

高油圧OFケーブル内圧補強層の検討

A Study on the Inside Pressure Reinforcement Layer of the High Oil Pressure OF Cable

網 野 弘* 福 田 重 穂*
Hiroshi Amino Shigeo Fukuda
大 内 敬 次* 菅 谷 恒 朗*
Keiji Ōuchi Tsuneo Sugaya

内 容 梗 概

OFケーブルなどの圧力ケーブルではケーブル鉛被を内圧に対して補強する方法として金属帯による内圧補強層が用いられる。ケーブルの耐内圧補強構造は通常、低油圧構造(0~3 kg/cm²)、中油圧構造(3~6 kg/cm²)および高油圧構造(6~18 kg/cm²)に分類される。本報告は最近、地下発電所など、高低差の大きいルートに布設される高油圧補強層について検討したもので、補強層の材料力学的取り扱いと実際の補強層について行なった耐内圧試験結果について述べ、現用の高油圧補強構造で短時間耐圧は 120 kg/cm² 以上、ケーブルの長時間加圧によって外径および補強テープのひずみの時間変化を生ずるのは 30 kg/cm² 以上であることを明らかにした。なお試験した補強構造については耐内圧に大きな差はみられず、最内層の短ピッチ補強テープの幅が比較的広いものの破断圧力が高いことが認められた。

1. 緒 言

最近、わが国においても地下発電所の引き出しなどの高低差の大きいルートに布設されるOFケーブルで、常時使用圧力が低油圧OFケーブルの許容圧力である 3 kg/cm² をこえるものがしばしば使用されるようになった。従来の低油圧OFケーブルは鉛被の耐内圧補強として、短ピッチ巻きの金属テープをケーブル鉛被上に密着して巻く構造で、ケーブル鉛被の長さ方向の応力に対しては特に補強層を設けていないが、高油圧補強OFケーブルの補強層ではケーブル軸方向の補強として長ピッチ巻きの補強テープを施すのが普通の設計である。今回、高油圧補強層の数種の構造のものについてその耐内圧強度、応力分担などを比較する試験を行なったのでその概要を報告したい。なお、補強層を材料力学的に扱い、テープの鉛被圧出を押える効果についても検討したのでその取り扱いと計算結果もあわせ報告する。

2. 補強層による耐内圧補強原理

補強層は円筒状鉛被の上にまかれた金属テープからなり、内圧による応力は金属テープに分担される。これは軸対称問題であるのですでに詳細な解析が行なわれている円筒の耐内圧理論を適用できる。

2.1 軸対称荷重のパイプの一般論

微小エレメントに作用する力の平衡関係を示すと第1図のようになる。図中に示す力の方向は矢印の方向をすべて正とする。

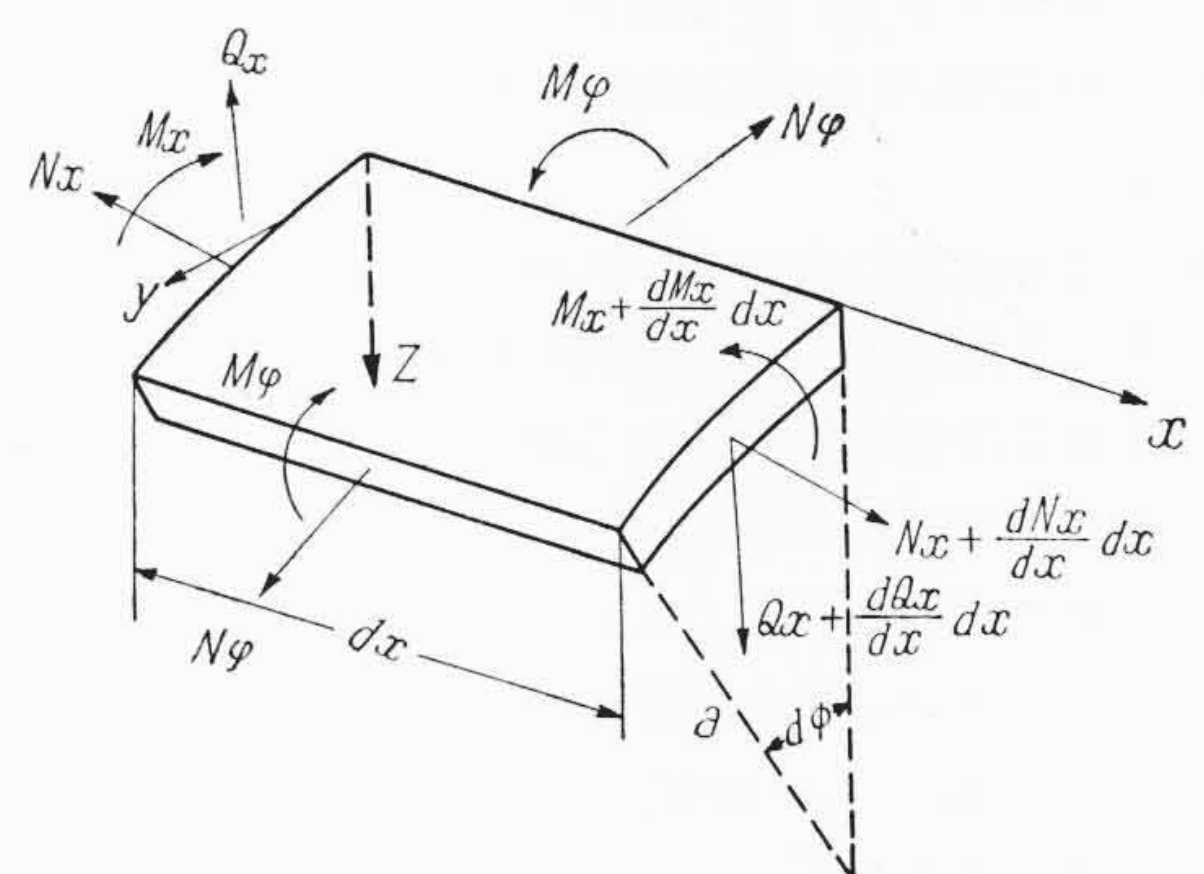
面に直角な力 N_x , N_ϕ , $(Z)^*$ } すべて単位長さ当たりの値を
せん断力 Q_x } 考える。ただし $(Z)^*$ は adx ,
曲げモーメント M_x , M_ϕ } $d\phi$ 面に働く単位面積当たりの力(圧力)で座標軸 Z 方向を正とする。

この面素に作用する力の平衡より次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_x}{dx} + \frac{1}{a} N_\phi &= -Z \\ \frac{dM_x}{dx} + Q_x &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

Q_x を消去して

$$-\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{1}{a} N_\phi = -Z \dots\dots\dots (2)$$



第1図 力の平衡関係図

2.2 変形を与える式の誘導

殻の曲げ剛性は一般に次式で求められる。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで E : 弾性係数
 ν : ポアソン比
 h : 板厚

Z 方向の変位を w で示すと

$$M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} \dots\dots\dots (4)$$

の関係がある。

また軸対称であるから N_ϕ は一定であり半径方向に w の変位がある場合には明らかに

$$N_\phi = -\frac{w}{a} E$$

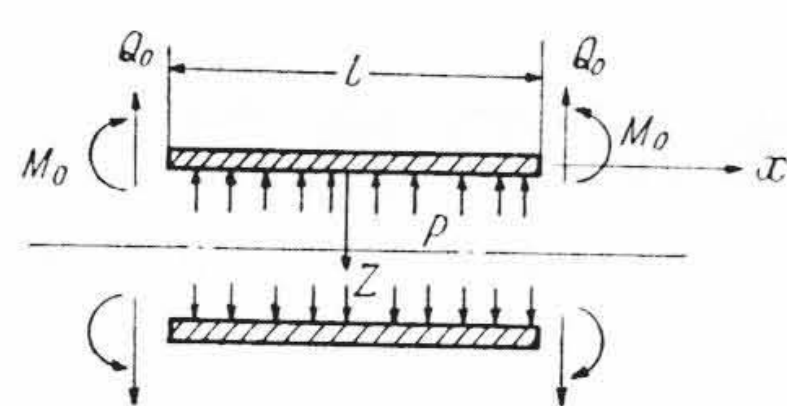
の関係がある。したがって変形を与える式はこれらの関係式を力の平衡式に代入して得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w &= \frac{Z}{D} \\ \beta^4 &= \frac{Eh}{4a^2 D} = \frac{3(1-\nu^2)}{a^2 h^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

