

長周期長時間地震動に対する免震建物の地震応答予測

—鉛プラグ挿入型積層ゴムの繰返し変形による特性変化を考慮した応答スペクトル法—

明治大学 谷本 満里菜

1. 研究背景および研究目的

2016年6月に国土交通省より時刻歴応答解析を用いた大臣認定ルートを対象として南海トラフ沿いの巨大地震による長周期長時間地震動対策¹⁾(以下、長周期通知)が公表された。図1に大阪圏の対象地域および簡略化応答スペクトルを示す。

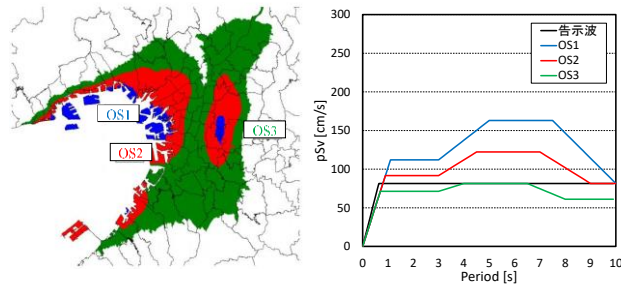


図1 大阪圏における対象地域と簡略化スペクトル¹⁾

建設省告示第六の手法(以下、告示法)は、時刻歴応答解析を行わずに長周期長時間地震動の影響を考慮する手法が未整備であるため長周期通知の対象外となっている。そのため、長周期通知の対象地域で免震建物を設計する際には、設計方法によって要求性能に差が生じる恐れがある。

長周期長時間地震動が免震建物に与える影響の一つに、免震部材の繰返し変形による耐力低下があげられる。飯場らは告示法に対して繰返し変形を考慮する手順を組み込んだ手法を提案している²⁾。しかし、応答スペクトル法に用いられる係数について、長周期長時間地震動に対応した評価式を用いた検討は行われていない。

以上より本研究では、免震部材の繰返し変形による特性変化を考慮し、長周期通知に記載される設計用地震動(以下、基整促波)に対応した応答スペクトル法の提案を目的とする。

2. 解析モデルおよび入力地震動

解析モデルは図2に示す一質点系モデルとする。表1に解析モデルのパラメータを示す。

表1 解析パラメーター

		有効ゴム径(mm)		
		750	1000	1500
鉛径 (mm)	細径	120	150	250
	標準径	150	200	300
	太径	180	250	350
面圧(N/mm ²)		7.5, 10, 15		

図2 一質点系モデル

免震部材は、支承材として鉛プラグ挿入型積層ゴム(以下、LRB)を用いる。免震層の復元力特性を示す係数は、LRB一基分の特性値を用いる。LRBは繰返し変形の影響を受けやすく³⁾、免震部材の繰返し変形に関する文献で多く用いられている。

入力地震動は、基整促波よりSZ1, SZ2, SZ3, CH1, CH2, CH3, OS1, OS2, OS3の9波を用いる。KA1は繰返し変形による特性変化の影響が極めて小さいため、本研究では対象外とする。図3に特に繰返し変形の影響が大きいSZ1, CH1, OS1の加速度波形および主要動区間を示す。主要動区間の算定は岡野らの手法⁴⁾を用いる。これは、加速度波形の二乗累積値における接線の傾きの変化を用いた手法である。傾きの急変点を捉えるため、本研究では二乗累積値の前後5秒間の平均値を用いて平滑化する。図3より、CH1およびOS1は比較的主要動が長い時間、繰返し変形を受け特性が変化した後大きな加速度を受け、繰返し変形の影響を受けやすいと考えられる。

