

応答スペクトルを用いた免震層の最大応答予測法の新しい試み

- その1 減衰低減係数による応答のばらつき改善と免震周期への着目の提案 -

正会員 山崎 久雄\*1  
同 渡邊 信也\*2  
同 高山 峯夫\*3  
同 笠井 和彦\*4

免震構造 最大応答予測 応答スペクトル  
減衰低減係数 免震周期

1. はじめに

免震層の応答を簡便に予測する方法には、エネルギーの釣合に立脚した方法<sup>1)2)</sup>と告示設計法<sup>3)</sup>など応答スペクトルによる方法がある。前者は入力エネルギー等価速度  $V_E$  と等価繰返し回数を与える係数  $\chi$  の設定が応答に影響を及ぼし実務上の扱いにくさがあるが、後者にも減衰低減係数  $D_h$  による応答の不確定性<sup>3)</sup>や塑性変形によって変化する等価周期  $T_e$  で収束計算を行う<sup>3)</sup>煩雑性があると言える。

本研究の目的は応答スペクトル法における上記課題を改善し、同方法の実務の有用性を向上させることである。具体的には、パラメトリック解析の結果をもとに、収束計算を要しないよう  $T_e$  でなく免震周期  $T_f$  に着目する(図1)ことと、 $D_h$  のばらつきを改善するための等価減衰定数の再評価式の有効性を示し、次報で応答予測値の検証を行う。

解析モデルは標準バイリニア型復元力特性をもつ1質点モデルとし、 $T_f=1\sim 10s$ 、降伏せん断力係数  $\alpha_p=1\sim 10\%$  である。

2.  $D_h$  のばらつきの検討

パラメトリック解析結果より最大変位  $U_{max}$  での等価減衰定数<sup>4)</sup>  $h_{eq}$  と  $D_h$  を式(1)で求めた。

$$h_{eq}=1/(4\pi)\cdot(\Delta W/W_i), D_h=U_{max}/S_{D(h=5\%)} \quad (1a,b)$$

ここに  $\Delta W$ 、 $W_i$  は履歴および歪エネルギーである。

図2にBCJL2における  $D_h-h_{eq}$  を、また  $D_h$  経験式として式(2)のAIJ式<sup>3)</sup>、Kasai式<sup>5)</sup>も合わせて示す。

$$D_{h(AIJ)}=1.5/(1+10h_{eq}), D_{h(Kasai)}=1.5/(1+25h_{eq})^{0.5} \quad (2a,b)$$

さらに  $S_D$  の評価を、(a)は  $T_e$  で、(b)は  $T_f$  で行ったものである。ここで式(1)(2)に示す等価線形理論式を用いつつ  $T_f$  に着目することは理論的矛盾の懸念もあるが、本研究目的を勘案し、そのまま当結果と相関性を示すこととした。

BCJL2では、 $T_e$  で評価する従来法ではKasai式がよい対応を示すが、 $T_f$  で評価するとAIJ式がよい対応を示す。

一方、図3に示すEL CENTRO NSでは(a)(b)とも  $D_h-h_{eq}$  は経験式に対してばらつきがある。ここで同図では  $T_f=1\sim 3s$  の  $D_h-h_{eq}$  を表示しているのであるが、 $T_f=1\sim 3s$  に限れば(a)はKasai式に、(b)はAIJ式にほぼ対応している。つまりEL CENTRO NSで  $D_h-h_{eq}$  がばらつくのは  $T_f=4s$  以上である。同じ現象は八戸NSやJR鷹取EWでも見られ(次報に図示する)、これらの地震波の  $\rho S_V$  が概ね  $T=3s$  を境に長周期側で相対速度スペクトル  $S_V$  を下回り始める(図4b)ことに注目した。一方、ばらつきの小さなBCJL2は  $T=10s$  で  $\rho S_V$   $S_V$  である(図4a)。上記は地震波に含まれる周期成分に影響されると考え、これを解析的に検証するために、告示

