

高減衰積層ゴム支承の履歴特性に着目した

免震橋梁の耐震性評価に関する研究

朴 敬勲¹, 梶田 幸秀²

長岡工業高等専門学校(前 九州大学)¹, 九州大学²

概要:本研究では、動的載荷実験を通じて高減衰積層ゴム支承(HDR)の実挙動を実験的に調査し、HDRの非線形性を考慮した新たな設計モデルを提案した。提案した履歴モデルはHDRの挙動を再現可能であり、正負方向の応答を独立に表現することができる。さらに、提案モデルを用いて実際の橋脚を対象とした地震応答解析を実施してモデルの妥当性を検証した。その結果、HDRの非線形性を考慮した高精度な耐震応答解析が可能であることが確認された。

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震において、積層ゴム支承は従来の鋼製支承と比較して著しく少ない損傷しか受けなかった。この結果、積層ゴム型免震支承は、橋梁を含む社会インフラの耐震性能向上を目的とした新設および復旧設計において優先的に採用されるようになった。高減衰積層ゴム(HDR)支承とは、固有の減衰性能を有するゴムと薄鋼板を交互に積層した構造を指す。この積層構造により高い鉛直剛性が得られ、鋼板との接着によって水平方向の変形を拘束することで大きな荷重に耐えることが可能となる。単一のゴムブロックと比較して、積層ゴム支承は著しく高い剛性を有し、鉛直方向の大荷重に対応できる。一方で水平方向にはゴム本来の柔軟性を維持し、地震時の大きなせん断変形に追従可能である。免震構造においては、積層ゴム支承により構造物の固有周期が延長され、地震動の卓越周期との共振が回避されることで、下部構造に伝達される慣性力を低減する効果がある。このように、水平方向の柔軟性と優れた減衰性能を兼ね備えた高減衰積層ゴム支承は、橋梁、病院、原子力発電所などの社会インフラにおいて開発・適用が進められてきた¹⁾。高減衰ゴムは、独特の物理的および化学的特性を有しており、エネルギー吸収と構造的健全性の両立が求められる免震支承や防音システムといった用途において、極めて重要な材料である。

高減衰積層ゴム支承(High Damping Rubber, HDR)における代表的な非線形性の一つに、マリンス効果(Mullins effect)によるせん断ひずみ依存性が挙げられる^{2,3)}。マリンス効果とは、ゴム材料に初回の荷重が加えられた際に、内部構造の不可逆的な損傷や高分子鎖の

再配列が生じ、力学特性に永久的な変化が生じる現象を指す。HDRに初回荷重が作用すると、ゴム内部におけるフィラーとマトリックスの結合の一部が破壊され、初期剛性が低下する。その結果、以降の繰返し荷重に対しては、支承の剛性が低下した状態で応答し、エネルギー吸収能力の低下およびヒステリシスループの狭小化が生じる。このような挙動により、剛性および減衰特性はせん断ひずみの大きさや繰返し回数に依存する変動特性を示す。マリンス効果を正確に考慮しない場合、HDRの性能は過小あるいは過大に評価される可能性がある。そのため、設計段階においては、この効果を反映した非線形材料モデルの導入が不可欠である。さらに、HDRにおける硬化(ハードニング)とは、特に地震動のような動的かつ大きな荷重に曝された際に顕著となる、剛性および変形抵抗の急激な増加を伴う非線形挙動を指す。この現象は、繰返し大変形によりゴム内部の高分子鎖が配向し、局所的に結晶化が進行することによって生じる^{4,5)}。ゴム材料には高分子鎖間に化学結合が存在し、これが構造的安定性を提供しているが、瞬間的な大荷重下では既存の架橋構造が強化されるか、新たな結合が形成されることにより、柔軟性が低下し剛性が増加する。特に高圧・高温環境下で繰返しせん断変形が加わると、ゴム分子の配列が再構築され、より構造化された硬い状態へと変化し、急激な剛性上昇を引き起こされる。

本研究の目的は、動的載荷実験結果に基づき、HDR支承の非線形特性、すなわちマリンス効果によるせん断ひずみ依存性および硬化挙動を考慮した高度なヒステリシスモデルを提案することである。実験では、縮小スケールのHDR支承供試体を製作し、橋梁上部構造

の鉛直荷重を模擬するために振幅を段階的に増加させた正弦波による動的载荷を行った。これらの実験は、「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」（日本道路協会）および ISO 22762-1: Elastomeric Seismic Protection Isolators - Part 1: Test Methods (2010) に準拠して実施された。得られた実験結果に基づき、従来のバイリニアモデルを拡張し、HDR 支承のせん断ひずみに応じて原点を挟んだ正・逆方向の挙動を独立に再現できるよう改良を加えた。さらに、最大経験変形依存性および硬化挙動を考慮するためのパラメータ定義と、それに基づくモデル化手法を提示した。最後に、実橋脚を対象とした地震応答解析を行い、従来のバイリニアモデルとの比較を通じて、提案モデルの実用性および妥当性を検証した。

2. 高減衰ゴム支承の特性検証試験

2.1 供試体の概要

図 1-2 に、特性検証試験のために設計された HDR 支承供試体およびその構成を示す。本供試体は、横浜ゴム株式会社により製作されたものである。表-1 には、HDR 支承供試体の代表的な諸元を示す。本研究で使用した HDR 供試体の断面積は $10,000 \text{ mm}^2$ であり、外側は厚さ 10 mm の保護ゴム層で覆われている。内部構造は、4 層の厚さ 4 mm の高減衰ゴム層と 3 層の厚さ 2.3 mm の補強鋼板からなり、これらが交互に積層された構成である。HDR 支承の性能は、積層ゴムの形状およびゴム材料の特性に依存する。積層ゴムの形状は、薄いゴム板と中間鋼板が交互に配置された層構造を特徴とする。

