

第7回 管理図によるリスク管理

講師：星野 展洋*

1. はじめに

これまでの講座では、緊張計算、試験緊張、緊張管理図の作成、および本緊張について説明してきました。

今回は、本緊張中のプレストレスの安定状態と異常状態を管理図により判断し、正確なプレストレスを導入するためのリスク管理方法について説明します。説明にあたり、橋梁工事で広く使用されているコンクリート道路橋施工便覧¹⁾を参考にしました。

2. 摩擦管理における管理図

主方向の内ケーブルに適用される、摩擦係数をパラメータとして管理する方法（以下、摩擦管理）における管理図について説明します。

2.1 PC鋼材1本ごとの管理図

摩擦管理におけるPC鋼材1本ごとの緊張管理図を図-1に示します。1本ごとの管理図では、プレストレス中に計測された摩擦係数 μ が、上方管理限界線（U.C.L.）と下方管理限界線（L.C.L.）によって示される管理限界内にあることを管理します。緊張作業中は、任意の2つの摩擦係数についての緊張計算結果より得られる点ABを通過する線を引止め線とし、緊張作業における引止め点（緊張作業を止める最終緊張力）を決定します。

また、緊張作業中の圧力計の読みは、絶対上限線^{a)}を超えてはいけません。

管理図作成の詳細は、第4回「緊張管理方法」を確認してください。

2.2 グループごとの管理図

摩擦管理におけるグループごとの管理図を含む全体の摩擦係数の管理図を図-2に示します。これは、上段に1本ごとの摩擦係数をプロットした図を、下段に何本かのPC鋼材をまとめた、グループごとの摩擦係数の平均値をプロットした図を示しており、それぞれ管理限界線（U.C.L.とL.C.L.）により管理します。グループの分け方については、一般に4～10本程度が適当であり、以下の点に注意して決定します。

- ① 1グループのPC鋼材の数が多すぎると、故障が原因による誤差の検出は鋭敏となる。
- ② 1グループのPC鋼材の数が多すぎると、1グループ

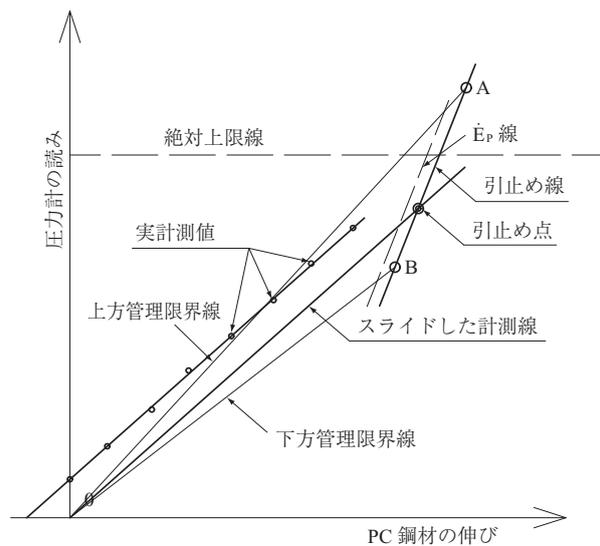


図-1 摩擦管理のPC鋼材1本ごとの管理図

桁 No.	G1					G2					G3				
鋼 No.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
PC鋼材1本ごとの μ	U.C.L.										修正 U.C.L.				
	L.C.L.										修正 L.C.L.				
グループごとの μ	U.C.L.										修正 U.C.L.				
	L.C.L.										修正 L.C.L.				
記事											管理限界の修正				

図-2 PC鋼材全体の摩擦係数の管理図

の全PC鋼材の緊張を完了して、はじめてそのばらつき状態および平均値が求められるので、故障が原因による異常の発見が時間的に遅れる。

- ③ PC鋼材数が少ないと上記①②と逆のことがいえる。

* Nobuhiro HOSHINO : (株) 富士ピー・エス 土木本部 土木技術グループ

④ 一部分の中に PC 鋼材が 10 本以上ある場合には、二つ以上のグループに分けるのがよい。ただし、各 PC 鋼材に配置、形状の異なった PC 鋼材がほぼ均等に配分され、グループ間に有意差が生じないような配慮が必要である。

