

バイリニア型Double Targetモデルを用いた 妥当性評価と地震応答評価

松田 泰治¹・大鳥 靖樹²・鶴野 禎史³
兼子 一弘⁴・徳丸 昂⁵・内藤 伸幸⁶

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@criepi.denken.or.jp

³正社員 HDR研究会 (〒307-0017 茨城県結城市若宮8-43)
E-mail:uno@kawakinkk.co.jp

⁴正社員 横浜ゴム株式会社 (〒254-8601 神奈川県平塚市追分2-1)
E-mail: kazuhiko.kaneko@y-yokohama.com

⁵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:156d8823@st.kumamoto-u.ac.jp

⁶正会員 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: nnaito@ark-info-sys.co.jp

高減衰積層ゴムは、一般の天然ゴム系積層ゴム支承に比べ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載荷試験データ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, retorning force

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、土木構造物は甚大な被害を受けた。これ以降、道路橋示方書的大幅な改定など耐震性、耐久性への関心が高まっており、近年耐震安全性を向上させる手段として、免震構造物が注目されている。一般に免震構造物は、アイソレーターを用いて橋の固有周期を適度に長くするとともに、ダンパーで減衰性能の増大を図って地震応答の低減を図る構造物である。これにより、地震荷重に対する構造部材の設計を容易にするとともに、構造物本体はもとより、構造物内部の重要設備や人を地震から守る役割を果たしている。免震装置の一つである免震支承は、上部構造物の固有周期の長期化を図るとともに減衰性を高め、地震力を低減するために極めて有効な装置の一つと考えられている。

免震装置のひとつとしてゴムにカーボン補強性充填剤を混入させ、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支承¹⁾がある。免震装置に要求される荷重支持機能と応答を軽減させる機能の両方を持つことが出来るゴム支承である。また、一体型であるため、構造が単純なものとなり、メンテナンスや価格の面で他の免震装置に比べて有利になることで注目されている。一方で、ゴム材料に添加されるカーボンブラック等の影響により、天然ゴム系積層ゴム支承や鉛プラグ入り積層ゴム支承に比べ各種依存性が顕著であるため応答評価が相対的に難しいことや、その依存性に関する研究がまだ十分でないことから、使用が避けられる傾向にあった。しかしながら、免震装置の選択の幅を広げ、安価で将来にわたり使われる免震構造物を建設していくためには、高減衰積層ゴム支承の力学特性の各種依存性や、それらが地震応答に与える影響を明確にしていくことが重要である。

高減衰積層ゴム支承の特性として、最大経験ひずみ依存性が挙げられる。繰返し変形することで初期の弾性率が徐々に低下する現象を持つMullins効果

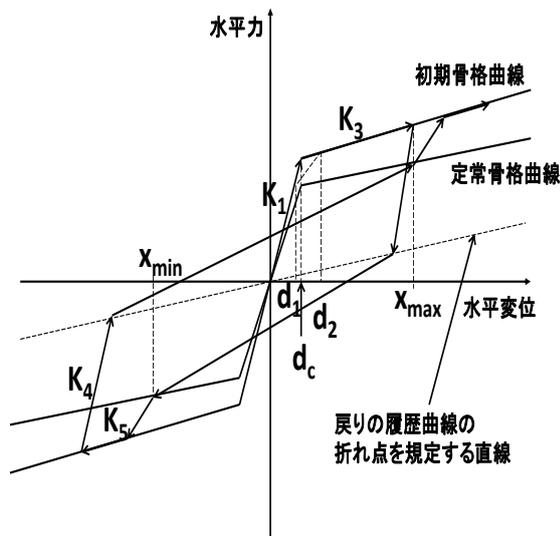


図-1 バイリニア型 Double Target モデルの履歴則

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経験ひずみの大きさによって力学特性が異なってくるというものである。これまでこの依存性に着目した研究^{2), 3), 4)}は少なく、最大経験ひずみ依存性を考慮した実用的な履歴モデルの開発は十分に行われていない。このことから、免震構造物の地震応答を評価する上で、高減衰積層ゴム支承の最大経験ひずみ依存性の影響について検討する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 モデルは実験結果との比較でその妥当性の確認が行われているが、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依存性を考慮した履歴特性のモデル化を行う。バイリニア型 Double Target モデルを提案し、その妥当性を材料試験体の载荷実験データとの比較によって評価する。また、免震構造物を対象とした地震応答解析を実施し、従来用いられているモデルとの比較を行い、その挙動について検討する。

2. バイリニア型 Double Target モデル

大鳥らは、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。



図-2 試験機

表-1 試験機の性能

温度	-40~80°C
周波数	0.01~20Hz
最大加振力	±14.7kN
最大振幅	±125mm

この考えを元に、今回提案するバイリニア型 Double Target モデルの履歴則を図-1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、初期载荷時と過去に経験した正負の最大せん断ひずみ(Xmax, Xmin)を上回る変形を受けた場合に用いる骨格曲線のことで、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を指向し、それを超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K5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、以下のように行われた。

- ① 履歴曲線より初期骨格曲線のパラメータK1, K3, K5と定常骨格曲線のパラメータK1, K3を定める。K1, K3の接点の変位を新たな水平降伏変位dcとして設定した。
- ② 除荷時の勾配K4を仮定し、除荷時の履歴曲線が折れる直線は高減衰積層ゴム支承の力学特性に整合するように定める。

3. モデル化の妥当性評価

- (1) ラップシヤ型試験片によるせん断特性試験
バイリニア型 Double Target モデルの妥当性を検討

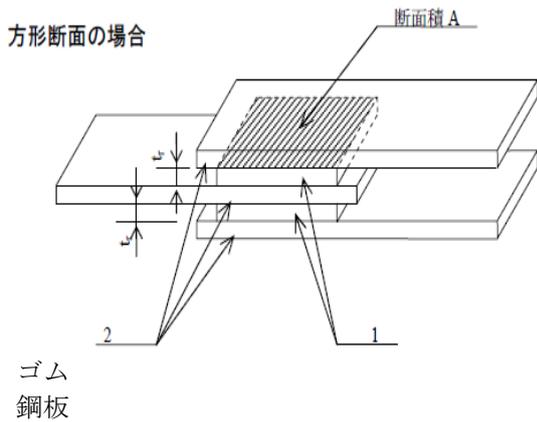


図-3 ラップシヤ型試験片

するため、ラップシヤ型試験片を用いたせん断特性試験を行い、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する。

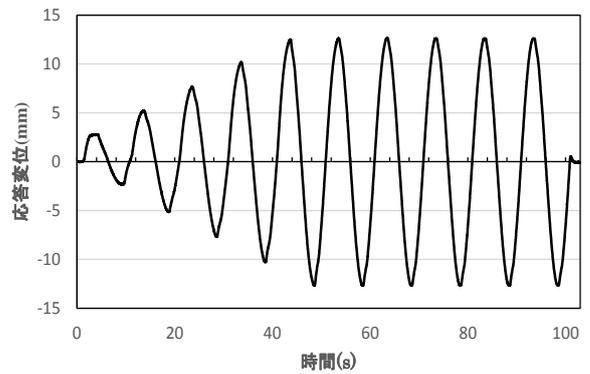
実験に用いた試験機の概略図を図-2に、試験機の性能を表-1に示す。また、ラップシヤ型試験片の概略図を図-3に示す。ラップシヤ型試験片のゴム部分の形状は25mm×25mm×5mmの立方体で、せん断ひずみが250%で12.5mmとなるものを使用している。図-4に繰返し漸増試験より得られた結果を示す。積分時間刻みは0.02s、加振順序は、せん断ひずみ50%から200%までは1サイクル、250%は6サイクルで行った。

