

荷重検知機構付加型ゴム支承の開発に関する基礎的研究

Research on the Development of a Rubber Bearing Load Transducer

宮下秀樹*, 三井康司**

Hideki MIYASHITA, Yasushi MITSUI

*株式会社守谷商会, 第一技術研究所 (〒380-8533 長野県長野市南千歳 1-3-7)

** 工博 信州大学教授, 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里 500)

According to the theory of Elasticity, the compression in a rubber bearing consisting of a combination of rubber and metal layers, may be calculated or obtained from the strain in the inner plates.

Applying this, it is then possible to create a rubber bearing load transducer. However, rubber is not an entirely elastic material but rather has both elastic and plastic properties. In addition, the mechanical effects on rubber are delayed since rubber has visco-elastic properties.

By considering rubber laminated structures for the transducer of pressure or load, the effects and adaptability of rubber are investigated.

It is concluded from the results obtained that the application proposed here may be applied to bridge supports and so on in line with the restrictions related to the response time and the loading history of the structure.

Key Words: rubber bearing, load transducer, visco-elastic, drift

キーワード: ゴム支承, 荷重変換器, 粘弾性, ドリフト

1. はじめに

ゴム支承は, 昭和30年代後半より主に橋梁用の支承装置として使用されてきた。以後, 多くの研究と実績の積み重ねにより, その実用性が確認されている。特に, 平成7年1月の阪神・淡路大震災を契機に構造物の免震化が進展する中で, ゴム支承の需要は橋梁にとどまらず, 建築分野へと拡大している。また, 近年の構造物の支承は, 構造の大型化・多様化・免震化等により, 従前と比較してより厳しい荷重環境に置かれることが多く, その構造の重要性が増大している。

この支承に, 装置としての機能・性能を低下させることなく, 荷重検知機構を付加することが可能ならば, 構造物の構造的信頼性を飛躍的に増大させることができる。

この具体例をあげれば, 以下のようなものがある。

- ①設計手法のチェック
- ②施工精度の確認並びに施工不良や欠陥の早期発見
- ③支承の実効性(有効面圧)のチェック
- ④構造物の老朽化や劣化に対する構造的チェック
- ⑤施工工程により構造系が変化する場合の安全管理

このように, 構造物の実反力を知ることの意義は非常に大きい。しかしながら現状は, 構造物の実反力をモニターしながら施工したり, 維持管理を行うといった手法は一般

化されていない。

現在, 実反力を知ろうとすればロードセル等の荷重計を支承に接続して設置する方法等があるが, これは構造系の変更を伴うことになり実用的でない。ここで, 従来から実用に供されてきたゴム支承の構造を変更することなく実反力の計測を簡便に実施可能とするものが, 以下に述べる荷重検知機構付加型ゴム支承¹⁾である。

本論文では, 荷重検知機構付加型ゴム支承の荷重検知理論と機構を具体的に示し, 試作器によるキャリブレーション結果に考察を加え, 実用化への有効性を示す。

2. ゴム支承の構造

構造物の支承に求められる機能には,

- ① 荷重伝達機能,
- ② 水平移動機能,
- ③ 回転機能,

がある²⁾。これらにより, 構造物の荷重は基礎を介して地盤に伝達される。一方, 構造物の免震化においては, 地盤から伝搬する地震動と構造物を絶縁して, 構造物の地震応答を軽減する手法が用いられる。このような用途に用いられる支承には,

- ④ アイソレート機能,

が必要となるが、基本的には上述の①～③の機能の複合化と考えることができる。

ゴムは、弾性率が $E=1.5\sim 400\text{N/mm}^2$ で、ポアソン比が、 $\nu=0.48\sim 0.50$ の弾性体である。板状のゴムを鉛直方向から一軸圧縮した場合、ポアソン比が0.5に近いためにゴム全体の体積が変化しないので、鉛直方向に圧縮変形した体積と同量の側方膨出が生じる。このゴム板を積層状に接合した鋼板あるいはリング状に接合した鋼材で側方膨出を拘束して、鉛直荷重に対する耐荷力を増大したものがゴム支承であり、①の機能となる(図-1参照)。

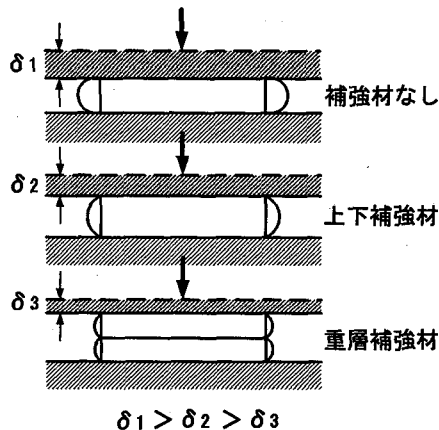


図-1 積層補強による①の機能²⁾

ゴム支承は、鉛直方向には鋼板等により補強され積層板としての剛性を有するが、水平方向は、ゴム本来の低弾性一高伸張性を維持している。ゴム支承が水平変位を受けた場合は、ゴムが容易にせん断変形することにより上部構造の変形を吸収することができ、②の機能となる(図-2参照)。

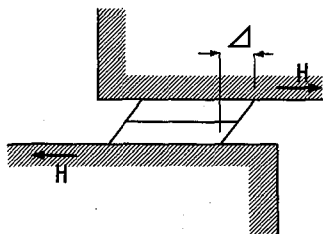


図-2 ゴムのせん断変形による②の機能²⁾

支承に接する構造部材は荷重の載荷等で回転を生じる場合がある。これに対して、ゴムの弾性変形で追随することができる。これが③の機能となる(図-3参照)。

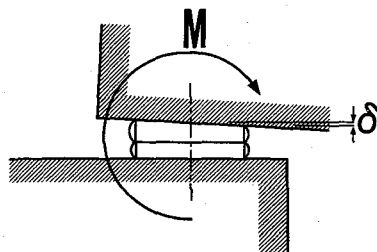


図-3 ゴムの弾性変形による③の機能²⁾

3. 荷重変換の理論

3.1 積層ゴムに生じる圧縮応力分布³⁾⁴⁾

積層ゴムのように上下面が拘束された円柱状のゴムブロックを、軸方向圧縮した場合の平均支圧応力 σ_c とひずみ ϵ の関係は、見かけの縦弾性係数を E_c として次式で表せる。

$$\sigma_c = \sigma_1 + \sigma_2 = E_c \cdot \epsilon \quad (1)$$

ここに σ_1 : 上下面の拘束がない一軸一様

$$\text{圧縮による応力} = E_0 \cdot \epsilon \quad (2)$$

E_0 : ゴムの縦弾性係数

σ_2 : 上下面の拘束により生じる拘束応力

ゴム材料は非圧縮性を有し、ポアソン比 ν は0.5に非常に近い値を示す。ゴムを上下方向から一軸圧縮すると、軸方向に収縮した体積に見合う側方膨出を生じ体積が変化しない。上下面が鋼板で補強された場合の側方膨出部の変形は、補強板の拘束を受けて、拘束のない場合の一軸一様圧縮のものと異なり、図-4のようになる。

