

引張軸応力下における積層ゴム支承のせん断変形性能に関する実験的検討

Effect of tensile axial loading on shear deformation capacity of a laminated rubber bearing

庄司学*, 齊藤啓**, 亀田敏弘***

Gaku Shoji, Kei Saito, and Toshihiro Kameda

*博(工), 筑波大学講師, 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

**筑波大学大学院, 理工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

***Ph.D., 筑波大学講師, 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

Effect of tensile axial loading on shear deformation capacity of a laminated rubber bearing is clarified. Cyclic loading tests are conducted to evaluate the relation between lateral force and lateral displacement of specimens under seismic and worn conditions. The strain measurement scheme based on image analysis is used to obtain the local strain field of specimens. The localized strain field under tensile axial loading is observed more remarkably at the edge of the specimen. It is also pointed out that the seismic performance of specimens under tensile and compressive axial loading is degraded severely after 300 cycles shear deformation

Key Words: seismic design, laminated rubber bearing, shear deformation, tensile axial loading

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降, 新設橋梁の建設や既設橋梁の耐震補強を行う際には免震構造や地震時水平力分散式構造が積極的に採用されている。免震橋梁の場合には免震支承を設置することによって構造系の長周期化と減衰性能の向上を図ることが可能となり, また, 地震時水平力分散式橋梁の場合には反力分散型支承によって上部構造から下部構造に伝達される地震力を下部構造間で平滑化することができる。この際, これらの橋梁においては支承として積層ゴム支承を用いることが一般的である。これは, 積層ゴム支承に上部構造の死荷重による圧縮軸応力や活荷重による応力振幅が作用した状態においても, 積層ゴム支承が地震時において要求されるせん断変形性能を比較的安定して保持し得るためである¹⁾。

一方, 近年, 車の走行性や騒音・振動の防止, あるいは地震時における落橋防止の観点から, 橋梁の多径間連続化が図られるようになってきている。また, 山岳部に建設される橋梁においては支持する橋脚が高橋脚や不等橋脚となる場合が多数生じている。このような橋梁では, 地震時において支承には軸力変動に伴う負反力が生じ, 支承が引張軸応力状態となる可能性が指摘されている²⁾。さらには, 機能分離型橋梁のように上部構造からの死荷重や活荷重に対応する機構と地震時に求められるせん断変形機構を分離する構造形式が提案されてきており³⁾, このような新

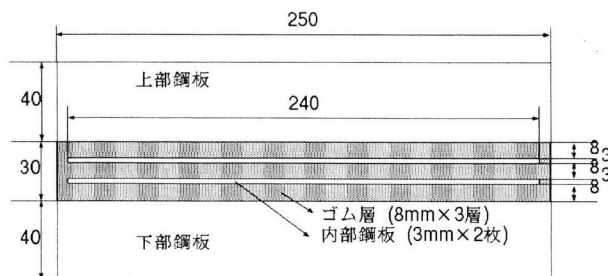
しい橋梁構造形式においては積層ゴム支承に作用する軸応力が圧縮軸応力を前提としないケースもあり得る。

積層ゴム支承が上部構造の死荷重相当の圧縮軸応力や活荷重に伴う応力振幅を受けた状態におけるせん断変形性能に関しては, Gent and Meineche⁴⁾, Kelly⁵⁾による弾性論に基づいた理論的検討や家村ら⁶⁾, Mori et al.⁷⁾による実験的検討がある。最近では阿部ら⁸⁾によって積層ゴム支承の構成則の構築に向けた研究が進められており, また, 松田ら⁹⁾によって積層ゴム支承の復元力特性だけでなく, 積層ゴム支承に生じる局所的な応力場やひずみ場の実体がFEM解析を通して明らかにされつつある。しかし, 引張軸応力下における積層ゴム支承のせん断変形性能に関しては, 建築・土木分野を問わず, 数例の検討例^{10), 11)}を除いてほとんど検討されていないのが現状であり, また, これらの検討例においても積層ゴム支承に生じる局所的な応力場やひずみ場に関して実証的なデータが得られているわけではない。

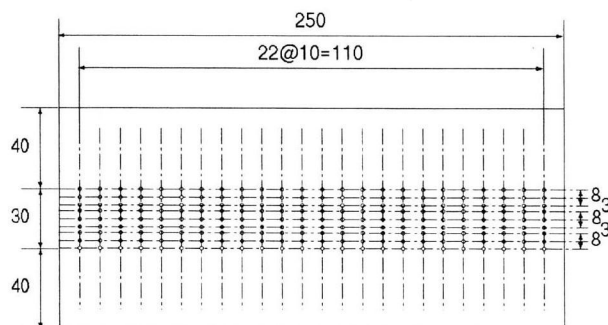
以上を踏まえ, 本研究では橋梁の耐震補強に用いられる積層ゴム支承を対象として繰り返し載荷実験を行うことにより, 引張軸応力下における積層ゴム支承のせん断変形性能を明らかにすることとした。せん断変形性能をはかる指標としては, 積層ゴム支承のマクロ的な力学的特性を表す水平力-水平変位の履歴曲線だけでなく, せん断変形時に積層ゴム支承に生じるひずみ場を画像解析によって求め, 検討することとした。なお, 繰り返し載荷実験では,

表一 実験供試体の概要

ゴムの種類	天然ゴム
静的せん断弾性係数 G	1.2MPa
支圧面積	□250[mm]
有効支圧面積 A_{eq}	□240[mm]
ゴム層（総厚 Σt_e ）	8[mm]×3[層]
内部鋼板	3[mm]×2[枚]
上下部連結鋼板	40[mm]×2[枚]
実験供試体高さ	110[mm]



