

長時間・長周期地震動を受ける鉛プラグの強度低下を考慮した 基礎免震構造物の耐震安全性の検証について

中川 肇*

Verification of Seismic Safety of Base Isolated Buildings Considering the Reduction in Strength of Lead Plug Under Long Time and Long Period Earthquakes

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

According to previous studies, it's said that when lead plug of rubber bearing acts on the long time and long period earthquakes, the yield strength of lead plug might decrease.

This paper discuss the seismic safety of base isolated building models with and without oil damper under the simulated Nankai Trough earthquake, considering the reduction in the lead plug. The earthquake waves assume the Hiei earthquake fault model and these waves are created at 5 sites in Kansai, Chukyo area. According to the analytical results without considering the strength reduction of lead plug, the maximum displacement of base isolated floor without oil damper became from 69.91 to 94.64cm. It can be said that the base isolation floor is an excessive deformation. However, by using oil damper, the maximum displacement response became from 53.68cm to 57.69cm.

On the other hand, by considering the strength reduction of lead plug, the reduction ratio ρ of lead plug increases as the yielding strength coefficient α increases from 0.05 to 0.09. However, the smaller the reduction ratio ρ is, the bigger the maximum displacement response of base isolation layer is. That's not safe. However, by using oil damper, the maximum displacement becomes less than the allowable value (60cm).

KEY WORDS: Base isolated buildings, Long period and time ground motions,
Simulated Nankai trough earthquake, Strength reduction of lead plug

1. はじめに

筆者は、2003 年の十勝沖地震 K-NET 苫小牧波¹⁾、の長周期地震動に関する免震・制震構造物に関する研究を着手し、2018 年以降、文献 2)、3) を基に、2035 年頃に発生が懸念されている南海トラフ模擬地震動を作成している。文献 4) ~7) において、宝永南海、安政東海地震の断層モデルを想定した南海トラフ模擬地震動を関西圏、中京圏、静岡圏で作成し、これら 3 圏の地震動を受ける超高層基礎免震構造物、基礎部と中間層部に免震層を有する多段免震構造物(サンドイッチ免震構造物)の応答低減効果及び免震層の耐震安全性について、検証した。

南海トラフ地震動に関する既往の研究として、大川等が、南海トラフ連動地震に対する「超高層建築物への長周期地震動の影響に対する検討」³⁾を実施している。

一方、免震構造物における長周期地震動への対策が強化される中、免震部材の繰り返し変形による疲労や性能劣化が最大の関心事となり、支承減衰一体型積層ゴム(LRB)では積層ゴム内部の発熱が減衰性能に及ぼす影響が懸念されている。

2016 年度以降、文献 8) ~13) において、LRB 内の鉛プラグ、錫プラグに長時間、長周期振動を与えた場合、プラグ内の温度上昇が顕著となり、プラグの特性変化、耐力低下が明らかになってきている。ここで、既往の研究を少し紹介したい。

*建築学科

文献 8) では、LRB が大振幅繰返し変形を受けた場合の熱・力学連成系挙動把握のため、差分法による熱伝導解析法、鉛温度～鉛降伏応力関係の提案、力学的特性評価法を提案、その手法の妥当性を、加振実験結果を用いて検証している。

文献 9)、10) では、LRB の切片荷重 Q_d の低下率を次式のように定義している。

$$LRB k_{\min} = \min Q_d / \text{design } Q_d \quad (1)$$

$$LRB k_{\min} = -0.06 + 1.25 \times \exp(-E/360V_p) \quad (2)$$

ここで、 $\text{design } Q_d$ は温度上昇による特性変化を考慮する前の切片荷重を、 $\min Q_d$ は温度上昇による特性変化を考慮した後の切片荷重を、 E, V_p は LRB の累積吸収エネルギーと鉛プラグの体積を示す。

文献 11) では、LRB の長周期・長時間地震動下の応答評価として、通常の時刻歴応答解析を行い、履歴吸収エネルギーから鉛プラグの特性を変化させ、再度時刻歴応答解析を行う方法（以下、簡易法）と文献 8) で示されている熱伝導解析法（以下、詳細法）を基に、文献 3) に示した想定南海トラフ地震で作成された静岡地域、中京地域、大阪地域での両解析を行い、その解法の差違が免震層の最大水平変位に及ぼす影響について検討している。

文献 12) では、LRB を有する基礎免震建物の長周期地震動に対する簡易応答評価法の精度検証を行っている。文献 13) では、錫プラグ入り積層ゴムの免震建物の地震応答評価を詳細法と簡易法を行い、長周期地震動下での地震応答評価では、錫プラグの耐力低下（通常の 20～30%程度）により、免震層が過大な応答変位が発生することを示唆している。これらの考察については、今後十分に検討する必要あると考えられるが、現在、既存の免震建物への影響を考えた場合、かなりの補強が必要ではないと推察している。

以上のことから、今後、長周期・長時間地震動に対する鉛プラグの温度上昇に耐力低下を無視することはできない。しかし、既往の研究では、鉛プラグの耐力低下により免震層に過大変形が生じることを説明しているが、その対応策について論じられていない。

また、文献 2)、3) で作成された南海トラフ模擬地震動を受ける関西・中京・静岡圏で検討された基礎免震構造物の研究事例は、参考文献 9)～13) に示すもので存在するが、少ないと思われる。

本論の目的は、【1】文献 9)、10) を参考に、LRB 内の鉛プラグの特性変化（耐力低下）を考慮し、文献 6)、7) で作成した関西圏・中京圏での宝永南海

模擬地震動を受ける同一の 40 階建て免震構造物の耐震安全性について、検証することである。【2】鉛プラグの耐力低下の有無により、免震層の応答特性（特に、層間変位応答、絶対加速度応答）にどのような影響を及ぼすかを明確に示したい。また、免震構造物の最大変形量の許容値（積層ゴムの最大せん断歪 300%）以内に制御するために、非線形粘性ダンパー（オイルダンパー）の適用が妥当か否かを検討することである。

