X 線を使用したセグメントの鉄筋応力測定に関する要素試験（その２）
～残留ひずみが存在する場合の応力測定～

東京電力パワーグリッド(株)　正会員○吉本正浩，非会員　小椋明仁，正会員　尾崎　潤
東電設計(株)　正会員　阿南健一
パルステック工業(株)　非会員　野末秀和

１．はじめに

近年，シールドトンネルにおいて，荷重の変動や鉄筋の腐食に伴う耐荷性能の低下や補強などの対策の報告が多く見られ，既設構造の健全性を評価するために発生応力度を精度よく計測することが必要となっている．そこで，鉄筋を切断せずに応力度を測定することができる X 線による計測について，セグメントの鉄筋への適用性などについて要素試験により検討し，適用性が高いとの結果が得られ，その１として報告した．

一方，シールドトンネルのセグメントは，円形構造となり，製造時の主鉄筋の曲げ加工が冷間加工により行われている．このため，鉄筋には曲げ加工によるひずみが残留していることになる．鉄筋の曲げ加工による残留ひずみを試算すると内径 2.0m のシールドトンネルの場合 6000μ程度となる．これは，鉄筋の降伏ひずみ（SD295 の場合 1475μ）に対して非常に大きい．X 線による応力測定装置は，従来，弾性範囲内の測定を主として行われており，加工時の残留ひずみの影響がどのように計測されるか不明であった．また，既設構造物において降伏応力以上の応力度となっている場合も考えられる．

そこで，室内試験による要素試験により，加工による残留ひずみや降伏応力度以上となった場合の計測精度などについて確認した．

２．試験方法

2.1 試験供試体

試験は,既設セグメントの鉄筋径および材料を参考に以下の 2 ケースを設定し，各 3 本の供試体について実施した．

ケース１：鉄筋径φ13（丸鋼），材料 SR235

ケース２：鉄筋径 D13（異形鉄筋），材料 SD295

試験供試体の X 線による計測位置には，鉄筋表面の防錆材（黒皮）を除去するため，数 cm の範囲の電解研磨を実施する．また，鉄筋ひずみの状況を確認するため,X 線の計測位置の近傍にひずみゲージを設置した．

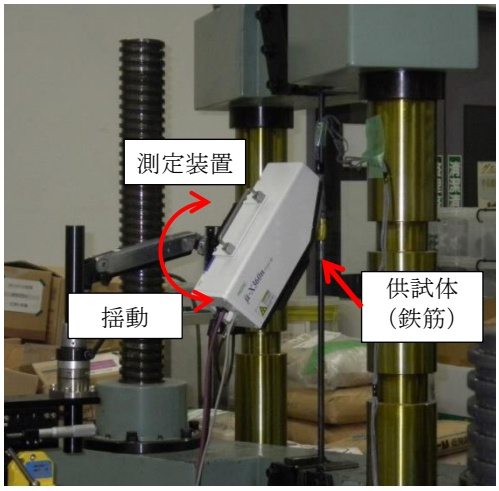


図１ X 線による鉄筋応力の測定状況

2.2 X 線による応力測定装置について

本検討で用いた X 線による応力測定装置は以下となっている（図１参照）．なお，測定方法は，別途報告したその１の結果から，計測装置を揺動させる方法を採用した．

・試験機：μ-X360（パルステック工業(株)製）　・測定手法：cosα法

・計測方法：揺動あり（揺動角±5 度，X 線露光：39 秒）

2.3 試験方法

載荷試験は，鉄筋加工による残留ひずみの影響を評価するため，次のように行った．

1)載荷１回目：降伏応力度以上までの載荷

鉄筋の引張試験装置により，曲げ加工による鉄筋ひずみとなる程度（7000μ程度）まで載荷を行った後に，

キーワード：セグメント，鉄筋，X 線応力測定法，非破壊測定，残留ひずみ
連絡先：〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3
東京電力パワーグリッド(株)工務部 TEL 03-6363-1111

