

積層ゴム用耐火被覆システム「ファイヤー キャッチ™」の開発

堀 長 生 高 橋 晃一郎
川 地 武

Development of Fire Protection System "FIRE CATCH™" for Base Isolation Devices

Nagao Hori Koichiro Takahashi
Takeshi Kawachi

Abstract

Laminated rubber base isolation devices have conventionally been installed between building superstructure and foundation. However, this space is increasingly being used for parking or warehousing incorporating fire protection. Inorganic fire protection such as rock-wool material is unsuitable for base isolation devices, because it must follow the horizontal displacement of the base isolation devices during an earthquake. The fire protection system "FIRE CATCH™" is made of a flexible polyisobutylene rubber material and can be used for base isolation devices. This system protects base isolation devices from fire with an incombustible carbon layer that expands by 4 times when heated to 200°C. Fire safety has been proven by the shear modulus test. The shear modulus before and after a 2-hour unloaded fire resistance test was within 5%. It is confirmed that the fire protection system can undergo $\pm 250\%$ displacement without harmful deformation under a vertical load of 7.85N/mm².

概 要

免震積層ゴムは、建物の基礎部分に設置されるのが一般的であったが、近年では免震階の積層ゴムに耐火被覆を施すことによって、免震階を駐車場や倉庫などに高度利用するケースが増えている。

積層ゴム用耐火被覆システムは、地震時に積層ゴムの水平変形に追従することが求められるため、従来のロックウールに代表される無機材料では適用できない問題点があった。「ファイヤー キャッチ™」はその主成分がポリイソブチレンゴムであるため、地震時に積層ゴムの変形に追従し、火災時に温度が200°Cになるとこのゴムが約4倍に発泡してその炭化層が断熱材として火災の火熱から積層ゴムを保護する仕組みである。

耐火性能は、2時間の非載荷加熱試験を行い、耐火試験前後における積層ゴムのせん断弾性係数差が5%以内であったことから十分な耐火性を有していることを確認した。変形追従性能は、面圧7.85N/mm²で、 $\pm 250\%$ の大変形に対しても、異常な変形を生じることなく追従することを確認した。

1. はじめに

免震用積層ゴムは、上部構造の基礎部分に設置されるのが一般的であったが、近年では免震階の高度利用を図るため中間階あるいは柱頭免震として積層ゴムに耐火被覆を施し、免震階を駐車場や倉庫などに利用するケースが増えている。既にこの目的の耐火被覆材として不燃性のセラミックブランケットやガラスクロスを用いたものが開発されているが、変形追従性を確保するために施工が複雑であったり、コストが高いなどの問題点を有していた。

近年、防火規定にも性能設計法が導入され耐火被覆材の材質にかかわらず、火災時に積層ゴムの支持耐力

や変形追従性能に低下がなく十分な保護機能を保持すれば良いとする性能評価法が注目されており、加熱発泡ゴムを利用した積層ゴム用耐火被覆システム「ファイヤー キャッチ™」は、このような性能評価法により開発された構法である。

本報は、火熱発泡ゴムを耐火被覆材として適用する有効性について述べるとともに、耐火被覆システムの耐火性能および変形追従性能について述べる。

2. 積層ゴム用耐火被覆システムの要求性能

積層ゴム用耐火被覆システムに要求される性能は、柱や梁などに用いられる耐火被覆と同様に火災時には、有

害な変形や脱落がなく、積層ゴムを火災による温度上昇から守り、鎮火後も積層ゴムの化学組成や形状に変化がなく初期の免震機能を保持することに加え、耐火被覆材の取り替えが容易に行えることが求められる。また地震時には、耐火被覆材が積層ゴムの二次元の水平変形に対して損傷することなく追従し、地震後は復元して所定の取り付け位置に戻る構造性能を有していることが求められる。