(2) バイリニア型Double Targetモデルの妥当性の検討

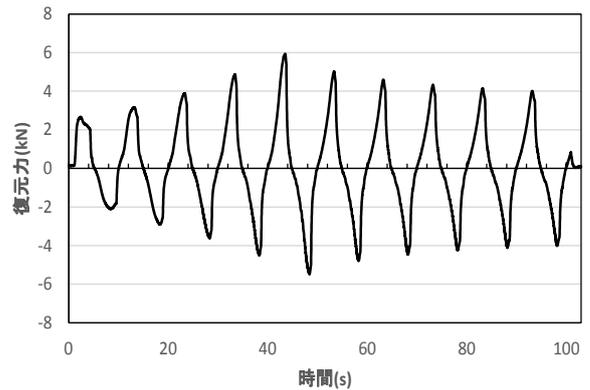
ラップシヤ型試験片を用いたせん断特性試験で得た結果からバイリニア型Double Targetモデルの妥当性を検討する。応答解析は1質点系モデルでNewmark β 法($\beta=1/4$)を用い、積分時間刻みは、0.01sとした。実験データより強制変位波形を入力し、表-2のようなモデルパラメータを設定した。初期骨格曲線は各加振1波目の履歴曲線を、定常骨格曲線は1波目以降の安定した履歴曲線を用いて設定した。

図-6に、試験結果とバイリニア型Double Targetモデルの比較を示す。図-6 (a)の復元力時刻歴をみると、復元力の値わずかな違いがあるものの、よく一致していることが分かる。図-6 (b)及び図-6 (c)の履歴曲線をみると、1サイクル目以降も概ね一致していることが分かる。

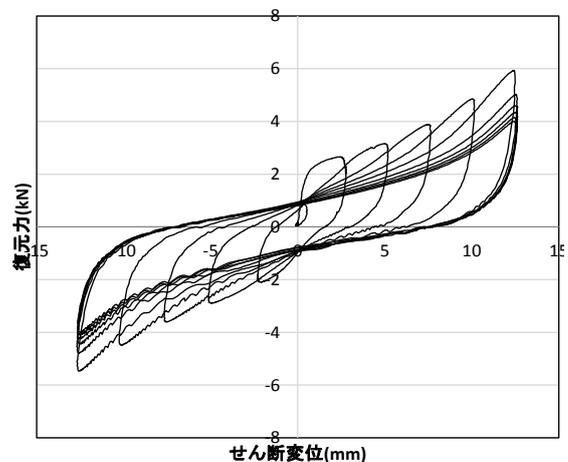
以上より、ラップシヤ型試験片を用いたせん断特性試験の結果とバイリニア型Double Targetモデルはよく一致しており、バイリニア型Double Targetモデルの妥当性が確認できた。



(a) 応答変位時刻歴



(b) 復元力時刻歴



(c) 履歴曲線

図-4 繰返し漸増試験より得られた応答

表-2 バイリニア型 Double Target モデルのパラメータ

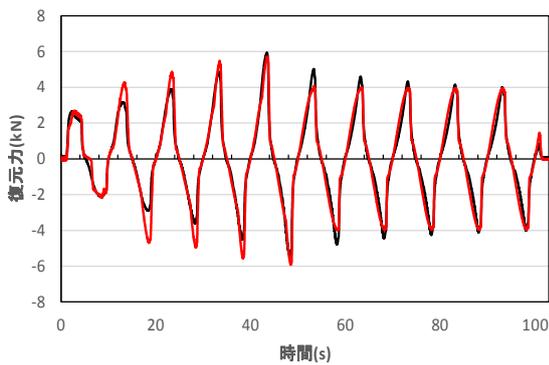
	K1(kN/mm)	K3(kN/mm)	K4(kN/mm)
初期骨格曲線	3.316	0.250	3.316
定常骨格曲線	3.149	0.198	3.316

剛性の折れ点 $dc=0.50\text{mm}$

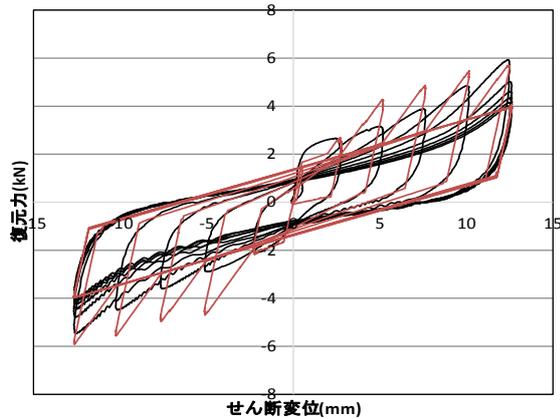
$K5=3.038\text{kN/mm}$

戻りの履歴曲線の折れ点を規定する直線の傾き $0.087(\text{kN/mm})$

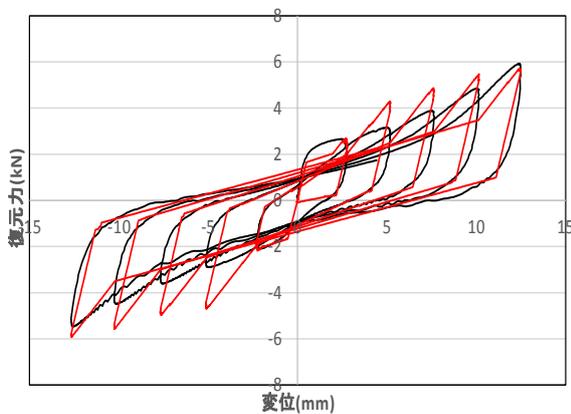
— 実験値 — バイリニア型 Double Target モデル



(a) 復元力時刻歴



(b) 繰返し漸増試験



(c) 繰返し漸増試験(1サイクル目のみ)

図-5 試験結果とバイリニア型 Double Target モデルとの比較

4. 地震応答解析に基づく評価

(1) 解析対象

道路橋の地震時挙動評価に対するバイリニア型 Double Targetモデルの適用性を把握するため、単柱橋脚モデルを用いた地震応答解析を行う。図-7に検討対象とした単柱橋脚モデルを示す。桁は重心位置で集中質量によりモデル化し、フーチングを含む

RC橋脚は二次元はり要素でモデル化した。質量は接点に集中質量として考慮した。橋脚基部は非線形はり要素で、基部以外は線形はり要素でモデル化した。はり要素の非線形性は武田モデルであり、フーチング下端には地盤ばねを考慮している。減衰定数は、地盤ばねを20%、支承部では5%とした。橋脚部分のはり要素に対する減衰定数は、非線形はり要素を2%、線形はり要素を5%とした。ゴム支承部の水平方向の復元力特性にバイリニア型 Double Targetモデルを導入した。また、比較対象としてバイリニアモデルを導入したものを扱う。バイリニア型 Double Targetモデル及びバイリニアモデルのパラメータは高減衰積層ゴムの力学特性に整合するよう表-3のように設定した。なお、バイリニアモデルのパラメータは初期骨格曲線に合わせたもの(以降、バイリニアモデル(初期))と定常骨格曲線に合わせたもの(以降、バイリニアモデル(定常))の2種類を使用する。

