鉛プラグ入り積層ゴム免震建物の長寿命化に関する基礎的研究

A STUDY ON PROLONGATION OF THE LIFETIME OF SEISMIC ISOLATED BUILDING WITH LEAD RUBBER BEARING

本多悠希 ——— * 1 野口 剛 ——— * 2
千葉一樹 ——— * 3 栗田 哲 ——— * 4

Yuki HONDA ——— * 1 Gou NOGUCHI ——— * 2
Kazuki CHIBA ——— * 3 Satoshi KURITA ——— * 4

キーワード：
免震, 鉛プラグ入り積層ゴム, 経年変化, 長寿命化

Keywords:
Seismic isolation, Lead rubber bearing, Aged deterioration, Life prolongation

In order to prolong the lifetime of seismic isolated building with lead rubber bearing (LRB), we investigate the relationship between the seismic response of the LRB-isolated building and the aging of LRB by a non-linear response analysis. For the non-linear response analysis, the restoring-force model of LRB taking in account the aged deterioration over 100 years old is developed from the experimental data. The experimental equation of the failure shear stress of LRB is also proposed. From the seismic response analyses, the aged deterioration of the failure shear stress of LRB is found to be important in the life-prolongation of LRB-isolated building.

1. はじめに

大気中の温暖化ガスを低減する低炭素社会実現に向けての取り組みが盛んに進められている。建築関連分野で排出される二酸化炭素は全産業排出量の約3割¹⁾と大きな割合を占めており、建築分野でも二酸化炭素排出量の削減を目指す取り組みが必要とされている。

建築関連分野での環境負荷は大きく分けて2種類に分類でき、主に「建物の維持管理に伴うもの」と「建設と解体時に伴うもの」となっている。後者の建設と解体に伴う環境負荷を低減に対しては、建物の長寿命化が検討されており、低炭素社会実現を目的とした一つの方向性として進められる。

現在、鉄筋コンクリート構造の建物は長寿命化を考慮した設計により、100年以上の耐用年数を確保することが可能である²⁾。一方、免震建物に関しては、免震部材の耐久性の研究が行われているが、100年以上の耐久性を有しているかについては、必ずしも明らかになっていない。積層ゴムに関しては、多くのメーカーから耐用年数を60年または80年に設定していると報告されているが³⁾、この耐用年数以上の耐久性を積層ゴムが有していることについては明確にされていない。免震建物の長寿命化を考えると、積層ゴムに対しても上部構造と同等の耐用年数が必要である。

本研究では、鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）を用いた免震建物の長寿命化を取り上げ、耐用年数が60年を超えるLRBの耐久性に関わる課題について、非線形地震応答解析により検討を行う。尚、地震応答解析の目的から60年以上の経年変化も考慮できるLRBの復元力モデルが必要となるが、そのような復元力モデルは提案されていない。そこで、60年相当までのLRBの熟老化促進試験結果⁴⁾を用いて、経年変化を考慮したLRBの復元力モデルを作成する。

2. 経年変化を考慮したLRBの力学モデル

経年変化を考慮したLRBの復元力特性と破断せん断歪みについて、(株)ブリヂストンが公表している技術資料⁴⁾に基づき、モデル化を行う。積層ゴム支承の経年変化は熟老化促進実験により予測することが可能であり、60年度相当までの経年変化については、天然ゴム系積層ゴム支承の熟老化促進実験の結果が文献4)に示されている。本研究では、長期の耐用年数として60年以上を対象としているため、経過年数60年以降の経年変化については、文献4)に示されている60年度相当までの実験結果を基に外挿を行う。

2.1 経年変化を考慮したLRBの復元力特性のモデル化

LRBの水平復元力特性を文献4)に記載されたゴムのせん断歪み依存性を考慮した修正バイリニアモデルとし、そのバイリニアモデルを図1に示す。LRBの降伏後剛性 K_d 及び一次剛性 K_u は式(1)及び式(2)で与えられている。

$$K_d = CK_d \cdot (K_r + K_p) \quad (1)$$

$$K_u = \beta \cdot K_d \quad (2)$$

ここに、 K_r : 天然ゴムの水平ばね定数

K_p : 鉛の水平剛性増加分

CK_d : 降伏後剛性の歪み依存による修正係数

β : 一次剛性の降伏後剛性に対する倍率

本研究では図2に示す概念図のように、LRBの経年変化を積層ゴム部分と鉛プラグ部分の二つに分けて考える。積層ゴム部分は経年変化によりゴムが硬化する影響で、天然ゴムの水平ばね定数 K_r が増加する。ここで、天然ゴムの水平ばね定数 K_r の経年による変化率を α_k とする。一方で、鉛プラグ部分は鉛そのものが安定的な金属であ

