

浮上り機構を用いた積層ゴムの引張対策据付法に関する検討

Characteristics of the Tensile Measures Device used for Laminated Rubber Isolator

原田 浩之 HIROYUKI HARADA

鈴木 亨 TORU SUZUKI

建築技術部 河井 慶太 KEITA KAWAI

構造設計ディビジョン 小田 稔 MINORU ODA

構造設計ディビジョン 南 圭祐 KEISUKE MINAMI

構造設計ディビジョン 牧田 瑞記 MIZUKI MAKITA

積層ゴムに過大な引張変形や引張応力を作用させることなく上部構造を浮上らせることのできる積層ゴム据付法について検討した。上部構造を浮上らせるための浮上り機構は、積層ゴムの下部フランジプレートと基礎との垂直方向の相対移動を許容し水平方向の相対移動を拘束するベースプレートと、浮上り時の挙動を支配する弾塑性部材であるゴムワッシャ、および浮上り時の引張力を基礎へと伝達する取付ボルトで構成される。

浮上り機構の主構成要素であるゴムワッシャの単体試験および実大サイズ積層ゴムの引張試験を実施した結果、今回の検討の範囲では、浮上り機構を用いた本据付法は所要の性能を有していることが確認された。

キーワード：免震構造、積層ゴム、引張対策、浮上り機構、軸力の再配分

This paper describes performance of the tensile measures device which is used for laminated rubber isolator. The device consists of a base plate, rubber washers, and installation bolts. The base plate has columnar dent to fit in a lower flange plate of laminated rubber and is fixed to the foundation. The rubber washer is an elasto-plastic material which control performance when the laminated rubber lifts up. Installation bolts transfer tensile force to the foundations. Compression tests of rubber washers and tensile tests of full scale laminated rubber with tensile measures device was carried out. As a results, in the range of this examinations, it was demonstrated that the tensile measures device has required performance.

Key Words: Seismically Isolated Structure, Laminated Rubber, Tensile Measures Device, Axial Force Redistribution

1. はじめに

免震構造に不可欠な積層ゴムは、その構造上、圧縮方向には大きな耐力を有するものの引張方向の耐力は非常に小さい。そのため免震構造をアスペクト比の大きい建物に適用する場合、免震層の周期を十分に長くして上部構造への地震入力を減らしたり、複数の柱の軸力をひとつの積層ゴムに集約して引抜き力や転倒モーメントに対する抵抗力を大きくしたりするなどして、積層ゴムに引張力を作用させない設計が行われてきた。しかしながら想定すべき地震動の巨大化と免震構造を適用する建物の多様化によって、積層ゴムに引張力を作用させない従来の設計が難しい建物も増えてきたため、近年では上部構造の部分的な浮上りを許容することによって、積層ゴムに作用する引張力を他の支承に再配分する設計も行われるようになってきた。

本報では、前述の引張力の再配分を利用した設計法に着目し、積層ゴムに過大な引張変形や引張応力を作用させることなく上部構造を浮上らせることのできる積層ゴム据付法について報告する。具体的には、大地震時に積層ゴムに引張力が生じると図-1、図-2に示すように下部フランジプレートが基礎から浮上る浮上り機構についてその挙動を支配する弾塑性部材（以下、ゴムワッシャ）の単体試験、同機構を用いたφ1300mm積層ゴムの実大引張試験を行い、同機構と積層ゴムを組み合わせた場合の性能を明らかにする。

本機構と同様の浮上り機構を用いた積層ゴム据付法についてはすでに幾つかの検討事例が報告されている^{1)~3)}が、本機構に用いるゴムワッシャがゴム材料のハードニング現象を利用した浮上り変位の最適制御、つまり変位10mm程度までは浮上りの対抗とならないように低剛性であり、それ以上の変位になると浮上り変位を抑制する

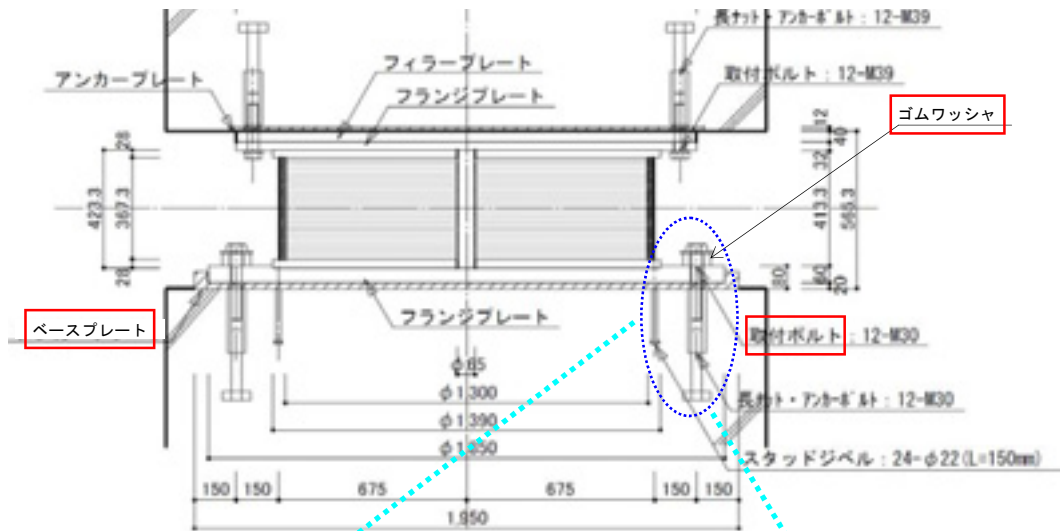


図-1 浮き上り機構を用いた積層ゴム据付法

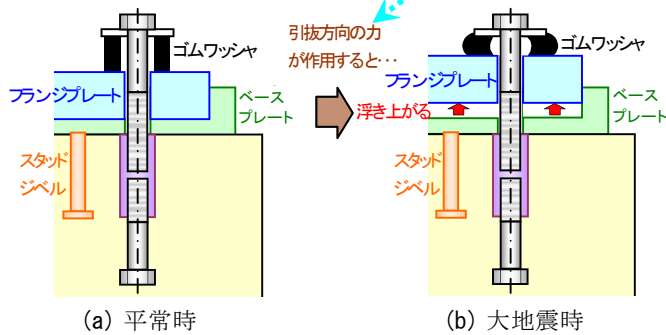


図-2 浮上り機構の動作メカニズム

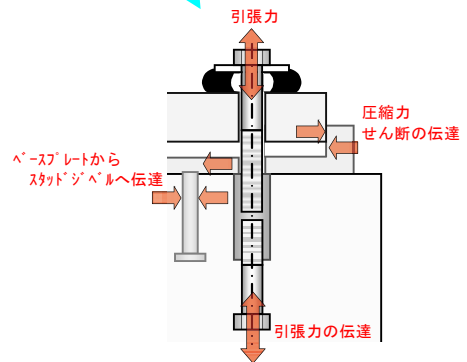


図-3 浮上り機構の応力伝達メカニズム

ために徐々に高剛性となる剛性変化の実現を目指して新たに開発したものであること、および取付ボルトにせん断力が作用しないように、ベースプレートにスタッドジベルを設けて従来のものとは異なるせん断力伝達経路を構築したことから、今回改めて検討を行うものである。

2. 浮上り機構の概要

図-1に浮上り機構を用いた積層ゴム据付法の概要を示す。浮上り機構はベースプレート、ゴムワッシャ、取付ボルトで構成される。ベースプレートは積層ゴムの下部フランジプレートをはめ込む円柱状の穴を有する鋼板であり、スタッドジベルにより基礎に固定される。ゴムワッシャは中央にボルト挿通孔を有する鋼板付きのゴムリングであり、積層ゴムの下部フランジプレートの上に配置される。取付ボルトは浮上り時の引張力を負担するボルトであり、ゴムワッシャ・フランジプレート・ベースプレートのそれぞれに設けられたボルト孔を貫通して基礎に固定される。大地震時に引抜き力が作用すると、図-2に示すように、積層ゴムよりも柔らかいゴムワッシャが圧縮変形し下部フランジプレートが浮上るため、積層

ゴムに過大な引張力や引張変形が生じることはないと考えられる。一方、積層ゴムの水平変形により生じるせん断力は、図-3に示すように、ベースプレートと下部フランジプレートの嵌合部の支圧によって負担し、スタッドジベルを通じて基礎へと伝達される。

