

プレストレスト コンクリート橋梁特に鉄道橋における プレストレスの管理に関する研究

STATISTIC CONTROL OF PRESTRESSING ON THE PRESTRESSED CONCRETE BRIDGE

野 口 功*
By Isao Noguchi

1. 緒 論

ある製品をつくる場合、その製品が何であろうと製品に期待したとおりの性能あるいは品質を持たせようとする努力が行なわれる。しかし、われわれの作る製品は100個作れば、100個とも多少とも異なった性能あるいは品質をそなえることはさげられず、まったく同一の製品を作ることはできない。製造する製品にばらつきはさげられないからといって、製品のばらつきを放任しておけば、これを用いて所要の性能を有する部材を作るために大きな安全率を考えなければならなくなり、したがって製品のコストが非常に高くなる。逆に安全率を考えなければ、信頼性の小さい部材しか作ることができないことになる。プレストレスト コンクリートにおいて、コンクリートの品質の管理、P C鋼材の品質管理というものは信頼性の高いP C部材を作って行くうえに非常に大切な事からである。しかし、プレストレスト コンクリートにおいては、十分に品質管理された材料を組み合わせるだけでは信頼性の高いP C部材を製作することはできない。なぜならば、プレストレスト コンクリートにおいては、所定のプレストレスが与えられて、はじめて所要の品質を備えた製品となるからである。P C部材に要求される品質、すなわち、所要の強度と耐久性を得るためにプレストレスの大きさを管理することは、コンクリートの品質管理、P C鋼材の品質管理と同等、あるいはそれ以上に大切な事からであろう。にもかかわらず、これまでプレストレスの大きさを管理については、国内はもとより外国においても、ほとんど深い関心がはらわれていなかった。内外の研究としては、フランスのBaret氏の研究報告があるだけである。氏の報告においても、P C鋼材の伸びから推定される引張力と荷重計の読みから推定される引張力の間が生じる誤差について、一つの現場におけるデータをあげて概念的な説明が行なわれている程度である。鉄道橋においては、設計荷重に近い活荷重が一日数10回ないし百数10回のくり返し回数で載荷されるので、P C部材に設計で考えたとおりのプレストレスが与えられなかった場合、P C部材の安全性、特に

疲労に対する安全性について他の種類の構造物にくらべて、はるかに大きい影響があると考えられる。また、わが国におけるP C鉄道橋の工事量は諸外国の鉄道における工事量にくらべて非常に多いのである。正確なプレストレスの作業を多くの現場において実施して行くためには、プレストレスの管理を実用的な方法で確立することが要求される。

この研究は東京大学 国分正胤教授より、終始ご懇篤なご指導を賜わりながら、その一部を吉田研究奨励金によって行なったものである。研究の実施にあたっては、国鉄構造物設計事務所 友永前所長、故川口元次長、河野現所長はじめ各位のご指導をいただき、研究資料の収集、収集資料の取りまとめについては終始、幹線総局土木部設計課の斉藤氏のご協力をいただいた。

その他の現場における管理の実施ならびにデータの収集については、構造物設計事務所 小池技師ほか田村、橘田、小須田、高藤の各氏ならびに現場担当者のご援助を得たものである。ここに謹んで厚くお礼申し上げる。

2. プレストレスの重要性和、管理に関する従来の実状

プレストレスト コンクリートは荷重によって生ずる応力と逆の応力をあらかじめ与えることを使命としているので、この応力の与え方いかんによっては、期待しただけの部材の強度を有することができない結果となる。しかし、与えられたプレストレスは目で見て検査することもできないし、また簡単にプレストレスを測定できるような機器も存在していない。このように部材の強度に非常に大きな影響を与えるにもかかわらず、その結果を知り得ないということは、部材の信頼性という面から非常に大きな問題である。しかしながら、これまでプレストレスの管理に対して、技術者の関心は非常に薄かったといわざるを得ない。この責任を単に現場技術者にだけ負わせることはできない。それは現場技術者の作業のよりどころとなる施工基準にも、ほとんど具体的な事項について記されたものではなく、プレストレスの問題点にもふれず、単に“設計で考えられたプレストレスが与えられるようにしなければならない”。という

* 正員 国鉄構造物設計事務所

通りいっぺんの表現で片づけられていたからでもある。もちろんこれは、わが国だけのことでなく、外国で制定されている施工基準にもほとんど明確な管理方法というものは、規定されていない。あるいは規定されていても、プレストレスの誤差というものを十分に把握したうえで規定であるとは考えられない。

二、三の外国の施工基準の例をあげてみると、A.C.I.-A.S. C.E. Joint Committee により1957年に制定された Tentative Recommendations for Prestressed Concrete には、“ポストテンション方式部材において、伸びから推定されるPC鋼材の引張力と荷重計から推定されるPC鋼材の引張力の間に5%の誤差を生じた場合には、プレストレスの作業を中止し、誤差の原因が測定の誤りにも、機械の故障にもよらない場合には責任技術者に相談しなければならぬ”と規定されている。

また、フランス国鉄のプレストレスト コンクリート施工示方書には“荷重計の読みが所定の値に達したのに、伸びが所定の値に達していない場合には伸びが所定の値に達するまで荷重計の読みを上げることができるが、5%を越えてはならない。荷重計の読みを5%上げても所定の伸びに達しない場合には、緊張作業を中止しなければならない。荷重計が所定の値に達する前に伸びが得られた場合には、荷重計が所定の値に達するまで緊張を続けること”と規定されている。

プレストレスの際の許容の誤差について、具体的に数字をあげて基準を決めている示方書は外国においても少なく、上記の二例ぐらいのものである。

これらの基準に記されているように、荷重計から推定される引張力と伸びから推定される引張力の間に5%以上の差を生じた場合は異常の状態であるという解釈をすると、実際にプレストレスの作業に立会った者であれば了解することができるのであるが、緊張作業を行なって見ると異常のケーブルだらけという事実しばしばそうぐうすることがある。そして測定の誤りでも、機械の故障でもないのである。つまり測定の誤りがなく、機械の故障がなくても、両方の測定値の間には5%以上の差を生じることが、かなり高い確率であられるのである。このように5%という許容限度は実際的な見地から考えるとあまり意味のない値であるということが出来る。しかし、この5%という値がプレストレスの誤差に直結する値であるとする部材の安全度という見地から5%以上の誤差を許すということではできない。

プレストレスの誤差が、実際にどの程度部材の安全性に影響を与えるものであるか、一、二の例について計算してみることにしよう。

緊張計算には、PC鋼線のヤング係数 $E_p = 2.10 \times 10^6$ kg/cm²、PCケーブルの角変化1ラジアンあたりの摩擦損失係数 $\mu = 0.3$ 、PCケーブルの長さ1mあたり摩擦

損失係数 $\lambda = 0.004$ の値を使用した。そして実際には、 $E_p = 2.00 \times 10^6$ kg/cm²、 $\mu = 0.45$ 、 $\lambda = 0.006$ で、しかもマンメーターの指度が正しい引張力より5%高い値を示す狂いを生じていたと仮定し、これ以外は、実際の状態が完全に緊張計算の仮定と合致していたものとする。スパン15.8m および35.00m、KS-18の鉄道橋の標準桁について計算してみると、荷重計の示度によって引き止め点を決める場合、緊張計算の仮定と、実際の状態の違いによって、表-1のような引張力の誤差ならびにプレストレスの不足を生じる。この程度の誤差は、ほとんどおこり得ないような誤差であるとはいえない。

表-1 プレストレスの誤差が引張縁のコンクリートの引張応力度にあらわれる影響(スパン35m および15.8mの鉄道橋用標準桁)

		荷重計により緊張力を決めた場合	伸びにより緊張力を決めた場合
導入直後のプレストレスの誤差	スパン35m	-12.2%	-7.1%
	スパン15.8m	-10.6%	-6.7%
クリープ終了後設計荷重がのった場合コンクリートにあらわれる引張応力度	スパン35m	24.7 kg/cm ²	13.7 kg/cm ²
	スパン15.8m	17.5 kg/cm ²	10.5 kg/cm ²

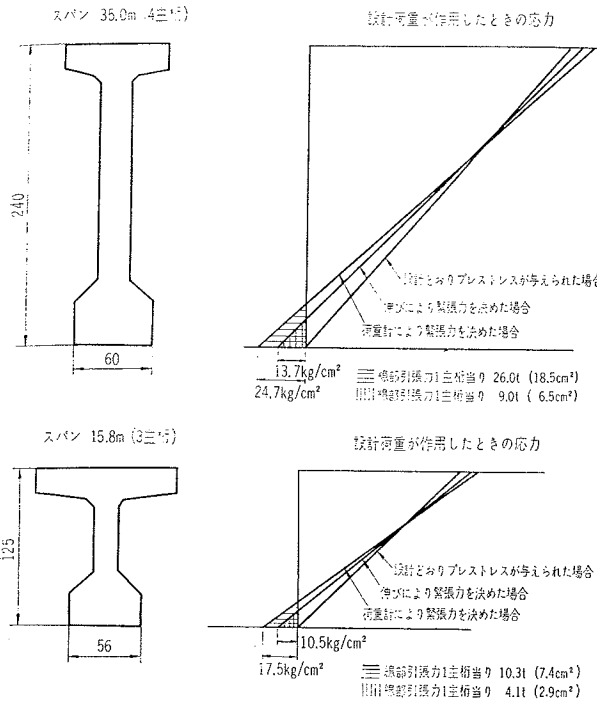
設計荷重が作用したとき、表-1に示すような引張応力を生じることがどの程度の重大事であるかということになるが、パーシャルプレストレスとして部材を設計する場合、コンクリートに許される許容引張応力は、土木学会PC指針によると、 $\sigma_{28} = 400$ kg/cm²のコンクリートを使用し、引張側が断面の下側にある場合25 kg/cm²、引張側が断面の上側にある場合15 kg/cm²である。しかも、この場合、コンクリートの受ける引張力に肩代わりし得るだけの鉄筋を配置しなければならないのである。

鉄道橋においては、これまでパーシャルプレストレスの設計を行なわず、フルプレストレスの設計ばかりであったが、仮りにパーシャルプレストレスの設計を許すものとする図-1に示すように引張力に対して鉄筋を配置しなければならない。そして計算上必要な鉄筋量は鉄筋の許容引張応力を1400 kg/cm²とすると荷重計により緊張力を決めた場合、スパン35mにおいて1主桁あたり18.5 cm²の断面積、スパン15.8mにおいて、1主桁あたり7.4 cm²の断面積となる。

また、伸びにより緊張力を決めた場合、スパン35mにおいて1主桁あたり6.5 cm²の断面積、スパン15.8mにおいて1主桁あたり2.9 cm²の断面積となる。

フルプレストレスの設計とパーシャルプレストレスの設計が等しい安全度を有するものであると仮定すると、フルプレストレスの設計においてプレストレスが不足し、表-1および図-1に示すような引張応力が生ずることは、上記のような鉄筋が不足するのと同様の安全性の低下があるものと考えることが

図-1 プレストレスの不足によりコンクリートに生ずる引張応力



従来、与えられたプレストレスの大きさを検査する方法としてプレストレスによるPC部材の反り量を測定することがしばしば行なわれている。理論的には、反り量を測定することによって与えられたプレストレスを検査することができるのであるが、実際には所要の精度でプレストレスを検査する手段としては不十分である。

なぜならば、先にも述べたようにプレストレスの大きさは数%程度以下の精度で与えなければならないのに対し、反り量測定では数%の精度でプレストレスの大きさを推定することは不可能だからである。これは反り量からプレストレスの大きさを推定するにはコンクリートのヤング係数を仮定しなければならないが、コンクリートのヤング係数を高い精度で求めることができないからである。

表-2 反り量の測定結果

橋梁名	桁本数	平均反り量(mm)	変動係数(%)
小丸川	31	22.0	9.1
森戸川	14	17.0	8.8
早川	8	19.9	5.5

表-2は現場においてPC部材の反り量を測定したデータであるが、同一のPC部材を製作した場合に反り量の変動係数は10%程度にも達する場合があります。これでは数%の誤差を検出する役には立たない。また、その前の段階として、反り量の基準となるプレストレス導入時のコンクリートのヤング係数の適当なる値を決めることがほとんど不可能でもある。したがって、反り量は参考値として知る程度にしか役に立たないといえる。

プレストレスの実際の作業は現場技術者の監督のもとに行なわれるが、ジャッキの操作、伸びの測定などは作業員によって行なわれるのが普通である。このため測定値に誤りが入る可能性も少なくなく、緊張記録に全面的信頼を置くことができない場合もおこってくる。この欠点を防ぐためには、ジャッキの圧力と伸びの量が自動記録される装置を使用することができ、外国においては特殊な工法において一部で実用されている。これもよい管理を行なうための一つの要素ではあるが、実際に緊張されたデータが誤りなく記録として残されるという面からは、決してこれだけやれば十分であるといえるものではない。自動記録装置を使用しなくても管理の記録から作業員の誤りを容易に発見できる方法を講ずることはさして困難なことではないと考えられる。

以上、プレストレスの管理の重要性和そのむずかしさ、さらに現在行なわれている方法が本意なものであることを述べたが、これらを要約してプレストレスの管理にあたって必要な問題点を提起するとつき

きる。

通常の土木工事においては、あまり大きな関心がはられない程度の誤差が、このようにPC部材の安全性に大きな影響をもたらすのである。

プレストレスの誤差が数%程度あると部材の安全性に対する影響を無視することができなくなるのに対し、PC鋼材の伸びと荷重計の読みから推定される引張力を5%以内の差におさめることは一般的に不可能であるという事実を考えた場合、設計上、つぎのような点を考えて設計で期待した安全度を確保する道が残されている。すなわち、

