

引張力を受ける鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性に関する実験

Experimental Study on Ultimate Characteristics of Lead Rubber Bearing under Tensile Force

大塚 久哲*, 栗木茂幸**, 池永雅良***

Hisanori OTSUKA, Shigeyuki KURIKI and Masayoshi IKENAGA

*フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

**九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

***オイレス工業(株) 免制震カンパニー 技術開発部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000番地)

Seismic isolated bridge using Lead Rubber Bearings (LRB) has become popular recently. In spite of tensile reaction force may be caused by the horizontal acceleration during strong earthquake, experimental data concerning ultimate characteristics of the LRB under tensile force are a little. Therefore the ultimate characteristics of LRB under tension (or tension-shear) is investigated by (1) monotonic tensile loading test with offset shear deformation, (2) cyclic tensile and compressive loading test with shear deformation and (3) cyclic shear test under tensile force. From the experimental results, it is understood that LRB shows the high flexibility under complicated loading conditions, and its ultimate characteristics depend on the amount of tensile and shear deformation and its loading experience.

Key Words: Seismic isolation, Lead Rubber Bearing, ultimate characteristics under tension, Failure experiment

1. はじめに

免震構造を重心位置の高い高層建造物や塔状比の大きい建物に適用する場合には、免震層の周期を充分長くして上部構造への地震入力を減らし、軸力を構造物両端に集中させ抵抗転倒モーメントを大きくすることなどにより、積層ゴムに引張反力を生じさせない設計が一般に行われている。しかし、免震構造の形状や入力地震動の大きさによっては、積層ゴムに引張力が作用することが考えられる。これは橋梁構造物においても同様で、地震時には水平震動による慣性力が上部工に橋軸回りの偶力を発生させて、支承部に負反力が生じる可能性がある。さらに、単柱式の張り出し式橋脚では基礎周りに大きく曲げ変形が発生し、それに伴い橋脚の梁には上下動が発生するため、支承部には引張反力が発生することが考えられる。これに加え、兵庫県南部地震のような直下型の大地震時には、水平震動に鉛直震動が同時に励起されるため、支承部には鉛直震動に相当する上揚力が累加されることを考慮しなければならない。このような理由により、積層ゴム支承に引張力が作用することが充分想定され、積層ゴム支承の引張反力の問題は避けておれないものと考えられる。

著者らはこれまでに連続鋼ダブルデッキラーメン高架橋を対象に、解析により基礎的な動的特性を確認するとともに、合理的免震橋梁として橋脚基部免震の有用性に関する研究を進めてきた。その結果、橋脚基部に配置した免震支承の最適特性や本構造形式の構造的・経済的優位性が明らかになりつつある^{1~8)}。これは、3次元骨組

みモデルを用いた時刻歴応答解析を実施したものであるが、その結果、免震支承に引張反力が生じ、その変形の程度は最大鉛直引張りひずみが1.5%生じ、最大せん断ひずみが171.6%になることがわかっている。

阪神高速3号線弁天工区でも既に震災復旧として橋脚基部に積層ゴム支承を配置したシングルデッキラーメン高架橋が採用されている⁹⁾。

本構造の特徴は、アンカー部及び基礎構造を含めてほぼ全ての主要部材が塑性化しない範囲で充分に経済的な断面が設計可能であること、温度変化による反力も免震支承のせん断変形によって吸収されることから主部材に過度な温度応力が作用せず多径間の連続化が可能となることが挙げられる。このように橋脚断面や基礎寸法の縮小、あるいは連続化による支承や伸縮装置の減少によって橋全体としての経済性は向上すると考えられる。これらのような優位性が認められる一方で、橋脚基部に配置した免震支承には引張反力が生じる場合が充分考えられ、これによる免震支承の機能低下及び破壊などの可能性を無視することはできない。^{8), 9)}

このように免震建造物の高層化や多様化に伴い、引張力が作用した場合の積層ゴムの挙動に対する関心が高まっているにも関わらず、積層ゴムの引張荷重状態における限界特性等の研究は圧縮状態における研究と比較して極端に少ない。引張力を受ける積層ゴムの限界特性を明らかにすることは、免震構造の適用範囲を拡大させる上での重要な知見となりうる。

積層ゴムの引張荷重下の挙動については川岡ら^{10), 11)}や

大鳥ら^{12~14)}の実験的な研究があり、引張荷重を経験した後の積層ゴムの基本特性の変化について実大供試体及び縮小供試体を用いた実験により明らかにしている。

さらに、瓜生ら^{15)~17)}は積層ゴムの引張状態における力学的特性、限界せん断歪等の力学特性、変形特性について理論的及び実験的に検討を行っており、積層ゴムの引張状態における設計上の許容限界を提案しているが、鉛プラグ入り積層ゴム(以下、LRB)に関する検討を行ったものは見られない。

坂口ら¹⁸⁾¹⁹⁾は高減衰積層ゴム支承を対象とした、引張荷重下の復元力特性に対して実験的に検討を行っている。

伊澤ら²⁰⁾はLRBに引張力が作用した後の圧縮荷重状態における力学特性に関する実験的検討を行い、LRBは圧縮力が載荷された状態であれば引張力を経験した後も、引張力経験前の特性を示すことを明らかにしている。

そこで本研究は、上記の観点よりLRBを対象として、引張及びせん断荷重下における限界性能および引張荷重が水平方向力学特性に与える影響を実験により把握することを試みた。

2. 実験の概要

2.1 実験供試体

供試体には20×20cmの矩形断面を有する、ゴム一層厚5mm、ゴム層数6、ゴム材質には天然積層ゴム(G=980kPa)のLRBを用いた。表-1に実験供試体の諸元を、図-1に実験供試体の形状を示す。供試体は1次形状係数 $S_1=10.0$ 、2次形状係数 $S_2=5.7$ である。連結鋼板(SS400)は厚さ22mm内部鋼板(SS400)は厚さ3mmで、中心にキープレート挿入用の孔、その周辺に鉛プラグ挿入用の孔を有している。

