

フェライト混練高減衰積層ゴムの開発

鈴木英世*・間山正一**・竹内幹雄***
・朝倉正雄****

新素材であるフェライトをゴムに混入した高減衰積層ゴムの開発を行った。実験計画によりゴム配合を設定し、ゴム単体の物性試験・減衰特性試験を行った。その結果、配合とフェライトゴムの物性値の関係が明らかとなり、高減衰積層ゴムに適した配合を知ることができた。次に、実物大の積層ゴムを作製し、免震装置に想定される種々の荷重・変形・振動数での力学試験および耐久性試験を行った。その結果、減衰定数が約11%で耐久性のあるフェライト混練高減衰積層ゴムが開発できたことを確認した。

Keywords : rubber bearing, high damping, ferrite byproducts, ferrite rubber, base isolation system

1. ま え が き

近年、従来の耐震設計技術に加え、免震設計技術の開発・研究が盛んに行われている。ニュージーランド、アメリカ等の諸外国においては、免震システムが道路橋¹⁾や建築構造物²⁾に積極的に取り入れられ、地震力の低減や、既往構造物の耐震補強に利用されている。国内でも建築分野を中心に、免震構法が導入され³⁾⁻⁵⁾、実用化技術として定着しつつある。

建築分野以外でもニーズは拡大しつつあり、著者らもライフラインの耐震性向上、震災後の都市機能の保持を目的として、電力施設を対象に免震システムの設計法の研究⁶⁾、免震装置の開発⁷⁾を行ってきた。また、橋梁分野でも免震システムを導入した道路橋が誕生しようとしている。

これまでもさまざまな免震装置が開発され利用されているが、基本的には、構造物を支持し長周期化を図る目的で主に積層ゴムを利用したアイソレーターと、エネルギーを吸収するダンパーとから構成されているものが多い。現在ではさらに、このアイソレーターとダンパーの両機能を有した高減衰積層ゴムを使用した免震装置が注目され、開発が行われている。この場合、アイソレーターとダンパーが一体化しているため、分離して設置するものに比べ、施工性が優れており、今後利用が拡大するものと考えられる。

一方、著者らの一人は、新素材としての副産物フェライトに注目し、種々の結合材の混合からなるフェライト混合物の材料およびその応用に関する研究^{8),9)}を行ってきた。本研究は、副産物フェライトがもつ制振性能に着

目し、これを免震装置に応用し、新素材を用いた高減衰積層ゴムの開発¹⁰⁾を試みたものである。なお、減衰定数の目標値は、著者らの研究⁶⁾から十分な免震効果の得られる値として、10%以上とした。ここでは、まずフェライトゴムの試験配合を行い、高減衰ゴムとしての条件を満足するゴム配合の検討を行った。次に、ゴムと鉄板を積層化し、実物大の高減衰積層ゴムを作製し、免震装置に想定される種々の荷重、変形、振動数での力学試験および耐久性試験を行い、高減衰ゴムとしての性能を確認した。

2. フェライトゴムの配合と基本物性

積層ゴムを作製するに先だち、配合と減衰特性・基本物性との関係を知るためゴム単体試験を行った。

(1) 材 料

a) 副産物フェライト

副産物フェライトとは、製鉄残渣、チタン白製造副産物、あるいは排水処理残渣として生成されるものであり、主として Fe_3O_4 から構成される磁性酸化物である。表-1に今回用いた副産物フェライトの分析表を示す。以後、この副産物フェライトを単にフェライトと呼ぶ。

フェライトは一般に比重が5程度、黒色を呈し、ニッケル程度の強さを有する強磁性の酸化物であり、比抵抗で $10^2 \Omega \cdot cm$ と電気抵抗が高く、化学的に安定している。また、含水比が数十%のスラッジ状で生成されることが多く、それ自体には結合力をもちない。写真-1にフェライトの顕微鏡写真の一例を示す。フェライトの粒径は、生成場所、生成時期により異なるが $1/100 \mu m$ ~数百 μm である。これを図-1の粒径加積曲線に示すように粒度調整をして使用した。

b) ゴ ム

本研究で使用したゴムは、天然ゴムを主体としたものであり、免震装置の置かれる環境を考慮し、耐久性の優

* 正会員 工修 東京電力(株)技術研究所
(〒182 調布市西つじヶ丘2-4-1)

** 正会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科

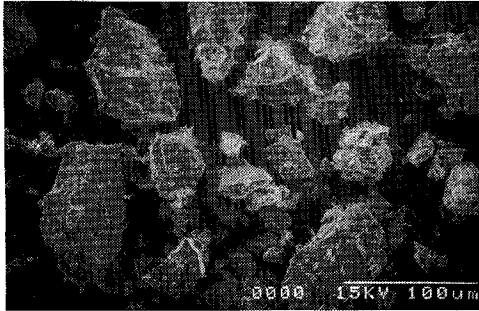
*** 正会員 工修 (株)奥村組技術開発部

**** 正会員 (株)奥村組技術開発部

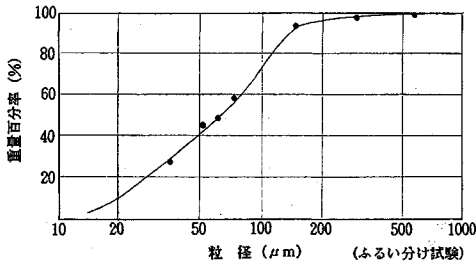
表一 副産物フェライトの分析値

成分	重量%	成分	重量%
Fe	65.06	Mn	0.122
Cu	0.012	S	0.267
SiO ₂	4.76	P	0.013
CaO	2.50	As	0.002
MgO	0.492	その他	25.821
Al ₂ O ₃	0.951		