3. ゴムワッシャ単体試験

(1) 試験体（ゴムワッシャ）の概要

図-4にゴムワッシャの構成および寸法図を、表-1に各構成要素の仕様を示す。ゴムワッシャは加硫接着されたゴムリングとフランジとからなる。ゴムリングは外形100mm、内径50mm、自由高さ45mmの中空円柱の天然ゴムであり、フランジは中央にφ31mmのボルト挿通孔が設けられた厚さ9mmの鋼製円板である。

ゴムワッシャには積層ゴムの浮上り変位を適度に抑制する機能と、経年や温度環境の変化などによる取付ボルトの緩みを防止する機能が求められる。本ゴムワッシャでは前者についてはゴム材料のハードニング現象を利用した圧縮剛性の調整で、後者については積層ゴム設置時に予変形を与えることで対応している。

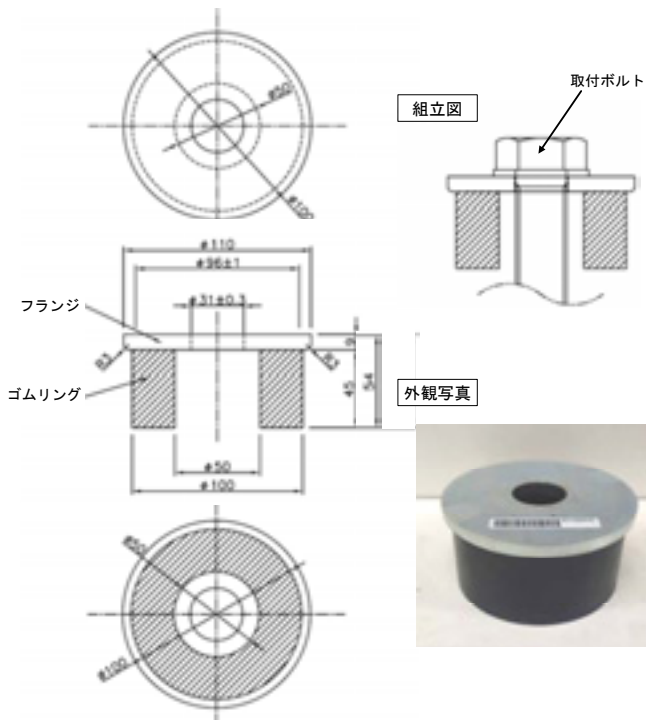


図-4 ゴムワッシャの構成および寸法図

表-1 ゴムワッシャの構成要素の仕様

構成部材	材質	規格	防錆仕様
ゴム	NR	硬さ65±10 (JIS A) JIS K 6253	—
フランジ	SS400	一般構造用圧延鋼材 JIS G 3101	電気めっき

表-2 試験方法および試験体数 (単体試験)

試験名称	試験方法	数
基本性能試験	圧縮変位20mmまで3サイクル加力し、圧縮荷重と圧縮変位を記録する。	5
傾斜時性能試験	試験体の上下面に0.01radの傾斜を与えた状態で圧縮変位20mmまで3サイクル加力し、圧縮荷重と圧縮変位を記録する。	2
多数回繰返し試験	圧縮変位12mmまたは20mmまで30サイクル加力し、圧縮荷重と圧縮変位を記録する。	各1
加熱劣化促進試験	加熱劣化により30年相当または80年相当に劣化させた後圧縮変位20mmまで3サイクル加力し、圧縮荷重と圧縮変位を記録する。加熱劣化促進条件は30年相当で80℃×7日、80年相当で80℃×18.5日である。	各1

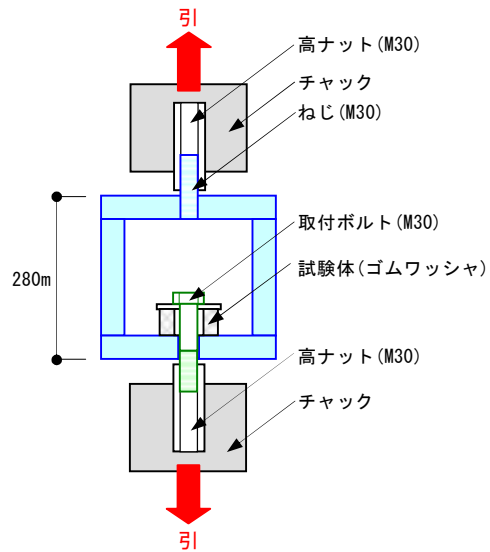
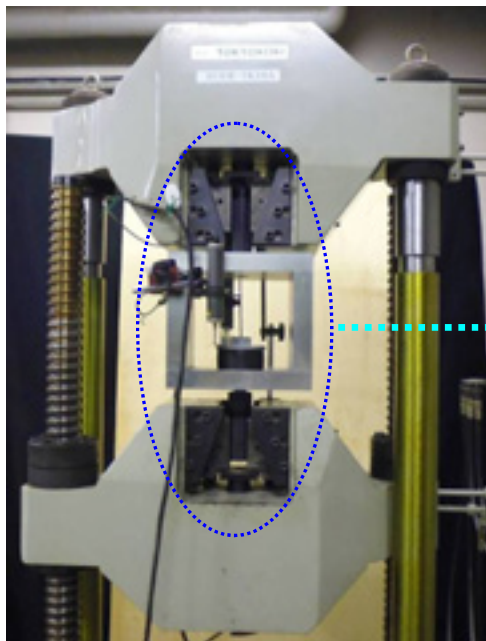


図-5 単体試験の試験装置

(2) 試験計画

ゴムワッシャの単体性能を確認するために、実際の使用状況を模擬した圧縮試験を実施した。

表-2 に試験方法および試験体数を示す。試験は基本性能試験、傾斜時性能試験、多数回繰返し試験、加熱劣化促進試験の4種類とし、試験体の全高が52mmになるまでボルトを締め付けた状態を初期状態(荷重および変位0)として実施した。ただし、傾斜時性能試験では試験体設置前にあらかじめ傾斜を与えなければならず(図-8

参照)、試験体高さによる初期管理が行えないため、圧縮荷重が2.5kNになるまでボルトを締め付けた状態を初期状態とした。

図-5 に試験装置の概要を示す。実際の使用状況を模擬するために、500kN 万能試験機で取付ボルトを引っ張ることにより、試験体を圧縮する仕組みとした。測定項目は試験体の圧縮変位および圧縮荷重とし、50mm 変位計で試験体の圧縮変位を2箇所測定するとともに、万能試験機に内蔵された荷重計で引張(圧縮)荷重を測定した。

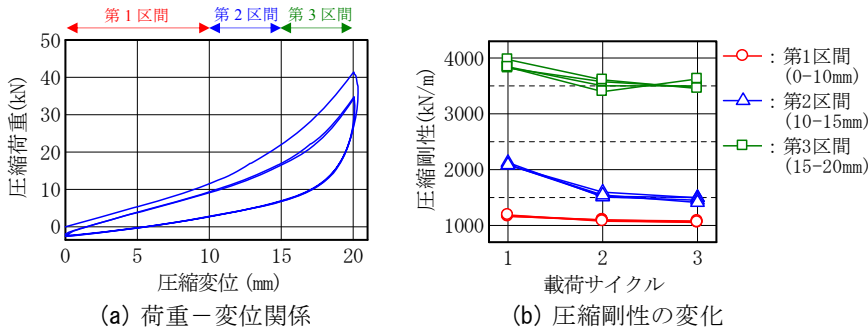


図-6 ゴムワッシャの基本性能試験結果

表-3 圧縮剛性

評価対象	圧縮剛性	標準偏差	
第1区間	1サイクル目	1.17	0.01
	2サイクル目	1.09	0.01
	3サイクル目	1.06	0.01
第2区間	1サイクル目	2.10	0.02
	2サイクル目	1.54	0.04
	3サイクル目	1.46	0.04
第3区間	1サイクル目	3.87	0.07
	2サイクル目	3.52	0.09
	3サイクル目	3.51	0.08

圧縮剛性の単位: $\times 10^3 \text{kN/m}$

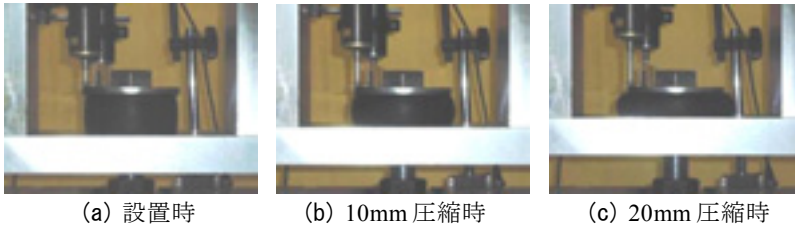


図-7 ゴムワッシャの変形状況

表-4 圧縮剛性 (傾斜時)

