

論文 緊張鋼材の付着すべりを考慮したプレストレストコンクリート 梁部材の材料非線形解析

松倉満智子*¹・上田正生*²・内山武司*³・土橋由造*⁴

要旨：本論文は、コンクリートの引張りひび割れや圧縮側における非線形な応力-歪関係、補強鋼材の弾・塑性特性、更には補強鋼材とコンクリート間の非線形な付着応力-すべり性状をも考慮に入れた「曲線テンドンを有するプレストレストコンクリート梁部材の材料非線形解析」のための基本手法について述べたもので、既往の実験結果と本解析値との比較を行なって本解析法の妥当性を検証する。

キーワード：PC梁、材料非線形解析、曲線テンドン、付着-すべり、有限要素法

1. はじめに

平面保持の仮定に立脚した梁理論に基づき、緊張鋼材の付着-すべり作用をも考慮し得る「曲線テンドンを有するプレストレストコンクリート(PC)梁部材の材料非線形解析」に関する既往の研究としては、Nishiyamaら[1]および田辺ら[2]の論文がある。しかし、前者はアンボンドPC部材のみを対象としており、また、テンドンとコンクリート間に付着のあるPC部材をも取り扱うことが可能な後者の解析法に於ても、テンドンとコンクリート間の付着係数として、弾性から破壊に至るまでテンドン曲線全長に亘って一定値のみを設定しており、「実際には、テンドン曲線沿って、刻々と複雑に変化するテンドンとコンクリート間の付着作用を、実現象に近い形で解析に反映させることが出来ない」等、その適用性には限界があるように思われる。

本論文は、著者らの一人が開発した緊張鋼材の付着すべりを考慮したPC梁部材の弾性解析手法[3]を拡張・発展させ、引張りひび割れを含むコンクリートと補強材の材料非線形性、及びテンドンとコンクリート間の非線形な付着作用をも取り扱うことが可能な、PC梁(柱)部材のための新たな材料非線形解析手法を提案したもので、更に、既往の実験結果と解析値との比較・検討を行なって本解析手法の適合性について若干の考察を試みる。

2. 解析のための基本仮定

PC梁部材の材料非線形解析を行なうにあたって、次のような基本仮定を設ける。

(1) 梁には曲げと軸力(テンドンの緊張力も含む)が作用し、平面保持の仮定に基づく微小変形理論が適用できるものとする。

(2) 解析には有限要素法を用いるものとし、梁部材のコンクリート断面を層状に仮想分割して取り扱う周知の積層要素モデルを採用する。

(3) 梁の内部に配置される各テンドン層は、2次曲線形状を有するものとし、テンドンとコンクリート(グラウチングモルタルを含む)との間には、テンドン曲線に沿う付着すべりが生じ、ある位置におけるテンドンのすべり変位は、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される。

(4) 各梁要素の個々のコンクリート層とテンドン層の材料性状は、各要素の各層ごとに、その歪履歴の状態に応じて各解析ステップ段階ごとに変化するが、個々の層内では一定の性状を有するものとする。(但し、コンクリート部分については、スターラップが密に配置されるような梁に対しては、必要に応じて、スターラップ内のコンクリートのコンファインド効果をも考慮し得るように、容易に拡張・対応させることが可能である。)

*1 北海道大学講師(正会員)

*2 北海道大学助教授 工学部・共通・情報図形科学講座、工博(正会員)

*3 北海道大学教授 工学部・共通・情報図形科学講座、工博(正会員)

*4 北海道大学名誉教授、工博(正会員)

は、単調漸増荷時の付着応力-すべり曲線を CEB-FIP のモデルコード [5] の $\tau - S$ 曲線に準拠した図 4 に掲げる 5 本の直線の連結からなる曲線形でモデル化するものとする。また、図 5 には、解析に用いた単調荷重曲線上の典型的な除荷開始点 U からの、除荷および再載荷時の仮定曲線経路を例示してある。

4. PC 梁部材の材料非線形有限要素解析

(1) PC 梁要素の変位関数とテンドンの曲線形

図 6 はここで使用する PC 梁要素の概要を示したものである。この要素の軸方向、鉛直方向の変位増分 Δu 、 Δw および任意の i 層のテンドンのすべり変位増分 ΔS_i の変位関数は、それぞれ次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= [1, x] \{\alpha_{u1}, \alpha_{u2}\}^T = [f_u] \{\alpha_u\} \\ \Delta w &= [1, x, x^2, x^3] \{\alpha_{w1}, \alpha_{w2}, \alpha_{w3}, \alpha_{w4}\}^T = [f_w] \{\alpha_w\} \\ \Delta S_i &= [1, x] \{\alpha_{S1}, \alpha_{S2}\}^T = [f_S] \{\alpha_S\} \end{aligned} \right\} (2)$$