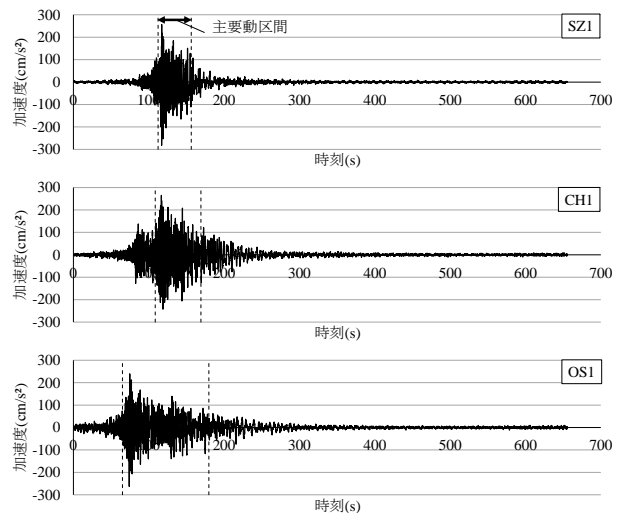


図3 基整促波の加速度波形および主要動区間

3. 時刻歴応答解析を用いた地震応答評価

時刻歴応答解析を用いて繰返し変形による特性変化を考慮した地震応答評価を行う。繰返し変形の影響は、LRBの降伏荷重の低下率 $LRBk_{min}$ として式(1)を用いて考慮する⁵⁾。

$$LRBk_{min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{W_p}{V_p} \times \frac{1}{360}\right) \quad (1)$$

ここで、 W_p : LRBの吸収エネルギー、 V_p : 鉛プラグ体積とする。

時刻歴応答解析を用いて繰返し変形を考慮する手法は、詳細法、準詳細法、簡易法の3つが挙げられる。詳細法は熱伝導解析を用いるため、本研究では通常の時刻歴応答解析を応用した準詳細法および簡易法を用いる。準詳細法は、時々刻々吸収エネルギーより $LRBk_{min}$ を算出し、復元力特性を変更する手法である。簡易法は設計時のモデルにおける時刻歴応答解析より全履歴吸収エネルギーに対する $LRBk_{min}$ を算出し、復元力特性を変更したモデルで再び時刻歴応答解析を行う手法³⁾である。

図4に繰返し変形非考慮の時刻歴応答解析および準詳細法による解析結果を示す。図4より、SZ1, CH1, OS1は準詳細法を用いて繰返し変形を考慮した応答値が特に大きくなった。

次に、準詳細法および簡易法による応答の比較を行う。解析モデルは表1に示す全ケースとし、入力地震動はSZ1, CH1, OS1を用いる。図5に準詳細法および簡易法より得られる最大応答を示す。最大応答変位は100cm以下、ベースシア係数は0.3以下の結果を示す。図5より、多くのケースで簡易法は準詳細法と比較し大きな応答値となっている。これは、簡易法では繰返し変形非考慮時の全履歴吸収エネルギーを用いて $LRBk_{min}$ を算出しているのに対し、準詳細法では最大応答変位時刻までの吸収エネルギーを用いているため、準詳細法の方が降伏荷重を大きく評価しやすいからであると考えられる。

図5において簡易法が準詳細法を下回るケースについて、時刻歴応答波形の比較を行う。図6における降伏荷重 Q_d は、設計時の降伏荷重に対しひずみ依存による降伏荷重の修正係数 CQ_d および $LRBk_{min}$ を乗じた値とする。図6より、CH1, OS1のように主要動が長い地震動では、準詳細法はLRBの吸収エネルギーが増加し特性変化が生じた後に大きな加速度が入力されるため、非常に大きな応答値となりやすい。一方簡易法は、一度目の時刻歴応答解析結果を用いて $LRBk_{min}$ を評価するため、二度目の解析では降伏荷重が一定となる。そのため急激なエネルギー吸収が降伏荷重に影響せず、準詳細法よりも小さな応答となったと考えられる。すなわち、簡易法が準詳細法と比較し過小評価となるケースは、主要動の長いCH1, OS1において生じやすい。しかし、図5より多くのケースで簡易法は準詳細法よりも大きな応答となっている。安全側の評価とするため、応答スペクトル法においても簡易法と同様に二度応答計算を行う手法が適切であると考えられる。

