

分散オフセット方式による直接水冷電力ケーブルの熱伸縮吸収

Absorption of Thermal Expansion of Direct Water-cooled Power Cables with Multiple Offsets

電力ケーブルの外部直接水冷は、既に実用化の段階に入ってきているが、この方式を適用した場合、運転・停止の際の電力ケーブルの温度変化幅が大きく、ケーブル重量も浮力により見掛け上軽くなるため、オフセット(ケーブルの負荷変動に伴う熱伸縮を吸収させるため、ケーブルにたるみを設けたもの)部への熱伸縮量が増大する。

この熱伸縮量を吸収する一方法として、分散オフセット方式を考案しオフセット部の伸縮実験を行なった。その結果、オフセット中央部に直線部を設けると、オフセット部アルミシースのひずみを減少させることができ、オフセット幅を従来の半分に縮小可能であることが確認できた。

五味 善昭* Gomi Yoshiaki
海老沢 昇** Ebisawa Noboru
鈴木 伸孝** Suzuki Nobutaka
林田 克哉*** Hayashida Katsuya
斉藤 哲夫*** Saitô Tetsuo

1 緒 言

ケーブルの大容量化に対処するために、外部直接水冷が行なわれているが、非冷却時に比べ2倍程度の送電容量がとれるため、地中送電線の増容量対策として、昭和53年に関西電力株式会社信貴敷津線で実用化されている。

一方、中部電力株式会社でも、275kV系統の送電方式として $1 \times 2,500\text{mm}^2$ OFケーブルのFRP(ガラス繊維強化プラスチック)パイプ内直接水冷線路を計画しており、最終容量1,100 MVA 3回線を目標に昭和60年ごろの導入へ向け、現在洞道建設を進めている。そのルートの一部(約2.3km間)は道路幅が狭いため、シールド工法により洞道の建設を行なうが、このシールド部分でケーブルの接続及び熱伸縮吸収用マンホールを設けることは相当に困難である。

今回建設予定のシールド洞道は円形の断面であり、通常の間角形断面よりも余裕がある。この余裕を利用して、ケーブルの熱伸縮を短区間ごとに小さなオフセットに分散吸収させ、マンホールを省略する布設方式を考案し、実サイズケーブルによる実験を行なった結果、分散オフセット方式の実用性を確認することができた。以下にこの検討結果とこれを基にした実布設設計について報告する。

2 外部直接水冷布設の分散オフセット方式

電力ケーブルの外部直接冷却方式は、ケーブルを水冷管内に布設し冷却水を循環するものであるが、管内のケーブルは負荷電流の変動に応じて熱伸縮を生じ、この熱伸縮を水冷管

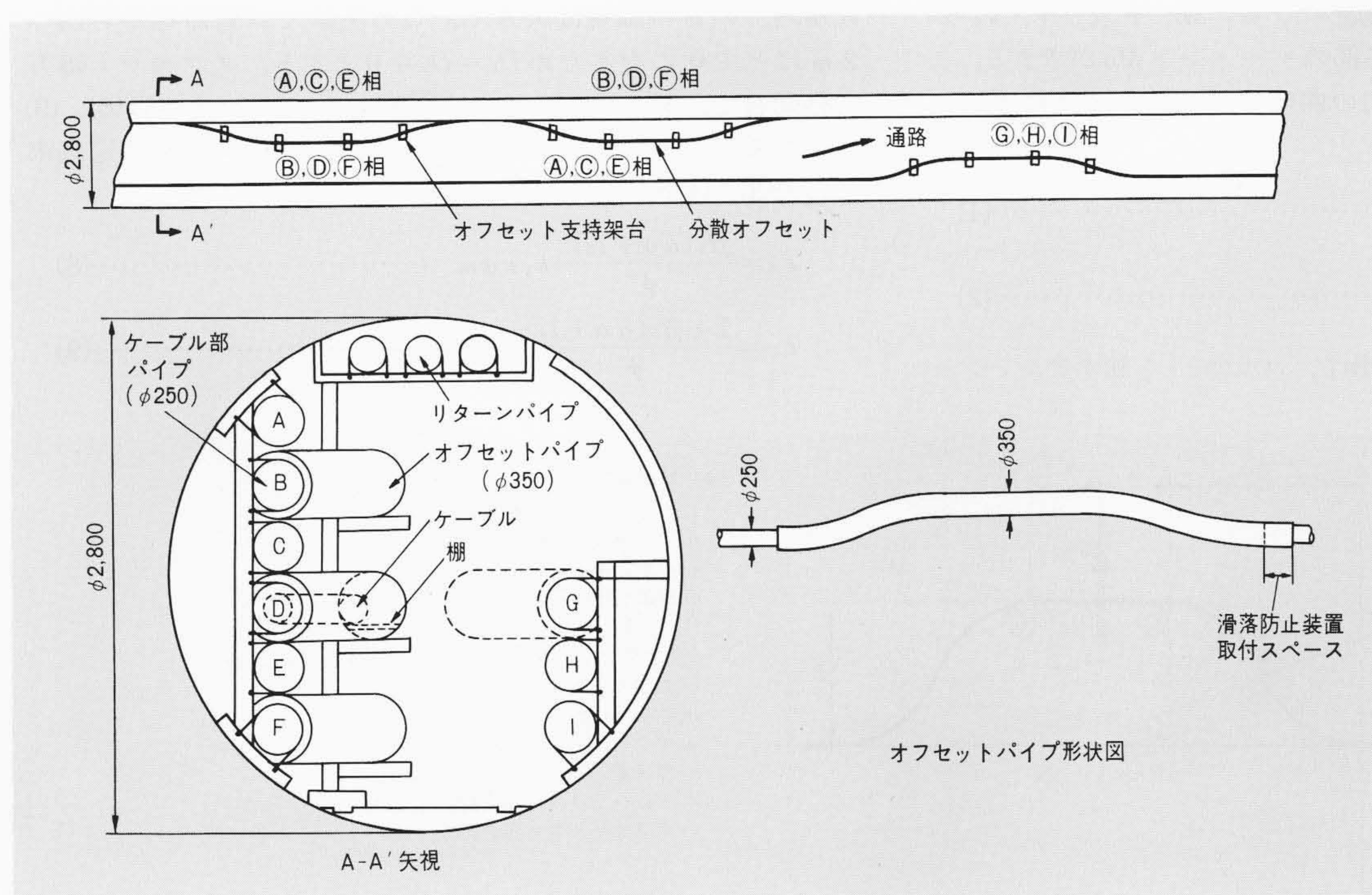


図1 シールド洞道内レイアウト 3回線布設を考えると、オフセットパイプ直径を350mmとし、通路スペースを確保すると、ケーブルオフセット幅は500mm以下にする必要がある。

* 中部電力株式会社工務計画部 ** 日立電線株式会社研究所 *** 日立電線株式会社日高工場

内で吸収する必要があるため、ある間隔ごとにケーブルを湾曲してオフセットをとっている。しかし、二つのオフセット間の間隔が長くなるとオフセットに集中してくるケーブルの伸縮が大きくなって大きなオフセットが必要となるため、マンホールも大形のものが必要になる。

大形マンホールは立地上、工地上多くの制約がある。これに対し比較的短い間隔に小さなオフセットを設け、熱伸縮を分散させて吸収しようとするのが分散オフセット方式の考えである。図1にシールド洞道内の水冷管とオフセットの配置概要を示す。水冷管には、ケーブル地絡時の異常に対しても強度の優れたFRP管を用い、オフセット部は一般部(直径250mm)よりも大きな径のパイプ(直径350mm)を用いている。オフセットパイプ内には棚を設け、ケーブルが管中央に位置するようにして伸縮吸収によるオフセット幅方向移動を最大にとれるようにしている。なお、布設ルート中には若干の傾斜部があるので、ケーブルのずり落ちを防ぐためオフセットパイプ内には滑落防止装置を取り付けられる構造にしている。

