

(19) 外ケーブルを有する連続合成桁橋の経時挙動に関する研究

TIME-DEPENDENT BEHAVIORS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE CONTINUOUS
GIRDER BRIDGES WITH EXTERNAL PRESTRESSING CABLES

栗田章光* 祖川武彦** 小坂 崇**
By Akimitsu KURITA, Takehiko SOGAWA and Takashi KOSAKA

The prestressing method by using the external cables in steel-concrete composite continuous girder bridges has various advantages in comparison with internal ones. However, the time-dependent behaviors in this type of bridges are not yet clarified perfectly. This paper, therefore, deals with the effects of creep and shrinkage on the loss of prestressing forces of the cables and the change of reactions at intermediate support in the steel-concrete composite continuous girder bridges with external cables. The outline of analytical treatments and the numerical examples are presented and discussed herein.

1. はじめに

近年、ヨーロッパを中心に新設および既存橋梁の補強に外ケーブル方式を採用した例が多く報告されている。外ケーブル方式は、従来から多く用いられている内ケーブル方式よりも施工性や経済面の面での利点が多い。わが国でも連続合成桁橋に外ケーブル方式を採用した例は数例あるが、諸外国に比べて遅れをとっているのが現状であるといえる。その理由として、ケーブル定着部や偏向部などの構造設計が不明確な上に、経時挙動も十分に解明されていないことなどが挙げられる。

そこで、本研究は、外ケーブルを有する連続合成桁橋の設計上の問題点の1つであるコンクリートのクリープおよび乾燥収縮挙動に着目し、解析式を誘導するとともに、数値計算を行い、この種の橋梁の経時挙動を解明することにした。本文では、まず、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮解析のための応力～ひずみ関係式を示す。ついで、外ケーブルを有する2径間連続合成桁を例に、解析モデルならびに、クリープおよび乾燥収縮によるコンクリート床版と鋼桁との分断断面力の変化量の解析手法について述べる。終わりに、数値計算例を示し、設計ための一資料を提供する。

* 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科

** 大阪工業大学大学院 工学部土木工学科

2. コンクリートの応力～ひずみ関係式

2.1 クリープの基本式^{1), 2)}

時刻 t_1 で応力 σ_1 が作用し、その後、時間の経過とともに応力が漸減する場合、任意時刻 t におけるコンクリートの応力～ひずみ関係式は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_{t-t_1} = & \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} + [\phi_d(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} \\ & + \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \Delta \sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_d(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \Delta \sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau \\ & - \frac{1}{E_b \phi_{d\infty}} \int_{t_1}^t \Delta \sigma_{\tau-t_1} \frac{d\{\phi_d(\tau-t_1)\phi_d(t-\tau)\}}{d\tau} d\tau\end{aligned}\quad (1)$$

ここに、

$\Delta \varepsilon_{t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのクリープによるコンクリートの変化ひずみ

σ_{t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリートの応力度

E_b : コンクリートのヤング係数

ϕ_v : 遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数

ϕ_f : フローひずみに対するクリープ係数

$\Delta \sigma_{t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリートの変化応力度

上式の右辺の第5項目が、回復クリープの影響を表す項である。そして、 ϕ_v のついた項が、遅れ弾性の影響を表す項である。

2.2 乾燥収縮の基本式³⁾

任意時刻 t におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみは、式(2)で表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_t = \frac{\Delta \sigma_t}{E_b} + \frac{1}{E_b} \int_0^t \Delta \sigma_\tau \frac{d\phi_s(\tau)}{d\tau} d\tau + \varepsilon_{s\infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_{s\infty}}\quad (2)$$

ここに、

$\Delta \varepsilon_t$: 時刻 t におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみ

$\Delta \sigma_t$: 時刻 t におけるコンクリートの乾燥収縮による変化応力度

$\varepsilon_{s\infty}$: 時刻 $t = \infty$ におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみ

$\phi_s(t)$: 時刻 t におけるコンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数

$\phi_{s\infty}$: 時刻 $t = \infty$ におけるコンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数