(1) 計算上必要なプレストレスに対し余分のプレストレスを与え、部材引張部にに対し圧縮応力の余裕を残す。

(2) 設計で考えたPC鋼材の引張応力より常に高い引張応力が与えられるよう、施工の際に引き止め点を決定する。

(3) プレストレスが不足した場合にもパーシャルプレストレスの部材としてもつように引張鉄筋を配置する。

おこり得る誤差を想定して、上記のような手段を講ずることは必要なことであるが、従来は、おこり得る誤差の大きさも明確にされず、しかも上記3項のような設計、施工上の考慮もあまりはられなかったというのが実状である。また、もし上記のような処置をとるとすれば、それだけPC部材の経済性の損失に影響があらわれてくる。

のようになる。

(1) プレストレッシング作業中の作業員による測定
の誤りをただちに発見でき、修正し得る方法を考えるこ
と。

(2) 荷重計のキャリブレーション、摩擦測定を行な
うことを規定するばかりでなく、荷重計の示度の狂い、
摩擦係数の変動がすみやかに発見できる方法を考えるこ
と。

(3) プレストレッシングの際の誤差を明らかにした
うえで、設計で考えた部材の安全性を確保するためのプ
レストレッシングの管理の方法、あるいは設計施工上考
えなければならぬ処置を明らかにすること。

3. PC 鉄道橋梁工事, 13 現場におけるプレ ストレッシング管理の調査結果

(1) 概 要

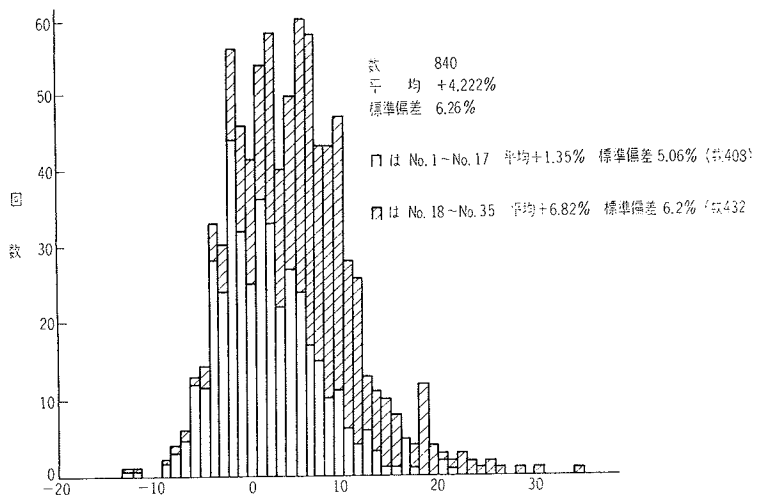
土木学会論文集第 76 号「小丸川PC 鉄道橋の架替え
工事ならびに関連して行なった実験的研究報告」におい
て、小丸川橋梁工事における 76 号の PC ケーブルのプ
レストレッシングの結果から、プレストレッシングにお
いておこる誤差を推定した。その結果、プレストレッ
シングにおいて、PC 鋼材の伸びから設計断面における引
張力を推定する場合にも、荷重計の読みから引張力を推
定する場合にも、各種のばらつきの原因によって 表-3
に示すように 3~5% 程度の標準偏差のばらつきはさけ
られないこと、したがって、伸びから推定される引張力
と荷重計の読みから推定される引張力の間にも 3~5%
の標準偏差のばらつき(図-2)の差を生じることがさ
けられないことが明らかにされた。そして、このさけら
れない偶然誤差を許しながら、正しいプレストレッ
シングを行なって行くためには、PC ケ
ーブルを組にわけ、各組ごとに伸び
から推定される引張力と荷重計から
推定される引張力の差の平均値をと
り、偶然誤差によるばらつきの影響
を小さくしておいて、故障原因によ
る差を鋭敏に検出して作業を改善し
て行く方法が非常に実用的であるこ
とを示した。図-3 において、個々
の PC ケーブルについての①~②の
値は非常に大きくばらついており、
このばらつきの中から故障原因を見
出すことは困難であるが、各 PC 桁
に含まれる PC ケーブルごとに平均
値をとってみると、ばらつきは非常
に小さくなり、No. 16 以降の桁のプ
レストレッシングに故障原因が介入
して来ていることが明りょうにあら

表-3 測定方法とばらつきの大きさ

測定内容	ばらつきの原因	ばらつきの 大きさ (標準偏差)	一方に偏す る誤差 (1 ケーブル 当たりの 平均値とし て)
伸びにより測 定した場合	a) PC 鋼線の断面積	0.6%	
	b) PC 鋼線のヤング係数	1.7	
	c) 摩擦損失値のばらつき	1.5~2.5	
	d) μ, λ の関係値	0~1.5	
	e) 伸び測定の誤差	1	
	g) すべりによるばらつき	0~1.5	-0.75%
	h) 応力-ひずみ曲線の曲線部	0.35	-0.68
	total		2.5~4.5
荷重計により 測定した場合	c) 摩擦損失値のばらつき	3~5	
	f) ジャッキのマノメーターの誤 差	2	
	g) すべりによるばらつき	0~1.5	-0.75
total		3.6~5.6	-0.75
荷重計から求 めた緊張力と 伸びから求め た緊張力の差 を生ずる原因	a) PC 鋼線の断面積	0.6	
	b) PC 鋼線のヤング係数	1.7	
	c) 摩擦損失値のばらつき	1.5~2.5	
	d) μ, λ の関係値	0~1.5	
	e) 伸び測定の誤差	1	
	f) ジャッキのマノメーターの誤 差	2	
	h) 応力-ひずみ曲線の曲線部	0.35	
	total		3.2~4.8
両者の読みの 差の原因とな らない誤差	c) 摩擦損失値のばらつき	1.5~2.5	
	g) すべりによるばらつき	0~1.5	-0.75
total		1.5~2.9	-0.75%

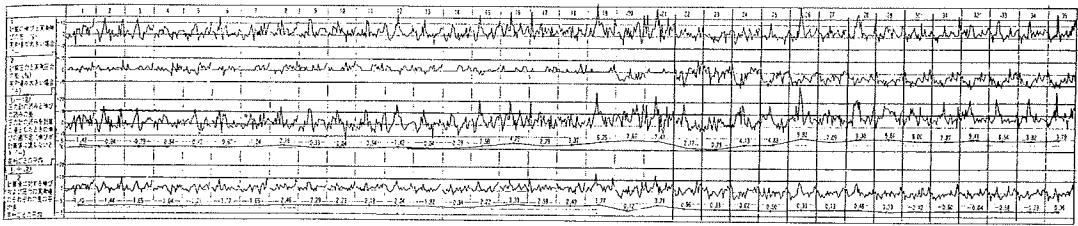
われている。しかし、細かい点に関しては残された問題
も少なくないので、さらに多くの工事現場において調査
を行なう必要がある。特に PC ケーブルの長さとか、配
置の形状、あるいはケーブルの種類に無関係に一定のば
らつきの値を考えてよいものかどうかという問題が残さ
れている。また、伸びの測定値と荷重計の読みから推定
される引張力との差は確率的にあらわれる誤差である
とし、われわれが実用的に整備し得る範囲内において PC

図-2 圧力計の読みと測定値との間の差



注) +は圧力計の読みを計算の値に値させたとき計算のひ差より実際のひ差のひ差が大きい場合、または計算のひ差と実際のひ差を一致させたとき圧力計の指針が計算による指針より低い場合。

図-3 各 P C ケーブルの緊張データ



ケーブルの組の中の数をもくとればとるほど、両者の差の平均値は 0 に近づくと考えているが、実際には、ある程度の荷重計の狂い、P C 鋼材のヤング係数の測定値と真の値との差、計算上の近似などというものを完全に排除することはできないので、これらの影響を管理の上にとどのように反映させるかの問題が残されている。これらの問題を解決するためには統計的な管理方法を現場に適用し、実用上の問題点を明らかにしなければならない。

以下にこれらの問題について、13 現場におけるおよそ 3000 本の P C ケーブルの緊張結果について検討を加えることにしよう。

(2) プレストレスの管理データに対する検討

a) 緊張計算過程に対する検討

主として国鉄の P C 工場の現場 13 カ所において合計約 3000 本の P C ケーブルの緊張データについて、伸びから推定される引張力と荷重計の読みから推定される引張力の間の差について全ケーブルの平均値と標準偏差を求めた。この結果は表-4 に一覧表にしてある。

表-4 現場における調査結果から得られた伸びと荷重計から推定される引張力の差

現場名	ケーブル本数	ケーブルの種類	伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差*		
			全ケーブルの平均値 (%)	標準偏差 (%)	
根岸線 A	100	フレシネー 12×φ7	+2.66	3.94	
	B	360	〃	+1.62	4.62
	C	300	〃	+1.70	4.10
	D	395	〃	+0.89	4.30
鬼怒川(連続桁)	203	フレシネー 12×φ12.4	+4.12	8.04	
鬼怒川(単純桁)	159	フレシネー 12×φ7	-0.73	4.19	
根川	40	〃	+2.38	2.48	
鷲の巣	70	ディビダグ φ27	-3.20	4.14	
永野田	72	フレシネー 12×φ7	+1.99	3.68	
小丸川(前半)	408	〃	+1.35	5.06	
	(後半)	432	〃	+6.82	6.20
美幌川	160	〃	+3.20	3.62	
丸子川	160	〃	+3.20	3.81	
井出川	120	〃	+1.70	4.24	
首都公団4号線	144	B.B.R.V. 36~44×φ6	-0.85	2.12	

* (+) 符号は、伸びから推定される引張力が大きい場合、すなわち荷重計の読みが計算上の値に達したときに、伸びの値が計算値を越えている場合、(-) 符号はその逆を示す。

この表の値からつきのことについて検討を加えて見よう。

① 両者の測定値の差の平均値について；理想的な状態において計算され、施工された場合には多くのケーブルについて求められた二つの測定値の差の平均値という

ものは 0 にならなければならないものである。しかし、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の間の差の平均値は表-4 に示すように、荷重計の狂っていたことが明らかになった小丸川(後半)と、P C 鋼材のヤング係数に修正を施した鷲の巣川を除くと両者から推定される引張力の差は -0.73~+4.12% となり、ほとんどの場合、伸びから推定される引張力が高くなっている。いいかえれば、伸びが計算値より多目にできる傾向を示しているということがいえる。

② 両者の測定値の差のばらつきについて；土木学会論文集 76 号に発表した小丸川橋梁において、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差のばらつきは標準偏差にして 3~5% 程度であることを論じた。この結果、一般的に偶然誤差の標準偏差について 5% という値を考えれば実用的であると推定されたのである。その後、国鉄の 13 の工事現場と首都公団の 1 現場において標準偏差を求めたところ、表-4 に示すような値となった。鬼怒川連続桁において 8.04%、首都公団 4 号線連続桁において 2.12% という特異な値を示しているほかは大体 3~6% の範囲にある。

したがって、偶然誤差によるばらつきの標準偏差を一般的に 5% とすることは十分に実用的な仮定であるといえることができる。また、非常に大きな現場においては 5% の標準偏差にとらわれず、その現場で得られたデータからその現場における母集団の標準偏差の推定値を計算し、この値を基礎にして管理限界を計算しなおすこともできるのである。

b) 管理図の上であらわれた判定に対する検討 表-4 に示した現場のうち比較的良好な管理が行なわれたと思われる 5 現場における管理図を検討してみることとする。

5 現場におけるプレストレスの管理図は、図-3 ならびに 4~7 に示すとおりである。標準偏差を 5% とし、2 シグマの管理限界を考え、1 組にふくまれる P C ケーブル n 本の場合 $\pm \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = \pm \frac{10}{\sqrt{n}}\%$ を採用すると、管理限界をはずれる P C ケーブルならびに組の数は表-5 のようになる。表-5 によると、P C ケーブルについては管理限界をはずれる割合は井出川の場合を除いて 5% 前後の値となり、管理限界の決め方が 20 回に 1 回の危険率をおかして決めたこととよく一致している。

図-4 根岸線C現場管理図

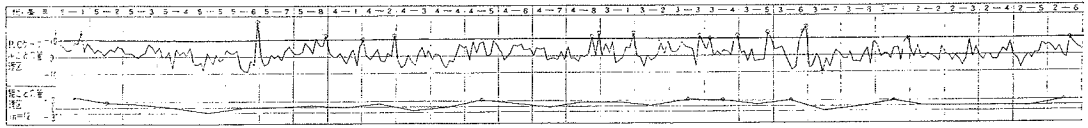


図-5 井出川橋梁管理図

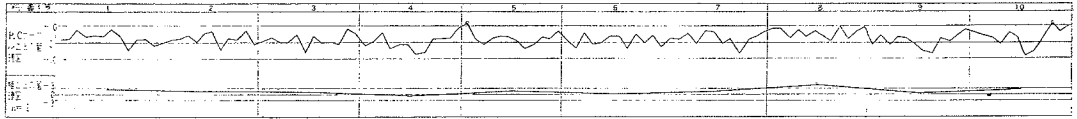


図-6 丸子橋橋梁管理図

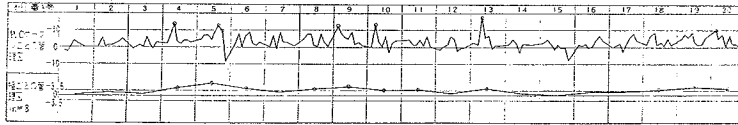


図-7 美幌川橋梁管理図

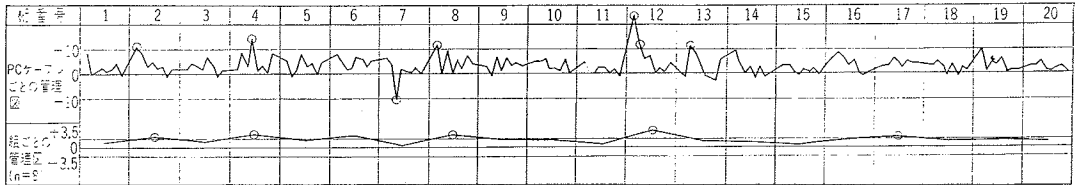


表-5 管理限界の値と限界値をはずれる割合

	ケーブル本数	組の数	標準偏差5%とし、2シグマを管理限界とした場合			
			ケーブルについて		組について	
			管理限界をはずれた数	%	管理限界をはずれた数	%
井出川	120	10	(+) 2 (-) 0	1.7	(+) 1 (-) 0	10.0
根岸線C	300	30	(+) 16 (-) 1	5.7	(+) 8 (-) 0	26.6
美幌川	160	20	(+) 6 (-) 1	4.4	(+) 6 (-) 0	30.0
丸子川	160	20	(+) 7 (-) 0	4.4	(+) 11 0 (-)	55.0
小丸川 (No. 1~No. 14)	336	14	(+) 15 (-) 2	5.1	(+) 0 (-) 0	0.0