(2) 解析条件

本研究の解析には汎用構造解析プログラムT-DAP III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 ($\beta=1/4$)、積分時間刻みは0.001sとした。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。また、減衰タイプはRayleigh減衰とし、第一基準振動数と第二基準振動数の組み合わせは、橋脚基部において過大な粘性減衰を示さないように1次の固有振動数と50Hzの組み合わせを採用した⁸⁾。

(3) 解析結果

図-7~11にレベル2地震動を入力地震動としたときの応答を示す。なお、全ての入力地震動の結果を示すと膨大な数になるため、各タイプの入力地震動から代表的な傾向が表れているII種地盤の解析結果を示す。

a) 桁の応答変位時刻歴

図-7に各入力地震動の桁の応答変位時刻歴、表-5にその最大変位・最小変位を示す。セルに色を付けた値は、各モデルで絶対的に最も大きな変位である。図-7(a)をみると、地震動の前半からバイリニア型 Double Targetモデルとバイリニアモデル(初期、定常)で挙動の傾向に差異がみられる。また、地震動の後半では、バイリニア型 Double Targetモデルはバイリニアモデル(初期、定常)との応答変位の差が大きくなっている。残留変位も応答変位と同様に、バイリニア型 Double Targetモデルが最も大きいことが分かる。この傾向は入力地震動が同じタイプIの図-7(b), (c)にもみられ、図-7(c)が最もバイリニア型 Double Targetモデルの残留変位が大きい。これは、地震動の後半でバイリニア型 Double Targetモデルは最大変位と定常骨格曲線の交点へ向かう挙動が目立っており、バイリニアモデル(初期、定常)二種類の

初期剛性より剛性が低くなる性質が出て変化しやすくなっているからである。入力地震動がタイプⅡである図-7(d), (e), (f)においても、図-7(a), (b), (c)と同様に、地震動の後半でバイリニア型Double Targetモデルがバイリニアモデル(初期, 定常)より応答変位が大きくなっていることが分かる。図-8(d), (e), (f)と比べて図-7(a), (b), (c)の方が応答変位や残留変位の差が大きいのは、レベル2地震動タイプⅠが長周期の入力地震動で、主要動が2度あることが影響しているといえる。最大変位については、表-5に示しているようにレベル2地震動入力地震動のⅠ-Ⅱ-3, Ⅱ-Ⅱ-1, Ⅱ-Ⅱ-3において、バイリニアモデル(定常)が最も大きくなっており、入力地震動によってバイリニア型Double Targetモデルが変位を抑制する傾向があることが分かる。

b) 橋脚頂部の応答変位時刻歴

図-8及び図-9に橋脚頂部の応答変位時刻歴を示す。

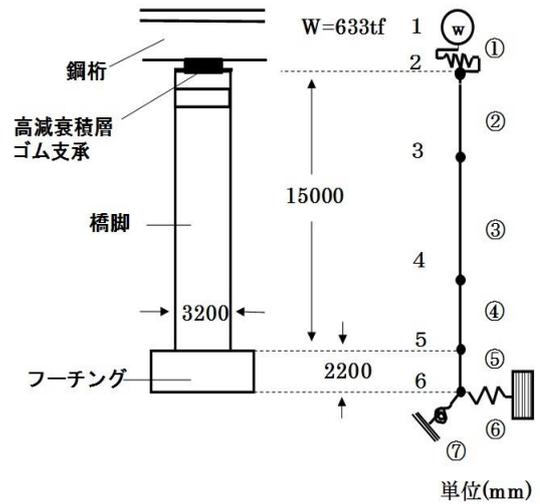


図-6 単柱橋脚モデル

表-3 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(定常)		バイリニアモデル(初期)	
	K_1 (tf/m)	K_3 (tf/m)	K_4 (tf/m)	初期剛性(tf/m)	2520	初期剛性(tf/m)	2820
初期骨格曲線	2820	197	2820	剛性の折れ点(m)	0.02	剛性の折れ点(m)	0.02
定常骨格曲線	2520	151	2820	2次剛性(tf/m)	151	2次剛性(tf/m)	197

剛性の折れ点 $d_c=0.02$ (m)

$K_5=842$ (tf/m), $h=0.05$

戻りの履歴曲線の折れ点を規定する直線の傾き 60(tf/m)

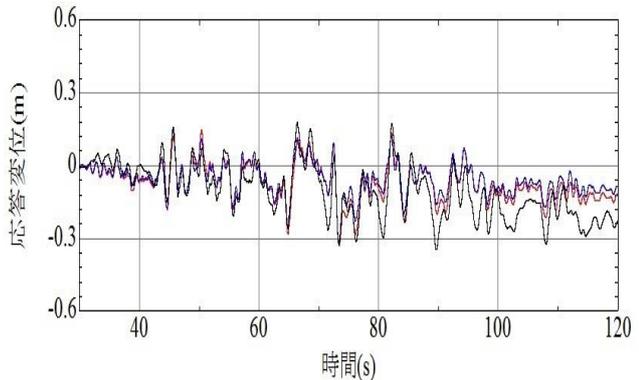
表-4 入力地震動
レベル2地震動(タイプⅠ)

地盤種別	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	開北橋周辺地盤上 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

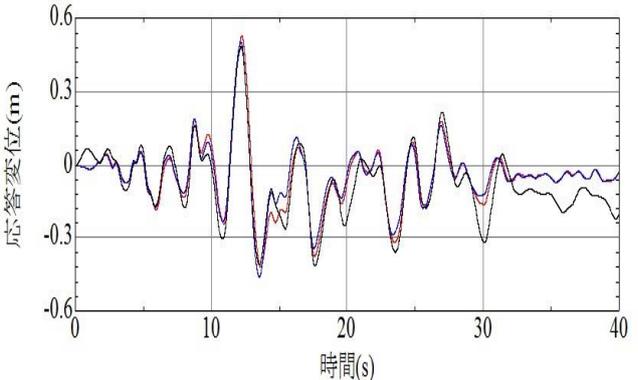
レベル2地震動(タイプⅡ)

地盤種別	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	Ⅱ-Ⅰ-1
		神戸海洋気象台地盤上 EW成分	Ⅱ-Ⅰ-2
		猪名川架橋予定地点周辺地盤上 NS成分	Ⅱ-Ⅰ-3
Ⅱ種地盤	JR西日本鷹取駅構内地盤上	NS成分	Ⅱ-Ⅱ-1
		EW成分	Ⅱ-Ⅱ-2
		大阪ガス葺合供給所構内地盤上 N27W成分	Ⅱ-Ⅱ-3
Ⅲ種地盤	東神戸大橋周辺地盤上	N12W成分	Ⅱ-Ⅲ-1
		ポートアイランド内地盤上 NS成分	Ⅱ-Ⅲ-2
		ポートアイランド内地盤上 EW成分	Ⅱ-Ⅲ-3

