

非線形粘性ダンパーを有する免震構造物の最適地震信頼性解析

中川 肇*

Optimum Seismic Reliability Analysis of Base-Isolated Buildings with Non-linear Viscous Damper

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

This paper presents the optimum parameter analysis of a base-isolated building under the Tokachioki type (2003) and Kii peninsula southeast offshore type (2004) random earthquake excitations. From the viewpoint of seismic reliability, the optimum parameter on the base isolation interface is determined in such a way that the responses of base isolated structural systems agree with the response demanded by the structural designer. The optimality of the parameter is discussed for the performance demanded coefficient and two random earthquake excitation models.

KEY WORDS: long natural period earthquake excitation, seismic reliability, optimum design
non-linear viscous damper

1. 序

1995 年の兵庫県南部地震以後、M7 クラスの巨大地震が日本各地、海外で発生している。2003 年 9 月 26 日午前 4 時 50 分、釧路沖を震源とする M8.0 の十勝沖地震が、2004 年 9 月 5 日午後 11 時 57 分、紀伊半島南東沖を震源とする M7.4 の紀伊半島南東沖地震が発生した。十勝沖地震はプレート境界地震で、苫小牧市は不整形な堆積盆地上に位置していたために、継続時間が長く、低振動数成分の多い揺れを観測している。所謂、「長周期地震動」の存在が確認された。一方、紀伊半島南東沖地震はプレート内部破壊地震で、2035 年～2040 年に発生することが懸念されている想定東南海地震震源域周辺で発生したが、地震の発生メカニズムが異なり、南海、東南海地震の前兆を示すものではなかった。しかし、関西圏特に、大阪平野などの堆積盆地構造では、十勝沖地震のように、地震動が盆地内で反射と屈折を繰り返し、西宮、豊中、高槻、大阪、堺で「やや長周期成分」が観測されている。

前報 1) では、地震信頼性理論に基づく免震構造の最適設計について論じ、免震層を構成する鋼棒ダン

パーの最適降伏耐力を推定した。本論では、前報で作成した十勝沖型非定常ランダム入力モデルと同様に、紀伊半島南東沖地震時の西宮市での観測記録を基に、非定常ランダム入力モデルを作成する。次に、最大速度 100cm/s で規定される長周期型ランダム入力を受ける免震構造物の地震信頼性解析を実施し、免震層の構成要素である非線形粘性ダンパー（以下、NV ダンパー）の最適粘性減衰係数を推定する。

2. 非定常ランダム入力モデルの構築

2-1 十勝沖地震、紀伊半島南東沖地震における スペクトル特性の評価

図 1、2 は、十勝沖地震時の苫小牧市及び、紀伊半島南東沖地震時の西宮、豊中、堺市で観測された地震波形と夫々のフーリエスペクトルを示している。図 3 には、十勝沖、紀伊半島南東沖地震において、最大速度を 75cm/s で規定された場合の速度応答スペクトルが描かれている。図 2 より、十勝沖地震の卓越振動数は 0.29Hz で、紀伊半島南東沖地震の西宮市での卓越振動数は 0.25～0.48Hz, 3.95Hz であり、やや長周期であることが判る。図 3 より、苫

*建築学科

小牧、西宮、豊中、堺市での観測記録は、3~5秒付近が卓越する地震動であり、国土交通省告示 1461号で示される速度応答スペクトルに酷似している。次節で作成する紀伊半島南東沖型非定常ランダム入力モデルは、免震構造の周期帯域である3~5秒が卓越している西宮市での観測記録を基に作成する。