以上の式(1)および(2)を用いて合成桁のクリープおよび乾燥収縮解析を行うことができる。

3. 外ケーブルを有する2径間連続合成桁の解析

3.1 解析モデル

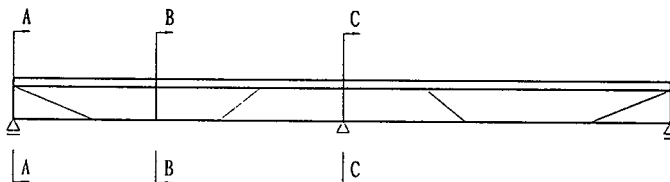


図-1 合成桁の側面図

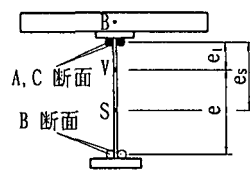
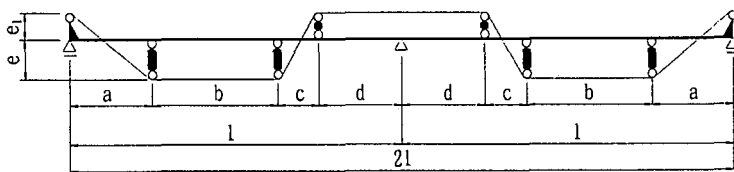


図-1に、外ケーブルを有する2径間連続合成桁の側面図を示す。この解析モデルを記号とともに図-2に示す。図-3には、合成桁の断面図とケーブルの偏心量に関する記号を示した。

外ケーブルの解析取扱いとして、次の2つの仮定を設けた。

- ① デビエータ部でケーブルの摩擦力は働かないものとする
- ② ケーブルのリラクセーションに関しては、別途考慮する。

次に、乾燥収縮の場合を例にとり、その解析法を略述する。

3.2 静定基本系における分担断面力の変化量の解析

時刻 t において、コンクリート床版の乾燥収縮によって生じる合成桁のひずみ分布と分担断面力の変化量を図-4に示す。

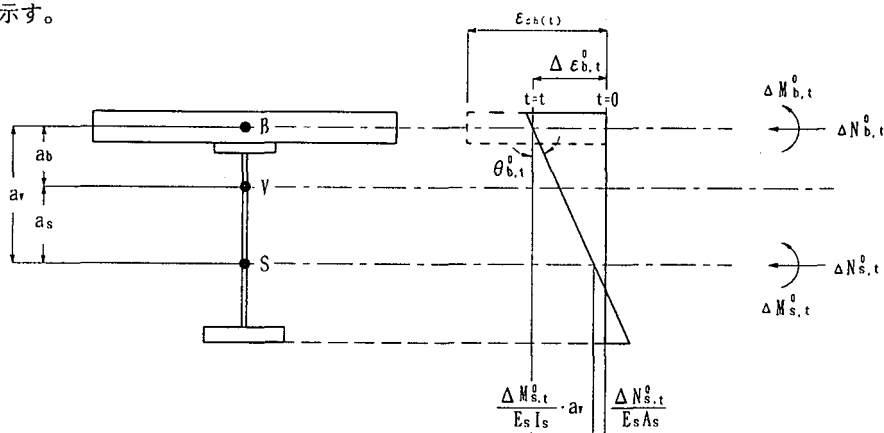


図-4 乾燥収縮に伴う合成桁断面のひずみ分布

コンクリート床版の自由収縮ひずみ $\varepsilon_{sh}(t)$ は、鋼桁拘束により、断面に内部応力を発生させ、各部材の断面力として置き換えることができる。図-4における乾燥収縮により静定基本系での各分担断面力の変化量は、つり合い条件式および、ひずみ適合条件式を適用するとことにより式(3)で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{b,t}^0 &= -\Delta N_{s,t}^0 = -\gamma_1 P_{sh} \beta(t) \\ \Delta M_{b,t}^0 &= \gamma_2 P_{sh} \beta(t), \quad \Delta M_{s,t}^0 = \gamma_3 P_{sh} \beta(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、

$$\gamma_1 = \frac{(1 + \eta_D + D_M)}{(1 + \eta_D + D_N + D_1 a_v)(1 + \eta_D + D_M) - D_1 D_M a_v}$$

$$\gamma_2 = \frac{D_M a_v}{(1 + \eta_D + D_N + D_1 a_v)(1 + \eta_D + D_M) - D_1 D_M a_v}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \gamma_3 &= \frac{(1 + \eta_D)a_v}{(1 + \eta_D + D_N + D_1a_v)(1 + \eta_D + D_M) - D_1D_Ma_v} \\
 D_1 &= \frac{E_bA_b}{E_sI_s}a_v, \quad D_N = \frac{E_bA_b}{E_sA_s}, \quad D_M = \frac{E_bI_b}{E_sI_s}, \quad \eta_D = \frac{1}{2}\phi_{sh}(t) \\
 P_{sh} &= \varepsilon_{sh(\infty)}E_bA_b, \quad \beta(t) = (1 - e^{-k_3t})
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3.3 不静定系における分担断面力の変化量の解析