2.2 実験方法

二軸載荷装置を使用して、単調引張破壊実験およびせん断変形下のける圧縮・引張繰返し載荷による破壊実験の2種類の破壊実験、また引張荷重下での繰返しせん断試験を行った。実験条件を表-2に、実験装置の概要を図-2に示す。載荷状況を写真-1に示す。ここで、せん断ひずみ

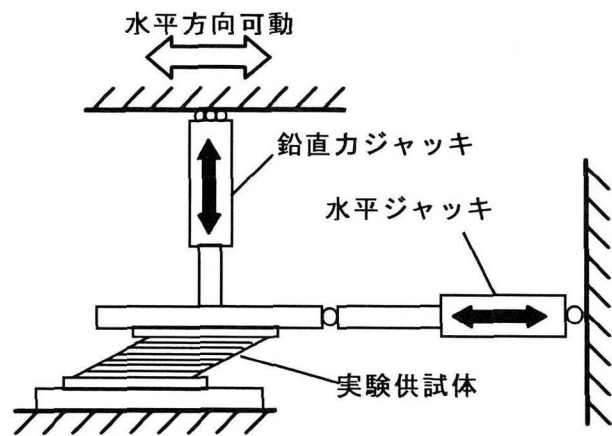


図-2 二軸載荷装置の概要(平面図)

表-1 実験供試体の諸元

項目	設計値	備考
積層ゴム断面積(mm ²)	200×200	
積層ゴム高さ(mm)	45	
鉛プラグ合計断面積(mm ²)	1963.5	φ25×4
ゴム総厚(mm)	5×6	
ゴムせん断弾性係数(kPa)	980	
内部鋼板厚(mm)	3×5	SS400
連結鋼板厚(mm)	22	SS400
1次形状係数	10	
2次形状係数	5.6	

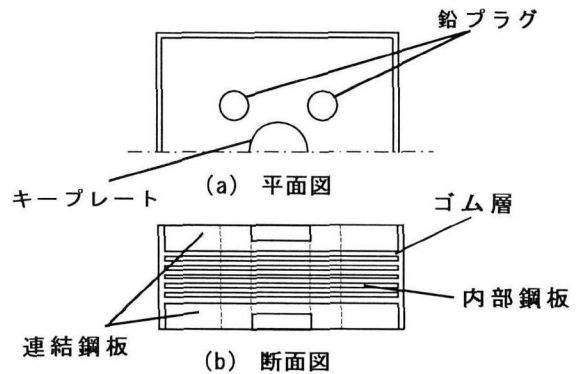


図-1 供試体形状

表-2 実験条件

(a) 単調引張及び圧縮・引張繰返し引張破壊実験

オフセットせん断ひずみ(%)	供試体数	
	単調引張実験	漸増圧縮・引張繰返し実験
0	3	1
250	3	1
350	3	1
450	3	0

(b) 引張・せん断実験(繰返し載荷回数:5回)

鉛直力:kN (平均面圧:MPa)	せん断ひずみ(%)	供試体数
285.4 (-7.84)	±200	1
142.7 (-3.92)		1
0.0 (0.00)		1
71.4 (-1.96)		1

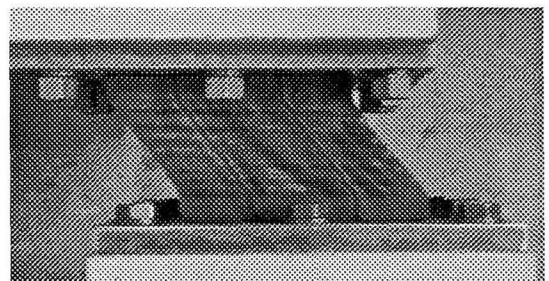


写真-1 載荷状況(γ=250%)

とは供試体の水平変形量を全ゴム層厚で除したものとし、引張ひずみとは供試体の引張変形量を全ゴム層厚で除したものとす。ここで、水平ジャッキは両端部において回転を許容する構造だが、鉛直力ジャッキはその基部において水平方向に移動できるのみである。

単調引張破断実験では 0、250、350 および 450% の 4 種類のオフセットせん断ひずみを与えた状態で、所定の初期圧縮荷重状態（圧縮平均面圧：-7.84MPa。以降、せん断変形の有無・大小に関わらず鉛直荷重を LRB の積層ゴム断面で除したものを平均面圧とし、圧縮平均面圧の符号を－、引張平均面圧の符号を＋とする）から引張平均面圧 1.96MPa まで 5 回の繰返し載荷を実施し、線形領域内の安定を確認した後、破断するまで単調に引張載荷を行った。

漸増繰返し圧縮引張実験では、0、250、350 および 450% のオフセットせん断ひずみを与えた状態で、初期圧縮荷重状態（圧縮平均面圧：-7.84MPa）から最終的に破断に至るまで引張荷重を漸増させる繰返し載荷を行った。

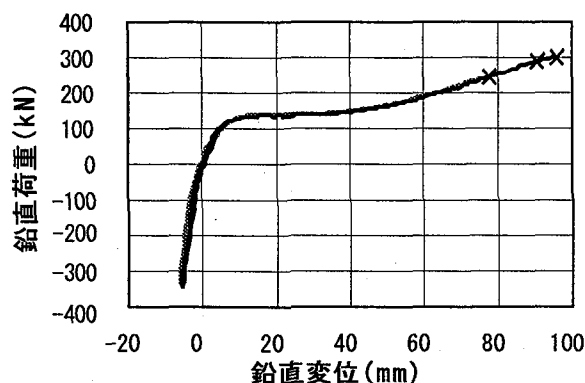
引張・せん断実験では鉛直力一定の状態では、 $\pm 200\%$ のせん断ひずみを生じさせるように繰返しせん断載荷を行い、鉛直力の違いが水平方向の力学特性に与える影響を確認した。