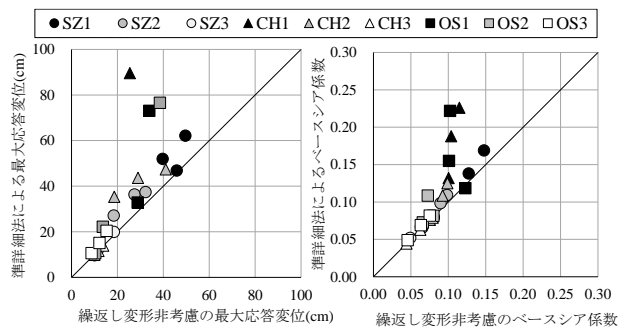


図4 繰返し変形考慮前後における最大応答の比較

(ゴム径 1000mm-鉛径 200mm)

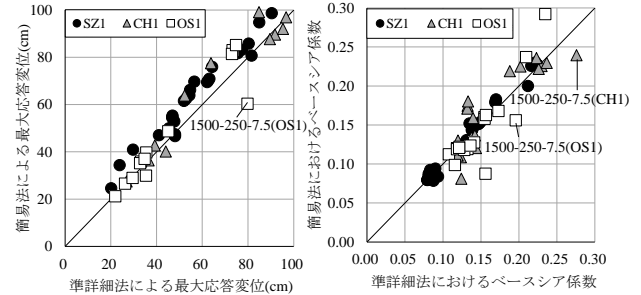
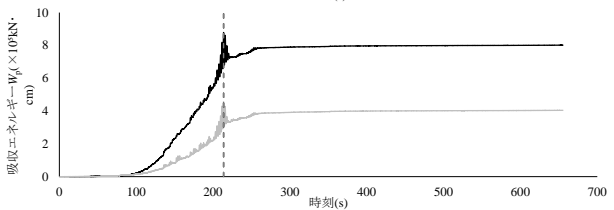
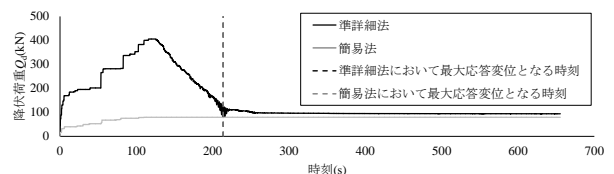
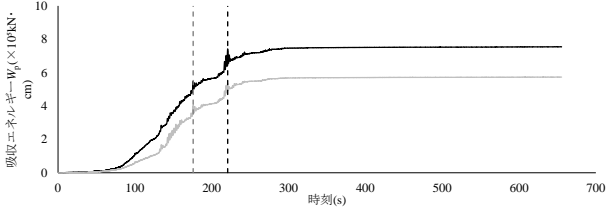
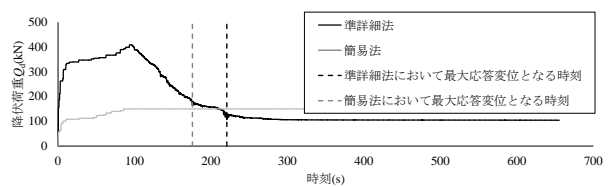


図5 準詳細法および簡易法による最大応答の比較



(a) ゴム径 1500mm-鉛径 250mm-面圧 7.5N/mm²(CH1)



(b) ゴム径 1500mm-鉛径 250mm-面圧 7.5N/mm²(OS1)

図6 準詳細法および簡易法による時刻歴応答波形

4. 応答スペクトル法における各係数に関する検討

応答スペクトル法を用いて繰返し変形の影響を考慮する手法に関する、各係数について検討を行う。繰返し変形非考慮の時刻歴応答解析結果を用いて、基整促波に対しても適用できる評価手法を明らかにする。