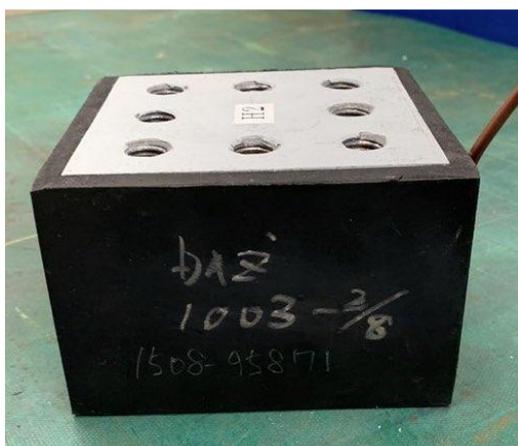


図 1 HDR 供試体

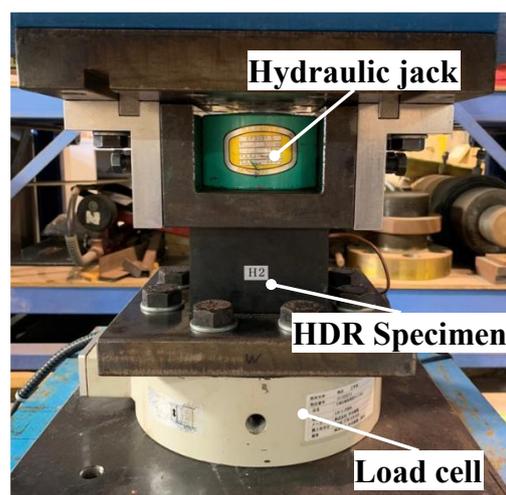


図 2 HDR 供試体

2.2 試験装置構成

HDR の特性検証試験は、九州大学において実施された^{6,7)}。試験に用いたハイブリッドアクチュエータの構成および仕様を、図 3 に示す。本ハイブリッドアクチュエータは、水平方向アクチュエータにより水平荷重を発生させ、油圧ジャッキにより一定の鉛直荷重を付加する構成である。日本道路協会の規定に基づき、上部構造からの荷重を模擬するため、供試体には 6 MPa の一定鉛直荷重が付加された。試験中は、HDR の両側においてせん断変位を計測するとともに、ロードセル上に供試体を設置し、作用荷重の測定を行った。



図 3 ハイブリッドアクチュエーター

2.3 試験計画および手順

本研究における HDR 供試体を用いた特性検証試験では、マリンズ効果に起因するせん断ひずみ依存性および、せん断ひずみがある値を超えた際に突発的に生じる硬化現象につ

いて調査を行った。HDR は、マリンス効果により履歴特性がせん断ひずみの大きさに依存する挙動を示す。すなわち、過去に経験した最大せん断ひずみに応じて履歴特性が変化する傾向がある。試験プログラムの詳細および各ステップを図 4 に示す。試験では、0.5 Hz の正弦波を HDR 供試体に対して 5 回繰り返して入力し、STEP 1 から STEP 4 まで段階的にせん断変形を付加した。各ステップの継続時間は 10 秒とし、各ステップ間には 30 分の休止時間を設けた。せん断変形は 50% から 250% まで段階的に増加させ、各ステップ終了後には小さなせん断変形から試験を再開し、HDR 支承の挙動に対する過去最大せん断変形の影響を解析した。積層ゴム支承におけるせん断ひずみは、ゴム層全体の高さと同方向変位に基づいて算出される。

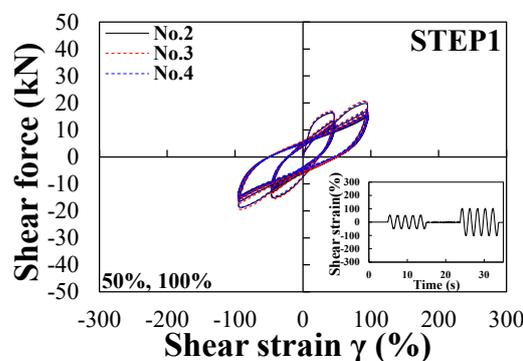
5 cycles (T=2s, f=0.5Hz)	Shear strain (Horizontal displacement)			
	STEP1	50% (8mm)	100% (16mm)	
STEP2	50% (8mm)	150% (24mm)		
STEP3	50% (8mm)	100% (16mm)	200% (32mm)	
STEP4	50% (8mm)	100% (16mm)	150% (24mm)	250% (40mm)