図一 実験供試体（単位はmm）



図二 画像解析のための標点（単位はmm）

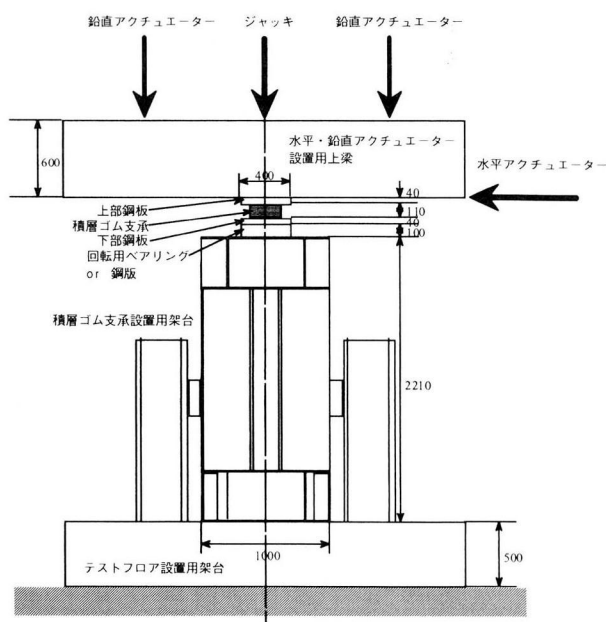
積層ゴム支承に一定の軸応力を作用させた状態で、地震時に求められるせん断変形を想定してせん断変形を漸増するケースと、温度変化やクリープによる常時のせん断変形を想定して一定のせん断変形を300回繰り返すケースの2通りを実施した。

2. 繰り返し載荷実験ならびに画像解析の概要

2.1 実験供試体と実験装置

実験供試体の概要を表一及び図一に示す。供試体は8mm×3層の天然ゴム層と3mm×2枚の内部鋼板（SS400）で構成されている。天然ゴムの静的せん断弾性係数 G は1.2MPaである。

供試体の被覆ゴムの表面には、後述するひずみ場の同定に必要な各変形状態における変位を測定するために、図二に示す207点（9行×23列）の標点をマークした。積層ゴム支承は鉛直剛性を高めるためにゴム層と鋼板の互層となっており、上下方向の両端部には上部鋼板及び下部鋼板が取り付けられている。このため、積層ゴム支承が圧縮、



図三 載荷方法（単位はmm）

引張、曲げなどの荷重による作用を受け、ゴム層が鋼板間の外側にはらみ出したり、内側に窪もうとしてもゴム層の変形が鋼板により拘束されるため、積層ゴム支承の自由端隅角部において局所的な応力が集中することとなる。このような応力集中は積層ゴム支承のゴム層あるいはゴム層－鋼板間における破断を誘発する要因となる。破断した積層ゴム支承に対して解剖試験を行い、破断の進行過程を検討した例など^{12), 13)}を参考にすると、被覆ゴムの破断が起点となり、内部に破断が進展する様子が観察される場合が多い。従って、積層ゴム支承の被覆ゴムに生じるひずみ場が積層ゴム支承の破壊形態を推し量る有用な指標となるため、ここでは供試体のせん断変形性能をはかる1つの指標として被覆ゴムに生じるひずみ場を同定することとした。

また、標点の最小メッシュサイズに関してはゴム層に対して縦4mm×横10mm、内部鋼板層に対して縦3mm×横10mmと定めたが、これらは本実験において使用するアクチュエータの載荷周波数（載荷速度）とデジタルビデオの有効画素数（25万画素）の双方の精度に基づいて定めたものである。なお、本実験においては、標点の最小メッシュサイズ並びにデジタルビデオの有効画素数の制約のため、載荷周波数を0.005Hz～0.01Hzとして載荷を行った。

図三には載荷装置の概要を示す。供試体を架台の上に設置した上で、供試体の上面には桁を模擬した梁（以下、上梁と呼ぶ）を設置した。2本の鉛直アクチュエータと水平アクチュエータのスイベルエンドを上梁に取り付け、2本の鉛直アクチュエータで圧縮力、引張力などの一定の軸力を荷重制御で保持し、水平アクチュエータでせん断変形を変位制御で与えた。なお、水平アクチュエータの載荷軸は供試体の上面、すなわち上梁下面とした。

2.2 実験ケース

実験ケースを表二に示す。ここでは、次式で定義した

表-2 実験ケース

実験ケース	载荷方法 (軸応力+せん断変形)
ケース1	一定圧縮(-6MPa)+せん断変形漸増
ケース2	軸応力ゼロ+せん断変形漸増
ケース3	一定引張(2MPa)+せん断変形漸増
ケース4	一定引張(1MPa)+せん断変形漸増
ケース5-1	一定圧縮(-6MPa)+一定せん断変形
ケース5-2	一定圧縮(-6MPa)+せん断変形漸増
ケース6-1	一定引張(2MPa)+一定せん断変形
ケース6-2	一定引張(2MPa)+せん断変形漸増
ケース7-1	一定引張(1MPa)+一定せん断変形
ケース7-2	一定引張(1MPa)+せん断変形漸増

せん断ひずみ γ (以下, 100%換算表示) を供試体に与えるせん断変形(水平変位)の指標として用いることとする。

$$\gamma = x / \sum t_e \quad (1)$$

ここで, x は供試体に作用させるせん断変形, $\sum t_e$ はゴム層の総厚(表-1 参照, 8mm×3層)である。また, 以下では圧縮軸応力をマイナス, 引張軸応力をプラスでそれぞれ表すこととする。

ケース1~4では, -6MPaの圧縮軸応力, 軸応力ゼロ, 2MPa及び1MPaの引張軸応力を作用させた状態で, 50% (=12mm), 75% (=18mm), 100% (=24mm), 125% (=30mm), 150% (=36mm), 200% (=48mm), 250% (=60mm)のせん断変形を順に载荷と除荷を3回ずつ繰り返しながら与えた。これらのせん断ひずみ γ 並びに繰り返し回数としては, 前述したように地震時において積層ゴム支承に求められるせん断変形を想定し, 定めたものである。これらの実験ケースによって, 圧縮, ゼロ, 引張の異なる軸応力を供試体に作用させた場合のせん断変形性能の相違を明らかにする。

