

PC ケーブルの摩擦を考慮した PC 構造物に対する FEM 解析手法の提案

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

近年、曲線橋やランプ橋などの設計方法に関する報告が各所でなされているが、PC ケーブルによる腹圧力や摩擦の影響を力学的に評価することは容易ではない。

Bui¹⁾らは外ケーブル方式においてデビエータの摩擦を考慮した解析手法を構築している。しかし、PC ケーブルがコンクリート内に埋め込まれた問題には適用できない。すなわち内ケーブルにおいて PC ケーブルの摩擦を適切に評価した FEM 解析手法はいまだ確立されていないと思われる。一方で、土木学会コンクリート標準示方書²⁾では摩擦を考慮した PC ケーブルの緊張力評価式が提案されている。

本研究では、コンクリート標準示方書²⁾で提案されている評価式を基に PC ケーブルの摩擦の効果を力学的に FEM 解析に導入するための解析手法を提案し、その基本的特質を把握することを目的とした。簡単な PC はりに対する緊張力導入直後の変形挙動の解析を行い、部材厚さが応力分布に及ぼす影響に焦点を当て解析的検討を行った。

2. PC ケーブルの摩擦力の等価節点力への変換方法

図-1 に示すような両引きで緊張された PC はりについて考える。PC ケーブルの両端にそれぞれ T_{r0} および T_{l0} の緊張力を作用させた。図中の黒枠で囲まれた領域はコンクリート、赤い直線は多直線で近似された PC ケーブルである。コンクリート領域は solid 要素、PC ケーブルは truss 要素でモデル化されると仮定する。コンクリート標準示方書²⁾で示される緊張力評価式を適用するとケーブル要素内の緊張力 $T(\theta_i, s)$ は次式のように定義される。

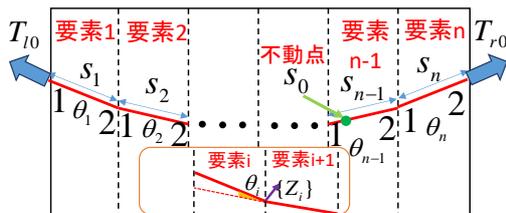


図-1 多直線近似によるモデル化

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

ここに、 θ_i は緊張力作用位置までの PC ケーブル要素 i と要素 $i+1$ がなす角度の総和であり、 s は引張端部からの PC ケーブルの長さである。さらに、 s_0 は左右両端部の引張力によりコンクリート内部の緊張力が釣り合う位置(不動点)である。 s_{max} は PC ケーブルの全体の長さである。 μ および λ は摩擦係数である。

次に、式(1)で得られた緊張力をコンクリート要素の等価節点力に変換することを考える。緊張力による摩擦力は角度変化に伴う力とせん断摩擦力で構成される。

角度変化に伴う力 $\{Z_i\}$ は、図-1 に示すように PC ケーブル要素 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 PC ケーブル力ベクトルであり、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。

また、せん断摩擦力 $\{S_s\}$ は、PC ケーブル方向に沿った変化量として次式で表わされる。

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

したがって、PC ケーブルの摩擦に起因するコンクリート要素の等価節点力 $\{Q\}$ は、仮想仕事の原理より最終的に次式にて表される。

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

ここに、 $[N]$ は solid 要素の形状関数である。式(4)を外力項として非線形応力解析コードに導入することにより緊張力を考慮した解析が可能になる。

3. プレストレス導入及びその後の耐力解析例

3.1 解析モデルと解析条件

提案した手法を既存の解析コード(LECOM³⁾)に組み込み、簡単な PC はりを対象としてプレストレスを導入し、その後の耐力解析を試みた。解析対象モデルを図-2 に示す。モデル①は 400mm×200mm×2000mm の PC はりであり、モデル②は 400mm×800mm×2000mm の

キーワード: PC ケーブル、摩擦力、FEM 解析

連絡先: 〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1 丁目 501 Tel:052-838-2343

