486

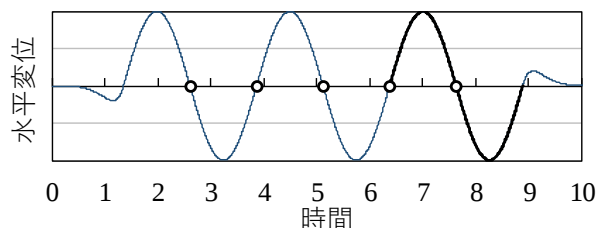


図2 加力サイクル

表4 試験体の基本性能

試験/設計値	Kd (kN/m)		Qd (kN)	
	Hタイプ	Sタイプ	Hタイプ	Sタイプ
設計値	99.4	122.4	160.3	160.3
出荷試験	98.8	111.6	166.9	172.5
標準試験	105.4	100.5	163.0	178.3
	Kd ₀		Qd ₀	

§3. 試験結果

図3に荷重-変形関係および試験結果の代表値として3サイクル目の二次剛性Kdと降伏荷重Qdを示す。各タイプいずれの試験においても最大速度1000 mm/s、最大水平歪200%または300%と厳しい試験条件の下でも荷重-変形関係は安定した履歴形状のループを描いている。また、第1、第2ループに比べ第3ループの面積が最も小さく履歴吸収エネルギーが徐々に小さくなっていることがわかる。

図4(i)に累積入力エネルギーの増加に伴う半サイクル毎のKd、Qdの変化と、(ii)に累積入力エネルギーと鉛プラグ上下面および下フランジプレートで計測した温度の時間変化を示す。ただし、図4(i)のKd、Qdの変化はそれぞれ標準試験の値(Kd₀、Qd₀)との比(凡例ではKd/Kd₀、Qd/Qd₀と表記)として示す。

図4(i)より、加振中の累積入力エネルギーの増加に伴いQdは低下しているが、加振後半で低下は緩やかになっている。一方、加振中のKdの変化は小さい。この傾向は各タイプそれぞれの試験で同様にみられ、既往の報告とも整合するものである。また、Sタイプの最大せん断歪200%と300%の試験は、間隔を30分程度あけ連続して行った試験であるが、試験開始直後のQdの値はほぼ同じとなっており、一度Qdが低下しても一定の時間が経過すれば特性が元に戻ることが確認できる。

図4(ii)より、加振開始後から鉛プラグ上下面の温度は上昇している。これは、加振速度が大きいと鉛プラグのせん断変形した部分で発生した熱が多く、周囲に伝導するよりも蓄積した分が多かったためと考えられる。また、鉛プラグ上下面の温度は加振終了後約100秒で最大値に達している。これは、高温となった鉛プラグ中心部から熱が上下面へ伝導するのに時間を要したためと考えられる。

累積入力エネルギーが最も大きいSタイプ、最大水平せん断歪300%の試験が最も鉛プラグ上下面の温度上昇が大きく、初期温度28℃から58℃に上昇した。下フランジプレートの温度に変化はなく一定であった。

