

鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の長周期地震動に対する繰返し性能に関する研究

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することが危惧されている。これを受け、2017年度から国土交通省の国住指第1111号(技術的助言)により、対象となる地域内では新築建物設計時に繰返し変形による免震材料の特性の変化を考慮することを求められることとなった。代表的な免震材料である鉛プラグ挿入型積層ゴム支承は、繰返し変形を受けることで鉛プラグの温度が上昇し、切片荷重が低下して履歴ループ面積が小さくなり、減衰効果が減少することが知られている。

本報では、当社が中国 無錫聖豊建築新材料有限公司と共同開発した鉛プラグ挿入型積層ゴム支承を対象に、長周期地震動に対する繰返し性能を把握するために実施した実大試験の結果および製品を対象とした熱伝導解析の結果を報告する。熱伝導解析による検討の結果、繰返し変形を受ける場合の切片荷重および鉛プラグ温度の変化を精度よく推定できる近似式を作成した。

Study on cyclic performance of lead rubber bearings under long-period ground motion

Abstract

Long-period ground motions were observed in the 2003 Tokachi-oki Earthquake and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. 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).

In this paper, we conducted cyclic tests using full-scale specimens and heat conduction analyses in order to confirm the performance against repeated deformation of lead rubber bearings jointly developed by FUJITA with FUYO Tech.

The following results were obtained.

- 1) It was confirmed that the device we developed has the same performance as a general device by cyclic tests using full-scale specimens.
- 2) The method of estimating the change in characteristics of the devices and the temperature rise of lead plugs by heat conduction analysis was verified by the results of cyclic tests using a full-scale test model.
- 3) We confirmed the performance of the products against cyclic deformation assuming long-period ground motion by conducting heat conduction analysis on all products.

キーワード： 鉛プラグ挿入型積層ゴム支承、
繰返し性能、熱伝導解析、
長周期地震動

§1.はじめに

2017年度から国土交通省の技術的助言により、対象地域内で新築建物設計時に繰返し変形による免震材料の特性の変化を考慮することを求められるようになった。既往の報告¹⁾により、一般に鉛プラグ挿入型積層ゴム支承は、繰返し変形により鉛プラグの温度が上昇し、それに伴って切片荷重が低下することが知られている。

本報では、当社が中国 無錫聖豊建築新材料有限公司(以下、FUYO 社)と共同開発した鉛プラグ挿入型積層ゴム支承(以下、FUYO 式 LRB)の製品を対象として、繰返し性能を熱伝導解析により確認した結果を報告する。熱伝導解析の妥当性は、実大の試験体による繰返し加振試験によって検証する。解析は、性能の変化を直接試験で確認できない大きな装置を含め、全製品を対象として行う。FUYO 式 LRB は、ゴム外径が600~1200mm、鉛径のゴム外径に対する比が0.15~0.25の製品がある。製品一覧を表1に示す。

§2.繰返し加振試験

2.1 試験体

試験体の寸法および特性値を表2に、試験体形状を図1に示す。表2には装置の諸元および特性に関する記号を併せ示す。試験体は、試験機の能力により実施可能な最大の装置としてDrが600mmの装置3体とした。試験体1と2はDpbが異なる試験体、試験体1と3はDrとDpbは共通で、内部構造が異なる試験体であり、試験体1と試験体2はS₁が37.5、試験体3はS₁が42.9の装置である。

2.2 試験概要

試験機は株式会社コベルコ科研の圧縮せん断試験機(鉛直最大荷重:4,500kN、水平最大荷重:400kN、最大速度:800mm/s、定格ストローク:±250mm)を用いた。測定項目は、変位(鉛直・水平)、荷重(鉛直・水平)および鉛プラグ温度とした。鉛プラグ温度の測定位置は図1に示す鉛プラグ上面と側面3/4高さとした。ただし、試験体3の側面3/4高さの温度測定位置は、鉛プラグ内部に12mm埋め込んだ位置である。なお、フランジプレートの取付いた試験体1および2は、上下フランジプレートと試験機の間には厚さ10mmの断熱材(熱伝導率:3.00×10⁻³W/cm°C以下)を設置した。試験条件は、建物の性能評価提出時チェックリスト(支承版²⁾)を参考に周期3~5秒、累積変形50mを目標とした。試験条件を表3に示す。各試験体とも、せん断歪γが100%で周期Tが3.0秒の試験と、γが180%でTが5.0秒の試験を実施した。累積変形は、試験機の能力により40m程度までとなった。試験状況を写真1に示す。