但し、 $\{\alpha_u\}$ 、 $\{\alpha_w\}$ 、 $\{\alpha_{S1}\}$: それぞれ変位 Δu 、 Δw 、 ΔS_i

の一般化変位。

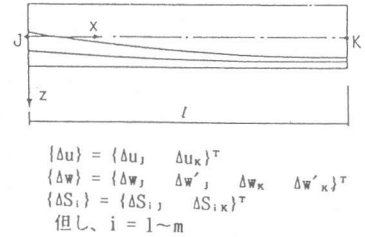


図-6 PC 梁のための有限要素

また、任意の i 層のテンドンの曲線形 h_{si} は基本仮定 (3) より次式で表される。

$$h_{si} = a_i + b_i x + c_i x^2 \quad (3)$$

但し、 h_{si} : i 層のテンドンの梁の基準軸からの距離、 a_i, b_i, c_i : 2 次曲線形を定義するための係数。

(2) 積層要素のための増分汎関数

梁のコンクリート断面を積層要素で表示した場合の、曲線テンドンを有する PC 梁部材のための増分表示された全ポテンシャル・エネルギー汎関数は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta \Pi = & \frac{1}{2} \int_0^l \left[\left(\sum_{i=1}^n B_i \Delta t_i E_{cti} + \sum_{i=1}^m A_{si} E_{si} \sqrt{1 + \left(\frac{dh_{si}}{dx} \right)^2} \right) \left(\frac{d\Delta u}{dx} \right)^2 - 2 \left(\sum_{i=1}^n B_i \Delta t_i E_{cti} z_{si} \right. \right. \\ & + \sum_{i=1}^m A_{si} E_{si} h_{si} \sqrt{1 + \left(\frac{dh_{si}}{dx} \right)^2} \left. \left(\frac{d\Delta u}{dx} \right) \left(\frac{d^2 \Delta w}{dx^2} \right) + 2 \sum_{i=1}^m \left(A_{si} E_{si} \left[\left(\frac{d\Delta u}{dx} \right) \left(\frac{d\Delta S_i}{dx} \right) \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - h_{si} \left(\frac{d^2 \Delta w}{dx^2} \right) \left(\frac{d\Delta S_i}{dx} \right) \right] \right) + \left(\sum_{i=1}^n B_i \Delta t_i E_{cti} z_{si}^2 + \sum_{i=1}^m \left(A_{si} E_{si} h_{si}^2 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{dh_{si}}{dx} \right)^2} \right) \left(\frac{d^2 \Delta w}{dx^2} \right)^2 \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^m \left[\frac{A_{si} E_{si}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dh_{si}}{dx} \right)^2}} \left(\frac{d\Delta S_i}{dx} \right)^2 + \sum_{i=1}^m \left(A_{bsi} K_{bsi} \sqrt{1 + \left(\frac{dh_{si}}{dx} \right)^2} \right) (\Delta S_i)^2 \right] dx \right. \\ & \left. - \int_0^l \left(\Delta P_u \left(\frac{d\Delta u}{dx} \right) + \Delta q_z \Delta w + \sum_{i=1}^m \Delta P_{Si} \left(\frac{d\Delta S_i}{dx} \right) \right) dx \right. \end{aligned} \quad (4)$$

但し、 l : 要素長、 B_i : 任意のコンクリート層 i の梁幅、 E_{cti} : 任意のコンクリート層 i の接線ヤング係数、 Δt_i : 任意のコンクリート層 i の層厚、 n : 仮想分割されたコンクリート断面の分割総数、 A_{si} : 任意のテンドン層 i の断面積、 E_{si} : 任意のテンドン層 i の接線ヤング係数、 A_{bsi} : 任意のテンドン層 i の単位長さあたりの付着周長、 K_{bsi} : 任意のテンドン層付着係数、 m : テンドンの総数、 ΔP_u : 軸方向の分布外力増分、 Δq_z : 鉛直方向の分布荷重増分、 ΔP_{Si} : 任意のテンドン層 i の緊張力増分

(3) 非線形解析手法

載荷による PC 梁の変形の増加とともに、コンクリートの亀裂やテンドンの降伏、更にはテン

ドンとコンクリート間の付着破壊等により、梁内部には様々な非釣り合い応力が発生することになる。これらは初期応力と見なされ、構造系に更なる変形をもたらす。本研究では、PC梁の非線形解析法として、接線剛性をういた荷重増分法及び変位増分法を採用した解析プログラムを、それぞれ別個に作成して解析を行なうこととした。

