

プレストレスングの管理 (1)

野 口 功*

1. ま え が き

ある製品を現場なり工場なりで製作する場合、われわれはその製品が規格で決められた数値に合格すること、あるいは規格で決められた許容差におさまることを期待する。そしてわれわれの期待に応えるために、製品の検査ということが行なわれる。

規格に合格しているかどうかを調べるもっとも単純で確実な手段は、製品の全部について試験を行なうことである。しかし、このような手段が常に取れるとは限らない。むしろ取れない場合の方が多いであろう。

例えばPC桁を製作して、これが設計において期待している耐荷力を有しているかどうかを試験することは理論的には不可能ではないにしても、何10トンもあるPC桁にひびわれが出るまでの試験荷重をかけて検査するようなことは、非常に多額の費用を要するため、実用としては不可能である。またPC鋼材あるいは鉄筋の引張強度のように試験の結果こわれてしまうような性質を検査するものには全数の検査というものに、いかに費用をかけてもできない相談である。

このような場合には、しばしば抜取り検査が行なわれる。例えば比較的小さいプレキャストの部材のようなものでは、50本に1本とか、100本に1本とかの割合で製品を抜き取り、これについて試験を行なう。この方法は現実にもさかんに行なわれている方法である。しかし、50本に1本とか、100本に1本とかの割合で代表選手を選び出して、この代表選手が、規格に合格しているかいないかによって、全体を判断することは非常に大きな危険を含んでいる。もちろん、検査をしないことにくらべたら抜取り検査の効果ということは、十分大きく取り上げることができるのであるが……。

抜取り検査も製品の管理に確率的な考え方を導入したものであるということが出来るが、導入の仕方が非常にばく然としている。すなわち、100本について1本の割合で検査し、これが検査に合格した場合、検査をしない残りの99本が、何10%合格であるとか、不合格のもの

ほどの程度の状態で不合格なのかを推論することは全く不可能である。

これに対してさらに新しい考え方である統計的管理方法が生れてきて、大量生産の製品の管理に非常に大きな役割をはたしており、この結果、製品のコストの低下、信頼性の増加に大きく寄与している。そして現在では、ほとんど大部分の工場製品の品質管理に応用されているといっても過言でないであろう。

建設の分野においては、この統計的品質管理の導入は非常におくれているが、それでもコンクリートの品質管理にはこの手法が導入され、現場において実用されるようになってきている。

製品を作る場合に、一分の狂いもなく製造することは不可能であり、常に何らかのばらつきがともなうものである。しかし、ばらつきは不可避なものであるからといって、ばらつきを放置しておれば、信頼性のある製品をつくることはできない。

もちろん、ばらつきを生じさせる原因は、ほとんど無数であるといつてよいほどに多く、個々の原因についてその大きさを分析することは、まず不可能であろう。しかし、ばらつきについては次の2つに分けて考えることができる。

a) 偶然の原因によるばらつき：これは製造工程にはいつてくる数多くの小さなばらつきが組合わさったものである。

b) 故障によるばらつき：これは製造工程において、ある要素が規格の原因をはずれたとか、機械の故障によるとかの単独の原因によって一般に生ずるものである。

例えばコンクリートの製造工程において、同一場所から採取している骨材の性質が、バッチごとに変動するようなばらつきは a) の原因と考えられ、骨材の採取場所が変わって、性質の非常に異なった骨材を使用したため、コンクリートの強度が変わったような場合には、b) の原因であると考えられることができる。またプレストレスングにおいて、同一状態と考えられるようなシーストPC鋼線の間での摩擦係数の変動は a) の原因の一つと考えられ、ジャッキの荷重計の狂い等は b) の原因と考えられるものである。

統計的管理においては、常に a) の原因と b) の原因区別しなければならぬ。

われわれの目的とする統計的品質管理は a) はさけられないばらつきの原因として、このばらつきが安定した状態であらわれている間は製造が順調に行なわれているものと判断し、b) の原因によるばらつきが生じてきたならば、いち早くこれを検出し、もとの安定した状態にもどしてやる、ことにあるのである。