表1 FUYO 式 LRB の製品一覧

Dr (mm)	シリーズ	Dpb (mm)																					
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
600	H S																						
700	H S																						
800	H S																						
850	H S																						
900	H S																						
950	H S																						
1000	H S T																						
1100	H S T																						
1200	H S T																						

※ H、S、Tシリーズはそれぞれゴム総厚さ200mm、2次形状係数=5、ゴム総厚さ250mmの製品

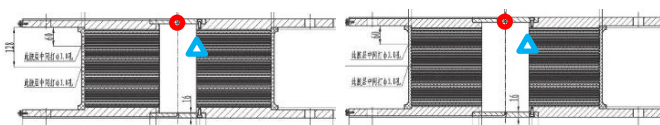
表2 試験体一覧

(a) 試験体の寸法

試験体	ゴム外径 Dr (mm)	鉛プラグ径 Dpb (mm)	ゴム一層分の厚さ tr (mm)	ゴム総数 n	ゴム総厚さ Hr (mm)	一次形状係数 S ₁	二次形状係数 S ₂
1	600-120A	120	4.0	30	120	37.5	5.00
2	600-150	150	4.0	30	120	37.5	5.00
3	600-120B	120	3.5	34	119	42.9	5.04

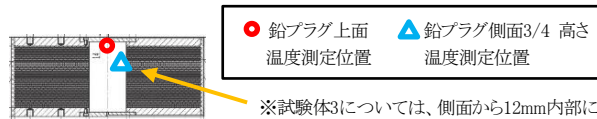
(b) 試験体の特性値

試験体	鉛直剛性 Kv (kN/mm)	二次剛性 Kd (kN/mm)	切片荷重 Qd (kN)	ひずみ100% 1ループ当たり 吸収エネルギー (kJ)	
1	600-120A	2943	0.929	90	39.67
2	600-150	2943	0.940	141	61.98
3	600-120B	3244	0.937	90	39.34



(a) 試験体1 (600-120A)

(b) 試験体2 (600-150)



(c) 試験体3 (600-120B)

● 鉛プラグ上面 温度測定位置
▲ 鉛プラグ側面3/4高さ 温度測定位置
※試験体3については、側面から12mm内部に埋込んだ位置

図1 試験体の形状

表3 試験条件

試験体 No.	鉛直荷重 (kN) [面圧] (N/mm ²)	波形	せん断歪 γ (%)	周期 T (s)	加振速度 (mm/s)	加振回数	累積変形 (m)
1	4241 [15]	正弦波	±100	3.0	251	87	41.8
			±180	5.0	271	40	34.6
±100			3.0	251	87	41.8	
±180			5.0	271	43	37.2	
3	±100	3.0	249	85	40.5		
	±180	5.0	269	41	35.1		

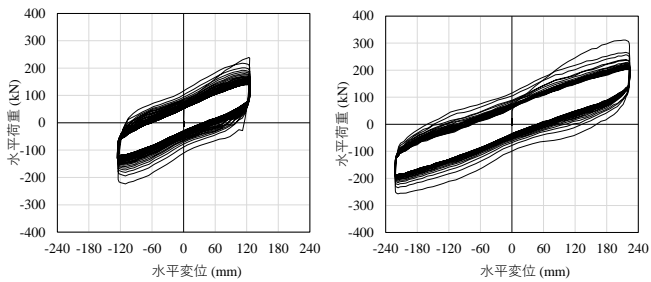


写真1 試験状況(試験体1)

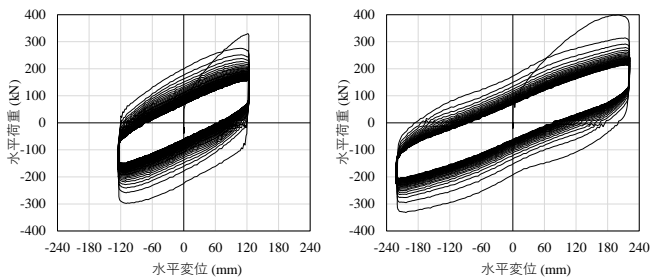
2.3 試験結果

水平荷重—水平変位関係を図2に、特性値(Kd , Qd)の変化を図3に、鉛プラグ各点の温度を図4に示す。横軸は鉛プラグ単位体積当たりの累積吸収エネルギー Wpb/Vpb とする。確認した試験体の性能の変化を以下に示す。