内圧 p ($Z = -p$) が作用している場合の一般解は

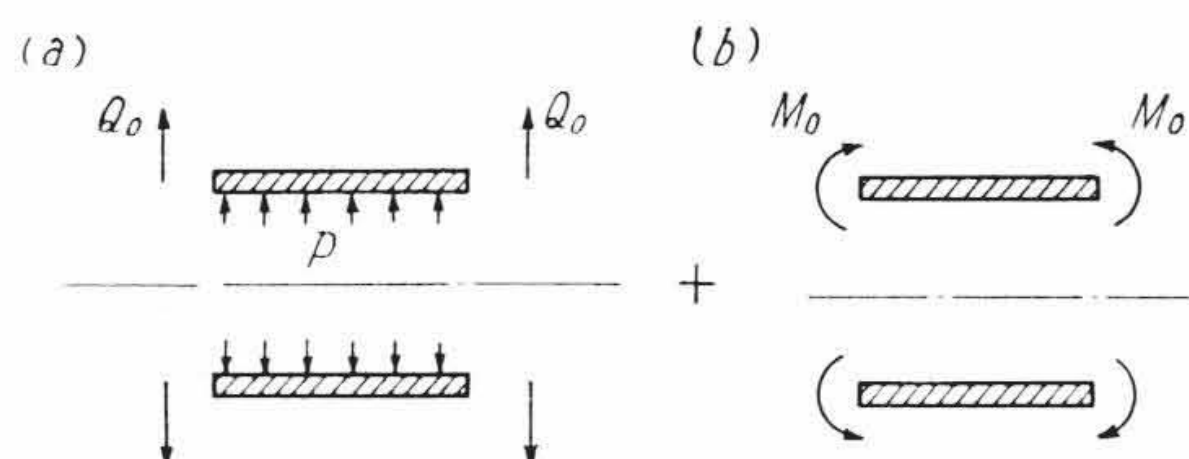
$$w = -\frac{pa^2}{Eh} + c_1 \sin \beta x \sinh \beta x + c_2 \sin \beta x \cosh \beta x + c_3 \cos \beta x - \sinh \beta x + c_4 \cos \beta x \cosh \beta x \dots\dots\dots (6)$$

* 日立電線株式会社



Q_0 : せん断力
 M_0 : 曲げモーメント
 p : 内 圧
 L : 補強リング間の長さ

第 2 図 補強層に加わるせん断力および曲げモーメント



第 3 図 せん断力と曲げモーメントの重畳

2.3 境界条件

今、補強リングを完全剛体とし、パイプに及ぼす作用を考えればそれらの力で置換できる。第 2 図および第 3 図に示すように補強リングに加わる力は Q_0 せん断力および p の内圧と曲げモーメント M_0 に区分できる。

変位が微小ならば重ね合わせの法則が適用できるから問題を簡単に扱うため次の 2 段階を踏んで上図の結果になるものとする。

(1) 内圧およびせん断力のある場合

境界条件は次のようになる。

(i) 中央では傾斜が零である。 $(dw/dx)_{x=0}=0$

(ii) 中央ではせん断力が零である。

$$(Q_x)_{x=0} = (dM_x/dx)_{x=0} = -D(d^3w/dx^3)_{x=0} = 0$$

(iii) 両端が曲げモーメント零である。 $(M_x)_{x=l/2} = -D$

(iv) 両端でせん断力が Q である。

$$(Q_x)_{x=l/2} = -D(d^3w/dx^3)_{x=l/2} = -Q_0$$

以上の条件を (6) 式に代入して w を求めると、

$$w = -\frac{pa^2}{Eh} - \frac{2Q_0\beta a^2}{Eh} \cdot \frac{2\sin\alpha\sinh\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh^2\alpha} \sin\beta x \cdot \sinh\beta x \\ - \frac{2Q_0\beta a^2}{Eh} \cdot \frac{2\cos\alpha\cosh\alpha}{\sin^2\alpha + \sinh 2\alpha} \cos\beta x \cosh\beta x \dots (7)$$

ただし $\beta l/2 = \alpha$

これより $x=l/2$ 端の変位と傾斜を求めると、

$$(w)_{x=l/2} = -\frac{pa^2}{Eh} - \frac{2Q_0\beta a^2}{Eh} \cdot \frac{\cos 2\alpha + \cosh 2\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ = -\frac{pa^2}{Eh} - \frac{2Q_0\beta a^2}{Eh} x_1(2\alpha) \dots (8)$$

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=l/2} = -\frac{2Q_0\beta^2 a^2}{Eh} \cdot \frac{-\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ = -\frac{2Q_0\beta^2 a^2}{Eh} x_2(2\alpha) \dots (9)$$

(2) 曲げモーメントのみがある場合

境界条件は次のようになる。

(i) 中央で傾斜が零である。 $(dw/dx)_{x=0}=0$

(ii) 中央でせん断力が零である。 $(Q_x)_{x=0} = -D(d^3w/dx^3)_{x=0}$

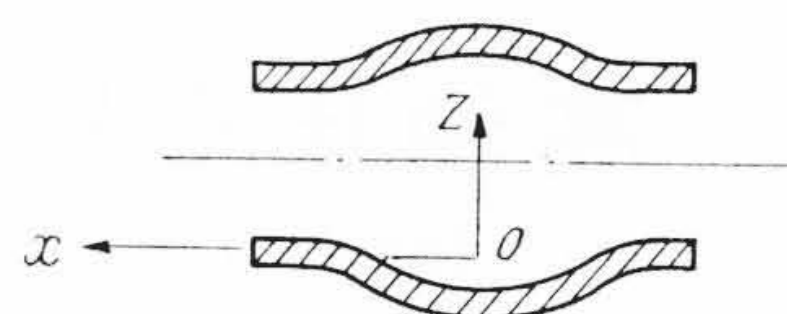
(iii) 端でせん断力が零である。

$$(Q_x)_{x=l/2} = -D(d^3w/dx^3)_{x=l/2} = 0$$

(iv) 端で曲げモーメントが M_0 である。

$$(M_x)_{x=l/2} = -D(d^2w/dx^2)_{x=l/2} = M_0$$

(6) 式において $p=0$ として以上の条件を代入すると次のようになる。



第 4 図 補強テープの変形

$$w = -\frac{2M_0\beta^2 a^2}{Eh} \cdot \frac{2(\sin\alpha\cosh\alpha + \cos\alpha\sinh\alpha)}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \sin\beta x \cdot \sinh\beta x \\ - \frac{2M_0\beta^2 a^2}{Eh} \cdot \frac{2(-\sin\alpha\cosh\alpha + \cos\alpha\sinh\alpha)}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \cos\beta x \cosh\beta x \dots (10)$$

$x=l/2$ 端における変位と傾斜は

$$(w)_{x=l/2} = -\frac{2M_0\beta^2 a^2}{Eh} \cdot \frac{-\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ = -\frac{2M_0\beta^2 a^2}{Eh} x_2(2\alpha) \dots (11)$$

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=l/2} = -\frac{M_0\beta^3 a^2}{Eh} \cdot \frac{-\cos 2\alpha + \cosh 2\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ = -\frac{4M_0\beta^3 a^2}{Eh} x_3(2\alpha) \dots (12)$$

2.4 補強リングがパイプに及ぼす力 (Q_0, M_0)

この場合の境界条件は次のようになる。

(i) 端 $x=l/2$ で傾斜が零である $(dw/dx)_{x=l/2}=0$

すなわち Q_0 による傾斜 (9) 式と M_0 による傾斜 (12) 式の和が零である。

$$-\frac{2Q_0\beta^2 a^2}{Eh} x_2(2\alpha) - \frac{4M_0\beta^3 a^2}{Eh} x_3(2\alpha) = 0$$

$$\therefore M_0 = -\frac{Q_0 x_2(2\alpha)}{2\beta x_3(2\alpha)} \dots (13)$$

(ii) 端 $x=l/2$ で変位が零である

すなわち Q_0, p による変位 (8) 式と M_0 による変位 (11) 式の和が零である。

$$-\frac{pa^2}{Eh} - \frac{2Q_0\beta a^2}{Eh} x_1(2\alpha) - \frac{2M_0\beta^2 a^2}{Eh} x_2(2\alpha) = 0$$

以上により未知数 Q_0, M_0 を求めると

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= -\frac{p}{\beta} \frac{x_3(2\alpha)}{2x_1(2\alpha)x_3(2\alpha) - x_2^2(2\alpha)} \\ &= -\frac{p}{\beta} x_3(2\alpha) \\ &= -\frac{p}{\beta} \frac{-\cos 2\alpha + \cosh 2\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ M_0 &= \frac{p}{2\beta^2} \frac{x_2(2\alpha)}{2x_1(2\alpha)x_3(2\alpha) - x_2^2(2\alpha)} \\ &= \frac{p}{2\beta^2} x_2(2\alpha) \\ &= \frac{p}{2\beta^2} \cdot \frac{-\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

