

軌道パッドの圧縮変形特性

Compression Characteristics of Rubber Pads

片岡 武*
Takeshi Kataoka

福田 重穂*
Shigeho Fukuda

水野 担三郎**
Tanzaburô Mizuno

要 旨

ゴム板はその表面に溝(みぞ)をつけて、圧縮荷重をささえながら防振目的で使われることが多い。今回は、レールの防振支持に使われる軌道パッドの圧縮変形特性と溝断面積の関係を検討した。

実験の結果、溝の断面積が小さければ圧縮変形曲線の立上りが小さな変形量で生じ、高荷重域で曲線の傾きは大きくなるのが定量的に明らかになり、従来、経験的に行なわれていた軌道パッドの特性解明に有効な指標を得ることができた。

1. 緒 言

防振を目的にしたゴム板は防振マット、防振パッドなどと呼ばれ、表面に溝を設けて適当な圧縮変形特性を与えて、建築構造物、重量機械、測定器、レールなどの防振支持に簡便に使える利点がある。今回は、これらのうちからレール支持に使われる防振ゴム板、すなわち軌道パッドを取り上げ、その圧縮変形特性について検討した。

列車が通過するとき軌道には500～1,000 cpsの高周波振動が発生して、軌道の劣化に大きな影響を与えるといわれている⁽¹⁾。ゴム材料は高周波振動のしゃ断にすぐれているので、図1のようにレールの下に軌道パッドを入れてレールを弾性締結する方法が広く採用されている⁽¹⁾。弾性締結の良し悪しは使われる軌道パッドの圧縮変形特性が設計どおりのものであるかどうかによって依存するところが多い。この圧縮変形特性は軌道パッド表面につける溝の寸法、数によって加減できることが経験的に知られているが、一般的考察⁽²⁾はきわめて少ない。

本報では、軌道パッドの圧縮変形曲線を解析して、見掛けのバネ定数、ヤング率を溝断面積で整理して、有効な規則性を見いだすことができた。実験結果とこれを使って所望する圧縮変形曲線を得るのに必要な軌道パッドを設計する方法について以下に述べる。

2. 実 験 方 法

2.1 実 験 試 料

軌道パッドの溝と圧縮変形曲線の関係を知るための実験に使った軌道パッドの寸法を図2に、溝の形状寸法と片面の溝本数を図3に示した。1枚の軌道パッドでは同一の形状の溝を表裏同数付けることにして、大部分は6本ずつにした。形状Aについてのみ溝が4本と5本のものも作り、別にD、Eと呼ぶことにした。それで、溝の形状は13種類であるが、軌道パッドはA～Oの総計15種類になった。ゴム材料はかたさ71のクロロブレン配合を用いて、ゴム練りロールから板状に取り出したゴムを切って溝形状が異なる各種の金型内に詰め、熱板プレス加硫を行なって、実験用軌道パッドを製作した。

2.2 圧 縮 変 形 試 験

圧縮変形試験は日本国有鉄道仕様書⁽³⁾(仕様と略す)に従って行なわれた。すなわち、図4に示す測定器具を使って、次のような要領で行なった。

- (1) 初めに20 tまで荷重を1回加えて、荷重を完全に0 tまで戻し、次に荷重を4 tまで加えたのち1 tに戻す。そのとき

* 日立電線株式会社研究所

** 日立電線株式会社電線工場

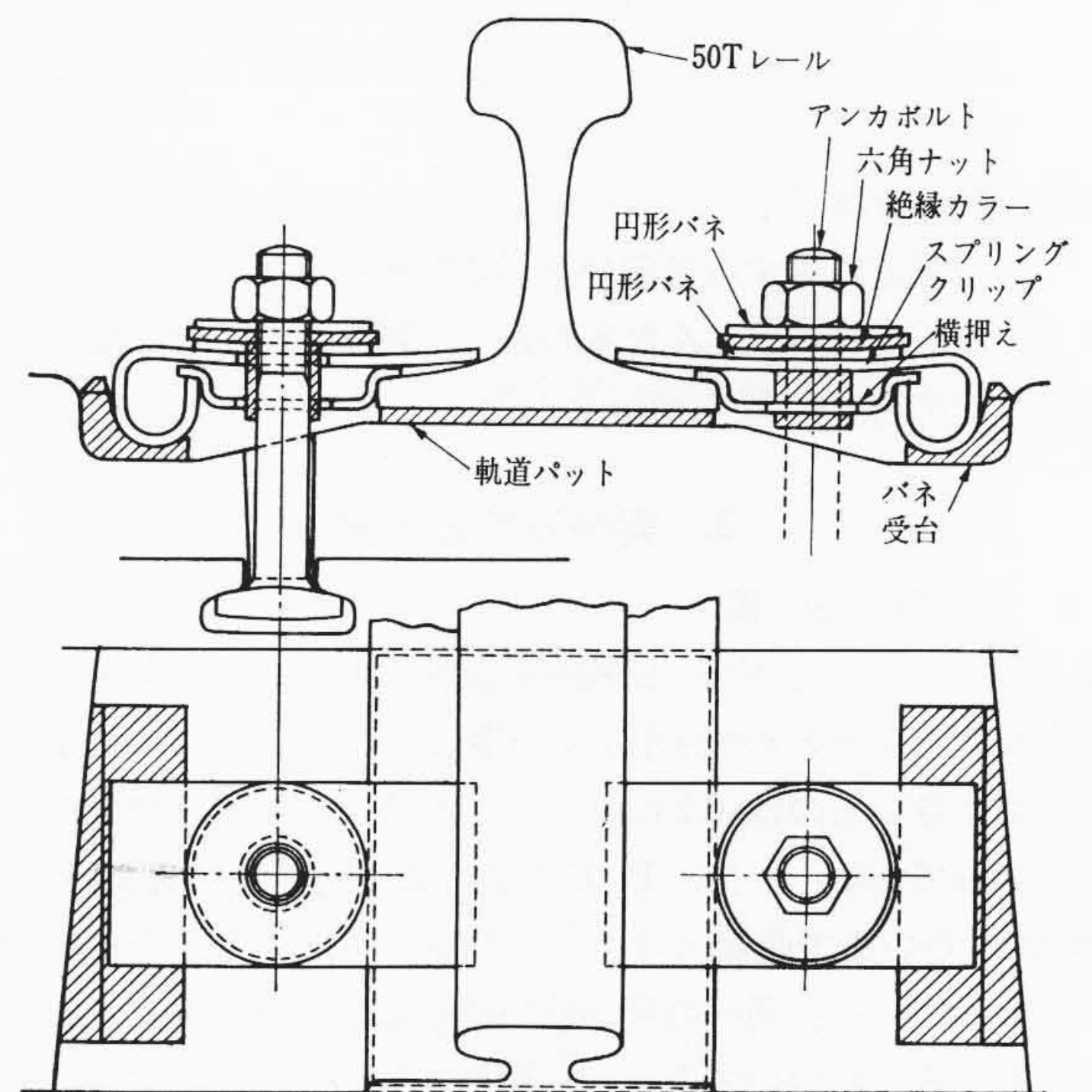


図1 新幹線レール締結装置(103形)

