

(64) PC橋梁における緊張管理手法の一考察

(株) 鴻池組	技術第4部PC課	正会員	池尾 孝司
(株) 鴻池組	技術第4部PC課		橋口 淳朗
(株) 鴻池組	技術第4部PC課		小林 仁
(株) 鴻池組	技術第4部PC課		○細橋 克哉

1. はじめに

PC構造物におけるプレストレスの目的は、設計で考えられているプレストレスを正しく導入することであり、『所定のプレストレスが与えられた』と判断された時にはじめて、PC構造物として機能するものである。この判断を得るためには、緊張作業の道標となる緊張管理手法(緊張管理の考え方)および舵取りとなる緊張管理作業方法の双方が正確かつシビアである必要がある。

本稿では、こうした緊張管理全般についてレベルアップを図るための一考察を紹介する。

2. 緊張管理手法のレベルアップ

摩擦係数が $\mu=0.3$ より大きく所定のプレストレスが導入できない場合、一般的には、①次ケーブルで不足分のプレストレスを追加導入する。②導入したプレストレスで構造物の応力度照査を行う。の2通りの方法が考えられるが、当社では緊張管理手法のレベルアップを図るという観点から、新しく『プレストレスの得喪量』という概念を導入して緊張管理を行った。ここで本緊張管理手法の実施例として2橋を紹介する。

1) Case A

本橋は、図-1に示すようにPC3径間連続中空床版橋(径間長=30m、橋長=90m)で両引きおよび片引き(左右)が存在する特殊な緊張形式であった。

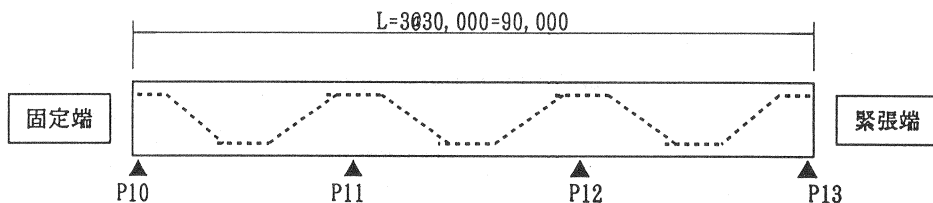


図-1 Case A橋の概要図

(1) 緊張計算における設計断面の選定

本橋の場合は、3径間連続なので着目する断面は、各径間中央3断面と中央の支点部2断面の計5断面となるが、その中で設計荷重作用時におけるコンクリートの応力度が厳しい各径間中央の3断面を緊張計算における設計断面とする。この各断面において所要のプレストレスを導入できれば全ての設計断面についても満足することになる。

(2) 緊張管理における問題点

設計においては、摩擦係数が $\mu=0.3$ と仮定して行われており、初期導入引張応力度 σ_{pt} の設定は通常プレストレス中の許容応力度 σ_{pa} に対して、ジャッキの内部摩擦ロス3%および余裕量として3%程度、合わせて6%程度を低減している。したがって、緊張力に対しては3%程度の余裕しかないことになる。本橋のように片引き緊張においては、実際の緊張作業で摩擦係数が $\mu > 0.3$ では許容応力度から決まる緊張力の絶対上限値 σ_{pa} の制約から所要のプレストレスが導入できないケースが発生する可能性がある。

例として、本橋における両引き、片引きにおける摩擦係数の許容値 μ_a は以下ようになる。

【条件】

①摩擦係数が $\mu > 0.3$ の場合

②設計断面【両引き】：2径間目の径間中央

【片引き】：1径間目の径間中央

③ケーブル諸元【両引き】： $\iota = 40.0305\text{m}$ 、 $\alpha = 50^\circ$ 、 $\sigma_{pa} = 144\text{kgf/mm}^2$ 、 $\sigma_{pj} = 86.77\text{kgf/mm}^2$