3. 実験結果

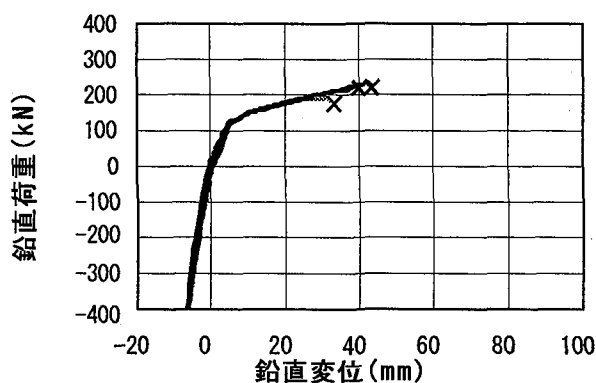
3.1 単調引張実験

実験は圧縮荷重 313.6kN（圧縮平均面圧 -7.84MPa）を与えた状態を初期状態とし、所定のオフセットせん断ひずみまでせん断変形させた後、引張荷重 78.4kN（引張平均面圧 1.96MPa）まで、5 回繰返し載荷を実施する。繰返し載荷時の引張平均面圧を 1.96MPa に設定した理由は、積層ゴムの引張平均面圧が 1.96MPa を超えると急速に引張剛性が低下することが報告されている^{14)~15)}ためである。その後、引張荷重を破断に至るまで載荷した。各オフセットせん断ひずみごと供試体を 3 体ずつ実施し、合計 12 体実施した。ここで、本実験における破断とは、上層と下層が完全に分離したときとする。

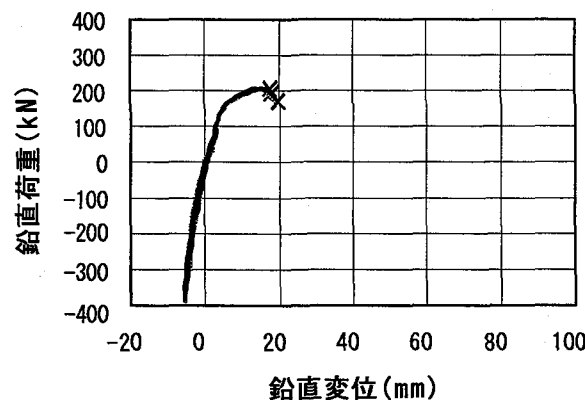
図-3 (a) にオフセットせん断ひずみが 0% の場合の鉛直荷重-鉛直変位関係を示す。圧縮荷重状態より引張荷重 78.4kN（引張平均面圧 1.96MPa）までは、線形的な荷重-変位関係となっており、98.0kN（引張平均面圧 2.45MPa）程度に至るまで安定した載荷曲線となっている。その後、急速に鉛直剛性が低下し始め、鉛直変位 10～35mm 付近では鉛直剛性が初期圧縮鉛直剛性の 1% 程度にまで低下する。さらに、鉛直変位 40mm 付近で再び鉛直剛性が上昇し、破断に至るまでほぼ一定の鉛直剛性を維持する。引張破断荷重は最大で 296.9kN（引張平均面圧 7.84MPa）、最小で 238.1kN



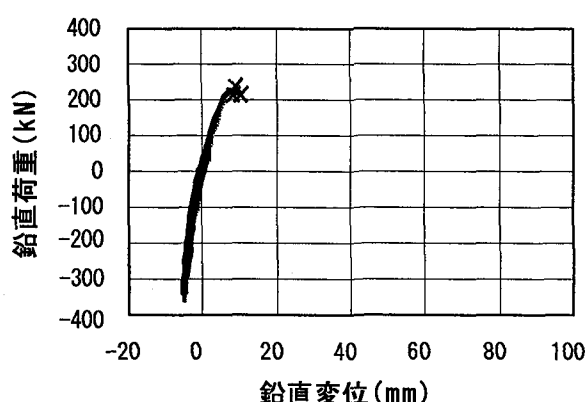
(a) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma = 0\%$)



(b) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma = 250\%$)



(c) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma = 350\%$)



(d) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma = 450\%$)

図-3 単調引張載荷実験結果
(γ : 初期オフセットせん断ひずみ(%))

(引張平均面圧 5.12MPa) となり、引張破断変位は最大で 95.3mm (引張ひずみ 318%)、最小で 76.8mm (引張ひずみ 256%) となった。

図-3(b)にオフセットせん断ひずみが 250% の場合の鉛直荷重-鉛直変位関係を示す。当初の 78.4kN までの繰返し載荷では線形的な荷重-変位関係となっており、圧縮荷重状態より引張荷重 98.0kN (引張平均面圧 2.45MPa) 程度にいたるまで安定した載荷曲線となっている。その後、引張荷重 117.6kN (引張平均面圧 3.23MPa)、鉛直変位 5mm 付近では鉛直剛性が初期圧縮鉛直剛性の 20% 程度にまで低下する。その後は破断に至るまでほぼ一定の鉛直剛性を維持する。引張破断荷重は最大で 213.6kN (引張平均面圧 5.59MPa)、最小で 197.0kN (引張平均面圧 5.10MPa) となり、引張破断変位は最大で 42.8mm (引張ひずみ 143%)、最小で 31.2mm (引張ひずみ 104%) となった。

図-3(c)にオフセットせん断ひずみが 350% の場合の鉛直荷重-鉛直変位関係を示す。圧縮荷重状態より引張荷重 78.4kN (引張平均面圧 1.96MPa) までは、線形的な荷重-変位関係となっており、147.0kN (引張平均面圧 3.92MPa) 程度に至るまで安定した載荷曲線となっているが、急速に鉛直剛性が低下し始め、鉛直変位 5mm 付近では鉛直剛性が初期圧縮鉛直剛性の 25% 程度にまで低下する。その後、鉛直変位 15mm 付近まで鉛直荷重は上昇し、破断に至るまでほぼ一定の鉛直剛性を維持する。破断荷重は最大で 200.9kN (引張平均面圧 5.19MPa)、最小で 197.0kN (引張平均面圧 5.19MPa) となり、破断変位は最大で 16.2mm (引張ひずみ 54%)、最小で 13.7mm (引張ひずみ 45.7%) となった。