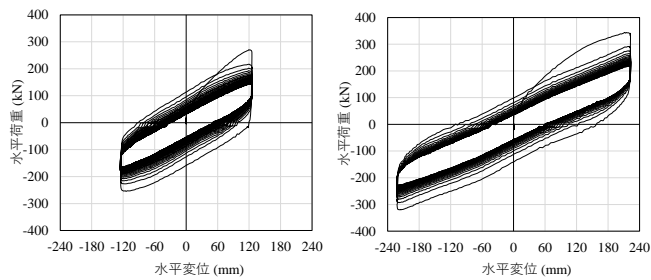
- Kd は加振初期に若干低下するが Wpb/Vpb が増加しても変化は少ない(図3(a))。
- Qd は加振初期から低下するが、 Wpb/Vpb が増加すると変化は緩やかになり、一定値に停留する傾向にある。 Wpb/Vpb が 600N/mm^2 で $0.4\sim 0.6$ 倍となった(図3(b))。
- 鉛プラグの温度は Wpb/Vpb の増加に伴い上昇した後停留する傾向があり、 Wpb/Vpb が 600N/mm^2 で最も高温となった試験体2の側面3/4高さ温度は 160°C を超えた(図4)。
- 試験体1と2の比較から、鉛径の大きい試験体2のほうが、切片荷重の低下が大きい(図3(b)、図4)。
- 試験体1と3の比較から、 Qd が低下したのち停留する値については内部構造の違いによる差異は小さい(図3(b))。



(i) $T=3\text{s}$, $\gamma=100\%$ (ii) $T=5\text{s}$, $\gamma=180\%$
(a) 試験体1 (600-120A)



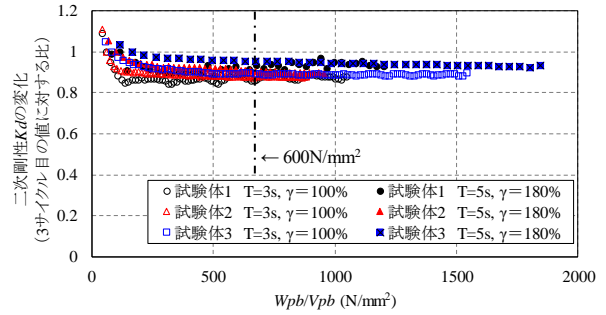
(i) $T=3\text{s}$, $\gamma=100\%$ (ii) $T=5\text{s}$, $\gamma=180\%$
(b) 試験体2 (600-150)



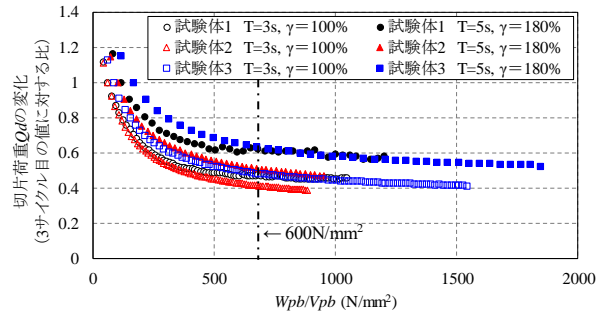
(i) $T=3\text{s}$, $\gamma=100\%$ (ii) $T=5\text{s}$, $\gamma=180\%$
(c) 試験体3 (600-120B)

図2 水平荷重—水平変位関係

繰返し加振試験前と試験後約30分の基本性能試験の比較例として試験体1 (600-120A)の結果を図5に示す。前述のとおり、繰返し変形によって一時的に Qd が低下したが、試験後は特性値がほぼ元の値に戻る事がわかった。なお、すべての試験体で同様の傾向を確認した。