4.1 最大応答変位時の減衰定数

履歴ループを用いて最大応答変位時の減衰定数を算出し、評価式との対応を確認する。履歴ループによる評価は、片ぶれの大きいケースでも有効である平石らの手法⁹⁾を用いる。LRBの最大応答変位の定常ループに対する減衰定数 h_{eq} は式(2)より評価する⁷⁾。免震部材の減衰定数の評価手法として、 h_{eq} に対し定常ループと非定常ループの減衰効果の差を表す低減係数を乗じる手法(以下、低減法)や、最大応答変位 δ までの減衰定数を平均する手法(以下、平均法)が挙げられる。告示法では低減法を採用しており、低減係数を0.8としている⁷⁾。平均法による減衰定数は、応答変位 δ' の定常ループに対する減衰定数 $h_{eq}'(\delta')$ を用いて式(4)で評価される⁸⁾。

$$h_{eq} = \frac{2(\mu-1)(1-p)}{\pi\mu(1-p+p\mu)} \quad (2)$$

$$h_d = h_{eq} \times 0.8 \quad (3)$$

$$\bar{h}_d = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta h_{eq}'(\delta') d\delta' \quad (4)$$

ここで、 μ :塑性率、 α :バイリニア係数とする。

図7に履歴ループおよび低減法、平均法より得られる減衰定数を示す。左図より、低減法は、履歴ループによる結果の傾向を概ね捉えている。しかし、点線がプロットを上回っているケースも多い。そのため、応答スペクトル法において最大応答変位に対する減衰定数を $0.8h_{eq}$ として応答予測を行った場合、減衰を過大評価し、最大応答変位を小さく評価してしまう可能性がある。

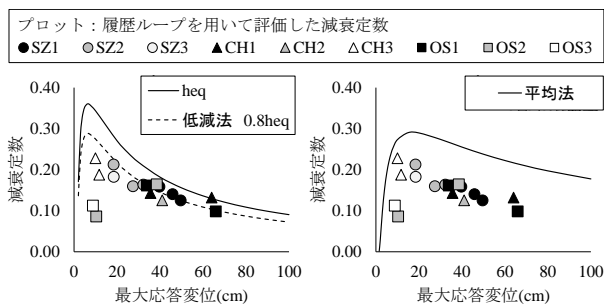


図7 履歴ループと低減法とおよび平均法の比較

4.2 免震部材の吸収エネルギーの評価

履歴型ダンパーと流体型ダンパーを併用したケースにおける各免震部材の吸収エネルギーは、10%のエネルギースペクトル V_E および各減衰定数を用いて式(5)より評価する手法が提案されている⁵⁾。

$$W_p = E \times \frac{h_d}{h_d + h_v} = \frac{1}{2} M V_E^2 \times \frac{h_d}{h_d + h_v} \quad (5)$$

ここで、 M :建物質質量、 h_d 、 h_v :履歴型ダンパーおよび流体型ダンパーの減衰定数とする。

吸収エネルギーは最終時刻までの累積値であるため、最大応答変位時の減衰定数を用いて評価するのは不適切であると考えられる。本節では、時刻歴応答解析より得られるLRBの吸収エネルギー割合 $W_p/(W_p+W_v)$ と、減衰定数の割合を比較する。解析モデルはゴム径1000mm-鉛径200mmのLRBに対し、せん断ひずみ200%における減衰定数5%、10%、20%のリニア型オイルダンパー(以下、OD)を併用する。ODの減衰定数 h_v は、一律で式(6)より評価する。

