

免震部材の特性と性能評価

高山峯夫

1. はじめに

免震設計の基本は免震部材の設計にあると言っても過言ではない。ここでは免震部材の設計の中で積層ゴムアイソレータに着目し、その特性と性能評価方法について論じる。なお、免震建築物に対する今回の告示の内容についても私見を述べたい。

2. 免震部材の特性

アイソレータに求められる基本的な性能は、

- ・鉛直支持性能
- ・水平変形性能
- ・復元性能
- ・耐久性
- ・品質・ばらつき

などである。アイソレータには常時荷重に対する長期間の安定した支持能力と経年変化に伴う性能劣化が許容範囲内であることが求められる。水平変形性能としては、免震層に予想される変形量まで鉛直荷重を安定に支持しながら追従できなければならない。この時、鉛直荷重は常時荷重の2~3倍程度になる場合があることに注意を要する。アイソレータとして大きな変形性能を有していると同時に、建物を元の位置に復元させる剛性も持たねばならない。復元性能の大きさが地震終了後の残留変形の大きさに影響を与える。出来るだけ柔らかい水平剛性である方が免震性能は高くなる。免震建物の解析や設計の信頼性を高める上で、水平剛性や復元力特性が軸力の変動に伴って大きく変動しないことが肝要である。また、微小変形域から破断に至るまでの履歴特性と面圧や速度などによる依存性も含めて定量的に把握されていることも必要である。力学特性や耐久性が優れているだけでなく、免震部材としての品質の安定性を持たなければならない。

図1~3に天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ型積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴムの水平履歴特性の

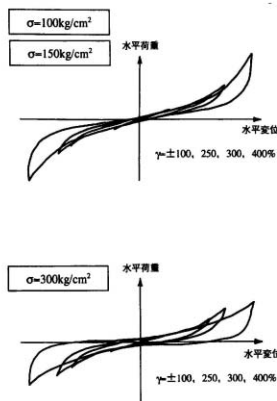


図1 天然ゴム系積層ゴムの履歴曲線の例
($G=4.5\text{kg/cm}^2$, $S_1=32$, $S_2=5.1$)

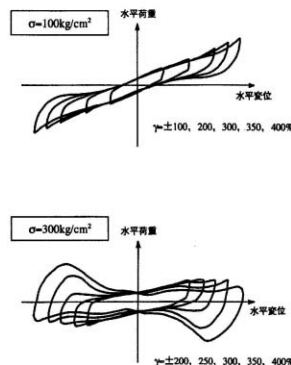


図2 鉛プラグ型積層ゴムの履歴曲線の例
($G=4\text{kg/cm}^2$, $S_1=35$, $S_2=5.1$)

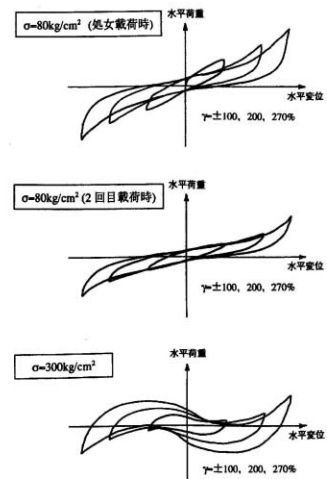


図3 高減衰ゴム系積層ゴムの履歴曲線の例 1/7
($G=6\text{kg/cm}^2$, $S_1=23$, $S_2=5.6$)

特徴を示す。天然ゴム系積層ゴムは、面圧の変動に対しても安定した線形の履歴特性を示す。面圧が 300kg/cm^2 のときには水平剛性の低下が顕著となるが、水平剛性が負となるような座屈現象は見られない。図中の γ はせん断変形量をゴム総厚で除したせん断変形率であり、加振振幅の最大値を示している。

鉛プラグ型積層ゴムは、面圧 100kg/cm^2 程度ではバイリニア型に近い復元力特性を示す。せん断変形率 300% 付近ではソフトニングの傾向も若干みられる。これは鉛プラグの拘束効果が低下したためであると考えられる。面圧 300kg/cm^2 では履歴面積が大きくなり、安定した履歴を示すことが難しくなる。水平変位 0mm 付近では水平剛性が負勾配となっており、座屈傾向がみられる。