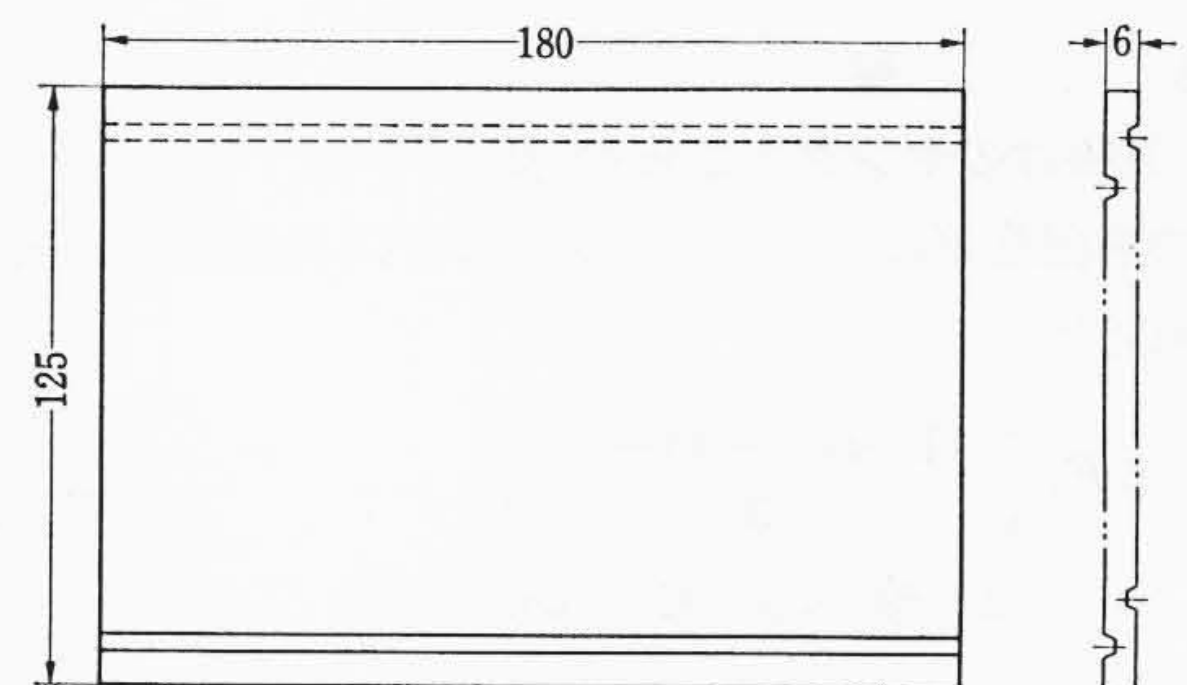
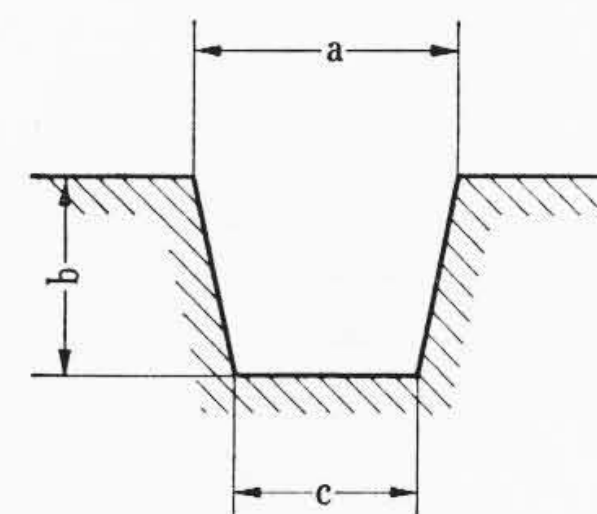


図2 実験用軌道パッドの寸法



溝の名称 項目	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
a	3.1	5.1	5.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	4.1	3.5	2.7	4.3	3.5	2.7
b	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2.6	2.1	1.6	1.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
c	2.6	4.6	2.6	2.6	2.6	2.8	2.9	3.1	3.2	3.8	3.0	2.2	2.6	2.6	2.6
溝 本 数	6	6	6	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

