

免震支承の履歴特性のモデル化の違いが地震応答に及ぼす 影響に関する一検討

横川英彰¹・堀 淳一²・星隈順一³

- 1正会員 博士（工学） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ 交流研究員
2正会員 博士（工学） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ 主任研究員
3正会員 博士（工学） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ 上席研究員
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6

1. まえがき

免震支承の特性として、同一振幅で繰り返し載荷すると水平力が低下していく特性がある。同一振幅で繰り返し載荷した場合には、加振1回目の載荷（初期載荷）時の水平力が特に大きく、2回目の載荷以降は、緩やかに水平力が低下していく¹⁾が、このような免震支承の特性は、道路橋の耐震設計では具体的には考慮されていない。

既往の研究において免震支承の履歴特性について検討したものとしては、原子力や建築の分野では、高減衰ゴム支承の処女載荷時の履歴特性が、地震時応答に対する影響が検討された例がある²⁻⁴⁾。ここで、高減衰ゴム支承の処女載荷時の履歴特性とは、免震支承が完成した直後の載荷から得られる特性（Mullins効果）である。これらの研究では、Mullins効果による履歴特性をDouble Targetモデルでモデル化し、地震応答解析からその影響を検討している。

橋梁の分野では、道路橋に免震支承が導入された始めた初期の段階で調査研究例⁵⁾がある。この研究では、道路橋で使用が想定される免震支承4種類を対象として、サブストラクチャーハイブリッド実験を行い、様々な状態での免震支承の準動的な特性が検討されている。この実験結果に基づいてバイリニアモデルが作成され、その適用性について検討が行われている。それ以外にも、積層ゴム系支承の実験結果に基づき、履歴特性を精緻に表現するマクロモ

デルを作成し、免震支承の地震応答特性を検討した研究⁶⁾や、免震支承の特性をレオロジー分野の考え方を応用してモデル化した研究⁷⁾など、履歴モデルの精緻化を検討した研究がある。また、高減衰ゴムのMullins効果について検討した例では、処女載荷状態の高減衰ゴム支承を対象にサブストラクチャーハイブリッド実験を行い、準動的な挙動からMullins効果が地震応答に対する影響を検討した研究⁸⁾や、高減衰ゴム支承の処女載荷時の履歴特性をモデル化し、支承と橋脚を連成した形でMullins効果が橋梁の地震応答に対する影響の検討⁹⁾が行われている。さらに、高減衰ゴム支承を対象に、3軸同時載荷実験を行い、水平2方向の履歴特性をMSSモデルや、Park-Wenモデルなどを用いて検討した研究¹⁰⁾などがある。しかし、これらの研究は、免震支承の履歴モデルの検討に主眼が置かれており、その初期載荷の特性に着目した研究ではない。

初期載荷において水平力が大きいと、結果的に地震応答で生じる免震支承の変位応答が低減し、エネルギー吸収量も減少することが想定され、これにより免震設計において期待されるエネルギー吸収が発揮されず、免震設計の耐震性能に影響を及ぼす可能性が懸念される。

そこで、本研究では、鉛プラグ入りゴム支承を対象に、免震支承の初期載荷時の特性に着目し、その履歴特性の違いが地震応答解析結果に及ぼす影響について検討した。

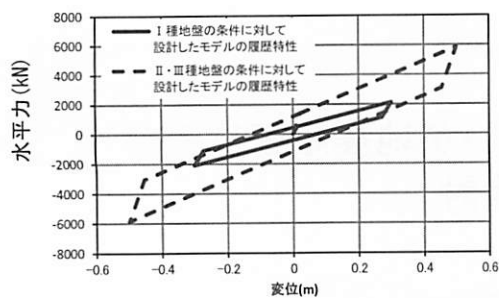
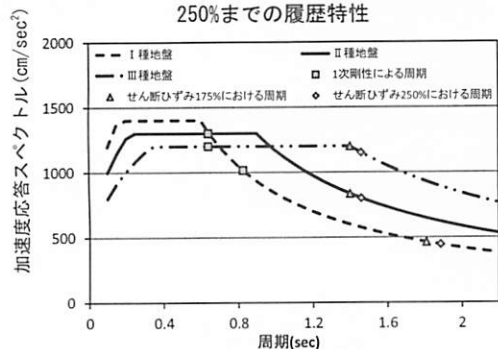
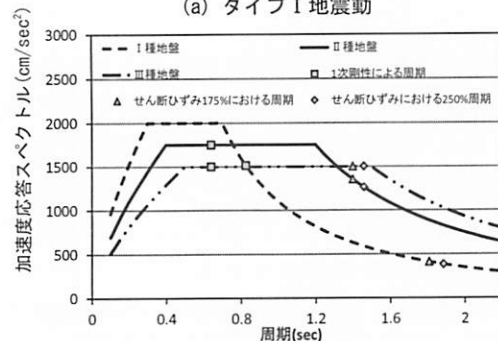


