

初期骨格曲線と定常骨格曲線を考慮した非線形履歴モデルを用いた免震橋の地震応答解析

高橋雅裕¹・梶原浩一²・塚本英子³・矢部正明⁴

¹正会員 株式会社長大 構造防災技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

²正会員 （独）防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21）

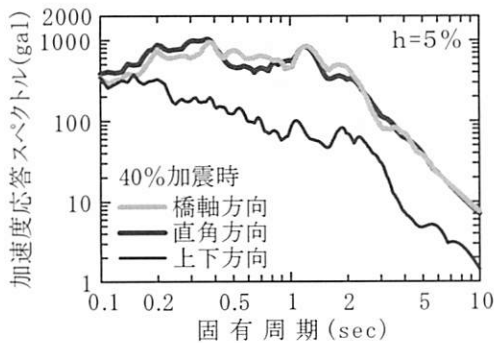
³非会員 株式会社長大 構造防災技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

⁴正会員 株式会社長大 構造事業本部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

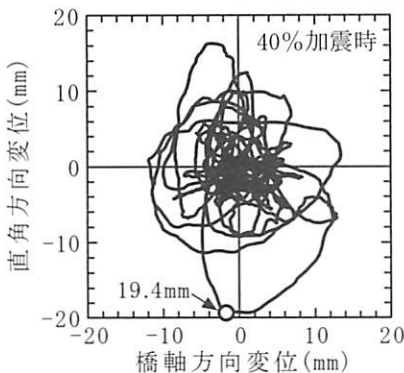
1. はじめに

E-ディフェンスを用いた次世代型RC橋脚（高じん性繊維補強モルタルを橋脚基部付近に使用）の実大三次元震動破壊実験¹⁾に先立って、図-1に示すようにRC橋脚上の固定支承を高減衰積層ゴム支承

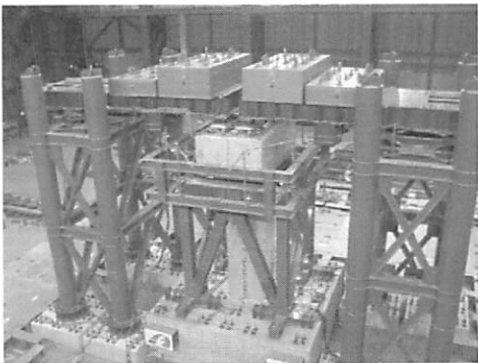
（ゴム厚 15mm × 6 層， 400mm × 400mm， $G10=1.0\text{N/mm}^2$ ）に置き換えた加震実験を行っている^{2),3)}。免震支承を設置した加震実験は，次世代型RC橋脚躯体に損傷が生じない範囲で加震する必要があったので，その加震強度を，1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅周辺地盤上記録3成分の地震動強度



(1) 加震台上の地震動



(2) 橋脚頂部水平2方向変位



(3) 実験模型全景



(4) 橋脚頂部免震支承
(400×400mm, 15mm×6層)