2.5 中央におけるふくらみ量

(7) 式および (10) 式において $x=0$ とおき、その和を求めればよい。

$$w_0 = -\frac{pa^2}{Eh} - \frac{2Q_0\beta a^2}{Eh} \cdot \frac{2\cos\alpha\cosh\alpha}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ - \frac{2M_0\beta^2 a^2}{Eh} \cdot \frac{2(-\sin\alpha\cosh\alpha + \cos\alpha\sinh\alpha)}{\sin 2\alpha + \sinh 2\alpha} \\ = -\frac{pa^2}{Eh} \left\{ 1 - \frac{2(\cos\alpha\sinh\alpha + \sin\alpha\cosh\alpha)}{\sin 2\alpha + \sinh^2\alpha} \right\} \dots (15)$$

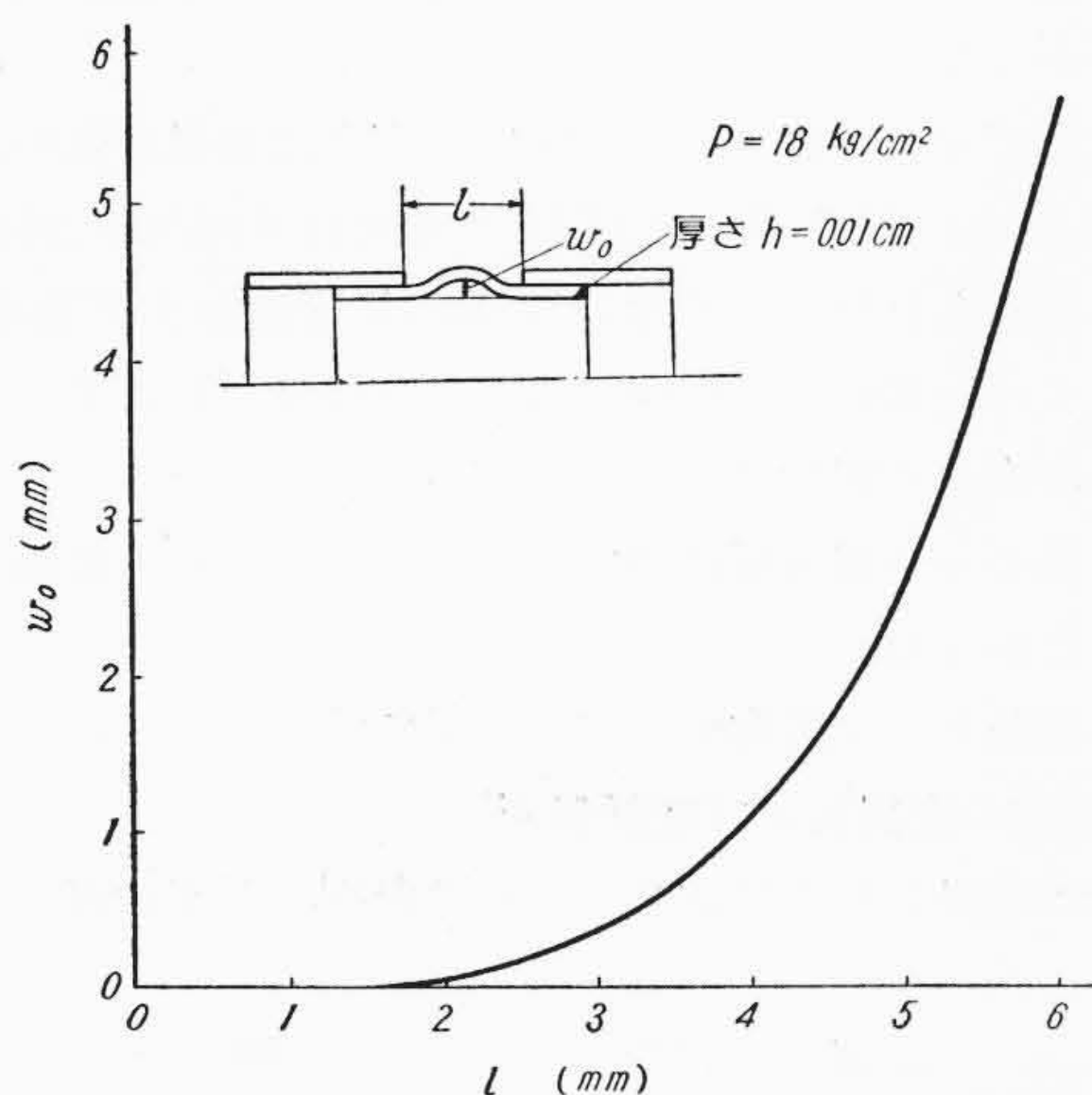
補強リング間のふくらみ量は (15) 式で表わされる。

第1表 供試ケーブルの補強構造

	H-1-A	H-1-B	H-2-A	H-2-B	H-H-3	H-H-4
鉛被内径 (mm)	59.2	59.2	59.2	59.2	59.2	59.2
鉛被厚さ (mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
座 床 (mm)	クロロブレン引綿テープ 0.25×1 (1/2ラップ)	クロロブレン引綿テープ 0.25×1 (1/2ラップ)	クロロブレン引綿テープ 0.25×1 (1/2ラップ)	クロロブレン引綿テープ 0.25×1 (1/2ラップ)	クロロブレン引綿テープ 0.25×1 (1/2ラップ)	クロロブレン引綿テープ 0.25×1 (1/2ラップ)
銅テープ (mm)	—	—	—	—	CuP 0.1×25×1 1~2オーバーラップ	CuP 0.1×25×2
短ピッチ補強 SuS 27 CS(mm)	0.4×40×2 ピッチ=43	0.4×40×2 ピッチ=43	0.4×20×2 ピッチ=23	0.4×20×2 ピッチ=23	0.4×25×2 ピッチ=28	0.4×10×2 同時巻きピッチ=26
介在テープ	—	クロロブレン引綿テープ	—	クロロブレン引綿テープ	クロロブレン引綿テープ	クロロブレン引綿テープ
長ピッチ補強 SuS 27 CS(mm)	0.4×10×19 ピッチ=1,200	0.4×10×19 ピッチ=1,200	0.4×10×19 ピッチ=1,200	0.4×10×19 ピッチ=1,200	0.4×10×19 ピッチ=1,000	0.4×10×19 ピッチ=1,000
介在テープ	—	クロロブレン引綿テープ	—	クロロブレン引綿テープ	クロロブレン引綿テープ	クロロブレン引綿テープ
押え巻き SuS 27 CS(mm)	0.2×25×2 同時巻き	0.2×25×2 同時巻き	0.2×25×2 同時巻き	0.2×25×2 同時巻き	0.4×25×1 2枚同時巻間にクロロブ レン引綿テープ	0.4×10×2 同時巻きピッチ=25

第2表 補強テープの機械的性質

補強層の名称	補強材の記号および寸法 (mm)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	耐 力 (kg/mm ²) (0.2%ひずみ)
座 床 銅 テ ー プ	CuP 0.1×25	36.4	6.0	12.0
短ピッチ補強テープ	SuS 27 CS 0.4×40	60.4	51.8	26.0
短ピッチ補強テープ	SuS 27 CS 0.4×20	61.7	50.6	24.2
長ピッチ補強テープ	SuS 27 CS 0.4×10	65.4	49.5	21.0
押え巻きテープ	SuS 27 CS 0.2×25	62.4	52.7	31.5



第5図 銅テープの突出と補強テープ間げきとの関係

なお $\alpha < 1$ の場合は次式となる。

$$w_0 = -\frac{1}{6} \frac{pa^2}{Eh} \alpha^4 = -\frac{1}{32} \frac{(1-\nu^2)}{Eh^3} pl^4 \quad \dots\dots\dots (16)$$

2.6 銅テープ座床層に対する適用例

鉛被の圧出を押える目的で補強層の最内層に薄い銅テープを施す構造がしばしば採用される。この場合の銅テープの突出を(16)式を用いて計算してみる。数値としては下記をとる。