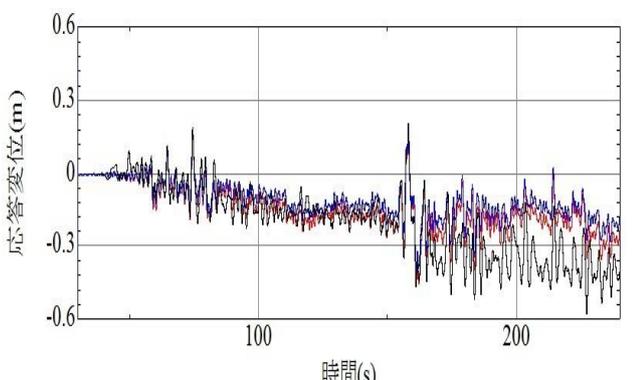
— バイリニア型Double Targetモデル - - - バイリニアモデル(定常) - · - · - バイリニアモデル(初期)



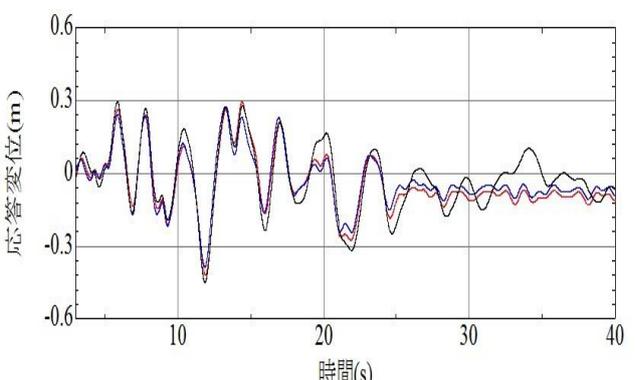
(a) レベル2地震動 I-II-1



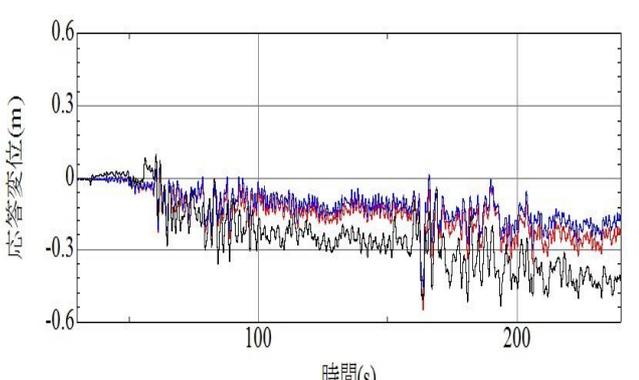
(d) レベル2地震動 II-II-1



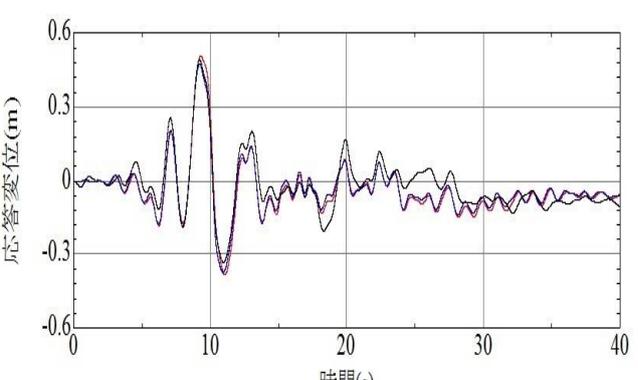
(b) レベル2地震動 I-II-2



(e) レベル2地震動 II-II-2



(c) レベル2地震動 I-II-3



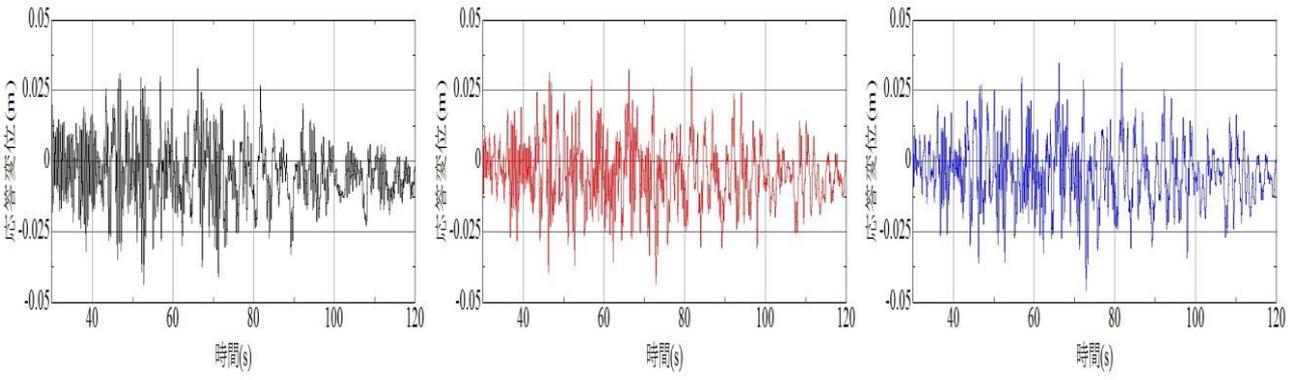
(f) レベル2地震動 II-II-3

図-7 桁の応答変位時刻歴

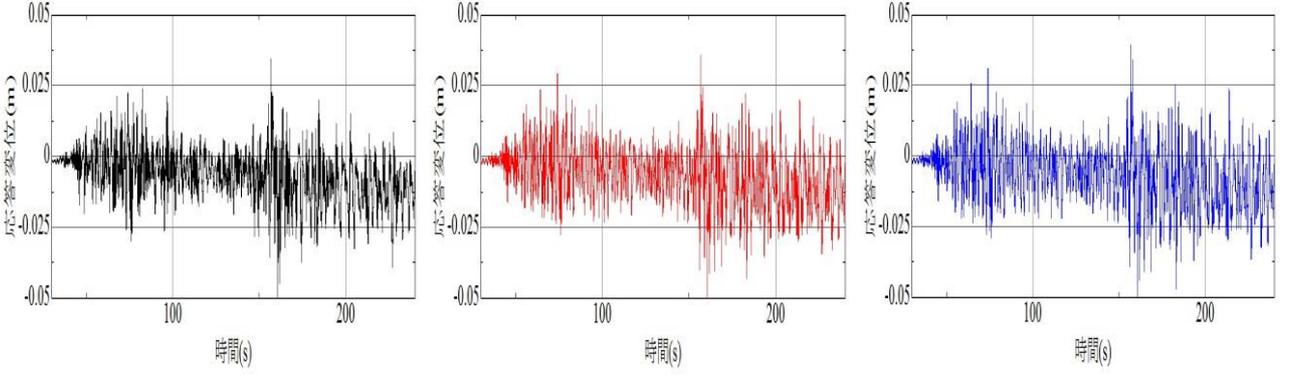
表-5 各入力地震動の桁の応答変位における最大変位・最小変位

	バイリニア型Double Targetモデル		バイリニアモデル(定常)		バイリニアモデル(初期)	
	最大変位(m)	最小変位(m)	最大変位(m)	最小変位(m)	最大変位(m)	最小変位(m)
I-II-1	0.18	-0.35	0.15	-0.33	0.14	-0.32
I-II-2	0.20	-0.58	0.16	-0.46	0.18	-0.41
I-II-3	0.10	-0.54	0.40	-0.55	0.05	-0.46
II-II-1	0.48	-0.42	0.53	-0.42	0.50	-0.46
II-II-2	0.30	-0.45	0.30	-0.42	0.27	-0.39
II-II-3	0.49	-0.33	0.51	-0.38	0.47	-0.37

