

# せん断専用取付ボルトを用いた積層ゴムの 引抜対応浮上がり機構の開発

Tensile Measures System for Laminated Rubber Using Fixing Bolts Carrying Only Lateral Force

鈴木 亨 TORU SUZUKI  
松永健太郎 KENTARO MATSUNAGA  
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 薫田 里実 SATOMI KUNDA  
建築技術部 河井 慶太 KEITA KAWAI  
建築技術部 原田 浩之 HIROYUKI HARADA

免震構造に用いる積層ゴムは、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。筆者らは、引抜力発生時に積層ゴムに過大な引張力を発生させない引抜対応浮上がり機構を開発した。本機構では、浮上がり機構として、引抜対応ボルトとせん断対応ボルトを設けている。せん断対応ボルトの構造性能を把握することを目的とし、FEM 解析およびボルト単体実大試験を実施すると共に、実大積層ゴムを用いた性能確認実験を実施し、その有効性を確認した。

キーワード：免震構造，積層ゴム，引張対策，浮上がり機構，実大試験

Although laminated rubber isolator has a large compressive strength, its tensile strength very small. The authors developed uplift mechanism for tensile force which does not generate an excessive tensile force to the laminated rubber when pullout force occur. In this system, the uplift mechanism is provided bolts without tensile resistance bolts. The FEM analysis, real size bolt tests, and experiments using a full scale laminated rubber were conducted to confirm its effectiveness.

**Key Words:** Seismically Isolated Structure, Laminated Rubber, Tensile Measures Device, Uplift Mechanism, Full Scale Experiment

## 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す等、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が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。

筆者らは、前報<sup>1)</sup>において、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、新たに開発したゴムワッシャ（引抜対応ゴム）の単体試験を行うとともに、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、同機構を用いた実大積層ゴムの引張試験結果について報告した。

本報では、新たに開発した積層ゴムの引抜対応浮上がり機構について、その概要と性能確認試験結果について報告する。

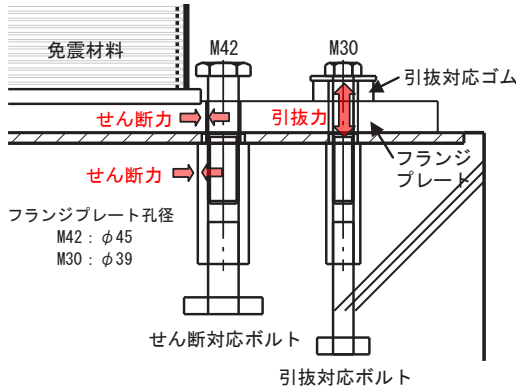


図-1 引抜き対応浮上がり機構の概要

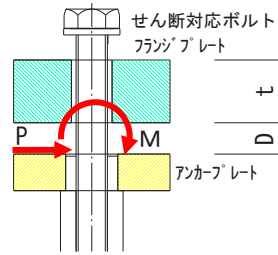


図-2 せん断対応ボルトの応力状態

表-1 FEM解析の解析パラメータと結果

	解析名	フランジプレート厚 t (mm)	浮上り量 D (mm)	せん断力 P (kN)	ボルト脚部曲げモーメント M (kNm)	脚部縁応力 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )		ボルト脚部変形 $\delta 1$ (mm)	フランジプレート下端変形 $\delta 2$ (mm)	ボルト変形 $\delta$ (mm)	加力中心 h (mm)	剛性 P/ $\delta$ K (kN/mm)
						引張側	圧縮側					
FEM① 脚部固定	P4020	40	20	132.6	3.36	645	562	-	-	0.039	5.35	3368
	P6010	60	10	131.5	2.31	563	377	-	-	0.014	7.54	9347
	P6015	60	15	132.6	2.84	588	466	-	-	0.025	6.41	5264
	P6020	60	20	133.0	3.37	647	564	-	-	0.050	5.36	2637
	P8020	80	20	133.0	3.37	647	564	-	-	0.040	5.36	3368
FEM② コンクリート	C5010	50	10	132.7	1.88	392	239	0.197	0.237	0.040	4.19	3318
	C5020	50	20	132.9	3.00	395	336	0.211	0.323	0.112	2.57	1187

※：鋼材：E=2.05×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup> コンクリート：E=2.50×10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup>(ボルト単体実大試験材料試験結果)

## 2. 引抜き対応浮上がり機構の概要

図-1 に引抜き対応浮上がり機構の概要を示す。

浮上がり機構として、引抜き対応ボルト(M30)とせん断対応ボルト(M42)を設ける。引抜き対応ボルトのフランジプレート上部には引抜き対応ゴムを設け、引抜き力発生時に引張力は引抜き対応ゴムを介してコンクリートに伝達される。引抜き対応ゴムの剛性は積層ゴムの引張剛性と比べて十分小さいことから、引張力はこの引抜き対応ゴムの剛性により左右され、免震材料への引張力を低減することができる。引抜き対応ボルトが取り付くフランジプレートの穴径をボルト径より十分に大きくすることによって、装置に働くせん断力は引抜き対応ボルトを介して基礎に伝わらない構造としている。せん断対応ボルトは免震装置が浮上った状態でせん断力をフランジプレートから基礎コンクリートへと伝達する。

引抜き対応ボルトはコンクリートへの定着長さを確保する必要があるものの、引張力が小さいことからボルト径は細く、長さは短い。せん断対応ボルトは太径が必要になるものの、せん断力はダボとして伝達するため、コンクリートへの定着長さが短く、基礎等の鉄筋との干渉が少なくなり施工的に有利となる。

## 3. せん断応力ボルトの性能

引張力発生時にフランジプレートが浮き上がった状態では、せん断対応ボルトは図-2 に示すようにボルト脚部にせん断力(P)と曲げモーメント(M)が発生する。このせん断対応ボルトの構造性能を把握することを目的とし、FEM解析およびボルト単体実大試験を実施した。

