

長大PC斜張橋の施工管理に関する一考察

Study on Construction Management of Long-Span PC Cable-Stayed Bridge

横山雅臣*, 松井繁之**, 内村祥史***

Masaomi Yokoyama, Shigeyuki Matsui, Yasushi Uchimura

*鹿島建設(株) 新猪名川大橋JV工事事務所(〒666-0014 川西市小戸2丁目16-10)

**工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

***鹿島建設(株) 新猪名川大橋JV工事事務所(〒666-0014 川西市小戸2丁目16-10)

PC cable-stayed bridges are built by cantilever method using stay-cables. To achieve good performance, the construction management system should be reasonable. For existing bridges, the management was carried out to conform the tensile forces of cables and the shape of main girders with the designed values considering a certain accuracy at each cable setting time. But this method is very difficult because the bridge has many factors on the cable forces and the shape of main girders due to high statically indeterminate structure.

To simplify the construction management, a new method called "Separated Management System" was proposed and it was adapted to a long span PC cable-stayed bridge. In this paper, some problems of the current construction management system are analyzed. Advantages of the new proposed method are clarified. Also, in the new method, creep effect of concrete during construction cycles, which was neglected in the current existing methods is taken into account considering the construction management and the shapes of bridge upon completion.

Key Words: PC cable-stayed bridge, Construction management, Creep

1. はじめに

主桁ブロックを張出し架設するPC斜張橋は、高次の不静定構造である。施工段階に応じて構造系が逐次変化し、完成系での出来形や応力を所定の許容範囲内に収めるには、各施工段階で所要の施工精度を確保する必要がある。また、施工系は、主桁の剛性が低いと荷重の変化に敏感でたわみやすく、施工中の誤差が累積されれば、完成系の出来形や応力状態に影響を及ぼす。従って、各施工ステップごとに斜材張力や主桁の変形を的確に把握し、その時点での各部材の安全性および将来の完成系に対する影響を確認しながら施工を進めていく必要がある。よって施工管理システムが必要になる。施工管理システムの目的は、以下の2点である。

- ① 部材の応力を管理値内に抑える
- ② 出来形を管理値内に抑える

従来の施工管理では、一般的に施工時におけるコンクリートのクリープ（以下、施工時クリープと称する）についての影響は考慮せず、以下の項目に着目して設計値と実測値との間に生ずる誤差を究明し、定量化しながら型枠セット時に補正を行うことで、前述の目的を満足させる管理方法がとられてきた。ここでは、この管理方法を逐次管理方式と称する。

- ① 施工中の各荷重の影響
- ② 部材剛性の影響
- ③ 温度変化の影響
- ④ 計測誤差の影響

しかし、逐次管理方式による場合、設計値と実測値を比較・分析し各施工段階での形状や応力・斜材張力を考

慮して補正値を算定することによって、最適な型枠セット高を決定しながら施工を進める考え方である。そのため、あらゆる誤差要因を含んで現れる設計値と実測値の差異（誤差）が一定の傾向を示さないことが考えられ、現場技術者の対話方式による最適型枠セット高の決定が必要になる。よって、第一に、施工管理が煩雑になることに加え、出来形がスムーズな線形にならずブロック接続部で角折れの生じることがある。第二に、PC斜張橋の長大化に伴って施工時クリープが無視できなくなる。すなわち、施工時クリープの影響による誤差が、施工管理上無視できない程度に大きくなる。また、施工時クリープを考慮しないで主桁の高さを設定した場合、完成後におけるコンクリートのクリープ終了時の出来形が管理値に収まらないことが考えられる。

第一の問題に関する合理的な解決方法として、上越し管理を相対管理と絶対管理に分ける分割管理方式を提案する。分割管理方式による場合、前述の①～④の誤差要因の内、④は計測の自動化で対処するものとすれば、相対管理では①～③の要因、絶対管理では①および②の要因が省略できる。

第二の問題である施工時クリープは、張出し架設される主桁部の長さ（以下、張出し規模と称する）に応じて施工時設計に考慮して線形を決め、絶対管理に反映させる必要があるものと考えられる。

相対管理とは、型枠セットの補正による高さ調整という考え方ではなく、型枠セットはあくまで既設ブロックに対し設計の線形に合わせるように連続させる管理である。絶対管理とは、相対管理により設計の線形に連続させた主桁が、図-1に示すように、計画高と実測高の間

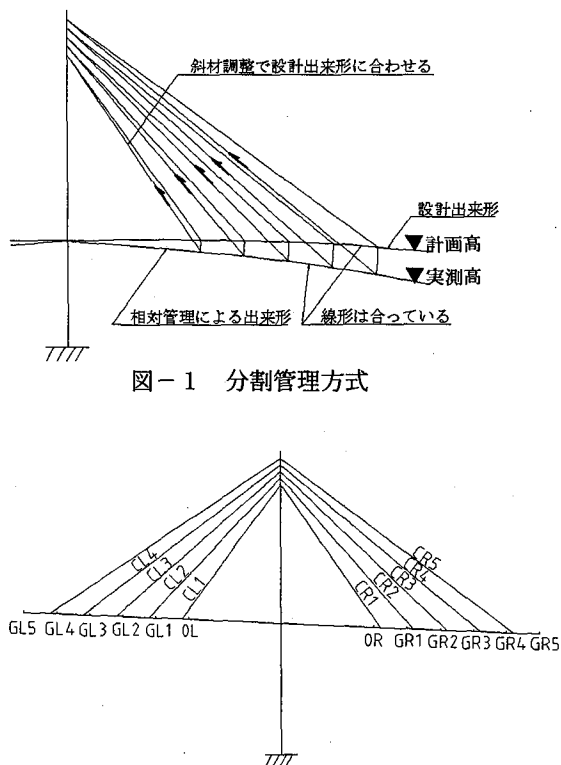


図-1 分割管理方式

図-2 解析モデル

に誤差が生じていた場合、斜材張力を調整することにより、相対管理で得た線形を保ちながら所定の計画高合わせるようにする管理である。この場合、前述した誤差要因の影響が施工管理上無視できる程度に小さければ、上越し量の変動は斜材張力の増減に帰することができ、上越しが正しければ、斜材の導入張力が正しいと評価でき、更に構造物の応力状態も精度良く管理されていることになる。

本論文では、実務的な視点から長大PC斜張橋における施工管理システムの合理化を目的に、分割管理の妥当性を考察するとともに、前述した影響要因の施工管理に及ぼす影響度を評価する。また、施工時クリープに着目して、張出し規模が200mのPC斜張橋をモデルに、施工管理および完成後の出来形に与える影響を検討する。

2. 分割管理方式の妥当性の検討

2.1 概要

分割管理方式とは、図-1に示したように型枠セット時は、主桁を設計の線形に合わせるように既設ブロックの線形から連続させる方法¹⁾で相対管理を行い、出来形高さは、斜材張力の調整により主桁を全体的に補正する絶対管理を行って合わせることを基本としている。また、分割管理方式は「途中経過の如何にかかわらず最終的に設計値通りの出来形にすることができれば、斜材張力や主桁応力は設計値通りになる」ということを前提とした

