

ゴム支承の繰り返しせん断変形性能を考慮した 免震設計に関する一研究

A study on a seismic isolation design
considered cyclic shear deformation performance of rubber bearings

竹内 孝徳[†], 鈴木 森晶^{††}, 青木 徹彦^{††}
Takanori TAKEUCHI, Moriaki SUZUKI, Tetsuhiko AOKI

A cyclic shear deformation performance tests have been carried out for three different types of actual size rubber bearings. Hysteresis curves are obtained at each shear deformation level for these rubber bearings as well as ultimate tear strength. Making simplified model from these test results, time-history response analysis is conducted using SDOF model to check the adequacy of current seismic isolation design. A new improved calculation method is proposed.

Key Words : Rubber-bearing, Shear deformation performance, Seismic isolation design, Time-history response analysis

1. 序論

1995年の兵庫県南部地震では高速道路橋脚などに甚大な被害が生じた。それ以降、大地震に対する構造物の耐震性能に関する研究が以前にも増して盛んに行われている。なかでも免震装置を用いて地震時における構造物の固有周期を長周期化するとともに慣性力を低減もしくは分散させることが、実構造物の耐震性向上に有効であると考えられる。そのため橋梁では、免震支承を用いた免震構造が急速に普及してきた。これに伴い、各研究機関、大学等で免震支承の基本性能や免震効果を明らかにする研究が数多くなされ、徐々に解明されつつある^{1)~3)}。

しかし、現在までのところ、実橋脚で使用される大型ゴム支承の大変形時における破断強度や使用限界を確認する性能試験は、十分行われていないのが現状である。

本研究では、3タイプの大型ゴム支承(HDR, NR, LRB)を用いて繰り返しせん断変形性能試験を行い、破断に至るまでのせん断変形挙動に着目し、各積層ゴム支承の特性を明らかにする⁴⁾。また、実験結果

を用いて免震支承を有する単体を1質点1自由度系にモデル化し、時刻歴応答解析を行い、免震設計における問題点を解明するとともに、これを改善する新たな算定方法を提案していく。

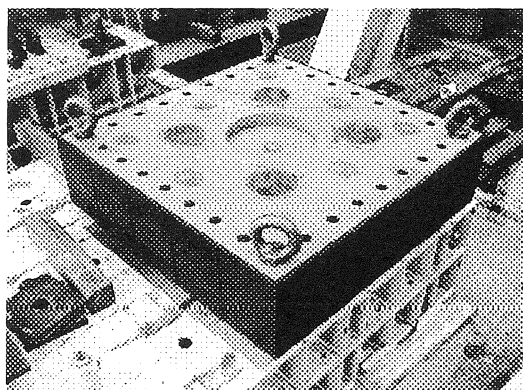


写真-1 実験供試体

2. 繰り返しせん断変形性能試験

2.1 実験供試体

写真-1に本研究で用いる実験供試体を示す。表-1に供試体諸元を示す。3種類のゴム支承(HDR…高減衰積層ゴム支承, NR…天然ゴム系積層ゴム支承, LRB…鉛プラグ入り積層ゴム支承)を各1体用意する。

[†] 愛知工業大学 建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 土木工学科(豊田市)

支承寸法は、平面形状□1000mm、厚さ 25mm×5 層で、
 ゴム間に挿入した鋼板の厚さはすべて 4.5mm である。
 いずれもせん断弾性係数 G12 の材料を用いた。

表-1 供試体諸元

供試体		HDR	NR	LRB
積層ゴムの設計寸法	mm	1000	1000	1000
ゴム層厚・積層数	mm	25×5	25×5	25×5
ゴム総厚さ	mm	125	125	125
等価剛性	kN/mm	9.408	9.440	9.562
等価減衰定数	%	13.9	—	14.7
鉛プラグ	mm	—	—	φ140
支承の面積	mm ²	1,000,000	1,000,000	938,425
鉛直荷重	kN	6,000	6,000	5,630

* せん断ひずみ量 100%=水平変位 125mm とする

2.2 実験載荷装置

図-1 に載荷装置を示す。載荷装置には、鉛直方向
 に 4000kN アクチュエータを 4 基、水平方向に 4000kN
 アクチュエータを 4 基、全 8 基を使用し載荷を行っ
 た。

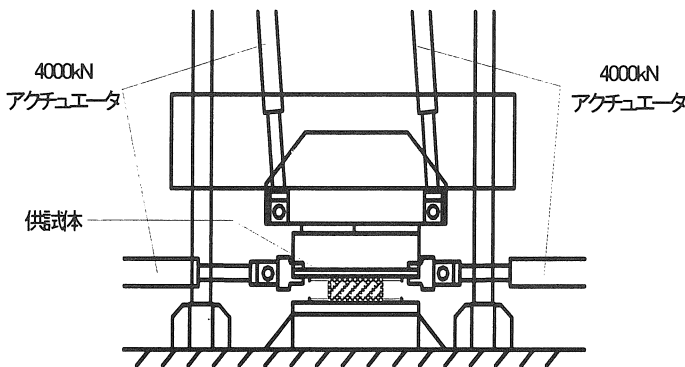
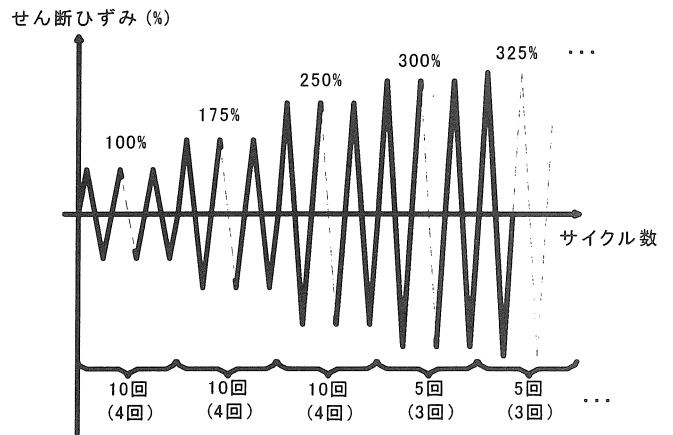