### (1) せん断対応ボルトのFEM解析

FEM解析では、ソリッド要素を用いたボルト脚部固定モデルとコンクリート基礎を考慮したモデルを検討した。

解析パラメータは、表-1 に示すようにボルト脚部固定モデル(FEM1)ではフランジプレートの板厚と浮上がり量(D)、コンクリート基礎考慮モデル(FEM2)では浮上がり量とした。せん断力を P=133kN と設定しているのは、実大の積層ゴムが 600mm 変形した際にボルト 1 本当たりにかかる荷重より算出した。

#### a) 脚部固定モデル

図-3 にボルト脚部を固定した FEM 解析のモデル図を示す。せん断対応ボルトは M42 で、ボルト穴径は 45mm である。フランジプレートとせん断対応ボルトのモデル化は図-4 に示すように片側 1.5mm のギャップを考慮した圧縮専用要素を設け、接触面はボルト中心から

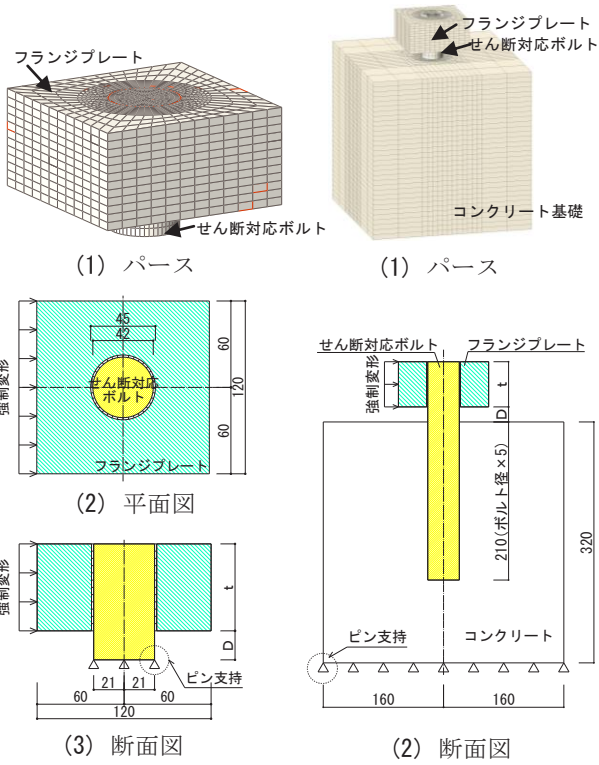


図-3 脚部固定モデル 図-5 コンクリート考慮モデル

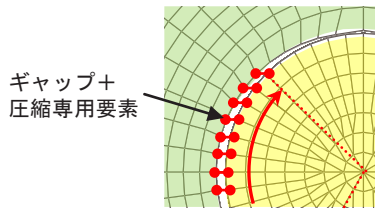


図-4 フランジプレートとボルト取り合い

90度の範囲となるように設定した。

解析結果を表-1 に、結果の一例を図-6 に示す。ボルト脚部の支点反力からボルト脚部の曲げモーメントを算出し、それから逆算した加力中心(h)は、フランジプレート下部から 5.35~7.54mm となり、フランジプレートの浮上り量が大きくなるに従い小さくなる傾向を示した。また、フランジプレートの厚みによる加力中心の違いはほとんどなく、ほぼ 5.36mm で同じであることが分かった。

**b) コンクリート基礎考慮モデル**

図-5 にコンクリート基礎を考慮した FEM 解析のモデル図を示す。フランジプレートとせん断対応ボルトのモデル化は脚部固定モデルと同一とし、ボルトとコンクリートは一体とした。解析結果を表-1 に、結果の一例を図-7 に示す。

表-1 より、コンクリート基礎考慮モデルにおけるボルト脚部の縁応力(引張側)は、脚部固定時の 2/3 程度

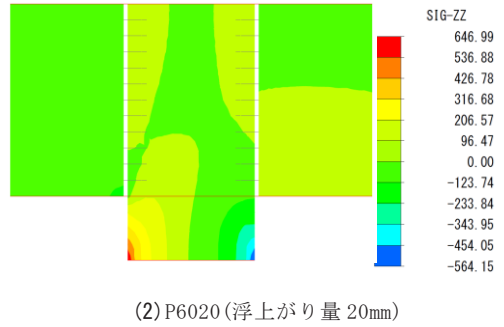
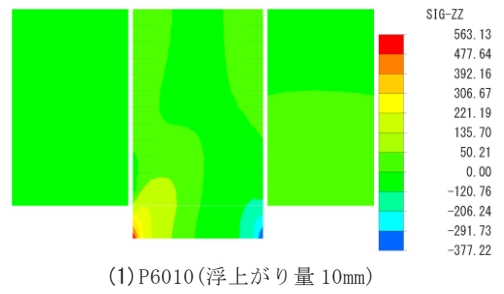


図-6 脚部固定 FEM 解析結果(鉛直応力 N/mm<sup>2</sup>)

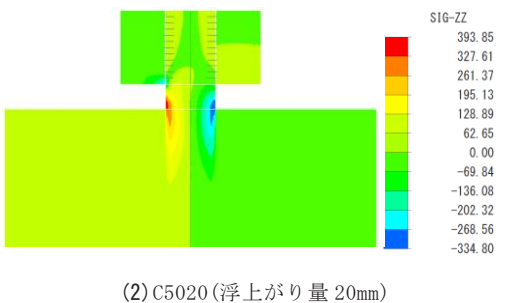
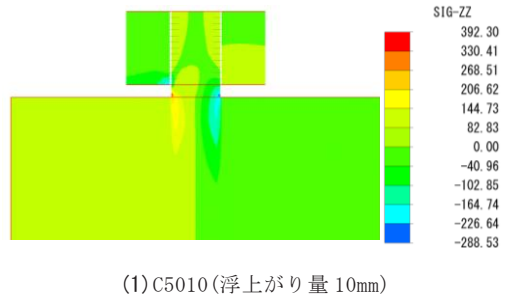