¹⁾ 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程
(〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6)

²⁾ 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

³⁾ 東京理科大学工学部第一部建築学科 助教・博士(工学)

⁴⁾ 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Arch., Grad. School of Eng., Tokyo Univ. of Science

²⁾ Graduate Student, Dept. of Arch., Grad. School of Eng., Tokyo Univ. of Science

³⁾ Assistant Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., Dept. of Arch., Grad. School of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

ることから経年変化しないと仮定すると、鉛の水平剛性増加分 K_p 及び降伏荷重 Q_d は変化しない。したがって、LRB の経年変化は積層ゴムの経年変化と同様に考えることができる。式 (1) の天然ゴムの水平ばね定数 K_r に経年変化率 α_k を適用することで、経年変化を考慮した LRB の降伏後剛性 K_d' を式 (3) のように表す。

$$K_d' = CK_d \cdot (\alpha_k \cdot K_r + K_p) \quad (3)$$

また、一次剛性 K_u は式 (2) のように降伏後剛性 K_d に依存した式で与えられるが、降伏後剛性 K_d' が変動しても、鉛プラグ部分は経年変化しないと仮定しているため経年変化前後で履歴面積が変わらないように、 β の値を逐次変動させ、経年変化を考慮した一次剛性 K_u' を式 (4) のように定める。その際の β' は式 (5) で表される。

$$K_u' = \beta' \cdot K_d' \quad (4)$$

$$\beta' = \frac{K_d}{K_d'} (\beta - 1) + 1 \quad (5)$$

天然ゴムの水平ばね定数に対する経年変化率 α_k の実験式作成にあたっては熱老化促進実験結果⁴⁾を用いる。促進実験は縮尺モデル $\phi 120[\text{mm}]$ (一次形状係数 $S1=35$, 二次形状係数 $S2=5$, せん断弾性係数 $G=0.4$, 劣化試験面圧 $\sigma=15[\text{N}/\text{mm}^2]$) を用いて行われた。実験から得られた 30 年度相当, 60 年度相当の天然ゴムの水平ばね定数 K_r の実験値を 0 年度の値で基準化した経年変化率を図 3(a) に示す。

図 3(a) に示した実験結果 3 点を最小二乗法により指数関数で近似を行い、指数関数の底が経過年数 t となるように定めると、天然ゴムの水平ばね定数の経年変化率 α_k の実験式は式 (6) となる。

$$\alpha_k = 6.51 \times 10^{-3} \times t^{0.59} + 1.0 \quad (t: \text{経過年数}) \quad (6)$$

2. 2 破断せん断歪みの経年変化のモデル化

積層ゴムの破断せん断歪みは経年変化によって低下する傾向がある。2.1 節で作成した天然ゴムの水平ばね定数の経年変化率と同様に、熱老化促進実験結果⁴⁾を用いて破断せん断歪みの経年変化率の実験式の作成を行う。尚、経年変化によって破断応力は増加傾向にあるが本研究では応力増加を考慮しないものとしモデル化を行う。

促進実験は縮尺モデル $\phi 120[\text{mm}]$ (一次形状係数 $S1=30$, 二次形状係数 $S2=5$, せん断弾性係数 $G=0.4$, 劣化試験面圧 $\sigma=14.7[\text{N}/\text{mm}^2]$) を用いて行われた。試験から得られた 30 年度相当, 60 年度相当の破断せん断歪みの実験値を 0 年度の値で基準化した経年変化率を図 3(b) に示す。

図 3(b) に示した実験結果 3 点を最小二乗法により指数関数で近似を行い、指数関数の底が経過年数 t となるように定めると、破断せん断歪みの経年変化率 $\alpha_{\gamma 1}$ の実験式は式 (7) となる。

$$\alpha_{\gamma 1} = -1.0 \times 10^{-4} \times t^{1.79} + 1.0 \quad (t: \text{経過年数}) \quad (7)$$

また、破断せん断歪みの経年変化に関しては実験結果及び試験体の各特性値のばらつきや実験結果が最大経過年数で 60 年度相当までしかないことを考慮し、破断せん断歪みの経年変化の実験式をもう 1 種作成する。

60 年相当までの実験結果 3 点から線形的に破断せん断歪みが低下すると仮定し、一次関数で近似を行った破断せん断歪みの経年変化率 $\alpha_{\gamma 2}$ の実験式を作成すると式 (8) となる。

$$\alpha_{\gamma 2} = -2.4 \times 10^{-3} \times t + 1.0 \quad (t: \text{経過年数}) \quad (8)$$