2. 基礎免震構造物の地震応答解析法

2.1 解析モデルと入力地震動モデル

本論では、鉄骨造 39 階建ての事務所ビル（63m×45m の床面積 2,835m²）の基礎部に鉛入り積層ゴム（LRB）、オイルダンパー（2,000kN 用を 5 基）を配置する 40 質点系の免震構造物を考える。つまり、上部構造物が 39 質点と免震層 1 質点を加えた 40 質点系の基礎免震系を意味する。LRB の荷重変形関係は、Bi-linear 型履歴特性とする。

入力地震動モデルは、参考文献 2) により、宝永南海地震断層モデルを基に作成した関西・中京圏 5 地点での模擬長周期地震動である。本論では、最大速度を 75cm/s に基準化し、国土交通省告示 1461 号に示されている「極めて稀に発生する地震動」と同等の地震動として解析に用いる。最大速度 75cm/s の入力地震動を用いるのは、実際の免震構造物の構造設計と同等のレベルと考えている。

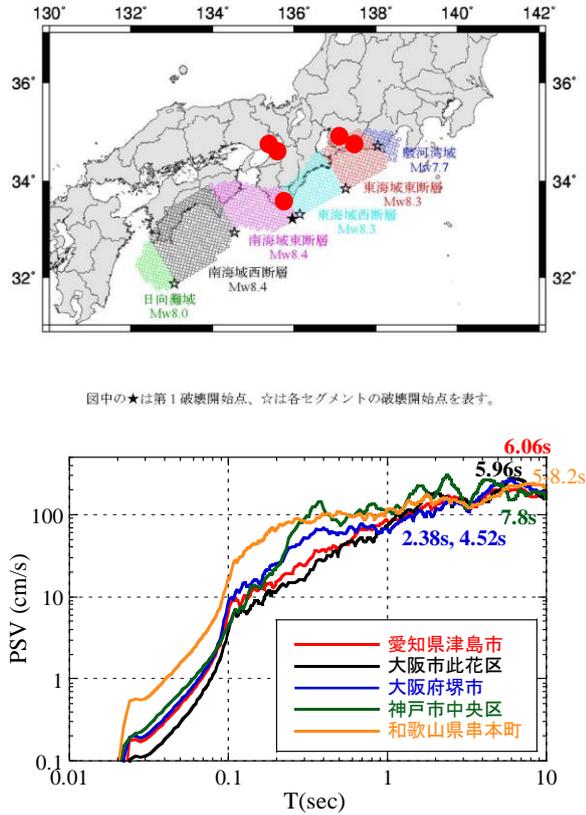
表 1 及び図 1 に入力地震動の諸元と宝永南海地震における断層モデルと中京圏・関西圏における 5% の速度応答スペクトルを示す。

宝永南海断層モデルと安政東海断層モデルにおいて、参考文献 2)、3) で示されている静岡圏、中京圏、関西圏及び四国圏において、数多くの地点で模擬長周期地震動を作成したが、筆者が期待した地域、例えば、四国沖などで長周期地震動波形は作成できず、表 1 に示した地震動モデルの 5 地点を本論で用いる入力地震動とする。表 1 には、原波の最大加速度値は紙面の幅の関係で削除した。

表 1 入力地震動の諸元（宝永南海地震）

場所	エリア	最大速度 (cm/s)	75cm/s 入力 (cm/s ²)
愛知県津島市	中京圏	12.26	212.95
大阪市此花区	関西圏	38.99	122.63
大阪府堺市		17.22	276.28
神戸市中央区		40.27	508.56
和歌山県串本町		4.42	817.19

図 1 より、宝永南海地震モデルでは、大阪府堺市の卓越周期は 2.38 秒と 4.52 秒であり、それ以外の関西圏 3 地点（大阪市此花区、神戸市中央区、和歌山県串本町）の卓越周期は、概ね 5~8.2 秒付近に存在し、中京圏の愛知県津島市の卓越周期は、6.06 秒で、長周期地震動である。



図中の★は第1破壊開始点、☆は各セグメントの破壊開始点を表す。

図 1 速度応答スペクトル
(宝永南海地震/中京・関西圏)

2・2 運動方程式と状態方程式の誘導

基礎免震系モデルにおいて、任意 i 層、基礎免震層の層間座標系の運動方程式は、次式のように表現できる。

i 層：

$$m_i(\ddot{u}_1 + \dots + \ddot{u}_i + \ddot{x}_g) + c_i \dot{u}_i - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} + k_i u_i - k_{i+1} u_{i+1} = 0 \quad (3)$$

基礎免震層：

$$m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) - c_2 \dot{u}_2 + k_1 u_1 - k_2 u_2 + k_d y_1 + c_d \phi(\dot{u}_1) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $m_i, u_i, y_i, \ddot{x}_g, k_1, k_d, \phi(\dot{u}_1)$ は夫々 i 層の質量、上部構造物、免震層の層間変位、免震層を構成するクーロン素子の層間変位、系の基盤に入力される加速度、積層ゴムと鉛プラグの剛性及び免震層のオイルダンパーの非線形関数である。

オイルダンパーの非線形関数 $\phi(\dot{u}_1)$ は、次式に示す完全弾塑性型の非線形関数であり、 \dot{u}_{cr} はリリース速度である。

$$\phi(\dot{u}_1) = \frac{\dot{u}_1}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) - \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} + \frac{\dot{u}_{cr}}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) + \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} \quad (5)$$

また、クーロン素子の層間速度 \dot{y}_i は、次式のように表現できる。

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \text{sgn}(y_i + \delta_i) - \text{sgn}(y_i - \delta_i) - \text{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{ \text{sgn}(y_i + \delta_i) + \text{sgn}(y_i - \delta_i) \}] \quad (6)$$