評価対象	圧縮剛性(変化率)	
第1区間	1サイクル目	1.16 (0.99)
	2サイクル目	1.08 (0.99)
	3サイクル目	1.06 (0.99)
第2区間	1サイクル目	2.33 (1.10)
	2サイクル目	1.56 (1.01)
	3サイクル目	1.48 (1.01)
第3区間	1サイクル目	4.52 (1.19)
	2サイクル目	4.23 (1.21)
	3サイクル目	4.28 (1.25)

剛性の単位: $\times 10^3 \text{kN/m}$

()内の数値は表-3の値に対する比。

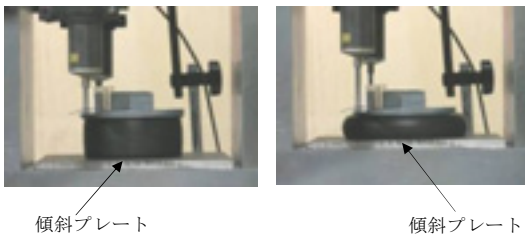


図-8 傾斜時試験状況

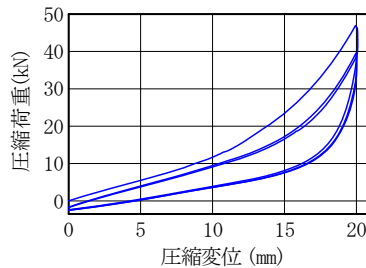


図-9 傾斜時の荷重-変位関係

(3) 試験結果

a) 基本性能試験

図-6、表-3に基本性能試験の結果を示す。ここで、ゴムワッシャの圧縮剛性は、圧縮変位 0~10mm の第1区間、圧縮変位 10~15mm の第2区間、圧縮変位 15~20mm の第3区間の各区間において、圧縮載荷時の荷重-変位関係より求めることとした(以下同じ)。

荷重-変位関係を見ると、2、3サイクル目に比べ1サイクル目では1割程度荷重が大きくなっている。各区間の圧縮剛性も1サイクル目が最も大きくなっており、第1区間で $1.17 \times 10^3 \text{kN/m}$ 、第2区間で $2.10 \times 10^3 \text{kN/m}$ 、第3区間で $3.87 \times 10^3 \text{kN/m}$ となっている。ここで、1サイクル目と2サイクル目の圧縮剛性を比較すると、第1および第3区間では7~8%の変化であるのに対し、第2区間では25%以上の変化となっている。これはゴム材料がハードニングを開始する圧縮変位が1サイクル目に比べ2サイクル目以降で大きくなったためと考えられる。

各区間の圧縮剛性は、ゴム材料のハードニング現象によって第1、第2、第3と圧縮変位が大きな区間になるにつれて大きくなっており、第1区間に比べ第2区間では1.5倍、第3区間では3.3倍になっている。したがって、

本ゴムワッシャは開発のねらいであったゴム材料のハードニング現象を利用した圧縮剛性の調整が程度良く行えているといえる。

図-7にゴムワッシャの変形状況を示す。今回使用上の限界に設定した圧縮変形20mmまで安定して変形していることが分かる。また、ゴムワッシャは自由高から2mm程度圧縮した状態で設置されるため、設置時においてもゴムリングが若干膨れていることが確認できる。なお、試験終了後におけるゴムワッシャの変形状態は試験開始前(設置時)とほぼ同じであった。また、試験中および試験終了後において取付ボルトに緩みは生じていなかった。

b) 傾斜時性能試験

図-8に試験状況の写真を、図-9に荷重-変位関係を示す。また、表-4に各区間各サイクルにおける圧縮剛性を傾斜のない場合(表-3の数値)と比較して示す。

荷重-変位関係は傾斜のない場合とほぼ同じ傾向を示しているが、ハードニングによるゴム硬化の程度が大きいように思われる。各区間の圧縮剛性は、第1区間および第2区間の2サイクル目以降では傾斜のない場合とほぼ同じであるが、第2区間の1サイクル目では1.1倍、第3区間では1.2倍になっている。

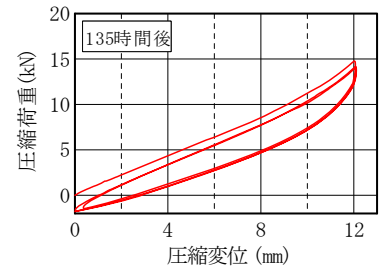
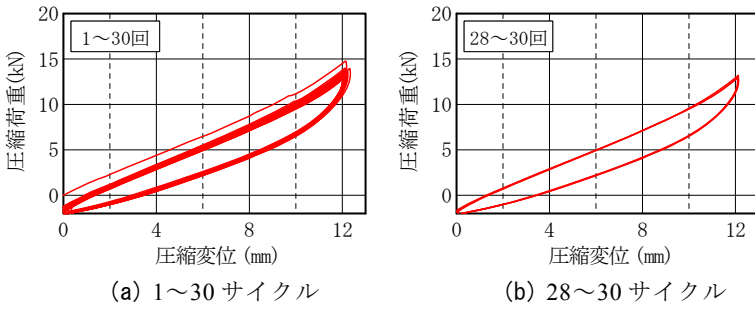
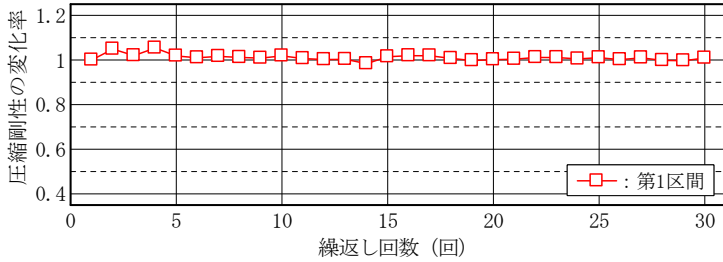


図-11 135 時間後の荷重-変位関係



(c) 繰返しによる圧縮剛性の変化率

図-10 圧縮変位 12mm の繰返し試験結果

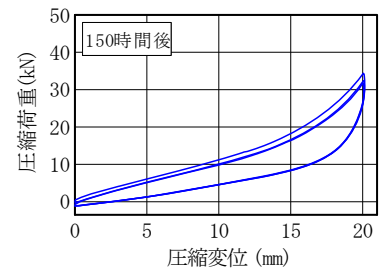
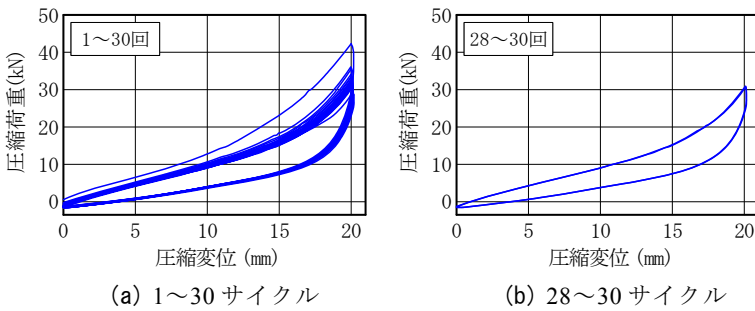
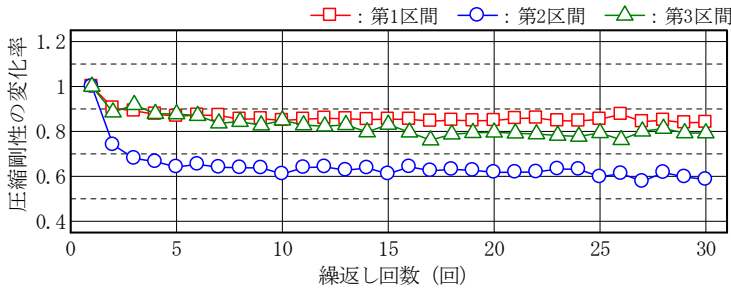


図-13 150 時間後の荷重-変位関係



(c) 繰返しによる圧縮剛性の変化率

図-12 圧縮変位 20mm の繰返し試験結果

表-5 135 時間後の圧縮剛性

評価対象	初期値	135時間後
第1区間	1サイクル目	1.10
	2サイクル目	1.16
	3サイクル目	1.13
		1.12 (1.02)
		1.17 (1.01)
		1.13 (1.01)

単位： $\times 10^3 \text{kN/m}$
()内の数値は初期値に対する比。

表-6 150 時間後の圧縮剛性

評価対象	初期値	150時間後
第1区間	1サイクル目	1.19
	2サイクル目	1.08
	3サイクル目	1.06
		1.03 (0.87)
		1.01 (0.94)
		0.99 (0.94)
第2区間	1サイクル目	2.09
	2サイクル目	1.54
	3サイクル目	1.41
		1.42 (0.68)
		1.31 (0.85)
		1.31 (0.93)
第3区間	1サイクル目	3.84
	2サイクル目	3.40
	3サイクル目	3.62
		3.18 (0.83)
		3.10 (0.91)
		3.04 (0.84)

