

【ノート】

平行線ケーブルに用いるケーブル
バンドの解析に関する考察

AN ANALYSIS OF CABLEBAND OF PARALLEL WIRE CABLE

村上 巳 里*
By Misato MURAKAMI

1. ま え が き

ケーブルバンドは、補剛桁の荷重を支えるハンガーロープ張力をケーブルに伝達するもので、その構造は図-1および図-2に示すものである。この真円形のケーブルバンドに対して、ケーブルは多数のワイヤから構成されているため、締付けによって変形する。本研究では、平行線ケーブルについてケーブルの断面形状の変形を考慮した解析手法について考察したものである。

いま、ケーブルバンドの変形を考慮しない解析手法¹⁾により、ケーブルバンドを真円形であると仮定し、締付け力がバンド全周に伝達されるものとして、滑動に対する安定計算式および応力度の算定式を示すと、

$$F_s \geq 2 \pi \mu n N_b / T_h \sin \phi \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = Z / lt \pm 6 Ze / lt^2 \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに、

- F_s : 滑動に対する安全率
- μ : ケーブルとバンドの摩擦係数
- n : ボルト本数 (片側)
- N_b : ボルト軸力
- T_h : ハンガーロープ張力
- ϕ : ケーブルの傾斜角

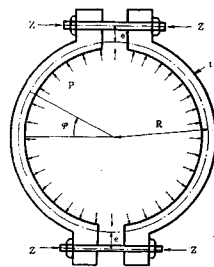
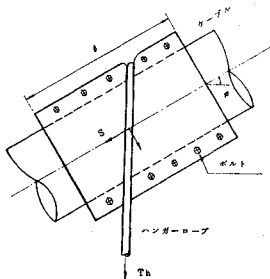


図-1 ケーブルバンド側面 図-2 ケーブルバンド断面

- l : ケーブルバンドの長さ
- t : ケーブルバンドの内厚
- e : 偏心距離
- Z : 締付け力 (nN_b)

である。

式 (1) から、 nN_b を求め、さらに構造上必要な l を決定し、式 (2) により応力度を検討することになる。

2. ケーブルの変形を考慮した解析手法

(1) 変形状態

ここに提案する解析の手法は、ケーブルの断面形状が締付け力の増大によって変化するとともに、その反力分布も変ることを考慮したものである。ケーブルの初期形状 (ケーブルスクイズ完了時) は、ケーブルバンドの架設上、長円形にせざるを得ない。そのため、ボルト軸力導入過程において、次の2段階の変形状態が考えられる。

a) なじみ変形状態

ボルト軸力導入の初期においては、ケーブルの縦径の近傍ではケーブルとバンドは接していない。そのため、ケーブルバンドは比較的小さいボルト軸力によって変形し、ケーブルに密着する。この状態は、長円形のケーブルになじむための変形過程である。この状態ではケーブルは変形しないものと仮定する。

b) 締付け変形状態

a) の状態から、さらに所定のボルト軸力を導入すると、ケーブルおよびバンドはともに変形し、すべての点においてケーブル反力 (バンド内圧) が生じている。この状態は、ケーブル径が減少 (空隙率の減少) する変形過程である。この状態における横径の減少は一对のバンドの間隙が減少したものと仮定する。

(2) なじみ変形の基本式

図-3 は、ケーブルバンドの変形および反力分布を示

* 正会員 建設省四国地方建設局, 技術管理官

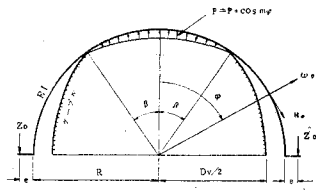


図-3 なじみ変形

したものである。ここで、反力分布を中心角0からβまで cos 分布するものと仮定する。いま、ケーブルバンドを円弧アーチと考え、図-3 のような座標を用いると、任意点(φ)における法線方向の変位と曲げモーメントとの関係は^{2),3)},