(a) Kd の変化



(b) Qd の変化

図3 特性値の変化

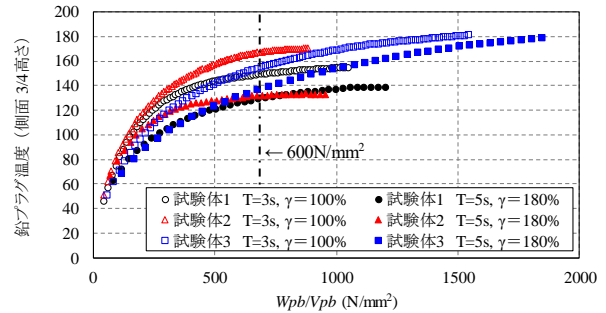
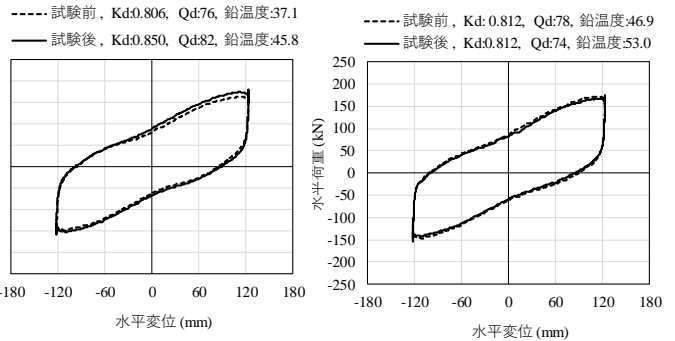


図4 鉛プラグ温度(側面3/4高さ)



(a) 試験 ($T=3\text{s}$, $\gamma=100\%$) 前後 (b) 試験 ($T=5\text{s}$, $\gamma=180\%$) 前後
図5 繰返し加振試験前後の基本性能試験結果 (600-120A)

§3.繰返し変形を想定した熱伝導解析

3.1 解析概要

解析は3次元FEMによる温度応力解析用の汎用ソフト ASTEA MACS Ver. 7.1.2を用いた。ただし、本ソフトはコンクリートの水和熱反応を対象とした長時間の解析が主であり、解析時間刻みの最小値が0.75秒であるため、本解析では時間のスケールを100倍して解析を実施した。解析フローを図6に示す。解析モデルは図7に示すように鉛、ゴムおよび鋼材の要素で構成した3次元モデルである。図7(a)に示す鉛プラグの赤色の要素は、側面がゴム部に接触しており、温度上昇分 $\Delta\theta_{pb}$ を与える鉛プラグのせん断変形部分である。図7(b)に示す境界条件は、モデルの上下面は完全断熱とし、他の表面は熱伝達率: $1.40 \times 10^{-3} \text{W}/(\text{cm}^2\text{C})$ の空気に接してと仮定した。文献1)を引用して設定した各要素の諸元を表4に示す。

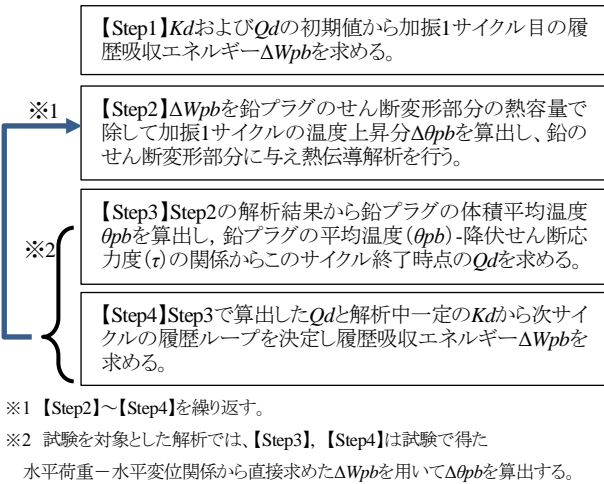


図6 解析フロー

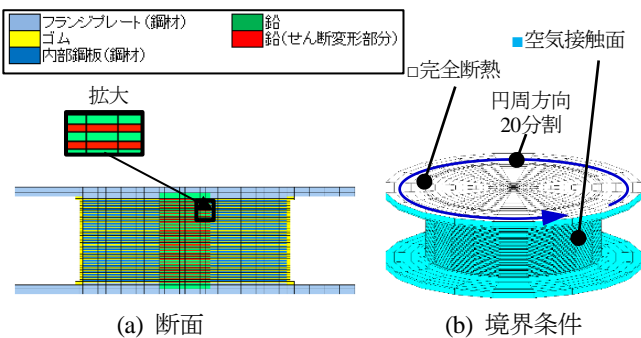


図7 解析モデル

表4 解析モデルの諸元

構成要素	熱伝導率 (W/cm°C)	比熱 (J/g°C)	比重 (g/cm³)
鉛	3.52×10^{-1}	0.126	11.34
ゴム	1.30×10^{-3}	1.500	1.10
鋼材	6.05×10^{-1}	0.435	7.85

