

緊張材の摩擦を考慮した PC 解析におけるセット量を含めた抜け出し量の計算方法の提案

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

著者¹⁾²⁾らはコンクリート標準示方書³⁾で示される緊張材の緊張力評価式を基に緊張材の摩擦力の効果を FEM 解析⁴⁾に導入するための解析手法を提案してきた。

PC 構造物には定着部で緊張材の伸び分とコンクリートの縮み分との抜け出し量が生じる。さらに、プレストレス導入終了時、緊張材を定着させるために抜け出し量がわずかに緩和されるセット量が生じる。

しかしながら、緊張材の内部摩擦を考慮したセット量を含む抜け出し量の計算方法は確立されていない。

本研究では、前報の解析手法を基にセット量を含めた抜け出し量の計算方法を提案することを目的とした。

2. 緊張材の摩擦を考慮した変形解析について

緊張材の摩擦を考慮した変形解析手法の概略を以下に述べる。

緊張材要素内の緊張力 $T(\theta_i, s)$ は次式で表される。

$$T(\theta_i, s) = \begin{cases} T_{L0} e^{-\mu\theta_i - \lambda(s_{max} - s)} & s > s_0 \\ T_{R0} e^{-\mu\theta_i - \lambda s} & s \leq s_0 \end{cases} \quad (1)$$

T_{L0} および T_{R0} はプレストレスを加える位置での左右両端それぞれの緊張材の緊張力である。 θ_i は緊張力作用位置までの緊張材要素 i と $i+1$ がなす角度の総和であり、 s は緊張端部からの緊張材の長さである。 s_0 は緊張力が釣り合う位置(不動点)である。 s_{max} は緊張材の全体の長さである。 μ および λ は摩擦係数である。

コンクリート要素の等価節点力 $\{Q\}$ は最終的に仮想仕事の原理より次式で表される。

$$\{Q\} = [N]^T \{Z_i\} + \int [N]^T \cdot e_i \frac{\partial T(\theta_i, s)}{\partial s} ds \quad (2)$$

$[N]$ は形状関数、 e_i は要素 i の単位接線ベクトル、 $\{Z_i\}$ は角度変化に伴う緊張材力の法線ベクトルである。式(2)の右辺 1 項目は緊張材の角度変化の押し上げ力を示し、2 項目は緊張材に沿った摩擦力を示す。

3. セット量を考慮した抜け出し量の計算方法

3.1 抜け出し量の定式化について

図-1 に示す PC はりを考える。PC はりに埋め込まれた緊張材に緊張力 T_{L0} および T_{R0} が作用している。これらの緊張力により変形した状態を考える。図中の点線は変形前を示している。緊張材の抜け出し量はそれ

ぞれ $\Delta \ell_{L,cable}$ および $\Delta \ell_{R,cable}$ とし、コンクリートの抜け出し量はそれぞれ $\Delta \ell_{L,conc}$ および $\Delta \ell_{R,conc}$ とする。

ここで、左側の緊張端部に着目する。左側の緊張材の全体的な抜け出し量 $\Delta \ell_L$ は次式で表される。

$$\Delta \ell_L = \Delta \ell_{L,cable} + \Delta \ell_{L,conc} \quad (3)$$

$\Delta \ell_{L,cable}$ と $\Delta \ell_{L,conc}$ は、コンクリートのひずみを緊張材に沿って積分により次式で表される。

$$\Delta \ell_{L,cable} = \int_s \frac{T(\theta_i, s)}{EA} ds, \Delta \ell_{L,conc} = \int_s \varepsilon_{cs} ds \quad (4)$$

EA は緊張材の軸剛性、 ε_{cs} は緊張材に沿った方向のコンクリート直ひずみ成分である。右側の $\Delta \ell_R$ についても同様の方法で求めることができる。

3.2 セット量による抜け出し量の変化の考慮方法

セット量は既知量であり、定着部右端のセット量を $\Delta \ell_{L,set}$ とし、左端のセット量を $\Delta \ell_{R,set}$ とする。本研究では、セット量による緊張材およびコンクリートの応力ひずみ場の変化は弾性的であると仮定する。

まず、緊張力がコンクリートに及ぼす変形分について考える。コンクリート要素に作用するセット量による緊張力の変化量はそれぞれ $-T(\theta_i, s) \cdot \Delta \ell_{L,set} / \Delta \ell_L$ および $-T(\theta_i, s) \cdot \Delta \ell_{R,set} / \Delta \ell_R$ で表される。式(2)の $-T(\theta_i, s)$ をこれらの項で置き換えることにより、セット量に伴う外力変化量 $\Delta \{Q_{set}\}$ が求められる。

$\{Q\}$ に対する抜け出し量 $\Delta \ell_L$ および $\Delta \ell_R$ を記憶し、その後 $\Delta \{Q_{set}\}$ を外力として改めて与え、剛性方程式を解き、さらにその時の抜け出し量変化を求めることにより、セット量によるコンクリートの抜け出し量の変化量 $\Delta \ell_{L,set,conc}$ および $\Delta \ell_{R,set,conc}$ を求めることができる。なお、不動点 s_0 についても緊張力増分ごとに更新する必要がある。