図-1 E-ディフェンスを用いた免震橋の実大三次元加震実験の様子

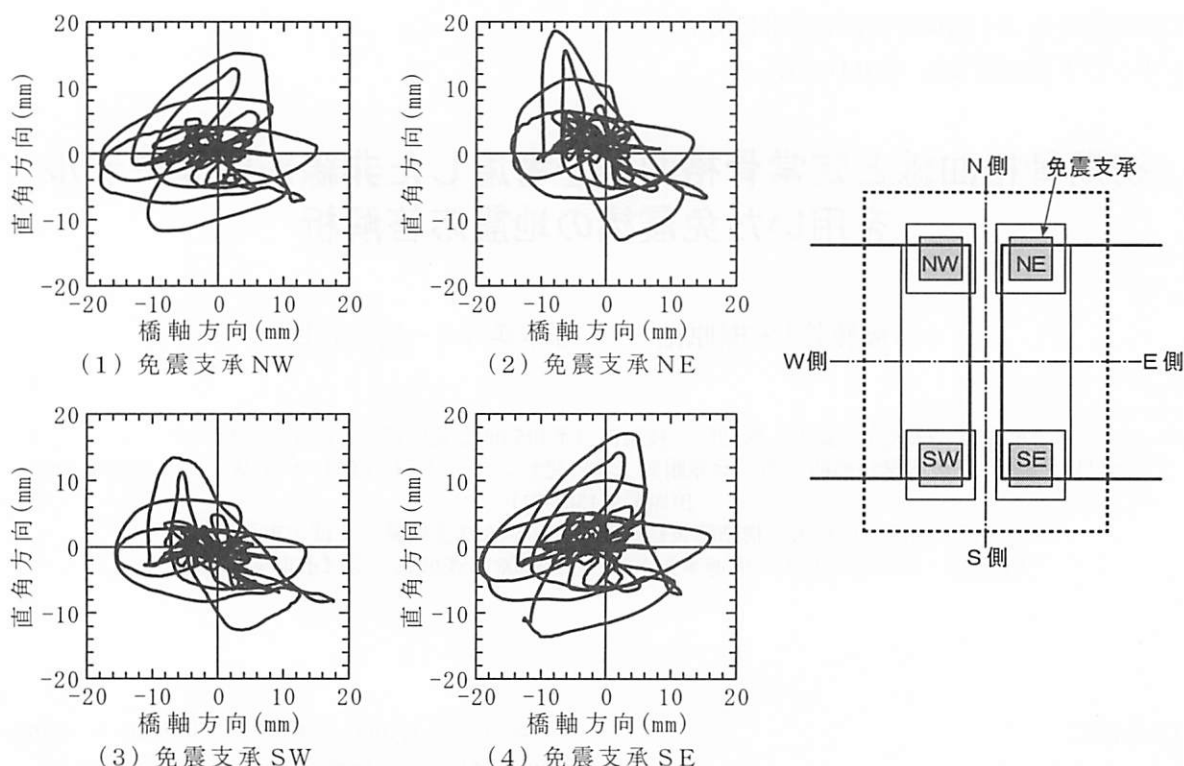


図-2 1995年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅周辺地盤上記録3成分の40%強度で加震した免震支承の地震応答変位

(加速度振幅)を8%, 16%, 24%, 32%, 40%と順次増加させながら行っている。橋脚頂部に生じた応答変位は約19mmと小さいが、免震支承の初期剛性を用いて算出されるモデルの橋軸方向基本固有周期が約0.57秒、橋軸直角方向基本固有周期が約0.43秒であることから、図中に示した加速度応答スペクトルから、40%加震時には約600gal(減衰定数5%の弾性加速度応答)近い加速度応答が生じる加震が行われたことになる。

E-ディフェンスを用いた免震橋の加震実験で計測された地震応答は、事前に行った免震支承の設計モデル(免震支承の設計変位によって作成したバイリニアモデル)を用いた動的解析結果と大きく異なっており、その原因として、支承に生じる変形量や過去に経験した最大ひずみによりその復元力特性が変化するという積層ゴム系支承の特性⁴⁾が原因ではないかと考えられた³⁾。同様な事象は、高減衰積層ゴム支承を対象に、順次载荷変位(せん断ひずみ)を100%-175%-250%と大きくした正負交番载荷実験と順次载荷変位を250%-175%-100%と小さくした正負交番载荷実験でも報告されている⁵⁾。積層ゴム系支承におけるこの特性は、Mullins効果によるもの⁶⁾で、建築分野では、1995年兵庫県南部地震以前より、最大経験ひずみ依存性^{7),8,9)}とか復元力の回復特性¹⁰⁾として検討が行われてきている。橋梁の積層ゴム系免震支承を対象とした検討は少なく、上述の文献5)の

他に、吉田らが最大経験ひずみ依存性を考慮した免震支承の解析モデルを提案している¹¹⁾。

本報告は、E-ディフェンスを用いた免震橋の地震応答を免震支承の非線形履歴モデルを用いて何処まで再現できるかを検討したものである。検討対象とした免震支承の非線形履歴モデルは、バイリニアモデルと双曲線モデルおよび建築分野で提案されている初期骨格曲線と定常骨格曲線を考慮したDouble-Targetモデル^{7),8,9)}である。RC橋脚や免震支承に大きな非線形応答を生じさせなかった実験であるが、もし、免震支承が設計モデルと大きく異ならない地震応答をしていたのなら、免震支承に約95%ほどのせん断ひずみが生じるはずだった実験である。現在、動的解析で使用されている免震支承の非線形履歴モデルが、この領域の地震応答をどの程度再現できるかを検討することは、実際の設計で対象としている免震支承に200%程度のせん断ひずみが生じる地震応答を精度良く求めるための課題を抽出するための情報の一つとなる。

2. E-ディフェンスを用いた免震橋の地震応答

図-2は、1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅周辺地盤上記録3成分の地震動強度を40%とした時の加震実験より得られた免震支承の水平2方向変位のリーサージュ図である。免震支承に生じたせん断ひずみは、

