

PC 曲線箱桁橋のクリープ解析法に関する研究

前田 晴人*1・酒井 一*2・曹 西*3・三井 康司*4

1. はじめに

コンクリート橋と鋼橋とを設計するうえでの大きな違いの1つは、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による影響の有無である。コンクリート橋を設計する場合、これらの影響は無視できない。コンクリート橋においても単純桁の場合、これらは変形量のみに影響し、断面力への影響はほとんどない。しかしながら、分割施工される連続桁のように構造系が変化し、自由変形が拘束される不静定構造物の場合は、これらの影響により不静定力が発生するため、断面力算出においてもこれらの影響を考慮する必要がある。

著者らはこれまで、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮問題に関して、二次元平面内において任意の軸線形状をもつコンクリート構造物のクリープ解析法¹⁾、1断面内に材齢の異なる2部材が存在するPC合成桁のクリープ解析法²⁾、および波形鋼板ウエブを有するPC箱桁橋のクリープ解析法³⁾等を提案した。

これらは基本的に、コンクリートのクリープ・乾燥収縮によるひずみ変化を求める際に、鉄筋およびPC鋼材の拘束効果を考慮した、変形法によるクリープ解析法であり、平面骨組構造を対象とした解析法であった。

日本におけるPC橋の歴史は、1952年の長生橋完成以来半世紀を経過しており、当初直線橋に対して用いられていたPC橋が、最近では平面曲線半径の小さいインターチェンジ橋にも使用されるようになった。しかしながら、著者らの知るかぎりでは、PC曲線橋に対するクリープ解析・実験・計測等について発表された論文は見当たらず、クリープによる影響は、後述する主桁とPC鋼材とを上下2層に配置した2層構造立体解析またはFEM解析等により求めている場合が多いものと推定される。

これらの解析法は、PC鋼材の配置を変更するたびに解析モデルから作り変える必要があり、照査業務には適しているが、PC鋼材配置の最適化をはかる等の検討業務に適しているとはいえない。

本研究では、先に提案した二次元の平面骨組構造に対するクリープ解析法に、面外の曲げ、せん断およびねじりの影響を追加した、三次元の立体骨組構造に対するクリープ解析法の基本式を提案する。この解析法によると、PC鋼材配置を変更しても、解析モデルまでフィードバックして変更する要はない。

さらに、段階施工されるPC3径間連続曲線箱桁橋を例にとり、曲線橋に対するクリープの影響を考察する。

2. 平面骨組に対するクリープ解析法¹⁾

先に提案した、二次元平面内において任意の軸線形状をもつコンクリート構造物に対する、鉄筋およびPC鋼材の拘束効果を考慮した変形法によるクリープ解析法は以下に示すとおりである。

2.1 変形法の基本式

施工段階（以下、ステージという） $r-1 \sim r$ の間に進行するクリープひずみについての釣り合い式は、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によってコンクリート断面図心に生じるひずみおよび曲率変化を、 $\epsilon_{cg}(t_r)$ 、 $\phi_{cg}(t_r)$ また、断面に作用している軸力および曲げモーメントを $N(t_r)$ 、 $M(t_r)$ とすると、式(1)のように表わすことができる(図-1)。図-1における z_m 、 z_n および z_k は、それぞれコンクリート断面図心から鉄筋図心、PC鋼材図心および任意のひずみ算出位置までの距離を示す。

$$\begin{bmatrix} N(t_r) \\ M(t_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \\ D_2 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{cg}(t_r) \\ \phi_{cg}(t_r) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F1P \\ F2P \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$N(t_r)$ 、 $M(t_r)$: $t_r \sim t_{r-1}$ における断面力の変化

$\epsilon_{cg}(t_r)$ 、 $\phi_{cg}(t_r)$: $t_r \sim t_{r-1}$ におけるひずみおよび曲率の変化

$D_1 = \phi_{r, r-1} E_c A_c + E_s A_s + E_p A$

$D_2 = E_s Q_s + E_p Q_p$

$D_3 = \phi_{r, r-1} E_c I_c + E_s I_s + E_p I_p$

$\phi_{r, r-1} = 1 / (1 + \phi_{r, r-1} / 2)$

$\phi_{r, r-1}$: $r-1 \sim r$ に進行するクリープ係数

E_c 、 E_s 、 E_p : コンクリート、鉄筋およびPC鋼材のヤング係数

A_c 、 A_s 、 A_p : コンクリート、鉄筋およびPC鋼材の断面積

Q_s 、 Q_p : 鉄筋およびPC鋼材のコンクリート断面図心まわり断面一次モーメント

I_c 、 I_s 、 I_p : コンクリート、鉄筋およびPC鋼材の断面二次モーメント

*1 Haruhito MAEDA : (株)日本構造橋梁研究所 設計第二部 工博

*2 Hajime SAKAI : (株)日本構造橋梁研究所 システム部

*3 Se SO : 信州大学 工学部 社会開発工学科 助手 工博

*4 Yasushi MITSUI : 信州大学 工学部 社会開発工学科 教授 工博

$$F1 = \phi_{r,r-1} \left\{ \sum_{k=r-1}^r (\Phi_{r,k} - \Phi_{r-1,k}) N_c(t_k) + E_c \varepsilon_{cs}(r, r-1) A_c \right\}$$

$$F2 = \phi_{r,r-1} \left\{ \sum_{k=r-1}^r (\Phi_{r,k} - \Phi_{r-1,k}) M_c(t_k) \right\}$$