5. 実験値と解析値の比較と考察

ここで展開した解析手法の適合性を検証するため、LinのPC梁の実験結果[6]との比較を行なっている。図7にはLinの実験梁の概要を掲げたが、図からも明らかのようにこの梁は両引きで緊張力が導入された2径間連続梁で、同図には計算に用いたテンドンプロフィールと構成材料の物理性状を明示してある。この梁の外荷重による非線形解析を開始するに先立ち、テンドンの緊張解析($P_{so}=130\text{kip}$)を行ないその後グラウチングがなされ強度が発現した後、荷重が始まったものとして解析を行なった。尚、この梁の計算に当たっては、部材長方向の要素分割はほぼ等間隔の86分割、部材厚方向には20層分割を用いている。図8は、実験結果と本解析法による計算結果を梁の中央点における荷重-変位曲線で比較したものである。図には、荷重増分法による本解析値を破線で、また、変位増分法によって得られた本解析曲線を実線で併記して示した。図の結果によれば、両解析値ともPC梁の全体の変形挙動は可なり良く表現しているが、最大荷重近傍においては、荷重増分による解では変形が大きく流れ、最大耐力時の変形量を捉えることが出来ないのに対して、変位増分法による解の方は、最大耐力時の荷重値とその時点の変形量、及びその後の梁の耐力低下現象を(実際の現象と一致するかどうかは別にして)明確に表示している。この最大耐力時の変形量は部材のダクティリティを評価する際の重要な指標の一つと考えられており、上図の計算結果は、変位増分法による本解析法が、これを適切に評価し得る可能性があることを示唆している。

[テンドンプロフィール]: $h_g = a + bx + cx^2$

- 1: $a = -3.46, b = 0.0, c = 0.0009583$
- 2: $a = -6.406, b = 0.1404, c = -0.0005225$
- 3: $a = 7.851, b = 0.1858, c = -0.0008779$
- 4: $a = 0.6675, b = 0.02062, c = -0.00007751$

[コンクリートの性質]: $E_c = 5400 \text{ ksi}$ (緊張解析時),

$E_{c0} = 5550 \text{ ksi}, \sigma_{cc} = 6400 \text{ psi}, \sigma_{ct} = 1280 \text{ psi},$
 $\sigma_{ct} = 510 \text{ psi}, \epsilon_{cc} = 0.003$

[テンドンの性質]: $\mu = 0.3, \lambda = 0.0005 \text{ rad/ft}$ (摩擦係数等)

$A_s = 0.963 \text{ in}^2, E_s = 27000 \text{ ksi}, H_s = 684 \text{ ksi}, \sigma_y = 227 \text{ ksi}$

[付着応力-すべり曲線]:

$\tau_{b1} = 963, \tau_{b2} = 1464, \tau_{b3} = 1926, \tau_{b4} = 289 \text{ (psi)},$
 $S_1 = 0.0027, S_2 = 0.0118, S_3 = 0.0236, S_4 = 0.0394 \text{ (in.)}$

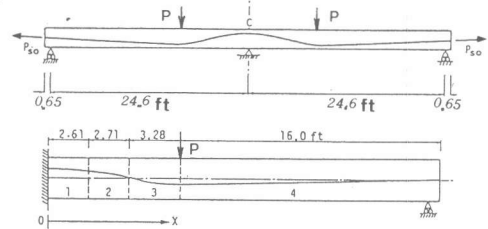


図-7 Linの実験梁の概要

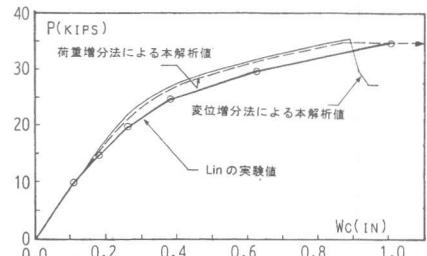


図-8 中央点の荷重-変位曲線の比較

6. 結論

本論文では、既報の平面保持の仮定に立脚した梁理論に基づく、緊張鋼材の付着すべりを考慮した曲線テンドンを有するPC梁部材の弾性有限要素解析法[1]を、材料非線形領域にも適用可能なように拡張・発展させ、既往の実験結果との比較を行なって解の妥当性の検証を試みた。その結果、変位増分法を用いた本解析値は、PC梁部材のダクティリティを評価する際の重要な指標の一つである最大耐力時の変形量をも適切に評価し得る可能性のあることが明かにされた。

[参考文献]

- 1) 田辺、梅原、牧: アンボンドあるいはアウトケーブル方式によるPC構造物の解析方法に関する研究、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.27-32, 1990.
- 2) Nishiyama, M., Mugunuma, H. and Watanabe, F.: Hysteretic Restoring Force Characteristic of Unbonded Prestressed Concrete Structure Under Earthquake Loads, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.22, No.2, 1989, pp.112-121.
- 3) 上田: 曲線テンドンを有するPC梁部材の基礎微分方程式と有限要素法による数値計算例、コンクリート工学論文集、Vol.1, No.1, pp.11-24, 1990.
- 4) Park, R., Kent, D.C.: Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, ASCE, Vol.105, pp.1341-1360, 6, 1972.
- 5) CEB-FIP, Model Code 1990, pp.3-1 ~ 3-5, 1990.
- 6) Lin, T. Y.: Strength of Continuous Prestressed Concrete Beams Under Static and Repeated Loads, Journal of ACI, Vol.26, No.10, pp.1037-1059, 6, 1955.