単位： $\times 10^3 \text{kN/m}$
()内の数値は初期値に対する比。

c) 多数回繰返し試験

図-10, 図-11, 表-5 に圧縮変位 12mm の試験結果を, 図-12, 図-13, 表-6 に圧縮変位 20mm の試験結果を示す。

圧縮変位が 12mm の場合には繰返し加力による圧縮剛性の変化はほとんどなく, 試験終了後 135 時間後にはほぼ初期の状態に戻っている。したがって, 圧縮変位 12mm 以下の使用条件であれば, 繰返しによる圧縮剛性の変化は無視することができる。

一方, 圧縮変位が 20mm の場合には繰返し回数が増すにつれて圧縮剛性は低下しており, 30 サイクル目には第1,

第2, 第3の各区間においてそれぞれ初期の 85%, 60%, 80% になっている。試験終了後 150 時間経過後においても第1および第3区間では初期の 85%, 第2区間では初期の 70%にまでしか圧縮剛性は回復していない。しかしながら, 試験終了後においても取付ボルトに緩みは生じておらず, ゴム高さ(自由高)の変化も-0.3mm とごくわずかであったため, 繰返しによる圧縮剛性の低下が許容できるのであれば, これ以降の継続使用も可能であると考えられる。

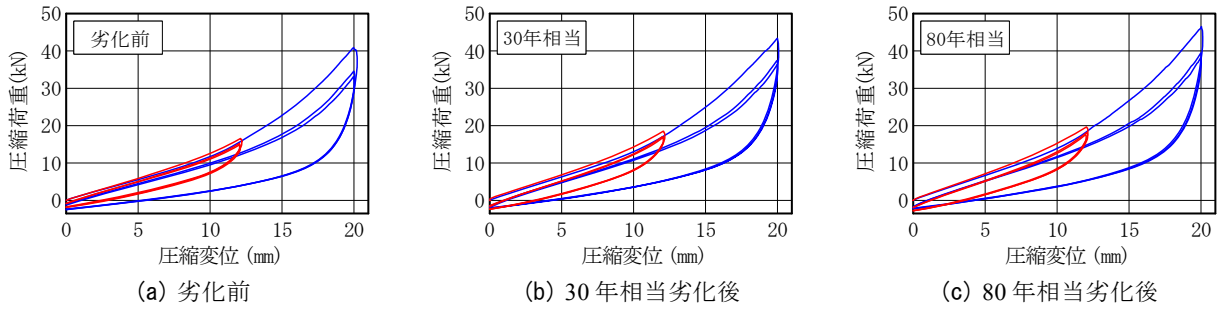


図-14 加熱劣化前後における荷重-変位関係

d) 加熱劣化促進試験

図-14 に加熱劣化前後における荷重-変位関係を、表-7 に加熱劣化前後における圧縮剛性の変化を示す。

経年による圧縮剛性の変化は第1区間で最も大きく、30年相当の劣化で+11~+15%、80年相当の劣化で+19%になっている。第2区間、第3区間と圧縮変位の大きな区間になるにつれてその程度は小さくなる傾向にあるものの、総括的には30年で+10%程度、80年で+20%程度の剛性変化が生じるものと考えられる。

表-7 加熱劣化による圧縮剛性の変化

評価対象	劣化前	30年相当劣化	80年相当劣化
第1区間	1サイクル目	1.16	1.29 (1.11)
	2サイクル目	1.09	1.23 (1.13)
	3サイクル目	1.06	1.22 (1.15)
第2区間	1サイクル目	2.20	2.39 (1.09)
	2サイクル目	1.54	1.67 (1.09)
	3サイクル目	1.46	1.59 (1.09)
第3区間	1サイクル目	3.58	3.68 (1.03)
	2サイクル目	3.36	3.49 (1.04)
	3サイクル目	3.15	3.42 (1.09)

単位：×10³kN/m、()内の数値は劣化前に対する比。

4. 実大引張試験

(1) 試験計画

実大サイズの積層ゴムと浮上り機構を組み合わせた時の構造性能を確認するために引張試験を行った。図-15 に試験体の断面図を、表-8 に積層ゴムの諸元を示す。

積層ゴムは直径1,300mm、ゴム層総厚254.8mmであり、下部フランジプレートの厚さは60mmである。ベースプレートは溝部深さ40mm、溝部直径1,853mm（下部フランジプレートの直径+3mm）であり、実際の応力伝達経路を再現するために、下部反力盤上に固定されたアタッチプレートにスタッドジベルの位置でボルト固定した(図-16参照)。ゴムワッシャは3章の単体試験で使用したものと同一であり、試験開始時に未使用のものを設置し、試験終了まで同じものを使用した。

表-9 に各試験の試験方法を、表-10 に試験条件および試験順序を示す。引張試験は引張変位のみを与える単純引張試験、オフセットせん断変形を与えた状態で引張変位を与えるオフセットせん断-引張試験、オフセット引張-せん断試験の3種類とした。また、引張試験前後における基本性能の変化を確認するために、出荷時検査と同様の基本性能試験を適宜行うこととした。

図-17 に試験機の外観図を、表-11 に測定項目および測定機器を、図-18 に測定位置の概略図を示す。

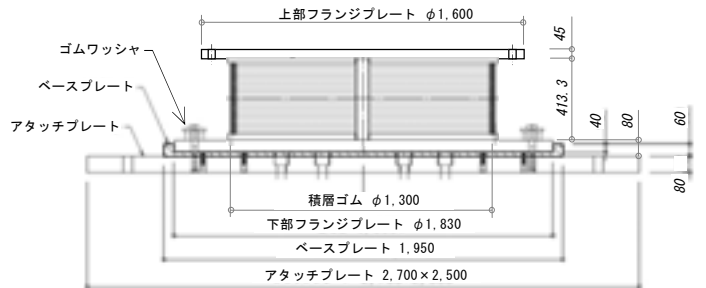


図-15 試験体の断面図

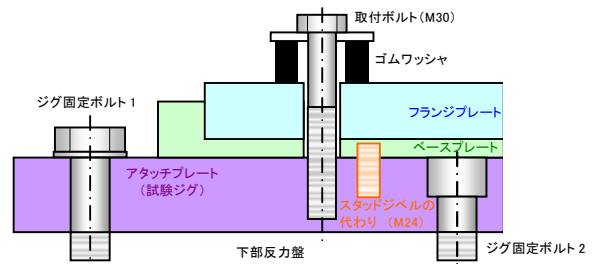


図-16 試験体設置のイメージ図

表-8 積層ゴムの諸元

ゴム材料	G=0.39 N/mm ²	
ゴム直径	外径=1300mm, 内径=65mm	
ゴム断面積	1.324 m ²	
ゴム層厚×層数	9.8mm×26層=254.8mm	
形状係数	S1=31.5, S2=5.1	
基本性能	鉛直剛性	5260×10 ³ kN/m
	水平剛性	2.04×10 ³ kN/m

表-9 試験方法

試験名称	測定方法	
単純引張試験	規定の引張変位を3サイクル与え、鉛直荷重-鉛直変位関係を記録する。	
オフセットせん断-引張試験	規定のオフセットせん断ひずみを与えた状態で、規定の引張変位を3サイクル与え、鉛直荷重-鉛直変位関係を記録する。	
オフセット引張-せん断試験	規定の引張変位を与えた状態で、規定のせん断ひずみを3サイクル与え、水平荷重-水平変位関係を記録する。	
基本性能試験	水平剛性	面圧15N/mm ² 相当の鉛直荷重を載荷し、せん断ひずみ $\gamma = \pm 100\%$ を3サイクル与え、3回目の履歴特性の最大変位値と最大荷重値の交点とその各最小値の交点を結んだ直線の傾きを算出する。
	鉛直剛性	面圧15N/mm ² 相当の鉛直荷重を載荷し、荷重振幅 $\pm 30\%$ を3サイクル加力した時の3回目の履歴特性の最大変位値と最大荷重値の交点とその各最小値の交点を結んだ直線の傾きを算出する。

表-11 測定項目および測定機器

測定項目	記号	計測機器	仕様
水平変位	—	試験機内蔵変位計	±800mm
水平荷重	—	ロードセル	8,000kN
上下反力盤間変位	D1~D4	接触式変位計	±25mm
ゴムワッシャ鉛直変位	F1~F3	レーザー変位計	±40mm
積層ゴム鉛直変位	L1, L2		
鉛直荷重	—	ロードセル	3,500kN