$N_c(t_k), M_c(t_k)$: γ までの任意ステージ k で作用する断面力

$\phi_{r,k}, \phi_{r-1,k}$: $k \sim r$ および $k \sim r-1$ に進行するクリープ係数

$\varepsilon_{cs}(r, r-1)$: $r-1 \sim r$ に進行するコンクリートの乾燥収縮度

$$F1P = A_p \{ \sigma_p^0 + \delta \sigma_p(t_r) \}$$

$$F2P = A_p \{ \sigma_p^0 + \delta \sigma_p(t_r) \} z_n$$

$F1P, F2P$: プレストレス力の影響

σ_p^0 : 導入プレストレス

$\delta \sigma_p(t_r)$: レラクセーションによる減少量

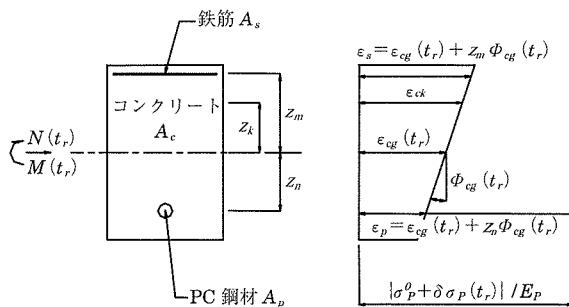


図-1 コンクリート断面における作用力とひずみ

二次元平面骨組構造の場合、式(1)に基づく鉄筋およびPC鋼材の拘束効果を考慮した変形法によるクリープ解析の基本式は、要素 $i-j$ に対して式(2)のように表すことができる。N, S, M はそれぞれ要素端における軸力、せん断力および曲げモーメントを表す。また、u, w, θ はそれぞれ要素両端における軸方向、軸直角方向および回転方向の変位である。

$$\begin{bmatrix} N_i \\ S_i \\ M_i \\ N_j \\ S_j \\ M_j \end{bmatrix} = \frac{1}{\ell} \begin{bmatrix} D_1 & & & & & \\ & 0 & \frac{12}{\ell^2} D & & & \\ & -D_2 & \frac{6}{\ell} D & D_4 & & \\ & -D_1 & 0 & D_2 & D_1 & \\ & 0 & \frac{12}{\ell^2} D & \frac{6}{\ell} D & 0 & \frac{12}{\ell^2} D \\ D_2 & \frac{6}{\ell} D & D_3 & -D_2 & \frac{6}{\ell} D & D_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ w_i \\ \theta_i \\ u_j \\ w_j \\ \theta_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(F1 - F1P) \\ 0 \\ (F2 - F2P) \\ (F1 - F1P) \\ 0 \\ -(F2 - F2P) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、

$$D = D_3 - \frac{D_2^2}{D_1}, \quad D_4 = 4D_3 - \frac{3D_2^2}{D_1}, \quad D_5 = 2D_3 - \frac{3D_2^2}{D_1}$$

ℓ : 要素長 ($i-j$ 間)

式(2)をマトリックス表示すると

$$\{F\} = [D] \cdot \{U\} + \{P\} \quad (3)$$

となる。 $\{F\}$ は節点力ベクトル、 $[D]$ は剛性マトリックス、 $\{U\}$ は節点変位ベクトルおよび $\{P\}$ は荷重ベクトルである。

2.2 クリープ係数

道路橋示方書におけるクリープ係数は、当初文献4)を

参考に定められていたが、近年の研究成果を踏まえ平成8年の改訂版から新たな修正式が用いられるようになった。ここではクリープ係数として道路橋示方書Iの解説に示された修正式を用いることとする⁵⁾。

クリープ係数の基本式は、遅れ弾性成分とフロー成分を考慮した式(4)で表すことができる。

$$\phi_{r,k} + \phi_{d0} \cdot \beta_d(t_r - t_k) + \phi_{f0} \{ \beta_f(t_r) - \beta_f(t_k) \} \quad (4)$$

ここに、

$\phi_{r,k}$: t_k から t_r までに進行するクリープ係数

ϕ_{d0} : 遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数で、一般に0.4

$\beta_d(t_r - t_k)$: 遅れ弾性ひずみの経時変化に関する係数で文献5)による

ϕ_{f0} : フローひずみに対するクリープ係数で、一般の屋外の場合2.0

$\beta_f(t_r)$: フローひずみの経時変化に関する係数で文献5)による

t_r, t_k : コンクリートの温度およびセメント種類に対する補正後の材齢

2.3 乾燥収縮度

乾燥収縮度の基本式としては、式(5)を用いることとする⁵⁾。

$$\varepsilon_{cs}(r, r-1) = \varepsilon_{s0} \{ \beta_s(t_r) - \beta_s(t_{r-1}) \} \quad (5)$$

ここに、

$\varepsilon_{cs}(r, r-1)$: t_{r-1} から t_r までに進行する乾燥収縮度

ε_{s0} : 基本乾燥収縮ひずみで、一般の屋外の場合 250×10^{-6}

$\beta_s(t_r)$: 乾燥収縮ひずみの経時変化に関する係数で文献5)による

t_r, t_k : コンクリートの温度に対する補正後の材令

3. 立体骨組に対するクリープ解析法

立体骨組の座標軸を橋軸方向に x 、鉛直下向きに z 、水平方向(右手系)に y とすると、式(2)に対応する三次元立体骨組構造に対するクリープ解析の基本式は、式(6)のように表すことができる。

立体骨組要素 $i-j$ の節点変位ベクトル $\{U\}$ は、平面骨組の場合を拡張して考えると、図-2(a)に示すように、節点 i については x, y, z 方向の変位 u_i, v_i, w_i 、と x, y, z 軸まわりの回転角 $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ 、また節点 j についても同様に、 x, y, z 方向の変位 u_j, v_j, w_j 、と x, y, z 軸まわりの回転角 $\theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}$ の12成分で構成される。

立体骨組要素の節点力ベクトル成分も、平面骨組の場合を拡張して考えると、図-2(b)に示すように、節点 i については x, y, z 方向に作用する力 N_i, S_{yi}, S_{zi} 、と x, y, z 軸まわりのモーメント M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} 、また節点 j についても同様に、 x, y, z 方向に作用する力 N_j, S_{yj}, S_{zj} 、と x, y, z 軸まわりのモーメント M_{xj}, M_{yj}, M_{zj} の12成分で構成される。

立体骨組に対してクリープ解析を行う際の剛性マトリックス $[D]$ は、式(2)に示す平面骨組の剛性マトリックスを拡

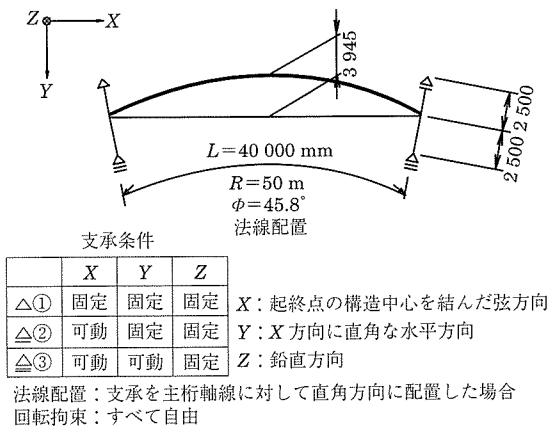


図 - 4 単純曲線箱桁の平面曲線と支承条件

立体骨組解析（以下、2層解析）および面内応力、面外曲げを受ける板要素により構成された立体FEM解析（以下、FEM解析）による比較を行う。

考慮する荷重は、自重およびプレストレス力とした。プレストレス力は径間中央の曲げ引張応力度を打ち消す程度に作用させるものとし、PC鋼材 12φ12.4 ($A_p = 1114.8 \text{ mm}^2$, $\sigma_p = 1000 \text{ N/mm}^2$) 12本を、下床版重心位置に配置することとした。