ケース5-1~7-1では, -6MPaの圧縮軸応力, 2MPa及び1MPaの引張軸応力を作用させた状態で, 90% (=21.6mm)のせん断変形を300回作用させた。これらの実験ケースでは温度変化やクリープによる常時の状態におけるせん断変形を想定したものである。90%のせん断変形を与えた理由としては, 道路橋支承便覧¹⁴⁾において常時の許容せん断ひずみを70%と規定していることを踏まえ, 温度変化やクリープによるせん断変形を最大90%程度と仮定したためである。また, 300回の繰り返し回数は, 耐震補強後の積層ゴム支承の供用期間を50年と想定し, 50年間の供用期間に90%のせん断変形が累積する回数として算出した。

ケース5-2~7-2では, ケース5-1~7-1の終了後に

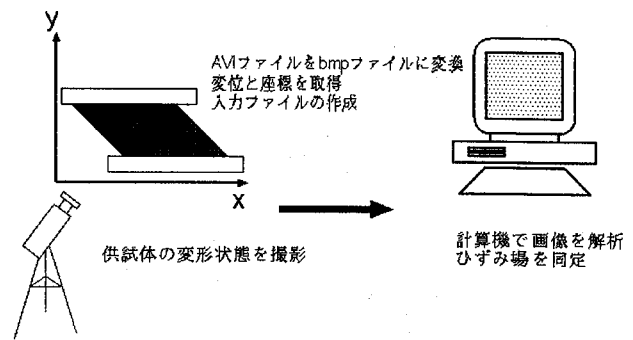


図-4 画像解析の流れ

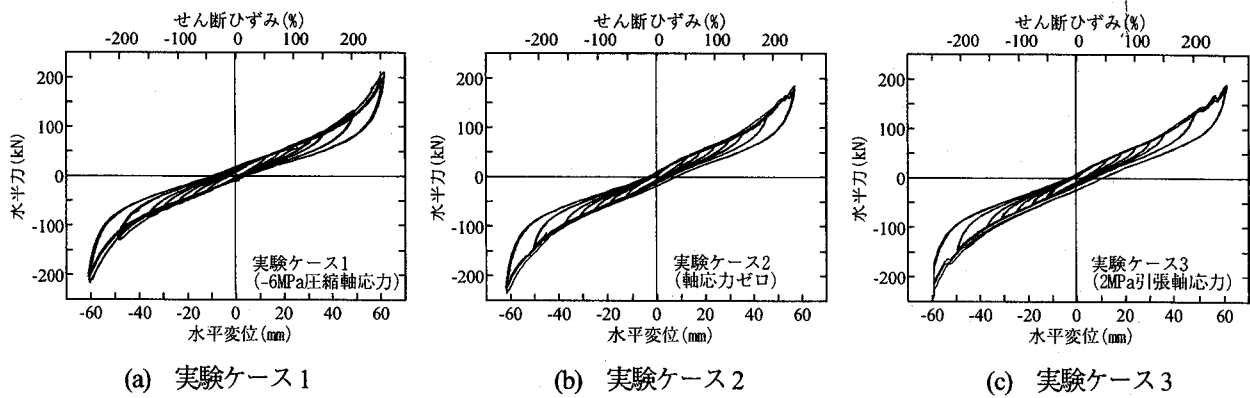
同一の供試体に対してケース1, ケース3, ケース4と同様の载荷を行った。これらの実験ケースでは, ケース5-1~7-1において温度変化やクリープを想定したせん断変形を作用させた供試体に, 地震時に求められるせん断変形を同じく作用させ, ケース1, ケース3, ケース4と比較して温度変化やクリープによる一定の繰り返しせん断変形による影響を明らかにするものである。

2.3 画像解析

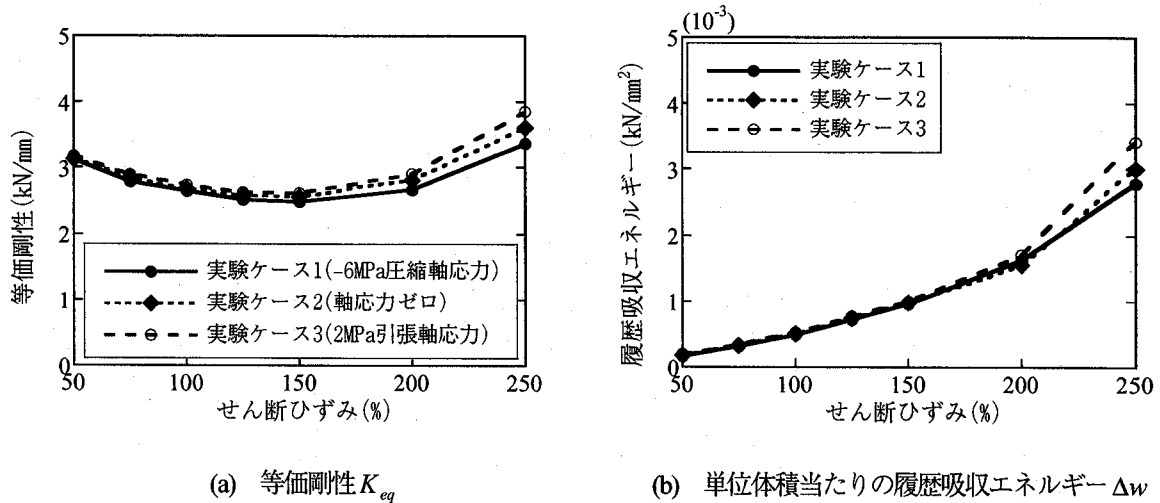
画像解析の概要を図-4に示す。第1に, 実験中に供試体の変形状態をデジタルビデオで撮影し, 撮影したデジタルデータをAVIファイルに出力する。これをAVI操作ソフトウェアConvertLBによりbitmap型の連番ファイルに出力し, 画像解析ソフトウェアMove-tr32/2Dを用いて, 供試体にマークした標点の x 方向ならびに y 方向の座標と変位を取得する。次に, 供試体にマークした標点に対して4点要素の格子として形状関数を定め, 得られた座標と変位をもとに各標点におけるひずみ場 ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , γ_{xy} を算出する。