しかし、組についてみると小丸川 (No. 1~No. 14) を除いて管理限界をはずれる割合が非常に多くっており、特に丸子川においては半数以上の組が管理限界をはずれることになる。もし、これらが異常な状態における緊張結果であるとするならば当然であるが、ここにあげた現場は特に緊張管理がよく行なわれたと思われる現場を選んだのであるから、管理方法の実用性という点から再検討を行なってみる必要がある。

まず、PCケーブルを何本かの組にした場合に実際のばらつきが理論どおりに小さくならないことは、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力との差のばらつきが完全に偶然誤差だけから成り立っていないことを示している。そして、この理由についてはつぎのような原因が考えられるのである。

(1) 管理限界のはずれ方が (+) 側にはずれているものが圧倒的に多い。これは a) において述べたことと一致している。このことは伸びから推定される引張力が大

きいことを示すものでPC鋼材の引張試験の結果から求めたヤング係数より、実際に緊張する場合のヤング係数のほうが小さくなるのではないかと考えられる。

(2) 配置形状の異なるPCケーブルを同一母集団として考えて理論づけを行なったが、実際には同一母集団と考えることができず、その影響が管理図の上にあられるということが考えられる。

(3) 摩擦測定を全ケーブルについて行なっておらず、一般に工事開始前に何本かのケーブルについて行なっているが、われわれが考える以上に摩擦係数の変動が大きく、この影響が大きくあらわれていることが考えられる。

4. 緊張計算において考慮すべきPCケーブルの見かけのヤング係数

PC鋼材の伸びを測定することによって与えられるべき引張力を求めようとする場合には、PC鋼材のヤング係数を正確に知っておかなければならない。一般に、使用するPC鋼材のヤング係数はPC鋼材の試験成績表に付随している応力-ひずみ曲線より求めている。しかし、多くの緊張作業の結果から、応力-ひずみ曲線から求めたヤング係数が真の値ではないと疑われるものかなりあることが明らかになった。というのは、応力-ひずみ曲線から求めたヤング係数が鋼の常識をはずれた値を示し、この値を使用した場合、計算上の伸びと実際の

伸びが一致しないからである。そこで、一応これまでに使用した P C 鋼線の試験成績表から求めたヤング係数を一覧表にまとめてみたところ、つぎの表-6 のようになった。

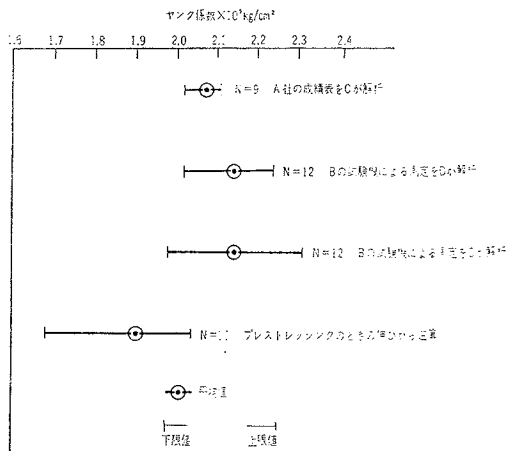
表-6 ヤング係数試験成績一覧表

ヤング係数	A 資料数20	B 35	C 38	D 23	E 129	F 35	合計 280
1.93			1				1
1.94							
1.95			1				1
1.96							
1.97							
1.98				1			1
1.99				1	2		3
2.00					4		4
2.01			2		7		9
2.02	3		1	1	9		14
2.03	3		6	4	15		28
2.04			4		21		25
2.05	2		1	1	18		22
2.06	1		4	1	16		22
2.07	2		4	1	13		20
2.08	3		2	7	9		21
2.09	1		2	2	5	1	11
2.10	2	4			2	3	11
2.11		7	3	1	2	4	17
2.12	3	11	4	1	2	5	26
2.13		3			2	5	10
2.14		7		1	1	5	14
2.15		2	1		1	4	8
2.16				1		3	4
2.17		1	2			3	6
2.18						1	1
2.19						1	1
平均	2.066	2.120	2.066	2.070	2.050	2.130	2.075
変動係数	1.70%	1.63%	5.10%	4.20%	3.24%	2.46%	4.77%

表-6 において B および F のブロックのヤング係数は、21 000 kg/mm² を越えているが、これが材料の性質によっているものか、あるいは測定のためなのか問題である。そこで、同一コイルの P C 鋼材のヤング係数が試験機および解析者によってどのように異なった値を与えるかを試してみた。

図-8 はその結果を示すものである。これによると、

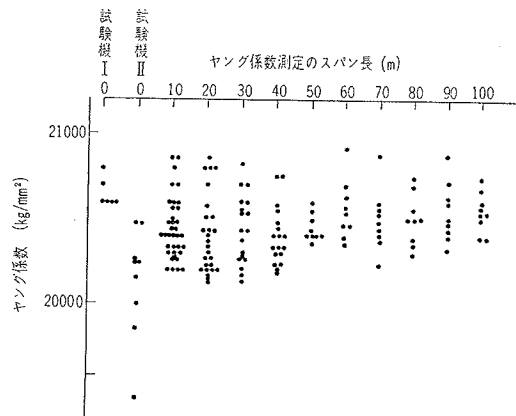
図-8 同一コイルの鋼線のヤング係数



同一コイルから取り出した資料でも試験機によってあるいは解析者によって求められるヤング係数の値に大きな差があることがわかる。A 社の試験による場合の平均値は 20 700 kg/mm² であるのに対し、B 社の試験機による場合には、平均値が 21 400 kg/mm² となっている。プレストレッシングのときの伸びから逆算したヤング係数は非常に小さいが、これはあとから論ずるように、プレストレッシングのときに求められる伸びは鋼線の弾性変形のみによる伸びだけでなく、他の要素によって伸びが大き目にてくるためである。

プレストレッシングの際には、かなり長い鋼線についての伸びを測定し、試験機においては 200 mm 程度の短いスパンにおいてヤング係数を測定するが、測定スパンが異なるとヤング係数の値がどのようになるかを測定したものが 図-9 である。この図は同一チャージから製造された P C 鋼線についてスパン 10 m から 100 m までの間の長さで、ヤング係数を求めたものであるが、伸びの測定を 10 m の場合も 100 m の場合も同一の尺度で求めたため、スパンが長くなるほど測定精度が高くなりばらつきが小さくなっているが、各スパンでのヤング係数の平均値はほとんど一定している。

図-9 ヤング係数測定のスパン長とばらつき



これに対し、引張試験機から求めた 200 mm のスパンでのヤング係数は明らかに異なった平均値を与えており、二つの試験機でもその値は異なっている。

われわれはこれまで試験成績表から求めたヤング係数を使用して、プレストレッシングの際における伸びを計算するのが正しい方法であると考えてきたが、以上の事がらを総合してみるに試験成績表のヤング係数の値は使用する P C 鋼材のヤング係数の妥当な値を示しているのではなく、材料のばらつきによってヤング係数がばらつくと考えられていたのが、実は試験機あるいは解析者の誤差をあらわすものであると考えることができるのである。そして、試験成績表より求めたヤング係数が何であろうとも使用する P C 鋼線のヤング係数は 20 500 ~ 21 000 kg/mm² の間にあると考えることができる。そし

てP C鋼材自体のヤング係数は試験成績表によるまでもなく、20 500 kg/mm²と考へてもせいぜい1%程度の誤差しか生じないことになる。しかし、プレストレッシングにおいて、もっとも必要なことは使用するP C鋼材のヤング係数がいくらであるかということではない。必要なのは伸びの測定結果から設計断面における鋼材の引張力を正当に評価するための見かけのヤング係数である。鋼材のヤング係数と緊張時の鋼材の伸び量に関する見かけのヤング係数とは必ずしも一致しない。このことは図-8からも明らかである。例えば、表-4について調べてみよう。伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差の各現場ごとについての平均値を調べてみると伸びから推定される引張力のほうが大きくなる場合が非常に多い。このことは、プレストレッシングの際の鋼材の伸びにあらわれてくる見かけのヤング係数が一般に鋼材のヤング係数よりいくぶん小さい値になるのではないかということを示唆している。

このようなことが考えられるため、いくつかの現場においてプレストレッシングの際のP C鋼材の見かけのヤング係数の測定を実施した。1本1本のP Cケーブルについては種々のばらつきの原因が介入するため、求められた見かけのヤング係数のばらつきは大きく個々の値の信頼性はうすいが、多くの測定データの平均値について比較してみると、かなり明らかなことがいえるようである。表-7および図-10は各現場における見かけのヤング係数の測定結果である。

表-7 見かけのヤング係数の値

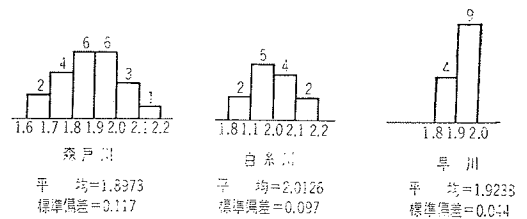
橋名	桁端定着ケーブル	途中曲げ上げ定着ケーブル	全ケーブル	参考鋼材試験成績表
根岸線(前半)	—	—	—	2.12(N=35)
	1.97	1.77	1.90(N=3)	
“(後半)				2.06(N=38)
小丸川	—	—	—	2.07(N=20)
	1.97	1.93	1.95(N=96)	
森戸川(l=24 m)	1.95	1.76	1.90(N=10)	2.07(N=23)
	1.98	1.98	1.98(N=14)	
“(l=25 m)	1.88	1.92	1.90(N=12)	
	1.93	1.96	1.94(N=13)	
白糸川	2.03	1.99	2.01(N=14)	2.05(N=2)
	2.06	2.03	2.05(N=14)	
上段のみの平均	1.95	1.91	1.94(N=36)	
全平均	7.97	1.94	1.95(N=176)	

注) a) 上段の数値は：摩擦試験の際に求めた見かけのヤング係数
 下段の数値は：本緊張の場合に摩擦係数が摩擦試験で求めた値と同じと考へて逆算した見かけのヤング係数
 b) N：試材数

表-7 および 図-10 からいえることは、

1) 見かけのヤング係数はP C鋼材のヤング係数より5%程度小さい $1.95 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 程度になるが、現場によってかなり大きなばらつきがある。

図-10 見かけのヤング係数のばらつき(摩擦試験の際に求めた値)

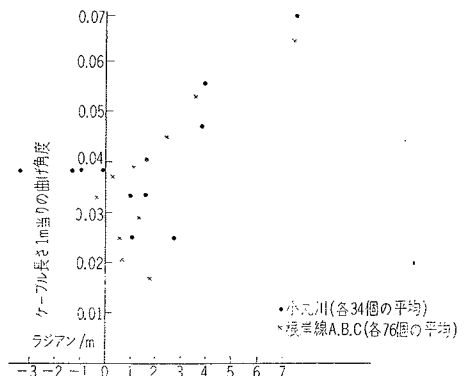


2) 二つの測定方法で求めた見かけのヤング係数の値は必ずしも一致していないが、全体的にはほぼ一致した見かけのヤング係数となっている。これは各現場における測定値が比較的少ないためであると考えられる。

3) P C桁の端部で定着されているP Cケーブルと途中で曲げ上げられているケーブルを区別してみた。この結果、途中曲げ上げのP Cケーブルのほうが多少見かけのヤング係数が小さくなる傾向にある。

結局、伸び測定の際の見かけのヤング係数はP C鋼材のヤング係数より小さくなることは明らかであるといえることができる。また、見かけのヤング係数はケーブルの配置形状によっても影響されるであろうことが推定される。この点については根岸線および小丸川橋梁において各形状のケーブルごとにくけた緊張データからうかがうことができる。ケーブルの配置形状を示す尺度としてケーブルの単位長さあたりの曲げ上げ角度をとり、見かけのヤング係数を示す尺度として伸びから推定した引張力と荷重計から推定した引張力の差の平均値(この値は各配置形状のP C鋼材の見かけのヤング係数が、緊張計算に採用したP C鋼材のヤング係数より、平均的に何%低くなるかを示す)をとり、これらの関係を求めると図-11のようになる。この図によると、ケーブル1mあたりの曲げ上げ角度が0.04ラジアン程度以下の場合(これは一般に端部定着のケーブルである)には両者の間に明確な関係は認められないが、0.04以上になると曲げ上げ角度が大きいくほど、見かけのヤング係数の低下が大きくなっている。