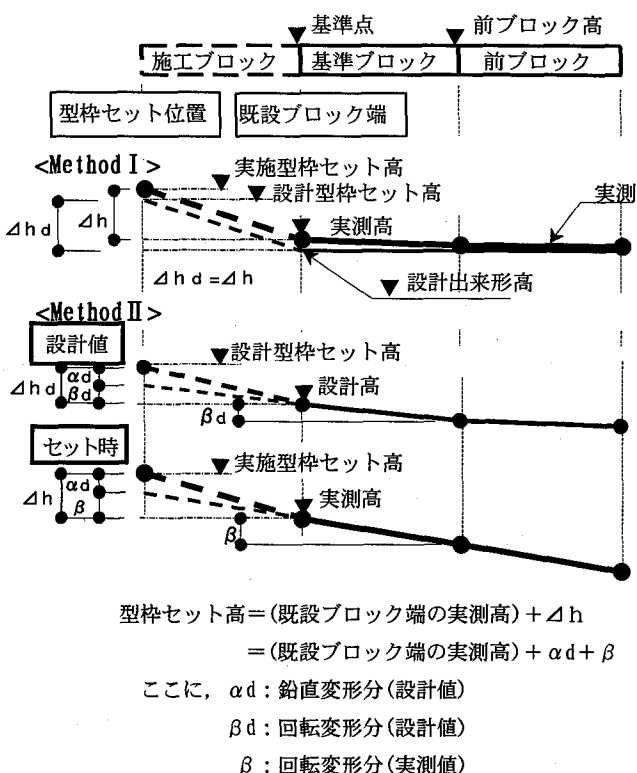


図-3 型枠セット高の決定

考え方である。そのためには、斜材張力調整後の出来形が設計値になるように型枠をセットすることが条件になる。そこで、前提条件の確認を行った上で、従来から多用されている型枠セット方法と絶対管理に基づいた型枠セット方法との違いが出来形に及ぼす影響を検討する。

2.2 施工順序による斜材張力と変形の関係

施工順序の違いによる斜材張力と変形の関係を見るため、以下に示すように、斜材導入張力を設計張力と一致させたものと、最初の斜材導入張力を設計張力の90%にし、最終的に調整して斜材張力を設計張力に一致させた2ケースで比較検討する。解析は、図-2に示すモデルで、斜材5段分について斜材張力のみを荷重として行う。

施工時の斜材張力決定法には、①1回調整法と②2回調整法がある。①の方法では斜材調整力の決定に解体計算を用いるので、斜材調整力は最終施工系に制約され自由選択の余地がない。②の方法では最初の緊張に自由選択余地があり、最適化手法導入の可能性がある。よって、2回調整法を基本と考え解析する。

Case I:斜材導入張力を設計張力と同一(導入率100%)

とし、斜材5段目までの張出し架設を行う場合

Case II:斜材導入張力を設計張力の90%(導入率90%)

とし、斜材5段目までの張出し架設を連続して

行った後、斜材を調整して導入張力を設計張力

(導入率100%)に合わせる場合

各ケースにおける斜材の設計張力および導入張力を表

-1に、主桁各ブロック先端の変形量を表-2に示す。

表－１ 斜材張力導入量（単位：kN）

Case I（導入率 100%）

（上段：増分，下段：累計）

斜材調整段階	CL 5	CL 4	CL 3	CL 2	CL 1	CR 1	CR 2	CR 3	CR 4	CR 5
1 段階					5377	5413				
					5377	5413				

5 段階	5199	-2590	-540	-355	-188	-184	-340	-511	-2550	5285
	5199	2384	2294	2848	2680	2756	2934	2421	2494	5285

Case II（１～５段階での導入率を90%とし、６段階で導入率を100%に補正）

（上段：増分，下段：累計）

斜材調整段階	CL 5	CL 4	CL 3	CL 2	CL 1	CR 1	CR 2	CR 3	CR 4	CR 5
1 段階 (導入率 90%)					4840	4872				
					4840	4872				

5 段階 (導入率 90%)	4679	-2331	-486	-319	-169	-166	-306	-460	-2295	4756
	4679	2146	2064	2563	2412	2480	2641	2179	2245	4756
6 段階 (導入率100%に補正)	521	238	229	284	268	276	294	242	249	529
	5199	2384	2294	2848	2680	2756	2935	2421	2494	5284

斜材調整対象） 1 段階：CL 1，CR 1

4 段階：CL 4，CR 4，CL 3，CR 3

2 段階：CL 2，CR 2，CL 1，CR 1

5 段階：CL 5，CR 5，CL 4，CR 4

3 段階：CL 3，CR 3，CL 2，CR 2

表－２ 変形量（単位：mm）

Case I（導入率 100%）

（上段：増分，下段：累計）

斜材調整段階	GL5	GL4	GL3	GL2	GL1	OL	OR	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5
1 段階					9.3	5.8	5.6	9.1				
					9.3	5.8	5.6	9.1				
2 段階				22.8	15.7	8.7	8.4	15.1	22.1			
				35.7	25.0	14.5	14.0	24.2	34.7			
3 段階			39.7	28.9	18.6	9.8	9.5	18.2	28.3	38.8		
			86.1	64.6	43.6	24.3	23.5	42.4	63.0	84.0		
4 段階		50.6	38.4	26.6	16.2	8.2	8.1	16.0	26.3	38.0	50.0	
		158.1	124.5	91.2	59.8	32.5	31.6	58.4	89.3	122.0	155.0	
5 段階	79.5	62.5	45.8	30.7	18.3	9.1	9.2	18.3	30.7	45.9	62.6	79.5
	271.2	220.6	170.3	121.9	78.1	41.6	40.8	76.7	120.0	167.9	217.6	267.5

Case II（１～５段階での導入率を90%とし、６段階で導入率を100%に補正）

（上段：増分，下段：累計）

斜材調整段階	GL5	GL4	GL3	GL2	GL1	OL	OR	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5
1 段階 (導入率 90%)					8.4	5.2	5.0	8.2				
					8.4	5.2	5.0	8.2				
2 段階 (導入率 90%)				20.5	14.1	7.8	7.6	13.6	19.9			
				32.1	22.5	13.1	12.6	21.8	31.2			
3 段階 (導入率 90%)			35.7	26.0	16.7	8.8	8.6	16.4	25.5	34.9		
			77.5	58.1	39.2	21.9	21.2	38.2	56.7	75.6		
4 段階 (導入率 90%)		45.5	34.6	23.9	14.6	7.4	7.3	14.4	23.7	34.2	45.0	
		142.3	112.1	82.1	53.8	29.3	28.4	52.6	80.4	109.8	139.5	
5 段階 (導入率 90%)	71.6	56.3	41.2	27.6	16.5	8.2	8.3	16.5	27.6	41.3	56.3	71.6
	244.1	198.5	153.3	109.7	70.3	37.4	36.7	69.0	108.0	151.1	195.8	240.8
6 段階(導入率 100%に補正)	27.1	22.1	17.0	12.2	7.8	4.2	4.1	7.7	12.0	16.8	21.7	26.7
	271.2	220.6	170.3	121.9	78.1	41.6	40.8	76.7	120.0	167.9	217.5	267.5

注）位置は各ブロック先端

表－１では、Case Iにおける斜材５段階調整後（５段階）の累加張力と、Case IIにおける斜材張力補正調整後（６段階）の累計張力が一致しており、また、表－２では、Case Iにおける斜材５段階調整後（５段階）の累計変形量と、Case IIにおける斜材張力補正調整後（６段階）の累計変形

量が一致している。補正調整後の斜材張力を設計値に合わせれば変形も設計値通りになることから、最終的に設計値通りの出来形にすることができれば、斜材張力や主桁応力は設計値通りになることが確認できる。

2. 3 型枠セット方法と出来形の関係

2. 2の結果により、①斜材張力を除く施工中の各荷重、②部材剛性、③温度変化、④計測誤差 および ⑤コンクリートのクリープ等の影響が施工管理上無視できる程度であるならば、主桁出来形における設計値との差異は、斜材張力の設計値との差異に起因するといえることができる。

