

(10) 合成構造物のクリープについて

川田建設(株) ○野田行衛
 ” 渡部寛文

1. はじめに

近年、鋼とコンクリートの長所を有効に利用した合成構造物が盛んに研究されはじめ、従来の合成桁のほかに、新しい形式の合成桁や複合構造の斜張橋などが建設されている。

これらの構造は、力学的に有利であると同時に経済的にも有利であり、架設中にも鋼材を利用することにより、施工の簡素化を図ることができる。

最近の合成構造は、主要な構造材料である鋼材、鉄筋、コンクリート、PC鋼材すべてが利用されるため、鋼構造とコンクリート構造の技術分野の境界がなくなりつつある。

ところで、合成構造の設計においては、コンクリートのクリープの問題があり、コンクリートのみの構造の場合に比較して、鋼材の影響を考慮するときわめて複雑な計算をしなければならない。しかも、合成構造では種々の構造形式や施工順序の組合せがあるため、厳密には架設系を追って計算する必要があるが、実際には計算不可能な場合もある。

このようなことから、当社では合成構造のクリープに関し統一的な計算プログラム(ただし、二次元)を開発し、さらに改良を加えた。

本稿では、従来の合成桁の理論で用いられたFritz、Wippelの解法と当社で開発した汎用解析プログラムの解析結果の比較および2、3の合成構造のクリープについて検討した結果について報告する。

2. 本解析法の概要

本計算では、図-1に示すように、5つの部材からなる断面、すなわち、鋼桁、上下コンクリート、上下PC鋼材を同時に扱うことができ、したがって、一断面内のコンクリートの材令差をも考慮できるのが特徴であり、また、従来の鋼材の影響を無視した純コンクリートの構造も扱うことができる。さらにコンクリート構造の遅れ弾性クリープを考慮することができ、きわめて汎用性が高いプログラムである。

解析法は合成断面を構成する各部材が負担する配分断面力をもとめ、独立したコンクリート断面にDischingerのクリープ、乾燥収縮の基本式を適用し、非クリープ部材である鋼部材との適合条件(軸方向ひずみと回転ひずみが等しい)から、連立方程式をたて、クリープ、乾燥収縮により新たに生じる断面力を求める。この場合、クリープ係数と乾燥収縮度は微小時間内の増加量としてあたえ、断面力に対し繰返しの逐次積分を行う。

一方、構造系でのクリープ、乾燥収縮による断面力は、変形法により解析しており、不静定力に対しても配分断面力の計算を行う。

Dischingerのクリープ、乾燥収縮により発生するひずみと応力との関係は、増分の形であらわすと(1)式で与えられる。

$$\Delta \varepsilon_{k+s} = \frac{\Delta \sigma_{k+s}}{E \phi} + \frac{\sigma_{c0}}{E \phi} \Delta \eta + \Delta \varepsilon_s \quad (1)$$

ここで

$$E \phi = \frac{E c_0}{1 + \Delta \phi / 2} \quad \Delta \eta = \frac{\Delta \phi}{1 + \Delta \phi / 2} \quad \text{である。}$$

ϵ_{co} : コンクリートの弾性係数 (=一定)
 $\Delta\phi$: 微小時間内でのクリープ係数変化量
 $\Delta\Sigma s$: " 乾燥収縮度

σ_{co} : 初期のコンクリート応力
 $\Delta\sigma_{k+s} : \Delta\phi, \Delta\epsilon_s$ 進行したことにより生ずる応力

図-1の M_u, N_u, M_L, N_L は上下コンクリート重心に作用する曲げモーメント、軸力である。
 $M_{pu}, N_{pu}, M_{pl}, N_{pl}$ はPC鋼材あるいは鋼材重心に作用する曲げモーメント、軸力であり、また、 M_s, N_s は鋼筋重心に作用する曲げモーメント、軸力である。

