

免震支承（LRB）の Mullins 効果と ハードニング特性が耐震性に及ぼす影響

内藤 伸幸¹・松田 泰治²・宇野 裕恵³・川神 雅秀⁴

¹正会員 株式会社アーク情報システム グループリーダー（〒222-0033 横浜市港北区新横浜 3-22-17）

E-mail: nnaito@ark-info-sys.co.jp

²正会員 熊本大学大学院 先端科学研究部 教授（〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1）

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

³正会員 オイレス工業株式会社 技師長（〒541-0053 大阪市中央区本町 4-6-7）

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

⁴フェロー会員 合同会社 防災構造工学研究所 代表（〒811-2202 福岡県糟屋郡志免町志免 1-13-5）

E-mail: masahide09210715@hotmail.co.jp

現行の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編では、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）を適用した免震橋梁の動的照査において、LRB の復元力特性を有効設計変位に対して割線剛性またはバイリニアでモデル化することを推奨している。しかし実際の復元力特性は、最大経験ひずみに依存し（Mullins 効果）、かつせん断ひずみが大きくなるとハードニングが生じることも確認されている。大規模地震に対する耐震性を評価する場合には、これらの復元力特性を適切に評価して動的解析を行うことが重要と考えられる。本研究は、LRB の製品検査の結果に基づいて新たな履歴モデルを提案し、現行の設計で用いられるバイリニアモデルとの比較検討を行ったものである。

Key Words: LRB, isolation bearing, Mullins effect, hardening, tri-linear model

1. はじめに

現行の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹⁾では、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）を適用した免震橋梁の動的照査を行う際に、そのモデル化について次のように記載している。

「レベル 2 地震動に対する許容変位を振幅とした一定振幅に対する 5 回以上の正負交番繰り返し載荷実験結果に基づき、この履歴特性を適切に考慮できるようにモデル化する必要がある」

一般には LRB の履歴特性をバイリニアの非線形履歴モデルとして解析しているが、実際には Mullins 効果と呼ばれるゴムの最大経験ひずみ依存性により、初期載荷時の抵抗力が 2 回目以降と大きく異なることが知られている。

さらに許容変位以下であっても変形量が大きくなるにつれて水平力－水平変位の傾きである剛性が大きくなるハードニングの発現も確認されている。

LRB のハードニングを考慮した非線形履歴モデルの提案は過去にも行われている。高橋ら²⁾は、せん断ひ

ずみ 175%を超える領域についてハードニングを考慮し、設計せん断ひずみの大きさに応じてせん断剛性を割り増したバイリニアモデルを提案している。これは繰り返し載荷 5 回目の履歴を再現することを目的としたものである。前野ら³⁾は、せん断ひずみ 300%まで漸増繰り返し載荷試験を行い、試験結果を近似するトリリニアの式を提案している。ただし、供試体が 3 種類の形状に対しそれぞれ 1 個か 2 個と非常に少ないものである。

Mullins 効果を考慮した非線形履歴モデルとしては、高減衰積層ゴム支承（HDR）については、藤沢ら⁴⁾が初期載荷とそれ以降の定常載荷において異なる履歴曲線を与える Double-Target モデルを提案している。また大鳥ら⁵⁾は、これを曲線からマルチリニアにした改良型 Double-Target モデルを提案している。また吉田ら⁶⁾は最大経験ひずみとハードニングを考慮したモデルを提案し、LRB と HDR の特定の試験結果を同定して自らの提案するモデルに適用するためのパラメータを提示している。

Mullins 効果により支承に最初に大きな地震応答が生じるときには、免震橋においては免震支承が十分にエネルギー吸収性能を発揮する前に橋脚が塑性化することに

表-1 試験体形状および個数

平面形状(mm) 橋軸×橋軸直角	ゴム厚 (mm)	層数	鉛プラグ 面積比率 (%)	一次形状 係数 S_1	二次形状 係数 S_2	試験体数
□950×1000	26	5	6.9	8.8	7.3	12
□950×1000	25	6	6.9	9.1	6.3	2
□950×1000	21	8	6.9	10.8	5.7	8
□950×1000	25	7	6.9	9.1	5.4	6
□1000×1400	25	4	4.6	11.2	10.0	4
□1050×1250	26	5	10.0	10.0	8.1	2
□1050×1250	21	8	10.0	12.4	6.3	4
□1050×1250	25	7	10.0	10.4	6.0	2
□1250×1250	28	4	7.0	10.4	11.2	8
□1350×1250	24	4	6.4	12.7	13.0	4
□1350×1250	30	4	6.4	10.2	10.4	6
□1450×1450	29	3	7.1	11.7	16.7	8
□1600×2000	30	3	9.7	13.5	17.8	2
□1650×1250	30	3	7.2	11.1	13.9	10
□1750×1250	27	4	6.8	12.6	11.6	10
□1750×1250	30	4	6.8	11.4	10.4	6
□1750×1250	26	5	6.8	13.1	9.6	4

より、耐震性能に影響を及ぼすことが懸念される。

本研究では、LRB の製品検査のデータに基づき Mullins 効果とハードニング特性を考慮することができる非線形履歴モデルを提案し、多径間連続の免震橋の RC 橋脚を対象として、現行設計で多く用いられているバイリニアモデルとの適用性についての比較検討を行った。

2. 製品検査結果分析

LRB (17 種類) 合計 98 体の試験体形状と各形状の個数を表-1 に示す。これらは 2005 年から 2007 年にかけて行われた 12 連の鉄道橋を対象とした製品検査の結果である。すべての試験体にはせん断弾性係数 $G=10\text{N/mm}^2$ (一般に G10 と呼ぶ) のゴムが使用されている。

(1) 製品検査結果

製品検査結果は、「水平力-水平変位」の関係で得られるが、個々のゴム総厚とゴム有効面積を考慮して「せん断応力-せん断ひずみ」関係として整理を行った。製品検査結果の履歴を図-1～図-3 に示す。

せん断ひずみ 150%で繰り返し回数 6 回の試験が行われた後、同じ日にせん断ひずみ 250%で繰り返し回数 5 回の試験が行われている。

150%試験の 1 ループ目で 2 ループ目以降より大きな復元力が得られているが、250%試験では最大経験ひずみである 150%を超える範囲だけでなく、150%以下の範囲でも 1 ループ目で 2 ループ目以降よりも大きな復元力が得られていることが確認できる。

このことから、LRB が製品検査を受けた後に橋梁に設置され、その後地震を受けるまでには、1 ループ目の復元力が回復することが見込まれる。

(2) 履歴特性

トリリニア型の履歴を仮定して、250%試験結果から

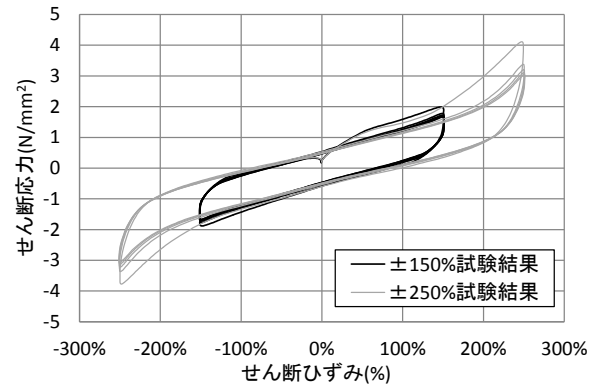


図-1 試験結果履歴図 (□950×1000 H130)