(3)~(6)式をマトリクス形式で表現すると次式となる。

$$\{\ddot{u}\} + [\tilde{c}]\{\dot{u}\} + [\tilde{c}_d]\{\phi\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}']\{y\} = -\{l'\}\ddot{x}_g \quad (7)$$

ここで、 $\{u\}$ は層間変位応答ベクトル、 $[\tilde{c}]$ 、 $[\tilde{k}]$ 、 $[\tilde{c}_d]$ 、 $[\tilde{k}']$ は夫々上部構造の粘性減衰、剛性に関するマトリクス、基礎免震層の粘性減衰、剛性マトリクス、 $\{l'\}$ は最下段エレメントのみが 1、その他は 0 のベクトルである。

(5)~(7)式より、状態ベクトルとして、 $\{U\} = \{\{u\}, \{\dot{u}\}, \{y\}\}^T$ とおくと、基礎免震系モデルの状態方程式は、次式のように表現できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] & [0] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] & -[\tilde{k}'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ -\{l'\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ -[\tilde{c}_d] \end{Bmatrix} \{\phi\} \quad (8)$$

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \text{sgn}(y_i + \delta_i) - \text{sgn}(y_i - \delta_i) - \text{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{ \text{sgn}(y_i + \delta_i) + \text{sgn}(y_i - \delta_i) \}] \quad (9)$$

$$\phi(\dot{u}_1) = \frac{\dot{u}_1}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) - \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} + \frac{\dot{u}_{cr}}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) + \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} \quad (10)$$

(8)~(10)式に示す各応答は、4 次精度の Runge-Kutta 法を用いて求める。

2・3 長時間・長周期振動による鉛プラグの耐力低下率の評価

参考文献 9)、10)において、鉛入り積層ゴム(LRB)内の鉛プラグに長時間、長周期振動を与えた場合、鉛プラグの温度が上昇し、耐力低下(特性変化)が生じると報告されている。

本論では、文献 10) に従い、簡易法による耐力低下後の鉛プラグの降伏せん断力 Q'_d を次式のように定義する。

$$Q'_d = \rho \cdot Q_d ; Q_d = \alpha \Sigma w_i \quad (11)$$

$$\rho = \frac{8.33}{7.967} \times \left\{ -0.06 + 1.25 \times \exp \left(-\frac{E}{360V_p} \right) \right\} \quad (12)$$

ここで、 E は、温度上昇による鉛プラグの耐力低下（特性変化）が生じない応答解析によって得られた免震層の累積塑性エネルギー量（ $N \cdot mm$ ）、 V_p は免震層全体の鉛プラグの体積（ mm^3 ）を示す。

免震層全体の鉛プラグの体積 V_p は、文献 16) より、次式のように示す。

$$V_p = \frac{Q_d}{\sigma_{pd}} \cdot H = \frac{\alpha \Sigma w_i}{8.33} \cdot H \quad (13)$$

ここで、 σ_{pd} 、 H は夫々鉛の降伏せん断応力度（ N/mm^2 ）と LRB の総高さ（ $=582mm$ ）である。

次に、簡易法による手順を以下に示す。

【1】(8)~(10)式を用いて、非線形粘性ダンパーを付加しない通常の基礎免震構造物の地震応答解析を実施する。

【2】(12)式に示す免震層の累積塑性エネルギー E と(13)式に示す鉛プラグの体積 V_p を求め、鉛プラグの耐力低下率 ρ を求める。

【3】鉛プラグの特性変化を考慮し、再度、地震応答解析を行い、免震層、上部構造物の各応答を求める。

3. 解析結果

本論では、39 質点系の上部構造物の 1 次固有周期を 3.9 秒とし、40 質点基礎免震系モデルの 1 次固有周期を 6.06 秒とする。40 質点免震系モデルの 1 次固有周期は、図 1 に示した宝永南海地震における卓越周期を見て、共振する恐れのある周期帯域を取って選択するために、愛知県津島市の卓越周期とした。

免震層を構成する積層ゴムの層全体の剛性 k_f を収斂計算により求める。ただし、各階の重量は一定で、14,175kN とし、LRB の降伏せん断力 Q_d は全重量の 5% とする。(5)式に示した非線形粘性ダンパーのリリーフ速度 \dot{u}_{cr} は、筆者の実務時代の設計事例を参考に、30cm/s とした。

3.1 簡易法による鉛プラグの耐力低下率 ρ と降伏せん断力係数 α'

本節では、LRB 内の鉛プラグの耐力低下率 ρ と降伏せん断力係数 $\alpha' (= \rho \cdot \alpha)$ を求めるために、2.3 節の簡易法による解析【1】、【2】を実施する。

入力地震動は、表 1 に示した中京圏 1 地点、関西

圏 4 地点の計 5 地点とし、耐力低下を考慮しない LRB の降伏せん断力係数 α を 0.05~0.09 とし、津島市、神戸市中央区、串本町については、0.05~0.08 とする。表 2.1~2.5 には、通常地震応答解析で得られた免震層の最大変位応答及び 2.3 節の(12)式で示した鉛プラグの耐力低下率 ρ 、耐力低下後の降伏せん断力係数 α' を示している。

表 2.1 愛知県津島市

α	0.05	0.06	0.07	0.08
免震層(cm)	74.55	68.31	61.92	56.32
ρ	0.767	0.876	0.958	1.00
α'	0.038	0.053	0.067	0.08

表 2.2 大阪市此花区

α	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
免震層(cm)	93.65	78.28	67.04	57.28	49.51
ρ	0.396	0.583	0.730	0.837	0.916
α'	0.020	0.035	0.051	0.067	0.082

表 2.3 大阪府堺市

α	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
免震層(cm)	94.64	80.84	67.86	55.26	47.80
ρ	0.391	0.564	0.691	0.792	0.870
α'	0.020	0.034	0.048	0.063	0.078