(発光分光分析法による)



写真一 副産物フェライトの顕微鏡写真



図一 フェライトの粒径加積曲線

れた合成ゴムを混合した。

c) コーティング材

フェライト粒子のコーティング材には、アスファルトを用いた。コーティングの目的は、i) フェライトコンクリートの場合、アスファルトコーティングをすることにより制振効果が改善された事例があり、今回も同様の効果が期待できること、ii) フェライトの粒形が鋭利であり、ゴムの変形性能に与える影響を避けること、の2点である。コーティング方法も文献⁹⁾と同じく、フェライトとアスファルトを所定温度に加熱し、アスファルトミキサーで約2分間混合する方法とした。フェライトをコーティングするアスファルトは、2種類で、ストレートアスファルトとシリコンアスファルトである。シリコンアスファルトはストレートアスファルトにシリコン油を5% (重量%) 混入したものである。

なお、フェライトコンクリートの研究成果⁹⁾を参考に、フェライトをアスファルトでコーティングしたものと

表二 ゴムの基本配合

材	料	重量%	
ゴ	ム	天然ゴム	80
		合成ゴム	20
フェライト		100~400	
コーティング材		0~2.5	
カーボンブラック・補強剤		—	
可 塑 剤		32~48	
加 硫 剤		1.9	
老化防止剤等		7.5	

表三 ゴム配合の因子と水準

(重量%)

		水 準				
因	子	フェライトの量 A	A ₁ (100)	A ₂ (200)	A ₃ (300)	A ₄ (400)
		コーティングの種類 B	B ₁ (7X 80/100)	B ₂ (7X200/250)	B ₃ (シリコン・7X)	—
		コーティングの量 C	C ₁ (0.0)	C ₂ (1.0)	C ₃ (2.0)	C ₄ (3.0)
		可 塑 剤 D	D ₁ (32)	D ₂ (48)	—	—

*7X 80/100ストレート・アスファルト 80/100 の略 80/100 は針入度 80~100 のこと
 *7X200/250ストレート・アスファルト200/250 の略 200/250 は針入度 200~250 のこと
 *シリコン・7Xストレート・アスファルト 80/100 とシリコンを95:5に混ぜたもの

コーティングなしの両方を採用した。

d) 可 塑 剤

ゴム分子間の潤滑剤として物理的に作用し、ゴムの加工性の改善や製品の柔軟性を増す目的で使用するもので、本研究では、ナフテン系プロセス油を用いた。

その他の材料として、加硫剤、加硫促進剤、老化防止剤等を配合した。加硫剤には硫黄を使用した。

(2) ゴムの配合

ゴムの基本配合を表二に示す。ゴム配合の設定と試験結果の分析には実験計画法を用いた。とりあげたゴム配合の因子・水準を表三に示す。因子は、特に減衰に強く影響を与えると思われる、フェライトの量(A)、コーティング材の種類(B)、コーティング材の量(C)、可塑剤の量(D)の4因子とし、交互作用としてA×Cが存在するものとした。水準は、配合の量的把握を鮮明にするために、4水準とし、直交表^{11)~13)}を用いて配合の計画を行った。

ゴムは、天然ゴムと合成ゴムとし、配合比は重量比で80%と20%とし、フェライトの種類は1種類とした。フェライトの量は、ゴムに対する重量比で100%、200%、300%、400%の4種類を考え、フェライトを覆うコーティング材の種類は「アスファルト 80/100」、「アスファルト 200/250」、「シリコンアスファルト」の3種とした。なお、80/100、200/250とは、針入度試験の値が、80~100、200~250の物性であることを示している。また、コーティング材の量は、ゴムに対する重量比で0%、1%、2%、3%の4種類とした。0%は、コーティング