3 オフセット挙動理論

3.1 ロール支持の一般解

オフセットは、円弧が接続するように成形される。図2はオフセット部の解析モデルを示したもので、点Dを中心とする左右対称形であり伸縮量 m はオフセット片側で吸収する量である。オフセット端の直線長($l_4 - l_3$)に比べて m が無視できない場合もあるので、 l_4 は初期値と m の和で与える。同図のオフセット形状を支点ごとの7区間に分解し、各支点でのたわみ量と回転角が境界条件になる。

垂直力 V_0 及び V は、オフセット中央部の支持条件によって二つの意味をもつ。点Bの垂直力 V_0 は中央部に支持するものがなく幅方向移動が自由の場合で、ケーブルと支持台の摩擦力として与える。そのため、未知数 $R_1 \sim R_4$ 、点Bのモーメント M_1 及び反抗力 F の解は13個の連立方程式から決まる。点Dの垂直力 V は、中央部支持の場合で摩擦力の影響を無視するが(1)式が加わるので14個の連立になる。 M_1 、 F 及び V 、 V_0 が与えられると、オフセット各部のモーメント M_0 が求まる。このときケーブルシース軸方向の曲げひずみは、(2)式によって表わされる。

$$w_D = \frac{2V}{k_0 P_5} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{M_0}{EI} r \phi \quad \dots\dots\dots(2)$$

ϕ : アルミシースの形状係数で、コルゲートを施すアルミシ-

スの場合は0.7~1.1が一般的であるが、外径、シース厚さ及び波高が増すと大きくなり、今回のものは1.5である。

3.2 固定端末とした特別解

ロール部を固定すなわち点A~E間ではケーブル変形がなく、オフセット曲率半径及びケーブル屈曲部と直線部の曲げ剛性を等しくおき摩擦力を無視すると、点A・Cのシースひずみ ε_A 、 ε_C 、中央部の幅方向移動量 w_D 及び反抗力 F は(3)~(6)式となる。

$$\varepsilon_A = \frac{a\alpha + l_5}{\phi} k_1 r \phi m \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\varepsilon_C = \frac{a\alpha + l_4}{\phi} k_1 r \phi m \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$w_D = \frac{k_1 m}{2\phi} [l_4 l_5 (l_4 + l_5) + a\alpha (l_4^2 + l_5^2) + 2a \sin \alpha \{a\alpha (l_4 + l_5) + 2l_4 l_5\}] - \frac{a^2 k_5 m}{\phi} (2a\alpha + l_4 + l_5) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$F = \frac{2a\alpha + l_4 + l_5}{2a\phi} EIm \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで ϕ 、 $k_1 \sim k_5$ はオフセット形状によって決まる定数

3.3 管路内の変形

これまでのロール支持は、オフセット実験のための端末条件で、実線路では、管路又はトラフの出口にオフセットを設ける。

したがって、管路内及びトラフ内でもケーブルの変形は可能である。このとき管路内ケーブルの幅方向移動は、ケーブル防食層と管路を含めた見掛けの弾性係数 E_s によって拘束されるとし、その挙動は弾性床上の梁理論に従うとすると、その一般解(7)式が管路内の変形曲線を示す。

$$w = e^{\beta s x} (D_1 \cos \beta s x + D_2 \sin \beta s x) + e^{-\beta s x} (D_3 \cos \beta s x + D_4 \sin \beta s x) \quad \dots\dots\dots(7)$$

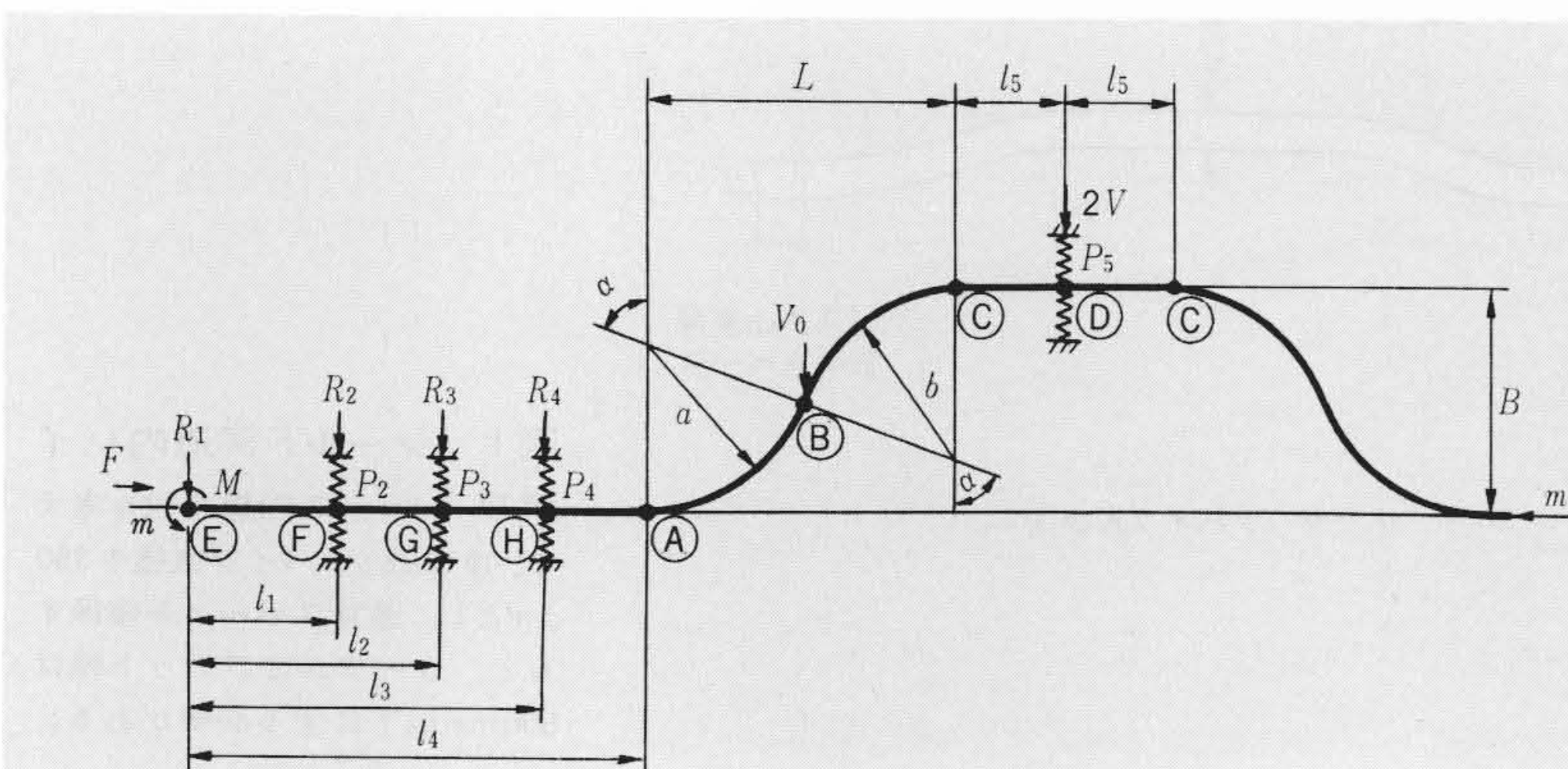
ここで $D_1 \sim D_4$: 積分定数

$$\beta s = \sqrt{\frac{E_s}{4EI}}$$

管路内での w の減衰は大きく、この実験では管路端から内へ2mほどで0になるため $D_1 = D_2 = 0$ とする。オフセット幅方向移動自由、 $V = V_0 = 0$ での点A・Cのシースひずみは(8)、(9)式となる。ここで βs を無限大とすれば、ロール部を固定端末とした(3)、(4)式と同じになる。

$$\varepsilon_A = \frac{\beta s (a\alpha + l_5)}{\phi'} k_1 r \phi m \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\varepsilon_C = \frac{1 + \beta s (a\alpha + l_4)}{\phi'} k_1 r \phi m \quad \dots\dots\dots(9)$$