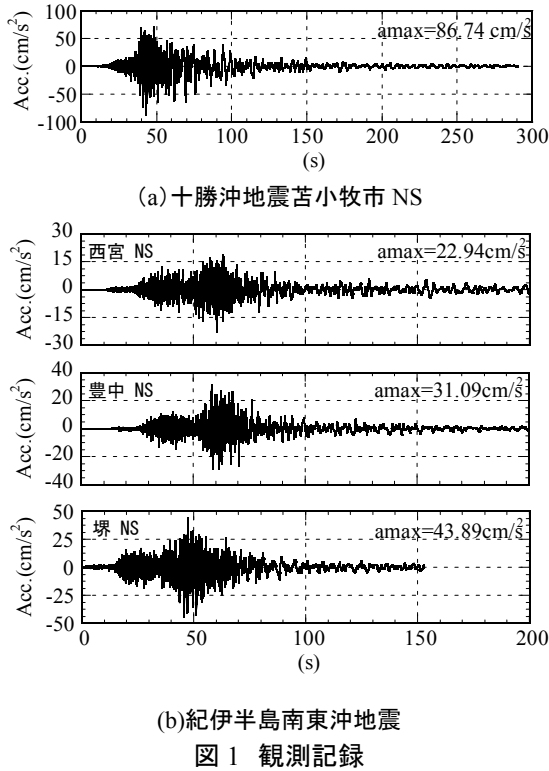


図1 観測記録

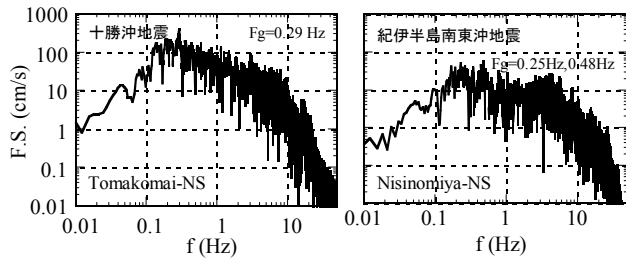


図2 フーリエスペクトル

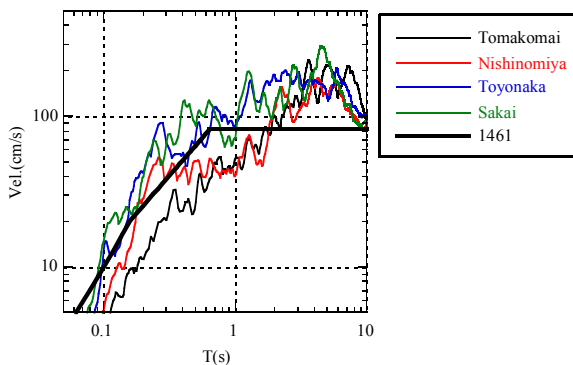


図3 速度応答スペクトル(75cm/s)

2-2 非定常ランダム入力モデルの作成

非定常ランダム入力モデルのパラメータ評価法は参考文献 1)~3) に示されており、ここでは省略する。詳細については前報 1)を参照されたい。

本節では、紀伊半島南東沖地震時の西宮市の観測記録以下、Kii-nishinomiya 型ランダム入力) の非定常ランダムパラメータ¹⁾³⁾を作成する。図4には、Tomakomai 型及び Kii-nishinomiya 型非定常ランダム入力モデルのパラメータが描かれている。(a)図が無次元振幅包絡線関数 σ_f/σ_{fmax} 、(b)図が卓越振動数 ω_g 、(c)図がスペクトルの形状係数 h_g である。図中の τ は地震動の継続時間の最終時刻に対する各時刻の無次元量を示している。図4より、 σ_f は強震付近を中心に単峰型を示し、 ω_g は両ケースとも単調減少することが判る。また、形状係数 h_g の値は異なるが、類似した傾向を示している。

