

(5) P C 鋼 線 に 就 いて

武 尾 敬 之 助

住友電気工業株式会社

宮 川 一 郎

1. 序 言

我々は此の數年来鋼弦コンクリート用鋼線の製造法並びに性能に就いて種々検討を加へ既に各種の材料の需要に應へると共に其の性能の研究結果を公表して來て居る。

(例、土木学会刊行書 プレストレストコンクリートと構造力学 28年8月等)

然し乍ら此の一年間に於いても我々の製造技術は一段と進歩し又多くの外国文献の入手、外国製品の検討が行はれた他欧米各社の製造の実状を調査する事が出来たので此等を綜合して報告したい。

元來鋼弦コンクリートは其の發達の初期に於いて強度の低い応力弛緩の甚しい材料を使用した為に長らく進歩を阻害され、Eugene Freyssinetの高張力鋼線と高強度コンクリートの併用によつて解決されたものである。現在鋼弦コンクリート用鋼材の發達は著しいものであるが其の殆んどが國產品で充分優れたものが得られる状態である。第一表に鋼弦コンクリート用鋼材の区分を示す。

2. 鋼弦コンクリート用鋼線に要望される性質

現在日本でどの様な規格が推奨されているかを第二表で説明し併せて外国の例を参考として検討を加へる。

先ず破壊強度と降伏点は高い程材料費の節約となつて良いが鋼の成分、加工法を多少變へても線径に対し自然に限度が与へられるから斷性を考慮して或る範圍に留めるのがよい。既に第二表の抗張力規格が高級高強度鋼であるピアノ線のJIS 4号規格に相当するのであるから如何に高強度の材料であるかという事が判かるう。

伸率は不測の大荷重に際し瞬間的破壊を避ける意味から多い事が望まれるが其の數値に対し實際上の裏付けはない様である。唯冷間加工線、オイルテンパード線を含めて破壊時の断面收縮は略45%以上に及ぶから標点距離が此の數値に大きく影響する。日本では鋼弦コンクリート用鋼線に対し全直径一率に100mmを採用するがDINでは3mm以下100mm、3mm以上20dで伸率それぞれ3%以上4%以上という規定をとつている。

第三表、第四表はそれぞれ米、獨の代表例でFelten & GuilleaumeのSt 160/180が高強度で目立つ他略第二表と類似している。

屈曲性は最近5mm、10mmという試験を経ておかなければならぬ程の材料の使い方がされていないので先ず第二表程度で差支へないと思はれる。

応力弛緩は性能上は最も重要なものであるが全数、長時間の試験を行う事が出来ぬので1/10の抜取りで10時間の試験をする。DINでは応力弛緩試験が難しいのでクリープ試験で代用している。

我々の応力弛緩試験機は写真1の如きもので精度よく測定され冷間加工線では獨のA. Krisch、米のG. T. Späne、英のF. Walley各氏の最近の測定結果同様半対數図で直線的變化を示す。現在では曾つての獨のG. Magnelの實驗、或は獨のFelten & Guilleaume社の結果は精度不足と見做されている。

応力弛緩が最も関連するのは応力歪線図に於ける殘留延伸曲線であつて冷間加工線、

タイムテンパード線、オイルテンパード線の各傾向が其の儘其の応力弛緩傾向を表している。勿論応力弛緩の概念及び傾向が現在程度迄究明されてくれば抗張力、降伏点、伸率の数値も又応力弛緩に対する一つの目安として役立つ訳である。

最後に巻取径の問題は操作上以外に同様に応力弛緩と関連を有している。F. Walley は小径コイルの応力弛緩の大なる事を証明し又 J. A. Roebling 社でも後述する如く小径コイルを機械的に伸直する場合の増大する応力弛緩に言及している。