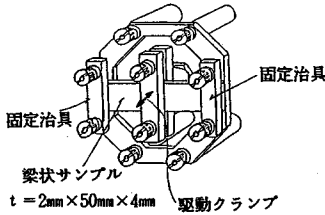


図-2 試験片・治具の概略図

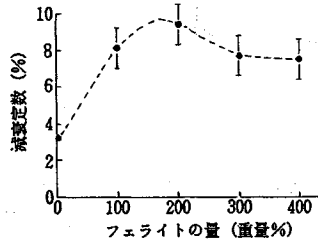


図-3 (a) フェライトの量と減衰定数

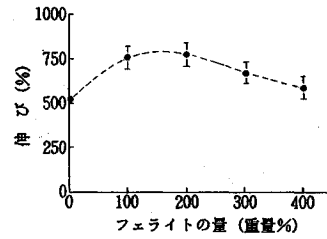


図-3 (b) フェライトの量と伸び

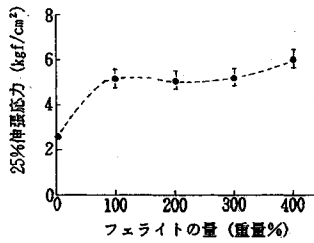


図-3 (c) フェライトの量と25%伸長応力

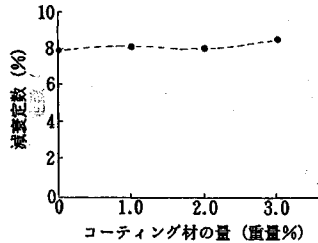


図-3 (d) コーティング材の量と減衰定数

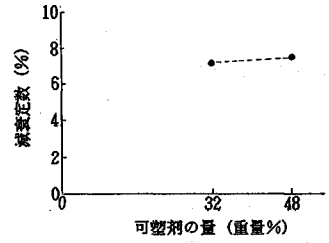


図-3 (e) 可塑剤の量と減衰定数

表-4 ゴム単体試験の試験項目

試験項目	測定値	試験片	試験方法
減衰特性試験	減衰定数 動的弾性率	50mm×4mm×厚さ2mm	別記のとおり
硬さ試験	硬度	厚さ12mm	JIS K6301 (3)
引張試験	引張強さ 伸び	ダンベル状 3号形	JIS K6301 (1)
低伸長応力試験	25%伸長応力	たんざく状 1号形	JIS K6301 (11)

表-5 コーティング材の種類と減衰定数

コーティング材の種類	アス 80/100	アス 200/250	シリコン・アス	コーティング材L
減衰定数 (%)	8.3	8.3	8.2	8.0

材を使用しないケースである。

ゴム配合の総数は、直交表を用いた実験計画法から32種類となり、比較のために、フェライトを配合しない既往積層ゴムに用いる天然ゴムの1種類を加え計33種類とした。

(3) 試験方法

ゴム単体試験の試験項目を表-4に示す。

a) 減衰特性試験

試験には高分子材料の動的特性値測定用に開発された動的粘弾性測定試験機¹⁴⁾を用いた。試験片・治具の概略を図-2に示す。梁状のサンプルの両端を固定し、その中央部を駆動クランプによって正弦振動を与え、ひずみを計測することによって、動的弾性率、減衰定数を算出するものである。今回用いた供試体の形状は50mm×4mm×厚さ2mm、試験片温度は20°C、加振振動数は0.3Hz、1.0Hzの2種類を、供試体は両端固定とし、曲げモードで計測した。

b) 基本物性試験

試験方法は、JIS K 6301「加硫ゴム物理試験方法」

に従い、ゴムの基本的物性を把握した。試験項目として、i) 硬さ試験、ii) 引張試験、iii) 低伸長応力試験、を行った。

(4) 試験結果

表-3に示す各項目の試験結果の分散分析を行った。その結果、A(フェライトの量)の水準間に有意な差が認められ、その他の要因B, C, Dおよび交互作用には有意な差はみられなかった。有意な差がみられたフェライトの量について、最適水準の推定を行った。減衰定数、伸び、25%伸長応力とフェライトの量との関係を図-3(a)~(c)に示す。同図では、水準の効果を信頼度95%の信頼区間で表示している。

a) フェライトの量と減衰定数の関係

天然ゴムの減衰定数は約3%であるが、フェライトを入れることにより減衰定数は約10%と飛躍的に大きくなるのがわかる。減衰定数のピークは、フェライト量が100%と200%の間で最大であり、フェライトを多量に入れても減衰定数が必ずしも大きくなるとは限らないと考えられる。

b) フェライトの量と伸びの関係

伸びのピークは、フェライト量が100%、200%の中間で最大であり、フェライト量が多くなると減少の傾向がみられる。しかし、フェライト量にかかわらず、天然ゴムと同程度の伸びを示し、積層ゴムに用いるゴムとし

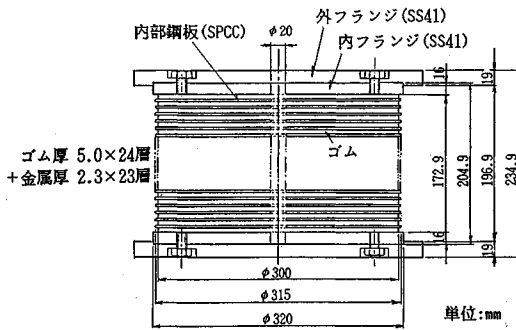


図-4 試験体

て十分な伸びを有していることがわかる。

c) フェライトの量と25%伸長応力の関係

フェライトの配合により、ゴムの剛性が大きくなり、フェライトの量100%~300%では大きな変化はないが、400%にするとさらに剛性が大きくなることがわかる。

B, C, Dの要因については、水準間に有意な差はみられなかったが、参考のため特に着目する減衰定数について各水準間との関係を表-5、図-3(d), (e)に示す。ここでは水準の効果を点推定値(単純平均値)で示す。