図-3(d)にオフセットせん断ひずみが 450% の場合の鉛直荷重-鉛直変位関係を示す。これまでと同様に、圧縮荷重状態より引張荷重 78.4kN (引張平均面圧 1.96MPa) までは、線形的な荷重-変位関係となっている。また、圧縮荷重状態より引張荷重 196.0kN (引張平均面圧 4.90MPa) 程度に至るまで安定した載荷曲線となっている。その後、徐々に鉛直剛性が低下し始め、鉛直変位 5mm 付近では鉛直剛性が初期圧縮鉛直剛性の 50% 程度にまで低下する。その後、鉛直変位が 10mm に至る前に全供試体が破断した。破断荷重は最大で 225.89kN (引張平均面圧 5.94MPa)、最小で 225.60kN (引張平均面圧 5.93MPa) となり、破断変位は最大で 9.7mm (引張ひずみ 32.3%)、最小で 8.0mm (引張ひずみ 26.7%) となった。

図-4に各オフセットせん断ひずみにおいて引張変形量が最大のケースの鉛直荷重-鉛直変位関係を比較した。全体を比較すると、圧縮荷重状態より引張荷重 78.4kN (引張平均面圧 1.96MPa) までは、線形的な荷重-変位関係となることがわかった。また、オフセットせん断ひずみの大きさによらず、引張荷重 98kN (引張平均面圧 2.45MPa) 程度までは大幅な鉛直剛性の低下及び非線形化は見られず、挙動は安定している。

引張荷重 98kN (引張平均面圧 2.45MPa) を超えると、鉛直剛性の低下が生じ始めるが、オフセットせん断ひずみが小さい供試体ほど剛性低下は顕著であり、オフセットせん断ひずみが 0% の供試体では初期引張剛性に比較して 2% 程度まで引張剛性が低下することがある。一方、オフセット

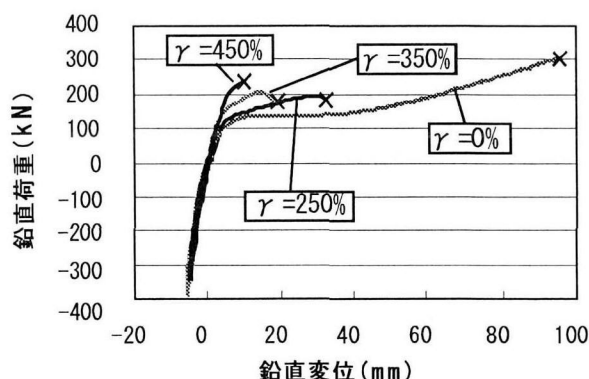


図-4 各オフセットひずみごとの鉛直荷重-鉛直変位関係の比較

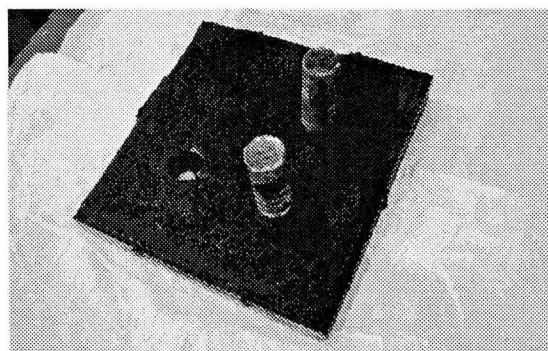


写真-2 単調引張載荷 ($\gamma=0\%$) による L R B の破断面

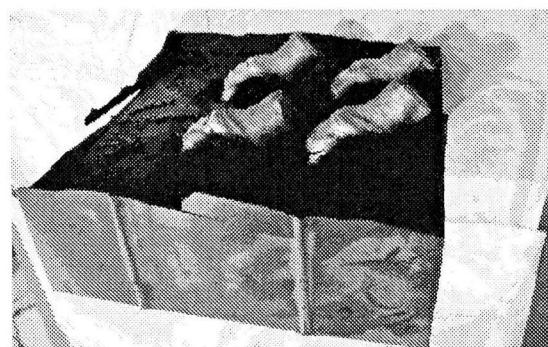


写真-3 単調引張載荷 ($\gamma=250\%$) による L R B の破断面

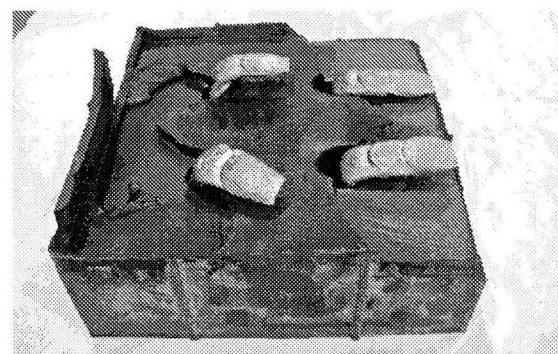


写真-4 単調引張載荷 ($\gamma=350\%$) による L R B の破断面

せん断ひずみが450%の供試体は引張荷重196.0kN(引張平均面圧4.90MPa)程度までほとんど鉛直剛性の低下は生じない、オフセットせん断ひずみが大きいほど鉛直剛性は低下しにくい傾向があるといえる。

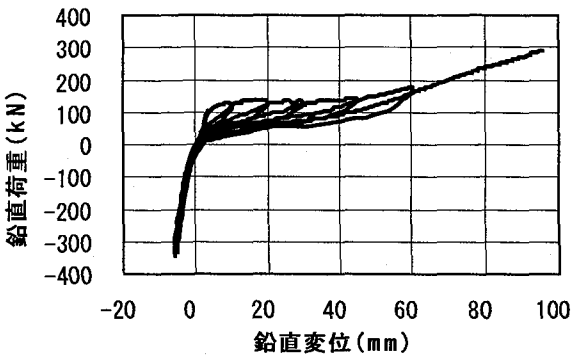
引張荷重に対する変形能力については、オフセットせん断ひずみが大きいほど低いことがわかった。通常使用される状態($\gamma=250\%$ 以下)では、鉛直荷重により破断に至るまで少なくとも鉛直ひずみ100%までを許容できる変形能力を有することがわかった。

