

順次緊張される緊張材の内部摩擦を考慮した解析手法に関する基礎的研究

株式会社 日本ピーエス 正会員 ○松本 一志 名城大学 正会員 石川 靖晃

1. はじめに

近年、形状が複雑なポストテンション方式におけるPC構造物が増加している。ゆえに、緊張材の摩擦をより一層慎重に考慮して、設計する必要がある。

一方で、外ケーブル方式において、Buiら¹⁾はデビエータの摩擦を考慮した解析手法を構築している。外ケーブル方式に限らず、一般的な摩擦の取り扱いについても研究が行われている^{例えは2)}。

近年、両引きで内部に緊張材が1本埋め込まれたPC構造物についての緊張材の摩擦を考慮するにあたり合理的な手法も提案されている^{例えは3)}。緊張材が順次緊張される際、既に定着された緊張材はコンクリートの弾性変形により緩みが生じるため、その緊張は考慮される必要がある⁴⁾。しかし、これらは考慮されていない。

本研究では、著者ら^{例えは3)}の提案手法を用いて、緊張材を順次緊張する力学的な取り扱い方法を提案する。さらに、緊張材が順次緊張される簡易モデルに対して、提案手法の基本的特質を把握することを目的とした。

2. 緊張材の摩擦を考慮したFEM解析手法の概要^{例えは3)}

著者ら^{例えは3)}の提案手法の概略を以下に述べる。

内部に緊張材が1本埋め込まれたPC構造物について考える。緊張材は多直線で曲線を表現する。このような仮定に基づき、コンクリート標準示方書⁵⁾の緊張力評価式を適用すると緊張材要素内の緊張力は不動点を境として緊張材の角度変化と緊張材の長さの関数となる。

不動点位置が定まれば、緊張力に起因する摩擦力の方向が定まるが、本提案手法では多直線近似をした緊

張材から不動点を求め、それを基に緊張材要素の摩擦に起因するコンクリート要素の等価節点力分 $\{Q_i\}$ は、最終的に仮想仕事の原理より緊張材の角度変化の押し上げ力と緊張材に沿った摩擦力の和で表される。

本提案手法は緊張力導入時のコンクリートの変形を含めた緊張材の抜け出し量の計算やセット量の考慮も可能であることが特徴である。

3. 緊張材を順次緊張する力学的取り扱い方法の提案

図-1に示すような複数本の緊張材が存在し、各緊張材を順次緊張することを考える。すでに緊張されて定着された緊張材はトラス要素などで有限要素にてモデル化されると仮定する。

緊張step i において緊張材 i を緊張し終え、定着された直後では、緊張材 i がコンクリート要素にもたらす等価節点力増分 $\{Q_i\}$ と、緊張材 i 自身に生じる等価節点力はつり合うため、次式が得られる。

$$\{Q_i\} + \int_{V_s} \{B_s\}^T \{\sigma_{si,i}\} dV_s = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\{\sigma_{si,i}\}$ は、緊張step i で緊張直後に緊張材 i に生じる応力増分であり、 $\{B_s\}$ は、緊張材を表す要素のひずみ-節点マトリックスであり、 V_s は、緊張材要素の体積領域である。緊張step i での摩擦以外のコンクリート要素の等価節点力を $\{F_i\}$ とすると、構造物全体の力のつり合い条件から次式が得られる。

$$\{F_i\} = \int_{V_c} \{B_c\}^T \{\sigma_{ci}\} dV_c + \sum_{j < i} \int_{V_s} \{B_s\}^T \{\sigma_{sj,i}\} dV_s - \{Q_i\} \quad (2)$$

ここで、 $\{\sigma_{sj,i}\}$ は、緊張step i で緊張直後に緊張材 j に生じる応力増分であり、 $\{B_c\}$ は、コンクリートを表す要素のひずみ-節点マトリックスであり、 $\{\sigma_{ci}\}$ は、緊張step i にて生じるコンクリート応力増分である。式(1)、(2)が順次緊張した場合の剛性方程式となる。

4. 提案手法の特質についての基本検討

4.1 解析モデルと解析条件

解析対象モデルを図-2に示す。モデルは長さ2mのはりであり、はりの中に4本の緊張材が配筋されている。さらに、図中のように軸鉄筋、スターラップが配筋されている。コンクリート要素は全て弾性体要素である。緊張力を導入する際の境界条件として、解析モ

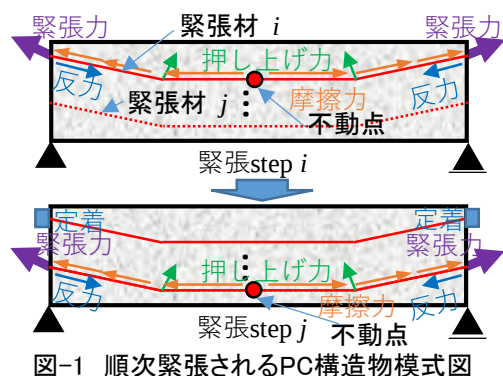


図-1 順次緊張されるPC構造物模式図

キーワード:緊張材、摩擦力、押し上げ力、順次緊張

連絡先:〒914-0027 福井県敦賀市若泉町3番地 Tel:0770-22-1400

デルが剛体変形しない最低限の拘束自由度（6 自由度）を考え、Case1、2 の 2 ケースを与えた（図-3）。緊張材は上・下段の 2 層とし、上段の緊張材を緊張する。上段の緊張材を定着後、下段の緊張材を緊張する。緊張時、いずれの緊張材についても両引きで 100kN の緊張力を 20step に分けて導入した。各緊張材に緊張力導入終了後、緊張材左右両端に 1step で 0.5mm のセット量が生じると仮定した。力学的特性値を表-1 に示す。