提案解析に対する解析モデルは図 - 5 (a) に示すとおりである。主桁は橋長 40 m を 10 等分し、各節点間を折れ線で結んだ梁部材としている。

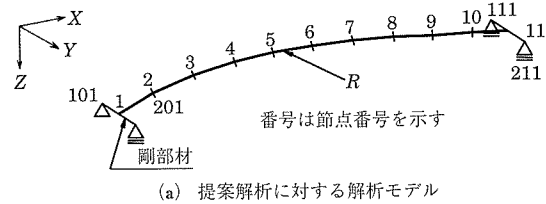
2層解析に対する解析モデルは図 - 5 (b) に示すとおりである。主桁は提案解析と同じ梁部材である。

PC鋼材は、等価断面積とヤング係数をもつ梁部材として評価する。主桁梁部材とPC鋼材梁部材間は、節点ごとに剛部材を配置することにより、偏心量 $e_p = 1.219 \text{ m}$ を確保している。プレストレス力はPC鋼材梁部材に温度換算で入力している。2層解析に用いた諸元を表 - 1 に示す。図 - 3 に示す断面形状に対して式(4)に示すクリープの基本式を適用した場合、材齢 0日~∞日の間に進行するクリープ係数は $\phi = 3.2$ となる。

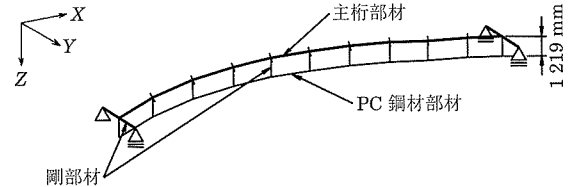
FEM解析に対する解析モデルは図 - 5(c) に示すとおりである。橋軸方向に関しては他のモデルと同様 10 等分、断面内に関しては上床版を 7 要素、ウエブを左右それぞれ 4 要素および下床版を 5 要素に分割している。各要素間はずべて

表 - 1 単純箱桁の 2層解析に用いた諸元

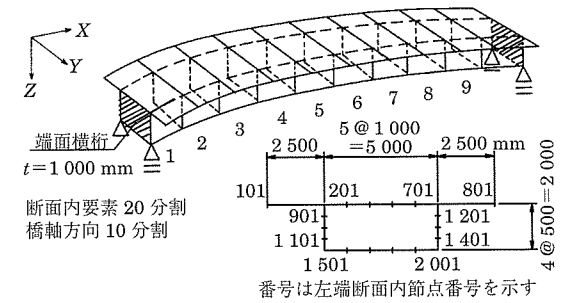
主桁梁部材	断面積	$A = 5.250 \text{ m}^2$
	断面二次モーメント (橋軸)	$I_y = 3.975 \text{ m}^4$
	断面二次モーメント (直角)	$I_z = 32.883 \text{ m}^4$
	ねじり剛性	$J = 8.000 \text{ m}^4$
	ヤング係数	$E = 3.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
PC鋼材梁部材	断面積	$A_p = 0.01338 \text{ m}^2$
	ヤング係数	$E_p = 2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$
	線膨張係数	$\epsilon_T = 10 \times 10^{-6}$
プレストレス力 (温度換算)	緊張応力	$\sigma_p = 1000 \text{ N/mm}^2$
	温度 $T = -\sigma_p / (E_p \cdot \epsilon_T)$	$T = -500 \text{ }^\circ\text{C}$



(a) 提案解析に対する解析モデル



(b) 2層解析に対する解析モデル



(c) FEM解析に対する解析モデル

図 - 5 単純曲線箱桁の解析モデル

て剛結合としている。また、両端には剛な端横桁を配置している。PC鋼材は下床版の各節点位置に 2本ずつ合計 12本を曲げ剛性のない梁部材として配置している。

クリープによるたわみを求める場合、2層解析およびFEM解析におけるコンクリートのヤング係数およびせん断弾性係数は、クリープ係数 $\phi = 3.2$ で除した値を用いている。

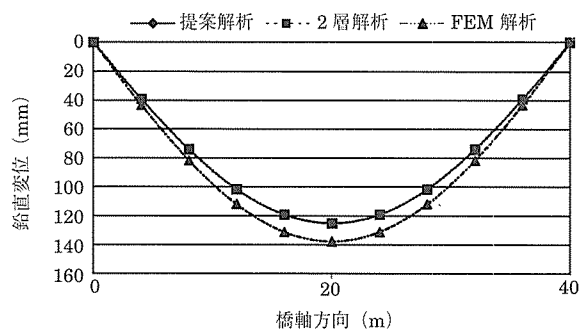
4.2 解析結果および考察

単純曲線箱桁の自重によるクリープ鉛直変位曲線を図 - 6 (a) に、プレストレス力によるクリープ鉛直変位曲線を図 - 6 (b) に示す。また、径間中央における鉛直変位および回転角を表 - 2 に示す。

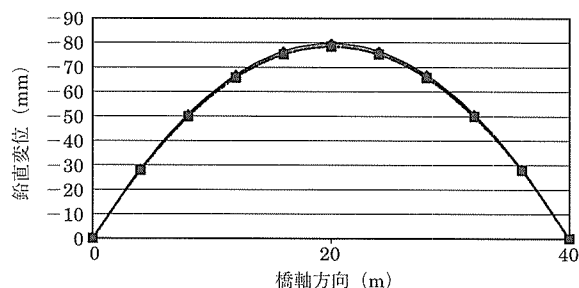
自重によるクリープ鉛直変位において、提案解析値と 2層解析値とはほぼ一致する。クリープ変位と弾性変位との比（以下、見かけのクリープ係数）は 2.93 となる。この値は実際のクリープ係数 $\phi = 3.2$ に比べて 1割程度小さな値となっているが、PC鋼材の剛性が反映された結果である。左右ウエブの平均値をとった FEM 解析値は、これらに比べて 10%程度大きな値となっているが、弾性変位も 10%程度大きな値となっており、見かけのクリープ係数は他の解析値とほぼ一致している。