d) コーティング材の種類と減衰定数の関係

アスファルト80/100, アスファルト200/250, シリコンアスファルトの3種類を比較したが、どのコーティング材を用いても減衰定数はほぼ同じ値である。

e) コーティング材の量と減衰定数の関係

0%, 1%, 2%, 3%の4つについて比較したが、ほぼ同じ値であり、量が多くても少なくても、またフェライトをコーティングしなくても、減衰定数はほぼ同じ結果を示すことがわかる。

f) 可塑剤の量と減衰定数の関係

可塑剤の量にほとんど関係なく、ほとんど一定の減衰定数を示していることがわかる。

3. フェライト積層ゴムの力学特性

フェライトゴムの配合を検討した結果に基づき、実規模の積層ゴムを製作し、アクチュエータを用いた動的力学試験を行い、その性能を確認した。

(1) 試験体

作製したのは、天然ゴムを主成分とした積層ゴム(以後、天然積層ゴムと呼ぶ)とフェライトが入った積層ゴム(以下、フェライト積層ゴムと呼ぶ)である。積層ゴムの設計においては、天然ゴムを想定し設計鉛直荷重を30tfと考え、水平ばね定数は固有周期が2秒程度になるように0.3tf/cmとし、水平変形能力は15cm以上、鉛直ばね定数は、150tf/cm(水平ばね定数の500倍)以上を目標として設計した。

表-6 ゴムの配合表 (重量%)

材料	種類 呼称	天然ゴム		
		NR	F1	F2
ゴム	天然ゴム	100	80	80
	合成ゴム	—	20	20
フェライト	—	—	200	100
コーティング材	—	—	1.5	—
カーボンブラック・補強剤	—	33.0	—	27.0
可塑剤・老化防止剤	—	44.0	9.7	41.0
加硫剤	—	5.0	2.9	4.3

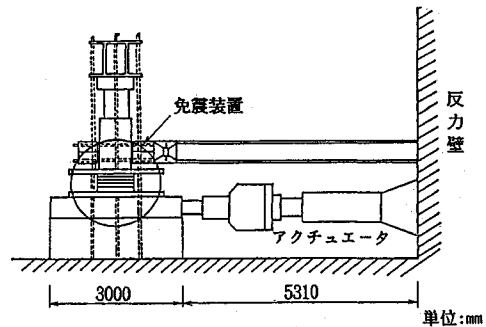


図-5 試験装置

設計された積層ゴムの形状を図-4に示す。天然積層ゴム、フェライト積層ゴムとも、ゴム(厚さ5mm×24層)と鉄板(厚さ2.3mm×23層)を交互に張り合わせたあと、モールドで、加圧・加硫・成形したものである。

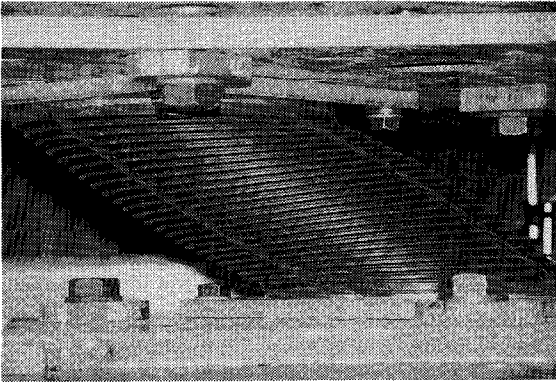
(2) 積層ゴムの配合

試験体として製作した天然積層ゴムとフェライト積層ゴムの配合を表-6に示す。天然積層ゴムの配合は、すでに実際の免震装置として実績のあるものと同配合とした。フェライト積層ゴムは、ゴム単体試験の結果を参考にし、計5種類を製作したが、そのうち代表例として、F1, F2の配合を示す。F1は、フェライトによる補強効果を期待し、カーボンブラックを配合していない。また、フェライトをアスファルトコーティングすることにより十分な柔軟性が得られることから、可塑剤量を極力抑えたものである。

F2は、ゴム材料試験において、減衰定数、伸びがコーティングの有無にほとんど関係しなかったことから、コーティングのないフェライトを用いた。F2は、天然積層ゴムの配合を基本に、フェライトを混合したもので、フェライト以外は、天然積層ゴムの配合と大きな差はないものである。