表-10 試験条件および試験順序

No	試験区分	せん断ひずみ (水平変位)	鉛直ひずみ または 面圧
1	基本(水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm ² (19860kN)
2	基本(鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm ² ±30%
3	単純引張	0% (0mm)	0~3.9% (0~10mm)
4	オフセットせん断-引張	+100% (+254.8mm)	0~3.9% (0~10mm)
5	オフセット引張-せん断	±100% (±254.8mm)	3.9% (10mm)
6	基本(水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm ² (19860kN)
7	基本(鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm ² ±30%
8	オフセットせん断-引張	+200% (+509.6mm)	0~3.9% (0~10mm)
9	オフセット引張-せん断	±200% (±509.6mm)	3.9% (10mm)
10	基本(水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm ² (19860kN)
11	基本(鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm ² ±30%
12	基本(水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm ² (19860kN)
13	基本(鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm ² ±30%
14	単純引張	0% (0mm)	0~7.8% (0~20mm)
15	オフセットせん断-引張	+100% (+254.8mm)	0~7.8% (0~20mm)
16	オフセット引張-せん断	±100% (±254.8mm)	7.8% (20mm)
17	オフセットせん断-引張	+200% (+509.6mm)	0~7.8% (0~20mm)
18	オフセット引張-せん断	±200% (±509.6mm)	7.8% (20mm)
19	基本(水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm ² (19860kN)
20	基本(鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm ² ±30%

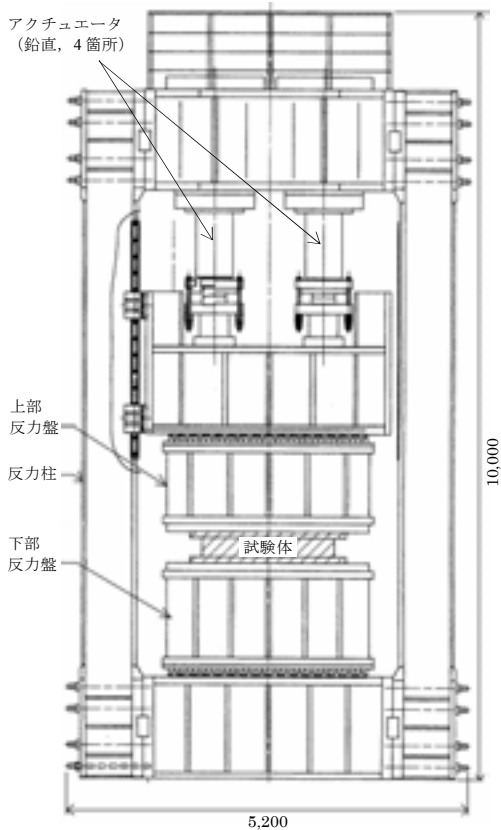


図-17 試験機の外観図

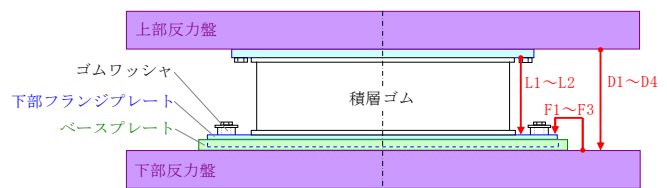
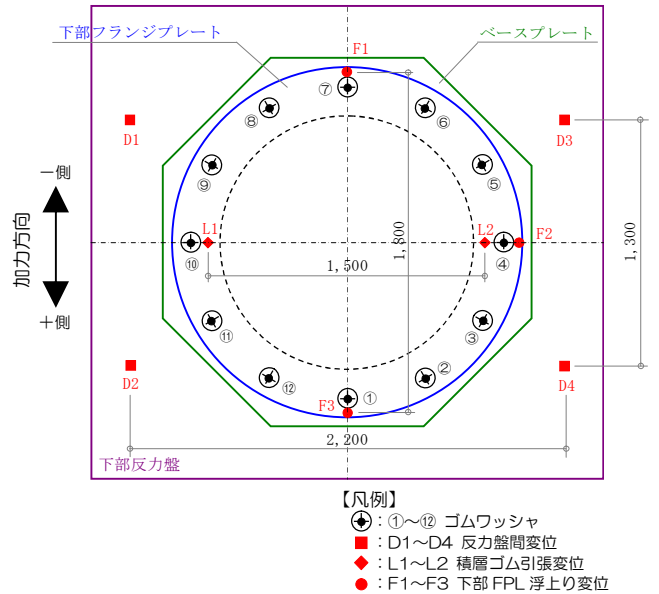


図-18 測定位置の概略図

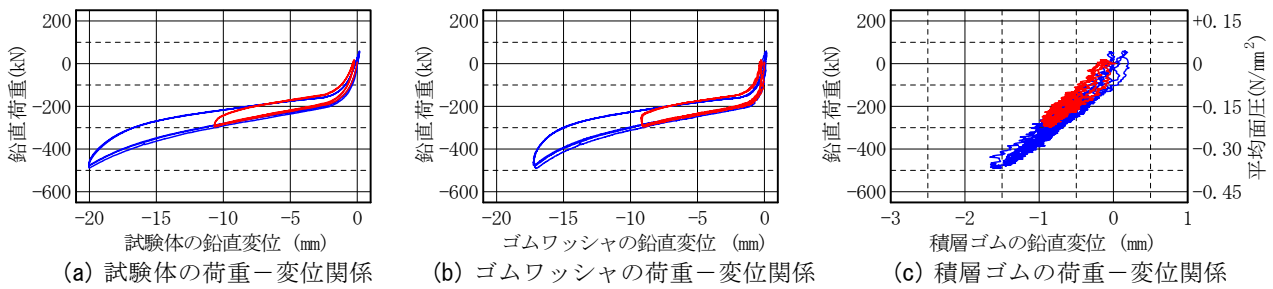


図-19 単純引張試験結果

(2) 試験結果

以下では、試験体の鉛直変位は D1～D4 の平均値、ゴムワッシャの鉛直変位は F1 と F3 の平均値、積層ゴムの鉛直変位は L1 と L2 の平均値とした。また、下部フランジプレートの回転角は F1 と F3 の差分より求めた。

a) 単純引張試験

図-19 に単純引張試験結果を示す。図(a),(b),(c)ともに縦軸は鉛直荷重 (図(c)の右縦軸は積層ゴムの平均面圧) であり引張側を負としている。横軸はそれぞれ試験体の鉛直変位、ゴムワッシャの鉛直変位、積層ゴムの鉛直変位であり、試験体および積層ゴムは引張側、ゴムワッシャは圧縮側を負としている。

試験体の鉛直変位が-20mmのときの鉛直荷重は-488kN、積層ゴムの平均面圧は-0.37N/mm²であり、積層ゴムの引張限界強度の基準値-1N/mm²の40%以下である。積層ゴムの鉛直変位も最大-1.8mmであり、鉛直剛性の線形性も保たれていることから、積層ゴムに引張降伏は生じていないものと考えられる。

試験体の荷重-変位関係より、下部フランジプレートが完全に浮上った後の載荷時3サイクル目の鉛直剛性を求めると、ゴムワッシャの第1区間に相当する-3～-12mmの範囲で 1.13×10⁴kN/m、第2区間に相当する-12～-17.5mmの範囲で 1.68×10⁴kN/mとなる。これは後述のゴムワッシャおよび積層ゴムの鉛直剛性を直列ばねとして計算した鉛直剛性のそれぞれ 97%および 95%に相当する。フランジプレートの面外剛性が考慮されていないため両者は完全には一致していないが、前述の直列ばねによる剛性計算は実用的には十分な精度であるといえる。

ゴムワッシャの荷重-変位関係より、ゴムワッシャの鉛直変位が-2～-10mmまでの第1区間および-10～-15mmまでの第2区間における載荷時3サイクル目の鉛直剛性を求めるとそれぞれ 1.30×10⁴kN/m、1.89×10⁴kN/mとなる。これらの値をゴムワッシャ1個あたりに換算するとそれぞれ 1.08×10³kN/m、1.58×10³kN/mであり、表-3に示したゴムワッシャ単体の圧縮剛性とおおむね一致する。したがって、下部フランジプレートが単純引張試験のようにまっすぐに浮上る場合には、ゴムワッシャ単体