$$\frac{d^2w}{d\phi^2} + w = -\frac{R^2}{EI} M \dots\dots\dots (3)$$

で示される。ここに

- w : ケーブルバンドの法線方向の変位
- EI : ケーブルバンドの曲げ剛性
- R : ケーブルバンドの半径
- M : 任意点(φ)の曲げモーメント

である。仮定条件から、ケーブル反力は、

$$p = p_0 \cos m\phi \dots\dots\dots (4)$$

となり、そのときの締付け力は

$$Z_0 = p_0 R C_1 / 2 \dots\dots\dots (5)$$

で示される。ここに

$$m = \pi / 2\beta$$

$$C_1 = 2m \cos \beta / (m^2 - 1)$$

である。

a) $0 \leq \phi \leq \beta$ の場合

任意点(φ)の曲げモーメントは、

$$M_{01} = \frac{p_0 R^2}{2} \left\{ C_1 \left(1 + \frac{e}{R} \right) + C_2 \cos \phi + \frac{2}{m^2 - 1} \cos m\phi \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに

$$C_2 = -2m \sin \beta / (m^2 - 1)$$

である。式(6)を式(3)に代入し、(1)の仮定から境界条件として、φ=0において、 $w_{01}=0$, $dw_{01}/d\phi=0$ を用いれば、

$$w_{01} = \frac{p_0 R^4}{2EI} \left[-C_1 \left(1 + \frac{e}{R} \right) + \left\{ C_1 \left(1 + \frac{e}{R} \right) - \frac{2}{(m^2 - 1)^2} \right\} \cos \phi + \frac{2}{(m^2 - 1)^2} \cos m\phi - \frac{C_2}{2} \phi \sin \phi \right] \dots\dots\dots (7)$$

をうる。接線方向の変位は、 $U_{01} = -\int w d\phi$ から、φ=0において $U_{01}=0$ なる境界条件を用いれば、

$$U_{01} = -\frac{p_0 R^4}{2EI} \left[-C_1 \left(1 + \frac{e}{R} \right) \phi + \left\{ C_1 \left(1 + \frac{e}{R} \right) \right. \right.$$

$$\left. - \frac{2}{(m^2 - 1)^2} \right\} \sin \phi + \frac{2}{(m^2 - 1)^2} \sin m\phi - \frac{C_2}{2} (\sin \phi - \phi \cos \phi)] \dots\dots\dots (8)$$

となる。また、せん断力および軸力は、

$$Q_{01} = -\frac{p_0 R}{2} \left\{ C_2 \sin \phi + \frac{2m}{m^2 - 1} \sin m\phi \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$N_{01} = -\frac{p_0 R}{2} \left\{ C_2 \cos \phi + \frac{2}{m^2 - 1} \cos m\phi \right\} \dots\dots\dots (10)$$

である。

b) $\beta \leq \phi \leq \pi/2$ の場合

任意点(φ)の曲げモーメントは、ケーブル反力がないことから、

$$M_{02} = \frac{p_0 R^2 C_1}{2} \left(1 + \frac{e}{R} - \sin \phi \right) \dots\dots\dots (11)$$

となり、a)と同様にして w を求めることができる。この場合の境界条件として、φ=βにおいて、 $w_{01}=w_{02}$, および $dw_{01}/d\phi = dw_{02}/d\phi$ を用いれば、

$$w_{02} = A \cos \phi + B \sin \phi - \frac{p_0 R^4 C_1}{2EI} \cdot \left(\frac{1}{2} \phi \cos \phi + 1 + \frac{e}{R} \right) \dots\dots\dots (12)$$

をうる。ここに、

$$A = \{ w_{01}(\beta) - w_{02}(\beta) \} \cos \beta - \{ w_{01}'(\beta) - w_{02}'(\beta) \} \sin \beta$$

$$B = \{ w_{01}(\beta) - w_{02}(\beta) \} \sin \beta + \{ w_{01}'(\beta) - w_{02}'(\beta) \} \cos \beta$$

$$w_{02}(\beta) = -\frac{p_0 R^4 C_1}{2EI} \left(\frac{1}{2} \beta \cos \beta + 1 + \frac{e}{R} \right)$$