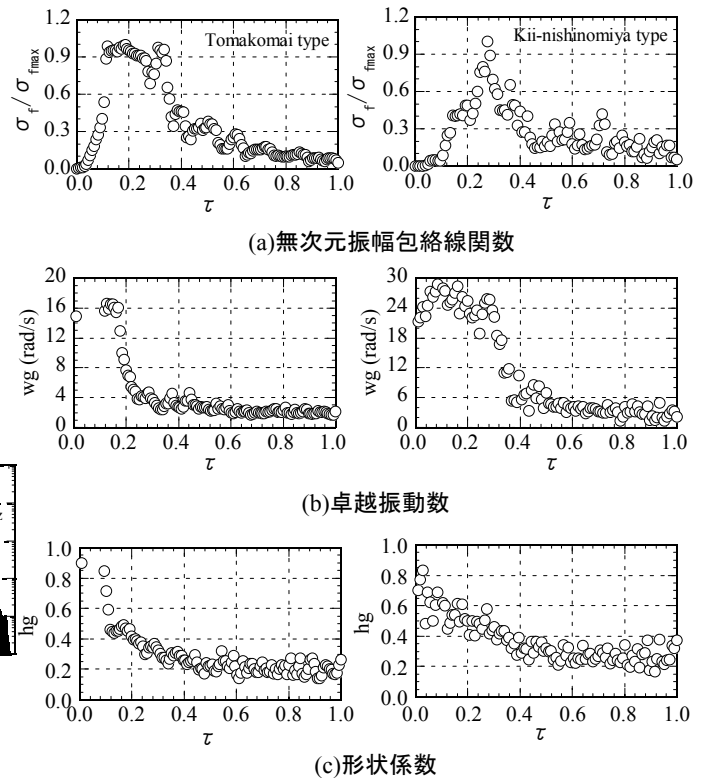


図4 非定常ランダム入力モデル

3. 解析手法

3-1 基礎免震系の運動方程式の誘導

本論では、2種類の基礎免震系モデルを想定している。上部構造物の復元力特性を bi-linear 型、免震層は積層ゴムと鋼棒ダンパーで構成される bi-linear 型とし、それらの復元力特性に等価線形化⁴⁾されたランダム入力を受ける免震系 (以下、BIS モデル) の運動方程式は次式のように与えられる。

$$\{\ddot{u}\} + \left[\tilde{c} \right] + \left[\tilde{k}' \right] \{c_1\} \{\dot{u}\} + \left[\tilde{k} \right] \{u\} + \left[\tilde{k}' \right] \{c_2\} \{y\} = -\{I'\} f \quad (1)$$

$$\{y\} \cong [c_3] \{\dot{u}\} + [c_4] \{y\} \quad (2)$$

$$f = \ddot{z} + \ddot{w}; \ddot{z} + 2h_g \omega_g \dot{z} + \omega_g^2 z = -\ddot{w} \quad (3)$$

ここで、 $[c_1] \sim [c_4]$ は等価線形化係数で、 \ddot{w} 、 f は夫々構造物の基盤に入力されるホワイトノイズ及び線形フィルターの通過過程で得られるノンホワイトノイズ²⁾である。

一方、BIS モデルの免震層にオイルダンパーなどの非線形粘性ダンパー⁵⁾を付加した免震系 (以下、BISNV モデル) の運動方程式は次式のように与えられる。

$$\{\ddot{u}\} + \left([\tilde{c}] + [\tilde{k}][c_1] + [\tilde{c}][c_s] \right) \{\dot{u}\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}][c_2]\{v\} = -\{l'\}f \quad (4)$$

ここで、 $[c_s]$ は NV ダンパーの等価線形化係数である。

3.2 免震系の地震信頼性評価

構造物の地震信頼性評価は、文献 6) に示されており、本論でも、前報 1) と同様に、この評価法に準拠し、免震層の最適パラメータを推定する。免震層が閾値 \tilde{u} を超えない残存確率つまり地震信頼性 (以下、SR) $R_1(T_d)$ は定常確率過程の場合、最終的に次式となる。

$$R_1(T_d) \cong \exp \left\{ -\frac{T_d \sigma_{\tilde{u}}}{\pi \sigma_{\tilde{u}}} \exp \left(-\frac{\rho^2 \tilde{u}^2}{2 \sigma_{\tilde{u}}^2} \right) \right\} \quad (5)$$

免震系全体の地震信頼性 $R(T_d)$ を (5) 式を各層の信頼性の総和として表現することは可能である。しかし、過大入力時の上部構造物の最大変位応答が一部、塑性域に入る可能性はあるが、殆どの場合、既往の解析例で弾性域以内であることは明らかである。従って、本報では、免震層に関する地震信頼性に限定している。

4. 解析パラメータ

4.1 地震入力モデル

表 1 は十勝沖地震 NS 成分、紀伊半島南東沖地震 NS 成分の最大速度を 100cm/s とし、その強震部分を基に計算したランダム入力の非定常パラメータ^{1),3)}の平均値を示している。

表 1 ランダム地震入力モデル

	$\sigma_f (cm/s^2)$	$\omega_g (rad/s)$	h_g
Tomakomai 型	266.5/3	2.94	0.323
Kii-nishinomiya 型	411.1/3	6.92	0.375

