

V-326

PC斜張橋の最適設計における最適化規準の検討

住友建設 榑 正員 ○玉置 一清 神戸大学工学部 正員 宮本 文徳
神戸大学工学部 正員 森川 英典 榑神戸製鋼所 正員 神田 正夫

1.はじめに コンクリート橋の長大化を目指す構造形式として近年最も注目を集めているものにPC斜張橋がある。その長大化の限界は主塔付近の主桁に生じる軸圧縮力より決定され、700mまで可能とされているが¹⁾、現在での当該形式橋梁の最大スパンは約7年前に完成したLunna橋の440m、国内においては呼子大橋の250mとなっており今後の発展が期待されている。そこで、本研究は、PC斜張橋の長大化に伴う重要な問題点の一つであるクリープの問題に着目し、従来、変形の制約条件から決定されていた斜材調整力決定にひずみエネルギーを目的関数とした最適化手法を取入れ、長大マルチケーブル形式モデルに適用することによりクリープ抑制手法を示唆し、長大PC斜張橋の合理的な設計の確立を目指すものである。

2.クリープによる断面力変化 PC斜張橋はコンクリート部材と鋼部材という全くクリープ性状の異なる部材より構成されているために、コンクリート部材である主桁や主塔のクリープが鋼部材である斜材によって拘束され、斜材張力が変化する。ここで、主塔・主桁の斜材定着点の相対変位の適合条件式は、

$$[S]\{P_{\varphi}\} + ([D_0] + [G]\{P\})\varphi + [G]\{P_{\varphi}\} \frac{\varphi}{1 - \exp(-\varphi)} = 0 \quad (1)$$

ここで、 φ ：クリープ係数、 $[S] = [\delta_{ijs}]$ ：単位張力による斜材伸び量

$[G] = [\delta_{ijs}]$ ：j番目斜材の単位張力によるi番目斜材位置の主塔・主桁の相対変位

$\{D_0\} = \{\delta_{i0}\}$ ：斜材調整力がゼロの時の斜材位置の主塔・主桁の相対変位

で表されるため、クリープによる斜材張力変化量 $\{P_{\varphi}\}$ は、

$$\{P_{\varphi}\} = \{[I] + \frac{1 - \exp(-\varphi)}{\varphi} [G]^{-1} [S]\}^{-1} (-[G]^{-1} \{D_0\} - \{P\}) \cdot (1 - \exp(-\varphi)) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、}\{P_a\} &= -[G]^{-1} \{D_0\}, [A] = \{[I] + \frac{1 - \exp(-\varphi)}{\varphi} [G]^{-1} [S]\}^{-1} \cdot (1 - \exp(-\varphi)) \text{ とおくと、} \\ \{P_{\varphi}\} &= [A] (\{P_a\} - \{P\}) \end{aligned} \quad (3)$$

と固有張力 $\{P_a\}$ と初期の斜材調整力 $\{P\}$ の関数として表され、 $\{P_{\varphi}\}$ が $\{P_a\}$ へ向かって移行することがわかる。また、クリープによる断面力変化は単位斜材張力による断面力の影響行列 $[M_s], [N_s]$ を用いて、次式のように表せる。

$$\{\Delta M_{\varphi}\} = [M_s]\{P_{\varphi}\}, \{\Delta N_{\varphi}\} = [N_s]\{P_{\varphi}\} \quad (4)_{a,b}$$

3.最適化規準の検討 主塔及び主桁のモーメント及び軸力によるひずみエネルギーを最小化することによって、PC斜張橋のクリープによる張力変化を小さく抑える斜材張力を決定できる²⁾。そこで、モーメントのみのひずみエネルギーを目的関数としたものをⅠ規準、モーメント+軸力のひずみエネルギーを目的関数としたものをⅡ規準として、その比較検討を行う。

$$\text{Ⅰ規準} : U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx \rightarrow \min \quad (5)$$

$$\text{Ⅱ規準} : U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx + \int_0^L \frac{N^2}{2EA} dx \rightarrow \min \quad (6)$$

$$\{M\} = \{M_0\} + [M_s]\{P\}, \{N\} = \{N_0\} + [N_s]\{P\}$$

ここで、 $\{M_0\}, \{N_0\}$ ：斜材調整力がゼロの時、死荷重によって部材両端に生じる断面力

$[M_s], [N_s]$ ：単位斜材調整力による部材両端に生じる断面力の影響行列

ここで、Ⅰ規準はカステリアーノの第二定理より、主桁の斜材定着点の鉛直方向の変位最小化を意味し、従来から行われているたわみ着目法とほぼ同義である。Ⅱ規準は、主塔・主桁の斜材定着点の相対変位最小化を意味し、その無制約解は、2章で示した固有張力 $\{P_a\}$ に一致する。

次に制約条件として、斜材張力が最適化の結果、負値となるのを避けるために斜材張力量に適当な下限

値を設ける。本研究では、下限値を単純にゼロとする場合とケーブル部材が線形と見なせる範囲としてErnstの式を展開した次式とする場合を考える。

$$P_{min} = \left(\frac{\lambda \cdot (\rho \cdot S \cdot \cos \alpha)^2}{12(1-\lambda)} \right)^{(1/3)} \cdot A_p \quad (7)$$