図3 実験用軌道パッドの溝寸法と溝本数

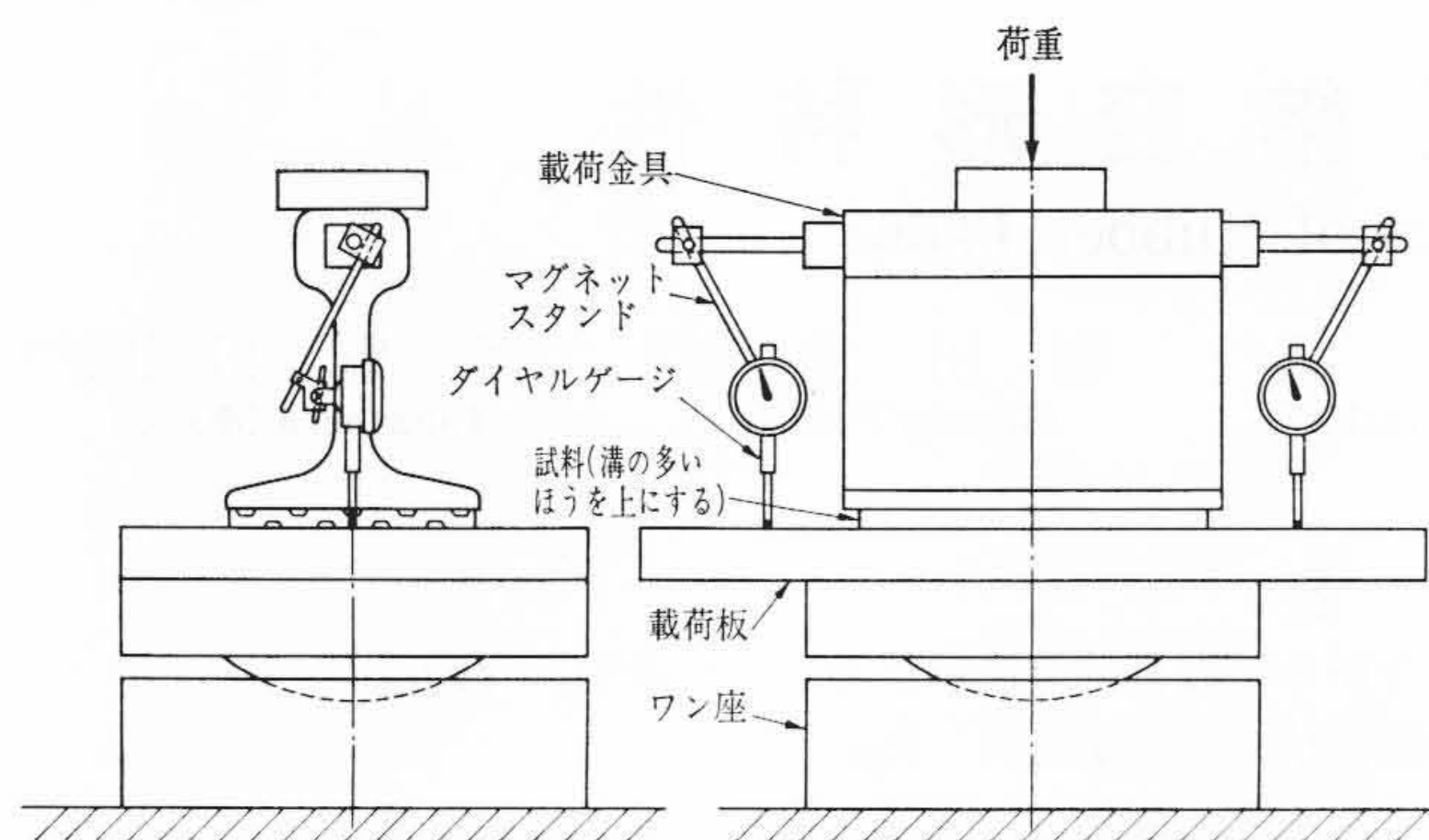


図4 圧縮変形試験法

にダイヤルゲージの目盛をゼロに合わせて逐次30 t まで荷重を増加させていくときの変形量を測定して圧縮変形曲線を得た。

- (2) 変形量はダイヤルゲージ2個の平均値をもって表わし、同一荷重に対する目盛の差が0.3 mm を越えるときは試験条件が不じゅうぶんなものとして再試験を行なった。
- (3) 荷重速度は10 t/min とした。

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果

15種類の軌道パッドで、圧縮変形試験をして求めた荷重上昇時の圧縮変形曲線をまとめて示したのが図5である。H, Iのように溝断面積が小さいものは0.2 mm くらいの小さな変形量で曲線は急に立ち上がっている。一方、B, Cのように溝断面積の大きいものは、1.0 mm くらいまで曲線はゆっくり増加していった、その後急激に立ち上がっている。同一の溝形状で溝の本数を4, 5, 6本に変えたD, E, A, についてみると、溝の本数が多くなるにつれて同一荷重で変形量は大きくなっている。それぞれの曲線はLを除いては他の曲線と交わることなく、きれいに間隔を置いた場所を占めている。

3.2 考察

3.2.1 見掛けのヤング率からの考察

ゴムの有限変形についての応力—ひずみの関係は一般に次式で与えられる⁽²⁾。

$$\sigma = E_{ap} \left\{ \frac{(1-\varepsilon)^{-2} - (1-\varepsilon)}{3} \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

σ : 圧縮応力 (kg/mm²)

ε : 圧縮ひずみ

E_{ap} : 見掛けのヤング率 (kg/mm²)

$$\sigma = \frac{P}{A_L} \times 1,000 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h} \quad \dots\dots\dots (3)$$

P : 圧縮荷重 (t)

A_L : 受圧面積 (mm²)

δ : 圧縮変形量 (mm)

h : ゴム厚 (mm)

軌道パッドの受圧面積 A_L は、溝の部分差し引いて次のようになる。

$$A_L = (W - na) \times L \quad \dots\dots\dots (4)$$

W : 軌道パッドの幅 (mm)

L : 軌道パッドの長さ (mm)

a : 溝の上部寸法 (mm)

n : 軌道パッド片面の溝本数

また、軌道パッドの圧縮変形曲線は図5のように1 tの荷重を加えた状態を起点として変形量を測定している。荷重1 tが加わったときの軌道パッドの変形量を δ_1 とすれば、 δ_1 は軌道パッドの圧縮変形曲線によって異なった値を取り、かつ、小さな値であるから、たくさんの軌道パッドについての一般的な考察を容易にするため、ここでは $\delta_1=0$ と仮定する。それで、(2)式で P を $P-1$ に置き替えて(1)式を変形すれば、軌道パッドの見掛けのヤング率 E_{ap} は次式で与えられる。

$$E_{ap} = \frac{P-1}{A_L} \times \left\{ \frac{3}{(1-\varepsilon)^{-2} - (1-\varepsilon)} \right\} \times 1,000 \quad \dots\dots\dots (5)$$

次に圧縮による軌道パッドの変形の様子を考えてみて、圧縮前後でゴムの体積は不変で、圧縮荷重によって生ずる軌道パッドの変形は溝部分の体積のみが小さくなっていくためであると仮定する。理論上、溝の体積がゼロになるときの変形量を臨界変形量 δ_c と呼べば、次の関係が得られる。

$$W \times \delta_c \times L = V_g \times L$$

$$\delta_c = \frac{V_g}{W} \quad \dots\dots\dots (6)$$

V_g : 溝の総断面積 (溝1個の断面積×溝の総本数)