ただし、斜材張力補正調整後の出来形が設計値になるように型枠をセットすることが条件である。よって、型枠セット方法と出来形の間を関係を検討する。

型枠のセット方法は、従来から採用されている型枠セット方法 (Method I) と提案の方式に基づいた型枠セット方法 (Method II) の2つとし、分割管理方式を採用した場合における出来形精度のシミュレーションを行う。なお、以下並びに図-3で、Method I および Method II による型枠セット高の決定方法を説明する。

Method I : 設計型枠セット高と基準点の設計出来形高さとの差を型枠セット量として、基準点の実測高に加えて型枠セット高とする方法

Method II : Method I の型枠セット量を回転分と鉛直分

表-3 シミュレーション結果 (Method I) (半橋分)

Case I (導入率 100%)		単位:mm					
位置 (ブロック)		GL5	GL4	GL3	GL2	GL1	OL
① 計 画 高		1290.0	1032.0	774.0	516.0	258.0	0.0
② 最終上げ越し量		-79.5	-113.1	-123.9	-109.0	-78.1	-41.6
③ 型 枠セット高		1210.5	918.9	650.1	407.0	179.9	-41.6
④ 型 枠セット量		241.0	229.1	220.3	217.8	221.5	-
1 段階	増分変位					9.3	5.8
	累計変位				型枠セット	9.3	5.8
2 段階	増分変位				22.8	15.7	8.7
	累計変位			型枠セット	22.8	25.0	14.5
3 段階	増分変位			39.7	28.9	18.6	9.8
	累計変位		型枠セット	39.7	51.7	43.6	24.3
4 段階	増分変位		50.6	38.4	26.6	16.2	8.2
	累計変位	型枠セット	50.6	78.1	78.3	59.8	32.5
5 段階	増分変位	79.5	62.5	45.8	30.7	18.3	9.1
	累計変位	79.5	113.1	123.9	109.0	78.1	41.6
⑤ 完成時出来形		1290.0	1032.0	774.0	516.0	258.0	0.0
⑥ 計画高との差 (⑤-①)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

注記) ②最終上げ越し量=-(最終施工段階での累計変位)、③型枠セット高=(①計画高)+(②最終上げ越し量)
④型枠セット量=(当該ブロック③型枠セット高)-[(前ブロック累計変位)+(前ブロック③型枠セット高)]
→設計出来形高さ

⑤完成時の出来形=(③型枠セット高)+(最終施工段階での累計変位)

Case II (1~5段階での導入率を90%とし、6段階で導入率を100%に補正)		単位:mm					
位置 (ブロック)		GL5	GL4	GL3	GL2	GL1	OL
① 計 画 高		1290.0	1032.0	774.0	516.0	258.0	0.0
② 最終上げ越し量		-98.7	-123.9	-128.5	-110.3	-78.1	-41.6
③ 型 枠セット高		1198.2	911.7	646.9	406.1	179.9	-41.6
④ 型 枠セット量		241.0	229.1	220.3	217.8	221.5	-
1 段階 (導入率 90%)	増分変位					8.4	5.2
	累計変位				型枠セット	8.4	5.2
2 段階 (導入率 90%)	増分変位				20.5	14.1	7.8
	累計変位			型枠セット	20.5	22.5	13.1
3 段階 (導入率 90%)	増分変位			35.7	26.0	16.7	8.8
	累計変位		型枠セット	35.7	46.5	39.2	21.9
4 段階 (導入率 90%)	増分変位		45.5	34.6	23.9	14.6	7.4
	累計変位	型枠セット	45.5	70.3	70.5	53.8	29.3
5 段階 (導入率 90%)	増分変位	71.6	56.3	41.2	27.6	16.5	8.2
	累計変位	71.6	101.8	111.5	98.1	70.3	37.4
6 段階 (導入率100%に補正)	増分変位	27.1	22.1	17.0	12.2	7.8	4.2
	累計変位	98.7	123.9	128.5	110.3	78.1	41.6
⑤' 完成時出来形 (6段階前出来形)		1263.0	1010.1	757.1	503.9	250.2	-4.2
⑥' 計画高との差 (⑤' -①)		-27.0	-21.9	-16.9	-12.1	-7.8	-4.2
⑤ 完成時出来形 (6段階後出来形)		1296.9	1035.6	775.4	516.4	258.0	0.0
⑥ 計画高との差 (⑤-①)		6.9	3.6	1.4	0.4	0.0	0.0

注記) ①④はCase I と同一値、②⑤はCase I と同じ計算過程
③型枠セット高=(前ブロック③型枠セット高)+(前ブロック累計変位)+(④型枠セット量) *
* 斜材導入率が設計値と違うためCase I の計算過程と異なる

(設計型枠セット量－設計回転分)に分け、鉛直分に実測回転分を加えたものを型枠セット量とし、基準点の実測高に加え型枠セット高とする方法

解析は、ケースおよび方法を2. 2と同じにする。Method I のシミュレーション結果を表-3に、Method II のシミュレーション結果を表-4に示す。

この結果、Method I の方法を用いる場合、Case II で計

画高と出来形との間に 6.9mm の差が生じるのに対し、Method II の方法を用いる場合は、両者が良く一致することが分かる。

よって、Method II の方法を用いて型枠をセットするならば、施工中の変形をその時点の設計上の出来形に合わせる管理(絶対管理)を行うことにより、主桁の応力および斜材張力を設計値に合わせることが可能であるといえる。

表-4 シミュレーション結果 (Method II) (半橋分)

Case I (導入率 100%)

単位:mm

位置 (ブロック)		GL5	GL4	GL3	GL2	GL1	OL
① 計 画 高		1290.0	1032.0	774.0	516.0	258.0	0.0
② 最終上げ越し量		-79.5	-113.1	-123.9	-109.0	-78.1	-41.6
③ 型 枠セット高		1210.5	918.9	650.1	407.0	179.9	-41.6
④ 型 枠セット量		241.0	229.1	220.3	217.8	221.5	—
(鉛直分)		-0.3	-2.0	-4.6	-7.2	—	—
(回転分)		241.3	231.1	224.9	225.0	—	—
1 段階	増分変位					9.3	5.8
	累計変位				型枠セット	9.3	5.8
2 段階	増分変位				22.8	15.7	8.7
	累計変位			型枠セット	22.8	25.0	14.5
3 段階	増分変位			39.7	28.9	18.6	9.8
	累計変位		型枠セット	39.7	51.7	43.6	24.3
4 段階	増分変位		50.6	38.4	26.6	16.2	8.2
	累計変位	型枠セット	50.6	78.1	78.3	59.8	32.5
5 段階	増分変位	79.5	62.5	45.8	30.7	18.3	9.1
	累計変位	79.5	113.1	123.9	109.0	78.1	41.6
⑤ 完成時出来形		1290.0	1032.0	774.0	516.0	258.0	0.0
⑥ 計画高との差 (⑤-①)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

注記) ①はMethod I Case I と同一値、②③④⑤はMethod I Case I と同一計算過程

Case II (1~5段階での導入率を90%とし、6段階で導入率を100%に補正)