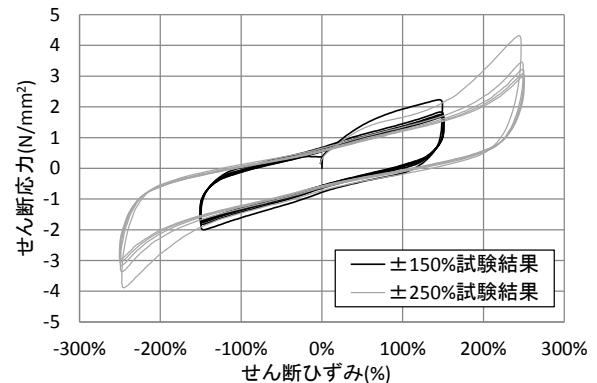


図-2 試験結果履歴図 (□1250×1250 H112)

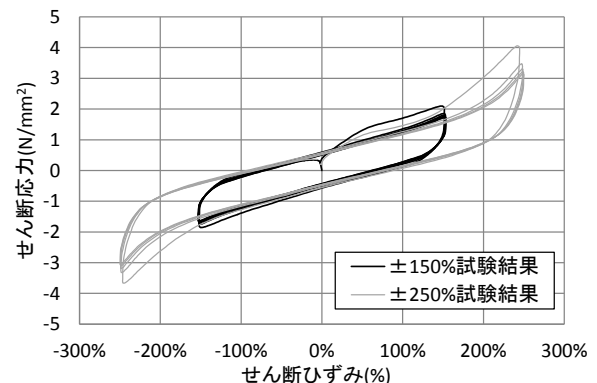


図-3 試験結果履歴図 (□1750×1250 H108)

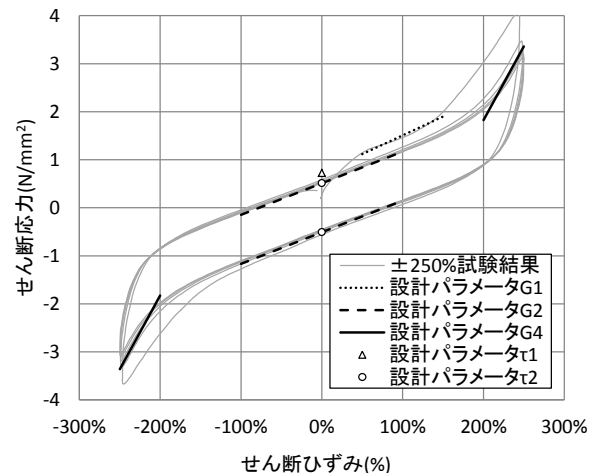


図-4 トリリニア型履歴のパラメータ

以下の方法で図-4に示す設計パラメータを決定した。

- ① 2 ループ目以降のせん断ひずみ±100%以下の区間の回帰直線を、バイリニアの二次剛性にあたる G_2 とし、この直線の切片応力を τ_2 とした。
- ② せん断ひずみ 2 ループ目以降の±200%以上の区間の回帰直線をハードニング時の剛性とみなし G_4 とした。
- ③ 1 ループ目のせん断ひずみ 50～150%区間の回帰直線を G_1 とし、この直線の切片応力を τ_1 とした。

ハードニング時の剛性 G_4 と二次剛性 G_2 の比がハードニングを表現するパラメータ、1 ループ目の切片応力 τ_1 と 2 ループ目の切片応力 τ_2 の比が Mullins 効果を表現するパラメータであると定義し、これについて整理を行っ

た。図-5 に鉛プラグ面積比率で分類した G_4/G_2 のヒストグラムを示す。全体としては正規分布とみなせるような関係になっているが、鉛プラグ面積比率と G_4/G_2 の相関は見られない。図-6 に同じ G_4/G_2 のヒストグラムを示す。こちらは二次形状係数 S_2 で分類したものである。 S_2 についても G_4/G_2 との相関は見られない。図-7 に試験時面圧で分類した G_4/G_2 のヒストグラムを示すが、試験時面圧との相関も見られなかった。なお、 G_4/G_2 の平均は 3.1、変動係数は 9.0%であった。図-8 に鉛プラグ面積比率で分類した τ_1/τ_2 のヒストグラムを示す。鉛プラグ面積比率が大きいほうが τ_1/τ_2 が大きい傾向はみられるが製品としてのばらつきと考えられるため、ここから何らかの関係式を導くのは難しい。図-9 に同じ τ_1/τ_2 のヒストグラムを

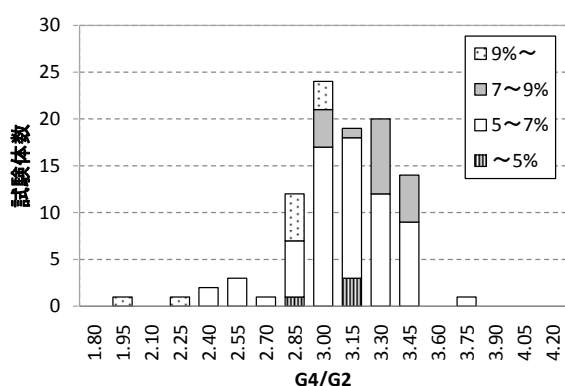


図-5 G_4/G_2 (鉛プラグ面積比率)

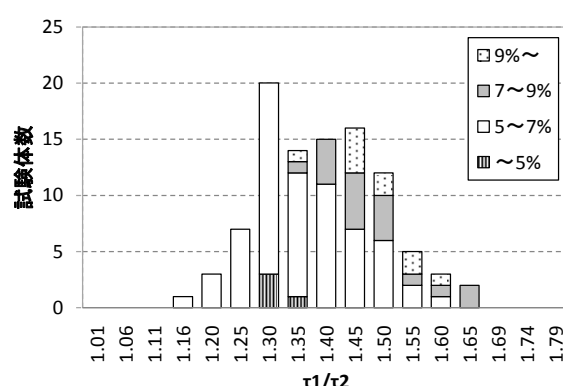


図-8 τ_1/τ_2 (鉛プラグ面積比率)

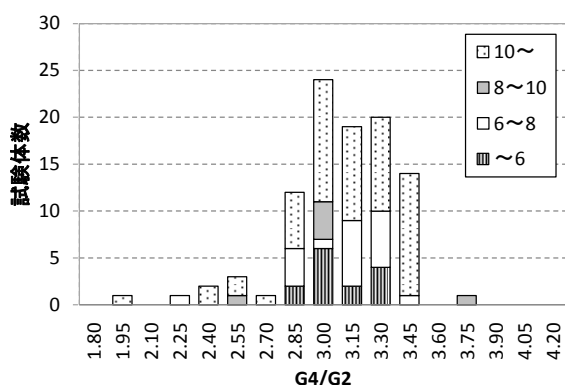


図-6 G_4/G_2 (二次形状係数 S_2)