ひずみになおして、理論上の臨界ひずみ ε_c は次のようになる。

$$\varepsilon_c = \frac{V_g}{Wh} \quad \dots\dots\dots (7)$$

理論上は、圧縮ひずみが ε_c になれば溝は消失して軌道パッド

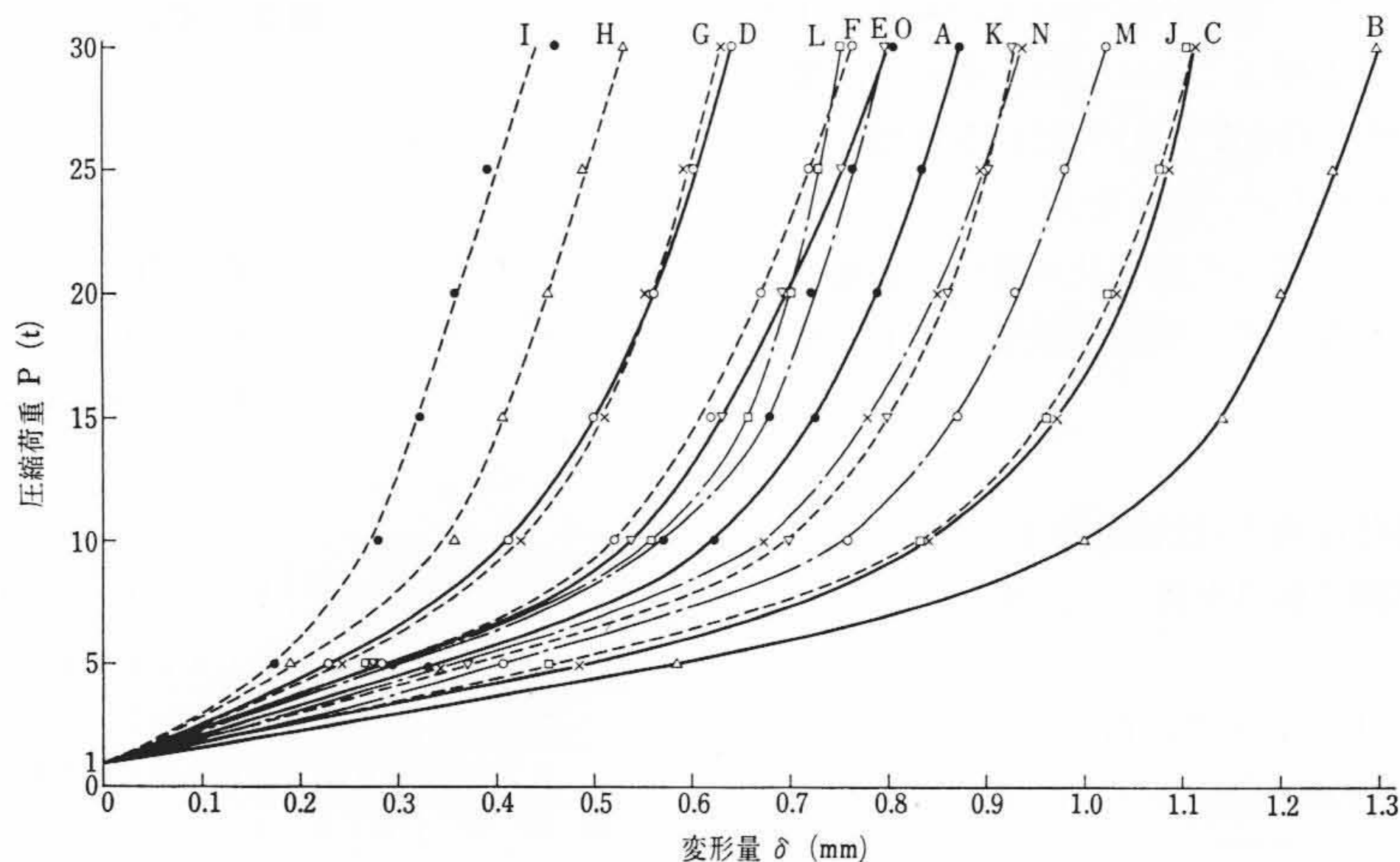


図5 圧縮変形曲線

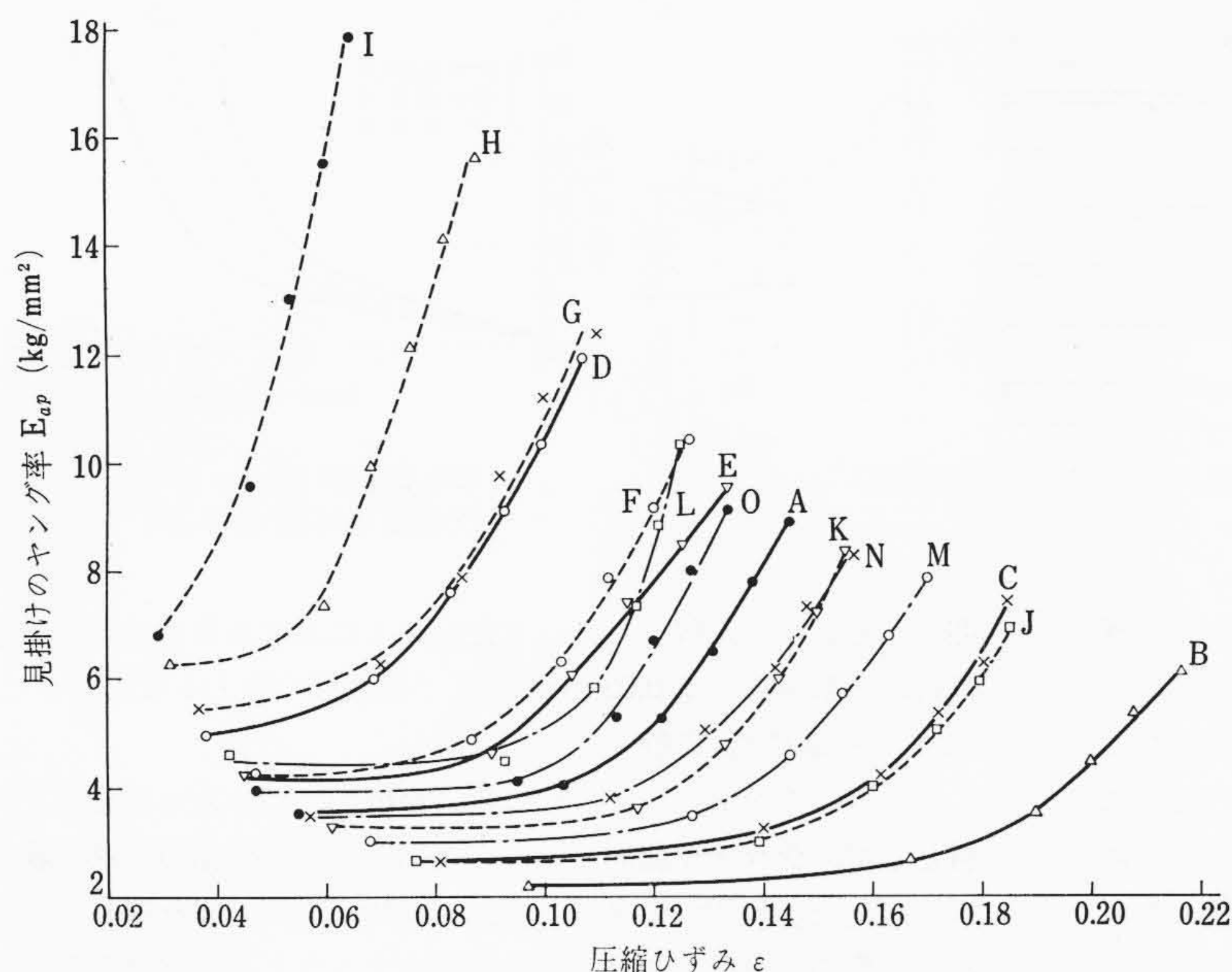


図6 見掛けのヤング率と圧縮ひずみ

は自由表面積の小さい板状になるため、見掛けのヤング率 E_{ap} は急増し始めるはずである。けれども、実際の軌道パッドでは溝の体積がゼロになることはなく、そのうえ、溝の体積がある程度小さくなったところから E_{ap} が急増していくことが予想される。以上のことを考慮に入れて(7)式を補正すると、実際の軌道パッドの臨界ひずみ ϵ_c' は次のようになる。

$$\epsilon_c' = \gamma \times \frac{V_g}{Wh} \dots\dots\dots (8)$$

ϵ_c' : 軌道パッドの臨界ひずみ

γ : 定数

実験で求めた図5の各圧縮曲線の荷重 P と変形量 δ の値を(3)～(5)式に代入して、 E_{ap} と ϵ の関係を求めたのが図6である。I, Hのように小さなひずみ領域で大きな E_{ap} をとるものもあるが、大部分の溝形状のものは小さなひずみ領域で E_{ap} はひずみに関係のない一定値を取り、その後ひずみの増加につれて大きな値をとっていく傾向にある。