図-1 載荷装置

2.3 載荷方法

載荷方法として、鉛直荷重は、死荷重反力相当の
 圧縮応力度 6.0N/mm²(鉛直荷重 5630kN~6000kN 相
 当)を載荷する。水平荷重は、地震時に想定される
 慣性力として水平方向に正負交番漸増繰り返し載荷
 を行う。なお、実験中は鉛直荷重を一定に保ちつ
 繰り返し載荷を行うものとする。これより、水平荷
 重-せん断ひずみ履歴曲線を求めた。図-2 に繰り返
 し載荷手順を示す。繰り返し回数については、免震
 支承の安定性を調べるため、設計限界値とされてい
 る許容せん断ひずみ 250%までは 10 回を繰り返し回
 数とする。300%以降は、25%増分で破断に至るまで各
 5 回の繰り返しを行う。ただし、天然ゴム系積層ゴ
 ム支承に関しては、特性が安定しているところで評

価するため、250%までは過去の実験経験より 4 回
 の繰り返し、300%以降は 3 回の繰り返しとする。



注) ()書きは、NR の場合

図-2 載荷手順

3. 実験結果

3.1 水平荷重-せん断ひずみ履歴曲線

図-3 に各供試体の水平荷重-せん断ひずみ履歴
 曲線と初期破断箇所(図中○印)を示す。縦軸は水平
 荷重を、横軸はせん断ひずみを示している。ここで、
 初期破断とは音と共にゴムの表面に亀裂が入った状
 態のことである。

これらの結果を見る限りでは、明らかに NR の履歴
 面積(エネルギー吸収量)が、他の供試体に比べ少な
 いことがわかる。また、すべての供試体におけるせ
 ん断変形挙動は、3 サイクル目以降比較的安定して
 いた。

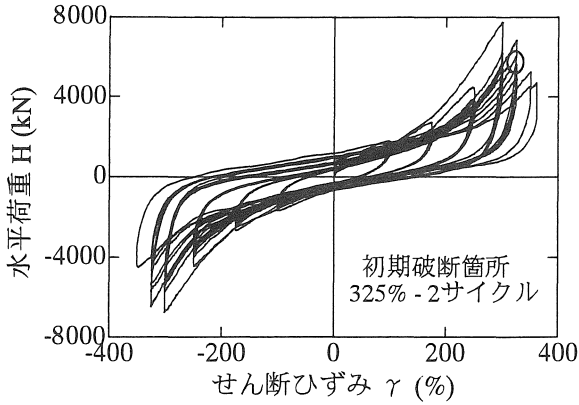
3.2 包絡線

図-4 に各 1 サイクル目のループを用いて求めた包
 絡線を示す。縦軸は水平荷重を、横軸はせん断ひ
 ずみを示している。

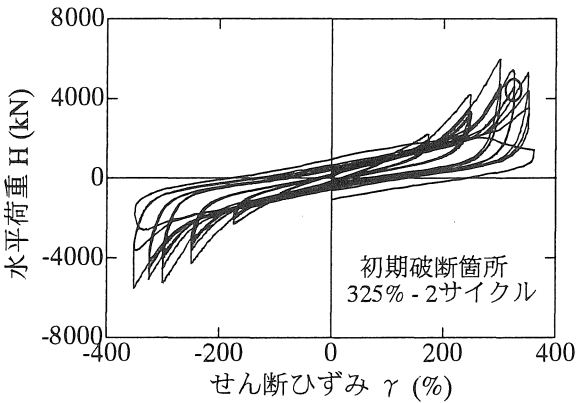
破断時の強度は、HDR, NR, LRB の順である。す
 べての供試体が、300%以降荷重の低下が著しく、負
 勾配が急である。HDR, NR については初期破断が起
 きる以前に、荷重の低下が見られる。

3.3 等価剛性・等価減衰定数の算出方法

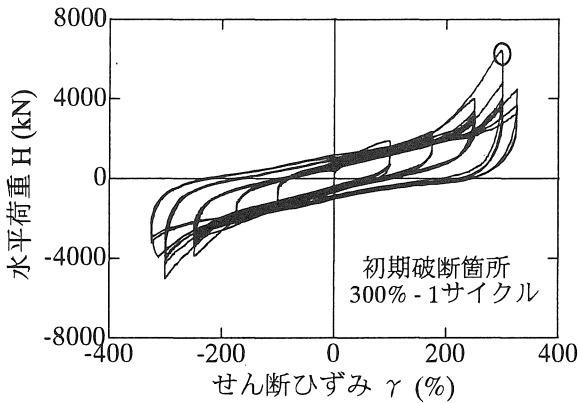
道路橋示方書⁵⁾において、等価剛性・等価減衰定
 数は、式(1)、(2)より算出する。一般には、175%せ
 ん断変形時の実験による履歴ループより、これらの
 値を定める。以下では、各せん断ひずみループご
 とのデータから等価剛性、等価減衰定数を算出して
 いる。(図-5 参照)



(a) 高減衰積層ゴム支承 (HDR)



(b) 天然ゴム系積層ゴム支承 (NR)



(c) 鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB)

図-3 水平荷重-せん断ひずみ履歴曲線

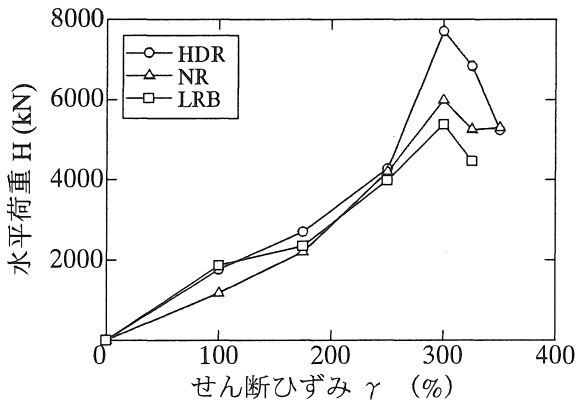


図-4 包絡線

$$K_B = \frac{F(u_{Be}) - F(-u_{Be})}{2u_{Be}} \quad \text{式(1)}$$

$$h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 K_B :等価剛性、 h_B :等価減衰定数、 u_{Be} :有効設計変位、 W :弾性エネルギー、 ΔW :1サイクルの履歴吸収エネルギーとする。