* 国鉄技師、構造物設計事務所

ただ a) についても全く傍観してばかりいるものではない。たとえば、コンクリートの品質管理において、構造物の設計で考えた圧縮強度と、コンクリートの配合設計においてねらう圧縮強度の間の余裕を小さくし、できるだけ経済的にコンクリートを製造しようとする場合、製造されるコンクリートの強度のばらつきを小さくしなければならぬ。そのためには、a) の原因によるばらつきが小さくなるように努力を行なうのである。骨材をあらかじめ何種類にもふるい分けて使用するの、骨材のばらつきを小さくし、その結果、コンクリートの圧縮強度のばらつきを小さくしようとするものである。

さて、これらのばらつきはどのような状態であらわれてくるかという、ばらつきが安定している状態においては図-1のAなる形のばらつきで、ばらつきの平均値 m_a 、ばらつきの広がり（標準偏差）は σ_a であらわされる。このような状態においては、製品の品質（例えばコンクリートの圧縮強度）が限界値 L を下まわる確率はほとんど0に近く、われわれは製品に対して十分な信頼をおくことができる。しかし、この安定したばらつきが、何らかの外的原因によって、安定がくづされた場合、限界値 L を下まわる製品が作られる可能性が大きくなり、その原因を除かない限り、われわれはもはや製品に対して十分な信頼を置くことができなくなる。

安定したばらつきがくづされる場合に、くづされ方について一般に2つの形が考えられる。その一つは、ばらつきの巾（標準偏差）が変わらないで平均値だけが変化する場合で、図-1のBのような曲線になる。例えば測定計器等が狂った場合にはこのような状態になる。他の一つは平均値が変わらないで、標準偏差が変わる場合で、図-1Cのようなばらつきの曲線になる。例えば、コンクリートの品質管理において、骨材の表面水の管理がずさんになったような場合にはこのような状態になる。したがって、われわれは管理しようとする製品の品質の平均値と、品質のばらつきの巾の両方を管理して、安定したばらつきの状態にあるかどうかを調べてゆかなければならないのである。そして管理の実際の手続きは管理図によって行なわれる（統計学的手法においてはさらに複雑な問題についても理論的な取扱いが行なわれているが、われわれが通常問題とする範囲は、この程度で十分であ

図-1

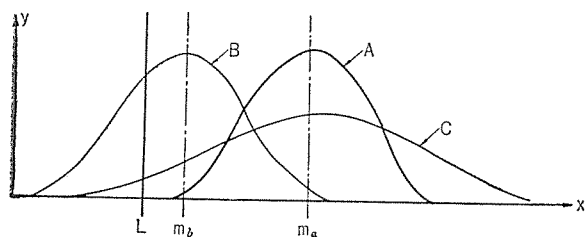
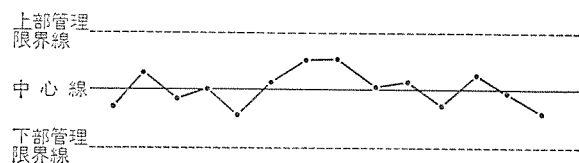


図-2



ろう)。

管理図には一般に中心線と、上下部管理限界線がひかれており、測定値をつぎつぎに打点していった場合、測定値が中心線のまわりに散らばっているときは、よい管理状態にあると判断することができ、測定値が上部あるいは下部の管理限界線の外に打点されると、工程が不調になったと判断するのである。管理限界線の値は、場合によって異なるが、普通 95% の信頼限界（管理図の判断が 95% の信頼度で判断される値で、平均値の管理に対しては、標準偏差の2倍の巾をとる）、99% あるいは 99.7%（標準偏差の3倍の巾）の信頼限界をとって引かれる。