図-1 解析で対象とした免震支承のせん断ひずみ250%までの履歴特性



(a) タイプ I 地震動



(b) タイプ II 地震動

図-2 免震支承の1次剛性による周期とせん断ひずみ175%, 250%における等価剛性による周期

2. 解析モデルと解析条件

本研究では、免震支承単体での初期載荷時の特性に着目する。ここで用いる解析モデルとしては、橋脚を剛体と仮定し、免震支承と上部構造のみとした1質点系モデルとした。

検討の第1ステップとして、その力学特性を道路橋示方書の標準加速度応答スペクトル（以下、設計スペクトルと呼ぶ）に合うように調整した地震動（以下、道示標準波と呼ぶ）¹¹⁾に対して、免震支承の応答せん断ひずみが220%~250%程度になるような形状を設定した免震支承に対して検討を行うこととした。このように設定した結果、I種地盤の条件に対しては600mm×600mmの平面形状、II・III種地盤の条件に対しては1000mm×1000mmの平面形状となった。

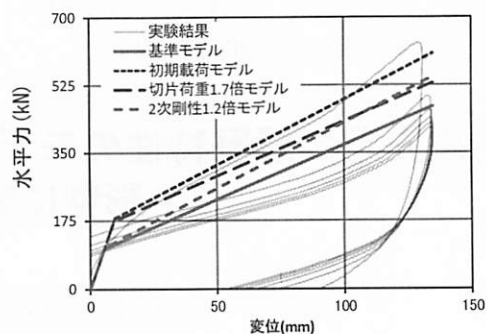
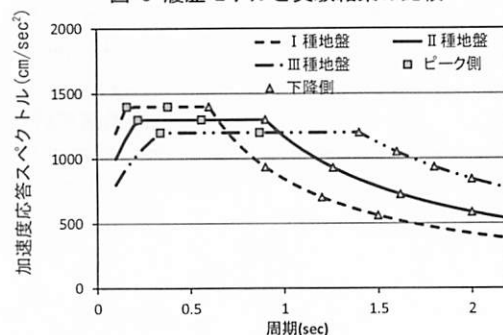
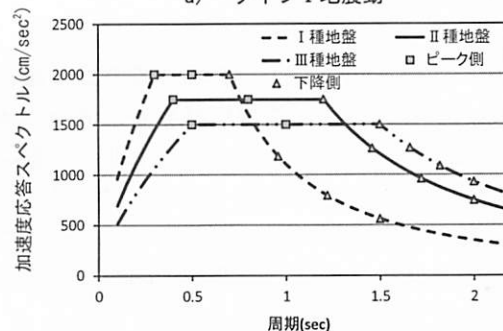