【片引き】： $\iota = 9.3731\text{m}$ 、 $\alpha = 10^\circ$ 、 $\sigma_{pa} = 144\text{kgf/mm}^2$ 、 $\sigma_{pj} = 124.69\text{kgf/mm}^2$

【桁端緊張力】 $\sigma_{pt} = (1 + \gamma) \times \sigma_{pj} \times \text{EXP} \{ \mu(\alpha + \lambda / \mu \times \iota) \}$

【許容摩擦係数】 $\mu_a = \text{Ln} \{ \sigma_{pa} / 1.03 / \sigma_{pj} \} / \{ \alpha + \lambda / \mu \times \iota \}$

【両引きの場合】 $\mu_a = \text{Ln} \{ 144.00 / 1.03 / 86.77 \} / \{ 50 \times \pi / 180 + 0.01333 \times 40.0305 \} = 0.34$

【片引きの場合】 $\mu_a = \text{Ln} \{ 144.00 / 1.03 / 64.11 \} / \{ 90 \times \pi / 180 + 0.01333 \times 70.4768 \} = 0.31$

以上のように、摩擦係数の許容値は、両引き緊張においては $\mu_a = 0.34$ となり経験上から問題はないが、片引き緊張においては $\mu_a = 0.31$ となり、実際の緊張における摩擦係数 μ が許容摩擦係数 μ_a を越える場合にはプレストレスの導入不足となり、はじめに述べた『所定のプレストレスを与えた』とは言えない。

(3) 所定のプレストレスが導入できない場合の対応策

既に緊張されたケーブルの各設計断面(本橋の場合は3断面)における『プレストレスの得喪量』を把握しながら緊張作業を進めていく。(プレストレスの得喪量は図-2参照)緊張作業前にプレストレス得喪量を摩擦係数 μ の全てのケースについて計算しておき、緊張の各施工段階におけるプレストレス得喪量を定量的に把握しておこうというものである。したがって、導入不足のケーブルが発生した際、『どの程度プレストレスを追加導入したらよいか』がリアルタイムに把握できるので、導入不足への対応も迅速かつ合理的に行えると思われる。