表 2.4 神戸市中央区

α	0.05	0.06	0.07	0.08
免震層(cm)	69.91	69.45	68.81	67.73
ρ	0.353	0.467	0.560	0.638
α'	0.018	0.028	0.039	0.051

表 2.5 和歌山県串本町

α	0.05	0.06	0.07	0.08
免震層(cm)	82.15	75.60	70.13	64.69
ρ	0.522	0.679	0.792	0.877
α'	0.026	0.041	0.055	0.070

1 章で記述したように鉛プラグに長時間・長周期振動を与えた場合、鉛プラグ内の温度上昇が生じ、耐力低下が発生する。表 2.1~2.5 より、鉛プラグの耐力低下率 ρ は、5 つの入力地震動に対し少し異なるが、概ね LRB の降伏せん断力係数 α が 0.05~0.09 に増加するについて、 ρ は 0.391~1.0 まで変動することが分かる。LRB の降伏せん断力係数 α が小さいほど、継続時間内の繰り返し振動による累積エネルギーが増加し、鉛プラグ内の温度上昇による耐力低下が大きくなる事が分かる。また、宝永南海地震での免震層の最大変位応答は、LRB の降伏せん断力係

数 α を0.08か0.09に設定すれば、積層ゴムの最大せん断歪300% (=60cm)以内に制御することはできるが、通常、LRBの降伏せん断力係数を0.08まで設定することは現実的设计では難しい。これまで、筆者は、このような場合、オイルダンパーを免震層に付加的に設置している。

以上の結果より、従来の研究では、LRBの降伏せん断力係数 α を0.05と設定してきたが、温度上昇による結果を踏まえて、その係数は0.07が適切ではないかと考えられる。

3・2 鉛プラグの耐力低下を考慮した基礎免震系モデルの応答特性と非線形粘性ダンパーに付加による応答低減効果

本節では、前節での結果を踏まえて、図2~6には、LRBの降伏せん断力係数 α を0.05、0.07とした場合の非線形粘性ダンパー(オイルダンパー)を付加しない通常のLRBのみ基礎免震系、鉛プラグに

耐力低下を考慮した基礎免震系及び粘性ダンパーを付加した場合の層間変位応答、絶対加速度応答を描いている。図2~6には、表1に示した中京圏1地点、関西圏の4地点である。

図2より、愛知県津島市での鉛プラグの耐力低下率 ρ は表2.1に示した通りで、0.767、0.958と低くなく、従来とそれほど変化はないと思われる。LRBの降伏せん断力係数 α' の違いによる免震層の最大変位応答は、81.39cm、63.73cmとなっており、非線形粘性ダンパーを付加することで、58.06cm、46.83cmと積層ゴムの許容値300%歪(60cm)以下となっている。絶対加速度応答について、鉛プラグの耐力低下の有無による違いは見られず、粘性ダンパーを付加することで、20層目までの加速度応答は低減する。降伏せん断力係数 α が大きいほど、層間変位は抑制されるが、加速度応答は増加する傾向がある。津島市の結果から、LRBの降伏せん断力係数 α は通常の5%で可能と判断できる。