図 4 試験プログラム

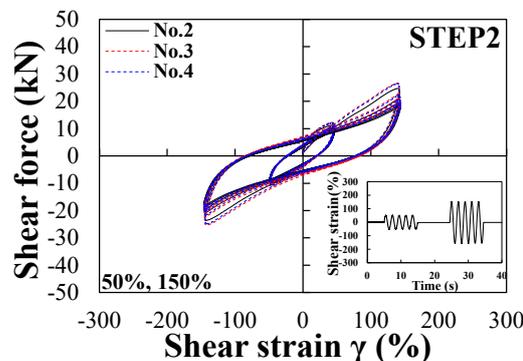
2.3 試験結果

図 5 に、STEP1 から STEP4 にかけて HDR 供試体に与えたせん断変形に対する実験結果を示す。せん断ひずみを段階的に増加させることで HDR 供試体の履歴挙動を調査し、3 体の供試体すべてにおいて一貫した結果が得られた。マリンス効果により、初回载荷後にはせん断力および履歴曲線の面積が減少し、とくに初めてせん断変形を経験した際に顕著なせん断力の低下が観察された。図 6 には、最初に与えたせん断変形の第 1 サイクルと第 3 サイクルにおける最大・最小せん断力の比較結果を示す。5 回繰り返されたサイクルのうち、第 1 サイクルは HDR 供試体の非線形特性を示し、第 3 サイクルは定常状態の履歴特性を表している。これらを比較した結果、最大せん断力は第 1 サイクルと比較して第 3 サイクルで、正方向では平均 21.9%、負方向では平均 17.2%減少した。この結果から、正方向でのせん断変形は負方向の挙動に影響を

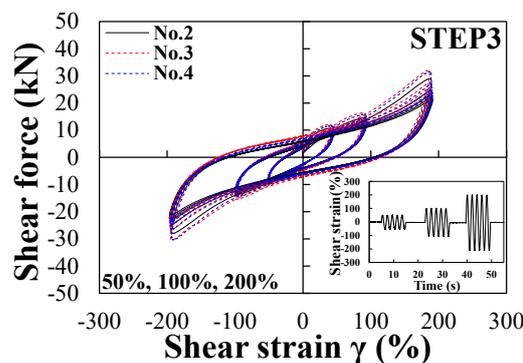
及ぼさず、せん断ひずみ依存性は原点を基準として正逆方向それぞれ独立に生じることが示唆された。STEP3 および STEP4 でそれぞれ 200% および 250% のせん断ひずみを与えた際には、履歴曲線上において明確な硬化現象が確認された。おおよそ 150% を超えるせん断ひずみで剛性の増加が認められた。第 1 サイクルにおける初期履歴と第 3 サイクルにおける定常履歴を比較したところ、初期降伏点以降で剛性が約 2 倍に増加し、初期履歴における硬化は定常履歴の約 1.25 倍であることが明らかとなった。以上の特性検証試験の結果から、HDR 支承の非線形挙動が確認された。初回サイクル後にせん断力が減少するマリンス効果が観察され、これは正・負双方の方向において同時に発生していた。



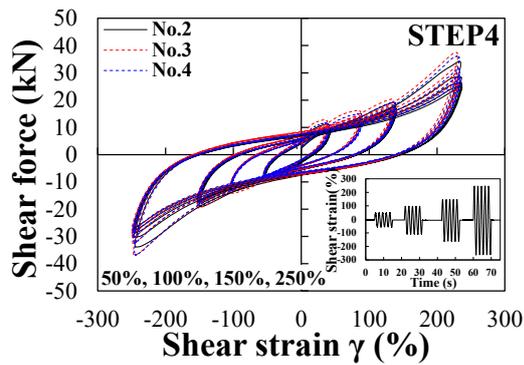
(a) STEP1 (±8mm, ±16mm)



(b) STEP2 (±8mm, ±24mm)

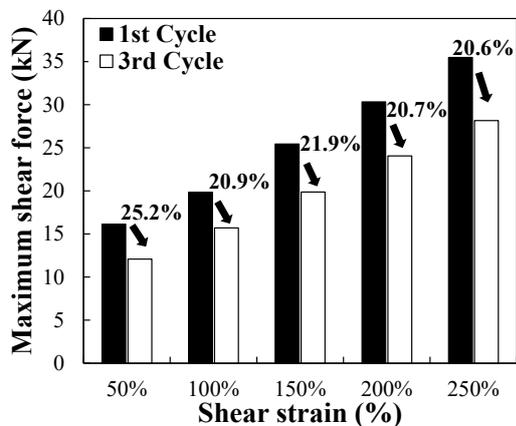


(c) STEP3 (±8mm, ±16mm, ±32mm)

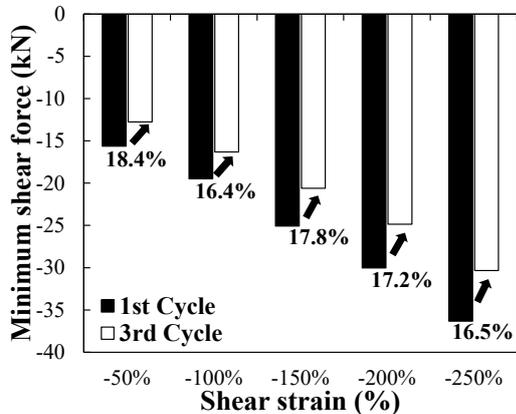


(d) STEP4 (±8mm, ±16mm, ±24mm, ±40mm)

図5 特性検証試験の結果



(a) 正方向



(b) 負方向

図6 初期せん断ひずみにおける最大・最小せん断力の比較

3. 非線形履歴モデル化

3.1 HDR 支承の履歴モデル

一般に、柱や梁などの構造部材が繰返しの水平荷重やモーメントを受ける際の力-変位関係を表現するために、バイリニアモデルが広く用いられている。このモデルは簡易的な履歴則であるが、比較的高い精度で解析を行