高減衰ゴム系積層ゴムでは面圧が低い時には紡錘形の履歴曲線を示すものの、やはり面圧が高くなると顕著な座屈現象を見せる。高減衰ゴム系では処女載荷時とそれ以降の載荷では履歴特性が大きく異なる。これは配合した添加剤の影響と言われている。しかし、ゴム配合（メーカー）によってはこの様な現象を示さない場合もある。従って、高減衰ゴム系積層ゴムの特性はゴム材料の特性に大きく依存しており、一般的に論じるのは困難である。

図 4 には天然ゴム系積層ゴムの履歴曲線より求めた水平剛性（接線剛性）と面圧の関係を示す。試験体の基本形状は同一であるが、製造方法が異なる鋼板露出型（中間鋼板が露出した形状）と鋼板埋込型（中間鋼板が被覆ゴムで覆われた形状）の 2 種類について示されている。図中には水平剛性の面圧依存に対する理論式も示されている。積層ゴムの座屈応力度 σ_{cr} はゴムのせん断弾性率 G に 1 次形状係数 S_1 と 2 次形状係数 S_2 を乗じた GS_1S_2 にほぼ比例する。この場合、座屈応力度は約 720kg/cm^2 となる。鋼板露出型の実験値は理論式と良い対応を示しているのに対して、鋼板埋込型の水平剛性の低下率は露出型に比べ非常に大きくなっている。この原因としては、中間鋼板の位置精度の違いなどが考えられるが、今後さらに検証が必要である。

図 5 には鉛プラグ型積層ゴムの水平剛性（降伏後剛性）と面圧の関係を示す。試験体の S_1 は約 35（中心孔の存在を無視した場合）、 S_2 は約 5 であり、座屈応力度は約 700kg/cm^2 となる。しかし、実験による水平剛性の面圧依存性は理論値よりも大きいため、実験値に合致するような座屈応力度を逆算すれば約 430kg/cm^2 となる。この座屈応力度は鉛プラグを無視して空孔があるとした場合に計算される座屈応力度に比べても 30% 低い値である。鉛が充填されていても中心孔が大きい（積層ゴム直径の $1/4 \sim 1/6$ 程度）ことによる影響が現れていると考えられる。

図 6 には高減衰ゴム系積層ゴムの水平剛性（接線剛性）と面圧の関係を示す。試験体の座屈応

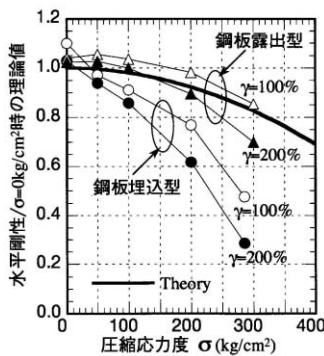


図 4 天然ゴム系積層ゴムの面圧依存性 (N500(20)-3.75×26, G4.5, $S_1=32$, $S_2=5.1$)

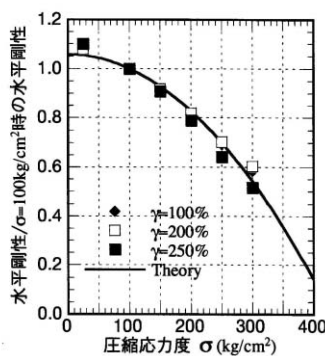


図 5 鉛プラグ型積層ゴムの面圧依存性 (L700(120)-4.9×28, G4, $S_1=35$, $S_2=5.1$)

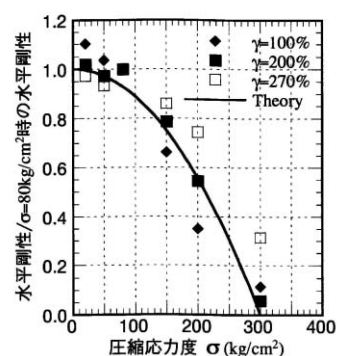


図 6 高減衰ゴム系積層ゴムの面圧依存性 (H900(150)-8×20, $S_1=23$, $S_2=5.6$)