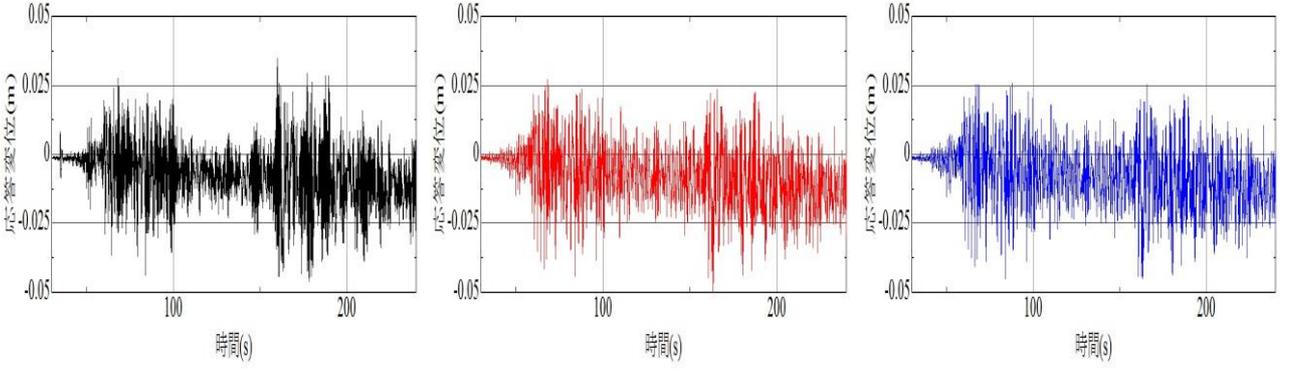
— バイリニア型Double Targetモデル - - - バイリニアモデル(定常) - - - バイリニアモデル(初期)



(a) レベル2地震動 I - II - 1



(b) レベル2地震動 I - II - 2



(c) レベル2地震動 I - II - 3

図-8 橋脚頂部の応答変位時刻歴(入力地震動: レベル2地震動タイプ I)

なお、橋脚頂部の応答変位時刻歴はモデルごとの線が重なる部分が多く判別が難しいので、バイリニア型Double Targetモデル、バイリニアモデル(初期、定常)の3種類のモデルをそれぞれ分けて示した。また、表-6にレベル2地震動タイプ I、タイプ II の橋脚頂部の応答変位の最大値・最小値の比較を示す。セルに色を付けた値は、表-5と同様に各モデルで絶対的に最も大きな変位である。図-8(a)をみると、バイリニア型Double Targetモデル、バイリニアモデル(初期、定常)での差はほとんどみられず、ほとんど同じ挙動をしていることが分かる。しかし、地震動

の後半で、バイリニア型Double Targetモデルの応答変位がバイリニアモデル(初期、定常)より小さくなっていることが確認できる。入力地震動が同じタイプ I の図-8(b)、(c)でも、図-8(a)と同様に各モデルでの挙動の差はみられず、地震動の後半でバイリニア型Double Targetモデルの応答変位がバイリニアモデル(初期、定常)より小さくなっていることが分かる。これは、図-7に示した桁の応答変位時刻歴において、バイリニア型Double Targetモデルの応答変位がバイリニアモデル(初期、定常)よりも大きくなった結果、相対的に橋脚頂部の応答変位が抑制されて

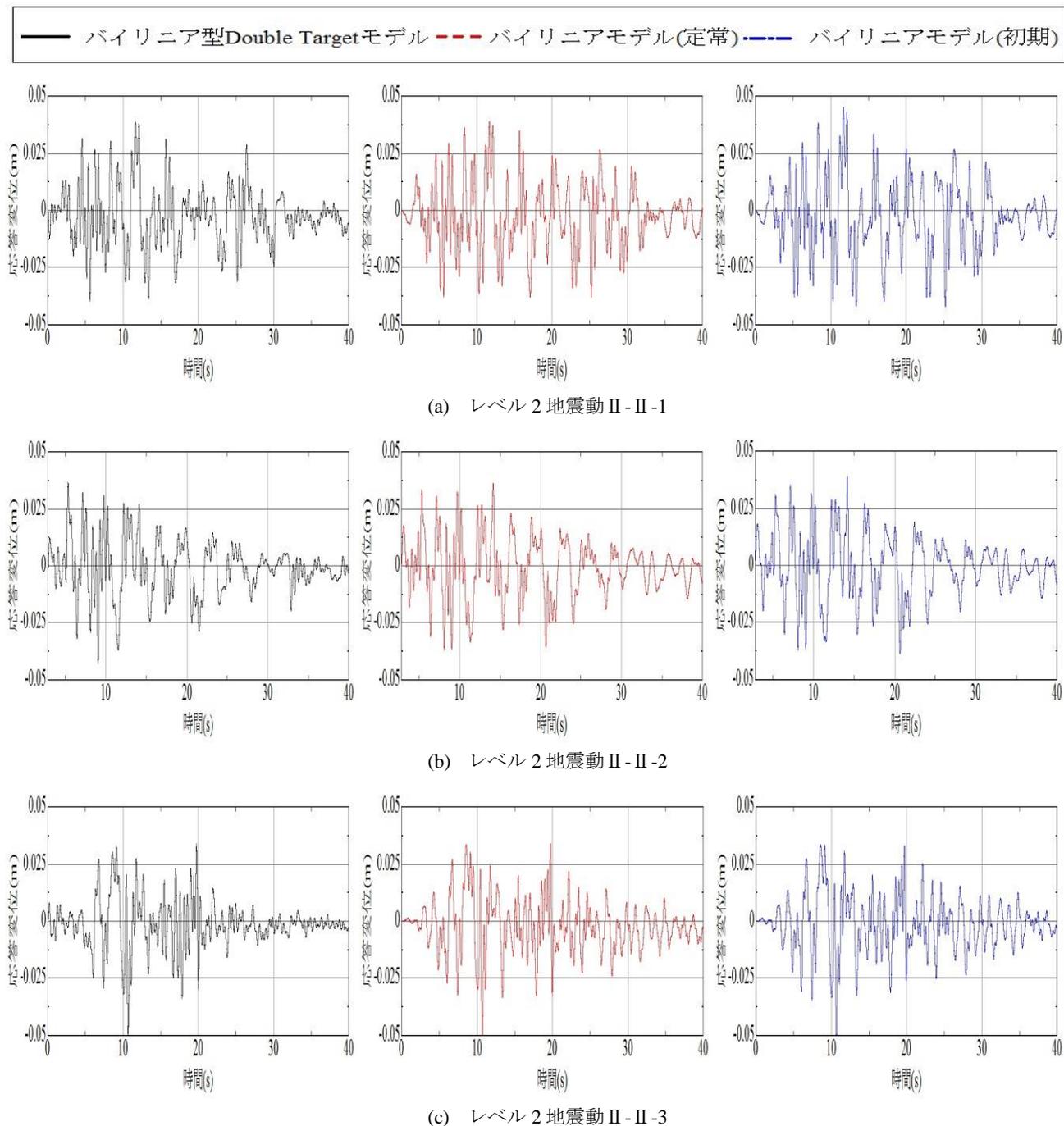
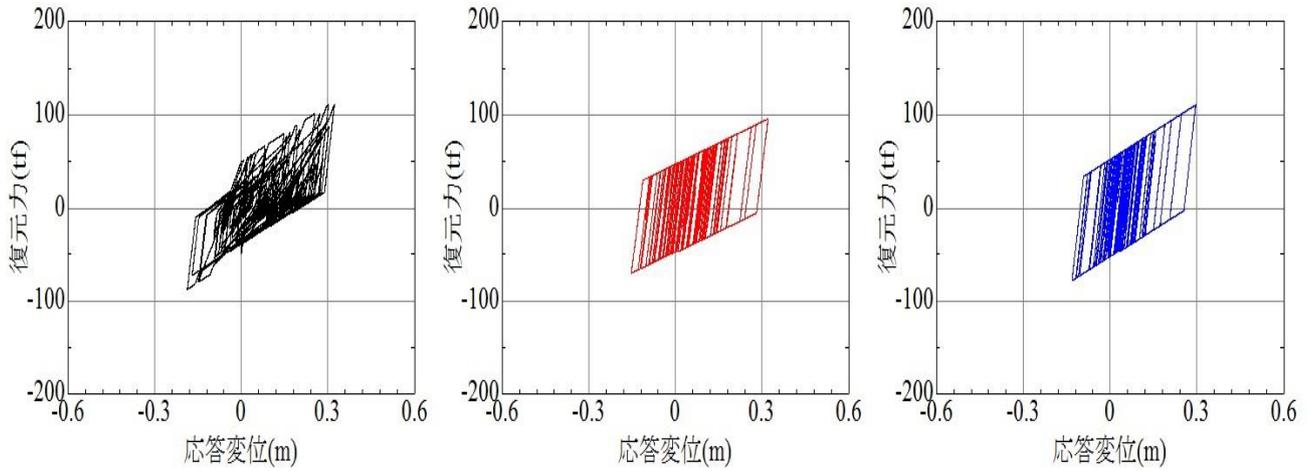