式(3)で求められた各分担断面力により、中間支点反力および外ケーブル張力に変化が生じる。図-4に示す、鋼桁の図心Sに生じるひずみおよび曲率は、式(5)のように表すことができる。

$$\Delta\theta_{s,t}^0 = \frac{\Delta M_{s,t}^0}{E_sI_s}, \quad \Delta\varepsilon_{s,t}^0 = \frac{\Delta N_{s,t}^0}{E_sA_s} \quad (5)$$

さらに、中間支点反力およびケーブル張力の変化量に関する弾性方程式を解くと、式(6)が得られる。

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta P_{d,t} &= -\frac{1}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2}(\delta_{22}\Delta\delta_{1d,t} - \delta_{12}\Delta\delta_{2d,t}) \\
 \Delta P_{e,t} &= -\frac{1}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2}(\delta_{11}\Delta\delta_{2d,t} - \delta_{12}\Delta\delta_{1d,t})
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned}
 \delta_{11} &= \frac{l^3}{6E_sI_s} \\
 \delta_{12} &= \delta_{21} = -\frac{\cos\alpha_1}{6E_sI_s}[3l^2(e_s - a\tan\alpha_1) + \tan\alpha_2\{3cl^2 + (a+b)^3 \\
 &\quad - (l-d)^3\} + a^3\tan\alpha_1] \\
 \delta_{22} &= \frac{2\cos^2\alpha_1}{3E_sI_s}\left[\frac{e_s^3}{\tan\alpha_1} + \frac{(e_s - a\tan\alpha_1 + c\tan\alpha_2)^2}{\tan\alpha_2}\right. \\
 &\quad \left.\{e_s - a\tan\alpha_1 + (c+3d)\tan\alpha_2\} + (e_s - a\tan\alpha_1)^2\right. \\
 &\quad \left.\left\{-e_s\left(\frac{1}{\tan\alpha_1} + \frac{1}{\tan\alpha_2}\right) + a\left(1 + \frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2}\right) + 3b\right\}\right] \\
 &\quad + \frac{2l\cos^2\alpha_1}{E_sA_s} + \frac{2\cos^2\alpha_1}{E_cA_c}\left(\frac{a}{\cos^3\alpha_1} + b + \frac{c}{\cos^3\alpha_2} + d\right) \\
 \Delta\delta_{1d,t} &= -\frac{l^2}{2E_sI_s}\gamma_3P_{sh}\beta(t) \\
 \Delta\delta_{2d,t} &= \frac{2}{E_sI_s}\gamma_3P_{sh}\beta(t)\left[\cos\alpha_1\left\{e_sl + \left(\frac{c}{2} + d\right)c\tan\alpha_2\right\} - a\sin\alpha_1\left(l - \frac{a}{2}\right)\right] \\
 &\quad + \frac{2\gamma_1}{E_sA_s}P_{sh}\beta(t)\cos\alpha_1\left\{a\left(1 - \frac{1}{\cos^2\alpha_1}\right) + c\left(1 - \frac{1}{\cos^2\alpha_2}\right)\right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(6)の不静定力の変化量により生じる各分担断面力の変化量を上添字1をつけて表すと、乾燥収縮により生じる各分担断面力の全変化量は、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} N_{b,t}^T &= \Delta N_{b,t}^0 + \Delta N_{b,t}^1, & N_{s,t}^T &= \Delta N_{s,t}^0 + \Delta N_{s,t}^1 \\ M_{b,t}^T &= \Delta M_{b,t}^0 + \Delta M_{b,t}^1, & M_{s,t}^T &= \Delta M_{s,t}^0 + \Delta M_{s,t}^1 \end{aligned} \right\} (8)$$