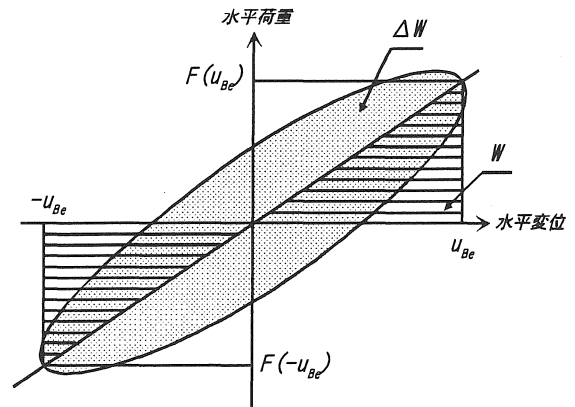


図-5 等価剛性・等価減衰定数

3.4 等価剛性

図-6に各供試体の等価剛性を示す。縦軸は等価剛性を、横軸はせん断ひずみを示している。ここで、剛性値は250%までは各グループ1~10サイクル(NRは1~4サイクル),それ以降各グループ1~5サイクル(NRは1~3サイクル)の平均値を使用している。

すべての供試体が、175%以降徐々にハードニング現象が起き、剛性が高くなるのがわかる。また、300%以降、急激に剛性低下する傾向が見られた。

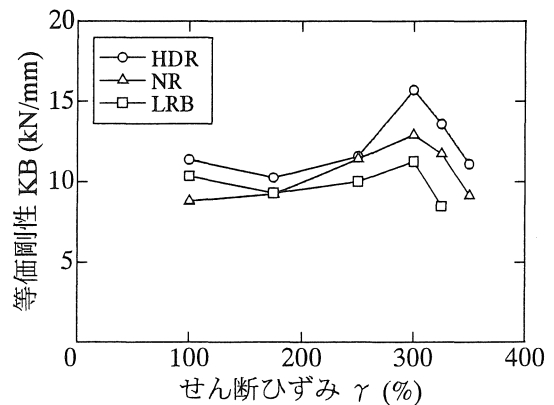


図-6 等価剛性

3.5 等価減衰定数

図-7 に、各供試体の等価減衰定数を示す。縦軸は等価減衰定数を、横軸はせん断ひずみを示している。ここで、減衰定数は 250%までは各グループ 1~10 サイクル(NR は 1~4 サイクル)、それ以降各グループ 1~5 サイクル(NR は 1~3 サイクル)の平均値を使用している。

せん断ひずみ 300%まではせん断ひずみの増加に伴い、等価減衰定数が低下し、その後やや上昇している。

HDR は、LRB に比べると等価減衰定数が若干小さいが、NR より高い減衰性能を有している。NR は、全体的に等価減衰定数が小さいが、それでも 10%近くの減衰があることは注目できる。LRB は、他の供試体に比べ、小変形時から等価減衰定数が大きい事がわかる。

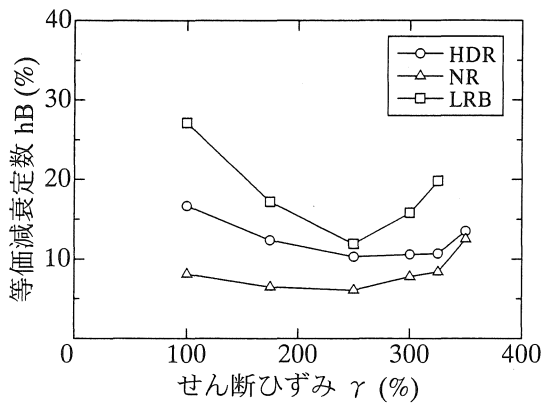


図-7 等価減衰定数

3.6 等価剛性における繰り返し安定性

図-8 に、免震支承である HDR, LRB における繰り返し回数に対する等価剛性の变化を示す。縦軸は等価剛性を、横軸は繰り返し回数を示している。

HDR, LRB の両者とも、1 サイクル目から 2 サイクル目にかけてやや大きく減少する傾向が見られた。3 サイクル以降、剛性の低下もあまり見られず安定した特性を示した。LRB の 300%時では、HDR のように剛性が高くなり、100%~250%時と同様な特性が得られた。

3.7 等価減衰定数における繰り返し安定性

図-9 に、免震支承である HDR, LRB における繰り返し回数に対する等価減衰定数の变化を示す。縦軸は等価減衰定数を、横軸は繰り返し回数を示している。

100%時では、HDR は高減衰性を生かし、LRB は鉛が効いていることで高い減衰性能を示した。HDR, LRB の両者とも、繰り返し増分量が増えるにつれて減衰性能は低下するものの、繰り返し回数の影響はほとんど受けずほぼ特性は安定している傾向が見られた。

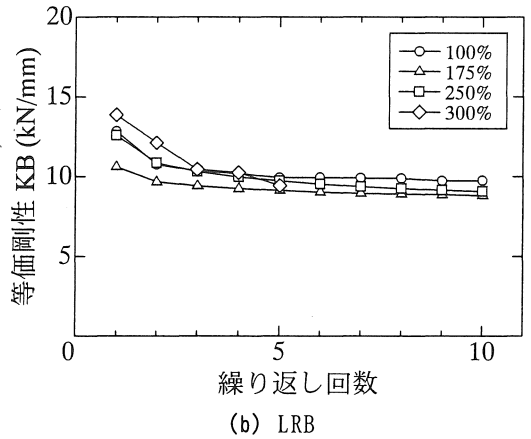
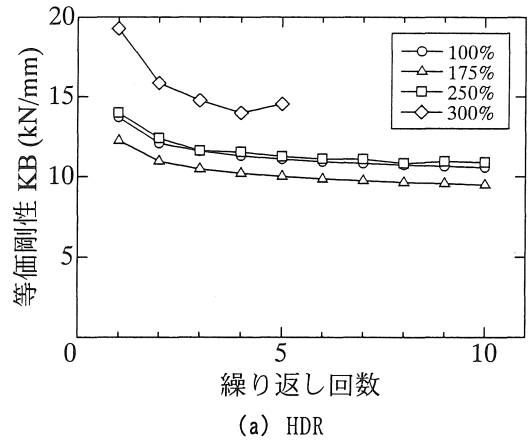


