

高減衰積層ゴムの復元力特性のモデル化が 地震応答に及ぼす影響評価

松田 泰治¹・大鳥 靖樹²・鵜野 禎史³・島袋 武⁴

¹正会員 熊本大学教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番1号)

E-mail:mazda@kumamoto-u.ac.jp

²正会員 電力中央研究所 我孫子地区 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:ootori@cripi.denken.or.jp

³正社員 (一社) 日本支承協会 (〒104-0031 東京都中央区京橋1丁目1番1号 八重洲ダイビル3階)

E-mail:h.uno@kawakinkk.co.jp

⁴学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番1号)

E-mail:131d8814@st.kumamoto-u.ac.jp

高減衰積層ゴムは、一般の天然ゴム系積層ゴムに比べMullins効果による最大経験ひずみ依存性が顕著である。従って、この最大経験ひずみ依存性が地震応答に及ぼす影響を検討しておくことは重要である。最大経験ひずみ依存性を考慮した履歴モデルの一つに改良型Double Targetモデルがあり、本研究ではその改良型Double Targetモデルの複雑さを解消したバイリニア型Double Targetモデルを構築した。構築したモデルの妥当性を既往の研究との比較によって評価し、免震構造物の地震応答解析を実施することでその挙動を検討した。

Key Words : base isolation, dynamic response analysis, restoring force

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、土木構造物に生じた甚大な被害を踏まえ、耐震安全性を向上させる手段として、免震支承が広く導入されるようになった。免震支承は、上部構造の固有周期の長周期化を図るとともに減衰性を高め、地震力を軽減するために極めて有効な方法の1つと考えられている。

免震支承の一種としてゴムにカーボンを補強性充填剤として混入させ、積層ゴム支承自体に高い減衰性能を持たせた高減衰積層ゴムがある。その復元力特性は、Mullins効果¹⁾により、同じ加振せん断ひずみであっても過去に経験した最大せん断ひずみの大きさによって、力学特性が異なってくる性質(最大経験ひずみ依存性)を有している。これまで、この依存性に着目した研究^{2), 3), 4)}は少なく、最大経験ひずみに依存した実用的な履歴モデルの開発についても十分に検討されていない。従って、免震構造物の地震応答を評価する上で、高減衰積層ゴムの最大経験ひずみ依存性の影響について検討しておくことは重要であると考えられる。

最大経験ひずみ依存性を考慮した履歴モデルには、藤沢ら²⁾のDouble-Targetモデルとそれに改良を加えた大鳥ら^{3), 4)}の改良型Double Targetモデルがある。改良型Double Targetモデルは実験と比較することでその妥当性の確認が行われている。一方で、これらのモデルは耐震設計において簡便に活用するにはパラメータの設定が複雑である。

本研究では、これまでに行われてきた研究を参考に最大経験ひずみに依存した履歴特性のモデル化を行う。改良型Double-Targetモデルの複雑さを解消したモデルの構築を行い、モデルの妥当性を既往の研究との比較によって評価する。さらに、免震構造物の地震応答解析を実施し、その挙動について検討する。