3.2 試験を対象とした解析

(1) 概要

本報で用いる熱伝導解析の妥当性を確認では、図6の解析フロー【Step3】と【Step4】で算出する累積吸収エネルギー ΔW_{pb} は、試験で得られた水平荷重-水平変位関係から直接求めた。 ΔW_{pb} と鉛プラグの熱容量を用いて算出した $\Delta\theta_{pb}$ を、鉛プラグのせん断変形部分に与えて熱伝導解析を行い、鉛プラグ各部の温度を求め、試験結果と解析結果の比較を行った。

(2) 解析結果

試験で得られた鉛プラグ温度と解析結果を図8に示す。解析結果は概ね試験結果と整合しており、本解析の妥当性が確認できる。また、鉛プラグのせん断応力度 τ と解析で求めた鉛プラグ各要素温度の体積による重みづけ平均値(鉛プラグ体積平均温度) θ_{pb} の関係を図9に示す。同図には実線で文献1)に示される $\tau-\theta_{pb}$ の関係式(以下、基整促式)を併せて示す。解析結果は基整促式と概ねよい一致がみられることから、本解析の妥当性が確認できる。

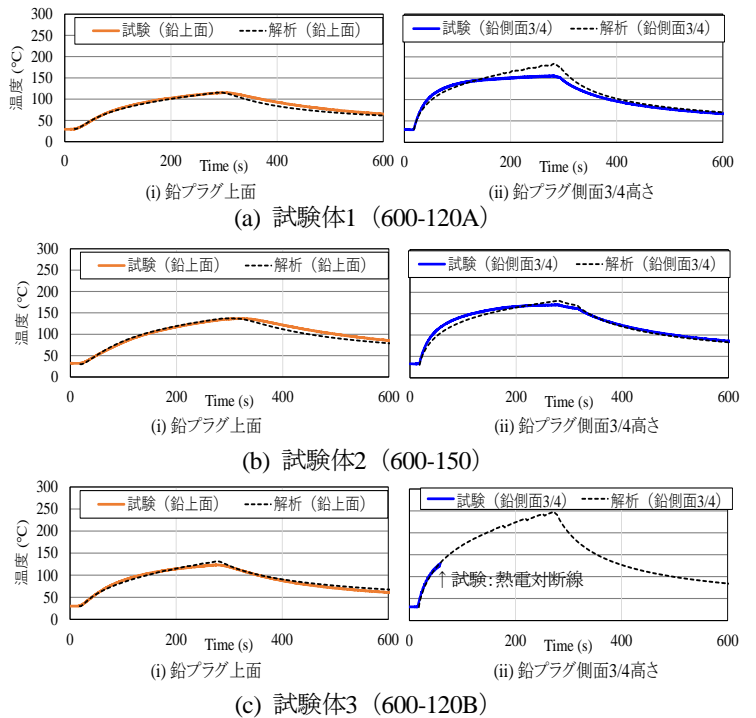


図8 試験と解析結果の鉛プラグ温度比較

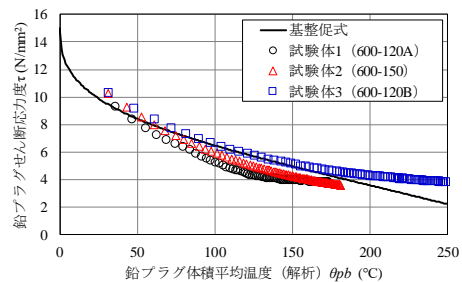


図9 基整促式¹⁾と解析結果のせん断応力度の変化

3.3 製品を対象とした解析

(1) 概要

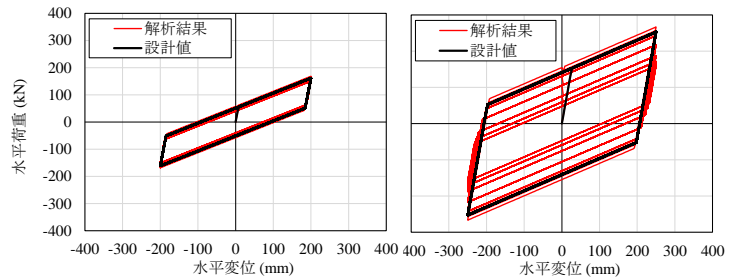
製品を対象とした解析では、解析フロー【Step3】と【Step4】で算出する ΔWpb は、仮定した水平荷重－水平変位関係から求めた。試験を対象とした解析と同様に、 $\Delta\theta pb$ を鉛プラグのせん断変形部分に与えて熱伝導解析を行って θpb を求め、基整促式により算出した Qd を用いて新たに水平荷重－水平変位関係を設定することを繰り返す。全要素の初期温度および雰囲気温度は 20°C 、初期の特性値は Kd 、 Qd とも設計値、水平荷重－水平変位関係はバイリニアモデル、 Kd は解析中一定(初期値)と仮定した。解析の対象とした製品一覧を表5に示す。