図-11 見かけのヤング係数とケーブル配置形状との関係



このように見かけのヤング係数が小さくなる原因としては、つぎのような理由が考えられる。

(1) PC鋼材が彎曲して配置されると曲げによる縁ひずみが加算されるため、応力-ひずみ曲線における比例限界が低くなり、この影響が伸びにあらわれる。

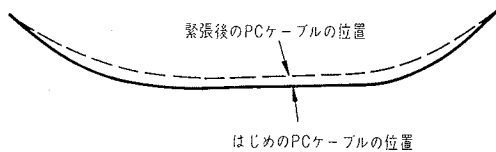
(2) シース内におけるPCケーブルの位置が緊張によって鉛直方向に移動する。

(3) 一般に測定するPC鋼材の伸び量はPC鋼材が部材端部から抜け出す量を測定しているが、PC鋼材の真の伸び量は抜け出し量から部材の短縮量を引いたもので、多少伸びが大き目にでてくる。すなわち、見かけのヤング係数が低下する傾向を示す。

(1) について；小丸川橋梁における緊張結果を使用して、応力-ひずみ曲線の曲線部分を考慮して伸びの計算を行なうと小丸川橋梁におけるように端部で非常に高い緊張力を与えたような場合には、曲げ上げ角度が大きくなり、長さの短いPCケーブルにおいて、1.5%程度のヤング係数の低下を生じるが、普通の場合にはほとんど影響ないものと見てよいであろう。

(2) について；伸びの測定の原点は、普通PC鋼線に20 kg/mm²程度の引張力を与えたところととる。このためシース内におけるPCケーブルのゆるみの影響などはなくなるはずであるが、緊張力を増して行くにつれてPC鋼線がセンタースパイラルの円周に沿って上方に移動したり、あるいはセンタースパイラルが変形したりすることが考えられる。すなわち、図-12のようにPCケーブルが移動するため、見かけ上の伸びが大きくなる

図-12 緊張によるPCケーブルの移動



る。緊張中にPCケーブルが1 cm上方に移動するものとして、小丸川橋梁のPC桁のNo. 1, No. 5, No. 11ケーブルについて見かけ上の伸びの増加量を計算してみると表-8のような値となる。現実にはPCケーブルが緊

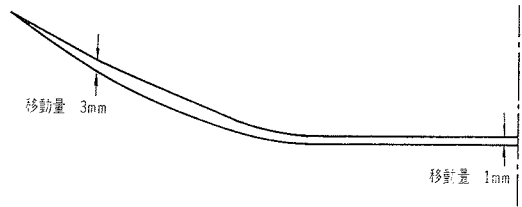
表-8 ケーブルの鉛直方向移動におよぼす伸びの増加量 (ケーブル重心が1 cm移動する場合)

ケーブル番号	長さ (m)	曲げ上げ角度 (rad)	伸びの増加量 (mm)	伸びの増加率 (%)
No. 1	13.0	0.421	2.6	3.7
No. 5	23.5	0.421	2.6	2.2
No. 11	23.1	0.283	1.75	1.5

張中にシース内においてどの程度の鉛直方向の移動を行なうかを測定してみた。測定を行なったのは、図-16に示すスパン19 m KS-18の標準PC桁のNo. 5ケーブルである。PCケーブルの中央と中央から8.315 mの点に観測穴をあけ緊張中のPCケーブルの移動を実測し

たのである。その結果、圧力50 kg/cm²から所定の圧力まで緊張する間の移動量は図-13に示すとおりであった。

図-13 PCケーブルの鉛直移動量



スパン中央で1 mm、曲げ上げ途中点で3 mm、そしてこの中間がなめらかに移動したものとすると、この二つの位置でのPCケーブルはケーブルの半長9.80 mに対し、1.1 mmの長さの差を生ずる。いいかえれば、ケーブルが移動することによって、弾性伸びのほかに片側で1.1 mmの伸びが加えられることになる。この場合、弾性伸びは48 mmであるので、伸びに対する影響は2.3%である。

プレストレッシングの際のPC鋼材の見かけのヤング係数が小さくなる理由の一つが、シース内において緊張力をますとともにPC鋼材が鉛直方向にわずかでも移動するためであるという推定が本実験の結果から明らかとなった。このことは、PCケーブルに使用するセンタースパイラルの選定がプレストレッシングの管理の上において大切であることを示唆している。

(3) について；PCケーブルの部材端部からの抜け出し量と、PCケーブルの実際の伸び量との差は、使用するPCケーブルの単位の大きさに関係するもので、例えば集中ケーブルを使用するような場合には10%近い差がでてくるが、このような場合には緊張計算において部材のちぢみ量を考慮するのが普通である。しかし、フレシナー方式あるいはこれに類似の方式のようにPCケーブルの単位が比較的小さくて、1本のPC部材に10本程度以上のPCケーブルを使用するような場合には、一般に抜け出し量をもってPCケーブルの伸び量と考えるのが普通である。

小丸川橋梁PC桁の場合において、抜け出し量を伸び量と考えたことによるPC鋼材の見かけのヤング係数の低下率は0.5%程度以下である。

(1),(2),(3)の理由によってPC鋼材のヤング係数が見かけ上低下するということになる。長さが短く、曲げ角度の大きい途中定着のPCケーブルの見かけ上のヤング係数の低下率が大きくなる傾向があり、これは表-7の見かけのヤング係数の実測のデータおよび図-11の結果と一致している。

ヤング係数の見かけ上の低下率の値は、PC部材の断面、PC鋼材の緊張応力、PC鋼材の配置形状、使用するシースの直径、センタースパイラルの性質などによ

って異なるものであることは表-7の多くの現場における実測値にかなりのばらつきがあることから容易に想像することができる。

プレストレッシングの際に知っておかなければならない値は、その現場におけるPC鋼材の見かけのヤング係数の値である。この見かけのヤング係数の値に見積り誤差があれば、正常なプレストレッシングの作業を行なうことはできなくなる。

緊張計算には試験成績表によるPC鋼材のヤング係数ではなくて現場で測定したPCケーブルの見かけのヤング係数を使用しなければならない。ただ、この場合、それぞれのPCケーブルについて異なった見かけのヤング係数を採用することは非常に不便であるから、各形状のPCケーブルについて測定した平均値を用いるのがよい。

5. プレストレッシングの管理上必要なPCケーブルの組分け方法

小丸川橋梁におけるプレストレッシングのばらつきの検討の際に、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差は3~5%程度の標準偏差でばらつくことを述べた。そして、その後他の現場において求めたプレストレッシングのデータについては表-4のような結果があらわれており、偶然誤差によるばらつきの標準偏差が3~5%程度となっている。しかしながら、この考え方の基礎になっている事項はPCケーブルはその配置形状のいかにかわらず同一母集団からのばらつきを示し、さらに、PCケーブルの見かけのヤング係数も各ケーブルについて等しいことを前提としているのである。

プレストレッシングの管理において、組分けされた各組にふくまれるPCケーブルが同等の配置形状を有する場合、例えば、同一形状のPC部材を多数製作し1本の部材にふくまれるPCケーブルを一つの組とする場合には、各PCケーブルが同一母集団とみなされない場合でも各組ごとにまとまれば近似的に同一母集団とみなすことができるので、上記の前提についてはあまり問題にならない。しかし、組分けの仕方が各組内にふくまれるPCケーブルが同等でない配置形状を有する場合、例えば、1本のPC部材にふくまれるケーブルが二つ以上の組に分けられ、それぞれにふくまれるケーブルの配置形状が異なる場合には各PCケーブルの母集団の違いが組としての母集団の違いとなってあらわれてくることがある。

したがって、PCケーブル配置形状、すなわち、長さ、曲げ上げ角度の大きさが異なることによって伸びからの引張力の推定値と荷重計からの引張力の推定値の間にどのような差を生じるかを検討して、PCケーブルの配置形状の差を管理の上においてどのように取り扱うべ

きかを確認しておくことが必要である。

根岸線ABC現場、小丸川橋梁における緊張データを各ケーブルごとに区別して整理してみると表-9、10のようになる。根岸線ABC現場は10本のPC同一ケーブルよりなる同一形状のPC桁76本を製作したので、配置のPCケーブルがおのおの76本ずつ存在する。また、小丸川橋梁においては工事の前半におけるマンメータの指度が正しかったと考えられる17本のPC桁について、1本の桁に同一配置のPCケーブルが2本ずつあるので、同一配置のPCケーブルがおのおの34本存在する。

表-9 根岸線ABC現場における各PCケーブルごとの伸びと圧力計の読みの差

ケーブル番号	ケーブルの長さ(m)	ケーブルの曲げ上げ角度(tan θ)	伸びから推定した引張力と、マンメーターから推定した引張力の差		資料数
			平均	標準偏差	
1	24.3	0.35	+1.32	3.45	76
2	24.3	0.30	+0.57	4.26	〃
3	24.2	0.25	+0.65	4.06	〃
4	24.1	0.20	+1.73	3.84	〃
5	24.4	0.40	-0.31	4.96	〃
6	24.5	0.45	+0.26	5.05	〃
7	23.1	0.45	+1.13	4.37	〃
8	20.1	0.45	+2.44	4.57	〃
9	17.1	0.45	+3.60	5.62	〃
10	14.1	0.45	+7.23	4.66	〃

表-10 小丸川 No. 1~No. 17 桁における各PCケーブルごとの伸びと圧力計の読みの差

ケーブル番号	ケーブルの長さ(m)	ケーブルの曲げ上げ角度(tan θ)	伸びから推定した引張力と、マンメーターから推定した引張力の差		資料数
			平均	標準偏差	
1	13.0	0.448	+7.41	5.55	34
2	16.1	0.448	+3.86	4.81	〃
3	19.0	0.448	+3.79	4.91	〃
4	22.1	0.448	+1.59	3.88	〃
5	23.5	0.448	-1.32	3.86	〃
6	23.5	0.448	-3.38	2.73	〃
7	23.3	0.448	-0.94	3.94	〃
8	23.3	0.448	-0.09	4.80	〃
9	23.2	0.392	+1.15	3.30	〃
10	23.2	0.392	+0.97	3.86	〃
11	23.1	0.291	+2.71	3.57	〃
12	23.1	0.291	+1.03	4.84	〃

これらの表をみると標準偏差の値は各配置形状のケーブルのグループごとにまとめてもさして変動は認められないが、平均値はケーブルの配置形状によってかなりの変動がある。このことは4.において述べた見かけのヤング係数がケーブルの配置形状により異なることによっておこるのである。すなわち、緊張計算では全部のケーブルに対して同一のヤング係数の値を用いて計算するので見かけのヤング係数が小さいPCケーブルにおいては伸びから推定される引張力が大きくあらわされることになる。

したがって、ケーブル間に有意差がある場合には管理の際組に分け、組と組の間の有意差の検定をしようとする

る目的に対し組内における有意差が大きな影響を与え、管理の判定を誤らせるおそれが出てくる。現場における緊張結果からケーブル間の有意差を分散分析によって判定した結果は表-11 のようになる。

表-11 ケーブル間の分散分析結果

橋名	分散分析の判定 (水準)	異質ケーブル番号
小丸川 (No. 1~14 桁)	有意 (0.5% 以下)	11' 22' 33' 5' 6' 6'
小丸川 (No. 28~35 桁)	" (")	11' 22' 33' 10' 11' 12'
井出川	" (2%)	8
根岸線 (スパン 20 m)	" (")	1
根岸線 (スパン 22.5 m)	" (1%)	10 (最短ケーブル)
城海津	有意とはいえない (12%)	—
岩屋下 (スパン 15 m)	有意 (2.5%)	1 (最短ケーブル)
岩屋下 (スパン 19 m)	有意とはいえない (30%)	—
早川 (No. 13~20 桁)	" (8%)	—

この結果によると、城海津、岩屋下 (スパン 19 m)、早川のようにケーブル間に有意差が認められない場合もあるが、表-11 の過半数の現場においてはケーブル間に有意差が認められる。特に小丸川の場合には、有意差の認められるケーブルが非常に多くなっているが共通して有意差の認められるものは、ケーブル番号 1, 2, 3 の途中曲げ上げケーブルである。その他、根岸線 (スパン 22.5 m)、岩屋下 (スパン 15 m) も途中曲げ上げの短いケーブルに有意差が認められている。

プレストレッシングの管理において組分けをする場合には、1本の部材にふくまれるケーブルを一組とすることがケーブル間の有意差を消去する上から望ましいのであるが、つぎのような場合には部材ごとに一組とすることは必ずしも得策ではない。

a) 1本のPC部材内にふくまれるPCケーブルの本数が非常に多い場合 非常に多くのケーブルで一組をつくると、管理図の点の数が少なくなる。このことは、何か異常の現象があらわれた場合に異常の発見をおそくし、異常を生じた部材の処置が非常に困難になる。この理由から、一組のケーブル本数は 10 本以下、できれば 5~7 本程度に選ぶのが望ましい。

b) PC部材のプレストレッシングを何回かにわけて行なう場合 プレストレッシングを何回かに分けて行なう場合、その間の期間が数日程度であれば別に問題はないが、一次緊張で何本かのPCケーブルを引張ってから、二次緊張までに相当の長期間を有するような場合には、統計的管理という意味からPC部材とは無関係に緊張順に何本かのケーブルをまとめて一組とする方法が望ましいし、異常状態の発見もおおくれることがない。

c) 形状寸法の異なったPC部材を製作する場合 類似のPC部材を製作する場合には各部材ごとに一組とすることもできるが、異なる部材につくる場合には、やはり緊張順に何本かずつを一組とするほうが便利な場合もある。

以上のように実際には、一つの部材の中のケーブルを

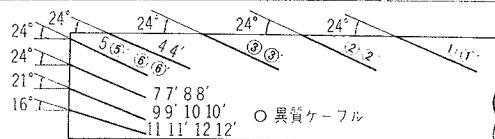
いくつかの組に分けたいことがおこってくる。

小丸川、根岸線、井出川について1本の桁にふくまれるPCケーブルをいろいろの組に分け、分散分析によって組間の有意差の判定を行なってみた。

小丸川については No. 1~No. 14 の桁は桁間において有意差はないものと認められるので、これらの桁について組分けの影響を調べて見た。組分けの方法は、一組内のケーブル本数が4本、6本、12本の場合を選んでそれぞれの場合について緊張順に組分けをして行く方法と、種々の配置形状のケーブルが各組にほぼ均等に分けられるように適当に組分けする方法について比較してみた。その結果は表-12 に示すように緊張順に組分けした場合には、各組に有意差のあるケーブルが均等に分配しないため、どの大きさの組に対しても組間に有意差があり、しかも高度に有意であるという判定となっている。これに対して組分けを適当に行なった場合には、いずれも組間の有意差は認められない。