銅テープのヤング率 $E = 1.13 \text{ kg/cm}^2$

鉛 被 外 半 径 $a = 3.71 \text{ cm}$

銅 テ ー プ 厚 $h = 0.01 \text{ cm}$

ポ ア ソ ン 比 $\nu = 0.35$

銅テープの外層に巻く補強テープの間げき l と突出量との関係は第5図に示すように与えられる。この図から間げきが3 mm以下であれば鉛被の圧出も0.5 mm以下に押えられることがわかる。

3. 各種高油圧補強層の耐内圧試験

3.1 供試ケーブルの補強構造

第1表に試験を行なった補強層の構造を示す。試作した補強層は6種類であり、いずれも最高使用圧力としては15 kg/cm²を前提とした設計のものである。試験ではケーブル構造のうち次の諸点について比較することを目標とした。

- (i) 最内層の短ピッチ補強テープと耐内圧強度の関係
- (ii) 座床用の薄銅テープの鉛被圧出抑制効果
- (iii) 金属テープ間の介在布テープの効果
- (iv) 長ピッチ補強テープおよびバインドテープの耐圧強度との関係

補強テープの材質は第2表に示すものを用いた。

3.2 短時間加圧破断試験

補強層の試験としては短時間の圧力加圧破断試験と長時間にわたる圧力加圧によるクリープ試験が考えられるが、ここでは短時間の圧力加圧破壊試験に限定する。実験に使用した試料は長さ2 mのものでケーブルの内部構造物は除いてある。両端に特殊終端処理を施し、終端部においては破壊を生じないようにした。

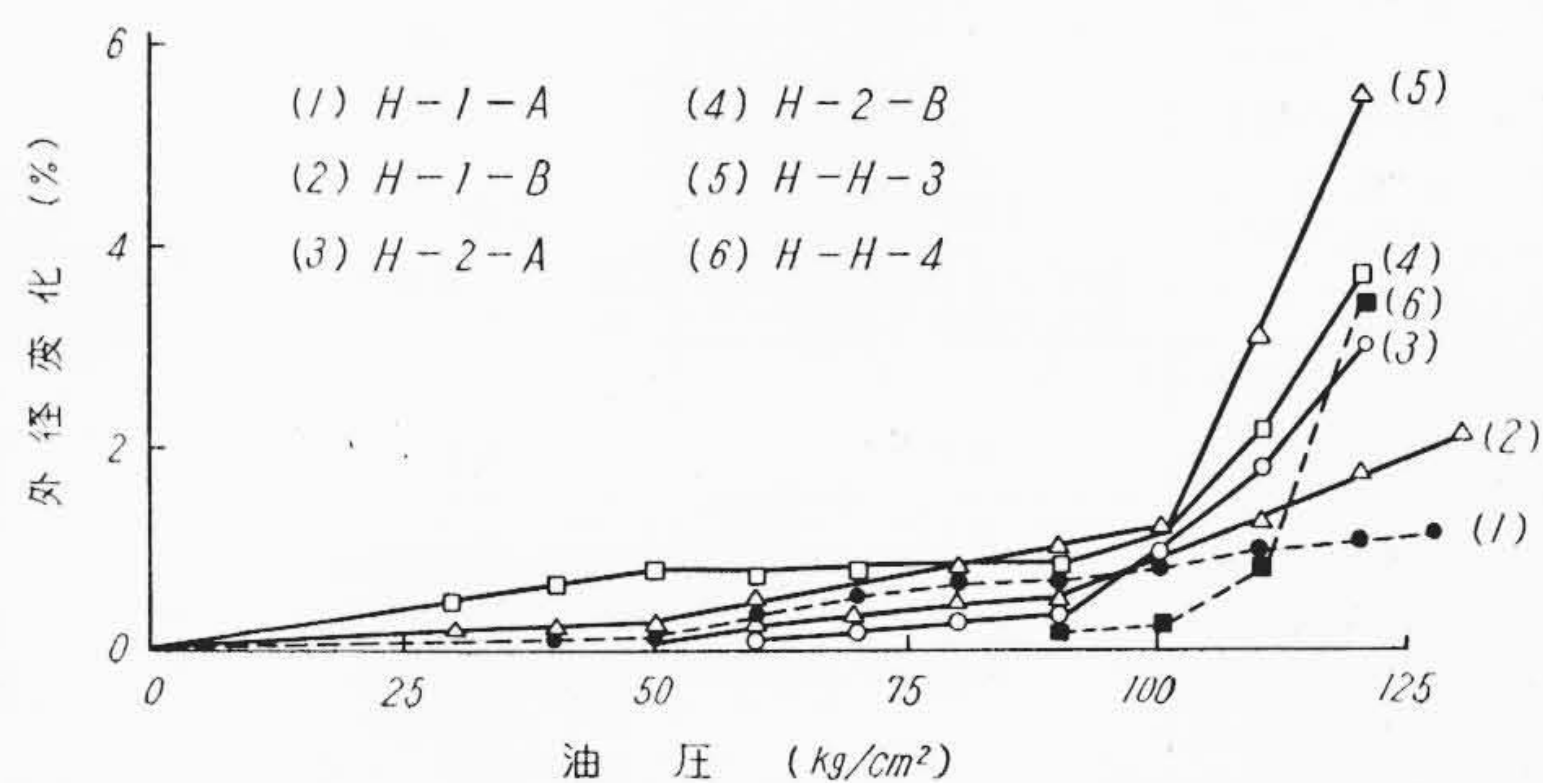
加圧方法は油圧器により5 kg/cm²ごと10分間の昇圧を行なった。

3.2.1 油圧によるケーブル外径および長さの変化

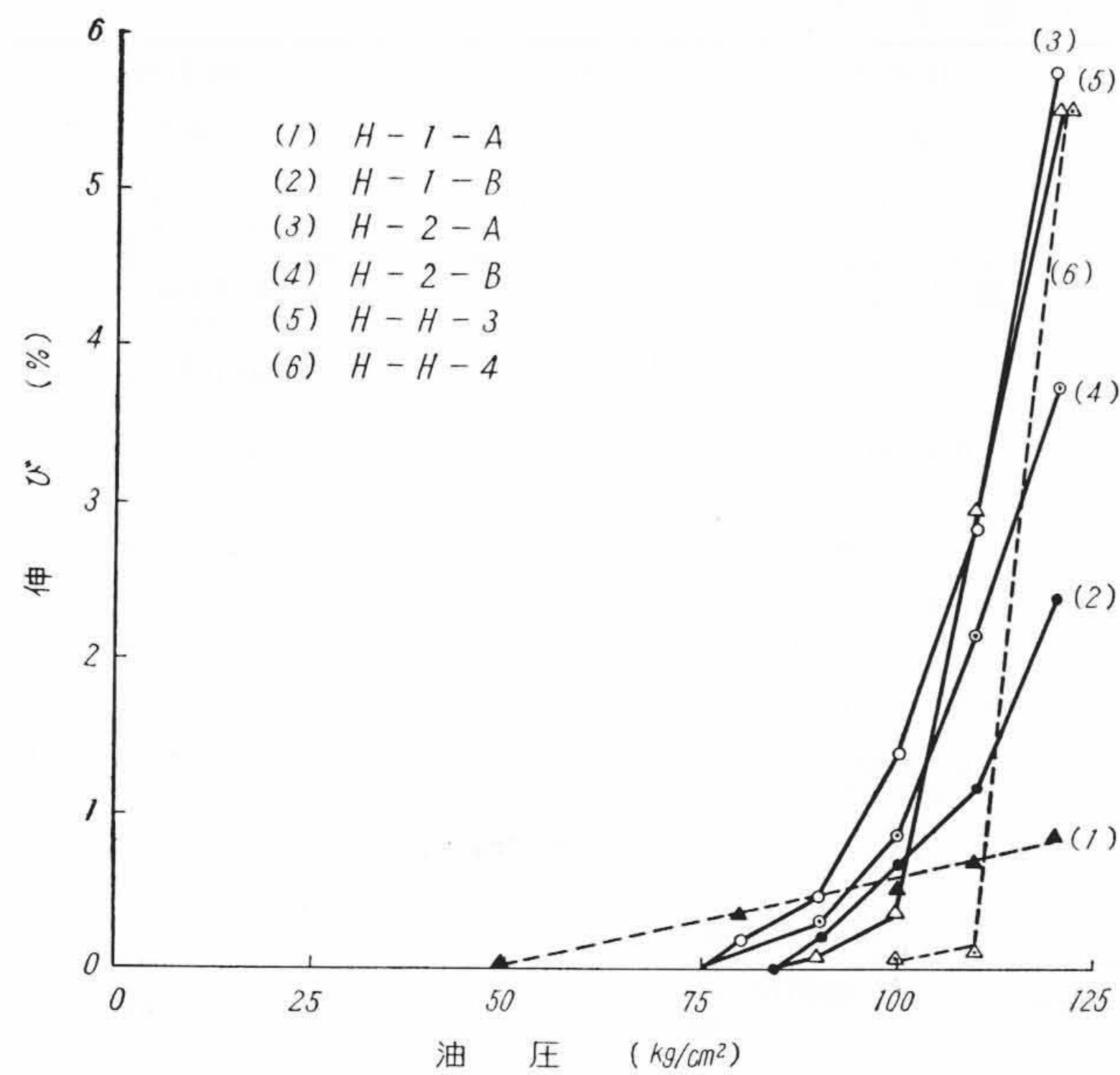
第6図および第7図は内圧を加えた状態でのケーブル外径とケーブル長さの変化を示したものである。

