日本建築学会構造系論文集 第75巻 第652号, 1099-1104, 2010年6月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 75 No. 652, 1099-1104, Jun., 2010

実大性能試験結果の回帰による免震用高減衰積層ゴムの特性表現式

AN EXPRESSION FOR MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS BY REGRESSION OF FULL SIZE PERFORMANCE TEST RESULTS

嶺脇重雄*, 山本雅史*, 東野雅彦**, 和田　章***
Shigeo MINEWAKI, Masashi YAMAMOTO, Masahiko HIGASHINO and Akira WADA

An analytical model that expresses mechanical properties, especially pressure dependent characteristics, of high damping rubber bearing in a simple form was proposed. The model was built through drawing regression equation based on a series of full size performance tests. It is possible to express the pressure dependent characteristics with a sufficient accuracy by including explanatory variables of products of the share strain and the pressure. Moreover, influence of load experience in the tests, and applicability to the bi-directional loading were also discussed.

Keywords : *Seismic Isolation, High Damping Rubber Bearings, Pressure Dependence, Full Size Test, Regression Equation*
免震，高減衰積層ゴム，面圧依存性，実大試験，回帰式

1. はじめに

免震構造建物の設計においては、平成12年国土交通省告示2009号に定められる構造計算方法を用いるものを除き、原則として地震応答解析による応答評価が行われる。この作業は、各設計クライテリアが満足されることを定量的に確認するという直截的な目的のほか、設計者が免震構造建物の振舞いを直感的に理解する助けになるという意味でも大いに重要である。

この地震応答解析に用いられる免震材料の復元力モデルは、各部材メーカーが平成12年国土交通省告示1446号に基づく材料認定取得の際に水平方向の荷重の履歴を表現することを目的として作成した近似式を準用することが一般的である。代表的な免震支承材料である積層ゴム支承においては、その水平変形をゴム層総厚さで無次元化した値（以下、せん断ひずみ、またはγ）の多項形式、または指数形式で復元力モデルが与えられている。また、Ozdemirモデルなどに代表される差分方程式モデルを拡張、改良し、積層ゴム支承の特性評価式を得る試み[1)~3)]が行われているが、これらの復元力モデルでも面圧による特性の変動を表現することは対象としていない。

積層ゴム支承の復元力特性の面圧依存性が一定の傾向を有することについては、多くの実験的研究の成果としてにより明らかにされており、各メーカーの技術資料でも紹介されているが、設計上、面圧依存性は必要に応じて品質ばらつきの一部として評価されているのが現状である。

超高層免震構造建物に代表される、建物幅に対する建物高さの比（アスペクト比）が大きな建物では、地震応答中の転倒モーメントにより各部免震支承部材の負担軸力に相当量の変動が生じる。この量は構造設計における検討段階で定量的に把握できる。すなわち、積層ゴム支承が負担する応力もそれによって生じる依存性も定量的に評価できるのであるから、復元力モデルに明確に取り込んで評価することがより合理的である。

水平方向に大きく変形する積層ゴム支承の面圧依存性を、鉛直荷重と変形量の積で与えられるP－δモーメントの影響として表現する試みが幾つか行われてきた。飯塚[5)]は、Koh, Kelly[4)]の回転ばね－せん断ばね－剛体要素の組合せからなる力学モデルを拡張し、材端部の曲げモーメント－回転角関係における非線形特性を双曲線関数で近似的に与えるマクロモデルを提案した。山本，菊地ら[6)]は、積層ゴム断面の面的広がりを表現する並列多軸ばねを材端に配置し各ばね要素に一定の非線形特性を与えることで上記の曲げモーメント－回転角関係を表現した。浅野，嶺脇[7)]は、積層ゴム支承の存在応力に応じて曲げモーメント－回転角関係における非線形特性が異なることを示し、これを逐次評価することで任意の応力状態における積層ゴム特性を表現し、更に上部構造、下部構造と連成した構造解析に適用可能な手法として提示した。これらの各手法は、比較的精

* 竹中工務店技術研究所　主任研究員・博士(工学)　Chief Researcher, R. & D. Inst., Takenaka Co., Dr. Eng.
** 竹中工務店技術研究所　部長・工修　General Manager, R. & D. Inst., Takenaka Co., M. Eng.
*** 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博　Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

密に積層ゴム支承の面圧とせん断ひずみの組合せに対する非線形性を評価でき、非対称曲げ状態など任意の応力状態に対応する拡張性を有するが、モデルを構成する要素特性の設定に一定のノウハウを有することや、手法の扱いそのものがやや煩雑であることから、設計ツールとして汎用的に用いられることは無く、当該研究グループ内での限られたケースでの利用に留まっているのが現状である。