3. 安定状態と異常状態の判断と処置方法

緊張管理図を描く主目的は、プレストレスに関する種々の作業工程が正常かどうかを客観的に判断するためであり、緊張管理図を品質管理に役立たせるように工夫していく必要があります。また、異常状態が認められる場合には、その原因を究明し、対策を講じる必要があります。

3.1 安定状態を示す管理図

PC 鋼材 1 本ごとの管理図では、図 - 1 のように計測値をプロットした軌跡を原点を通るようにスライドした直線が管理限界内で、かつ一直線上にある場合は、安定状態といえます。

グループごとの管理図を含む全体の摩擦係数の管理図では、安定状態を示すものは次のようなものです。

- ① 管理限界内にある。ただし、20 点に 1 点の割合以下では管理限界外に出ても直ちに異常と認めない。
- ② 管理図上の点が中心線のまわりに多く集まり、同時にそれが適当に分散している (図 - 3)。

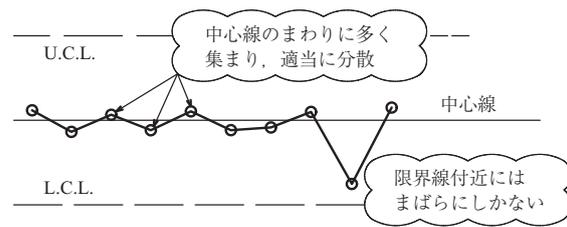


図 - 3 安定した摩擦係数管理

③ 上記 ② の状態で、さらに管理限界線付近では非常にまばらにしか点のないこと (図 - 3)。

以上のような管理図は、正しいプレストレスが導入されると判断でき、計算された管理限界は、次回の緊張に対する管理の基準としても採用できます。

3.2 異常状態と処置方法

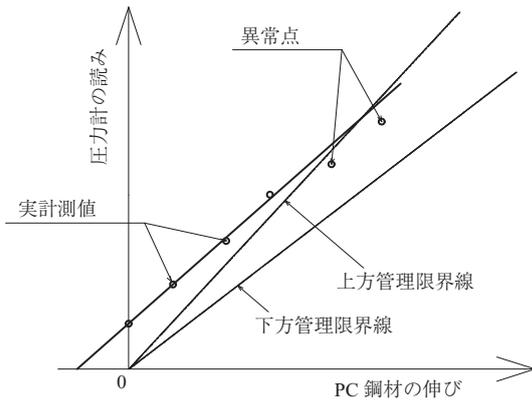
ここでは、何らかの異常があると判断できる緊張管理図の例を示します。しかし、緊張管理はできるだけ均一な製品を造るために行うものであり、安定状態でないとしても必ずしも構造物の耐荷力が不足するとは言いきれませんが、適切な処置をとることにより、以後の工事の改善について役立てなければなりません。