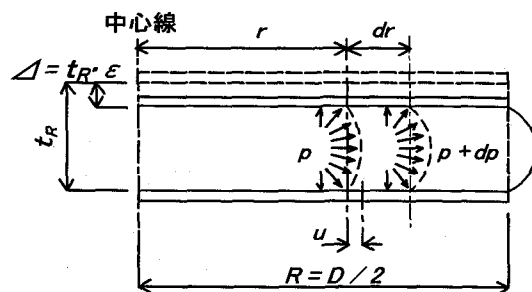


図-4 ゴムの側方膨出

側方膨出によるはらみ出しは微小変形で2次放物線を描くと仮定すれば、円柱状のゴムブロックの場合、中心から r の位置におけるはらみ出し量 u は、ゴムの非圧縮性から次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \pi^2 t_R &= \pi^2 (t_R - \Delta) + 4\pi r t_R / 3 \\ \therefore u &= \frac{3\Delta}{4t_R} r \end{aligned} \quad (3)$$

ここに r : 中心からの距離

t_R : ゴム厚

Δ : 圧縮変形量($= t_R \cdot \epsilon$)

u : はらみ出し量

ただし $1 - \epsilon \approx 1, r \gg u$ と仮定する

増分圧力 dp は古典弾性理論より

$$dp = -\frac{8}{3} \left(\frac{E_0 u}{t_R^2} \right) dr \quad (4)$$

となる。式(3)を式(4)に代入し中心から距離 r の位置での圧力 p は、

$$p = - \int_r^R dp = \int_r^R \left(\frac{2E_0 \Delta r}{t_R^3} \right) dr = \frac{E_0 \Delta}{t_R^3} (R^2 - r^2) \\ = \frac{R^2}{t_R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) E_0 \cdot \varepsilon \quad (5)$$

次に、全拘束面積について p を積分し σ_2 を得る。

$$\sigma_2 = \frac{2}{A} \int_0^R \int_0^\pi pr \cdot d\theta \cdot dr \\ = \frac{2E_0 \Delta}{At_R^3} \int_0^R \int_0^\pi r(R^2 - r^2) d\theta \cdot dr \\ = \frac{\pi E_0 \Delta R^4}{2At_R^3} = \frac{R^2}{2t_R^2} E_0 \cdot \varepsilon \quad (6)$$

ここに R : ゴム半径

D : ゴム直径($=2R$)

A : ゴムの受圧面積($=\pi R^2$)

したがって、式(2)と式(6)を式(1)に代入して平均支圧応力 σ_c を求めることができる。

$$\sigma_c = \left(1 + \frac{R^2}{2t_R^2} \right) E_0 \cdot \varepsilon = (1 + 2S^2) E_0 \cdot \varepsilon \quad (7)$$

ここに S : 形状係数 $= \frac{\text{載荷面積}}{\text{自由表面積}} = \frac{R}{2t_R} = \frac{D}{4t_R}$

これより圧縮変形に対する見かけの縦弾性係数 E_c を次式で示すことができる。

$$E_c = (1 + 2S^2) E_0 \quad (8)$$

最大圧縮応力度 $\sigma_{\max}$ は中心部で発生するので式(5)において $r=0$ とおくことで求めることができる。

$$\sigma_{\max} = \left(1 + \frac{R^2}{t_R^2} \right) E_0 \cdot \varepsilon = (1 + 4S^2) E_0 \cdot \varepsilon \quad (9)$$

これより、形状係数 S が十分大きければ、最大支圧応力 $\sigma_{\max}$ は平均支圧応力の2倍となる。また、式(7)は次式で近似できる。

$$\sigma_c \cong \frac{R^2}{2t_R^2} E_0 \cdot \varepsilon \quad (10)$$

これを式(5)に代入し $E_0 \cdot \varepsilon$ を消去すれば、ゴム層の圧力分布は次式のような放物線で表すことができる。

$$p = 2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \sigma_c \quad (11)$$

3.2 積層ゴム中間鋼板に生じる応力^④

次に、中間鋼板に生じる応力を求める。図-5において、この微小要素に作用する力 P_r は高次微小量を見捨てる。

$$P_r = \{p(r) - p(r+dr)\} r \cdot d\theta \cdot dr = 4\sigma_c t_R \frac{r^2}{R^2} dr \cdot d\theta \quad (12)$$

となり、応力の釣り合いは次式となる。

$$rt_s d\theta \cdot d\sigma_r + \sigma_r t_s dr \cdot d\theta - \sigma_\theta t_s dr \cdot d\theta \\ + 4\sigma_c t_R \frac{r^2}{R^2} dr \cdot d\theta = 0$$

ここに t_s : 中間鋼板の厚さ

t_R : ゴム層の厚さ

σ_r : 半径方向応力度

σ_θ : 円周方向応力度

両辺を $t_s d\theta \cdot dr$ で除せば式(13)が得られる。

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta + 4\sigma_c \frac{t_R}{t_s} \frac{r^2}{R^2} = 0 \quad (13)$$

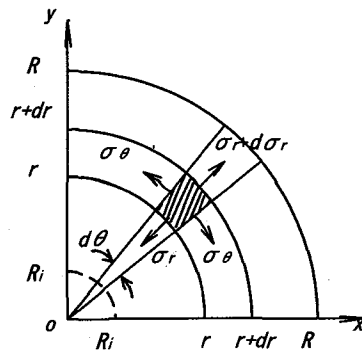


図-5 中間鋼板の応力の釣り合い

半径 r 面の半径方向変位を u 、 $(r+dr)$ 面の変位を $(u+du)$ とすれば、半径方向のひずみ ε_r と円周方向のひずみ ε_θ は、

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

となる。これらより、応力と変形の関係は次式のようになる。

$$\sigma_r = \frac{E_s}{1-\nu_s} \left(\frac{du}{dr} + \nu_s \frac{u}{r} \right), \quad \sigma_\theta = \frac{E_s}{1-\nu_s} \left(\frac{u}{r} + \nu_s \frac{du}{dr} \right) \quad (14)$$

ここに E_s : 鋼板のヤング率

ν_s : 鋼板のポアソン比

式(14)を式(13)に代入すれば、変位の方程式が次のように導かれる。

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = -4 \frac{1-\nu_s}{E_s} \frac{t_R}{t_s} \frac{r}{R^2} \sigma_c \quad (15)$$

式(15)の一般解は、

$$u = Ar + \frac{B}{r} - \frac{1-\nu_s}{2E_s} \frac{t_R}{t_s} \frac{r^3}{R^2} \sigma_c \quad (16)$$