4.2 等価節点力のつり合いに関する基本検討

緊張材に起因するコンクリート要素の節点力は基本的には内的に作用する力であるため、等価節点力の節点による総和と任意節点周りのモーメントの総和は必ず 0 になる。まず、この点についての確認を行った。

図-4 に全ての緊張材を緊張した直後の境界条件 2 ケースにおける変形モードと長手方向コンクリート応力分布を示す。変形モードは各ケースを比較すると、座標位置は異なるものの変形自体は一致しており、応力分布も一致している。ゆえに、等価節点力の総和と任意節点周りのモーメントの総和は 0 であり、等価節点力は内的に作用する力であることが確認された。言い換えれば、剛体変形しない最低限の拘束自由度を与えれば、解は拘束条件に依存しないことが確認された。

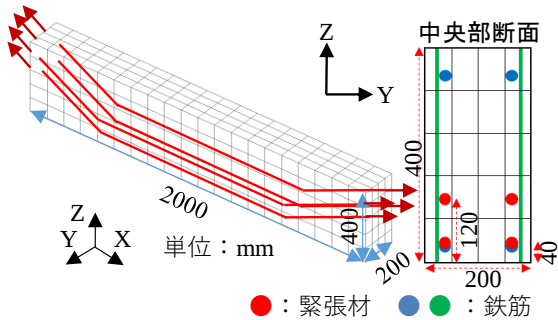


図-2 簡易モデルにおける鳥瞰図と断面図

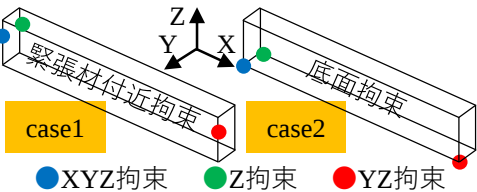


図-3 拘束節点座標位置の異なる境界条件

表-1 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	20000N/mm ²
ポアソン比	0.2
鉄筋、緊張材のヤング率	210000N/mm ²
鉄筋降伏強度	345N/mm ²
緊張力の係数 μ	0.3
緊張力の係数 λ	0.004 (1/m)
緊張材降伏強度	1000N/mm ²

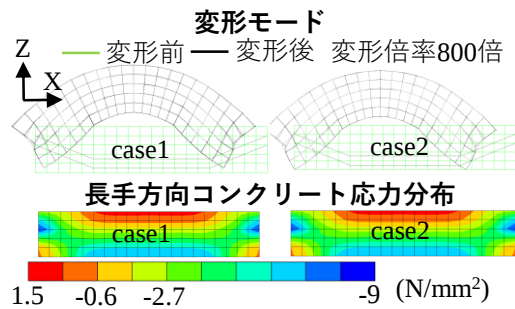


図-4 緊張力導入終了直後の変形挙動

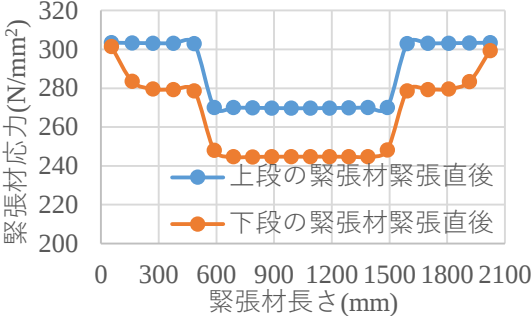


図-5 上段の緊張材1本における応力変化

4.3 順次緊張による緊張材応力に関する検討

図-5 に上段の緊張材 1 本における応力変化を示す。図中の縦軸は緊張材の応力を示し、横軸は緊張材の長さを示す。凡例の青線は上段の緊張材緊張直後を示し、橙線は下段の緊張材緊張直後を示す。下段の緊張材緊張により上段の緊張材には緩みが生じるが、本解析はこの緩みをシミュレートできていると考えられる。

5. まとめ

以上より、著者ら（例えば、3）の提案手法を用い、緊張材を順次緊張する力学的な取り扱い方法を提案した。簡易モデルでの数値計算の結果、剛体変形しない最低限の拘束自由度を与えた場合、解は拘束条件に依存しないことが確認された。また、緊張材の順次緊張を合理的に捉えていることが確認された。今後は実構造物を対象に提案手法の検証を進めていきたいと考える。

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 Deviators, J. Materials, Conc. Struct. Pavements, JSCE, No.718/V-57, 107-119, 2002 November, 2) 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, 3) 松本ら: PC 構造物における緊張材摩擦を考慮した解析手法と初期ひずみ法との比較に関する基礎的研究, 第 73 回年次学術講演概要集, pp1137, 1138, 2018.8.29-31, 4) 公益社会法人 プレストレストコンクリート: 「フレッシュマンのための PC 講座」, 2018, 5) (社) 土木学会: 「コンクリート標準示方書（設計編）」, 土木学会, 2007.