の圧縮剛性を個数倍したものを浮上り機構の鉛直剛性とみなすことが可能である。

最後に、積層ゴムの荷重-変位関係より3サイクル目の引張剛性を最小2乗法で求めると3.0×10⁵kN/mとなる。これは基本性能試験結果より求めた圧縮変位1mmまでの圧縮剛性3.2×10⁵kN/mとほぼ同じ値であった。また、基本性能試験で求めた初期圧縮剛性4.7×10⁶kN/mの1/16であり、積層ゴムの引張変位にフランジプレートの面外変形が含まれていないために、過去に行われたφ1,200mm積層ゴムの引張試験結果(圧縮剛性の1/28)⁴⁾よりも高率であった。

b) オフセットせん断-引張試験

図-20 にオフセットせん断変形 509.6mm (せん断ひずみ 200%) 時の試験結果を、図-21 に鉛直変位-20mmの時の試験状況写真を示す。ここで、図-20(d)の縦軸は下部フランジプレートの回転角であり、図-18 に示す F1 側の浮上り変位が F3 側よりも大きい場合を正としている。また、図-20(e)と(f)の横軸はそれぞれゴムワッシャと積層ゴムの補正鉛直変位(実測された鉛直変位を上下鉛直荷重作用線の中心位置における鉛直変位に換算したもの、図-22 参照)である。

オフセットせん断変形を与えると浮上り機構の嵌合部に圧縮力が生じ、浮上り時の摩擦抵抗力が大きくなるため、引張荷重は単純引張試験よりも大きくなると予想される。しかしながら、試験体の鉛直変位-20mmの時の鉛直荷重は-496kN、積層ゴムの平均面圧に換算して-0.37N/mm²であり、単純引張試験とほぼ同じ値であった。

これはせん断変形によって積層ゴムの引張剛性が低下したためと考えられる。確認のため、鉛直荷重と積層ゴムの補正鉛直変位の関係(図-20(f))から3サイクル目の引張剛性を最小2乗法で求めると、せん断ひずみ100%時で 2.70×10⁵kN/m、200%時で 1.67×10⁵kN/mであり、それぞれ単純引張試験結果の90%、56%であった。

図-23 にせん断ひずみ 0%を基準とした積層ゴムの引張剛性の変化率Δkとせん断ひずみγの関係を示す。両者の関係は、せん断ひずみ 200%までの範囲では、同図中に実線で示した式(1)で精度良く模擬できている。

$$\Delta k = 1 - 0.11 \times \gamma^2 \quad (1)$$

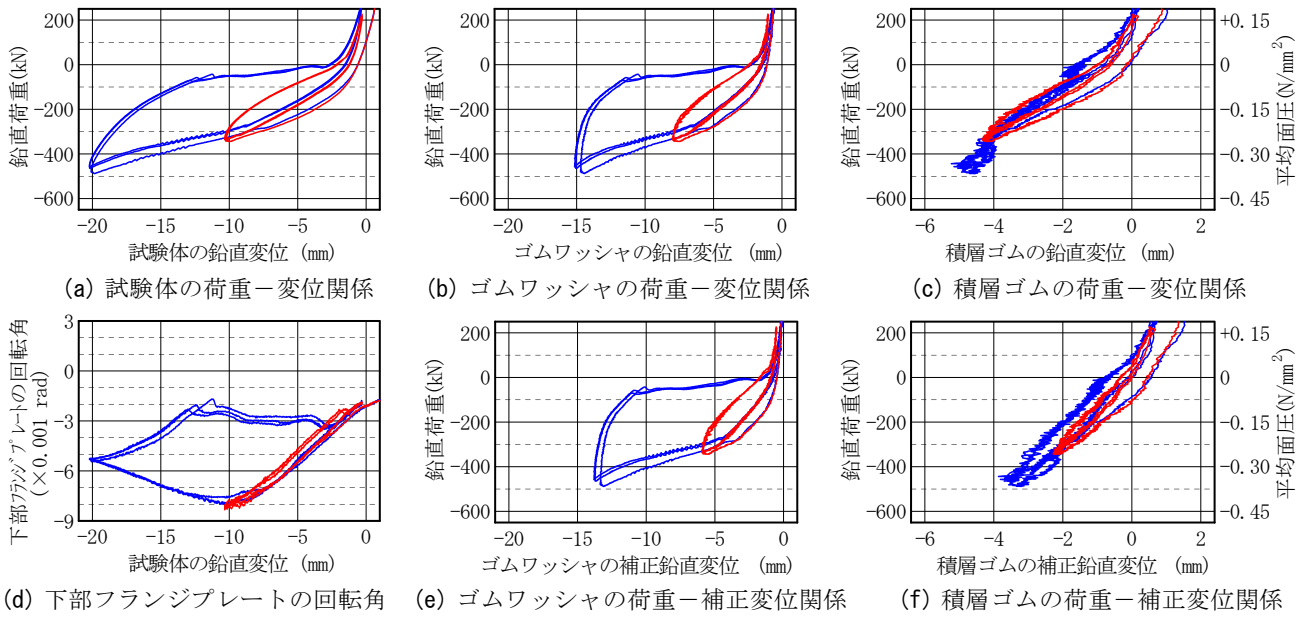


図-20 オフセットせん断-引張試験結果 (オフセットせん断ひずみ 200%)

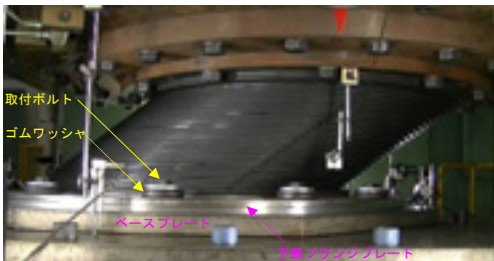


図-21 オフセットせん断-引張試験の状況

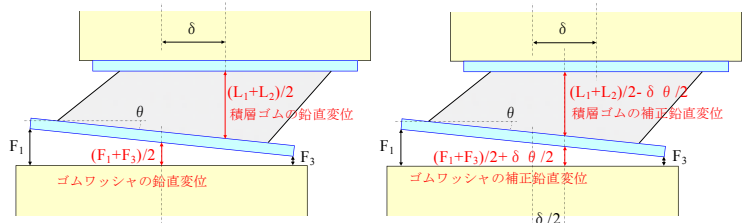


図-22 鉛直変位と補正鉛直変位

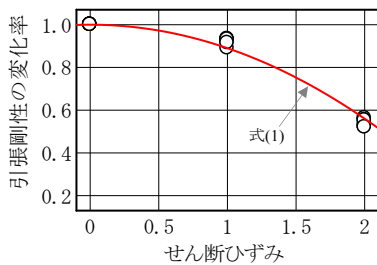


図-23 引張剛性の変化率

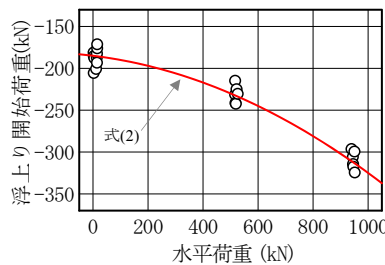


図-24 浮上り開始荷重の変化

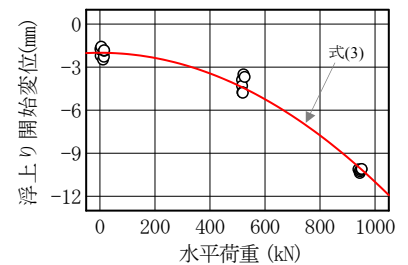


図-25 浮上り開始変位の変化

図-20 (a) および (d) をみると、嵌合部の支圧力によって当該箇所における浮上りが拘束され、下部フランジプレートに回転（水平面に対する傾斜）が生じていることが分かる。回転角は下部フランジプレート全体が浮上る直前で -0.008rad の最大値に達し、その後、下部フランジプレート全体が浮上り始めると徐々に小さくなっている。

ここで、下部フランジプレート全体が浮上り始めると回転角が小さくなる理由としてはゴムワッシャのハードニングに伴う圧縮剛性の変化が考えられる。つまり、嵌合部側のゴムワッシャが圧縮変形を始める頃にはその反対側のゴムワッシャはすでに大きく圧縮変形しているため、嵌合部側よりもゴムワッシャの抵抗力が大きくなって、これ以降の変形があまり進まなかったものと考えら

れる。

なお、今回の検討の範囲では回転角の最大値は 0.008rad であり、使用上の限界の目安とされる 0.01rad 以下であったが、積層ゴムのせん断変形が今回の検討の範囲を超えて大きくなると、引張応力よりも先に回転角が限界に達することも十分に考えられるため注意が必要である。

図-24 に下部フランジプレート全体が浮上り始めるときの鉛直荷重（以下、浮上り開始荷重）と水平荷重の関係を、図-25 に下部フランジプレート全体が浮上り始めるときの鉛直変位（以下、浮上り開始変位）と水平荷重の関係を示す。