セラミッククロスやセラミックブランケットなどの不燃材料を用いた積層ゴム用耐火被覆システムは既に開発、商品化されているが、元々変形追従性のない無機材料を積層ゴムにどれだけ変形追従させるかが開発のポイントとなっており、施工性、経済性、意匠性の点で十分満足できるものが開発されていないのが現状である。

3. 加熱発泡ゴムの有効性

3.1 ポリイソブチレン(PIB)ゴムの特性

「ファイヤー キャッチ™」は、加熱発泡性ポリイソブチレン(PIB)ゴムを使用することで地震時の変形追従性と火災時の耐火性を確保できるように設計したものであ

る。

Fig.1にその概要を示す。

地震時には耐火被覆自体がゴム弾性を有するため伸縮し積層ゴムの変形に追従させることができる。しかしゴムは有機系高分子でそれ自体可燃物であるため耐火被覆材として使用できないと考えるのが一般的であろう。

「ファイヤー キャッチ™」に採用したPIBゴムは加熱発泡ゴムでFig.2に示すような組成配合をしており、この中に含まれるポリリン酸アンモニウムが約200℃から熱分解を始め、CO₂やN₂などの不燃性ガスを発生しながら膨張すると同時に自ら燃焼を伴い炭化することで無機の炭酸カルシウム成分とともに不燃断熱層を形成する仕組みである。また、PIBゴムは透湿抵抗が非常に大きいことを特徴としており、これによりPIBゴムに添加されたポリリン酸アンモニウムが空気中の水分により加水分解することを抑制し、長期にわたって火災時の加熱発泡性を保つことが可能となった。

以下に加熱発泡ゴムを用いた耐火被覆システムの有効性を検証するため、難燃性ゴムを含めた各種ゴムの燃焼時の裏面温度上昇とコーンカロリー計による発熱速度、発煙量、COガス濃度などの測定を行った結果を述べる。