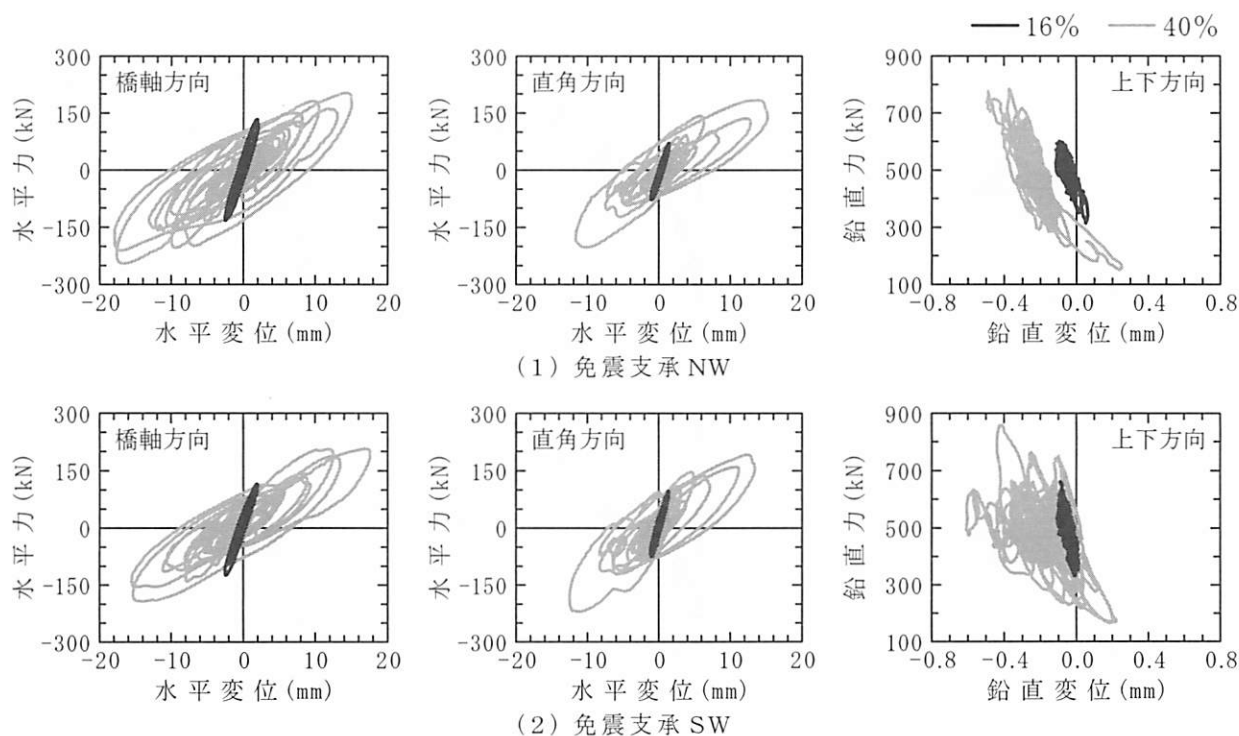


図-3 加震実験から得られた免震支承の非線形地震応答

免震支承NWで橋軸が約20%，直角が約17%，免震支承NEで橋軸が約17%，直角が約21%，免震支承SWで橋軸が約20%，直角が約15%，免震支承SEで橋軸が約22%，直角が約19%である。リーサージュ図の形状を比較すると，対角線上の免震支承NWとSE，NEとSWでその形状が近似しているが，免震支承に生じたせん断ひずみの大きさ僅かではあるが異なっている。理由としては，各支承の力学特性値の違いや，三次元加震（地震応答）の影響が考えられる。

図-3は，1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅周辺地盤上記録3成分の地震動強度を16%とした時と40%とした時の免震支承の荷重－変位関係（応答履歴）を整理したものである。図には，同一支承上に位置する免震支承NWとSWの地震応答を示してある。水平方向の荷重－変位関係に注目すると，16%での加震では免震支承の地震応答はほぼ線形とみなせるが，40%加震では非線形応答が生じていることがわかる。上下方向は，16%加震ではほぼ線形とみなせるが，40%加震では，鉛直下方の力を減少させる領域（積層ゴムにとって引張状態）と鉛直下方の力を増加させる領域（積層ゴムにとって圧縮状態）で，その傾き（剛性＝荷重／変位）が異なっていることがわかる。加震前の鉛直方向反力は約485kNであるので，500kN付近を境に，傾きが異なっている。

免震支承を設置した中央のRC橋脚上では，橋軸方向と橋軸直角方向の両方向とも弾性固定（免震支承による剛性で支持）としているが，両端部の橋脚

上（架台上）では，橋軸方向が可動で橋軸直角方向を固定としているため，免震支承の水平力－水平変位関係が描く履歴ループの面積は，橋軸方向の方が，橋軸直角方向よりも大きいことがわかる。

上下方向の鉛直力－鉛直変位関係は，免震支承NWよりもSWの方が複雑な地震応答となっている。図には示していないが，同様の傾向は，免震支承NEとSEにも現れている。これは，1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅周辺地盤上記録の加速度振幅の位相特性がこのような地震応答の非対称性を生じさせていると考えられる。

3. 免震支承のモデル化

後述する動的解析に用いる免震支承の非線形履歴モデルは，次の4種類を作成した。

1番目の非線形履歴モデルは，図-2に示した40%加震時の免震支承に生じた水平変位を設計変位として作成したバイリニアモデルで，実際の免震設計と同じ方法でその骨格曲線を定めた。

2番目のモデルは，加震実験から得られた非線形性を直接バイリニアモデルの骨格曲線とした。図-4は，1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅周辺地盤上記録3成分の地震動強度を8%，16%，24%，32%，40%と変化させて得られた水平力－水平変位関係から，求めた最大・最小荷重時の荷重と変位の値を整理したものである。加震実験より得られた値は，加震強度に応じて非線形性が現れていることがわかる。ここでは，