うことが可能である。図7には、バイリニアモデルから本研究で提案する Double-Target モデルの概念図を示す^{8,9)}。

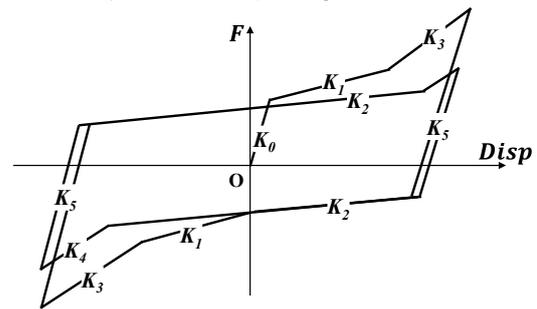
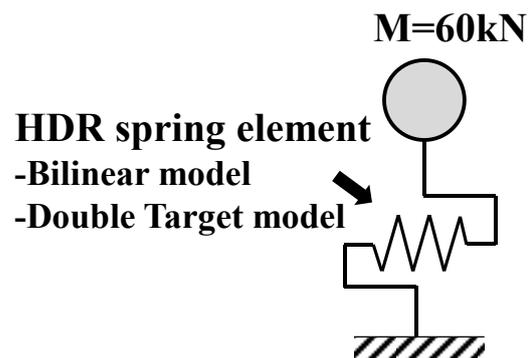
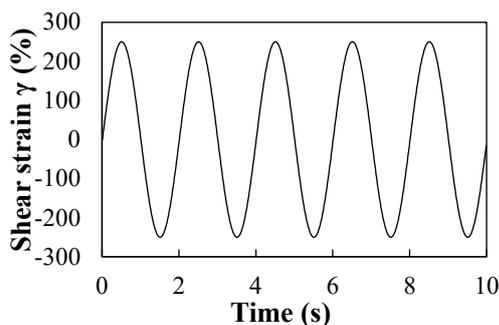


図7 履歴モデルの概念図

Double-Target モデルでは、初期ヒステリシスおよび定常状態ヒステリシスについて、初期剛性、二次剛性、復元剛性をそれぞれ個別に定義することで、マリンズ効果によるせん断ひずみ依存性を反映している。さらに、硬化開始点および硬化剛性のパラメータを設定することで、硬化挙動も表現可能とした。これにより、提案モデルはせん断ひずみ依存性および硬化特性の両方を再現できる。本研究では特性検証試験および力学特性の評価に基づき、正方向の最大せん断ひずみが負方向の挙動に与える影響は極めて小さいことが確認された。したがって、HDR 支承の非線形履歴挙動をより正確に再現するために、本研究で提案するモデルでは、正方向および負方向それぞれの最大せん断ひずみを独立に適用することを提案する。



(a) 1自由度系モデル



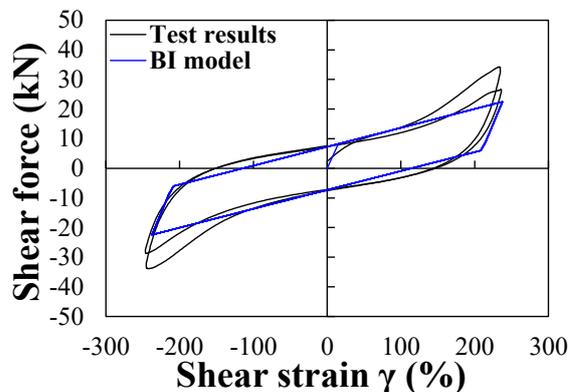
(b) 入力波形 (せん断ひずみ 250%)
 図 8 動的解析における解析条件

3.2 履歴モデルの妥当性検証

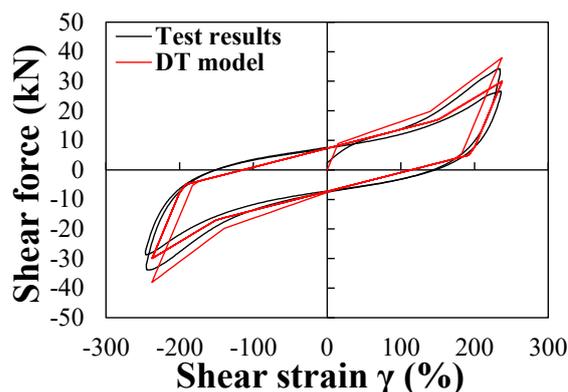
本研究では、HDR 支承におけるマリンズ効果および硬化現象を考慮した Double-Target モデルの妥当性を確認するため、強制変位による動的解析を実施し、従来の二線形モデルとの比較を通じて、特性検証試験結果の再現性を検証した。図 8 には、動的解析に用いた 1 自由度系の構造モデルおよび入力波形を示す。特性検証試験結果を再現するため、油圧ジャッキにより加えられた鉛直荷重と同等の 60 kN の鉛直荷重を単一材料点モデルに加え、HDR 支承の特性を反映したバイリニアモデルおよび Double-Target モデルをバネ要素に導入した。入力波形としては、HDR 供試体の非線形履歴特性が最も顕著に現れた特性検証試験の STEP 4 において加振された、せん断ひずみ 250% の正弦波を使用した。

図 9 に、バイリニアモデル、Double-Target モデルおよび実験結果の比較として得られたひずみ-せん断力関係を示す。各履歴モデルのパラメータは、特性検証実験の結果に基づいて導出された。図 9 (a) は、基本的なバイリニアモデルによる動的解析結果である。バイリニアモデルは HDR 支承の単純な挙動を再現することに焦点を当てているが、せん断ひずみに起因するマリンズ効果や硬化現象を適切に反映するには限界がある。一方、図 9 (b) は Double-Target モデルによる動的解析結果を示している。本モデルはバイリニアモデルを基に、マリンズ効果と硬化現象の双方を同時に考慮しており、実験結果により近いヒステリシス挙動の再現が可能である。特に、せん断ひずみ 250% における硬化特性および非線形ヒステリシス曲線を正確に再現しており、提案した Double-Target モデルが実験結果に基づいて設定されたパラ