図-7 コンクリート基礎考慮 FEM 解析結果(鉛直応力 N/mm<sup>2</sup>)

であった。また、コンクリート基礎考慮モデルにおけるボルト変形(δ)は脚部固定時の 200%以上となり、コンクリート部での変形が大きいことが分かる。

ボルト脚部の縁応力からボルト脚部の曲げモーメントを算出し、逆算した加力中心は脚部固定時よりもフランジプレート下面に近くなり、2.57~4.19mm となった。

**(2) せん断対応ボルト単体実大試験**

表-2 にせん断対応ボルト単体実大試験一覧と試験結果を、表-3 に試験時のコンクリート材料試験結果を示す。試験パラメータは浮上り量とアンカープレート厚

表-2 せん断対応ボルト単体試験の一覧と試験結果

解析名	フランジプレート厚 t (mm)	浮上り量 D (mm)	アンカープレート厚 t' (mm)	せん断力 P (kN)	回	剛性		ボルト中央曲げモーメント M (kNm)	中央線応力 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )		加力中心 h (mm)				
						K1 (kN/mm)	K2 (kN/mm)		引張側	圧縮側					
ボルト実大試験	0-PL19-1	50	0	19	200	1	105.2	167.1	計測なし						
						2	156.2	362.6							
						3	151.9	360.4							
	0-PL19-2	50	0	19	200	1	115.6	194.4							
						2	177.3	346.6							
						3	171.5	346.3							
	0-PL50	50	0	50	200	1	67.8	146.0							
						2	110.8	350.1							
						3	109.1	361.0							
	10-PL19-1	50	10	19	200	1	98.9	132.0				1.74	193	253	3.71
						2	109.5	259.7				1.81	244	253	4.06
						3	107.6	259.1				1.88	265	251	4.41
10-PL19-2	50	10	19	200	1	84.9	149.2	ゲージ不良							
					2	90.4	252.9								
					3	89.0	256.3								
10-PL50	50	10	50	200	1	79.3	144.5	2.63	383	302	8.14				
					2	97.2	271.6	2.67	389	305	8.34				
					3	93.2	272.6	2.71	395	306	8.55				
20-PL19-1	50	20	19	200	1	83.3	96.9	4.43	644	531	12.15				
					2	77.3	188.0	4.41	640	529	12.03				
					3	77.1	187.6	4.39	638	528	11.94				
20-PL19-2	50	20	19	200	1	58.3	112.1	4.21	611	458	11.02				
					2	74.7	268.6	4.19	609	456	10.94				
					3	75.2	276.4	4.19	609	456	10.94				
20-PL50	50	20	50	200	1	84.9	109.3	4.39	638	522	12.00				
					2	75.7	191.7	4.38	636	523	11.87				
					3	72.7	191.4	4.36	634	520	11.78				
FEM②	C5010	50	10	--	200	1	477.3	--	1.54	172	224	2.69			
	C5020	50	20	--	200	1	350.3	--	3.06	439	305	5.28			

注) 剛性のK1はP=20~40kN時、K2はP=70~170kN時を示す。

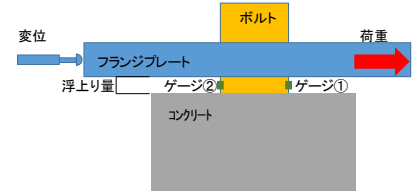


図-8 ボルト単体試験

表-3 コンクリート試験結果

浮上り量 D (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
0	28.2	24800	2.76
10, 20	28.8	25000	2.77

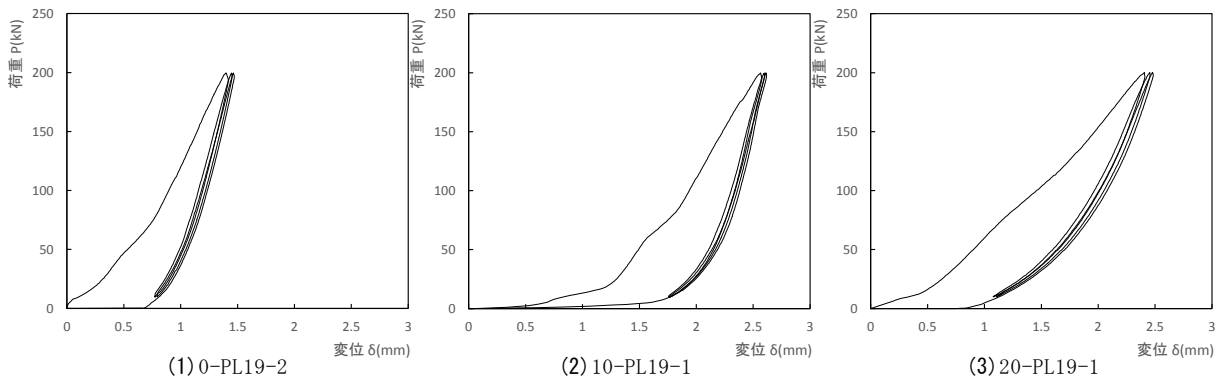


図-9 荷重-変形関係

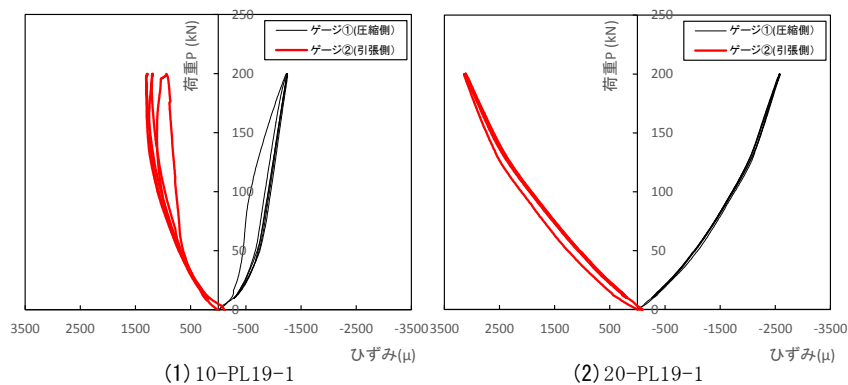


図-10 荷重-ひずみ関係

とし、アンカープレート 19mm は実建物での採用板厚で、50mm はボルト脚部の固定度を高めることを目的とした。

図-8 に単体試験加力状況図を示す。計測項目は、フランジプレートの荷重、変形で、浮上がり量 10mm、

20mm 時はフランジプレート下面から下方向に各々 5mm、10mm の位置でのボルトの圧縮側、引張側ひずみを計測した。加力は P=200kN までを一方方向に 3 回繰り返すものとした。