2. プレストレスの管理の問題点

統計的品質管理のごく概略の考え方は前節に述べたとおりであるが、管理の対象によってその実施方法はかなり異なってくるものである。プレストレスの管理を行なうためには、どのような点に特長があり、どのような点について考慮しなければならないかを少しく考察して見ることにしよう。

(1) いかなる測定値を統計量に選ぶか

コンクリートの品質管理を行なうのには、コンクリートの圧縮強度が統計量として採用されている。

ではプレストレスの管理で、どのような測定値を統計量として採用するのがより便利で、効果が大きいかを考えてみよう。直接測定できる統計量としては、次のような測定値が考えられる。

- a) 設計断面におけるコンクリートのひずみ
- b) PC部材のそり上がり量
- c) PC部材の短縮量
- d) ジャッキの荷重計の読み
- e) PC鋼材ののび量

設計断面におけるコンクリートのひずみは部材に与えられたプレストレスを直接測ることになるので、統計量として採用するには、もっとも適している、ということができよう。しかし、b) c) も同様であるが、コンクリートのひずみを測定する場合には、コンクリートのヤング係数のばらつきがふくまれてくる。この場合、プレストレスのばらつきと、ヤング係数のばらつきの大きさが問題になってくる。非常に具合の悪いことに、コンクリートのヤング係数のばらつきは大きく、測定方法、測定時のコンクリートの材令、コンクリートの

乾湿の状態などによって、非常に大きな差を生じるものである。このため、プレストレスが、われわれの欲する範囲のばらつきで与えられているかどうかを調べる手段として、コンクリートのヤング係数が直接関係してくるような測定値は適当でないのである。

ジャッキの荷重計の読みは、P C部材端部におけるP C鋼材の引張力の直接測定値であるが、設計断面における引張力をあらかず測定値ではなく、P C鋼材とシースの間に摩擦がある場合には統計量として適当でない。

P C鋼材ののび量については、P C鋼材の全長にわたる平均的な応力を知るだけであり、これも設計断面におけるP C鋼材の引張力をあらかず測定値ではない。

このように、プレストレスの結果、設計断面にどれだけの引張力が与えられたかを、満足できる精度で直接知る手段はないということになるのである。

そこで少しく見方を変えて検討してみよう。

プレストレスの作業において問題になるのは次の2つの点である。

a) 荷重計の読み、およびP C鋼材ののび量がどこまで達したら緊張作業を止めてP C鋼材を定着するか。

b) 緊張作業にあたって、設計断面の緊張力を変動させる偶然原因が、安定した状態にあるか。

統計的な管理においては、b)の問題が大切であって、プレストレスの結果の信頼性を高めるためにも、安定した状態でプレストレスが行なわれているかどうかを問題にしなければならないのである。

適切な摩擦係数、P C鋼材のヤング係数を知ることができるならば、緊張計算によって、引き止めすべき荷重計の読み、およびP C鋼材ののび量を計算することができる。そして摩擦係数、P C鋼材のヤング係数等のばらつきの原因が、安定した状態のもとにおかれていれば、われわれはプレストレスが適切に行なわれていると判断することができるのである。ばらつきが安定しているかどうかを判断するには、荷重計の読みと、のび量の関係を見ればよい。なぜならば、プレストレスが完全に計算において仮定した状態のもとで行なわれていれば、計算で求めた荷重計の圧力までP C鋼材を緊張したとき、同時に計算で求めたのび量が得られるはずである。しかし、実際には種々のばらつきの原因によって、荷重計の計算圧力と、計算ののび量が同時には得られない。したがって、ばらつきの状態を知る尺度として、荷重計から推定される設計断面の引張力と、のびから推定される設計断面の引張力との差を考え、これを統計量として考えらるることができる。そしてこの統計量によって、われわれが安定した状態でプレストレスを行なっているかどうかの判断の基準とすることを期待する

