高減衰免震ゴム

深堀 美 英*

1. はじめに

免震用積層ゴムを用いた免震構造ビルの開発に
いよいよ拍車がかかってきたようである。日本では1985年までに完成した免震ビルが1棟であったのに対し、それから2年間で9棟が建設され、1988年には更に8棟が建設される予定になっている。これはフランスの小学校(1977)、南アの原子力発電所(1977~1984)、ニュージーランドの一般ビル(1981)及びアメリカの州裁判所(1985)など1988年までに日本以外の世界各国で建てられた免震ビルの合計が10棟足らずであることを考えれば、日本における最近の免震構造の普及がいかに急速であるかを物語っている。

一方このような免震ビルの開発が最初は大手ゼネコンと呼ばれる一部の大手建設会社を中心に進められたのに対し、最近はその他のゼネコン各社の参入が目立ち今年中には約30の建設会社が免震ビルの大員認定を得るための建設センター評定を終了、又は受けることになっている。

また免震構造を適用する建物の種類にも最近変化が見られる。すなわち最初に建てられたほとんどの免震ビルがゼネコン各社の自社用研究棟や寮などであったのが、昨年頃から一般的なマンションやオフィスビル、ハイテクビルなどへと適用範囲が拡大している。

更に今一つ、免震ビルの普及を急速なものにしている要因として免震ビルの有効性がいくつかの地震で立証されてきたことがあげられる。例えば1987年12月17日の千葉県沖20 km(マグニチュード6.7)の地震は、千葉が震度5(強震)、東京などが震度4(中震)という、関東地方としてはかなり大きな地震であった。この結果千葉では窓ガラスが割れたり、ケガ人が出るなどの被害があった。この地震に対する免震ビルの効果が数多く報告されているが、その中でも例えば千葉県に近い西船橋にある竹中工務店の独身寮と、清瀬にある大林

組のR & Dセンターに関する観測結果が図1¹⁾、図2²⁾に示されている。これらのデータは、免震構造にすることによって建物に加わるエネルギー(加速度)が地震のエネルギーの1/4程度に減少さ

図1 地震観測結果：竹中工務店独身寮(免震ビル)

図2 地震観測結果：大林組R/Dセンター(免震ビル)と技術研究所(非免震ビル)

* (株)ブリヂストン(〒187 東京都小平市小川東町3-1-1)研究開発本部、主任研究員。昭和45年九州大学工学部応用化学科修士課程卒業。同年ブリヂストンタイヤ(株)(当時)入社。49~51年ロンドン大学クィーンメリーカレッジ留学。Ph.D. <趣味> テニス、野球、絵画。

れることを立証している。

以上述べたようにいまや免震ビルは、最初の“ものめずらしさ”の段階から“実質的效果を求めて”の段階に入ったと考えてよい。そしてそのような背景の下で今求められているものは免震構造を真に普及させるための優れた免震用デバイスの開発であり、特に免震ゴムとダンパーの開発はそのポイントになっている。

2. 高減衰免震ゴムとは

免震構造は基本的には2つの要素から成り立っている。1つは、ばね支承であり、もう1つはダンパーである。ばね支承というのは、平常的に建物を直接支えるとともに地震時には建物の水平方向の揺れの周期を地震波の周期より長周期側へずらす働きをするものであり、建物を支えた状態でその水平方向のゆっくりした往復運動を保証するばねの役割を果たす。このばね支承として最もよく用いられているのがゴムと鉄板の積層体である免震用積層ゴム(免震ゴム)である³⁾(図3)。

一方ダンパーは建物の地震時の水平変位を一定値以内におさえるとともに、地震時の建物の揺れをできるだけ早く減衰させる働きをする。このようなダンパーには金属(鋼棒、鉛棒)の塑性変形を