注: 略語説明

- l_1, l_2, l_3, l_4 (ロール支持間隔)
- l_5 (オフセット中央部の直線長さ)
- a, b (オフセット部の曲率半径)
- α (曲率半径の円弧角)
- P_2, P_3, P_4 (ロール支持部のばね定数)
- P_5 (オフセット中央部を固定したときのばね定数)
- B (オフセット幅)
- L (オフセット長さ)
- m (オフセット片側からの伸縮量)
- F (伸縮量 m に相当する軸力)
- R_1, R_2, R_3, R_4 (ロール支持部の反力)
- V (オフセット中央固定部の反力)

図2 実験解析モデルと記号説明 実布設ではE~H間は管路内となり、このときのケーブル変形は弾性床上の梁理論で表わした。

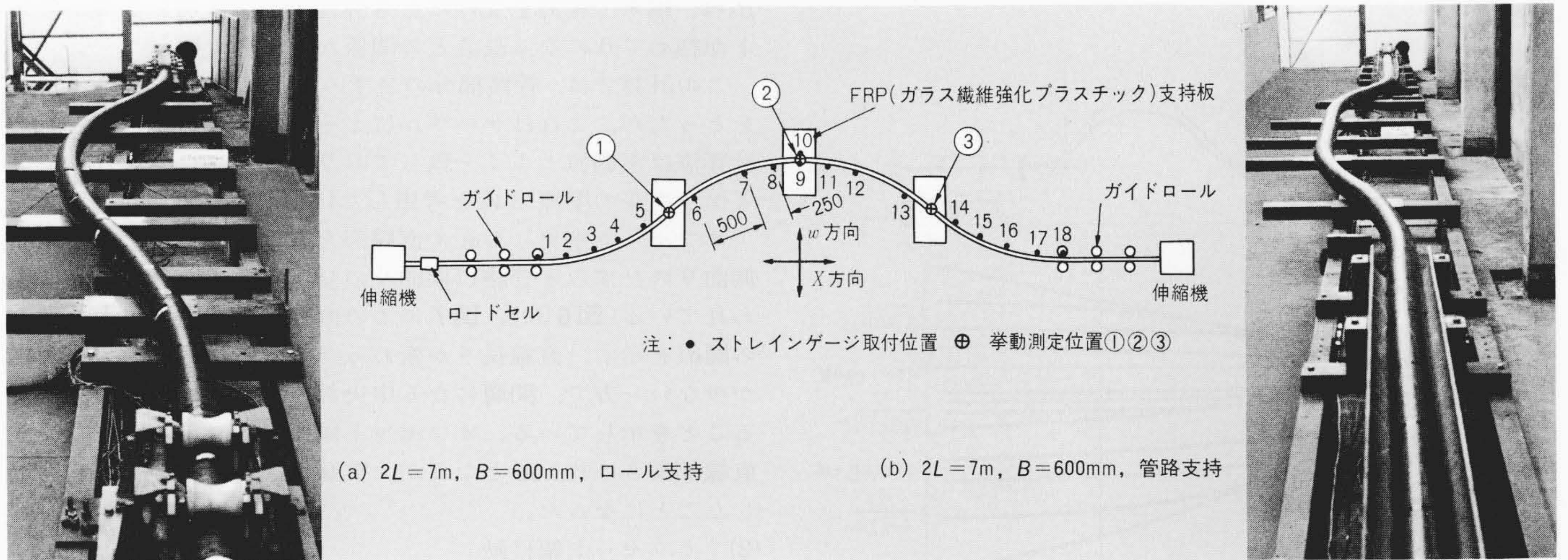


図3 オフセット実験の概要 実際のケーブルは、オフセットパイプ内に収まるが、実験では支持棚だけを模擬している。

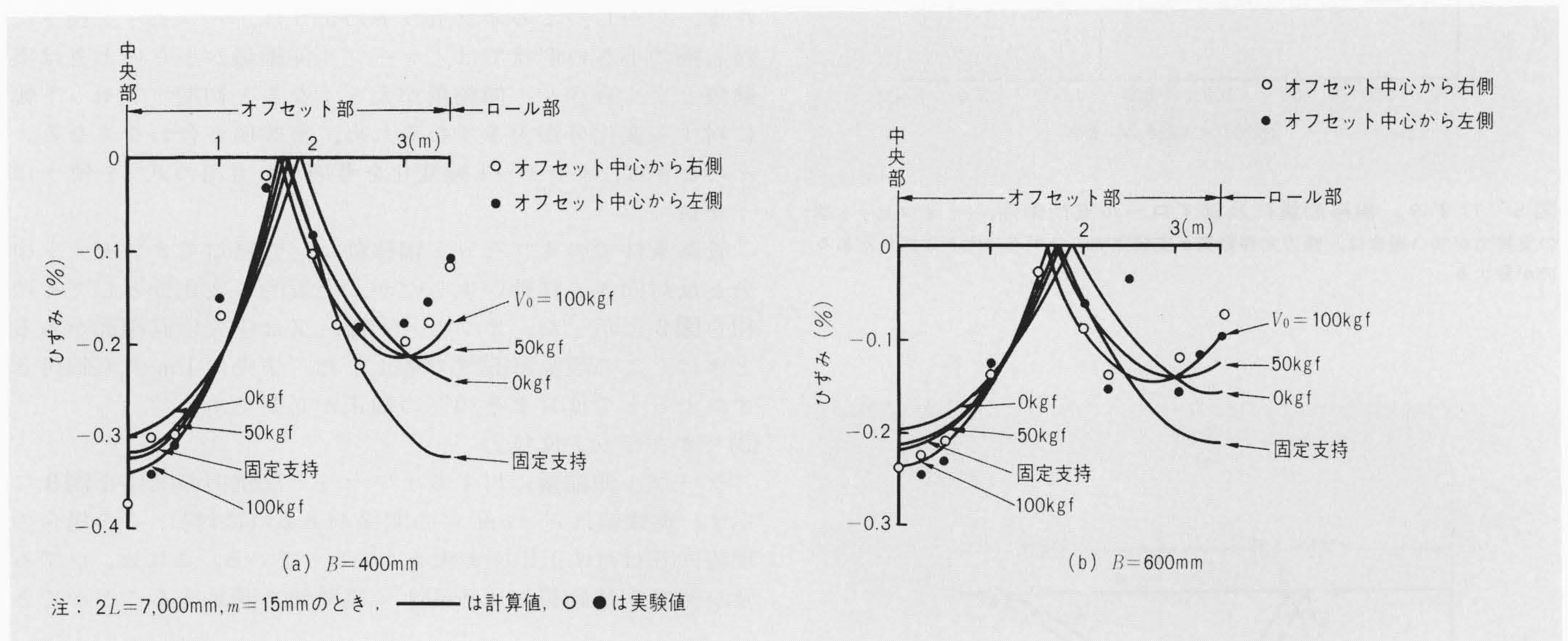


図4 ロール支持におけるシースひずみ分布(幅方向移動自由) オフセット中央部のひずみが、ロール部側のひずみよりも大きく発生している。なお、 V_0 は支持台との摩擦力の大きさを示す。