Δ は、クリープ、乾燥収縮により生ずる配分断面力を意味する。

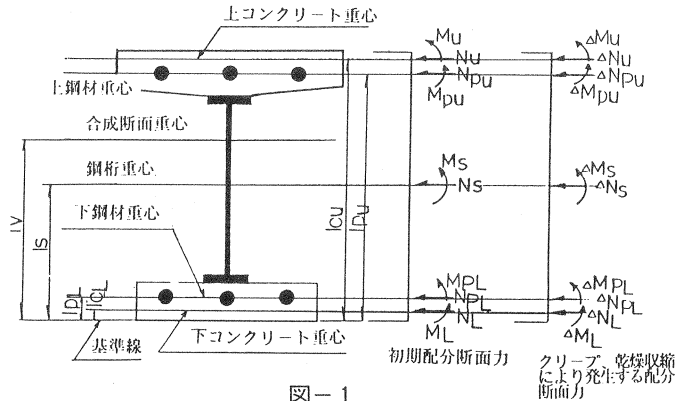


図-1

3. Fritzの解法

Fritzの解析法は、合成断面におけるコンクリート部のクリープ、乾燥収縮によるコンクリートひずみと鋼部材に生ずるひずみが等しいという適合条件から微分方程式を立て、直接解を求めた式が基本になっている。

Fritzの基本式は(2)式で与えられ、 α_0 は荷重初期に生ずるコンクリートと鋼筋のひずみの比率で、個々の部材の剛性の関数である。この基本式の解から、一定荷重荷重および乾燥収縮状態の任意時間のコンクリートの応力とひずみの関係をもとめ、コンクリートの仮想ヤング係数 $E_c\Psi$ を導入し、クリープの進行とともに、コンクリートの剛性がみかけ上変化したとして計算する。

一定荷重荷重時の Ψ の値は1よりも大きく、($\Psi = 1$ は無筋コンクリートの場合)すなわち、クリープの進行とともにコンクリート部材のヤング係数が低下していく。

$$\frac{d\sigma_c}{d\phi} + \alpha_0 \cdot \sigma_c + \alpha_0 \frac{\epsilon_s}{\phi} E_{co} = 0 \quad (2)$$

ここで

$$\alpha_0 = \frac{K_s (S_{co} + S_s)}{K_{vo} \cdot S_{vo}}$$

$K = EA, S = EJ$ でコンクリート、鋼筋、合成断面の伸び剛性、曲げ剛性である。

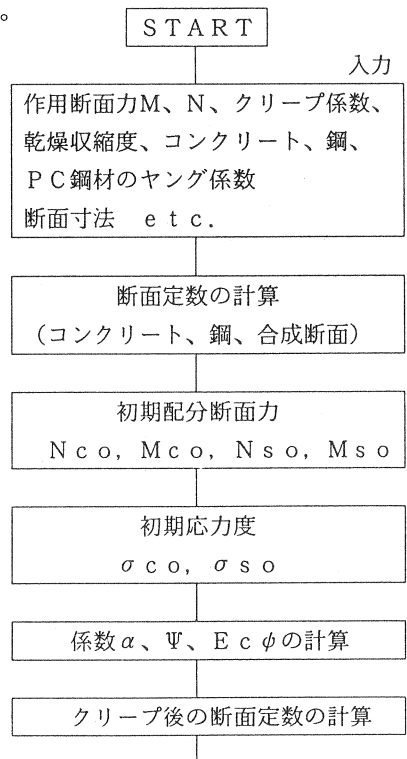
クリープに対する仮想ヤング係数は

$$E_c\phi = \frac{E_{co}}{1 + \phi \cdot \phi} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{e^{\alpha_0 \phi} - 1}{\alpha_0 \phi}$$

である。

同様に乾燥収縮の場合の仮想ヤング係数は(4)式で与えられる。



$$E_c \phi' = \frac{E_c \alpha}{1 + \phi' \cdot \phi} \quad (4)$$

$$\phi' = \frac{e^{\alpha \phi}}{e^{\alpha \phi} - 1} - \frac{1}{\alpha \phi}$$

なお、W i p p e l の解法では、軸ひずみに対する適合条件のほかに、回転ひずみの条件をも満足しており、F r i t z よりも厳密に求めている。

図-2は、F r i t z の解法のフローを示す。

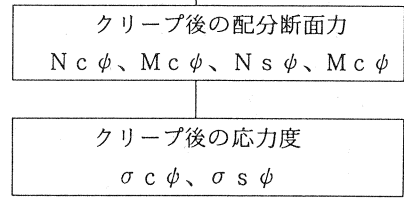


図-2

4. 計算精度の比較

ここでは文献3)、文献4)にある計算例にもとずき、本方法で解析した結果とF r i t z、W i p p e l の解法結果の比較を行う。

(1) 合成桁のクリープ

文献3)の例題の断面寸法を図-3に示す。構造は静定系で、断面力として曲げモーメント $M = 1105 \text{ tf}\cdot\text{m}$ が作用しており、床版コンクリートのクリープ係数を $\phi = 1 \sim 4$ とした場合の解析結果を示す。

