

論文

[2002] 緊張完了後のポストテンション PC 梁の剛性評価のための有限要素について

正会員 ○上田 正生 (北海道大学工学部)

正会員 杉野目 章 (室蘭工業大学工学部)

正会員 広瀬 雅明 (東急建設札幌支店)

1. はじめに

周知のように、曲線形状Tendonを有するポストテンションPC梁部材のためのFEM梁要素としては、Bond, Kang, Scordelis らの著名なモデルがある^{1,2}。しかしながら、これら既往のモデルは何れも、個々の要素内でTendonは傾斜直線形と仮定されており、またTendonによる補強の効果も、要素の剛性マトリックスを評価する際には直接考慮せずに、プレストレスの効果を各要素の等価節点力に変換することによって、あとから間接的に算入する方法を採っている。

本論文では、Tendonを個々の要素内であるがままの曲線として、しかもTendonとコンクリート間には付着すべりを許容して、要素の剛性マトリックスに直接取り入れるポストテンションPC梁のための、精・粗2種の新しい有限要素について報告し、数値計算例を掲げて若干の考察を試みる。尚、本報で緊張完了後のPC梁の剛性の評価をその対象としたのは、既往の方法に対する本手法の優位性がここにあり、また本法では、Tendonの緊張解析が極めて容易なためである³。

2. 基本仮定事項

解析に当たって用いた、基本仮定事項を以下に列挙する。

1) 梁は各要素ごとに一樣外形断面を有するもの(個々の要素間では、断面の大きさは異なってもよい)とし、微小変形の仮定が適用できるものとする。

2) コンクリートとTendonは共に弾性体であり、コンクリート断面には変形後も平面保持の仮定が成立する。

3) 梁断面内には、梁丈方向に m 層のTendonが設置されており、各Tendonは材軸に沿って鉛直方向に滑らかな2次曲線(梁の全部材長を通して、単一の2次曲線である必要はなく、隣接要素間で滑らかに連続していれば、曲線形は要素ごとに異なってもよい)を描いて配置されている。また各Tendonは設置曲線に沿った軸力のみを負担するものとする。

4) ある位置における各Tendon層とコンクリートの間には、個々のTendon曲線に沿って付着すべりが生ずるものとし、その位置のすべり変位は、平面が保持されるコンクリート部分からの相対的なズレ変位で表示でき、またこのすべり変位と、コンクリートとTendonの界面に発生する付着応力の間には、線形付着すべり関係が成り立つものとする。

3. Tendonの付着すべりを考慮したPC梁部材の有限要素解析

3-1 歪と応力

図1は、ポストテンションPC梁の断面記号と梁内部に配置されている任意のTendon層 i の設置状況を図示したものである。ここでは、材軸上の任意点 x における z (鉛直)方向の変位を w 、 x (材軸)方向の変位を u 、また断面内に m 層存在する任意のTendon層 i の設置曲線に沿うすべり変位を S_i とし、コンクリート部分と各Tendon層がそれぞれ負担する歪と応力、及び両者の界面に生ずる付着応力について考える。

(1) コンクリート部分の歪と応力

梁の任意点 x における材軸から z だけ離れた位置(座標系は図1参照)のコンクリート部分の

歪 ε_c は、次式で表される。

$$z\varepsilon_c = \varepsilon_o + z\phi \quad (1)$$

ここに、 ε_o は梁の軸歪、 ϕ は曲率であり、それぞれ次のように与えられる。

$$\varepsilon_o = du/dx \quad (2)$$

$$\phi = -d^2w/dx^2 \quad (3)$$

同じ位置のコンクリートの応力 σ_c は、下式で表される。

$$z\sigma_c = E_c z\varepsilon_c \quad (4)$$

但し、 E_c ：コンクリートのヤング係数

(2) Tendonの歪と応力

梁断面内に m 層存在するTendonのうちの任意の i 層を考える。ある位置におけるこの層の設置曲線方向（図1参照： x と共に変化する）に沿う歪 ε_{si} は、次式で表示することができる。

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_o + h_{si}\phi + \varepsilon_{ssi} \quad (5)$$