自重によるクリープ回転角についても鉛直変位と同様の傾向が見られ、見かけのクリープ係数は、提案解析、2層解析および FEM 解析ともほぼ一致する。

プレストレス力によるクリープ変形量は、鉛直変位および回転角ともに、各解析法ともほぼ一致した値となっている。



(a) 自重によるクリープ鉛直変位



(b) プレストレス力によるクリープ鉛直変位

図 - 6 単純曲線箱桁のクリープ鉛直変位

表 - 2 径間中央のクリープ変形量

		①クリープ変形量	②弾性変形量	①/②見かけのクリープ係数	
		自重	鉛直変位 (mm)	提案解析 125.3 2層解析 125.2 FEM 解析 137.8	42.7 42.7 46.4
自重	回転角 (mrad)	提案解析 -5.175 2層解析 -5.212 FEM 解析 -5.643	-1.687 -1.675 -1.811	3.07 3.11 3.12	
	プレストレス力	鉛直変位 (mm)	提案解析 -79.6 2層解析 -78.4 FEM 解析 -78.3	-28.4 -28.3 -27.0	2.80 2.77 2.90
		回転角 (mrad)	提案解析 1.592 2層解析 1.568 FEM 解析 1.564	0.568 0.566 0.538	2.80 2.77 2.91

これらの結果より、単純曲線箱桁のクリープ性状について、提案解析法は、精度よく解が求められることを確認した。

5. 片持ち直線箱桁にねじり荷重を作用させた場合の解析結果および考察

ねじり荷重に対する妥当性を確認するために、片持ち直線箱桁にねじり荷重を作用させた場合の変形状について考察する。

5.1 解析モデル

片持ち直線箱桁の解析は、図 - 3 に示した 1 室箱桁断面で、橋長 $L = 40$ m、起点側を全方向固定、終点側を完全自由としたモデルに対して行う。

考察に際しては、提案解析と FEM 解析との比較を行う。FEM 解析モデルは、4. で用いた曲線 FEM 解析モデルと同

様の要素分割で、曲線を直線に伸ばし、起点側断面の節点を全方向固定、終点側を完全自由としたモデルを用いる。FEM のクリープ解析においては、ヤング係数をクリープ係数 ($\phi = 3.2$) で除した値を用いる。

ねじり荷重は、自由端に 1 000 kNm の集中ねじり荷重 (各ウエブに ± 200 kN) を作用させた場合と、橋長全体にわたり 50 kNm/m の分布ねじり荷重 (各ウエブに ± 10 kN/m) を作用させた場合について考察する。

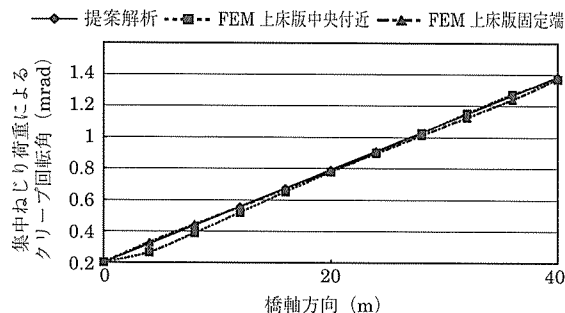
5.2 解析結果および考察

提案解析および FEM 解析によるクリープ回転角を図 - 7 に示す。また、自由端におけるクリープ回転角を表 - 3 に示す。

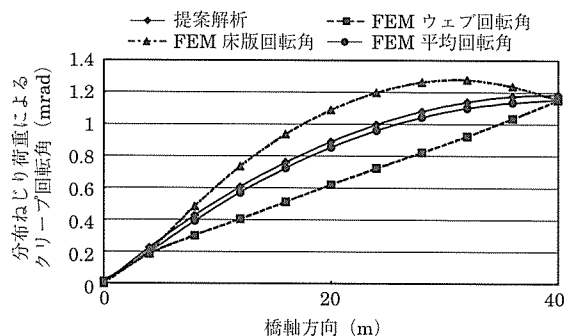
表 - 3 より、ねじり荷重による自由端のクリープ回転角は、集中または分布荷重に関わらず、提案解析値と FEM 解析値とはほぼ一致している。また、クリープ回転角と弾性回転角との比は 3.2 であり、回転に関しては鋼材の影響を考慮していないため、クリープ係数そのものと一致する。

図 - 7(a) に示すように、集中ねじり荷重によるクリープ回転角は、固定端から自由端の間の中間値についても、提案解析値と FEM 解析値とはほぼ一致する。

しかしながら、分布ねじり荷重による固定端から自由端



(a) 先端集中ねじり荷重によるクリープ回転角



(b) 分布ねじり荷重によるクリープ回転角

図 - 7 片持ち直線箱桁のねじり荷重によるクリープ回転角

表 - 3 ねじり荷重による自由端のクリープ回転角 (mrad)

		①クリープ回転角	②弾性回転角	①/②見かけのクリープ係数
		集中ねじり荷重	提案解析 1.185 FEM 解析 1.174	0.370 0.367
分布ねじり荷重	提案解析	1.185	0.370	3.20
	FEM 解析	1.154	0.361	3.20

の間のクリープ回転角は、図 - 7(b)に示すように両解析値で必ずしも一致しない。これは、FEM 解析の箱桁断面内においてせん断変形が発生し、ウェブの回転角と床版の回転角とが異なった値を示すためである。提案解析は 1 本の梁を基本としているため、断面内の変形については考慮することができない。FEM 解析におけるウェブと床版の回転角の平均値は、提案解析値とほぼ一致しており、提案解析の回転角は、箱桁断面全体としての平均回転角を表しているといえる。

これらの結果より、ねじり荷重に対するクリープ性状について、提案解析法は精度よく解が求められることを確認した。

6. 突上げ片持ち曲線箱桁に対する解析結果および考察

4. では単純曲線箱桁についての解析を行ったため、不静定力は発生しなかった。また、5. においても静定系の片持ち直線箱桁についての解析を行ったため、不静定力は発生しなかった。ここでは、片持ち曲線箱桁に自重およびプレストレス力作用させた後、片持ち曲線箱桁の自由端を鉛直方向に固定して突上げ片持ち曲線箱桁とした場合の不静定力について考察する。