2. 高減衰積層ゴムのモデル化

(1) 既往のモデルの概要

免震支承の復元力特性は、これまで多くの研究者によって種々のモデルが提案され解析が行われてきた。例

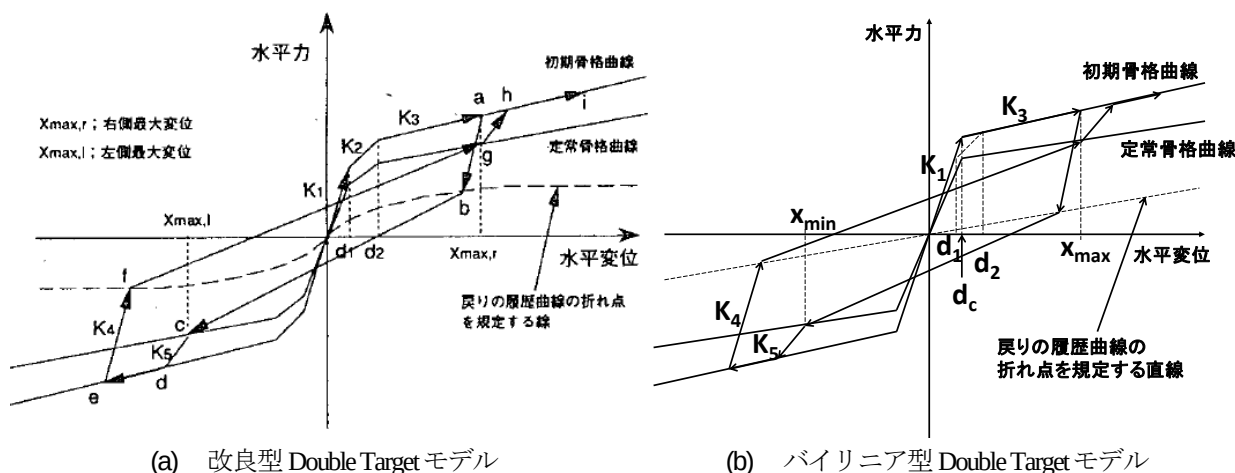


図-1 モデルの履歴則

えば、藤田⁵⁾は、変位依存型の修正モデルを、また、菊地⁶⁾は、繰り返し依存性と鉛直軸力依存性を考慮したモデルを提案し、解析を行っている。しかしながら、これらのモデルはいずれも過去に経験したひずみの大きさによる剛性の変化を考慮していない。このため、藤沢²⁾はこの影響を考慮した復元力モデルとしてDouble-Targetモデルを提案している。このモデルでは、“正側または負側で経験した変位の大きさは、その反対側でも経験したとする”という仮定を用いている。

(2) 改良型Double Targetモデル^{3, 4)}

大鳥^{3, 4)}は、最大経験ひずみ依存性を考慮した復元力モデルを考える場合、正側、負側それぞれ別々に最大経験ひずみを上回る場合とそれ以下の場合で履歴曲線の変化を考える方が妥当である、とした。さらに、最大経験ひずみ依存性による剛性の低下を引き起こすMullins効果が比較的弱いゴムの分子結合の引張破壊によって生じ、一般には免震要素を圧縮荷重下でせん断変形を加えた場合には要素の一部分のゴムのみが引張状態になり外力に抵抗することから、“正側または負側で経験した変位と荷重はその反対側の特性に影響を及ぼさない”とする仮定を用いた。大鳥らによって提案された改良型Double Targetモデルの履歴則を図-1(a)に、基本法則を以下に示す。

①復元力特性は、二本の骨格曲線とそれとは独立の履歴曲線で定義する。ここで、初期骨格曲線とは、初期載荷時と過去に経験した正負の最大せん断ひずみ($X_{max,r}$, $X_{min,l}$)を上回る変形を受けた場合に用いる骨格曲線のこと、定常骨格曲線とは過去に経験した最大せん断ひずみ以下の領域で用いる骨格曲線のことを言う。

②正側または負側で経験した変位はその反対側の特性に影響を及ぼさない。

③履歴曲線は、過去に経験した最大せん断ひずみにお

ける定常骨格曲線上の点(g, c)を指向し、それを越えた場合には最大経験ひずみにおける定常骨格曲線上の点から勾配 K_5 で初期骨格曲線まで上昇するものとする。

各パラメータの設定は、動的基本特性実験の結果に基づき以下に行われた。

①履歴曲線より初期骨格曲線のパラメータ $K_1^{(0)}$, $K_2^{(0)}$, $K_3^{(0)}$, K_5 と定常骨格曲線のパラメータ $K_1^{(s)}$, $K_2^{(s)}$, $K_3^{(s)}$ を定める。

②除荷時の勾配 K_4 を仮定し、除荷時の履歴曲線が折れる点 f_d を等価粘性減衰定数が実験結果と等しくなるように設定する。

除荷時の履歴曲線の折れる点を表現するのに水平変位に依存した以下の式が用いられた。

$$f_d = f_a \sqrt[3]{X} + f_b X \quad (1)$$

ここで、 X は水平変位、 f_a , f_b は除荷時の履歴曲線が折れる点を規定する関数のパラメータである。

(3) バイリニア型Double Targetモデル

本研究では、改良型Double Targetモデルにおけるモデル化の煩雑さを解消するため、図-1(b)に示すバイリニア型Double Targetモデルを作成した。改良型Double Targetモデルの構成則から簡略化した点は2点あり、1点目は、 K_2 を省き、 K_1 , K_3 の接点の変位を新たな水平降伏変位 d_c として設定した点である。2点目は、戻りの履歴曲線の折れ点を規定する線を直線にした点である。