上式中の h_{si} は、図1に示すように i 層のTendonの材軸からの鉛直距離で、先の仮定(3)より x の2次関数として下式で与えられる。

$$h_{si} = a_i + b_i x + c_i x^2 \quad (6)$$

但し、 a_i, b_i, c_i ： i 層のTendonの曲線形を決定するための定数

また(5)式中の ε_{ssi} は、 i 層のTendonの設置曲線に沿うすべり率で、次式で表される。

$$\varepsilon_{ssi} = dS_i/d\delta_i = (dS_i/dx)/(d\delta_i/dx) \quad (7)$$

上式中の微分 $d\delta_i/dx$ は、図2を参照することにより直ちに求められ下式となる。

$$d\delta_i/dx = \sqrt{1+(dh_{si}/dx)^2} \quad (8)$$

同じ位置のTendon層 i の応力 σ_{si} は、

$$\sigma_{si} = E_{si} \varepsilon_{si} \quad (9)$$

但し、 E_{si} ： i 層のTendonのヤング係数

(3) 付着応力

i 層のTendonとコンクリートの界面に生ずる付着応力 τ_{bi} は、前節の仮定(4)より、すべり変位 S_i に線形に対応するから、次式で与えられる。

$$\tau_{bi} = K_{bi} S_i \quad (10)$$

但し、 K_{bi} ： i 層のTendonとコンクリート間の付着係数

3-2 軸力および曲げモーメント

PC梁断面の軸力と曲げモーメントは、(1)~(9)式の関係を用いて次のように表される。

$$N = B \int_{-t/2}^{t/2} z\sigma_c dz + \sum_{i=1}^m \{A_{si} \sqrt{1+(dh_{si}/dx)^2} (\sigma_{si} - h_{si}\sigma_c)\} \quad (11)$$

$$M = B \int_{-t/2}^{t/2} z\sigma_c z dz + \sum_{i=1}^m \{A_{si} h_{si} \sqrt{1+(dh_{si}/dx)^2} (\sigma_{si} - h_{si}\sigma_c)\} \quad (12)$$

但し、 B ：梁幅、 A_{si} ： i 層のTendonの断面積

上式中の $h_{si}\sigma_c$ は、 i 層のTendonと同じ位置のコンクリートの応力であり、この項はTendonによるコンクリートの断面欠損を考慮するために必要となるものである。上の2式に(4),(5),(9)式の関係を代入して整理すると下式を得る。

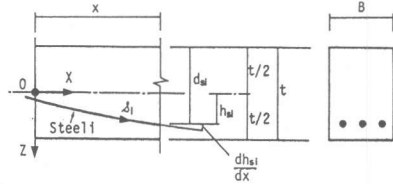


図1 PC梁の断面記号とTendon Steel層 i の配置形状

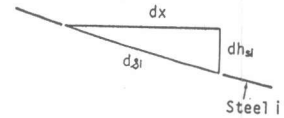


図2 $d\delta_i, dh_{si}, dx$ の関係

$$N = [AE_c + \sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\}] \frac{du}{dx} - \sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} h_{s1} \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\} \frac{d^2 w}{dx^2} + \sum_{s=1}^m \{A_{s1} E_{s1} \frac{dS_i}{dx}\} \quad (13)$$

$$M = \sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} h_{s1} \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\} \frac{du}{dx} - [I_0 E_c + \sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} h_{s1}^2 \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\}] \frac{d^2 w}{dx^2} + \sum_{s=1}^m \{A_{s1} E_{s1} h_{s1} \frac{dS_i}{dx}\} \quad (14)$$

但し、A：梁断面積(A=Bt)、I₀：無筋の場合の梁の断面2次モーメント、A_{s1}^{*}：i層のTendonの換算断面積で A_{s1}^{*} = A_{s1}(1-E_c/E_{s1})