となる。式(16)を式(14)に代入して、以下の境界条件を考慮すると、応力 σ_r, σ_θ は式(17)で与えられる。

〈境界条件: 中心孔がない場合〉

$r=R$ のとき $\sigma_r=0$

$r=0$ のとき $u=0, \therefore B=0$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_c \frac{3+\nu_s}{2} \frac{t_R}{t_s} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} \\ \sigma_\theta &= \sigma_c \frac{3+\nu_s}{2} \frac{t_R}{t_s} \left\{ 1 - \frac{1+3\nu_s}{3+\nu_s} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} \\ \sigma_z &= -2\sigma_c \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

このように積層板に垂直圧力が作用すると、中間鋼板には式(17)に示した応力が発生する。これは、垂直方向の作用圧力の大小が中間鋼板の応力（ひずみ）の大ききで検知できることを意味するものである。

本荷重検知機構は、この中間鋼板のひずみを、中間鋼板に貼り付けたひずみゲージで計測して、垂直応力を検知する荷重変換装置である。

4. 荷重検知機能付加型ゴム支承の構造

4.1 構造概要

荷重検知機能付加型ゴム支承の構造は、現在一般的に使用されているゴム支承と同様で、ゴム板と中間鋼板の積層構造からなっている。図-6に、ゴム2層、中間鋼板1層からなる荷重検知機能付加型ゴム支承の例を示す。

荷重検知機構付加型ゴム支承の構造は、ひずみゲージを貼り付けた中間鋼板（以下、受圧板という）を積層の中心に置き、その上下にゴム板を接着（加硫）したものに、平面剛性を付加するために最外縁に剛性の大きい鋼板（以下、フランジという）を接着（加硫）したものが基本となる。積層数に制約はないが、受圧板を積層の中心として上下に対象となる積層構成が望ましい。平面形状は円形が基本となる。

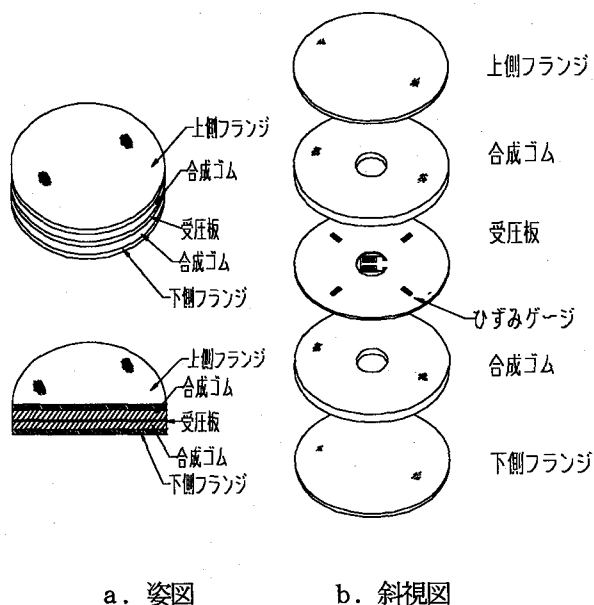


図-6 荷重検知機構付加型ゴム支承の例

4.2 鉛直荷重検知機構

図-6のゴム支承に鉛直荷重（鉛直圧力）を載荷したときの変形および応力の状態を図-7に示す。

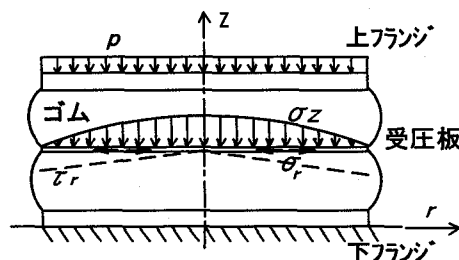


図-7 鉛直荷重を受けた受圧板の応力

鉛直荷重を受けたゴム支承の受圧板に生じる軸力は、同心円状の分布を示す。この値は3.1で示したごとく作用した鉛直方向の圧縮応力に比例し、円中心方向の軸ひずみをモニターすることで、鉛直荷重の大小を検知することができる。

4.3 温度補償機構

図-7に示したモデルに温度変化を与えると、受圧板は荷重載荷の場合と同じ同心円状の伸縮を示す。この状態で受圧板のひずみを計っても、載荷による応答か温度変化によるものか判断できず、荷重センサーとしての信頼性が劣る。

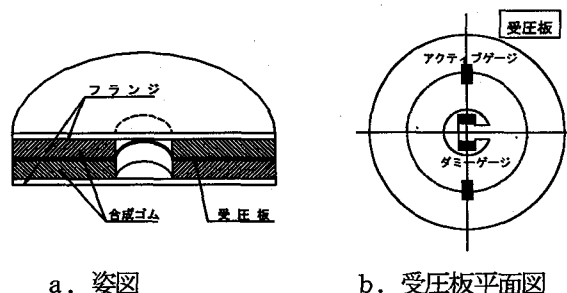


図-8 温度補償機構

この温度補償方法として、積層ゴムの中心を空洞にして、受圧板の中心部に設けた舌片をその空洞内に張り出し（図-8 b）、受圧板にゴムの影響を受けずに温度伸縮のみを感受する部分をつくる。そして、載荷圧力の影響を受ける受圧板の1/4直径の位置と前記舌片部にひずみゲージを貼り付け、アクティブ・ダミー法を用いて、ひずみから温度の影響を取る。

ゴムの熱膨張率は鋼の7倍であるが、弾性が鋼に比べて極めて低いことから、ゴムの温度ひずみが受圧板に及ぼす影響が少なく、受圧板の温度ひずみは、受圧板自身の熱伸縮量と見なすことができる。よって、受圧板の材質に適合したセルコン・ゲージを使用することにより、より確実な温度補償が可能となる。

4.4 回転及び水平変形応力補償機構

ゴム支承には、支承の第2機能としての水平移動機能及び第3の機能としての回転機能が求められる。構造物の変形・収縮等によりゴム支承の積層方向にせん断変形や回転が生じると、受圧板にも鉛直荷重によるものと異なる応力が発生する。この応力の影響を消去しないと正確な鉛直荷重の検知ができなくなる。

2枚の剛性板に接着されたゴムのせん断特性について、戸原⁷⁾は、ゴムに曲げ変形を伴うせん断変形が生じるとして図-9 aを示している。これはフランジの回転を拘束したせん断形態（以下オフセット変形という）であるが、このようなせん断変形の場合、中間鋼板には曲げは生じずせん断のみが作用する。これに対して、フランジの回転を伴うせん断形態の場合（図-9 b）は、中間鋼板に曲げとせん断が作用する。