ここで ϕ' はオフセット形状及び β_s によって決まる定数

4 オフセット実験

4.1 実験方法

オフセットとしては、シールド断面内に無理なく収まり、かつアルミシースひずみが許容値(0.3%)内であることを要する。実験は図3に示す装置を使い、オフセット長さ、幅及び中央直線部の長さを種々変えとともに、オフセット両端支持部の管路の有無についても実施し、各部のひずみその他の挙動を測定した。なおケーブルは、実際に布設予定の275kVケーブルでは最大サイズの2,500mm²を使用した。

4.2 実験結果

(1) ひずみ

実験の結果は、当初予想していたオフセット部ひずみ分布と異なったため、漸次形状を変えて進める結果となった。ロール支持でのオフセット幅移動自由条件のひずみ測定結果を図4に示す。中央部に直線部がない場合には、ロール支持側曲りに比べて、中央部側曲りのひずみのほうが大きく発生し

ている。これは、管路で支持した場合(後述の図7(a))でも同様であった。計算値は、ロール支持点の変形を考慮したこの理論値を示したもので、ケーブル自重を受ける架台とケーブル間の摩擦力 $V_0=50\text{kgf}$ 相当のひずみ分布が実測値に類似することが分かる。また、計算に用いた支持部のばね定数 P は、ケーブルを径方向に圧縮したときの変形量と荷重の関係から、実験によって200kgf/mmとした。この結果のように、ロールによる端末支持は理論解析上の完全な固定ではないことが分かる。図5はロールによる支持をばね支持と考えたときと、完全固定と仮定したときの計算比を示したもので、ひずみはオフセット中で最大ひずみの発生する中央部で6~15%、ロール支持側は20~40%小さくなり、実験結果を裏付けている。なお、ロール支持間隔が大きいほどひずみの低下率が高いが、これは支持点のケーブルが、より傾きやすくなるためといえる。

幅方向移動量 w_D については、 P が50~200kgf/mmでは5~10%の増加になることが分かる。オフセット端が管路になっている場合のシースひずみ分布を図6に示す。計算に用いた