図-3 履歴モデルと実験結果の比較



a) タイプ I 地震動



(b) タイプ II 地震動

図-4 1次剛性周期の設定と設計スペクトル

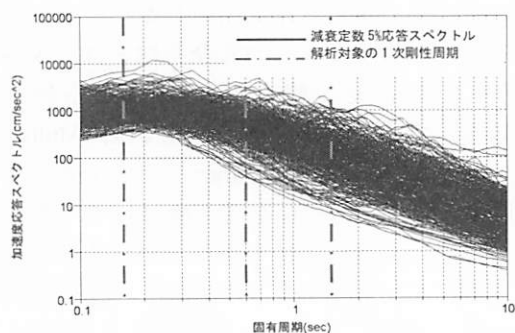


図-5 1次剛性周期の設定と444 波形の減衰定数5% 加速度応答スペクトル

ここで、支承の2次形状係数は5と設定している。な

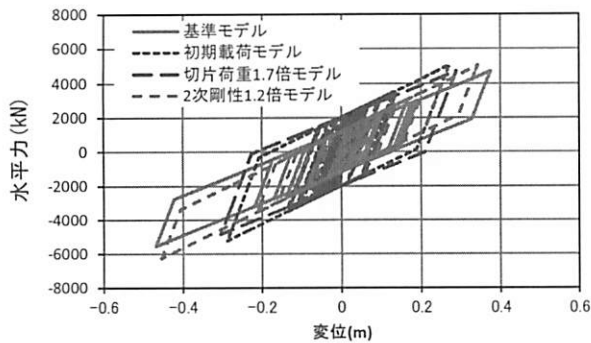


図-6 履歴応答の一例

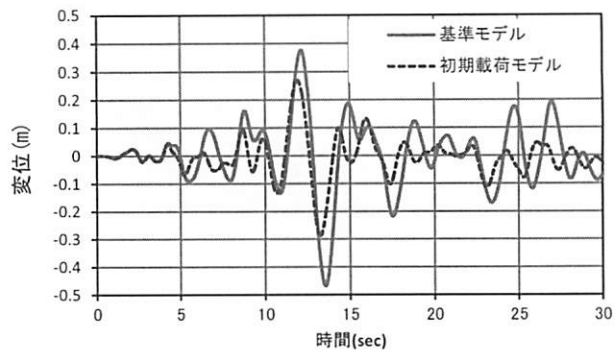
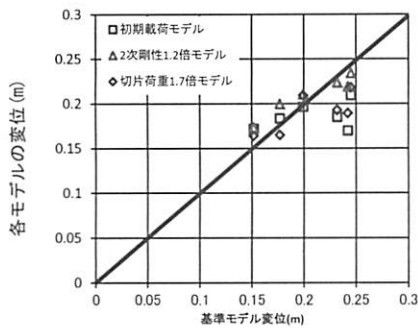
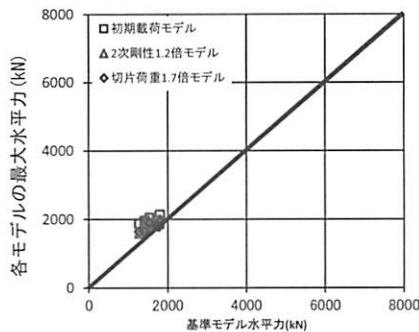


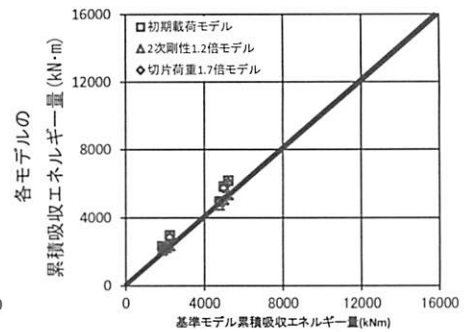
図-7 変位応答の一例



(a) 最大応答変位

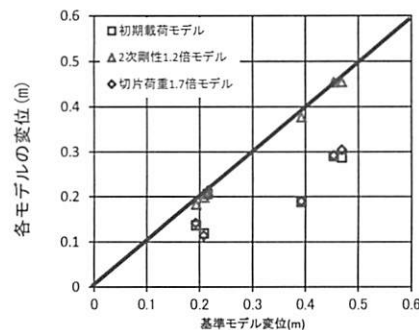


(b) 最大応答水平力

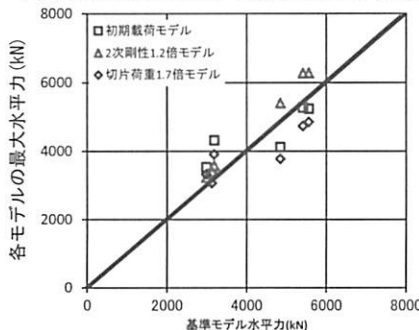


(c) 累積吸収エネルギー量

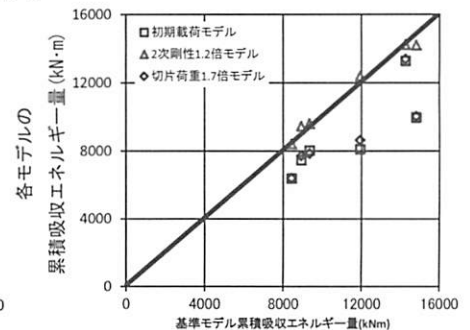
(1) I 種地盤の条件に対して設計したモデルの応答



(a) 最大応答変位

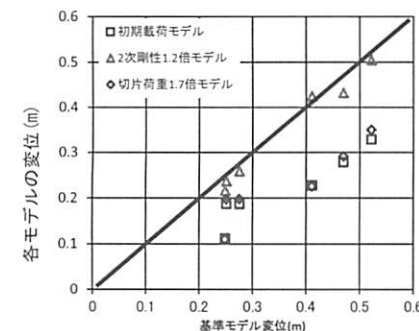


(b) 最大応答水平力

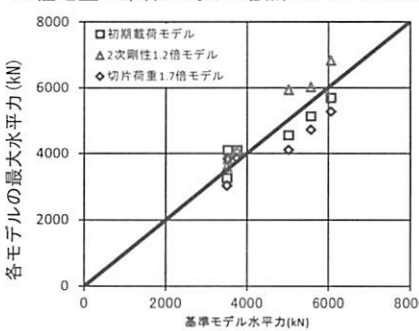


(c) 累積吸収エネルギー量

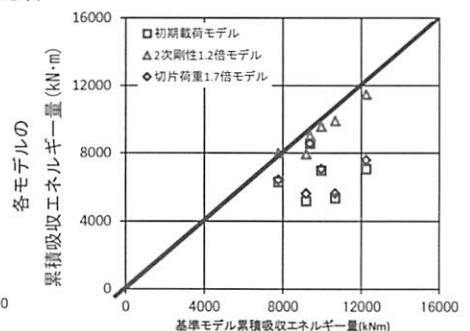
(2) II 種地盤の条件に対して設計したモデルの応答



(a) 最大応答変位



(b) 最大応答水平力



(c) 累積吸収エネルギー量

(3) III 種地盤の条件に対して設計したモデルの応答

図-8 応答解析結果からの傾向

お、対象とした免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承とし、免震支承のモデル化に際しては、支承便覧¹²⁾に記載されている設計式に基づき、図-1に示すような、せん断ひずみ250%で設定されるバイリニアモデルを設定した（以下、基準モデルと呼ぶ）。図-2