6.1 解析モデル

片持ち曲線箱桁の解析モデルは、図 - 3 に示した形状の 1 室箱桁断面で、図 - 4 に示すように橋長を $L = 40 \text{ m}$ 、平面曲線半径を $R = 50 \text{ m}$ 、支線線を主桁軸線に対して直角に配置して、起点側を全方向固定、終点側を完全自由としている。突上げ片持ち曲線箱桁は、片持ち曲線箱桁の解析モデルにおいて終点側の支線位置 2 支点を鉛直方向固定としたものである。

考察に際しては、1 本の主桁と支線配置横桁および支線により構成された提案解析と、主桁と PC 鋼材とを上下 2 層に配置した 2 層解析との比較を行う。

考慮する荷重は、自重およびプレストレス力とした。プレストレス力は起点側固定端の曲げ引張応力度を打ち消す程度に作用させるものとし、PC 鋼材 $12 \phi 12.4$ ($A_p = 1114.8 \text{ mm}^2$, $\sigma_p = 1000 \text{ N/mm}^2$) 30 本を、上床版圆心に配置することとした。

提案解析に対する解析モデルは図 - 8(a)に示すとおりである。主桁は橋長 40 m を 10 等分し、各節点間を折れ線で結んだ梁部材としている。

2 層解析に対する解析モデルは図 - 8(b)に示すとおりである。主桁は提案解析と同じ梁部材である。

PC 鋼材は、等価な断面積とヤング係数を持ち、曲げ剛性のない梁部材として評価する。主桁梁部材と PC 鋼材梁部材間は節点ごとに剛部材を配置することにより、偏心量 $e_p = 0.781 \text{ m}$ を確保している。プレストレス力は PC 鋼材梁部材に温度換算で入力している。2 層解析に用いた諸元を表 - 4 に示す。

6.2 2 層解析におけるクリープ不静定力の計算

2 層解析におけるクリープ不静定反力は、片持ち曲線箱桁に自重、プレストレス力および終点側支線に単位荷重を

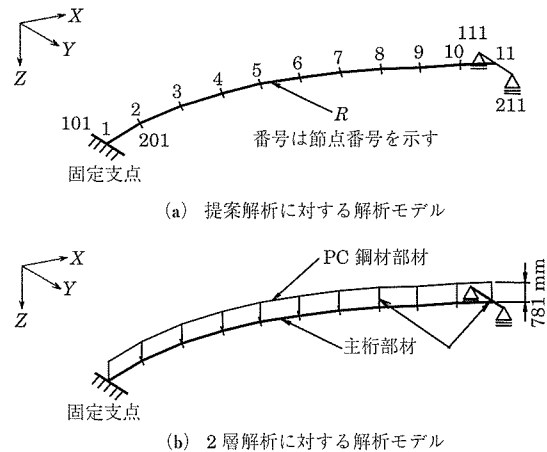


図 - 8 片持ちおよび突上げ片持ち曲線箱桁の解析モデル

表 - 4 突上げ片持ち曲線箱桁の 2 層解析に用いた諸元

主桁梁部材	断面積	$A = 5.250 \text{ m}^2$
	断面 2 次モーメント (橋軸)	$I_y = 3.975 \text{ m}^4$
	断面 2 次モーメント (直角)	$I_z = 32.883 \text{ m}^4$
	ねじりモーメント	$J = 8.000 \text{ m}^4$
	ヤング係数	$E = 3.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
PC 鋼材梁部材	断面積	$A_p = 0.03344 \text{ m}^2$
	ヤング係数	$E_p = 2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$
	線膨張係数	$\epsilon_T = 10 \times 10^{-6}$
	緊張応力	$\sigma_T = 1000 \text{ N/mm}^2$
プレストレス力 (温度換算)	温度換算係数	$T = -\sigma_p / (E_p \epsilon_T)$
	緊張応力	$T = -500 \text{ }^\circ\text{C}$
	クリープ係数	$\phi = 3.2$

表 - 5 2 層解析におけるクリープ不静定反力の算出

		外 (o)	内 (i)
外 $p_o = 1$ による鉛直変位 (mm)	$\delta_{p_o, o}, \delta_{p_o, i}$	0.1740	0.1625
内 $p_i = 1$ による鉛直変位 (mm)	$\delta_{p_i, o}, \delta_{p_i, i}$	0.1625	0.1600
自重による鉛直変位 (mm)	$\delta_{g_o}, \delta_{g_i}$	324.8	305.7
プレストレス力による鉛直変位 (mm)	$\delta_{s_o}, \delta_{s_i}$	-137.7	-124.7
自重によるクリープ不静定反力 (kN)	$R\phi_o, R\phi_i$	1533	276
プレストレス力によるクリープ不静定反力 (kN)	$R\phi_o, R\phi_i$	-1190	462

作用させた場合の変形量を用いて、式(7)により計算した。式(7)は構造系に変化がある場合のクリープ不静定力算出近似式として一般的に用いられる式を、立体解析用に応用したものである。計算結果を表 - 5 に示す。不静定断面力は、単位荷重を載荷することにより発生した断面力に対して、不静定反力倍することにより求めることができる。

$$\begin{bmatrix} R\phi_o \\ R\phi_i \end{bmatrix} = [1 - \exp(-\phi)] \begin{bmatrix} \delta_{p_o, o} & \delta_{p_i, o} \\ \delta_{p_o, i} & \delta_{p_i, i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \delta_{g_o} \\ \delta_{g_i} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここに,

$R\phi_o, R\phi_i$: クリープによる曲線外側ウェブおよび内側ウェブの不静定反力

ϕ : 支点設置からクリープ終了までのクリープ係数 (= 3.2)

$\delta_{po, o}, \delta_{po, i}$: 終点外側ウェブ支点位置に単位荷重を作用させた場合の終点外側ウェブおよび内側ウェブ支点位置での鉛直変位

$\delta_{pi, o}, \delta_{pi, i}$: 終点内側ウェブ支点位置に単位荷重を作用させた場合の終点外側ウェブおよび内側ウェブ支点位置での鉛直変位