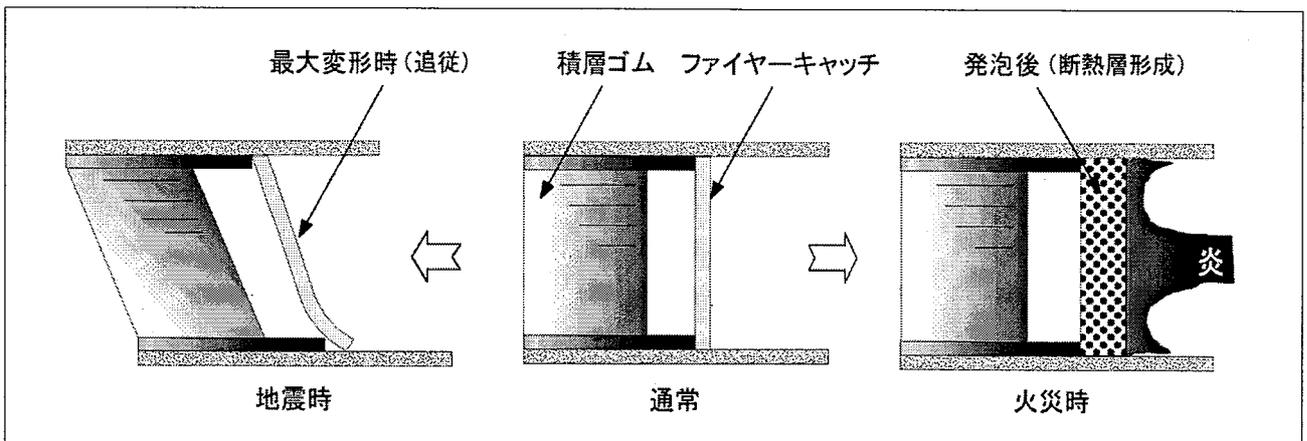


Fig.1 免震積層ゴム用耐火被覆システム
Fire protection System for Base Isolation Devices

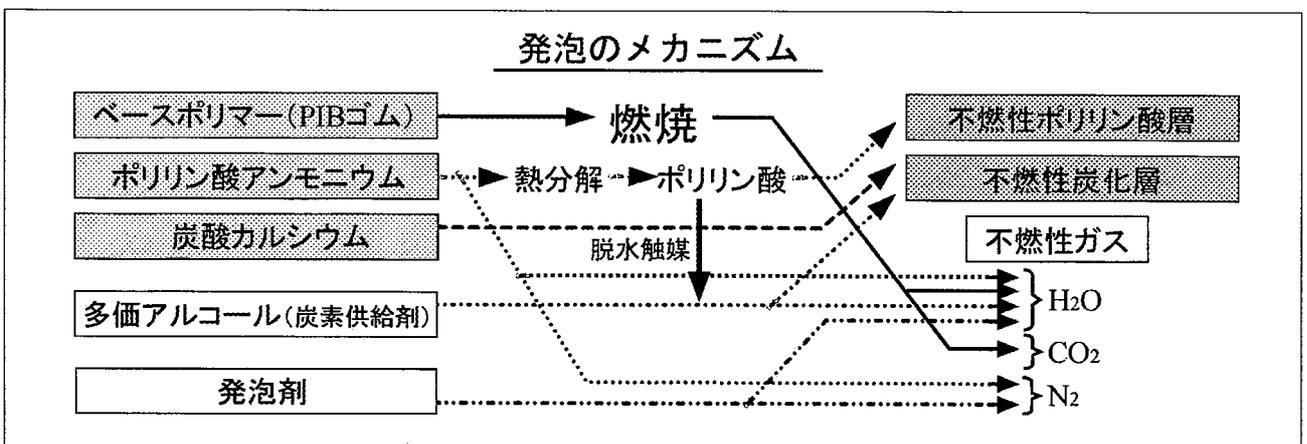


Fig.2 PIBゴム発泡のメカニズム
Expansion Mechanism of PIB Rubber

3.2 ゴム種類の検討

3.2.1 試験概要

積層ゴム用耐火被覆材として最適なゴムの種類を選択するため、Table 1に示すように難燃性の高いシリコン系ゴムなど5種類と、加熱発泡倍率の異なるPIBゴムの3種類を選び試験した。

試験条件を以下に示す。

試験装置：コーンカロリー計 (Fig.3参照)
(アトラス社製 CONE II)

設置方向：水平方向

外部加熱強度：50kW/m²

試験体形状：100×100×厚さ(6, 12, 24mm)

試験体の裏面温度は熱電対により測定した。

3.2.2 結果および考察

Fig. 4に各種ゴムをコーンカロリー計にて燃焼試験した際の裏面温度変化を示す。

試験体厚さ6mmの各種ゴムについて燃焼時の裏面最高温度を比較すると4倍発泡PIBゴム(No. 8)は、400℃程度であり難燃性シリコン系ゴム(No. 4)に比べ100℃以上低くなった。また、同じPIBゴムでも無発泡のものや2倍発泡のものは約800℃近くまで裏面温度が上昇していることから、断熱性能を上げるには、ゴム自体を難燃化するよりも加熱によりゴムが発泡し早期に不燃断熱層を形成させることが有効であり、約4倍程度に発泡すれば断熱性が良くなることがわかった。Photo 1は4倍に発泡したPIBゴムの様子である。また、4倍以上に発泡させると不燃断熱層が脆くなるため自立性を求められる用途では好ましくない。

3.3 ポリイソブチレン(PIB)ゴムの厚さ

3.3.1 試験概要

耐火被覆材の断熱性を向上させるためには、不燃断熱層の厚さが厚いほど有利になる。4倍発泡PIBゴムの厚さを6, 12, 24mmに成形した試験体について裏面温度を測定し最適厚さを求めることとした。試験法はゴム種類の検討時と同様コーンカロリー計を使用した。

