

プレストレスする連続合成桁設計計算プログラム

中本 啓介¹⁾ 石川 敏之²⁾ 岡田 幸児³⁾

近年、公共事業のコスト縮減により経済的な橋梁の設計を目指して、連続合成桁の設計が盛んに行われている。それらの設計は主に、“PC 床版を有するプレストレスしない連続合成桁の設計指針（案）”を基に設計されている。これに対してプレストレス導入により桁全域の床版を有効とするプレストレスする連続合成桁の設計が経済的であることが考えられる。連続合成桁の設計は、非合成桁の設計に比べてクリープ・乾燥収縮を考慮する必要があるため設計計算が非常に煩雑である。これに加えプレストレスする連続合成桁の設計では、プレストレス導入の計算およびそれらのクリープの計算が付加されるため設計計算がより煩雑となる。そこで、プレストレスする連続合成桁を効率よく行える設計計算プログラムの開発を行った。ここではプレストレスする連続合成桁設計計算プログラムの内容およびその適用例を紹介する。

キーワード：連続合成桁，プレストレス，ジャッキ操作，PC 軸力

まえがき

近年、日本道路公団を中心に、床版を主構部材として取り扱う連続合成桁橋が盛んに取り入れられている。これは、公共事業のコスト縮減により経済的な橋梁を目指した設計法が要求され、従来の非合成桁の設計とは異なり、鋼桁だけでなく床版にも外力による桁作用力を分担させ経済性を図っていることによる。合成桁としての設計が再度見直された要因としては、床版の劣化のメカニズムが明か¹⁾にされたことが挙げられる。これにより、桁作用と床版作用に十分耐えられる床版の設計が可能となった。さらに、近年、合成床版などの耐久性に優れる床版が開発され、今後、合成桁の需要が増すと考えられている。

現在、設計・施工が行われている PC 床版連続合成桁の大半が橋梁建設協会による“PC 床版を有するプレストレスしない連続合成桁の設計指針

（案）”²⁾を基に設計されている。この方法は、中間支点付近の床版上面に発生するひび割れ幅を制御する事によってひび割れを許容し、負曲げ領域区間（ $0.15L$ ， L ：支間長）を仮定してその範囲の床版を無視し、鋼桁と鉄筋により外力に抵抗する設計方針である。これに対してプレストレス導入により、桁全域の床版を有効とするプレストレスする連続合成桁の設計がより経済的であることが考えられる。

プレストレスしない連続合成桁（以下、部分合成）は、非合成桁の設計と比べてクリープ・乾燥収縮を考慮する必要があるため設計計算が非常に煩雑である。これに加え、プレストレスする連続合成桁（以下、全合成）では、クリープ・乾燥収縮の計算に加えジャッキ操作、PC 軸力導入の計算が付加されるため設計計算がより煩雑となる。そこで、全合成の設計を効率よく行える設計計算プログラムの開発を行った。ここでは、その内容および適用例を紹介する。

1) 技術研究室 2) 技術研究室 3) 橋梁設計部東京設計一課

1. プログラムの概要

本プログラムは橋軸方向にプレストレスする連続合成桁の設計計算プログラムである。断面力計算は、前死荷重、後死荷重、活荷重により発生する断面力の計算は格子桁の解析プログラム GRID（以下、GRID）の出力ファイルを取り込む形式とした。ジャッキ操作、PC 軸力導入により発生する断面力の算出およびクリープ・乾燥収縮・温度差により発生する不静定力の算出には平面骨組解析プログラム（以下、FRAME）を用いた。GRID、FRAME により算出した断面力を用いて床版応力度および鋼桁応力度を計算し荷重の組合せケース毎に応力度を足合わせる。なお、計算可能な応力度は主桁断面の一部としての床版、鋼桁、鉄筋、PC 鋼の各構造要素である。本プログラムの計算フローを図-1に示す。



図-1 プログラムの計算フロー

2. プログラムの特徴

本プログラムは、プレストレスを考慮した計算の他、計算手法として、ヤング係数の算出に通常用いられる道路橋示方書・同解説³⁾（以下、道示）の手法の他に仮想ヤング係数法⁴⁾を採用している。そして、プログラム操作はパソコン(Windows95,