尚ボンド性は各論で詳述するが特にプレテンション用に重要である。

3. 鋼弦コンクリート線各論

3.1 Hard Drawn Wire

原料を厳選し慎重な熔解、造塊、圧延を経て得られた良好なる線材を鉛パテンチングと称する鉛槽への連続恒温変態処理を行つた后引拔ダイスを用いて冷間引伸を繰返して高度の抗張力を与へたものである。此の線の特徴は第一に応力弛緩が半対数図で直線となり且其の安定性が高い事である。又屈曲値も優れている。伸率は靱性の優れている炭素 0.80% の高級鋼線で第二表の数値を幾分上廻る程度で 0.60 C の鋼線では此の様な靱性と高強度を併せ持つ事が出来ない。冷間加工線の欠点はコイルの巻ぐせがつき易い点にある。降伏点強度はタイムテンパード線、オイルテンパード線に比して低いが一応規格は満足する。但し応力歪曲線がねている分だけ同一応力に対し余分に引伸ばさなければならない。

3.2 Time Tempered Wire (Blueing Wire)

冷間加工線を熱処理する事によつて降伏点を上昇させ得る事が当初の狙いであつた様であるが其の後短時間の応力弛緩が著しく改善される事が判り一方破断伸の大なる事も利点と数へられる様になつた。従つて外国でも始めは熱処理経費を考へて採用をためらつていたが米国の J. S. Roebling 社等では正式に製作している。但し此の場合注意しなければならぬ事は既に昨夏我々の指摘した如く高荷重では冷間加工線よりも応力弛緩が大になる事である。第一図に同社の最近の研究結果を示しておくが此の理由は熱処理線が降伏点近辺から急速に残留伸びの増大する現象と関連するものである。

Time Tempered Wire は我々も又製作を続け冷間加工線との differential relaxation を処理条件と併せて発表して來ている。第二図に製品の試験結果を示すが第二表の試験荷重より 13% も高い荷重で尚規格内にある。

Time Tempered Wire の特徴は低荷重で応力弛緩の少ない事、線の伸直性の良い事、破断伸が楽に規格を上廻る事等にある。逆に欠点は相当嚴重な管理を行はないと応力弛緩が長時間后で保証し得ぬ線をつくつてしまう事、屈曲値が低くなり勝な事等である。従つて抗張力、降伏点、伸の見掛値のみでなく応力弛緩傾向を考慮しなければならない。

3.3 Oil Tempered Wire

Oil Tempered Wire は欧米に於いても極く最近の發達であつて適当な加工を与へて所定径とした鋼線を加熱炉中から連続的に油に焼入れ更に同様に鉛浴槽を通して焼戻し完全に伸直な高強度の線を得るものである。此の場合油槽を出て

から鉛槽に入る距離を調整するとMartempered Wireを得る事が出来る。鋼弦コンクリート用鋼線として此の製法をとつているので有名なのはベルギーのSambre Escaut社で第五表の様な規格で製造しているがCurrent Qualityの生産量は500t/月といはれる。Felten & Guilleaumeの例を見ても普通品のOil Tempered Wireの強度は幾分低値を示す様である。

尙Oil Tempered Wireの応力弛緩はTime-Tempered Wireのそれと類似するが上手に製造すると相当長時間に亘つて殆んど弛緩のおこらぬ線をつくる事が出来る。但しSambre-Escaut社の誇るSpecial Qualityの応力弛緩曲線を詳細に吟味すれば第三図の如くであつて一時間以内位は殆んど応力弛緩がおこらぬが其の後冷間加工線同様の傾斜で進行する事が予想される。従つて又Oil Tempered Wireの製造も慎重な作業が行はなければならない。尙Oil Tempered Wireの特徴は破壊伸の大なる事その他太線となるに従つて冷間加工線では伸々強度が出し難くなるがOil Tempered線では成分の選定、熱処理条件の適正により割合に容易に製造が可能である。

唯問題は一般のOil Tempered Wireでは歐洲に優る発達を遂げている米國で鋼弦コンクリート材としての使用に疑念を懐いている事であつて高荷重下のStress-Corrosion(実験は硝酸カルシウム、硝酸アンモンを用いる)結果が不良な事が原因である。