δ_{go}, δ_{gi} : 自重またはプレストレスを作用させた場合の終点外側ウェブおよび内側ウェブ支点位置での鉛直変位

6.3 解析結果および考察

提案解析および2層解析によるクリープ不静定反力は、表-6に示すとおりである。両解析法によるクリープ不静定反力はほぼ一致する。

自重によるクリープ不静定力は、図-9(a)~図-9(c)に示すとおりである。また、プレストレスによるクリープ

不静定力は、図-10(a)~図-10(c)に示すとおりである。それぞれ、(a)は橋軸方向の曲げモーメント、(b)は鉛直方向のせん断力、(c)はねじりモーメントを示す。

両解析法とも不静定反力がほぼ一致しているため、その反力により発生するクリープ不静定力もよく一致している。

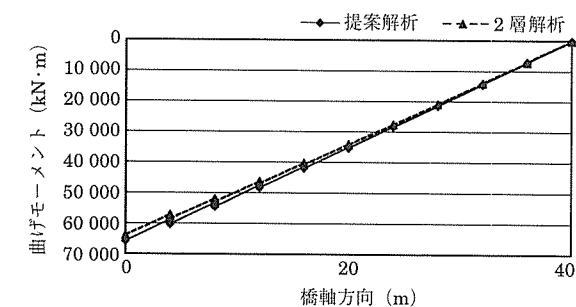
これらの解析結果から、提案解析法は不静定構造物に対しても適用できることが確認された。

7.3 径間連続曲線箱桁に対する結果および考察

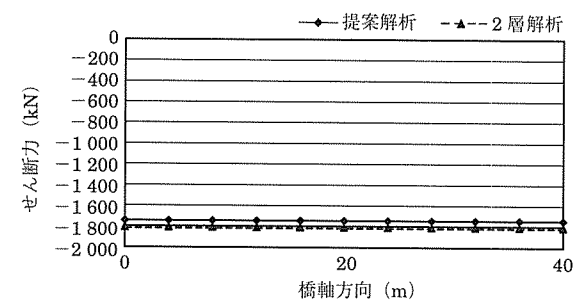
曲線桁は、道路線形上および構造上の理由で、単純桁として用いられるよりも、連続桁として用いられる場合の方

表-6 突上げ片持ち曲線箱桁の不静定反力 (kN)

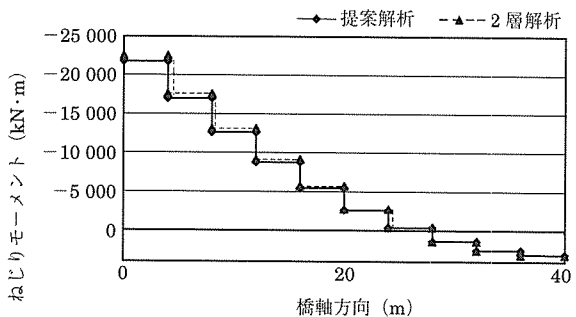
		外側ウェブ	内側ウェブ	合計
自重	①提案解析	1 494	253	1 747
	②2層解析	1 533	276	1 809
	②/①比率	1.03	1.09	1.04
プレストレス	①提案解析	-1 184	464	-720
	②2層解析	-1 190	462	-728
	②/①比率	1.01	1.00	1.01



(a) クリープ解曲げモーメント (kN·m)

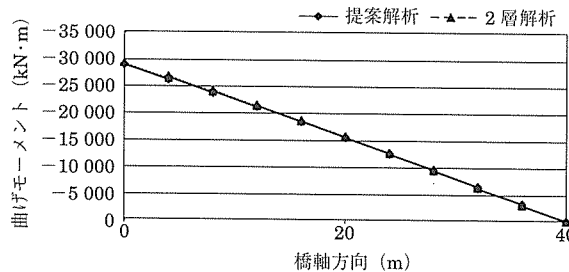


(b) クリープ解せん断力 (kN)

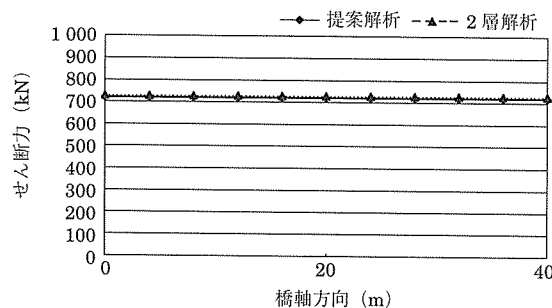


(c) クリープ解ねじりモーメント (kN·m)

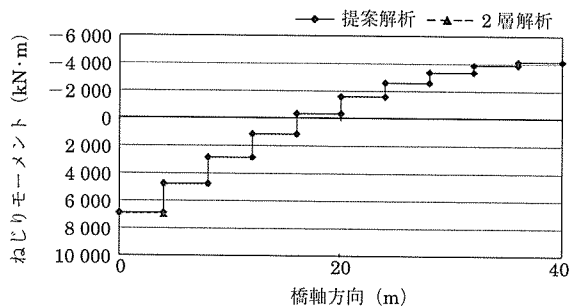
図-9 突上げ片持ち曲線箱桁の自重によるクリープ不静定力



(a) クリープ解曲げモーメント (kN·m)



(b) クリープ解せん断力 (kN)



(c) クリープ解ねじりモーメント (kN·m)

図-10 突上げ片持ち曲線箱桁のプレストレスによるクリープ不静定力

が多い。ここでは、連続曲線箱桁のクリープ特性を把握するために、3径間連続曲線箱桁と3径間連続直線箱桁との比較を行う。また、クリープによる不静定力を発生させるために、スパンバイスパン架設による段階施工を例にとり、検討を行う。

7.1 解析モデル

3径間連続曲線箱桁の解析は、図-3に示した形状の1室箱桁断面で、図-11に示すように支間長を $L=40\text{ m}$ 、平面曲線半径を $R=100\text{ m}$ 、支承を主桁軸線に対して直角に配置したモデルに対して行う。3径間連続直線箱桁の解析は、上記モデルの平面曲線を直線としたモデルに対して行う。

施工段階（以下、ステージ）は、図-11に示す3ステージに分けて行い、施工に要した日数は、それぞれ10日とした。構造系完成時からクリープ終了時までに行うクリープ係数は、第1から第3ステージで施工するそれぞれの部材に対して、2.3、2.4、および2.6となる。