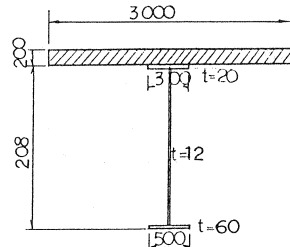


図-3

表-1は鋼桁の軸力と曲げモーメントの比較を示すが、本解法とF r i t z の解法結果との差は、ほぼ少数点以下の値約0.1%程度の差である。

力学的にはクリープの増大とともに、見掛上コンクリートの剛性が減少することから、床版の負担する曲げモーメントが減り、その分鋼桁の曲げモーメントが徐々に大きくなり、配分断面力の転移が生ずる。

表-1

ϕ	断面力	本解法	F r i t z の解法	仮定弾性係数 $E_c \phi$
0	N_s	511.86 t	511.86	350000
	M_s	317.25 $\text{tf}\cdot\text{m}$	317.25	
1	N_s	459.85	459.71	170204
	M_s	398.04	398.00	
2	N_s	413.03	412.78	108226
	M_s	470.41	470.43	
3	N_s	370.87	370.57	76978
	M_s	535.34	535.45	
4	N_s	332.97	332.63	58233
	M_s	593.61	593.83	

(2) 合成桁のクリープの伴う乾燥収縮

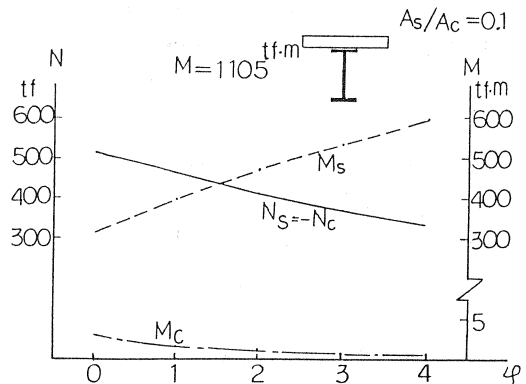
(1)と同一の断面において、床版コンクリートが $\epsilon_s = 250 \times 10^{-6}$ の乾燥収縮を起こしたものとし、クリープ係数が $\phi = 1 \sim 4$ の場合のコンクリートと鋼桁に生じる応力の計算結果を示す。

表-2から、本解析法の結果の方が僅かに大きい値を示すが、コンクリート応力で5%、鋼桁応力で0.2%以下の差である。

クリープ係数の増大とともに、コンクリート床版の引張応力は緩和される。

(3) P C 鋼材と鋼部材

文献4)の例題であり、P C 部材に比較的多



くの鋼材が配置された場合の鋼材拘束の影響を考慮している。鋼材総面積/コンクリート面積 = 5%で、プレストレス力 = 20.538 tf、クリープ係数 $\phi = 3$ として計算した。

表-3は、計算の結果を比較したものであるが、最大でも2%以下の差であった。

(4) 遅れ弾性クリープの影響

遅れ弾性クリープの計算精度を調べるために手計算で追うことができる最も簡単な例を示す。

最初にスパン10mの単純桁を2つ並べ、その後、後打ちのコンクリートを打設し、連続桁とした場合の構造系変化による自重クリープの影響を計算した。単位重量は10 tf/mで、両桁の材令は同一とする。

最終クリープ係数は $\phi = 2.6$ とし、フロー値 $\phi_f = 2.2$ 、遅れ弾性値 $\phi_v = 0.4$ として計算した。

遅れ弾性を考慮したクリープにより生ずる不静定力 $X\phi$ は次式により計算した。

$$X\phi = Xb \left(1 - \frac{\phi f}{e^{1.4}} \right)$$

また、遅れ弾性を考慮しない場合は、

$$X\phi = Xb (1 - e^{-\phi})$$

により求めた。

ここで、 Xb は全支保工施工における支点曲げモーメントである。

解析の結果を表-4に示すが、誤差は、0.1~0.2%程度であり、無視できるものである。

しかしながら、本解法では分割施工などの若材令時の遅れ弾性が変化する場合には対応できない。

5. 合成構造のクリープ計算例

(1) 合成構造桁橋

鋼桁の上下床版にコンクリートを使用し、下コンクリートにはプレストレス力を導入する合成桁橋を扱う。構造は単純形式で、スパン長は40

表-2

φ	断面力	本解法	Prilzの解法	仮弾性係数Eφ kg/cm ²
0	σ _{cu}	-5.46	-5.46	350000
	σ _{sl}	61.93	61.93	
1	σ _{cu}	-6.57	-6.44	231992
	σ _{sl}	59.06	59.03	
2	σ _{cu}	-6.99	-6.73	171899
	σ _{sl}	56.23	56.16	
3	σ _{cu}	-7.06	-6.74	135582
	σ _{sl}	53.52	53.43	
4	σ _{cu}	-6.96	-6.64	111308
	σ _{sl}	50.94	50.85	