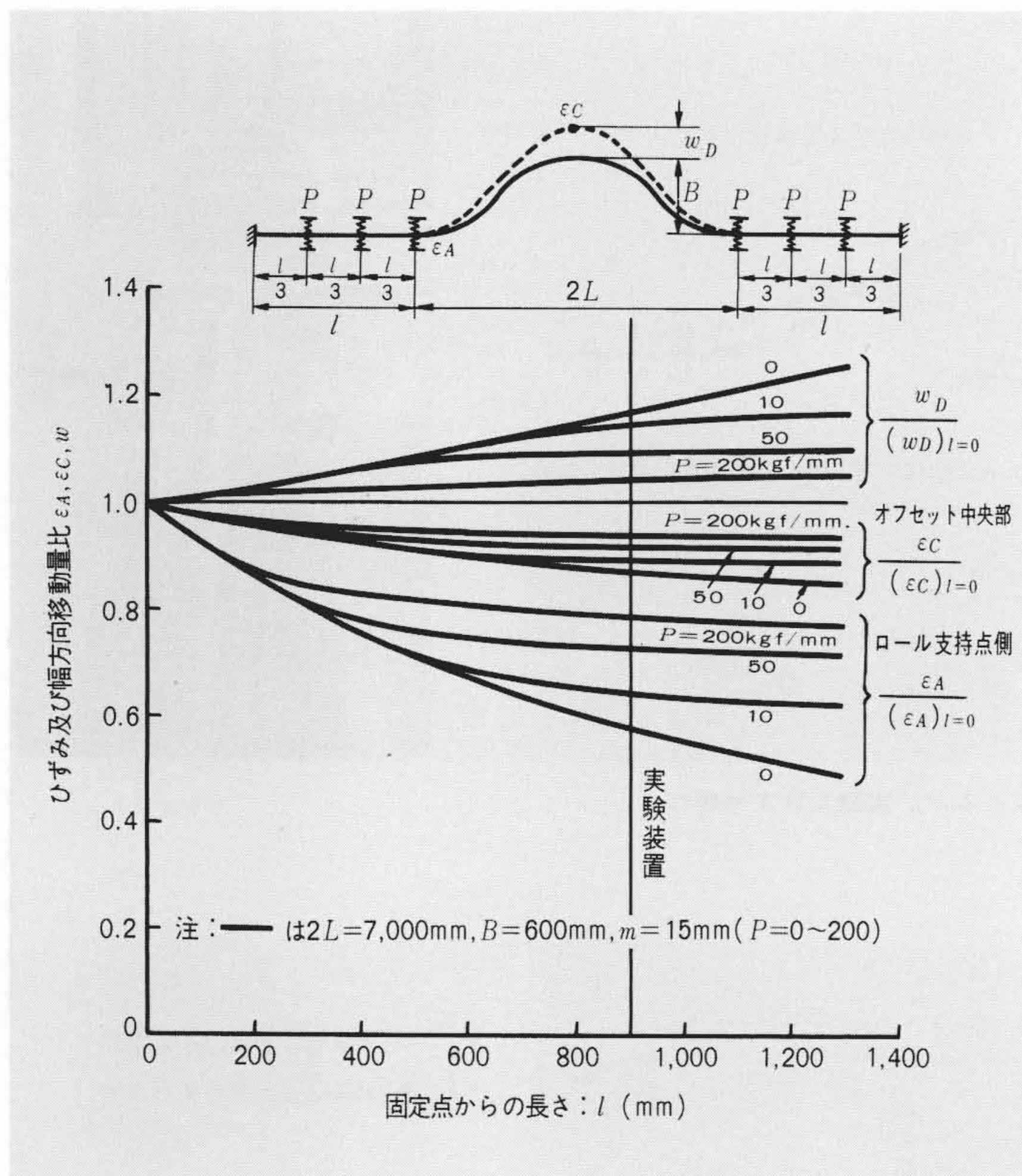


図5 ひずみ、幅移動量に及ぼすロール支持条件 オフセット端の支持力が弱い場合は、幅方向移動量と支持点側のひずみに大きな変化があるの分かる。

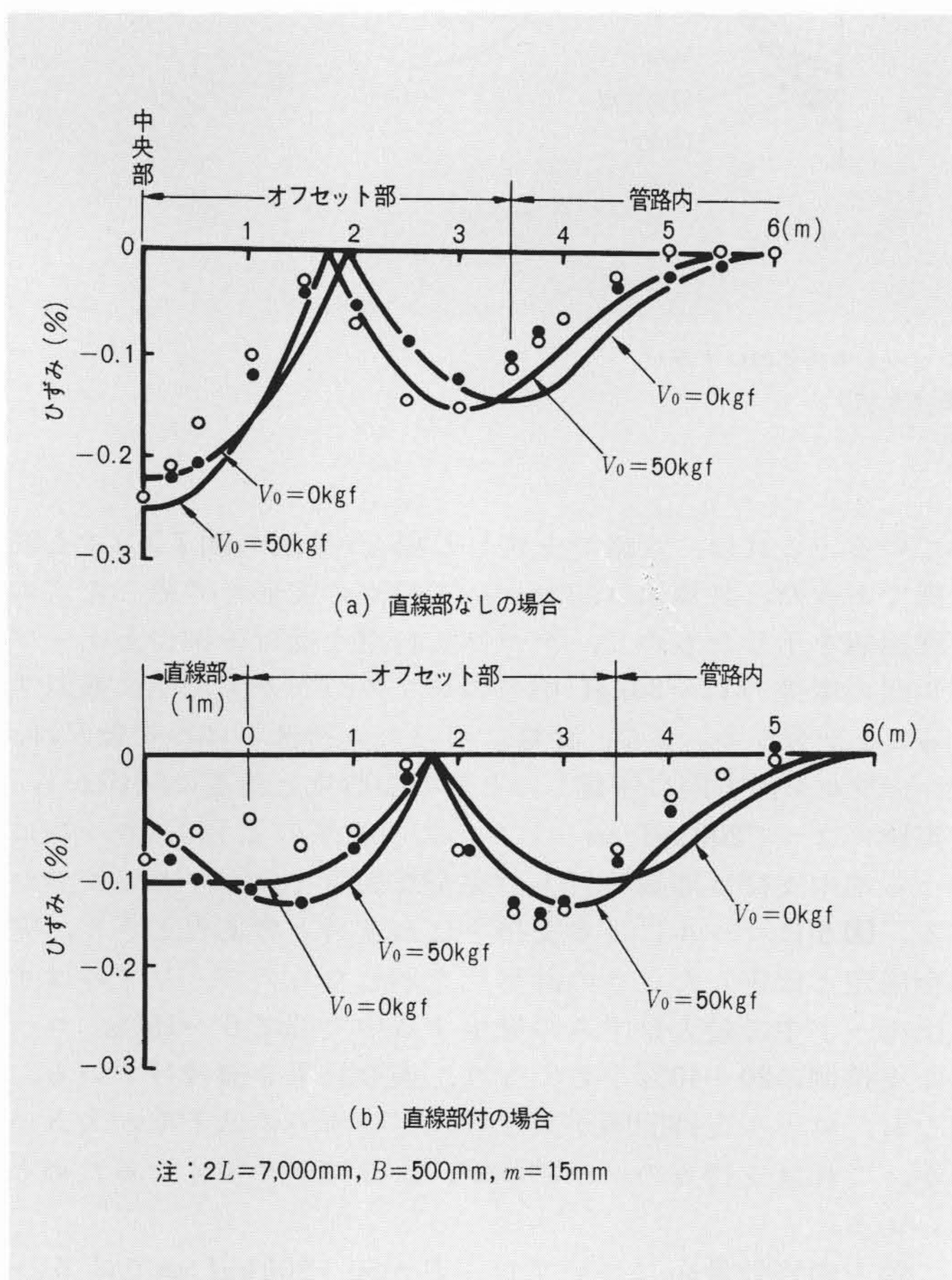


図6 管路支持実験値と計算値の比較 同じ曲げ半径のオフセット形状でも、中央部に直線部を設けると、オフセット中央部側ひずみが小さくなる。

β_s は、端末に軸力を受けたとき弾性床上梁に加わるモーメントが初めて0になる長さとの関係から決めた¹⁾。

この計算では、管路部分のひずみが0になる実験値1,500mmをとったが、これはケーブルによって異なると考えられる。計算値は実測値とよく一致しており、管路支持の場合も架台とケーブルの摩擦力 V_0 を考慮したほうがより近い値となる。

オフセット中央に1mの直線部を設けた場合には、中央部側曲りのひずみと管路口側曲りのひずみの大きさが均等に現われている(図6(b))。図7にこの直線部長さ l_s と最大ひずみの関係を示す。直線長さが変わっても管路口側のひずみ変化が小さい一方で、問題になる中央部のひずみは急激に低下することを示している。オフセット両側のひずみが等しくなる直線部長さは約1mとなるが、実験は偶然にその長さを選定したことになった。

(2) オフセット幅移動

オフセットは水冷管内に入れるため、幅移動の大きさもまた重要である。図8に幅方向移動量最大値とケーブル伸縮量との関係を示す。幅移動量の計算値は、前出の(5)式で表わされる。しかし、このオフセットのように、オフセット長さに対し幅の小さい形状では、ケーブル伸縮量が小さいときは実験値とよく合うが、伸縮量が大きくなると初期オフセット幅に対する変化分が大きくなるため、実験値と合わなくなる。そのときは、オフセット幅変化を考慮した吉田の式²⁾を使うほうが良い。

管路条件でのオフセット幅移動は、管路口でオフセット中央と反対向きの移動が生じたが、実質的な変化分としてその和を図8に示した。オフセット端、又は中央に直線部があるときは、この理論解(5)式で補正した。中央に1mの直線付きオフセットではおよそ10%の補正が必要である。

(3) オフセット反抗力

ケーブル伸縮量に対するオフセット反抗力の関係を図9に示す。実験値は $F = am^{0.39}$ の関係があるのに対し、この場合の理論式(6)は m に正比例と大きく異なっている。これは、ひずみ及び幅方向移動量が比較的良好に実験値を満足することができ

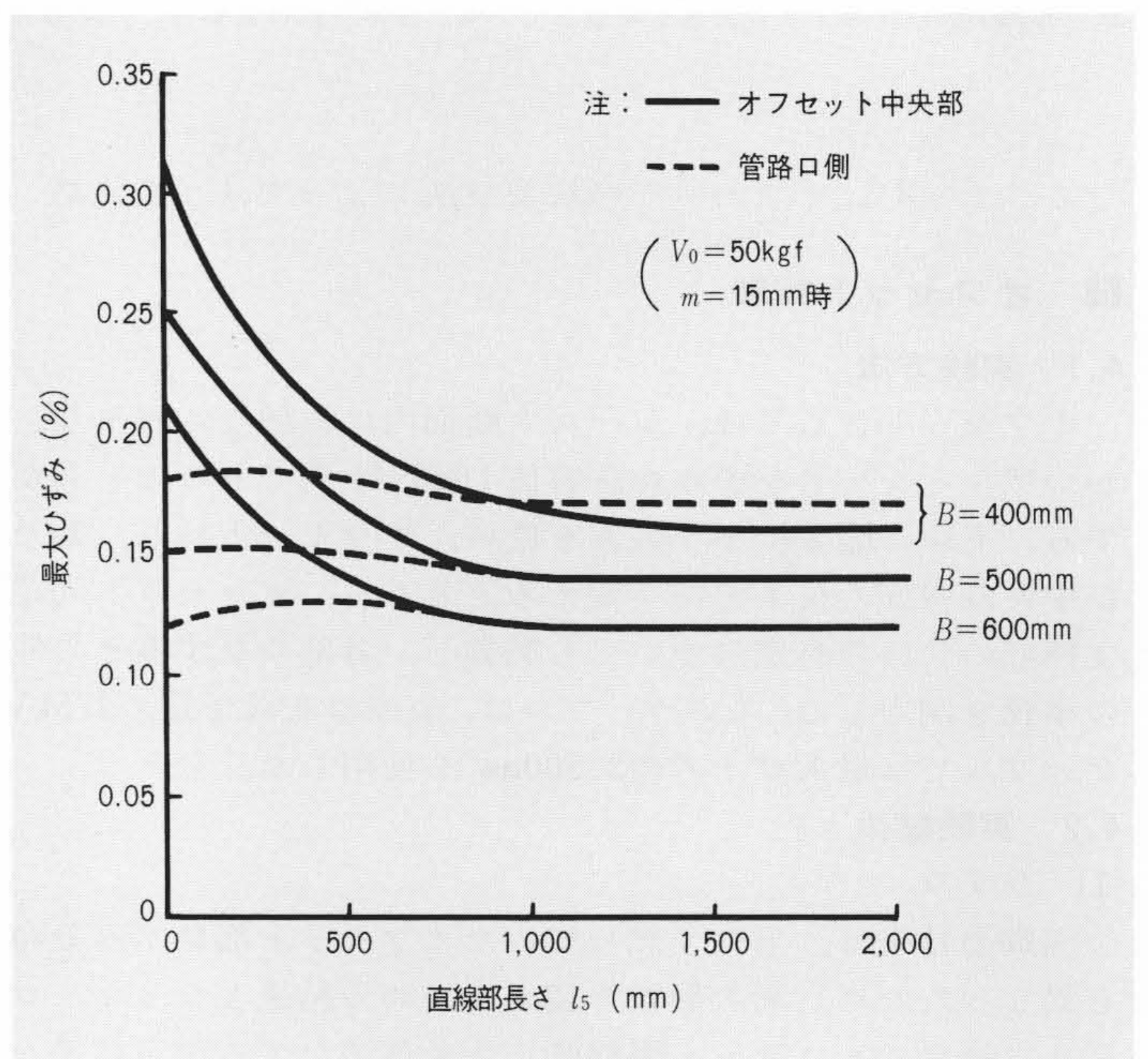


図7 オフセット部最大ひずみと中央直線長さの関係($L = 3,500</math> mm) オフセット部のひずみが均等化される中央部の直線長さは、約1mであることが分かる。$