考慮する荷重は、自重およびプレストレス力とした。プレストレス力は自重による曲げ引張応力度を打ち消す程度に作用させるものとし、PC鋼材 $12\phi 12.7$ ($A_p=1\ 184.52\text{ mm}^2$, $\sigma_p=1\ 013\text{ N/mm}^2$, $P=1\ 200\text{ kN}$) 10本を、図-12に示すように配置することとした。

提案解析に対する解析モデルは図-13に示すとおりである。主桁は支間長 40 m を10等分し、各節点間を折れ線で結んだ梁部材としている。

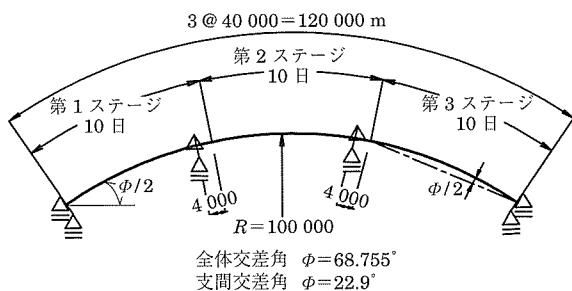


図-11 平面曲線と架設ステージ

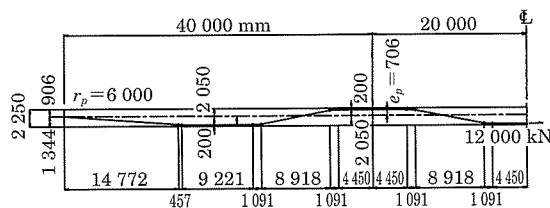


図-12 PC鋼材配置

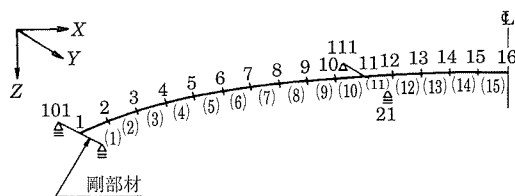


図-13 3径間連続箱桁の解析モデル

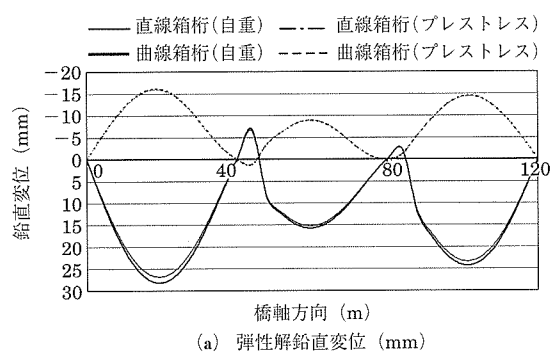
7.2 解析結果および考察

3径間連続箱桁の自重およびプレストレス力による鉛直変位を図-14に示す。図-14(a)は弾性鉛直変位であり、曲線箱桁の自重による径間中央部変位がやや大きめとなる以外は、直線箱桁と曲線箱桁との差はない。図-14(b)はクリープ鉛直変位であり、弾性変位と同様、直線箱桁と曲線箱桁とで有意な差はない。

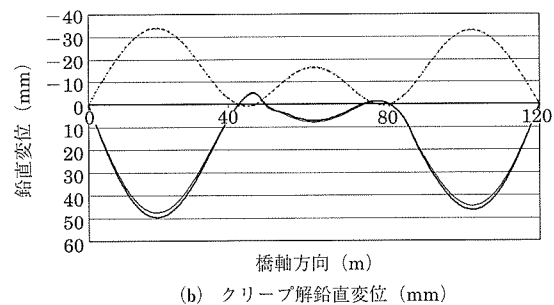
図-15は自重およびプレストレス力による曲げモーメントを示したものである。曲げモーメントに関しても、弾性解およびクリープ解ともに、直線箱桁と曲線箱桁とで有意な差はない。図-16に示すように、せん断力についても有意な差はない。クリープ解析によりえられた曲げモーメントおよびせん断力は、段階施工を考慮してえられた弾性解析による値を、全支保工架設と仮定して算出した弾性解による値に近づける方向に発生している。

図-17(a)は曲線箱桁の自重によるねじりモーメントを示したものである。クリープ解は弾性解を低減させる方向に発生しており、最大のねじりモーメントが発生している端点部においては、弾性解を約20%低減させている。図-17(b)はプレストレス力によるねじり不静定モーメントを示したものである。この値に関してもクリープ解は弾性解を低減させる方向に発生しており、最大のねじり不静定モーメントが発生している中間支点部においては、自重同様、弾性解を約20%低減させている。

これらの結果から、連続曲線箱桁を解析するにあたり、鉛直変位、曲げモーメントおよびせん断力の算出は直線モデルで代用できること、ねじりモーメントの算出にあたっては曲線箱桁として解析し、弾性解のみならずクリープの影響を考慮する必要があることが明らかとなった。



(a) 弾性解鉛直変位 (mm)



(b) クリープ解鉛直変位 (mm)