設計ツールとして汎用的に用いられるためには、面圧およびP－δモーメントについてもせん断ひずみと同様、地震応答中の変動を平易な形で反映できることが望ましく、これらのパラメータについても、多項形式、または指数形式で表現した復元力モデルが提供されることが望ましい。嶺脇[8]は、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承について、納入時の製品検査データに基づく回帰式を得たが、試験データ範囲の制約から、高面圧領域や大せん断ひずみ領域における特性を充分に表現したものとはなっていない。

筆者らの研究グループでは、実大の免震支承試験体を用いた一連の加力実験を実施し[9]、せん断ひずみの変動に面圧の変動を連動させた高面圧、大せん断ひずみ試験を実施した。その結果として、せん断ひずみの増加に伴い面圧が増加する加力条件においては、水平荷重変形関係の接線剛性の低下が著しくなる可能性があること、その結果として接線剛性が負勾配を呈する状態となっても、それが直ちに鉛直荷重支持性能の喪失を意味しないこと、などが観察され、さらにそれに伴い、通常設計で用いられる領域を超えた、部材認定上の限界せん断ひずみかつ圧縮限界荷重付近から微小な引張域までの領域に至る水平方向の力学特性を把握することができた。

本論は、上記の実大免震支承性能試験結果のうち、高減衰積層ゴム支承についてせん断ひずみ、面圧に対する水平方向力学特性の依存性を説明する回帰式を得、せん断ひずみ、面圧、P－δモーメントの変動による水平方向力学特性の変動を平易な形式で表現する復元力モデルの可能性を提示することをその目的とする。

また、上記の実大免震支承性能試験においては、高減衰積層ゴム支承の水平２方向加力試験による復元力が水平１方向試験から想定される復元力と乖離し、同時にねじれ変形が発生することによって、せん断ひずみの破断限界が従来の想定よりも小さくなるという結果が得られた。この結果については、高減衰積層ゴム支承の復元力が原点に向かう弾性復元力と略進行逆方向に向かう減衰力から構成されるものとして、それぞれを試験結果から同定することにより、一見奇異に見える水平２方向加力試験における復元力や積層ゴム内部にねじれモーメントが２次的に発生することを説明できることを示した[10]。このことは、少なくとも高減衰積層ゴム支承においては、水平方向の荷重変形関係を弾性復元力と減衰力に分離して評価することが本質的であることを示唆している。また、水平２方向加力試験の機会は、対応可能な試験機が少ないため極めて限られおり、水平２方向加力試験による特性が水平１方向試験の結果から推定できるかどうかについて検討しておくことには大きな価値がある。これらを考慮して、本論では水平１方向試験結果について水平方向の荷重変形関係を弾性復元力と減衰力に分離して評価することにする。

２．対象とする試験結果

本論で対象とする試験結果は文献[9]に紹介した２体の高減衰積層ゴム試験体によるものである。いずれもブリヂストン社製品であり、同社規格でX0.6と称されるゴム種を用いたものである[11]。外径は1300mmおよび700mm、２次形状係数S2はいずれもほぼ５である。試験体一覧を表１に示す。試験実施に際しては同一の試験体に対して表２に示す一連の試験を実施した。従って、試験結果には一連の試験による大変形領域に及ぶ荷重履歴の影響が含まれる。本論では表中○印を附した試験を対象として回帰式を導く。水平２方向加力試験との比較においては、△印を附した水平二軸試験を対象とする。変位パターンは図１中のＸ軌跡であり、第１周期の振幅が第２、第３周期のおよそ1/2となるパターンである。水平二軸試験ではＹ軌跡を併用した。面圧変動試験における変動パターンは図２に示すもので、水平変位の正負に対し非対称な面圧となる。図１、２中の数字は表２中の番号欄に対応する（以下、試験番号）。

表１　試験体一覧

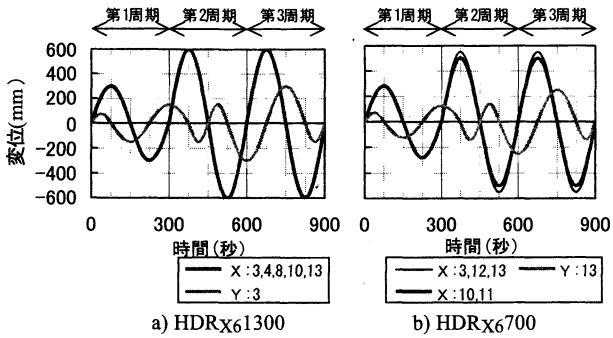
種別	略称	試験体名	外径	内径	内部ゴム	ゴム種	内部鋼板	鋼種	総高さ	S2	S1
高減衰積層ゴム	ＨＤＲ	$HDR_{X6}700$	700	15	4.7t×30	X0.6	3.1t×29	SS400	286.9	4.96	36.4
		$HDR_{X6}1300$	1300	30	8.7t×30	X0.6	4.4t×29	SS400	468.6	4.98	36.5