ことができる。

(2) ばらつきはどんな原因によって生じるか

実際にプレストレスの作業を行なってみると、荷重計の圧力から推定される引張力と、のびの量から推定される引張力の間、かなりの差を生じることに気がつくであろう。プレストレスの管理を行なうにあたって、どのような原因によって、このようなばらつきが生じるかを知っておくことも必要である。ただし、前節にも述べたように、偶然の原因によるばらつきは、ほとんど無限の小さい原因が複雑に重なり合って生じるものなので、その全部をとりあげることはできないが、おもな原因を拾い上げてみるだけでも次のようなものが考えられる。

- a) P C鋼材の断面積のばらつき
- b) P C鋼材のヤング係数のばらつき
- c) 摩擦係数のばらつき
- d) P Cケーブル内におけるP C鋼材応力分布の変動
- e) P C鋼材ののび測定における測定誤差
- f) 荷重計の読取り誤差
- g) シース内におけるP Cケーブルのたるみの影響の仕方のばらつき

これらのばらつきの個々の大きさは標準偏差で1~2%の小さなものであるが、これらが組合わさると、標準偏差で3~5%程度のばらつきとなる。したがって、われわれはプレストレスにおいて、3~5%程度のばらつきは全く偶然で、制御できないものであると考えることができる。実際の現場において求めたばらつきの状態は、表-1に示すような値になっている。これによると、荷重計からの引張力の推定値と、のびからの引張力の推定値の差の標準偏差は、上述したと同程度の3~5%の値を示している。

緊張計算の仮定が適切であれば、の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全ケーブルについて平均した値はほとんど0になるはずであるが、実際にはある有限な値、しかも大部分は、のびからの推定値が大きくなる。いいかえれば、荷重計の読みが所定の値に達する前に、所定ののび量が止るような傾向がある。これは、緊張計算において考慮しなかった、応力一ひずみ曲線の曲線部分による見かけのヤング係数の低下を無視すること、P C鋼材のシー内における遊びを補正するため、のび測定の0点を多少緊張力をかけた状態においてとるが、完全に遊びを除去できないための影響、分散ケーブルの場合、個々のケーブルののび量を、鋼材の抜け出し長さで測るため、部材の弾性縮みに相当する量だけ、のびが大きく出てくること等によるため、これらの影響を考えれば、摩擦試験により摩擦係数を決定し、これによって緊張計算を行ない、ジャッキのキャリブレーションを正確に行なえば、平均的には、緊

表-1

現場名	ケーブル数	ケーブルの種類	の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
鷺の巣	70	ディビダーク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

* (+)符号はのびから推定される引張力が大きい場合、(-)はその逆を示す

張計算の結果ののびと、荷重計の圧力の関係と、実際におけるこれら2つの間の関係とはよく一致するということができる。したがって、よく管理された状態において、のびと荷重計の値とのくい違いの量を管理図にプロットしてゆけば、中心線(理想的には0線)のまわりにばらつくであろうことが推定される。そしてわれわれは、この中心線が安定しているかどうか、中心線のかなりのばらつきが大きさが安定しているかどうかを管理してゆけばよいのである。

(3) 必要な精度で故障原因を発見するには、どのようにしたらよいか

プレストレスングに必要な精度は、いくらであるかを、ずばりいうことはむずかしい。しかし、そうかといって無制限に放置しておいて、よい問題ではない。

現在実用している機械の精度をこえるような、あるいは実用している手段では行なえないような精度を要求することはできないので、もしこのようなことがあれば、設計において、プレストレスングの誤差を十分カバーできる程度の安全性の余裕をみておかなければならないことになる。

ただわれわれが、よく注意しなければならないことは、プレストレスングにおける誤差率は、PC部材の引張側に与えられるプレストレスに關係してくるものであって、引張側に生じている応力に關係するものではないということである。特にこの問題は、長スパンの橋のように自分の重量が大きい場合に重要である。たとえばフルプレストレスングの橋において、(桁自重):(活荷重+自重以外の死荷重)=2:1の場合、材令28日における