単位:mm

位置 (ブロック)		GL5	GL4	GL3	GL2	GL1	OL
① 計 画 高		1290.0	1032.0	774.0	516.0	258.0	0.0
② 最終上げ越し量		-98.7	-123.9	-128.5	-110.3	-78.1	-41.6
③ 型 枠セット高		1191.4	908.3	645.6	405.8	179.9	-41.6
④ 型 枠セット量		237.6	227.0	219.3	217.5	221.5	—
(鉛直分)		-0.3	-2.0	-4.6	-7.2	—	—
(回転分)		237.9	229.0	223.9	224.7	—	—
1 段階 (導入率 90%)	増分変位					8.4	5.2
	累計変位				型枠セット	8.4	5.2
2 段階 (導入率 90%)	増分変位				20.5	14.1	7.8
	累計変位			型枠セット	20.5	22.5	13.1
3 段階 (導入率 90%)	増分変位			35.7	26.0	16.7	8.8
	累計変位		型枠セット	35.7	46.5	39.2	21.9
4 段階 (導入率 90%)	増分変位		45.5	34.6	23.9	14.6	7.4
	累計変位	型枠セット	45.5	70.3	70.5	53.8	29.3
5 段階 (導入率 90%)	増分変位	71.6	56.3	41.2	27.6	16.5	8.2
	累計変位	71.6	101.8	111.5	98.1	70.3	37.4
6 段階 (導入率100%に補正)	増分変位	27.1	22.1	17.0	12.2	7.8	4.2
	累計変位	98.7	123.9	128.5	110.3	78.1	41.6
⑤' 完成時出来形 (6段階前出来形)		1263.0	1010.1	757.1	503.9	250.2	-4.2
⑥' 計画高との差 (⑤' -①)		-27.0	-21.9	-16.9	-12.1	-7.8	-4.2
⑤ 完成時出来形 (6段階後出来形)		1290.1	1032.2	774.1	516.1	258.0	0.0
⑥ 計画高との差 (⑤-①)		0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0

注記) ①はMethod I Case II と同一値、②③⑤はMethod I Case II と同一計算過程

④型枠セット量= (鉛直分) + (回転分)

ここで、(鉛直分)=(鉛直分(Case I))

(回転分) = (前ブロック型枠セット高) + (前ブロック累計変位) - [(前々ブロック型枠セット高) + (前々ブロック累計変位)]

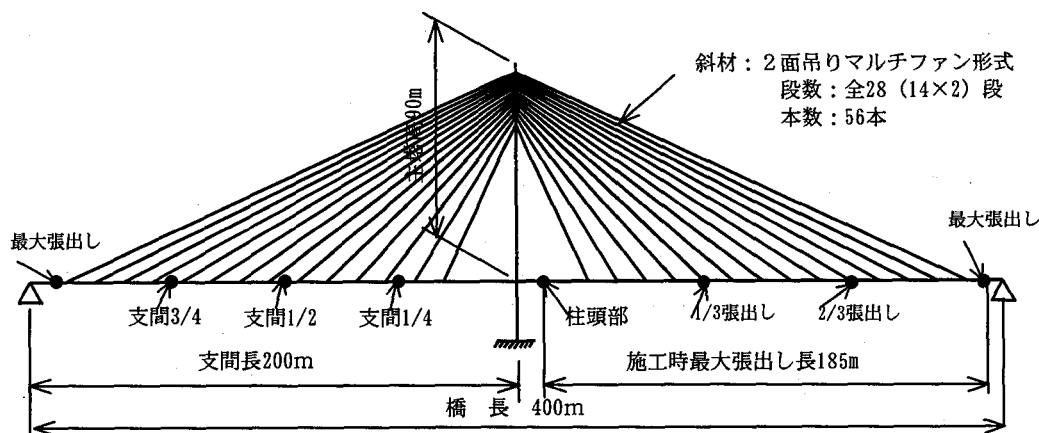


図-4 猪名川解析モデル

3. 施工管理上における誤差要因の検討

3. 1 概要

1. で述べた施工管理における誤差要因の内、計測誤差については計測を完全自動化することにより最小限に抑制するものとし、①施工中の各荷重、②部材剛性、③温度変化について、その影響度を評価する。影響度の評価は、施工時に管理できる程度に大きく、管理対象として扱うことに意味があるかどうかを判断の基準とする。すなわち、PC斜張橋の施工管理は、斜材張力の調整により所定の高さに上げ越す管理方法であり、斜材を調整する際に生じる張力の導入誤差を基準とする。

そこで、既存の研究成果および実績に基づいてケーブルのクリープ・リラクセーション、斜材張力導入時のジャッキおよび計器の誤差を検討し、現状ではやむを得ないと考えられる斜材張力の導入誤差を推定する。

なお、図-4に、以下の解析を行った構造モデルの概要および解析位置を示す。

3. 2 斜材の誤差要因

(1) ケーブルのクリープ・リラクセーション

文献²⁾に、 $\phi 7\text{mm}$ 亜鉛メッキ鋼線を用いた素線 (SWRS82B) と工場製作ケーブル (SWRS82B $\phi 7-421$) を用いたケーブルのクリープ・リラクセーションおよび鋳込み合金タイプ定着体の抜け出し量に関する実験結果が示されている。素線のクリープ量は、常温 ($21\pm 1^\circ\text{C}$) で一定引張応力 628N/mm^2 (0.4Pu : Pu は引張強さ) を負荷した場合、1,000時間後で1.56%である。リラクセーションは、常温 ($21\pm 1^\circ\text{C}$) および $60\pm 1^\circ\text{C}$ の2ケースで初期応力 628N/mm^2 (0.4Pu) を負荷した場合、1,000時間後でそれぞれ1.73%、2.01%である。素線を束ねたことによる影響は、これより小さく各々1%程度になっているが、実験方法の問題を指摘している。定着体の抜け出し量は、ケーブルの長さに関係なく一定で2.2mmである。

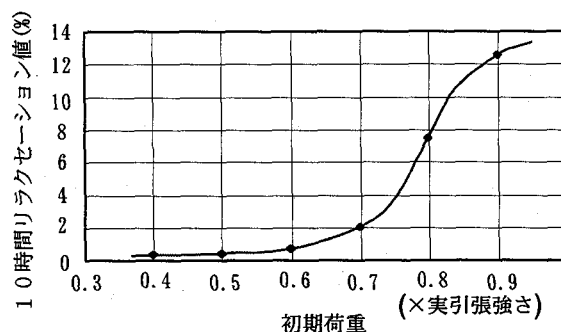


図-5 初期荷重とリラクセーション値の関係

これらの結果から、常温におけるSWRS82B $\phi 7-421$ について、長さ100m、200m、400mの斜材で、ケーブルのクリープ・リラクセーションを推定している。この推定値を参考に、斜材長100~200m (実績³⁾は、76.9~207m) の平均的な値を推定すると、ケーブルのクリープおよびリラクセーション量はともに、1.9~2.6%になる。

ケーブルのクリープ・リラクセーションは、初期応力、温度等およびコンクリートの乾燥収縮、クリープ等に影響される。また、ケーブルのクリープ・リラクセーションは、1,000時間を基準にすることが多い。しかし、時間経過とともに大きくなる傾向があり、リラクセーションの終局値は、1,000時間リラクセーション値の3倍程度⁴⁾になる。実際では、斜材ごとに経過時間が異なる。

初期応力については、 $\phi 7\text{mm}$ 亜鉛メッキ鋼線で初期応力を実引張強さの40~90%として10時間リラクセーションの測定結果⁴⁾を図-5に示す。この結果から、リラクセーションは、初期応力が 0.6Pu 以上では急激な増加を示し、 0.6Pu の場合、 0.4Pu の2倍程度になる。実績³⁾では、施工時の斜材最大応力を 0.6Pu まで許容した。斜材は、2段階に分けて緊張 (1次調整および2次調整) し、3段階でゆるめる (3次調整) 調整方法によったため、1次調整では、概ね 0.4Pu を下回っていたが、2次調整以降は概ね $0.4\sim 0.6\text{Pu}$ 間で変化をしていた。