メータを有効に反映できていることを示している。以上より、Double-Target モデルは従来のバイリニアモデルと比較して、せん断ひずみ依存性および硬化現象をより効果的に再現し、実験結果との整合性を高めていることが確認された。



(a) バイリニアモデル



(b) Double Target モデル

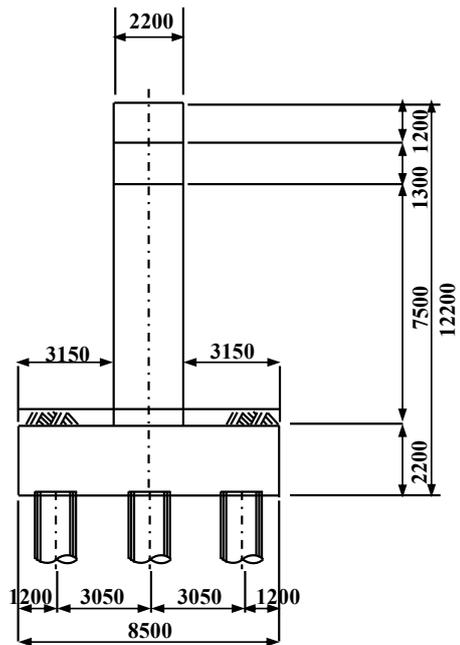
図 9 バイリニアモデル、Double-Target モデル、および実験結果の比較

4. 設計地震波を用いた地震応答解析

4.1 解析条件

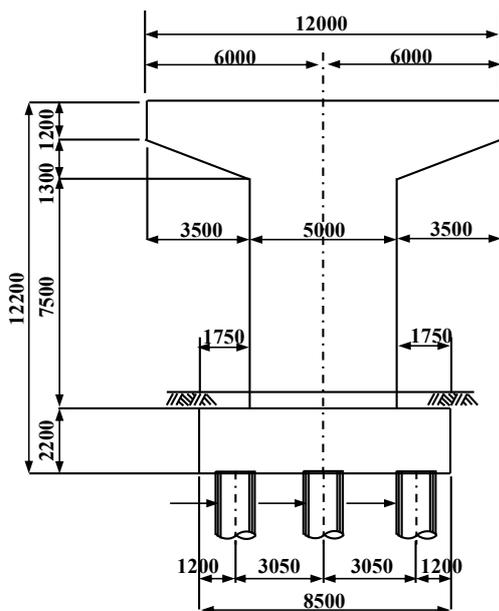
図 10 に示す構造は、『道路橋示方書・耐震設計編』に記載されている TYPE II 地盤上に位置する 5 径間連続非合成鋼桁橋である。原型橋梁には、地震時の免震装置として 5 基の積層ゴム支承 (RB) が使用されていた。RB は、ゴムと鋼板が交互に積層された構造を持ち、水平方向の柔軟性により地震力を低減しつつ、鉛直方向には必要な剛性を確保することで、構造の安定性を保っている。本研究では、免震装置のエネルギー吸収能力および減衰特性を考慮し、提案された非線形履歴モデルの妥当性を検討するために、RB を高減衰積層ゴム支承に置き換えた^{8, 10)}。支承の

変更の際して、橋脚の形状は変更せず、配筋レイアウトのみを変更し、橋脚断面の構成を設定した。HDR 支承は、設計上許容される最大せん断ひずみを 250%とすることを目標に設定した。動的載荷実験に用いた HDR 支承の履歴特性を橋脚に適用するために、応力ひずみ関係に相似則を適用して HDR 支承を設計した。特に、支承の一边を 100 mm から 735 mm にスケールアップしている。本研究の目的は、地震時における HDR 支承のマリンズ効果による剛性劣化および硬化現象が、橋脚および支承に及ぼす基本的な影響を明らかにすることである。そのため、橋脚モデルは単柱橋脚として設定し、HDR 支承の履歴モデルには、提案する履歴モデルと比較用として従来のバイリニアモデルを適用した。地震応答解析は非線形時刻歴応答解析により実施した。入力地震動は、地震動 TYPE1 および TYPE2 に基づいて選定した。なお、TYPE2 地盤は、岩盤や硬い砂礫層以外の地盤を指す。各地震動タイプにつき 3 波を選定し、各タイプの 3 波の解析結果を平均して評価を行った。解析には汎用構造解析プログラム TDAP III を用いた。バイリニアモデルおよび Double-Target モデルは、ユーザーサブルーチンとして実装し、同プログラムに組み込んだ。数値積分には、時間刻み 0.001 秒、Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) を用いた。図 11 は 橋梁の HDR 支承および橋脚の耐震応答解析用構造モデルを示す。



