

論文 連続合成桁 RC 床版のクリープ・乾燥収縮解析

松田 浩*1・倉方 慶夫*2・プーンタナポン・ソムボン*3・中村 太一*4

要旨：多径間連続桁の解析においては、床版の打継ぎ部のせん断応力及びコンクリートのひび割れ発生に伴うせん断応力度の再分配などを検討する必要がある。多径間連続合成桁を解析するために、コンクリート床版と鋼桁の接合面のジベルは弾性的に変形し、せん断的なずれ変位が生じるとした不完全（弾性）合成桁の基礎式を誘導し、それに基づく解析プログラムを開発した。連続合成桁の中間支点部の RC 床版に注目した数値解析を行い、クリープや乾燥収縮に関する設計基準値や鉄筋によるクリープ・乾燥収縮の拘束などについて検討した。

キーワード：連続合成桁, 不完全合成桁, クリープ, 乾燥収縮, RC 床版

1. はじめに

連続鋼合成桁橋の建設は絶えて久しく、1973 年以降設計基準の更新は行われてない。しかし、建設コスト縮減の要求に伴ない、少数主桁の合成桁が見直されるようになった。筆者ら¹⁾も、連続鋼合成 2 主桁橋の試算を試みた結果、クリープと乾燥収縮、および中間支点上の RC 床版の剛性算定についていくつかの問題点が生じた。

本研究では、多径間連続合成桁を解析するために、コンクリート床版と鋼桁の接合面のジベルは弾性的に変形し、せん断的なずれ変位が生じるとした不完全（弾性）合成桁の基礎式を誘導し、それに基づく解析プログラムを開発した。連続合成桁の中間支点部における RC 床版に注目した数値解析を実行し、クリープや乾燥収縮に関する設計基準値や鉄筋によるクリープ・乾燥収縮の拘束効果などについて検討したものである。

2. 解析理論

2.1 不完全合成桁の解析

多径間連続合成桁の解析を行う場合、床版の打ち継ぎ部でのせん断応力度、コンクリートのひび割れに伴うせん断応力度の再分配などを検討する必要がある。本解析プログラムでは、ジベルを

弾性分布ばねとして取扱い、ジベルの弾性的な変形により、コンクリート床版と鋼桁の接合面には、せん断的なずれ変位が生じるとした合成桁（弾性合成桁）として解析を行う。

2.2 変位と変形

図 1 に示すように、鋼桁部分に (x, y, z) 座標、コンクリート部分に (ξ, η, ζ) 座標を導入する。 ζ 軸と z 軸の間隔を η_d 、床版と鋼桁の接合面の η 座標値を η_{cl} 、 y 座標値を y_{su} とするとき、次の関係が成り立つ。

$$y = \eta - \eta_d, \quad z = \zeta, \quad \eta_d = \eta_{cl} - y_{su} \quad (1)$$

床版、鋼桁部材の任意点の変位ベクトル \mathbf{u}_c 、 \mathbf{u}_s は、平面保持の仮定の下で次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_c &= v_{c0} \mathbf{i}_\eta + (w_{c0} - \alpha \eta) \mathbf{i}_\zeta \\ \mathbf{u}_s &= v_{s0} \mathbf{i}_y + (w_{s0} - \alpha y) \mathbf{i}_z \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 v_{c0} 、 w_{c0} は各々 ζ 軸上の \mathbf{i}_η 、 \mathbf{i}_ζ 方向の変位、 v_{s0} 、 w_{s0} は各々 z 軸上の \mathbf{i}_y 、 \mathbf{i}_z 方向の変位であり、 α は断面の回転変位である。

各部材の断面は変形せず、それらの接合面では鉛直方向の相対変位は生じないとすれば、

$$v_0 = v_{c0} = v_{s0} \quad (3)$$

が成り立つ。また、各部材のせん断変形は一般に無視できるので次式となる。

$$\alpha = v'_0 = \frac{dv_0}{dz} \quad (4)$$

*1 長崎大学助教授 工学部 構造工学科 工博 (正会員)