以上の 2 種類を破断せん断歪みの経年変化率の実験式とする。

図 1 修正バイリニア型の復元力特性

図 2 LRB の復元力特性の経年変化概要

(a) 天然ゴムの水平ばね定数 K_r

(b) 破断せん断歪み

図 3 特性の経年変化率

3. 経年変化を考慮した LRB 免震建物の地震応答解析

3. 1 解析モデル

地震応答解析に使用する LRB 免震建物の振動モデルを図 4 に示す。振動モデルは上部構造を剛体とした 1 質点系振動モデルである。

$$M_s \ddot{x} + Q(x) = -M_s \ddot{x}_0 \quad (9)$$

上部構造の質量 M_s は 8000[ton] とする。免震層には直径 900[mm]、せん断弾性係数 $G=0.4$ 、鉛プラグ径 180φ、ゴム層厚 180[mm] (6[mm] × 30 層) の LRB が 15 基配置されているとして、免震層の水平復元力 Q は 2.1 節の経年変化を考慮した LRB 復元力モデルから計算する。入力地震動 $\ddot{x}_0$ は日本建築センターにより作成された模擬地震波 BCJ-L2 (最大加速度 356[gal]) を使用する。尚、原波形を使用するケース (BCJ-L2 × 1.0 倍) の他に、地震動の不確定性を考慮し、地震動強さに余裕を持たせ、原波形の振幅を 1.5 倍に拡張したケース (BCJ-L2 × 1.5 倍) についても応答計算を行う。応答計算は、非線形時刻歴応答解析法により行う。

応答解析を行う前に、解析モデルの LRB 復元力特性の経年変化を調べる。LRB の経過年数が 0 年、60 年、120 年について LRB の水平復元力の履歴曲線を求め、その結果を図 5 に示す。図中の履歴曲線は、最大せん断歪み 100% 時と最大せん断歪み 200% 時の履歴曲線である。経過年数が 120 年になると、経過年数 0 年との違いが降伏後剛性に認められるようになるが、経過年数 0 年に対する経過年数 120 年の降伏後剛性の増分は僅かである。

次に、ゴムの経年変化による LRB の降伏後剛性の増加が免震建物

図 4 解析モデル

図 5 水平復元力特性

(a) BCJ-L2 × 1.0 倍入力時

の固有周期に及ぼす影響について検討する。検討に使用する免震建物の固有周期は LRB の等価剛性から算出される固有周期とする。この固有周期の経年変化を経過年数 160 年まで外挿した結果を図 6 に示す。図中の記号 ■ はせん断歪み 100% 時の固有周期を表し、記号 ● はせん断歪み 200% 時の固有周期を表す。せん断歪み 200% の固有周期は、経過年数が 160 年となっても、経過年数 0 年に比べて約 0.1 秒短くなる程度である。

3. 2 最大応答値

LRB のゴムの経年変化が免震建物の地震応答に及ぼす影響について検討を行う。地震応答については、最大変位応答と最大加速度に着目し、これらの最大応答は非線形時刻歴応答解析により求める。経過年数 160 年までの間を 20 年間隔で等分割し、各経過年数に対して応答解析を行い、得られた結果を図 7 に示す。図 7 (a) には入力加速度の振幅を 1 倍した場合の結果 (BCJ-L2 × 1.0 倍) を図示し、図 7 (b) には入力加速度の振幅を 1.5 倍した場合の結果 (BCJ-L2 × 1.5 倍) を図示する。また、図中の記号 ■ は最大変位応答を表し、記号 ● は最大加速度応答を表す。図 7 (a) 及び (b) とともに、縦軸は経過年数 0 年時の最大応答値に対する割合である。最大応答変位は経過年数が長くなるにつれて徐々に減少し、経過年数 160 年時では BCJ-L2 × 1.0 倍及び BCJ-L2 × 1.5 倍入力のどちらの場合においても 3% 程度しか減少していない。一方、最大加速度応答は経過年数が長くなるにつれて、徐々に増加し、どちらの入力の場合においても 7% 程度増加している。従って、経過年数が 160 年であっても最大応答の経年変化は 10% 以下であり、LRB のゴムの経年変化が免震建物の最大応答に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3. 3 LRB の水平変形能力から見た考察