なお, 供試体表面に貼付された標点の最小メッシュサイズ(図-2参照)並びにデジタルビデオの有効画素数の制約より, 画像解析により得られる標点の座標値の有効数字はmm単位にして小数点以下1桁である。従って, これらに基づいて求められるひずみ場の精度としては小数点以下2桁程度である。以下, 実験結果を考察する際にはこの点に注意して記述してある。

さらに, 図-4に示すように供試体がマイナス x 方向にせん断変形した場合について求められた結果であるため, せん断ひずみ γ_{xy} はいずれも負の値となっている。また, 実験ケースの中には供試体のせん断変形が大きくなるに従ってゴムの伸張が大きくなり, ひずみ場の算出に不可欠な標点が剥離するケースが見られた。これらのケースについては画像解析の結果の精度が保証できないため, 以下の考察においては全て省いてある。



図一5 実験ケース1～3における水平力-水平変位関係



図一6 実験ケース1～3における等価剛性 K_{eq} 及び単位体積当たりの履歴吸収エネルギー Δw の比較

3. 引張軸応力下におけるせん断変形性能

3.1 圧縮および引張軸応力の相違による影響

実験ケース1～3より得られた水平力-水平変位の履歴曲線を図一5に示す。また、各せん断ひずみ γ において等価剛性 K_{eq} 及び単位体積当たりの履歴吸収エネルギー Δw を求めると図一6のようになる。ここでは K_{eq} 及び Δw は次式により求めた。

$$K_{eq} = \frac{P_{x_{max}}}{x_{max}} \quad (2)$$

$$\Delta w = \frac{1}{A_{eq} \sum t_e} \oint P(x) dx \quad (3)$$

ここで、 x_{max} は3回目の載荷時における最大水平変位、 $P_{x_{max}}$ は x_{max} のときに作用する水平力であり、また、 A_{eq} は有効支圧面積(表一参照、240mm×240mm)、 $P(x)$ は水平変位 x における水平力である。

図一5及び図一6によれば、実験ケース1～3の間では履歴曲線の特徴や単位体積当たりの等価剛性 K_{eq} 、履歴吸収

エネルギー Δw のいずれも大きな相違は見られない。ただし、2MPaの引張軸応力を作用させた実験ケース3では他のケースと比較して、せん断ひずみ γ が150%以上になると、 Δw が1.13～1.17倍程度、 K_{eq} が1.09～1.15倍程度大きくなっている。すなわち、引張軸応力作用下においては、せん断ひずみ γ が150%程度を越えるようになると、内部履歴がわずかに膨らんでくるか、あるいはハードニングが助長する可能性がある。

実験ケース1及び3において供試体の被覆ゴムに生じたひずみ場を示すと図一7、図一8のようになる。いずれのケースにおいてもせん断ひずみ γ が75%と150%の場合をそれぞれ示している。なお、紙面の都合から、図一7(a)に示したひずみ場 ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 、 γ_{xy} の凡例の値をそのまま図一7(a)以降に示すひずみ場に対しても適用することとする。前述した図一6によれば圧縮および引張軸応力の相違による影響はせん断ひずみ γ が概ね150%以上となる場合に生じているため、図一7、図一8に基づくひずみ場に対する考察も γ が150%の場合に対して行う。