(3) 試験方法

試験装置は図-5に示すような、圧縮せん断試験機を使用した。鉛直荷重を一定に保ちながら、アクチュエー

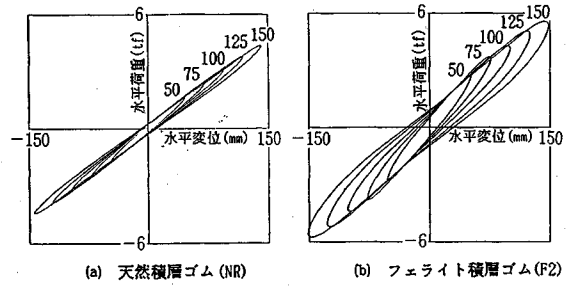


写真一 水平方向加振試験状況

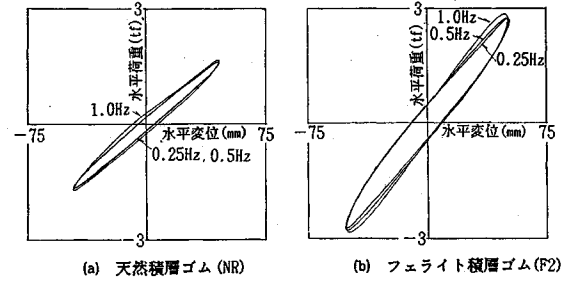
表一 ゴムの種類と減衰定数

ゴムの種類	天然ゴム		フェライトゴム	
	NR	F1	F1	F2
減衰定数 (%)	3.0	10.1	10.1	10.9

※水平振幅 150mm 振動数 0.5Hz 鉛直荷重 30tf



図一 復元力特性の水平振幅依存性



図二 復元力特性の振動数依存性

タにより水平方向に動的にせん断変形させるものである。試験は、水平方向加振 (0 ± 300 mm, 0 ~ 4 Hz, 0 ~ 60 tf), 鉛直方向荷重 (0 ~ 150 tf) の範囲で行った。水平方向加振時の状況を写真一に示す。

試験項目は以下のとおりである。

- a) 減衰特性
- b) 復元力特性の水平振幅依存性
- c) 復元力特性の振動数依存性
- d) 復元力特性の鉛直荷重依存性
- e) 鉛直方向変形特性
- f) 水平方向変形能力

(4) 試験結果

a) 減衰特性

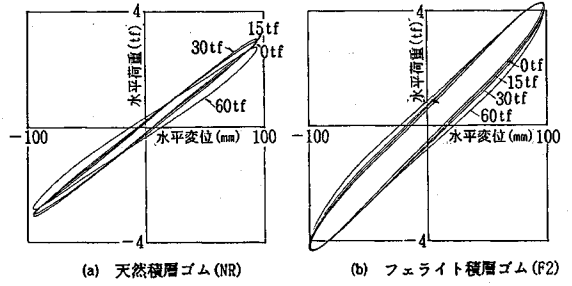
各ゴムの水平方向加振 (水平振幅 150 mm, 振動数 0.5 Hz, 鉛直荷重 30 tf) を行い, それぞれの履歴ループから等価減衰定数を求めた結果を表一に示す。等価剛性は, 最大変形点と原点を結ぶ直線の勾配とし, 等価減衰定数は, 履歴ループ内面積から算出した。

天然積層ゴムの減衰定数は, 3% 程度, フェライト積層ゴムはその2~3倍と大きな値を示している。特にF2は減衰定数が最も大きく, 約11%の値を示している。

復元力特性はF1, F2で大きく変わらないことから, ここではF2の復元力特性でフェライト積層ゴムを代表させ, 天然積層ゴムと比較しその特性を以下に示す。

b) 復元力特性の水平振幅依存性

図一に天然積層ゴム (NR) およびフェライト積層ゴム (F2) の水平振幅を変化させた場合の水平荷重-水平変位の結果を示す。振動数は0.5 Hz, 鉛直荷重を



図三 復元力特性の鉛直荷重依存性

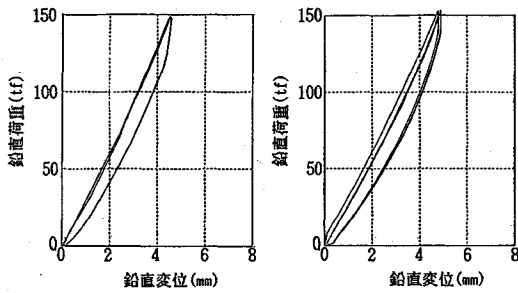
30 tfと一定にし, ゴムのせん断ひずみで約40~125%に相当するよう水平振幅を±50~±150 mmに変化させた。

天然積層ゴムは, 変位が大きくなっても剛性・履歴ループ形状ともほとんど変化していない。一方フェライト積層ゴムは, 水平変位が大きくなるにつれて剛性は低下し, 等価剛性, 等価減衰とも変位依存性を有している。履歴ループは滑らかな形状を描いており, 小さな変位レベルでも明らかに, NRよりも大きなエネルギー吸収を示すことがわかる。

c) 復元力特性の振動数依存性

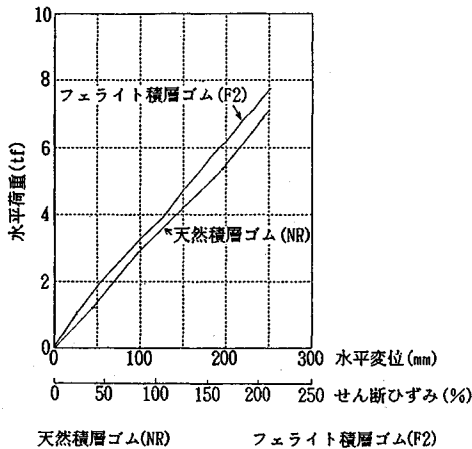
図二に加振振動数を変化させた場合の水平荷重-水平変位の結果を示す。水平振幅を±50 mm, 鉛直荷重を30 tfと一定にし, 振動数を0.25, 0.5, 1.0 Hzに変化させた。