3-3 全ポテンシャル・エネルギー汎関数

補強材の付着すべりを考慮した場合のコンクリート部材の全ポテンシャル・エネルギー汎関数Πは、次のように表示することができる。^{4・5}

$$\Pi = (U_{cn} + U_{st} + U_{bs}) - V \quad (15)$$

但し、U_{cn}, U_{st}, U_{bs}：構造体の内部エネルギー、V：外部ポテンシャル・エネルギー
上式中のU_{cn}, U_{st}, U_{bs}は、それぞれPC梁のコンクリート、Tendon、および付着すべりに係る内部エネルギーであり、次のように表示することができる。

$$U_{cn} = \frac{1}{2} \int_0^L \int_{-t/2}^{t/2} B E_c z^2 \epsilon^2 dz dx - \frac{1}{2} \int_0^L \{ \sum_{s=1}^m A_{s1} E_{s1} \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2} \epsilon_{s1}^2 \} dx \quad (16)$$

$$U_{st} = \frac{1}{2} \int_0^L \{ \sum_{s=1}^m A_{s1} E_{s1} \epsilon_{s1}^2 \} d\delta_i \quad (17)$$

$$U_{bs} = \frac{1}{2} \int_0^L \{ \sum_{s=1}^m A_{bs1} K_{bi} S_i^2 \} d\delta_i \quad (18)$$

但し、L：PC梁の部材長、L_{s1}：i層のTendonの全曲線長、A_{bs1}：i層のTendonの単位長さ当たりの付着表面積

以上の3式のうち、U_{st}とU_{bs}はTendon曲線に沿ってとられた曲線δ_iに関する積分の型で表示されているので、これを図2を参照してxに関する積分の型に変換すると、(17)、(18)式は次のようになる。

$$U_{st} = \frac{1}{2} \int_0^L \{ \sum_{s=1}^m A_{s1} E_{s1} \epsilon_{s1}^2 \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2} \} dx \quad (19)$$

$$U_{bs} = \frac{1}{2} \int_0^L \{ \sum_{s=1}^m A_{bs1} K_{bi} S_i^2 \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2} \} dx \quad (20)$$

従って、軸力と鉛直荷重が作用する場合のポストテンションPC梁の全ポテンシャル・エネルギー汎関数Πは、下式となる。

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \int_0^L & \left\{ [A E_c + \sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\}] \left(\frac{du}{dx}\right)^2 - 2 \left[\sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} h_{s1} \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\} \right] \frac{du}{dx} \frac{d^2 w}{dx^2} + 2 \sum_{s=1}^m \{A_{s1} E_{s1} \left(\frac{du}{dx} \frac{dS_i}{dx} \right. \right. \\ & \left. \left. - h_{s1} \frac{d^2 w}{dx^2} \frac{dS_i}{dx}\right) \right] + [I_0 E_c + \sum_{s=1}^m \{A_{s1}^* E_{s1} h_{s1}^2 \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\}] \left(\frac{d^2 w}{dx^2}\right)^2 + \sum_{s=1}^m \left\{ \frac{A_{s1} E_{s1}}{\sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}} \left(\frac{dS_i}{dx}\right)^2 \right\} \right. \\ & \left. + \sum_{s=1}^m \{A_{bs1} K_{bi} S_i^2 \sqrt{1+(dh_{s1}/dx)^2}\} \right\} dx - \int_0^L \{P_u (du/dx) + q_z w\} dx \quad (21) \end{aligned}$$

3-4 有限要素法への定式化

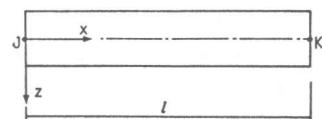
(1) PC梁要素の変位関数と歪

図3に、本解析で使用したPC梁要素を示す。この要素の設定変位u, w, S_i (但し i=1~m) の各変位関数は、それぞれ以下のものである。

$$u = [1 \ x] \{ \alpha_{u1} \ \alpha_{u2} \}^T = [f_u] \{ \alpha_u \} \quad (22)$$

$$w = [1 \ x \ x^2 \ x^3] \{ \alpha_{w1} \ \alpha_{w2} \ \alpha_{w3} \ \alpha_{w4} \}^T = [f_w] \{ \alpha_w \} \quad (23)$$

$$S_i = [1 \ x] \{ \alpha_{s1i} \ \alpha_{s2i} \}^T = [f_s] \{ \alpha_{s1} \} \quad (24)$$



$$\begin{aligned} \{\Delta u\} &= \{u_i \ u_k\}^T, \quad \{\Delta w\} = \{w_i \ w'_i \ w_k \ w'_k\}^T \\ \{\Delta S\} &= \{S_{i1} \ S_{i2} \ \dots \ S_{im} \ S_{k1} \ S_{k2} \ \dots \ S_{km}\}^T \end{aligned}$$