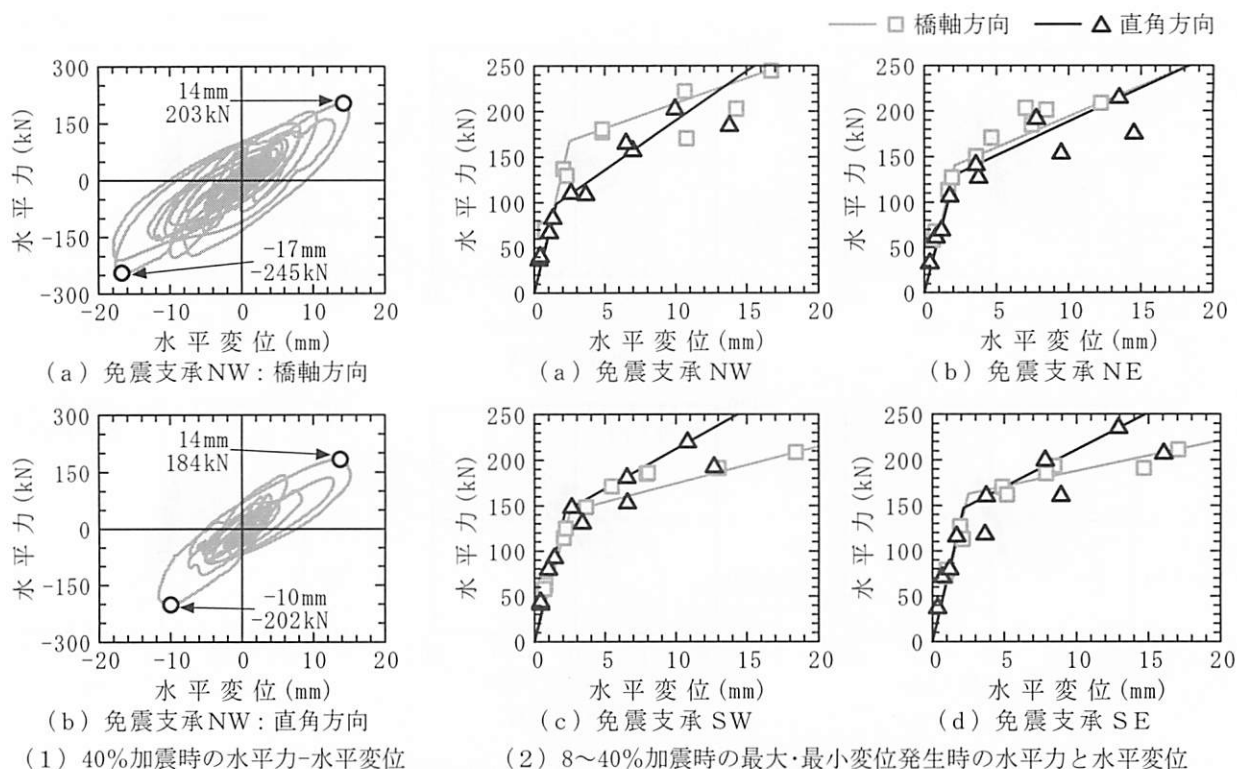


図-4 加震強度を変化させた免震支承の水平力と水平変位関係の変化

加震実験より得られた最大・最小荷重時の荷重と変位の値を近似した骨格曲線（図中の実線）を有するバイリニアモデルを作成した。

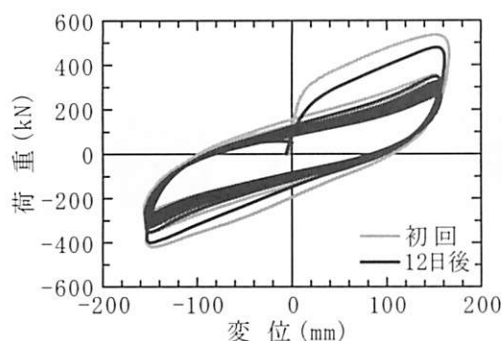
3番目のモデルは、加震実験から得られたせん断剛性が設計で想定したものよりも大きかった³⁾ことを考慮して、初期載荷における水平力-水平変位関係を用いて作成した。図-5は、E-ディフェンスでの加震実験を行う前に実施したせん断ひずみ175%の正負交番載荷実験結果（初回）とその12日後に実施した正負交番載荷実験結果（12日後）、E-ディフェンスでの加震終了後222日経ってから行った正負交番載荷実験結果（222日後）である。図中の(1)は加震実験に用いた免震支承と同じロットで製作されたものであるが、加震実験には使用していない免震支承である。加震実験は、2010年2月18日に行われており、初回の正負交番載荷実験は2010年1月中頃に実施されているので、初回の載荷から約1ヶ月が経過している。これより、加震実験時には、初期の復元力特性は回復していた¹⁰⁾とみなして、初期の水平力-水平変位関係を近似した双曲線モデルを作成した。

建築分野では、積層系ゴム支承の履歴の影響による剛性変化（最大経験ひずみ依存性）を考慮した解析モデルが提案されている^{7),8),9)}。ここでは、図-6に示す大鳥によって提案されている改良型Double Targetモデル^{9),12)}を4番目の非線形履歴モデルとして