3.4 Indented or Deformed wire

Indented WireはスイスのRos氏等により種々考案されたもので製造法にはRolling WireとDrawing Wireの両方式があるといわれている。Indented Wireの形状は圧痕の形、ピッチが各社でまちまちであるが英のBritish Ropes Ltd.の円形、スイスのB.B.R.V.の橢円形等(写真2、3)が有名である。其等の性能を第六表に示しておく。

Drawing Wireとの機械的性質の相異は圧痕の形状及び製造法により異なるものであるがSambre-Escaut社では積極的にSame qualityを保証している。我々は其の製造の当初に於いてDrawing Wireを別途Indentationして応力弛緩の増大を経験したので現在はダイスローラーによるDrawing & Indenting方式に改良して伸直度の優れ且強度及び応力弛緩の良好な材料を製造している。

Indented Wireを使用する最大の理由は線のコンクリートに対するボンディングの改良である。我々のIndented Wireを鉄道枕木に使用した結果も又此の事実を裏書きしている。但し実際にボンディング試験を行つた結果ではInitial SlipではDrawing Wireと完全な錆付線の間中に位するから当然ボンディング効果は限定される訳である。勿論Anchorは非常に大となる(第四図)

ボンディングに就いて更に附言すればプレテンション形式では作業上伸々線の錆付けは満足に行ひ難いもので従つてIndented Wireが安心感が持たれるのである。

3.5 Cable

Cableと此処に称するのは単に線の束であつて結束方式を含めて例へば Freyssinet Cable、Magnel Cable等と呼ばれるもので要するに単線を束ねて引張る様にしたものである。従つて性能としては単線と大差ないが唯緩んだ線が生じない様にしなければならない。

3.6 Twin or Triple Strand

現在日本で使用されているのは二本撚線であつて単線として先ず規格に合格し更に撚線としての降伏点規格に適合しなければならない。撚のピッチは我々の製造しているものでは7dである。

一般に撚線にする事により応力弛緩は悪くなるが其の反面二本別々に緊張する必要がなくなり又ボンド性を向上させる利点がある。第七表に各種の線のボンド効果を考慮せる基準例を示しておく。

3.7 Rope

Ropeを鋼弦コンクリートのポストテンション用に使用する事は米国では盛に行われるが日本では未だ試験が行われた程度で今後の発達にまつより外はない。我々の特殊構造のピアノ線ロープは強度上優れたものである。

3.8 Oil Tempered Round Rod

適当な直径の圧延線材を其の儘Oil Temperするもので製造原価が低廉な利点を有する。歐洲での製作例はRheinhausen Huetttenwerk社のもので先方の仕様と現品の調査結果を第八表に示しておく。此の場合応力弛緩は時間と共に急速に増大し冷間加工線と逆転する傾向を示したがOil Temperの処理が上手なら此の鋼種でも良好線が得られる筈である。

3.9 Oil Tempered Special Shaped Rod

此の種類に属するものは同じくRheinhausen社のOval Gerippt Rod、第九表、写真4、Felten & Gwilleaume社のNeptun-Stahl第十表、写真5等がある。後者では又単なる平角捩り棒、同線も製造している。Shaped Rodの意義がボンド性の向上にある事は言う迄もあるまい。

4. 鋼弦コンクリート鋼棒

鋼弦コンクリートに高張力鋼棒を使用する方法は適当な鋼材、螺子切、接続方法、の進歩と共に次第に発達して来た。現在有名なものは工法の特徴で知られる独のDyckerhoff & Widmann社、英のMacalloy社、米のStress-Steel社の各製品である。日本で差当り鋼棒の使用が期待されるのはコンクリート枕木であるがDyckerhoffのNeuss工場では18.6mmの鋼棒を用い多量に生産されていた(写真五)

4.1 Rolled Bar

一般にSi-Mn鋼等の低合金鋼を用い適当な圧延条件で黒皮の儘の高張力鋼棒とした上で強度を落さぬ様な螺子切を行う。熱処理を行はぬので廢価であり、且大量生産に適している。