図3 Tendonの付着滑りを考慮したPC梁要素

但し, $[f_u], [f_w], [f_s]$: 変位 u, w, S_i の形状関数, $\{\alpha_u\}, \{\alpha_w\}, \{\alpha_{s_i}\}$: u, w, S_i の一般化変位
 従って, これらの各変位の導関数は,

$$u' = du/dx = [0 \ 1] \{\alpha_u\} = [f'_u] \{\alpha_u\} \quad (25)$$

$$w' = dw/dx = [0 \ 1 \ 2x \ 3x^2] \{\alpha_w\} = [f'_w] \{\alpha_w\} \quad (26)$$

$$w'' = d^2w/dx^2 = [0 \ 0 \ 2 \ 6x] \{\alpha_w\} = [f''_w] \{\alpha_w\} \quad (27)$$

$$S'_i = dS_i/dx = [0 \ 1] \{\alpha_{s_i}\} = [f'_s] \{\alpha_{s_i}\} \quad (28)$$

この P C 梁要素の両端の節点変位ベクトルと一般化変位の関係は, (22)~(24)式および(26)式に,
 両節点(J,K)のx座標(0, l)を代入することによって得られ, 次のようになる。

$$\{\Delta_u\} = \{u_j \ u_k\}^T = [C_u] \{\alpha_u\} \quad (29)$$

$$\{\Delta_w\} = \{w_j \ w'_j \ w_k \ w'_k\}^T = [C_w] \{\alpha_w\} \quad (30)$$

$$\{\Delta_{s_i}\} = \{S_{ij} \ S_{ik}\}^T = [C_s] \{\alpha_{s_i}\} \quad (31)$$

但し,

$$\left. \begin{aligned} [C_u] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & l \end{bmatrix} \\ [C_w] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l & l^2 & l^3 \\ 0 & 1 & 2l & 3l^2 \end{bmatrix} \\ [C_s] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & l \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

(2) 2種の有限要素方程式

前項で得た(22)~(32)式の間係を, “記号Lをlで置き換えた汎関数(21)式” に代入し, 各節点変位に関して変分をとると, 下式の形の有限要素方程式を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uw} & K_{us} \\ K_{uw}^T & K_{ww} & K_{ws} \\ K_{us}^T & K_{ws}^T & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_u \\ \Delta_w \\ \Delta_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_u \\ P_w \\ P_s \end{Bmatrix} \quad (33)$$

但し, $[K_{uu}], [K_{uw}], [K_{us}], [K_{ww}], [K_{ws}], [K_{ss}]$: 部分剛性マトリックス

$\{P_u\}, \{P_w\}$: 軸, および鉛直荷重, $\{P_s\}$: Tendon緊張荷重

周知のように, 上式の右辺を構成する各部分剛性マトリックス $[K_{uu}] \sim [K_{ss}]$ は, x に関する0から l までの定積分の形で表示されるが, この積分を遂行する際に, 容認可能なある種の近似を“導入するか? 否か?”によって, 相異なる二つの剛性マトリックスが求められ, 結果として, 外面的な表示式は(33)式と同一であるが, 実際には異なる2種の有限要素方程式が得られることになる。即ち, ここで云う近似は, 次式で表される。

$$\sqrt{1 + (dh_{s_i}/dx)^2} = 1 \quad (34)$$

勿論, P C 梁内部に存在する各Tendon曲線の湾曲の程度(上式中の dh_{s_i}/dx の値)が小さい場合, 上式の近似が成立し得るであろうことは, 充分予測可能な事柄である。この近似は, 剛性マトリックスの誘導とプログラミングを著しく簡略化し, 本手法を, 数多くの繰返し計算が基本となる材料非線形解析等に拡張する場合, その有用性が明かとなるはずである。