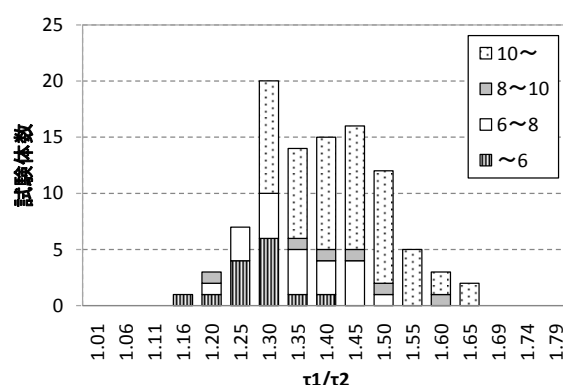


図-9 τ_1/τ_2 (二次形状係数 S_2)

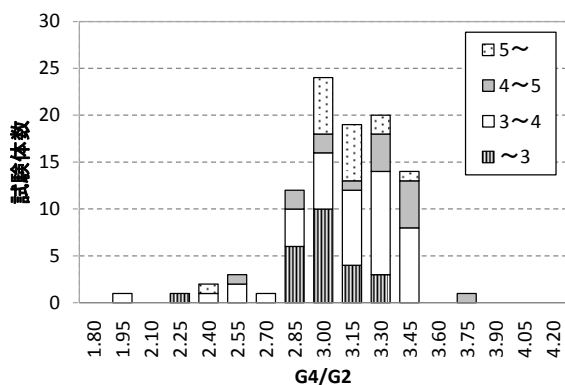


図-7 G_4/G_2 (試験時面圧 N/mm^2)

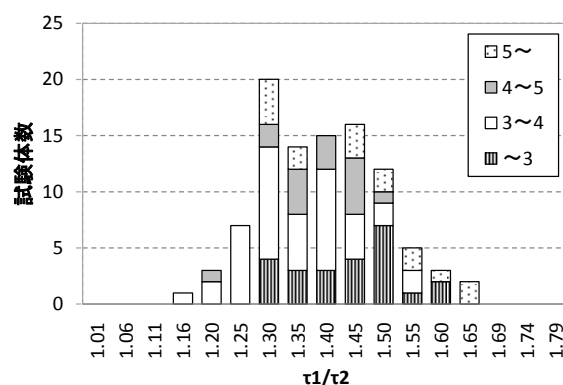


図-10 τ_1/τ_2 (試験時面圧 N/mm^2)

二次形状係数 S_2 で分類したものを示す。 S_2 が大きいほうが τ_1/τ_2 も大きい傾向にある。しかし、鉛プラグ面積比率で見た場合と同様に製品のばらつきと考えられ S_2 との関係を一一般化するには至らない。 図-10 に試験時面圧で分類した τ_1/τ_2 ヒストグラムを示す。 試験時面圧との相関は見られなかった。 なお、 τ_1/τ_2 の平均は 1.4, 変動係数は 7.4% であった。

3. 履歴モデル

(1) 履歴ルール

試験結果を模擬するために、1 ループ目と 2 ループ目で切片応力が異なるので、それぞれのハードニングを考慮できる非線形履歴モデルを考案した。 この非線形履歴モデルの名称は、藤沢ら⁴⁾ にならい Double-Target 型トリリニアモデルとした。

図-11 に考案したモデルの履歴の例を示す。 1 ループ目は、原点から A-B-C と進み、反転すると切片応力が τ_1 から τ_2 に低下し C-D-E と進む。 ハードニングが開始するひずみは 1 ループ目と 2 ループ目以降でそれぞれ設定できるようにした。 負側は 1 ループ目のため γ_1 からハードニングし E-F と進む。 さらに反転し F-G と進んだ後、正側は 2 ループ目のため γ_2 からハードニングし G-H-I と進む。

ハードニングを経験せずに反転した場合についての履歴ルールを図-12 に示す。 原点から A-B-C と反転すると切片応力が τ_1 から τ_2 に低下し C-D-E と進むが、最大経験ひずみ γ_{max} を更新すると切片応力が τ_1 に向かって回復し E-F-G-H と進む。 なお、初期剛性 G_0 と除荷剛性 G_5 、1 ループ目と 2 ループ目以降の第 2 剛性 G_1 と G_2 、1 ループ目と 2 ループ目以降のハードニング時の剛性 G_3 と G_4 は、それぞれ別の値とすることもできるが、以降の解析では簡略化して同じ値とした。

(2) 履歴確認

試験体の平面形状・ゴム層厚・ゴム層数・鉛面積等から現行設計に基づき、道路橋支承便覧⁷⁾ の式に基づきバイリニアの特性を計算し、 G_4/G_2 および τ_1/τ_2 の平均値を使って、Double-Target 型トリリニアモデルの履歴特性を設定した。 ハードニングを起こすひずみは、1 ループ目が $\gamma_1 = \pm 150\%$ 、2 ループ目以降が $\gamma_2 = \pm 200\%$ とした。

考案した履歴モデルを TDAPIII⁸⁾ のユーザ定義非線形モデルとして組み込み、試験の変位波形を 1 自由度系のせん断ばねモデルに強制変位として入力し解析を行い製品検査結果との比較を行った。

製品検査結果と解析結果の差異を履歴吸収エネルギーで確認したものを図-13～図-15 に示す。 いずれも製品検

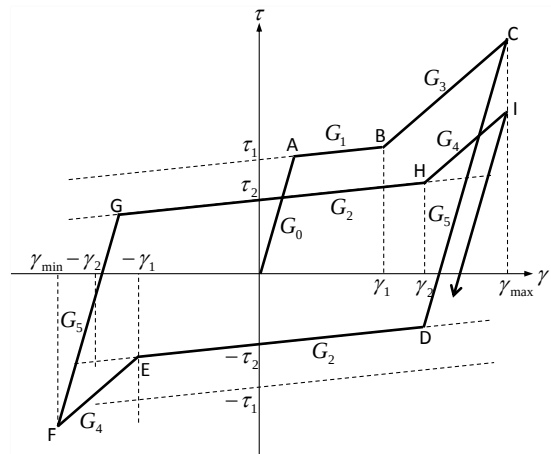


図-11 Double-Target 型トリリニアモデル

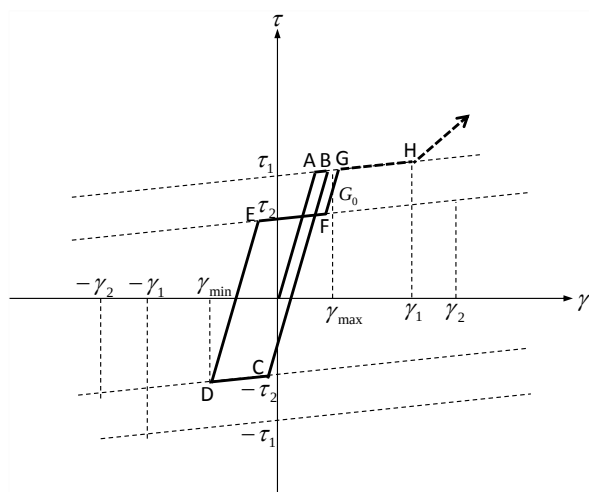


図-12 最大経験ひずみ依存による耐力回復

査結果より解析結果のほうがひずみエネルギーが小さい。

原因としては、解析では除荷剛性を直線としているが、実際には除荷履歴が大きく膨らんでいることが考えられる。この除荷剛性は、道路橋支承便覧の式で決まる一次剛性としており二次剛性の 6.5 倍の直線勾配としている。