中間的な変形曲線を持つ溝形状0に関するデータを取り出して示したのが図7であるが、 $E_{ap} \sim \epsilon$ の関係は交差する二本の直線で近似できる。この交差する点が前述の軌道パッドの臨界ひずみ ϵ_c' に相当し、 ϵ_c' 以下のひずみ領域ではひずみに無関係な一定の見掛けのヤング率 E_{apc} を持ち、 ϵ_c' 以上にひずみが増加すれば E_{ap} は直線的に増していくのが示されている。(8)式が成立つものとするれば、実験結果から求められる ϵ_c' と溝の総断面積 V_g の間には比例関係があるはずである。そこで、図6のそれぞれの曲線を図7のように直線近似して ϵ_c' を求め、各溝の総断面積 V_g との関係をもとめたのが図8である。なお、I, Hのように E_{apc} が不めいりような場合は、実験での最小荷重、5tのときの E_{ap} を E_{apc} として ϵ_c' を求めた。図8でデータは1本の直線によって、きれいな直線関係が得られた。この直線の傾きから(8)式の定数 γ を求めると、 $\gamma=0.77$ になる。すなわち、溝の体積の約80%に相当する分だけ軌道パッドが圧縮されたときから、見掛けのヤング率は大きくなり始めると解釈できる。

3.2.2 見掛けのバネ定数からの考察

先に見掛けのヤング率に注目して、臨界ひずみ付近の小さなひずみ領域、すなわち低荷重域での溝形状と圧縮変形曲線との関係を求めた。次に圧縮変形曲線の高荷重域での性質と溝の関係を求めるために見掛けのバネ定数に着目して考察してみる。

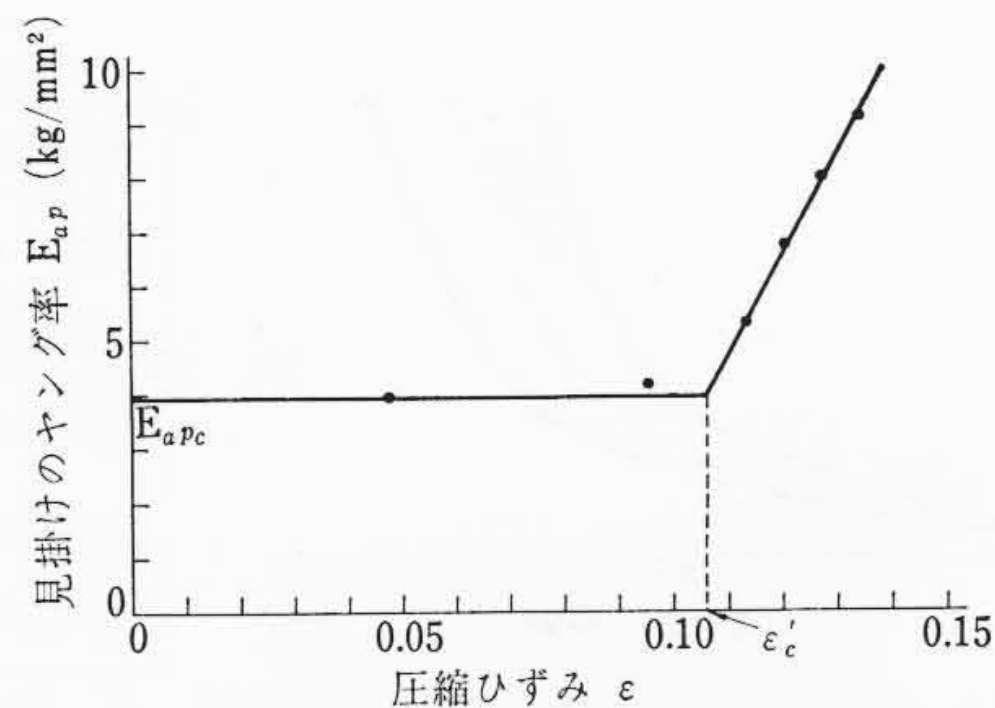


図7 見掛けのヤング率と圧縮ひずみの直線近似(溝の名称:0)