ϵ_{xx} に関しては、圧縮軸応力を作用させたケース1(図一7(b) i) 参照)では-0.03～-0.02のひずみが領域全体に

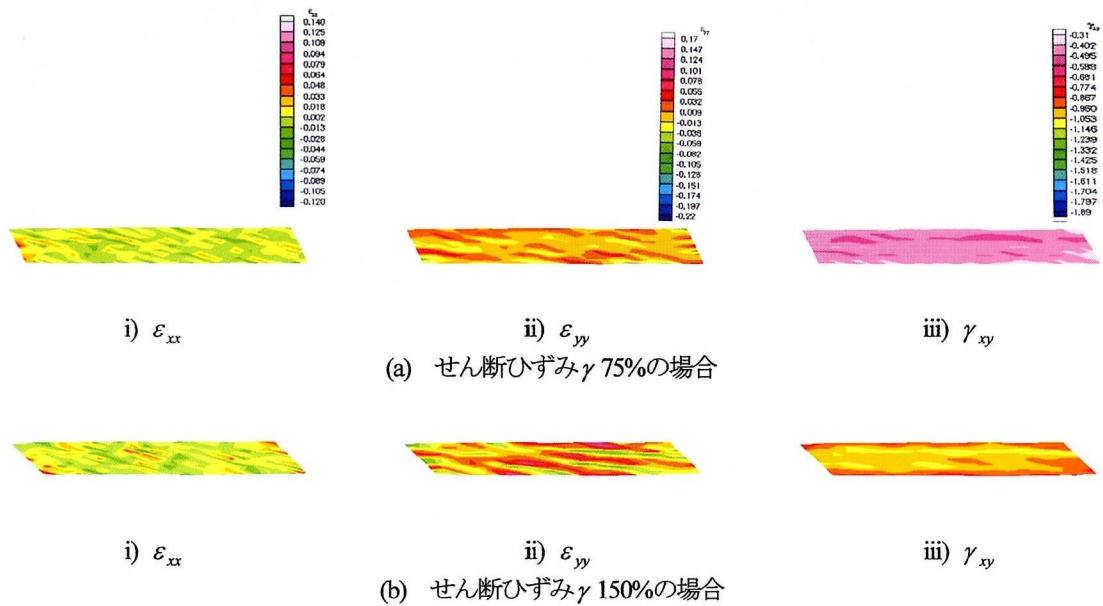


図-7 実験ケース1において供試体に生じるひずみ場

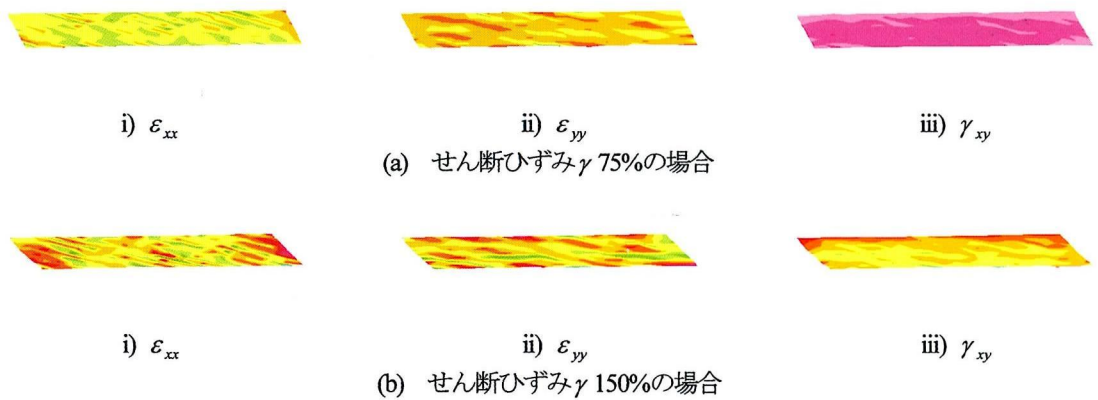


図-8 実験ケース3において供試体に生じるひずみ場

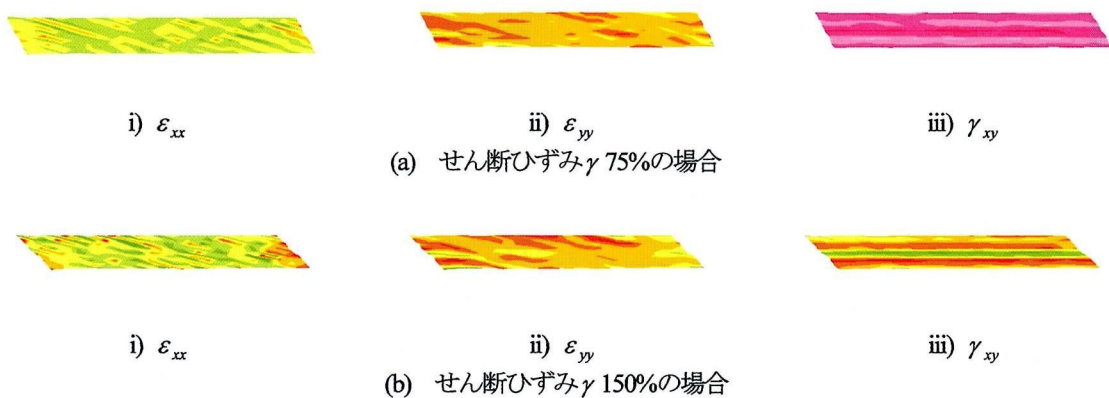
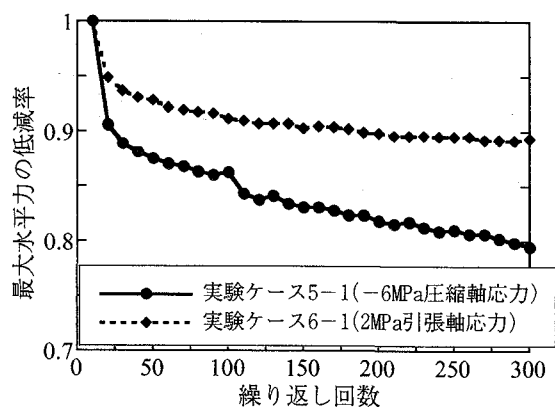
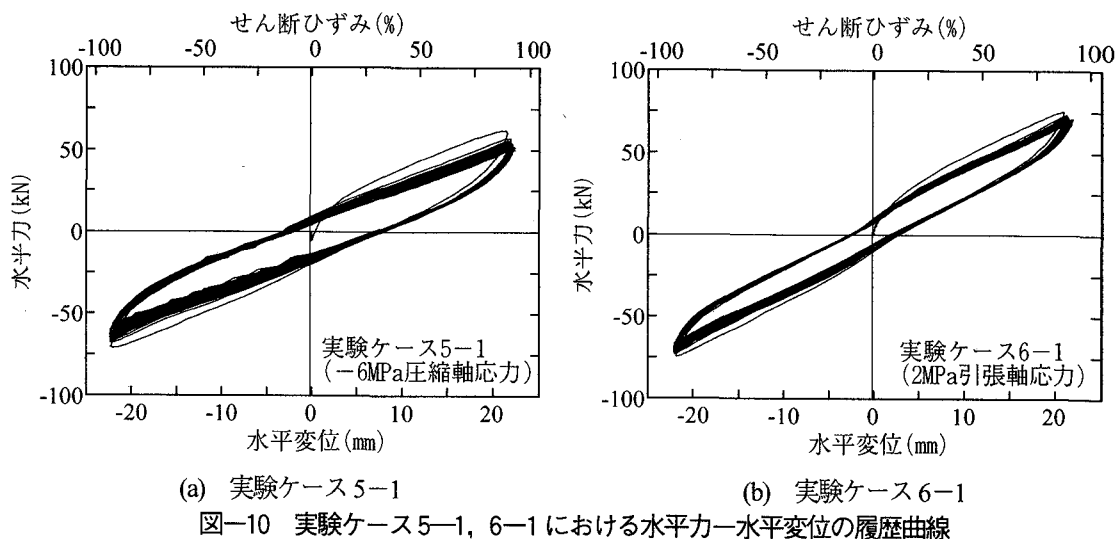


図-9 実験ケース4において供試体に生じるひずみ場

分布しているのに対して、引張軸応力を作用させたケース3 (図-8 (b) i) 参照) では0.02~0.06の伸張のひずみが

供試体全体に広く分布し、さらに供試体の左右自由端隅角部のゴム層領域において0.06程度の大きなひずみが生



じている。 ε_{yy} に関しては ε_{xx} の分布とは逆に、ケース 3 (図-8 (b) ii) 参照) と比較して、ケース 1 (図-7 (b) ii) 参照) では 0.10~0.12 の伸張のひずみが生じている。 γ_{xy} については、ケース 1 (図-7 (b) iii) 参照) と比較してケース 3 (図-8 (b) iii) 参照) の方が -1.15~-1.05 のひずみ領域が広がっており、引張軸応力を作用させた場合の方がより大きなひずみとなっている。このように、図-5 及び図-6 によれば軸応力の相違が積層ゴム支承の復元力特性に与える影響は顕著ではなかったが、ひずみ場に関しては値の大きさや分布の傾向に軸応力による影響が強く現れると言える。