履歴吸収エネルギーの試験結果と解析結果の比の分布を図-16 に示す。 図中の(a)(b)(c)はそれぞれ図-13～図-15 の結果が属する階級を示している。 すべての試験体のうち 9 割ほどが製品検査結果より解析結果のほうが履歴吸収エネルギーが小さい傾向にある。 履歴の比較を図-17～図-19 に示す。 図-17 と図-19 に比べると図-18 は、製品検査結果と道路橋支承便覧の式で決めた二次剛性の差が大きい、これがひずみエネルギーの差の大きさにも現れている。

最大反力の製品検査結果と解析結果の比を図-20 に示す。 平均値は 1.0 よりも小さいが、変動係数は 4% とばらつきの少ない結果となった。 個々の製品検査結果には G_4/G_2 が 9.0%, τ_1/τ_2 が 7.4% のばらつきがあるが、これを考慮していないにも関わらず、解析では製品検査結果を良く再現することができた。

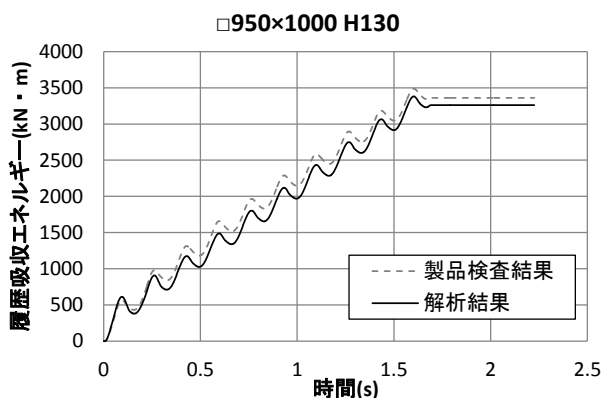


図-13 履歴吸収エネルギー (a)

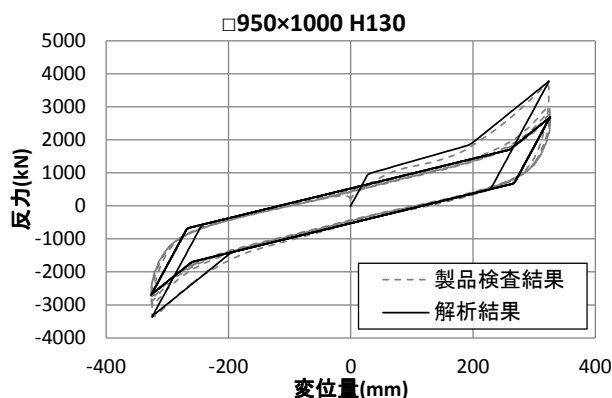


図-17 最大反力 (a)

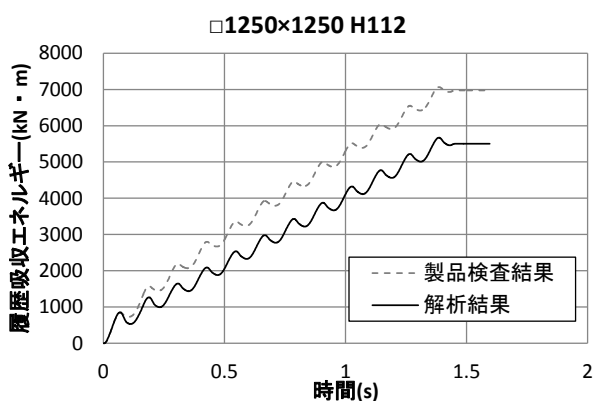


図-14 履歴吸収エネルギー (b)

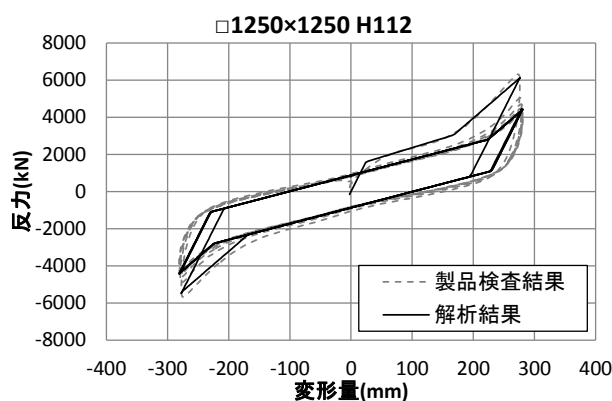


図-18 最大反力 (b)

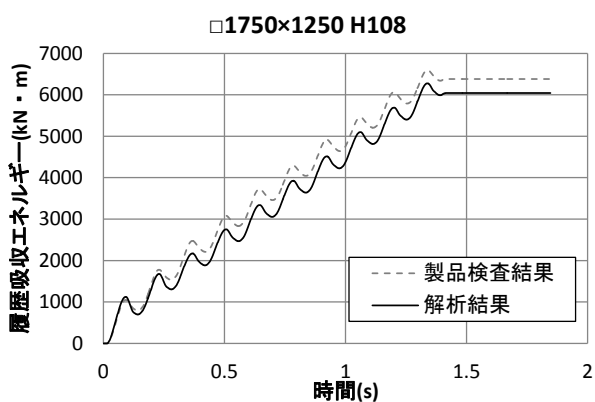


図-15 履歴吸収エネルギー (c)

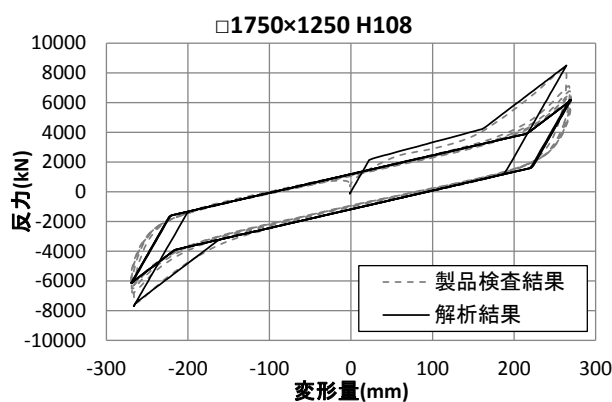


図-19 最大反力 (c)

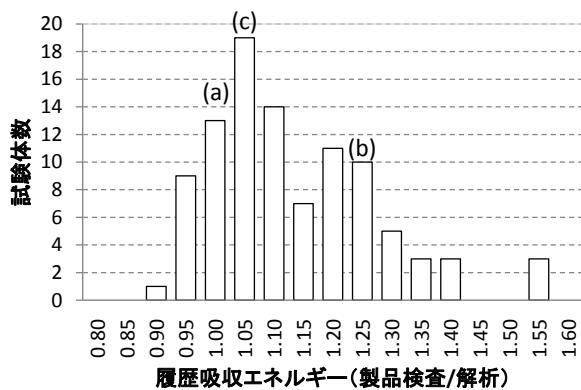


図-16 履歴吸収エネルギー (製品検査/解析)
(平均 1.13, 変動係数 12.2%)