図-8 等価剛性における繰り返し安定性

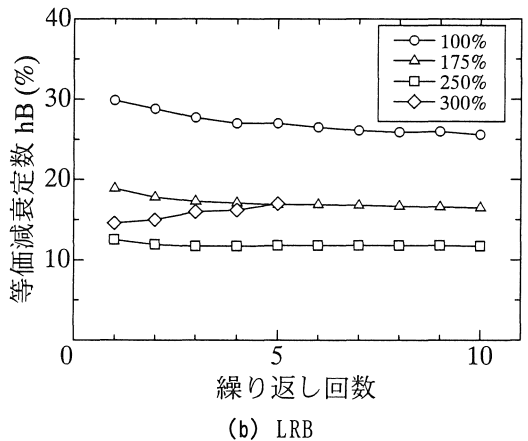
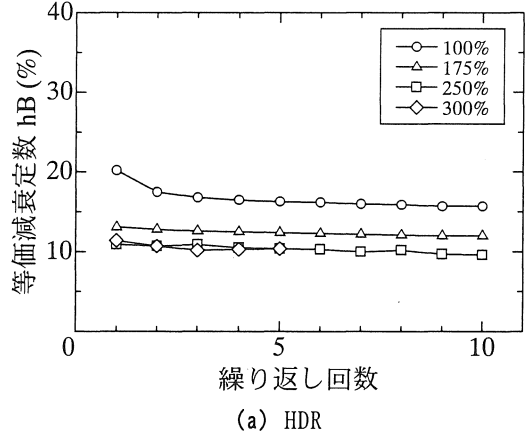


図-9 等価減衰定数における繰り返し安定性

3.8 累積エネルギー吸収量

図-10 に累積エネルギー吸収量を示す。縦軸は累積エネルギー吸収量を、横軸はせん断ひずみを示している。

履歴面積の大きさは、LRB, HDR, NR の順である。すべての供試体が、初期破断を起こした後もエネルギーを吸収し続けている。NR(天然ゴム)に対して、HDR は高減衰性を生かしエネルギーを吸収し、LRB についても鉛を入れることで小変形時からエネルギーを吸収するなど、各積層ゴムの特徴が明確に表れる結果となった。

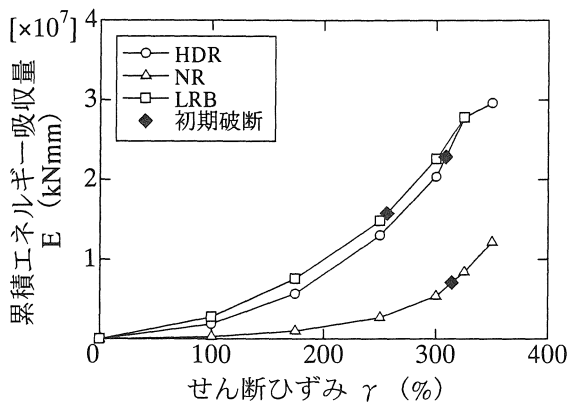


図-10 累積エネルギー吸収量

$$u_{Be} = c_B u_B \tag{3}$$

$$u_B = \begin{cases} \frac{k_h W_U}{K_B} & \text{(震度法)} \end{cases} \tag{4}$$

$$u_B = \begin{cases} \frac{k_{hem} W_U}{K_B} & \text{(保有水平耐力法)} \end{cases} \tag{5}$$

ここで、 u_{Be} :有効設計変位、 u_B :設計変位、 k_h :震度法に用いる設計水平震度、 k_{hem} :保有水平耐力法に用いる等価水平震度、 K_B :等価剛性、 W_U :上部工重量、 c_B :補正係数(=0.7)とする。

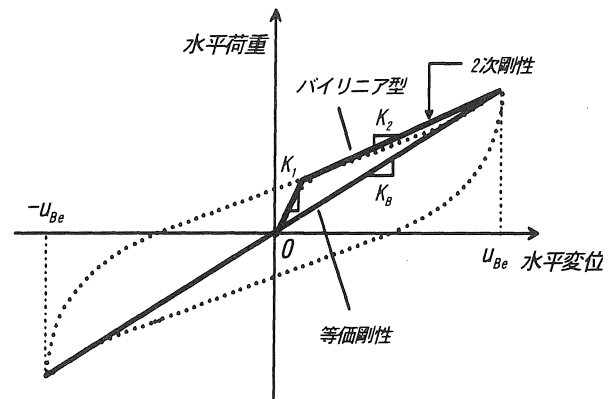


図-11 免震支承の特性

4. 時刻歴応答解析

4.1 解析概要

平成8年に改訂された道路橋示方書・同解説V耐震設計編(以下、道示と称す)では免震設計の章が新たに加えられ、これまで具体的な規定がなかった免震設計が確立された。この方法は、地震力の分散と系の高減衰化に重点を置いた設計法として規定されている。

現在、道示において、免震装置の設計変位(免震支承に生じる変位) u_B を算出する際に、前章で求めた等価剛性を用いて式(4)、(5)より算出すると規定されている。しかしながら、図-11に示すとおり、免震支承は非線形な特性を有するにもかかわらず、線形な特性と仮定して定めており、実際の構造物の挙動を正しく再現できるのか疑問である。

そこで本研究では、前章の結果をもとに、免震支承を有する単体を1質点1自由度系にモデル化し、Newmark β 法を用いて時刻歴応答解析を行い、免震設計における上記の問題点を解明するとともに新たな算定方法を提案する⁶⁾。

4.2 解析方法

本研究では、図-12(a)に示すような免震支承単体を対象とし、この系を図-12(b)のように1質点1自由度系にモデル化した。地盤から加速度入力を受ける1質点系の運動方程式は、式(6)で表される。

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = -M \ddot{x}_0 \tag{6}$$

ここで、 M 、 C 、 K は質量、減衰係数、剛性を表しており、 \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 、 \ddot{x}_0 はそれぞれ応答加速度、応答速度、応答変位、地動加速度を表している。

