

PC鋼より線のヤング係数について

鳥 居 勇 三 郎*
 勝 又 朝 昭*
 岩 田 齊**

1. 緒 言

プレストレスト コンクリートに使用される PC 鋼材中よった線には、2本より、3本より、7本よりのほか、19本よりその他の多層よりがあるが、わが国では現在このうち2本より、7本よりだけが JIS 化され一般に広く用いられている。ヤング率の問題は2本よりでは特に取立てて単線との差を云々するほどのこともないので、ここでは7本よりのみについて述べることにする。

プレストレスト コンクリートを設計時には、より線のヤング係数をすべて $20\,000\text{ kg/mm}^2$ として計算している¹⁾。しかし実際のプレストレスングでは、それぞれのより線について求められた実測のヤング係数を参照し、十分に検定された荷重計を用い、必要の際には各部分の摩擦等を考慮に入れることによって、より線に正しい所定の荷重が導入されたことを確認することになっている²⁾。すなわち、プレテンション方式の場合には、より線の伸びが計算値に合うかどうかをチェックし、ポストテンション方式の場合には、さらに摩擦とか、コンクリートの弾性変形という点も計算して、より線の引出し長さが計算値に合うかどうかのチェックが行なわれている。

しかし、これらの計算値と実測値との間には一般に5%程度の差は避けられない。この原因には多くの理由が考えられるが、より線のヤング係数測定上の誤りも大きな影響力をもつと考えなければならない。一般に製品に添付されるより線メーカーのヤング係数の検査成績値は、短かいスパンについての測定値であって、大略 $18\,500\sim 20\,500\text{ kg/mm}^2$ の間にばらつき、範囲として10%にも達している。このようなばらつきの原因としては、当然、そのより線自身の差もあるが、測定の誤差や、その値がごく一部分の値に過ぎない等の点を考えると、このばらつきがそのまま製品より線のヤング率のばらつきであるとは考えにくくなる。また、長いスパンで実際に緊張する時のヤング係数にあてはめることができ

るかどうかも、多くの疑問があることになる。

もしこのように測定値に誤りがある時に、かりにヤング係数を低目にした場合は、プレストレスング中に事故も起しかねない。特にポストテンション方式で、何組かのより線を順次緊張してゆく場合を考えると、初期のより線には、その後のコンクリートの弾性変形を考慮して、許容応力以上の荷重が導入されるので、これらの結果が重複すると破断する可能性を生じてくる。逆に高目に誤まった場合には、所定の応力が導入されないことになって、不良部材が作られ、これも重大な事故を起こす可能性がある。

このように考えてみると、より線のヤング係数は非常に重要で、実際に正しく測定されねばならないし、またこの測定値の示す意味も、十分に理解しておく必要がある。この考えから、より線のヤング係数について種々検討した結果を報告する。

2. より線のヤング係数の測定法

一般にヤング係数の測定は、ある一定の標点間に伸び測定治具を取りつけ、ある一定の低い初荷重を与えたのち、適当な間隔で荷重を上昇させ、そのたびごとに初荷重に下げて、それぞれ全伸びと残留伸びとを求めてゆき、これらの全伸びから残留伸びを差引いた値と、その時の荷重とが示す直線の傾斜から求めるのが普通で、これを精密法と呼んでおこう。材料自身に内部応力がある場合には、残留伸びが低荷重から明瞭に現われ、ヤング係数が低くなる。

PC 鋼線の場合には冷間伸線による内部応力を除去する(ストレス レリーフ)のために低温熱処理(ブルーイング)が行なわれるので、残留伸びは降伏点近くまでほとんど現われないのが普通で、これは測定されたヤング係数が正しい値を示していることを意味している。したがって上記のように毎回残留伸びを測定することをやめて、ある初荷重から荷重を順次上昇させて、その時の全伸びを求め、この全伸びと荷重との直線関係部分からヤング率を求める簡便法が採用されている。しかし、精密法でも簡便法でも、荷重—全伸びの関係が初荷重から

* 住友電気工業KK特殊線事業部 技術部

** 同 上 伊丹研究部

弾性限度まで正しく直線上にあることはむづかしく、低荷重側は誤差のために多少それるのが普通であるため、一般にはこれらの点は傾斜直線を画くに際して不問に付してよいというのが大方の意見である。