寸法はmm、tは厚さ、ゴム種はﾌﾞﾘﾁﾞｽﾄﾝ社規格、

表２　試験ケース一覧

$HDR_{X6}1300$			$HDR_{X6}700$		
番号	試験内容	備考	番号	試験内容	備考
1	検収試験に類似	14MPa, ±300mm, 三角波 10mm/s×3 波	1	検収試験と同じ	10MPa, ±280mm, 三角波 18mm/s×3 波
2	検収試験と同じ	10MPa	2	基本試験(予備)	14MPa, ±280～550mm, 300 秒×3 波
△3	水平二軸(1)	14MPa, X:±300～600mm, Y:±150～300mm	○3	基本試験(1 回目)	〃
○4	基本試験(1 回目)	14MPa, ±300～600mm, 300 秒×3 波	4	実速度	6 秒×3 波
5	実速度	6 秒×3 波	5	繰返し(区間 1)	±50～400mm, 6 秒×計 50 波
6	繰返し	±50～400mm, 50 波, 累計 4200 秒	6	繰返し(区間 2)	
7	基本試験(2 回目)	4 と同じ	7	繰返し(区間 3)	
○8	面圧変動	-1～40MPa(図 2 参照)	8	繰返し(区間 4)	
9	高面圧(中断)	40MPa(中断)	9	基本試験(2 回目)	3 と同じ
○10	高面圧	27MPa	○10	面圧変動(1)	-1～32MPa(図 2 参照), ±280～500mm
11	水平二軸(2)	-1～40MPa, X:±300～600mm, Y:±150～300mm	○11	面圧変動(2)	-1～32MPa(図 2 参照), ±280～500mm
12	苫小牧応答波	最大 X≒590mm, Y≒310mm, 継続 58 秒	○12	基本試験(3 回目)	3 と同じ
○13	基本試験(3 回目)	4 と同じ	△13	水平二軸	X:±280～550mm, Y:±140～280mm
14	コジャエリ応答波	最大 X≒630mm, Y≒310mm, 継続 40 秒			

○△は本論における検討、比較対象



a) $HDR_{X6}1300$　　b) $HDR_{X6}700$

図１　基本変位パターン

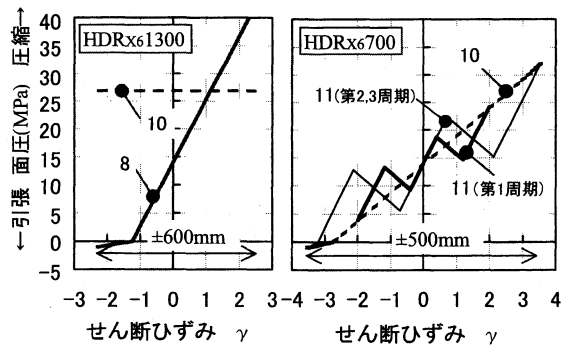


図２　面圧変動パターン

試験結果として得られた水平方向荷重変形関係を図３に示す。スペースの都合で試験ごとに荷重軸をずらして表示した。$HDR_{X6}1300$にはメーカーによる既往評価式[注1)]によるループを併記した。

両試験体とも面圧の大きい領域では接線剛性が低下すると共にループの膨らみ、すなわち、正負変形の増大時と減少時（以下、これらを往路および復路と称す：図４参照）の荷重差が大きくなる傾向をもつ。その結果、面圧を変動させた試験ケースでは正負変位に対し非対称の荷重変形関係となる。基本試験同士の比較では後に実施したケースでループの膨らみが幾分小さい。また、既往評価式は、面圧変動試験、高面圧試験による試験結果と乖離する。

３．弾性復元力と減衰力の分離

試験結果として得られたそれぞれの荷重変形関係から、弾性復元力と減衰力を分離した。分離にあたっては、荷重変形関係をせん断応力度τとせん断ひずみγの関係に読み替えた上で演算を行った。水平２方向加力試験を対象とした既往の検討[10)]においては、各変位位置における復元力を原点に向かう力 F_r と略進行反対方向に向かう力 F_S に分離（応力度は σ_r, σ_S と表示）したが、水平１方向加力試験を対象とする本論では、各ループにおける往路と復路の中心線に相当するせん断応力度 τ_r と、ループ膨らみ幅の 1/2 に相当するせん断応力度 τ_S とに分離した（式(1)）。これらはそれぞれ、弾性復元力および減衰力に相当する応力度として、上記 σ_r, σ_S と同じ意味をもつ。面圧σについては、往路、復路における載荷値の誤差が無視できるものとして、平均値 $\bar{\sigma}$ を用いた（式(2)）。式(1),(2)中、L および UL はそれぞれ往路、復路の値であることを示す添え字である。

$$\tau_r = 0.5\cdot(\tau_L + \tau_{UL})\cdot \mathrm{sgn}(\gamma),\quad \tau_s = 0.5\cdot(\tau_L - \tau_{UL})\cdot \mathrm{sgn}(\gamma) \quad \cdots(1)$$