スペクトル<sup>3)</sup>と同様に長周期域で  $\rho S_{V(h=5\%)}=256/\pi(\text{cm/s})$ 、ただし遮断周期  $T_c=10,6,4,2s$  でハイパスフィルタを通した、透過域の異なる4波で同様の検討を行った。

図5は  $T_c$  の異なる4波の  $\rho S_V$  と  $S_V$ 、図6は同じく  $T_f$  で評価した  $D_h-h_{eq}$  ( $T_f < T_c$  を、 $T_f > T_c$  を)と経験式である。 $T < T_c$  では  $\rho S_V = S_V$  となり  $D_h-h_{eq}$  はAIJ式に対応し、 $T > T_c$  では  $\rho S_V < S_V$  となり  $D_h-h_{eq}$  はばらつくことが確認できた。また図5には各地震波の地動最大速度  $V_{0,max}$  も示しているが、この値は  $S_V$  の長周期側の漸近値に対応している(図4のEL CENTRO NSも同様、いずれも積分は10秒振子法<sup>6)</sup>)。

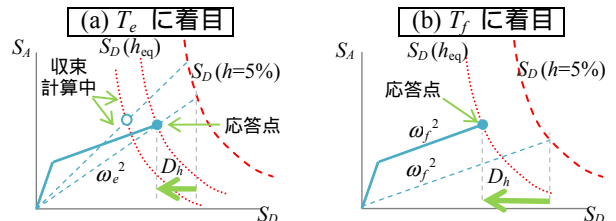


図1 TeおよびTfに着目する概念図

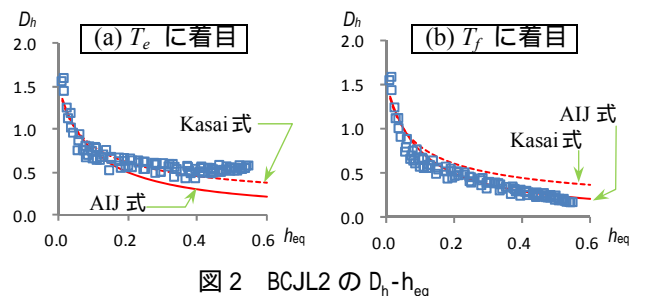


図2 BCJL2の  $D_h-h_{eq}$

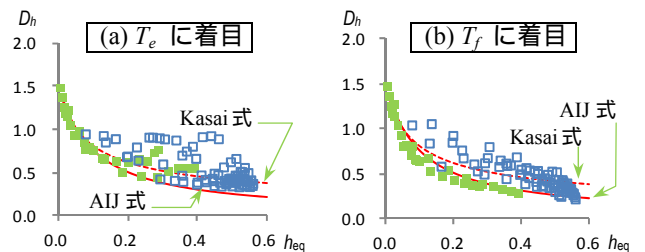


図3 EL CENTRO NS(50cm/s)の  $D_h-h_{eq}$

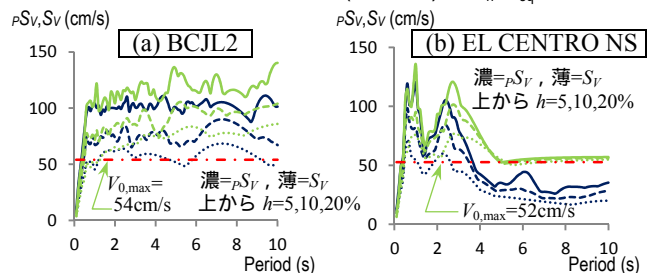


図4  $\rho S_V$  と  $S_V$  (BCJL2 と EL CENTRO NS(50cm/s))