写真2にSタイプ試験体で最大水平せん断歪300%の試験状況(最大水平せん断歪を生じた時刻)を示す。

なお、各試験体とも加振中および加振後に外見には損傷等がないことを確認した。

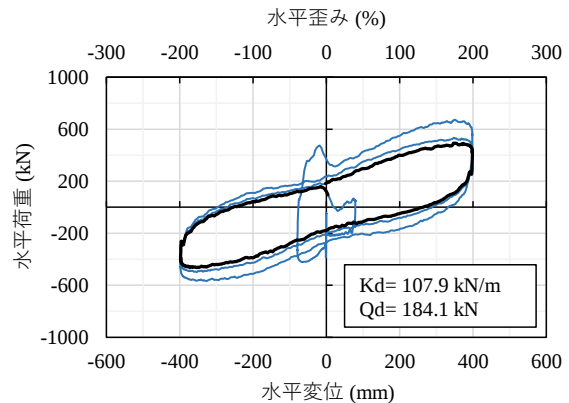
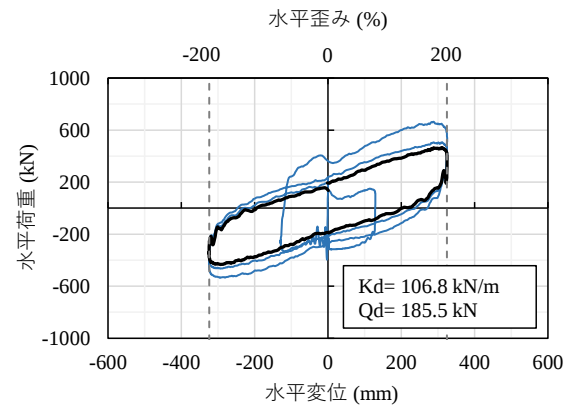
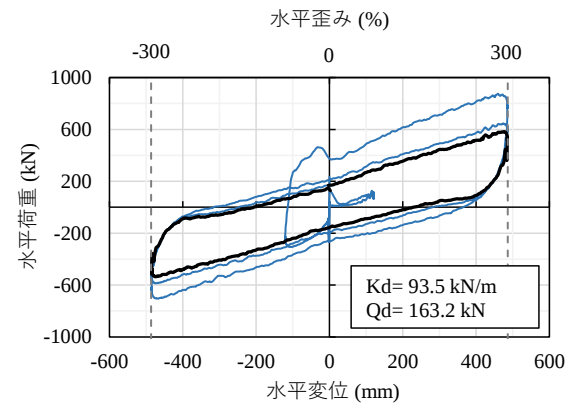
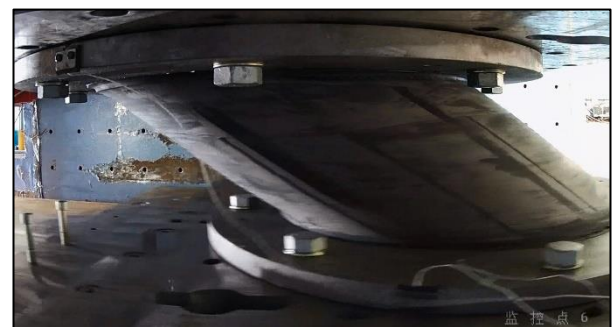
(a) Hタイプ、 $\gamma=200\%$ 、 $V=1000$ mm/s(b) Sタイプ、 $\gamma=200\%$ 、 $V=1000$ mm/s(c) Sタイプ、 $\gamma=300\%$ 、 $V=1000$ mm/s

図3 荷重-変形関係

写真2 試験状況(Sタイプ、 $\gamma=300\%$ 、 $V=1000$ mm/s)