浮上り開始荷重 F と水平荷重 Q の関係は式(2)で、浮上り開始変位 D と水平荷重 Q の関係は式(3)で表現でき

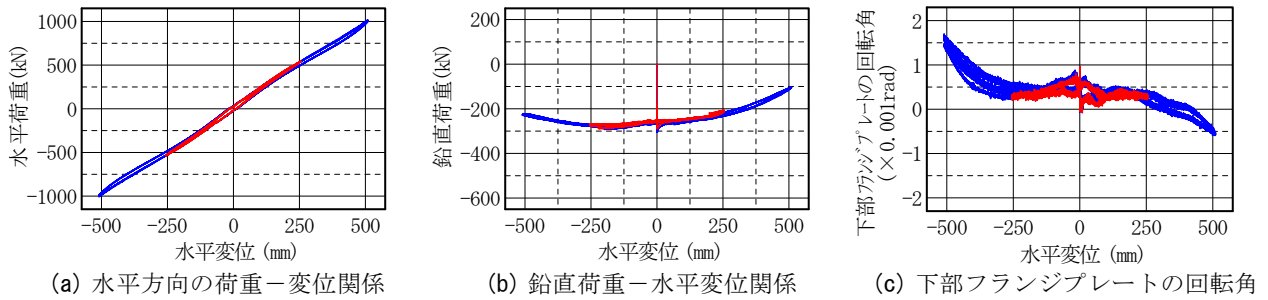


図-26 オフセット引張 10mm の試験結果

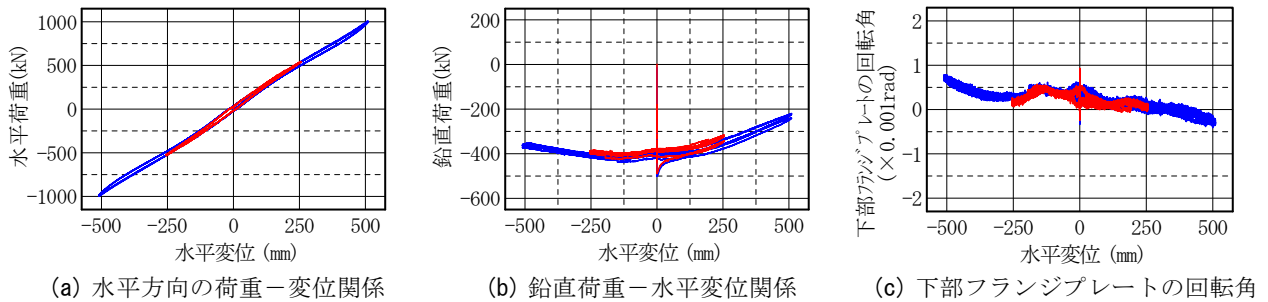


図-27 オフセット引張 20mm の試験結果

る。ここで、式(2)よりせん断ひずみ 300% ($Q = 1,560\text{kN}$) における浮上り開始荷重を求めると -491kN となる。また、鉛直変位を -20mm 、下部フランジプレートが完全に浮上り始めた後の鉛直剛性をゴムワッシャの第 2、第 3 区間の圧縮剛性の平均値の個数倍と仮定し、浮上り後の荷重変化を求めると -716kN となる。したがって、せん断ひずみ 300%、鉛直変位 -20mm の時の引張荷重は $1,207\text{kN}$ 、積層ゴムの平均引張面圧に換算して 0.91N/mm^2 となるため、この条件下において積層ゴムが引張降伏することはないものと考えられる。ただし、式(3)によればこのとき下部フランジプレートの嵌合部側は浮上っておらず、積層ゴムには 0.02rad を超える回転が生じていると考えられるため、実際にこの条件下での使用を想定する場合には、回転に対する検討が必要である。

$$F = -185 - 4 \times 10^{-2} \times Q - 10^{-4} \times Q^2 \quad (2)$$

$$D = -2 - 9 \times 10^{-6} \times Q^2 \quad (3)$$

ここに、 F : 浮上り開始荷重 (kN)
 D : 浮上り開始変位 (mm)
 Q : 水平荷重 (kN)

鉛直荷重とゴムワッシャの補正鉛直変位の関係 (図-20(e)) から、補正鉛直変位が $-6 \sim -10\text{mm}$ の第 1 区間における載荷時 3 サイクル目の鉛直剛性を求めると $1.47 \times 10^4\text{kN/m}$ となり、単純引張試験結果の 1.13 倍になっている。ゴムワッシャ 1 個あたりに換算すると $1.23 \times 10^3\text{kN/m}$ であり、ゴムワッシャ単体試験結果の第 1 区間と第 2 区間の圧縮剛性の平均値程度になっている。これは、補正鉛直変位が第 1 区間の範囲内にあっても、下部フランジ

プレートの回転により、一部のゴムワッシャの圧縮変位はすでに第 2、第 3 区間に入っているためと考えられる。

したがって、下部フランジプレートに大きな回転が生じる場合には、ゴムワッシャ単体の圧縮剛性を個数倍して浮上り機構の鉛直剛性とするのは難しく、ゴムワッシャ個々の圧縮変位を見極めた上で全体の鉛直剛性を推定する必要があると考えられる。

c) オフセット引張-せん断試験

図-26 と図-27 にオフセット引張-せん断試験の結果を示す。図-26 は試験体の鉛直変位が -10mm の場合、図-27 は -20mm の場合である。

水平方向の荷重-変位関係をみると、積層ゴムに浮上りが生じた場合でも水平剛性の線形性は確保されており、せん断ひずみ 100% 時で $2.10 \times 10^3\text{kN/m}$ 、200% 時で $1.97 \times 10^3\text{kN/m}$ であって、表-8 に示した基本性能と非常に良く一致している。したがって浮上りが生じた場合でも積層ゴムは所要の水平性能を保持し続けているといえる。

鉛直荷重と水平変位の関係をみると、水平変位のプラス側とマイナス側で程度は異なるものの、水平変形が大きくなるにつれて引張荷重は小さくなっている。これは試験体の伸びに伴う引張荷重の増加よりも積層ゴムの剛性低下に伴う引張荷重の減少の方が影響が大きかったためと考えられる。

下部フランジプレートの回転角をみると、試験体の鉛直変位が -10mm の時の方が -20mm の時よりも大きくなっている。これはゴムワッシャの圧縮剛性が非線形であり、圧縮変位が 15mm を超える第 3 区間では圧縮変位 10mm までの第 1 区間に比べ 3 倍以上の高剛性となるためと考