3.3.2 結果および考察

Fig. 4に示すように試験体の厚さが厚いほど発泡後の不燃断熱層も厚くなるため、裏面温度の上昇が抑制される。しかし、可燃物量の増大に伴い24mm厚さの試験体は3時間以上燃焼を続けることがわかった。このことからPIBゴムはより厚い方が断熱性も向上するが、その反面燃焼時間も長くなるため、2時間の要求耐火時間に対して4倍発泡PIBゴムの場合、12mmが最適であることがわかった。

3.4 燃焼性状

3.4.1 試験概要

コーンカロリー計によりTable 1に示す6mm厚の各種ゴムの発熱速度、煙による減光係数、CO濃度を測定した。発熱速度は燃え易さの度合いを時間変化とともに測定するもので材料固有のものである。また、煙による減光係数もその発生量が逐次測定されるため、避難安全性を考

Table 1 試験体一覧
Details of Used Materials

試験体	種類		厚さ
No. 1	シリコン系	2液成分形	6 mm
No. 2	変成シリコン系	2液成分形	6 mm
No. 3	変成シリコン系	1液成分形	6 mm
No. 4	シリコン系	2液成分形	6 mm
No. 5	変成シリコン系	2液成分形	6 mm
No. 6	PIB無発泡品	2液成分形	6 mm
No. 7	PIB 2倍発泡品	2液成分形	6 mm
No. 8	PIB 4倍発泡品	2液成分形	6 mm
No. 9	PIB 4倍発泡品	2液成分形	12 mm
No. 10	PIB 4倍発泡品	2液成分形	24 mm

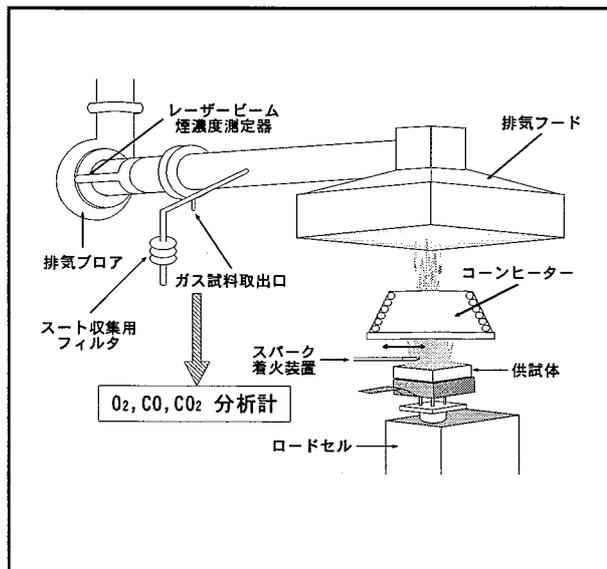


Fig. 3 コーンカロリー計概要
Outline of The Cone Calorimeter



Photo 1 PIBゴム発泡後の様子
Photograph of Expanded PIB Rubber

える上での参考値になり、CO濃度は、材料が燃える際に放出されるガス有害性を評価することができる。

3.4.2 結果および考察

Fig. 5に、燃焼の経過時間に対する発熱速度を示す。

最大発熱速度は4倍発泡PIBゴムやシリコン系ゴムに比べて無発泡、2倍発泡PIBゴムおよび変成シリコン系ゴムが大きい。同じ組成のPIBゴムでも発泡倍率が大きくなると燃焼速度が遅くなることによって最大発熱速度が小さくなったものと考えられる。

Fig. 6, 7に煙による減光係数（発煙量）とCO濃度の経時変化を示す。発熱速度と同様に4倍発泡PIBゴムは、燃焼に伴う煙が多量に発生することはなかった。また、CO濃度もシリコン系ゴムと同程度でその発生量は非常に少なくガス有害性も小さいことがわかった。

4. 耐火被覆システムの耐火性能

4.1 加熱試験

4.1.1 試験概要

Fig. 8, 9に示す試験体について、JIS A 1304（建築構造部分の耐火試験方法）（Fig. 10）に規定された標準加熱温度に沿って2時間の非載荷加熱試験を行い、加熱中および加熱後の試験体各部温度測定並びに試験体の状況を観察した。