*2 新日本技研 (株)・技術部 工博

*3 長崎大学大学院・構造工学専攻

*4 新日本技研 (株)・技術部

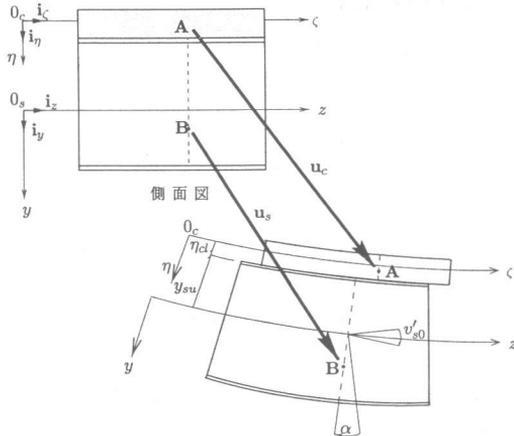


図1 合成部材の変位と変形

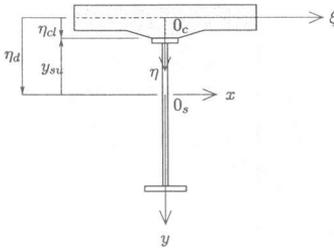


図2 断面図

したがって、任意点の変位成分を

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_c &= v_c \mathbf{i}_\eta + w_c \mathbf{i}_\zeta \\ \mathbf{u}_s &= v_s \mathbf{i}_y + w_s \mathbf{i}_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と表すとき、次式が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} v_c &= v_0, \quad w_c = w_{c0} - v'_0 \eta \\ v_s &= v_0, \quad w_s = w_{s0} - v'_0 y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

上式から、床版および鋼桁部材の直ひずみ ε_ζ および ε_z が次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\zeta &= \partial w_c / \partial \zeta = w'_{c0} - v'_0 \eta \\ \varepsilon_z &= \partial w_s / \partial z = w'_{s0} - v'_0 y \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

また、床版と鋼桁のずれ変位 \hat{w} は次式となる。

$$\hat{w} = w_{s0} + v'_0 \eta_d - w_{c0} \quad (8)$$

2.3 つり合い式

図1に示す合成桁のつり合いに対して仮想仕事の原理を適用すると、

$$\begin{aligned} & \int_{z_1}^{z_2} \left(\int_{A_c} \sigma_c \delta \varepsilon_\zeta dA_c + \int_{A_s} \sigma_s \delta \varepsilon_z dA_s \right) dz \\ & + \int_{z_1}^{z_2} q_d \delta \hat{w} dz - \int_{z_1}^{z_2} (\mathbf{p}_c \cdot \delta \mathbf{u}_{c0} + \mathbf{p}_s \cdot \delta \mathbf{u}_{s0}) dz \\ & - \left[n_z \left\{ \int_{A_c} \bar{p}_c \delta \mathbf{u}_c dA_c + \int_{A_s} \bar{p}_s \delta \mathbf{u}_s dA_s \right\} \right]_{z_1}^{z_2} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

となる。ここに、 $\int_{A_c} dA_c$ は床版断面に亘る積分、 $\int_{A_s} dA_s$ は鋼桁断面に亘る積分、 n_z は両端断面の

外向き単位法線ベクトルの \mathbf{i}_z 方向成分である。

$$n_z = \begin{cases} -1, & (z = z_1) \\ 1, & (z = z_2) \end{cases}$$

σ_c と σ_s は床版と鋼桁の直応力、 q_d は床版と桁の接合面のせん断応力(せん断流)、 \mathbf{u}_{c0} と \mathbf{u}_{s0} はそれぞれ床版と鋼桁の軸線上の変位である。

$$\mathbf{u}_{c0} = \mathbf{u}_c(\eta = 0), \quad \mathbf{u}_{s0} = \mathbf{u}_s(y = 0) \quad (10)$$

また、床版の ζ 軸と鋼桁の z 軸上にそれぞれ分布荷重 \mathbf{p}_c と \mathbf{p}_s が作用し、床版部と鋼桁部の両端断面にはそれぞれ $\bar{\mathbf{p}}_c$ と $\bar{\mathbf{p}}_s$ なる表面力が作用するとし、その成分を、

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p}_c &= p_\eta \mathbf{i}_\eta + p_\zeta \mathbf{i}_\zeta, \quad \mathbf{p}_s = p_y \mathbf{i}_y + p_z \mathbf{i}_z \\ \bar{\mathbf{p}}_c &= \bar{p}_\eta \mathbf{i}_\eta + \bar{p}_\zeta \mathbf{i}_\zeta, \quad \bar{\mathbf{p}}_s = \bar{p}_y \mathbf{i}_y + \bar{p}_z \mathbf{i}_z \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