以下に, P C 梁のための精・粗2種の剛性マトリックスを示す。

1) $\sqrt{(dh_{s_i}/dx)^2} \neq 1$ の場合の剛性マトリックス

$$\left. \begin{aligned} [K_{uu}] &= [C_u]^T \left[A E_f \int_0^l [f_u] [f_u] dx + \sum_{i=1}^m \int_0^l \left(A_i^* E_{s_i} \sqrt{1 + b_i^2 + 4b_i c_i x + 4c_i^2 x^2} [f_u] \right) dx \right] [C_u] \\ [K_{ww}] &= -[C_w]^T \left[\sum_{i=1}^m \int_0^l \left(A_i^* E_{s_i} (a_i + b_i x + c_i x^2) \sqrt{1 + b_i^2 + 4b_i c_i x + 4c_i^2 x^2} [f_w] \right) dx \right] [C_w] \\ [K_{ws}] &= [C_w]^T \left[b_i E_s \int_0^l [f_w] [f_w] dx + \sum_{i=1}^m \int_0^l \left(A_i^* E_{s_i} (a_i + b_i x + c_i x^2) \sqrt{1 + b_i^2 + 4b_i c_i x + 4c_i^2 x^2} [f_w] \right) [f_w] dx \right] [C_w] \end{aligned} \right\}$$

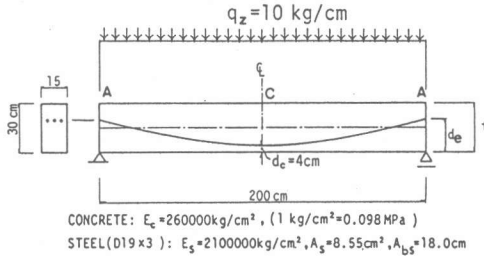


図 4 モデル P C 梁の概要

$$\begin{aligned}
 [K_{wp}] &= \sum [[C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} [f_{0i}]^T [f_{0i}] dx \right) [C_0^T]] \\
 [K_{wp}] &= \sum [-[C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} (a_i + b_i x + c_i x^2) [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T]] \\
 [K_{us}] &= \sum [[C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} (1 + b_i^2 + 4b_i c_i x + 4c_i^2 x^2)^{1/2} [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^L A_{bi} K_{bi} \sqrt{1 + b_i^2 + 4b_i c_i x + 4c_i^2 x^2} [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T]]
 \end{aligned} \quad (35)$$

2) $\sqrt{1 + (dh_{si}/dx)^2} = 1$ の場合の剛性マトリックス

$$\begin{aligned}
 [K_{us}] &= [C_0^T]^T (A_{0c} + \sum A_{0i}^* E_{0i}) \left(\int_0^L [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T] \\
 [K_{wp}] &= -[C_0^T]^T \left(\sum A_{0i}^* E_{0i} \int_0^L (a_i + b_i x + c_i x^2) [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T] \\
 [K_{wp}] &= [C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx + \sum A_{0i}^* E_{0i} \int_0^L (a_i + b_i x + c_i x^2) [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T] \\
 [K_{us}] &= \sum [[C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T]] \\
 [K_{wp}] &= \sum [-[C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} (a_i + b_i x + c_i x^2) [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T]] \\
 [K_{us}] &= \sum [[C_0^T]^T \left(\int_0^L A_{0i} E_{0i} [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx + \int_0^L A_{bi} K_{bi} [f_{0i}^*]^T [f_{0i}^*] dx \right) [C_0^T]]
 \end{aligned} \quad (36)$$

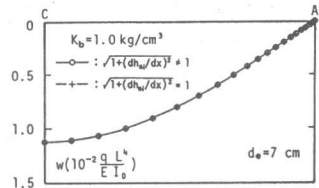
但し、(35)、(36)式中の $[K_{us}]$ 、 $[K_{ws}]$ 、 $[K_{ss}]$ の右辺の記号 Σ は、通常の summation ではなく、節点変位の並び順に従う各構成部分マトリックスの assemble を意味する。