(b) 側面図

図 10 対象とする 5 径間連続非合成鋼桁橋の上部構造および橋脚



(a) 正面図

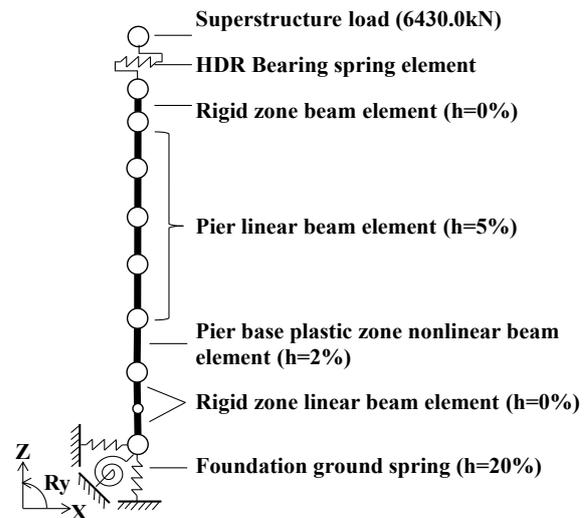
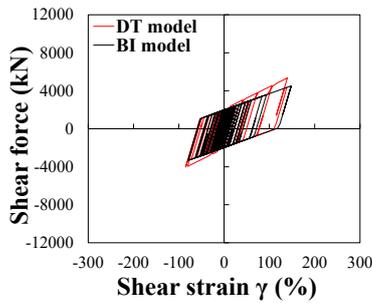


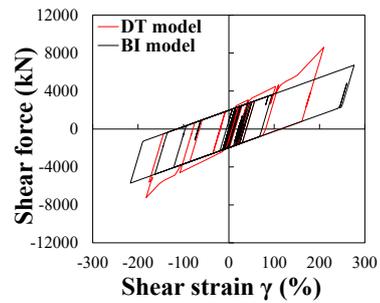
図 11 橋梁の HDR 支承および橋脚の耐震応答解析用構造モデル

4.2 解析結果

図 12 および図 13 は、それぞれ TYPE1 および TYPE2 地震動に対する HDR 支承の履歴応答を各ケースごとに示したものである。



(a) Case 1



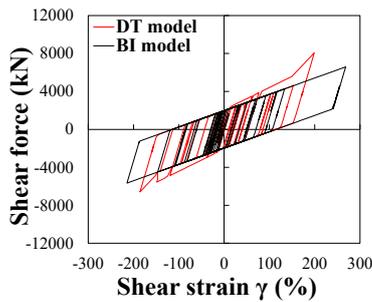
(a) Case 3

図 13 TYPE2 地震動に対する各ケースの HDR 支承の履歴応答

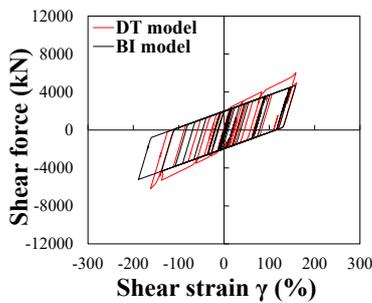
(a) Case 2

(a) Case 3

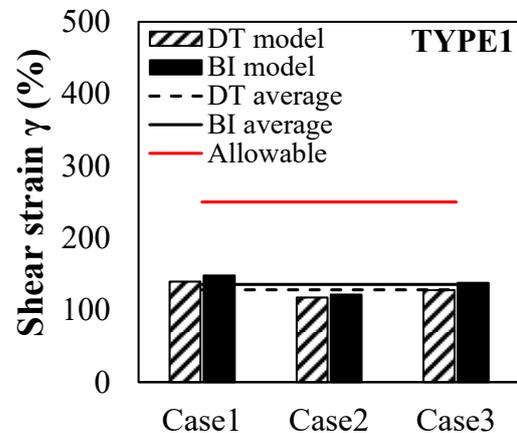
図 12 TYPE1 地震動に対する各ケースの HDR 支承の履歴応答



(a) Case 1

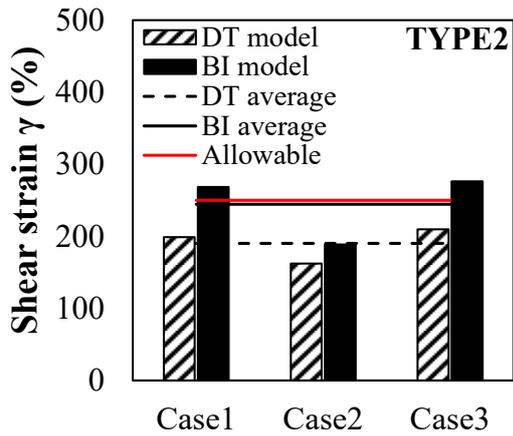


(a) Case 2



(a) TYPE1 地震動

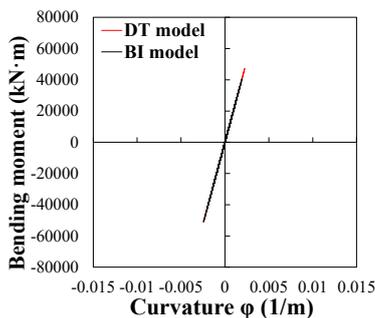
図 14 は、Double-Target モデルおよびバイリニアモデルに基づく各ケースの支承ユニットにおける最大せん断ひずみ応答の比較を示している。各履歴モデルによって得られたせん断ひずみの値は、TYPE1 および TYPE2 の平均最大せん断ひずみ値、および日本の道路橋示方書に定められた設計せん断ひずみと比較された。全体的な応答履歴曲線から、Double-Target モデルは特性検証試験で観察された HDR 支承のせん断ひずみ依存性および硬化挙動を適切に再現していることが確認された。地震応答解析の結果、TYPE1 の 3 ケースおよび TYPE2 の 3 ケースすべてにおいて、平均せん断ひずみは設計限界の 250% 以内に収まっていた。HDR 支承の非線形性および硬化効果を考慮するかどうかによって、Double-Target モデルとバイリニアモデルとの間に差異が見られた。硬化効果を考慮した Double-Target モデルでは、バイリニアモデルと比較してせん断ひずみが小さくなり、これは荷重増加時に変形を抑制する硬化挙動によるものであり、より保守的なひずみ予測を可能としている。