表-5 リラクゼーション値の比較

種 類	10時間リラクゼーション値				
	試験数 n	平均 X(%)	標準偏差 σ (%)	最大値 Xmax (%)	最小値 Xmin (%)
※φ7mm P C鋼線	128	1.46	0.36	2.22	0.83
P C鋼より線	123	1.72	0.36	2.46	0.90

※ ブルイグ材を用いている。亜鉛メッキ鋼線はブルイグ材と同等である

リラクゼーション値は、 $60\pm1^{\circ}\text{C}$ では常温($21\pm1^{\circ}\text{C}$)に比べ1.16倍程度になる。実績³⁾の斜材温度測定結果では、日変化および季節変化で、 $-5\sim37^{\circ}\text{C}$ 間で変化をしていた。

従来の施工管理では、一般的に施工時クリープの影響は考慮していないことから、純リラクゼーションを採用する必要があると考えられる。しかし、この場合においてもP C斜張橋では、ケーブルに段階的なひずみ変化を与える結果になることから、見かけのリラクゼーション値に近づく傾向が考えられる。コンクリートの乾燥収縮、クリープを考慮した場合、見かけのリラクゼーション値は純リラクゼーション値の60~70%程度⁴⁾になる。

また、表-5にP C鋼材のリラクゼーション試験結果を統計的にまとめたもの⁴⁾を示すが、標準偏差が0.36(%)で、φ7mm P C鋼線のリラクゼーション値そのものにもかなり大きなバラツキがあることが分かる。

これらを総合するとともに既往の採用値を参考に、実績³⁾では、ケーブルのクリープ・リラクゼーションとして斜材1次および2次調整時に3%を見込んでいる。しかし、上述のように、ケーブルのクリープおよびリラクゼーションは、様々な条件で大きく変化することから、確かな値を設定することが極めて難しく、不確定要素を含んだ3%であり、斜材張力管理上の大きな課題である。

(2) ジャッキ

斜材の調整は、ジャッキ、電動ポンプを用いて行う。実績³⁾では、ジャッキの導入力は、電動ポンプの荷重計の示度によらずジャッキに高容量圧力計(ひずみゲージ

式変換器)を付ける方法で測定した。ジャッキのキャリブレーションは、容積型力計で行った。表-6に、ジャッキのキャリブレーション誤差および容積型力計、高容量圧力計の公称誤差を示す。

この結果から、斜材調整機器の誤差は合計で $\pm 2.2\%$ になる。なお、斜材導入張力に2.2%の誤差が生じた場合、主桁変形量に与える影響は、図-6に示すように最大48mm程度になる。この他、施工管理に影響を与えられる誤差要因として、ケーブルの摩擦によるロスがある。既存のP C斜張橋において、斜材定着側にロードセルを設置して、斜材調整機器の誤差およびケーブルの

表-6 斜材調整機器の誤差

品 名	型式・能力	誤差 (%)
ジャッキ	10.79 MN	± 1.0
容積型力計	9.807 MN	± 0.2
高容量圧力計	196 MP	± 1.0

摩擦を含めた導入力ロスを測定した結果、3~5%であったという報告⁵⁾がある。

(3) 斜材張力導入誤差による影響

既往のP C斜張橋で、斜材張力導入時における不確定値が合計で5~8%に及んでいる。また、実績³⁾では、5.2%を考えている。これらより、本検討における不確定値は、下限値と考えられる5%と仮定した。