試験に用いた積層ゴムは、直径600mmの天然ゴム系積層ゴムで加熱試験前に水平特性試験を行い、加熱試験後にも同様の試験を行って、加熱試験による積層ゴムの特性変化を調査した。

4.1.2 試験結果および考察

試験時の状況は、加熱試験開始後、数分で僅かに煙が発生し、その煙に着火後は加熱終了まで煙の発生は認められなかった。13分後にPIBゴムの発泡が認められた。加熱試験終了後の被覆材は、白い炭化層となっており、自立強度は有しているが脆弱で変形性能はなかった。

Fig. 11およびTable 2に加熱試験における各部の最高温度と到達時間を示す。この結果、積層ゴム表面の最高温度は84℃であった。積層ゴムは製造時に約150℃で加硫されることから、150℃以下の温度履歴では積層ゴムの変質はないものと考えられ、このことから耐火被覆システムは、2時間の耐火性能を有していると考えられる。

4.2 耐火試験前後における積層ゴムの履歴特性

4.2.1 試験概要

積層ゴム用耐火被覆システムにおける耐火性能の評価法は、加熱試験前後における積層ゴムの履歴特性から加熱試験によって受けた積層ゴムの熱劣化を評価するのが適切であると考えられる。

積層ゴムのせん断弾性係数を加熱試験前後に求めて熱的影響の有無について確認をした。試験は、鉛直荷重19.6MNが載荷できる二軸試験機を用いて、面圧7.85N/mm²で、±50%から±250%のせん断歪みを、振動数0.005Hzのランプ波を与えて行った。