3. モデル化の妥当性評価

(1) 改良型Double Targetモデル

大鳥らは改良型Double Targetモデルの妥当性を検討するため、動的基本特性実験を行い、その結果とシミュレ

ーションを比較することで、モデルの妥当性を確認している。

動的基本特性実験は、鉛直軸力として設計支持荷重を作用させた状態で、実機で想定されるひずみ速度と同じになるように加振振動数を調整し、加振せん断ひずみを徐々に大きくしながら実施したものである。初期骨格曲線は加振1波目の履歴曲線を、定常骨格曲線は加振3波目の安定した履歴曲線を用いて設定してい

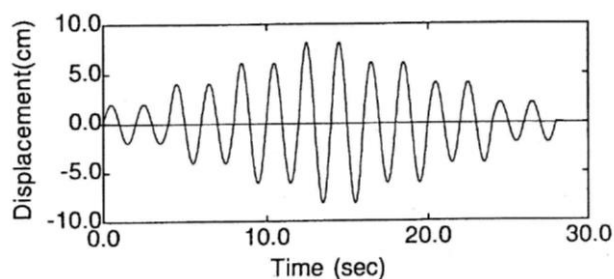
表-1 改良型 Double Target モデルのパラメータ

	K_1 (tf/cm)	K_2 (tf/cm)	K_3 (tf/cm)	K_4 (tf/cm)
初期骨格曲線	5.178	2.378	0.903	5.178
定常骨格曲線	4.916	2.104	0.611	5.178

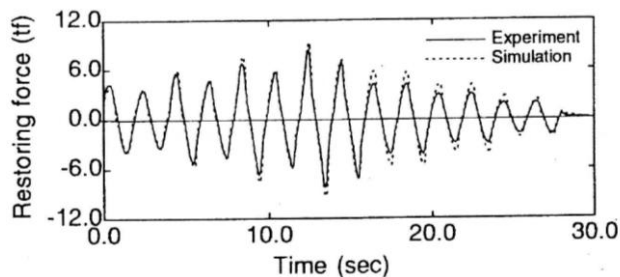
剛性の折れ点 $d_1=0.370$ (cm), $d_2=0.717$ (cm)

$K_5=1.621$ (tf/cm), $W=12.5$ (tf), $h=0.02$

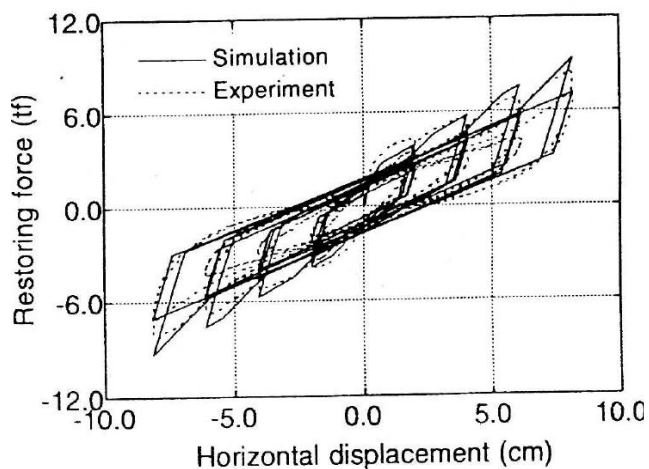
$f_a=0.0414$ (tf/cm^{1/3}), $f_b=0.502$ (tf/cm)



(a) 加振波形



(b) 復元力時刻歴



(c) 履歴曲線

図-2 改良型 Double Target モデルの応答⁴⁾

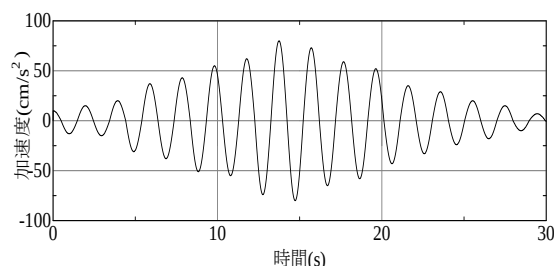
表-2 バイリニア型 Double Target モデルのパラメータ

	K_1 (tf/cm)	K_3 (tf/cm)	K_4 (tf/cm)
初期骨格曲線	5.178	0.903	5.178
定常骨格曲線	4.916	0.611	5.178