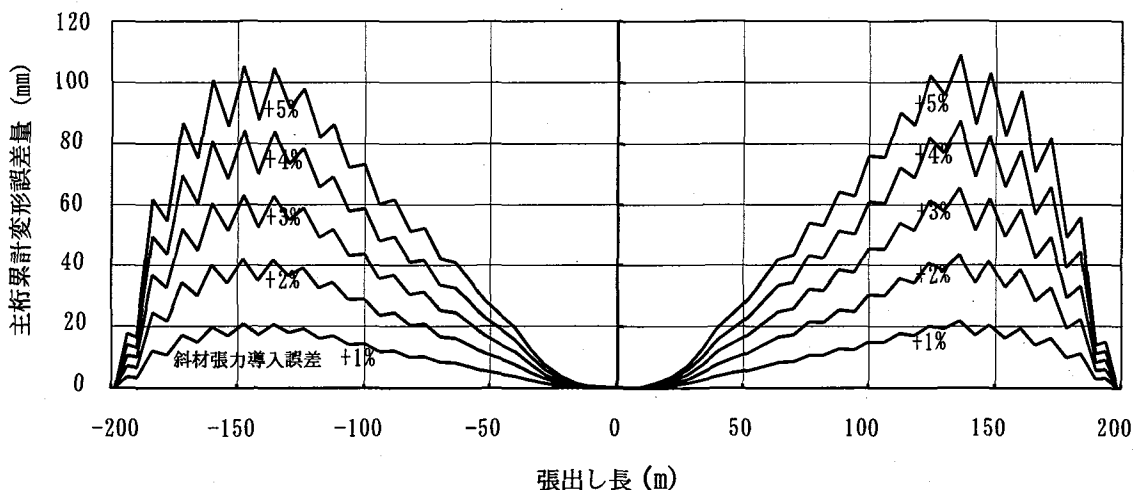


図-6 斜材張力導入誤差が主桁累計変形量に与える影響

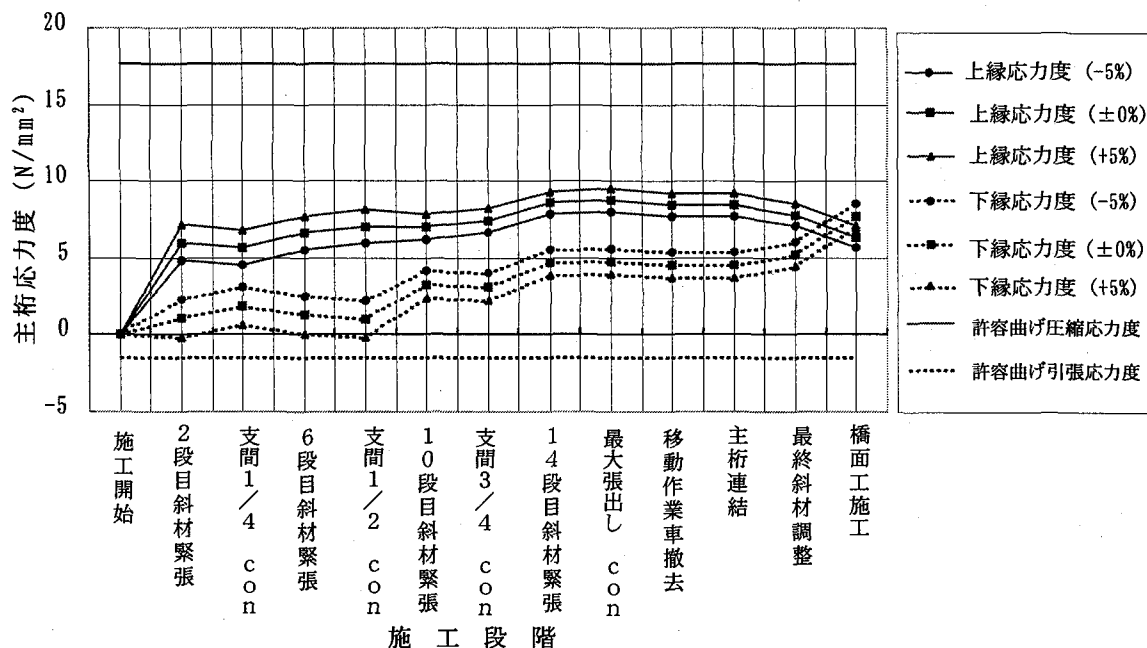


図-7 斜材張力導入誤差量が主桁応力度に与える影響（施工段階毎変化，柱頭部断面）

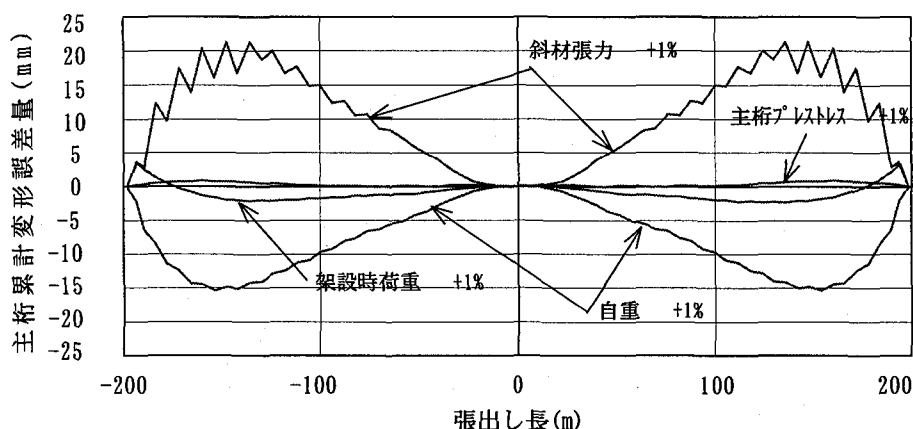


図-8 施工中の各荷重誤差が主桁累計変形量に与える影響

各段階の斜材張力導入時に、一律1～5%の誤差が生じた場合、主桁張出し最終段階までに累積される各ブロック先端における変位の誤差を図-6に示す。1%で最大22mm、5%で最大109mmの誤差が生じることになる。また、斜材張力の導入誤差が一律±5%の場合、主桁応力度（柱頭部断面）に与える影響を図-7に示す。ブロック張出し初期に影響が大きい、許容応力を十分満足している。

3.3 誤差要因の影響度評価

(1) 施工中の各荷重

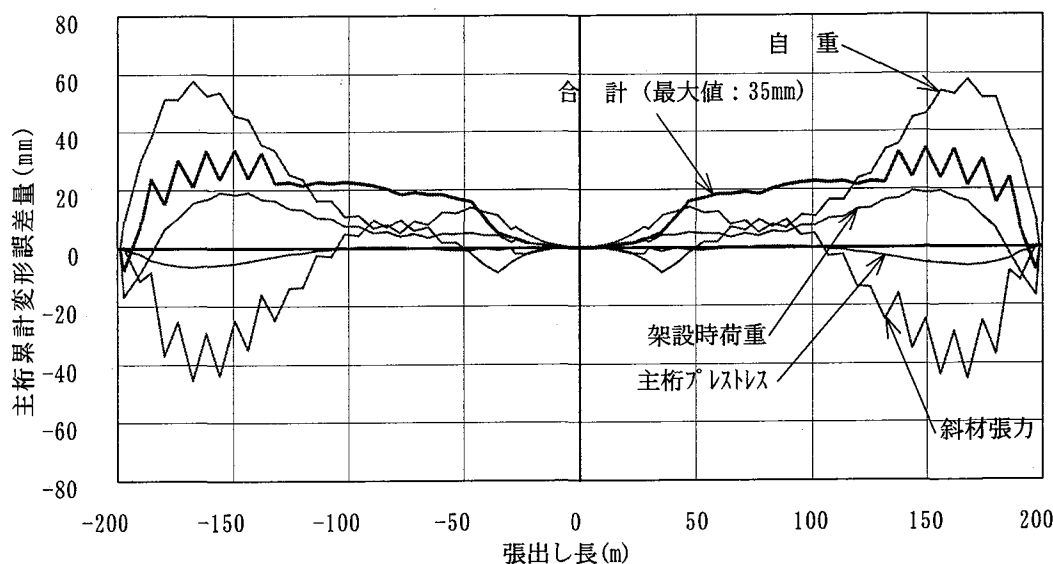
施工中の各荷重に関しては、完成系にも影響を与える持続荷重と施工の進捗に合わせて移動し施工後撤去される架設時荷重に分け、その影響を評価する。これらの影響については、図-8に示す。完成系にも影響を与える自重の影響が大きく、斜材張力の誤差が主桁変形量に与

える影響度の約75%になる。架設時荷重に対しては、斜材の不確定値に比べその影響度が小さい。

(2) 部材の剛性

道路橋示方書⁶⁾に準拠して、 $f'_{ck} = 39.2 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートに対するヤング係数(E_c)を $E_c = 30.4 \text{ KN/mm}^2$ とした。ヤング係数(E_c)が約15%増の 34.8 KN/mm^2 に変動した場合について、主桁変形に与える影響を図-9に示す。また、ヤング係数(E_c)が $26.0 \sim 34.8 \text{ KN/mm}^2$ まで変動した場合の主桁応力度に与える影響を図-10に示す。ヤング係数の変動が主桁変形に与える影響は、最大35mmで、斜材張力導入誤差量に換算すると、約1.5%に相当する。また、応力度に与える影響は、小さく十分許容値を満足する。

(3) 温度変化



($E_c: 30.4 \text{ KN/mm}^2 \rightarrow 34.8 \text{ KN/mm}^2$)