に、このモデルに基づく固有周期と、設計スペクトルとの対応を示す。支承の初期剛性に基づく固有周期はI 種地盤で0.82秒、II・III 種地盤で0.64秒となる。また、基準モデルのせん断ひずみ175%における等価剛性で算出した周期は、I 種地盤で1.8秒、II・

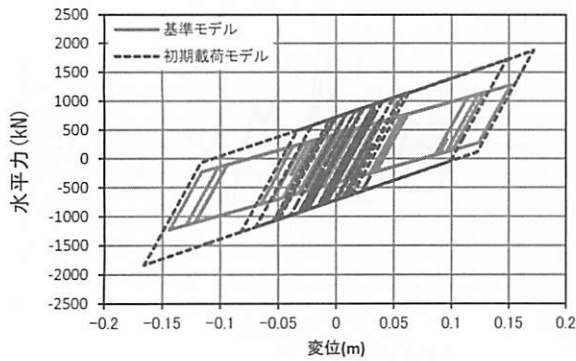


図-9 基準モデルと初期載荷モデルの履歴の比較

Ⅲ種地盤で1.4秒、250%における等価剛性で算出した固有周期はⅠ種地盤で1.9秒、Ⅱ・Ⅲ種地盤で1.46秒となった。なお、基準モデルにおける切片荷重と質点の重量の比(以下、 Q/W と呼ぶ)は、Ⅰ種地盤では0.068、Ⅱ・Ⅲ種地盤では0.20となる。2次剛性は1次剛性に対して1/6.5となるように設定した。

解析では、初期載荷時の履歴特性の影響を検討するために、基準モデルのほかに、図-3に示すような3つのモデルを設定した。まず、初期載荷の影響を考慮したモデルとして、初期載荷時の履歴と合うように、基準モデルに対して切片荷重を1.7倍とし2次剛性を1.2倍としたバイリニアモデル(以下、初期載荷モデルと呼ぶ)を設定した。本来、このような特性を示すのは初期載荷時だけであるが、本検討での地震応答解析では、切片荷重、2次剛性ともに地震応答中の履歴特性は変化させていない。このほか、基準モデルに対して切片荷重を1.7倍とし、2次剛性を基準モデルと同じとした場合(以下、切片荷重1.7倍モデルと呼ぶ)、基準モデルに対して2次剛性を1.2倍とし切片荷重を基準モデルと同じとした場合のモデル(以下、2次剛性1.2倍モデルと呼ぶ)を検討対象とした。解析では、地盤種別ごとのモデルに対して、道示標準波の地震動のタイプごとの3波を入力した。

なお、粘性減衰はせん断ひずみ250%で設定される等価剛性に対して、1%の減衰定数を設定した。

詳細は後述するが、このようなモデルに対して解析を行った結果、切片荷重を大きくした場合でも、基準モデルと比較して応答が大きくなる応答特性が得られたケースがあった。この理由を検討するために、1次剛性と質点質量から求められる固有周期(以下、1次剛性の固有周期と呼ぶ)を変化させたパラメトリック解析を行った。図-4に示すような設計スペクトルの形状との関係を調べるために、この1次剛性を設計スペクトルのピーク領域にあうように設定した場合(ピーク側の設定)とピークから下がる領域にあうように設定した場合(下降側の設定)に対してそれぞれ2ケース程度ずつを設定した。