荷重とフランジプレートの変形関係を図-9 に示す。

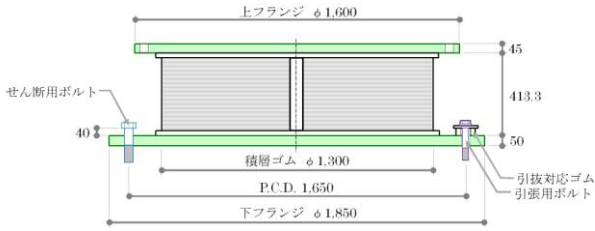


図-11 試験体断面図

表-4 積層ゴムの諸元

ゴム材料	G=0.39 N/mm <sup>2</sup>	
ゴム直径	外径=1300mm, 内径=65mm	
ゴム断面積	1.324 m <sup>2</sup>	
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 <sup>3</sup> kN/m
	水平剛性	2.04×10 <sup>3</sup> kN/m

表-6 試験条件

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 <sup>2</sup> 相当の鉛直荷重を載荷し、既定のせん断ひずみを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 <sup>2</sup> 相当の鉛直荷重を載荷し、荷重振幅±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。

フランジプレートとせん断対応ボルトの間にクリアランスがあるため、1回目の加力ではなだらかな荷重増分となり、1回目の除荷時から2回目、3回目はほぼ同一の履歴を示している。

表-2 に荷重が 20~40kN 時および 70~170kN 時の剛性を示す。1回目の剛性は、2、3回目と比べて小さくなっていた。これは、ボルトのなじみやフランジプレートへの食込み等によるものと考えられる。

荷重とボルトのひずみ関係を図-10 に示す。ひずみは、フランジプレートの食込み等の影響を受けないことから3回ともほぼ同じ挙動を示し、圧縮側と比べて引張側の方が少し大きな値となっている。ひずみゲージ貼付位置での FEM 解析（コンクリート基礎考慮モデル）と比べると 50~75%程度である。ひずみからその位置での曲げモーメントを算出し、逆算した加力中心はフランジプレート下部から 10mm の浮上りでは 3.71~8.55mm、20mm の浮上りでは 10.94~12.15mm で、FEM 解析よりも高くなっていた。

表-5 試験名称と試験方法

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 <sup>2</sup> (19860kN)
②	基本 (鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm <sup>2</sup> ±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	オフセットせん断-引張	+200% (+509.6mm)	0~3.9% (0~10mm)
⑦	オフセットせん断-引張	-200% (-509.6mm)	0~3.9% (0~10mm)
⑧	オフセット引張-せん断	±200% (±509.6mm)	3.9% (10mm)
⑨	基本 (水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm <sup>2</sup> (19860kN)
⑩	基本 (水平剛性)	±200% (±509.6mm)	15N/mm <sup>2</sup> (19860kN)
⑪	基本 (鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm <sup>2</sup> ±30%
⑫	単純引張	0% (0mm)	0~7.8% (0~20mm)
⑬	オフセットせん断-引張	+100% (+254.8mm)	0~7.8% (0~20mm)
⑭	オフセット引張-せん断	±100% (±254.8mm)	7.8% (20mm)
⑮	オフセットせん断-引張	+200% (+509.6mm)	0~7.8% (0~20mm)
⑯	オフセットせん断-引張	-200% (-509.6mm)	0~7.8% (0~20mm)
⑰	オフセット引張-せん断	±200% (±509.6mm)	7.8% (20mm)
⑱	基本 (水平剛性)	±100% (±254.8mm)	15N/mm <sup>2</sup> (19860kN)
⑲	基本 (水平剛性)	±200% (±509.6mm)	15N/mm <sup>2</sup> (19860kN)
⑳	基本 (鉛直剛性)	0% (0mm)	15N/mm <sup>2</sup> ±30%

表-7 測定項目と測定機器

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
鉛直荷重	-	ロードセル	3,500kN
反力盤間変位	D1~D4	接触式変位計	±25mm
積層ゴム鉛直変位	L1, L2	レーザー変位計	±40mm
下フランジ鉛直変位	F1~F8	レーザー変位計	
下フランジ水平相対変位	H1, H2	レーザー変位計	-10~+15mm

#### 4. 実大積層ゴムを用いた性能試験

筆者らの提案する浮上り機構と実大サイズの積層ゴムを組み合わせた場合の構造性能を確認するために性能試験を実施した。

##### (1) 試験計画

図-11 に試験体断面図を、表-4 に積層ゴムの諸元を示す。浮上り機構の構成要素であるせん断対応ボルト (M42) と引抜対応ボルト (M30) は、直径 1,650mm の同一円周状に交互に配置されている (図-13 参照)。

表-5 に各試験の試験名称と試験方法を、表-6 に試験条件を示す。表-5 において、試験 No.に○印の付いた試験は、せん断対応ボルトを低強度 (強度区分 6.8) とした状態でも実施した。また、試験 No.⑲と⑳ は引抜対応ボルトと引抜対応ゴムがない状態でも実施した。

