緊張力による摩擦を考慮したPC構造物の耐荷力解析手法に関する基礎的研究

名城大学　学生会員　○松本　一志
名城大学　正会員　石川　靖晃

1. はじめに

プレストレス導入の際、摩擦力や腹圧力等を適切に評価する必要があるが、PC構造の形状が複雑になるほどその評価は困難となる。しかし、その評価方法は十分ではない。Bui[1)]らは外ケーブル方式においてデビエータの摩擦力を考慮した解析手法を構築しているが、実際のPC構造への適用という意味では充分ではない。本研究では、コンクリート標準示方書[2)]で提案されている緊張力の評価式を基に緊張力による摩擦の効果をFEM解析に導入するための解析手法を提案することを目的とした。

2. 緊張材の摩擦力の等価節点力への変換方法

図-1に示すようにsolid要素に埋め込まれた多直線から構成される要素について考える。各直線要素が埋め込まれているsolid要素は既知であると仮定する。なお、直線要素端部は必ずしもsolid要素面上に存在する必要はない。プレストレスを加える位置での緊張材の引張力をそれぞれT_{r0}およびT_{l0}とし、コンクリート内部での緊張材の引張力を$T(\theta_i,s)$とする。そして、緊張力作用位置までの緊張材要素iと要素$i+1$がなす角度の総和をθ_i、緊張材の左側からの距離をsとする。さらに、両引きにより作用する緊張力が釣り合う位置(不動点)をs_0、緊張材の全体の長さを$s_{\max}$とする。このとき引張力$T(\theta_i,s)$は不動点を境にそれぞれ次式で表わされる。

$$T(\theta,s)=\begin{cases} T_{r0}e^{-\mu\theta_i-\lambda s} & s\le s_0 \\ T_{l0}e^{-\mu\theta_{n-i}-\lambda(s_{\max}-s)} & s>s_0 \end{cases} \quad (1)$$

ここにμは角変化による摩擦係数、λは緊張材による摩擦係数である。緊張材要素をiと$i-1$の共通節点における角度変化に伴う法線方向の緊張材力ベクトル$\{Z_i\}$は、力のつり合い条件から次式にて表わされる。

$$\{Z_i\}=T(\theta_i,s)\cdot\vec{e}_i+T(\theta_{i-1},s)\cdot\vec{e}_{i-1} \quad (2)$$

ここで$\vec{e}_i$は要素iの単位接線ベクトルである。式(1)を緊張材の引張端から設計断面までの長さsで偏微分することにより、緊張材からコンクリートに与えるせん断摩擦力$\{S_s\}$は次式で表わされる。

$$\{S_s\}=\frac{\partial T(\theta_i,s)}{\partial s}\cdot\vec{e}_i \quad (3)$$

コンクリートに緊張材が与える等価節点力$\{Q\}$は、せん断摩擦力と角度変化に伴う力で構成され、仮想仕事の原理より最終的に次式にて与えられる。

$$\{Q\}=[N]^T\{Z_i\}+\int[N]^T\cdot\vec{e}_i\cdot\frac{\partial T(\theta_i,s)}{\partial s}ds+\int[N]^T\cdot\vec{e}_i\cdot\frac{\partial T(\theta_i,s)}{\partial s}ds \quad (4)$$

ここで、$[N]$は形状関数である。式(4)を通常のFEM応力解析コードに重ね合わせることで、緊張材の摩擦力を考慮に入れたFEM解析が可能となる。

3. プレストレス導入及びその後の耐荷力解析例

3.1 解析モデルと解析条件

提案した手法を解析コードLECOM[3)]を用い簡単なPC梁を対象としてプレストレスを導入し、その後の耐荷力解析を試みた。解析対象モデルは400mm×200mm×2000mmのPC梁である(図-2)。なお黄色の箇所は強制要素である。図-3に示すようにプレストレスを導入する際に緊張材の等価節点力が作用するコンクリート要素の節点変位を剛体変形しない程度に拘束した。緊張材に両引きで200kNの緊張力を20stepに分けて導入した。プレストレス導入後、変位固定境界を単純支持とし、且つ緑色の矢印の方向に0.1mm/stepの強制変位を与えた。緊張材は弾性