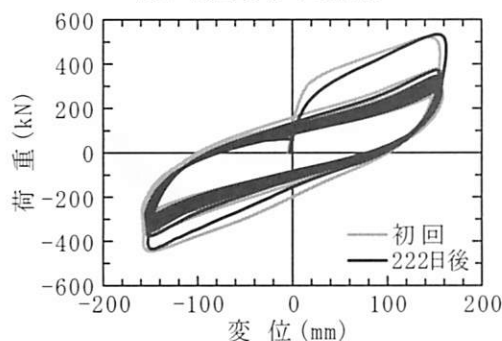
用いた。大鳥らのモデルは、建築（原子力）に用いる免震支承に対する実験結果に基づいて作成されたモデルであり、橋梁に用いる免震支承とは異なるが、初期の骨格曲線と定常部の骨格曲線の両方を考慮できるモデルとして採用した。前述したように、最近、吉田らは橋梁の免震支承を対象とした、最大経験ひずみ依存性を考慮した非線形履歴モデルを提案している¹¹⁾が、そのプログラム化には、著者らも至っていないので、著者らが既にプログラム化している建築分野で提案されているモデルを用いた。

図-6は、改良型Double Targetモデルを示したものである。改良型Double Targetモデルの基本則^{9),12)}を以下に示す。なお、初期骨格曲線は、初期載荷時と過去に経験した左右の最大せん断ひずみ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である。

- 1) 復元力特性は、初期骨格曲線 (k_1^i, k_2^i, k_3^i) と定常骨格曲線 (k_1^s, k_2^s, k_3^s) の2本の骨格曲線と履歴曲線で定義する。
- 2) 最大経験ひずみの大きさによる履歴曲線の変化は、正側と負側で別々に考える。
- 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、最大経験ひずみを超える場合には、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 で初期骨格曲線を



(1) 初回とその12日後



(2) 初回と実大三次元加震の222日後

図-5 加震実験に用いた免震支承の加震前後における正負交番載荷実験（最大せん断ひずみ175%）

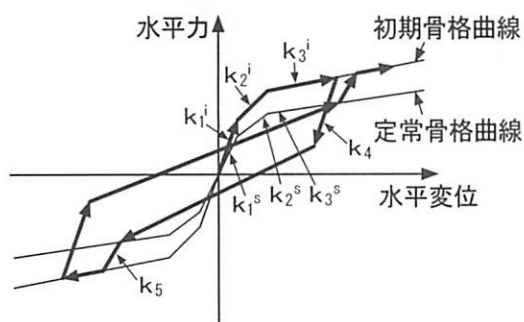


図-6 改良型 Double Target モデル^{9),12)}

指向して上昇するものとする。

E-ディフェンスで用いた免震支承では、図-6に示す勾配 k_5 や除荷時の履歴曲線の折れる点を規定するパラメータ等を求めるための実験を行っていないので、文献12)の値を参考に定めた。

4. 非線形履歴モデルによる地震応答の再現性

図-7は、40%加震時の免震支承に生じた変位を設計変位としたバイリニアモデル、8~40%加震時の免震支承に生じた水平方向の荷重-変位関係の非線形性に基づいて作成したバイリニアモデル、初期の荷重-変位関係を近似した双曲線モデルより得られた動的解析結果を、加震実験結果と比較する形で示

してある。比較したのは、橋脚頂部の水平2方向変位と免震支承NWの水平方向の荷重-変位関係である。

40%加震時の免震支承に生じた変位を設計変位としたバイリニアモデルは、橋脚頂部の地震応答、免震支承の地震応答ともに、その再現性が最も低いことがわかる。これは、免震支承に生じているせん断ひずみが約20%と小さいため、せん断ひずみ200~250%域を対象とした免震支承の設計モデルの作成方法では、免震支承に生じるせん断ひずみが小さい領域の地震応答を再現できないからである。免震支承の荷重-変位関係の形状は無視し、水平力や水平変位の値だけに着目すると、水平変位は過大に評価されているが、水平力は加震実験より得られた値に近似していることがわかる。

8~40%加震時の免震支承に生じた水平方向の荷重-変位関係の非線形性に基づいて作成したバイリニアモデルは、免震支承に生じる橋軸方向の水平力と水平変位とともに、小さく評価している。逆に、橋軸直角方向は、免震支承に生じる水平力と水平変位とともに、大きく評価している。このような結果になったのは、図-4に示すように、免震支承NWでは、橋軸直角方向の水平力-水平変位関係が橋軸方向よりもかなり早い段階で非線形化するようにモデル化されているからである。

初期の荷重-変位関係を近似した双曲線モデルは、免震支承に生じる水平力や水平変位の大きさや荷重-変位関係の形状を、前述した2つのモデルに比較して、加震実験に対する近似度合いが高いことがわかる。

図-8は、改良型Double Targetモデルによる地震応答と加震実験結果を比較したものである。改良型Double Targetモデルは、定常骨格曲線を繰り返し載荷時の平均的な値としてモデル化した場合と、繰り返し載荷の1回目のループでモデル化した場合の2ケースを検討対象とした。定常骨格曲線を繰り返し載荷時の平均的な値としてモデル化した場合は、免震支承に生じる水平力と水平変位を大きく評価しており、その結果、橋脚頂部に生じる地震応答の再現性も低いことがわかる。