図-12 に試験機の外観図を、表-7 に測定項目および測定機器を、図-13 に測定位置の概略図を示す。

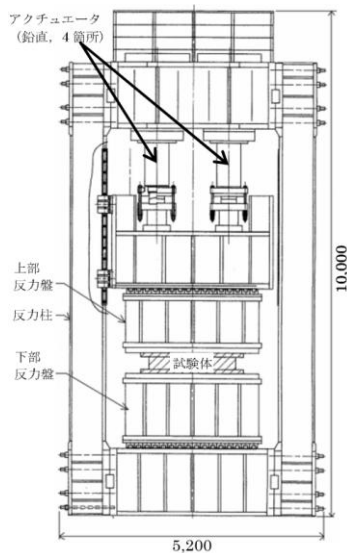


図-12 試験機概観図

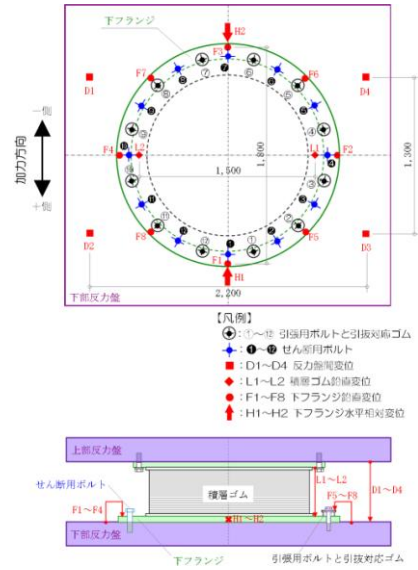


図-13 測定位置

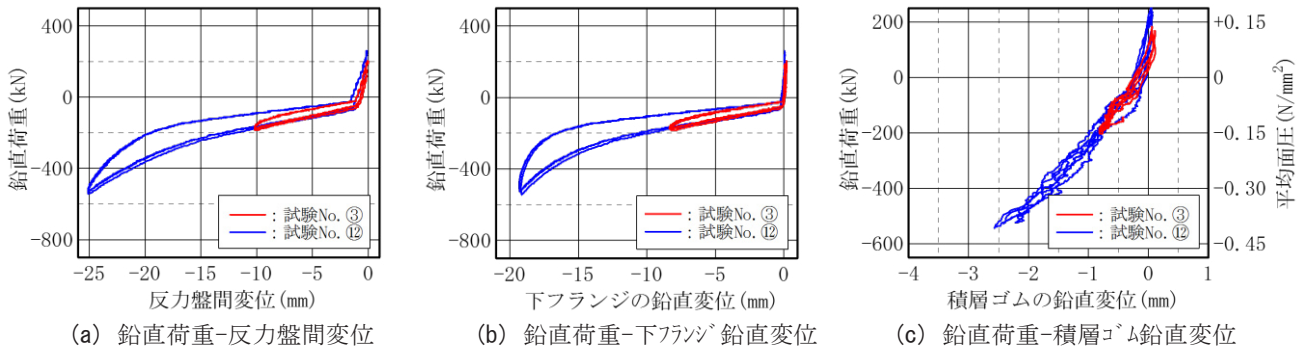


図-14 単純引張試験の結果

(2) 試験結果

a) 単純引張試験

図-14 に単純引張試験結果を示す。ここで、反力盤間変位は上下に広がる方向を、積層ゴムの鉛直変位は積層ゴムが伸びる方向を、下フランジの鉛直変位はフランジが浮き上る方向を負とした。

反力盤間変位が-25mm（下フランジの鉛直変位-19mm）の時の鉛直荷重は-544kN、積層ゴムの平均面圧は-0.41 N/mm<sup>2</sup>であり、積層ゴムの引張限界強度の基準値-1N/mm<sup>2</sup>の40%程度であった。積層ゴムの鉛直変位も最大-2.3mm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。なお、下フランジが完全に浮き上がった後の鉛直剛性は、引抜対応ゴムの単体の鉛直剛性（1.1×103kN/m）<sup>1)</sup>の約12倍であった。

b) オフセットせん断－引張試験

図-15 にオフセットせん断ひずみ+200%

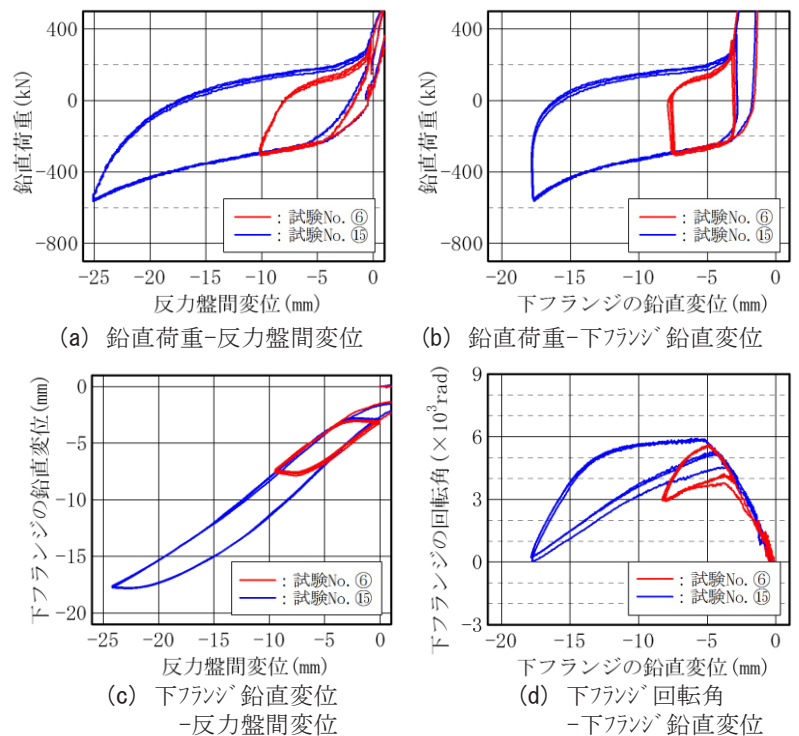


図-15 オフセットせん断－引張試験の結果(1)