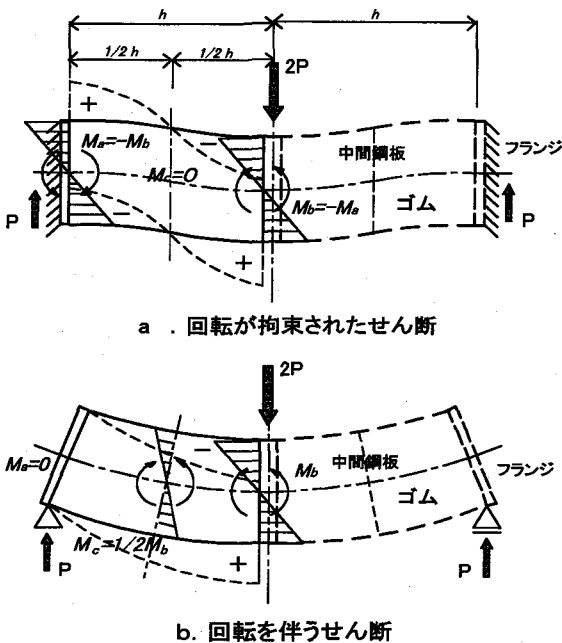


図-9 2枚の剛性板に接着されたゴムのせん断特性

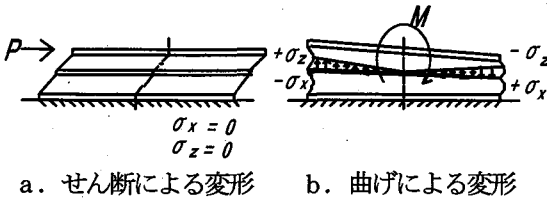


図-10 受圧板に作用する応力

これらのせん断変形により受圧板に生じる応力を、図-10に示す。オフセット変形のように単純にせん断力のみが作用する場合には、受圧板に面内方向の軸力 σ_x は生じない。これに対し、単純な曲げが作用する場合には、曲げにより生じるゴム・ブロック維方向の軸力 σ_z の影響で直角方向の受圧板に面内軸力 σ_x が生じる。 σ_z は中立軸で正負の対象分布を示す。これにより σ_x も、符号が正負異なり絶対値が中心点対称の分布となる。よって、受圧板のひずみ検出において、中心を基点とする点対称位置のひずみ

の和を求めると、曲げ変形の影響を消去することが可能となる。曲げを伴うせん断の場合も、曲げ成分のみを上記の方法で除去すれば良い。

4.5 受圧板ひずみのピックアップ方法

受圧板応力の検出は、図-11 aに示す位置にひずみゲージを貼り付けて、その軸方向ひずみ量をピックアップする。これらのひずみゲージは、前述した3つの計測意図により配置をしてある。すなわち、

- ①鉛直荷重用配置、
- ②温度補償用ダミー配置、
- ③せん断及び曲げ変形応力補償用配置、

である。

これらのゲージをホイーストンブリッジに組み込むことにより実効性のある計測補償システムができる。ブリッジ回路の組方は4ゲージ法を基本とする。4ゲージの一辺に受圧板中心に対して点対称に貼ったアクティブゲージ2枚を組み込む。これで、曲げ変形応力補償を実現する。つづいて、舌片部の上下に貼ったダミーゲージ2枚を前記の隣辺に組み込む。これにより、舌片部の自重による曲げひずみをキャンセルするとともに、アクティブ・ダミー法により温度補償を行う。結果として、鉛直荷重によるひずみのみを計測できることになる。これらを表したものが、図-11 bのブリッジ図である。

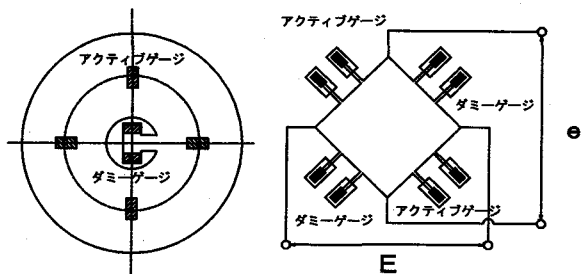


図-11 ひずみゲージの貼り付け方法

5. 実用化上の問題

5.1 ゴム弾性の問題

前節までに、弾性理論に立脚するとゴムと金属からなる積層板に作用する圧縮力が、中間積層板のひずみで検知できることを示した。しかしゴム材料は、大きな変形を受けても除荷後に変形が回復する特徴を有するものの、完全な弾性体でない。すなわち、可塑性変形、弾性余効、載荷履歴効果等の性質を有する⁸⁾。これは、ゴム材料のエントロピー弾性に起因するもので、金属材料等のエネルギー弾性と異なる点である。

一般的にゴム材料を力学的に扱う場合、次の2点について留意する必要がある。

- ①非線形性の取り扱い
- ②粘弾性の取り扱い

非線形性の対応は、幾何学的非線形と材料非線形の両者について考慮する必要がある。ゴム材料の材料非線形性には、ヒステリシス損失も含まれ非可逆的な変形挙動が含まれる。積層ゴム支承の軸圧縮に関しては、圧縮ひずみのオーダーが数%であり、実用上線形問題として取り扱われているが、水平変形に関しては幾何学的非線形性も含めた取り扱いが必要となる。

さらに、ゴムは弾性と粘性を共有するので、力学的な負荷に対して応答の遅れを生じる。積層ゴムを荷重センサーの本体構造とする場合、このようなゴムの材料特性が精度および信頼性にどのように影響するか確認する必要がある。配慮を要する具体的な物性としては、次のものがある。

- ㊦ 非線形弾性
- ㊩ 緩和弾性
- ㊫ ヒステリシス損失
- ㊭ 圧縮永久ひずみ
- ㊮ クリープ
- ㊯ 弾性の温度依存

多くのゴム製工業用品は、これらの諸物性に起因する力学的問題を内在しているが、使用目的、要求性能の範囲の中で十分実用に供されているのが現状である。本荷重変換器においても、試作を重ねる中で上記の諸物性が与える影響について、実用性の面から検証を行う必要がある。

5.2 ひずみ計測技術の問題

本荷重変換器においてひずみゲージは、ゴムと受圧板との間に挟み込まれた状態で使用している。さらに、ひずみゲージには①大きな面外圧力と②面内層せん断力が作用する。ひずみゲージはこのような用法を想定して製作されていないので、その計測信頼性は定かでない。①については高圧力下での使用例も多く問題ないようであるが、②については、図-12に示す一般的なひずみゲージ構造からみてその信頼性が懸念される。

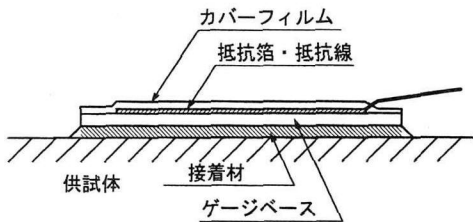


図-12 一般的なひずみゲージの構造

ひずみゲージは、薄い電気絶縁物からなるベースの上に格子上の抵抗線、またはフォトリソ加工した抵抗箔を形成したもので、その表面はベースと材質が異なるカバーフィルムで覆われている。本荷重変換器においては、この弾性の異なる材質からなる積層状のひずみゲージに、上下面をずらすような力が作用することになり。このような用法に対する適用性についての検討が必要となる。