冷間伸線した鋼線をよって作ったより線も、鋼線と同様にブルーイングされているので、ヤング係数の測定に簡便法を用いて、なんらさしつかえはない。しかし、より線の場合には、荷重を加えた初期において、よりの締りがあるので、低荷重域では同一荷重に対する伸びが大きくなり、結局、定性的には図-1に示すような関係となる。したがって、より線の場合にはこれを誤差とすることができない。

3. より線の見掛けのヤング係数

より線についてのこのような初期の曲線関係は破断荷重のほぼ 10% 以下であるとし、この 10% 破断荷重での全伸びを 0.1% と仮定すると (JIS その他施工指針)、それ以上はほぼ直線的な関係が得られる。しかし、実際にヤング係数を求めるために詳細に検討すると、一般にはそれ以上の荷重にわたって曲線関係が存在しているのが普通で、直線部分は相当に狭い荷重範囲に限られている。

実際に現場でより線を緊張する場合には、ある初荷重をかけ、この荷重から順次増加するごとに全伸びを求めており、この関係から直線を引いて計算しているので、平均傾斜となり、この荷重範囲での平均の見掛けのヤング係数となる。したがって完全に直線部分から求めた値とは異なったものとなる。しかし実際的にはこのような平均の見掛けのヤング係数の方が実用的であるといえる。

この平均の見掛けのヤング係数は当然初荷重に応じて変化する性質を持っている。この意味から出荷検査として行なわれる短い標点距離 (200 mm) でのこれらの関係を求めた結果について述べよう。

供試材は 1 ドラムの 12.4 mm (1/2") PC 鋼より線で、1 カ月おきに毎回 2 本ずつ試料をとり、5 カ月にわたり測定した。許容引張応力度から考えて、施工時にはほぼ弾性限荷重まで緊張されることもあるといえるので、一応、10% 規格破断荷重の時の全伸びを 0.1% とした時の 0.7% 全伸びまでについて

- a) 原点からの見掛けのヤング係数
- b) 0.1% 全伸びからの見掛けのヤング係数
- c) 直線部分での正規のヤング係数
- d) 0.1% 伸びから 0.7% 伸びまでの平均の見掛けのヤング係数

を求めた。これらの意味は図-1 から知りうると思う。

図-1 より線の荷重-伸び曲線とヤング係数の関係

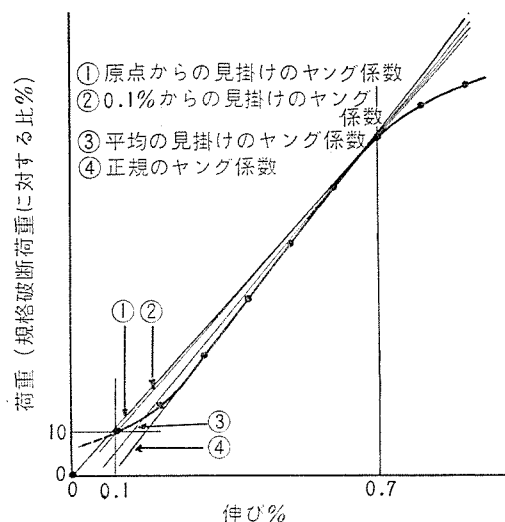
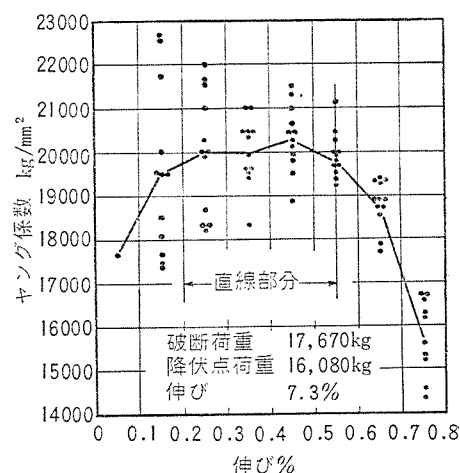