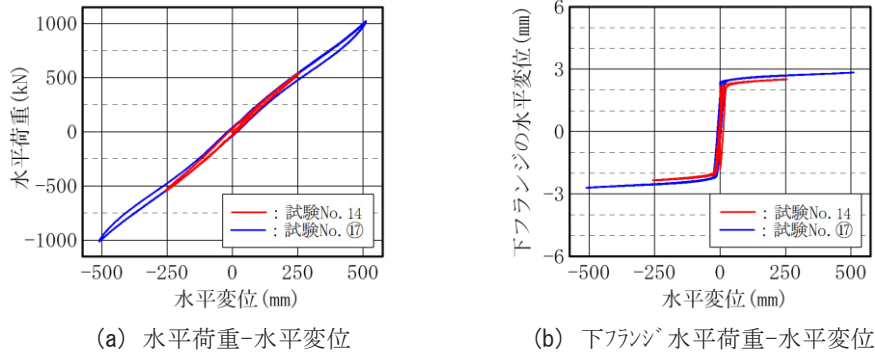


図-16 オフセット引張-せん断試験の結果

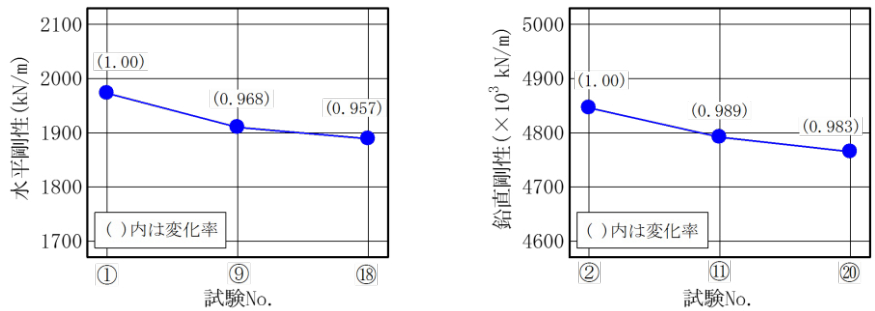


図-17 水平剛性の変化(1)

図-18 鉛直剛性の変化(1)

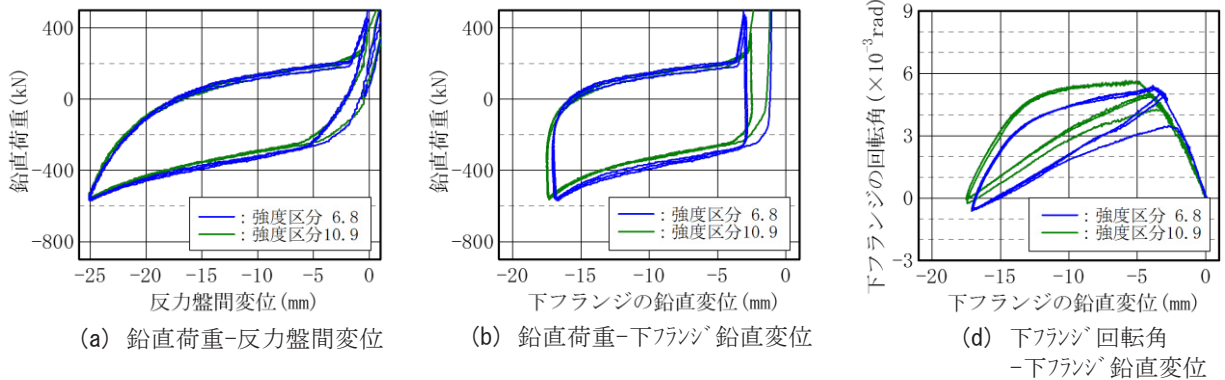


図-19 オフセットせん断-引張試験の結果(2)

(せん断変形+509.6mm) 時の試験結果を示す。

オフセットせん断変形によって、せん断対応ボルトとボルト孔との接触面における摩擦抵抗が増大し、荷重-変位関係の履歴面積は大きくなっているが、反力盤間変位が-25mm 時の鉛直荷重は-564kN、積層ゴムの平均面圧に換算して-0.43N/mm<sup>2</sup>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。下フランジの回転角は、下フランジ全体が浮上る直前の鉛直変位 5mm 程度の時に最大となり、それ以上の鉛直変位がでは徐々に小さくなっている。これは引抜対応ゴムのハードニングに伴う圧縮剛性の変化によるものと考えられる<sup>1)</sup>。なお、今回の試験の範囲では回転角の最大値は 0.006rad. であった。

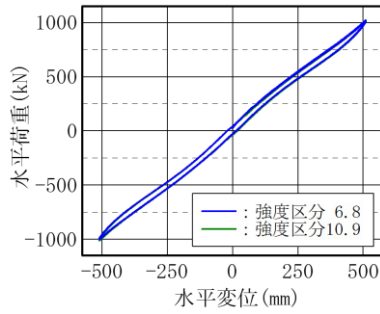
c) オフセット引張-せん断試験

図-16 に反力盤間のオフセット引張変位 25mm 時の試験結果を示す。

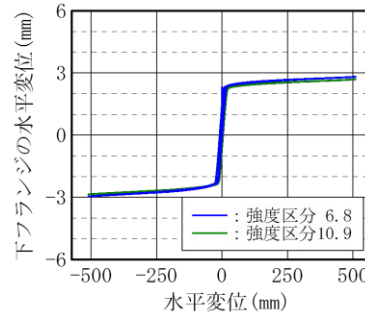
積層ゴムに浮上がりが生じた場合でも荷重-変位関係の線形性は確保されており、水平剛性はせん断ひずみ 100%時で  $2.17 \times 10^3$  kN/m、200%時で  $1.95 \times 10^3$  kN/m であって、表-4 に示した基本性能と良く一致している。下フランジのすべり変位 (P-P 値) は約 4mm であり、ボルト孔のクリアランス 3mm よりも若干大きくなっている。

d) 基本性能試験

図-17、図-18 にそれぞれ各試験前後に実施した基本性能試験における水平および鉛直剛性の変化を示す。剛性の変化は水平方向で-4.3%、鉛直方向で-1.7%と非常に小さかった。