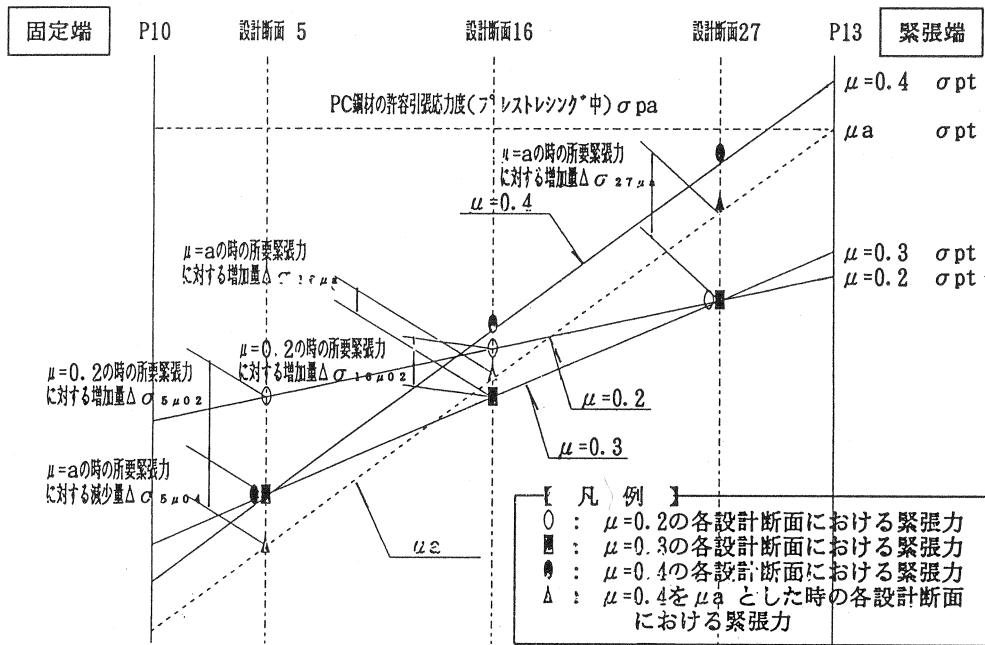


図-2 プレストレスの得喪量の概念図

表一 各施工段階におけるプレストレス得失量

緊張順序	ケーブル	緊張形式	実際の 摩擦係数 μ	設計断面【単位: kgf/mm ² 】					
				5		16		27	
				得失量	累計	得失量	累計	得失量	累計
1	C1-G3	両引き	0.288	0.74		1.19		0.56	
2	C2-G3	左引き	0.295	2.95	3.69	2.11	3.30	0.71	1.27
3	C3-G3	右引き	0.298	0.29	3.98	1.42	4.72	2.22	3.49
4	C1-G4	両引き	0.291	0.51	4.49	0.90	5.62	0.42	3.91
5	C2-G4	左引き	0.277	1.85	6.34	3.37	8.99	3.35	7.26
6	C3-G4	右引き	0.320	-1.61	4.73	1.54	10.53	6.43	13.69
7	C1-G5	両引き	0.221	0.07	4.80	8.00	18.53	0.10	13.79
8	C2-G5	左引き	0.243	0.73	5.53	6.27	24.80	8.47	22.26
9	C3-G5	右引き	0.245	8.25	13.78	5.97	30.77	0.58	22.84
10	C1-G2	両引き	0.270	0.12	13.90	3.06	33.83	0.18	23.02
11	C2-G2	左引き	0.286	1.09	14.99	2.18	36.01	2.10	25.12
12	C3-G2	右引き	0.279	3.17	18.16	2.68	38.69	0.82	25.94
13	CR1-G1	両引き	0.289	0.00	18.16	1.47	40.16	0.11	26.05
14	C2-G1	左引き	0.350	4.65	22.81	-4.59	35.57	-10.34	15.71
15	C3-G1	右引き	0.288	1.82	24.63	1.68	37.25	0.59	16.30
16	CL1-G6	両引き	0.276	0.00	24.63	2.75	40.00	0.19	16.49
17	C2-G6	左引き	0.255	0.00	24.63	6.07	46.07	8.82	25.31
18	C3-G6	右引き	0.289	1.72	26.35	1.36	41.36	0.00	25.31
19	CR1-G6	両引き	0.291	0.00	26.35	1.38	42.74	0.26	25.57
20	CL1-G1	両引き	0.260	0.00	26.35	4.49	47.23	0.30	25.87
プレストレスの得失量の合計					26.35		47.23		25.87

2) Case B

本橋は、図-3に示すようにPC6径間連続中空床版橋(径間長=30m、橋長=180m)で、3分割施工となっており両引きおよび片引き(左右)が存在する。

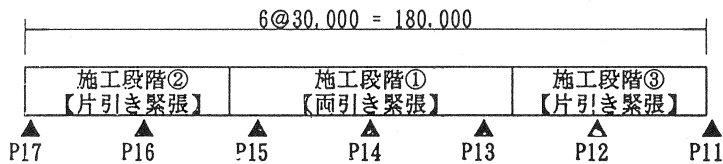


図-3 Case B橋の概要図

(1) 緊張管理における問題点

グラウト注入手順を各分割施工ごとに行うことにより、グラウトの付着が切れる恐れがあるので図-4に示すPC鋼材応力度の分布において、施工段階①の桁端部における定着後の緊張力($\sigma P1$)と施工段階②の接続端部における緊張力($\sigma P2$)の大小関係を把握して $\sigma P1 > \sigma P2$ となることを確認しなければならない。($\sigma P1 < \sigma P2$ となる場合にグラウトの付着状態を定量的に把握するのは困難であるが、少なくとも $\sigma P1 > \sigma P2$ であればグラウトの付着に問題はないと考えられる。)