$$w_{01}'(\beta) = -\frac{p_0 R^4}{2EI} \left[+ \left\{ C_1 \left(1 + \frac{e}{R} \right) - \frac{2}{m^2 - 1} \right\} \cdot \sin \beta + \frac{2m}{(m^2 - 1)^2} + \frac{C_2}{2} (\sin \beta + \beta \cos \beta) \right]$$

$$w_{02}'(\beta) = -\frac{p_0 R^4 C_1}{4EI} (\cos \beta - \beta \sin \beta)$$

である。また、接線方向の変位は、

$$U_{02} = -A \sin \phi + B \cos \phi + \frac{p_0 R^4 C_1}{2EI} \cdot \left\{ \frac{1}{2} (\cos \phi + \phi \sin \phi) + \left(1 + \frac{e}{R} \right) \phi \right\} + C_3 \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここに

$$C_3 = U_{01}(\beta) + A \sin \beta - B \cos \beta - \frac{p_0 R^4 C_1}{2EI} \cdot \left\{ \frac{1}{2} (\cos \beta + \beta \sin \beta) + \left(1 + \frac{e}{R} \right) \beta \right\}$$

である。また、せん断力および軸力は、

$$Q_{02} = \frac{p_0 R C_1}{2} \cos \phi \dots\dots\dots (14)$$

$$N_{02} = \frac{p_0 R C_1}{2} \sin \varphi \dots\dots\dots(15)$$

で示される。

(3) 締付け変形の基本式

図-4 は締付け変形時のケーブルバンドの変形および反力分布を示したものである。この場合の反力は、等分布反力 (p_1) と \cos 分布反力 ($p_2 = p_{02} \cos \varphi, 0 \leq \varphi \leq \pi/2$) であると仮定する。

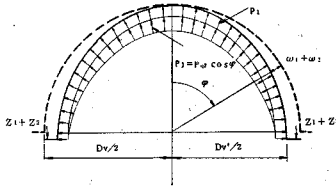


図-4 締付け変形

a) 等分布反力の場合

ケーブルの締付け力 (Z_1) と等分布反力 (p_1) とは

$$Z_1 = p_1 \cdot R \dots\dots\dots(16)$$

なる関係があり、任意点 (φ) の曲げモーメントは、

$$M_1 = Z_1 \cdot e \dots\dots\dots(17)$$

となり、式 (3) と (2) の仮定から前節と同様な境界条件を用いると、法線方向の変位は、

$$w_1 = -\frac{R^2 M_1}{EI} (1 - \cos \varphi) \dots\dots\dots(18)$$

となる。また、接線方向の変位は

$$U_1 = \frac{R^2 M_1}{EI} (\varphi - \sin \varphi) \dots\dots\dots(19)$$

で示される。せん断力は $Q_1 = 0$ であるが、軸力は、

$$N_1 = Z_1 \dots\dots\dots(20)$$

となる。

b) \cos 分布の場合

ケーブルの締付け力 (Z_2) と \cos 分布反力 (p_2) とは、

$$Z_2 = \pi R p_{02} / 4 \dots\dots\dots(21)$$

なる関係があり、任意点 (φ) の曲げモーメントは、

$$M_2 = R \cdot Z_2 \left(1 + \frac{e}{R} - \frac{2}{\pi} \cos \varphi - \frac{2}{\pi} \varphi \cdot \sin \varphi \right) \dots\dots\dots(22)$$

となり、a) と同様にして法線および接線方向の変位を求めると、

$$w_2 = -\frac{R^2 Z_2}{EI} \left\{ \left(1 + \frac{e}{R} \right) (1 - \cos \varphi) - \frac{3}{2\pi} \varphi \sin \varphi + \frac{1}{2\pi} \varphi^2 \cos \varphi \right\} \dots\dots\dots(23)$$

$$u_2 = \frac{R^2 Z_2}{EI} \left\{ \left(1 + \frac{e}{R} \right) \varphi - \left(1 + \frac{e}{R} + \frac{5}{2\pi} \right) \sin \varphi + \frac{5}{2\pi} \varphi \cdot \cos \varphi + \frac{1}{2\pi} \varphi^2 \sin \varphi \right\} \dots\dots\dots(24)$$