(a) 水平荷重-水平変位



(b) 下フランジ水平荷重-水平変位

図-20 オフセット引張-せん断試験の結果(2)

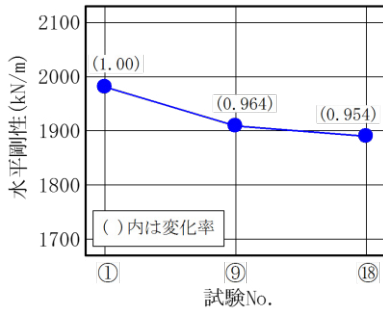


図-21 水平剛性の変化(2)

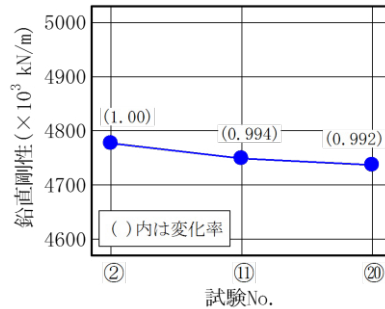


図-22 鉛直剛性の変化(2)

表-8 鉛直荷重・鉛直変位の比較

せん断用ボルト	鉛直荷重	下フランジの鉛直変位
①強度区分 6.8	568 kN	17.3 mm
②強度区分10.9	564 kN	17.7 mm
①/②	1.007	0.976

表-9 剛性変化率の比較

せん断用ボルト	水平方向		鉛直方向	
	中間	最終	中間	最終
強度区分 6.8	0.964	0.954	0.994	0.992
強度区分10.9	0.968	0.957	0.989	0.983

## 5. せん断対応ボルトの健全性と引抜対応ゴムの有効性の検討

### (1) 低強度せん断対応ボルトによるボルト健全性の確認

前章に示した試験機では、直径 1,300mm の積層ゴムのせん断ひずみ 200%を超える大変形引張試験は難しい。大変形時におけるボルトの健全性を確認するために、本来強度区分 10.9 で設計されているせん断対応ボルトを強度区分 6.8 に変更し実大試験を行った。本章ではその結果を報告する。なお、本試験では前試験で使用した積層ゴムを再使用するため、加力方向はこれまでせん断変形を経験していない 90 度方向となるように配慮した。

#### a) オフセットせん断-引張試験

図-19 にオフセットせん断ひずみ+200%時の試験結果を示す。図中には強度区分 10.9 のせん断対応ボルトを用いた時の試験結果も併記している。

ボルト強度の異なる 2 種類の荷重-変位関係に有意な



図-23 試験後のせん断用ボルト

差は認められず、反力盤間変位-25mm の時の鉛直荷重ならびに下フランジの鉛直変位も表-8 に示すようにほぼ一致している。引張変位の増大に伴う下フランジの回転傾向もほぼ同じであり、回転角の最大値も 0.005~0.006rad でほぼ一致している。

#### b) オフセット引張-せん断試験

図-20 に反力盤間のオフセット引張変位 25mm の時の試験結果を示す。図中には強度区分 10.9 のせん断対応



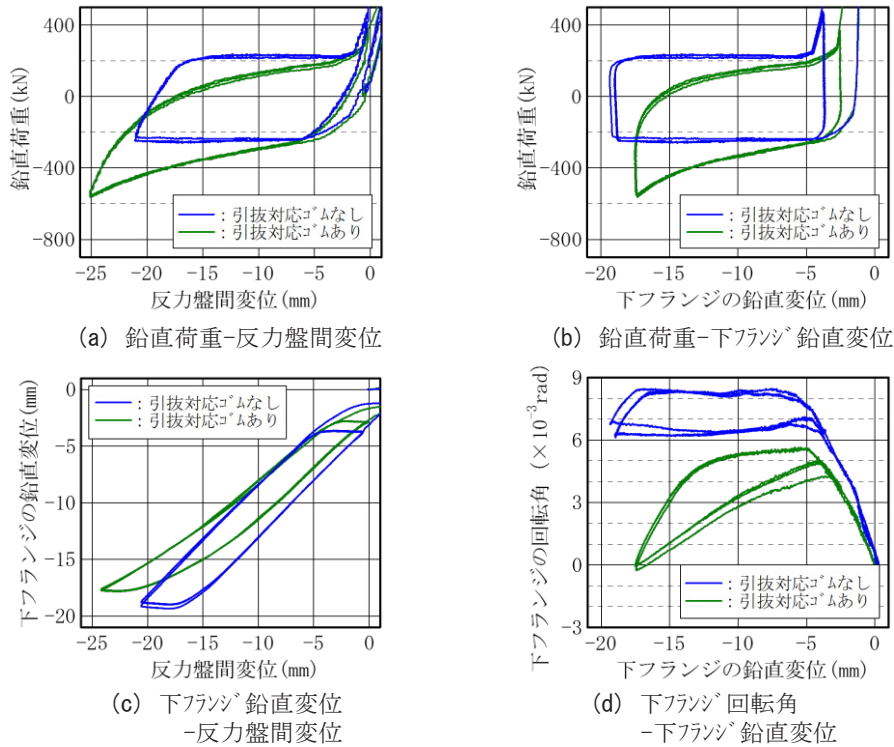


図-24 オフセットせん断-引張試験の結果(3)