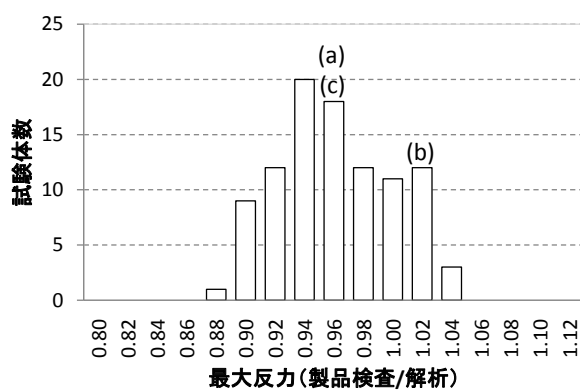


図-20 最大反力 (製品検査/解析)
(平均 0.96, 変動係数 4.0%)

4. 免震橋の応答評価

Ⅱ種地盤上の多径間連続桁の免震橋の RC 橋脚を対象として、提案モデルを適用して、現行の設計に用いられるバイリニアモデルとの応答比較を行った。

(1) 解析モデル

解析対象とした橋梁の一般図を図-21 に示す。この橋梁は、道路橋の耐震設計に関する資料⁹⁾に記載されている分散橋を免震橋に設定し直したものである。この橋梁の P1 橋脚について、LRB のせん断ひずみがレベル 2 地震に対する応答の 3 波平均で 250%になるように設定し、かつ橋脚の塑性率が許容塑性率を満たすように、橋脚の配筋を見直して基本ケースとした。解析モデルを図-22 に示す。橋脚の断面寸法は 5000mm×2200mm である。橋軸方向の曲げに対して主鉄筋 D38 の 2 段配筋となった。

上部構造の分担重量 6430.0kN は、一支承線に 5 基の LRB で支持している。支承は□780×780 でゴム層厚 32mm の 5 層、鉛プラグ面積比率 7.0%とした。形状係数は $S_1=5.7$ 、 $S_2=6.1$ である。

水平 1 方向加震での解析であるため、支承は純せん断の変形をするとみなしてモデル化している。

(2) 解析条件

現行設計による支承の等価剛性を用いて固有値解析を行った結果を表-2 に示す。1 次と有効質量比が 100%となる 4 次の固有振動数とひずみエネルギー比例減衰定数を用いて、図-23 に示す Rayleigh 減衰を設定した。ただし支承は履歴減衰のみを考慮した。

RC 橋脚は、基部の塑性ヒンジ部は、武田型モデルの曲げ非線形履歴 ($M-\phi$) とし、それ以外の部分は線形とした。

地震波は道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に記載されるレベル 2 地震動のタイプ I (以下 I-II) とタイプ II (以下 II-II) の各 3 波を用いた。

橋軸方向の水平 1 方向加震による時刻歴応答解析を行

い、タイプ I とタイプ II それぞれについて橋脚の最大塑性率と支承の最大せん断ひずみの評価を行った。

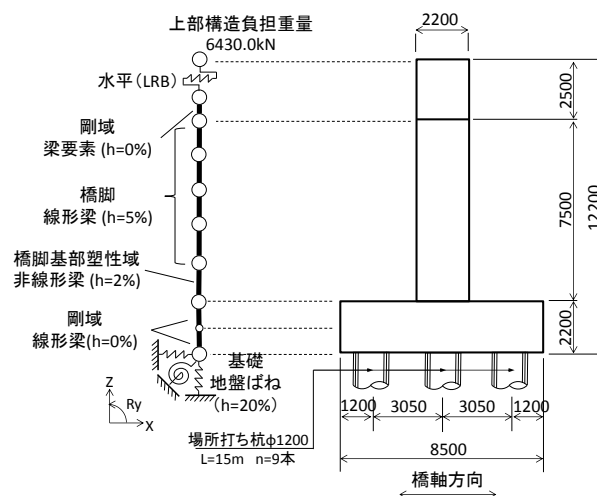


図-22 解析モデル

表-2 固有値解析結果

次数	周波数 f(Hz)	周期 T(s)	減衰定数 h	累積有効 質量比(%)
1	0.850	1.177	0.031	56
2	3.942	0.254	0.114	79
3	12.018	0.083	0.127	97
4	27.217	0.037	0.159	100
5	62.956	0.016	0.044	100

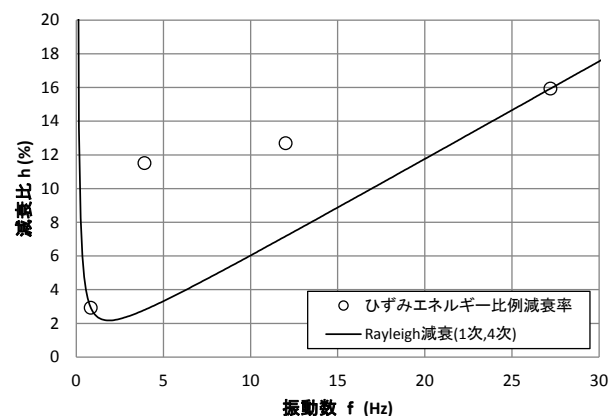


図-23 Rayleigh 減衰

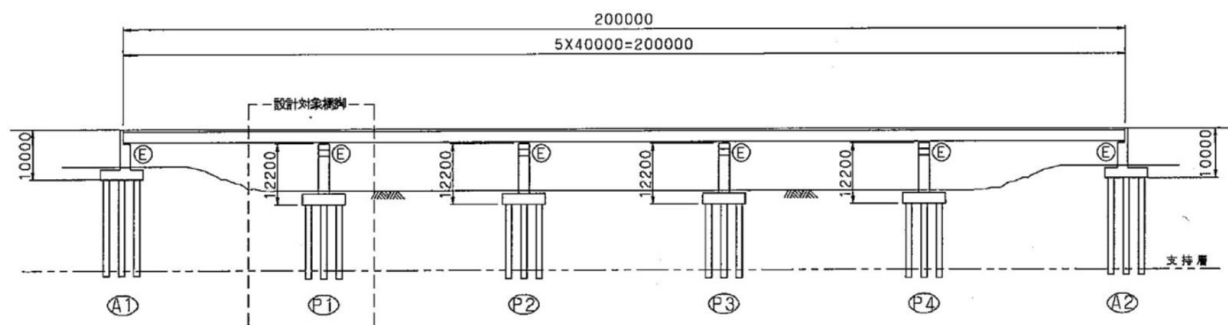


図-21 解析対象橋梁 一般図

(3) 解析ケース

支承の履歴モデルは、表-3に示す5ケースで解析を行った。ここで、**ケース①**現行は前述した基本ケースである。**ケース②**は、**ケース①**の履歴を元に製品検査の整理により求めた τ_1/τ_2 の平均値 1.4 で1ループ目の切片応力を割増したものである。**ケース③**は、**ケース①**の履歴から製品検査の整理により求めた G_1/G_2 の平均値 3.1 でハードニング領域の剛性を割増したものである。**ケース④**は、1ループ目の切片応力割増しとハードニング領域の剛性割増の両方を考慮した。