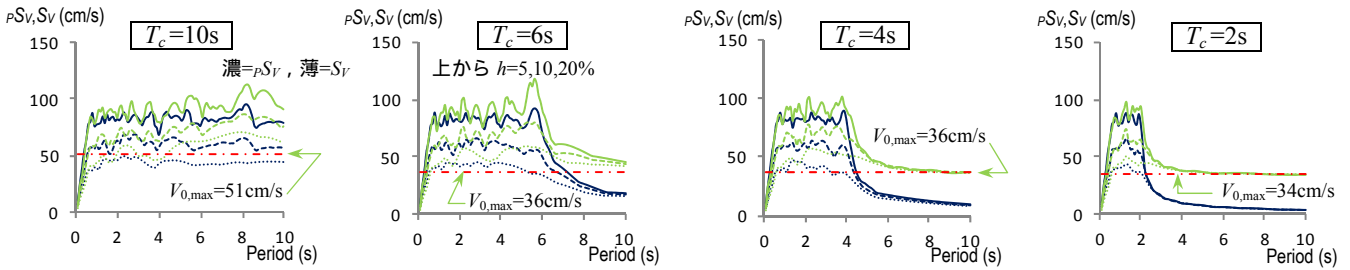


図5 透過域の異なる4波の $\rho S_V$ と $S_V$  (濃= $\rho S_V$ , 薄= $S_V$ , 上から  $h=5, 10, 20\%$ )

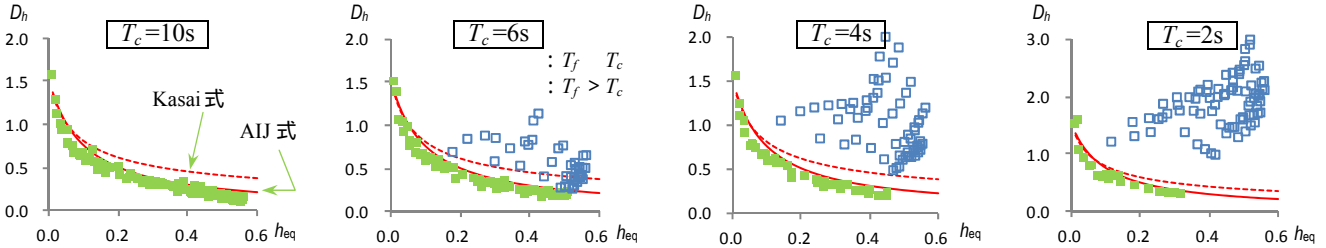


図6 透過域の異なる4波の $D_h-h_{eq}$  ( $T_f$ に着目)

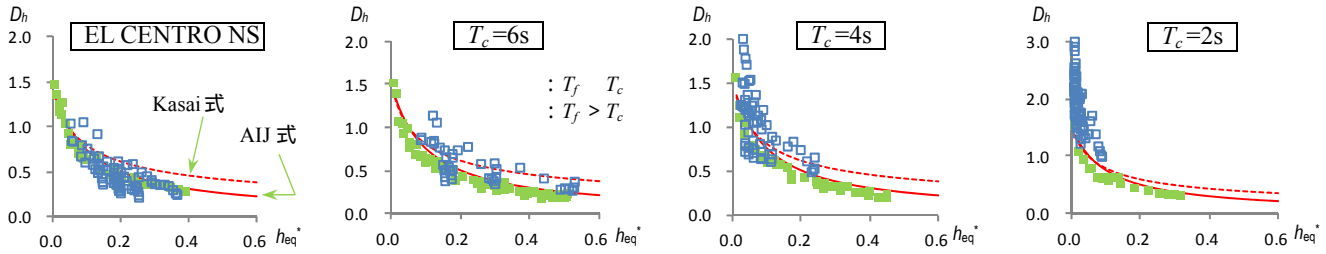


図7 再評価後の $D_h-h_{eq}^*$  (EL CENTRO NSおよび透過域の異なる $T_c=6, 4, 2s$ の3波,  $T_f$ に着目)

### 3. 減衰定数の再評価によるばらつき改善と $T_f$ への着目

以上より,  $D_h$ のばらつきは全体的に分布せず,  $\rho S_V < S_V$ となる長周期域で顕著に生じ, その境界周期は地震波の周期特性によること, また  $\rho S_V$   $S_V$ の領域では  $T_f$ に着目した  $D_h-h_{eq}$ はAIJ式によく対応すること, さらに長周期側の  $S_V$ は  $V_{0,max}$ で代用可能であることが言える。