3.2 引張軸応力の程度の相違による影響

図-9 には 1MPa の引張軸応力を作用させた場合の供試体に生じるひずみ場を示す。ここでは、図-8 及び図-9 に基づいて、前節と同様にせん断ひずみ γ が 150% の場合のひずみ場について引張軸応力の程度の相違による影響

について考察する。

ε_{xx} に関しては、1MPa の引張軸応力を作用させたケース 4 (図-9 (b) i) 参照) と比較してより大きな 2MPa の引張軸応力を作用させたケース 3 (図-8 (b) i) 参照) では 0.05~0.06 の伸張のひずみが広く分布し、特に供試体の左右自由端隅部のゴム層領域において大きなひずみが集中している。一方、 ε_{yy} に関しては、ケース 3 (図-8 (b) ii) 参照) と比較して、ケース 4 (図-9 (b) ii) 参照) では 0.01 程度のひずみが供試体の領域全体に分布しており、全体的に伸張している。 γ_{xy} については、ケース 4 (図-9 (b) iii) 参照) では -1.43~-1.24 程度のひずみと -0.96~-0.78 程度のひずみが互層を成しており、かつケース 3 (図-8 (b) iii) 参照) と比較して領域全体に大きなひずみが生じている。これは、同一のせん断ひずみ γ を達成するためには、引張軸応力の小さいケース 4 の方が γ_{xy} としてはより大きく歪まなければならなかったためである。

4. 一定の繰返しせん断変形を作用させた後の地震時相当のせん断変形性能

4.1 圧縮および引張軸応力の相違による影響

図-10 は実験ケース 5-1 及び 6-1 における水平力-水平変位の履歴曲線を示した結果である。また、繰返し回数 i に応じた最大水平力 $P(x_i^{\max})$ の低減率 η を求めると図-11、ケース 5-2, 6-2 において各せん断ひずみ γ における等価剛性 K_{eq} 及び単位体積当たりの履歴吸収エネルギー Δw を求めると図-12 のようになる。なお、最大水平力 $P(x_i^{\max})$ の低減率 η は次式によって定義することとした。