我々も又此の方式で高張力鋼棒を製作しているが其の性能を同社の製品と比較すれ

ば第十一表、第五図の如くで全く遜色ないと言へよう。尙此種鋼棒は図より見られる如く応力歪線図の立方が線に比して早い特徴を有している。

4.2 Heat Treated Bar

英国のMacalloy社の製品が此の方式を採用していた事がある。圧延は容易であるが熱処理費用で材料が高価につく欠点がある。英米の製品がどの程度迄此の方式を採用しているかも近々判明する筈である。熱処理棒は応力歪線図で降伏点の占める位置が高い特徴があるのはOil Tempered Wire同様である。

5. 結 言

各国の鋼弦コンクリート用鋼材料を調査して見て我々の製造している材料が全く遜色がない事を知つて意を強くした。現在日本の現状は未だ2.9mm級の時代であるが逐次欧米なみの大構造物が鋼弦コンクリートで建設されると思はれる。此の場合の使用材料も又充分期待に沿ひ得るであらう。勿論我々も又材料の進歩に日々を努力を重ねたい。

表-1 鋼弦コンクリート用鋼材の区分

Wire	Wire	Hard Drawn Wire
		Time-Tempered (Blueing) Wire
		Oil Tempered Wire
		Indented or Deformed Wire
	Wires	Cable
		Twin or Triple Strand
		Rope
Bar	Wire rod	Oil Tempered Round Rod
		Oil Tempered Special Shaped Rod
		Rolled Bar
		Heat Treated Bar

表-2 日本における推奨規格

直径 ϕ mm	直径公差 ϕ mm	抗張力 $\frac{Kg}{mm^2}$	降伏点 $\frac{Kg}{mm^2}$	伸% (100mm)	屈曲回	巻取径m
1.0	-0.015 +0.03	> 240	> 190	> 1.5	> 4 (5 r)	0.7
1.6	"	> 225	> 180	> 2.0	> 4 "	"
2.0	-0.02 +0.04	> 215	> 170	> 2.5	> 4 "	1.0
2.9	"	> 195	> 165	> 3.0	> 4 "	"
5.0	-0.03 +0.05	> 165	> 140	> 4.5	> 3 (10 r)	1.5
7.0	"	> 165	> 140	> 5.0	> 3 "	"

〔注〕 応力弛緩は降伏点強度の85%の荷重下で10時間後に5%以内

表-3 J.A.Roebling's Specification

直径 ϕ mm	抗張力 $\frac{Kg}{mm^2}$
2.0	> 207.5
2.9	> 193.5
5.0	> 176.0
7.0	> 166.0

表-4 Felten & Guilleaumes Specification

種 別	直径 ϕ mm	抗張力 $\frac{Kg}{mm^2}$	降伏点 $\frac{Kg}{mm^2}$	伸%(10d)
St 145/160	5.0~7.0	> 160	> 145	7 ~ 8
St 160/180	5.0~7.0	> 180	> 160	7 ~ 8
St 140/150	5.0~7.0	> 150	> 140	7 ~ 8

〔注〕 ただしSt140/150はOil Tempered Wire

(Sambre-Escout社)

表 - 6表-7 各種線のボンド性を考慮せる使用限界 (Ros)

〔注〕 尚 120 Kg/mm^2 の Stress を伝達するに要する長さは

2 mm ϕ Smooth Wire	330 mm
3 " "	710
3 Indented	180

表-8 Oil Tempered Round Rodの性能
(Rheinhausen Huetttenwerk)

a 仕 様

直径 mm	抗張力Kg/mm ²	降伏点Kg/mm ²	伸% 10d
5.2	> 160	> 145	> 6
8.0	> 150	> 135	> 6

b 試 料 成 績

試 料	抗張力 Kg/mm ²	伸 % 100mm	化 学 成 分			
			C	Si	Mn	Fe
5.2	155	7.0	0.73	0.80	1.31	Bal
8.0	146	8.0	0.80	0.71	1.24	Bal