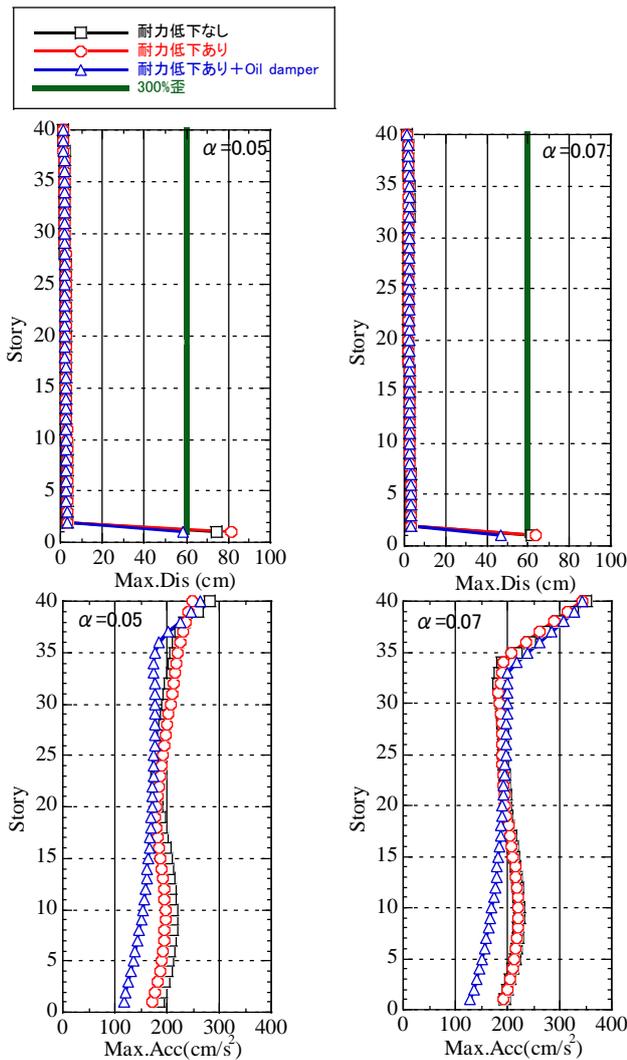


図2 愛知県津島市での基礎免震系の応答特性

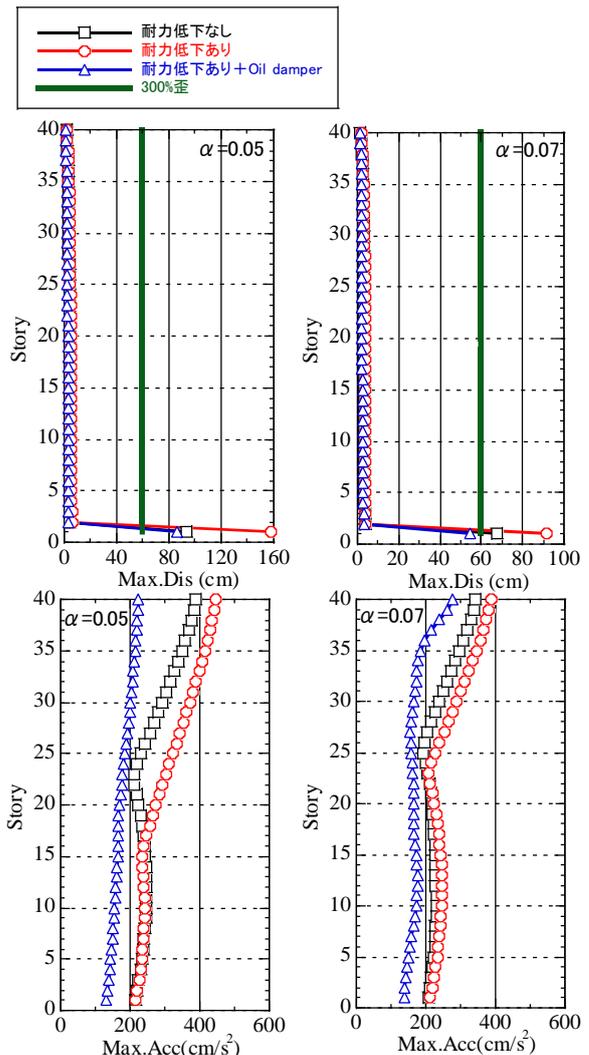


図3 大阪市此花区での基礎免震系の応答特性

図3より、大阪市此花区での鉛プラグの耐力低下率は表2.2に示した通りで、0.396、0.73と23%異なることが分かる。鉛プラグの耐力低下の有無を考慮すると、LRBの降伏せん断力係数 α が0.05、0.07における免震層の最大変位応答は、夫々157.80cm、93.65cm、91.83cm、67.04cmとなっている。此花区での地震動をLRBが長時間受けた場合、急激な耐力低下が生じ、免震層が過大変形を生じ、従来の設計とは行かない。また、非線形粘性ダンパーを付加することで、85.80cm、54.36cmとなる。LRBの降伏せん断力係数 α が0.07の場合のみ、積層ゴムの許容値300%歪(60cm)以下となっている。また、絶対加速度応答について、鉛プラグの耐力低下の有無による違いは、20~25層以上で見られる。粘性ダンパーを付加することで、構造物全体の加速度応答は低減する。大阪市此花区の結果から、LRBの降伏せん断力係数 α は7%を設定する必要がある。

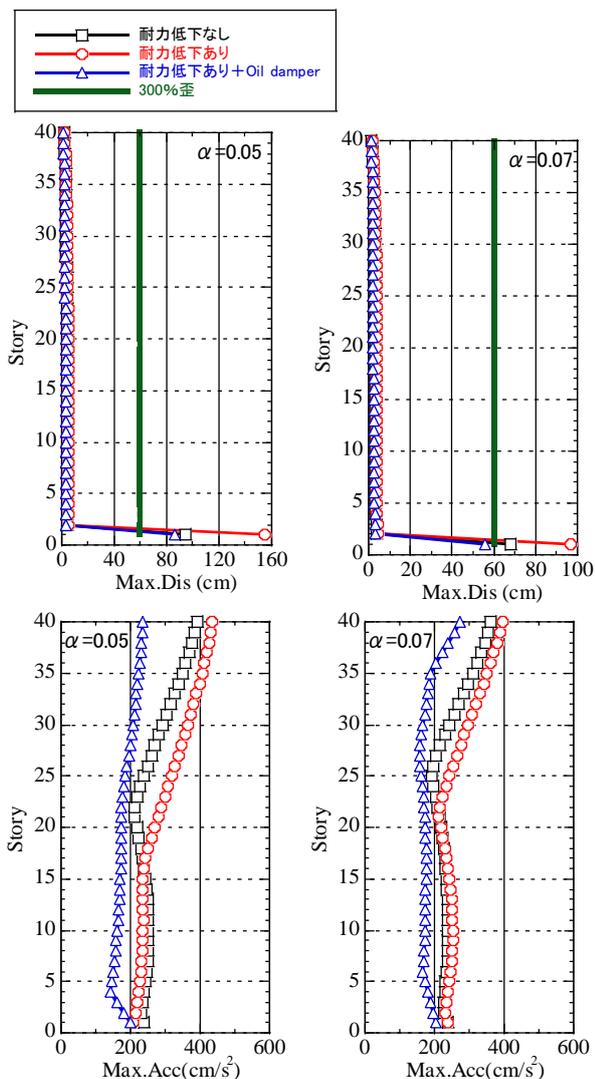


図4 大阪府堺市での基礎免震系の応答特性

図4より、層間変位応答分布については、図3の大阪市此花区の結果と類似しており、表2.3に示した鉛プラグの耐力低下率 ρ は、LRBの降伏せん断力係数 α が0.05、0.07に対し、0.396、0.691と29.5%異なることが分かる。耐力低下の有無を考慮すると免震層の最大変位応答は、夫々155.15cm、94.64cm、97.11cm、67.86cmとなっている。これは、此花区の結果と非常に類似している。また、非線形粘性ダンパーを付加することで、86.29cm、55.79cmとなる。LRBの降伏せん断力係数 α が0.07の場合のみ、積層ゴムの許容値300%歪(60cm)以下となっている。また、絶対加速度応答について、鉛プラグの耐力低下の有無による違いは、17~22層以上で見られる。粘性ダンパーを付加することで、構造物全体の加速度応答は低減するが、LRBの降伏せん断力係数 α の設定による違いはあまり見られないが、大阪府堺市の結果から、LRBの降伏せん断力係数 α は7%を設定する必要がある。