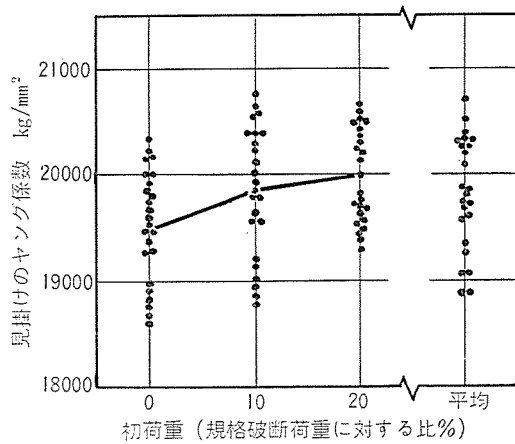
図-2 1/2 より線の各伸部のヤング係数



直線を示す部分をはっきり知るためには、0.1% だけ伸びるごとにその部分でのヤング係数を計算すればよい。本実験からは図-2 が得られた。これで見ると全伸びとして 0.2% から 0.55% の間ならば直線とみなしてよいことになる。

これらの各種のヤング係数を求めるにあたって、同一のデータで 2 回計算してその値を出した。得られた計算値の結果を図-3 に示す。正規のヤング係数は 0.2% 伸び以上で得られるが、この時の荷重は規格破断荷重の約 20% であるので、ここに正規のヤング係数を記入した。別に右端には、0.1% から 0.7% 伸びの範囲での平均の見掛けのヤング係数を併記してある。このように直線をどのように引くかによって、ヤング係数はかなりに変化し、見掛けのヤング係数は初荷重が小さいほど小さくなる。平均の見掛けのヤング係数は大体 10% 規格破断荷重からの見掛けのヤング係数に一致しているが、これは当然のことである。これらの平均値は表-1 に示すとおりである。ここで注意すべきことは、原点のとり方であ

図-3 1/2"より線の見掛けのヤング係数



って、本実験では、10% 規格破断荷重の所を 0.1% 伸びとしたのであるが、例えば 5% 規格破断荷重から計算する時には、そこからの見掛けのヤング係数をもつと低い値となることである。このようにヤング係数は種々の値があるので、製品に添付される検査値がどの方法で求められたものであるかを十分に知っていなければならない。

4. 短いスパンでのヤング係数の測定誤差

上記の実験で特筆すべきことは、ヤング係数の測定値のばらつきが大きいことである。この理由として考えられるのは、

- 1) 供試材自身のヤング係数の差 (コイル内の位置による変動)
- 2) 測定誤差: 1 回ごとの測定法の誤差・計算時の誤差・時期を変えたための誤差

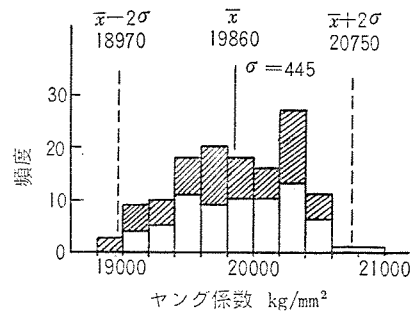
である。

これらの因子に分解した結果を表-1 に示す。材料自身のばらつきと測定時期をかえることによるばらつきが大きい。正規のヤング係数は測定時期によっては、ほとんどばらつかないといえる。正規のヤング係数の計算のばらつきが大きいのは、その荷重範囲が狭いためである。全体の精度として 2σ をとれば $\pm 5\%$ は避けられないことになる。

表-1 短スパンのヤング係数とそのばらつき (1/2")

	ばらつき (σ) kg/mm ²				ヤング係数 平均値 kg/mm ²
	計算間	位置(含測定)	測定 時間	全	
原点からの見掛けヤング係数	130	405	445	530	19 520
10% T.S. からの見掛けヤング係数	155	465	515	610	19 830
10% T.S. からの平均見掛けヤング係数	210	460	365	540	19 800
正規のヤング係数	290	490	(0)	445	19 960

図-4 一般 3/8" より線の正規のヤング係数ヒストグラム (GL=200 mm)



注: 白部分 1 回目 ハッチング部分 2 回目

製造ロット間のばらつきを求めるために、過去の検査データから正規のヤング係数のヒストグラムとして図-4 を作成した。検査時期を変えて 2 回を集計したものであり、これには上記のばらつきのほかにコイル間とロット間のばらつきも入っている。より線の種類によって、そのばらつきには差がないので特に 3/8" のものを示した。19 000~20 800 kg/mm² の間にばらつき、平均値は 19 860 kg/mm² である。これから求められるばらつきを表-1 の値と比較するとほとんど一致し、コイル間とロット間のばらつきはまず無いといってもよく、少なくともわずかな検査値からはロットの差を云々することはできないと言える。