6. 試作器の製作

試作器は弾性に優れる天然ゴムを使用し、表-1に示す構造諸元のものを作成した。受圧板にセットするひずみゲージは、ゲージ長 3mm、幅 2mm、抵抗値 350Ω、線膨張係数 70 の大ひずみ用箔ゲージを使用した。受圧板上の配線は銅箔を使用した。また、受圧板の材質は加工性の良いポリプロピレンを使用した。表-1に試作器の諸元を、図-12に受圧板の形状を示す。また試作器の全景を写真-1に、ゴムの物性値(カタログ値)を表-2に示す。

表-1 試作器の形状諸元

モデル名	M-1	
外 径	φ=120mm	
内 径	φ= 40mm	
形状係数	S=40	
	材 質	厚 さ
ゴム	天然ゴム	5.0+5.0mm
受圧板	ポリプロピレン	1.1mm
フランジ	SUS-304	2@3.8mm
フランジ接着剤	常温加硫ゴム接着剤	2@0.63mm
受圧板接着剤	シアノアクリレート系接着剤	2@0.06mm

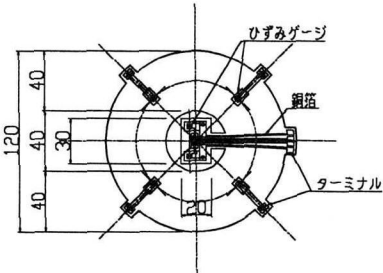


図-13 受圧板形状

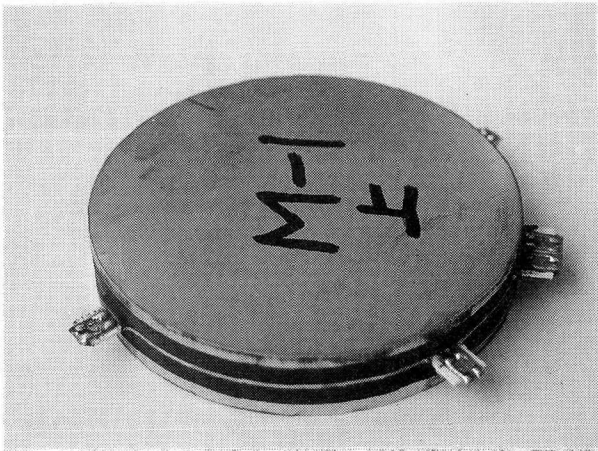


写真-1 試作器の全景

表-2 ゴムの物性値

試験項目	単 位	天然ゴム
硬さ Hs	度	65
引張強さ TB	N/mm ²	3.2
切断時伸び EB	%	300
引裂強さ TR	N/mm	12.7
圧縮永久ひずみ	% (70°C×70h)	34

7. 試作器のキャリブレーション

7.1 載荷試験概要

載荷試験装置は、図-14に示したものを製作して、鉛直軸力載荷と層せん断力載荷が同時に行えるものとした。せん断の形態は曲げ変形を拘束しないように配慮し、せん断方向と直角に回転が生じるようにした。すなわち、本載荷装置を使用して水平せん断変形を与えた場合は、供試体に曲げ回転とせん断力が同時に作用する。試験は室温において行い、その気温は27~34℃の範囲にあった。写真-2に試験状況を示す。

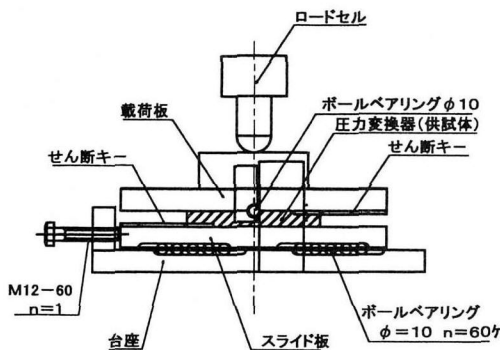


図-14 載荷試験装置

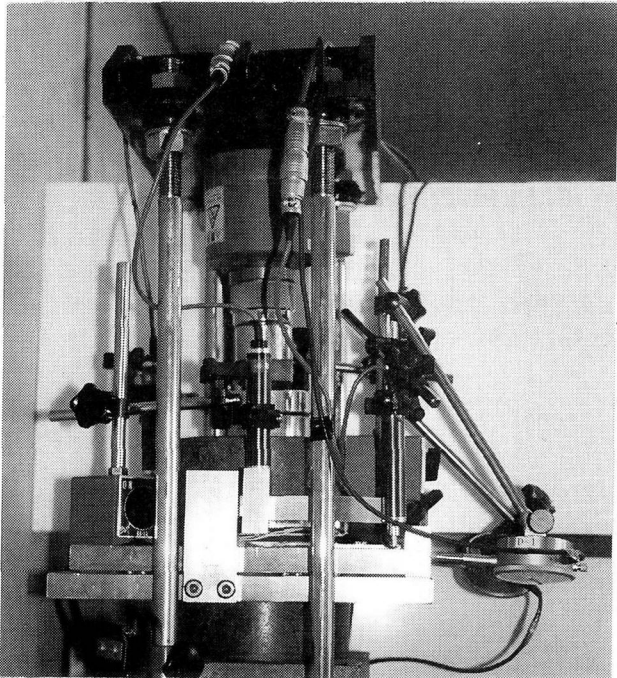


写真-2 載荷試験状況

加圧装置は手動スクリージャッキ (50kN) を使用し、荷重はひずみゲージ式ロードセル (10kN) を用いて計測した。軸方向圧縮変位は、載荷板上面位置において、精度1/1000mmのひずみゲージ式変位計4本を使用して計測した。水平せん断変位は、スライド板の移動量を精度1/100mmのひずみゲージ式変位計2本で計測した。

7.2 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮載荷試験は、表-3に示す、最大荷重、荷重保持時間、荷重制御方法の異なる3種類の試験を実施した。各試験の実施間隔は最低24時間以上を確保した。

表-3 一軸圧縮載荷試験の概要

試験名	最大圧 N/mm ²	Step 数	Cycle 数	Step 間隔	接着 材齢	荷重 制御法
プレ載荷	0.483	5	3	5min	7	一定保持
第1回目	0.966	5	1	1hour	9	一定保持
第2回目	0.483	5	1	5min	11	一定保持
第3回目	0.966	5	1	1day	33	非制御

図-15に、第3回目載荷試験における時間-受圧板ひずみ曲線を示す。この試験は、荷重の制御を行っておらず、各ステップ初頭に所定の荷重を載荷した後は、ゴムの圧縮ひずみの進行に伴い平均支圧応力が減少している。各ステップの後半では気温の日変動に伴う載荷装置の熱伸縮の影響で支圧応力が増加している。