表-9 Oval Gerippt Wireの性能
(Rheinhausen Huetttenwerk)

a 仕 様

寸法 mm	抗張力Kg/mm ²	降伏点Kg/mm ²	伸% 10d
8×2.8	> 160	> 145	> 5
9×4.2	> 160	> 145	> 5

b 試 料 成 績

試 料 mm	抗張力 Kg/mm ²	伸 % 100mm	化 学 成 分			
			C	Si	Mn	Fe
8×2.8	156	5.0	0.72	0.69	1.13	Bal
9×4.2	155	7.0	0.72	0.75	1.15	Bal

表-10 Special Shaped Rodの性能

Neptun-Stahl (Felten & Guilleaume
Carlowerk)

No.	形 状	抗張力Kg/mm ²	降伏点Kg/mm ²	伸 % 10d
N60	11.5×5.2	> 135	> 120	> 8
N40	9.5×4.2	> 140	> 120	> 8
N25	7.6×3.4	> 145	> 125	> 7
N14	5.8×2.5	> 150	> 130	> 7

[注] N14以下はDrawn Wire

N60の分析例	C	Si	Mn	Fe
	0.67	0.57	0.72	Bal

表-11 High Tension Rolled Barの性能

18.6 mm Bar

	Dyckerhoff社 仕様 St 55/85	Dyckerhoff 社製品	住友製品
抗張力Kg/mm ²	> 85	110.0	107.0
降伏点Kg/mm ²	> 55	70.0	82.3
伸 5d %	8 ~ 14	14.4	16.5
絞 %	> 45	35.1	54.9

25.0 mm Bar

	Dyckerhoff 仕様 St 60/90	Dycker -hoff製品	住友製品	
			Normal	Strong
抗張力Kg/mm ²	> 90	112.0	100.5	112.2
降伏点Kg/mm ²	> 60	68.5	68.8	80.7
伸 5d %	8 ~ 14	14.4	15.9	15.0
絞 %	> 45	38.2	48.5	38.7

Dyckerhoff社製品の化学成分(Si-Mn鋼)