天然ゴム, フェライトゴムとも剛性は振動数が大きくなっても, ほとんど変化せず, また履歴ループ内面積は



(a) 天然積層ゴム(NR) (b) フェライト積層ゴム(F2)

図-9 鉛直方向載荷, 鉛直荷重-鉛直変位



天然積層ゴム(NR) フェライト積層ゴム(F2)

図-10 水平変形能力

振動数の増加とともに若干であるが大きくなっている。等価減衰定数に換算すると、1.0 Hz の場合 0.25 Hz に比較し 10% 程度増大する。

d) 復元力特性の鉛直荷重依存性

図-8 に天然ゴムおよびフェライト積層ゴムの鉛直荷重を変化させた場合の水平荷重-水平変位の結果を示す。水平振幅を ±100 mm, 振動数を 0.5 Hz と一定にし、鉛直荷重を 0, 15, 30, 60 tf に変化させた。

剛性は、鉛直荷重の増加とともに若干であるが低下する依存性を示している。これは、2次形状係数(直径/ゴム総厚)が 2.5 とあまり大きくないことが原因と考えられ、天然積層ゴム、フェライト積層ゴム両方に共通してみうけられる。

e) 鉛直方向変形特性

図-9 に天然およびフェライト積層ゴムの鉛直方向載荷の鉛直荷重-鉛直変位の結果を示す。鉛直荷重を 0~150 tf (鉛直応力=212 kgf/cm²) に変化させ、3回鉛直載荷を繰り返した。

荷重-変位曲線は、0~150 tf までほとんど直線的で勾配はほとんど線形とみなせる。設計荷重の 5 倍に当たる鉛直荷重を載荷したが、天然積層ゴム、フェライト積層

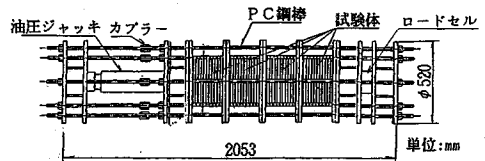


図-11 クリープ試験装置

ゴムとも荷重除荷後の残留変位は非常に小さい。鉛直ばね定数は、天然積層ゴムで約 300 tf/cm (水平方向の約 1000 倍)、フェライト積層ゴムで約 320 tf/cm (水平方向の約 700 倍) と、きわめて高い鉛直剛性を有していることがわかる。

f) 水平方向変形能力

図-10 に天然およびフェライト積層ゴムの水平耐力試験の水平荷重-水平変位の結果を示す。鉛直荷重を 30 tf と一定にし、水平変位を 0~250 mm まで静的に変形させた。フェライト積層ゴムの剛性は 50 mm をすぎると若干低下するが、ほぼ直線的であり、天然積層ゴムと同様この範囲ではハードニング現象はみられなかった。最大変位が 250 mm のとき、せん断ひずみで約 210%、鉛直荷重によるひずみを併せた局部せん断ひずみは約 400% に達するが、ゴムの変形、ゴム-金属間の接着面に異状はなく、安定した変形追従性を示した。また、上下面で重なり合う有効面積は、積層ゴムの面積の約 8% となるが、鉛直荷重 30 tf を保持し十分な支持能力を示した。

4. フェライト積層ゴムの耐久性試験

積層ゴムの耐久性試験として、圧縮クリープ試験、繰り返し水平載荷試験を行った。

(1) 試験方法

a) クリープ試験

クリープ試験は、力学特性試験に使用した天然積層ゴム、フェライト積層ゴムを用いて行った。試験装置は、図-11 に示すように、PC 鋼棒、カップラー、油圧ジャッキ、ロードセルから構成されている。試験装置ごと温度 20°C の恒温室に入れ、積層ゴムと治具が所定の温度になった後に、設計荷重に相当する一定の圧縮荷重 30 tf (圧縮応力度換算 $\sigma=42 \text{ kgf/cm}^2$) を載荷し、1 か月間連続的に計測した。変位量は、積層ゴムのフランジ間に試験体 1 個当たり 3 か所に変位計を設けその平均値とした。

b) 繰り返し水平載荷試験

繰り返し水平載荷試験は、前述の圧縮せん断試験機を用いて、水平振幅 ±100 mm (ゴムのせん断ひずみ約 83%)、振動数 0.5 Hz、鉛直載荷 30 tf にて 500 サイクル連続して加振を行った。積層ゴム内部に温度計を設置