と表す。式(9)に式(6)~(8)、(11)を代入し、次の関係式を用いると、

$$\left. \begin{aligned} N_c &= \int_{A_c} \sigma_c dA_c, \quad M_c = \int_{A_c} \sigma_c \eta dA_c \\ N_s &= \int_{A_s} \sigma_s dA_s, \quad M_s = \int_{A_s} \sigma_s y dA_s \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_c &= \int_{A_c} \bar{p}_\eta dA_c, \quad \bar{S}_s = \int_{A_s} \bar{p}_y dA_s \\ \bar{N}_c &= \int_{A_c} \bar{p}_\zeta dA_c, \quad \bar{N}_s = \int_{A_s} \bar{p}_z dA_s \\ \bar{M}_c &= \int_{A_c} \bar{p}_\zeta \eta dA_c, \quad \bar{M}_s = \int_{A_s} \bar{p}_z y dA_s \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} M_v &= M_c + M_s - N_c \eta_d, \quad N_v = N_c + N_s \\ \bar{M}_v &= \bar{M}_c + \bar{M}_s - \bar{N}_c \eta_d, \quad \bar{N}_v = \bar{N}_c + \bar{N}_s \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$p_{vz} = p_\zeta + p_z$$

合成桁のつり合い式と力学的境界条件が次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} -M_v'' - p_{vy} + p'_\zeta \eta_d &= 0 \\ -N_v - p_{vz} &= 0 \\ N'_c + q_d + p_\zeta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} n_z \bar{S}_v &= M'_v - p_\zeta \eta_d \\ n_z \bar{M}_v &= M_v \\ n_z \bar{N}_v &= N_v \\ n_z \bar{N}_c &= N_c \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

2.4 断面力と変位の関係

床版と鋼桁の応力とひずみの関係は、

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_\zeta, \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_z \quad (17)$$

と表せる。ここに、 E_c と E_s はそれぞれ床版と鋼桁の弾性係数である。上式を式(12)に代入し、さらに式(7)を代入すると断面力と変位の関係が次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} N_c &= E_c A_c w'_{c0} - E_c J_c v''_0 \\ M_c &= E_c J_c w'_{c0} - E_s I_c v''_0 \\ N_s &= E_s A_s w'_{s0} - E_s J_s v''_0 \\ M_s &= E_s J_s w'_{s0} - E_s I_s v''_0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_c &= \int_{A_c} dA_c, & A_s &= \int_{A_s} dA_s \\ J_c &= \int_{A_c} \eta dA_c, & J_s &= \int_{A_s} y dA_s \\ I_c &= \int_{A_c} \eta^2 dA_c, & I_s &= \int_{A_s} y^2 dA_s \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

また、床版と鋼桁間のせん断応力 q_d は、ジベルのせん断剛度(床版と鋼桁間の単位長当りの分布せん断ばね)を k_d とするとき、

$$q_d = k_d \hat{w} \quad (20)$$

と表せるものとする。

式(14)に式(18)を代入すると、次式となる。

$$\begin{aligned} M_v &= E_s J_v w'_{s0} - E_s I_v v''_0 - E_c (J_c - A_c \eta_d) \hat{w}' \\ N_v &= E_s A_v w'_{s0} - E_s J_v v''_0 - E_c A_c \hat{w}' \end{aligned}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_v &= \frac{1}{n} A_c + A_s \\ J_v &= \frac{1}{n} (J_c - A_c \eta_d) + J_s \\ I_v &= \frac{1}{n} \{ I_c - 2J_c \eta_d + A_c \eta_d^2 \} + I_s \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

であり、 n は弾性係数比 $n = E_s / E_c$ である。

2.5 有限要素法による剛性方程式の誘導

床版にプレストレス荷重を与えるものとし、床版の断面力を、

$$M_c \Rightarrow M_c + M_{cp}, \quad N_c \Rightarrow N_c + N_{cp} \quad (22)$$

と置き換える。ここに、 M_{cp} 、 N_{cp} はプレストレス力が床版の軸線に対して構成する曲げモーメント(図1の ζ 軸上の値)と軸力であり、既知量である。上式を仮想仕事の原理式に代入すると、