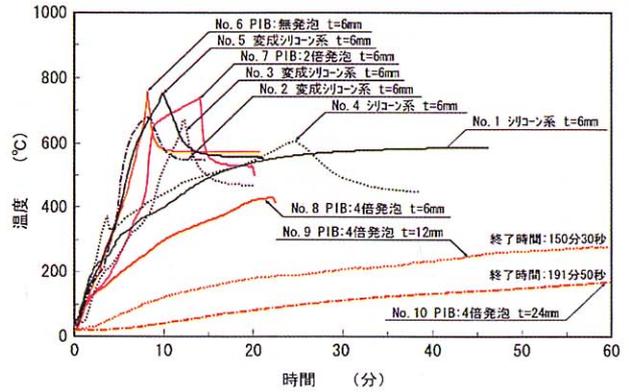


Fig.4 裏面温度 vs. 時間
Back Temperature of Specimens vs. Time

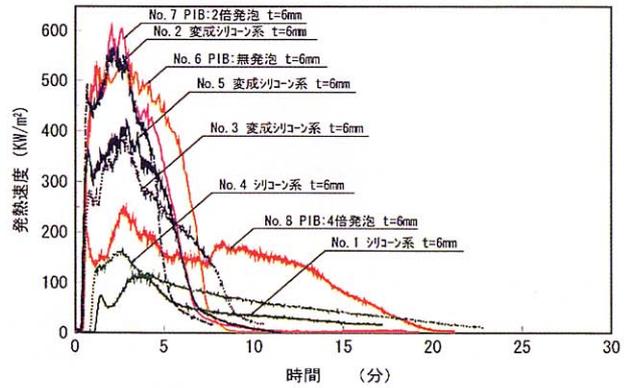


Fig.5 発熱速度 vs. 時間
Heat Release Rate vs. Time

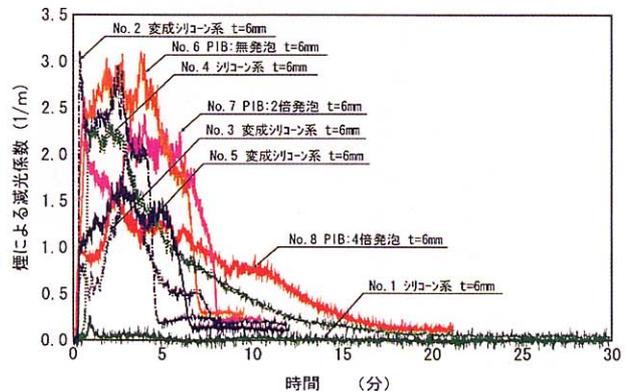


Fig.6 煙による減光係数 vs. 時間
Extinction Coefficient vs. Time

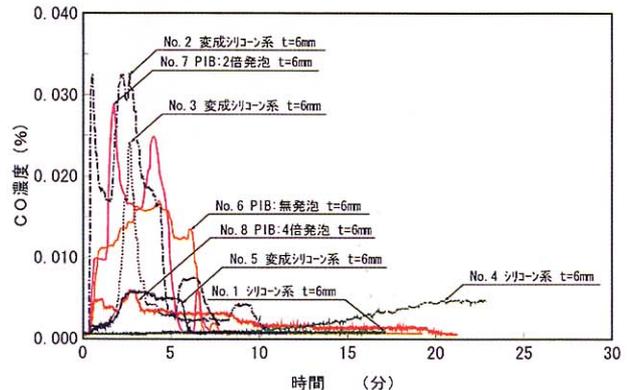


Fig.7 CO濃度 vs. 時間
CO Concentration vs. Time

4.2.2 結果および考察

積層ゴムの法定耐用年数を60年としたときのせん断弾性係数に関する経年劣化率は、20%以内を管理値として運用されている。耐火試験を行う前と後での積層ゴムのせん断弾性係数の差が20%以内であれば、積層ゴムの実用上の劣化はないといえる。

Fig. 12に2時間加熱試験前後の積層ゴムの履歴特性を示す。Table 3に積層ゴムのせん断歪みが50~250%におけるせん断弾性係数を示す。せん断歪みが50~250%において加熱試験前後におけるせん断弾性係数の差は5%以内であった。以上の結果から、加熱試験によって積層ゴムの特性に変化はなく、耐火被覆システムは2時間の耐火性を保持したと考えられる。