$$\bar{\sigma} = 0.5\cdot(\sigma_L + \sigma_{UL}) \quad \cdots(2)$$

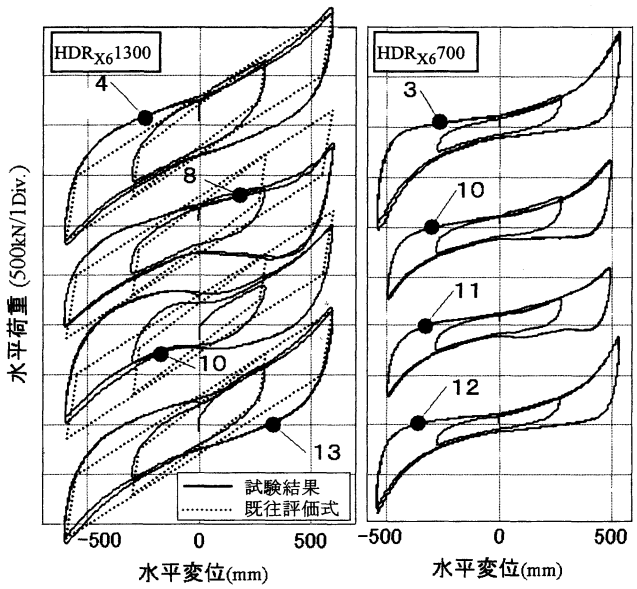


図３　試験結果の荷重変形関係

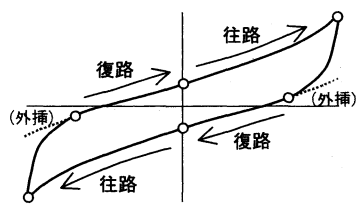


図４　往路、復路の説明図

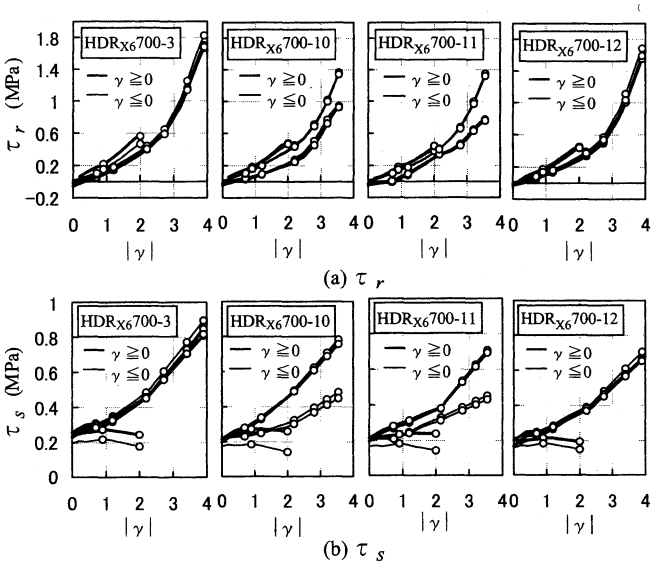


図５　弾性復元力と減衰力の分離結果例

○は回帰式作成のためのサンプル点

式(1),(2)の演算において、往路と復路では全く同一のγにおける計測データが存在する訳ではないので、往路、復路それぞれについてτ－γ関係をγの多項式で近似した。この際、不連続であると考えられる区間は個別に近似式を求めた。また、復路において除荷開始時点における立ち上がり剛性の影響が大きいと考えられる区間（原則として除荷開始点せん断ひずみからその 70%まで）は一旦対象から省き、近似式を求めた後に外挿によって補った。各区間における多項近似式の寄与率（R^2）はいずれも 0.999 以上である。

分離結果の τ_r, τ_s の例として、HDRX6700 によるものを図５に示す。図中、－（ハイフン）後の数字は試験番号である。

面圧が増加する加力条件では τ_r が低下し、τ_s が増大すること、面圧が低下する加力条件では τ s が低下することなどが、試験番号 10,11 と 12 とを比較することで明瞭に把握できる。また、試験番号 10 と 11 の比較から、その傾向は面圧の増減に対し敏感であると言える。また、試験番号 12 では、τ_r, τ_s とも試験番号 3 に比べやや低下しており、荷重履歴の影響が現れたものと考えられる。また、上記の各傾向はせん断ひずみ振幅 350%ないし 390%の条件（第２～第３周期）において顕著で、せん断ひずみ振幅 200%の条件（第１周期）では明瞭でないこともわかる。

4．回帰式の誘導

4. 1　サンプリング

回帰式誘導のため τ_r, τ_s, $\bar{\sigma}$ を$|\gamma|$に対してサンプリングした。ここでは、1) HDRX6700-11 に用いた面圧変動パターン(図２参照)における曲折点をカバーする。2) 面圧依存の傾向が明瞭に現れている第２～第３周期におけるサンプル点数を第１周期の 3～4 倍とし回帰式の感度を確保する。3) HDRX6700, HDRX61300 のそれぞれについて、各試験のサンプル点数を同一にする。などを考慮した。サンプル点数は合計 184 である。$\bar{\sigma}$ －$|\gamma|$平面におけるサンプル点の分布を図６に示す。高面圧、大せん断ひずみに及ぶ $\bar{\sigma}$ －$|\gamma|$平面をカバーし、かつ極端な偏りの無い分布となっている。