$\rho S_V < V_{0,max}$ でのばらつきを改善するため, 式(1a)の $h_{eq}$ を式(3)で再評価し,  $h_{eq}^*$ を式(2)に適用することを提案する。

$$h_{eq}^* = \min\{1, (\rho S_V / V_{0,max})^2\} h_{eq} \quad (3)$$

式(3)は  $\rho S_V < V_{0,max}$ において  $D_h$ から逆算した  $h_{eq}$ と式(1a)の  $h_{eq}$ との関係式を検討し指数項を丸めたものである。

図7に, 式(3)で再評価したEL CENTRO NSおよび $T_c=6, 4, 2s$ の $D_h-h_{eq}^*$ を示す。再評価後はAIJ式への対応が改善する。

図8は再評価後の $D_h$ と式(1a)の $h_{eq}$ との関係で, 表記4地震波の応答解析結果との比較である ( $\alpha_p=4\%$ ,  $T_f=1\sim 10s$ )。再評価後の $D_h$ は $T_f$ に伴う変化にも概ね対応できている。

### 4. まとめ

従来の免震層の応答予測に用いられる応答スペクトル法に内在している $D_h$ のばらつきについて検討し,  $\rho S_V$ と $V_{0,max}$ によって再評価した減衰定数で改善でき, また $T_f$ に着目した場合の $D_h-h_{eq}$ の相関性を示した。次報では,  $T_f$ に着目することの適用条件の検討を含めて, 本提案内容を反映した応答スペクトル法による予測結果の検証を行う。

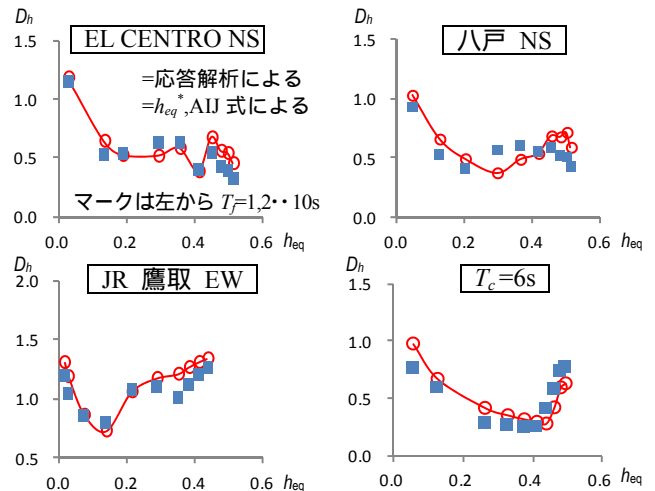


図8 4地震波による $D_h-h_{eq}$ の検証 ( $\alpha_p=4\%$ ,  $T_f$ に着目)

### 参考文献

- 1) 高山峯夫ほか: 4秒免震への道, 理工図書, 1997.8
- 2) 山崎久雄, 渡邊信也, 石鍋雄一郎, 高山峯夫, 笠井和彦: 非線形粘性ダンパーを含む免震層の簡便な応答予測法 その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.555-558, 2011.8
- 3) 改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景, ぎょうせい, 2001.8
- 4) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, 2003.5
- 5) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化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571号 53-62, 2003.9
- 6) 北村春幸: 性能設計のための建築振動解析入門, 彰国社, 2002.9

用いた地震波の出典はその2に示す。

\*1 ユニオンシステム(株) 振動解析総合推進室  
\*2 NTTファシリティーズ総合研究所 構造技術本部  
\*3 福岡大学 工学部建築学科教授・工博  
\*4 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph.D.

\*1 UNION SYSTEM INC. Dynamic Analysis Research Complex  
\*2 NTT FACILITIES RESEARCH INSTITUTE Inc  
\*3 Prof., Fukuoka University, Faculty of Engineering, Dr.Eng.  
\*4 Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.