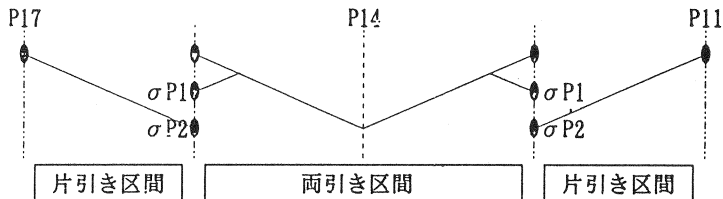


図-4 PC鋼材応力度分布図

(2) 摩擦係数の変化によるPC鋼材応力度分布

設計では摩擦係数が $\mu=0.3$ として計算されており、この場合のPC鋼材応力度では $\sigma P1 > \sigma P2$ となっており、両引きと片引きの摩擦係数が $\mu=0.3$ であればグラウトの付着切れには問題はない。しかし、実際の緊張では、摩擦係数が変化するためPC鋼材応力度も変化し、両引きと片引きの摩擦係数の組み合わせによっては、 $\sigma P1 < \sigma P2$ となる可能性がある。(図-5参照)

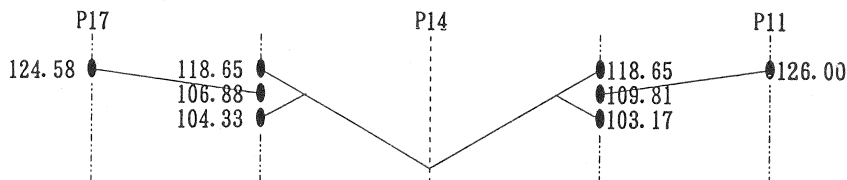


図-5 $\sigma P1 < \sigma P2$ のケース (摩擦係数 両引き=片引き $\mu=0.1$)

また、両引きの摩擦係数 $\mu=0.1, 0.2, 0.3$ に対して $\sigma P1 = \sigma P2$ となるような摩擦係数を μ_{limit} (限界摩擦係数)として、その値を各ケーブル種別ごとに算出すると下表のようになり、両引きの摩擦係数 $\mu=0.1 \sim 0.3$ の範囲では概略的には $\mu_{limit} < 0.2$ であることがわかった。

表-1 限界摩擦係数 μ_{limit} の算定結果

	C1ケーブル			C2ケーブル			C3ケーブル		
	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1
両引き	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1
左引き	****	0.111	0.121	****	0.120	0.132	****	0.111	0.124
右引き	0.127	0.147	0.158	0.110	0.139	0.153	0.113	0.142	0.156

**** → 片引きの摩擦係数 $\mu=0.1 \sim 0.3$ の範囲では $\sigma P1 < \sigma P2$ とならないことを意味する。

(3) 対策方法

対策方法を考える場合、施工段階①における両引き緊張の結果に左右されるのではなく、施工段階②の片引き緊張時に対処できれば、施工上および緊張管理上において都合がよい。

具体的には、図-6に示すような片引き緊張を例に挙げると緊張計算により算出された桁端緊張力 σ_{pm1} を付着問題発生がしないよう σ_{pm2} ($\sigma P1 = \sigma P2$)となるよう緊張する。

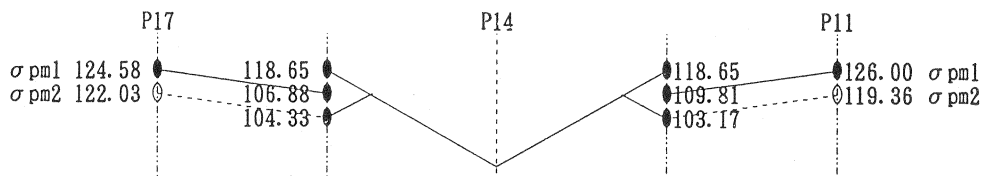


図-6 $\sigma P1 = \sigma P2$ となる緊張方法 (摩擦係数 両引き=片引き $\mu=0.1$)