5. 引張速度と、より線のヤング係数との関係

通常の出荷検査では、ヤング係数の測定は降伏点測定と一緒にこなわれ、0.7% 伸びまでの所要時間はほぼ 1 分であるが、実際現場での緊張時間は一般にこれよりも長時間を要する。この点から差が生ずるとも考えられるので実験を行なってみた。

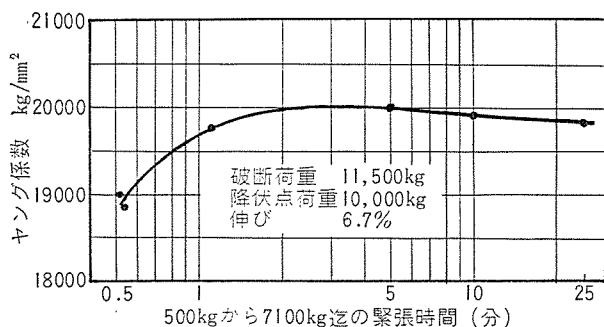
供試材は高抗張力の 9.3 mm (3/8") P C 鋼より線でアムスラー式横型試験機を用い、約 5 m のチャック間隔でつかみ、初荷重 500 kg (規格破断荷重の 4.8%) の状態で 4.5 m の標点を打ち、7 100 kg の荷重をかけた定時の標点の移動を 0.05 mm 精度のカセットメーターで測定した。この際の荷重をかける条件を次のとおりとした。

1) 500 kg から 7 100 kg をかけるまでの時間を 30 秒、1 分、5 分、10 分としたもの

2) 500 kg から 4 500 kg までを 5 分間とし、その荷重に 15 分間保持し、ついで 7 100 kg までを 5 分間 (計 25 分間)

得られた結果を図-5 に示す。これによると、引張時間が 30 秒の時には、見掛けのヤング係数は低く現われる。これは油圧式試験機固有のもので、指示が遅れることによるのかも知れない。しかし 1 分以上であれば、時間が相当長くなってもその値はあまり変化せずヤング係

図-5 緊張速度と見掛けのヤング係数との関係
(3/8"高張力より線)



数はほぼ 20 000 kg/mm² が得られている。もちろん非常に長時間で測定すればクリープの関係で当然低くなるはずで、本実験でもこの傾向が示唆される。要するに通常検査では特に異常な値が出ることはない。

6. より線の長スパンのヤング係数

今まで述べてきた結果から短スパンの値が、そのまま長スパンに適用できそうにもないことが十分に予想される。したがって 100 m スパンでの実験を行なった。実験方法は図-6 に示すとおりで、概略を説明すると、

1) 荷重測定には、焼入焼戻後、十分な荷重でストレッチングし、さらに十分ブルーイングした高比例限の 11 φ 鋼棒について、あらかじめ荷重と伸びとの関係を求めておいて、これを固定端側にそう入して、その伸びをダイヤルゲージで読んで荷重に換算した。

2) 初荷重は 500 kg (規格破断荷重の 4.8%) とし、これはナットを締めることによって与え、この時に 0, 50, 80, 100 m の標点をつけた。

3) オイルジャッキ (ストローク 500 mm) で約 50 mm 引張るごとに各標点での伸びと、荷重計の読みを記録した。

なお 500 mm ではストロークが短いので、2 回引張ることによって規格破断荷重の 70% (7 300 kg) 以上になるまでデータをとった。

4) 緊張時間は約 20 分である。

このようにしてスパンの 50, 80, 100 m のものをうるることができるが、このほかにも一応参考として 80 m から 100 m までの 20 m, 50 m から 80 m までの 30 m ス

図-6 長スパンのヤング係数測定法

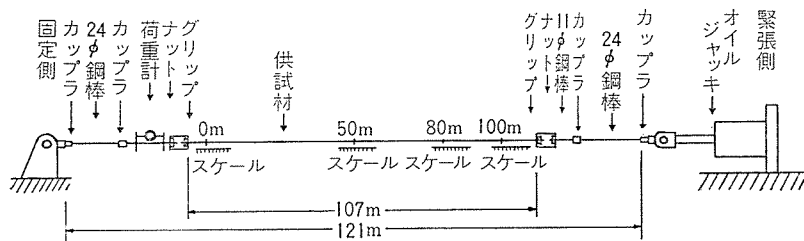


図-7 長スパンの荷重-伸び曲線の例 (3/8"高張力より線)