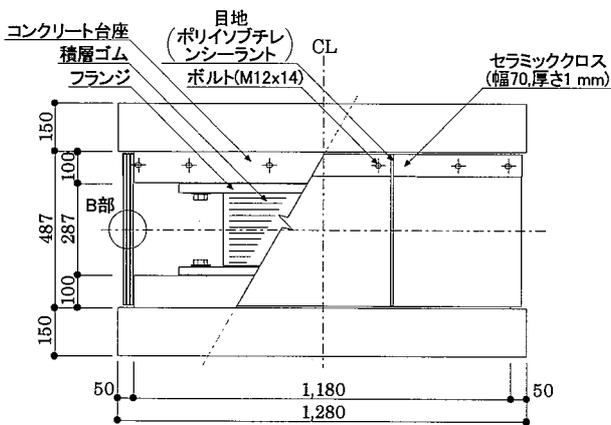


Fig. 8 耐火用試験体概略図
Outline of Specimen for Fire Resistance Test

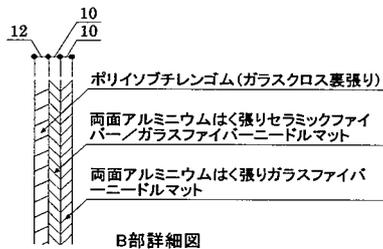


Fig. 9 耐火被覆詳細図
Detail of Fire Protection System

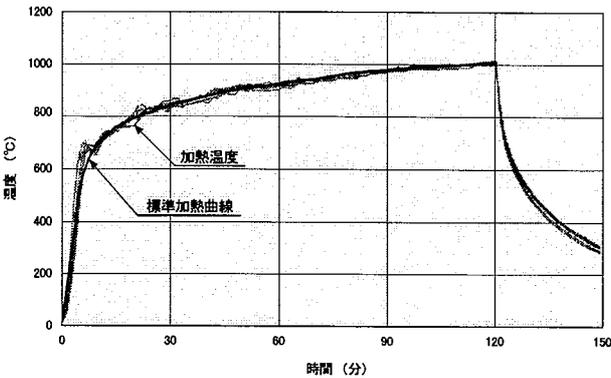


Fig. 10 耐火試験時の炉内温度
Actual Temperature of Fire Resistance Test

Table 2 各部の最高温度
Maximum Temperature and Reach Time at Fire Resistance Test

測定位置	最高温度 (°C)	到達時間 (分)
積層ゴム内部 (深さ 7mm)	53	133
積層ゴム表面	84	129
フランジ	45	141
アンカーボルト	54	141
中空部	108	127
耐火被覆材裏面	295	130

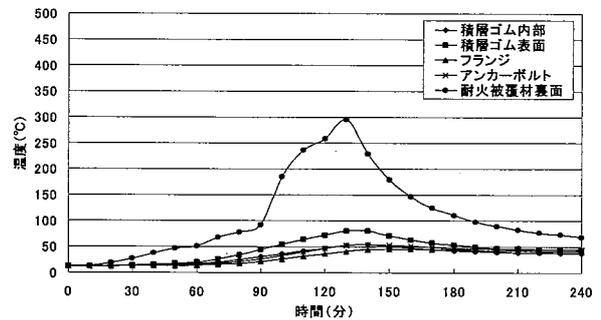


Fig. 11 耐火試験時の熱履歴
Heating History of Each Points on specimen at Fire Resistance Test

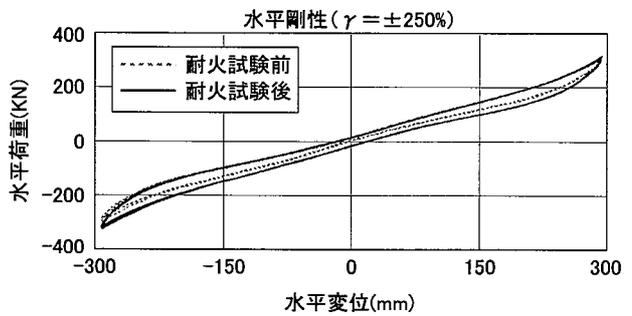


Fig. 12 耐火試験前後における積層ゴムの剪断変形試験結果
Horizontal Load-displacement Curves Before and After Fire Resistance Test

Table 3 耐火試験前後における積層ゴムの水平特性比
Shear Modulus of Base Isolation Device Before and After Fire Resistance Test

せん断歪	せん断弾性係数 (N/mm ²)		後/前
	耐火試験前	耐火試験後	
50%	0.425	0.445	1.048
100%	0.395	0.407	1.030
150%	0.383	0.385	1.005
200%	0.385	0.385	1.000
250%	0.398	0.414	1.039

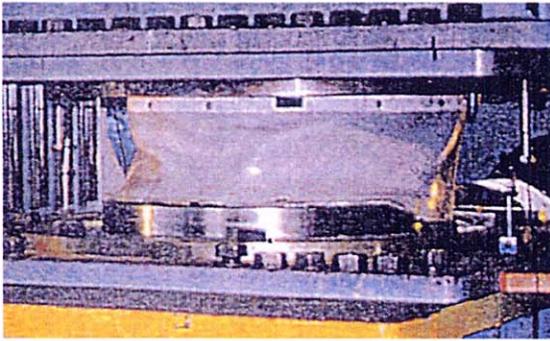


Photo 2 変形追従試験 (水平変位: +250%)
Photograph of Deformation Test
(Horizontal Displacement +250%)