PC 鋼材 1 本ごとの管理図に対する異常状態、その原因および処置の一例をまとめると、表 - 1 のとおりです。

表 - 1 PC 鋼材 1 本ごとの緊張管理図に対する判断と処置¹⁾

異常現象	状況	原因	対策例
1 実測値が一直線上にない	① 伸びが 1 ~ 2 mm のばらつき	i) 伸びの読み誤差 圧力計の読み誤差	・測定誤差の範囲と判断し、最小二乗法の考えで直線を引く
		ii) 計測器のくせ	・圧力計を検定し、くせを補正する
	② 2 点以上のばらつき	iii) 伸びの読み誤り 圧力計の読み誤り	・測定方法、測定者の読み精度向上 ・マーク点、測定方法などの再確認
		iv) 特定の鋼線の滑り	・iii) の原因でないことを確認した後、ケーブル状況を確認する 例：12S12.7 (鋼より線 12 本) の場合、12 本のうち問題のある鋼より線と他の鋼より線とを確認 ・鋼線の汚れなどを取り除く ・ウェッジの不良などがいないか確認する
		v) PC 鋼材の弾性限界が異常に低い	・PC 鋼材の引張強度試験を行い、異常の有無を調べる
		vi) 鋼線が拘束を受けている	・シース内に流れ込んだモルタルによる拘束が原因と考えられるので、引き続いて同じ現象が生じることは少ない ・最小二乗法の考えで直線を引く
2 管理限界を外れる	① 上限を超える	原因 iii) と同じ	
		vii) PC 鋼材が途中で拘束を受けて、全体にわたって伸びていない	・途中の拘束を除去する ・PC 鋼材の品質に異常がある場合、PC 鋼材を交換して緊張を続ける
		viii) PC 鋼材のヤング係数が大きい	・鋼材のヤング係数の再確認試験
	原因不明	・引止め線付近まで緊張する ただし、絶対上限線を超えることはできない	
② 下限を下回る	原因 iii), iv) と同じ		
原因不明	ix) PC 鋼材のヤング係数が小さい	・原因 viii) と同じ対策	
原因不明	原因不明	・引止め線を超え、なおかつ $\dot{\mu} = 0.1$ を超えるまで緊張する	
3 配に傾向性がある	① 勾配がねてくる	原因 iv) と同じ	
		x) 鋼線の切断	・鋼線を交換し、切断の原因を確かめる
		原因 v) と同じ	
	原因不明	原因不明	・引止め線を超え、なおかつ $\dot{\mu} = 0.1$ を超えるまで緊張する
② 勾配が立ってくる	xi) 緊張の途中より鋼線が拘束を受けている	・作業を直ちに中止し、原因を追及する ・ジャッキのストロークがない場合は、鋼材を仮定着し、ジャッキを盛り替えて緊張を続ける	
	xii) 汚れの付着	・他の鋼材で緊張量の不足を補う	
4 大きく異なる	① 許容値に対して非常に大きい	xiii) コーンの不良	・コーン付近を清掃する
		原因 xiii) と同じ	・引き続いて大きい場合は、使用するコーンを交換する
	② 許容値に対して非常に小さい	原因 xiii) と同じ	・引き続いて生じる場合は、使用するコーンを交換する

注：この他参考文献 1) を参考にしたり、使用する緊張工法の特徴により生じる異常の場合の処置を作成するのが望ましい。



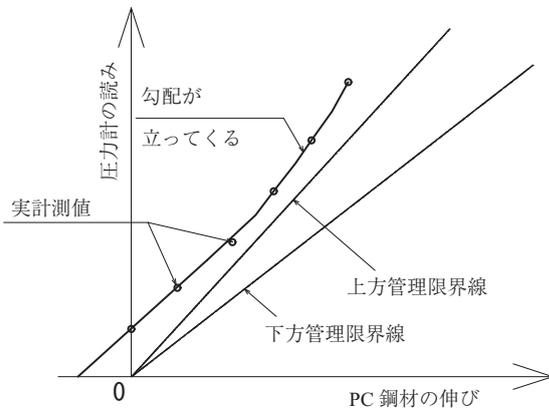
管理グラフの判断：原因を調査し、ばらつきを除去する必要がある

原因調査：

- i) 伸びや圧力計の読み誤り
 - ※測定者への読み直し指示や慎重な測定で改めることができる
- ii) 特定の鋼線の滑り
 - ※1度の滑りならば、その後の測定値は直線で結ぶことができ、滑る前の測定値を結んだ直線とはほぼ平行するようになる
- iii) PC鋼材の弾性限が異常に低い
 - ※圧力が大きくなると予想伸びより大きな伸びを示す
- iv) 鋼線がシース内のモルタルなどで拘束を受けている
 - ※引き続いて生じない、比較的摩擦が大きい

処置方法：表 - 1 の状況 ② の原因に応じて対策例を参照

図 - 4 2点以上のばらつきがある場合



管理グラフの判断：作業を直ちに中止して、原因を追及する必要がある

原因調査：緊張の途中より鋼線が拘束を受けている

- ※モルタルの混入、またはジャッキストロークがない

処置方法：

- ・途中の拘束を除去する
- ・ジャッキストロークがない場合、鋼材を仮定着し、ジャッキを盛り替え緊張する

図 - 5 軌跡が立ってくる場合

図 - 4, 5 には、表 - 1 の異常状態を示す管理図の一例とその対処方法を示します。

PC鋼材1本ごとの管理図によって、測定点の軌跡に注

意を払っていれば早い時期での異常点の発見が容易となり、異常を発見した場合、緊張中の測定者への読み直し指示やPC鋼材の滑りの有無を調査するなどして対処することができます。