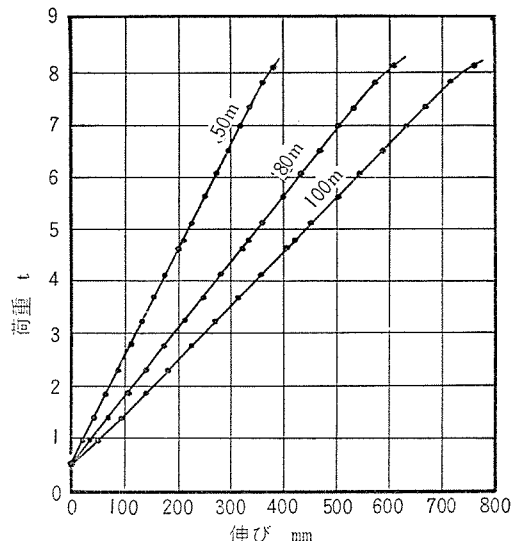
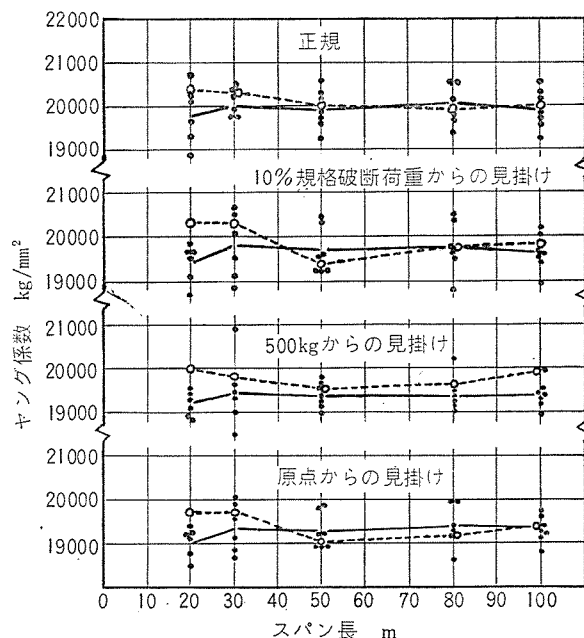


図-8 0.7% 規格破断荷重までのヤング係数

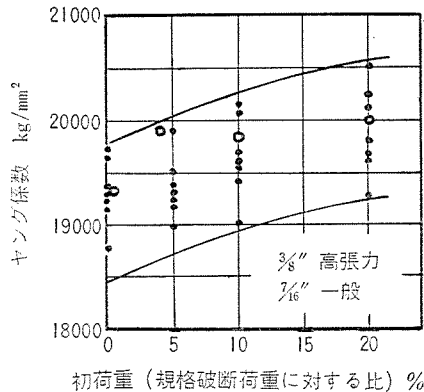


注：実線 3/8" 高張力 破線 7/16" 一般

パンのデータも求めうるので計算した。得られた荷重-伸び曲線の一例を図-7 に示す。初荷重付近は曲線であって、弾性限は 7 500 kg 付近にある。7 300 kg (規格破断荷重の 70%) までで各種のヤング係数を求めた。この結果を図-8 に示す。実験誤差が大きいが、スパン長によるヤング係数の差はないと認められる。荷重-伸びの関係が直線を示すのは規格破断荷重の 20% すなわち 2 000 kg 以上であるから、この点以上で見掛けのヤング係数が正規のヤング率になるとして図-9 を作った。図が複雑になるので 100 mm スパンのもののみにとどめた。この図には、追加実験した 7/16" より線

の結果 (8700 kg までについて求めた) も併記してある。この場合、原点から求めた見掛けのヤング係数は、図-1 からわかるように 500 kg からの値よりも大きくなることありうるので不連続にならざるを得ないが、一応全体の傾向を表わすために適当な幅をもたせた曲線

図-9 100 m スパン時の見掛けのヤング係数



を引いてある。この結果から正規のヤング係数は 19900 kg/mm² 程度であり、10% 規格破断荷重ではそれより 200 ほど低く、5% の場合は 450 ほど低く、原点では 600 ほど低い値となることがわかる。これは先の 図-3 とほぼ同じ傾向とみてよい。