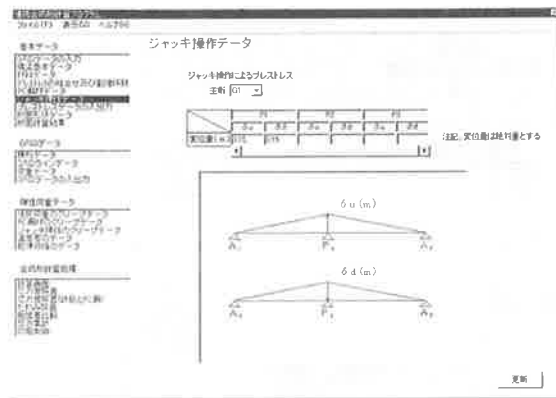


図-2 操作画面例

98) 上で対話形式による入出力処理が可能である。

図-2に本プログラムの操作例を示す。

下記に本プログラムの特徴を示す。

- ① GRID ファイルの作成、読み込みが可能（ただし、作成は直橋のみ、読み込みは任意の形状が可能）。
- ② FRAME ファイルの作成、読み込みが可能。プログラム内部で自動実行。
- ③ クリープ・乾燥収縮の内部荷重算出の際に仮想ヤング係数法を用いた計算が可能。
- ④ 後死荷重によるクリープによる影響は、後死荷重が正曲げ区間のみ計算を行う（全区間計算も可能）。
- ⑤ 乾燥収縮・温度差による影響は、全区間計算を行う（中間支線の左右 0.15L 区間を除くことも可能）。
- ⑥ ジャッキアップは床版打設前の鋼桁断面に対して計算を行う。
- ⑦ ジャッキダウンはコンクリート硬化後に行う。
- ⑧ PC による軸力導入はコンクリート硬化後に行う。導入場所、本数は任意に設定できる。
- ⑨ ジャッキおよび PC 軸力のプレストレスによるクリープは正曲げ区間のみ計算を行う（全区間計算も可能）。

本プログラムでは、クリープ・乾燥収縮の計算に、道示Ⅱ. “9 章 合成桁” による換算ヤング計数比 n_1 , n_2 および仮想ヤング係数 n_1' , n_2' を用いた計算を採用した。仮想ヤング係数法とは、鋼桁とコンクリート床版の断面構成比 α 、断面積比 ω を用いて仮想ヤング計数比 n_1' , n_2' を算出しクリープ・乾燥収縮の計算を行う方法である。

仮想ヤング係数法を用いたクリープ・乾燥収縮の仮想ヤング係数 n_1' , n_2' は次式を用いて算出する。

【クリープ】

$$n' = \left(\frac{1+\kappa}{2} \right) n \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{e^{\alpha \cdot \phi_1} + \alpha - 1}{\alpha} \quad (2)$$

ここに、

α : 断面構成比, $\alpha = \frac{A_s I_s}{A_v I_v}$

n : ヤング係数, $n=7$

A_v, I_v : 合成断面の断面積および断面2次モーメント

A_s, I_s : 鋼桁断面の断面積および断面2次モーメント

ϕ_1 : クリープ係数, $\phi_1=2$

【乾燥収縮】

$$n_2' = \kappa' n$$

$$\kappa' = \frac{1 - e^{-\omega \cdot \phi_1} (1 - \omega)}{\omega e^{-\omega \cdot \phi_1}} \quad (3)$$

ここに、

ω : 断面積比, $\omega = \frac{A_s}{A_v}$

上記式より算出した仮想ヤング係数 n_1' , n_2' より、クリープ、乾燥収縮の計算に用いる断面積、断面2次モーメント A_{v1}' , I_{v1}' , A_{v2}' , I_{v2}' をそれぞれ算出し、クリープ・乾燥収縮の計算を行う。

3. 橋軸方向プレストレスの計算

本プログラムはジャッキ操作およびPC軸力導入によるプレストレスが可能である(図-3)。プレストレスにより発生するクリープについても考慮し計算を行う。参考文献2)では、図-4に示すように、クリープは負曲げ区間、乾燥収縮は中間支点より左右に0.15L区間は床版を無視した計

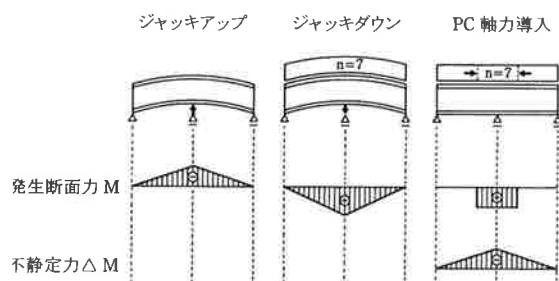


図-3 プレストレスシグ

算となっている。本プログラムでは橋軸方向にプレストレスを導入するため乾燥収縮については床版を全範囲有効として、計算を行うものとする。これらの範囲について図-5に概念図を示す。