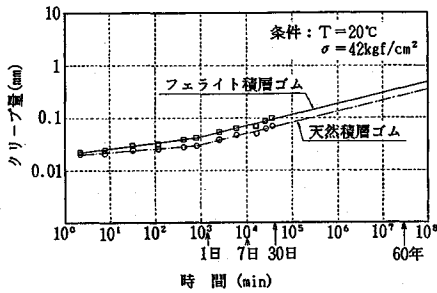


図-12 クリープ試験結果

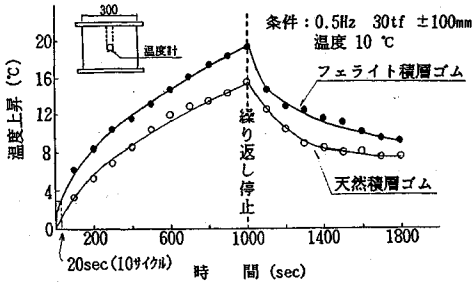


図-13 繰り返しによる内部温度上昇

し、加振時の内部温度の上昇を計測した。

(2) 試験結果

a) クリープ試験

クリープ試験の結果を図-12に示す。天然積層ゴム・フェライト積層ゴムとも、1日程度を境に進行速度が変化している。最初はクリープ進行が速いが、約1日経過後は進行が遅くなり、両対数目盛にプロットしたクリープ量と経過時間の関係はほぼ直線上にのることがわかる。60年後のクリープ量を外挿により推定すると、天然積層ゴムは約0.3mm、フェライト積層ゴムでは約0.4mm程度である。ゴムの総厚は、24層×5mm=120mmであり、クリープ量はゴムの総厚の0.3~0.4%程度である。今回の試験は常温下で行ったものであり、面圧も比較的小さく、クリープ量は小さめの値を示していると考えられるが、天然積層ゴムと比較して、フェライト積層ゴムのクリープ量は、長期の使用に対して支障はないと考えられる。

b) 繰り返し水平載荷試験

繰り返し回数と内部温度の上昇を図-13に示す。加振とともに、天然・フェライト積層ゴムとも内部温度が上昇し、500サイクル加振時において天然積層ゴムでは約15°C上昇するが、フェライト積層ゴムは約20°C上昇する。フェライト積層ゴムは、ゴム自体に減衰機能をもたせているため、天然積層ゴムよりも内部温度の上昇は大きい。実地震波においては、大振幅の回数は10サイクル程度以下と考えられ、温度上昇は3°C以下と推

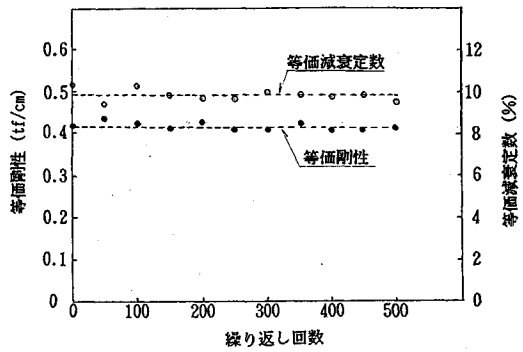


図-14 繰り返しによる等価剛性、等価減衰定数の変動

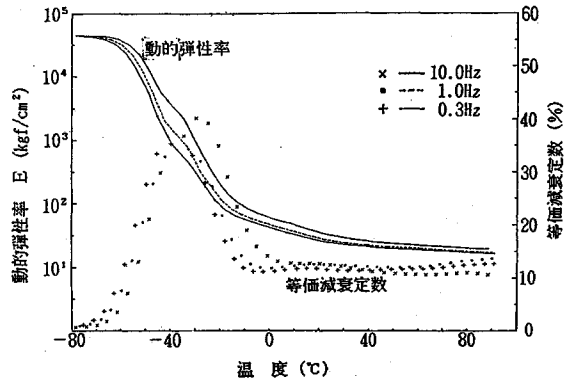


図-15 温度特性 (弾性率と等価減衰定数)

定される。

繰り返し載荷による等価剛性および等価減衰定数の変動を図-14に示す。繰り返し回数が増加しても、剛性および減衰定数はほとんど変動せず安定した特性を示すことがわかる。また、先のゴム内部の温度上昇を考え合わせると、ゴムが温度に依存しない特性を有していると考えられる。

さらに、それを確認するため、2.で用いた図-2のゴム単体の減衰特性試験機を用い、F2のゴムについて等価減衰定数と温度の関係を検討した。その結果は、図-15に示すとおりである。加振振動数は、0.3 Hz, 1.0 Hz, 10 Hzの3種類を、温度は-80°C~+80°Cまでとした。この試験結果によると、-30°C付近に減衰定数のピークがある。また、弾性率は温度の低下とともに単調に増加する。実使用温度の範囲を考慮すると、等価減衰定数および弾性率ともに実用上ほぼ一定の値を示すことがわかる。

5. 結 論

フェライトを混練したゴムの物性試験を行い、高減衰ゴムとしての条件を満足するゴム配合の検討を行うとともに、実物大の高減衰積層ゴムを作製し、免震装置に想

定される条件下で特性試験を行った。その結果得られた成果を列挙すると以下のとおりである。

(1) ゴムにフェライトを混練することにより減衰性能の優れた材料が得られた。

(2) 減衰性能に大きな影響を及ぼす因子はフェライト量であり、ゴムとの重量比で200%程度で減衰定数が最大値を示す。またフェライト量が多くなるにつれ、剛性は大きく、伸びは小さくなる。したがって積層ゴムとして使用するためにはフェライトの配合は100~200%程度が適切である。