長スパンの場合には短スパンのヤング係数と、どのような関係になるかを考えてみる。一般に直列に連結した組み合わせバネのバネ 常数の考え²⁾をこれにあてはめることができるので、等しい短スパンのヤング係数を $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ とし、全体のヤング係数を E_T とすれば、

$$1/E_T = 1/n(1/E_1 + 1/E_2 + \dots + 1/E_n)$$

$E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ のばらつきが小さければ (実際に $\sigma \approx 2.5\%$)

$$E_T \approx 1/n \cdot (E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n)$$

となり、平均値とみなしてもさしつかえない。したがって、ほぼ平均値のヤング係数となると予想され、ばらつきも平均値のばらつきとなって、ほとんどばらつかなくなるものといえる。短スパンを 200 mm とすれば 100 m の時には、ばらつきは、 $1/\sqrt{100/0.2} \approx 1/22$ 、すなわち $\sigma \approx 0.1\%$ (実際値として $\pm 40 \text{ kg/mm}^2$) となるはずであるが、本実験ではあまりにも測定上の誤差が大きくてこれを立証しえない。現場での緊張の時にもこの程度の大きい誤差はあると思う。本実験でのばらつきは、ほぼ $\pm 5\%$ であった。しかし短スパンの値 (図-3 参照) と長スパンの平均値とはよく一致し、特に異常な値が出るとはいえない。

7. より線のヤング係数の値

7 本より線のヤング係数は計算法によって種々な値が得られることが示されたが、ここでは正規のヤング係数

について考えてみることにする。一般にこれらのより線のヤング係数を単線とくらべた時の低下率は、近似的に次式で与えられている³⁾。

$$1 - \frac{\cos^2 \beta}{1 + k \sin^2 \beta}$$

k は常数で普通は 2 である。 β は側線の軸方向との傾き角であって、これはよりピッチで定まり、次式で近似的に表わせる。

$$\beta = \frac{2/3 \cdot D \cdot \pi}{P}$$

D : より線の呼び径

P : ピッチ

ピッチは一般に (12~16) D であるから、12 D , 14 D , 16 D の場合の低下率を求めてみると、それぞれ 10%, 7.5%, 6% 程度となり、鋼線のヤング係数を 21000 kg/mm² とすれば、それぞれ 18900 kg/mm², 19450 kg/mm², 19800 kg/mm² となってくる。平均として 14 D を採用すれば、ほぼ 19500 kg/mm² となり、われわれの得たほぼ 20000 kg/mm² の値との差は若干大きいですが、まず妥当なものとしてよいと思われる。

このような考え方からすれば、より線の正規のヤング係数は、公称径が異なっても変化しないといえるわけで、表-2 のように、この種類では差がないとみてよい。より線ではストレス レリーフの程度によって差が出ると思われるが、現在の製品では恐らく不十分であるとは考えられず、またより方の不良によっても低い値が出ることが十分に想像されるが、その強度からみて、恐らくいちじるしい差を生ずるような不良品はないと思われる。

表-2 各種 7 本より線のヤング係数

呼び径 (D)	平均値 kg/mm ²	平均ピッチ mm	検査数
12.4 mm (1/2")	19620	169 (14.2D)	20
10.8 mm (7/16")	20080	153 (14.2D)	50
9.3 mm (3/8")	19860	131 (14.1D)	134
5/16"	19860	110 (13.9D)	26
1/4"	20100	91 (14.7D)	36

総平均 19940 kg/mm²

今までに述べてきた諸実験や調査の結果のほかに、さらに実際の緊張時の荷重計の精度、温度変化、その他摩擦などの仮定による誤差類を考えれば、より線の個々のロットについての検査値で計算することは、ほとんど意味がなくなると考えられてくる。実際に製造されている製品の強度は JIS 規格を 5% 以上上まわっているのが普通であるから⁴⁾、より線のヤング係数をかりに一定値として作業を行なっても、それによる事故はほとんど起り得ないことになる。一定値として平均値を採用すれば、この方がかえって安全であるといえるし、導入応力の誤