	C	Si	Mn	Fe
18.6 mm	0.72	0.84	1.20	Bal
26.0 mm	0.71	0.83	1.26	Bal

附 Stress-Steel Bar Specification

抗張力 Kg/mm^2	降伏点 (0.7%伸) Kg/mm^2	伸 % 10 inch
> 101.5	> 91	> 6.5

図-1

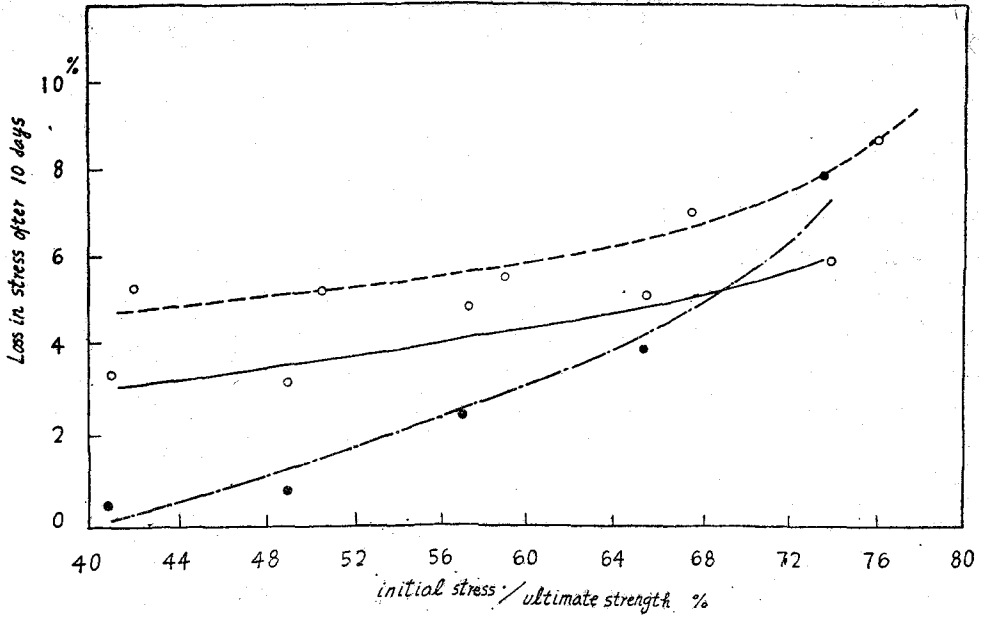


図-2

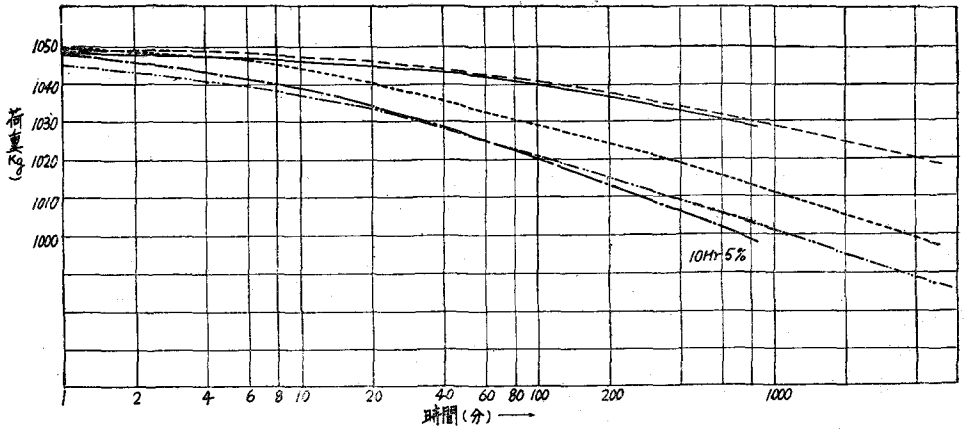
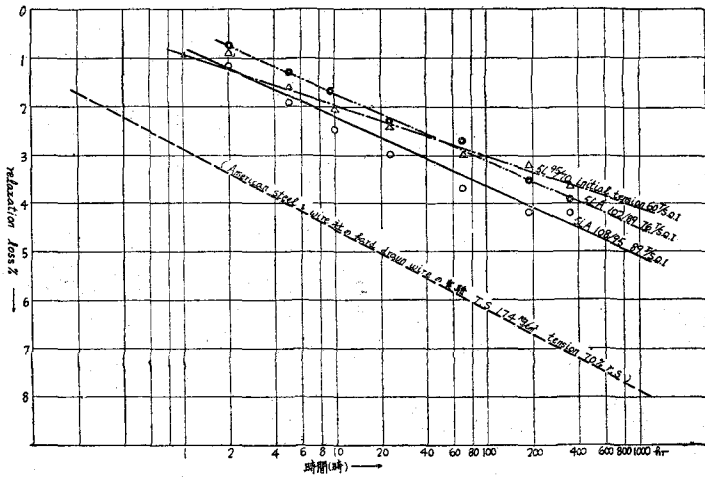
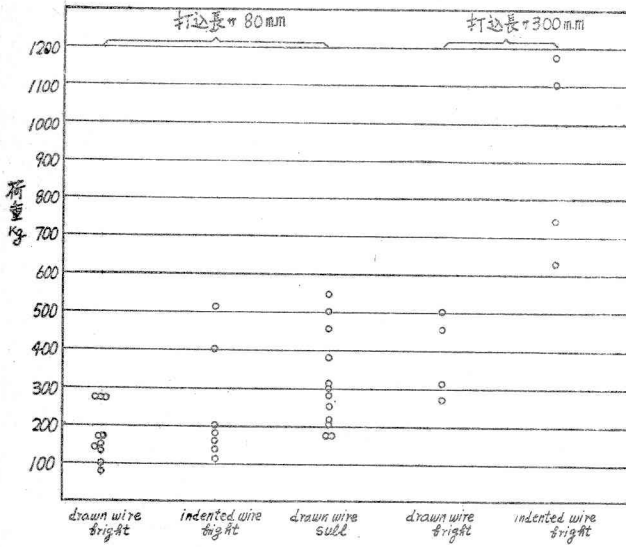