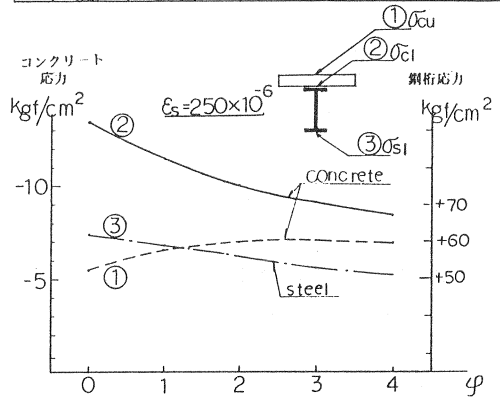
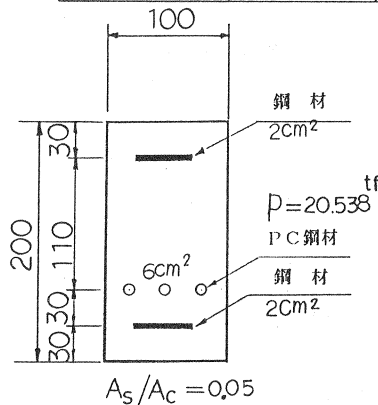


表-3

	本解法	Wippelの解法
上鋼材軸力	0.70 tf	0.687 tf
下鋼材軸力	4.86	4.858
プレストレス力	-14.93	-14.940
コンクリート軸力	9.38	9.395
曲げモーメント	0.32 tm	0.318 tm



mである。(図-4)

上下コンクリートの部材厚は、それぞれ28cm、30cmとし、鋼桁は、H-1350×300×12×25を使用する。また、プレストレス力は、1500tfとした。

施工順序は、まず鋼桁を架設し、下コンクリートを打設し、硬化後プレストレスングして一体とする。このときの抵抗断面は鋼桁と下コンクリートの合成断面である。

その後上床版の施工を行い、箱桁断面とする。ただし、このときは上床版の荷重に対する抵抗断面は、全断面とする。

この例のように、Fritzの解法では一断面内に材令差のある2つのコンクリートのクリープを同時に扱うことはできない。

ここでは、次のような仮定をし、コンクリート自重によるクリープ応力の比較を行った。

表-4

	遅れ弾性考慮	遅れ弾性無視
本解法	-106.62	-115.99
理論解	-106.50	-115.72

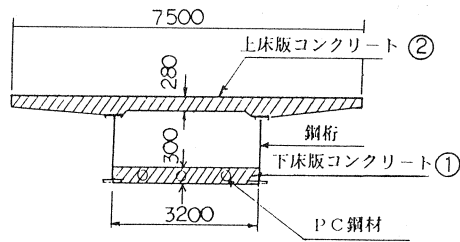
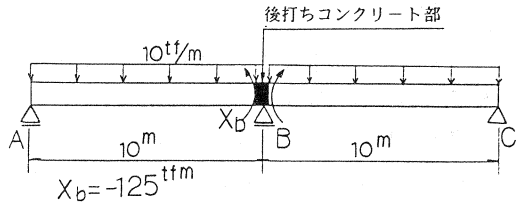


図-4

仮定-1 ; 下コンクリートのクリープが0~0.5進んだ後、上コンクリートの自重が載荷し、その後は上下コンクリートのクリープが同時に進行する。

仮定-2 ; 下コンクリートのクリープが0~0.5進んだ後、上コンクリートの自重が載荷し、上コンクリートのみ $\phi = 0 \sim 2.0$ 進み、その後上コンクリートのクリープは終了したとし、下コンクリートを0.5~2.0までクリープさせるものとする。