持続曲げモーメントおよび持続軸方向力が作用した時のクリープ解についても、同様の手順によって求めることができる。

表-1 計算条件

断 面 積 (m ²)	コンクリート床版	$A_b = 6.0 \times 10^{-1}$
	鋼 桁	$A_s = 6.0 \times 10^{-2}$
	合成断面の換算断面積	$A_v = 1.6 \times 10^{-1}$
	ケーブル	$A_e = 7.2 \times 10^{-4}$
合成桁の断面2次モーメント (m ⁴)	コンクリート床版	$I_b = 2.0 \times 10^{-3}$
	鋼 桁	$I_s = 3.567 \times 10^{-2}$
	合成断面	$I_v = 1.2424 \times 10^{-1}$
ヤング係数 (tf/m ²)	コンクリート床版	$E_b = 3.5 \times 10^6$
	鋼 桁	$E_s = 2.1 \times 10^7$
	ケーブル	$E_e = 2.0 \times 10^7$
外ケーブル導入張力 (tf)		P=200
死 荷 重 (tf/m)		q=1.0
クリープ	遅れ弾性クリープ係数	$\phi_{v\infty} = 0.4$
	フロークリープ係数	$\phi_{f\infty} = 1.6$
乾燥収縮	クリープ係数	$\phi_{s\infty} = 4.0$
	収縮量の最終値	$\varepsilon_{s\infty} = 200 \times 10^{-6}$
ケーブルの配置 (m)		a=10, b=15, c=5, d=10
ケーブルの偏心距離 (m)		e=1.545, e ₁ =0.445 e _s =1.404

4. 数値計算結果および考察

外ケーブルは後死荷重の載荷前に図-1に示すように配置するものとする。計算条件および、断面の諸定数は、表-1に示すとおりである。

まず、乾燥収縮の影響によって生じる鋼桁の分担曲げモーメントの変化量を図-4に示す。静定基本系の場合、桁全長に一定の曲げモーメントの変化量が作用するのに対し、不静定系の場合では、中間支点上で最大の負の曲げモーメント-85.620 tf・mの変化量が得られた。これは、表-2に示すように、乾燥収縮によるケーブル張力の変化量よりも、中間支点反力の変化量の方が大きいためである。したがって、鋼桁の分担曲げモーメントの全変化量は、不静定系での桁全長にわたる負の曲げモーメントにより、中間支付近では負の曲げモーメントとなる。

次に、クリープの影響について述べる。コンクリート床版の初期応力度は、表-1の条件で計算した場合、桁全長において圧縮状態である。合成桁に作用する持続曲げモーメントを図-5に示す。一方、持続軸方向力は桁全長にわたって一定で197.451 tfの圧縮力が作用している。これらの持続力により生じるクリープに伴う鋼桁の分担曲げモーメントの変化量を図-6に示す。静定基本系では持続曲げモーメントと持続軸方向力との影響を受けていることがわかる。不静定系では、中間支点で最大の負の曲げモーメントの変化量-53.504 tf・mが生じる。したがって、クリープによる鋼桁の分担曲げモーメントの全変化量の最大は、両端の支点上に生じ、その値は48.059 tf・mとなる。

表-2 乾燥収縮による中間支点反力およびケーブル張力の変化量

中間支点反力 (tf)	ケーブル張力 (tf)
4.288	1.089×10^{-1}

表-3 プレストレス導入後のクリープによる中間支点反力およびケーブル張力の変化量

	中間支点反力 (tf)	ケーブル張力 (tf)
持続曲げモーメント成分	3.577×10^{-3}	9.683×10^{-2}
持続軸力成分	2.691	1.960×10^{-1}

(ケーブル張力 + : 引張力、- : 圧縮力)

う鋼桁の分担曲げモーメントの変化量を図-6に示す。静定基本系では持続曲げモーメントと持続軸方向力との影響を受けていることがわかる。不静定系では、中間支点で最大の負の曲げモーメントの変化量-53.504 tf・mが生じる。したがって、クリープによる鋼桁の分担曲げモーメントの全変化量の最大は、両端の支点上に生じ、その値は48.059 tf・mとなる。

5. まとめ

(1) 乾燥収縮による影響

鋼桁の分担曲げモーメントの変化量は、静定基本系では、桁全長にわたり一定であるのに対して、不静定系では、ケーブル張力よりも中間支点反力の影響が大きいために、全て負のモーメントが生じることになる。乾燥収縮により生じる外ケーブル張力の変化量は、今回の計算条件では無視しうる程度の値となった。