$$\begin{aligned} & \int_{z_1}^{z_2} \{ -M_v \delta v''_0 + N_v \delta w'_{s0} - N_c \delta \hat{w}' \} dz + \int_{z_1}^{z_2} q_d \delta \hat{w} dz \\ & + \int_{z_1}^{z_2} \left[-(M_{cp} - N_{cp} \eta_d) \delta v''_0 + N_{cp} \delta w'_{s0} - N_{cp} \delta \hat{w}' \right] dz \\ & - \int_{z_1}^{z_2} \{ p_{vy} \delta v_0 + p_{\zeta} \eta_d \delta v'_0 + p_{vz} \delta w_{s0} - p_{\zeta} \delta \hat{w} \} dz \\ & - \left[n_z \{ \bar{S}_v \delta v_0 - \bar{M}_v \delta v'_0 + \bar{N}_v \delta w_{s0} - \bar{N}_c \delta \hat{w} \} \right]_{z_1}^{z_2} = 0 \quad (23) \end{aligned}$$

となる。この棒要素の各部材軸線上の変位を、

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= g_1 \bar{v}_1 + g_2 \bar{v}_2 + g_3 \bar{v}_3 + g_4 \bar{v}_4 \\ \hat{w} &= g_1 \bar{w}_{d1} + g_2 \bar{w}_{d2} + g_3 \bar{w}_{d3} + g_4 \bar{w}_{d4} \\ w_{s0} &= g_1 \bar{w}_{s1} + g_2 \bar{w}_{s2} + g_3 \bar{w}_{s3} + g_4 \bar{w}_{s4} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

と仮定する。ここに、 g_i は変位関数であり、

$$\mu = (z - z_1) / l \quad (25)$$

とするとき、次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= 1 - 3\mu^2 + 2\mu^3, & g_2 &= (\mu - 2\mu^2 + \mu^3)l \\ g_3 &= 3\mu^2 - 2\mu^3, & g_4 &= (-\mu^2 + \mu^3)l \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$\bar{v}_i, \bar{w}_{di}, \bar{w}_{si}$ ($i=1 \sim 4$) などは要素の両端の節点変位や変形を表し、

$$\left. \begin{aligned} \bar{v}_1 &= v_0(z = z_1), & \bar{v}_2 &= v'_0(z = z_1) \\ \bar{v}_3 &= v_0(z = z_2), & \bar{v}_4 &= v'_0(z = z_2) \\ \bar{w}_{d1} &= \hat{w}(z = z_1), & \bar{w}_{d2} &= \hat{w}'(z = z_1) \\ \bar{w}_{d3} &= \hat{w}(z = z_2), & \bar{w}_{d4} &= \hat{w}'(z = z_2) \\ \bar{w}_{s1} &= w_{s0}(z = z_1), & \bar{w}_{s2} &= w'_{s0}(z = z_1) \\ \bar{w}_{s3} &= w_{s0}(z = z_2), & \bar{w}_{s4} &= w'_{s0}(z = z_2) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

である。なお、断面定数やせん断ばねおよび分布外力は要素内で直線変化するものとする。

式(23)の仮想仕事式に変位関数などを代入して、変分計算を実行すると剛性マトリックスが導かれる。本解析では、行列演算支援ソフトウェア Matlab を用い、変分計算や解析的な積分などには Symbolic Math Tool Box を使用して導いた。

2.6 床版と鋼桁の個々の断面力

床版と鋼桁の曲げモーメント M_c 、 M_s 、せん断力 S_s 、 S_c 、鋼桁の軸力 N_s は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} N_s &= N_v - N_c \\ M_s &= \frac{-E_s I_{s0} e_c N_c + E_c I_{c0} e_s N_s + E_s I_{s0} (M_v + N_c \eta_d)}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} \\ M_c &= M_v - M_s + N_c \eta_d \\ S_s &= \frac{E_s I_{s0} S_v}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} - \frac{E_s I_{s0} (\eta_p - e_c) p_z}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} \\ & \quad - \frac{E_c I_{c0} (y_{su} - e_s) + E_s I_{s0} (\eta_{cl} - e_c) q_d}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} \\ & \quad - \left(\frac{E_s I_{s0} e_c}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} \right)' N_c + \left(\frac{E_c I_{c0} e_s}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} \right)' N_s \\ & \quad + \left(\frac{E_s I_{s0}}{E_c I_{c0} + E_s I_{s0}} \right)' M_0 \\ S_c &= S_v - S_s \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

ここに、

$$\begin{aligned} I_{c0} &= I_c - e_c J_c, & I_{s0} &= I_s - e_s J_s, \\ e_c &= \frac{J_c}{A_c}, & e_s &= \frac{J_s}{A_s} \end{aligned} \quad (29)$$