4. 数値計算例と考察

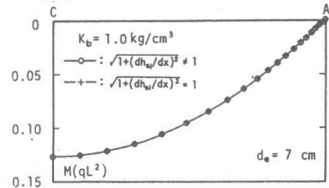
前節で述べた A) $\sqrt{1 + (dh_{si}/dx)^2} \neq 1$ のより精密な解と、B) $\sqrt{1 + (dh_{si}/dx)^2} = 1$ なる近似仮定を用いた場合の、2種の本解析値の相違を調べるため、等分布荷重を受ける“Tendonの緊張完了後のモデル P C 梁”の数値計算例を掲げ、若干の検討・考察を試みる。

図 4 は、単一 Tendon 層を有するモデル P C 梁の概要と構成材料の力学的性状を示したものである。ここでは、同図中の記号 d_e が、 $d_e = 7 \text{ cm}$ と $d_e = 27 \text{ cm}$ の場合の、Tendon 曲線の湾曲の度合の異なる 2 種類の P C 梁を対象にして解析を行ってみる。但し、両モデル P C 梁とも、計算に用いた Tendon の附着係数の値は、 $K_b = 1.0 \text{ kg/cm}^3$ (ほゞアンボンドに対応⁶⁾) と $K_b = 10^5 \text{ kg/cm}^3$ (ほゞ完全附着に対応⁶⁾) の 2 ケースである。

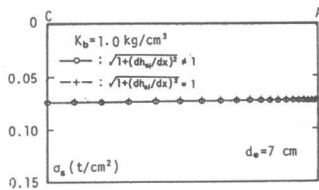
図 5 と図 6 は、それぞれ $d_e = 7 \text{ cm}$ の P C 梁の附着係数 $K_b = 1.0 \text{ kg/cm}^3$ と $K_b = 10^5 \text{ kg/cm}^3$ の場合の、A), B) 2 種の本解析値を、(a)鉛直変位曲線、(b)曲げモーメント曲線、(c)Tendon 応力曲線、(d)附着応力曲線で比較したもので、図 7 と図 8 はまた、それぞれ $d_e = 27 \text{ cm}$ の P C 梁の場合の先と同様な計算結果を図示したものである。これらの図は、Tendon 曲線の湾曲の程度が小さな $d_e = 7 \text{ cm}$ の P C 梁、および湾曲の度合の比較的大きな $d_e = 27 \text{ cm}$ の P C 梁の場合とも、 $K_b = 10^5 \text{ kg/cm}^3$ のときの (c) Tendon 応力曲線と (d) 附着応力曲線の両解析値の間に、幾分かの相違が認められるが、その差はさほど大



