

プレテンション方式PC鋼棒のネジ山定着構造に関する解析的研究

オリエンタル建設(株) 正会員 ○立花 弘
 オリエンタル建設(株) 正会員 工博 今井 昌文
 オリエンタル建設(株) 正会員 近藤 琢也

1. はじめに

中空PC鋼棒を利用した現場施工タイプのプレテンション工法 (Non Abutment Pretensioning Prestressing Method 以下NAPP工法とする) は、現場における緊張作業および通常のグラウト作業が不要なため、施工の省力化を図ることが可能である。またプレテンション方式であるので定着具が不要であり、ナットによる支圧定着とPC鋼棒に加工されたネジ部による付着定着の複合定着構造であるので、鋼棒端部における応力集中が低減されるとともに、工場で所定の緊張力を導入できることから施工品質の確保が容易となるなど多くの利点があり、現在までに様々な場面で利用されている。

現在NAPP工法のさらなる適用範囲の拡大のため種々の試験が行われている。本報告はその一環としてネジ山定着に関する付着定着に着目した解析的検討を行い、その結果について報告するものである。

2. 目的

NAPP工法のみによらずプレテンション方式における付着定着のメカニズムは複雑であり、特に終局荷重作用時においては、解析的にこれを再現することが困難である。本報告では、既往の研究結果¹⁾を基に、PC鋼棒表面に加工されたネジ山による付着定着構造について非線形FEMモデルを用いて再現し、それにより今後のNAPP工法の事前解析をより正確に行い、試験の効率化を図るとともに、実構造へNAPP工法を適用した場合の応力状態を、より詳細に把握することを目的とする。

3. NAPP工法概要

NAPP工法は、中空PC鋼棒、反力PC鋼棒およびNAPPホルダーなどから構成されるNAPPユニットを現場において配置し、コンクリート硬化後にプレストレス導入を行う工法である。図-1にNAPPユニットの構成および定着構造の概念図を示す。プレストレスの導入工程は、まず反力PC鋼棒を中空PC鋼棒に挿入し、それに反力(圧縮力)を取らせて油圧ジャッキにより中空PC鋼棒に引張力を付与する。その引張力を保持したまま型枠内に設置後コンクリートを打設する。コンクリートが所定の圧縮強度に達した後中空PC鋼棒の緊張力を解放する。その際中空PC鋼棒のネジ部とコンクリートとの付着およびアンカーナットの支圧により定着されることによりコンクリートに圧縮応力、すなわちプレストレスが導入されることとなる。既往の研究¹⁾により、緊張力に対する分担はアンカーナットの支圧力による部分が30~40%であるのに対し、ネジ部の機械的抵抗力による部分が60~70%と機械的抵抗力が大きいという知見を得ている。

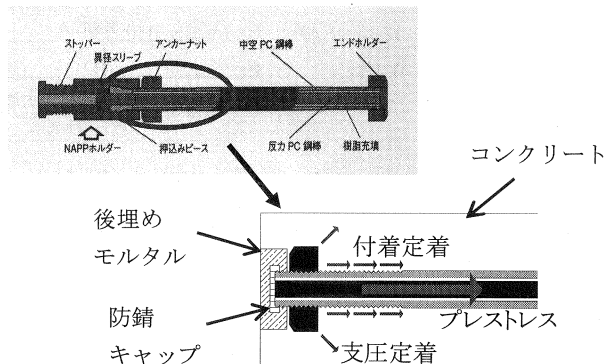


図-1 NAPPユニットおよび定着構造

4. 解析

4-1 解析モデルの概要

上記から、ネジ部の付着構造を解明するため既往の研究¹⁾で行われた引抜き試験 (以下実験とする) を解析により再現する。図-2 に試験体の概略図およびひずみ、変位の計測位置を示す。また図-3 に解析モデルの概念図を示す。試験体および荷重が左右対称であることから、解析モデルは4分の1モデルとした。また境界条件としてコンクリート部の側面を水平方向に拘束し、上縁を鉛直方向に拘束した。