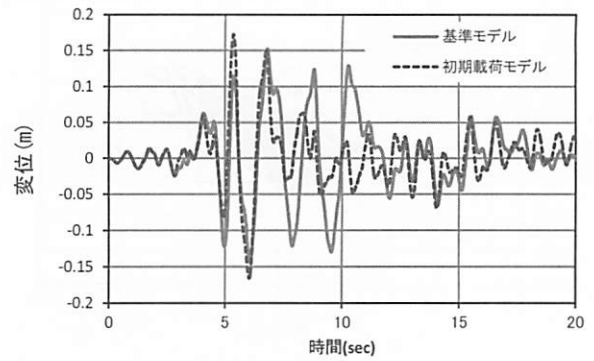


図-10 基準モデルと初期載荷モデルの変位時刻歴の比較

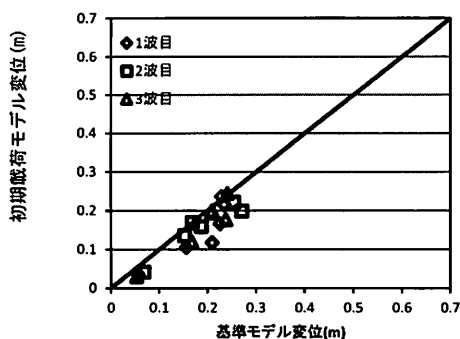
なお、切片荷重と2次剛性の設定方法は基準モデルの場合と同じとした。

上記は、入力地震動のスペクトルが設計地震動のスペクトルに合うように調整された地震動に対するものであるが、実際に観測された地震動は、周期の小さな変化に対しても加速度応答スペクトルの値が大きく変化するものもあり、スペクトルの形状に凹凸があるため、実際に観測された地震動を用いると道示標準波を用いた解析とは異なる結果が得られることが考えられる。そこで、実地震動を用いて同様な検討を行った。その地震動は、1996年から2012年までに我が国で観測された震度5強以上、かつ最大加速度が300gal以上の水平成分のみを選択した地震動であり、その数は444波形(以下、444波形と呼ぶ)である。また、これらの地震動の減衰定数5%の加速度応答スペクトルを示すと、図-5のとおりである。図-5から、加速度応答スペクトルで0.3秒程度までは、固有周期の増加に伴いスペクトルが大きくなる、あるいは概ね同程度となる傾向であり、0.3秒より長い周期では固有周期の増加に伴いスペクトルが小さくなる傾向となっている。

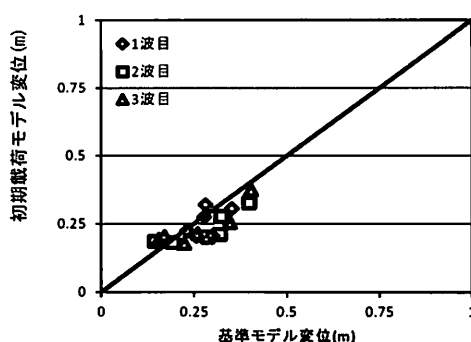
切片荷重と2次剛性の設定方法は基準モデルと同じとし、 Q/W はⅠ種地盤の検討で用いた値と同じ値とした。また、1次剛性の固有周期は、図-5に示す加速度応答スペクトルの傾向から、ピーク領域の値(ピーク側の設定)として0.16秒とした。ピーク領域よりやや下降している値(ピーク領域よりやや下降している側の設定)としては0.6秒、下降領域の値(下降側の設定)としては1.5秒とした。

3. 道示標準波に対して設計した支承の応答特性

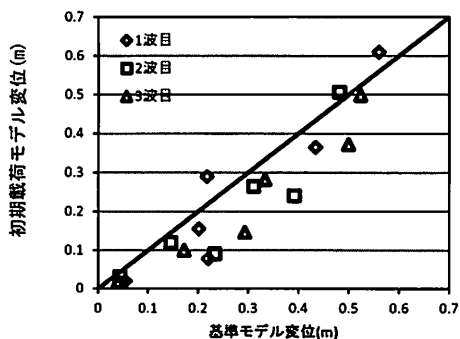
時刻歴応答解析の結果得られた履歴応答及び、変位応答の例を図-6、図-7に示す。これらタイプⅡ地震動、Ⅰ種地盤の2波目を入力した結果である。これらより、基準モデルと2次剛性1.2倍モデルでは、2次剛性1.2倍モデルの方が、最大変位応答時の水平