となる。また、せん断力および軸力は、

$$Q_2 = \frac{2 Z_2}{\pi} \varphi \cos \varphi \dots\dots\dots(25)$$

$$N_2 = \frac{2 Z_2}{\pi} (\cos \varphi + \varphi \sin \varphi) \dots\dots\dots(26)$$

で示される。

(4) 変形と反力分布および締付け力の分配

前節 (2) および (3) で述べたように、変形について 2 種類、反力分布および締付け力については 3 種類のもので仮定した。ここでは、これらの諸量を変形量と所要締付け力から分配する方法について述べる。ケーブルの初期形状を縦径 D_v 、横径 D_h とし、所定の締付け力を導入したときの形状を縦径 D_v' 、横径 D_h' とすると、

(i) なじみ変形量 ($\varphi = \pi/2$) は

$$(D_v - D_b) / 2 = w_{02}(\pi/2)$$

(ii) 締付け変形量 ($\varphi = \pi/2$) は

$$(D_v' - D_v) / 2 = w_1(\pi/2) + w_2(\pi/2)$$

である。ここに、 D_b はバンドの内径である。

いま、所要締付け力を $Z(nN_b)$ とすると、それぞれの変形量に対応した締付け力、 Z_0, Z_1 および Z_2 は次のようにして求めることができる。

Z_0 は、式 (12) から

$$Z_0 = -\frac{a_1}{k \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{m^2 - 1} + \frac{e}{R} \right)} \dots\dots\dots(27)$$

となる。ここに

$$a_1 = (D_v - D_b) / 2$$

$$k = R^3 / EI$$

である。次に、締付け変形時の締付け力は

$$Z_1 + Z_2 = Z - Z_0 \dots\dots\dots(28)$$

で、その変位量は、式 (18), (23) から、

$$r_1 Z_1 + r_2 Z_2 = a_2 \dots\dots\dots(29)$$

となる。ここに

$$r_1 = -R^2 \cdot e / EI$$

$$r_2 = -k(1/4 + e/R)$$

$$a_2 = (D_v' - D_v) / 2$$

である。式 (28), (29) から、

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{r_1 - r_2} \{ a_2 - (Z - Z_0) r_2 \} \\ Z_2 &= \frac{1}{r_1 - r_2} \{ -a_2 + (Z - Z_0) r_1 \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(30)$$

となる。 Z_0, Z_1, Z_2 が求めれば、変位および応力はそれぞれの式に代入して求めることができる。

3. 数値計算

(1) 諸数値

$$T_h = 170 \text{ (t)}$$

$$R = 35.2 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sin \phi &= 0.3 & D_b &= 66.4 \text{ (cm)} \\ t &= 4.0 \text{ (cm)} & D_p &= 66.0 \text{ (cm)} \\ \mu &= 0.15 & D_v' &= 65.4 \text{ (cm)} \\ e &= 1.45 \text{ (cm)} & F_s &= 3.0 \\ a_1 &= -0.20 \text{ (cm)} & E &= 2.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ a_2 &= -0.30 \text{ (cm)} & N_b &= 40.0 \text{ (t)} \\ \sigma_a &= 1600 \text{ (kg/cm}^2\text{)} & \beta &= \pi/4 \end{aligned}$$

(2) ケーブルを真円とした場合

式 (1) から

$$n \geq 3.0 \times 170 \times 0.3/2 \times 3.14 \times 0.15 \times 40 = 4.2$$

となり、ボルトは上下各5本配列するとし、ハンガーロープの取付溝などを考えて、 $l=120$ cm とする。締付け力は、 $Z=5 \times 40=200$ (t) となり、ケーブルバンドの応力度は、式 (2) から、 $\sigma_t = +1323$ kg/cm²、 $\sigma_c = -489$ kg/cm² となる。

(3) ケーブルの変形を考慮した場合

(2) で決定された締付け力の分配は、式 (27)、(30) から、 $Z_0=12791$ (t)、 $Z_1=181077$ (t) および $Z_2=6132$ (t) となり、このときの変位および応力度は 図-5 に示すものである。