各オフセットせん断ひずみごとに3体の供試体を用いて破壊実験を行ったが、供試体による力学特性の違いは見られなかったが、破断荷重及び破断変位に関しては、ばらつきが見られ、オフセットせん断ひずみが小さいほどこの傾向は顕著になる。また、全ての供試体において、その破壊形態は非常に脆性的であり、最大荷重後に急激に耐力が失われた。

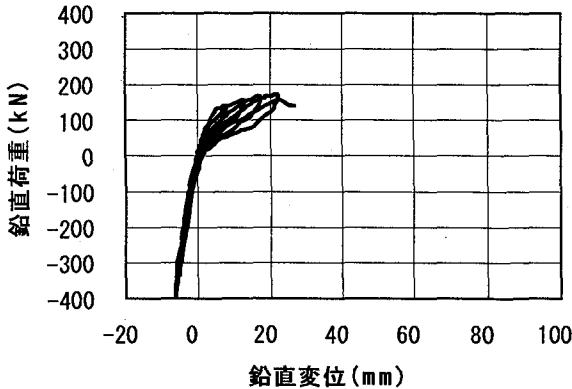
写真-2～4に今回の実験で使用した供試体の破断面の状況を示す。全ての供試体で、積層ゴムの最も連結鋼板に近いゴム層から破壊が生じている。オフセットせん断ひずみが0%の場合は、鉛プラグにはほとんど損傷らしきものは確認できず、単に抜け出したのみであった。しかし、オフセットせん断ひずみが増加するにつれて鉛プラグの損傷も確認できるが、鉛プラグが積層ゴム支承の破壊に対して抵抗した形跡は見られなかった。

3.2 圧縮・引張繰返し実験

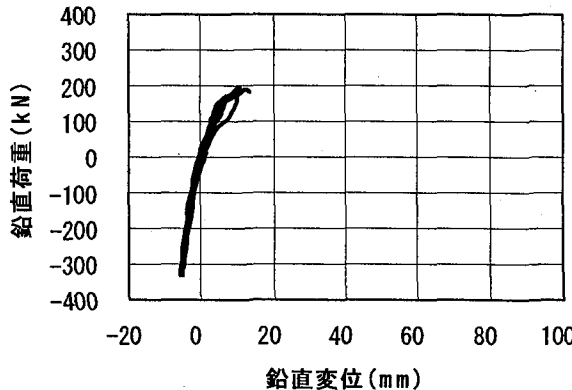
図-5 (a)にオフセットせん断ひずみが0%の場合の圧縮・引張繰返し載荷実験結果を示す。引張方向の骨格曲線は図-3 (a)に示す単調引張実験の結果を再現する結果となっている。引張領域における除荷曲線は引張荷重に対して線形的な挙動を維持できる範囲を超えると、原点指向型の曲線を描きつつも、途中に反曲点のある曲線となる。これは、引張荷重による鉛直変位が増加するにつれて顕著になっていく。また、引張領域における再載荷曲線は引張載荷が繰り返されるほど剛性低下の程度が大きくなる。鉛直荷重が引張から圧縮に変化する際に、若干の残留変位のようなものが認められる。これは剛性低下の程度と共に徐々に大きくなる傾向にあるが、非常に小さいものであり、今回の実



(a) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma=0\%$)



(b) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma=250\%$)



(c) 鉛直荷重 - 鉛直変位関係 ($\gamma=350\%$)

図-5 圧縮・引張繰返し載荷実験結果
(γ :初期オフセットせん断ひずみ(%))

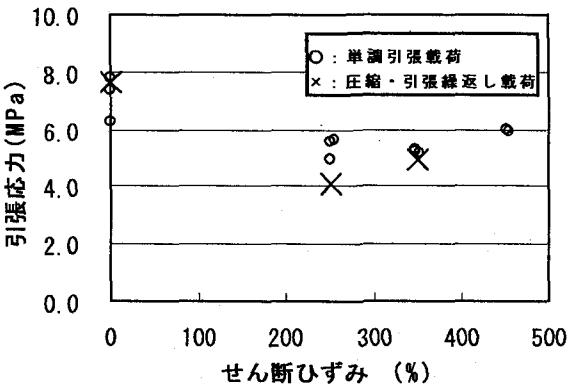


図-6 引張応力 - せん断ひずみ関係
(供試体破断時)

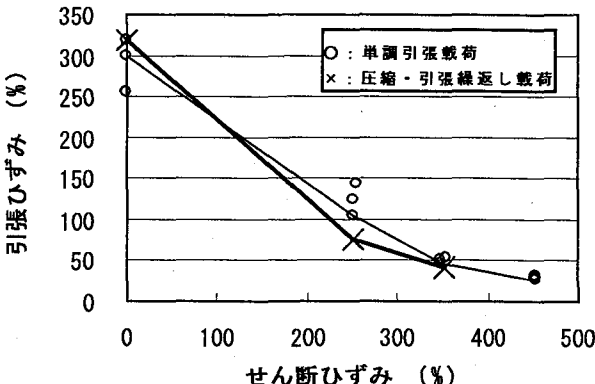


図-7 引張ひずみ - せん断ひずみ関係
(供試体破断時)

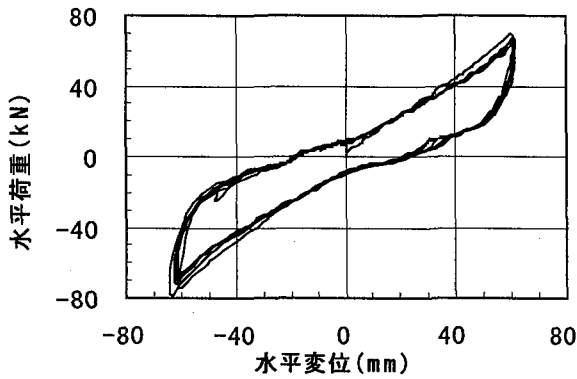


図-8 水平荷重 - 水平変位関係
(圧縮平均面圧 -7.84MPa)