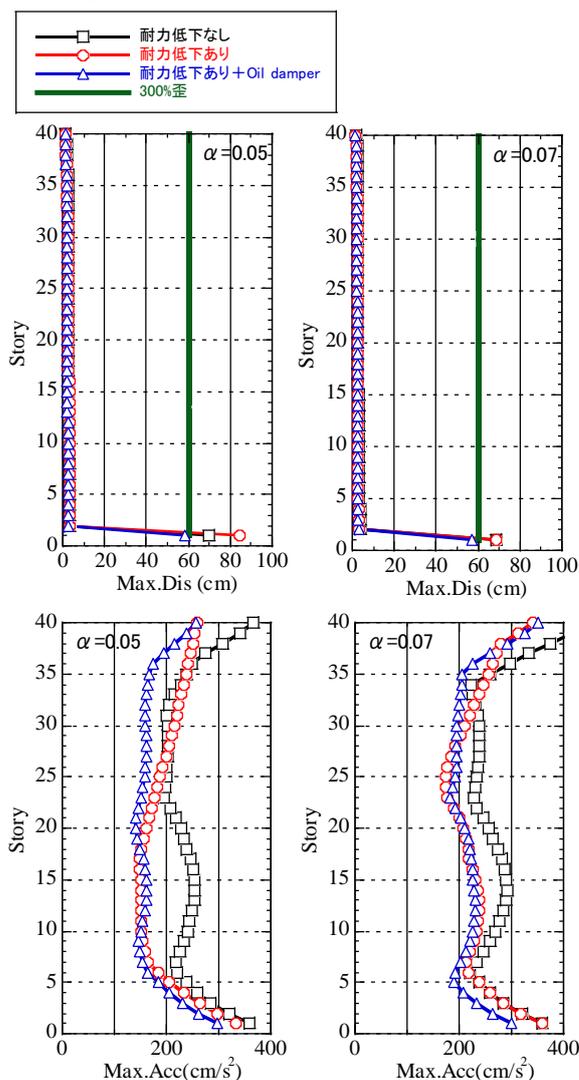


図5 神戸市中央区での基礎免震系の応答特性

図 5 より、神戸市中央区での鉛プラグの耐力低下率 ρ は表 2.4 に示した通りで、LRB の降伏せん断力係数 α が 0.05、0.07 に対し、0.353、0.560 で 21%異なる。LRB の耐力低下の有無を考慮すると免震層の最大変位応答は、夫々 84.95cm、69.91cm、68.71cm、68.81cm となっており、非線形粘性ダンパーを付加することで、58.63cm、57.06cm と積層ゴムの許容値 300%歪 (60cm) 以下となっている。これは、図 2 の愛知県津島市の結果と同じである。一方、絶対加速度応答について、鉛プラグの耐力低下の有無による違いは、耐力低下なし、あり、粘性ダンパー付加の順に加速度応答は、低減される。20 層以下では、耐力低下ありと粘性ダンパー付加の場合の応答はほぼ同じである。神戸市中央区の結果から、LRB の降伏せん断力係数 α は通常の 5%で可能と判断できる。

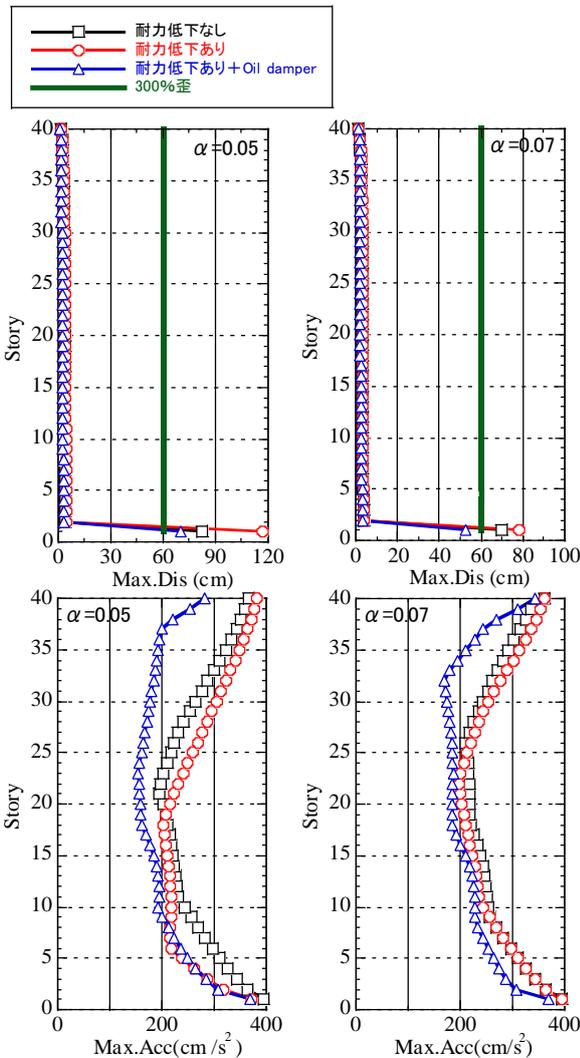


図 6 和歌山県串本町での基礎免震系の応答特性

図 6 より、和歌山県串本町での鉛プラグの耐力低

下率 ρ は表 2.5 に示した通りで、LRB の降伏せん断力係数 α が 0.05、0.07 に対し、0.522、0.792 で 27%異なる。大阪市此花区、堺市、神戸市中央区に比べ、耐力低下率は低くならない。LRB の耐力低下の有無を考慮すると免震層の最大変位応答は、夫々 116.68cm、82.15cm、78.46cm、70.13cm となっており、非線形粘性ダンパーを付加することで、70.05cm、52.55cm と、 α が 0.07 の場合のみ、積層ゴムの許容値 300%歪 (60cm) 以下となっている。一方、絶対加速度応答について、鉛プラグの耐力低下の有無による違いは、耐力低下なし、あり、粘性ダンパー付加の順に加速度応答は、低減される。 α が 0.05 の場合、10 層以下の低層部で、耐力低下ありと粘性ダンパー付加の場合の加速度応答値はほぼ同じ値となっている。また、 α が 0.07 の場合、32 層以上で 0.05 の場合に比べ、絶対加速度応答が増加している。愛知県津島市の結果と類似している。