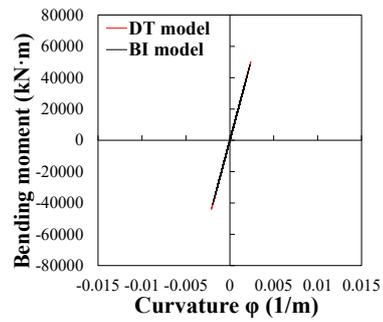
(b) TYPE2 地震動

図 14 各ケースの支承部における最大せん断ひずみ応答の比較

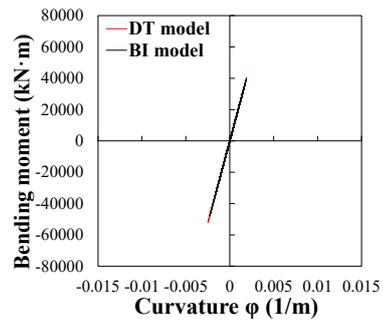
図 15 および図 16 に、HDR 支承の非線形履歴特性が橋脚の曲率-モーメント関係に及ぼす影響を示す。本解析においては、橋脚断面の塑性率を、塑性ヒンジとして設計される構造部材の耐震性能評価指標として採用した。対象橋脚の断面に基づき算出された設計許容塑性率は 1.695 であり、すべての解析ケースにおいて当該値を下回る結果が得られたことから、設計上の許容範囲が満足されたことが確認された。Double-Target モデルとバイリニアモデルにおける塑性率の違いは、HDR 支承のせん断ひずみ挙動と密接に関連している。Double-Target モデルは、材料の硬化特性を反映することでせん断ひずみを低減する一方、支承による変形抑制により橋脚下部における荷重集中が生じ、結果として塑性率が増加する傾向を示した。



(a) Case 1

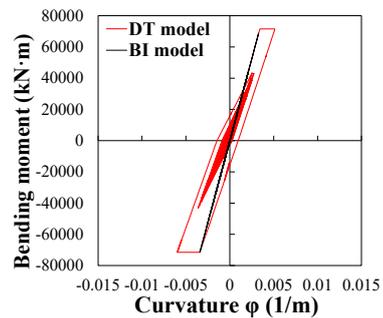


(a) Case 2

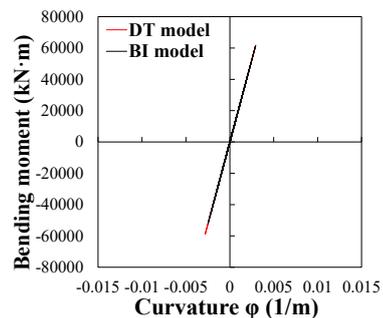


(a) Case 3

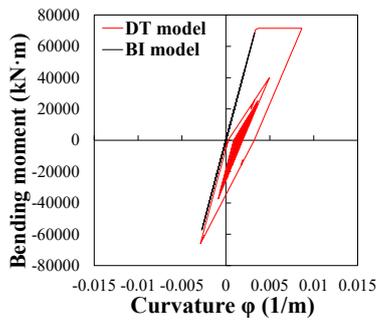
図 15 TYPE1 地震動に対する各ケースの HDR 支承の履歴応答



(a) Case 1



(a) Case 2



(a) Case 3

図 16 TYPE1 地震動に対する各ケースの HDR 支承の履歴応答

5. 結論

本研究では、せん断変形下における縮小スケール HDR 供試体の力学特性および非線形挙動を性能確認実験により評価した。その結果、Mullins 効果による剛性低下および硬化現象の発現が確認された。これに基づき、Double-Target モデルを新たに提案した。本論文で得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 特性確認実験の結果、3 体の供試体を用いた試験により、HDR 支承の非線形ヒステリシス挙動が明確に確認された。各せん断ひずみレベルにおいて、せん断力、吸収エネルギー、および等価剛性は初回サイクルで最大値を示し、2 回目サイクルで約 20% 程度低下した後、比較的安定した挙動を示した。これはせん断ひずみに依存する挙動であることを示している。特に、HDR 供試体の非線形性が最も顕著となったせん断ひずみ 250% においては、1 回目と 3 回目のサイクルを比較した結果、せん断力は 20.6%、吸収エネルギーは 15.6%、等価剛性は 18.5% 低下した。一方で、減衰係数にはサイクルによる変化が見られなかった。また、せん断ひずみ約 150% において、初期および定常状態のヒステリシスループにおけるせん断剛性が約 2 倍に増加する硬化現象が観察された。

(2) HDR 支承の非線形履歴挙動を再現するために、Mullins 効果と硬化現象の双方を同時に考慮した Double-Target モデルを提案した。モデルパラメータは、特性確認試験において非線形性が最も顕著となった 250% せん断ひずみ時のヒステリシス曲線に基づき決定された。提案モデルは、HDR 支承の実際の挙動およびせん断ひずみに対する依存性を高い精度

で再現可能であることが確認された。試験結果と Double-Target モデルの機械的特性を比較した結果、1 回目から 3 回目サイクルにかけてのせん断力、吸収エネルギー、等価剛性の低下率において、誤差はそれぞれ約 5%、10%、11% となり、比較的良好な一致が得られた。