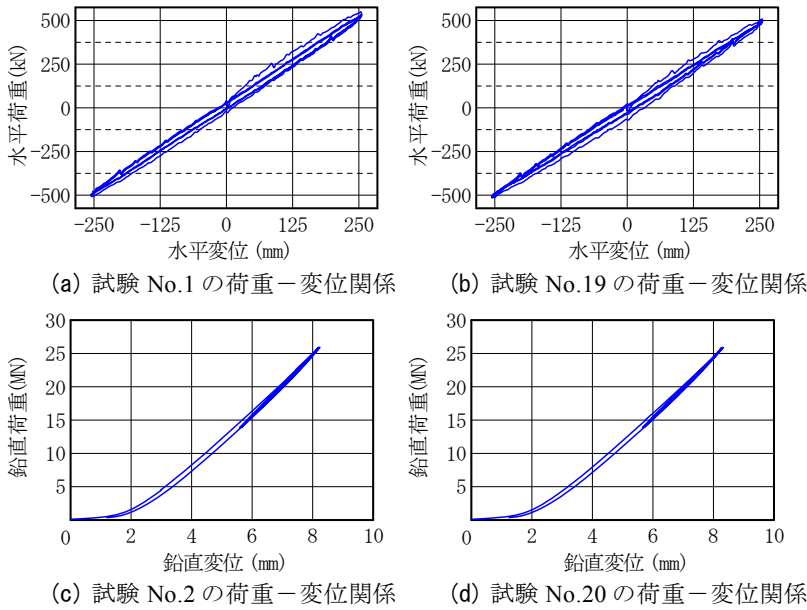


図-28 初期と最終の基本性能試験結果

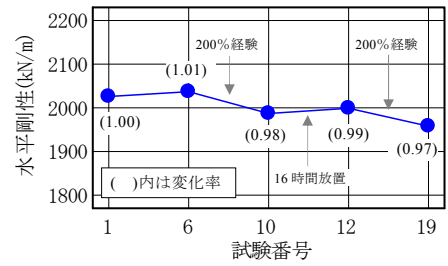


図-29 水平剛性の変化

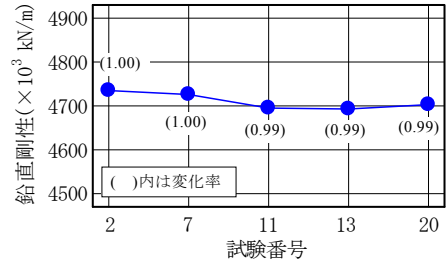


図-30 鉛直剛性の変化

表-12 ゴムワッシャの圧縮剛性

評価対象		位置①	位置④	位置⑦
第1区間	1サイクル目	1.10 (0.94)	1.11 (0.94)	1.10 (0.93)
	2サイクル目	1.08 (0.99)	1.07 (0.98)	1.09 (1.00)
	3サイクル目	1.07 (1.00)	1.08 (1.01)	1.08 (1.01)
第2区間	1サイクル目	1.72 (0.82)	1.78 (0.85)	1.68 (0.80)
	2サイクル目	1.40 (0.91)	1.42 (0.92)	1.40 (0.91)
	3サイクル目	1.36 (0.93)	1.38 (0.94)	1.37 (0.94)
第3区間	1サイクル目	3.49 (0.90)	3.59 (0.93)	3.45 (0.89)
	2サイクル目	3.27 (0.93)	3.34 (0.95)	3.26 (0.93)
	3サイクル目	3.22 (0.92)	3.22 (0.92)	3.22 (0.92)

単位：×10³kN/m，()内の数値は表-3の値に対する比。

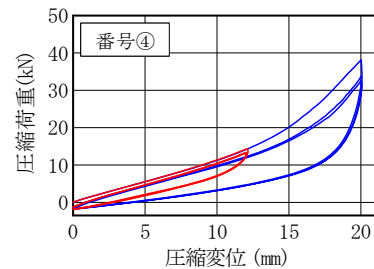


図-31 ゴムワッシャの荷重－変位関係

えられる。つまり、鉛直変位が-10mmの時よりも-20mmの時のほうが取付ボルトの固定度が高まったために回転角が小さくなったと考えられる。なお、ゴムワッシャの鉛直変位は試験体の鉛直変位が-10mmの時で-8~-9mm、-20mmの時で-17~-18mmであった。

d) 基本性能試験

図-28に初期(試験 No.1,2)および最終(試験 No.19,20)の基本性能試験の荷重－変位関係を示す。また、図-29、図-30にそれぞれ水平剛性および鉛直剛性の変化を示す。

水平および鉛直方向ともに初期および最終の荷重－変位関係に有意な差は認められず、剛性の変化も水平で-3%、鉛直で-1%と非常に小さい。したがって、本機構を用いて据付けられたφ1,300mmの積層ゴムの浮上りが生じ500kN(平均面圧0.38kN/mm²)の引張力が作用した後も健全であり、継続使用可能であると考えられる。なお、水平剛性の低下はせん断ひずみ200%の水平載荷によるものであり、積層ゴムの浮上りや引張応力による影響はごくわずかであると推測される。

(3) ゴムワッシャの残存性能

実大引張試験で使用したゴムワッシャの残存性能を確認するために、実大引張試験の約1ヶ月後に単体試験を実施した。試験体は図-18に示す番号①、④、⑦の位置で使用した3体であり、実大引張試験における最大圧縮変位はそれぞれ18.4mm、17.9mm、19.9mmである。

表-12、図-31に試験結果を示す。第1区間の圧縮剛性をみると1サイクル目では6~7%低下しているものの、2,3サイクル目では初期とほぼ同じ値になっている。一方、第2、第3区間をみると、2サイクル目以降でも5~9%の剛性低下が認められ、第2区間の1サイクル目では最大20%の剛性低下が認められる。しかしながら、外観に損傷はなく、荷重－変位関係も初期と大差なく安定している。また、別途実施した寸法検査によればゴム高さ(自由高)の変化も-0.3~-0.5mmとごくわずかであった。したがって、上記鉛直剛性の変化が許容できるのであれば、実大引張試験によって最大圧縮変位20mm、最大回転角0.008rad、累積変位700mm以上を経験したゴムワッシャのこれ以降の継続使用も可能であると考えられる。

5. まとめ

積層ゴムに過大な引張変形や引張応力を作用させずに上部構造を浮上らせることのできる積層ゴム据付法について検討した。浮上り機構の主構成要素であるゴムワッシャの単体試験および浮上り機構を用いたφ1,300mmの積層ゴムの引張試験を実施し、以下の結論を得た。

(1) ゴムワッシャの単体性能について

- ① 圧縮変位0～10mmの第1区間、10～15mmの第2区間、15～20mmの第3区間における処女載荷時の圧縮剛性はそれぞれ $1.17 \times 10^3 \text{kN/m}$ 、 $2.10 \times 10^3 \text{kN/m}$ 、 $3.87 \times 10^3 \text{kN/m}$ である。
- ② 0.01radの回転（上下面間の相対的な傾斜）が生じて第1区間の圧縮剛性はほとんど変化しない。第2および第3区間の圧縮剛性はそれぞれ1.1倍、1.2倍になる。
- ③ 12mmの圧縮変位を30回繰返し経験しても圧縮剛性はほとんど変化しない。20mmの場合には第1、第2、第3区間の圧縮剛性はそれぞれ0.85倍、0.60倍、0.80倍になる。
- ④ 30年および80年相当の経年変化により圧縮剛性はそれぞれ1.1倍、1.2倍になる。

(2) 積層ゴムと浮上り機構を組み合わせた時の性能について

- ① 積層ゴムの平均引張応力は鉛直変位-10mmで $0.22 \sim 0.26 \text{N/mm}^2$ 、-20mmで $0.36 \sim 0.37 \text{N/mm}^2$ であり、引張限界強度の基準値 1N/mm^2 の40%未満である。
- ② 積層ゴムのせん断変形によって浮上り機構の嵌合部に圧縮力が生じると、当該箇所における浮上りが拘束され回転が生じる。回転角は積層ゴムのせん断力に支配され、下部フランジプレート全体が浮上る直前で最大となる。せん断ひずみ200%（せん断力1,000kN）の場合、鉛直変位-10mmで回転角は最大となり0.008radに達する。
- ③ 積層ゴムの引張剛性は水平変形0で $3.0 \times 10^5 \text{kN/m}$ 、255mm ($\gamma=100\%$) で $2.7 \times 10^5 \text{kN/m}$ 、510mm ($\gamma=200\%$) で $1.6 \times 10^5 \text{kN/m}$ であり、水平変形が大きくなるにつれて低下する傾向にある。
- ④ 積層ゴムに浮上りが生じて水平方向の荷重-変位関係は線形性を保っており水平剛性も変化しない。また、浮上り経験後においても積層ゴムの水平および鉛直の基本性能に変化は認められない。

以上より、本浮上り機構を用いた積層ゴム据付法は、積層ゴムに過大な引張変形や引張応力を作用させることなく上部構造を浮上らせることのできる据付法のひとつであることが実証されたといえる。ただし、積層ゴムのせん断変形が今回の検討の範囲を超えて大きくなると、浮上り時における下部フランジプレートの回転角が0.01rad以上となり、引張応力よりも先に回転角が使用上の限界に達することがあるため注意が必要である。

なお、浮上り機構と積層ゴムを組み合わせた時の性能は、想定する使用条件のみならず、嵌合部の平滑度や各部のクリアランス等によっても変化するため、これら諸条件の変化が各性能に及ぼす影響を把握することも重要と考えられるが、それらについては今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 荻野伸行, 加藤直樹, 柳勝幸, 開発美雪, 堀田 祐介, 和田章: IBT ワッシャを用いた φ1100 積層ゴムの性能確認試験 (その1) ~ (その3), 日本建築学会大会 (東北) 学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.837-842, 2009.7
- 2) 藤波健剛, 龍神弘明, 森本 敏幸, 五十嵐治人, 柳勝幸, 開発美雪, 前野慧, 和田章: ゴムリングを用いた φ1100 積層ゴムの性能確認試験 (その1) ~ (その4), 日本建築学会大会 (北陸) 学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.219-226, 2010.7
- 3) 熊澤千果生, 高坂隆一, 柳勝幸, 前野慧, 和田明: ゴムリングを用いた φ1300 積層ゴムの性能確認試験 (その1) ~ (その3), 日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.493-498, 2011.7
- 4) 村松佳孝, 西川一郎, 川端一三, 高山正春, 木村雄一: 大サイズ天然ゴム系積層ゴムアイソレータの引張特性, 日本建築学会技術報告集第12号, pp.53-56, 2001.1