利用する弾塑性ダンパー、粘性体のせん断抵抗力を利用する粘性ダンパー更にオリフィスを用いるオイルダンパーなどがあり、ゼネコン各社が独自のダンパーを開発している。

日本では免震ゴムとダンパーを並列に設置する免震構造が一般的である。例えば大林組のR & D センターは免震ゴム14個と鋼棒ダンパー96本で構成された免震ビルである²⁾(図4)。その他、鹿島建設も免震ゴムと鋼棒ダンパー、竹中工務店は免震ゴムと粘性ダンパー、清水建設は免震ゴムとオイルダンパーをおのおの並列に設置して使用している。しかしながら免震ゴムと独立のダンパーを並列に設置すると、ダンパー自体の費用に加えダンパー施工費用及びメンテナンス費用がかさむため全体としてかなりコスト高になることがさけられなかった。更に免震ゴムとダンパーが床下に林立するため床下の空間が狭くなり作業上も見ばえ的にも好ましくないものとなっていた。

これに対し、免震ゴムに直接減衰(ダンピング)効果を付与した、ばね効果と減衰効果兼備の一体型免震ゴムが開発されている。その1つが鉛入り免震ゴムであり、免震ゴムの中心部をくり抜きその部分に鉛を封入したものである(図5)。特性的には免震ゴムと鉛棒ダンパーを並列に設置したものと同じである。一方、ばね効果、減衰効果兼備の一体型の別のタイプとして本報告で述べる高減衰免震ゴムがある。これはダンパーを併用するのではなく、ゴム自体に高減衰性、高ヒステリシス性を与えることによりばね効果とダンピング効果を備えたものとなっている。このような高減衰免震ゴムの一例としてはカルフォルニアの州裁判所に用いられたものがあるが、減衰能力の大きさなど

図3 免震構造の基本構成

図4 免震ゴムと鋼棒ダンパーで出来た免震構造

図5 鉛入り一体型免震ゴム

に問題があり今までのところ日本では使用されていない(図18参照)。

ところで免震構造体においてどの程度の減衰能力を必要とするかは建物の設計者の思想にもよるが、日本におけるゼネコン各社の求める値は多くの場合、等価粘性減衰定数が0.15以上となっている(後述)。このように高減衰免震ゴムに求められる性能はまずゴム自体の減衰能力が極めて高いことである。一方ばね支承としての働きを考えるとばね定数(剛性)の温度依存性や振動数依存性が小さいこと、クリープの小さいことが必要である³⁾。一般的には材料における高ヒステリシス性と低温度依存性、低クリープ性は相反するものであり、それらの両立化が開発のポイントになる。更に長期耐久性が必要なものも当然である。

以上のように高減衰免震ゴムの開発にはいくつかの困難な課題を解決しなければならないが、今回ブリヂストンで開発された高減衰免震ゴム(MRB-HD)はこれらの課題にチャレンジした製品である。したがって本報で説明する高減衰免震ゴムとは特に注釈がない限りこのMRB-HDを指すものとする。

3. 高減衰免震ゴムのばね特性と減衰特性

高減衰免震ゴムの構造を図6に示す。長期(60年)耐久性を確保するために高減衰ゴムを外皮ゴムで保護する構造となっている。

さて高減衰免震ゴムのばね特性と減衰特性は次のようにして求められる。免震ゴムに一定の鉛直荷重を与えた状態で、水平方向に一定振幅(0.5 HzのSin波)で5回動的変形を与える(図7)。次に振幅を少し大きくして同様の変形を与える。このように順次振幅を大きくして測定(1st サイクル(図8))した後、再び低振幅から高振幅まで繰り返し2nd サイクルとする。このとき得られるヒステリシスループ(図9)から、等価せん断剛性(K_H)と減衰性能の指標となる等価粘性減衰定数

図6 高減衰免震ゴム

図7 動的圧縮、せん断試験機

図8 加振方法

図9 動的特性値の定義

(h_{eq})が式(1)と式(2)で与えられる。

$$K_H = F_0 / \Delta X \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{W}{\Delta ABC} \quad (2)$$