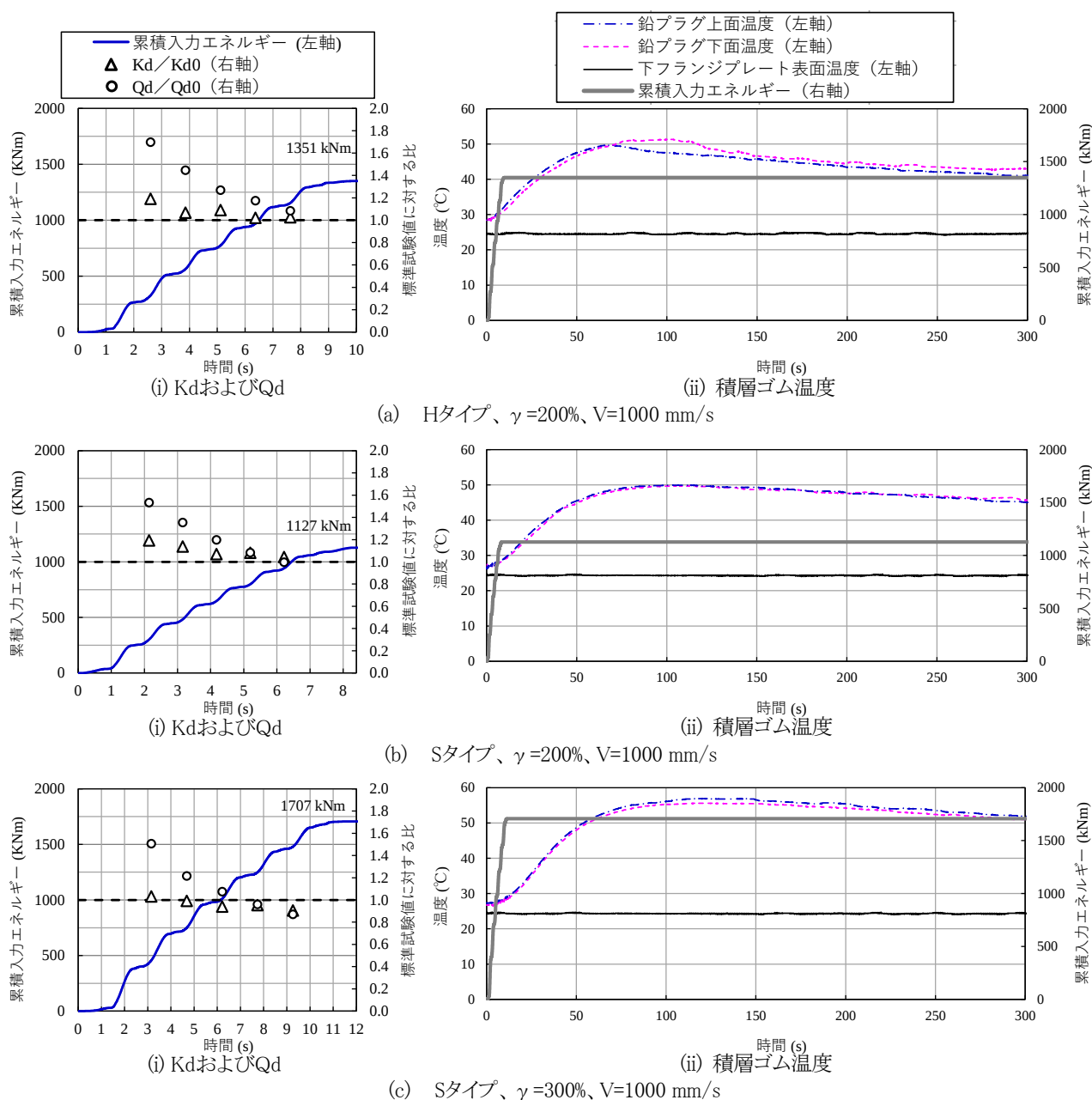


図4 累積入力エネルギーに伴うKd、Qdおよび積層ゴム温度の時間変化

§4. まとめ

高速大変形時の鉛プラグ入り積層ゴムの特性を把握するため、2タイプの実大試験体による高速大歪試験を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・実大試験体で最大速度 1000 mm/s、最大水平せん断歪 300%と厳しい条件の試験でも、荷重-変形関係は安定した履歴形状を描いた。
- ・高速大変形加振であったため、加振につれて降伏荷重 Qd は低下したが、加振途中から低下は緩やかになった。一方、二次剛性 Kd については変化が小さかった。
- ・加振により一旦 Qd が低下しても、30 分程度時間が経過すると加振前の状態に戻った。

【参考文献】

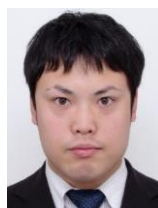
- 1) 馮 徳民: 中国武漢海潤(HIRUN)圧縮せん断試験機について、「設置が望まれる実大動的加力装置」シンポジウム, 東京工業大学, 2015.12
- 2) 嶺脇重雄 ほか: 超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験、構造工学論文集Vol.55B, pp.469-477, 2009.3
- 3) 建築研究所: 免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状態への影響に関する研究, No.170号, 2016.4

謝辞

本稿の試験は株式会社高環境エンジニアリングおよび無錫聖豊建築新材料有限公司(FUYO)のご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

ひとこと

LRBへの累積入力エネルギーに伴う装置特性の変化について、降伏荷重 Qd の減少は既往研究でも報告がされているところですが、今後より精度のよい検討ができればよいと考えています。



田中 良一