図-9 橋脚頂部の応答変位時刻歴(入力地震動: レベル2地震動タイプII)

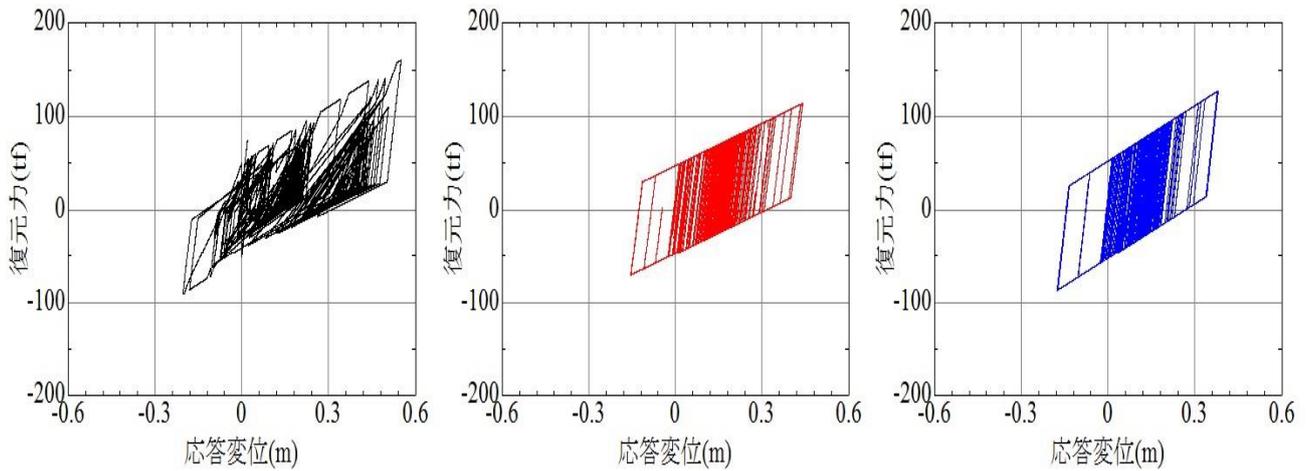
表-6 各入力地震動の橋脚頂部の応答変位における最大変位・最小変位

	バイリニア型Double Targetモデル		バイリニアモデル(定常)		バイリニアモデル(初期)	
	最大変位(m)	最小変位(m)	最大変位(m)	最小変位(m)	最大変位(m)	最小変位(m)
I-II-1	0.033	-0.043	0.033	-0.044	0.035	-0.046
I-II-2	0.035	-0.051	0.036	-0.051	0.039	-0.050
I-II-3	0.035	-0.046	0.027	-0.050	0.026	-0.045
II-II-1	0.039	-0.040	0.039	-0.038	0.045	-0.042
II-II-2	0.037	-0.043	0.036	-0.037	0.039	-0.039
II-II-3	0.034	-0.050	0.034	-0.056	0.033	-0.053

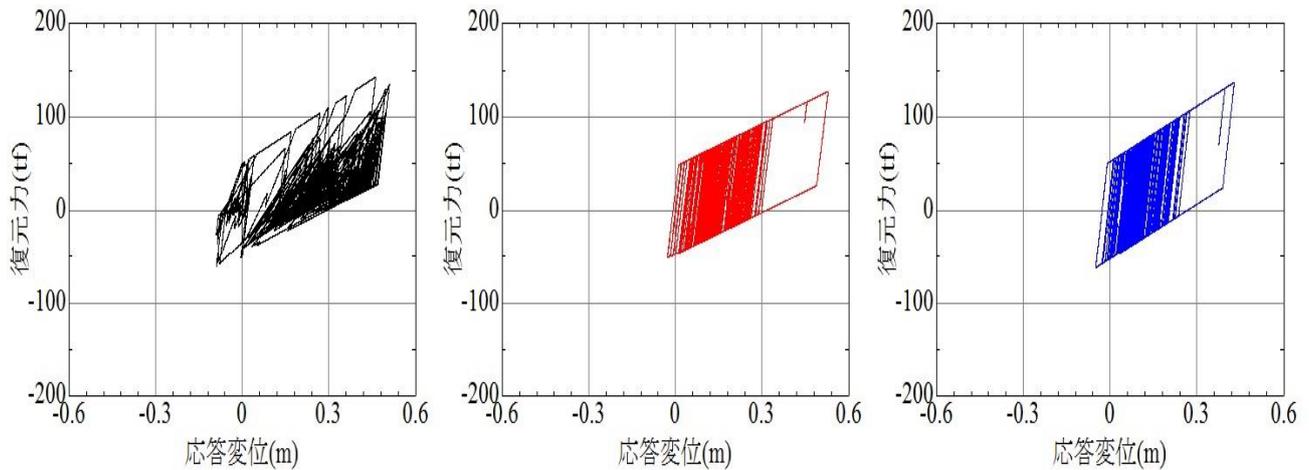
— バイリニア型Double Targetモデル
 - - - バイリニアモデル(定常)
 - · - · - バイリニアモデル(初期)