そこで高減衰免震ゴムについて得られた測定結果を以下に示す。

3.1 変形量依存性

最初に減衰能力の小さいゴムの代表例として標準的天然ゴム系免震ゴムのヒステリシスループを図10に示す。ヒステリシスループのふくらみは非

図10 標準免震ゴムのヒステリシスループ

図11 鋼棒ダンパーのヒステリシスループ²⁾ 図12 鉛入り一体型免震ゴムのヒステリシスループ⁴⁾

常に小さく $h_{eq}=0.025$ となっている。一方鋼棒ダンパーのヒステリシスループを図11に、鉛入り一体型免震ゴムのヒステリシスループを図12に示す。これらのループの特性として大きな減衰能力が得られる代りに変位の小さい領域ではかなり高

図13 鉛入り一体型免震ゴムを用いた免震鉄骨体をEl Centro波で加振したときの応答加速度(G)の時間変化：(a)加振台、(b)1階、(c)5階

い剛性を示す。このため小さい地震には免震効果を発揮しにくいのではないかと考えられており、ゼネコン各社が独自の工夫をこらしている。更に今一つの特徴として、弾塑性ダンパーの場合図11、図12が示すように基本的にヒステリシスループが菱型となっており加荷時に比べ除荷時の剛性がかかなり高くなるため、高周波振動領域で共振現象を起こす可能性がある。図13、図14はかなり大きな鉛を免震ゴムの中心部に封入した一体型免震ゴムを用いて行われたカルフォルニア大学での実験結果である⁴⁾。これは加振機の上に組立てられた鉄骨構造体(コンクリートブロックを載せて重量調整)の基礎底部にこの一体型免震ゴムを敷き、地震波(El Centro波)で加振した時の鉄骨体の応答加速度を測定したものである。図13の(a)は加振台、(b)、(c)はおのおの鉄骨体の1階及び5階における加速度の時間変化をG単位で示したもので

図14 図13で与えられた各加速度の振動数特性：(a) 加振台，(b) 1階，(c) 5階

あり，一方図14の(a)，(b)，(c)は図13に与えられた各加速度の振動数特性(フーリエスペクトル)である。図13より，このような免震構造とすることにより最大加速度が加振台上の0.85 Gから1階で0.28 G，5階で0.38 Gに減少していることがわかる。一方，図14を見ると，1階，5階では加振機には含まれないかなり強い振動が15 Hz付近に現われている。これは前述の除荷時の高剛性に起因する共振現象と考えられ，免震構造の設計時に考慮すべき項目の一つであろう。

さて高減衰免震ゴムのはステリシスループについて，ひずみのやや小さい領域での結果を図15(a)，(b)に，ひずみの大きい領域までの結果を図16(a)，(b)に示す。高減衰免震ゴムの特徴としてはほきれいな笹の葉状のはステリシスループを描くことがわかる。したがって弾塑性ダンパーと異なって加荷時と除荷時の剛性の差が小さく，ループの頂点間を結ぶ直線で系の剛性が近似できる。高減

図15 高減衰免震ゴムの中変形領域でのハステリシスループ：(a) 1st サイクル，(b) 2nd サイクル

衰免震ゴムの場合，1st サイクルに対し2nd サイクルのほうが剛性が低下しループ全体が丸味をおびる傾向がある。そこで，得られた水平方向の剛性をせん断ひずみに対してプロットしたのが図17である。高減衰ゴムは典型的な力学的非線形性を示す材料であり，ひずみの小さい領域ではひずみの減少に伴って剛性が急激に増加することがわかる。ただしひずみが50%以上になるとこの傾向はゆるやかになり，100%を越えると300%程度まではほとんど変化しない。図18(a)は高減衰免震ゴムを一方方向にのみ変形させたときのS-S曲線であるが，せん断ひずみが350%を超えると剛性が再び増加し，550%で破断している様子がわかる。図18(b)はそのときの破断面写真である。フランジ近傍の接着部で破壊しているが，完全なゴム破壊であることを示している。