また、表 - 1 で述べる管理限界を外れた場合のリスクは、管理限界を外れた1本のPC鋼材についてのリスクですが、引続き管理限界を外れる場合や連続的な傾向がある場合などのリスク管理は、図 - 2 に示す全体の摩擦係数の管理図で行います。

全体の摩擦係数の管理図における異常状態は以下のような状態のことを指します。

① 管理限界の外に連続して2点以上とび出た場合

これまでの講座で説明したように、摩擦係数を2シグマ法で管理しているため、20回に1回程度は管理限界の外にでることもあります。それが連続して飛び出る確率は $(1/20)^2 = 1/400$ (確率1/20の事象が2回続けて起こる確率) となり、偶然に生じたとは考えにくいいため、異常状態と判断し、このような場合には、徹底的に原因を追及する必要があります。

② 連続的に中心線の片側にある場合

図 - 6 に示すように中心線の片側に、点が連続して現れる場合です。管理図による判断をするうえで、一般の品質管理を参考にすると、次の判断基準に基づいて処置します。

- ・連続5点・・・将来の動きに対して注意する
- ・連続6点・・・原因があるものとして調査を始める
- ・連続7点・・・安定状態になるよう処置をとる

この判断基準の意味は、測定点が中心線の上と下のどちらに現れるかの確率は1/2であるため、同じ側に連続7回現れる確率は、 $(1/2)^7 = 1/128$ と非常に小さくなります。言い換えれば、この場合を異常と判断しても、その判断が間違っ確率が1/128としかならないということです。

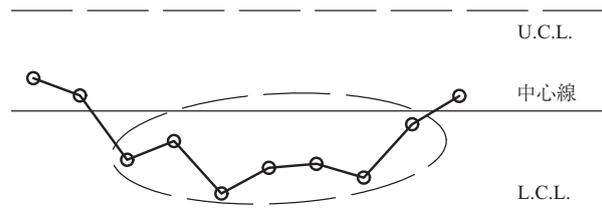


図 - 6 管理図の片側に測定点が見れる例

③ 点が中心線に対し片側に多く現れる場合

図 - 6 のように連続しなくても、中心線の一方に点が多く現れる場合(図 - 7)は、故障などの特殊な原因があるとして、一般の品質管理を参考に次の4つの判断基準で異常状態と判断します。

- ・連続11点中10点が片側に現れる場合
- ・連続14点中12点が片側に現れる場合
- ・連続17点中14点が片側に現れる場合
- ・連続20点中16点が片側に現れる場合