(2) 解析結果

ゴム外径 Dr および鉛プラグ径 Dpb が最小、最大の装置の比較(①)、 Dpb/Dr が0.2(Dpb が標準径)である各装置の比較(②)および同一 Dr で Dpb が異なる装置の比較(③)を示す。比較①として、水平荷重－水平変位関係と切片荷重 Qd および鉛プラグ体積平均温度 θpb の変化を図11に示す。 Qd の変化は、縦軸に Qd の設計値に対する比 μ をとり、横軸は一般化するため鉛プラグ単位体積当たりの累積吸収エネルギー Wpb/Vpb をとる。 θpb の変化は、縦軸に θpb を、横軸に Wpb/Vpb をとる。 Dr と Dpb がともに最小の600-90では、 Wpb/Vpb が $600\text{N}/\text{mm}^2$ のとき、 μ は0.7程度、 θpb は 110°C 程度であるのに対し、最大の1200-300では μ は0.3程度、 θpb は 240°C 程度となり、解析結果に大きな差異がみられた。比較②として、 Dpb/Dr が同一の装置として Dr が600mm、800mm、1000mm、1200mmで、 Dpb/Dr が0.2である装置について、 μ － Wpb/Vpb 関係と θpb － Wpb/Vpb 関係を図12に示す。 Dpb/Dr が同一の場合、大きな装置ほど Qd の低下が大きく θpb も高くなることから分かる。比較③として Dr が600mmと1200mmの装置について、 Dpb のみが異なる装置の μ － Wpb/Vpb 関係と θpb － Wpb/Vpb 関係を図13に示す。同一 Dr の装置では Dpb が大きいくほど Qd の低下が大きく、 θpb も高くなることから分かる。既往の報告^{1), 3), 4)}でも、 Dpb が大きくなると、鉛プラグの温度が上昇し、 Qd の低下が大きくなることから報告されており、本製品も同様の傾向がみられた。

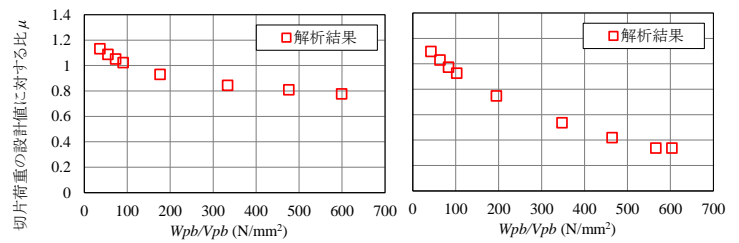
表5 製品を対象とした解析モデルの形状

製品名称	Dr (mm)	Dpb (mm)	tr (mm)	n	Hr (mm)	S_1	S_2	比較項目
1 600H-90	600	90	5.0	40	200	30.0	3.0	①③
2 600H-120		120						②③
3 600H-150	800	150	5.7	35	199.5	35.1	4.0	③
4 800H-160		160						②
5 1000T-200	1000	200	7.0	36	252	35.7	4.0	②
6 1200T-180	1200	180	7.0	36	252	42.9	4.8	③
7 1200T-240		240						②③
8 1200T-300		300						①③

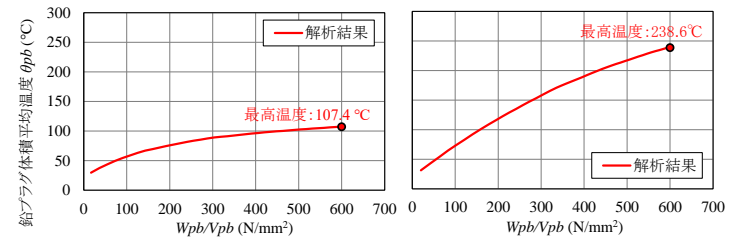


(i) 600H-90 (ii) 1200T-300

(a) 水平荷重-水平変位関係



(i) 600H-90 (ii) 1200T-300

(b) 切片荷重変化率 μ 

(i) 600H-90 (ii) 1200T-300

(c) 鉛プラグ体積平均温度 θpb

図11 製品を対象とした解析結果(比較①)