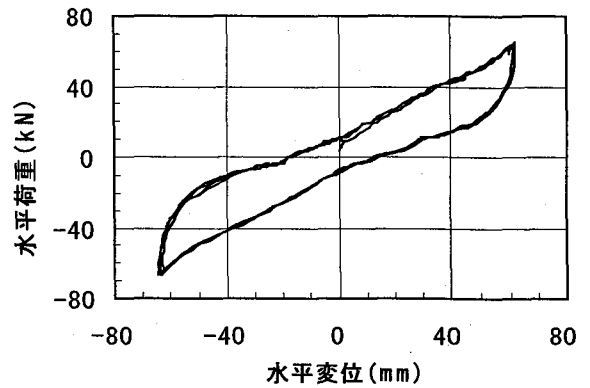


図-9 水平荷重 - 水平変位関係
(圧縮平均面圧 -3.92MPa)

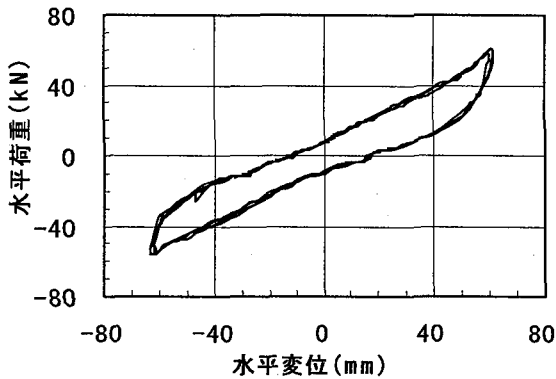


図-10 水平荷重 - 水平変位関係
(圧縮平均面圧 0.0MPa)

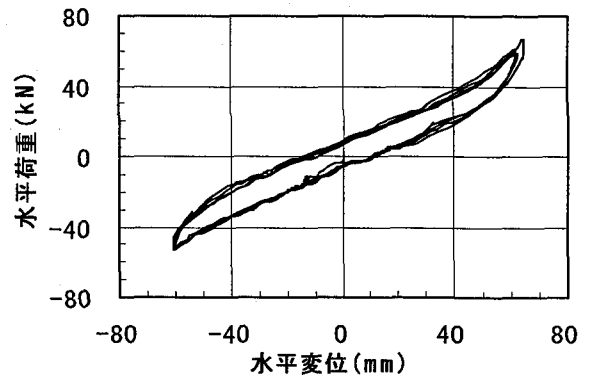


図-11 水平荷重 - 水平変位関係
(引張平均面圧 1.96MPa)

験では最大でも2.5mmであった。また、非常に大きな鉛直方向の変形を経験しても、荷重が圧縮領域に至るならば、その荷重-変位関係はほぼ線形と見なせる。引張破断荷重は291.1kN(引張平均面圧7.64MPa)、引張破断変位は最大で95.6mm(引張ひずみ319%)となった。

図-5(b)にオフセットせん断ひずみが250%の場合、図-5(c)にオフセットせん断ひずみが350%の場合の圧縮・引張繰返し載荷実験結果を示す。これも、引張方向の骨格曲線は図-3に示す単調引張実験の結果を再現する結果となっている。履歴復元力特性の定性的傾向については、基本的にオフセットせん断ひずみ0%の実験結果とほぼ同じであった。オフセットせん断ひずみが250%の場合の引張破断荷重は153.9kN(引張平均面圧4.12MPa)、引張破断変位は最大で22.7mm(引張ひずみ76%)となった。オフセットせん断ひずみが350%の場合の引張破断荷重は188.2kN(引張平均面圧4.93MPa)、引張破断変位は最大で12.3mm(引張ひずみ41%)となった。

図-6に供試体破断時の引張応力ひずみ-せん断ひずみ関係を、図-7に供試体破断時の引張ひずみ-せん断ひずみ関係を示す。単調引張載荷実験の結果と圧縮・引張繰返し載荷実験の結果を比較すると、オフセットせん断ひずみが0%の場合は、圧縮・引張繰返し載荷による引張変形能力の低下が見られないが、しかし、オフセットせん断ひずみが250%の場合は、単調載荷実験において最も低い引張応力の78%に、引張ひずみは75%程度に低下した。オフセットせん断ひずみ350%の場合は、繰返し引張載荷の載荷回数

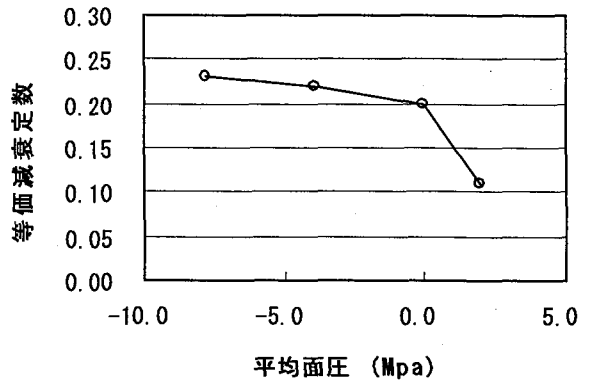


図-12 面圧と等価減衰定数の関係

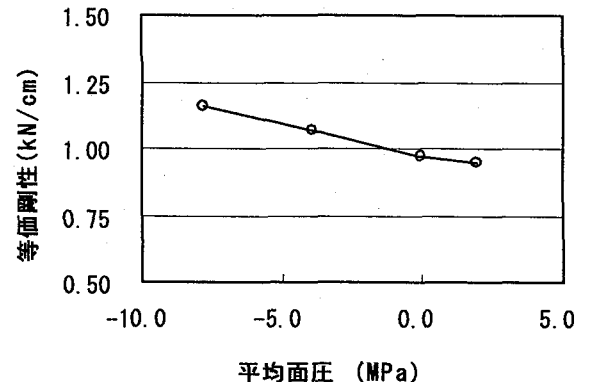


図-13 平均面圧と等価剛性の関係

が小さいうちに破断してしまったため、今回の実験では顕著な破断荷重の低下は確認できなかった。

せん断変形下においては、引張もしくはせん断変形によって生じたゴム層内部の損傷が、せん断荷重を作用させたままの引張・圧縮繰返し荷重によって拡大しつづけるためと考えられる。