第6図のケーブル外径と油圧の関係曲線をみるといずれの場合も圧力が100 kg/cm²、破壊圧力の80%をこえると急激にケーブル外径が増大することが明らかとなった。ケーブル構造別では、H-1-A形、H-1-B形ケーブルでは外径変化が小さい。

これらの結果を補強層構造と対応してみると、内圧に対する補強として働くものは、短ピッチ補強、長ピッチ補強およびその押え巻きであるが、最内層の短ピッチ補強層が外径変化に対しては最も重要なものと考えられる。この点から外径変化量の大きいものと小さいものについて比較すると第1表に示したとおり、短ピッチ補強テープの幅の広いもの、すなわちH-1-AおよびH-1-B



第6図 圧力と円周方向の伸びとの関係



第 7 図 圧力とケーブル方向の伸びとの関係

が幅の狭いテープを使用している他のケーブルに比較して効果的であることがわかる。

長さ方向の伸びの変化は第 7 図にみられるように外径変化の場合と同じように、H-1-A、H-1-B が他の補強構造のものに比較して良好な結果を示している。長さ方向に対する補強としては長ピッチ補強層がもっとも大きな補強効果をもつと考えられるが、実験に使用した 6 種のケーブルの長ピッチ補強層はいずれも同一のものでありながら長さ方向の補強に対しても短ピッチ補強層の幅の広いもののほうが外径変化に対する場合と同じように効果的であった。

3.2.2 スネーク 状 況

油圧加圧時のケーブルのスネーク状況について測定を行なった。第 8 図に結果を示す。このスネ

ークは約 80 kg/cm² 付近より発生し、圧力の増加にしたがって大きくなる。破断個所は図に示したとおりほとんどスネークの最大点において補強テープの間げきが広くなるため鉛被が圧出し破断に至っている。

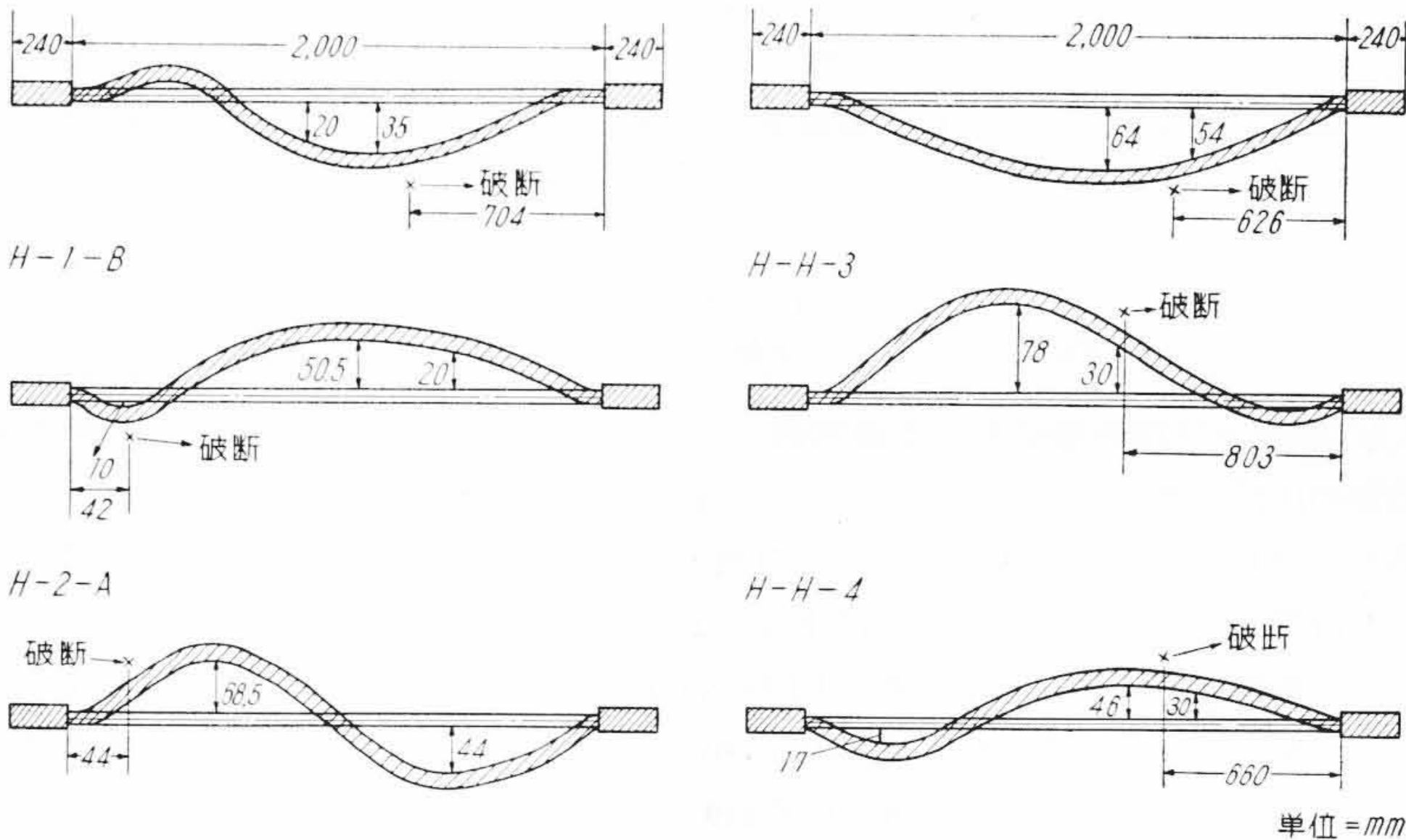
3.2.3 破断圧力と補強構造の損傷

第 3 表に短時間破断油圧を示す。各補強構造とも破断油圧にはほとんど差がみられない。ただし、短ピッチ補強テープの幅が広い、H-1-A および H-1-B において、他の構造より若干高い破断油圧を示した。破断後の供試ケーブルを解体して補強構造の変化をまとめたのが第 4 表である。なお解体したケーブルの状況を第 9 図に示す。これら補強構造の損傷状況とその他の状況との関係のうち注目すべきものを列記すると次のようになる。

- (1) H-H-3 および H-H-4 では座床層上の銅テープが完全に破断した。
- (2) 短ピッチ補強に用いたテープはいずれも破断現象は認められなかった。
- (3) 短ピッチ補強テープの間げき変化は外径変化の比較的小さい H-1-A、H-1-B および H-2-A では 6 m/m、外径変化の大きく認められたものでは H-2-B、H-H-3 および H-H-4 などにおいて 6～10 m/m 程度であり、外径変化にはテープ間げきの乱れが大きく影響することが明らかとなった。
- (4) 長ピッチ補強層に用いたテープはいずれも破断現象は認められなかった。
- (5) 補強テープ間布テープの効果は特に認められなかった。