である。

2.7 クリーブと乾燥収縮

コンクリート床版が合成された後、時刻 t_0 に後死荷重が作用して床版には $\sigma_c^{(0)}$ 、鋼桁には $\sigma_s^{(0)}$ なる応力度が発生したとする。この状態からクリーブや乾燥収縮が進行し、時刻 t において床版応力度は $\sigma_c(t) = \sigma_c^{(0)} + \Delta\sigma_c(t)$ 、鋼桁の応力度は $\sigma_s(t) = \sigma_s^{(0)} + \Delta\sigma_s(t)$ になったとする。また、この間の乾燥収縮ひずみを $\Delta\varepsilon^{(s)}(t)$ と表すとき、床版に発生するひずみ $\Delta\varepsilon_c(t)$ ($t_0 \sim t$ 間のひずみの変化量) は、Trost の公式によると、

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_c(t) &= \frac{\sigma_c^{(0)}}{E_c} \phi_{t-t_0} \\ & \quad + \frac{\Delta\sigma_c(t)}{E_c} (1 + \mu \phi_{t-t_0}) + \Delta\varepsilon^{(s)}(t) \end{aligned} \quad (30)$$

と与えられる。ここに、 ϕ_{t-t_0} は $\sigma_c^{(0)}$ が作用した t_0 時点から時刻 t までのクリープ係数であり、 μ は同様に時刻 $t_0 \sim t$ 間のレラクセーション係数である。上式の右辺第1項はフローひずみ $\varepsilon_c^{(0)} \phi(t)$ 、第2項は遅れ弾性ひずみ $\Delta\varepsilon_c(t)$ を表す。すなわち、

$$\varepsilon_c^{(0)} \phi_{t-t_0} = \frac{\sigma_c^{(0)}}{E_c} \phi_{t-t_0}, \quad (31)$$

$$\Delta\varepsilon_c(t) = \frac{\Delta\sigma_c(t)}{E_c} (1 + \mu\phi_{t-t_0}) \quad (32)$$

であり、前付きの Δ はクリープと乾燥収縮に伴う諸量の増分を表す。

式(32)より、遅れ弾性ひずみに伴う床版の応力度 $\Delta\sigma_c$ は、次式で表せる。

$$\Delta\sigma_c(t) = E_c^* \Delta\varepsilon_c(t) \quad (33)$$

$$E_c^* = E_{c,t-t_0} = \frac{E_c}{1 + \mu\phi_{t-t_0}l} \quad (34)$$

この間の仮想仕事は外力の増分がないとすると、

$$\int_{z_1}^{z_2} (\int_{A_c} E_c^* \Delta\varepsilon_c \delta\varepsilon_c dA_c + \int_{A_s} \Delta\sigma_s \delta\varepsilon_s dA_s) dz + \int_{z_1}^{z_2} \Delta Q_d \delta w dz - [n_z \{ \int_{A_c} \Delta \bar{p}_c \cdot \delta u_c dA_c + \int_{A_s} \Delta \bar{p}_s \cdot \delta u_s dA_s \}]_{z_1}^{z_2} = 0$$

となる。 $\Delta \bar{p}_c$ と $\Delta \bar{p}_s$ はそれぞれクリープと乾燥収縮に伴う床版と主桁の両端断面の表面力の増分である。上式に式(30)を代入し、式(33),(34)と式(12),(13)の関係を用い、さらに、次の関係

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_c &= E_c^* A_c \Delta w'_{c0} - E_c^* J_c \Delta v''_0 \\ \Delta M_c &= E_c^* J_c \Delta w'_{c0} - E_c^* I_c \Delta v''_0 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