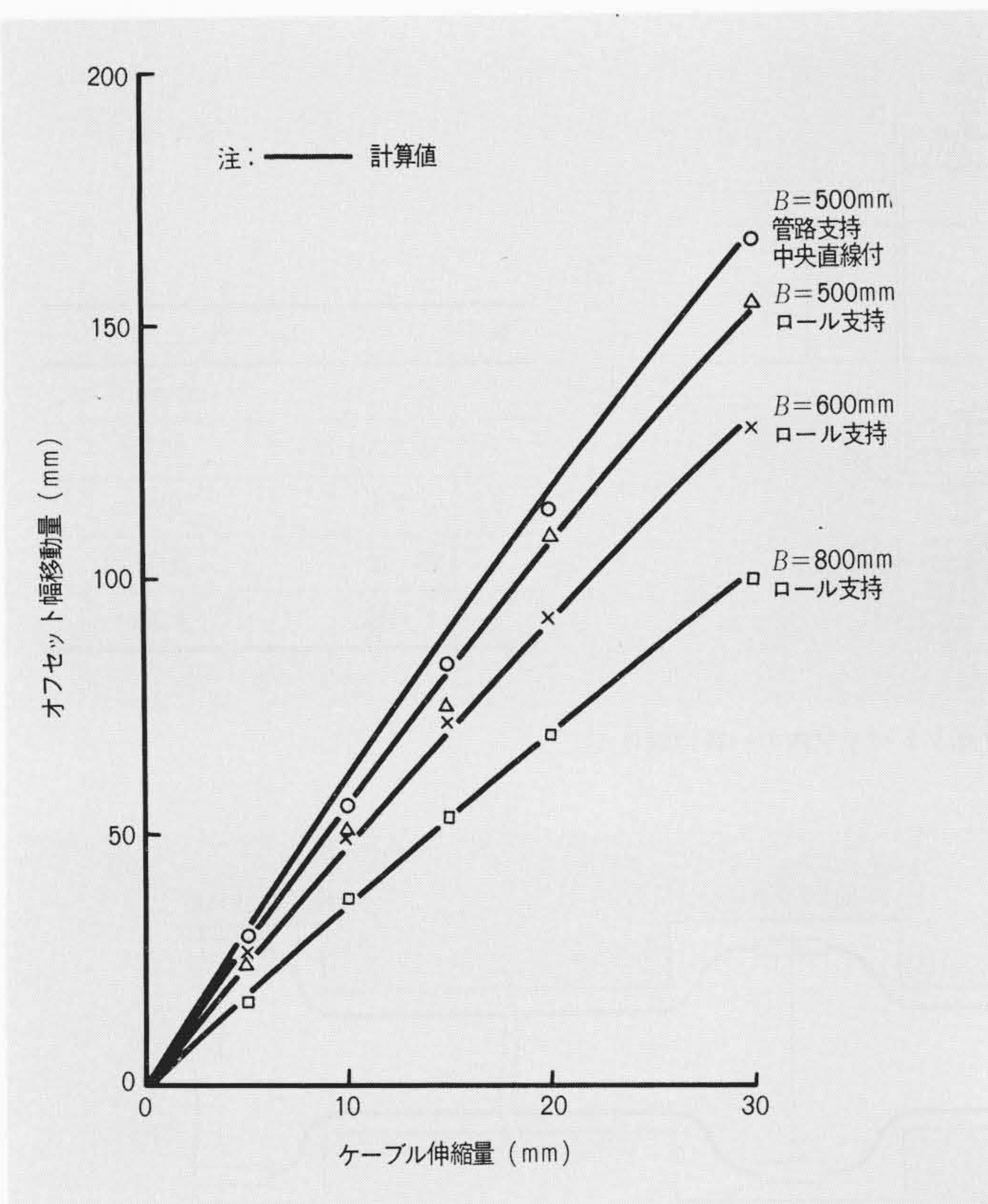


図8 ケーブル伸縮量とオフセット幅移動量の関係(2L=7,000mm) 実測値は、計算値とよく合うことを示している。

たのに対し、ケーブル変形を理論的に扱うとき常に問題となる弾性係数が直接関係する反抗力算出は、より複雑なものが含まれているためのものと思われる。

5 実設計例

5.1 オフセット形状

以上の検討結果から、275kV単心2,500mm²アルミ被OFケーブルの分散オフセット設計例について述べる。

分散オフセットを設計するに当たって検討する項目は下記のとおりである。

- (1) ケーブル伸縮量
- (2) ケーブルアルミシースひずみ
- (3) オフセット幅方向移動量
- (4) 洞道内スペース
- (5) ケーブル許容曲げ半径
- (6) ケーブル引入れ張力及び側圧

オフセットの基本形はアルミシースひずみが、オフセット部全体に分散して小さくなる中央部直線付のものとし、スパン長60m及び70mの2種で検討する。

ケーブル伸縮量の計算式及び諸定数は次のとおりである。

$$m = \frac{l}{2} \left(\alpha t - \frac{\mu w l}{2EA} - \frac{2K}{EA} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし $t > \frac{\mu w l}{\alpha EA}$

ここに m : ケーブル伸縮量(mm)

l : スパン長(mm)