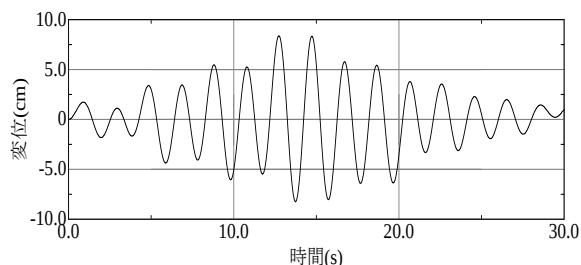
剛性の折れ点 $d_c=0.48$ (cm)

$K_5=1.621$ (tf/cm), $W=12.5$ (tf), $h=0.02$

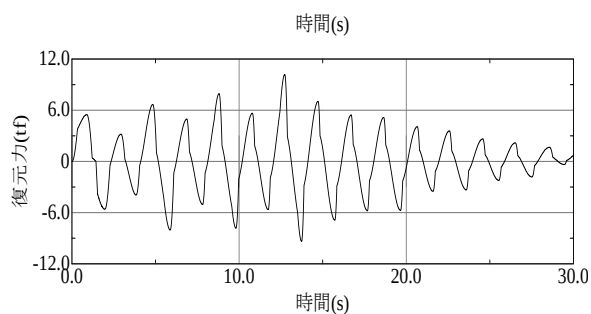
戻りの履歴曲線の折れ点を規定する直線の傾き 0.260 (tf/cm)



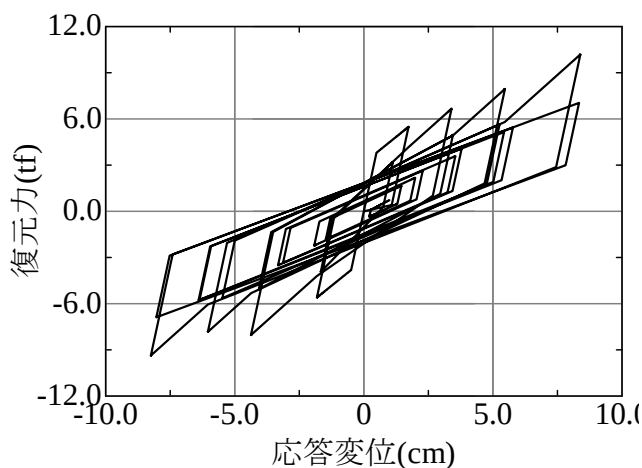
(a) 加速度波形



(b) 応答変位時刻歴



(c) 復元力時刻歴



(d) 履歴曲線

図-3 バイリニア型 Double Target モデルの応答

る。また、除荷時の履歴曲線の折れ点を規定する関数パラメータ f_0 、 f_b は、加振の等価粘性減衰定数の実験とシミュレーションの残差自乗和が最小になるように定めている。動的な基本特性実験の結果より設定された設計支持荷重12.5tf要素におけるモデルパラメータを表-1、解析結果を図-2に示す。図-2(a)の変位時刻歴は上述した加振波形である。また、図-2(b)の復元力時刻歴及び図-2(c)の履歴曲線は実験とシミュレーションの結果を載せている。図中の実験とシミュレーションの結果を比較すると良く一致していることがわかり、改良型Double Targetモデルが高減衰積層ゴムのモデルとして妥当であることがわかる。この結果を用いて、バイリニア型Double Targetモデルの妥当性を評価する。

(2) バイリニア型Double Targetモデル

大鳥らの得た結果からバイリニア型 Double Target モデルの妥当性を検討するため、表-2 のようなモデルパラメータを設定した。応答解析は1 質点系モデルで Newmark β 法($\beta=1/6$)を用い、微小時間間隔は 0.001s とした。こ