表-12 小丸川橋 (No. 1~14 桁) の分散分析結果

数	グループの		判定 (水準)
	分類法	内容	
6	緊張順	12 12' 6' 6 4 4' 3' 3 1 1' 2' 2 5 5' 7' 7 8 8' 9' 9 10 10' 11' 11	有意 (0.5% 以下)
	適当	1 6 7 12 1' 6' 7' 12' 2 5 8 11 2' 5' 8' 11' 3 4 9 10 3' 4' 9' 10'	有意とはいえない (32%)
4	緊張順	12 12' 6' 6 4 4' 3' 3 1 1' 2' 2' 5 5' 7' 7 8 8' 9' 9 10 10' 11' 11	有意 (0.5% 以下)
	適当	1 4 5 8 9 12 1' 4' 5' 8' 9' 12' 2 3 6 7 10 11 2' 3' 6' 7' 10' 11'	有意とはいえない (50%)
2	緊張順	12 12' 6' 6 4 4' 3' 3 1 1' 2' 2' 5 5' 7' 7 8 8' 9' 9 10 10' 11' 11	有意 (0.5%)
	適当	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1' 2' 3' 4' 5' 6' 7' 8' 9' 10' 11' 12'	有意とはいえない (7.5%)

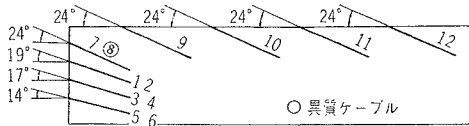


井出川については1本の桁にふくまれる 12本のケーブルを4本、6本の組に分けてみた。その結果は表-13 に示すとおりであるが、緊張順に組分けを行なっても適当なる組分けを行なった場合も、いずれも組間に有意な差は認められない。表-10 に示すように井出川の場合

合には、有意な差を有するケーブルは No. 8 だけであり、有意の程度もあまり高くないのでこの有意な差がグループ分けに影響を与えないという結果になった。

表—13 井出川橋の分散分析結果

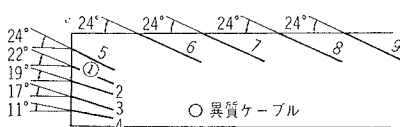
数	グループの		判定 (水準)
	分類法	内容	
3	緊張順	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	有意とはいえない (18%)
		1 6 7 12 2 5 8 11 3 4 9 10	
	適當	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	— " — (20%)
2	適當	1 3 5 7 9 11 2 4 6 8 10 12	— " — (22%)



これに対して、根岸線の場合には小丸川の場合と全く逆の判定結果があらわれている。すなわち、表—14 に示すとおりである。

表—14 根岸線(スパン 20 m)の分散分析結果

数	グループの		判定(水準)	
	分類法	内容		
3	時間的な緊張順	(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9)	有意とはいえない (50%以上)	
		1 2 3 4 5 6 7 8 9		— " — (17%)
		1 5 6 2 3 4 7 8 9		— " — (27%)
	桁単位適當	1 2 9 3 5 8 4 6 7	有 意 (2.5%)	



根岸線の場合には、プレストレッシングを2回に分けて行なった。第1回のプレストレッシングの際に6本のPCケーブルを緊張し2~3週間後に残りのケーブルを緊張する方法をとった。このため組分けの方法として一組を3本とし、時間的に緊張した順序に組分けをする方法、各桁ごとで緊張順に組分けをする方法、1本のPC桁に配置されているケーブルを一方の端から配列順に3本ずつに分ける方法、そして最後に1本のPC桁内において配置形状がほぼ均等になるような組分けの方法を選んだのであるが、分散分析の結果は各組間に有意差をな

くしようとして適当に選んだ組分けの場合だけが組間に有意差を認めることになり、予想とは逆の結果になった。しかし、この場合、有意の程度は小さい。

井出川、根岸線の場合には有意差のあるケーブルが配置形状の差とは無関係にあらわれている。特に、根岸線の場合のように適当に組分けをしたものが、有意差を生ずるような結果になったが、配置形状に無関係に有意差のあるケーブルがあらわれる場合には、特別な理由がないかぎり有意差の程度は一般に小さいものと考えられることができる。小丸川の場合の有意差は0.5%の危険度でいえるのに対し、根岸線の場合には2.5%の危険度になっている。したがって、根岸線の場合のように適当に組分けした場合にかえて有意になっても、それが管理の実施上に影響するところは小さいものと考えられることができる。

各種の組分けの方法によって管理図を描いてみると図—14、15 のようになる。図—14 は小丸川橋梁において統計的な管理状態にあった No. 1~No. 14 までの14本のPC桁の336本のPCケーブルについて、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差を引張力の%であらわした値を個々のケーブルについて、また、各種の組分けを行なった場合の平均値を管理図の形にプロットしたものであるが、個々のケーブルについての分布を求めると平均値が+0.98% (平均的に伸びから推定される引張力が0.98%高くなる)、標準偏差4.37%となる。これを母集団の平均値、標準偏差であると仮定し、正規分布であるとすると2σをはずれるケーブルは約5%存在する。そして同様にn本を一組とした場合には、 $2\sigma/\sqrt{n}$ をはずれる資料が約5%できなくてはならない。しかし実際には緊張順にn本ごとを一つの組とした場合には、 $2\sigma/\sqrt{n}$ をはずれる資料がずっと多くなる。このことはグループ分けの方法が不適当の場合には管理図の判断を誤らせ、正常な管理状態にある場合にも、異常な状態が生じたという判断をさせる場合が非常に多くなっていく。この結果、管理図の実用性をなくすことになるので、組分けの問題は非常に重要である。そしてケーブルの配置形状の類似のものが各組にほぼ等分されるように組分け方法をとることの必要性を示している。

一方、井出川橋梁については図—15 示すとおりである。

井出川橋梁においては、先の表—13 においてどのような組分け方法を行なっても有意差は認められなかったが、図—15 においても類似の結果を与えている。すなわち、PCケーブル6本を一組とする場合には、2σの範囲をはずれるPCケーブルの割合は緊張順にとったもののほうが適当な組分けを行なったものより理論値に近い結果を与えており、PCケーブル4本を一組とする場

図-14 小丸川橋梁 PC 緊張管理図 (各桁の組分けについての比較)

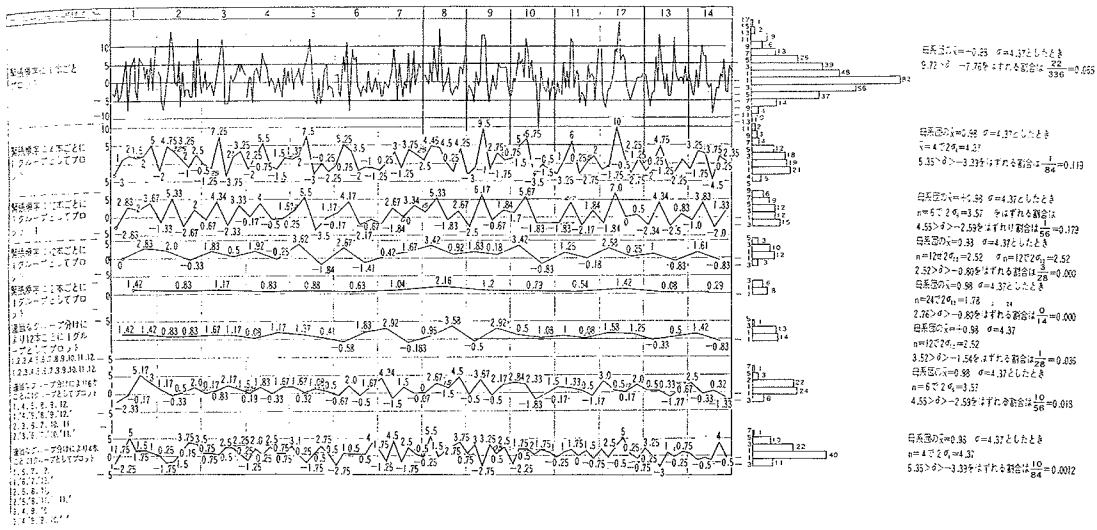
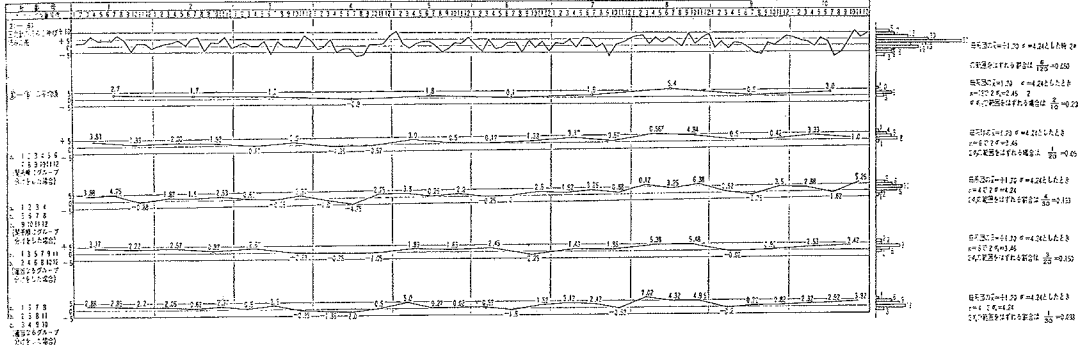


図-15 井出川橋梁 PC 桁緊張管理図 (各桁の組分けについての比較)



には、その逆の結果を与えている。そして組分けの方法の差による影響はあまり明瞭でないといえることができる。

図-15 において非常に興味ある点は、No. 8 の PC 桁においては個々のケーブルについては 2σ の範囲をはずれる PC ケーブルがないにもかかわらず、組に分けた平均値で管理していく場合には、その組分けの方法がどのように行なわれた場合にも共通して、 2σ の範囲をはずれる組があらわれていることであり、組による管理方法の利点を明らかにあらわしている。

組分けの方法がプレストレスの管理にどのような影響を与えるかを三つの現場について検討してみた。その結果は上記のように三者三様であり、組わけについて十分慎重に考慮しなければならない場合もあり、また逆に、組分けについて十分な考慮を行なっても何の役にもたない場合もある。そして、これは現場の条件によってまちまちであるといえることができる。

ここで結論としていえることができるのは、PC ケーブルの配置形状を考慮して適当なる組分け方法を行なった場合の害がプレストレスの管理のうえにおよぼす

影響は小さいが、適当なる組分け方法を行なわなかった場合の害がプレストレスの管理のうえにおよぼす影響は非常に大きいということである。したがって、統計的管理の効果を十分に生かそうとするには各組が同一母集団と考えられるように、常に適当な組分け方法を選ばなければならない。

6. 各種の摩擦がプレストレスの誤差におよぼす影響

これまでの考察においてもうかがわれたように、PC ケーブルが弯曲しているということが PC 鋼材の見かけのヤング係数を考えなければならないような結果を生じさせ、また、シーストと PC ケーブルとの間の摩擦による引張力の損失が高い精度を要求されるプレストレスを複雑にするもっとも大きな要素となっている。

このようにプレストレスにとって、もっとも重要な要素の一つである摩擦係数については、いわゆる摩擦試験によってその値を知る手段がある。ただ、この摩擦測定試験によってわれわれが知ることができる摩擦係数について、われわれはどの程度の信頼度をおくことが

できるかを理解し、また、この摩擦係数についての表現をどのように簡略化してプレストレスングの管理の手段に導入するかを検討してみる必要があるであろう。

(1) ジャッキおよび定着具の内部摩擦係数

PCケーブルの端部において、PC鋼材が定着具内において曲げられるため定着具とPC鋼材の間にシース内におけるとは別の摩擦を生じ、ごく短い区間においてPC鋼材に与えられる引張力が低下する。

ジャッキおよび定着具内における摩擦損失が、計算において仮定したものと異なると荷重計のキャリブレーションをいかに入念に行なっても意味がないことになってしまう。

フレシネー方式の実橋において行なった従来の測定例を示すと表-15のよ

表-15 ジャッキおよび定着具の内部摩擦損失測定値

橋梁名	摩擦損失係数 τ
須川	0.034
須川	0.028
須川	0.033
須川	0.030
須川	0.038
須川	0.040
須川	0.062
須川	0.054
須川	0.044
須川	0.044
須川	0.057
須川	0.045
平均	$\bar{x}=0.043 \sigma=0.0104$

うな値になっている。また、実験室内において定着具およびPC鋼材の表面の状態をいちじるしく変えて、この内部摩擦係数を測定した結果は表-16に示すとおりである。これらの結果によると、定着具およびPC鋼材のさびの状態によって摩擦係数は影響されることがわかるが、一般の現場においてはさびの全然ないものを使用することは少ないので、実橋における測定の結果のばらつきは比較的小さい値を示しており標準偏差で1%程度である。

表-16 PC鋼材および定着具のさびの状態による内部摩擦損失係数の差

定着具の状態	PC鋼材の表面の状態	摩擦損失係数 τ
さびなし	さびなし	0.020
さびあり	さびあり	0.053

(2) PC鋼材とシースとの接触摩擦係数

PC鋼材とシースとの接触摩擦係数は、一般にPCケーブルの単位曲げ角度あたりの摩擦損失係数 μ と PCケーブルの単位長さあたりの摩擦損失係数 λ に分けて計算されており、これが実際のケーブル内の応力分布と一般的によく一致するものであることは、参考文献^{(4),(19)}による実験結果に示されている。