以下に、ジャッキ操作、PC軸力導入によるプレストレスの計算およびそれらによって発生するクリープの計算方法について述べる。

1) ジャッキ操作

FRAMEを用いてジャッキダウンを行う支点に強制変位を与え発生する断面力 M_j を用いて式(4)(5)により応力度を計算する。

$$\text{床版応力度: } \sigma_{ej} = \frac{1}{n} \frac{M_j}{I_v} y_e \quad (4)$$

$$\text{鋼桁応力度: } \sigma_{sj} = \frac{M_j}{I_v} y_s \quad (5)$$

2) ジャッキ操作によるクリープ

ジャッキ操作により発生する正曲げ荷重を用いてジャッキ操作に伴うクリープによる応力度などを式(6)~(10)より計算する。

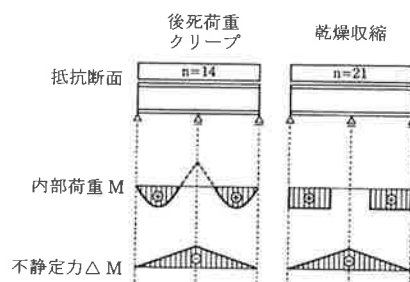


図-4 クリープ・乾燥収縮の取扱い(プレストレスしない連続合成桁)

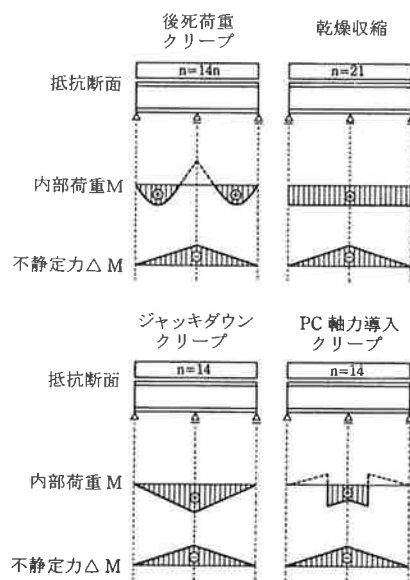


図-5 クリープ・乾燥収縮の取扱い(プレストレスする連続合成桁)

床版応力度：

$$\sigma_{cuj} = \frac{1}{n} \left(\frac{P}{A_{v1}} + \frac{M+\Delta M}{I_{v1}} y_c \right) - \frac{2\phi_1}{2+\phi_1} \sigma_{cj} \quad (6)$$

$$\text{鋼桁応力度} : \sigma_{csj} = \frac{P}{A_{v1}} + \frac{M+\Delta M}{I_{v1}} y_s \quad (7)$$

ここに、

$$N_c = \frac{M_j}{n I_v} d_c A_c \quad (8)$$

$$P = \frac{2\phi_1}{2+\phi_1} N_c \quad (9)$$

$$M = P d_{c1} \quad (10)$$

A_c : コンクリートの断面積

d_c : 合成断面の図心軸から床版中心までの距離

d_{c1} : 換算ヤング計数比 n_1 を用いた合成断面の図心軸から床版中心までの距離

A_{v1} , I_{v1} : 換算ヤング計数比 n_1 を用いて算出した合成断面の断面積および断面 2 次モーメント

3) PC 軸力導入

PC 軸力導入による応力度は導入軸力 P_p を用いて下記の式より計算する。

床版応力度：

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{n} \left(\frac{P_p}{A_v} + \frac{M_p+\Delta M}{I_v} y_c \right) \quad (11)$$

$$\text{鋼桁応力度} : \sigma_{sp} = \frac{P_p}{A_v} + \frac{M_p+\Delta M}{I_v} y_s \quad (12)$$

ここに、

$$M_p = P_p d_p$$

d_p : 合成断面の図心軸から PC 鋼材までの距離

4) PC 軸力導入によるクリープ

導入軸力 P_p と P により発生する曲げモーメントを用いて PC 軸力導入によるクリープによる応力度などを式(13)～(16)より計算する。

床版応力度：

$$\sigma_{csp} = \frac{1}{n} \left(\frac{P}{A_{v1}} + \frac{M+\Delta M}{I_{v1}} y_c \right) - \frac{2\phi_1}{1+\phi_1} \sigma_{cp} \quad (13)$$

$$\text{鋼桁応力度} : \sigma_{csp} = \frac{P}{A_{v1}} + \frac{M+\Delta M}{I_{v1}} y_s \quad (14)$$