の応答解析では加振波形で制御することができないため、図-3(a)のような加速度を入力し、変位応答が図-2(a)の加振波形とほぼ同じになるよう制御した。

図-3(b)に応答変位時刻歴、(c)に復元力時刻歴、(d)に履歴曲線を示す。大鳥らの結果と比較すると、概ね一致していることがわかる。

4. 地震応答解析に基づく評価

(1) 解析条件

免震構造物の挙動を把握するため、1 質点系モデルを用いた地震応答解析を行う。本研究には汎用構造解析プログラム T-DAPⅢを使用した。バイリニア型 Double Target モデルをユーザーサブルーチンとして作成し、プログラム中に組み込んだ。また、解析方法には Newmark β 法($\beta=1/4$)を用い、時間間隔は 0.001s とした。バイリニア型 Double Target モデルのパラメータは表-2 を参考に表-3 のように設定した。一方、比較対象として、

表-3 各モデルのパラメータ

バイリニア型Double Targetモデル				バイリニアモデル	
	K_1 (tf/cm)	K_3 (tf/cm)	K_4 (tf/cm)	初期剛性(tf/cm)	4.916
初期骨格曲線	5.178	0.700	5.178	剛性の折れ点(cm)	2.00
定常骨格曲線	4.916	0.500	5.178	2次剛性(tf/cm)	0.500

剛性の折れ点 $d_c=2.00$ (cm)

$K_5=1.621$ (tf/cm), $W=12.5$ (tf), $h=0.02$

戻りの履歴曲線の折れ点を規定する直線の傾き 0.300(tf/cm)

表-4 入力地震動

レベル2地震動（タイプⅠ）

地震種別	地震名	記録場所及び成分	呼び名
Ⅰ種地盤	平成15年十勝沖地震	清水道路維持出張所構内地盤上 EW成分	I-I-1
	平成23年東北地方太平洋沖地震	海北橋周辺地盤上 EW成分	I-I-2
		新晩翠橋周辺地盤上 NS成分	I-I-3
Ⅱ種地盤	平成15年十勝沖地震	直別観測点地盤上 EW成分	I-II-1
	平成23年東北地方太平洋沖地震	仙台河川国道事務所構内地盤上 EW成分	I-II-2
		阿武隈大堰管理所構内地盤上 NS成分	I-II-3
Ⅲ種地盤	平成15年十勝沖地震	大樹町生花観測点地盤上 EW成分	I-III-1
	平成23年東北地方太平洋沖地震	山崎震動観測所地盤上 NS成分	I-III-2
		土浦出張所構内地盤上 EW成分	I-III-3

レベル2地震動（タイプⅡ）

地震種別	地震名	記録場所及び成分	呼び名
Ⅰ種地盤	平成7年兵庫県南部地震	神戸海洋気象台地盤上 NS成分	I - I -1
		神戸海洋気象台地盤上 EW成分	I - I -2
		猪名川架橋予定地点周辺地盤上 NS成分	I - I -3
Ⅱ種地盤		JR西日本鷹取駅構内地盤上 NS成分	I - Ⅱ -1
		JR西日本鷹取駅構内地盤上 EW成分	I - Ⅱ -2
		大阪ガス葺合供給所構内地盤上 N27W成分	I - Ⅱ -3
Ⅲ種地盤		東神戸大橋周辺地盤上 N12W成分	I - Ⅲ -1
		ポートアイランド内地盤上 NS成分	I - Ⅲ -2
		ポートアイランド内地盤上 EW成分	I - Ⅲ -3