3.3 引張荷重下におけるせん断実験

図-8～11にそれぞれの平均面圧下での水平荷重-水平変位関係を示す。履歴ループの形状にあまり大きな変化は見られないが、圧縮平均面圧が小さくなるにつれて履歴ループが細くなり、履歴減衰能力が低下しているのがわかる。鉛プラグ入り積層ゴム支承は鉛プラグが免震支承としての減衰能力を負担するわけであるが、通常は圧縮荷重作用下において使用が想定されている。今回、実験したような、低圧縮荷重もしくは引張荷重作用下では、鉛プラグをゴム層によって充分拘束できなくなることによって、履歴減衰能力の低下が起きるのではないと思われる。

図-12に平均面圧と等価減衰定数の関係を示す。全般的な傾向としては、圧縮平均面圧が低下するにつれて、等価減衰定数も減少する傾向にある。圧縮平均面圧が0～77.84MPaの場合では、等価減衰定数の減少は緩やか(23～20%)であるが、引張平均面圧が1.96MPaの場合は11%となり、引張荷重領域では等価減衰定数が急速に低下する。

図-13に平均面圧と等価剛性の関係を示す。これによると、圧縮面圧が高いほど等価剛性が高いことがわかる。圧縮平均面圧が低下するにつれて、等価剛性も低下するが、値の違いはあまり大きくなく、平均面圧の違いが等価剛性に及ぼす影響は等価減衰定数に与える影響よりも小さいといえる。

4. 実験のまとめ

本研究は、鉛プラグ入り積層ゴム支承を対象として、引張及びせん断荷重下における限界性能および引張荷重がLRBの水平方向力学特性に与える影響を実験により把握することを試みた。

本研究で得られた成果を要約すると、以下のとおりである。

4.1 単調引張実験

(1) 単調な引張荷重に対しては、初期オフセットせん断ひずみの大きさによらず、引張荷重98kN(引張平均面圧2.45MPa)程度までは大幅な鉛直剛性の低下及び非線形化は見られず、挙動は安定している。

(2) 引張荷重98kN(引張平均面圧2.45MPa)を超えると、鉛直剛性の低下が生じ始めるが、オフセットせん断ひずみが小さい供試体ほど剛性低下は顕著であり、オフセットせん断ひずみが0%の供試体では初期引張剛性に比較して2%程度まで引張剛性が低下する。一方、オフセットせん断ひずみが450%の供試体は引張荷重196kN(引張平均面圧4.90MPa)程度までほとんど鉛直剛性の低下は生じない、つまりオフセットせん断ひずみが大きいほど鉛直剛性は低下

しにくいといえる。

(3) 引張荷重に対する変形能力については、オフセットせん断ひずみが大きいほど低いことがわかった。通常使用される状態($\gamma=250\%$ 以下)では、鉛直荷重により破断に至るまで少なくとも鉛直ひずみ100%までを許容できる変形能力を有することがわかった。

(4) 各オフセットせん断ひずみごとに3体の供試体を用いて破壊実験を行ったが、供試体による力学特性の違いは見られなかったが、破断荷重及び破断変位に関しては、ばらつきが見られ、オフセットせん断ひずみが小さいほどこの傾向は顕著であった。

4.2 圧縮・引張繰返し実験

(1) 鉛プラグ入り積層ゴムの鉛直方向履歴復元力特性のうち、引張領域における載荷曲線は単調引張実験から得られたとほぼ同様の結果が得られた。また、引張領域除荷曲線は反曲点のある曲線となりつつも原点を指向する傾向がある。さらに、再載荷曲線は最大経験変位及び最大経験荷重を指向する傾向がある。

(2) 鉛プラグ入り積層ゴムの鉛直方向履歴復元力特性のうち、圧縮荷重領域における荷重-変形関係は線形と見なしうる。

(3) 圧縮・引張繰返し載荷を受けたにも関わらず、オフセットせん断ひずみ0%の場合は、単調引張載荷と比較して破断点は特に低下していなかった。しかし、オフセットせん断ひずみ250%の場合は、繰返し引張載荷により徐々に剛性低下し、最終的に破断荷重も低下している。オフセットせん断ひずみ350%の場合は、繰返し引張載荷の載荷回数が小さいうちに破断してしまったため、今回の実験ではあまり破断荷重の低下は確認できなかった。

4.3 引張荷重下におけるせん断実験

(1) 水平方向履歴復元力特性は引張荷重に強く影響されることがわかった。圧縮平均面圧7.84MPa載荷時と比較すると、引張平均面圧1.96MPa載荷時では鉛プラグの履歴減衰効果はほとんど見られなくなる。

(2) 圧縮平均面圧が低下するにつれて、等価減衰定数も減少する傾向にある。圧縮平均面圧が0～77.84MPaの場合では、等価減衰定数の減少は緩やか(23～20%)であるが、引張平均面圧が1.96MPaの場合は11%となり、引張荷重領域では等価減衰定数が急速に低下する。

(3) 圧縮面圧が高いほど等価剛性が高い傾向がある。圧縮平均面圧が低下するにつれて、等価剛性も低下するが、値の違いは大きくなく、平均面圧の違いが等価剛性に及ぼす影響は、等価減衰定数に比較すると小さいといえる。

5. 基部免震ダブルデッキ高架橋における免震支承の安全性について

著者らはこれまでに連続鋼ダブルデッキラーメン高架橋を対象に、合理的免震橋梁としての橋脚基部免震の有用性に関する研究を進めてきた。その結果、大地震時には免震支承に引張反力が生じてしまう場合があることを確認している⁹⁾。この場合、最大引張鉛直ひずみが1.5%