3.2.4 鉛被の圧出および破断個所

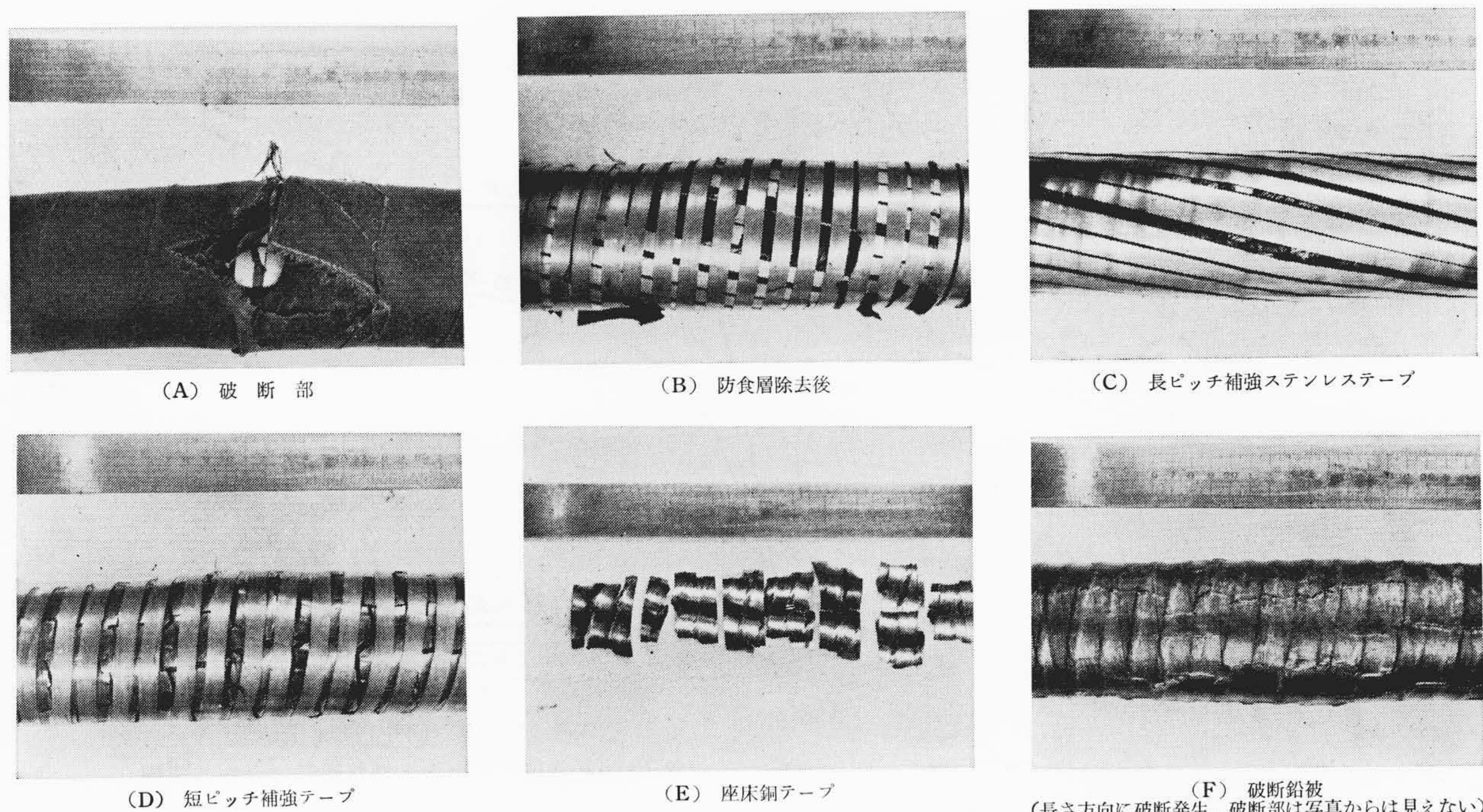
第 5 表に破断した各供試ケーブルの鉛被の圧出状況を示す。



第 8 図 油 圧 試 験 時 の ス ネ ー ク 状 況

第 4 表 各 種 ケ ー ブ ル の 解 体 状 況

測 定 項 目		ケ ー ブ ル 名 称					
		H-1-A	H-1-B	H-2-A	H-2-B	H-H-3	H-H-4
破断口の状況	破断部外径 (mm)	防食層含み=1.2 鉛 被=8.3	防食層含み=2.0 鉛 被=9.0	防食層含み=3.0 鉛 被=9.5	防食層含み=3.8 鉛 被=10.2	防食層含み=4.8 鉛 被=13.6	防食層含み=6.0 鉛 被=15.0
	長さ方向 (mm)	6	20	40	26	40	40
	破断部の形状	—	—	—	—	—	写真参照
	破断圧力 (kg/cm ²)	126 7分	135 1分	120 1分	120 3分	120 1分	123 2分
解 体 状 況	座床テープ	短ピッチ補強テープに沿って破れている	短ピッチ補強テープに沿って破れている	短ピッチ補強テープに沿って破れている	短ピッチ補強テープに沿って破れている	長さ方向に 2～3 箇所破れが見られた	長さ方向に 2～3 箇所破れが見られた
	銅テープ	—	—	—	—	銅テープは完全に破断している	銅テープは完全に破断している
	SuS 27 CS 短ピッチ補強	異常なし テープギャップ 4～6mm	異常なし テープギャップ 4mm	異常なし テープギャップ 5mm	異常なし テープギャップ 10mm	異常なし テープギャップ 8mm	異常なし テープギャップ 6～10mm
	介在テープ	—	1 箇所破断	—	数多く破断	数多く破断	数多く破断
	SuS 27 CS 長ピッチ補強	異常なし 座屈なし	異常なし 座屈なし	異常なし 座屈なし	異常なし 座屈なし	異常なし テープギャップ 7mm	異常なし テープギャップ 8mm
状 況	介在テープ	—	長ピッチ補強テープに沿って破れている	—	長ピッチ補強テープに沿って破れている	長ピッチ補強テープに沿って破れている	長ピッチ補強テープに沿って破れている
	SuS 27 CS 押さえ巻き	異常なし、スネーク大の部分に乱れあり	異常なし	異常なし テープギャップ 8mm	異常なし テープギャップ 10mm	異常なし テープギャップ 14mm	異常なし テープギャップ 6mm



第9図 内圧試験後の解体状況 (H-H-4)

第5表 内圧試験後の鉛被圧出状況

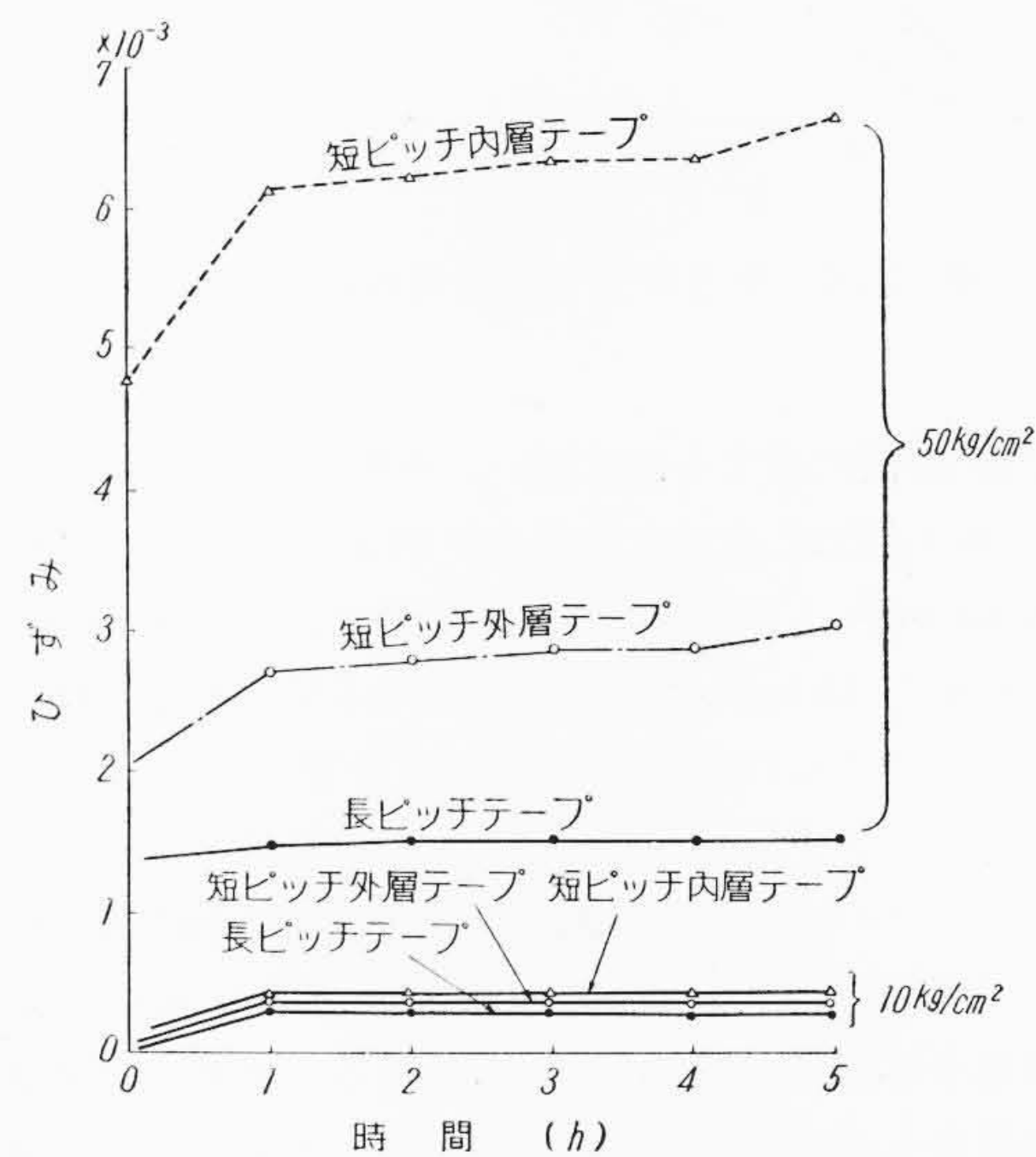
ケーブル名	圧出鉛被の幅 (mm)	圧出鉛被の高さ (mm)	圧出鉛被状況	備考
H-1-A	9.0	0.5		
H-1-B	7.8	0.7		
H-2-A	11.0	0.5		
H-2-B	4.0	0.2		
H-H-3	10.4	0.5		破断部の検出はガス封入
H-H-4	7.4	0.8		