(a) レベル2地震動 I - II -1

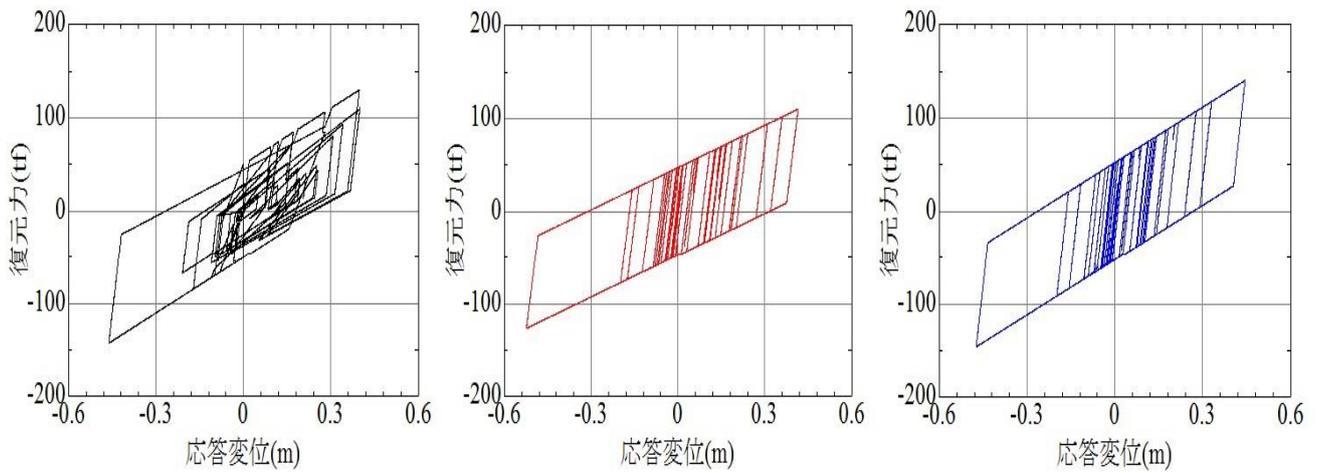
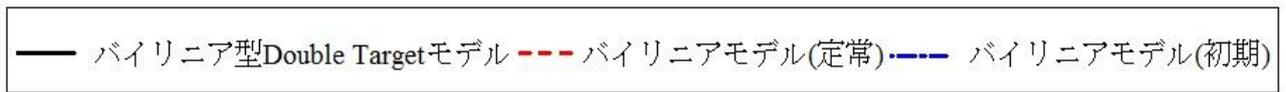


(b) レベル2地震動 I - II -2

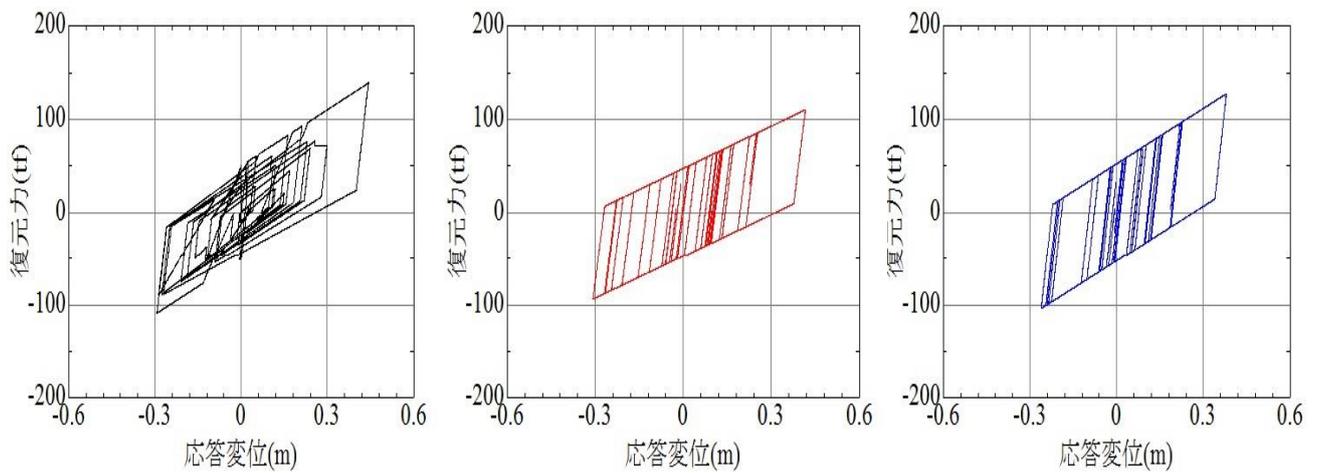


(c) レベル2地震動 I - II -3

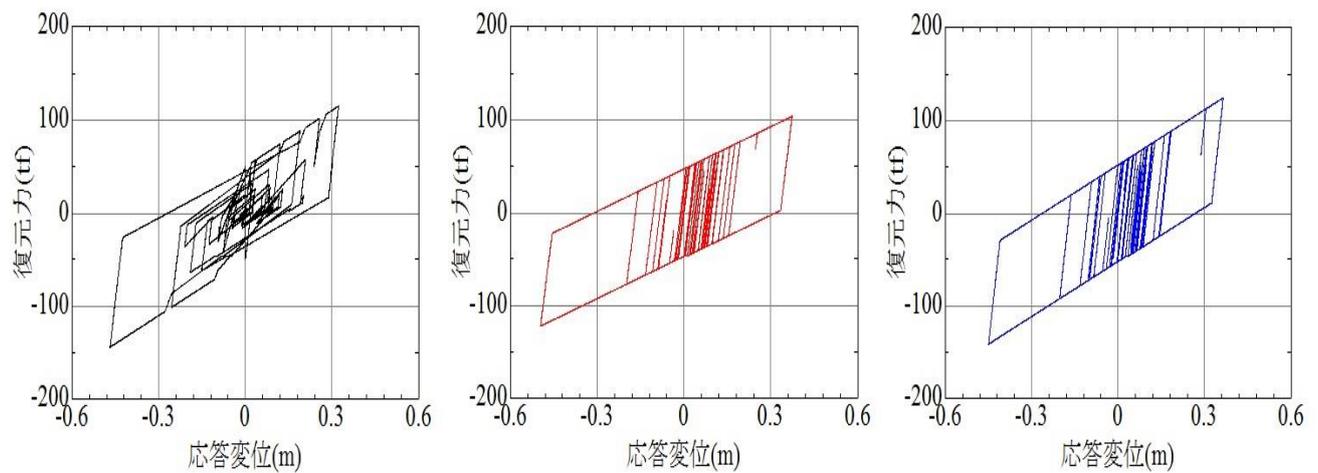
図-10 高減衰積層ゴムの履歴曲線(入力地震動: レベル2地震動タイプ I)