※「免震構造の最新動向」, 建築技術 2001 年 7 月号に投稿したものと同一内容です。

力度を計算すれば、 $G=4\text{kg/cm}^2$ とした場合でも約 510kg/cm^2 となる。しかし、実験結果では水平剛性は面圧 300kg/cm^2 でほぼ 0 になる。図中には座屈応力度を 300kg/cm^2 とした場合の面圧依存性の理論値を示している。実験による面圧依存性は理論曲線に対応している。座屈応力度が計算値よりも大きく低下する原因としては、やはり材料特性（配合）自体に問題があると思われる。このため、高減衰ゴム系積層ゴムの性能はゴム材料の特性に大きく依存しており、材料特性の厳密な評価が求められている。

面圧が高い場合の鉛プラグ型や高減衰ゴム系積層ゴムの履歴曲線では、小変形域での接線剛性は負で、それ以降剛性が正となるものの変形能力が低下している。これは、初期変形で座屈が発生しているものの、その後のひずみ硬化により見かけ上復元力があるように見えている。この場合、試験をすれば多少抵抗力は示すものの積層ゴムは座屈状態であり、荷重支持能力はないものと見なすべきである。変位 0 付近での座屈を判断するためには接線剛性による評価が必要であり、割線剛性（等価剛性）による評価は適切ではない。

また、鉛プラグ型積層ゴムの降伏荷重特性値は面圧の上昇に伴い 2 倍近く増加する。高減衰ゴム系積層ゴムの動的試験結果からは y 切片荷重は加振振動数 0.01Hz を基準とすれば 0.2Hz では 1.5 倍の荷重値を示すなど速度依存性が大きいことが示されている。この様に、積層ゴムの種類によっては、その特性が速度、面圧、ひずみによる影響を受けるため設計範囲の設定と解析用復元力モデルの作成には十分な注意が必要となる。

3. 性能評価の基本と問題点

免震部材は、通常の構造部材とは異なり建物への設置前に部材性能や品質の確認をすることが可能である。このことは、免震建物の性能の確保、耐震安全性の確保に繋がっている。免震部材に要求される性能は目標とする建物性能が異なれば当然変化するであろう。

現在、免震部材の品質・性能検査法は、設計者やメーカーによって異なる内容と方法がとられている。今後、免震部材の品質向上や性能の安定性を高めるために、次のような試験・検査の考え方を提案したい。検査法は、免震部材を実際に採用する前に行われておくべき特性評価試験と免震部材を建物に設置する前に行われる製品性能検査の 2 段階構成となっている。更に製品性能検査は、部材性能検査と品質性能検査に分類される。

○特性評価試験（Pre-qualification Tests）

設計、モデル化のためのデータを提供するために、あらかじめ実施しておくべき試験。

基本特性試験、各種依存性試験、限界性能試験、耐久性試験などから構成される。試験体のサイズや形状が混在しておらず統一的な評価がなされていることが望ましい。

○製品性能検査

・部材性能検査（Prototype Tests）

特性評価試験での結果を再確認する検査。実大製品を使用した性能検査であり、限界特性などの評価も実施する。

・品質性能検査（Quality Control Tests）

製品の全数に対して実施される検査。積層ゴムにおいては、現時点において加硫成型後

※「免震構造の最新動向」, 建築技術 2001 年 7 月号に投稿したものと同一内容です。

の特性を評価する手法が完成されていないため、実製品に対する検査を実施する必要がある。製品検査は性能試験により製品の基本特性を調査する。その他に、材料検査や寸法検査も実施される。

- ・製品検査
- ・材料検査
- ・寸法検査

品質・性能検査法の作成に当たっては、採用する免震システムの特性を踏まえ設計対象領域を十分カバーできるような試験方法とすることが重要である。設計者には免震部材の性能・品質を確保するため試験方法や検査法に対する十分な認識と責任が求められている。また、メーカーには決められた製造方法や品質確保に対する十分な製造管理能力が求められている。