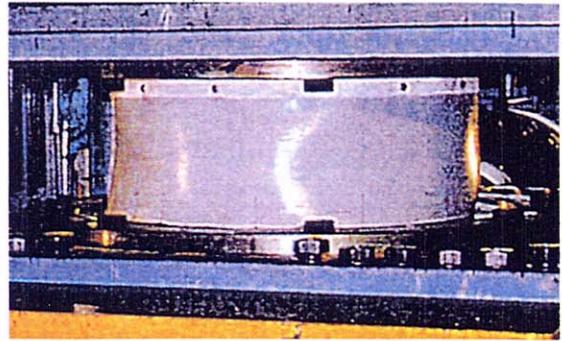


Photo 3 変形追従試験 (水平変位: 0%)
Photograph of Deformation Test
(Horizontal displacement 0%)

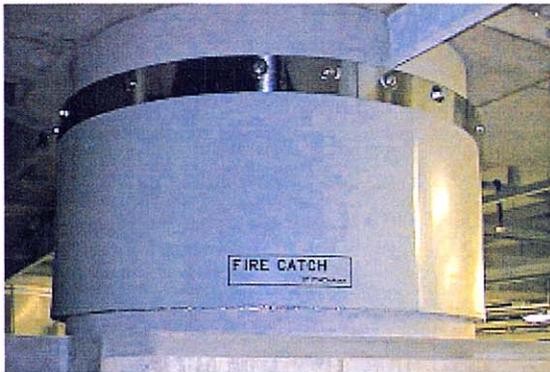


Photo 4 耐火被覆外観
Appearance of Fire Protection System
"Fire Catch™"



Photo 5 耐火被覆取り付け事例
Schematic of Installed Fire Protection System

5. 耐火被覆システムの変形追従性能

耐火試験を行った積層ゴムに対して、「ファイヤーキャッチ™」を取り付け施工し、せん断変形を与えて変形追従性能の確認を行った。

試験は、積層ゴムの履歴特性試験と同様に、鉛直荷重19.6MNが載荷できる二軸試験機を用いて、面圧7.85N/mm²で、±50%から±250%のせん断歪みを、振動数0.005Hzのランプ波を与えて行った。水平変位が250%に達したときの耐火被覆システムの状況をPhoto 2に、0%に戻ったときの状況をPhoto 3に示した。この結果、加熱発泡ゴムによる耐火被覆システムは、±250%の大変形に対しても異常な変形を生じることなく追従し、また積層ゴムの変形を阻害することもないことがわかった。

6. 実物件への適用

実物件への適用に際しては(財)日本建築センターの防災個別評定を受けて適用された。

本耐火被覆は3層の構造になっているが、これらは全て上部フランジにボルトで吊り下げる施工方式をとっている。そのため、予め開けられた耐火被覆材の穴にボルトを挿してだけで容易に施工ができる。

Photo 4, 5は、免震階にある駐車場の免震装置に「ファイヤーキャッチ™」を取り付けた様子である。

レトロフィットのような既存建物の改修においても同

様に居住階を免震階とする場合、本耐火被覆は後付けも容易で工期も短く適用が可能である。

7. まとめ

免震階を高度利用するには、積層ゴムの変形に追従する合理的な耐火被覆システムの開発が必要となる。

PIBゴムを加熱発泡させることにより、その不燃炭化層が火災時に有効な耐火被覆材となることを検証し、これを利用した積層ゴムの耐火被覆システム「ファイヤーキャッチ™」を開発して耐火性能試験と変形追従性試験を行った。

以上の結果、「ファイヤーキャッチ™」は、2時間の耐火性能を有することと、±250%の水平変位に十分追従することを確認した。

参考文献

- 1) 伊澤清治, 他, 「免震積層ゴム用多段スライド式耐火被覆の開発」, 日本建築学会技術報告集 第7号, 1992年2月
- 2) 高橋晃一郎, 他, 「免震積層ゴム用耐火被覆システムに関する研究(その1 加熱発泡ゴムの有効性の検証)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999年9月
- 3) 堀長生, 他, 「免震積層ゴム用耐火被覆システムに関する研究(その2 加熱発泡ゴムによる耐火被覆システムの性能)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999年9月