ゴムの経年変化により LRB の破断せん断歪みは低下する。前節で求めた最大変位応答から算出される LRB の最大せん断歪みと経年変化

図 6 固有周期

(b) BCJ-L2 × 1.5 倍入力時

図 7 最大応答値の経年変化

を考慮した LRB の破断せん断歪と比較し、LRB の水平変形能力と経年変化について考察する。

図 8 に示した最大変位応答から算出した LRB の最大せん断歪みと式 (7) と式 (8) を用いて計算した破断せん断歪みとの比較を図 8 に示す。図中の破断せん断歪みは、経過年数 0 年の破断せん断歪みを 400%と仮定して計算した値である。図 8 (a) には、式 (7) で与えられる破断せん断歪みの経年変化率 α_{γ_1} (指数関数近似) から算出した破断せん断歪みの結果 (Case1) を示す。一方、経年変化率 α_{γ_2} を用いて得られた結果を Case2 として同図に示す。また、入力加速度の振幅を 1.0 倍した場合 (BCJ-L2×1.0 倍入力時) の最大せん断歪み (記号■) と入力加速度の振幅を 1.5 倍した場合 (BCJ-L2×1.5 倍入力時) の最大せん断歪み (記号●) を図 8 (a) 及び (b) の両図に示す。

Case1 の場合、1.0 倍入力時では、経過年数が 120 年を超えると最大せん断歪みが破断せん断歪みを上回る。1.5 倍入力時では、経過年数が 100 年に達する前で最大せん断歪みが破断歪みを超えている。一方、Case2 の場合、1.0 倍入力時は、経過年数が 160 年になっても最大せん断歪みは破断せん断歪みを超えることはない。1.5 倍入力時でも、経過年数が 150 年程度になってから最大せん断歪みが破断せん断歪みを超えるようになる。このように、経過年数が約 100 年を超えると、Case1 と Case2 の破断せん断歪みの違いが顕著に現れる。耐用年数が 100 年を超える免震建物を設計しようとする場合、破断せん断歪みの経年変化を考慮して設計限界変位を決めようとする場合、Case1 と Case2 の破断せん断歪みの違いは無視できない。

この Case1 と Case2 の破断せん断歪みの違いは破断せん断歪みの実験式の作成に使用した関数の相違によるものでなく、実験式の作成に使用した実験データが 60 年相当までしかなかったことに起因

すると考えられる。図 3 (b) が示すように、実験を行った 60 年相当の範囲では Case1 と Case2 の破断せん断歪みには殆ど差異がみられないことから、この考えの証左となっている。従って、耐用年数が 60 年またはそれ以上の耐用年数の LRB 免震建物を設計しようとする場合には、現在の実験の年数範囲では不十分であり、現在よりも長い年数の促進劣化実験を行うことが必要である。

4. まとめ

耐用年数が 60 年を超える LRB 免震建物の課題を探るために、メーカーの熱老化促進実験結果から経年変化を考慮した LRB 復元力モデルを作成し、そのモデルを用いて地震応答解析を行った。得られた知見は以下の通りである。

1) LRB ゴム部分の経年変化が LRB 免震建物の最大応答に及ぼす影響を調べた結果、経過年数が 160 年経っても、経年変化の考慮の有無による最大応答の差異は 10%以下であることを解析的に確認した。このことから、耐用年数が 60 年を超えるものとした LRB 免震建物は、LRB ゴム部分の経年変化が建物の最大応答に及ぼす影響は小さいと考えられる。

2) 耐用年数が 60 年を超える LRB 免震建物の設計において、経年変化を考慮した LRB の破断せん断歪の実験式が有する精度は重要な課題となる。60 年相当までの LRB 熱老化促進試験結果から作成した破断せん断歪の実験式は、経過年数 60 年度までは十分な精度を有しているが、経過年数が 100 年程度になると実験式の違いが顕著に現れる。この違いは、実験式の作成に使用した実験データが 60 年相当までしかなかったことに起因している。従って、耐用年数が 60 年を超える LRB 免震建物を設計しようとする場合には、現在よりも長い経過年数の LRB 熱老化促進実験を行うことが必要である。

参考文献

- 1) 環境省調査：http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html
- 2) 建築工事標準仕様書・同解説－鉄筋コンクリート工事 JASS5, 2003.2
- 3) 高山峯夫：「積層ゴムの耐久性は 200 年?」, 第 13 回免震フォーラム, 日本免震技術者協会, 2010.9
- 4) 株式会社ブリヂストン：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承技術資料, 2008.7.25

[2010 年 10 月 20 日原稿受理 2011 年 1 月 7 日採用決定]

(a) Case1 (指数関数近似)

(b) Case2 (一次関数近似)

図 8 最大せん断歪みと破断歪み