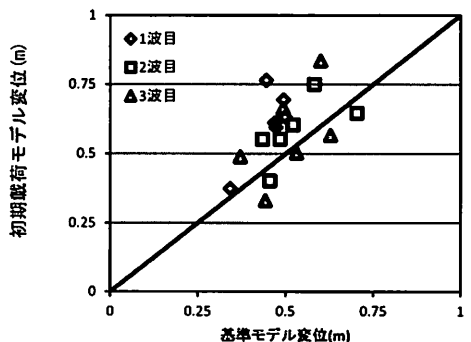
(a) I 種地盤（設計スペクトルのピーク側の設定）



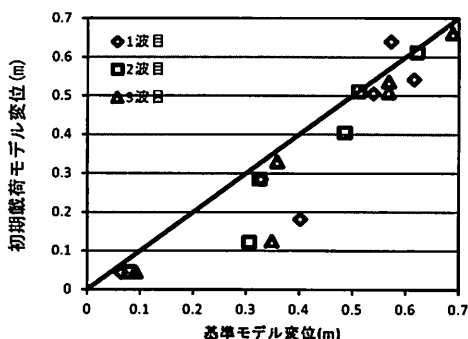
(b) I 種地盤（設計スペクトルの下降側の設定）



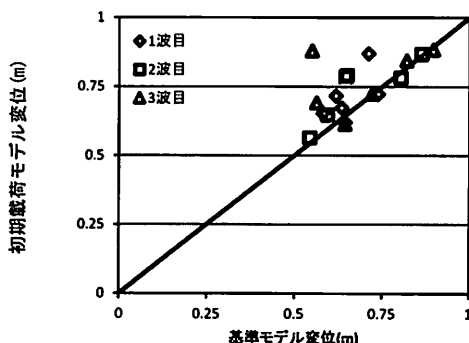
(c) II 種地盤（設計スペクトルのピーク側の設定）



(d) II 種地盤（設計スペクトルの下降側の設定）



(e) III 種地盤（設計スペクトルのピーク側の設定）



(f) III 種地盤（設計スペクトルの下降側の設定）

図-11 1 次剛性のパラメトリック解析から得た最大変位応答

力の方がやや大きい、ほぼ同程度の変位となっている。また、初期載荷モデルと切片荷重1.7倍モデルでは、初期載荷モデルの最大変位応答時の水平力が大きくなっているが、ほぼ同程度の変位応答の傾向となっている。一方で、切片荷重が1.7倍異なる場合には、最大変位応答にして約65%の違いが生じている。すなわち、地震応答特性への影響という観点からは、2次剛性よりも切片荷重の方が地震応答にあたえる影響が大きく、切片荷重が大きくなると変位応答が小さくなるのが分かる。こうした解析を全ての解析ケースで行い、最大変位応答、最大水平力、累積吸収エネルギー量を比較した結果を図-8に示す。ここから、2次剛性1.2倍モデルは、全ての地震動で基準モデルと概ね同程度の結果となった。一方、切片荷重1.7倍モデルや初期載荷モデルでは、I 種地盤のモデルに対する結果と II・III 種地盤のモ

デルに対する結果で傾向が異なることが分かる。II・III 種地盤のモデルでは、基準モデルに対して応答が小さくなる傾向があり、解析ケースにより半分程度になる場合がある。この結果、累積吸収エネルギー量では、基準モデルと比較して小さくなる傾向にある。また、最大水平力も基準モデルと比較して小さくなる傾向にある。切片荷重が大きくなれば、最大水平力も大きくなると想定されるが、図-6からも分かるように降伏変位に達したときの水平力が大きくても、変位応答が小さいと結果として水平力が大きくならないため、このような結果になったと考えられる。一方、I 種地盤のモデルについては、切片荷重1.7倍モデルや初期載荷モデルの場合にも、基準モデルのケースと最大変位応答が同程度となり、その結果、累積吸収エネルギーがむしろ大きくなる傾向を示す場合がある。この場合、当然ながら、最