ここで、 ρ ：斜材の単位体積あたりの重量、 S ：斜材の長さ、 α ：斜材の主桁位置における定着角度

λ ：サグによる斜材のヤング係数低下率1%の時、 $\lambda=0.99$ 、 σ ：斜材の応力度、 A_p ：斜材断面積

4.モデルへの適用例 実際に施工された実橋を基にしたモデル

を用いて、上述の2つの最適化規準を適用した例を示す。なお、本モデルは、スパン87m+87mの2径間左右対称形で、斜材は11段のマルチケーブル形式となっている。図1にⅠ規準を用いて最適化した場合の主桁のモーメント分布とそのクリープによる変動を示す。また、表1に斜材張力の値を示す。これらの結果から、たわみに着目したⅠ規準では、クリープによりモーメント分布が最大で113t・mとかなり大きな変化を示すことがわかる。クリープによる影響を最小とするⅡ規準の無制約解（固有張力）は、表1に併記するように最外縁で大きな負値を示すため、斜材張力に① $P>0$ 、②サグ剛性低下1%以内の各制約条件を付けて最適化を行った。図2、図3にそれぞれ①、②の場合の主桁のモーメント分布とそのクリープによる変動を示す。表1より、①では最外縁で下限制約がアクティブとなってゼロ値を示し、②では最外縁とその1本内側の斜材で下限制約に対してアクティブとなり、Ⅰ規準によるモーメント分布に比べ、支点に近い端部で正方向に膨らむ傾向を示す。しかし、クリープによるモーメント変動は、無制約で0t・m、①で25t・m、②で49t・mと下限制約を小さくする程小さくなり、Ⅰ規準に比べかなり小さなものである。

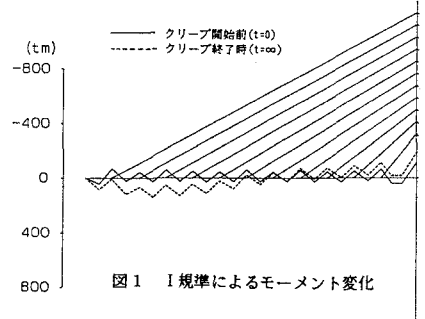


図1 Ⅰ規準によるモーメント変化

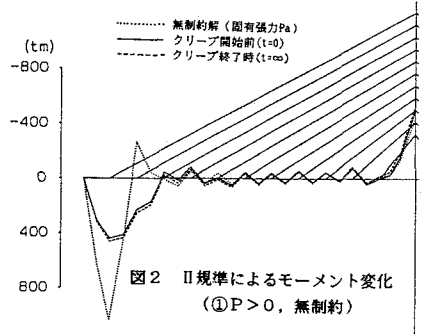


図2 Ⅱ規準によるモーメント変化
（① $P>0$ ，無制約）

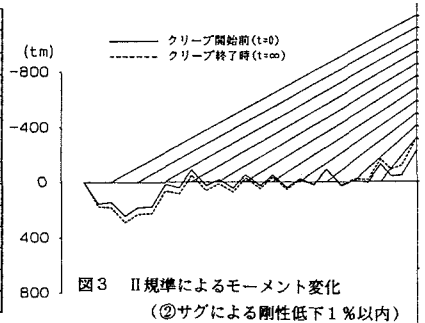


図3 Ⅱ規準によるモーメント変化
（②サグによる剛性低下1%以内）

表1 最適斜材張力とクリープによる張力変化

Ⅰ規準		Ⅱ規準					
		サグ剛性低下1%		$P>0$		無制約解	
P	P_p	P	P_p	P	P_p	P	P_a
231.4	-13.6	167.7	-8.9	0.1	-6.0	-525.4	
185.0	-9.0	136.8	-3.6	178.7	-1.6	682.4	
203.3	-6.2	212.2	-1.6	266.6	-0.7	94.1	
190.7	-3.5	245.6	-0.5	226.4	-0.2	213.2	
181.9	-1.0	156.7	0.3	152.7	0.4	183.0	
190.6	0.8	191.9	0.3	195.7	0.3	183.3	
168.9	1.9	183.2	0.0	169.7	-0.1	175.2	
173.0	1.9	142.8	-0.4	175.4	-0.6	168.4	
153.8	1.2	194.5	-1.4	146.2	-0.8	151.1	
138.8	-0.1	96.0	-1.8	165.5	-0.7	158.1	
136.7	-1.6	149.5	-4.4	56.2	-0.3	71.4	

最上段：最外縁斜材～最下段：最内縁斜材

5.まとめ 以上の結果より、長大マルチケーブル形式PC斜張橋において、クリープによる断面力変化を小さく抑えるためには、外側、特に最外縁の斜材を緩めることが非常に有効であり、さらに長大橋梁になると、支点付近には、斜材を配置せずに剛性の高い主桁を配置することが、クリープの影響をより効果的に抑制できるものと考えられる。

参考文献 1)F.Leonhardt (成井訳)：特別寄稿 斜張橋，土木施工，1988.5 2)古川、他：プレストレストコンクリート斜張橋の最適斜材張力に関する研究，土木学会論文集，第374号，pp503～512，1986.10