定常骨格曲線を繰り返し載荷時の1回目のループでモデル化した場合は、橋脚頂部の地震応答の再現性は、他の非線形履歴モデルから大きく改善されていないが、免震支承に生じる地震応答の再現性は、荷重-変位関係の形状、水平力と水平変位の大きさとともに、他の非線形履歴モデルよりも加震実験結果に対する近似度合いが高いことがわかる。

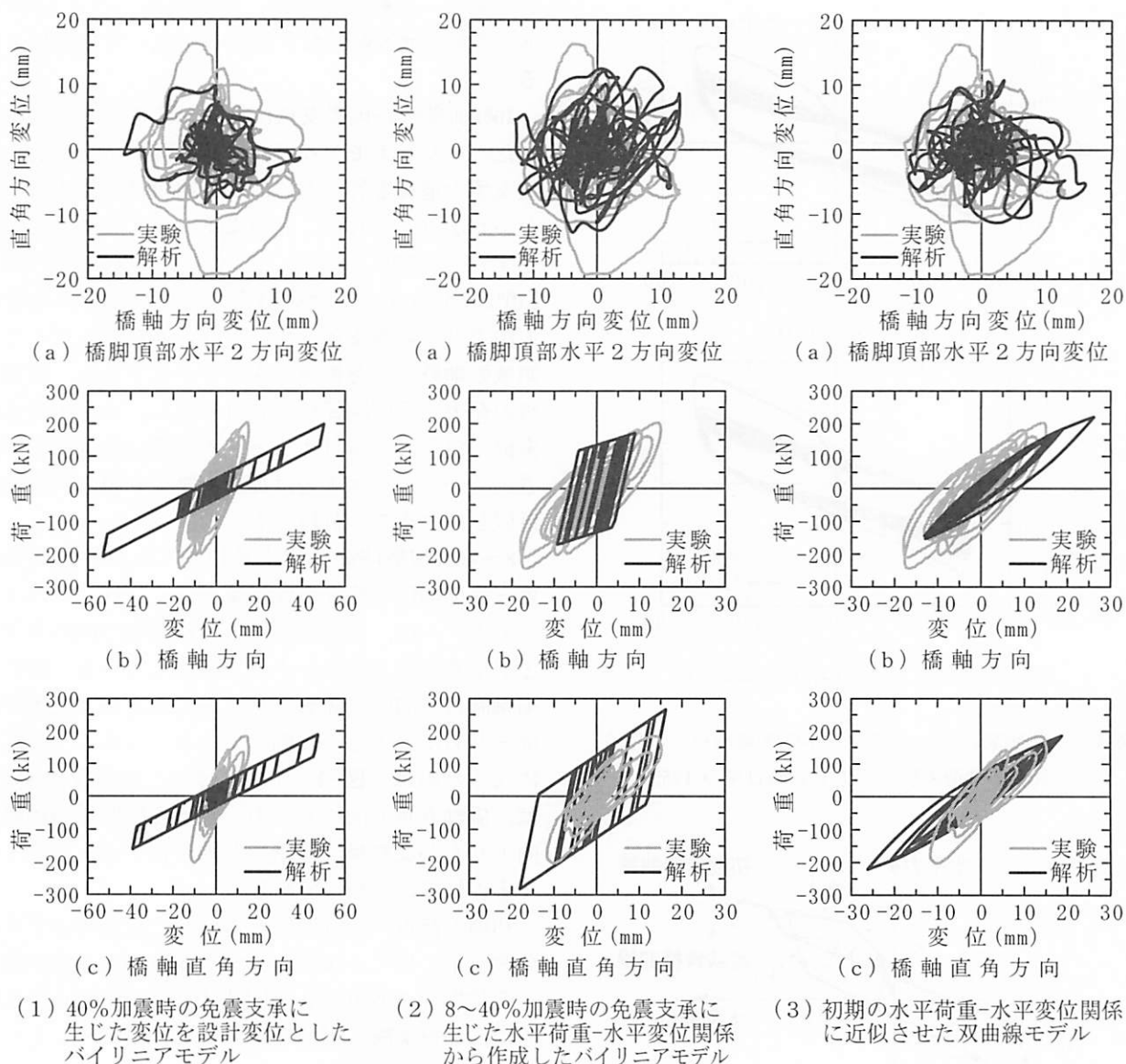


図-7 バイリニアモデルと双曲線モデルを用いた動的解析結果と加震実験結果の地震応答の比較

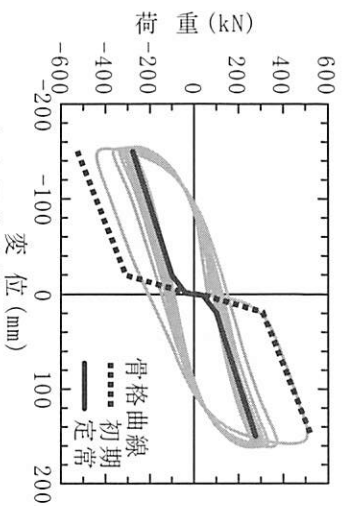
5. まとめ

E-ディフェンスを用いて実施された免震橋の地震応答は、支承に生じる変形量や過去に経験した最大ひずみによりその復元力特性が変化するという積層ゴム系支承の特性が原因で、事前に行った免震支承の設計モデルを用いた動的解析結果と大きく異なるものであった。本報告では、加震実験で計測された免震支承に生じた地震応答を、非線形履歴モデルでどの程度再現できるかを検討した。検討結果を以下に列挙する。