④ 点が連続して上昇または下降する傾向の場合

図 - 8 のような場合で、この場合も②と同様に7回連

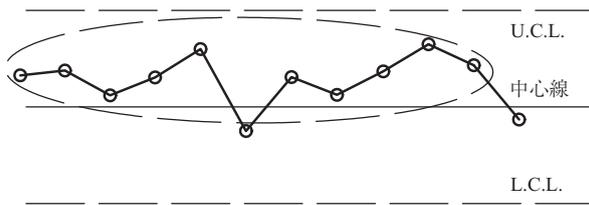


図 - 7 測定点が片側に多く現れる例

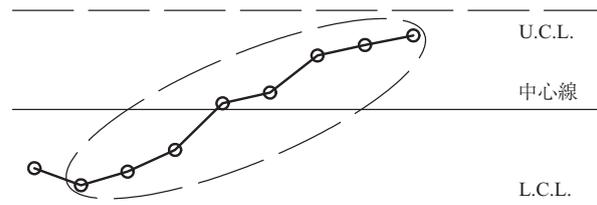


図 - 8 測定点が連続して上昇する例

表 - 3 $\dot{\mu}$ 値に対する正常、異常の判断と処置¹⁾

形式	$\dot{\mu}$ の範囲	判断	原因調査	処置方法
(A)	つねに $-0.05 \leq \dot{\mu} \leq 0.65$	標準的な管理状態にある。 すなわち正常と判断する。		$-0.05 \leq \dot{\mu} < 0.1$ の場合は、 $\dot{\mu} = 0.1$ に相当する圧力計の読みを最終緊張力とする
(B)	まれに $-0.40 \leq \dot{\mu} < -0.05$ または $0.65 < \dot{\mu} \leq 1.3$	標準的な管理状態とはいえないが、たまに起こり得ないことではない。 これだけでは正常とも判断し難く注意信号とみなす。	次の PC 鋼材の緊張のときは、あらゆる点でとくに慎重な作業を行う。	(イ) $-0.4 \leq \dot{\mu} < -0.05$ の場合、 $\dot{\mu} = 0.1$ に相当する圧力計の読みを最終緊張力とする。 (ロ) $0.65 < \dot{\mu} \leq 1.3$ の場合、絶対上限線を限度とし E_p 線との交点の圧力計の読みを最終緊張力とする。
(C)	連続 2 点以上 $-0.40 \leq \dot{\mu} < -0.05$ または $0.65 < \dot{\mu} \leq 1.3$		I) 緊張計算の間違いか検算する II) 緊張グラフ作成の精度を確かめる III) PC 鋼材伸び量の計測ミスか確かめる	I) ~ VI) の原因は必ず除去する。VII) VIII) の原因の場合、とりあえずそれに応じて管理グラフを変更し、管理していけばよいが、構造物のそりと短縮も必ず測定し、判断の参考とするのがよい。 ヤング係数が異常の場合、鋼材を交換する。
(D)	$\dot{\mu} < -0.40$ または $\dot{\mu} > 1.3$	管理状態になく偶然以外の原因ありと考える。 すなわち明らかに異常と判断する。	IV) 圧力計の狂いでないか、キャリブレーションをして確かめる V) モルタル漏れがないか PC 鋼材を動かしてみる VI) グループ分けが不適切か、グループ間の差を検定する VII) 摩擦状態を三次元的に考える VIII) 摩擦およびヤング係数が異常な値か測定する	

続いたら異常状態と判断して処置をとります。この現象は、たとえば、圧力計が徐々に狂い出してきた場合などが考えられます。

① から④ などの異常状態が発見された場合、偶然以外の原因があると判断し、原因調査と原因に応じた処置を行う必要があります。原因の調査は以下の順序で行います。

- I) 緊張計算に間違いがないか検算する
- II) 緊張グラフ作成の精度を確かめる
(以上の原因はとくに緊張の最初に生じやすい)
- III) PC 鋼材伸び量の計測ミスがないか確かめる
(とくにマーク点距離の勘違いや忘れることが多いので入念に確かめる)
- IV) 圧力計に狂いがないか、キャリブレーションをして確かめる
- V) モルタル漏れがないか PC 鋼材を動かしてみる
- VI) グループ分けが適切か、グループ間の差を検定する
- VII) 摩擦状態を三次元的に考える
- VIII) 摩擦およびヤング係数が異常な値か測定する

処置方法は、I) ~ VI) を必ず除去し、VII), VIII) については、それに応じて管理限界を変更して管理していけばよいのですが、構造物の反りや短縮量の測定、使用鋼材のヤング係数の抜取り検査など、原因追求のために努力を払う必要があります。

最後に、 $\dot{\mu}$ の値に対する判断と処置の一例をまとめ、表 - 2 に示します。

4. おわりに

今回は、緊張管理図を用いたプレストレッシングのリスク管理について解説しました。なお、横締め PC 鋼材や外ケーブルなどの緊張管理方法として用いる引張力と伸びを独立して管理する方法 (伸び管理) におけるリスク管理についても同様の考え方により 1 本ごと、グループごとに摩擦係数 $\dot{\mu}$ を管理します。詳細につきましては、参考文献 1) などを参照してください。次回は、緊張作業時の安全管理について解説します。

注

- a) 絶対上限線：PC 鋼材の応力度がプレストレッシング中における許容引張応力度 (道路橋の場合、 $0.80 \sigma_{py}$ または $0.90 \sigma_{py}$ のうち小さい方の値) を超えないように管理グラフ上に位置を示した圧力計示度の上限線。

参考文献

- 1) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，1998
- 2) 現代理工学出版：PC 橋のプレストレッシングと設計施工，1995

【2011 年 8 月 30 日受付】