4.2 構造物モデル

構造物モデルは 11 質点免震系モデルを想定し、免震系モデルに関する標準パラメータを次のように設定する。

①免震系の上部構造物は、表 2 に示す 10 質点系モ

デルで、1 次固有周期 T_1 は 1.0 秒とし 1 次減衰定数 h_1 は 2% の初期剛性比例型とする。

表 2 上部構造物

階	層剛性 (kN/cm)
10	6785.2
9	10819.7
8	14177.5
7	17055.7
6	19529.9
5	21641.3
4	23411.4
3	24855.9
2	25985.7
1	26807.6

階高、質量は夫々 400(cm)、12.5(kN・s²/cm) で各層一様とする。弾性剛性分布は耐震規準に基づき、各層の層間変位応答分布が一様になる様に決定した。②免震系モデルの 1 次固有周期は 4.0 秒とし、鋼棒ダンパーの初期剛性、降伏強度は夫々積層ゴムの剛性 k_f の 10 倍、免震層上部の構造物重量の 1~25% とする。③NV ダンパーの粘性減衰係数 c' は 10~1000 kNs/cm とし、速度応答の閾値 \dot{u}_{cr} は 10cm/s とする。

5. 数値解析例

5.1 免震層の設計

本論では、免震系モデルの 1 次固有周期を 4.0 秒になるように固有値解析を実施し、収束計算により積層ゴムの剛性を決定する。その結果を表 3、4 に示す。一例として鋼棒ダンパーの降伏強度レベル及び初期剛性比は夫々 $\alpha = 0.10$ 、 $\beta = 10$ である。

表 3 免震層の設計

初期剛性 (kN/cm)	2 次剛性 (kN/cm)	αQ (kN)	δ (cm)
3919.2	356.3	13467.7	3.78

表 4 固有値解析結果 単位: s

1 次	4.000
2 次	0.575
3 次	0.308
4 次	0.213
5 次	0.164

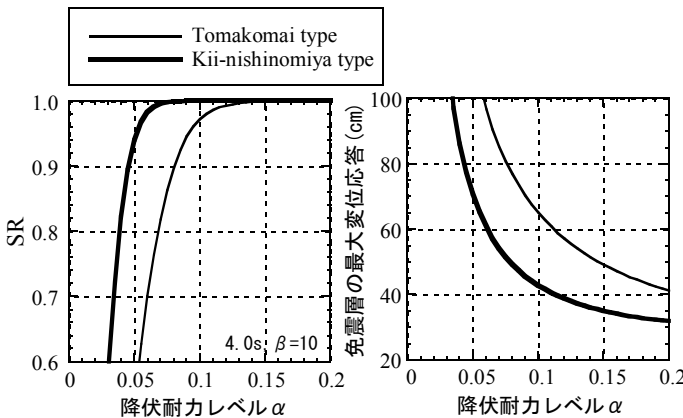
5.2 免震層の性能指定型最適パラメータの推定

1) 鋼棒ダンパーの最適降伏耐力レベルの評価

図 5 には、入力地震動を Tomakomai 型、Kii-nishinomiya 型ランダム入力とし、鋼棒ダンパーの降伏耐力レベル $\alpha (= Q_d / \Sigma W) = 0.01 \sim 0.2$ まで 0.01 刻みに変動させ、BIS モデルでの地震信頼性 SR が描かれている。ここで、(a)図が SR、(b)図が免震層の最大変位応答を示している。(5)式中の性能要求係数 ρ は 1.0 とし、免震層の閾値 $\tilde{u} = 60.9$ cm (積層ゴムのせん断歪 300%) とする。地震信頼性 SR=1.0 は免震層の最大変位応答が閾値 \tilde{u} を全く超えない

確率を示すことであるが、図 5(a)から判るように、SR 曲線は 0.98 付近から鋼棒ダンパーの降伏耐力レベル α の増加に対して極めて鈍感になるために、最適値を決定する場合、SR=0.99 と 1.0 では、その最適解に非常に差が生じると考えられる。本論では、鋼棒ダンパーの最適降伏耐力レベルは、現実の設計を考慮し SR=0.99 となる点を最適解として定義する。