図16 高減衰免震ゴムの大変形領域までのヒステリシスループ：(a) 1st サイクル，(b) 2nd サイクル

図17 高減衰免震ゴムの力学非線形曲線

図18(a) 高減衰免震ゴムの静的S-S曲線

図18(b) 高減衰免震ゴムの破断面，矢印は破壊の進行方向を示す

一方等価粘性減衰定数(h_{eq})のひずみ依存性を図19に示す。ひずみが大きくなるにつれ h_{eq} は若干低下する傾向があるが、設計値として定められた許容せん断ひずみ値200%までは h_{eq} が0.15を超えており、特にひずみが100%以下では h_{eq} が0.2に近い値となっている。これらの結果は高減衰免震ゴム(MRB-HD)が免震構造に必要な減衰能力を充分備えていることを示している。ちなみにカルフォルニアの州裁判所で用いられた高減衰免震ゴムの h_{eq} を図19に併記しているが、MRB-HDに比べ h_{eq} の値が約1/2となっている。

3.2 鉛直荷重依存性

一般に免震ゴムの水平方向の剛性は鉛直荷重依存性を示し、一定の鉛直荷重を加えた状態で水平

図19 高減衰免震ゴムの等価粘性減衰定数(MRB-HDとカルフォルニア州裁判所に用いられたものとの比較)。

図20 せん断変形を加えたとき、免震ゴム内で起こるインサート鉄板の回転による水平分力の発生

方向に変形させたときの水平方向の剛性は鉛直荷重の増加に伴って低下する。これは図20に示すように積層ゴムがせん断変形するときインサート鉄板が回転し更に鉄板の一部に曲げが起こるた

図21 せん断剛性の面圧依存性

図22 等価粘性減衰定数の面圧依存性(記号は図21と同じ)

め⁵⁾、これに鉛直方向の力が加わるとせん断方向の分力が発生しせん断変形がより容易に起こりやすくなる、すなわちせん断剛性が低下する現象である。

高減衰免震ゴムの場合も同様の傾向を示し、鉛直荷重が増加するにつれ水平方向の剛性が若干低下する(図21)。一方、 h_{eq} は鉛直荷重が増加する

図23 ゴム厚の大きい高減衰免震ゴムにおけるヒステリシスループの面圧依存性：鉛直荷重が、(a) 0 ton, (b) 4 ton, (c) 8 ton.

につれ若干増加する傾向がある(図22)。

これらの極端な例として、ゴム層がかなり厚い形状の高減衰免震ゴムにおけるヒステリシスループの鉛直荷重依存性を図22に示すが、鉛直荷重の増加に伴ってヒステリシスループの形状が変化し h_{eq} が著しく増大する(図23)ことがわかる⁶⁾。

3.3 繰り返し変形依存性

前に述べたように、高減衰免震ゴムでは1stサイクルと2ndサイクルの剛性の差がかなり大きい(図15, 図16)。ただし図24に見られるように一定変形量で連続繰り返し変形させたときの剛性は、3回以後になるとほぼ一定値になる。一方、等価粘性減衰定数 h_{eq} は繰り返し変形を与えてもほとんど変化しない(図25)。

高減衰免震ゴムが繰り返し変形を受けたとき免震ゴムの内部、外表面部で外気温度に対してどの程度の温度上昇が起こるかを図26に示す。当然のことながら温度上昇の程度は変形量や振動数によって異なるが、免震ゴムが地震時に最大ひずみを受ける回数は10~20回程度と考えれば温度上昇に伴う性能の変化はほとんど無視してもさしつかえない。

図24 セン断剛性の連続くり返し数依存性

図25 等価粘性減衰定数の連続くり返し数依存性 (記号は図24と同じ)

3.4 振動数依存性

高減衰免震ゴムの性能の振動数依存性を図27, 図28に示す。図27を見ると振動数が高くなるにつれ若干剛性が増加しているが、その温度依存性がかなり小さい(後述)ことを考えると剛性の振動数依存性は考えなくてもよい。また h_{eq} もほとんど振動数依存性を示さない。