α : ケーブル線膨張係数($1.67 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

t : 日間温度変化(35°C)……夜間無負荷, 昼間12時間90%連続負荷を想定した温度変化,

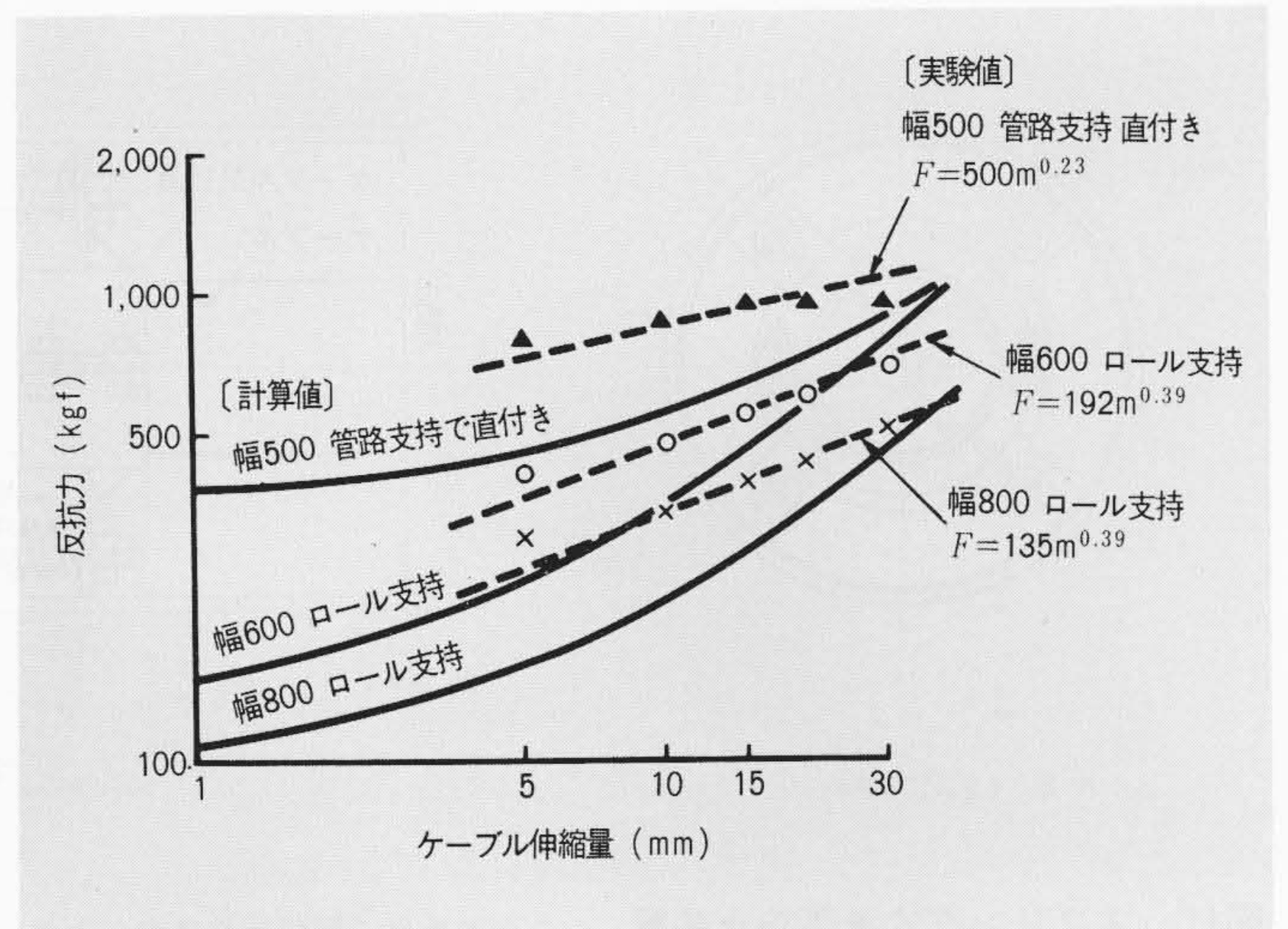


図9 オフセット反抗力(2L=7,000mm) 実験値は $F=am^n$ の関係になっている。

年間温度変化(75°C)

μ : FRPパイプとの摩擦係数(0.3)

w : ケーブル水中重量(0.025kgf/mm)

E : ケーブルヤング率(7,000kgf/mm²)

A : 導体断面積(2,500mm²)

K : オフセット反抗力^{*1)} 490kgf (35°C), 600kgf (75°C)

スパン長	ケーブル伸縮量	
	温度変化	
	日間35°C	年間75°C
60m	16.2mm	35.9mm
70m	18.9mm	41.9mm

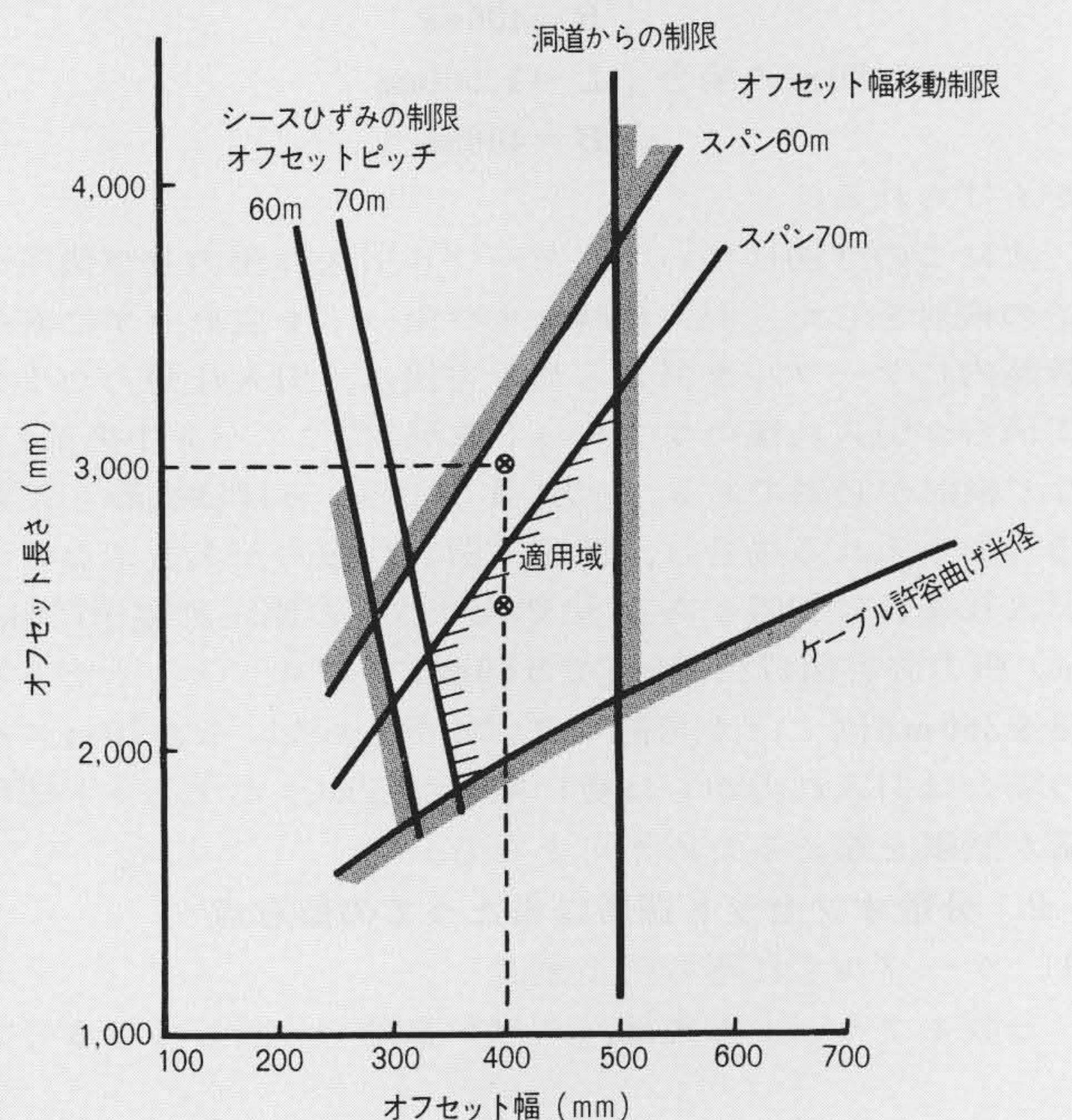


図10 オフセット寸法関係図 アルミシースの許容ひずみは、日間伸縮量に対して0.3%, オフセット幅移動は、年間伸縮量に対して210mmまでとした。また、ケーブル許容曲げ半径は $R \geq 20D$ (D : ケーブル径)とすると、オフセット適用域は図の斜線内となる。