図-14 3径間連続箱桁の鉛直変位

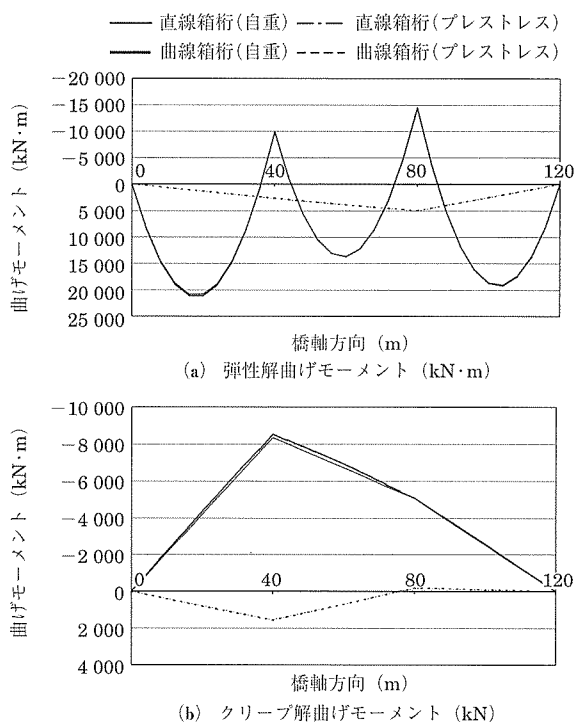


図 - 15 3 径間連続箱桁橋の曲げモーメント

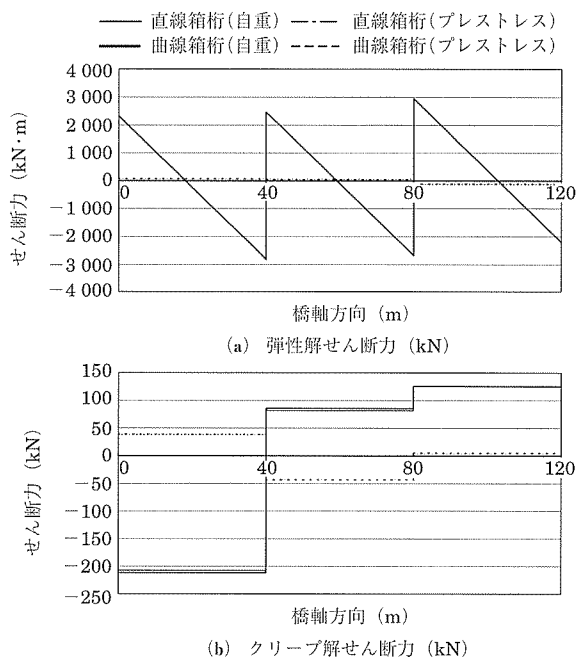


図 - 16 3 径間連続箱桁橋のせん断力

8. ま と め

本論文において得られた結論は次のとおりである。

- (1) 三次元立体骨組における、鉄筋およびPC鋼材の拘束効果を考慮したクリープ解析法の基本式は、式(6)で表すことができる。
- (2) 単純曲線箱桁のクリープ性状について検討することにより、提案解析法は精度よく解が求められること

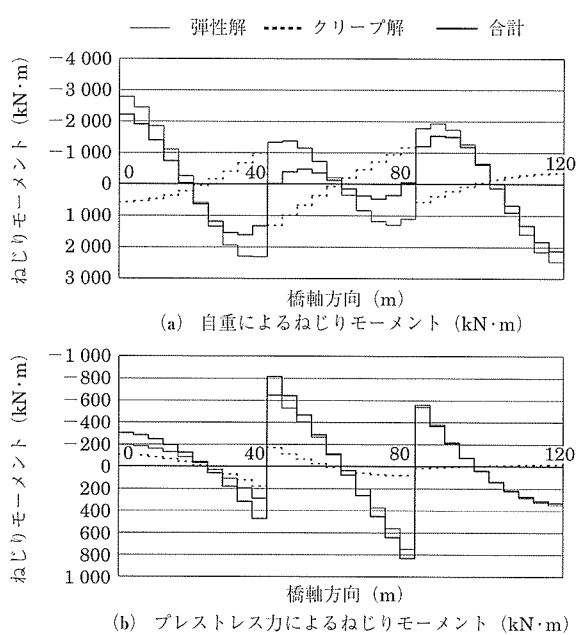


図 - 17 曲線箱桁のねじりモーメント

を確認した。

- (3) 片持ち直線箱桁にねじり荷重を作用させた場合のクリープ性状について検討することにより、提案解析法は精度よく解が求められることを確認した。
- (4) 突上げ片持ち曲線箱桁のクリープ不静定力について検討することにより、提案解析法は不静定構造物に対しても精度よく解が求められることを確認した。
- (5) 3 径間連続曲線箱桁と直線箱桁とを比較検討することにより、曲線半径 $R = 100$ m、支間 $L = 40$ m 程度の曲線橋であれば、鉛直変位、曲げモーメントおよびせん断力を直線箱桁として計算しても有意な差が生じないことが明らかとなった。
- (6) 3 径間連続曲線箱桁のクリープねじりモーメントについて検討することにより、クリープ解が弾性解に対して無視できない値であり、曲線箱桁として解析する必要のあることが明らかとなった。曲線半径 $R = 100$ m、支間 $L = 40$ m の 3 径間連続曲線箱桁の試算結果によると、弾性解はクリープ解により 20% 低減された。

謝 辞

本研究の実施にあたり有益なご助言をいただいた(株)日本構造橋梁研究所の小宮正久博士に深謝の意を表します。

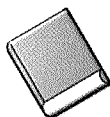
参考文献

- 1) 小宮正久, 酒井 一, 前田晴人: 任意形コンクリート構造物のクリープ解析法に関する一提案, プレストレストコンクリート, Vol.29, No.2, プレストレストコンクリート技術協会, pp.8~17, 1987.3
- 2) 小宮正久, 酒井 一, 前田晴人: PC 合成桁のクリープ解析, プレストレストコンクリート, Vol.32, No.2, プレストレストコンクリート技術協会, pp.63~73, 1990.3
- 3) 前田晴人, 酒井 一, 小宮正久: 波形鋼板ウェブを有する PC 箱桁橋のクリープ解析法に関する研究, 土木学会論文集, 第 699/V-1,

- pp.171 ~ 181, 2003.2
- 4) H.リュッシュ, D.エンゲビルト著, 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
 - 5) 道路橋示方書。共通編, 日本道路協会, pp.30 ~ 38, 2002年3月
 - 6) 前田晴人, 小宮正久, 酒井 一: PC単純曲線箱桁の解析法とプレ

ストレス効果に関する一考察, プレストレストコンクリート, Vol.44, No.4, プレストレストコンクリート技術協会, pp.81 ~ 90, 2002.7

【2004年1月27日受付】



刊行物案内

第1回 *fib* コンGRES 2002 — 21世紀のコンクリート構造— 論文集

(平成14年10月)

平成14年10月に大阪で開催された標記コンGRESの講演論文集です。
下記の2種類となります。

- (1) プロシーディングス1(印刷物 全2巻):
全ての招待講演論文および採用論文の要旨
(1論文あたり2ページ)を掲載
会員 特価: 10 000 円(税込み・送料協会負担)
非会員価格: 12 000 円(税込み・送料協会負担)

- (2) プロシーディングス2(印刷物 全8巻):
プロシーディングス1および全ての採用論文
を掲載
会員 特価: 30 000 円(税込み・送料協会負担)
非会員価格: 36 000 円(税込み・送料協会負担)