3.5 温度依存性

免震ゴムに求められる重要項目の一つとして剛性及び減衰性能の温度依存性の小さいことがあげ

図26 連続くり返し変形による高減衰免震ゴムの温度上昇

図27 セン断剛性の振動数依存性

図28 等価粘性減衰定数の振動数依存性(記号は図27と同じ)

図29 高減衰免震ゴムにおける剛性の温度依存性。各温度における剛性を30°Cの剛性で規格化してある。

られる。なぜなら免震ゴムの使用される温度範囲はかなり広く³⁾、これらの特性の変化が直接形状設計を左右するからである。図29は高減衰免震ゴムの剛性の温度依存性を示している。ここでは、各温度における剛性($E(T)$)を30°Cにおける剛性($E(30^\circ)$)で規格化した値として表示されている。免震ゴムの使用温度(-30°C~30°C)を考えた場合、高減衰免震ゴムは標準的天然ゴム系免震ゴム(低ヒステリシス性)と比べてほとんど遜色のないものとなっている。

4. 高減衰免震ゴムのクリープ特性

免震ゴムは極めて長期間建物を支えるため圧縮クリープを小さくすることが求められる。免震ゴムの圧縮クリープは一般的には建物の沈下、特に不等沈下をもたらすということで警戒されるが、実際におこる免震ゴムの圧縮クリープ量は通常ので地盤沈下のレベルに比べるとかなり小さい。しかしここで重要なことは例え数%の圧縮変形であっても免震ゴム内に大きな局部ひずみ(引張りひずみ)を生じるという点にある⁵⁾。

免震ゴムに荷重を載せたときの沈下量(ϵ)は初

図30 高減衰免震ゴムと標準免震ゴムの20°Cにおけるクリープ曲線(両対数表示)。

図31 図30クリープ量に初期沈下量(ϵ_0)を加えた全沈下量(ϵ)曲線(片対数表示)。

期沈下量(ϵ_0)とその後時間とともに増加する沈下量($\Delta\epsilon$ =クリープ)の和で与えられるが、積層ゴムの圧縮クリープの特徴としてクリープ量と時間を両対数表示すると特異な曲線形状(初期にはゆるやかな曲線となるが一定時間後には直線となる)を示す³⁾。したがって直線部の外挿より長期クリープ量を推定することが可能である。図30は標準的天然ゴム系免震ゴムと比較したときの高減衰免震ゴムのクリープ曲線である。初期時間域では高減衰免震ゴムのクリープが標準免震ゴムより若干大きい。定常の直線域に入るとむしろ高減衰免震ゴムの勾配が標準免震ゴムのそれより小さくなる。この結果として例えば60年後には両者はほぼ同じ大きさのクリープ量となっている。そこでこのクリープ($\Delta\epsilon$)と ϵ_0 を加えた全沈下量(ϵ)の時間変化を示したものが図31であり、両者が同等の沈下量になることがわかる。このように高減衰免震ゴムはその高減衰性にもかかわらず標準免震ゴムと同等の低クリープ性を示す。

5. 高減衰免震ゴムの微小変形特性

3.1で述べたように、高減衰免震ゴムは典型的な力学非線形材料であり特に小変形領域ではその傾向が強い。そこで非常に小さい変形(せん断ひ

ずみが0.1～10%)下で高減衰免震ゴムがどのように挙動するか⁶⁾について述べることにする。

図32, 図33はおののせん断ひずみが0.1～1.0%, 1～10%におけるヒステリシスループである。本質的には図15, 図16と同じである。そこでこれらのひずみ域での剛性と等価粘性減衰定数をせん断ひずみに対してプロットしたのが図34, 図35である。剛性はひずみが低下するにつれて増加するが, せん断ひずみが約1%になると最大になり, そのときの剛性は100%ひずみ時の剛性の約4倍の大きさとなっている。