破断個所の状況は、座床層上に薄い硬銅テープを用いた H-H-3 および H-H-4 とその他の短ピッチ補強テープを座床上に直接巻いたものとは異なる。前者においては鉛被の破断個所が必ずしも圧出部ではない。後者においては必ず圧出部において破断している。この点からのみ考えると軟銅テープを座床上に用いれば圧出部の破断を押える効果を持つと考えられる。圧出部の高さは短ピッチ補強テープの厚さと比較するとほとんどの場合、最内部の補強テープの値を越えているから二重補強としても鉛被の圧出を押えうるとは断定できない。

3.3 長時間耐圧試験

3.3.1 試験方法

長さ 2m のケーブル試料をとり、中心部の防食層を 200mm 除去し、各補強テープごとに抵抗線ひずみ計 (K-19-1) を接着した。両端末はスリーブを用いて圧着し密封した。油圧の加圧条件は次のとおりである。

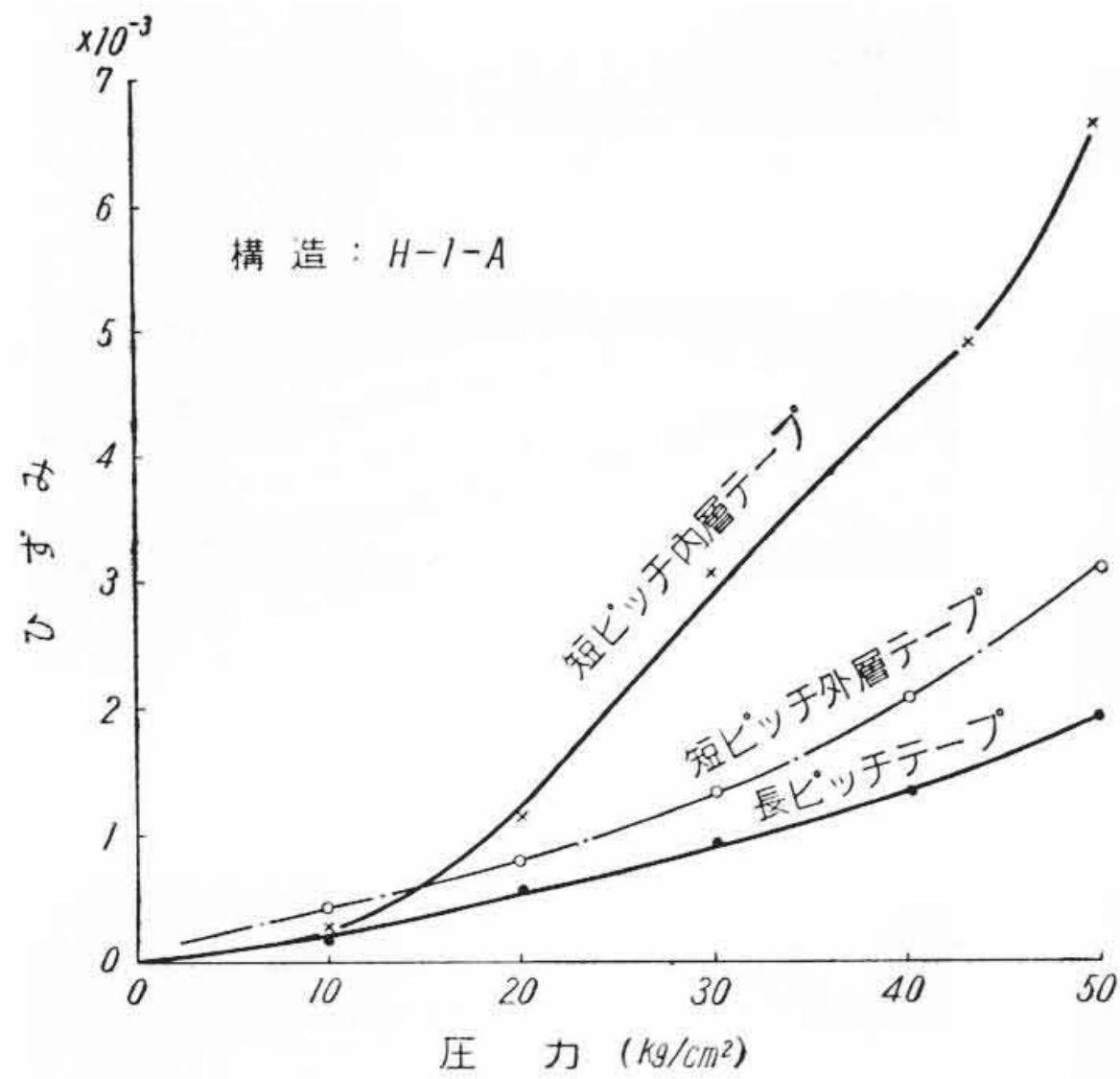


第10図 補強層のひずみの時間変化

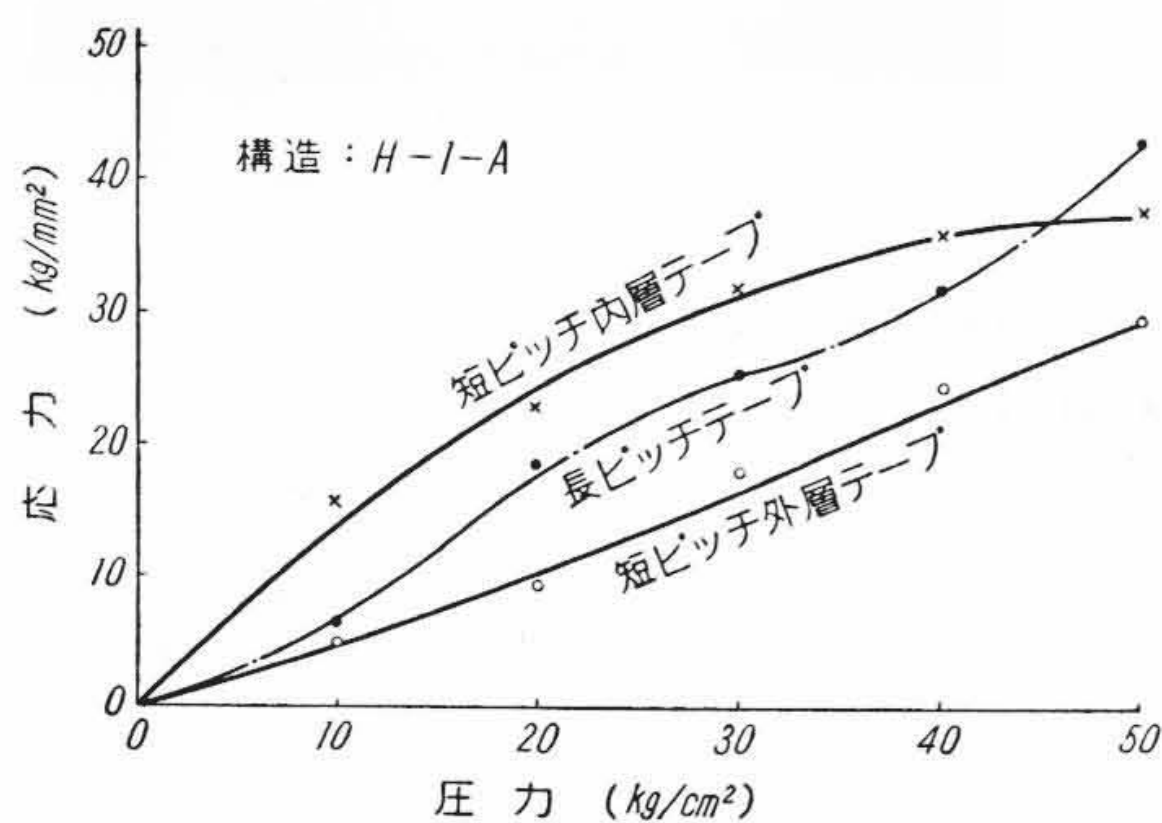
圧力 (kg/cm ²)	保時時間 (h)
10	0.5
20	1
30	7
40	15
50	30～漏油まで