圧縮強度が400 kg/cm²のコンクリートに対し、部材引張部のコンクリートにプレストレス導入直後170 kg/cm²の圧縮応力を与える場合、プレストレスの有効率を80%とすると、引張部に導入される有効プレストレスは、

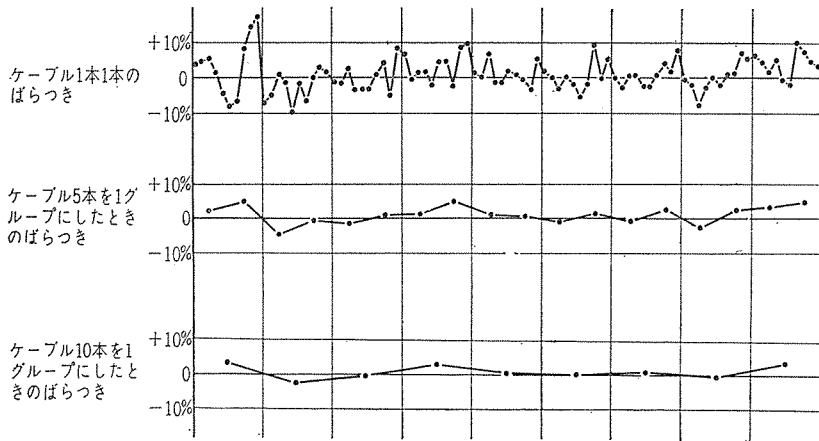
$$80\% \times 170 \text{ kg/cm}^2 (1+2) \approx 400 \text{ kg/cm}^2$$

すなわち、有効プレストレスは400 kg/cm²にも達するのであり、プレストレスングに5%の誤差があり、プレストレスが不足する場合、設計荷重が作用したとき $400 \text{ kg/cm}^2 \times 5\% = 20 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力が生ずることになる。これに対して活荷重による応力の変動量は、せいぜい100 kg/cm²程度(活荷重と自重以外の死荷重による応力変動が $80\% \times 170 \text{ kg/cm}^2 = 136 \text{ kg/cm}^2$ であるから)にすぎないのであるから、プレストレスによる誤差が20 kg/cm²も生ずることは、非常に大きい影響であるといえることができる。

自重が軽い部材ではこのように大きな影響を与えることはないが、部材の自重が全体の荷重に占める割合によって、プレストレスングの誤差が与える影響が異なることは、十分に承知しておかなければならない。

このようにプレストレスングの誤差が5%程度であっても、部材の安全性に大きな影響を与えることがあるのに、実際にプレストレスングを行なって見ると、の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間には、上記のように、普通の場合でも3~5%の標準偏差のばらつきがある。図-3は実際に緊張したデータの一例を示すものであるが、これでは、荷重計の読みから推定される引張力と、のびから推定される引張力の間には10%以上も差を生ずるようなケーブルもあるのである。したがって、ケーブル1本ごとに管理図を書いて行ったのでは、荷重計のあまり大きくない狂い等は、管理図から容易に検出することができなくなってくる。このため、プレストレスングに介入する誤差が偶然誤差だけであるようにするには、何本かのケーブルをまとめて、それらのケーブルについての平均値をとって、管理図にプロットして見ると、故障原因による誤差を容易に検出することができるようになる。これは、n本のケーブルについての平均値をとると、偶然原因による誤差による平均値のばらつきの大きさは、1本のケーブルのばらつきの大きさの $1/\sqrt{n}$ になるのに対し、故障原因による誤差は、n本のケーブルの平均値をとっても、1本のケーブルについても大きさは変わらないからである。また、このように何本かのケーブルをまとめることは、前節において述べたように、いわゆるばらつきの中が安定しているかどうかの管理をしてゆくうえにも必要なことでもある。図-3において、ケーブルを何本かのグループに分けて管理してゆくと、偶然原因によるばらつき