一方 h_{eq} はせん断ひずみが数%以上では0.15以上, ひずみが1%の時でも0.12を保っている。この点が, 低ひずみ域では弾性のみで減衰効果を発現しない弾塑性ダンパーとは大きく異なるところである。ただしひずみが1%以下になると高減衰免震ゴムも h_{eq} がかなり低下する。

高減衰免震ゴムが低ひずみ域でこのように挙動することは強風などから建物の揺れを守るのに好

適である。風による入力エネルギーは地震時のそれに比べるとはるかに小さいが, それでも標準免震ゴムの上に乗せた状態では建物が風で揺れるため住人の船酔い現象が起こる。高減衰免震ゴムは小変形での剛性が高くかつかなり大きい減衰性能を持っているため風揺れ防止のトリガーが不要である。

しかし一方, 微小変形時の剛性の増加は免震ゴムに免震機能と微振動(例えば交通振動, 精密機器に対する地盤振動)防止を兼備させるのに望ましいことではない。この点に関し高減衰免震ゴムの場合現在までのところ2種類の異なった報告がなされている。一つは大林組の報告であり, トラック振動では31.5 Hzと63 Hzを含む18 Hz程度以上の振動数範囲で防振効果のあることが実験的に確められている⁷⁾(図36)。また, 63 Hzを重要視する地下鉄の構造物に対しては顕著な防振効果のあることが計算で求められている(図37)。

一方鹿島建設の計算では防振効果があまり期待

図32 微小せん断ひずみ(0.1%～1.0%)下での高減衰免震ゴムのヒステリシスループ

図33 図32と同種プロット, ただしせん断ひずみが1～10%

図34 小変形領域におけるせん断剛性の変化

図35 小変形領域における等価粘性減衰定数の変化

図36 トラック走行(30 km/hr)時の上下方向の振動, 高減衰免震ゴムを使用した建物(1階)と地盤の差

図38 振動台上の模型建物に高減衰免震ゴムを用いない場合と用いた場合の振動伝達率の差(マイナスの値が防振効果の大きさを示す)

図39 複合型免震ゴム

図37 地下鉄構築直上建物に高減衰免震ゴムを適用したときの上下方向の振動(計算例)

できないだろうという結果になっている⁶⁾(図38). このため鹿島建設とブリヂストンは高減衰ゴムと一般の低補強天然ゴム(標準免震ゴム用)とを図39のように複合化した免震ゴムを考案した⁶⁾. この場合複合免震ゴムは微小変形時には低補強天然ゴムの特性を示すが大変形になるにつれ高減衰ゴムの特性を示すようになる. すなわち微小変形時の剛性の増加が非常に小さいことを実験的に確かめている(図40(a), (b), (c)). いずれにしろ高減衰免震ゴムがどの程度の微振動防止効果を示すかは今後の評価を待たねばならない.

6. 地震に対する高減衰免震ゴムの効果

6.1 大地震に対する効果(シミュレーション)

これまで述べてきたように, 高減衰免震ゴムは等価粘性減衰定数が0.15以上であるため大地震に対しては優れた免震効果を発揮するであろうことは容易に予測されることである. 東急建設の研究陣は高減衰免震ゴムを用いた免震建物に, 表1で与えられる各種地震波を入力したときの建物の応答をシミュレートした. ただし等価粘性減衰定数

図40 小変形領域における複合型免震ゴムのヒステリシス特性：(a)せん断ひずみ0.1～1.0%，(b)せん断ひずみ1～10%，(c)せん断剛性のひずみ依存性

は0.12を用いている⁸⁾。図41、図42は得られた加速度応答スペクトル及び変位応答スペクトルである。図41で示される最大加速度はいずれの地震波に対しても表1で与えられる入力最大の加速度の1/5程度となっている。またそのときの建物の最大の変位量はほぼ設計許容変位(30 cm)内に収まっている(図42)。これらの結果は大地震に対する高減衰免震ゴムの免震効果を裏づけるものである。