コンクリートおよび中空PC鋼棒にはソリッド要素を、コンクリートとPC鋼棒との界面 (以下界面とする) には本検討で使用したFEM解析ソフト特有の界面要素を使用した。界面要素の厚さはネジ山の高さである1.4mmとし、材料特性として付着応力 τ とせん断ずれ変形量 S の関係を設定することにより実際の界面の挙動を再現した。コンクリート部およびPC鋼棒部はそれぞれコンクリート設計基準強度 30N/mm^2 、鋼材径 $\phi 40\text{mm}$ の弾性部材とした。

4-2 実験式の適用

(1) 界面要素の設定

既往の研究¹⁾では、自由端位置における界面の付着応力 τ とせん断ずれ S/D の関係を実験結果から回帰し、以下の式 (以下実験式とする) で表している。本解析モデルでは、界面要素における材料特性の設定が重要となるため、この実験式を界面の材料特性として設定した。これをモデル1とする。

$$\tau = 0.273 \cdot f_c \cdot \ln(1+1330 \cdot S/D) \quad (0.0\% \leq S/D < 0.7\%) \quad (1)$$

$$\tau = 0.273 \cdot f_c \cdot \ln(1+9.31) \quad (0.7\% \leq S/D < 1.0\%) \quad (2)$$

$$\tau = 0 \quad (1.0\% \leq S/D) \quad (3)$$

ここで

τ : 付着応力度 (N/mm^2) f_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2)

S : 自由端でのせん断ずれ変形量 (mm) D : 鋼材径 (mm)

(2) 解析結果および考察

界面の付着応力 τ とせん断ずれ S/D の関係について実験式と、実験式をそのまま界面要素の材料特性としたモデル1の解析値との比較を図-4に示す。また、引抜き荷重 P とせん断ずれ変形量 S の関係について各実験供試体から得られたデータ (以下実験値とする) と解析値の比較を図-5に示す。図-4から、実験式と解析値の間に相違が生じているのがわかる。実験では自由端とコンクリート部高さ方向中央付近に設置した変位計による相対変位をせん断ずれ変形量としている。そのため実験式のせん断ずれ変形量 S にはコンクリートの弾性変形も含んでいると考えられる。このコンクリート弾性変形分も含んだ付着応力 τ とせん断ずれ変形量 S との関係を解析における界面に対して設定したため、実際の界面のせん断剛性に比べ小さかったことにより相違が生じたと推察される。

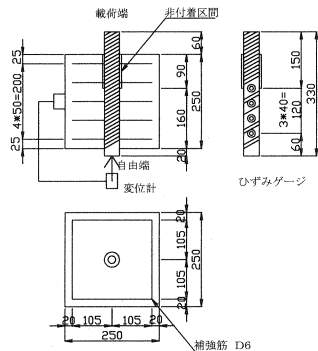


図-2 試験体概略図

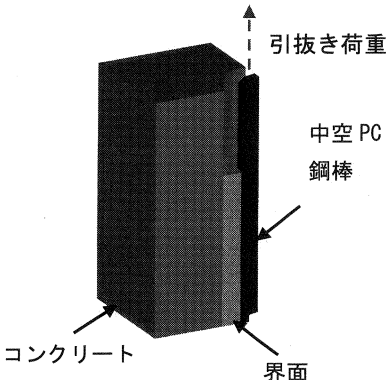


図-3 解析モデル概念図

また図-5 から、実験では引抜き荷重 P が 130kN 程度までせん断ずれ変形 S は発生していないが、解析では荷重が作用した時点でせん断ずれ変形が発生している。これは、実際には初期の変位が発生するまでの剛性（以下初期剛性とする）が高いことによると推察される。さらに、実験では引抜き最大荷重である 280kN 程度に達した後、引抜き荷重は増加せず、せん断ずれ変形量のみ増加していくのに対し、解析値は引抜き最大荷重およびその後の挙動が大きく異なる。これは引抜き最大荷重に達した後の、付着を保持する区間の設定が影響していると推察される。