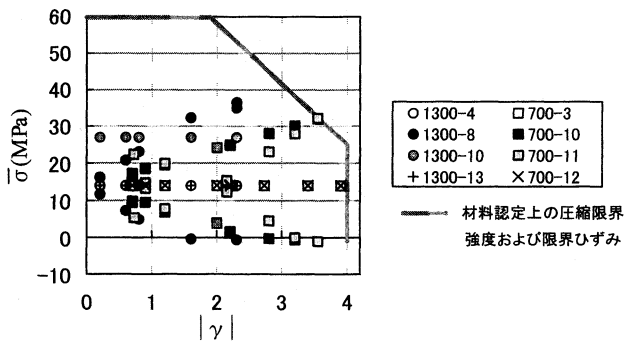


図６　サンプル点の分布

4. 2　方法

τ_r, τ_s それぞれについて、重回帰分析によって近似式を誘導した。τ_r については、$|\gamma|=0$ において $\tau_r=0$ なる条件を与えるため、式(3)による G_r を回帰の対象とした。

$$G_r = \tau_r / |\gamma| = 0.5 \cdot (\tau_L + \tau_{UL}) / \gamma \quad \cdots(3)$$

回帰式の形式は、式(4)で表現される多項式とした。説明変数 x_j にはせん断ひずみ、面圧などの加力条件やそれらの積、累乗、経験最大値、累積値などを割り当てた上、ある説明変数を除去した後の回帰式における重相関係数 R が最も大となる一変数を逐次除去し、最終的に t 検定により有意と判定される項のみを残存させた。いわゆる変数減少法である[例えば 12)]。有意水準の閾値は 5%とした。y は前述のように G_r および τ_s である。

$$y = c_0 + \sum_j c_j \cdot x_j \quad \cdots(4)$$

表３　回帰式に用いる説明変数

群	説明変数
1	$\|\gamma\|$, $\|\gamma\|^2$, $\|\gamma\|^3$, $\|\gamma\|^4$, $\|\gamma\|_{max}$
2	$\bar{\sigma}$, $\bar{\sigma}^2$, $\bar{\sigma}^3$, $\bar{\sigma}^4$, $\|\gamma\|\bar{\sigma}$, $\|\gamma\|\bar{\sigma}^2$, $\|\gamma\|\bar{\sigma}^3$, $\|\gamma\|^2\bar{\sigma}^2$, $(\|\gamma\|\bar{\sigma})_{max}$, $(\|\gamma\|\bar{\sigma}^2)_{max}$
3	ξ , $\|\gamma\|\xi$, $\bar{\sigma}\xi$, $\|\gamma\|\bar{\sigma}\xi$, $\|\gamma\|\bar{\sigma}^2\xi$, $\|\gamma\|^2\bar{\sigma}^2\xi$ ケース A: $\xi=\Sigma\|\gamma\|_{max}$, ケース B: $\xi=\Sigma(\|\gamma\|\bar{\sigma})_{max}$, ケース C: $\xi=\Sigma(\|\gamma\|\bar{\sigma}^2)_{max}$

回帰式の誘導は以下に述べる手順により段階的に行った。

①基本試験のサンプルデータのみを対象として回帰式を求む。サンプル数は 92 である。説明変数は表３の群１に属するもので、せん断ひずみに関わる変数である。面圧変動を考慮しない既往の評価式に相当する。表中の添字 *max* はその時刻における当該試験の経験最大値である。

②面圧変動試験、高面圧試験のサンプルデータを対象とし、試験データと①の回帰式による評価値との差を回帰する。サンプル数は 92 である。説明変数は表３の群２に属するもので、面圧および面圧とせん断ひずみの積に関わる変数である。

③対象とした試験において同一の試験体に大変形領域に及ぶ数次の荷重履歴を与えた影響を表現することを目的とする検討である。検討対象の全データ 184 サンプルを対象とし、試験データと①および②の回帰式の和による評価値との差を回帰する。説明変数は表３の群３に属するもので、表中の変数 ξ はせん断ひずみまたは面圧とせん断ひずみの積に関する値について半ループ毎の最大値を累積した値を示す変数である。A,B,C いずれかのケースのうち最大の重相関係数 R を与える ξ を選ぶ。