$$h_v = \frac{C_v}{2\sqrt{MK_{eq}}} \quad (6)$$

LRBの減衰定数の評価式は、手法1:式(2)、手法2:式(3)、手法3:式(4)とする。図8より、手法3が最もよくプロットの傾向を捉えている。

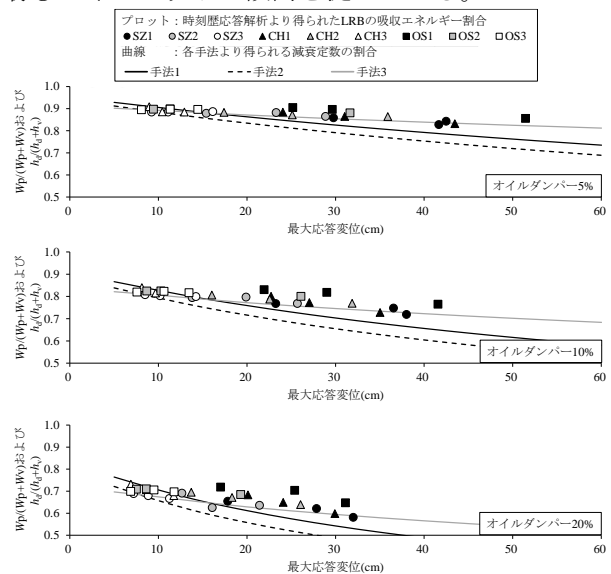


図8 吸収エネルギー割合と減衰定数割合の関係

5. 基整促波に対応した応答スペクトル法

図9に基整促波に対応した応答スペクトル法(以下、提案法)の手順を示す。最大応答の評価には、減衰補正係数 F_h および疑似速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの比 λ が用いられる。告示に示されるこれらの評価式は、基整促波を対象にした場合応答を過大評価する傾向がある⁹⁾。そこで、本研究では基整促波に対応した片岡らの手法⁹⁾および渡邊らの手法¹⁰⁾を用いる。免震部材の吸収エネルギーの評価は、式(5)および4.2節に示す手法3を用いる。

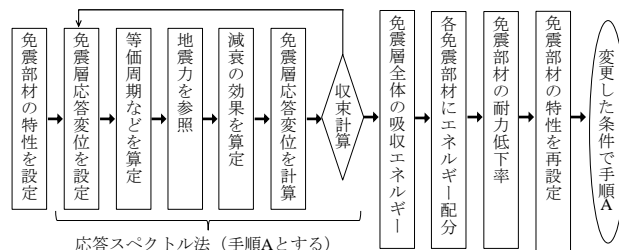


図9 基整促波に対応した応答スペクトル法手順

図10, 図11に準詳細法および提案法より得られる鉛プラグ体積当たりのLRBの吸収エネルギー W_p/V_p および最大応答を示す。 W_p/V_p は、準詳細法では最大応答変位となる時刻, 提案法では一度目の応答スペクトル法より得られる値とする。解析ケースは図10はゴム径1000mm-鉛径200mmのLRBのみ, 図11は同LRBにせん断ひずみ200%における減衰定数5%のODを併用したケースとする。

結果より, 提案法における W_p/V_p は安全側であり, 繰返し変形の影響は考慮可能である。変位・速度・ベースシア係数は+50%以内に収まった。また, 危険側となるケースもあったが, これは F_h および μ が精度の向上を目的として提案されており⁹⁾安全率が考慮されていないためであると考えられる。

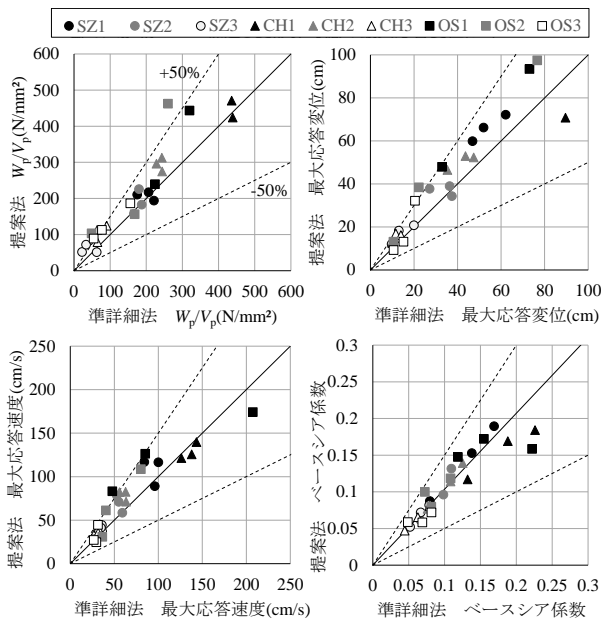


図10 準詳細法と提案法による結果比較(LRB)