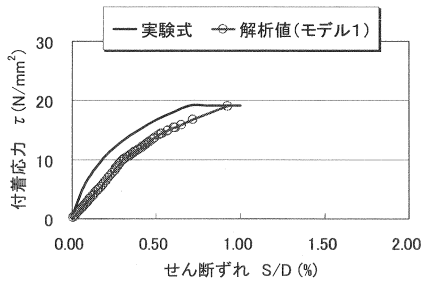


図-4 付着応力-せん断ずれ

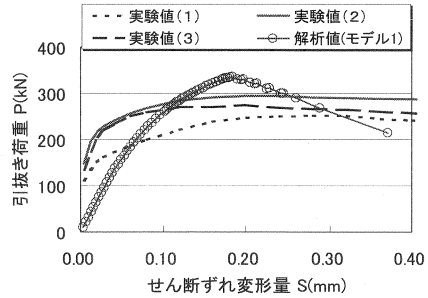


図-5 引抜き荷重-せん断ずれ変形

4-3 材料特性の修正

以上の考察から界面要素に対し以下の3点を考慮した付着応力 τ とせん断ずれ S/D を設定した。図-6 に各ケースにて設定した $\tau-S/D$ 関係を示す。

(1) 初期剛性の設定

実際にはPC鋼棒のネジ山付近に微細なひび割れが発生、進行していくことにより自由端へ引抜き荷重が伝達していきせん断ずれが発生すると考えられるため、自由端にその引抜き荷重が達するまではある程度荷重に抵抗すると推察される。実験値では初期のせん断ずれ変形が発生するまで約130kNの引抜き荷重を要することから高い初期剛性を与える。

(2) 付着応力最大値までの剛性の設定

付着応力最大値は実験式と同値とし、初期剛性後（引抜き荷重が130kNに達した後）から付着応力最大値に至るまでのせん断剛性は実験式における $S/D=0.0\% \sim 0.7\%$ の割線剛性とする。

(3) 付着応力最大値後の剛性の設定

まず付着応力最大値に達した後、 $S/D=0.3\%$ 分の変位が発生する間は付着応力を保持し、その後急激に解放されるモデルを設定する（モデル2とする）。また付着応力最大値に達した後、 $S/D=1.0\%$ まで徐々に付着応力が解放されるモデル（モデル3とする）、付着応力最大値に達した直後に急激に付着応力が解放されるモデル（モデル4とする）の3ケースを設定する。

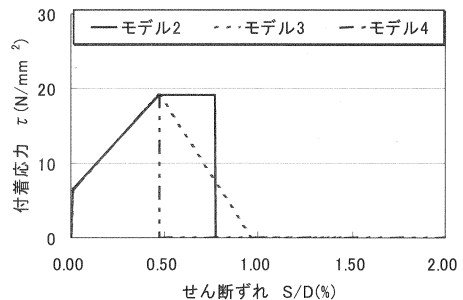


図-6 モデル2~4における界面の付着応力-せん断ずれ関係

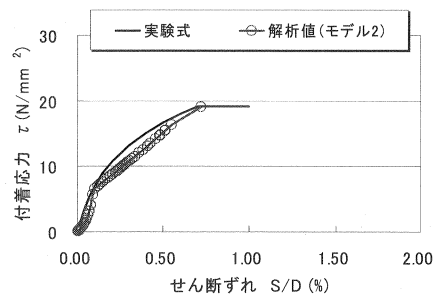


図-7 付着応力-せん断ずれ(モデル2)