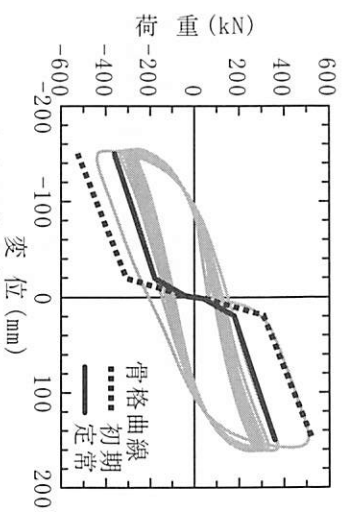
1) 加震実験で免震支承に生じた水平変位を設計変位として通常の免震設計と同様に作成したバイリニアモデルは、免震支承に生じる水平変位を大きく評価していたが、水平力の大きさは加震実験より得られた値に近似していた。水平変位の再現性が

低いのは、免震支承に生じたせん断ひずみが約20%と小さいにもかかわらず、免震支承に生じるせん断ひずみ200~250%を想定した非線形履歴モデルの作成ルールを準用したことが原因と考えられる。

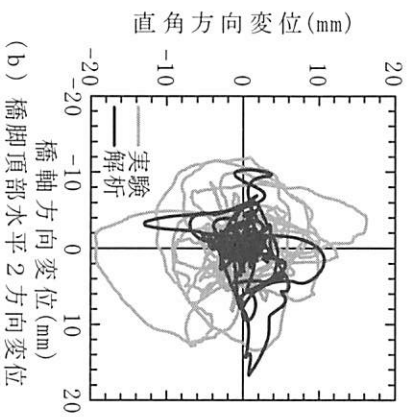
2) 加震強度を変化させた加震実験から得られた免震支承の水平方向の非線形特性（水平力と水平変位）から定めた骨格曲線を有するバイリニアモデルは、加震実験の主方向に相当する橋軸方向の免震支承の地震応答を過小評価していた。初期荷重の影響を検討する際に、初期骨格曲線を用いたバイリニアモデルを作成した検討が行われることがある¹³⁾が、今回の結果はそのようなモデルは、実際に生じる地震応答を過小評価している可能性があることを示しており、その評価には注意が必要である。