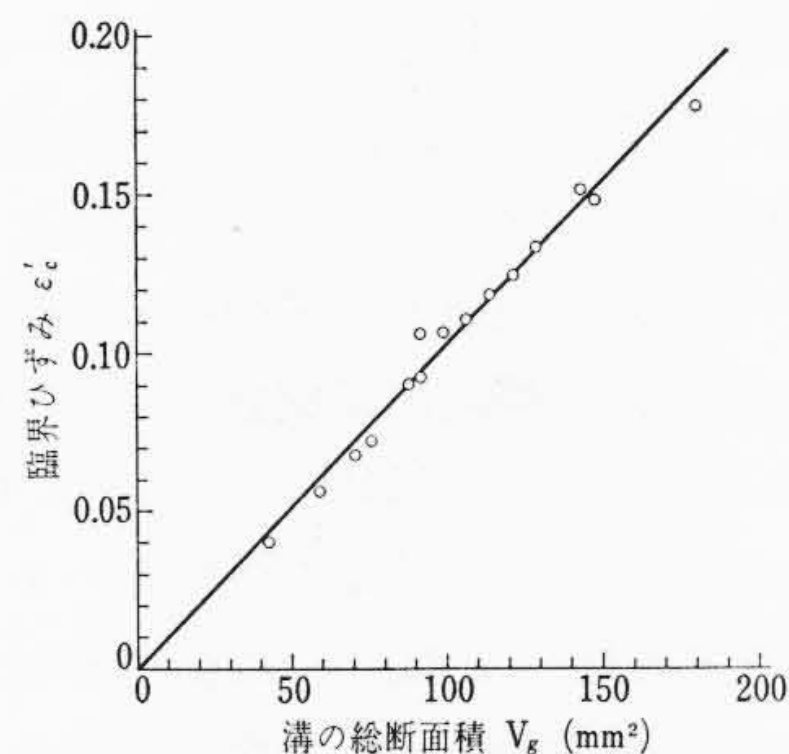


図8 臨界ひずみと溝の総断面積

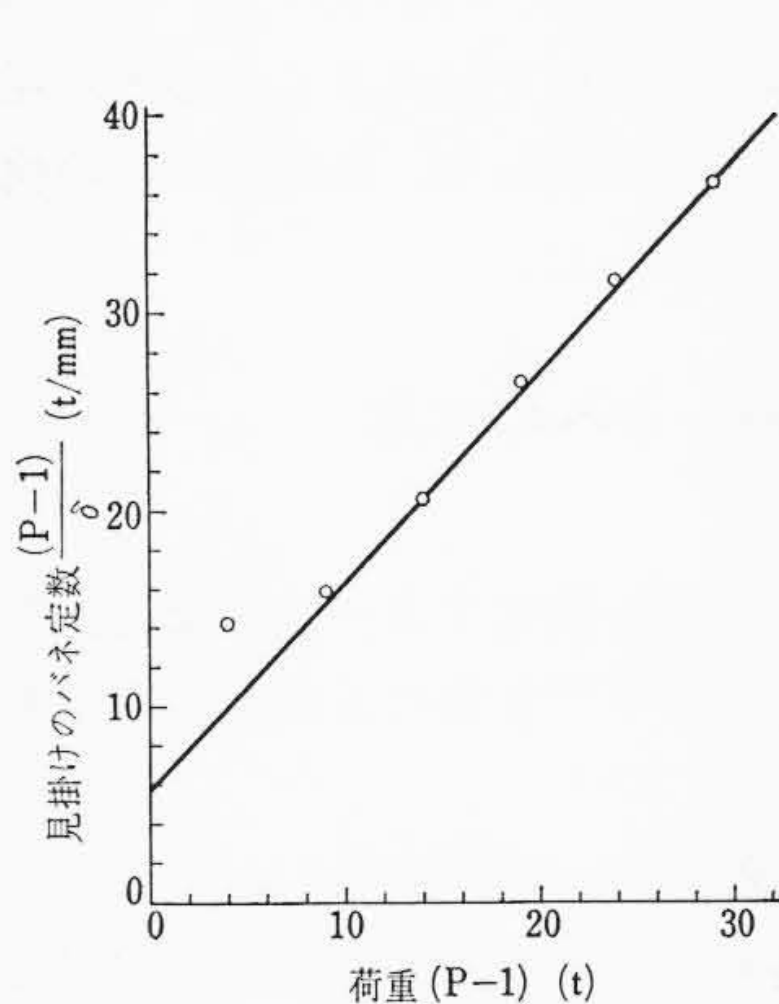
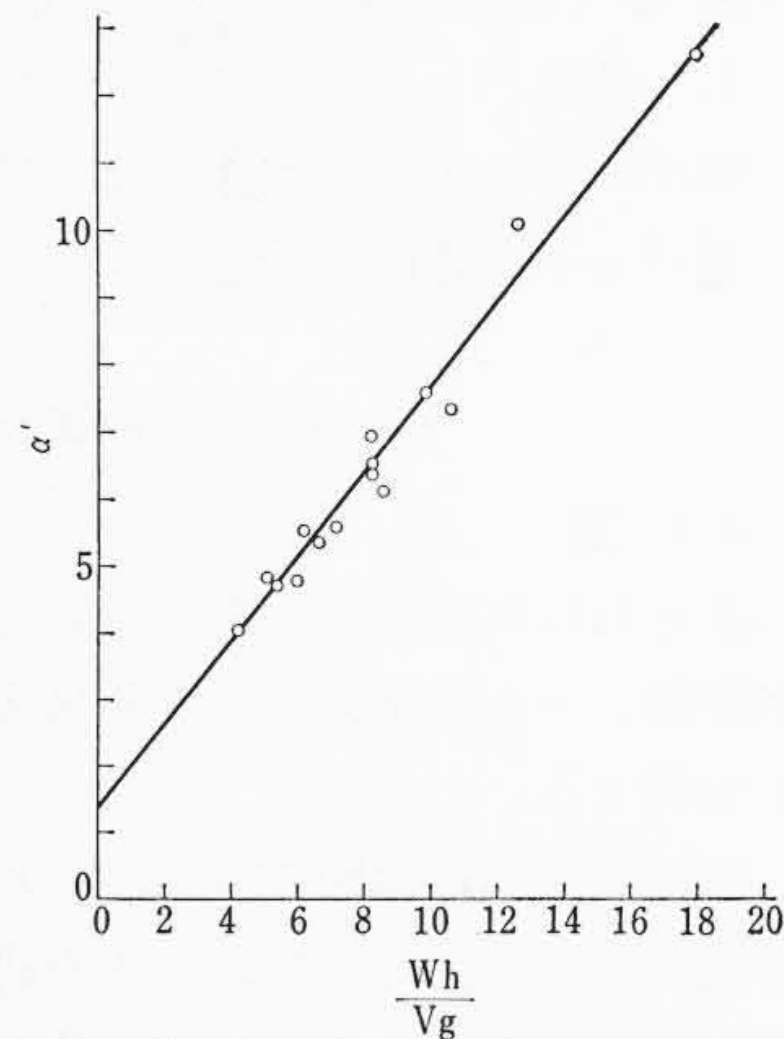