表1 各種地震波とその最大加速度

地震波名	最大加速度 [gal]
EL-CENTRO, NS	511
TAFT, EW	497
HACHINOHE, NS	330
TH 030-1FL, NS	367
人工地震波	137

図41 高減衰免震ゴムを用いた建物に表1の各種地震波を入力したときの加速度応答スペクトル

図42 図41に関する変位応答スペクトル

6.2 小地震に対する効果(実際の観測結果)

すべての免震構造は大地震に対しては優れた免震効果を発揮するように設計されている。しかし、小地震に対しても効果を発揮するかどうかは

使用するダンパーに依存しており、一般に弾塑性ダンパーは免震効果を発揮しにくく(前述)、粘性ダンパーやオイルダンパーは免震効果を発揮しやすい。さて高減衰免震ゴムの場合について貴重な観測結果が大林組から報告されている。

大林組の清瀬市(東京)にある実験棟は高減衰免震ゴムを用いた免震建物となっており、1987年6月の茨城県南西部を震源とする地震(東京震度3)での観測結果が得られている⁷⁾(図43)。この図は地表面及び免震建物の1階床上で観測された東西及び南北方向の加速度の時間変化である。地表面での最大加速度が13 galであったのに対し免震建物上では最大加速度が3~4 galに減少しており、免震構造とすることにより地震のエネルギーが1/3~1/4に低減されることがわかる。

一般に震度4の中地震では地表面の最大加速度は50~100 gal程度となるが、この観測例の13 galの大地震に対し優れた免震効果があったということは高減衰免震ゴムが小さな地震に対してもかなりの免震効果を発揮するであろうと期待させる。

7. 高減衰免震ゴムにおけるダンピング発現のメカニズム

日頃、あまりゴム材料と関係のないユーザーにとってゴムが大きな減衰機能を持つということが不思議であるらしい。これは繰り返し引張ってもほとんど元の状態にもどる輪ゴムのイメージが強いからであろう。しかしゴム屋の立場から見ると、逆にすべてのゴム材料は大なり小なり減衰機

能(ヒステリシス効果)を持っているということが常識的である。そこで基礎的なことではあるが、今一度ゴム材料における減衰機能発現のメカニズムについて少し考えてみることにしたい。

7.1 理想ゴム弾性体

周知のとおりゴム弾性論によると、ゴム分子鎖は未変形のときエントロピー最大(エネルギー最小)の状態にあり、これが引張られるとエントロピーが減少し系のエネルギーが増加する。したがって力を取り去ると元のエントロピー状態に戻ろうとする。このため化学結合架橋点で固定されたゴム分子鎖は力を取り去ると元の構造、形状に戻り、そのときの応力~ひずみ曲線は加荷時と除荷時が全く重なるループを描く(図44(a))。ただしここで注意すべきことは、このような理想ゴム弾性論が成り立つのはおのおのの分子鎖が独立に動くことができ、かつ分子鎖同志の相互作用がない、すなわち摩擦係数がゼロのときである。

7.2 実在の架橋純ゴム

しかしながら実在のゴム架橋物の場合、分子鎖間にはファンデルワールス力や水素結合が働くため分子鎖の動きによってかなりの高摩擦(高粘着)が発生する。このため、分子鎖のからみ合いや凝集による弱い擬似架橋点が多数に存在する実際の架橋ゴムに力が増えられ、力の大きさに応じて分子鎖のすべりや凝集部分の分離などが起こり、結果的には擬似架橋点の数が減少する。したがって除荷時は加荷時に比べ、擬似架橋点の減少した割合に応じ応力が低下する。すなわち応力~

図43 高減衰免震ゴムを用いた免震建物の地震観測実例

図44 ゴムの応力~ひずみ曲線：(a)理想ゴム弾性体，(b)実在の架橋ゴム，(c)カーボン充てんゴム

ひずみ曲線がヒステリシスループを描く(図44(b)). このヒステリシスループで囲まれたエネルギー(ヒステリシスエネルギー)が、ゴムの変形時に発生する分子摩擦エネルギーであり熱エネルギーとして系外に放出される。標準免震ゴムに見られる若干のヒステリシスエネルギーは主にこのようなメカニズムで発現したものと考えてよい。