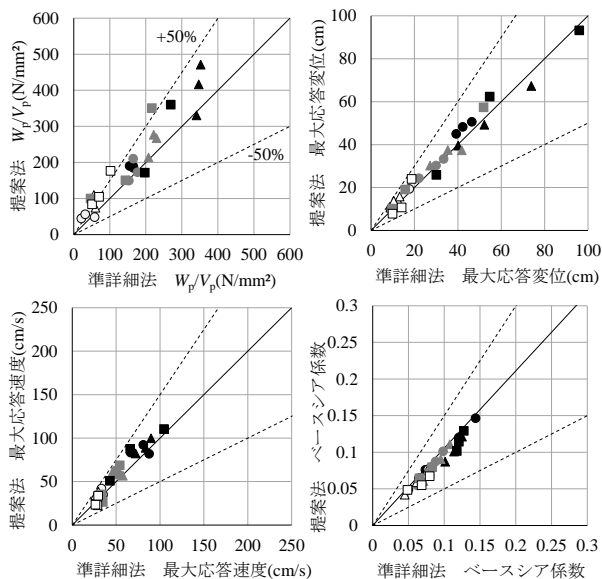


図11 準詳細法と提案法による結果比較(LRB+OD)

6. まとめ

本研究より得られた知見を示す。

- ・ 簡易法と準詳細法より得られる最大応答値を比較すると, 多くのケースで簡易法の方が大きな値となる。
- ・ 最大応答変位に対する減衰定数は, 基整促波を対象としても告示に示される手法が有効である。
- ・ 免震層に対する各免震部材の吸収エネルギー割合は, 減衰定数を用いて概ね評価可能である。
- ・ 応答スペクトル法に繰返し変形の影響を考慮する手順を組み込み, 準詳細法による解析結果と比較することで精度を確認した。

参考文献

1. 国交省建築基準整備促進事業:国住指第1111号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言) 別紙 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策の対象区域と各区域における擬似速度応答スペクトル, 2016.6
2. 飯場正紀:加速度応答スペクトルを用いた長周期地震動に対する免震建物の応答評価その1 入力エネルギーと加速度応答スペクトル平滑化の考え方, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.585-586, 2014.9
3. 国交省建築基準整備促進事業:国住指第1111号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言) 別紙 5-2 免震建築物の繰返し依存性の検証方法, 2016.6
4. 岡野創, 永野正行, 今村晃ら:応答スペクトルとエネルギースペクトルのスケールリング, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第637号, pp.477-486, 2009.3
5. 近藤明洋:長周期・長時間地震動に対する免震部材の挙動と応答評価, 日本建築学会大会2017 構造部門(振動), PD資料, 2017.9
6. 大塚悠里, 平石久廣ら:非定常弾性応答時における応答低減係数の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第745号, pp.363-371, 2018.3
7. 建築研究所:改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景, 2001.8, pp.33-34
8. 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚:等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第68巻, 第571号, pp.53-62, 2003.9
9. 小林正人, 片岡祐人:南海トラフ沿いの巨大地震による設計用長周期地震動に対する地震応答スペクトルの周期特性を考慮した減衰補正式の提案 国土交通省より公表された簡略化スペクトルおよび波形例を対象とした検討, 日本建築学会構造系論文集, 第758号, pp.477-487, 2019.4
10. 渡邊貴博, 小林正人:応答スペクトル法による免震建物の地震応答予測に関する研究その6 長周期地震動を対象とした免震層の速度応答評価法の提案, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.891-892, 2018.9