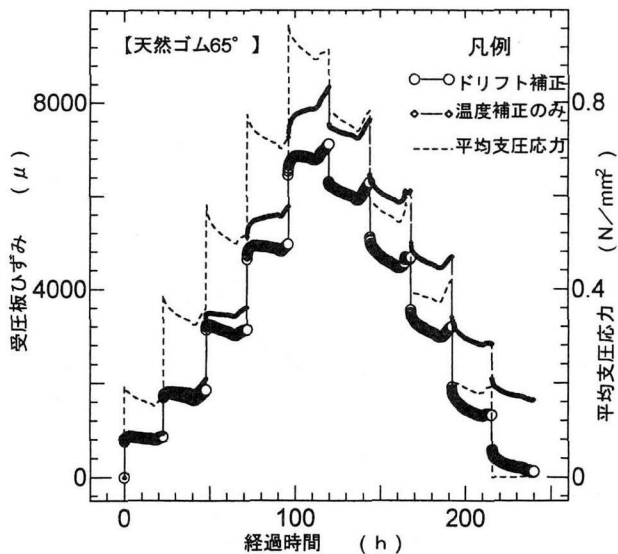


図-15 時間-受圧板ひずみ曲線

受圧板ひずみは大きなドリフトを示している。この時の、平均支圧応力と受圧板ひずみの比 σ_c / ϵ_r を経時的に示したものが図-16である。図中の σ_c / ϵ_r は、荷重増加、除荷過程を通じ経時的に一定の率で減少している。これは一種のドリフトと考えることができ、以下に上げる要因により生じると考える。

【正の要因】

- ①ひずみゲージのクリープ
- ②ひずみゲージカバーフィルムのより (ズレ)
- ③ひずみゲージ接着材の経時劣化とクリープ
- ④ひずみゲージのジュール熱の影響
- ⑤受圧板のクリープ
- ⑥ゴム膨出の粘弾性的遅れ

【負の要因】

- ⑦ゴムの応力緩和
- ⑧積層板接着材の応力緩和

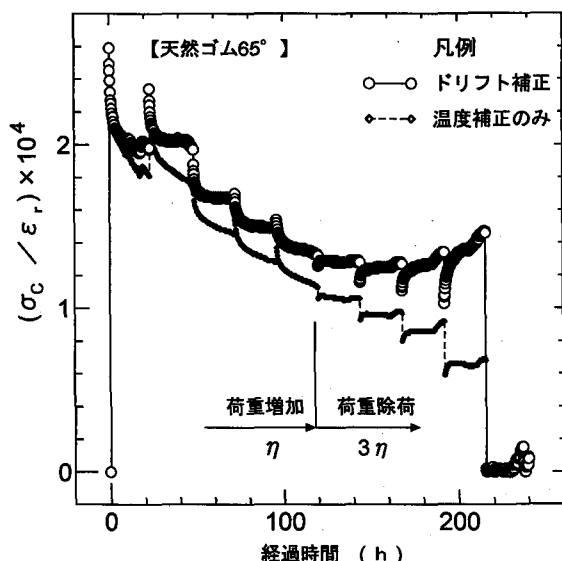


図-16 時間-見掛け弾性曲線

これらの内、①～⑤に起因するものは、限定された試験時間内では時間と荷重の積に1次比例するとみなし、本文ではこれをドリフトと呼ぶこととする。

このドリフトをマックスウェルの粘弾性要素でモデル化し、定応力状態におけるひずみ変動を次式で表す。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_1) + \frac{\sigma_c(t-t_1)}{\eta} \quad (18)$$

ここに $\varepsilon(t)$: 実測ひずみ

$\varepsilon(t_1)$: ドリフトを生じる前の真ひずみ

$\frac{\sigma_c(t-t_1)}{\eta}$: 時間 t_1 から t まで生じるドリフト

σ_c : ここでは、平均支圧応力

η : 粘性率

このとき、⑥に起因するものは、試験時間内で経時的非線形挙動を示すと仮定すれば、式(18)の右辺第2項では相対的に補正されないと考える。

さらに次の4つの仮定条件を加えドリフト補正したものを、図-15、16中にドリフト補正曲線として示す。

【ドリフト補正の仮定】

- ①荷重除荷時の粘性率は、 σ_c/ε_r がほぼ一定に収束するように試行した結果、荷重増加時の3倍とした。
- ②粘性率は試験毎に経時的、履歴的な違いにより異なる値を取る。
- ③粘性率は一試験内で一定値とする。
- ④除荷後一定時間経過すると受圧板ひずみは消失する
- ④の仮定は以下の理由による。

ゴムの軸方向圧縮ひずみを図-17に示す。ゴムは完全弾性体でなく、一般的に大きな圧縮永久ひずみを生じる。積層ゴムに生じる水平方向の膨出も残留するが、支圧力がなくなると膨出圧も消失すると考える。よって、ゴムに水平方向の残留変位があっても、ゴムに比べ受圧板の剛性が大きいので、受圧板はこの影響を受けることなく可逆的な挙動が可能となると考える。ただし、軸圧縮ひずみの分布

が非線形となり受圧板に曲げモーメントが作用することがあるが、これは積層板上下のフランジの剛性を高めることで回避することができる。以上の仮定に基づいて算出した粘性率を図-18に示す。

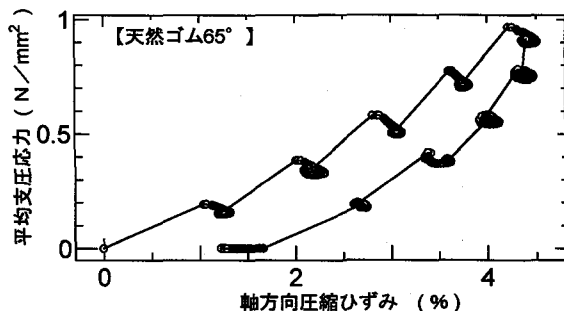


図-17 ゴムの圧縮ひずみ-平均支圧応力曲線

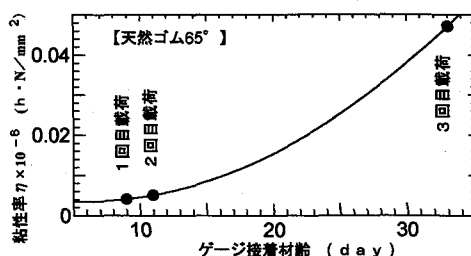


図-18 試作器の接着材齢-粘性率曲線

このような手法によりドリフトを除去した後の平均支圧応力と受圧板ひずみの関係を図-19に示す。1荷重ステップの荷重保持時間は24時間である。各ステップ内での荷重変動に対し弾性的な挙動を示し始めるまでの時間が(図-19中の t_{v_i})、荷重の増加に伴って長くなっている。この時間が、ゴム粘性挙動の実用上の収束点と考えることができ、荷重変換器としての応答時間となる。最終荷重段階では収束しておらず、応答時間は24時間を超えるが、有限の時間内で実用上の収束はあり得る。