和歌山県串本町の結果から、LRB の降伏せん断力係数 α は 7%必要であると判断できる。

3-3 鉛プラグの耐力低下を考慮した場合の免震層の荷重・変形関係

本節では、鉛プラグの温度上昇による耐力低下の有無、粘性ダンパーの付加による応答低減効果を免震層の荷重・変形関係から論じる。ただし、入力地震動は、3.2 節の結果より、大阪市此花区と愛知県津島市とする。

図 7、8 には、入力地震動を大阪市此花区と愛知県津島市とし、LRB の降伏せん断力係数 α を 0.05、0.07 とした場合の免震層の荷重・変形関係を鉛プラグの耐力低下なし、あり、非線形粘性ダンパーを付加した場合の結果を示す。

図 7 より、LRB の降伏せん断力係数 α が 0.05 の場合、その耐力低下の有無に関わらず、免震層の最大変形量は 60cm を超え、特に耐力低下がある場合、最大せん断歪で 789%となり、完全に破断している。この結果に非線形粘性ダンパーを付加した場合、最大変形量は 85.8cm で最大せん断歪で 429%で 300%以上となっている。一方、LRB の降伏せん断力係数 α が 0.07 の場合、耐力低下の有無において、最大変形量は夫々 91.83cm、67.04cm となり、300%歪を超えている。しかし、粘性ダンパーを付加することで、鉛プラグに耐力低下が生じて、最大変形量は 54.36cm で最大せん断歪で 272%で 300%以内となっている。大阪市此花区の場合、LRB の降伏せん断力係数 α は 7%必要である。

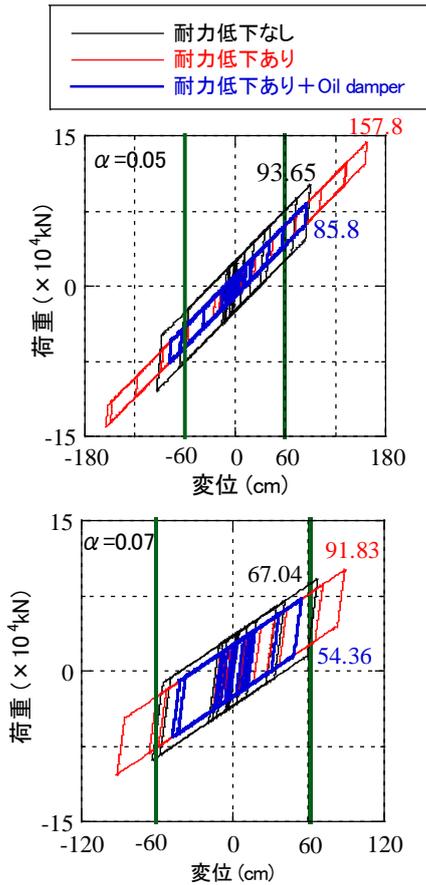


図 7 免震層の荷重・変形関係（大阪市此花区）

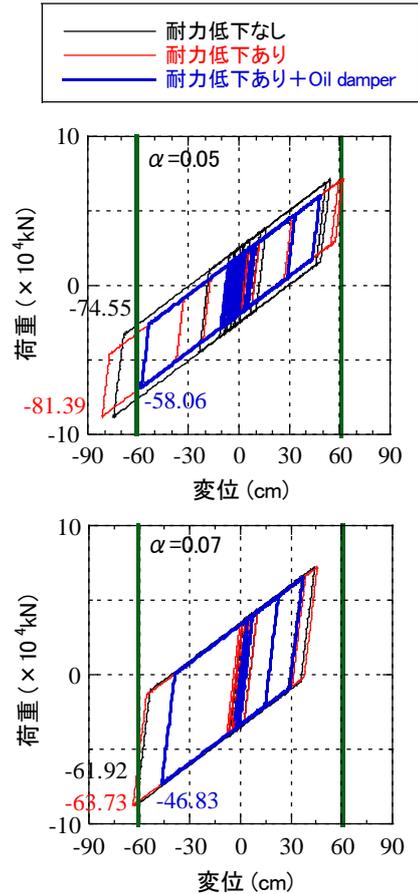


図 8 免震層の荷重・変形関係（愛知県津島市）

愛知県津島市での鉛プラグの耐力低下率 ρ は、表 2.1 に示した通り、LRB の降伏せん断力係数 α を 0.05、0.07 の場合、夫々、0.767、0.958 と長周期、長時間振動を受けても耐力低下は 23~4% 程度である。

図 8 より、 $\alpha=0.05$ の場合の耐力低下の有無を考慮した解析での免震層の最大変形量は、夫々、81.39cm、74.55cm、63.73cm、61.92cm となる。一方、非線形粘性ダンパーを付加した場合、夫々、58.06cm、46.83cm となり、最大せん断歪 290%、234% で 300% 以内となっている。愛知県津島市の場合、LRB の降伏せん断係数 α は通常の 5% で設計可能であると言える。

前節、本節の解析結果から、LRB 内の鉛プラグに対し長時間、長周期地震動を経験した場合、LRB の降伏せん断力係数 α は、その耐力低下を考慮すると、全重量の 7% に設定することが望ましいと考える。その上で、最大せん断歪 300% を超える場合は、通常のオイルダンパーを用いることが現状では必要である。

4. まとめ

免震構造物における長周期地震動への対策が強化される中、免震部材の繰り返し変形による疲労や性能劣化が最大の関心事となり、支承減衰一体型積層ゴム (LRB) では積層ゴム内部の発熱が減衰性能に及ぼす影響が懸念されている。