実橋の施工の際に測定されたPC鋼材とシースとの接触摩擦係数は表-17に示すとおりである。表-17に示す値は各現場において何本かのケーブルについて摩擦測定試験を行ない、その結果から最小自乗法によって μ および λ (この場合便宜上 λ/μ の値で示す) を計算した値である。

これらの現場において求めた μ および λ/μ の値は、それぞれ異なった本数のPCケーブルの摩擦試験から求めた値であるので、それぞれの値の重みは同一ではないが便宜上同一の重みとして平均値および標準偏差を計算した結果、 μ の平均値 0.385、標準偏差の推定値 0.08、 λ/μ の平均値 0.0157、標準偏差の推定値 0.0081 となる。

表-17 PC鋼材とシースの間の接触摩擦係数の実測値

橋梁名	μ	λ/μ
須川	0.5	0.0048
須川	0.3	0.0247
須川	0.33	0.0333
須川	0.46	0.0117
須川	0.38	0.0068
須川	0.54	0.0143
須川	0.46	0.0096
須川	0.40	0.0050
須川	0.26	0.0216
須川	0.28	0.0196
須川	0.43	0.0088
須川(前半)	0.35	0.0209
須川(後半)	0.42	0.0144
須川	0.36	0.0194
須川	0.31	0.0207
平均	0.385	0.0157
標準偏差	0.08	0.0081

プレストレスングの作業のための緊張計算を行なう場合、また、プレストレスングの管理の手順を簡単にしようとする場合、摩擦損失についての三つの変数をできるだけ簡単な形にして処理するようなことを考える必要がある。

このためには、三つの摩擦損失係数のうちの係数が緊張力の誤差にもっとも大きな影響を与え、しかも大きなばらつきの原因になるかを知り、そのうえで簡略化の方法を決め、簡略化された方法によっても実用上の害のないことを確かめなければならない。

三つの係数が緊張力の低下におよぼす影響の程度はケーブルの配置形状、長さによって異なるはずである。われわれが通常製作する部材は曲げ上げ角度が 0.1~0.5 ラジアン、ケーブル長さは 10~40m を考えておけば橋桁用のPC部材としては十分な範囲であり、他の部材においても大体この範囲におさえられている。これらの範囲で、表-15 および表-17 に求めた摩擦損失係数が、緊張力の低下におよぼす影響の大きさを計算してみるとジャッキおよび定着具の摩擦損失 τ の大きさおよびばらつきは、PCケーブルとシースの接触摩擦損失 (μ および λ の影響によるもの) のそれらにくらべて一般に小さく、また、絶対値としてもプレストレスングのばらつきに大きな影響を与えるほどのものではない。したがってフレシネー方式の定着具の場合には、ジャッキおよび定着具の摩擦損失試験を行なうことを推奨するが一般的には5%の損失を考えて緊張計算を行なえばよいであろう。その他の工法についても、ほぼ同程度あるいはそれ以下と考えられるので、特定の定着方式についてのジャッキおよび定着具の摩擦損失の大きさをあらかじめ試験によって求めておけば一般的にこれを使用して緊張計算を行ない、これによるばらつきを多くのばらつきの要

素の一つと考えることによって処理しても十分目的を達することができる。

PCケーブルとシースの間の接触摩擦損失は一般的に10%以上の値にもなり、条件の悪い場合（ケーブルが長く、曲げ上げ角度が大きい場合）には20%以上にもなることが考えられるので、摩擦損失の値については慎重に取り扱う必要がある。PC鋼材の伸びによって引張力を推定する場合に見かけのヤング係数が直接的な影響を与えるように荷重計の読みによって引張力を推定する場合には、PCケーブルとシースの間の摩擦損失が直接的な影響を与える。しかも、見かけのヤング係数が5%程度の標準偏差で影響を与えるのにくらべて摩擦損失は、現場の条件が変わってくると10%程度にも達する標準偏差で影響を与える。

このようにプレストレッシングにとって重要な要素であるが、摩擦測定試験からわれわれが直接求められる値は $\mu\alpha + \lambda l$ であって、 μ および λ のおのおの値については知ることができない。このため、何本かのPCケ

ーブルで摩擦試験を行ない、最小自乗法によって μ および λ を推定するしか方法がない。そこで、このようにして求めた μ および λ を使用して計算したPCケーブルの応力分布と実際に緊張したときのPCケーブルの応力分布とがどの程度一致するものか、実際のPCケーブルにおいて中間の応力を測定して検討してみた。

桁はスパン 19m, KS-18 の標準PC桁の2本のPCケーブルについて実験を行なった。試験を行なったPCケーブルは途中曲げ上げされた No. 3 ケーブルと端部定着された No. 5 ケーブルである。

PC鋼材のひずみ測定はスパン中央および曲げ上げ途中2カ所にコンクリートに窓を明け、PCケーブルを露出させ、PC鋼材にワイヤ ストレインゲージをはりつけて測定した。PCケーブルの配置形状およびひずみ測定位置は 図-16 に示すとおりである。

緊張時に測点において測定されたPC鋼線の応力と計算の際に求めた応力を 図-17, 18 に示してある。また摩擦による応力減少についての実測値と計算値についての差を 表-18 に示してある。

この結果によると計算において仮定したスパン中央における引張応力と実際に与えられた引張応力の差については、図-17, 18 ならびに 表-18 に示すように 2~5% 程度であり、われわれが通常予期しなければならない程度の誤差である。

表-18 に示す摩擦試験の結果を用いて計算した応力比は試験を行なった桁の前に製作した桁において全 11 ケーブルについて摩擦試験を行ない最小自乗法によって、摩擦係数 μ, λ を求め応力減少を計算したものである。

図-16 緊張試験 PC ケーブル配置図

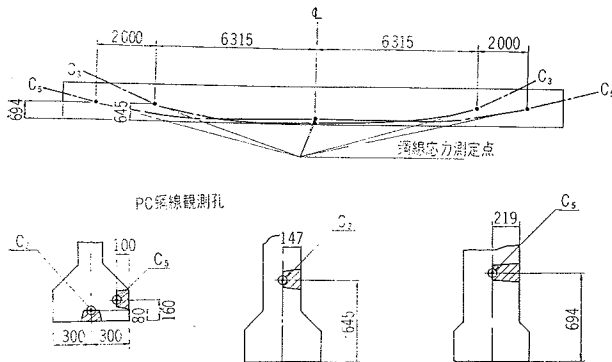
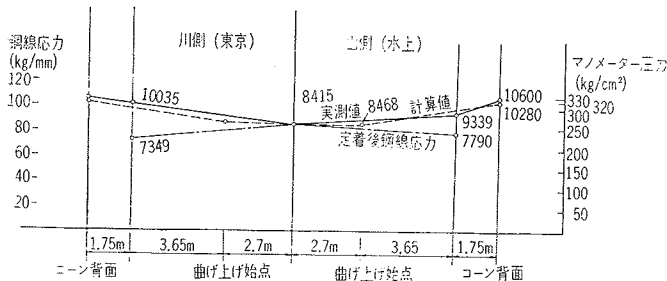
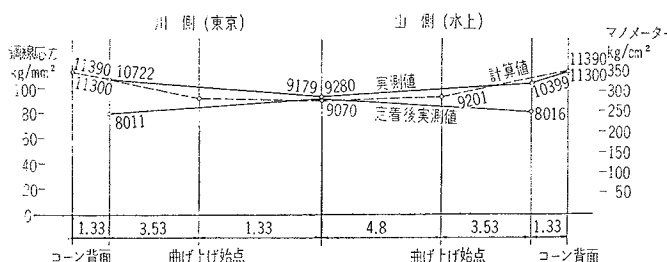


図-17 No. 3 ケーブル本緊張鋼線応力 ($E=205 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)



計算応力	320 kg/cm ²
計算伸び	77 mm ($E_p=205 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)
実測応力	330 kg/cm ²
実測伸び	79 mm
スパン中央所要緊張力	81.9 kg/mm ²
緊張時スパン中央計算応力	84.0
めり込み	5.5 + 3.5 mm

図-18 No. 5 ケーブル本緊張鋼線応力 ($E=205 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)



計算応力	353 kg/cm ²
計算伸び	96.5 mm
実測応力	350 kg/cm ²
スパン中央所要緊張力	89.4 kg/mm ²
緊張時中央計算緊張力	90.7 kg/mm ²
めり込み	4.5 + 4.5 mm

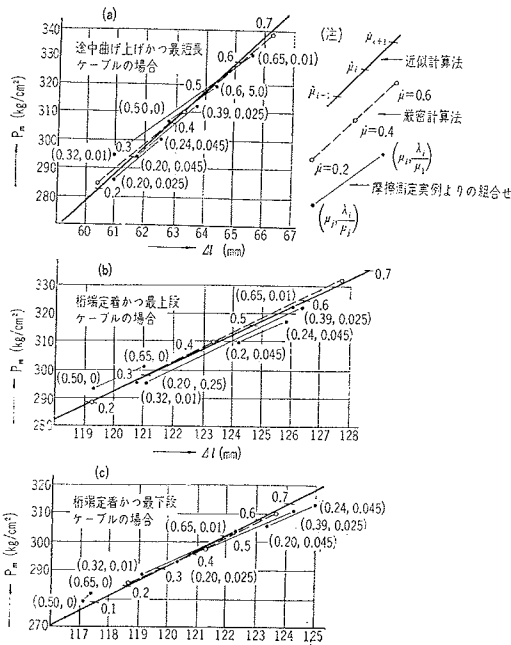
表-18 摩擦による応力減少

	緊張端鋼線応力 (kg/mm ²)	スパン中央鋼線応力 (kg/mm ²)	応力比 (a)	摩擦試験の結果を用いて計算した応力比 (b)	b/a
No. 5 ケーブル予備緊張	113.00	93.8	1.21	1.28	1.06
No. 5 ケーブル本緊張	113.00	92.6	1.22	1.28	1.05
No. 3 ケーブル予備緊張	106.00	85.2	1.25	1.22	0.98
No. 3 ケーブル本緊張	106.00	83.1	1.28	1.22	0.96

(b) では $\mu=0.45$ $\lambda=0.003$ を得た

本実験において、応力測定を行なった場所はスパン中央のほか曲げ上げ途中2点であったが、曲げ上げ途中の点での応力はその点での計算による応力と必ずしも一致していない。 μ および λ が伸びおよび荷重計の読みにどのような影響を与えるかについては、学会論文集 76 号所載の小丸川橋梁における研究で論じてあるが、同一形状ケーブルにおいて荷重計の読みに対しては $(\mu\alpha + \lambda)$ という値で関係してくるので、仮りに $\lambda/\mu = \text{一定}$ として、変数を μ だけの関数と考えてもさしつかえない。一方、伸びの値は $\mu\alpha + \lambda$ が一定の場合でも μ と λ の組み合わせが異なることによって影響される。ただ、われわれが μ と λ と称している値は、最小自乗法によって推定した値であり、個々の PC ケーブルにおける μ あるいは λ ではないのである。そして上に述べた実験結果にもあらわれているように個々の PC ケーブルにおいては、計算から出された μ と λ の個々の値は必ずしも実際の μ, λ の値をあらわしていない。このように μ および λ が仮定の値であり、個々の PC ケーブルではこの仮定の値と異なった値を示すのであるから、むしろ λ/μ を一定と考えてしまうほうが管理を簡単化するうえ

図-19 μ と λ の組み合わせの変化がケーブルの伸びと端部引張力の関係に与える影響



から有利ではないかと考えられる。

λ/μ を一定と考えて緊張計算を行ってもよいかどうかは、このためにあらわれる誤差の大小によって決まるものである。スパン 25m の代表的な鉄道橋用の PC 桁について、 $\lambda/\mu = \text{一定}$ とすることの影響を試みた。なお、このとき緊張

計算に応力分布を一次式で考えた普通近似式と応力分布の変化を指数関数と考えた厳密式を用いた場合との比較も一緒に試みた。その結果は 図-19 に示してあるが、この図から判断するのに、表-17 に示す λ/μ の変動の範囲であれば実用上は $\lambda/\mu = \text{一定}$ (この場合、学会 PC 指針の $\mu=0.3, \lambda=0.004$ より $\lambda/\mu=0.0133$ とした) と考えても、PC 鋼材の伸びと端部引張力との関係に大きな影響は与えず、十分実用上の目的を達するものと考えられる。また、緊張計算として近似式を用いても十分実用的であることも了解することができる。

本章においては、各種の摩擦係数がプレストレッシングの誤差におよぼす影響について検討してみた。この結果、シースと PC ケーブルとの間の摩擦係数がプレストレッシングにおよぼす影響は非常に大きいのであるが、複雑な摩擦損失の表現方法を μ だけの関数であらわしても、実用上十分であることを確認することができたのである。

7. プレストレッシングの管理における統計量の選択に関する検討

(1) 統計量に関する理論的考察

小丸川橋梁工事におけるプレストレッシングの誤差の研究に際して、プレストレッシングの管理を行なう場合に、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差を統計量として選定するのがよいことを提案した。そして、この考え方はこれまでの現場において実用され、実用上大きな欠点のないことが示されている。しかし、6. までに述べたように、各種の問題点が明らかにされたので、再び管理方法、特に統計量についての理論的、実用的な検討を行ない、より合理的で、しかも実用上、簡単に使用できる統計量について検討を行なってみることにする。

これまでの研究によってプレストレッシングの際、荷重計による測定方法には摩擦係数が直接に関係し、摩擦係数のばらつき、あるいは見積り誤差が荷重計から引張力を決める場合に、もっとも支配的な影響を与えることが明らかになっている。一方、伸び測定から引張力を決める場合にも、各種のばらつきの要素が介入してくるが、これらを総合して、PC 鋼材の見かけのヤング係数という概念にまとめることができ、この見かけのヤング係数が PC 鋼材のヤング係数より低い値となることが明