この場合、付着問題はクリアしているがプレストレスの導入量見てみると $126.00 - 119.36 = 6.6$ (kgf/mm²) だけ不足してしまうこととなる。

そこで、摩擦係数 μ の変化による各設計断面の所要プレストレスに対する増減量を『プレストレスの得失量』(前述)を導入する。

以上より、本橋における付着切れ問題の対策方法としては、上述の『プレストレスの得失量』を各ケーブルごとに把握することにより、設計断面における所要プレストレスを過不足なく導入するよう緊張管理を進めていく。

3. 緊張管理作業の改善

1) 従来の緊張管理と問題点

従来の緊張管理では、緊張管理データであるPC鋼材の伸び量 Δl とポンプの圧力示度 σ_m を緊張作業員がスケールおよび目視にて測定して、緊張管理責任者が事前に作成した緊張管理図上にこれらのデータをプロットしていき、データのばらつき状態より緊張作業が適正に行われているかを判断しながら、最終緊張力の約90%程度において、1本の直線(測定線)を引くことにより最終緊張力を決定していく。

ここで、従来の緊張管理方法においては、以下のような問題点が存在する。

- ①ばらつきのある緊張管理データについて1本の直線を引く行為には、緊張管理責任者の直感性にゆだねられるため客観性に欠けており、また個人差が出てくる。
- ②PC鋼材の伸び量とポンプの圧力示度の測定値についても読み間違えたり、また個人差が出てくる。

2) 当社の新しい緊張管理方法

当社では、上記の問題点を是正するため以下の2方法を提案および実施をした。

①パソコンによる緊張管理図の作成(緊張管理ソフトの開発: 図-7参照)

緊張作業員が測定したPC鋼材の伸び量 Δl とポンプの圧力示度 σ_m のデータをパソコンに手入力していき、各荷重段階でこれらのデータを最小二乗法による回帰直線を引いて、直線性の程度を表す相関係数 γ により緊張作業が適正に行われているかを判定する。その際の判定基準値は、過去の蓄積したデータより相関係数 $\gamma \geq 0.999$ と設定した。また、パソコンの画面には、『現在の緊張管理データ』(図-8参照)として相関係数の他、摩擦係数、次ステップの推定伸び量、最終段階の引止め荷重および伸び量がリアルタイムに表示されるようになっているので、従来の緊張管理方法に比べてレベルアップした方法と言える。