$$\eta = P(x_i^{\max}) / P(x_1^{\max}) \quad (4)$$

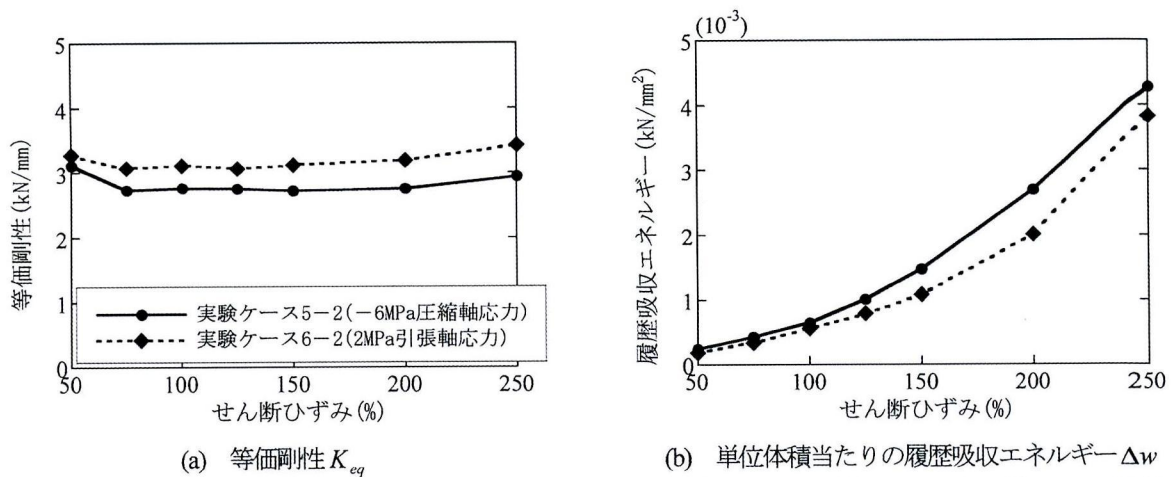


図-12 実験ケース5-2, 6-2における等価剛性 K_{eq} 及び単位体積当たりの履歴吸収エネルギー Δw の比較

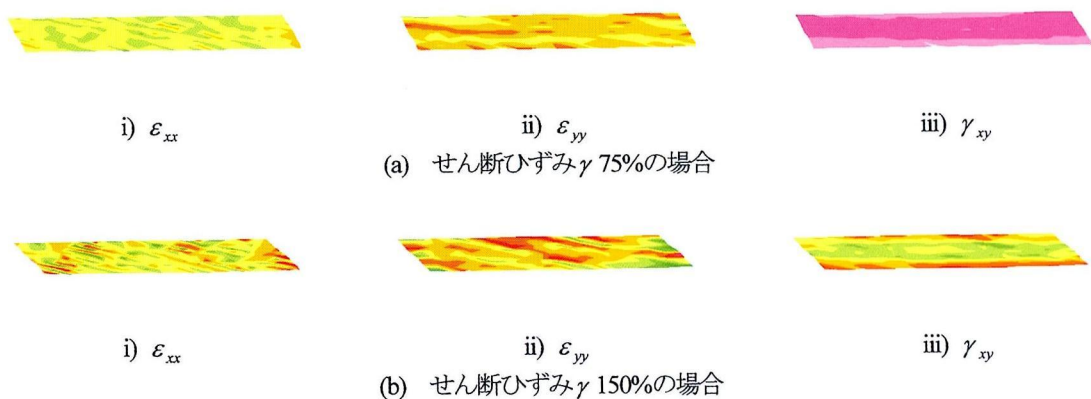


図-13 実験ケース5-2において供試体に生じるひずみ場

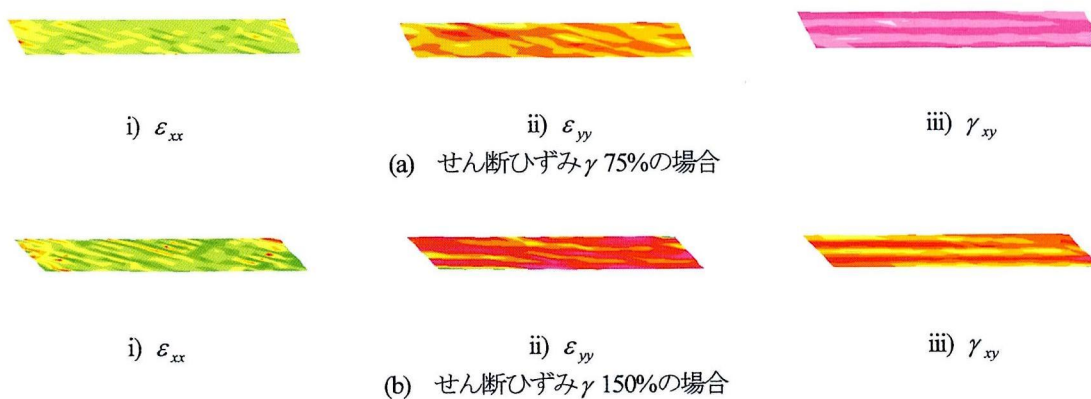


図-14 実験ケース6-2において供試体に生じるひずみ場

ここで、 $P(x_1^{\max})$ は1回目の荷重ステップで生じた最大変位 $x_1^{\max}$ における水平力、 $P(x_i^{\max})$ は*i*回目の荷重ステップで生じた最大変位 $x_i^{\max}$ における水平力である。

図-11によれば、-6MPaの圧縮軸応力を作用させたケース5-1の場合には90%のせん断変形を300回繰り返した時点で最大水平力 $P(x_{300}^{\max})$ は $P(x_1^{\max})$ の80%以下まで低

下しているのに対して、2MPaの引張軸応力を作用させたケース6-1の場合には $P(x_1^{\max})$ の90%程度までしか最大水平力 $P(x_{300}^{\max})$ は低下していない。圧縮軸応力よりもむしろ引張軸応力を作用させた場合の方が最大水平力 $P(x_i^{\max})$ の低減率 η は低い。

図-12によれば、300回の繰り返しせん断を与える

ケース6-2の場合にはケース5-2と比較して単位体積当たりの履歴吸収エネルギー Δw が1~2割程度低減し、逆に等価剛性 K_{eq} が1~2割程度高くなっている。これは、引張軸応力を作用させた場合の方が1ループの履歴がより細くなることを意味する。300回の繰返しせん断をあらかじめ与えなかった場合には図-6に示したように圧縮並びに引張軸応力の相違が Δw や K_{eq} に与える影響は顕著でなかったことを考慮すると、300回の繰返しせん断を与えると軸応力の相違による影響が大きく現れてくると言える。

4.2 ひずみ場の相違

実験ケース5-2及び6-2において供試体の被覆ゴムに生じたひずみ場を示すと図-13、図-14のようになる。

図-13、図-14に基づくひずみ場に対する考察も第3章と同様にせん断ひずみ γ が150%の場合に対して行うものとする。

-6MPaの圧縮軸応力を作用させたケース1とケース5-2について比較すると、 ϵ_{xx} に関しては300回の繰返しせん断を与えたケース5-2(図-13(b) i) 参照)の方が0.02~0.06の伸張のひずみが供試体の左右自由端隅角部のゴム層領域においてより広範に生じている。また、 ϵ_{yy} に関しても、ケース1(図-7(b) ii) 参照)と比較して、ケース5-2(図-13(b) ii) 参照)では-0.08~-0.04のひずみが供試体の領域全体に広がっている。 γ_{xy} についてはケース5-2の場合(図-13(b) iii) 参照)の方が-1.24~-1.05の大きなひずみ領域が供試体の全体に広がっている。このように、ケース5-2ではケース1と比較して ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 、 γ_{xy} のいずれも大きな値を示しており、かつこれらの示す領域も供試体全体に広がっていることから、300回の繰返しせん断を受けるとゴム層の劣化が進み、積層ゴム支承のせん断変形性能は低下すると考えられる。

次に、2MPaの引張軸応力を作用させたケース3とケース6-2について比較すると、 ϵ_{xx} に関しては300回の繰返しせん断を与えたケース6-2の方が-0.03~0.02のひずみ領域が、また、 ϵ_{yy} に関しても0.03~0.08の伸張のひずみ領域が供試体全体に広がっている。逆に、 γ_{xy} については、ケース3(図-8(b) iii) 参照)と比較してケース6-2(図-14(b) iii) 参照)の方が-0.96~-0.78のひずみ領域が供試体全体に広がり、 γ_{xy} は全体的に小さくなっている。さらに、ケース6-2では大きく歪んだ領域が内部鋼板間の3層のゴム層に明瞭に生じている。

ケース5-2と6-2を比較すると、 ϵ_{xx} 及び γ_{xy} に関してはケース5-2の方がいずれも大きな値を示しており、 ϵ_{yy} に関しては正負が逆のひずみを生じている。これより、ひずみの値の大小という観点からは、圧縮軸応力を作用さ

せた状態で繰返しせん断を与えた場合の方が引張軸応力を作用させた状態で繰返しせん断を与えた場合よりも、繰返しせん断を与えた後の地震時相当のせん断変形性能は低下すると言える。これは前節で述べた図-10、図-11の結果とも呼応するものである。ひずみ分布の傾向としては、圧縮軸応力を作用させたケース5-2の場合には内部鋼板近傍のゴム層で大きなひずみを示し、一方、引張軸応力を作用させたケース6-2の場合には上下部鋼板付近並びに内部鋼板間のゴム層領域において大きなひずみを示している。このように、軸応力の相違によってひずみ分布の傾向には顕著な相違が生じる。