本論では、巻末に示した文献 9)、10) を参考に、LRB 内の鉛プラグが長時間、長周期地震動を受けた場合、内部の温度上昇による耐力低下率 ρ が、関西圏、中京圏での南海トラフ模擬地震動に対しどの程度の値を示すか、基礎免震系モデルの最大変位応答、絶対加速度応答分布に対しどのような影響を及ぼすかを明らかにした。また、非線形粘性ダンパー (オイルダンパー) を用いることで、免震層の耐震安全性が得られるかを検証した。

解析結果から得られた工学的な知見は以下の通りである。

- (1) 宝永南海地震で作成した関西圏 4 地点、中京圏 1 地点に対し、従来の LRB の降伏せん断力係数 α を 0.05、0.07 とした場合の LRB 内の鉛プラグの耐力低下率 ρ は、 $\alpha=0.05$ では、大阪市此

花区、大阪府堺市、神戸市中央区では、夫々 0.396、0.396、0.353 と通常の LRB のせん断耐力の 65~60%まで低下する。 $\alpha = 0.07$ では、夫々、0.73、0.691、0.56 と耐力低下はするが、 $\alpha = 0.05$ に比べて小さい。一方、和歌山県串本町、愛知県津島市では、 $\alpha = 0.05, 0.07$ の場合の耐力低下率 ρ は、0.522、0.792、0.767、0.958 と上記の 3 地点より耐力低下はあまり生じない。宝永南海トラフ地震であっても、地域及び LRB の降伏せん断係数 α の設定によって異なる。

- (2) 鉛プラグの耐力低下を考慮した基礎免震系モデルの免震層の最大変位応答は、LRB の降伏せん断力係数 $\alpha = 0.05$ の場合、5 地点に対し、81.39cm~157.80cm と最大せん断歪 300%を大きく超過している。しかし、免震層に非線形粘性ダンパー 2,000kN 用を 5 基、付加することで免震層の最大変位応答は、58.06cm~86.29cm となり、神戸市中央区と愛知県津島市の結果のみ、300%歪以内となる。他の 3 地点では、300%歪にはならない。一方、 $\alpha = 0.07$ の場合、5 地点に対し、63.73cm~97.11cm と最大せん断歪 300%を超過しているが、免震層に非線形粘性ダンパーを付加することで、免震層の最大変位応答は、46.83cm~57.06cm となり、300%以内となる。

本論では、鉛プラグに長時間・長周期振動を与えた場合、その耐力低下について、検討を行ったが、LRB の降伏せん断力係数 α は、その耐力低下を考慮すると、全重量の 7%に設定することが望ましいと考える。しかし、平成の時代に設計、施工された中層、高層免震建物は、鉛入り積層ゴム或は高減衰積層ゴムのみしか採用されておらず、また、入力地震動に南海トラフ地震のような長周期地震動が含まれておらず、この 2 点を解消するために、既存の免震構造物に対し、以下の 2 点の検討が今後、必要である。

- 1) 長時間、長周期地震動に対し、既存の免震構造物の応答特性特に、免震層の最大変位応答、絶対加速度応答、地震層せん断力係数について検討し、必要に応じて、オイルダンパーの追加検討、現状の積層ゴムの取り換え、補強工事のための検討を行う。
- 2) LRB 内の鉛プラグが長時間、長周期振動を受けても、耐力低下が生じない新しいダンパーの開発、それに代わる新素材の開発が必要である。この項目について、積層ゴムメーカーの開発を待たざるを得

ない。

参考文献

- 1) (独) 防災科学研究所：地震観測システム K-NET、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin>
- 2) 榊構造計画研究所：模擬・長周期地震波作成プログラム ARTEQ-LP for Windows Ver.2.1
- 3) 大川出ほか：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討、建築研究資料 No.144、147、2013.8、2013.9
- 4) 中川肇：想定南海トラフ地震を受けるサンドイッチ免震構造物の耐震安全性の検討、明石高専研究紀要、第 61 号、14~18 頁、2019.3
- 5) Hajime Nakagawa : Seismic Safety of Sandwich Base Isolated Buildings under Simulated Nankai Trough Earthquake, 17th World Conference of Earthquake Engineering (17WCEE), Sendai, Japan, September 2021.
- 6) 中川肇：想定南海トラフ地震動を受ける基礎免震構造物の耐震安全性について、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、817~818 頁、2022.9
- 7) 中川肇、角野嘉則：想定南海トラフ地震動を受ける鋼構造基礎免震構造物の耐震安全性の検証について~関西圏・中京圏・静岡圏での解析結果~、日本鋼構造協会、鋼構造論文年次報告集（鋼構造シンポジウム 2022）、第 30 巻、571~578 頁、2022.11
- 8) 近藤明洋ほか：鉛入り積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した応答解析法、日本建築学会構造系論文集、第 83 巻、第 753 号、1595~1605 頁、2018.11
- 9) 国立研究開発法人研究所：免震部材の多数繰返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究、No.170、2016.4
- 10) 脇島健二ほか：長周期地震動に対する免震材料の性能評価（その 2）鉛プラグ挿入型積層ゴム支承、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、153~154 頁、2018.9
- 11) 近藤明洋：鉛プラグ入り積層ゴムを用いた免震建物応答に影響を与える地震動特性の抽出、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、153~154 頁、2019.9
- 12) 伊藤真二ほか：基礎免震建物の長周期地震動に対する簡易応答評価法の精度検証（その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、179~

180 頁、 2019.9

- 13) 本田葉ほか：錫プラグ入り積層ゴムの熱・力学連成挙動を考慮した免震建物の地震応答評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、1019～1020 頁、 2018.9
- 14) 白山敦子ほか：南海トラフ地震における準精算法による繰り返し特性を考慮した基礎免震構造物の応答評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、603～604 頁、 2020.9
- 15) 竹内貞光ほか：南海トラフ地震を想定した長周期地震動に対する中間層免震建物の応答特性（その 1, 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、 631～634 頁、 2020.9
- 16) オイレス工業㈱：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承、 2009.6