ハードニングが起こるせん断ひずみは、**ケース④**は、試験結果のとおり1ループ目が150%、2ループ目以降が200%とした。**ケース③**は、1ループ目と2ループ目以降の違いがないため中間の175%からハードニングする設定とした。**ケース⑤**文献は、高橋ら²⁾の提案した割増しバイリニアモデルのことである。

表-3 解析ケース

検討ケース	Mullins効果	ハードニング	非線形モデル
①現行	-	-	バイリニア
②Mullins	切片応力割増		バイリニア
③ハードニング	-	せん断剛性割増	トリリニア
④Mullins+HD	切片応力割増	せん断剛性割増	トリリニア
⑤文献	-	せん断剛性割増	バイリニア

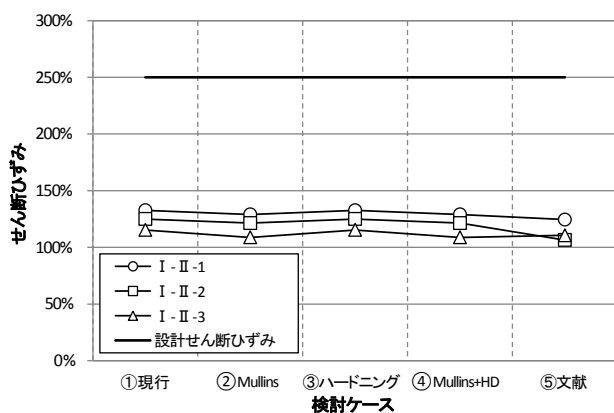


図-24 支承の最大応答せん断ひずみ (I-II)

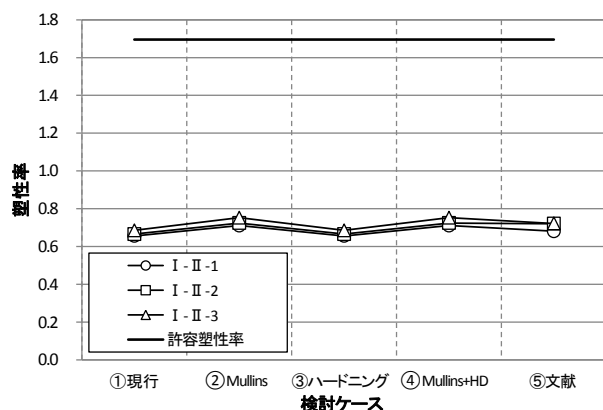


図-25 橋脚の最大応答塑性率 (I-II)

(4) 解析結果

図-24にI-II地震動に対する支承の最大応答せん断ひずみを示す。いずれもハードニングを起こしていない。

図-25にI-II地震動に対する橋脚の最大応答塑性率を示す。すべてのケースで弾性域に納まっており、支承のモデル化の違いによる影響はほとんど現れていない。

図-26にII-II地震動に対する支承の最大応答せん断ひずみを示す。いずれもハードニング領域に入っているため、各ケースで応答に違いが現れている。Mullins効果やハードニングを考慮することで支承の変形量が抑制されるという傾向が確認できる。

図-27にレベルII-II地震動に対する橋脚の最大応答塑性率を示すが、II-II-2だけは弾性域に留まるケースと塑性域に入るケースが混ざっており他の地震波と異なる傾向を示しているが、Mullins効果やハードニングを考慮することで塑性率が大きくなる傾向にあることが分かる。

図-28に**ケース①③⑤**についてII-II-1地震動に対する支承の応答履歴の比較を示す。ばね変形量0.128mがせん断ひずみ100%に相当する。**ケース①**に比べて**ケース③**と**ケース⑤**はハードニングを考慮したことにより支承の最大変形量が抑えられている。一方で最大ばね反力

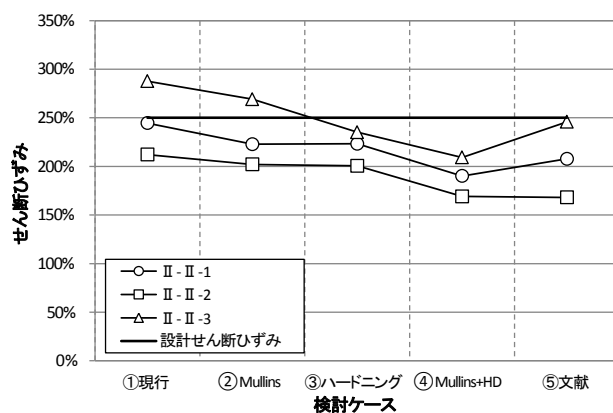


図-26 支承の最大応答せん断ひずみ (II-II)

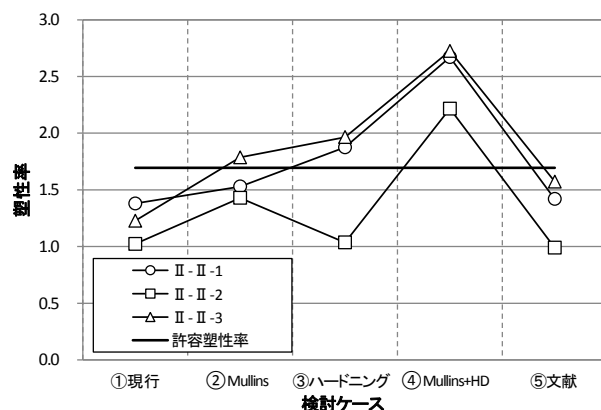


図-27 橋脚の最大応答塑性率 (II-II)

は、ケース①よりもケース⑤さらにケース③のほうが大きく、これにより橋脚に作用する荷重が大きくなることで、図-31 に示すとおり、相対変位も大きくなっている。

ここで相対変位は、橋脚の水平力 P と水平変位 δ で見たときの降伏変位と橋脚基部に設定した曲げ非線形 $M-\phi$ の降伏曲率に対応するように、橋脚基部と上部構造の水平変位の差に橋脚の基部の回転角に橋脚高さを乗じた転倒による水平変位加え、さらに支承の変形量を除いて計算したものである。また許容変位は塑性率が許容塑性率となるとき相対変位のことであり、なお支承変位は

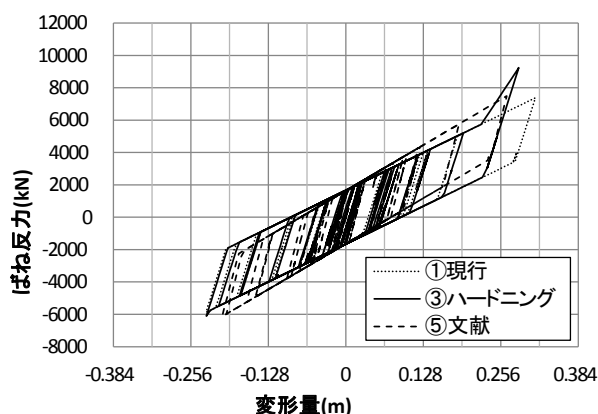


図-28 支承履歴比較 (II-II-1)