3.3.2 各補強テープのひずみおよび応力

油圧加圧時には補強層を構成する各テープはそれぞれ応力を分担し、それに応じたひずみを生ずる。一定圧力に対するひずみの時間変化の測定例を H-1-A について第10図に示す。油圧を加えた直後にひずみは急激に増大するが、これは加圧瞬時には各テープ間、鉛被とテープ間に間隙が存在し、これを埋め合わせるように内部の鉛被あるいは補強テープが外層テープに密着するまで変形するためである。その後のひずみの増加は、内圧による応力によって材料がクリープ的に変形する領域である。内圧補強層として問題となるのはこの部分である。試験結果、ひずみの増加



第 11 図 圧力による補強層のひずみ

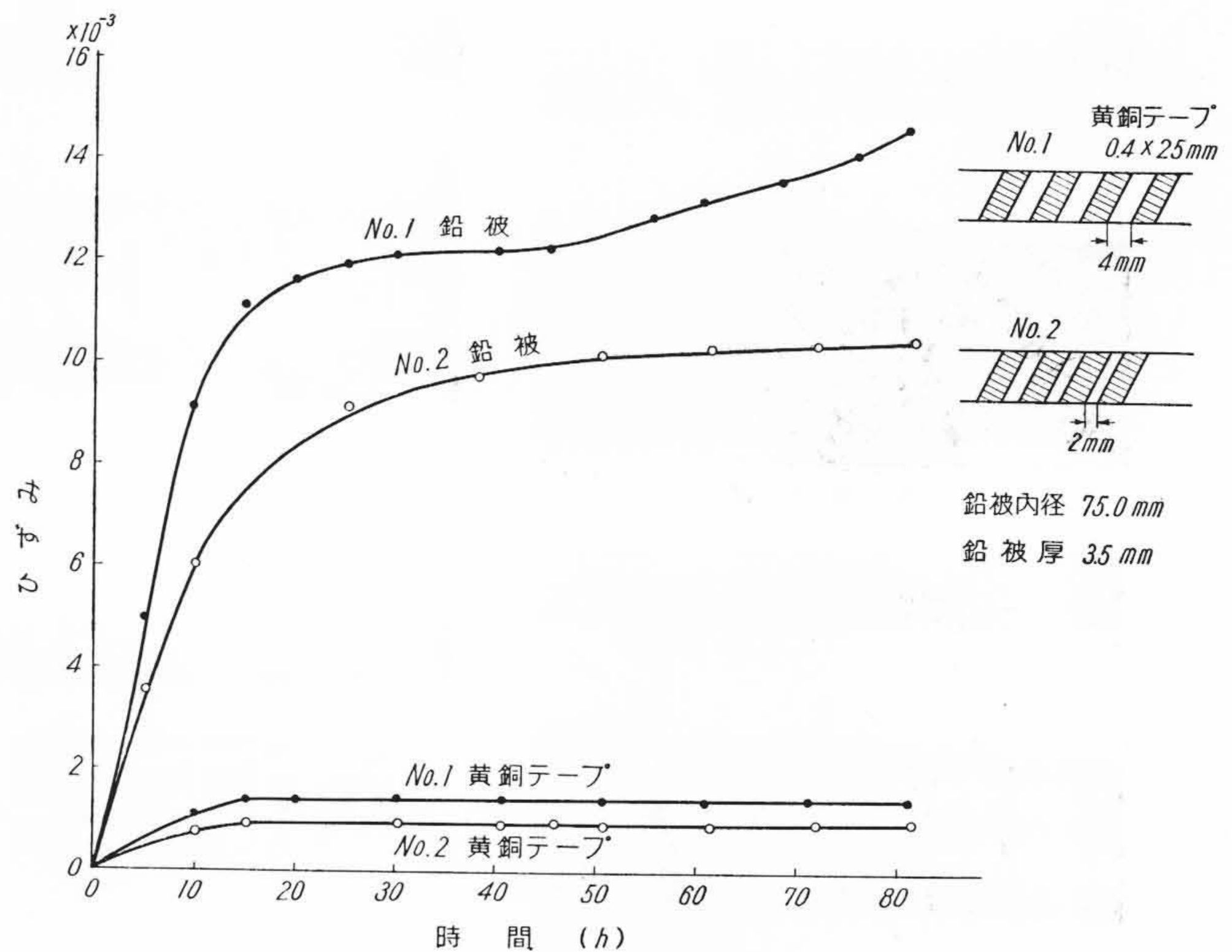


第 12 図 圧力による補強層の応力

傾向は第 10 図に示すものに近い。内圧としては 30 時間程度の加圧では 40 kg/cm^2 まではひずみの増加は無視しうる程度であるが、 50 kg/cm^2 より時間的増加が確認された。 50 kg/cm^2 は常時最高使用圧力 15 kg/cm^2 に対して約 3.3 倍の裕度を持つことになる。圧力とひずみの関係を示すと第 11 図のようになり、比例的关系がある。ひずみ量より応力-ひずみ量特性を用いて換算した各補強テープの応力を第 12 図に示す。補強層に用いたステンレステープは 0.2% 耐力 (proof stress) が 25 kg/mm^2 であるが、これに相当する油圧は約 25 kg/cm^2 である。補強層の構造としては各補強層テープに分担される応力が均一であることが望ましい。試験した補強構造のうちでは H-1-A, H-H-3, H-H-4 が応力の分担がほぼ等しく、その他のものは不均衡が目だった。

3.3.3 鉛被圧出に及ぼす補強テープ間げき

鉛被の破断はほとんどの場合、補強層テープ間げきの圧出部に発生している。補強層のテープ間げきを狭くすれば鉛被の圧出は当然押えられるが、ケーブルの屈曲特性を悪化させないためには最小限の間げきは不可欠であり、通常 $2 \sim 3 \text{ mm}$ の値がとられている。そこで間げきと圧出量との関係を実験的に求め第 13 図に示す結果が得られた。圧出量を寸法的に測定するのは困難であるので抵抗線ひずみ計を使用し、クリープひずみを測定したものであるがテープ間げきを縮小することで圧出量を押えることが明らかに示された。



第 13 図 鉛被の圧出量と補強層間げきとの関係

4. 結 言

高油圧補強層について行なった検討結果を要約すると次のようになる。

- (1) 材料力学的取り扱いから座床用銅テープの鉛被圧出抑制効果を計算した結果、間げきの狭い場合相当の効果が期待できることが明らかとなった。
- (2) 現用の高油圧補強層の短時間破断圧力は 120 kg/cm^2 以上あることを確認した。
- (3) 補強テープの加圧時のひずみおよび応力分担を測定し、応力分担の均一な構造を確認した。
- (4) 補強テープ間げき長と鉛被圧力によるひずみの関係を実測し、間げきは 2 mm 以下が望ましいことが明らかとなった。
- (5) 短ピッチ補強テープの幅は比較的広いものが短時間破断に対しては効果的であることが明らかとなった。
- (6) 補強テープの応力変化のあらわれるのは 50 kg/cm^2 程度の圧力である。

以上により現用の補強構造はいずれも本質的な欠陥はなく使用できることが確認され、今後の設計資料としては有用なデータが得られた。

最後に本試験にご指導、ご激励いただいた水上、杉山両部長、山本課長および試験用端末についてご指導、ご協力いただいた日立電線株式会社日高工場第 2 研究課星野氏に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) H. S. Pheleps, A. M. Gates & F. Kahn: Proc. A. S. T. M., 40, 885 (1940)
- (2) A. King & V. H. Wentworth: Raw Materials for Electric Cable (book) 212 (1954)
- (3) B. B. Rinity & R. J. Wiseman: Trans. A. I. E. E., 59, 165 (1940)
- (4) 東京電力: OF ケーブル鉛被補強規格