5. 結論

本研究では橋梁の耐震補強に用いられる積層ゴム支承に対して繰返し載荷実験を行うことにより、軸応力の相違が積層ゴム支承のせん断変形性能に与える影響について検討した。積層ゴム支承のせん断変形性能をはかる指標として、積層ゴム支承の復元力特性だけでなく、せん断変形時に積層ゴム支承に生じるひずみ場 ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 、 γ_{xy} を取りあげ、これらについて考察を加えた。繰返し載荷実験では、積層ゴム支承に一定の軸応力を作用させた状態で、地震時に求められるせん断変形を想定してせん断変形を漸増するケースと、温度変化やクリープによる常時のせん断変形を想定して一定のせん断変形を300回繰返すケースの2通りを実施した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 圧縮及び引張のいずれの軸応力下においてもせん断変形が大きくなるに従って、ゴム層の左右自由端隅角部において局所的に大きなひずみが生じるようになる。このようなひずみ分布の傾向は引張軸応力を作用させたケースの方がより顕著となる。
- 2) γ_{xy} の分布には軸応力の相違による影響が顕著に現れる。圧縮軸応力を作用させた場合には内部鋼板近傍のゴム層において、一方、引張軸応力を作用させた場合には上下部鋼板付近並びに内部鋼板間のゴム層領域において大きなひずみ分布となる。
- 3) 300回の繰返しせん断をあらかじめ作用させた後の積層ゴム支承の地震時相当のせん断変形性能は、圧縮及び引張のいずれの軸応力下においても低下する。しかし、軸応力の相違による影響に関しては、引張軸応力を作用させた場合には、圧縮軸応力を作用させた場合と比較して、履歴吸収エネルギー Δw が1~2割程度低減し、等価剛性 K_{eq} が1~2割程度大きくなるなど水平力-水平変位の履歴が細くなる傾向が認められる一方で、繰返し回数に応じた最大水平力 $P(x_i^{\max})$ の低減率 η はむしろ低くなる。また、ひずみの値の大小という観点からも、 ϵ_{xx} 及び γ_{xy} に関し

ては圧縮軸応力を作用させた場合の方が引張軸応力を作用させた場合よりも大きな値を示している。これらの点を考慮すると、本実験で対象とした軸応力の相違のレベルでは、引張軸応力を作用させた場合においても圧縮軸応力を作用させた場合と比較してせん断変形性能が必ずしも劣るわけではないと言える。

現行の設計において積層ゴム支承に生じる負反力は基本的に認めていない¹⁵⁾。これは、引張軸応力下において積層ゴム支承に生じるゴム層と内部鋼板間の界面の剥離・破断などの破壊形態の問題や、このような剥離・破断が生じた場合のセットボルトやアンカーボルトへの影響、さらには橋梁全体系の地震応答に与える影響に関して現象的に十分に明らかになっていないためである。本研究においても実験ケースや載荷装置の制約の問題から、引張軸応力を作用させた場合の積層ゴム支承の破壊形態に関して一般的な結論に到達することはできなかったが、今後、引張軸応力下における積層ゴム支承の力学的特性に関して破壊形態の推定を含めて信頼性がさらに高まれば、積層ゴム支承や橋梁全体系の設計自由度は明らかに高まる。このような際に、本研究によって得られた知見は有用な情報になり得ると考えている。

謝辞

本研究において使用した積層ゴム支承はゴム支承協会に関連メーカーに製作していただきました。関係各位には供試体の製作のみならず、積層ゴム支承の力学的特性など貴重なご教示をいただきました。また、実験の準備、治具の設置や撤去、載荷にあたっては筑波大学機能工学系の小島篤志技官に尽力していただきました。さらに、日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物の応答制御技術に関する研究委員会」の委員の方々には結果の取りまとめの際に貴重なご助言をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992.
- 2) 高橋良和，家村浩和，平井崇士：滑り型免震支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響，第26回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Vol.2，

pp.1077-1080，2001.8.

- 3) 伊津野和行，児島孝之，鈴木亮介，和田敦志，濱田譲，吉野伸：ゴム材の圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発，土木学会論文集，No.563/I-39，pp.71-78，1997.4.
- 4) Gent, A. N. and Meinecke, E. A. : Compression, Bending and Shear of Bonded Rubber Blocks, *Polymer Engineering and Science*, 10(1), pp.48-53, 1970.
- 5) Kelly, J. M. : *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd Edition, Springer, 1997.
- 6) 家村浩和，五十嵐晃，陳友真，中島裕之：曲げ・変動軸力載荷条件下における免震支承の復元力特性，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，土木学会，pp.305-312，1996.11.
- 7) Mori, A., Moss, P. J. , Cooke, N. and Carr, A. J. : The Behavior of Bearings Used for Seismic Isolation under Shear and Axial Load, *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 2, pp.199-224, 1999.
- 8) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三：免震用積層ゴム支承の水平2方向を含む復元力特性とそのモデル化，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.125-144，2002.1.
- 9) 松田泰治，大塚久哲，中島崇之：FEMを用いた積層ゴム支承の局部せん断ひずみ評価に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.48A，pp.833-842，2002.3.
- 10) 菊池優，北村佳久，林章二，河島庸一，坂口達，山田親文：引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第524号，pp.57-64，1999.10.
- 11) 大塚久哲，栗木茂幸，池永雅良：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，構造工学論文集，土木学会，Vol.48A，pp.843-850，2002.3.
- 12) 深堀美英：高分子材料へのフラクトグラフィーの導入(1)，日本ゴム協会誌，第55巻，第2号，pp.82-103，1982.
- 13) 庄司学，川島一彦，加藤享二：高減衰積層ゴム支承の設計における橋脚の回転変形の影響，構造工学論文集，土木学会，Vol.48A，pp.851-861，2002.3.
- 14) 日本道路協会：道路橋支承便覧，1991.
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.

(2002年9月13日受付)