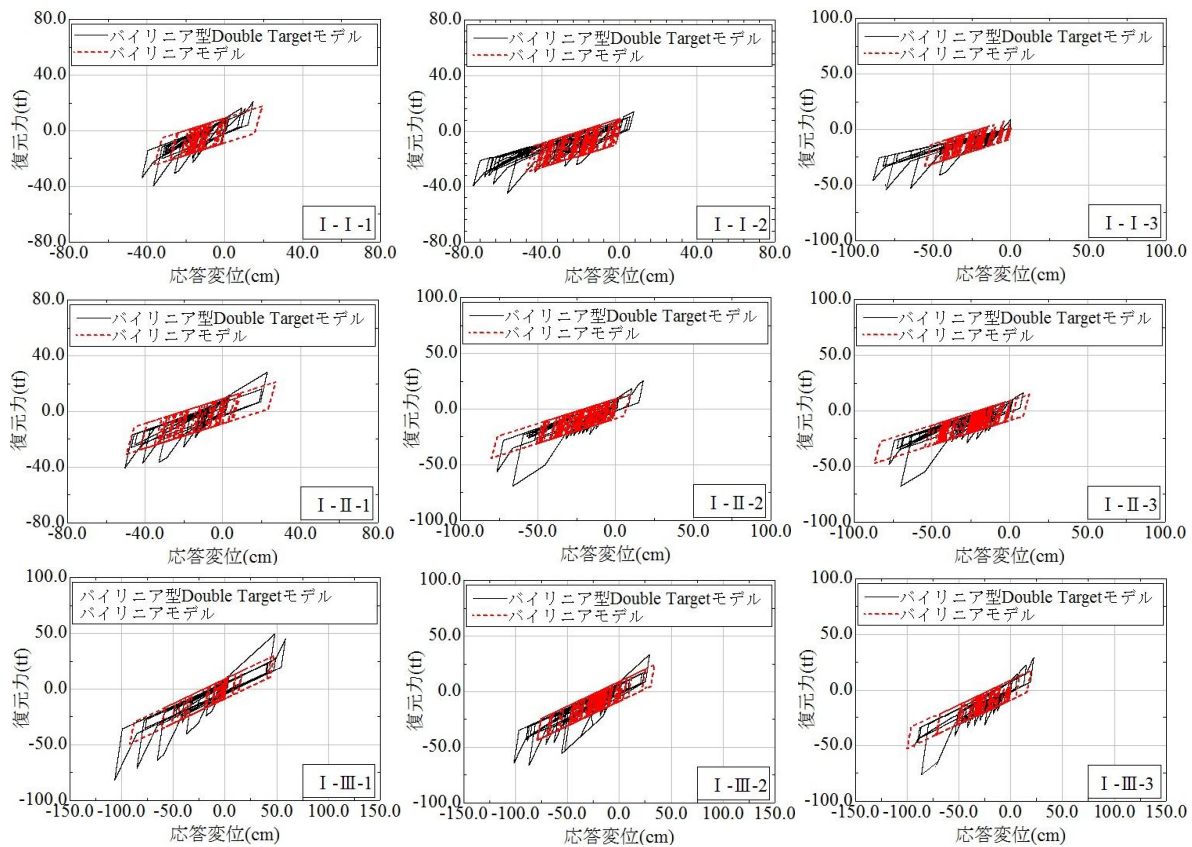


図4 レベル2地震動（タイプⅠ）に対する応答

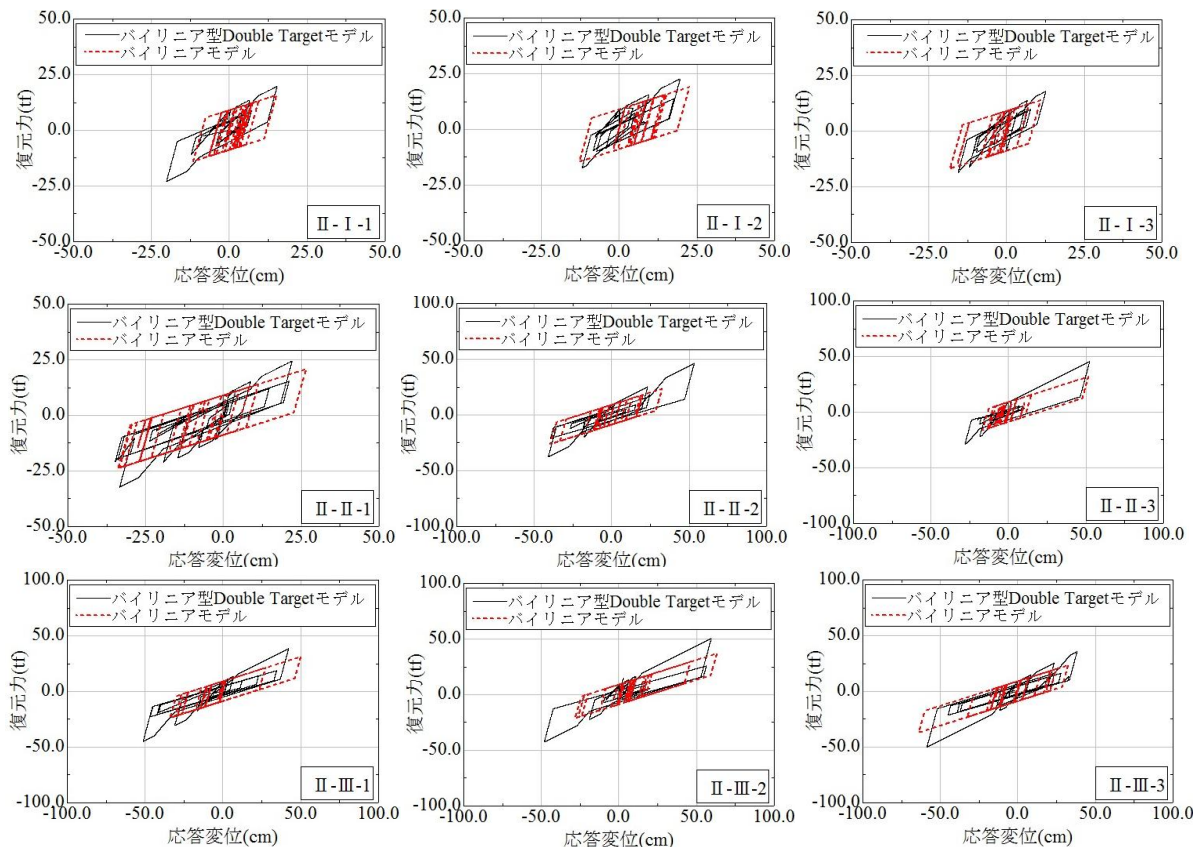


図5 レベル2地震動（タイプⅡ）に対する応答

表-5 各履歴モデルの変位量による比較

	バイリニア型Double Targetモデル		バイリニアモデル	
	最大変位(cm)	最小変位(cm)	最大変位(cm)	最小変位(cm)
I-I-1	11.52	-42.61	19.46	-36.01
I-I-2	8.79	-75.36	0.81	-48.00
I-I-3	0.25	-88.80	0.15	-55.29
I-II-1	22.88	-50.37	27.39	-49.44
I-II-2	17.79	-76.42	9.58	-79.83
I-II-3	8.80	-77.56	12.75	-86.92
I-III-1	58.42	-106.73	48.83	-91.65
I-III-2	29.16	-101.61	34.33	-79.01
I-III-3	22.20	-93.34	19.00	-99.81
II-I-1	15.35	-20.18	15.27	-11.52
II-I-2	19.59	-11.98	22.69	-12.75
II-I-3	12.34	-15.55	11.10	-18.09
II-II-1	22.07	-34.76	26.68	-33.70
II-II-2	53.26	-40.90	32.77	-39.45
II-II-3	52.38	-28.03	51.76	-16.47