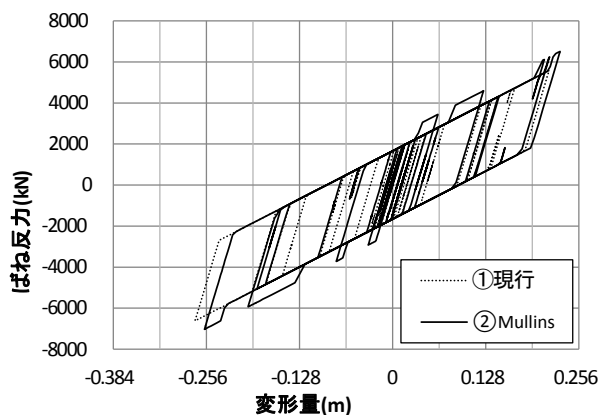


図-29 支承履歴比較 (II-II-2)

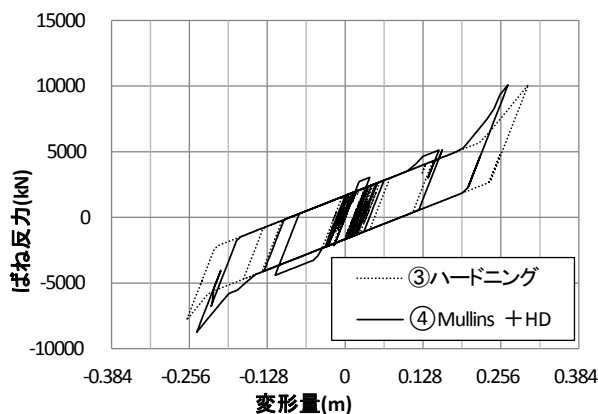


図-30 支承履歴比較 (II-II-3)

支承が加振方向負側に倒れるときを正、相対変位は橋脚が加振方向正側に倒れるときを正と定義した。

図-29 にケース①②の II-II-2 地震動に対する支承の応答履歴の比較を示す。ケース②は Mullins 効果を考慮したことによって最大経験ひずみを更新するところで剛性が大きくなるため変形が抑えられている。また最大ばね反力もケース①より大きくなるため、図-32 に示すように橋脚の相対変位も大きくなる。この例では、ケース①で弾性域に留まっていたものがケース②で塑性域に入ったことによりさらに相対変位の差が拡大している。

図-30 にケース③④の II-II-3 地震動に対する応答履歴

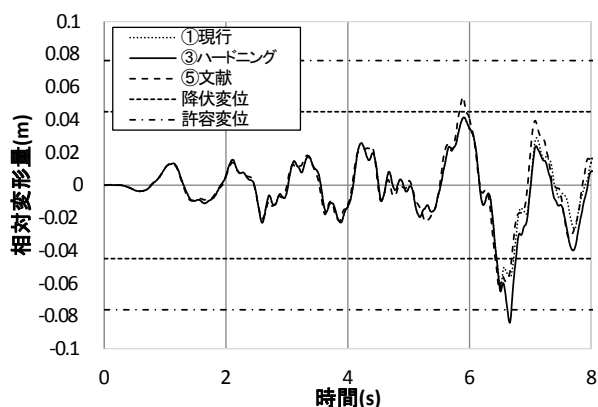


図-31 橋脚相対変位比較 (II-II-1)

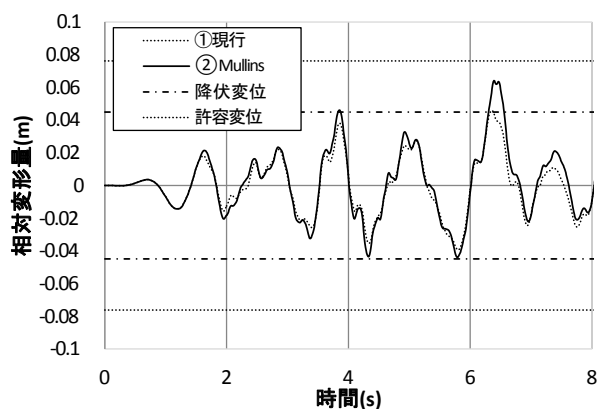


図-32 橋脚相対変位比較 (II-II-2)

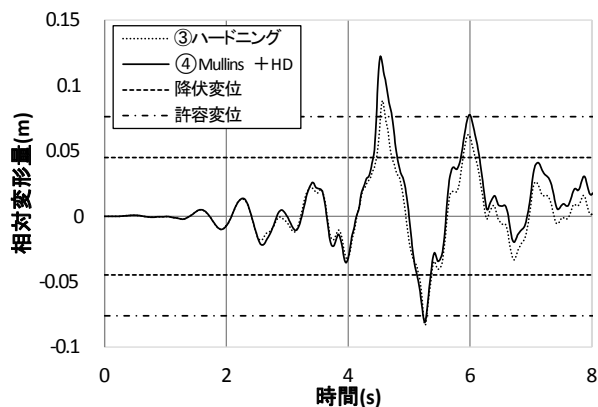


図-33 橋脚相対変位比較 (II-II-3)

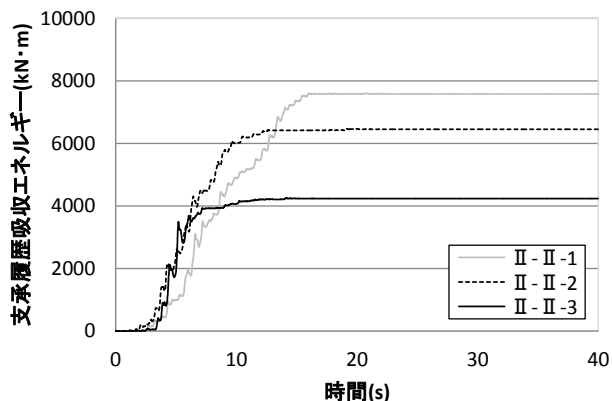


図-34 支承履歴吸収エネルギー (ケース②)

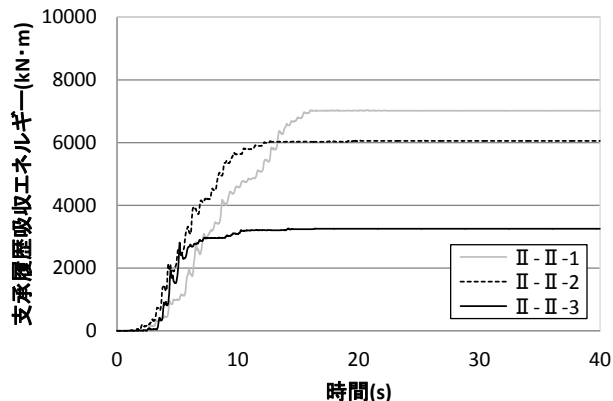


図-36 支承履歴吸収エネルギー (ケース④)