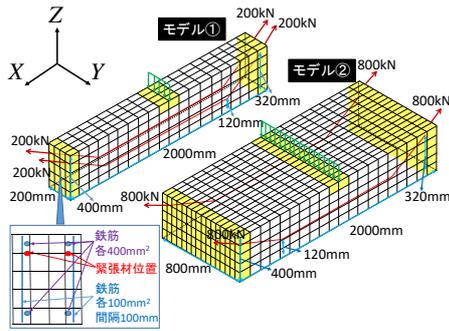


図-2 解析対象モデル①、②

PCはりである。図-2の左下にモデル①の断面図を示す。モデル②の断面図はモデル①のそれと厚さが異なるのみであり、鉄筋やPCの断面積やかぶり厚さは両断面とも同じである。黄色でハッチされた要素とPCケーブル要素は弾性体と仮定する。モデル①、②共に、プレストレスを導入する際の境界条件として、PCはりが剛体変形しないように拘束した。モデル①、②それぞれにおいて、一本当たり200kNと800kNの緊張力を20stepに分けて導入した。強制変位作用時では、境界条件を単純支持とし、かつ緑色の矢印の方向に100stepで0.1mm/stepの強制変位を与えた。緊張時、PCケーブルのヤング率の値を0とし、強制変位作用開始後、ヤング率の値を与えた。力学的特性値は、基本的には土木学会コンクリート標準示方書²⁾に基づき与えた。

3.2 緊張力導入直後の変形挙動

図-3に長手方向の変形モードを示す。図中の緑線は変形前、黒線は変形後を示している。ただし、変形倍率は100倍としている。モデル①、②共に変形は上に凸を示しており、緊張力に伴う摩擦による変形が合理的に計算されていることがわかる。

図-4に長手方向応力分布を示す。なお図中のコンターは図中上に示される青いハッチ部分の領域を表している。コンターの黒色はレベルに示された範囲外であることを示している。モデル①は上側に引張応力がほとんど作用しておらず、下側に圧縮応力が5~6N/mm²

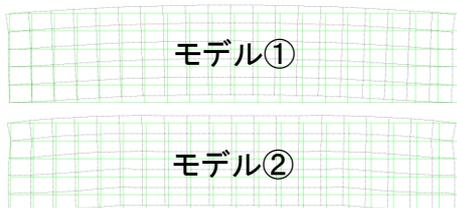


図-3 PCはり側面の変形挙動

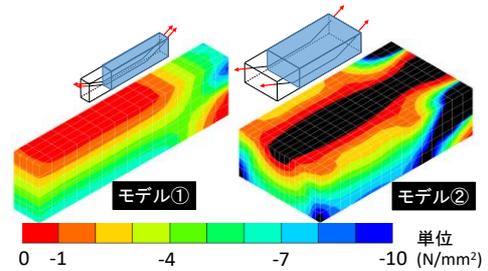


図-4 長手方向コンクリート応力分布

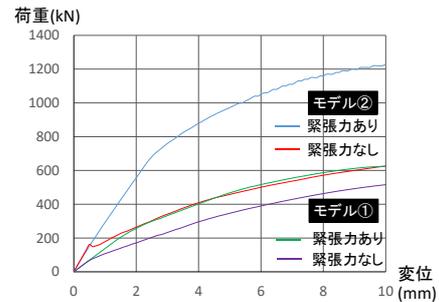


図-5 荷重変位曲線

程度作用している。また、断面厚さ方向に一樣な応力分布を示している。一方、モデル②は上側に引張応力が作用しており、下側に圧縮応力が7~8N/mm²程度作用している。また、応力分布は厚さ方向に変化している。

3.3 強制変位作用時での荷重変位関係

図-5に荷重変位曲線を示す。「緊張力あり」は本提案手法を用いた計算結果、「緊張力なし」は本提案手法において緊張力を0kNとした計算結果である。今回の解析では、PCケーブル要素の応力ひずみ関係を弾性と仮定しているが、その範囲では妥当な解となっている。

4. まとめ

以上より、本研究の範囲では本提案手法はPCケーブルの緊張後の変形挙動を合理的に捉えることが確認された。今後はPCケーブル要素に非線形応力ひずみ関係を導入するなどさらに検討をすすめたい。

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。ここに謝意を表す。

参考文献 1)Bui Khac DIEP,Hidetaka UMEHARA and Tada-aki TANABE: Numerical Analysis of Externally Prestressed Concrete Beams Considering Friction at Deviators,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