また、最大の特徴は管理方法に客観性が有り、誰が緊張管理を行っても同一の結果となることである。

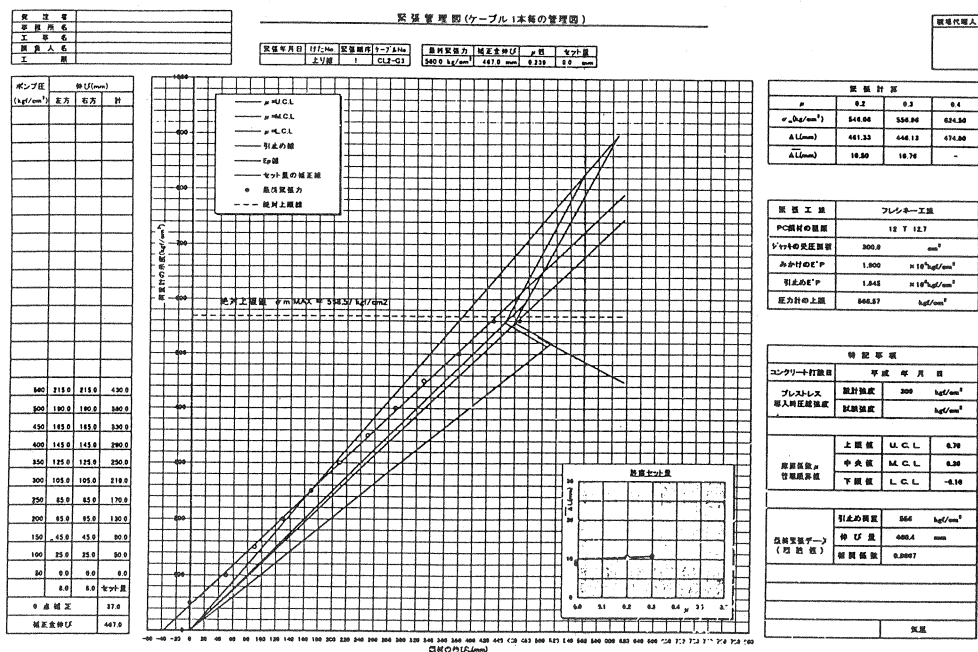


図-7 パソコンによる緊張管理図

現在の緊張管理データ		
	次回	最終
引止め荷重(kg/cm^2)	610.0	556
伸び(mm)	467.7	460.4
μ	--	0.239
相関係数		0.9997
ゼロ点の補正の有無		

図-8 現在の緊張管理データ

②緊張管理自動計測システムの開発

緊張ジャッキには変位計を、またポンプには圧力計をそれぞれ装着して、P C鋼材の伸び量 Δl とポンプの圧力示度 σ を自動的にパソコンに取り込む『計測システム』を開発して、上記の『緊張管理ソフト』とリンクさせて緊張管理の自動化を行った。(図-9 参照)

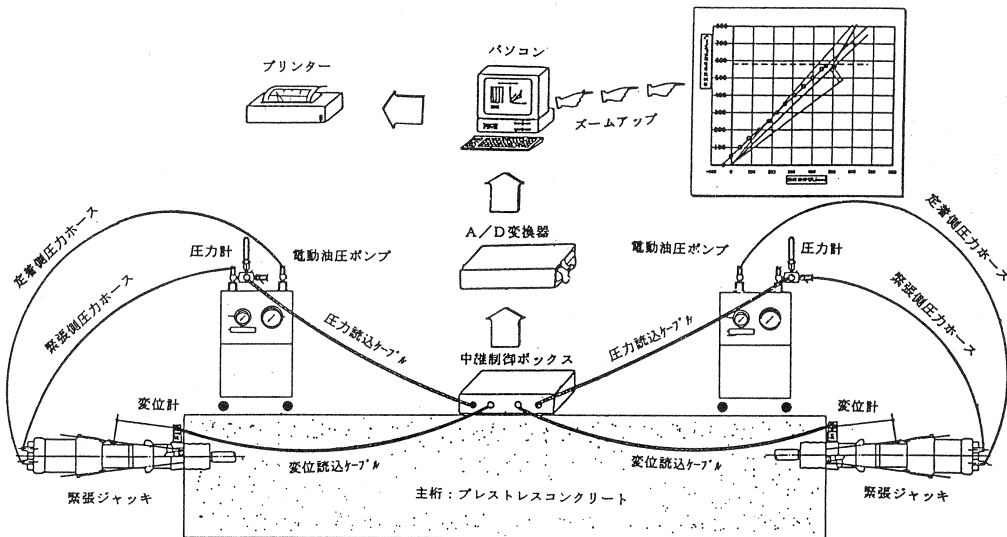


図-9 緊張管理自動計測システム概要図

4. おわりに

プレストレストコンクリート橋における緊張管理全般についてのレベルアップを主眼に、緊張管理手法(緊張計算、緊張管理の考え方)と緊張管理作業方法(管理図の作成、計測のパソコンによる自動化)について紹介してきたが、これらの双方が遂行されたときにはじめて、プレストリングの目的である『設計で考えられている所定のプレストレスが正しく与えられた』という判断が得られるものとする。

本稿がP C構造物の品質向上の一助となれば幸いである。