を代入すると次式を得る。

$$\int_{z_1}^{z_2} [-\{E_c^* J_c \Delta w'_{c0} + E_s J_s \Delta w'_{s0} - E_c^* (J_c - A_c \eta_d) \Delta w'\} \delta v''_0 + (E_s A_s w'_{s0} - E_s J_s v''_0 - E_c^* A_c \hat{w}') \delta w'_{s0} - \{E_c^* A_c (w'_{s0} - \hat{w}') - E_c^* (J_c - A_c \eta_d) v''_0 - k_d \hat{w}'\} \delta \hat{w}'] dz + \int_{z_1}^{z_2} \varphi_{t-t_0} (E_c^*/E_c) \{-(M_c^{(0)} - N_c^{(0)} \eta_d) \delta v''_0 + N_c^{(0)} \delta w'_{s0} - N_c^{(0)} \delta \hat{w}'\} dz + \int_{z_1}^{z_2} \{(E_c^* (J_c - A_c \eta_d) \Delta\varepsilon^{(s)} \delta v''_0 + E_c^* A_c \Delta\varepsilon^{(s)} \delta w'_{s0} - E_c^* A_c \Delta\varepsilon^{(s)} \delta \hat{w}'\} dz - [n_z \{\Delta \bar{S} \delta v_0 - \Delta \bar{M}_v \delta v'_0 + \Delta \bar{N}_v \delta w_{s0} - \Delta \bar{N}_c \delta \hat{w}\}]_{z_1}^{z_2} = 0$$

上式と式(23)と比較するとわかるように、上式から導かれる剛性係数は通常荷重の場合において $E_c \Rightarrow E_c^*$ 置き換えたものに等しい。また、等価節

点力は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{P}_i &= \Delta \bar{S}_{vi} \\ &+ \int_{z_1}^{z_2} \phi_{t-t_0} (E_c^*/E_c) (M_c^{(0)} - N_c^{(0)} \eta_d) g'_i dz \\ &+ \int_{z_1}^{z_2} E_c^* (J_c - A_c \eta_d) \Delta\varepsilon^{(s)} g'_i dz \\ \Delta \bar{Q}_{di} &= \Delta \bar{N}_{di} \\ &+ \int_{z_1}^{z_2} \{\phi_{t-t_0} (E_c^*/E_c) N_c^{(0)} + E_c^* A_c \Delta\varepsilon^{(s)}\} g'_i dz \\ \Delta \bar{Q}_{vi} &= \Delta \bar{N}_{vi} \\ &- \int_{z_1}^{z_2} \{\phi_{t-t_0} (E_c^*/E_c) N_c^{(0)} + E_c^* A_c \Delta\varepsilon^{(s)}\} g'_i dz \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

3. 設計基準の比較

3.1 CEB FIP Model Code と道路橋示方書

CEB-CODE²⁾と道路橋示方書(以下、道示と略)³⁾との規定とを比較すると、道示では設計計算においてクリープ係数と最終乾燥収縮度は常に一定値が用いられている。一方、CEB-CODEではクリープ係数や乾燥収縮度は、実験における基本値(プレーンコンクリートの値)と様々なパラメータから計算するように規定されている。この計算に必要なカテゴリーとして、セメントの種類、コンクリートの設計基準強度、外気温、相対湿度、仮想部材厚、コンクリートの材令などがある。したがって、CEB-CODEでのクリープ係数や乾燥収縮度は現場の環境条件やコンクリートの様々なパラメータによって大きく変化した値となる。

3.2 中間支点部における DIN の規定

中間支点部のコンクリート剛性と乾燥収縮の取扱いについては、プレストレスしない連続合成桁において、中間支点の領域に発生する負曲げモーメントに対してコンクリートの引張抵抗力を無視し、鋼断面のみ抵抗させ、床版中のコンクリートにひび割れの発生を許容するものである。したがって、DINの規定⁴⁾では、図4を示すように中間支点部のひび割れを考慮し、中間支点の両端0.15lの範囲にあるコンクリートは完全ひび割れ状態にあるものとみなし、その区間でのクリープ・乾燥収縮を無視することができると規定されている。

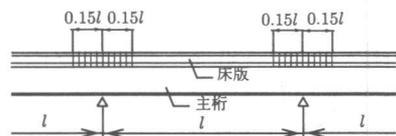


図4 床版のひび割れを考慮する区間

4. 数値解析結果および考察

4.1 ジベルのせん断ばねの影響

解析では、図5に示す単純合成桁解析モデルを用い、ジベルのせん断剛度を $1 \sim 1 \times 10^9$ (kN/m/m) まで変化させて解析を行った。図6はジベルのせん断ばね定数とスパン中央のたわみの関係を示したものである。せん断ばね剛度が 1×10^7 (kN/m/m) を超えると、たわみはほぼ一定となる。図7はせん断ばね定数を変化させたときのコンクリートの軸力の分布図を示したものである。この図より、ジベルのせん断剛度が 1×10^7 を超えると、コンクリートの軸力はほとんど変化しないことがわかる。