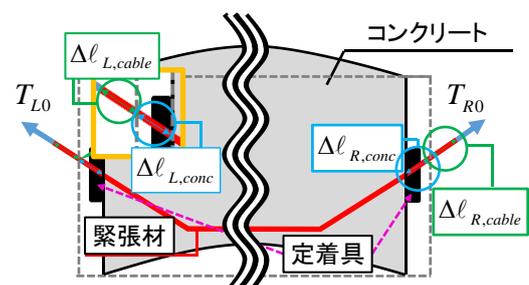


図-1 変形前後の PC はりと抜け出し量

左側の緊張材のセット量による抜け出し量の変化量 $\Delta \ell_{L, set, cable}$ は式(4)の $-T(\theta_i, s)$ を $-T(\theta_i, s) \Delta \ell_{L, set} / \Delta \ell_L$ に置き換えることで求めることができる。右側の

$\Delta \ell_{R, set, cable}$ についても同様に求めることができる。

4. 抜け出し量およびセット量の数値計算の一例

4.1 解析モデルと解析条件

解析モデルは図-2に示す PC はりである¹²⁾。なお黄色の箇所は弾性要素である。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程度に拘束した。2本の緊張材を両引きで200kNの緊張力を20stepに分けて導入した。プレストレス導入終了直後、2本の緊張材左右両端に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 セット量による変形モードおよびひずみ分布

図-3に側面の変形モードを示す。図中の上図はセット量考慮直前を示し、下図はセット量考慮直後を示す。実線は変形前を示し、点線は変形後を示す。なお、変形倍率は100倍である。セット量考慮直後の変形は考慮直前に比べ、上に凸の変位が若干減少している。

図-4に側面のひずみ分布を示す。セット量考慮直前は上側にひずみはさほど生じておらず、下側にひずみが圧縮ひずみ-300~-250 μ 程度生じているが、考慮直後は緊張材の定着部と下側のひずみが減少している。

4.3 抜け出し量の経時変化の関係

図-5に左側における緊張材1本の抜け出し量の経時

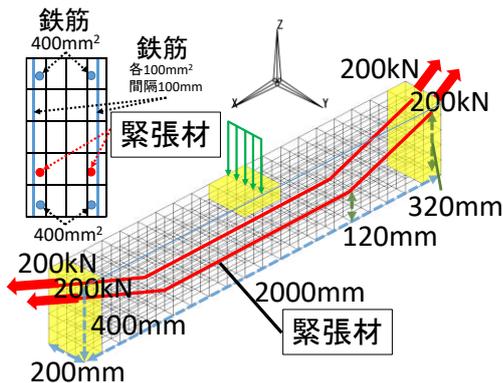


図-2 解析モデルの断面図と側面図

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/mm ²
ポアソン比	0.2
圧縮強度	30 N/mm ²
引張強度	3 N/mm ²
破壊エネルギー	80 N/mm ²
鉄筋, 緊張材のヤング率	210000 N/mm ²
鉄筋降伏強度	345 N/mm ²
緊張力の係数 μ	0.3
緊張力の係数 λ	0.004 (1/m)

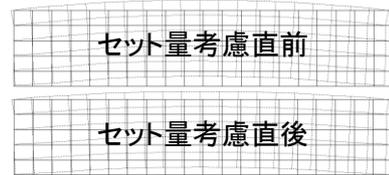


図-3 PC はり側面の変形モード
セット量考慮直前

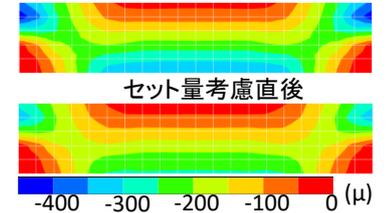


図-4 PC はり側面のひずみ分布

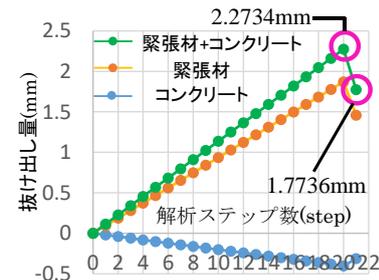


図-5 抜け出し量の経時変化

変化の関係を示す。図中の凡例「緊張材+コンクリート」は $\Delta \ell_L$ であり、「緊張材」は $\Delta \ell_{L, cable}$ であり、「コンクリート」は $\Delta \ell_{L, conc}$ である。プレストレス導入時の0~20stepに着目すると、緊張材とコンクリートが寄与する抜け出し量の割合はおおよそ5:1となっている。

セット量を与えた21stepは「緊張材+コンクリート」の抜け出し量が0.4998mm減少している。セット量の0.5mmと0.002mm誤差があるが、概ね一致している。

5. まとめ

緊張材とコンクリートのセット量を含めた抜け出し量の計算方法を提案した。簡単なモデルでの数値計算の結果、その方法は抜け出し量を合理的に捉えることが確認できた。今後は実構造物を対象に数値実験を行い、提案した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) 松本ら: 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, 平成 28 年度 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp539-540, 2017.3.3, 2) 松本ら: 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, 第 72 回年次学術講演概要集, pp655656, 2017.9.11-13, 3) (社) 土木学会: 「コンクリート標準示方書 (設計編)」, 土木学会, 2007, 4) 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