(3) フェライト積層ゴムの剛性は、実用上の水平変位量の範囲では、水平変位の増大に伴って低下する傾向のせん断ひずみ依存性を示す。また、大変形時の減衰定数は天然積層ゴムの3~4倍の約11%の値を示し、微小振幅から大振幅まで安定した滑らかな復元力特性を示すことがわかった。

(4) 復元力特性の鉛直荷重依存性、振動数依存性は、天然積層ゴムと同様の傾向を示す。

(5) 実物大の積層ゴムを用いた鉛直の一定荷重の下でのせん断試験により

- i. 鉛直支持性能(設計荷重の5倍)
- ii. 大変形追従能力(せん断ひずみ $\gamma=200\%$)
- iii. 反復荷重での安定性($n=500$ サイクル)
- iv. 高減衰性能($h=10\%$ 以上)

が確認された。このことからアイソレーターとしての機能ならびにダンパーとしての機能を併せ持った、高減衰フェライト積層ゴムの機能を有することが確かめられた。

(6) フェライト積層ゴムのクリープ特性は、天然積層ゴムの1.2~1.4倍程度であり、長期間の使用においても、クリープ量は小さく、実用に十分耐える。

6. あとがき

高減衰積層ゴムについてはさまざまな研究が進められており、一部実用化が開始されている。今回開発したフェライト積層ゴムは、免震装置としてすでに実績のある天然積層ゴムの配合を基本に、フェライトを混練したもので、天然積層ゴムと同様安定した特性を有している。また、製作工程においても、天然ゴムによるものと同様の方法をとることができ、副産物フェライト自体多量に存

在しているなどの利点がある。この研究が副産物フェライトの応用技術の発展¹⁵⁾、また免震技術の普及の一助になれば幸いである。

最後に開発を行うにあたり丁寧なご指導を賜りました久保慶三郎東京大学名誉教授、ゴムの製作・試験にご協力頂いた日産化学工業(株)の関係各位に、ここに厚く謝意を表します。また、試験・データ処理に尽力いただいた東京電力(株)、(株)奥村組の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (財)国土開発技術研究センター：ニュージーランドにおける橋梁の免震装置調査報告書、免震装置を有する道路橋の耐震設計研究委員会現地調査団、1987年12月。
- 2) テクノロジー・トランスファー研究所：欧米における免震構造実態調査報告書、1986年10月。
- 3) 竹内幹雄：免震装置の利用、土木学会誌、Vol.71, No.4, pp.56~57, 1986年。
- 4) 堀口潤一・海津信廣・真柴純治：変電機器の免震装置の開発、第7回日本地震工学シンポジウム、pp.1645~1650, 1986年12月。
- 5) 竹内幹雄・原田 治ほか：免震構法とその実証実験、火力原子力発電、Vol.38, No.5, pp.37~47, 1987年。
- 6) 鈴木英世・竹内幹雄ほか：免震装置の最適設計に関する基礎検討、構造工学論文集、Vol.35A, pp.621~627, 1989年3月。
- 7) 鈴木英世・竹内幹雄ほか：電力施設に適用する免震装置の実験的研究、第20回地震工学研究発表会・講演概要集、pp.493~496, 1989年7月。
- 8) 間山正一：コーテッドフェライトコンクリートの振動性状、土木学会論文報告集、第384号/V-7, pp.93~101, 1987年8月。
- 9) 間山正一：フェライトエポキシ混合物の振動性状と力学的性状、土木学会論文報告集、第385号/VI-7, pp.59~68, 1987年9月。
- 10) 鈴木英世・久保慶三郎・竹内幹雄・間山正一：振動エネルギー吸収材料および装置、公開特許公報(A)平2-190633, 平成2年7月。
- 11) 田口玄一：実験計画法(新版)上・下、丸善、1962年。
- 12) 田口玄一：直交表と線点図、丸善、1962年。
- 13) 鷲尾泰俊：実験計画法入門、日本規格協会、1988年。
- 14) 日合商事(株)、PL-DMTA技術資料。
- 15) 間山正一・山内文雄：副産物フェライトの土木工学への応用、土木学会誌、Vol.72, No.5, pp.35~40, 1987年。
(1990.9.17受付)

DEVELOPMENT OF HIGH DAMPING FERRITE RUBBER BEARING

Hideyo SUZUKI, Masakazu MAYAMA,
Mikio TAKEUCHI and Masao ASAKURA

This paper describes the development of high damping rubber bearing consisting of steel plates and thin ferrite rubber sheets. The dynamic tests were carried out. Following conclusions were obtained. 1) Through the dynamic tests, it was proved that the ferrite rubber which are obtained by mixing rubber with ferrite byproducts, has high damping. 2) The ferrite rubber bearing performs the function of isolation and damper. Equivalent damping constant, which is obtained from the hysteresis loop, is about 11%, which is about three times as large as the natural rubber bearing's. 3) The frequency and vertical load dependency of the hysteresis loop can be disregarded in the range of actual seismic response. 4) Through the endurance tests, it was confirmed that the ferrite rubber bearing can reasonably satisfy the design requirements.