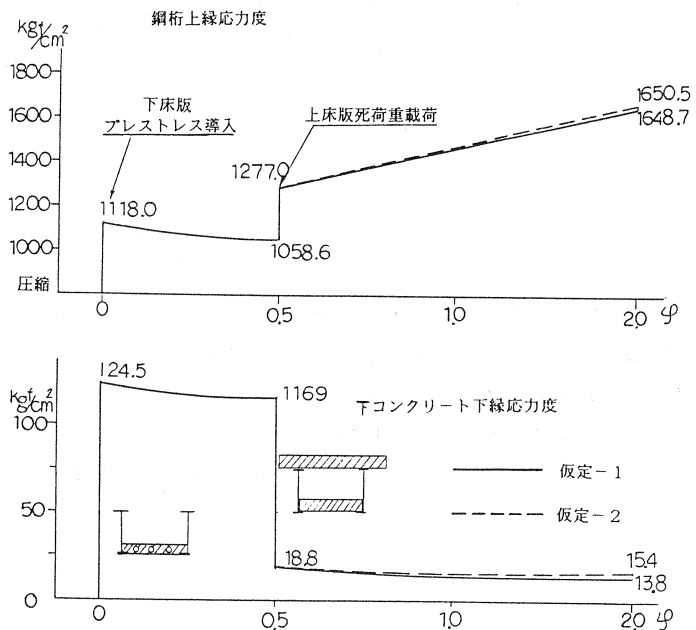


図-5

図-5は、鋼桁の上フランジと下コンクリート下縁応力の経時変化を示す。この結果から、仮定-1あるいは仮定-2で計算してもほとんど差がないことが分る。したがって、仮定-2により、Fritzの方法により計算してもよいものと思われる。

(2) コンクリート斜張橋

主桁に鋼桁を埋め込んだコンクリート斜張橋を扱う。この工法のメリットは1ブロック長が長くできることである。

本プログラムは20の架設ステップを連続的に扱うことができる。ここでの計算は、厳密解として鋼桁張り出し、打設、斜材張力導入のサイクル工程を追いながら、クリープに対し鋼桁の影響を考慮した場合と簡易法として鋼桁を無視し、完成系以後にのみクリープが進行した場合について検討する。架設中のクリープ係数は1ブロックごとに0.1ずつ進むものとし、最終クリープ係数は2.0とした。また、簡易法では、架設中の平均クリープ係数を0.2、最終的に2.0まで進行するものとし、両方とも塔の影響は考えない。

鋼材とコンクリートの弾性係数比 $E_s / E_{co} = 6$ として計算した。

図-6は厳密解と簡易法による主桁の曲げモーメント分布を示すが、その差は余り大きくはない。しかしながら、軸力に対しては簡易法の方が、かなり大きく無視できない差がある。

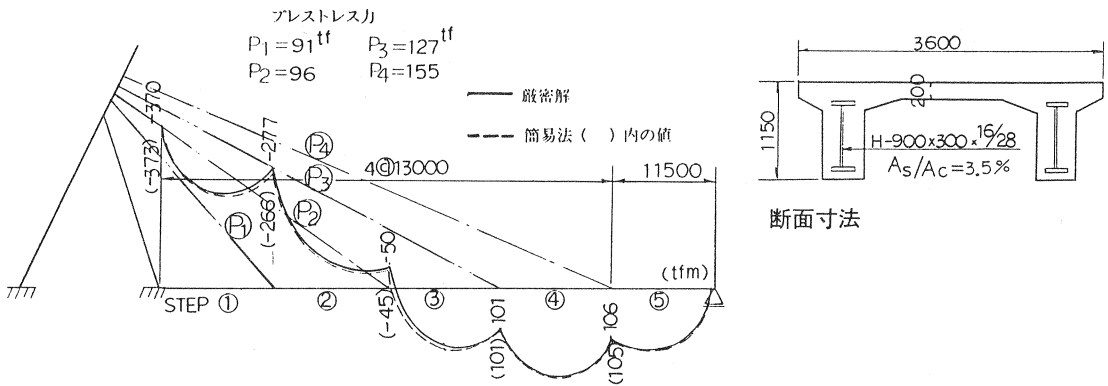


図-6

参 考 文 献

- 1) 北島彰夫; 鋼・コンクリート合成桁の乾燥収縮クリープ解析、川田技報、1978
- 2) 星 埜; コンクリート斜張橋のクリープ解析、土木学会論文集、1980、3月
- 3) B. Fritz; Verbundträger, Springer, 1961
- 4) H. Wippel; Berechnung von Verbundkonstruktionen aus Stahl und Beton, Springer, 1963