図-9 ヤング係数の誤差が完成時の主桁累計変形量に与える影響

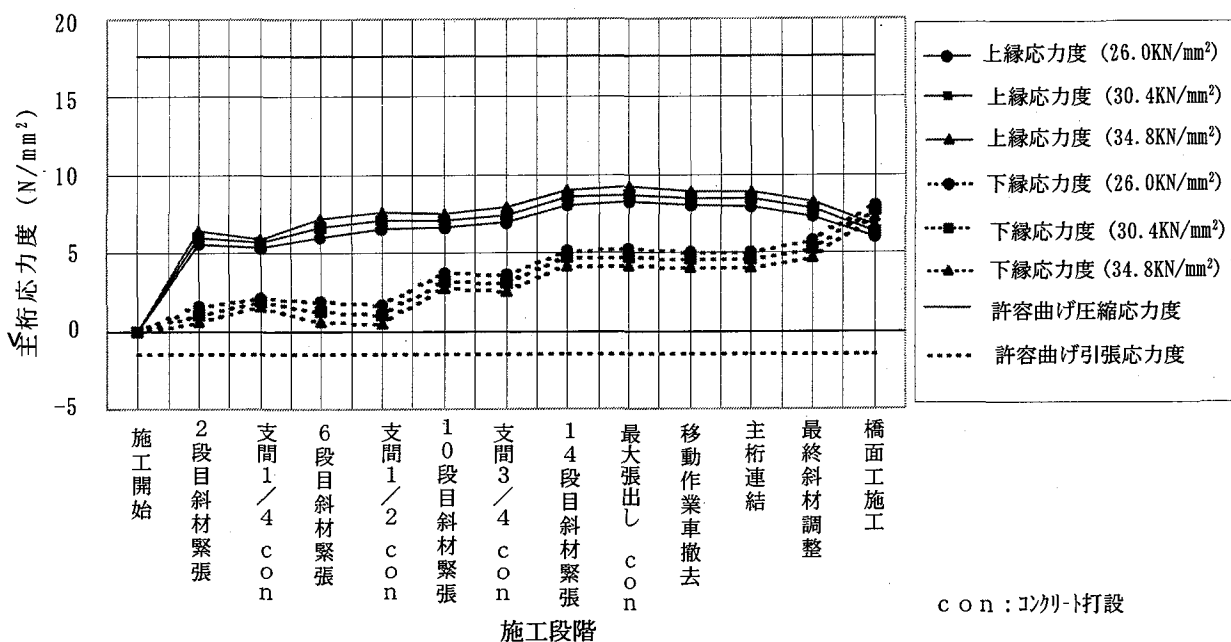


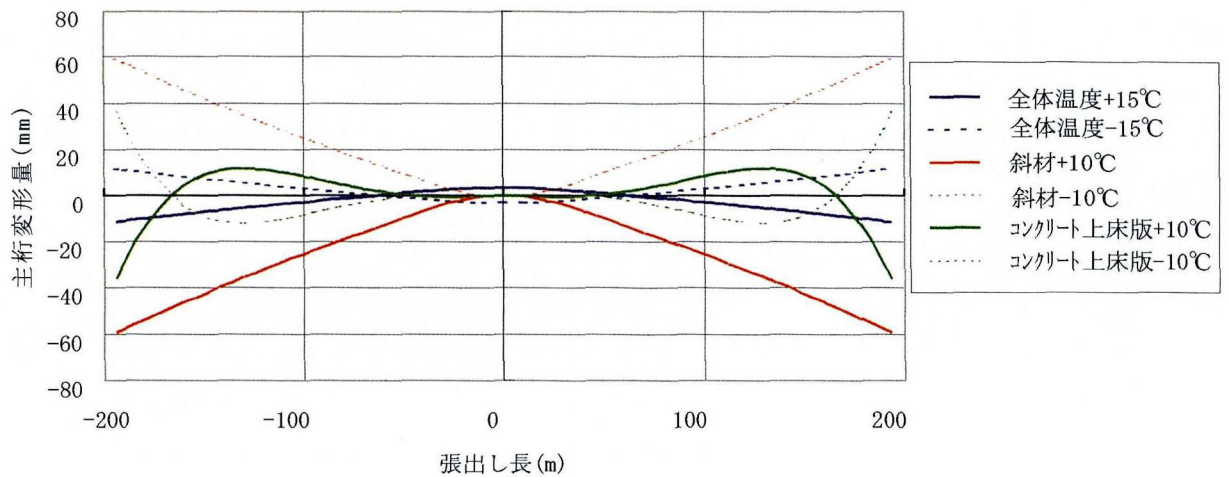
図-10 ヤング係数誤差量が主桁応力度に与える影響 (施工段階毎変化, 柱頭部断面)

施工管理上における部材全体温度の変化 (年変化) に対する影響は、小さいことが 図-11および既往の実績⁷⁾からも確認されている。部材間 (斜材とコンクリート上・下床版) 温度差 (日変化) に対しては、図-11に示すように、最大 60mmで主桁の変形に対する影響が大きい。しかしこれは、斜材とコンクリート上・下床版の温度差がなくなる時には影響がなくなる。図-12に示す実測から、斜材とコンクリート上・下床版の温度差がほとんどなくなる時刻 (午前11時頃) があることが理解できる。しか

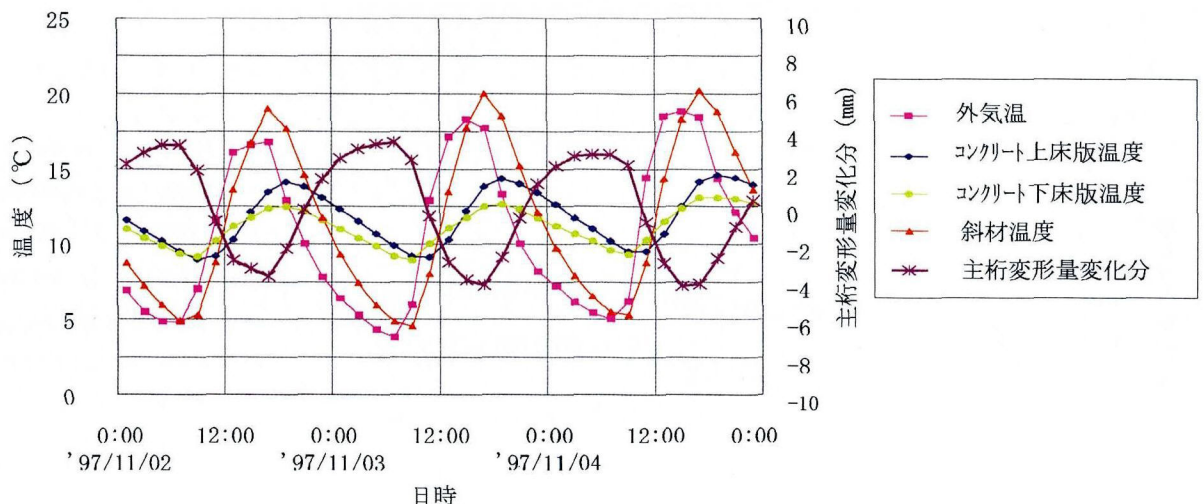
も、主桁変形の変化が外気温の変化に追従する。

4. 施工管理に関する考察

PC斜張橋の施工管理において、斜材・主桁の設計諸係数および施工誤差その他の不確定値が混在することは現状では避けることが難しい。PC斜張橋の出来形は斜材張力の調整により管理するという基本思想を徹底する。そして、施工中に生じる諸々の誤差要因を斜材張力管理



図－１１ 温度荷重（全体温度差および部材間温度差）が主桁変形量に与える影響



図－１２ 各部材温度および主桁変形量変化分（同一断面着目）の実測結果

に反映させ、いかに斜材張力を導入するかを管理すべきであると考ええる。

正確な斜材張力導入を張力自体の計測に求めるのは、ケーブルのクリープ・リラクレーションおよび計測精度を考慮すると困難であり、分割管理方式が考えられる。すなわち、前述の方法で型枠セット時の相対管理を行い、主桁の上越し誤差の推移を管理して、一定の傾向をつかみ、必要に応じてある段階ごとに絶対管理で変形を補正することで、所定の設計上越し高さに調整していく施工管理システムが望ましいと考える。

この方法では、主桁応力度の許容範囲および斜材調整の可能範囲を限度として相対管理にある程度の誤差を許容する考え方が必要になる。そして、主桁の上越し誤差の傾向を早期かつ正確に発見する管理が重要になる。

なお、施工管理に影響を及ぼす誤差要因については以下のように考える。

施工中の各荷重については、自重の影響が大きい。自重の誤差に関しては、絶対管理における斜材張力で補正することになるが、完成系に対しても大きな影響を持つことから、設計数量を正確に算出するとともに施工を慎重に行うべきである。架設時荷重に関しては、分割管理方式における絶対管理に対する影響は小さく無視できるが相対管理に影響を及ぼすことが考えられる。架設時荷重の変動を把握することは難しいが、主桁の施工をシステム化することで、荷重の補正を必要としない施工環境を創り出すことは可能である。すなわち、斜材張力導入時の架設時荷重を一定にすることができる。