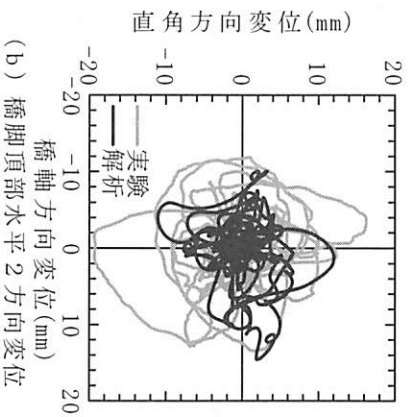
(a) 骨格曲線モデル化



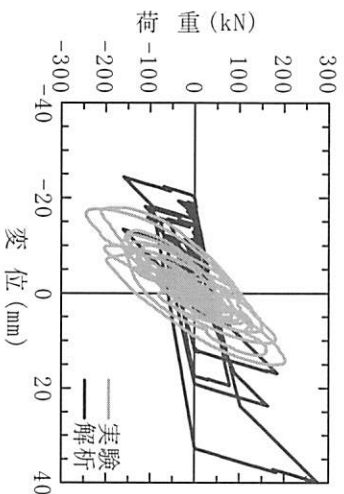
(a) 骨格曲線モデル化



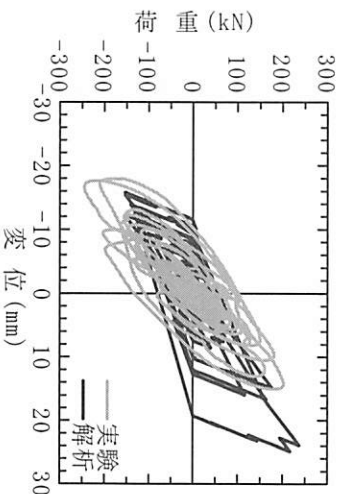
(b) 橋脚頂部水平2方向変位



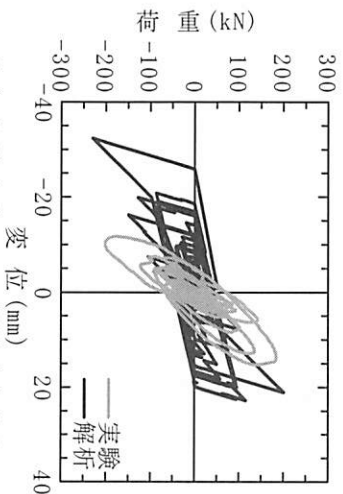
(b) 橋脚頂部水平2方向変位



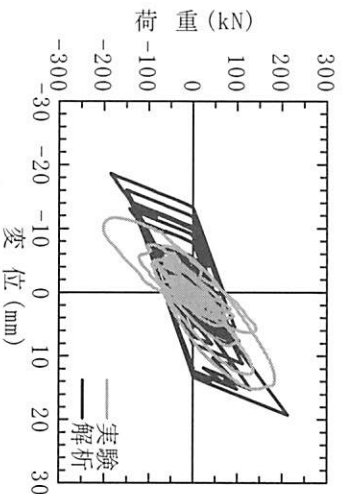
(c) 免震支承NW：橋軸方向



(c) 免震支承NW：橋軸方向



(d) 免震支承NW：橋軸直角方向



(d) 免震支承NW：橋軸直角方向

(1) 定常骨格曲線を繰り返し載荷における平均値でモデル化

(2) 定常骨格曲線を繰り返し載荷における1回目のループでモデル化

図8 改良型 Double Target モデルを用いた動的解析結果と加震実験結果の地震応答の比較

3)初期載荷の水平力ー水平変位関係を近似した双曲線モデルは、1)や2)よりも加震実験に対する近似度合いが高かったが、これは、免震支承に生じているせん断ひずみが約20%と小さい領域の地震応答だからと考えられる。

4)定常骨格曲線を繰り返し載荷時の1回目のループでモデル化した改良型Double Targetモデルは、橋脚頂部の地震応答の再現性は、他の非線形履歴モデルから大きく改善されているが、免震支承に生じる地震応答の再現性は、荷重ー変位関係の形

状、水平力と水平変位の大きさともに、他の非線形履歴モデルよりも加震実験結果に対する近似度合いが高いことがわかる。

免震設計が対象としている免震支承に生じるせん断ひずみが200~250%域の地震応答に、免震支承の最大経験ひずみ依存性が与える影響を実用上無視できるかどうかは、地震観測やE-ディフェンスのような実大三次元加震実験が最も精度が良い検証方法であるが、そのような手段を用いることができない場合は、解析的な検討によって免震設計の設計成果に与える感度分析を行うことになる。以上の結果より、そのような検討を行う場合には、免震支承の最大経験ひずみ依存性を考慮できる解析モデルを用いる必要があることがわかる。

最後に、復元力の回復特性について、考察しておく。大鳥らの研究¹⁰⁾によれば、免震支承に200%程度のせん断ひずみを与える正負交番載荷実験を行っておけば、その後時間が経過して復元力が回復しても初期載荷のような大きな荷重-変位関係とはならないとされているが、図-5の(2)に示す図は、最大せん断ひずみが175%と大鳥らの最大載荷変位よりも小さいが、222日後には、その復元力はほとんど初期の状態まで回復していることがわかる。このような違いが生じるのは、建築分野で用いる免震支承と橋梁で用いる免震支承の設計と製作および使用条件の違いに起因していると考えられる。

Mullins効果は、カーボンを充填した高減衰ゴムだけに生じる事象ではなく、未充填の純ゴムでも起こることが知られており⁴⁾、高分子材料を専門とする分野では旧くから確認されていた現象であるとともに、今でも重要で興味ある研究課題⁶⁾のようである。積層ゴム系免震支承を利用する分野の技術者が、無関心でいてよい事象なのかどうかを判断するためには、更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 中山学, 梶原浩一, 川島一彦: E-ディフェンスを用いたダメージフリー橋脚を目指す震動実験, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) 第I部門, pp.31-32, 2010.
- 2) 加藤亮二, 近藤誠一, 川島一彦, 中山学: 一定せん断変形状態における免震支承の鉛直引張実験~E-ディフェンス実験に向けての免震支承の事前要素実験~, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) 第I部門, pp.33-34, 2010.
- 3) 中山学, 川島一彦, 矢部正明: E-ディフェンスを用いた免震支承の震動実験, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) 第I部門, pp.35-36, 2010.
- 4) 深堀美英著: 設計のための高分子の力学, 技報堂出版, pp.338-339, 2000.
- 5) 袁涌, 青木徹彦, 青山和嵩: 高減衰積層ゴム支承の動的特性に関する研究, 愛知工業大学研究報告, 第40号B, pp.197-205, 2005.
- 6) 深堀美英: ゴムのカーボンブラック補強その2.従来のカーボン補強研究で解っていること, いらないこと, 日本ゴム協会誌, 第77巻, 第1号, pp.18-24, 2004.
- 7) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.505-506, 1993.
- 8) 李傑, 向井洋一, 橘英三郎, 井上豊: 高減衰ゴムを用いた免震支承の復元力特性が建物の応答に及ぼす影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.777-778, 1994.
- 9) 大鳥靖樹, 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, 第472号, pp.75-84, 1995.
- 10) 大鳥靖樹, 平田和太: 高減衰積層ゴムの復元力回復特性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.695-696, 1996.
- 11) 吉田純司, 杉山俊幸: 耐震設計における動的解析のための免震用積層ゴム支承の拡張バイリニアモデル, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.2, pp.238-251, 2014.
- 12) 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, 長岡技術科学大学博士論文, 1996.
- 13) 横川秀彰, 堺淳一, 星限順一: 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, 第16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.29-36, 2013.