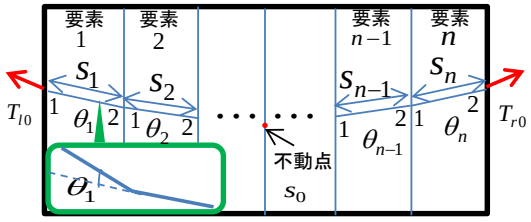

図-1　多直線近似による緊張材のモデル化

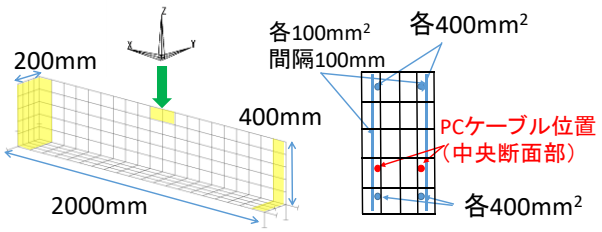

図-2　解析モデルの側面図と断面図

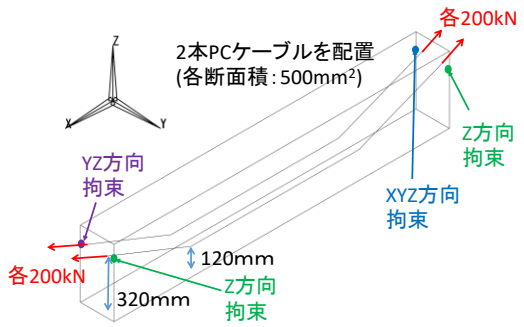

図-3　プレストレス導入時の変位境界条件

表-1　解析対象モデルの力学的特性値

特性の種類	力学的特性値
コンクリートヤング率	20000 N/mm²
ポアソン比	0.2
圧縮強度	30 N/mm²
引張強度	3 N/mm²
破壊エネルギー	80 N/mm²
鉄筋ヤング率	210000 N/mm²
鉄筋降伏強度	345 N/mm²
PC ケーブルヤング率	210000 N/mm²
緊張力の係数 μ	0.3
緊張力の係数 λ	0.004（1/m）

体と仮定し、緊張時にはヤング率を 0 とし、強制変位作用時にヤング率を与えた。力学的特性値を表-1 に示す。

3. 2　緊張力導入後の変形挙動

緊張力導入後の側面における変形モードを図-4 に示す。ただし、変形倍率は 100 倍としている。緊張力に伴う摩擦により妥当な変形となっていることがわかる。続いて、側面における長手方向応力分布を図-4 に重ねて示す。緊張材の折れ曲がり区間において圧縮側に 1～2N/mm² 程度の引張応力、引張側に 6～7N/mm² 程度の圧縮応力が作用しており、妥当な解となっている。以上のことから、本提案手法の妥当性がある程度確認されたと思われる。

3. 3　緊張後の荷重変位関係

荷重変位曲線を図-5 に示す。図中の縦軸は強制変位を与えた位置の反力の総和であり、横軸は強制変位を表している。また、図中の凡例「緊張力なし」は PC 鋼材の剛性のみを考慮し、緊張力を 0kN とした解析ケースである。「緊張力あり」(本提案手法)のケースの荷重は「緊張力なし」のケースの荷重と比べ大きく発生しており、プレストレスの効果を適切にシミュレートしていると考えられる。

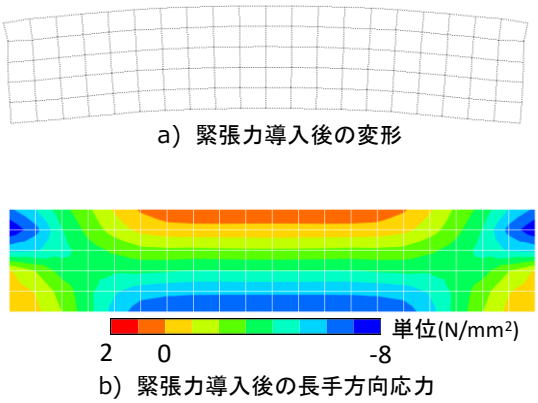

図-4　PC 梁側面の変形挙動と応力分布

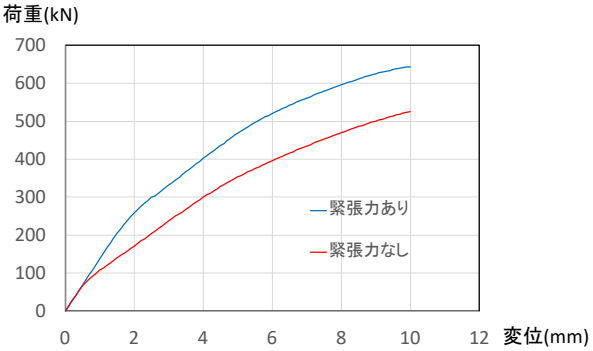

図-5　緊張力の有無による荷重変位曲線の比較

4.　まとめ

本研究では、緊張材への緊張力の評価式を基にプレストレスの効果を FEM 解析に導入するための解析手法を提案した。簡単な PC 構造物モデルに対して数値解析を実施した結果、提案した手法を今後拡張していくための見通しを得ることができた。今後はより複雑な緊張材の配置された構造物を想定し、数値実験を行い、提案した解析手法について、さらに検討したいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、LECOM 研究会の方々から大変貴重な意見をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献 1)Bui Khac DIEP,Hidetaka UMEHARA and Tada-aki TANABE: Numerical Analysis of Externally Prestressed Concrete Beams Considering Friction at Deviatos,J. Materials, Conc.Struct.Pavements, JSCE, No.718/V-57, 107-119, 2002 November,2)（社）土木学会:「コンクリート標準示方書（設計編）」,土木学会,2007, 3)田辺忠顕:初期応力を考慮した PC 構造物の非線形解析とプログラム,技報堂,2004