解析は、Newmark β 法($\beta=1/4$)を用いて行う。また入力地震波は、表-2に示す道示(平成8年)に示されている標準加速度応答スペクトルに適合するよう調整された標準地震波形を用い、1種地盤、2種地盤、3種地盤に各3波、計9波の波形を入力する。

表-2 入力地震波

	1種地盤		2種地盤		3種地盤	
Level2 Type II	I	INAGAWA	IV	FUKIAI	VII	N-HKB-NS
	II	N-JMA-NS	V	N-JRT-NS	VIII	P-ISL-NS
	III	N-JMA-EW	VI	N-JRT-EW	IX	P-ISL-EW

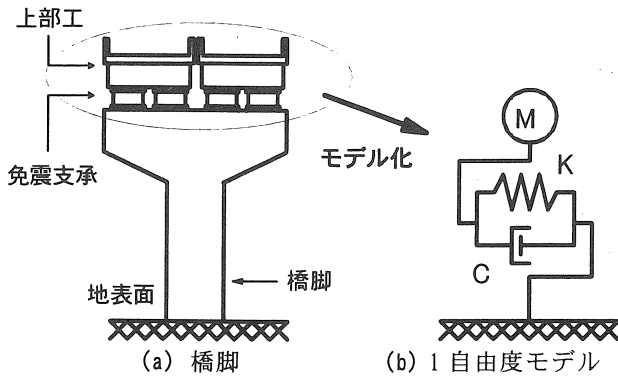


図-12 解析対象のモデル

表-3 免震支承諸元

		HDR	LRB
道示モデル	上部工重量 M (kN)	6000	6000
	等価剛性 K_B (kN/mm)	10.238	9.278
	等価減衰定数 h_B (%)	12.4	17.2
バイリニアモデル	上部工重量 M (kN)	6000	6000
	1次剛性 K_1 (kN/mm)	85.000	85.000
	2次剛性 K_2 (kN/mm)	5.421	5.725
減衰定数 h (%)		0.0	0.0

4.3 解析モデル

解析対象は、通常用いられる免震支承である HDR(高減衰積層ゴム支承)と LRB(鉛プラグ入り積層ゴム支承)の 2 種類に対して検証した。

4.3.1 道路橋示方書による規定値

道示に規定されているとおり、実験結果における各諸元を表-3 に示す。ここで、 M : 上部工重量、 K_B 、 h_B : 有効設計変位 (175%時変位) u_{Be} における 10 回の正負交番漸増繰り返し载荷より求められた等価剛性、および等価減衰定数の平均値とする。

4.3.2 バイリニア型復元力モデル

本研究では、比較対象として、実際の免震支承の復元力特性に近い硬化型バイリニアモデルを実測値から以下のように定めた。

バイリニア型の復元力モデル上で必要となる各諸元を表-3 に示す。

1) 1次剛性 K_1

実験結果より、算出した。

2) 2次剛性 K_2

175%時せん断ひずみの半分 (87.5%) に相当する変位となる正側、負側の合計 4 点 (引張側: T_1 および T_2 、圧縮側: C_1 および C_2) に対して、 T_1 と T_2 を結んだ直線 T の傾きを K_{2T} 、 C_1 と C_2 を結んだ直線 C の傾きを K_{2C} とし、それぞれ 10 回の平均値を求め、それらの平均値を K_2 とした。

(図-13 参照)

3) 減衰定数 h

免震支承に関しては、履歴減衰を考慮しているため 0% とする。

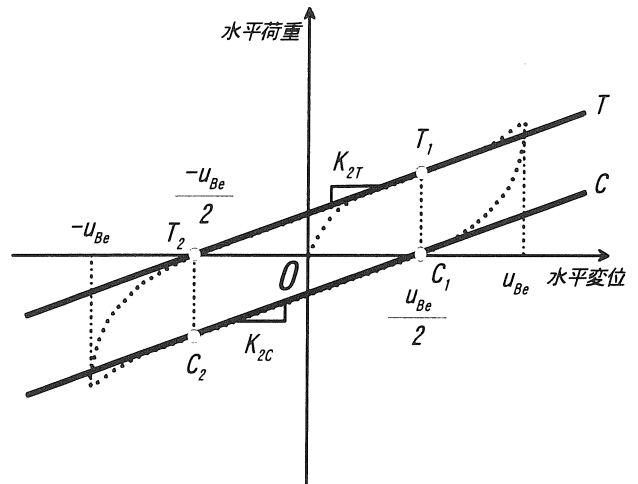


図-13 2次剛性

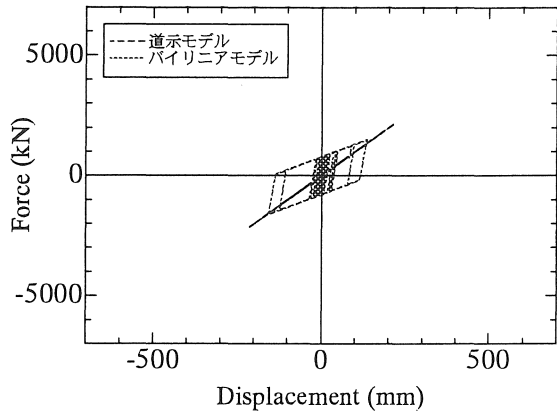
5. 解析結果

5.1 応答履歴曲線

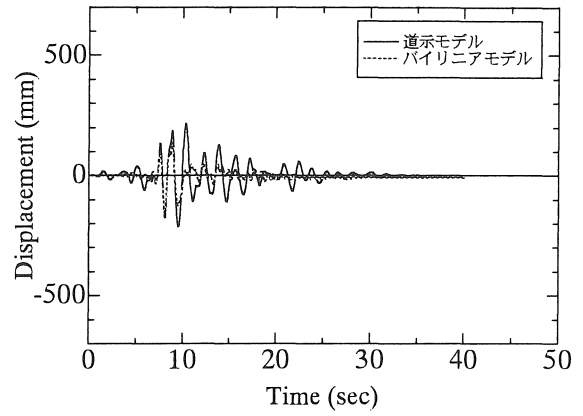
図-14, 15 に HDR、図-16, 17 に LRB における各種地盤に対しての時刻歴応答解析を行った結果を示す。図-14, 16 の縦軸は荷重を、横軸は変位を示している。図-15, 17 の縦軸は変位を、横軸は時刻を示している。また、図-18 に、各入力地震波に対して、道示の応答変位に対するバイリニアモデルによる変位の割合を示す (引張側)。縦軸はバイリニアモデルの応答変位 δ_b を、道示の応答変位 δ_d で除した値を、横軸は各入力地震波を示している。