図 5(a)より、地震信頼性 SR は α の変動に対して非線形的に増加し、SR=1.0 に漸近していくことが判る。また、 α が 0.06~0.08 以下になると SR は急激に低下することが判る。これは、免震層の応答が指定した閾値 \tilde{u} を著しく超過し免震層が不安定な状況に陥る可能性を示唆している。2 種類の長周期ランダム入力モデルにおいて、SR=0.99 を満足する最適解は、Tomakomai 型、Kii-nishinomiya 型で夫々、0.11、0.065 となり、両者は異なることが判る。これは、地震動の最大加速度と卓越振動数が異なっているためと推察される。(b)図より、鋼棒ダンパーの降伏耐力が増加するにつれて、免震層の最大応答は低下し、免震層の閾値 $\tilde{u} = 60.9 \text{ cm}$ に一致する最適降伏耐力レベルは、SR=0.99 を満足する値に一致する。以上の結果より、Tomakomai 型ランダム入力において、鋼棒ダンパーの最適降伏耐力は、上部構造物の全重量の 11%に相当するために、現実の設計では難しい。鋼棒ダンパーの降伏耐力は免震構造の実設計で使用させる範囲とし、その不足分を NV ダンパーの粘性減衰に期待し、その最適値を推定する。



(a) 地震信頼性 SR (b) 免震層の最大変位応答
図 5 免震層の降伏耐力レベルに対する地震信頼性

2) NV ダンパーの最適粘性減衰係数の評価

図 6 には、鋼棒ダンパーの降伏耐力レベル $\alpha = 0.06$ とし、NV ダンパーの粘性減衰係数 $c' = 10 \sim 1000 \text{ kNs/cm}$ まで 10 kNs/cm 刻みに変動させ、

性能要求係数 $\rho = 0.6 \sim 0.8$ (せん断歪 240~320%程度に対応)とした場合の BISNV モデルでの SR が描かれている。図 6 より、地震信頼性 SR は c' の増加に対して非線形的に増加し、SR=1.0 に漸近することが判る。SR=0.99 となる最適解は性能要求係数 ρ に対して、夫々存在し、 ρ が小さくなるつまり、積層ゴムのせん断歪を小さくするためには、最適粘性減衰係数 c'_{opt} は大きくなることが判る。性能要求係数 ρ に対する最適粘性減衰係数を表 5 に示す。Tomakomai 型と Kii-nishinomiya 型では、そのパラメータは前項 1)で推定した鋼棒ダンパーの降伏耐力レベルほどではないが、若干異なる。

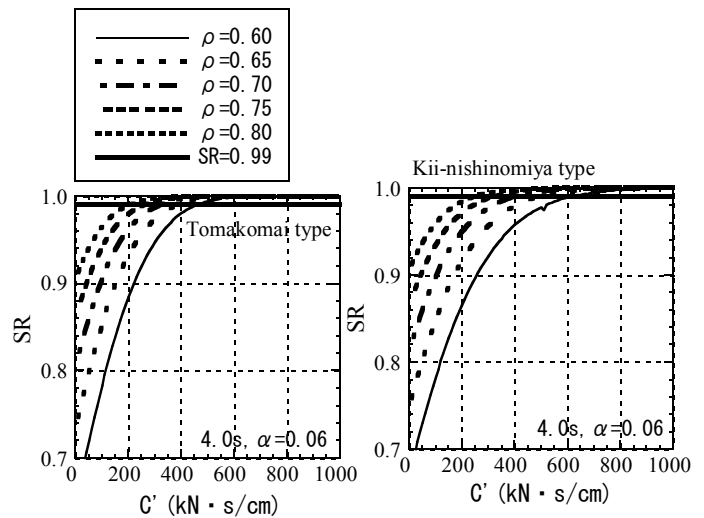


図 6 NV ダンパーの粘性減衰係数に対する地震信頼性 SR

表 5 NV ダンパーの最適粘性減衰係数 単位:kNs/cm

ρ	Tomakomai type	Kii-nishinomiya type
0.60	460	610
0.65	380	500
0.70	320	400
0.75	260	320
0.80	200	250