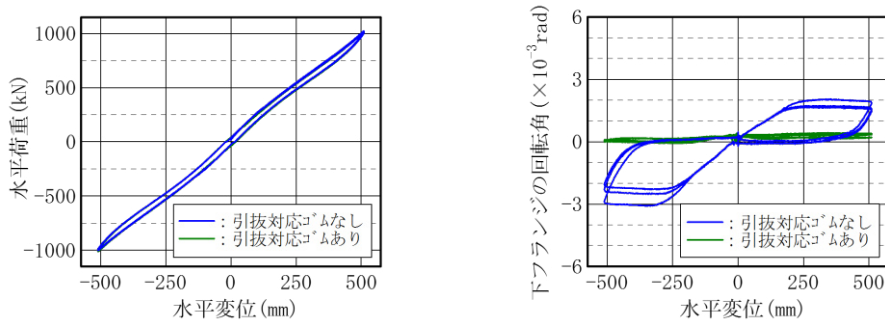


図-25 オフセット引張-せん断試験の結果(3)

ボルトを用いた時の試験結果も併記している。

荷重-変位関係より求めた水平剛性は  $1.95 \times 10^3 \text{ kN/m}$  であり、強度区分 10.9 のボルトを用いた場合とほぼ一致している。下フランジのすべり量、水平荷重によるせん断対応ボルトの変形量もほぼ同じであり、ボルト強度の違いによる影響はほとんど認められない。

c) 基本性能試験

図-21 と 図-22 にそれぞれ試験前後における水平および鉛直剛性の変化を、表-9 に前章で示した強度区分 10.9 のせん断対応ボルトを用いた時の変化率との比較を示す。剛性の変化は水平で-5.6%、鉛直で-0.8%であり、強度区分 10.9 のせん断対応ボルトを用いた場合とほぼ同じであった。

以上 a) ~ c) の結果より、本試験の範囲では、ボルト強度の違いが積層ゴムおよび浮上り機構の構造性能に及ぼす影響は非常に小さいといえる。

図-23 に試験後のせん断対応ボルトの写真を示す。フランジとの接触部にすり傷が見られるものの、曲がり等の致命的な損傷は見あたらなかった。ボルトの基準強度は強度区分 10.9 で  $728 \text{ N/mm}^2$ 、強度区分 6.8 で  $420 \text{ N/mm}^2$  であるため、浮上り機構に強度区分 10.9 のボルトを使用すれば、本試験で作用した水平荷重の 1.7 倍以上の水平荷重が作用しても、せん断対応ボルトの健全性は保たれるものと推察される。

(2) 引抜対応ゴムによる積層ゴムの回転抑制効果の確認

本浮上り機構で使用する引抜対応ゴムには、積層ゴムの浮上り時において過度な回転を抑制する効果が期待される。本項では引抜対応ゴムの回転抑制効果について検証するために実施した、引抜対応ボルト (M30) と引抜対応ゴムがない状態での試験結果について報告す

る。なお、せん断対応ボルト（M42）は前章の試験に使用した強度区分 6.8 のものである。

#### a) オフセットせん断一引張試験

図-24 に試験結果を示す。図中には引抜対応ゴムがある場合の試験結果も併記している。

反力盤間変位-21mm（下フランジの鉛直変位-19.4mm）の時の鉛直荷重は-260kN、積層ゴムの平均面圧に換算して-0.20N/mm<sup>2</sup>であり、引抜対応ゴムがある場合に比べ半分以下に小さくなっている。その結果、反力盤間変位に占める下フランジの鉛直変位の割合が大きくなり、積層ゴムの引張変位が小さくなっている。

下フランジの回転角と鉛直荷重との関係を見ると、下フランジは鉛直荷重がせん断対応ボルトとボルト孔との接触部における摩擦力を上回るまで回転を続けた後、そのままの角度で浮き上がっている。引抜対応ゴムがある場合に見られた、下フランジ全体が浮上がり始めると回転角が徐々に小さくなる現象は見られない。下フランジ全体が浮上がり始める時の鉛直変位も、引抜対応ゴムがある場合に比べ若干大きくなり、その結果、回転角の最大値は 0.0056rad から 0.0085rad に大きくなっている。

オフセットせん断ひずみ+200%時の水平荷重 925kN と鉛直荷重-260kN からせん断対応ボルトの接触部の摩擦係数を求めると 0.28 であった。金属同士のすべり摩擦係数としては小さめの値であると思われる。

#### b) オフセット引張一せん断試験

図-25 に試験結果を示す。図中には引抜対応ゴムがある場合の試験結果も併記している。

荷重一変位関係の線形性は保たれており、水平剛性も  $1.96 \times 10^3$  kN/m で引抜対応ゴムがある場合とほぼ同じである。一方、水平変形に伴う下フランジの回転は引抜対応ゴムがある場合に比べ若干大きくなっており、下フランジの回転抵抗が小さくなったことがわかる。

## 6. まとめ

引抜力発生時に積層ゴムに過大な引張力を発生させない引抜対応浮上がり機構を開発し、せん断対応ボルトの FEM 解析およびボルトの単体試験を実施した結果、以下のことが確認できた。

- ① せん断対応ボルトの脚部は、免震材料の実大試験時は固定となるものの、コンクリート基礎を考慮した方がボルトの曲げ応力は小さくなる。
- ② コンクリート基礎によりボルトの変形は大きくなるものの、免震材料の変形 600mm と比べて 0.2mm 程度なので、免震材料に与える影響はないと判断できる。

- ③ フランジプレートが浮上がった状態では、せん断対応ボルトにせん断力と曲げモーメントが発生するものの、その加力中心はフランジプレートの厚みには影響せず、下端から最大で 10mm 程度と考えられる。

また、同機構を用いた実大サイズの積層ゴムを用いた引張一せん断試験を実施した結果、本浮上がり機構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機構であることが確認できたとともに、せん断対応ボルトの健全性、浮上がり時における引抜対応ゴムの回転抑制効果を確認した。

## 参考文献

- 1) 原田浩之ほか：浮上が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，三井住友建設技術開発センター報告第12号，pp.73～84，2014.10