(3) 免震橋の地震応答解析においては、HDR 支承の履歴挙動を表現するモデルとして、Double-Target モデルの方がバイリニアモデルよりも高い妥当性を有することが示された。Double-Target モデルは HDR 支承の非線形特性および硬化効果を考慮しており、せん断ひずみおよび橋脚基部の塑性率の両面において、より精緻かつ保守的な予測が可能となる。せん断ひずみ解析では、Double-Target モデルはバイリニアモデルと比較してより小さいひずみ値を示し、設計限界内の安全性を向上させる結果となった。これは、荷重増加時の変形を抑制する硬化効果によるものである。一方、橋脚基部の塑性率解析においては、Double-Target モデルの方がやや高い値を示したが、これは支承部でのひずみ抑制に伴う荷重集中が橋脚に発生し、局所応答をより現実的に再現した結果であると解釈される。以上より、Double-Target モデルは HDR 支承の実挙動をバイリニアモデルよりも高精度で再現可能であり、HDR 支承の設計においてより適した手法であると結論づけられる。

今後の課題として、地震応答時における急激なせん断変形に起因する応答のスパイク現象への対応が挙げられる。本研究では単一橋脚モデルにおいて顕著なスパイクは見られなかったが、多支点橋脚モデルや橋梁全体モデルにおいては発生の可能性があるため、これを考慮した解析を今後実施する予定である。また、本研究で提案した Double-Target モデルに加えて、既往研究にて提案された他のモデルとの比較検討も、今後の研究課題として取り組む予定である。

6. 謝辞

本研究は、HDR 研究会（川金コアテック株式会社、住友理工株式会社、日本鑄造株式会社、株式会社ブリヂストン、横浜ゴム株式会社）との共同研究の成果の一部である。また、本研究は令和 6 年度九州建設技術管理協会による「建設技術開発助成（プロジェクト名：

HAKF542100)」の支援を受けて実施されたものである。ここに深く感謝の意を表す。なお、本研究成果の一部は、以下の論文として学術誌に掲載された。「Kyeonghoon Park, Kunyang Wang, Yukihide Kajita, Taiji Mazda, Seismic response analysis of base-isolated piers considering the mechanical properties and nonlinearity of HDR bearings, Structures, Volume 75, 2025, Article ID 108687, ISSN 2352-0124.」

7. 参考文献

参考文献は以下の通りに記述してください。

- [1] Murota, Nobuo & Suzuki, S. & Mori, Takahiro & Wakishima, K. & Sadan, Bahadir & Tuzun, Cuneyt & Sutcu, Fatih & Erdik, M.. (2021). Performance of high-damping rubber bearings for seismic isolation of residential buildings in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 143. 106620. [10.1016/j.soildyn.2021.106620](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106620).
- [2] Teh TW, Tan CG, Jumaat MZ. Feasibility Evaluation of Novel High-Damping Rubbers as Energy-Dissipation Material under Axial Dynamic Load for Damper Devices. *Buildings*. 2022; 12(11):1917. <https://doi.org/10.3390/buildings12111917>
- [3] Chen B, Dai J, Song T, Guan Q. Research and Development of High-Performance High-Damping Rubber Materials for High-Damping Rubber Isolation Bearings: A Review. *Polymers*. 2022; 14(12):2427. <https://doi.org/10.3390/polym14122427>
- [4] Guo, Zhihao & Peng, Tianbo. (2024). Study on a Pseudo-Elastic Model for High-Damping Rubber. *Polymers*. 16. 3042. [10.3390/polym16213042](https://doi.org/10.3390/polym16213042).
- [5] Li, Feng & Peng, Tianbo. (2024). Developing a New Constitutive Model of High Damping Rubber by Combining GRU and Attention Mechanism. *Polymers*. 16. 567. [10.3390/polym16050567](https://doi.org/10.3390/polym16050567).
- [6] MAZDA, Taiji & OHTORI, Yasuki & UNO, Yoshifumi & SHIMABUKURO, Takeshi. (2015). EVALUATION ON SEISMIC RESPONSE CONSIDERING CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARING. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*. 71. I_198-I_209. [10.2208/jscejseee.71.I_198](https://doi.org/10.2208/jscejseee.71.I_198).
- [7] Koo, Gyeong-Hoi & Ohtori, Yasuki. (1998). Loading rate effects of high damping seismic isolation rubber bearing on earthquake responses. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 12. 58-66. [10.1007/BF02946534](https://doi.org/10.1007/BF02946534).
- [8] NAITO, Nobuyuki & MAZDA, Taiji & UNO, Hiroshige & KAWAKAMI, Masahide. (2017). SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF LRB CONSIDERING MULLINS EFFECT AND HARDENING. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*. 73. I_499-I_510. [10.2208/jscejseee.73.I_499](https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I_499).
- [9] Kyeonghoon Park, Taiji Mazda and Yukihide Kajita. (2023). Dynamic loading tests and analytical modeling for high-damping rubber bearings. *Earthquakes and Structures*. Volume 25, Number 3, September 2023 , pages 161-175. DOI: <https://doi.org/10.12989/eas.2023.25.3.161>
- [10] Xu Chen, Dario De Domenico, Chunxiang LI. (2023). Seismic resilient design of rocking tall bridge piers using inerter-based systems, *Engineering Structures*, Volume 281, 115819, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115819>.

受理日：令和7年5月13日