II-III-1	42.22	-51.25	50.27	-33.71
II-III-2	59.47	-48.11	63.33	-28.07
II-III-3	38.17	-58.62	32.64	-63.77

1 質点系モデルにバイリニアモデルを導入したものも扱う。バイリニアモデルのパラメータも併せて表-3に示す。表-3中のバイリニア型 Double Target モデルのパラメータは最大変位 50cm において図-2 に示される高減衰積層ゴムの力学特性に整合するように定めた。入力地震動は、表-4 に示す道路橋示方書⁷⁾が規定するレベル2地震動のタイプI及びタイプIIを使用する。

(2) 解析結果

図-4にレベル2地震動（タイプI）を入力したときのバイリニア型Double Targetモデルとバイリニアモデルの履歴曲線を示す。黒線がバイリニア型Double Targetモデル、赤鎖線がバイリニアモデルの履歴曲線であり、それぞれの入力地震動は、各図右下に示す通りである。図-4から読み取れるように、バイリニア型Double Targetモデルの履歴曲線は、初期骨格曲線に乗り、バイリニアモデルのものよりも復元力を増大させることで履歴全体の面積が大きくなっており、履歴エネルギーを吸収する形になっている。この結果から減衰性を高め、変形が抑制され、逆に復元力は増大していることがわかる。一方、レベル2地震動（タイプI）の特徴として継続時間が長いことが挙げられる。そのため、大きな入力加速度によって履歴曲線が最大変位を更新してからそれより小さい入力加速度を多く受けることで、初期骨格曲線に乗るのではなく最大変位における定常骨格曲線上の点を指向する応答が多くなっている。