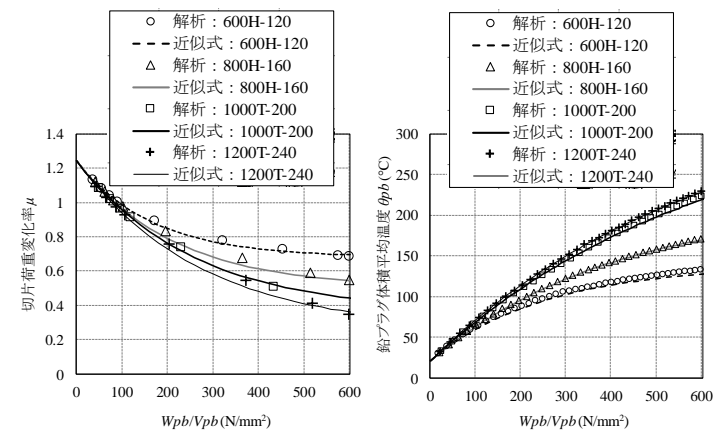
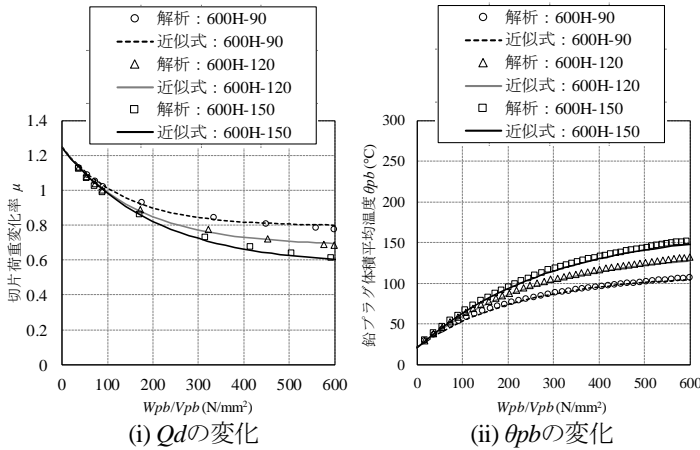
(i) Qd の変化(ii) θpb の変化図12 $Dpb/Dr=0.2$ の装置の解析結果(比較②)

表6 係数 α_{ij}

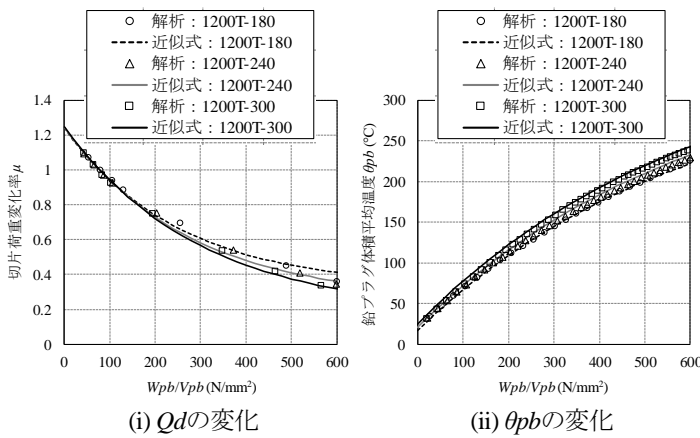
i	j							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4.37×10^{-7}	-1.47×10^{-3}	1.38	-2.57×10^{-6}	5.96×10^{-3}	-1.66	-0.68	0.68
2	-4.37×10^{-7}	1.47×10^{-3}	-0.186	0	-1.0×10^{-3}	1.60	0.80	-0.80
3	2.50×10^{-6}	-5.95×10^{-3}	4.86	0	-1.0×10^{-3}	1.60	-0.80	0.80

表7 係数 β_{ij}

i	j						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-1.12×10^{-6}	3.24×10^{-3}	-1.08	-1.25×10^{-3}	1.75	0.80	-0.80
2	1.12×10^{-6}	-3.24×10^{-3}	1.15	-1.32×10^{-3}	1.75	1.00	-1.00
3	3.44×10^{-6}	-7.57×10^{-3}	4.74	-1.38×10^{-3}	1.80	-0.48	0.48