部材剛性の影響は、斜材が有する不確定度から判断し

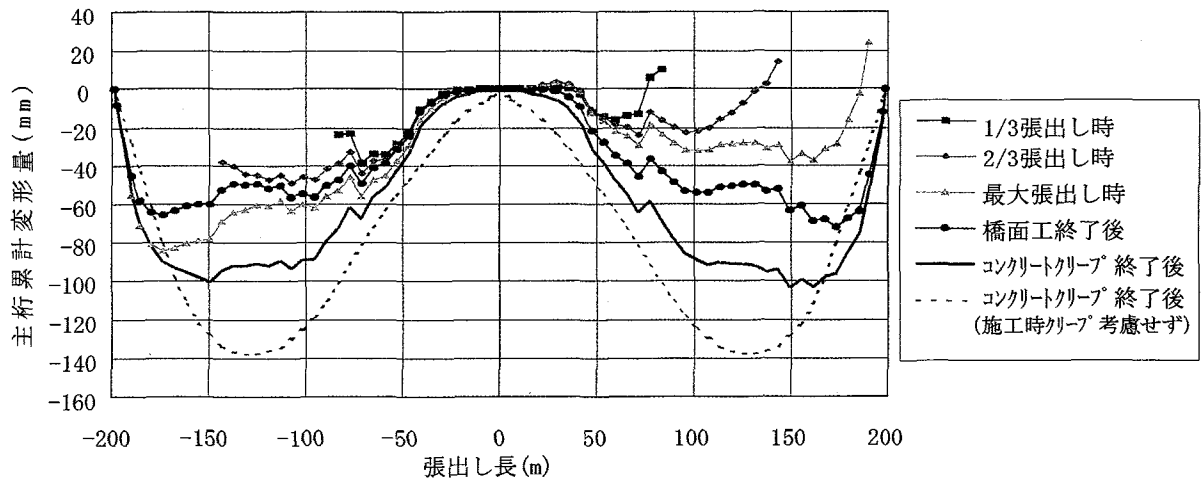


図-13 施工段階別主桁累計変形量分布（施工時クリープ考慮）

て、実務的な施工管理システムにおいて考慮する必要がないものと考えられる。

温度変化の影響について、主桁の応力上からは、ほとんど問題にならないが、主桁の変形および斜材の張力には大きな影響を及ぼす。しかし、問題になるのは部材間温度差（斜材とコンクリート上・下床版）であり、ほぼ一定になる時刻がある、また、温度変化が急激ではない場合、主桁のたわみ変化が十分気温の変化に追随するので、同時刻の温度を用いて計算した温度補正も正確にできることが確認されている。従って、温度変化の影響は大きい管理を難しくする要因ではない。

5. 長大PC斜張橋における施工中クリープの検討

これまでのPC斜張橋では、一般的に、施工時に生じるコンクリートのクリープ・乾燥収縮は考慮せずに、主桁連結後から生じるものと仮定し、適切な部材区分ごとの平均材齢からコンクリートのクリープ係数・乾燥収縮度を与えて出来形および応力を算定している。これは、大きい張出し規模および特殊な構造を除いてその影響が小さく、斜材張力の調整で消去できることが確認された既往の施工時要因解析の結果⁷⁾に基づいている。

しかし、PC斜張橋の長大化に伴って、施工時クリープが、施工管理上および完成後の出来形・応力に影響を及ぼすことが考えられるため、張出し規模が200m（ブロック長6m）のPC斜張橋で施工時クリープの影響に関する検討⁸⁾を行った。施工時クリープの算定に用いるコンクリートのクリープ係数は、道路橋示方書⁶⁾に準拠し、実施の工程より求めた主桁のコンクリート材齢に基づいて求めた。また、荷重としては、自重、プレストレス力、斜材調整力の他、架設時荷重として移動作業車、作業荷重等を考慮した。

図-13に、施工時クリープを考慮した場合に関する最大張出し後、連結後における橋面工終了後、および完成後におけるコンクリートのクリープ終了後のクリープ変形量並びに施工時クリープを考慮しない場合に関する完成後におけるコンクリートのクリープ終了後のクリープ変形量を示す。

これらの結果から、最大張出し時の変形は、施工時クリープを考慮した場合としない場合で、最大張出し後に、最大86mmの差が生じ、斜材張力導入誤差量に換算すると約4%程度にもなり、施工管理に考慮する必要があるものと考えられる。また、完成後におけるコンクリートのクリープ終了後の変形量は、施工時クリープを考慮した場合としない場合で、最大48mmの差が生じる。

長大化に伴って施工時クリープの影響が大きくなるのは、斜材の剛性が相対的に小さくなることや主桁応力の変動が異なってくること等が考えられる。また、長大PC斜張橋で施工時クリープを考慮した場合としない場合で、完成後におけるコンクリートのクリープ終了後のクリープ変形量の相異が顕著になるのは、施工時クリープによる不静定力の影響が長大化に伴って大きくなるためと考えられる。

6. まとめ

長大PC斜張橋では、施工管理に影響を与える様々な誤差要因の影響度が大きく、膨大な解析および補正に多大な労力を要してきた。本論文では、実務的な視点に立脚して施工管理システムを合理化する目的で、施工管理システムの基本思想および着目点を明確にし、分割管理方式を提案した。また、施工時クリープが施工管理および完成後の出来形に与える影響を明らかにするため、張出し規模が200mのPC斜張橋をモデルに検討した。

施工管理システムに関しては、施工管理上の不確定値は不確定値として位置付けその影響度を評価することで、着目点を出来形の管理において、線形に着目した絶対管理と出来形を斜材張力で調整することに徹した絶対管理の併用を基本とする。そのためには、主桁変形の経時変化を正確に捉える必要があり、自動計測システムを導入することが望ましい。

施工時クリープに関しては、張出し規模が 200m の PC 斜張橋について、施工管理に与える影響が大きいこと、施工時クリープを考慮しない場合、完成後の出来形に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。

今後、分割管理方式の視点に立ったデータの蓄積・分析がなされるならば、絶対管理が省略できるものと考えられる。また、施工時クリープについては、張出し規模およびブロック長の相異による傾向および標準的な影響度が把握できるものと考えられる。

謝辞：本論文では、神鋼鋼線工業（株）からご提示頂いた貴重な資料を使わせて頂いた。また、鹿島建設が携わった PC 斜張橋の実績を参考にした。解析および実測結果は新猪名川大橋（阪神高速道路公団）施工時の資料によった。コンクリートのクリープ解析については、鹿島建設技術研究所村山八洲雄博士に多大な助言と協力を賜った。この場をお借りして関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 蓮池博, 浅見佳久, 大澤照夫, 大西俊彦, 和田卓也: 秩父公園橋の施工, 橋梁と基礎, Vol. 28, No. 10, pp. 2 ~ 6, 1994
- 2) 坂本良文, 江口立也, 北條哲男, 木村敏, 和田克哉: プレ防食型斜張橋用ケーブルのクリープ, リラクセーションに関する実験的検討, 橋梁と基礎, Vol. 26, No. 3, pp. 27 ~ 32, 1992
- 3) 鳥谷越社二, 奥田英晶, 横山雅臣, 山内丈樹: 新猪名川大橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol. 31, No. 10, pp. 2 ~ 7, 1997
- 4) 神鋼鋼線工業株式会社研究開発部第 2 研究室: PC 鋼材のリラクセーション特性, 1980. 9
- 5) 北海道開発局帯広開発建設部: 十勝大橋工事誌, 1998. 3
- 6) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編 III コンクリート橋編), 1996. 8
- 7) 建設省近畿地方建設局大滝ダム工事事務所: 白屋橋工事記録, 1991. 3
- 8) H. リュッシュ, D. ユンクビルト (百島祐信訳): コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976

(1999年9月17日受付)