らかになっている。

そこで、プレストレスングに介入してくるばらつき、または誤差を摩擦係数と見かけのヤング係数という二つの要素にしぼって考えてみると統計的な管理に対する概念をかなり簡化することができる。

ある1本のPCケーブルを緊張する場合、われわれはPC鋼材端部の緊張力を荷重計によって知り、PCケーブルの平均的な引張力をPC鋼材の伸びから知ることができる。そして、この二つの測度から設計断面において所定の引張力を与える点はどこにあるかを知らうとする。すなわち、図-20において横軸に伸び、縦軸に端部緊張力をとった場合、所定の引張力を与える計算上の点がA点であるとす。しかし、種々のばらつき、あるいは誤差が介入してくるため、実際の緊張にあたって計算上の引張力を得る点がA点に一致することはなく、A点付近に平面的にばらついた点となる。さて、この平面的なばらつきを表現するのに、先に述べた摩擦係数と見かけのヤング係数という二つの値を求めると非常に便利である。なぜならば、今、設計断面における所定の緊張力、ジャッキのピストンの断面積、PCケーブルの曲げ角度、PCケーブルの長さの要素を定数とすれば、緊張計算より所定のジャッキ圧 P_m 、所定の伸び量 Δl はつぎの関数型であらわされる。

$$P_m = f(\mu, \lambda, r)$$

$$\Delta l = g(\mu, \lambda, r, \dot{E}_p)$$

ここに、 μ, λ : シースとPC鋼材との摩擦係数でケーブル単位曲げ上げ角度による係数 μ 、ケーブルの波打ちによる単位長さによる係数 λ

r : ジャッキおよび定着具の内部摩擦係数

\dot{E}_p : PC鋼材の見かけのヤング係数

つぎに、上の式における変数 $\mu, \lambda, r, \dot{E}_p$ などのうち

表-19 $r, \mu, \lambda, \dot{E}_p$ の $P_m, \Delta l$ の関係におよぼす影響

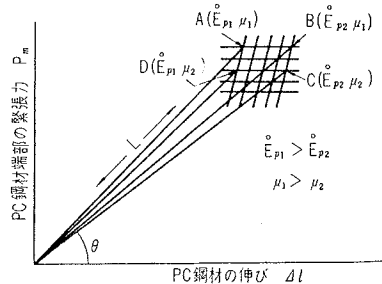
変動する要素	μ, λ	r	\dot{E}_p
P_m に対する影響	敏感	敏感	無関係
Δl に対する影響	鈍感	無関係	敏感

参考図			
-----	--	--	--

一つが変動する場合、それが P_m と Δl の関係を示す図上において、どのようにあらわれるかを計算してみると表-19 のようになる。

このように摩擦に係する要素は伸び Δl の値に影響する仕方が非常に鈍く、 \dot{E}_p は端部緊張力 P_m に全然関係をおよぼさない。したがって、図-20 における所定の緊張力を示す点を図-21 のように摩擦係数 μ (この場合、4. において論じたように摩擦係数を μ だけの関

図-21 μ, \dot{E}_p による $P_m, \Delta l$ の関係のばらつき表現



数であらわす) と見かけのヤング係数 \dot{E}_p による網目上の一点としてあらわすことができる。すなわち、設計断面においてある一定の緊張力を与えようとする場合、摩擦損失係数 μ と見かけのヤング係数 \dot{E}_p が変化すると、その組合わせによって A, B, C, D, ... という点であらわすことができる。

ここで、プレストレスングの管理の本質にもう一度立ち帰ってみることにしよう。設計断面に与えられる緊張力を管理して行くためには、つぎの二つの条件が満足されなければならないのである。すなわち、

(1) 外的条件、例えば、摩擦係数、見かけのヤング係数、荷重計のキャリブレーションなどが統計的に管理された状態にあること。

(2) 外的条件が管理されたとすで所定の緊張力が与えられる引き止め点を決めること。

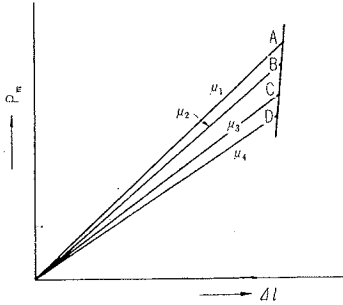
小丸川橋の工事の際の研究の結果として、提案された管理方法は (1) の外的条件を管理して行く方法であり、(2) については、特に、統計的に管理して行くところまで行ってない。

統計的管理の理想的な形態としては、(1) と (2) の問題を同時に管理して行く方法である。図-21 の μ と \dot{E}_p の二つの変数について統計的な管理を行なうことができるならば、これは (1) と (2) を同時に管理して行くことができるのであるが、このような2変数の統計的な管理を簡単な方法で実用化することは不可能であり、やはり統計的管理の統計量は1変数とすべきである。このためには 図-21 に示す網目による2変数の条件を1変数に簡略化することを考えなければならない。すなわち、一つの変数を定数におきかえなければならない。

図-21 における \dot{E}_p を定数とおくと、つぎのような

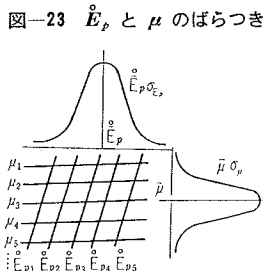
図-22 によってあらわすことができる。

図-22 \hat{E}_p を一定とした場合の $P_m, \Delta l$ の関係のばらつき表現



すなわち、 \hat{E}_p を適当な値に仮定すれば、摩擦係数が $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$ と変化するにしたがって PC ケーブルの引き止め点をおのおの A, B, C, D, ... 点に選ぶことができるのである。この考えを実用する場合には、ある仮定した \hat{E}_p について、摩擦係数が $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \dots$ の各場合について緊張計算を行なっており、実際に PC ケーブルを緊張する場合に P_m と Δl の関係をプロットして行き、この伸び—圧力直線が A, B, C, D, ... 線と交わった点を引き止め点とすればよいわけである。ただこの場合、 \hat{E}_p の選び方に問題が残る。というのは選ばれた \hat{E}_p と実際の PC ケーブルの見かけのヤング係数が一致している場合には、このような引き止め点の選び方でよく、また、伸び—圧力直線の軌跡の μ がそのケーブルの実際の摩擦係数を示すことになるのであるが、選ばれた \hat{E}_p と実際の PC ケーブルの見かけのヤング係数が一致していない場合には、このように選ばれた引き止め点では正確な引張力が与えられないし、また、伸び—圧力直線の軌跡の μ が、そのケーブルの摩擦係数をあらわさなくなる。これはあくまで手順を簡略したために生ずる誤差である。したがって、このような方法によっても十分満足な引き止め点を求めることはできない。しかし、PC 部材として引張力が所定の値より多少多目に与えられているほうが安全である。そして、引き止め点を決める場合、引張力が不足する可能性を少なくしようという目的であれば、その解決方法は比較的簡単である。

図-23 において、見かけのヤング係数の平均値 \hat{E}_p 、標準偏差 σE_p が既知であるとすると引き止め点を決める \hat{E}_p を決める場合、 $\hat{E}_p = \bar{E}_p - n \sigma E_p$ とし n を適当に選ぶことによって、その引き止め点で止めた場合、引張力が設計で考えた値より小さくなる確率をある値以下にすることができる。

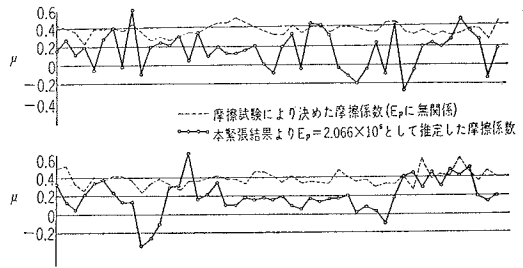


小丸川橋梁における研

究において提案した方法によると $\hat{E}_p, \bar{\mu}$ という計算上の一つの点を基準として考えているわけであるが、このようにすることによって、 \hat{E}_p のばらつきを考えた引き止め点を決めることができる。4. において論じたように同じ現場における $\sigma E_p / \hat{E}_p$ は 5% 程度の値であるのでこの程度の超過引張力であれば PC 鋼材の許容引張力に対して、あまり問題になることはない。

このように引き止め点を決めるための \hat{E}_p が決まれば、あとは緊張時の圧力—伸び直線の軌跡が示す μ の値を統計量として管理して行くことができる。ここで再び注意しなければならないことは、このようにして決められた μ の値は理論上の摩擦係数ではあるが、求められた μ の値には見かけのヤング係数がばらつくことによる影響がふくまれるため、もはや実際上の摩擦係数を示す値ではなくなっている。したがって、この値を μ° であらわすことにする。図-24 はこれを示す一例である。

図-24 摩擦試験から求めた μ と緊張時の軌跡から求めた μ° の関係



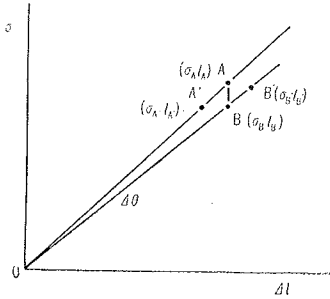
あるケーブルについて摩擦試験から求めた摩擦係数 μ とそのケーブルを緊張したときの圧力—伸び直線の軌跡から求められた μ° との関係をプロットしたものであるが、この両者はまったく相関がなくなっている。これは \hat{E}_p のばらつきの影響の仕方が各ケーブルによって異なり、この影響が大きく、両者の間の相関がまったく失なわれてしまったものである。したがって、統計量として μ° を採用した場合、個々のケーブルについては実際の摩擦係数とはほとんど関係がないことを十分に心得ておく必要がある。

(2) 統計量に関する実用上の検討

a) 計算上の比較 2. において統計量として取り上げた伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差 (これを計算上の値に対する % であらわす) δ と前節において提案した統計量 μ° との間には、どのような関係があるかを知っておくことが必要であろう。

図-22 から明らかなように μ° は圧力—伸び直線の軌跡と Δl 軸または P_m 軸との角度を表現をかえてあらわした値である。一方、 δ の値については 図-25 において O-A を緊張計算において求めた圧力—伸び直線とし、O-B が実際の緊張において得られた圧力—伸び直線とすると、つぎのような関係がある。

図-25 $\sigma, \Delta l$ と δ との関係



A' 点と A 点については,

$$\delta_{A'} = \frac{l_{A'} - l_A}{l_A} \cdot \frac{\sigma_{A'} - \sigma_A}{\sigma_A} = \frac{l_{A'}}{l_A} \cdot \frac{\sigma_{A'}}{\sigma_A} = 0$$

B 点と A 点については,

$$\delta_B = \frac{l_B}{l_A} - \frac{\sigma_B}{\sigma_A} = 1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \quad (\because l_A = l_B)$$

B' 点と A 点については,

$$\delta_{B'} = \frac{l_{B'}}{l_A} - \frac{\sigma_{B'}}{\sigma_A} = \frac{l_{B'}}{l_B} \left(\frac{l_B}{l_A} - \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \right)$$

$\frac{l_{B'}}{l_B}$ は実用上 1 と考えることができるので

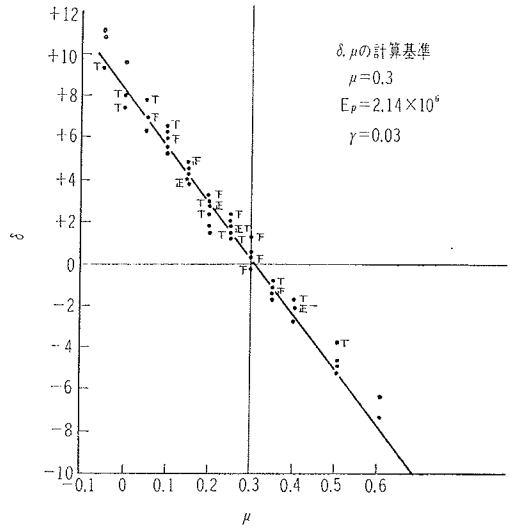
$$\delta_{B'} \doteq \left(\frac{l_B}{l_A} - \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \right) = 1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_A}$$

すなわち、OA 直線と OB 直線の開きをあらわす値であるといえることができる。

このように理論的には統計量 μ° と δ は、いずれも圧力-伸び直線の勾配と近似的に一次の関係をあらわす数値であり、互いの間にも近似的に一次の直線関係がなり立たなければならないはずである。

果たして、実際上二つの統計量の間にも直線的な関係が成立するか否かを調べるために、井出川橋の場合について各ケーブルの δ および μ° の値の相関を求めてみると図-26 のように明瞭な直線の相関が得られる。