5.3 NV ダンパーの最適粘性減衰係数が入力地震動レベルに及ぼす影響

本節では、5.2 節 2)項で得られた NV ダンパーの最適粘性減衰係数が入力地震動レベルに対して、どのような影響を及ぼすかを地震信頼性 SR 及び免震層の最大変位応答の観点から検討する。図 7 には、免震層の降伏耐力レベルを $\alpha = 0.06$ 、ランダム入力モデルを Tomakomai 型、表 5 に示した性能要求係数 $\rho = 0.6 \sim 0.8$ に対する最適粘性減衰係数 $c'_{opt} = 460, 320, 200 \text{ kNs/cm}$ とし、入力地震動レベルを 25~150cm/s まで 5 cm/s 刻みに変動させた場合の地震信頼性 SR 及び免震層の最大変位応答 u_{1max} が描かれて

いる。図 7 より、入力地震動レベルが 100cm/s 付近まで、SR は 1.0 であり、それ以降、低下し、性能要求係数が大きくなる場合は、その低下率は急激である。これは、免震層の最大変位応答図が示すように、積層ゴムの性能保障限界値つまり、300%歪を超える地震動レベルが夫々のモデルで異なり、最適なダンパーを付加することで、110~125cm/s 付近まで 300%歪を越えることはない。すなわち、本論で開発した地震信頼性を規範とする免震系の最適設計法において、安全のレベルが低下することは免震層に過大な変形を生じさせることを意味し、免震系の不安定挙動、危険度を明確に表現できる。また、Kii-nishinomiya 型ランダム入力モデルの場合も、図 7 と同様な傾向を示すことを確認している。

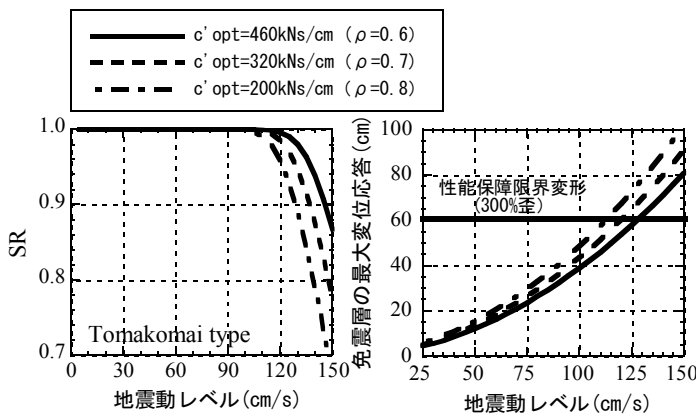


図 7 入力地震動レベルに対する地震信頼性及び免震層の最大変位応答

5.4 NV ダンパーの最適粘性減衰係数が地震動の非定常性に及ぼす影響

本節では、以下の 2 点の項目を検証するために、非定常ランダム応答解析を実施する。

- 1) 5.2 節で推定した鋼棒ダンパー及び NV ダンパーの最適値は定常確率過程に基づいているが、地震動の非定常性に影響を及ぼさないかを検証する。
- 2) 一般に、長周期地震動に対して、超高層建築物が主要動以降の長周期成分に共振し、長時間の揺れを経験すると言われている。免震構造物は長周期地震動に対して共振現象を生じないかどうかを検証する。

まず、5.2 節 2) 項で得られた最適粘性減衰ダンパーを有する BISNV モデルに対して、非定常ランダム応答解析を実施する。入力地震動は最大速度 100cm/s で規定される Tomakomai 型、Kii-nishinomiya 型ランダム入力とする。図 8 は、表 5 に示した性能要求係数 $\rho = 0.6$ での最適粘性減衰係数 c'_{opt} を与えた場合の免震層の層間変位、絶対加速度応答の r.m.s.