4. 3　回帰結果

手順①の結果を式(5)で表記し、各変数の回帰係数 c_j 及び回帰式の寄与率 R^2 を表４に示す。表中の－は除去された変数であることを表わす。G_{r1} 欄の R^2 は $\tau_{r1}=G_{r1}|\gamma|$について算定した（以後、表５～７の $G_{r2\sim4}$ 欄、G_r 欄も同じ）。R^2 はいずれも 0.9 を上回り良好な近似を与えるといえる。G_{r1}、τ_{s1} いずれにも $|\gamma|_{max}$ 項が有意な変数として残存することが既往の提案式との相違として特徴的である。

$$y_1 = c_{01} + \sum_{j=1}^{5} c_j \cdot x_j \quad \cdots(5)$$

表４　回帰式(5)の回帰係数

y_1		G_{r1}	τ_{s2}
j	x_j	c_j	
01	－	0.182	0.0688
1	$\|\gamma\|$	0.122	－
2	$\|\gamma\|^2$	-0.0341	－
3	$\|\gamma\|^3$	－	0.00776
4	$\|\gamma\|^4$	0.00189	－
5	$\|\gamma\|_{max}$	-0.0386	0.0634
R^2		0.985	0.900

手順②の結果を式(6),(7)で表記し、各変数の回帰係数 c_j 及び回帰式の寄与率 R^2 を表５に示す。面圧依存特性を表現するのにさほど多くの項は必要としないこと、$\bar{\sigma}$ やその高次項のみでなく $|\gamma|$ と $\bar{\sigma}$ の組合せ項を含めることが有効であることを示す結果となった。経験最大値の項は残存しなかった。式(7)の寄与率は $\tau_r=G_r|\gamma|$、τ_s とも 0.9 を上回る。

$$y_2 = c_{02} + \sum_{j=6}^{15} c_j \cdot x_j \quad \cdots(6)$$

$$y = y_1 + y_2 \quad \cdots(7)$$

表５　回帰式(6)の回帰係数

y_2		G_{r2}	τ_{s2}
j	x_j	c_j	
02	—	0.0101	-0.123
6	$\bar{\sigma}$	—	0.00936
7	$\bar{\sigma}^2$	-3.01×10^{-4}	—
8	$\bar{\sigma}^3$	—	-5.53×10^{-6}
9	$\bar{\sigma}^4$	—	—
10	$\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma}$	—	—
11	$\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma}^2$	1.41×10^{-4}	—
12	$\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma}^3$	—	—
13	$\lvert\gamma\rvert^2\bar{\sigma}^2$	-2.45×10^{-5}	8.89×10^{-6}
14	$(\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma})_{max}$	—	—
15	$(\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma}^2)_{max}$	—	—
R^2		0.821	0.726
式(7)	y	G_r	τ_s
	R^2	0.981	0.909

式(8)の変換により回帰式でτ-γ関係上の荷重経路を表現できる。複合同順は往路が+、復路が－である。式(8)によるτ-γ関係の構成を図７に示す。除荷開始時点の立上がり勾配は回帰の対象ではないが、ここでは、文献[8]の検討に基づき部分R-Oモデルで表現した。復路曲線との接続点は、図４における外挿開始点に相当し、原則として除荷開始点せん断ひずみの70%となる点である。対象とした８試験について試験結果との対応を図８に示す。

$$\tau = G_r \cdot \gamma \pm \mathrm{sgn}(\gamma) \cdot \tau_s \quad \cdots(8)$$

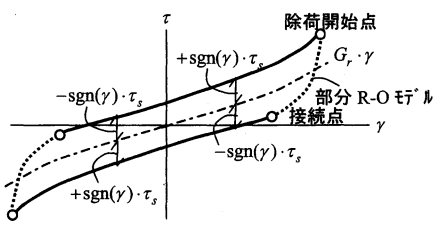


図７　$\tau-\gamma$関係の構成

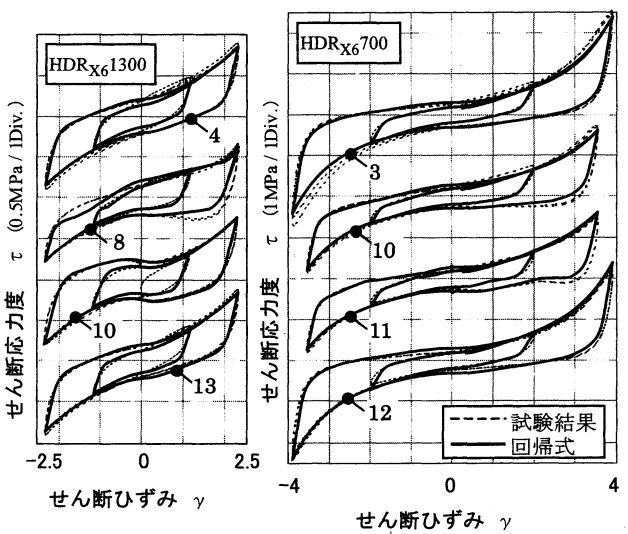


図８　試験結果と回帰式(7)の対応

せん断ひずみが比較的小さな条件で面圧変動が大きい HDRX61300-8においてループ面積を過小評価する傾向が見られるが、その他の試験に対しては、回帰式は試験結果に良好な近似を与える。特に、HDRX6700-10、11においては圧縮側復路における面圧変動経路の違いによるせん断応力度の微細な変動まで表現できている。