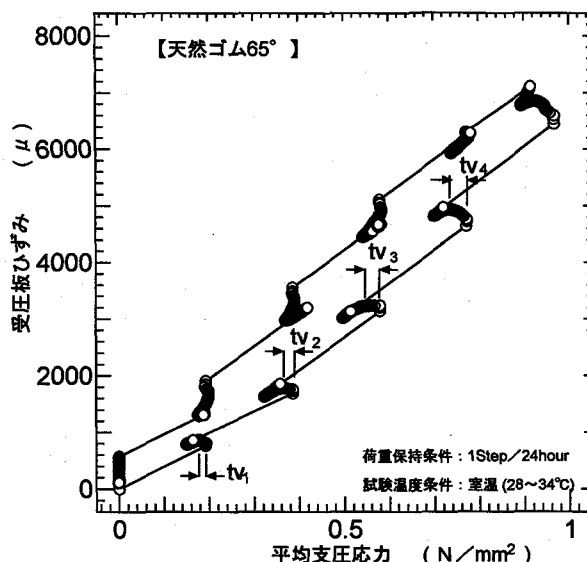


図-19 平均支圧応力-受圧板ひずみ曲線

これらより本荷重変換器は、荷重応答は遅く、一般の荷重変換器のような用法はできないが、橋梁の死荷重や、均衡状態にある土圧等の、荷重変動の少ない荷重計測に適用できる。

次に、ゴムの変形は荷重の履歴の影響を受ける。これが受圧板ひずみにどのように影響するか確認するため、複数の載荷試験を実施した。各々の平均支圧応力と受圧板ひずみの関係を図-20に示す。

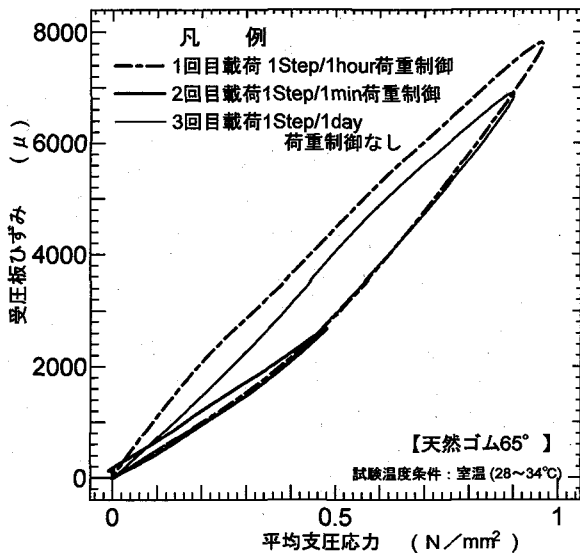


図-20 受圧板ひずみ特性における載荷履歴の影響

荷重増加時のひずみ挙動は再現性があり荷重変換器の信頼性は確保できる。それに対し、除荷時のひずみ値は各試験で異なる。これは、載荷速度、履歴等の影響によるものと考えられる。ただし、ドリフト量は時間と荷重の積に1次比例するとした仮定に含まれる誤差も上記に含まれている。いずれにしても、除荷過程の経路は載荷過程と異なるので、荷重変動の大きい計測には不向きとなり、死荷重反力に対する活荷重反力の比が小さな橋梁もしくは、共用開始前の死荷重のみの反力測定等に使用法が限定される。

7.3 曲げを伴う水平せん断試験

水平せん断試験は、強度の異なる平均支圧応力 0.24, 0.48, 0.72 N/mm² を各々1時間一定保持した後に、ゴム総厚 Σt_R の25% (曲げ回転に伴う先端底部の浮上りが生じない程度) のせん断変形を与える水平力を5段階に分けて載除荷した。各段階の保持時間は5分間とした。せん断方向は受圧板の1対のひずみゲージ方向と一致させてある。図-21に、載荷時間と受圧板各部のひずみの関係を示す。せん断に伴う曲げの影響で、ゴムの縦ひずみ (σ_z 方向) が圧縮となる縁は受圧板半径方向のひずみが増大し、引っ張りとなる縁では受圧板ひずみが減少している。これらのひずみの相殺により、曲げ回転に対する補償ができる。

図-21のひずみの平均値と、せん断変位量 δh と Σt_R の比 (以下、せん断変形比) との相関を図-22に示す。各荷重レベルにおいて曲げを伴うせん断変形を与えても

受圧板ひずみの変動がなく、圧縮荷重の検知ができる。

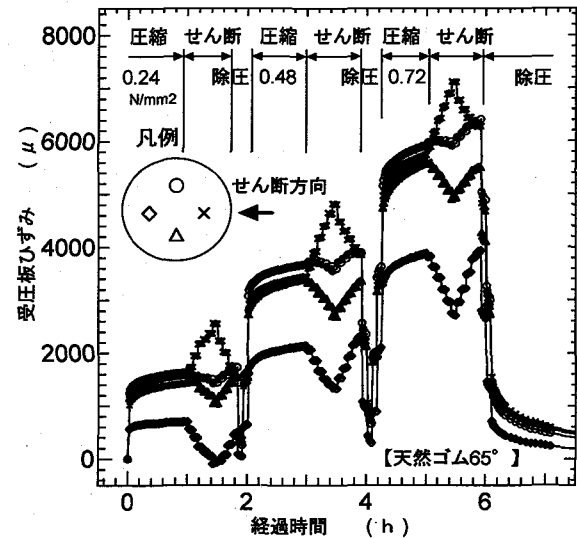


図-21 時間-受圧板ひずみ曲線 (水平せん断試験)

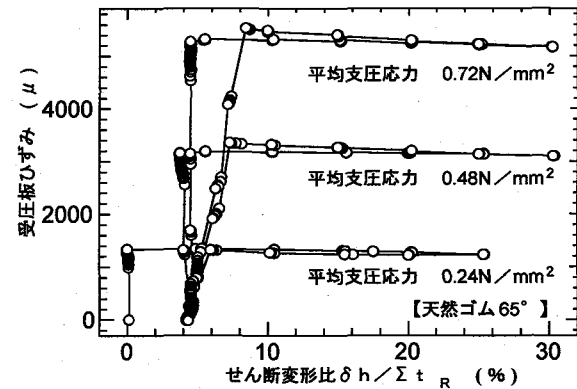


図-22 せん断変形比-受圧板ひずみ曲線

上記ひずみは、せん断変形の増加に伴い若干のひずみ減少が見られる。この減少は、せん断方向に対し直角に位置するゲージにも認められる。原因としてゲージに面内せん断ひずみが生じたことも考えられる。しかし、直角方向のゲージは、同じ面内せん断変形を生じたとしても横感度が小さいので、せん断方向のゲージと同じレベルでのひずみ変動は示さないと考えられるならば、この挙動を面内せん断の影響とするのは不合理となる。この減少を考えると、供試体の水平変位とゴムの圧縮ひずみの関係は着目に値する。この関係を図-23に示す。