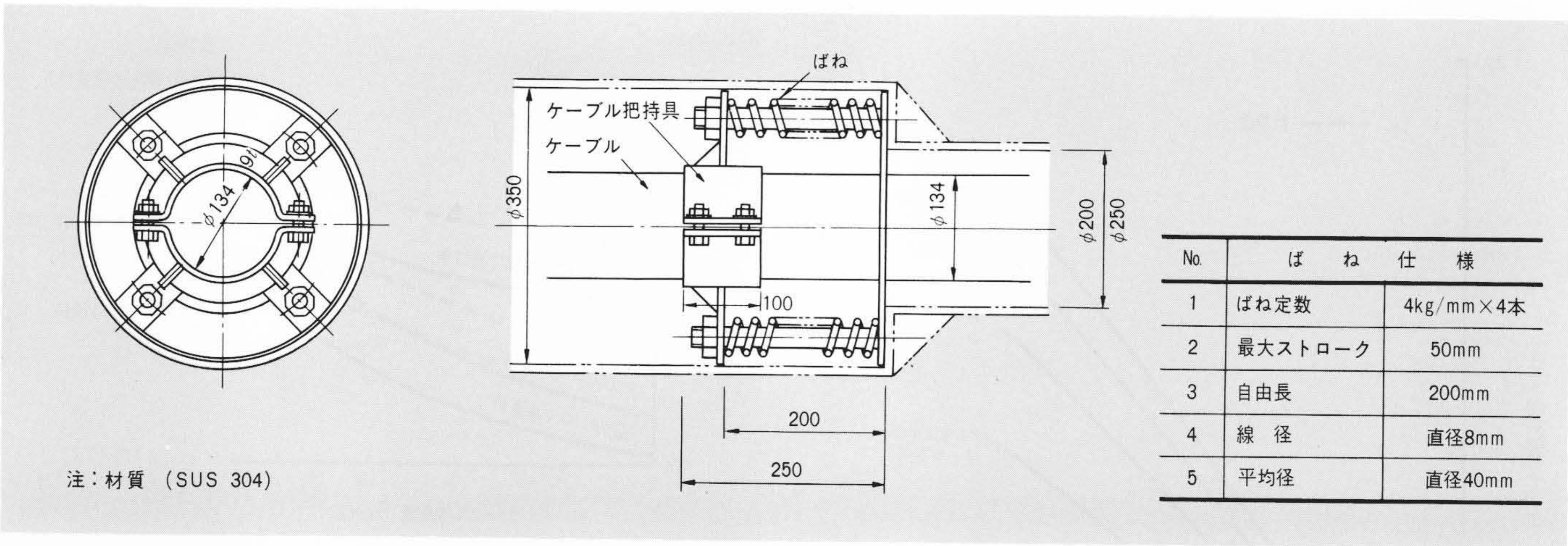


図11 スプリング式滑落防止装置 この装置は、取付け作業のしやすいオフセットパイプ内の一端に設ける。

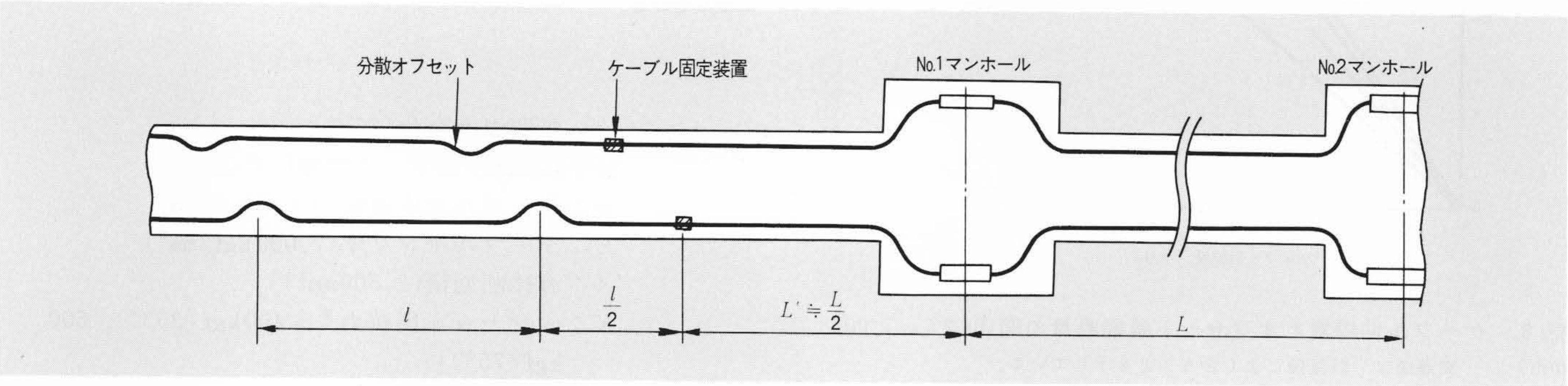


図12 分散オフセット区間と従来布設区間の境界 マンホール内へのケーブル伸縮量を、左右均衡になるような位置でケーブルを固定する。

以上の(2)～(5)の関連について、4章の検討結果を用いて計算したオフセット寸法関係を図10に示す。同図の中から各条件を満足するオフセット寸法を選定すると、

スパン60mの場合 $\begin{cases} L=3,000\text{mm} \\ B=400\text{mm} \end{cases}$
スパン70mの場合 $\begin{cases} L=2,500\text{mm} \\ B=400\text{mm} \end{cases}$

があげられる。

次にこの寸法について、ケーブル引入れ張力及び側圧の面での検討をした。引入れ時にオフセットを成形せずに直線で管路内にケーブルを引き入れる方法は、引入れ張力が小さくて済むが引入れ後のオフセット成形(特にスパン中央部)工法など検討が必要である。一方、オフセットをほぼ成形した管の中へ引き入れる場合は、側圧、引入れ張力が大きくなるので引入れ条長に制限がある。このケーブルの側圧許容値750kgf/m、張力許容値17,500kgfでは60mごとにオフセットがある管路を360m引くことが可能なことが分かった。なお70mスパンの場合は引入れ力からは更に楽になるが、オフセット幅移動量が制限を超えるため不可となる。

5.2 分散オフセット採用に当たっての留意点

(1) ケーブルずれ落ち防止装置

分散オフセット方式は、スパンを短く分割しているの

で温度変化でもケーブル全長が熱伸縮する。したがって、ルート中にわずかな傾斜やオフセット反抗力の不均衡があってもケーブルのずれ落ちが心配される。そこで、スパンの中央を固定するか、図11に示す装置をオフセット端に取り付けてずれ落ちを防止する必要がある。

(2) 分散オフセット区間と従来布設区間の境界

分散オフセット区間から従来布設区間へ移行する部分では、図12に示すようにNo.1マンホールのオフセットへのケーブル伸縮量を左右均衡のとれたものにする必要がある。したがって、No.1とNo.2マンホールのスパン長さの約半の箇所にケーブル固定装置を取り付けるよう留意する必要がある。

6 結 言

シールド洞道などマンホールが設けられない洞道での外部直接水冷ケーブルの熱伸縮対策として、分散オフセット方式を取りあげ研究開発を行なった結果、ほぼ実用化できる見通しが得られた。今後、この分散オフセット形布設方式が、直接水冷方式の地中送電線路の一つの標準布設方式となって、地中電力ケーブルの信頼性の向上に寄与することを期待する。

終わりに、この研究に当たって御指導、御援助をいただいた関係各位に対し厚く御礼申しあげる。

参考文献

1) 国島、ほか3名：ケーブルオフセット部のひずみ分布，昭和54年電気学会全国大会，No1154（昭54-4）
2) 吉田：オフセット部接続箱移動量の新しい計算式，昭和43年電気学会東京支部大会，No237（昭43-10）

※1) 反抗力はオフセット幅500mm、長さ3,500mmの形状から想定した。
なお、大サイズケーブルの場合、この値が多少変化しても伸縮量にはあまり影響しない。