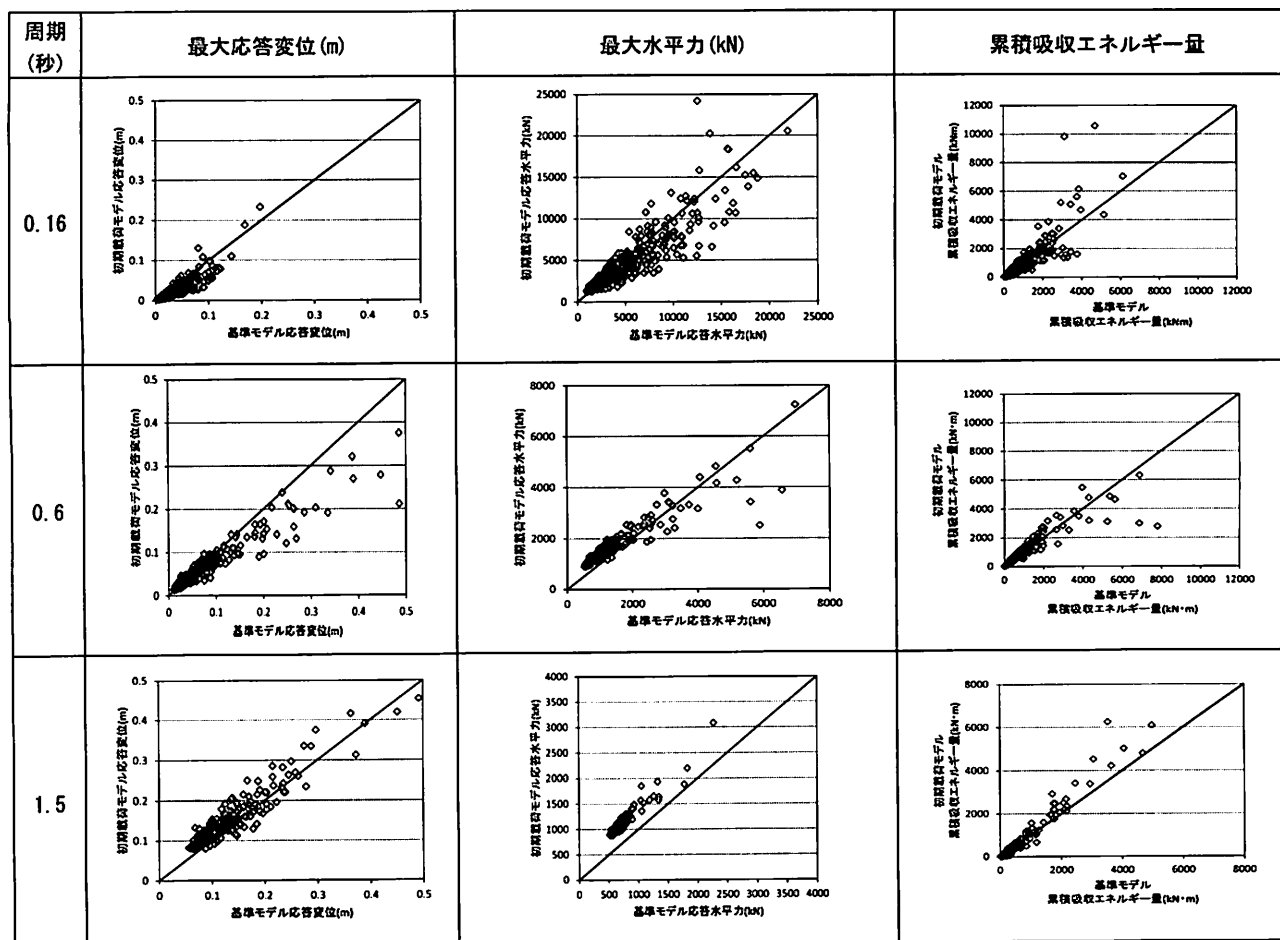


図-12 444 地震動を入力した場合のモデルの応答

大水平力も基準モデルより大きい。これに該当するケースの履歴応答と変位応答を示した結果がそれぞれ図-9、図-10である。この結果はⅠ種地盤、タイプⅡ地震動の2波目を入力した場合の結果である。変位時刻歴から初期载荷モデルでは、6秒付近の応答が最大となっており、初期段階の応答の違いが最大応答値に影響を及ぼしていると考えられる。図-2に示したように、Ⅰ種地盤のモデルでは1次剛性に対する固有周期が長く、入力地震動の加速度応答スペクトルの下降域にあるため、基準モデルにおいて相対的に低い降伏点で降伏し、最大変位時の固有周期（以下、みかけの固有周期と呼ぶ）がのびた後には地震力の影響が小さくなって変位応答が大きくなかったことが一因と考えられる。

4. 1次剛性の固有周期を変化させたパラメトリック解析の結果と考察

(1) 道示標準波を入力した結果

3章に示したように、切片荷重が大きくなる場合でも最大変位応答や累積エネルギー吸収量が小さくならない場合があるが、これには免震支承の固有周期と設計スペクトルの形状が関係していることが考

えられる。そこで、図-4に示したように設計スペクトルのピーク領域が主たる応答となる場合（ピーク側の設定）と、下降域が主たる応答となる場合（下降側の設定）において、応答特性の違いを調べることを目的に、1次剛性の固有周期を変化させてパラメトリック解析を行った。解析結果を図-11に示す。全体的な傾向として、1次剛性の固有周期が設計スペクトルのピーク領域にあり、見かけの固有周期も概ねピーク領域にある場合（ピーク側の設定）には、初期载荷モデルの場合には基準モデルの場合に比べて、変位応答は小さくなる傾向を示す。一方、1次剛性の固有周期が設計スペクトルの下降域にあり、みかけの固有周期も下降域にある場合（下降側の設定）では、ばらつきはあるものの、初期载荷モデルの場合と基準モデルの場合と生じる変位応答は概ね同程度となる傾向にある。

これは、1次剛性の固有周期が概ね設計スペクトルのピーク領域にある場合には、基準モデルの場合に初期载荷モデルに比べて早い段階で降伏変位に達し、みかけの固有周期がのびた後も地震力の影響は同程度であるので、変位応答が増大する。結果として、初期载荷モデルよりも切片荷重が小さい分だけ変位応答が大きくなったことが考えられる。一方、

1次剛性の固有周期が設計スペクトルの下降域にある場合には、基準モデルの場合に相対的に早い段階で降伏すると、みかけの固有周期がのびることにより、地震力の影響が小さくなる。その結果、変位応答が大きくなり、初期載荷モデルの場合には1次剛性による応答の影響が相対的に大きくなって、その分、変位応答が大きくなったことが要因のひとつであると考えられる。

(2) 444波形を入力した結果

図-12に444波形を入力した結果を示す。ここで、初期載荷モデル、基準モデルのいずれかにおいて、弾性応答に留まった場合には、その地震動に対する結果は両モデルともに除外している。選択した波形の数は、周期0.16秒では444波形、周期0.6秒では424波形、周期1.5秒では249波形である。