図-3 緊張データのグループ分けの一例



の巾が小さくなってきて、故障原因が鋭敏にあらわれてくるのが了解できるであろう。

(4) グループの大きさはどの程度にすべきか

上に述べたように、ケーブルをグループごとに管理することによって、故障原因を鋭敏に検出することができ、非常に有利になってくるのであるが、一体グループ分けはどのようにしたらよいかという問題が起ってくる。

1 グループのケーブル本数が多かったり、少なかったりすると、それぞれ次のような利点、欠点がでてくる。すなわち、1グループのケーブル本数が多くなると、

- a) 故障原因の検出は鋭敏になる。
- b) 1グループの全部のケーブルを緊張し終わらないと、平均値および、ばらつきの中についての資料が求まらないため、故障原因の発見が時間的におそくなる。

c) ばらつきの巾としては、標準偏差の計算は、面倒であるため、一般にグループ内の最大値と最小値の巾を資料として取るが、ケーブル本数が多くなると、その誤差が大きくなる。

1グループのケーブル本数が少なくなると、上記と逆のことがいえる。

これらのことを考慮して、一般には1グループのケーブル本数は、5~10本程度が適当である。もし一つのPC部材の中にPCケーブルが10本以上も含まれる場合には、一つのPC部材の中のPCケーブルを2つ以上のグループに分けることを考えなければならないが、この場合、各グループに配置形状の異なったケーブルがほぼ均等に分配されるような分け方が好ましい。部材の途中で定着されているケーブルだけで1グループ作り、部材の端部で定着されているケーブルで他のグループを作ると、この2つのグループの間に有意な差を生じることがあるので、このようなことはさげなければならない。

例えば図-4のようなケーブル配置のPC部材があり、一つの部材に含まれるPCケーブルを2つのグループに分ける場合、①②③④のケーブルと、⑤⑥⑦⑧の

ケーブルで2つのグループに分けるのは適当でない。この場合には①③⑤⑦と②④⑥⑧か、あるいは①④⑤⑧と②③⑥⑦というような分け方をすれば、ケーブルの配置形状によって有意差がある場合でも、グループ間の有意差を消すことができるので、各グループが同一母集団であると考えられる。

(5) 引き止めをどのように決めるか

PCケーブルを緊張する場合、荷重計の読みとのびの値から所定の緊張力が与えられるかどうかを判断するわけであるが、この判断には、(2)において述べたようなさげられない偶然誤差が介入してくる。これらの偶然誤差の中でも、摩擦係数、PC鋼材の見掛けのヤング係数、荷重計の指度というものは知らないうちに故障誤差となりやすいものであり、荷重計の読みおよび、のび測定値からの判断に直接的な誤差をもたらすものである。荷重計の指度についてはキャリブレーションを行なうこと以外に方法はないが、摩擦係数、PC鋼材の見掛けのヤング係数のばらつきについては次のように取り扱うことができる。すなわち、図-5において示すように、PCケーブルののび-圧力線において、所定の引張力を与える点は、見掛けのヤング係数と摩擦係数の種々の組み合わせについて1つの点に対応する。例えば摩擦係数 μ_1 と見掛けのヤング係数 E_{p1} の組み合わせに対して所定の引止め点はA、 μ_3 と E_{p3} の組み合わせに対しては、B……このように各ケーブルの摩擦係数と見掛けのヤング係数の組み合わせが決まれば、引止め点は一義的に決まるものと考えることがで

図-4

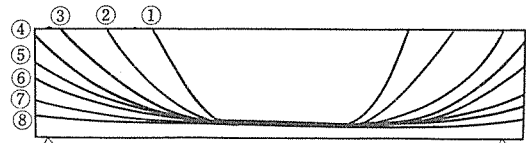


図-5