水平せん断変形時における軸方向圧縮変形量は、せん断変形の増大に伴い減少し、せん断変形の復元と伴に増大している。言い換えると、せん断変形の進行により体積膨張が生じ、復元により体積収縮が生じている。上述の受圧板のひずみ変動は、せん断変形の一部がせん断の直角方向に転じたことに連動して生じたものと考えられることができる。

水平せん断変形時には、有効支圧面積の減少に伴う面圧増加による圧縮ひずみの増加がある。さらにせん断による幾何学的な断面高さの落ち込みもあるので、せん断に伴い

ゴムの見かけの圧縮量は増加するのが一般的である。本実験はこれと異なる結果を示した。この原因は、面圧が実用のゴム支承の1/10と低レベルであったことによるものと考えられる。

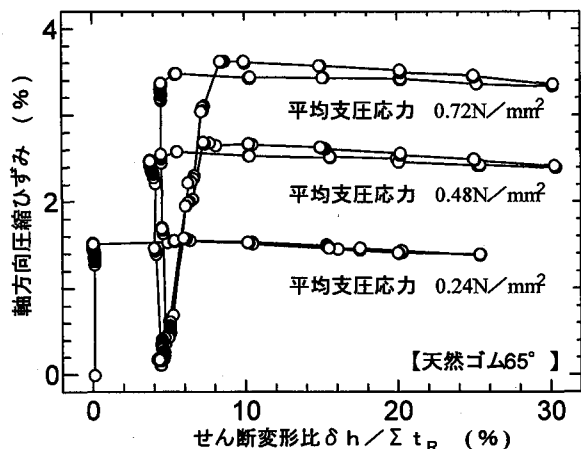


図-2.3 せん断変形比-軸方向圧縮ひずみ曲線

7.4 ひずみ計測技術の問題点

本試作器の出力は、大きなドリフト量を含んでいる。これはひずみ計測技術上の問題に起因するものである。この要因を挙げると以下のものがある。

- ① ゲージ上下の積層構造の違いに起因する問題
- ② ゲージ接着技術の問題 (主に耐久性)
- ③ ゲージのジュール熱の問題

①は専用のゲージを開発 (製作) することが必要となる。
②は適正な接着剤の選定と貼り付け技術の向上で対処できる。③については、ゲージの周囲を熱伝導率の低いゴムで直接覆うので、無視できない問題である。今回の実験では、発熱の影響が出ないように連続モニター (電圧印加) を回避している。今後は、ゴムと受圧板の接着に放熱シリコン等の熱伝導率の大きな材料を使用して、ジュール熱の拡散を図る対策が必要となる。

8. 結論

弾性理論に立脚するとゴムと金属からなる積層板に作用する圧縮力が、中間積層板のひずみで検知できる。しかしながらゴムは完全弾性体でなく、弾性と塑性の2面を有する。さらに、ゴムは弾性と粘性を共有するので、力学的な負荷に対して応答の遅れを生じる。積層ゴムを荷重センサーの本体構造とする場合、このようなゴムの材料特性が精度および信頼性にどのように影響するか検証を行った。その結果は以下のとおりである。

(1) 本荷重変換器の出力には、ひずみ計測技術の問題より大きなドリフトが含まれる。これは、ひずみゲージの積層構造に起因する問題を解決する必要がある。本論文では、これを時間と荷重の積に1次比例するとして数値的に除去した。その結果、ゴムの粘弾性的な挙動は有限の時間内で実用上収束することを確認した。硬さ 65° の天然ゴ

ムを用いた本試作器の場合、1.0N/mm²の面圧レベルでの応答速度は1日程度である。荷重増加過程における荷重変換器としての信頼性は実用のレベルにある。除荷過程におけるひずみ出力は、荷重履歴、載荷速度の影響を受け、荷重変換器としての信頼性が劣る。以上を総合すると、以下に挙げる使用条件に限り、荷重センサーとしての適用が可能である。

- ① 橋梁死荷重反力等の荷重変動の緩慢なもの
- ② 均衡状態にある土圧など

(2) 曲げおよび曲げを伴うせん断変形に対しては、曲げにより生じるゴム・ブロック縦方向の軸力 σ_z の影響で直角方向の受圧板に面内軸力 σ_x が生じる。 σ_z は中心軸に対して正負の対象分布を示す。これにより σ_x も、符号が正負異なり絶対値が中心点对称の分布となる。よって、受圧板のひずみ検出において、中心を基点とする点对称位置のひずみの和を求めると、曲げ変形の影響を消去することが可能となる。試作器にゴム総厚の25%に相当する水平せん断変形作用させた結果、その影響を確実に補償することができることを確認した。このとき、ゴムに鉛直方向のひずみ変動が生じ、これに伴い受圧板のひずみが若干変動した。これは低レベルの面圧下でのせん断挙動と推定する。ただし、有効載荷面積の減少が無視できない大せん断変形時においては、上記のかぎりでない。

9. おわりに

著者は過去に、有効面圧不足を原因とした橋梁ゴム支承の滑動事故を経験している。これは、事前に面圧のモニターが可能であったならば防ぎ得た事故であった。この時の体験を契機に、荷重検知機構付加型のゴム支承を開発してきた。現在、ゴム接着技術及びひずみ計測技術の未熟により、橋梁支承級の面圧レベルに到達していないが、本研究成果を元に、より実用的な荷重検知機構付加型のゴム支承を開発して行くとともに、土圧計としての本荷重変換機構の適応性も研究して行く予定である。

参考文献

- 1) 宮下秀樹：平成11年度特許出願第074858号，1999。
- 2) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，pp.151-168，
- 3) Gent, A.N., Lindley, P.B. : The Compression of Bonded Rubber Blocks, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 173, No. 3, pp. 111-122, 1959.
- 4) Gent, A.N., Henry, R.L., Roxbury, M.L. : Interfacial Stresses for Bonded Rubber Blocks in Compression and Shear, Journal of Applied Mechanics, Dec., pp. 855-859, 1974.
- 5) Gent, A.N., Meinecke, E.A. : Compression, Bending, and Shear for Bonded Rubber Blocks, Polymer Engineering and Science, Vol. 10, No. 1, Jan., pp. 48-53, 1970.
- 6) 多田秀之 他：4秒免震への道，理工図書，pp. 206-208, 1995.
- 7) 戸原春彦：防振ゴム，現代工学社，pp. 97-107, 1975.
- 8) 久保亮五：ゴム弾性 (初版復刻版)，裳華房，pp. 26-47, 1996.

(1999年9月17日受付)