(a) レベル2地震動II-II-1



(b) レベル2地震動II-II-2



(c) レベル2地震動II-II-3

図-11 高減衰積層ゴムの履歴曲線(入力地震動: レベル2地震動タイプII)

表-7 各入力地震動の履歴曲線における最大変位・最小変位

	バイリニア型Double Targetモデル		バイリニアモデル(定常)		バイリニアモデル(初期)	
	最大変位(m)	最小変位(m)	最大変位(m)	最小変位(m)	最大変位(m)	最小変位(m)
I-II-1	0.32	-0.19	0.32	-0.15	0.29	-0.13
I-II-2	0.55	-0.20	0.44	-0.15	0.38	-0.18
I-II-3	0.49	-0.09	0.53	-0.03	0.43	-0.05
II-II-1	0.40	-0.46	0.42	-0.52	0.44	-0.47
II-II-2	0.44	-0.29	0.42	-0.31	0.38	-0.26
II-II-3	0.32	-0.47	0.37	-0.50	0.36	-0.45

いると考えられる。最大変位については、表-6にあるように入力地震動によって最大値を示すモデルはそれぞれ異なり、差もあまりみられない。

図-9をみると、図-8と同様、各モデルでの挙動の差はみられず、地震動の後半でバイリニア型Double Targetモデルがバイリニアモデル(初期、定常)と比べて変位を抑制していることが分かる。表-6をみると、最大変位もレベル2地震動タイプIと同様に入力地震動によって最大値を示すモデルは異なり、差もあまりみられないことが分かる。これも、図-7に示した桁の応答変位時刻歴において、バイリニア型Double Targetモデルの応答変位がバイリニアモデル(初期、定常)よりも大きくなった結果、相対的に橋脚頂部の応答変位が抑制されていることが理由と考えられる。

c) 高減衰積層ゴムの履歴曲線

図-10及び図-11に高減衰積層ゴムの履歴曲線を示す。図-8、図-9の橋脚頂部の応答変位時刻歴と同様に、モデルごとの線が重なる部分が多く判別が難しいので、バイリニア型Double Targetモデル、バイリニアモデル(初期、定常)の3種類のモデルをそれぞれ分けて示した。また、表-7に各入力地震動の履歴曲線の応答変位の最大値・最小値の比較を示す。セルに色を付けた値は、表-5、表-6と同様に各モデルで絶対的に最も大きな変位である。図-10(a)をみると、バイリニア型Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて復元力が大きいことが分かる。図-10(c)でもバイリニア型Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて履歴吸収エネルギーが大きく、変位が小さいことが分かる。このことから、バイリニア型Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて履歴吸収エネルギーが大きく、変位を抑制する傾向があるといえる。しかし、図-10(b)では、履歴吸収エネルギーはバイリニア型Double Targetモデルが大きいものの、応答変位がバイリニアモデル(初期、定常)より大きくなっていることが確認できる。これは図-7で示した桁の応答変位時刻歴の応答変位が大きくなった傾向と同様、地震動の後半でバイリニア型Double Targetモデルは最大変位と定常骨格曲線の交点へ向かう挙動が目立っており、バイリニアモデル(初期、定常)二種類の初期剛性より剛性が低くなる性質が出て変化しやすくなっているからであると考えられる。

図-11(a)をみると、図-10と同様に、バイリニア

型Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて履歴吸収エネルギーが大きく、変位が小さいことが分かる。図-11(b), (c)でもバイリニア型Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて履歴吸収エネルギーが大きく、レベル2地震動タイプIIでもバイリニア型Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて履歴吸収エネルギーが大きく、変位を抑制する傾向があるといえる。この傾向は図-10のレベル2地震動タイプIより図-11レベル2地震動タイプIIが顕著にみられる。これは、タイプIIの地震動が最大加速度に近い大きさの加速度が連続する地震動であるため、バイリニア型Double Targetモデルで最大変位を更新することが少なくなったことが原因と考えられる。なお、図-10及び図-11において、バイリニアモデル(初期)が最も履歴吸収エネルギーが大きく変位を抑制していることが分かる。しかしながら、バイリニアモデル(初期)が示すことができる復元力は初期載荷時と最大変位を更新したときのみであり、最大経験ひずみ依存性を考慮しているとはいえない。そのため、高減衰積層ゴムの履歴モデルには不適であるといえる。表-7をみると、履歴曲線における最大変位・最小変位はレベル2地震動入力地震動のI-II-3、II-II-1、II-II-3において、バイリニアモデル(定常)が最も大きな値を示していることが分かる。これは表-5で示した桁の応答変位における最大変位・最小変位と同様の結果であり、高減衰積層ゴムの応答変位の大きさが桁の応答変位の大きさに関わってくるということが分かる。なお、表-7の入力地震動I-II-1においてバイリニア型Double Targetモデルとバイリニアモデル(定常)の最大変位は同じ値になっているが、小数点以下3桁以上ではバイリニア型Double Targetモデルの方が大きい値を示しているため、このようになった。

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に注目が集まっている。その中で高減衰積層ゴム支承に於いては最大経験ひずみ依存性の影響が指摘されており、これまでに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、モデルの妥当性を実験値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、従来使われているモデルとの比較、検討を行った。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- 1) 最大経験ひずみ依存性を考慮したバイリニア型 Double Targetモデルを開発した。ラップシエア型試験片を用いた試験データとの比較を行い、モデル化の妥当性を確認した。
- 2) 単柱橋脚を有する鋼桁橋を参考に提案モデルの適用性を確認した。その結果、高減衰積層ゴムの履歴曲線において、バイリニア型 Double Targetモデルはバイリニアモデル(定常)と比べて履歴吸収エネルギーが大きく、変位を抑制する傾向があることが分かった。
- 3) バイリニア型 Double Targetモデルの最大変位を指向するときに剛性が低下する特徴によって、桁の応答変位時刻歴においてバイリニアモデルより変位が大きくなるケースがあり、注意を要することが明らかとなった。

参考文献

- 1) J.Diani, B.Fayolle, P.Gilormini : A review on the Mullins' 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.
- 8) 宇野州彦, 松田泰治, 大塚久哲 : ゴム支承を用いた反力分散構造の減衰評価に関する一考察, 第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.61-68, 2005.

(2015. ? . ? 受付)

ADEQUACY EVALUSTION AND SEISMIC RESPONSE EVALUATION OF HIGHWAY BRIDGES USING BI-LINEAR DOUBLE TARGET MODEL

Taiji MAZDA, Yasuki OHTORI, Yoshifumi UNO, Kazuhiro KANEKO and Kou TOKUMARU

Experienced shear strain dependency of high damping rubber bearing which is induced by Mullins effect of rubber is one of influential dependency to dynamic response of the bridge. So the effect of experienced shear strain dependency on seismic response of isolation structure should be evaluated. From past studies, loading history must be taken into account to evaluate characteristics of high damping rubber. In this research, bi-linear double target model is proposed considering the experienced shear strain dependency. From seismic response analysis, the effect of experienced shear strain dependency on seismic response are evaluated. And proposed model was compared with commonly used model.