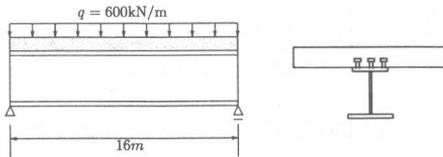


図5 ジベルの解析対象モデル

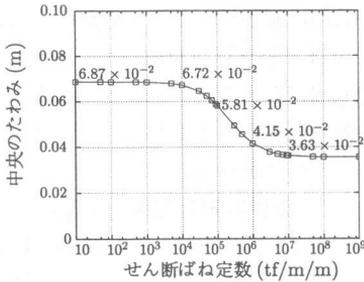


図6 ジベルのせん断ばね定数と中央たわみ

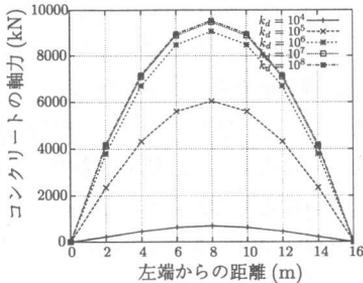


図7 せん断ばね定数とコンクリートの軸力

4.2 10径間連続合成桁の解析結果

実際の設計データを参考にして、10径間連続合成桁(橋長:44.7@2 + 45.1@2 + 44.7 + 45.1@2 + 44.7@3 = 448.6m, 幅員:14m, I型鋼格子床版)を解析対象モデルとし、図8に示すように各施工

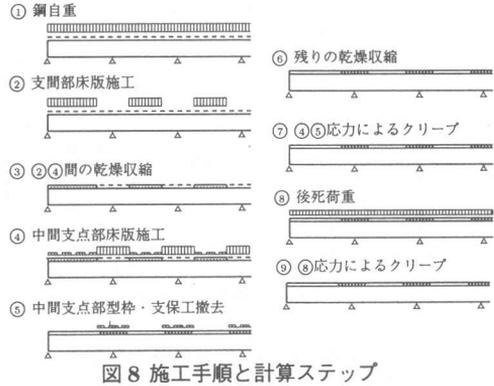


図8 施工手順と計算ステップ

表1 主桁断面力の解析条件

ケース	コンクリートの剛性	クリープ・乾燥収縮	鋼材の拘束
(a)	全長有効	中間支点部は無視	無視
(b)	中間支点部は無視	中間支点部は無視	考慮
(c)	全長有効	中間支点部は無視	考慮
(d)	全長有効	全長有効	考慮

中間支点部無視とは支点の $\pm 0.15l$ の範囲

ステップ毎に数値解析を行った。その際、表1に示す4ケースの条件での比較計算を行った。なお、表1で“中間支点部は無視”と記した範囲は中間支点両側 $0.15l$ のひび割れ発生区間である。

(1) 床版中の鋼材の拘束効果

床版中の鋼材の拘束効果、および中間支点部の床版剛性と乾燥収縮の有無の影響を調べるために、ケース(a)~(d)の床版の軸力分布(端支点から第2径間中央まで)を図9に示す。ケース(a)では鋼材の拘束のみを考慮し、一方ケース(b)(c)(d)では、鋼材だけでなく床版中の鋼材による拘束も考慮している。なお、クリープ・乾燥収縮の計算においては、道示の規定値(最終収縮度 ϵ_x は 20×10^{-5} , クリープ係数は $\varphi_1 = 2.0$, $\varphi_2 = 4.0$)を用いた。床版中の鋼材量は主桁断面積の60%程度以上で上フランジ断面積の3倍程度となり、それによる乾燥収縮度の拘束効果は大きく、ケース(a)の床版合成断面の軸力に比べ、ケース(b)(c)(d)のコンクリート断面の軸力は支間部で約1.5~2倍になる。したがって、ケース(a)の計算ではクリープや乾燥収縮によるコンクリート応力度を過小評価する結果となる。