ここに、

$$N_c = \frac{1}{n} \left(\frac{M_p+\Delta M}{I_v} d_c + \frac{P_p}{A_v} \right) A_c \quad (15)$$

$$P = \frac{2\phi_1}{2+\phi_1} N_c \quad (16)$$

$$M = P d_{c1}$$

上記式により床版応力度および鋼桁応力度を算出し、前後死荷重、活荷重を含め応力度レベルで足し合わせて応力度照査を行う。

4. プログラムを用いた計算例

本プログラムを用いた計算例として、部分合成モデル、全合成モデルの床版応力度の比較を示す。全合成モデルについては、部分合成モデルで構成した断面を用いてジャッキ操作によるプレストレスを導入している。

対象とする橋梁は図-6に示す 2 径間連続合成 2 主桁橋を想定した。断面構成を表-1に示す。

検討対象

形 式：2 径間連続合成桁

橋 長：55.8 m

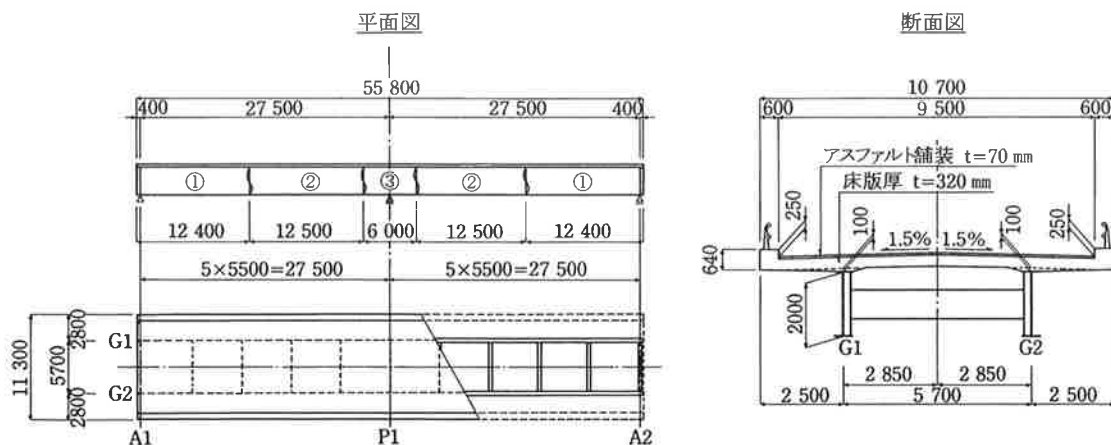


図-6 橋梁一般図(計算例)

表-1 断面構成（計算例）

断 面	①	②	③
U-Flg 500×tu	16	16	33
Web 2000×tw	17	17	17
L-Flg 600×tl	19	36	55

支間割：27.5+27.5 m

有効幅員：9.5 m

活荷重：B 活荷重

舗 装：アスファルト舗装厚 75 mm

床 版：コンクリート設計基準強度

$$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

鉄筋 SD245

床版厚 320 mm , ハンチ高さ 100 mm

使用鋼材：SM490Y（降伏点一定鋼）

ジャッキ操作量：合成前（後）+150（-150）mm

本プログラムを用いて計算した床版上面の橋軸方向の応力度を図-7に示す。荷重の組合せは主荷重（クリープ，乾燥収縮含む）としてある。部分合成モデルの中間支点上断面の床版応力度は引張となる。それに対し全合成モデルではジャッキ操作量を P1 支点に 150 mm とすることで床版の応力度を圧縮とすることができる。これにより，プレストレスする連続合成桁の計算が可能であることが確認できる。実際の設計ではジャッキ操作での応力度変化に伴う断面修正が必要となる。

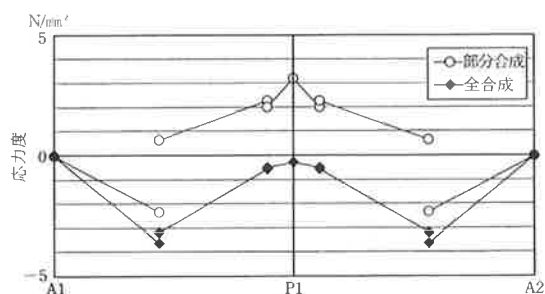


図-7 床版上面の応力分布の比較（計算例）

あとがき

本プログラムは，今後盛んに採用が予想される連続合成桁について設計業務の効率化，基準改訂への迅速な対応を目的として開発を行った。従来では，煩雑な作業を伴うとされてきた合成桁の断面力計算，断面照査，結果抽出等の一連のシステムが本プログラムにより効率的に処理されることを期待する。

参考文献

- 1) 例えば，松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，1987.
- 2) 日本橋梁建設協会：PC 床版を有するプレストレスしない連続合成桁の設計（案），1996.8.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，1996.12.
- 4) 中井 博・北田俊行：鋼橋設計の基礎，共立出版，pp.269-279，1992.5.