1) 1種地盤 (岩盤のような固い地盤)

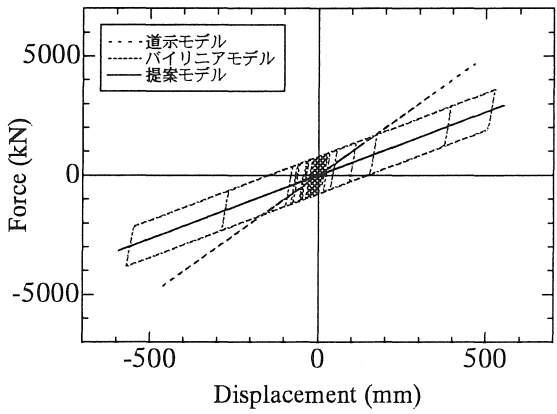
1種地盤に対しては、HDR、LRB の両者とも、バイリニアモデルよりも道示の応答変位が大きく、図-18(a) を見ても、各地震波とも安全側の等価式となっていることがわかる。



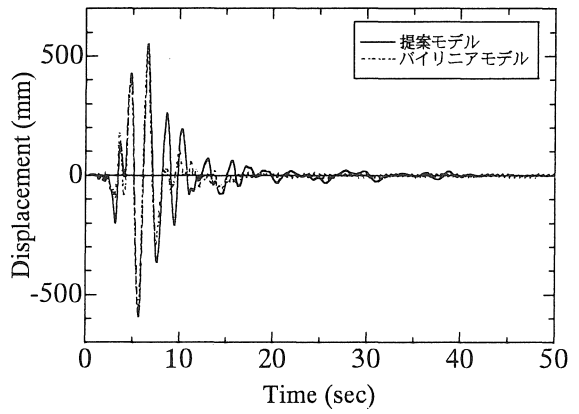
(a) 1種地盤 Inagawa



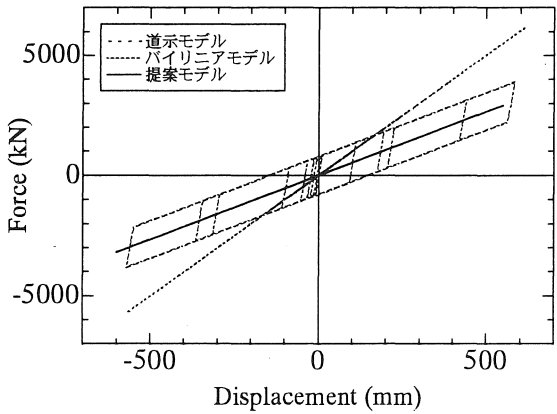
(a) 1種地盤 Inagawa



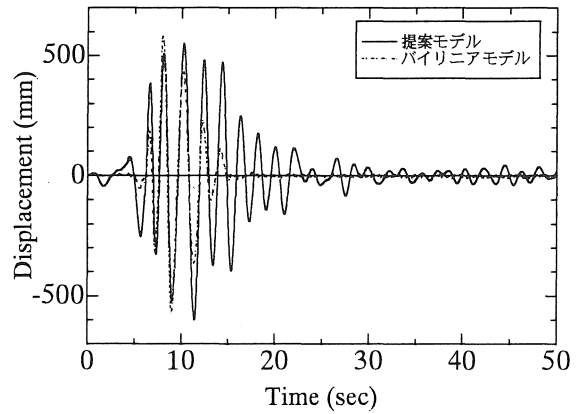
(b) 2種地盤 Fukiai



(b) 2種地盤 Fukiai



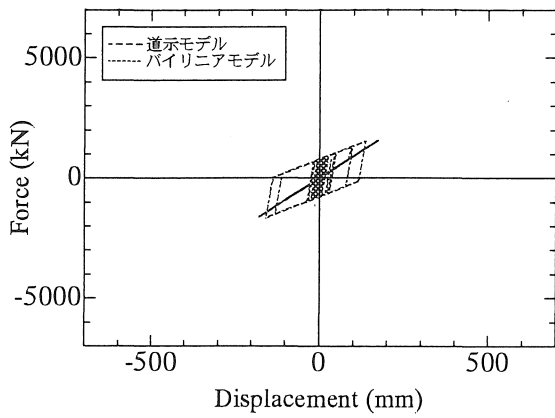
(c) 3種地盤 N-hkb-ns



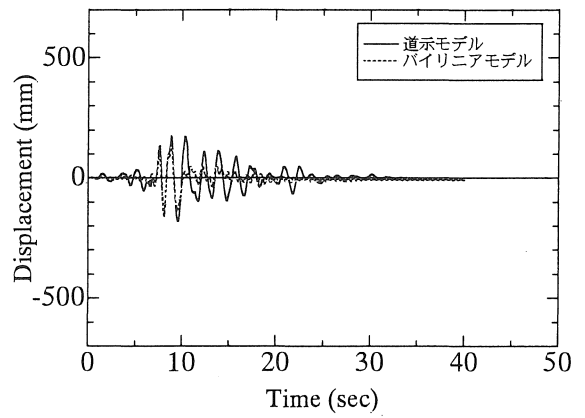
(c) 3種地盤 N-hkb-ns

図-14 荷重-変位履歴曲線 (HDR)

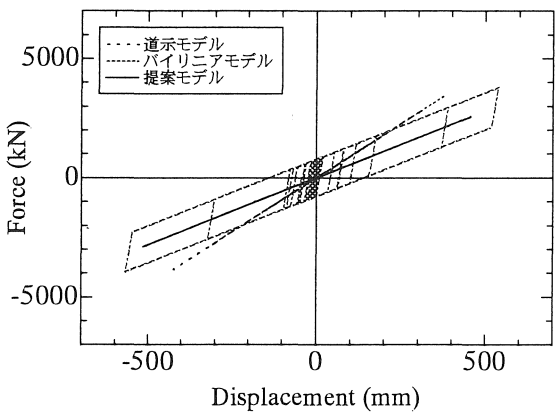
図-15 時刻歴応答変位曲線 (HDR)