値の時刻歴が描かれている。図 8 より、層間変位及び絶対加速度応答の r.m.s. 値は、Tomakomai 型の方が若干大きいですが、最大変位応答 ($\cong 3\sigma_1$) においても、積層ゴムのせん断歪 300% を超えておらず、定常確率過程の場合と同様の結果である。また 100 秒付近から見られる長周期地震動による共振現象は見られない。これは、Tomakomai 型ランダム入力モデルはやや長周期成分を多く含んでいるためと、免震構造物の場合、時々刻々と固有周期が変動することと、鋼棒ダンパーの履歴減衰効果及び NV ダンパーの粘性減衰効果によるものと推察される。

以上の結果より、本節の冒頭で述べた 2 点について、非定常応答解析を実施することで検証できたとと言える。

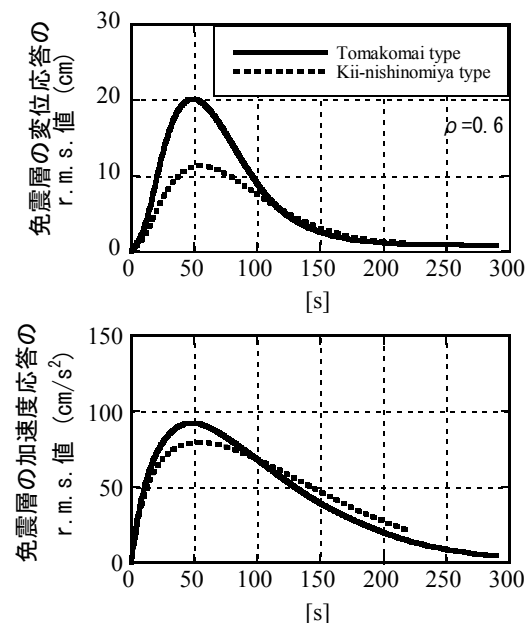


図 8 非定常応答解析結果

6. 結語

本論では、十勝沖地震(2003)、紀伊半島南東沖地震(2004)の非定常ランダム入力モデルを作成し、長周期ランダム入力を受ける非線形粘性ダンパーを有する免震系の地震信頼性解析を実施し、その最適粘性減衰係数を推定した。また、最適粘性減衰係数を有する免震構造物が長周期地震動に対して共振現象を生じないかどうか、非定常ランダム応答解析を基に検証した。本論の解析結果から免震系の最適設計について軽々に結論を述べることはできないが、それらが示す工学的知見を述べる。

- (1) 非線形粘性ダンパーの最適粘性減衰係数 c'_{opt} は、性能要求係数 $\rho = 0.6 \sim 0.8$ に対して、概ね 600~200kNs/cm となる。

- (2) NV ダンパーの最適粘性減衰係数 c' を 460kNs/cm とした場合、入力地震動レベルが 120cm/s 以内では免震系の地震信頼性 SR は 1.0 を保つが、120cm/s を超えると SR は緩やかに低下し、150cm/s の入力では SR は 0.86 となる。
- (3) 本論の様な地震動のランダム性を考慮した確率論的地震応答解析に基づく免震層の最適パラメータを推定する限り、入力地震動特性がその最適パラメータに及ぼす影響は少ない。
- (4) 長周期地震動を受ける免震構造物において、共振現象による応答が増幅することはない。

謝辞

本論で採用しました十勝沖地震苫小牧市及び紀伊半島南東沖地震での観測記録は、独立行政法人防災科学技術研究所 (K-NET, KiK-net) より使用させて頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川肇：地震信頼性理論に基づく免震構造の最適設計について、明石工業高等専門学校研究紀要、第 48 号、pp.89～95 (2005)
- 2) Tajimi,H.: A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake, Proc. of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol.II, pp.781～797 (1960)
- 3) 浅野幸一郎：地震入力パラメータの変動を考慮した構造物の動的応答、日本建築学会構造系論文報告集、第 400 号、pp.123～130 (1989)
- 4) 浅野幸一郎：履歴系の統計的等価線形化法、日本建築学会構造系論文報告集、第 335 号、pp.10～14 (1981)
- 5) 中川肇：ランダム地震入力を受ける連結制震ダンパーを有する 2 棟免震構造物の性能指定型設計について、日本建築学会構造系論文集、第 585 号、pp.63～69 (2004)
- 6) 金子修平、松田敏、浅野幸一郎：上町断層系想定地震動モデルによる大阪市域を対象とした建築構造物の地震信頼性解析、日本建築学会構造系論文集、第 530 号、pp.29～36 (2000)