図-12から変位応答に着目すると、周期0.16秒（ピーク側の設定）や、周期0.6秒（ピークよりやや下降している側の設定）では、基準モデルの方が大きい傾向にあるが、周期1.5秒（下降側の設定）では、初期載荷モデルの方が応答が大きい傾向となっている。また、最大水平力は周期0.16秒（ピーク側の設定）では、ばらつきはあるものの、基準モデルの方が大きい傾向となっているが、周期0.6秒（ピークよりやや下降している側の設定）では若干ではあるが、初期載荷モデルの応答が基準モデルと比較して大きい傾向を示している。これは、初期載荷モデルの方が基準モデルよりも切片荷重が大きく、変位応答が基準モデルよりも小さくても、相対的に水平力が大きくなることが理由である。一方、周期1.5秒（下降側の設定）では、変位応答は基準モデルより初期載荷モデルの方が大きく、また、切片荷重も初期載荷モデルの方が大きいため、水平力も大きい結果となった。累積吸収エネルギー量では、ばらつきはあるものの、周期0.16秒（ピーク側の設定）では基準モデルの方が、若干ながら累積吸収エネルギー量が大きい傾向となる。周期0.6秒（ピークよりやや下降している側の設定）では、変位応答の傾向と同様に、基準モデルのほうが、累積吸収エネルギー量が多い傾向となる。一方で、周期1.5秒（下降側の設定）では、概ね初期載荷モデルの方が、累積吸収エネルギー量が大きい傾向となっている。

以上より、ばらつきはあるものの、全体的な傾向としては、実際に観測された地震動を入力した場合にも、道示標準波を入力した場合と同様の傾向にある。

5. 結論

本研究では、免震支承における履歴特性の違いが地震応答特性に及ぼす影響について検討した。本検討で得られた結論は次のとおりである。

- 1) 免震支承の2次剛性の変化が、最大変位応答、累積吸収エネルギー量、最大水平力に及ぼす影響は大きくはない。
- 2) 免震支承の切片荷重の変化は、地震応答解析結果に有意な影響を及ぼす。特に、1次剛性の固有周期が加速度応答スペクトルのピーク領域にある場合には、切片荷重大きいと変位応答が小さくなり、その結果、設計で免震支承に期待したエネルギー吸収が発揮されない可能性がある。一方、1次剛性の固有周期が設計スペクトルの下降域にある場合は、切片荷重が小さいモデルでは、長周期化の影響により、地震力の影響が小さくなる。しかし、相対的にみれば、切片荷重が大きいモデルでも、変位応答が著しく小さくなることはなく、エネルギー吸収量としては概ね等価であると考えられる。
- 3) 実地震で観測された444波形の地震動を用いた解析結果と道示標準波を用いた解析結果を比較すると、ばらつきはあるものの、全体的な傾向としては、標準地震動を入力した結果と比較して、概ね同様な結果となった。

謝辞：本研究で用いた444波形は（独）防災科学技術研究所のK-NETで観測された結果を用いました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) (財) 土木研究センター：道路橋の免震・制震設計法マニュアル（案）, pp.III-1-III-20, 2011.12.
- 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, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.505-506, 1993.9.
- 3) 大島靖樹, 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, 日本建築学会講演梗概集, pp.793-794, 1994.9.
- 4) 大島靖樹, 石田勝彦：高減衰積層ゴムの最大経験ひずみ依存性が免震構造物の地震時応答に与える影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.75-84, 1995.6.
- 5) (財) 防災研究協会：道路橋の免震設計に関する調査研究, 阪神高速道路公団工務部 平成3年度受託研究成果報告書, 1992.3.

- 6) 阿部雅人,吉田純司, 藤野陽三:免震用積層ゴム支承の水平 2 方向を含む復元力特性とそのモデル化,土木学会論文集 No.696/ I -58,pp.125-144,2002.1.
- 7) 奥井義昭, 小島康幸, A.R.Bhuiyan, 市野一樹, 今井隆, 三田村浩: ゴム支承を対象とした耐震設計用レオロジーモデル, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会概要集,No.63,A-23,2007,2.
- 8) 高橋良和, 鶴野禎史, 高井智康, 朝倉康信, 加藤亨二, 山田博, 金子一弘: 初期載荷状態の高減衰ゴム支承を用いたハイブリッド地震応答実験, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,pp.331-336,2012.7.
- 9) 高井智康, 鶴野禎史, 兼子一弘, 山田博, 加藤亨二: 高減衰ゴム支承の初期履歴による地震時応答の影響に関する研究, 第67回土木学会年次学術講演会講演概要集, I -394,2012,9.
- 10) 五十嵐晃 党 紀, 村越雄太, 伊東俊彦: 免震ゴム支承の水平 2 方向復元力特性に関する載荷実験および復元力モデルの比較検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学),Vol.69,No.4 (地震工学論文集第 32 巻)) I _311- I _325,2013.
- 11) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編,2012.4.
- 12) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.