積層ゴムの性能評価においては、地震時の面圧変動を含んだ広い領域に対して、破断変形まで含めた履歴特性が検証されていることが必要である。例えば、図 7 に示すような終局限界曲線が十分な実験データに基づいて設定され、それに基づいて設計で使用する範囲（設計範囲）を規定することが望ましい。ただし、圧縮せん断試験による水平破断試験のデータ、特に実大製品による試験は非常に少なく、今後のデータの蓄積が必要である。試験装置の能力の制約から水平破断試験を縮小試験体により確認することも行われている。縮小モデルを用いた試験ではスケール効果により実大製品の限界性能を精度良く評価することは難しい。しかし、現状では実大製品による試験可能な領域までの結果と縮小試験体による破断試験を相互に比較することで実大製品の限界性能を予測するなど、出来るだけ多くのデータに基づいて評価することが求められる。縮小試験体の縮小比としては少なくとも 1/1.5~1/2 程度は必要と考える。

圧縮破壊試験は天然ゴム系積層ゴムを用いた 1 例だけであり、他の積層ゴムを用いた試験はなされていない。引張方向の特性評価試験の結果、引張変形能力は高いことが明らかとなり引張域での使用範囲も増えている。引張方向は圧縮方向の特性とは異なり、引張荷重が小さいかわりに変形能力は高い特徴を示す。このため積層ゴムの引張側特性については引張ひずみで評価するのが適切であると考えられる。しかし、スケール効果や引張変形を受けた後の経年劣化などについての検証は不十分である。

いずれにしても免震部材の性能をいろいろな角度から評価することが求められている。免震部材が大型化する中、性能評価を厳密に行うために公的機関などに大型の試験装置を整備することも推進すべきであろう。

三菱マテリアル製鉛ダンパーの溶着不良事故は 3 月にプレス発表された。現在は現行品との取り替えに入っていると聞いている。事故に繋がった製造方法の不具合については徹底的に検証される必要がある。不良品の疑いがある製品について本年 2 月に福岡大学で実施した試験結果から、「溶着率が 40% 程度以上の製品に関しては、今回の試験範囲では溶着面の剥離などの異常は発生しないと思われる。」との判断を

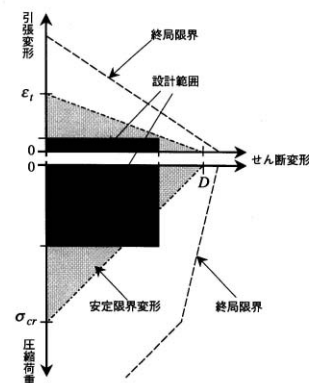


図 7 積層ゴムの限界性能曲線の考え方

設計範囲の一部が安定限界変形を越えている部分があるが、これは安定限界変形が必ずしも限界状態に達しているわけではないことによる。

※「免震構造の最新動向」, 建築技術 2001 年 7 月号に投稿したものと同一内容です。

提出したものの、「同じ製造時期の製品でも性能の変動が大きい」ため設計者・施工者は我先にと現行品との交換を要求した。製品に不良があれば交換するのはメーカーの責任であるが、取り替えの判断基準について十分検討されないままになっているのは残念である。

当該メーカーの製品に関して 1995 年～1999 年まで限界性能を含めた加振試験は福岡大学では行われていない。途中、何回か製品検査として限界性能試験等が実施されておれば、不良品の早期発見は可能であったかもしれない。この様なことが行われなかったことは、メーカーだけでなく、免震部材に関して設計者や施工者の認識が足りなかったことも一因であると考えられる。設計目標に照らして免震部材の製品検査としてふさわしい性能検査法の採用を心がける必要がある。

取り替えられた鉛ダンパーの溶着部の健全性を評価することは、交換が適切であったのか、不良発生の原因究明、並びに今後の製品の品質を確保する上で非常に効果的と考えるが、交換作業に追われ、そのような余裕はないと聞いている。今後、交換された製品については製品性能試験などの実施とデータの公開を期待したい。