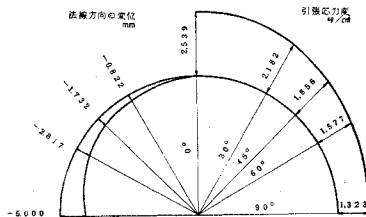


図-5 ケーブルバンドの変位と応力度

4. 考 察

(1) 変形量の推定と反力分布角 (β)

提案した解析手法では、あらかじめケーブルの形状および変形量を推定しておく必要がある。このことは、ストランドの配列、ケーブルの空隙率などに関係するため、単に締付け力から求めることは困難である。多くの場合、ケーブル径の決定のため、事前に実物大のケーブル締付け試験を行うので、そのとき変形量も併せて測定するとともに、実橋でのケーブル張力を考慮して変形量を推定する。数値計算に用いた変形量は関門橋のケーブル締付けから求めた平均値である。また、ケーブルの反力分布角 (β) も仮定する必要があるが、この値の応力度におよぼす影響は小さいことがわかった。

(2) ケーブルバンドの応力

図-6 は内径 51 cm のケーブルバンドの応力測定結果⁴⁾ と計算値を対比したものである。この結果から、変形状態およびケーブル反力分布の仮定は一様妥当性があると思われる。

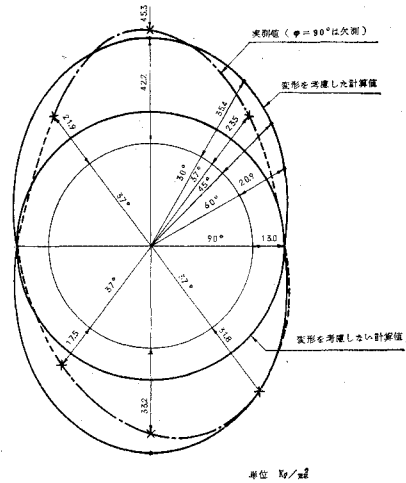


図-6 応力測定値と計算値の比較

5. あとがき

本研究では、ケーブルバンドの解析手法について新しい提案をしたが、その構造が断面形状的に弾塑性的なケーブルを締付けるというものであるため、幾つかの問題点がある。たとえば、材料の使用状態からみた実応力度と許容応力度の関係、また、本研究では述べなかったが、ボルト軸力の経時低下などがある。本研究が、ケーブルバンドの解析および問題点の解明に参考になれば幸いである。

最後に、本研究をまとめるにあたって、日本道路公団企画課 古道正男氏から貴重なご意見をいただいたことに謝辞を述べるとともに、ケーブルバンドの実験資料を提供していただいた本四公団設計二課長 沢井広之氏には厚く感謝する次第である。