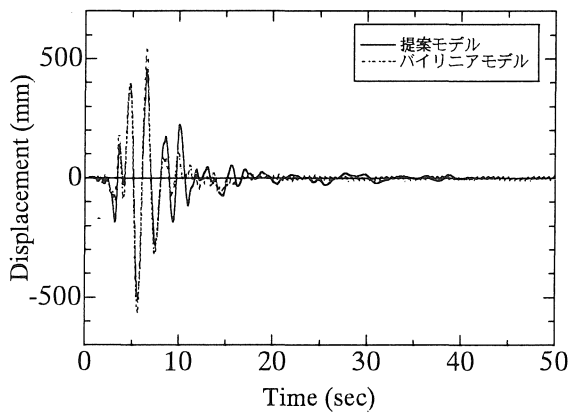
(a) 1 種地盤 Inagawa



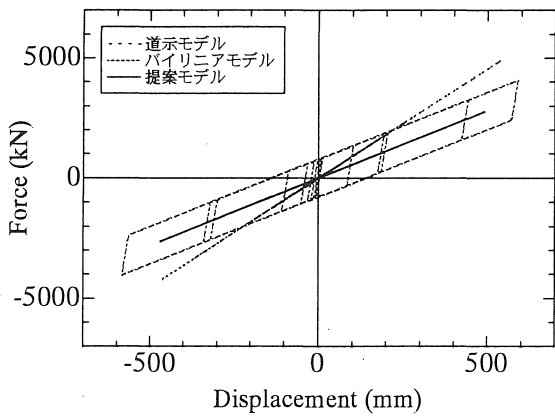
(a) 1 種地盤 Inagawa



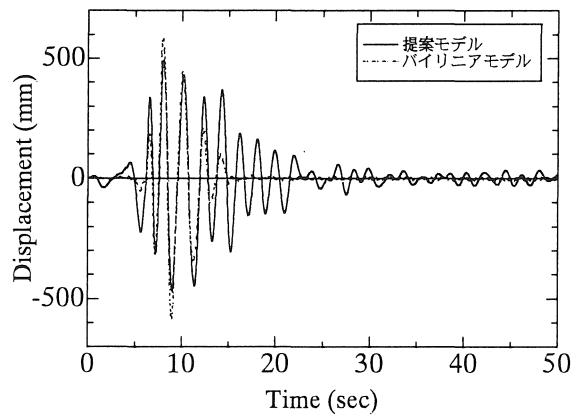
(b) 2 種地盤 Fukiai



(b) 2 種地盤 Fukiai



(c) 3 種地盤 N-hkb-ns



(c) 3 種地盤 N-hkb-ns

図-16 荷重-変位履歴曲線 (LRB)

図-17 時刻歴応答変位曲線 (LRB)

2) 2種地盤 (1種と3種の中間地盤)

2種地盤に対しては、HDR、LRBの両者とも、実際のゴム支承に近いバイリニアモデルの応答変位が大きく、HDRでは引張側で約50mm、圧縮側で約100mm、LRBでは引張側で約160mm、圧縮側で約150mm、道示による設計値より大きく応答変位が生じる結果となった。図-18(b)を見ても、道示の4割程度も応答変位が大きく生じる結果があり、安全側とは言えない結果となった。

3) 3種地盤 (沖積層のような柔らかい地盤)

3種地盤に対しては、HDRを見ると、剛性の値は異なっているが、ほぼ同等の応答変位が生じる結果となった。しかし、LRBではバイリニアモデルの応答変位が大きく、引張側で約50mm、圧縮側で約120mm、道示による設計値より大きく応答変位が生じる結果となった。また、図-18(c)では、2種地盤同様、応答変位が4割程度も大きく生じる結果もあり、安全側とは言えない結果となった。

5.2 残留変位

図-19にHDR、LRBにおける各地震波に対して、設計上の残留変位に対するバイリニアモデルによる変化の割合を示す。縦軸はバイリニアモデルでの残留変位 δ_{br} を、設計上の残留変位 δ_r で除した値を、横軸は各入力地震波を示している。

免震支承の残留変位としては、保有水平耐力法に用いる免震支承の設計変位 u_B の10%程度以下になることを目安にしている。

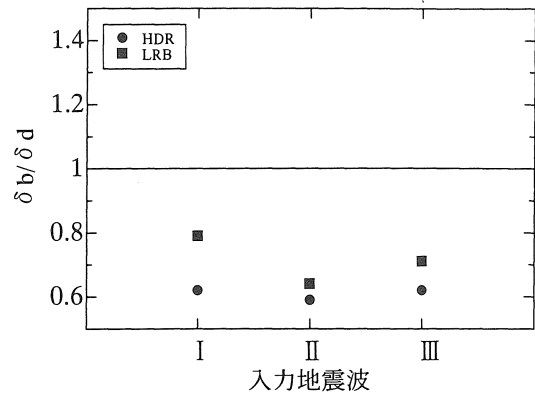
道示モデルにおいては、HDR、LRBの両者とも、各地震波に対してすべて0mmに収束する結果となった。バイリニアモデルにおいては、HDR、LRBの両者とも、許容範囲内に収まっていた。

5.3 提案モデル

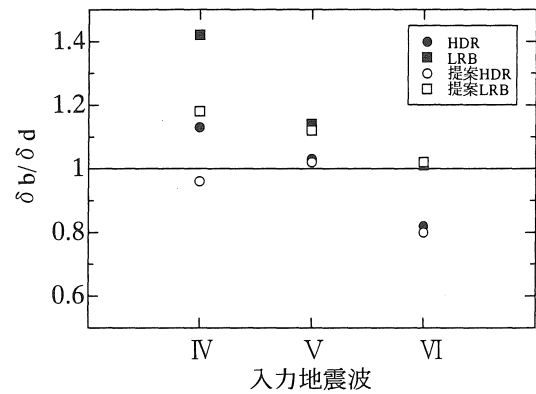
解析結果より得られたとおり、1種地盤については、安全側に評価できるが、2、3種地盤については、現在の手法を適用するには問題があると思われる。