性能の評価や検査に関しては、免震だけの問題ではなく、一般の建築物にも当てはまる問題である。品質を管理するのは大変なことであり、品質を見極める試験方法や全数検査か抜き取り検査かなどについて慎重に考える必要がある。これは設計者の責任である。法律を免罪符にしてはならない。

4. 部材設計は誰のもの

日本建築学会や日本免震構造協会ではアイソレータやダンパーを「免震部材」と呼称している。これは、免震部材を通常の柱や梁と同じ構造部材として認識しているためである。免震構造の開発初期の段階では、「免震装置」という言葉が使われていた。一部では積層ゴムの支持荷重を「定格荷重」と呼んでいた時期もある。現在でも使われることもあるが、機械部品のような機構をもつものなどは装置と呼ぶ方が適切かもしれない。原子力の分野では免震装置は免震システムのことを指し、個々のアイソレータなどは「免震要素」と呼んでいる。

今回、告示ではこれらとは全く異なり「免震材料」という呼称が用いられた。アイソレータやダンパーは単一の材料で構成されているわけではなく、幾つかの材料が組み合わせられて本来の性能を発揮する。この組み合わせ方によっていろいろな性能が発揮されるわけで、「材料」という呼称は全く不適切である。また、この「材料」は認定材料とならないと使用できないことになっている。

免震材料に対する品質基準（告示第 2010 号）には基準値（特性値）の測定方法などが規定されている。しかし、その内容は、弾性系支承（積層ゴム）に面圧依存性、速度依存性に関する規定がないなど、部材の性能を評価する上では最低基準とも言えないものである。認定された「材料」の基準値のみがカタログの様な形式で公表されるだけでは、基準値の判断ができない。認定された部材の基準値を決める背景となった実験データが公開されることが是非必要である。検査方法に関しては、抜き取り検査が可能となっているが、鉛ダンパーの事故例に見るように、他の部材も含め全数検査は当面続ける必要がある。

免震建物の技術的基準（告示第 2009 号）では、等価線形化手法（本来、等価線形化手法は収斂計算により応答を求める方法である）による計算法が規定されている。大まかな手順は、1)免震

層の設計限界変位 δ_S を免震部材の基準変形に基づいて設定、2)設計限界変位時の履歴特性から等価粘性減衰定数 h_d に基づいた加速度の低減率 F_h を計算、3)設計限界変位に対応する等価剛性 $K = Q_S / \delta_S$ から等価周期 (設計限界固有周期) T_S を算出、4)免震層に作用する地震力 Q から免震層の基準変位 $\delta = Q / K$ を算出し、これに諸係数を乗じて、応答変位 δ_r を算出する。最終的に、これが設計限界変位 δ_S 以下であれば OK となる。

認定された「材料」の剛性や降伏荷重などの基準値を利用すれば、いとも簡単に免震建物の「計算」は可能となる。バイリニア型復元力特性において限界変位量が与えられれば告示に示された方法から等価周期 T_S と等価減衰定数 h_d は決定される。そこで、変位量を 1cm 刻みで 100cm まで変化させて得られる T_S , h_d を用いて基準変位を計算した。その結果を図 8 に示す。バイリニア型復元力の降伏変位は 1cm で一定、接線剛性にに基づいた周期 T_f は 2~6 秒、降伏せん断力係数 α_s は 0.04 とした。地震力の計算では、表層地盤の増幅係数 G_s と地域係数 Z はともに 1.0 としている。免震層の復元力特性と入力レベルが同一であるにもかかわらず、限界変位を大きく設定するに従い、基準変位 (応答変位) は単調に増加する。単純に $G_s = 2$ とした場合、限界変位は 60cm 以上必要となる。また周期 T_f による変化はほとんどない。これは降伏せん断力係数が変化しても同様である。この様に、告示の計算法は応答値に免震建物の周期特性が反映されにくく、地震時応答変位が恣意的に決定される可能性がある。