図10には床版コンクリートの乾燥収縮によるジベルのせん断応力分布を示す。床版中の鋼材の拘束を考慮することによって、ジベルの応力は桁端部で約4割減少する。

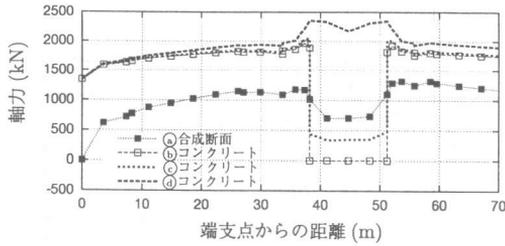


図9 乾燥収縮によるRC床版の軸力

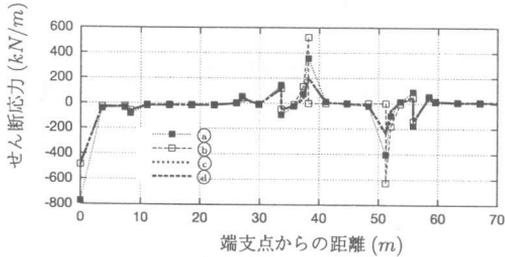


図10 乾燥収縮によるジベルのせん断応力

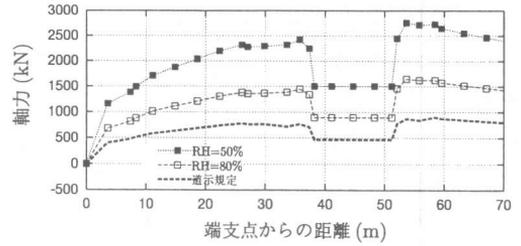


図11 乾燥収縮によるRC床版の軸力

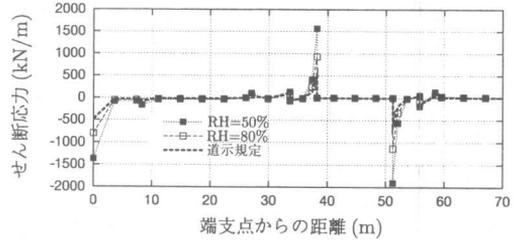


図12 乾燥収縮によるジベルのせん断応力

(2) クリープ係数, 乾燥収縮度の規定値の影響
 クリープ・乾燥収縮の計算において, 道示の規定値と CEB-CODEの規定値とを用いた場合の比較計算を行った. 道示の規定値は前述の通りである. 一方, CEB-CODEの規定値では, コンクリートの設計基準強度は $f_{ck} = 30\text{MPa}$, 仮想部材厚 $H_0 = 300\text{mm}$ とし, 相対湿度 $\text{RH}=50, 80\%$ の2通りでクリープ係数と乾燥収縮度を算定した.

道示, CEB-CODEの規定値を用いた乾燥収縮による合成桁の軸力分布を図11に示す. これらの解析結果は大きく異なり, $\text{RH}50$ では合成床版の軸力は道示の結果の3倍程度となっている.

図12にジベルのせん断応力を示す. ジベルのせん断応力も中間支点部で $\text{RH}50$ の値は, 道示の約75%増となっている. クリープ係数と最終乾燥収縮度の規定値について, 道示では常に一定値が用いられているが, CEB-CODEでは種々のパラメータを導入して実験式から計算するようになっており, プレーンコンクリートとしての値を用いている. クリープ係数・乾燥収縮量はコンクリートの設計基準強度, 環境条件, 材齢など, 種々のパラメータによって変化するため, 道示のように一定値を用いると現実の応力状態とかけ離れた応力値が算定されるおそれがある.

5. まとめ

連続合成桁の解析プログラムを用いて中間支点部のRC床版に注目した数値解析を行い, クリープや乾燥収縮に関する設計基準値や鉄筋によるクリープ・乾燥収縮の拘束などについて検討した結果以下のことがわかった.

- (1) クリープ・乾燥収縮に対する床版の鋼材の拘束効果は大きく, コンクリートひび割れ制御設計ではその効果は無視できず, クリープ係数や乾燥収縮度に対する値を正確に規定する必要がある.
- (2) コンクリートにひび割れが発生前の経時解析を行ったが, 活荷重が載荷されると中間支点部にはひび割れが発生する. ひび割れ発生後は床版剛性は急激に低下し, またクリープ・乾燥収縮の効果も緩和されるので, この効果を考慮しないと過大設計になることも考えられるが, ひび割れ発生後の応力解析については今後の課題としたい.

参考文献

- 1) 倉方慶夫ほか: 連続鋼合成桁における鉄筋コンクリート床版の設計上の課題, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998
- 2) 川上洵ほか訳: コンクリート構造物の応力と変形 [クリープ・乾燥収縮・ひび割れ], pp.345-352 (CEB-FIP Model Code 1990 (MC90))
- 3) 日本道路橋協会: 道示・解説, 鋼橋編, 1994
- 4) 伊藤敏一ほか訳: 合成桁におけるひび割れ幅の制限, 橋梁と基礎, 1993-2