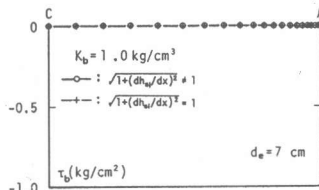
(a) 撓み曲線



(b) 曲げモーメント曲線



(c) Tendon の応力曲線



(d) Tendon の附着応力曲線

図 5 $d_e = 7 \text{ cm}$ モデル P C 梁の計算結果
 $- K_b = 1.0 \text{ kg/cm}^3$ の場合 -

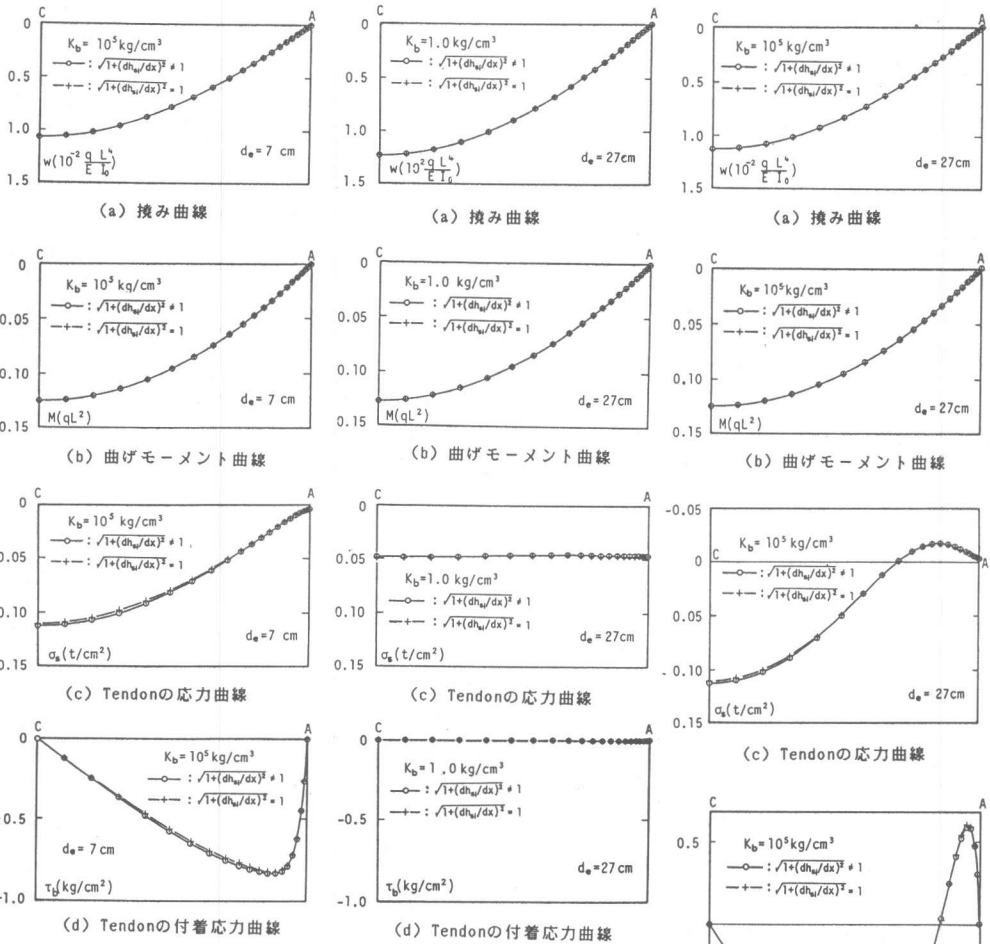


図 6 $d_0=7\text{cm}$ モデル PC 梁の計算結果
- $K_b=10^5\text{kg/cm}^3$ の場合 -

図 7 $d_0=27\text{cm}$ モデル PC 梁の計算結果
- $K_b=1.0\text{kg/cm}^3$ の場合 -

きなものではなく、 $\sqrt{1+(dh_{0i}/dx)^2}=1$ なる近似仮定を導入した簡略解でも、実用的には充分使用することが可能なことを示している。

5. まとめ

本論文では、曲線形状Tendonを有するPC梁部材の、Tendonの附着滑りを考慮した場合の、精・粗2種の新しい有限要素解析法について報告し、モデルPC梁を対象にした数値計算例により、“緊張完了後のPC梁の曲げの問題”に対する両解析値の比較・検討を行い、 $\sqrt{1+(dh_{0i}/dx)^2}=1$ なる近似仮定を用いた簡略解でも、精度上然したる問題もなく実用に供し得ることを明らかにした。

[参考文献]

- 1) Bond, D.: An Examination of the Automated Design of Prestressed Concrete Bridge Decks by Computer, Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, 1975, Vol.59, pp.669-697
- 2) Kang, V. J., and Scordelis, A. C.: Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Frames, J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Engrs, 1980, 106, No. ST2, pp.445-462
- 3) 上田正生・広瀬雅明: 曲線形状Tendonを有するPC梁部材の有限要素解析, 土木学会北海道支部論文報告集 第44号, 1988, pp.57-70
- 4) 上田正生・土橋由道: 補強筋の附着すべりを考慮した鉄筋コンクリートはり部材の曲げ変形解析, 土木学会論文集, 第372号/V-5, 1986, pp.55-64
- 5) 上田正生: 補強筋の附着すべりを考慮した鉄筋コンクリート床板の変形挙動解析 (その2) 幾何学的非線形領域における基礎微分方程式と数値計算例, 日本建築学会構造系論文報告集, 第385号, 1988, pp.33-104
- 6) 上田正生: 補強筋の附着すべりを考慮した曲線形状配筋を有する鉄筋コンクリート梁部材の有限要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987, pp.1131-1132