図 9 は、図 8 と同様にバイリニア型復元力モデルから得られた T_S , h_d を用いて弾性応答解析を実施し、最大応答変位を求めた結果である。入力地震波は BCJ-L2 (0.8 倍) と EL CENTRO(NS)50kine である。いずれの場合も横軸の変位量の増加に伴い、等価線形応答は増加傾向を示す。BCJ-L2 波入力に対しては図 8 の場合によく似た傾向を示しているが、EL CENTRO 波では周期 T_f の違いにより応答変位には差異が見られる。同じ復元力特性を用いて弾塑性応答解析を実施した。EL CENTRO 波入力時は周期 T_f の影響は少なく、応答変位は 16~20cm の範囲にある。BCJ-L2 波入力時には、周期 2 秒の約 16cm から周期 6 秒の約 32cm まで一様に増加する。図 9 において応答値が収斂するのは、横軸と縦軸の変位量が一致する点であり、EL CENTRO 波の場合には弾塑性応答にほぼ対応している。しかし、BCJ-L2 波の場合の等価線形化による応答値は周期の変化を殆ど受けず 20cm 程度である。これは一つの例であるが、等価線形化手法の適用性については更なる検証が必要である。

免震建物だけに限らず建築物の耐震安全性の検討において、部材の性能と建物の設計は不可分の関係にある。限界耐力計算法では、免震層 (免震部材) の復元力特性がすでに決まっていると

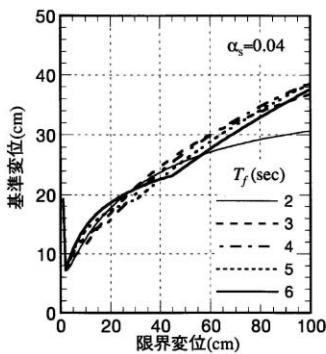


図 8 告示式による限界変位と基準変位の関係

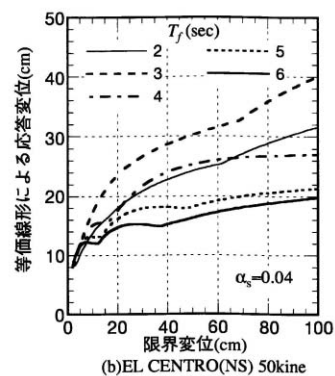
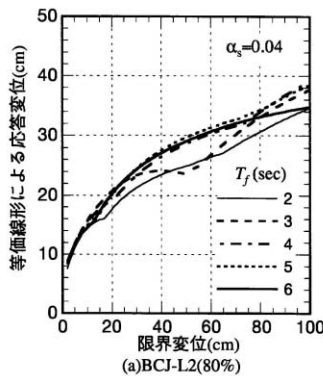


図 9 等価線形による応答変位

※「免震構造の最新動向」, 建築技術 2001 年 7 月号に投稿したものと同一内容です。

の前提にたっているが、実際には作用する荷重や速度などの影響で履歴特性は影響を受ける。部材の性能評価と免震建物の性能評価を別々に行うことは非常に不自然である。

部材の設計と免震建物の性能評価をともに設計者の判断と責任で行えるようにすることが必要である。このことが、より品質の高い免震建築を多く創り出せる原動力になるはずである。

5. おわりに

免震部材の特性は完全に解明されているわけではなく、形状、材質や荷重条件の影響を受ける。「免震材料」として性能を一律に規定できる段階にはない。設計者は免震部材が柱や梁と同じ構造部材であるとの認識に立ち、免震部材の調査・研究を行い、免震部材の選択、設計、仕様の決定を行うべきである。設計者には、免震部材の製作と性能・挙動に関する十分な認識が求められている。

参考文献

- 1) 多田英之, "免震の真実", 毎日新聞社, 1999
- 2) 秋山 宏, "建築基準法改正への期待と警鐘", 鉄構技術, 200.10
- 3) 神田 順, 小堀鐸二, 西川孝夫, "建築基準法「性能規定化」の現状に関する問題点と提言", 鉄構技術, 2001.3