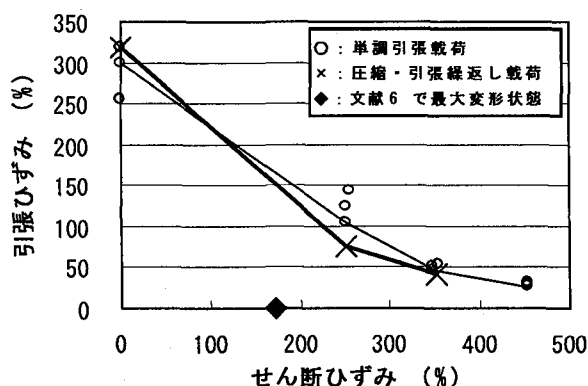


図-14 引張りひずみ-せん断ひずみ関係

最大せん断ひずみが171.6%となる、両者はほぼ同時に生じているため、最大の変形状態であるといえる。これを、今回の実験によって得られた破断限界特性にプロットしたものを図-14に示す。せん断ひずみ及び引張りひずみとも十分に安全な範囲内にある。つまり、引張荷重が生じたとしても、直ちにLRBが破断に至ったり、機能低下に至ることはないことがわかる。

今回の実験によって、LRBの引張及びせん断荷重による破断限界ひずみについて明らかにすることができ、安定した力学的挙動が確保できる使用限界についても、有用な知見が得られたと考えられる。

ここで得られた結果が、免震構造の適用範囲の拡大の一助となれば幸いである。

謝辞

本実験の計画、準備において株式会社オイレス工業の伊関治郎氏及び川原壮一郎氏には多大な御協力を賜り、さらに実験供試体をご提供いただきました。また、九州大学大学院助手の矢暮亘氏及び同技官山崎智彦氏には、本実験の実施にあたり多大な協力を得ることができました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) J.Park, H.Otsuka, A.Komiya and Y.Suzuki: Dynamic Characteristics of Isolated of Bridges Considering Different Location of Seismic Isolation, Journal of Structure Engineering, JSCE, Vol.44A, pp.743 ~ 751, 1998.3
- 2) 大塚久哲, 栗木茂幸, 朴 禎根, 鈴木泰之, 土田貴之: 鋼製ダブルデッキラーメン高架橋の免震化に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 869 ~ 878, 1999. 3
- 3) H.Otsuka, S.Kuriki, J.Park Y.Suzuki and T.Tsuchida: Study on the Seismic Isolation of High elevated Rigid Frame Bridge with Double Deck, Earthquake Resistant Engineering Structure, Vol.4, pp.207 ~ 216, 1999.7
- 4) 栗木茂幸, 大塚久哲, 鈴木泰之, 土田貴之: 免震化した11径間連続鋼ダブルデッキラーメン橋の地震応答解析, 土木学会第54回年次学術講演会, pp. 16 ~ 17, 1999. 9
- 5) 栗木茂幸, 大塚久哲, 鈴木泰之, 土田貴之: 多径間連続ダブルデッキラーメン橋の免震化に関する検討, 第25

回地震工学研究発表会, pp.773 ~ 776, 1999. 7

- 6) 大塚久哲, 栗木茂幸, 鈴木泰之, 土田貴之: 多径間連続ダブルデッキ鋼ラーメン高架橋の免震化に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 899 ~ 906, 2000. 3
- 7) 林 秀侃, 川北司郎: 阪神高速3号線弁天工区の復旧事例, 橋梁と基礎, Vol. 30, No. 8, pp. 48 ~ 56, 1996. 8
- 8) 道路橋示法書, V耐震設計編, 日本道路協会, 1996. 12
- 9) R. I. Skinner, W. H. Robinson and G. H. McVerry (川島一彦, 北川良和監訳): 免震設計入門, 鹿島出版会, 1996. 11
- 10) 川岡千里, 富島誠司, 井上哲士朗, 久野雅祥, 平山浩史, 西川一郎, 村松佳孝: 天然ゴム系積層ゴムアイソレータの引張特性について (その2 実大積層ゴムの引張試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp557 ~ 558, 1998. 9
- 11) 村松佳孝, 富島誠司, 井上哲士朗, 久野雅祥, 平山浩史, 川岡千里, 西川一郎: 天然ゴム系積層ゴムアイソレータの引張特性について (その3 $\phi 100$ 積層ゴム縮小体試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp559 ~ 560, 1998. 9
- 12) 安井健治, 矢花修一, 大鳥靖樹, 平田和太, 松田泰治: 積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討 (その2 試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp633 ~ 634, 1996. 9
- 13) 矢花修一, 大鳥靖樹, 平田和太, 安井健治, 松田泰治: 積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討 (その1 線形限界の定義と試験方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp631 ~ 632, 1996. 9
- 14) 大鳥靖樹: 積層ゴム免震要素の引張許容応力設定に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp535 ~ 536, 1997. 9
- 15) 瓜生 満, 西川孝夫: 免震用積層ゴムの剛性, 変形及び限界特性に関する研究 (鉛直方向の特性), 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp31 ~ 37, 1995. 11
- 16) 瓜生 満, 西川孝夫: 免震用積層ゴムの剛性, 変形及び限界特性に関する研究 (せん断変形下における水平及び鉛直方向特性について), 日本建築学会構造系論文集, 第479号, pp119 ~ 128, 1996. 1
- 17) 瓜生 満, 西川孝夫: 免震用積層ゴムの引張状態における力学特性, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp2759 ~ 2764, 1998
- 18) 坂口達, 山田親文, 菊池優, 北村佳久, 林章二: 引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に関する研究 (その1 試験概要, 引張・圧縮せん断試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp549 ~ 550, 1998. 9
- 19) 林章二, 菊池優, 北村佳久, 山田親文, 坂口達: 引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に関する研究 (その2 試験概要, 引張・圧縮試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp549 ~ 550, 1998. 9
- 20) 伊澤清治, 池永雅良, 安居功二, 長谷川 治, 大西良弘: 引張力・せん断力同時載荷によるLRBの特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp537 ~ 538, 1997. 9

(2001年9月14日受付)