図9 見掛けのバネ定数と荷重(溝の名称:0)

図10 α' と $\frac{Wh}{V_g}$

車端部に取り付けられるゴム緩衝器は圧縮変形量が大きく、見掛けのバネ定数と荷重の間には次の近似式が成り立つといわれている⁽⁴⁾。

$$\frac{P}{\delta} = \alpha P + \beta \dots\dots\dots (9)$$

α, β : 定数

一方、軌道パッドの圧縮変形量は小さいが、その圧縮変形曲線の非線性がゴム緩衝器のものに類似しているため、軌道パッドの場合にも、次の関係式が成り立つと考えられる。

$$\frac{P-1}{\delta} = \alpha(P-1) + \beta \dots\dots\dots (10)$$

ここで

$$\left. \begin{array}{l} \alpha h = \alpha' \\ \beta h = \beta' \end{array} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

と置いて、(11)式を(10)式に代入すれば次のようになる。

$$\frac{P-1}{\delta} = \frac{\alpha'}{h} (P-1) + \frac{\beta'}{h} \dots\dots\dots (12)$$

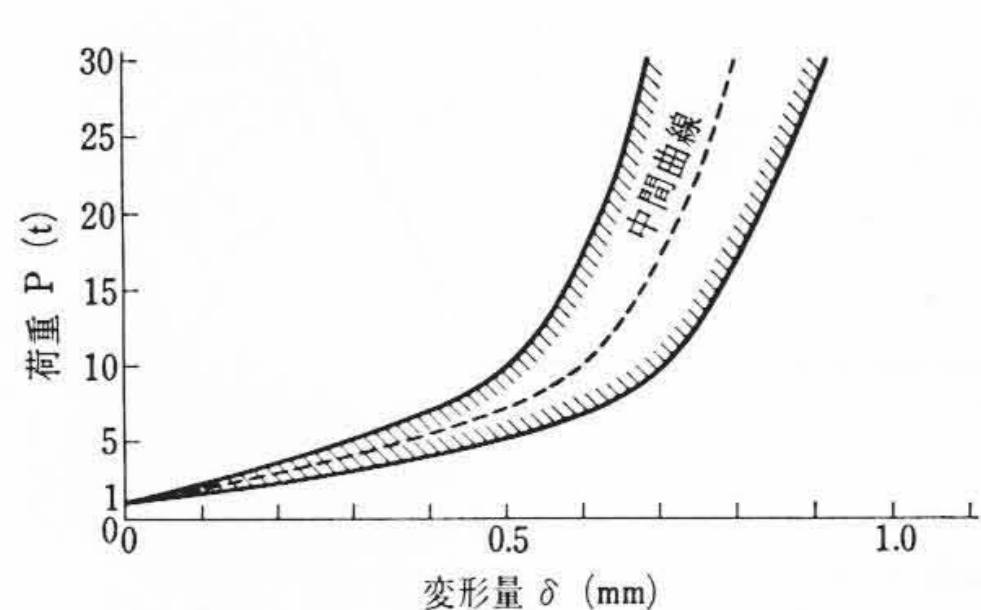


図 11 圧縮変形曲線の仕様範囲 (103 形)

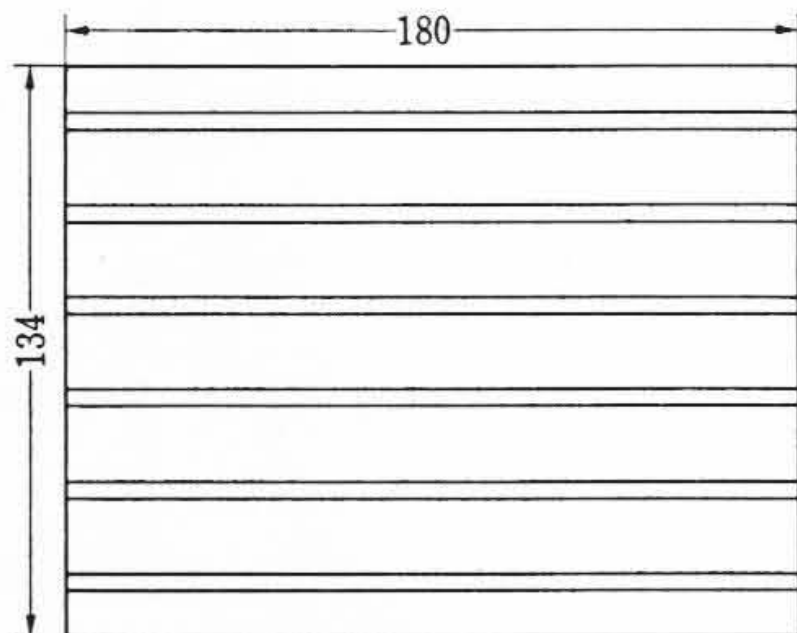
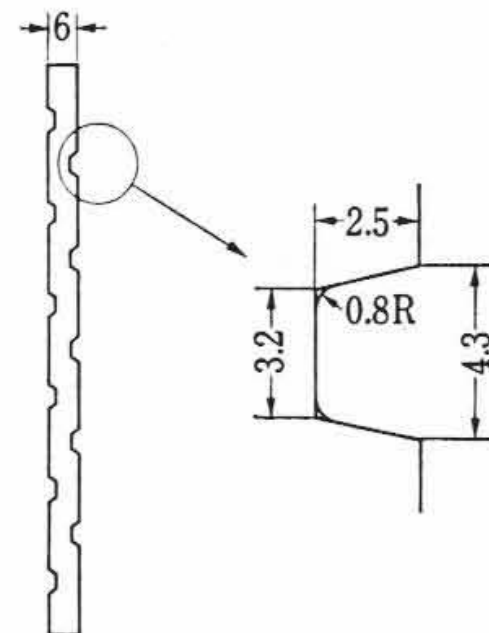