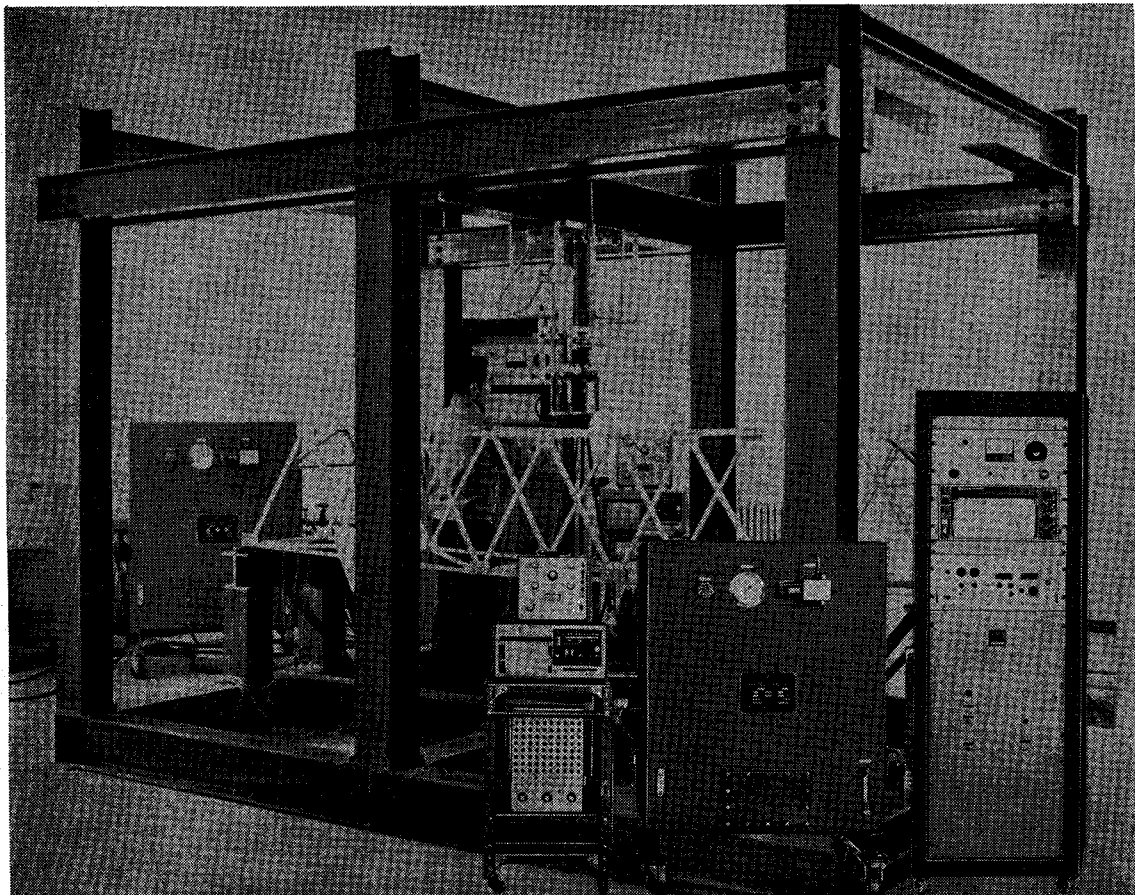
参考文献

- 1) 平井 敦：鋼橋 III, pp. 633~634, 919~922, 技報堂, 1967年9月。
- 2) ハウラネック・シュタインハルト, 橋 善雄・小松定夫 共訳：鋼橋の理論と計算, pp. 342~349, 山海堂, 1965年1月。
- 3) Timoshenko, 長谷川節訳：板とシユールの理論(下), pp. 439~503, プレイン図書出版, 1975年8月。
- 4) 榎波義幸・北川 信：ケーブルバンドに関する実験的研究, 第30回年次学術講演会講演概要集, I-204, 土木学会, 1975年10月。

(1976.8.17・受付)

—MARUI— MIV-4600 電気油圧サーボシステム —

電気油圧式 振動疲労試験機



MIV-4600シリーズは中小規模・材料・構造物・構造物模型
部品等の実働波による振動・疲労試験に最適品です。

特長 ◆振動、疲労波形を任意の波形運転することができます。

(正弦・三角・矩形・複合・ランダム・磁気テープ入力による運転も可能)