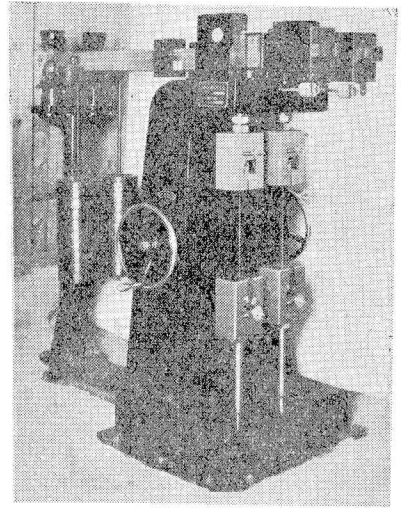
図-3



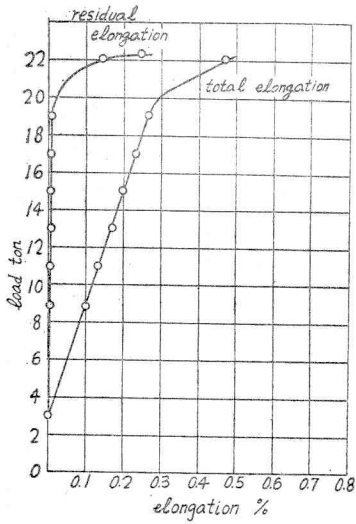
図—4



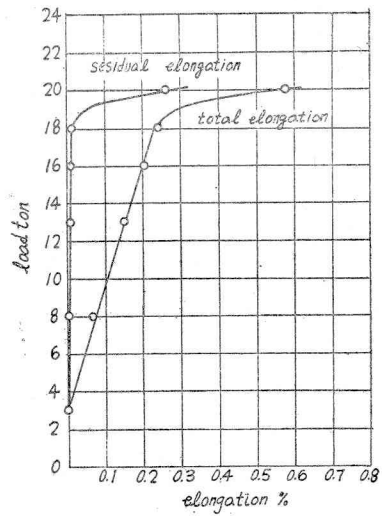
写真—1 応用弛緩試験機



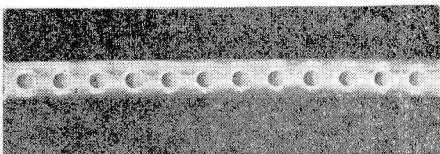
図—5



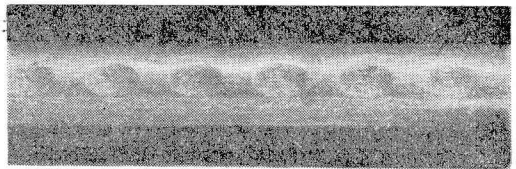
図—6



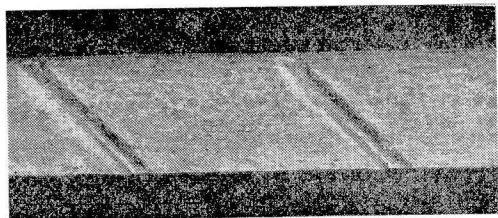
写真—2 British Ropes社の
Indented Wire 5mm



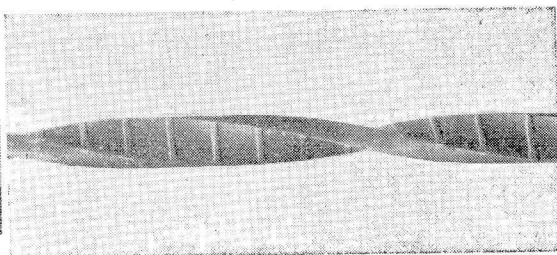
写真—3 B.B.R.V.社のIndented Wire 5mm



写真—4 Rheinhausen 社のOval Geripptrod



写真—5 Felten & Guillaume社のNeptum-Stahl



写真—6 Dyckerhoff 社 Neuos 工場
におけるコンクリート枕木