図 12 試作軌道パッド (103 形)

図 13 試作軌道パッドの
圧縮変形特性 (103 形)

(12)式にみるように、 α' は無次元化されて、軌道パッドの厚さが変わった場合も総括して取り扱える一般性のある定数になっている。先の場合と同様に、中間の変形曲線を示した溝形状0について、見掛けのバネ定数と荷重の関係を求めると図9のようになる。このように、軌道パッドの場合も高荷重域で見掛けのバネ定数と荷重の間に直線関係が成立するのが確認された。図9から求めた直線の傾き α を(11)式に代入して α' を求めることができる。このような方法で、図5の各軌道パッドの変形曲線からおのの α' を求めた。また、 β' は軌道パッドの場合は曲線の特徴づけるのにあまり重要な因子でないと考えられたので考察は省略した。ここで、溝に関係した因子として(7)式の臨界ひずみの逆数 $\frac{Wh}{V_g}$ に着目して、15種類の軌道パッドの α' を整理したものが図10である。 α' と $\frac{Wh}{V_g}$ の間には直線関係が得られた。すなわち、軌道パッドで溝に対するゴムの断面積比が大きくなると、見掛けのバネ定数は大きくなっていくのがわかり、高荷重域での軌道パッドの特性を予想できるようになった。

4. 新幹線用軌道パッドへの応用

4.1 設 計 法

与えられた圧縮変形曲線を満足する溝を決定する一般的な方法を新幹線レール締結装置 103 形用軌道パッド⁽³⁾を例にとって要点のみを説明する。

圧縮変形曲線は図11の2本の実線で示した曲線内にはいるように設計したい。ここで、2本の曲線の平均を求め、この中間曲線を満足する溝形状を求めれば、仕様をじゅうぶん満足すると推定された。溝形状の設計手順は二つの方法から構成されている。最初に見掛けのバネ定数と溝断面積の関係からおおざっぱな見当をつけ、次にこの見当を足がかりにして臨界ひずみと溝断面積の関係から溝の寸法を最終的に決定する。図11の中間曲線を解析して求めた見掛けのバネ定数から $\alpha'=7.06$ となる。先に求めた図10を使って、 α' から溝の総断面積は $V_g=93.8 \text{ mm}^2$ になる。軌道パッドの1本の溝形状は、台形断面で底面の角に $0.5 R$ くらいつけたものが集中応力を減らすのに有効であるといわれている⁽²⁾。今回も溝形状を台形にして、底面に $0.8 R$ をつけることにすれば、溝の上部寸法は $a=4.11 \text{ mm}$ と見当づけられる。この $a=4.11 \text{ mm}$ を使って、軌道パッドの見掛けのヤング率 E_{ap} から臨界ひずみを求めると $\epsilon_c'=0.097$ になり、前述の(8)式から $V_g=102.15 \text{ mm}^2$ となり、 $a=4.29 \text{ mm}$ と求められる。それで、今回は溝の上部寸法を $a=4.30 \text{ mm}$ にして、図12のように軌道パッドを設計して試作することにした。

4.2 試作品の試験結果

(1) 圧縮変形試験

図4の試験装置を用いて試作軌道パッドの変形量を測定した。図13はその結果である。測定値は高荷重域で設計値よりも若干小さな変形量を示しているがほぼ満足すべき結果になり、仕様範

囲内にじゅうぶん収まった。また、15 tにおける荷重上昇時と下降時の変形量の差も0.03 mm程度で仕様値の約1/4に収まった。

(2) 屈曲疲労試験

軌道パッドを溝の条に直角に25.4 mm幅に切りとった短冊を試料として、デマチャ屈曲試験機⁽⁵⁾で引っ張り、圧縮の屈曲を繰り返し与えた。仕様で定められている10,000回の繰り返しで、全試料は亀裂(きれつ)や粘着現象が発生するなどの異常はみられなかった。

(3) 圧縮永久ひずみ試験

軌道パッドの試験片を50%圧縮した状態で100℃の加熱空気下で24時間老化させたのちに永久ひずみを測定した。全試料の圧縮永久ひずみは10%以下で、許容永久ひずみ30%の1/3くらいに相当し、じゅうぶん仕様内に収まった。

仕様ではこのほかに、電気抵抗、ゴムの強さなどに関する試験も定められているが、試作品はこれらの仕様規格もじゅうぶん満足した。

5. 結 言

以上のように、軌道パッドの溝が圧縮変形曲線に及ぼす影響を検討して、次の結果を得た。

- (1) 軌道パッドの見掛けのヤング率は低ひずみ域では一定値をとり、高ひずみ域ではひずみの増加につれて直線的に増加する傾向があって、2本の直線で近似できる。
- (2) 見掛けのヤング率が急増するときのひずみは、軌道パッドの寸法、溝の総断面積から求めることができる。
- (3) 軌道パッドの見掛けのバネ定数と圧縮荷重の間には直線関係が成立し、直線の傾きは溝に対するゴムの断面積比が大きくなるにつれて増大する。
- (4) 軌道パッドの圧縮変形曲線が与えられたときに、これを満足する溝の形状を見掛けのバネ定数、臨界ひずみに着目して設計する方法を示した。この設計に基づき試作した軌道パッドは日本国有鉄道仕様の各項目をじゅうぶんに満足した。

最後に本研究の遂行は日本国有鉄道仕様書⁽³⁾に負うところが大きなることを述べて関係者に謝意を表する。さらに、本研究にご指導、ご協力くださった日立電線株式会社電線工場北条部長、松賀主任技師、木村、大友、植田の諸氏にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 防振ゴム研究会編：防振ゴム，157（昭38 日本鉄道車輛工業会）
- (2) 戸原ほか4名：鉄研報告 116（昭35）
- (3) 日本国有鉄道仕様書，幹軌 02-273
- (4) 石田，樋口，渡辺：日立評論 50，208（昭43-3）
- (5) ASTM D 813-59