同様に、図-5にレベル2地震動（タイプII）を入力した場合のそれぞれのモデルの履歴曲線を示す。凡例は図

-4と同様である。図-4の傾向と同様に、バイリニア型 Double Targetモデルの特徴として、大きな加速度を受け、それに応答した変位が大きくなった後、バイリニアモデルでは見られない大きな履歴吸収を見ることができる。これによって、復元力が増大する一方で変形が抑制されていると考えられる。

図-4、5で示した履歴曲線の最大変位、最小変位を表-5に示す。入力地震動に対する変位の絶対値をケース毎に比較すると、ほとんどのケースでバイリニア型Double Targetモデルの値の方が小さく、復元力を増大させることで変形を抑制していることがわかる。

5. まとめ

近年、耐震安全性を向上させる手段として免震支承が注目されている。従って、適用性の高い免震支承の一つである高減衰積層ゴムの最大経験ひずみ依存性の影響について検討しておくことは重要であり、これまでいくつかのモデルが提案されている。本研究では、最大経験ひずみ依存性を考慮した履歴特性を持つ改良型Double-Targetモデルの複雑さを解消したモデルであるバイリニア型Double Targetモデルの構築を行い、モデルの妥当性を既往の研究との比較によって評価した。さらに、免震構造物の地震応答解析を実施し、その挙動について検討した。以下に、本研究で得られた結論を示す。

1) 最大経験ひずみを考慮した大鳥らの改良型Double

Targetモデルを参考にバイリニア型Double Targetモデルを開発した。そして、大鳥らの解析条件に合わせて解析を行うことで、そのモデルの妥当性を確認できた。

2) バイリニア型Double Targetモデルとバイリニアモデルの比較により、バイリニア型Double Targetモデルの履歴吸収エネルギーが大きく、復元力を増大させることで変位を抑えることができることがわかった。

今後は、実際の土木構造物をモデル化しそのモデルの復元力特性にバイリニア型Double Targetモデルを導入することで、耐震性能評価を行う予定である。

謝辞： 本研究の実施にあたって有益な助言を頂いた株式会社情報システム内藤伸幸氏に感謝の意を表します。

参考文献

1) J.Diani, B.Fayolle, P.Gilormini : A review on the Mul-

lins' effect, European Polymer Journal, pp.601-612, 2009.

- 2) 藤沢一裕, 松下裕臣, 佐々木輝男：免震ゴム支承の復元力特性のモデル化に関する研究, 日本建築学会大会講演梗概集（関東）, pp505-506, 1993.
- 3) 大鳥靖樹：高減衰積層ゴムを用いた免震構造物の地震応答評価に関する研究, 博士論文, 1996.
- 4) 大鳥靖樹, 松田泰治, 石田勝彦：改良型 Double Target モデルによる免震構造物の地震応答解析, 日本建築学会大会講演梗概集（東海）, pp793-794, 1994.
- 5) 藤田隆史, 鈴木重信, 藤田聡：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究（第1報, 履歴復元力の基本特性と解析モデル）, 日本機械学会論文集（C 編）56巻523号, pp.658-665, 1990.
- 6) 菊地優, 猿田正明, 田村和夫：建物免震用積層ゴムの復元力特性に関する研究, 建築学会構造工学論文集 Vol.40B, pp.17-188, 1994.
- 7) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.

EVALUATION ON SEISMIC RESPONSE CONSIDERING CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARING

Taiji MAZDA, Yasuki OHTORI, Yoshifumi UNO and Takeshi SHIMABUKURO

Experienced shear strain dependency of high damping rubber bearing which is induced by Mullins effect of rubber is one of influential dependency to seismic response. So the effect of experienced shear strain dependency on seismic response of isolation structure should be evaluated. From past studies, we indicated that loading history must be taken into account. And then seismic response analysis are performed by bi-linear double target model is able to take into account the experienced shear strain dependency. From seismic response analysis, the effect of experienced shear strain dependency on seismic response are evaluated.