そこで本研究では、現在の手法を大きく変更するのではなく、簡易的に変更することで、実際に近い応答変位を表現できる手法を提案する。

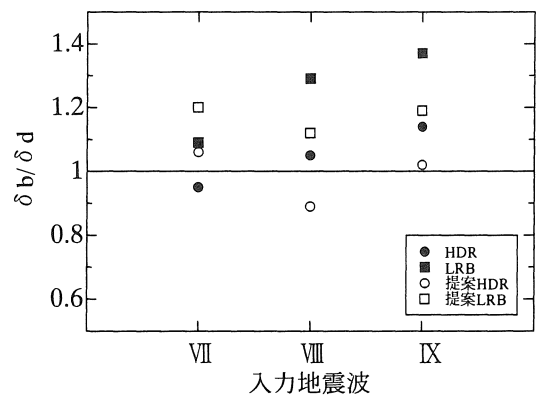
すなわち、現在の設計で用いられる等価剛性の代わりに、4.3.2で求めた2次剛性(図-13参照)を用いることを提案する。この2次剛性を用いた解析結果を、HDRは図-14、15の(b)、(c)、LRBは図-16、17の(b)、(c)に示す。



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図-18 応答結果 (引張側)

同図から明らかなように、提案モデルを用いた解析の結果、道示モデルでは4割程度応答変位が大きく生じていたが、提案モデルでは2割程度以内まで応答変形を抑えることができた。

6. 結論

本研究では、実橋脚に使用される 3 種類 (HDR, NR, LRB) の大型ゴム支承の繰り返しせん断変形試験を実施した。実験結果より以下の点が明らかとなった。

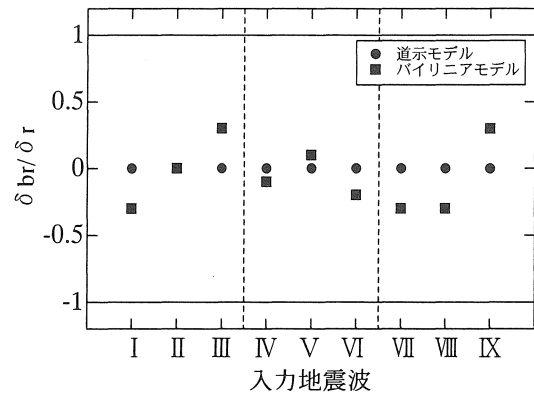
- (1) せん断弾性係数 G_{12} 相当の大型ゴム支承の破断ひずみは、300%~325%であった。
- (2) すべての供試体において、ゴムの表面に亀裂が生じたぐらいでは、荷重の低下はするものの、エネルギーは吸収し続ける。
- (3) 繰り返し载荷におけるせん断変形挙動は、1 サイクル目はやや大きく、2 サイクル目からは小さくなるが、3 サイクル目以降比較的安定していた。
- (4) すべての供試体にハードニング現象が顕著に見られ、この現象が大きくなるほどエネルギー吸収性能も増加する傾向がある。
- (5) 実物大のせん断変形挙動を確認でき、各積層ゴムの特徴が明確に表れた結果となった。

実験結果をもとに、時刻歴応答解析を行い、免震設計における問題点を明らかにし解明した。解析結果より以下の点が明らかとなった。

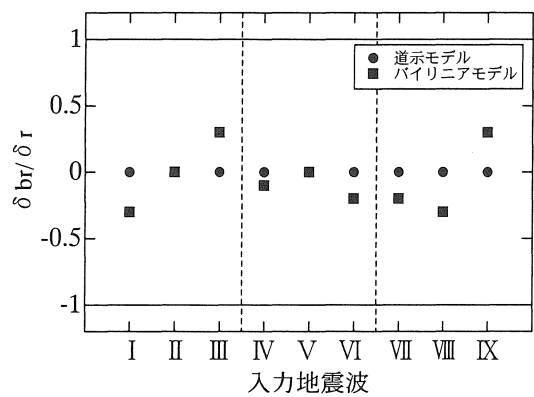
- (6) 現在、道示における等価剛性、等価減衰定数を用いた応答では、1 種地盤については、安全側の評価となることが確認された。
- (7) 2, 3 種地盤については、設計値より 4 割程度も大きく応答変位が生じる結果となり、場合によっては、安全性に問題があるのではないかと考えられる。
- (8) 残留変位においては、各種地盤に関わらず許容範囲内であった。
- (9) 等価剛性として、2 次剛性を採用することを提案した。これによって、応答変位を 20%増まで抑えることができた。

本研究では、実物大の供試体 2 体だけの解析結果であるので、今後更に供試体数を増やした実験を行い、その結果を用いて解析する必要があると思われる。

謝辞：本実験は、愛知工業大学 耐震実験センターの大型実験設備を用いて行った。また、本研究は、本学大学院の水野君、昨年度卒業生小林君、津田君、愛知工業大学 耐震実験センター技術員の鈴木氏の協力により行われた。ここに感謝の意を表す。



(a) HDR



(b) LRB

図-19 残留変位

<参考文献>

- 1) 日本免震構造協会：免震積層ゴム入門，1997. 9.
- 2) 日本ゴム協会・免震用積層ゴム委員会：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック，2000. 1.
- 3) 竹内孝徳，水野豪，鈴木森晶，青木徹彦，前野裕文，森下宣明：ゴム支承のせん断変形性能に関する実験的研究，第 26 回地震工学研究発表会，H2-3，1101-1104，2001. 8.
- 4) 青木徹彦，鈴木森晶，前野裕文，森下宣明，今井隆，山根義洋：大型ゴム支承の繰り返しせん断変形特性に関する実験的研究，土木学会第 56 回年次学術講演会，I-A230，pp. 460-461，2001. 10.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996. 12.
- 6) 子林稔，宇佐美勉，葛西昭：免震および非免震鋼製橋脚の動的解析による耐震性能評価，土木学会論文集，No. 619，I-47，177-192，1999. 4.

(受理 平成14年 3月19日)