本論は限られた試験体を対象としており、回帰結果は一例に過ぎないが、上記の結果は、表３の群１および群２に示した説明変数から適切なものを選択することで、平易な形式で面圧依存特性を精度よく表現することが可能であることを示すものである。

手順③の結果を式(9),(10)及び表６に示す。式(9)自体の寄与率は大きくないが、式(10)の寄与率は$\tau_r = G_r|\gamma|$、τ_sとも式(7)に比べ向上する。式(10)によるτ-γ関係をHDRX6700-3について図９に示す。図８で正負最大荷重点付近に見られた差が改善されており、式(9)により荷重履歴の影響が表現されていると言える。

$$y_3 = c_{03} + \sum_{j=16}^{21} c_j \cdot x_j \quad \cdots(9)$$

$$y = y_1 + y_2 + y_3 \quad \cdots(10)$$

表６　回帰式(9)の回帰係数

y_3		G_{r3}	τ_{s3}
ξ		$\Sigma\lvert\gamma\rvert_{max}$	$\Sigma(\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma})_{max}$
j	x_j	c_j	
03	—	0.0247	0.0436
16	ξ	-4.40×10^{-5}	—
17	$\lvert\gamma\rvert\xi$	—	-6.72×10^{-6}
18	$\bar{\sigma}\xi$	—	-8.38×10^{-7}
19	$\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma}\xi$	—	—
20	$\lvert\gamma\rvert\bar{\sigma}^2\xi$	—	1.11×10^{-8}
21	$\lvert\gamma\rvert^2\bar{\sigma}^2\xi$	—	—
R^2		0.270	0.256
式(10)	y	G_r	τ_s
	R^2	0.987	0.932

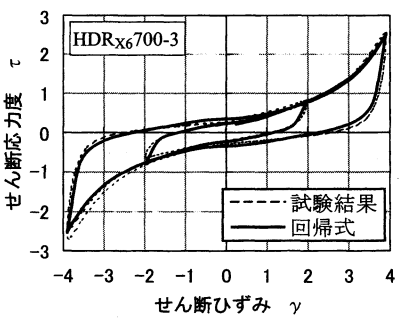


図９　式(10)による$\tau-\gamma$関係(HDRX6700-3)

５．水平２方向加力結果との対応

水平二軸試験HDRX6700-13、HDRX61300-3について、文献[10]の方法で弾性復元力と減衰力を分離したものと、式(10)による推定値とを比較して図10に示す。ここでは、水平二軸試験における変位のベクトルの大きさをゴム層総厚さで無次元化した値γ_rを式(10)の$|\gamma|$に読み替えて適用した。図10においては、特に減衰応力τ_sについて試験結果と式(10)の差が大きい。式(10)による値が試験結果のほぼ下限値に相当することから、この差は水平２方向変位に伴う２次的な応力の発生によるものと解釈できる。

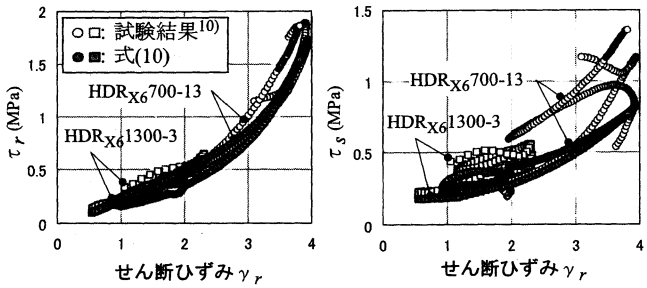


図 10　水平二軸試験と回帰式(10)の対応

試験結果と式(10)の差について、表７中に示す説明変数を用いて回帰を行った。サンプル数は 454 である。ここで、$\Delta\theta$ は変位ベクトルと変位増分ベクトルの為す角度、τ_{sn} は変位ベクトルに直交する向きのせん断応力度である。τ_{sn} は式(10)による τ_s から算定した。

回帰結果を式(11),(12)で表記し、回帰係数及び寄与率を表７に示す。図 10 に見られる差には実験時の測定誤差や分離に伴う計算誤差が含まれていることを考慮すれば、回帰式(11)は水平二軸特性を良く説明しており、式(12)は良好な近似を与える。

式(12)による HDRX6700-13 の τ-γ 関係を X 方向、Y 方向それぞれについて図 11 に示す。τ_r, τ_s のベクトル合成については文献[10]を踏襲した。X 方向で第２周期から第３周期にかけて荷重が増大してゆく現象を表現できるなど、両方向とも試験結果とよく一致する。

$$y_4 = c_{04} + \sum_{j=22}^{27} c_j \cdot x_j \quad \cdots(11)$$

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \quad \cdots(12)$$

表７　回帰式(11)の回帰係数

y_4		G_{r4}	τ_{s4}
j	x_j	c_j	
04	—	0.00641	0.105
22	τ_{sn}	-0.216	-0.752
23	$\cos\Delta\theta$	-0.0756	0.0932
24	$\gamma_r \cos\Delta\theta$	0.0471	—
25	$\gamma_r \cos^3\Delta\theta$	-0.0407	-0.118
26	$\gamma_r \tau_{sn}$	0.0418	0.199
27	$\gamma_r{}^2$	—	0.0134
R^2		0.779	0.579
式(12)	y	G_r	τ_s
	R^2	0.986	0.895