差も全体として少なくなるはずである。したがって、ヤング係数の測定法の規定を作るべきであり、また大量に少なくともロット単位で使用する場合のヤング係数としてはその平均値をもって代表させるのがよいと考える。さらに進んで設計の時と同様に、同一値をもって簡単に作業が行なえるようにするために、各メーカーの品質のより一そうの均一化が望ましいと考える。

8. 結 論

7本より線のヤング係数について、いくつかの実験を行なってその考察を試みた結果、次のことが判明した。

- 1) より線の荷重—伸び曲線は初期の低荷重域ではよりの縮りのために曲線を呈し、ほぼ導入荷重の30%以上で直線になるが、導入応力付近ではこの直線性も失われてくる。
- 2) したがってヤング係数は計算法によって種々の値が得られるので、実際に出されたものの意味を十分に認識しておくことが必要である。
- 3) 通常の測定法の誤差は5%程度が見込まれる。したがってロット間の差を云々するのは危険性が多い。
- 4) 正規のヤング係数としては19900 kg/mm² くらい

が妥当と思われ、これはより線の種類によって差がないものと思う。初荷重のとり方で600 kg/mm² くらい低くなることもある。

5) 引張速度が速く0.02%/sec くらいの速度では低値をうることがあるが、通常のものではほとんど無影響である。

6) 100 m スパンまでの試験から、短スパンの平均値に等しいヤング係数が得られた。しかしばらつきが小さくなることは確認できなかった。

以上の結果と、実際の製品の品質、それに緊張荷重の精度等を加味して考えると、より線のヤング係数については一定値としてそれほど問題はないであろうと判断を下したが、より線メーカー側でも一そう均質なものをやることは必要であろう。

参 考 文 献

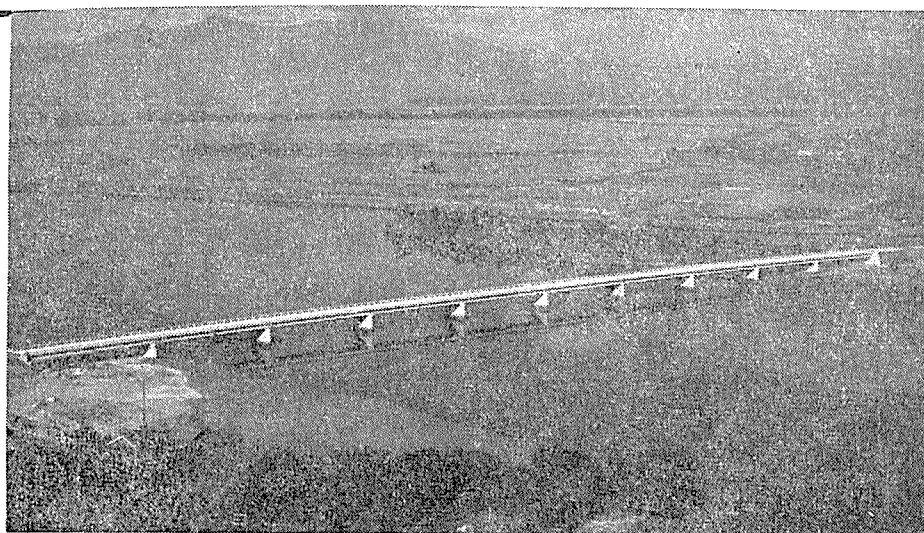
- 1) 例えば、土木学会プレストレスト コンクリート設計施工指針(1961)
- 2) 例えば、日本バネ協会編：バネ p. 153
- 3) 坂・岡田・六車：プレストレスト コンクリート p. 53
- 4) プレストレスト コンクリート Vol. 4, No. 2, April 1962 p. 38

1963.4.25・受付



鋼弦コンクリート

設 計
施 工
製 造



第二有明橋(鹿児島県) L=10@30m=300m W=6.0m

九州鋼弦コンクリート株式会社

代表者 取締役社長 真 貝 貫 一

本 社	福岡市天神町天神ビル4階	TEL(74)7963・(75)1343
山家工場	福岡県筑紫郡筑紫野町大字山家	TEL(二日市)2733
大阪営業所	大阪市北区芝田町97(新梅田ビル212号)	TEL(36)0384
高松出張所	高松市八番町26の2西日本復興建設(株)高松営業所内	TEL(3)5911
佐世保出張所	佐世保市戸尾町91(株)大友商会内	TEL(3)8961