4-4 解析結果

3 ケースとも付着応力最大値に達するまでは同じ履歴をたどるため、ここではモデル2のみの実験式と解析値における付着応力 τ とせん断ずれS/Dの関係を図-7に示す。この図から付着応力最大値に達するまでのせん断ずれは実験式に近似した結果となることがわかる。

各ケースにおける引抜き荷重Pとせん断ずれ変形量Sの関係を図-8~10に示す。3 ケースとも引抜き荷重P=130kN時における自由端のせん断ずれ変形量Sは実験値とほぼ同様の値に近づいた。

図-8に示すようにモデル2において引抜き最大荷重は実験値に比べ大きくなった。また、せん断ずれ変形量が増加するとともに引抜き荷重が減少していく。一方、図-9に示すようにモデル3において、引抜き最大荷重は実験と解析とでほぼ同値となった。また引抜き最大荷重に達した後の引抜き荷重の減少も、モデル2に比べある程度緩やかである。図-10に示すように、モデル4において引抜き最大荷重の値は3つの実験値内になった。しかしモデル2と同様、せん断ずれ変形が増加するとともに、引抜き荷重が減少している。

4-5 考察

以上よりモデル3が最も実験値と整合した結果となった。実験値では、引抜き最大荷重に達した後、せん断ずれ変形は進行しても引抜き荷重はさほど減少しない。モデル3においても同様の傾向がある程度見られるため、付着の低下には軟化域があり、それにより引抜き最大荷重を保持したまません断ずれ変形も増加していくと推察される。また、付着応力が保持される区間が長いほど、引抜き最大荷重が大きくなると考えられる。本解析では自由端における τ -S/D関係を界面全域の剛性として設定したが、その他の区間についても考慮した設定ができれば、より実験値に近いモデルになると推察される。

5. おわりに

本検討では既往の研究¹⁾から求められた実験式をもとに界面のせん断剛性を設定して解析を行った。実験式には反映されていない初期剛性および付着の軟化域を設定することにより、実験値に近い解析モデルを再現できた。しかし、本検討では実験式から界面のせん断剛性を設定したため、定量的に再現できるモデルではない。今後どのような構造に対しても適用できるよう、これらの特性を定式化する必要がある。

参考文献 1) 今井昌文:中空PC鋼棒を用いたプレテンション方式によるコンクリートへのプレストレス導入工法に関する研究
2) NAPP 工法設計・施工マニュアル: NAPP 工法技術研究会技術部会

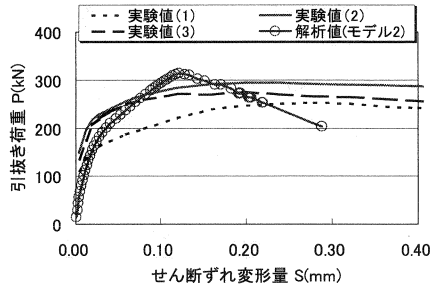


図-8 引抜き荷重-せん断ずれ変形(モデル2)

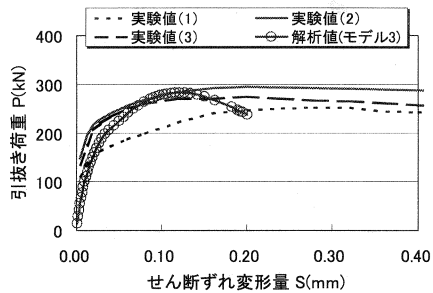


図-9 引抜き荷重-せん断ずれ変形(モデル3)

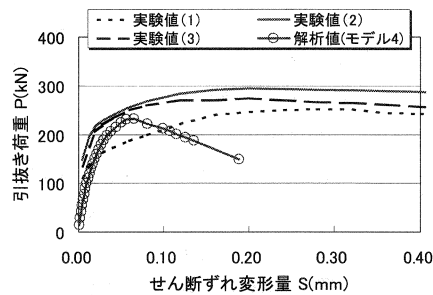


図-10 引抜き荷重-せん断ずれ変形(モデル4)