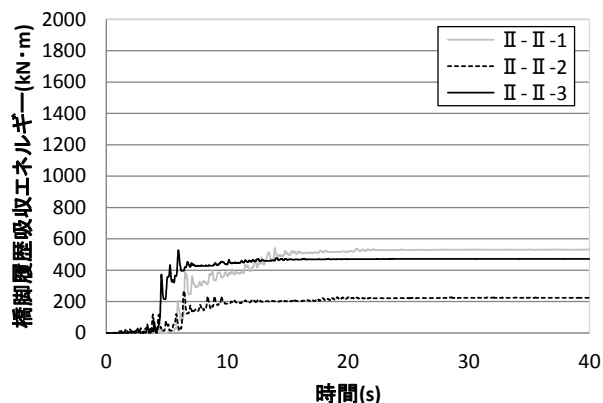


図-35 橋脚基部履歴吸収エネルギー (ケース②)

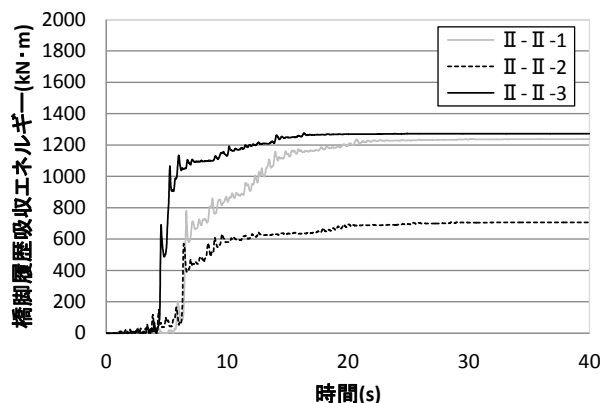


図-37 橋脚基部履歴吸収エネルギー (ケース④)

の比較を示す。ケース④のほうが1ループ目のハードニング開始を150%とケース③の175%より小さく設定したため、ケース④の方が最大変位はケース③より抑えられている。

単純に最大ばね反力だけを比較すると、ケース③のほうがケース④よりも大きいですが、図-33に示すように橋脚の最大相対変位はケース④のほうが大きいという結果になった。最初に橋脚が塑性化するとき相対変位が正側にシフトしてしまうため、2ループ目以降でこれを上回るような入力がなければ、最大相対変位は1ループ目で決まってしまう。

次に、支承と橋脚がともに非線形挙動をしているケース②とケース④について履歴吸収エネルギーの比較を行った。図-34にケース②の支承の履歴吸収エネルギーを示す。図-36に示したケース④と比較すると、どの地震波に対してもケース④の方が履歴吸収エネルギーが小さいことが分かる。このことからケース④はハードニングを考慮したことによって支承の変形が抑制されていることが確認できる。図-35にケース②の橋脚基部の履歴吸収エネルギーを示す。図-37のケース④と比較すると、ケース④の方がエネルギー吸収量が多いことが分かる。ケース②よりもケース④の方が相対変位が大きいことがエネルギー吸収量にも現れている。

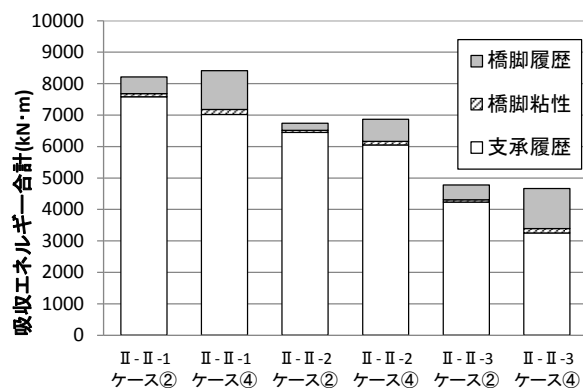


図-38 吸収エネルギー合計比較

図-38に吸収エネルギーの合計を比較したものを示す。ここで、橋脚履歴と支承履歴は解析の最終時刻における履歴吸収エネルギー、橋脚粘性とは、橋脚基部の梁要素の初期剛性から決めた Rayleigh 減衰によるエネルギー吸収量である。

どの地震波の場合もハードニングにより支承の変形が抑えらると、一方で橋脚基部が変形し、吸収エネルギーの合計が一定に保たれるというトレードオフの関係が確認できた。

7. まとめ

LRB の製品検査結果から、Mullins 効果とハードニングの特性を表現するパラメータを抽出し、形状や鉛比率との関係について確認を行った。これらの関係を一般化する式を得ることはできなかったが、それぞれ 9.0%と 7.4%の変動係数を持った正規分布とみなせるようなばらつきが得られた。

Mullins 効果とハードニングを考慮することができる非線形モデルとして、Double-Target 型トリリニアモデルを提案した。道路橋支承便覧の算出式で決まるバイリニアを製品検査結果から得られたパラメータの平均値を使って Double-Target 型トリリニアモデルに拡張することで製品検査結果を再現することができた。

さらに多径間連続の免震橋の RC 橋脚を対象として、提案モデルと現行設計のバイリニアとの比較を行った。結論として次のことが得られた。

- ① 橋脚が弾性域に留まっていれば、支承のモデル化の違いが応答に与える影響が小さい。
- ② 橋脚が塑性域に入る場合は、支承のモデル化の違いが応答に与える影響が大きい。
- ③ Mullins 効果とハードニングを考慮することにより支承の変形が抑制され、逆に橋脚変形が増加するという傾向が認められる。

ただし、今回は鉄道橋で使用した LRB の製品検査結果から Mullins 効果とハードニングを表現するためのパラメータを設定したが、道路橋向けの LRB についても同様の傾向が見られるかについて確認する必要がある。

また調査結果にはパラメータのばらつきが見られたが、検討解析にはこのばらつきを考慮していない。今後ばらつきの要因を検証し、実際の設計にどのように取り込むのかについても検討する必要がある。

ここに記載した RC 橋脚の解析結果は一つの例であり、他の設計条件でも支承のモデル化を変更することで結果にどのような影響が生じるのかの確認が必要である。

謝辞：本研究で使用したデータは独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構九州新幹線建設局より提供いただいたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.280-283，2012。
- 2) 高橋良和，篠原型二，星隈順一：免震支承の設計モデルの高度化，第 17 回性能に基づく橋両党の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2014。
- 3) 前野裕文，森下宣明，山根義洋，竹ノ内勇，鄭沂，坂本佳子：ゴム支承の繰り返し履歴特性のモデル化，土木学会第 56 回年次学術講演会，2001。
- 4) 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) 1993。
- 5) 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，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 1994。
- 6) 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.2，238-251，2014。
- 7) 日本道路協会：道路橋支承便覧，pp.95-102，2004。
- 8) アーク情報システム：TDAPIII バッチ版使用手引書，A2.7-1 - A2.7-14，2016。
- 9) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，2-1 - 2-139，5-1 - 5-36，1997。

(2016. ?? 受付)

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF LRB CONSIDERING MULLINS EFFECT AND HARDENING

Nobuyuki NAITO, Taiji Mazda, Hiroshige UNO and Masahide KAWAKAMI

In this research, non-linear model named Double-Target-Tri-Linear for LRB considering Mullins effect and Hardening is proposed based on the product inspection results at release. All bearings are made of 'G10' stiffness rubber, but shapes of the bearings are various. Parameters using in Double-Target-Tri-Linear model were evaluated from the results.

And seismic performance of a single pier model of highway-bridge was compared using the proposed model and bi-linear model. From the calculated results, the effect of difference of used model was relatively large in the case that the pier deforms up to plastic range.