図-26 井出川 No. 1~No. 14 桁の δ と μ° の関係

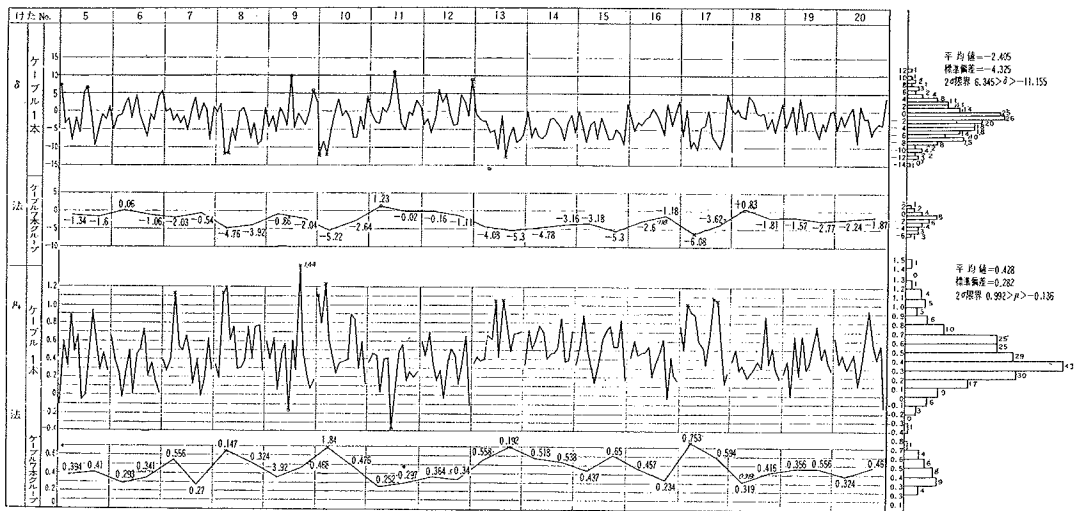


このことはプレストレスの管理の統計量として δ を採用しても、 μ° を採用しても同等に管理が行なえるであろうことを示すものである。

b) 管理図の上における比較 a) において論じたように二つの統計量 δ および μ° は、理論的にも、また実用上にも一次の関係があることが明らかになった。したがって、いずれの統計量によってプレストレスの管理を行なっても同様の結果が得られるであろうことを想像することができる。しかし、図-26~36 でもわかるように両者の間に直線の関係があっても、おのおのの点が完全に直線上にあるのではなく、ある程度のばらつきを有している。したがって、統計的管理という点からの実用性を確認するには同一の現場において行なった二つの管理方法の管理図を比較してみなければならない。

図-27 は森戸川橋において行なった二つの管理方法に

図-27 δ 法と μ° 法による管理図の比較



よる管理図である。図において、おのおのの資料から母集団の平均値と標準偏差を推定し 2σ をはずれるものを○印または×印で記してある。○印および×印は、どちらの側に 2σ をはずれたかを示すものであり、 δ 法における大きい値は μ 法における小さい値に対応することを注意しておく必要がある。

これによると個々のケーブルについては、 2σ をはずれるものが一致していないものもあるが、傾向としてはほぼ一致しているといえるであろう。また、ケーブル7本を1グループにしたデータについてみると両者一致しているものは1カ所だけであるが、片方が 2σ をはずれているものは、他もほとんど 2σ の限界いっぱいになっており、たまたまある値で線を引いたため管理限界をはずれるものが一致していないが、実用上の問題としては両者いずれによっても管理図の判定に大きな狂いを生ずることはないといえるであろう。

δ 法によった場合、伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の間に標準偏差にして5%のばらつきがあると考えており、この値が一般的に実用してさし支えない値であることが確かめられている。 μ 法によった場合、 μ の値の標準偏差は一般的にいくら考えればよいかという問題がおこってくる。いくつかの現場において求めた μ の標準偏差の推定値は表-20のようになる。これによると森戸川のように標準偏差の推定値が、0.282 という大きな値を示す例もあるが、一般的には μ の標準偏差は 0.2 と考えてさし支えないであろう。

8. 結 論

所要の強度、耐久性、その他所要の性質を有するPC部材を作るためにはコンクリートおよびPC鋼材の品質の管理を行わなければならないことはもちろんであるが、これだけでは不十分であり、プレストレッシングの管理を行なってはじめて所要の性質のPC部材を作ることができるのである。

本研究はプレストレッシングの実用的な管理方法を明らかにするために行なったものである。すなわち、PC鉄道橋およそ20の工事現場について調査を行ない、調査資料を整理した結果から得られた管理方法について論じたものである。一般にプレストレッシングの誤差はコンクリートおよびPC鋼材の品質、測定器具の特性、および施工条件その他によって相違し、非常に複雑なものであり推計学的な考え方で取り扱うことはできな

い。したがって、プレストレッシングの管理方法については理論的な考慮のほか多くの工事現場における経験をも考慮することが必要となるのは当然である。

本研究における調査研究の範囲では、つぎのことがいえると考えられる。

(1) プレストレッシングの誤差の影響はPC部材の大きさ、その他によって異なるが、プレストレッシングの誤差が数%にすぎなくても一般にPC部材の安全性に無視し得ない影響を与えることが示された。例えば、荷重計に5%の狂いがあり、PC鋼材とシースの間の摩擦係数が設計で考えたより5割多く、PC鋼材のヤング係数が設計で考えた値と5%違っていた場合、これらを考慮しないでプレストレッシングを行なったとすると設計荷重が載荷された場合、10%程度のプレストレスの不足となり、これによって、コンクリートには15~25 kg/cm²の予期しない引張応力を生じPC部材の安全度は低下する。

荷重計、PC鋼材とシースの間の摩擦係数、PC鋼材のヤング係数などの誤差がおよぼす悪影響はPC部材のスパンが長くなり、自重の占める割合が大きくなるほどいちじるしくなるのであるから、長大スパンのPC橋梁においては特に、誤差の影響を少なくするよう考慮することが大切である。

(2) 実際のプレストレッシングの作業においてPC鋼材に与えるべき引張力は、荷重計の読みとPC鋼材の伸びの測定値とから定めている。しかし、一般に荷重計の読みと伸びの測定値との間には緊張計算において求めたこれらの関係と相当に異なった関係を生じる場合が少なくない。例えば、荷重計に狂いがなくPC鋼材とシースの間の摩擦係数、PC鋼材のヤング係数などにほとんど誤差が認められないのに荷重計の読みと伸びの測定値との間に10%程度の差を生じることは珍しくないものであって、20%以上の差を生じることすらある。二つの測定値の間にこのように大きな差を生じる原因その他について調査した結果、橋梁において広く使用されるPCケーブルにおいては二つの測定値の間に標準偏差にして5%程度のばらつきを生じ、しかも、この値は管理状態の良好な工事現場においても同程度であることが明らかにされた。このようなばらつきがあるため、個々のPCケーブルについて、いかに入念なプレストレッシングの管理を行なってもPC部材としては不十分なプレストレッシングの管理しか行なうことができない。偶然誤差による影響を少なくし、人為的な誤差をただちに発見して早期に必要な処置をとるためにはPCケーブルを組に分け、各組の平均値にもとづいて管理するのが適当な方法であることが明らかにされた。しかし、組に分けて行なう管理の効果をいっそう有効にするためには各組におけるばらつきが同一の母集団となるように考慮する必要が

表-20 μ の値の標準偏差の推定値

橋 梁 名	資料数	標準偏差の推定値
小丸川 (前半)	96	0.192
小丸川 (後半)	96	0.143
井 出 川	100	0.144
森 戸 川	224	0.282
根 岸 線	576	0.175

ある。すなわち、配置形状の異なるPCケーブルが各組に均等に分けられるように組分けすることが必要である(土木学会論文集第76号)。

(3) 従来、PC鋼材の伸びの計算にはPC鋼材の引張試験の際の応力-ひずみ曲線から求められたヤング係数を用いるべきであるとされてきた。そして、これによって実用上、十分正確な値が得られるものと考えられてきた。しかし、多くの工事現場において調査した結果、シース内に配置されたPCケーブルの伸び量から逆算したヤング係数は引張試験の結果から求められたヤング係数より、一般に小さな値となることが示された。例えば、引張試験から求めたヤング係数が $2.05 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度であるのにこのPC鋼材を実際に緊張してみると $1.95 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度の値となり、個々のケーブルについては $1.80 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 以下の値になることもあった。この原因としては、PCケーブルの曲がりによる縁ひずみが付加されること、応力-ひずみ曲線の比例限界を越える引張応力を与えること、PC部材の弾性縮みを考慮しないでPC鋼材の抜け出し量を伸び量とすることなどが考えられる。しかし、これらの原因だけでは前記のようないちじるしい差を生ずることは説明できないのである。工事現場における諸調査を検討した結果、センタースパイラルの弾性変形、センタースパイラルの外周にそってPC鋼材が移動することなどによって、プレストレスの作業中にPCケーブルが鉛直に移動し、PCケーブルの端部において、伸びの増加となってあらわれることが大きな原因になり得ることが示された。したがって、PCケーブルの伸びの計算にはPC鋼材の引張試験の際の応力-ひずみ曲線から求めたヤング係数のかわりに、実際のPCケーブルについてあらかじめ緊張試験を行ない、これから求められたPCケーブルの見かけのヤング係数を用いる必要があるのである。

(4) PC鋼材とシースの間の摩擦係数はPC鋼材の単位長さあたりの摩擦損失係数 λ とPC鋼材の単位角変化あたりの摩擦損失係数 μ に分けて考えることが広く行なわれている。1本のPCケーブルに二つの変数があるため、PCケーブルの摩擦係数を求める場合、何本かのPCケーブルについて摩擦試験を行ない、この結果から最小自乗法によって平均的な μ および λ の値を求めたのである。このようにすれば個々のPCケーブルの μ および λ を知ることはできないことになり、プレストレスの作業に不便な点があらわれてくる。調査の結果によると λ/μ の値は 0.005 から 0.03 の範囲で変動していたが、この変動がプレストレスの管理におよぼす影響は無視してもさし支えないことが示された。したがって、PC鋼材とシースの間の摩擦係数は μ のみの関数とし、 λ/μ の値を 0.015 程度の一定の値と考えるのが実用上便利であると思われる。

(5) プレストレスの管理を行なう場合、基準とする統計量の選定が重要な問題である。プレストレスの作業において、われわれが直接知りうる値はPC鋼材の伸び量とPC鋼材の端部の引張力を示す荷重計の読みの二つである。多くの現場における調査の結果から、伸びから推定される引張力と荷重計の読みから推定される引張力との差を統計量に選ぶことによって、実用的なプレストレスの管理が行なえることが示された。なお、さらに検討を続けた結果、プレストレスの際のPC鋼材とシースの間の見かけの摩擦係数を緊張図の上から求め、これを統計量として管理すれば管理を簡単化することができ、しかも、PCケーブルの引き止め点を合理的に決めることができる。しかも、管理の効果は伸びから推定される引張力と荷重計から推定される引張力の差を統計量に選ぶ場合と実用的には同様であることが示された。

これを要するにプレストレスの管理にあたっては、PC鋼材の見かけのヤング係数、PC鋼材とシースの間の摩擦係数を正確に把握することも大切であるが、PCケーブルを適当な組に分け、各組ごとに管理を行なうことがもっとも大切であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 川口・和仁・菅原・野口・羽田野：小丸川PC鉄道橋の架替え工事ならびに関連して行なった実験的研究報告，土木学会論文集第76号，1961年9月。
- 2) 野口 功：プレストレスの管理について，昭和36年土木学会夏期講習会，「最近におけるプレストレスコンクリート」。
- 3) 丸安隆和：コンクリートの品質管理，土木学会刊行，1956年11月。
- 4) 仁杉 巖：支間30mのプレストレスコンクリート鉄道橋（信楽線第一大戸川橋梁）の設計・施工およびこれに関連して行なった実験研究の報告，土木学会論文集第27号，1950年7月。
- 5) 齋藤 昇：プレストレス管理のための一考察，土木技術18巻1号，1963年1月，2月。
- 6) 4th Congress of F.I.P. Theme II Paper No. 9, Some problem in prestressed concrete construction in Japan.
- 7) 野口 功・齋藤 昇：プレストレスに関する一考察(ケーブルのグループ分けについての検討)，プレストレスコンクリート技術協会第3回年次学術講演会，1963年2月11日。
- 8) 野口 功：プレストレスの管理，プレストレスコンクリート，1963年2月。
- 9) 森口繁一：初等数理統計学。
- 10) 高 金地：統計的品質管理の基礎。
- 11) W.A. シュハート（坂本平八訳）：品質管理の基礎概念。
- 12) 西堀栄三郎・磯部邦夫：品質管理実施法。
- 13) Baretz, J. : Dispersion et controle des allongements dans les operations de précontrainte, Association Scientifique de la Précontrainte, 1^{er} session d'étude novembre 1956.
- 14) Dumas, F. : Résistance et sécurité du béton précontraint, Travaux, novembre, décembre 1958. janvier, février, mai, novembre, décembre 1959. janvier, mars, octobre, 1960 1961.

- 15) Rös, R. : Steel wire for prestressed concrete considered from the point of view of the designer, Rapport Final Symposium de la R.I.L.E.M. juillet, 1958.
 - 16) ACI-ASCE Joint Commitee, Tentative recommendations for prestressed concrete, 1957.
 - 17) S.N.C.F. : Cahier des charges specials ouvrage en béton précontraint, 4 mars, 1959.
 - 19) Cooley, E.H. : Friction in post-tensioned prestressing systems, Cement and Concrete Association Research Report 1, 1953, october.
 - 20) Ministère des Travaux Publics : Instructions relatives à l'emploi du béton précontraint, 1953.
- (原稿受付 : 1963.6.25)

昭和38年度土木学会論文集編集委員

委員長	奥村敏恵 安芸周 一 赤井浩 一 伊藤 学 池田 治 池守昌 幸 大沼 徹 岡内 功 岡田 宏 神山光 男 栗林 栄 一	副委員長	吉川秀夫 小池重郎 小寺圭司 後藤正雄 佐武昭二 杉木昭典 鈴木雄太 多田恒彦 建部 彦 野 治	委員	土肥正彦 中川博次 中瀬明男 伯野元彦 林正夫 久武啓祐 藤田嘉夫 堀井健一郎 西尾元充 増田重臣	委員	三木五三郎 村上良丸 村田二郎 八木功孟 山根寛治 箭内徳也 山崎徳也 吉田 巖	幹事	西脇 威 夫
-----	--	------	---	----	--	----	---	----	--------

昭和39年2月15日印刷
昭和39年2月20日発行

土木学会論文集 第102号 定価 150円(〒20円)

編集兼発行者 東京都新宿区四谷一丁目 社団法人 土木学会 羽田 巖
印刷者 東京都港区赤坂溜池5 株式会社 技報堂 大沼正吉

発 行 所 社 団 法 人 土 木 学 会 振替東京 16828 番
東京都新宿郵便局区内 新宿区四谷一丁目 電話(351)代表 5138 番