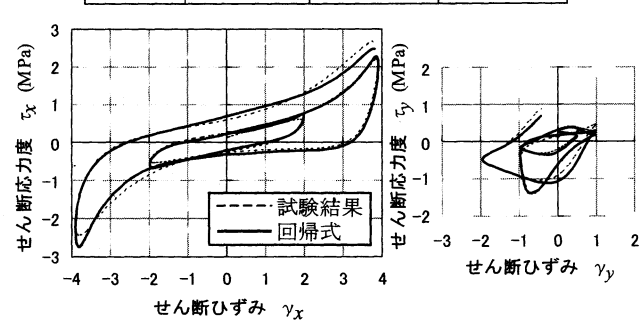


図 11　水平二軸試験結果と式(12)の対応(HDRX6700-13)

6．まとめ

高減衰積層ゴム支承の実大免震支承性能試験における水平方向力学特性を説明する回帰式を求め、面圧に対する水平方向力学特性の依存性を平易な形式で表現する復元力モデルを提示した。また、試験における荷重履歴の影響や水平２方向加力試験との対応についても論じた。具体的には以下となる。

①せん断ひずみの経験最大値は荷重経路を表現する回帰式の説明変数として有意と言える。

②面圧やその高次項、せん断ひずみと面圧の組合せ項から適切なものを選択することで、３項程度の説明変数で面圧依存特性を精度よく表現することが可能である。

③経験最大値の累積値を説明変数として導入することで、大変形領域に及ぶ数次の荷重履歴の影響を表現できる。

④水平２方向加力試験における特性は、水平１方向試験に基づく特性評価式で直接表現できない。その差は水平２方向変位の状態を表現する説明変数を導入することで説明できる。

本論は限られた試験体を対象としており、回帰結果は一例として位置付けられる。①②については、設計対象領域について既に多くの試験データが蓄積されていることから、せん断ひずみ、面圧に対する水平方向力学特性の依存性を統一的に表現する設計用復元力モデルが、本論を参考として提示されることを望みたい。④については、未だ試験データは限られており、水平１方向特性から２方向特性を推定、評価するためには更にデータの蓄積が必要である。

参考文献

1) 藤田隆史,鈴木重信,藤田聡：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究（第１報,履歴復元力の基本特性と解析モデル），日本機械学会論文集（C編），５６巻５２３号，pp.658-666，1990.3
2) Kikuchi,M. and Aiken,I.D.: An analytical hystereesis model for elastomeric seismic isolation bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.26, pp.215-231, 1997
3) 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
4) Koh,C.G. and Kelly,J.M.: A simple mechaical model for elastomeric bearings used in base isolation, Int.J.mech.sci., 30, pp.933-943, 1988
5) 飯塚真巨：積層ゴムの大変形マクロモデル，日本建築学会免震構造設計指針第２版，pp.545-563，1993
6) 山本祥江，菊地優，越川武晃，上田正生：並列多軸ばねを用いた積層ゴムの大変形挙動解析，日本建築学会構造系論文集，第 618 号，pp.81-88，2007.8
7) 浅野三男，嶺脇重雄：取付部の柔性を考慮した免震用積層ゴムの水平剛性評価，日本建築学会技術報告集，第８号，pp.57-62，1999.6
8) 嶺脇重雄：免震建築物の上部構造応答評価に用いる積層ゴム復元力モデルの構築，日本建築学会技術報告集，第１６号，pp.51-56，2002.12
9) 嶺脇重雄，山本雅史，東野雅彦，和田章ほか４名：超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験，構造工学論文集 Vol.55B，pp.469-477，2009.3
10) 山本雅史，嶺脇重雄，米田春美，東野雅彦，和田章：高減衰積層ゴム支承の水平２方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 638 号，pp.639-645，2009.4
11) 室田伸夫，菊地隆志ほか４名：荷重履歴依存性を改良した新高減衰積層ゴムの開発（その１～２），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp879-882，2007.8
12) 奥野忠一，久米均，芳賀敏郎，吉澤正：多変量解析法，日科技連出版社，1971

注

注1)　メーカーによる既往評価式については、ブリヂストン高減衰ゴム系積層ゴム支承（X0.6 タイプ）に関する建築材料認定書（認定番号 MVBR－0341）別表および本論で対象とした試験体の検査成績書を参照した。

(2009年11月５日原稿受理，2010年３月８日採用決定)