7.3 高減衰免震ゴム

ゴムにカーボンなどの充てん剤を加えると、上記のゴム分子鎖自体の摩擦に加えカーボン表面へのゴムの吸着やカーボン同志の連続相、不連続相の形成によって、みかけの粘性係数 $[\eta]$ が飛躍的に増加する(式(3))⁹⁾。

$$\eta = \eta_0 = (1 + 2.5\phi + 14.1\phi^2) \quad (3)$$

ここで η_0 はカーボンを含まないときのみかけの粘性係数、 ϕ はカーボンの含有分率である。すなわちこのような系に力を加えると、前述の分子鎖のすべりとはもとよりゴム分子鎖のカーボン表面からの脱着→再吸着、カーボン凝集相の破壊と再凝集などが起こり多大の摩擦エネルギーが発生する。これを応力～ひずみ曲線でみると除荷時の応力の低下が大きく、ヒステリシスエネルギーの大きいループとなる(図44(c))。

高減衰免震ゴムには、減衰能力を極めて大きくしかつクリープや性能の温度依存性を小さくするために特殊な充てん剤が配合されている。したがってゴムと特殊充てん剤によって形成された系内で起こる内部摩擦によって、系に加えられた力学的エネルギーの一部を熱エネルギーに変換して消費させる働きが高減衰免震ゴムのダンピング発現のメカニズムである。

8. あとがき

高減衰免震ゴムはコストダウン効果、施行、メンテナンスの容易さ及び中小地震に対する期待などがあるため、現在かなり多数のゼネコンが高減衰免震ゴムを用いた免震建物を建築センターで評定中である。

一方高減衰免震ゴムの適用法の一つとして部分免震システムがある。これは新築ではなく既存ビルの免震を行うのに、建物全体ではなく各階、各床、各機器レベルを免震させようというものである(もっともアメリカでは既存ビルの免震が行なわれ始めている)。このような免震の場合一般に被免震体の重量が軽いため通常形状の免震ゴムで

図45 多段式免震ゴムシステム

は背高ノッポにならざるを得ず、この結果非常に座屈しやすくなる。これを解消するために開発されたのが多段式免震ゴムシステムであり、一般に4個の小型免震ゴムを鉄板で連結したユニットを数段重ね合せたものである(図45)。

高減衰免震ゴムにとって今後の課題は、その複雑なばね特性、減衰特性を建物の地震解析と連結するためのソフトの開発であり、現在理論的、実験的に検討されている。いずれにしろ高減衰免震ゴムにしてもその他の免震構造体にしてもまだ実際の地震経験が少なく、その免震効果を正確に評価するには今後の数多くの観測結果を待つ以外にない。

参考文献

- 1) 読売新聞：12月18日，1987，データは竹中工務店より入手
- 2) 武田寿一：構造物の免震，防振，制振，技報堂(1988)，p. 140
- 3) 深堀美英：日ゴム協誌，60，397，1987
- 4) Kelly, J. M., Tasi, H. C.: Structural Engineering and Structural Mechanics, Report No. UCB/SESM-84/17, 1984
- 5) Seki, W., Fukahori, Y., Iseda, Y., & Matsunaga, T.: Rub. Chem. Tech., 60, 856, 1987
- 6) 八坂厚彦，飯塚真巨，深堀美英，芳沢利和：昭和63年度日本建築学会大会(関東)，講演No. 2197(1988)
- 7) 武田寿一，岡田 宏，内田 壘ら：大林組技術研究所報 No. 36, 103, 1988
- 8) 小嶋英治，林田敏弘，川久保政茂ら：東急建設技術研究所報 No. 14, 135, 1988
- 9) Kraus, G.: Rub. Chem. Tech., 38, 1070(1965)