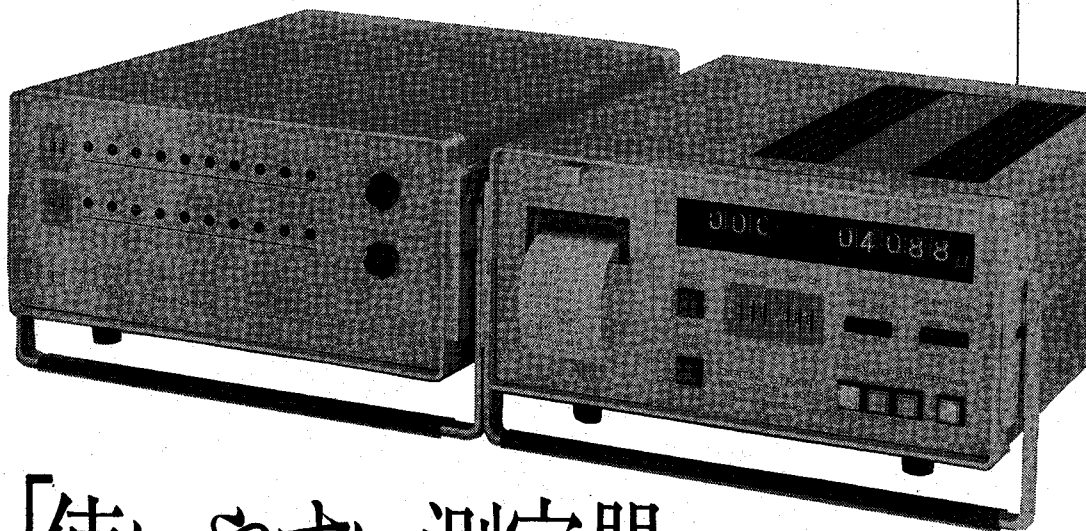
- ◆制御方式を広い範囲に選択することができます(荷重・変位・加速度の制御が可能)
- ◆複数の加振器を組合せて同時に運転できます(振巾・位相等を変えて運転が可能)
- ◆出力は±50ton～±100kg各種製造いたしています。
- ◆任意の場所で設置し試験が可能です。



土木建築用材料試験機

株式会社 **マルイ**

東京営業所 東京都港区芝公園2丁目9-12 ☎東京 (03) 434-4717
大阪営業所 大阪市城東区中央1丁目11-1 ☎大阪 (06) 934-1021
名古屋営業所 名古屋市中村区牧野町5丁目10 ☎名古屋(052)452-1381
九州営業所 福岡市博多区比恵町4番17 ☎福岡 (092)411-0950



「使いやすい測定器」と
ご好評をいただいております。

初期値記憶式—バランス調整不要

共和の携帯型デジタルひずみ測定器 SD-500A, ASB-50A

計測開始時に測定点の初期不平衡出力をコアメモリに記憶し、次に負荷時のひずみを測定し、すでに記憶している初期不平衡分とを演算し、真のひずみを求めます。ひずみ値は、デジタル表示すると共に、内蔵プリンタでプリントアウトします。

小型、軽量、可搬型で現場向。実験室用としてラックタイプもあります。また自動無人計測用のオプション機器の準備があり、データ解析処理のためのパーソナルコンピュータにも接続できます。

特長

- ・調整時間が大幅に短縮できる
- ・計測時間は1点あたり0.5秒以下
- ・直流ブリッジ電源採用により、高精度な測定ができる
- ・測定点の開始、終了の任意設定可能
- ・オプション機器が豊富

仕様

測定範囲……………0～±39999×10⁻⁶ひずみ
計測時間……………0.5秒/点
多点切換点数……………20点(カスケード接続10台)
50点(カスケード接続4台)
ゲージブリッジ
回路切換……………1、2、4枚ゲージ法、全点共通または単独切換
精度……………±(指示値0.1%+2数値)
電源……………AC100V
寸法……………350×160×400mm

オプション機器

- ・デジタルクロック ASC-50A
- ・スタータ AST-50A
- ・紙テープさん孔装置 OPC-50A
- ・ケーブルアダプタ

未来をひらく電子計測器メーカー

株式会社 共和電業

本社・工場
東京都調布市調布ヶ丘3の5の1
電話=0424-87-2111(大代)

東京営業所
東京都港区芝西久保明舟町19
電話=03-502-3551(大代)

大阪営業所
大阪市東区森之宮東之町544(三双ビル)
電話=06-942-2661(代)

名古屋営業所
名古屋市千種区田代町字瓶杖1の57(東山大木ビル)
電話=052-782-2521(代)

福岡営業所
福岡市博多区博多駅東2の5の20(松永ビル)
電話=092-411-6744(代)

広島営業所
広島市東白島町5の9((にまきビル)
電話=0822-21-9536

札幌営業所
札幌市中央区南四条西9丁目(観光ビル)
電話=011-261-7629

水戸営業所
水戸市上水戸2の6の5
電話=0292-25-1074