(2) クリープによる影響

静定基本系においては、持続曲げモーメント、および持続軸方向力によりコンクリート床版内にクリープが生じ、鋼桁の分担曲げモーメントの変化量は持続曲げモーメントの分布形に比例した形状で生ずる。

不静定系でのクリープが中間支点反力の変化量に与える影響は、持続軸方向力成分の方が、持続曲げモーメント成分よりも大きくなることがわかった。これは、持続曲げモーメントがスパン全長にわたって正負にバランスよく分布しているためである。ゆえに、鋼桁の分担曲げモーメントの変化量は、主に持続軸方向力によって生じていることがわかった。

全変化量については、両端支点を除いて、静定基本系と不静定系の曲げモーメントの変化量がお互いに打ち消し合うことがわかった。

今後は、他のケーブル配置および本数等についても検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 渡辺誠一・六車 熙：コンクリートのクリープひずみに関する一考察－遅れ弾性および回復クリープのPC静定部材のクリープ解析に及ぼす影響－、日本建築学会構造系論文報告集、第402号、pp. 71～78、1989年。
- 2) Kurita, A. and Nakai, H.: An Analysis for Long-Term Behavior of Steel - Concrete Composite Girders by Taking Account of Creep Recovery, Proc. of JSCE, Structural Eng. Earthquake Eng. Vol. 9, No. 2, pp. 117s～128s, 1992.
- 3) Kurita, A. and Nakai, H.: Effect of Creep Coefficient on Analysis of Shrinkage in Steel - Concrete Composite Girder Bridges, Abstract of the Second Japan - Korea Joint Seminar on Steel Bridges, pp. 59～60, Sept., 1992.

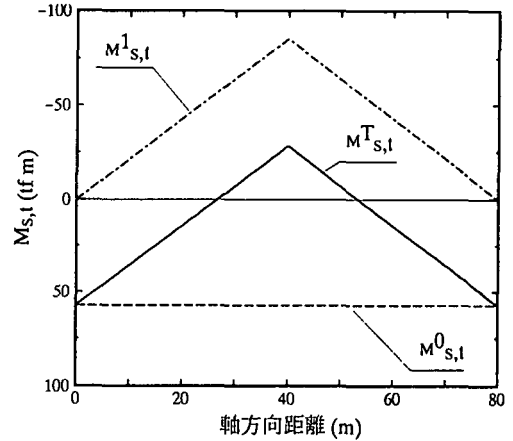


図-4 乾燥収縮による鋼桁の分担曲げモーメントの変化量

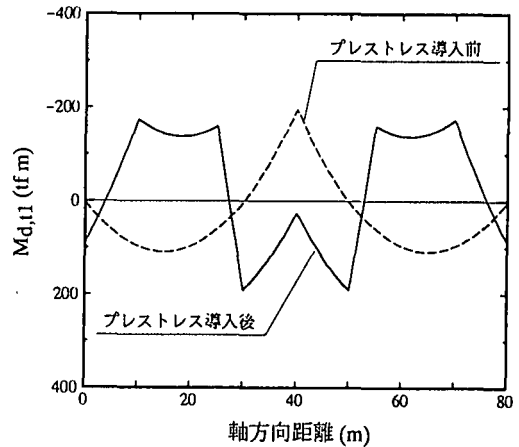


図-5 合成桁に作用する持続曲げモーメント

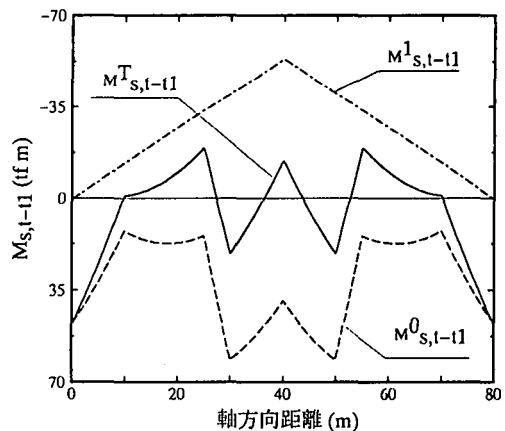


図-6 クリープによる鋼桁の分担曲げモーメントの変化量