(a) Dr 600mm



(b) Dr 1200mm

図13 同一ゴム外径で鉛径の異なる装置の結果(比較③)

§4. 製品の特性変化を表現する近似式

前章までの解析結果を用いて、FUYO式LRBの繰返し性能として、 Qd の設計値に対する変化率 μ および鉛プラグ体積平均温度 θ_{pb} と、繰返し変形による単位体積当たりの累積吸収エネルギー W_{pb}/V_{pb} との関係を表す近似式を作成した。近似式はまず、比較②の結果から $D_{pb}/D_r=0.2$ の装置の解析結果の回帰を行い、その後比較③の結果から同一ゴム外径で D_{pb} が異なる装置の違いについて回帰を行った。最後に、②と③の装置の回帰結果を併せることで作成した。近似式を(1)式および(2)式に示す。

$$\mu = \frac{8.33}{7.97} \cdot \left\{ C_{Q1} + C_{Q2} \cdot \exp\left(-C_{Q3} \cdot \frac{1}{360} \cdot \frac{W_{Pb}}{V_{Pb}}\right) \right\} \quad \dots (1)$$

$$\theta_{pb} = \frac{327.5}{1.1} \left\{ C_{T1} + C_{T2} \cdot \exp\left(C_{T3} \cdot \frac{1}{360} \cdot \frac{W_{Pb}}{V_{Pb}}\right) \right\} \quad \dots (2)$$

ここで、 $C_{Q1} \sim C_{Q3}$ および $C_{T1} \sim C_{T3}$ は、 D_{pb}/D_r を変数とする係数の関数であり、(3)式と(4)式で表される。式中の係数 α_{ij} および β_{ij} ($i=1 \sim 3, j=1 \sim 7$)は表6および表7に示す。

$$C_{Qi} = (\alpha_{i1} \cdot D_r^2 + \alpha_{i2} \cdot D_r + \alpha_{i3}) \cdot \left\{ (\alpha_{i4} \cdot D_r^2 + \alpha_{i5} \cdot D_r + \alpha_{i6}) \cdot \left(\frac{D_{pb}/D_r}{0.2} \cdot \alpha_{i7} + \alpha_{i8} \right) + 1 \right\} \quad \dots (3)$$

$$C_{Ti} = (\beta_{i1} \cdot D_r^2 + \beta_{i2} \cdot D_r + \beta_{i3}) \cdot \left\{ (\beta_{i4} \cdot D_r + \beta_{i5}) \cdot \left(\frac{D_{pb}/D_r}{0.2} \cdot \beta_{i6} + \beta_{i7} \right) + 1 \right\} \quad \dots (4)$$

図12および図13より、近似式は $D_{pb}/D_r=0.2$ の装置の解析結果を精度よく近似しており、かつ同一 Dr で D_{pb} が異なる装置の違いについても Dr が最小の600mmと最大の1200mmの装置でよく近似している。以上より作成した近似式で全製品の繰返し性能を評価できることがわかる。

§5. まとめ

当社が中国 無錫聖豊建築新材料有限公司と共同開発した鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の製品を対象に、長周期地震動による繰返し変形に対する性能の確認を、熱伝導解析により行った。その結果、繰返し変形を受ける場合の切片荷重および鉛プラグ温度の変化を精度よく推定できる近似式を作成した。これによりすべての製品について繰返し性能を評価できることを示した。

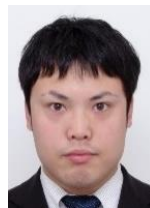
※FUYO式LRBは、本報で示した繰返し性能の近似式より、一般的かつ安全側の評価をした関係式によって、長周期地震動に対する性能変化について、一般財団法人日本建築センターより評定を取得した(評定-IB0027-01)。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人建築研究所: 免震部材の多数回繰返し特性と免震建物の地震応答性状への影響に関する研究、建築研究資料、No.170、pp.VI-1.3-1-1~26、2016.4.
- 2) 一般財団法人日本建築センター: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化確認試験に対するチェックリスト(支承材)、2017.5
- 3) 竹中康雄ほか: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する試験的研究、日本建築学会構造系論文集、第74巻 第646号、2009.12
- 4) 北村春幸ほか: 長周期地震動対応を行う際の注意点、建築技術、No.815、pp.116-125、2017.12

ひとこと

当社が開発した鉛プラグ挿入型積層ゴムの繰返し性能を評価できるようになったことで、本製品を技術的助言の対象地域でも適用可能となりました。



田中 良一