荷重が 0 となるまで除荷を行う．X 線による計測は，荷重を保持させて行い，降伏応力度以上の場合は載荷装置に設置した変位計が一定となるように保持して行った．

2)載荷 2 回目：残留ひずみが生じた場合での再載荷

載荷 1 回目の除荷時にひずみゲージの計測からひずみが残留していることを確認する．載荷 2 回目開始時の鉄筋の残留ひずみは**表 1** のようになっており，おおむね降伏応力度以上のひずみが発生した状態となっていた．除荷した後，載荷 1 回目と同様の方法で再載荷を行う．再載荷は，既設構造物の鉄筋が降伏応力度以上の状態となっている場合を想定し，降伏後も安全性が確保できる範囲で計測を継続した．

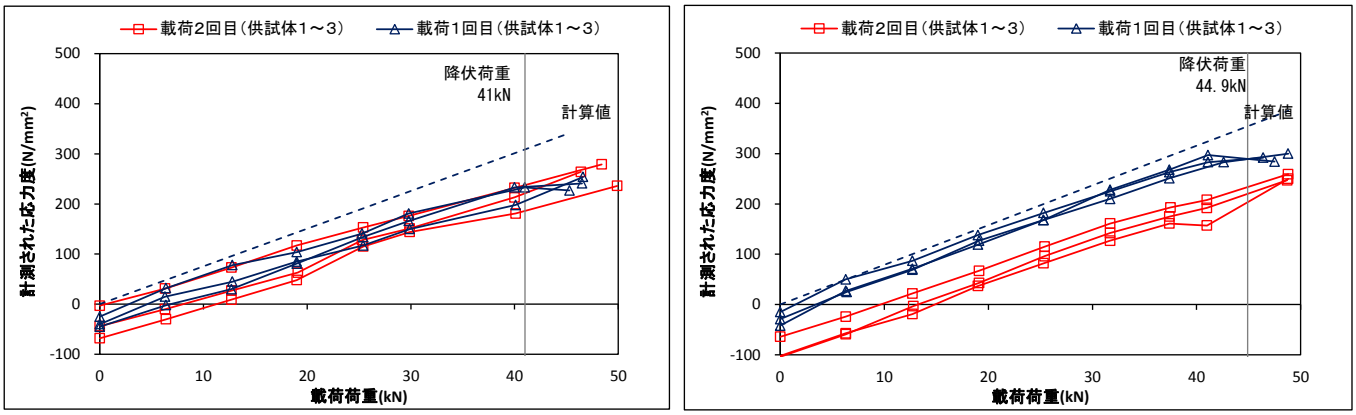
表 1 載荷 2 回目開始時の鉄筋の残留ひずみ

鉄筋種類	載荷2回目開始時の鉄筋ひずみの平均値(μ)		
SR235	1767	1798	1475
SD295	2654	3080	5014

3．試験結果

載荷 1 回目および 2 回目の試験結果を載荷荷重と計測された応力度の関係として整理したのが**図 2** である．グラフ中に示している計算値は，精度確認の基準値であり，載荷荷重を鉄筋の有効断面積で除した値である．また，降伏応力度は，載荷 1 回目のひずみゲージによる計測結果から得られた値である．

この結果，塑性化させた後に再載荷した場合でも，計測される応力度は，載荷荷重と線形関係となっている．また，計測された値は，1 回目の載荷と同様に計算値に対して若干小さな値となっている．これは，塑性化した場合，結晶面ですべりが生じた状態となるが，すべり面に位置している原子は計測箇所全体に占める比率が少なく，計測箇所の大部分の原子は塑性化前と同等の状態にあるためと考えられる．このため，計測前の塑性化の有無によらず，X 線装置を用いて計測される応力度は，材料に生じている応力度と評価することができ，セグメントの鉄筋の曲げ加工の影響も考慮する必要はないと考えられる．



a)鉄筋の種類：φ13（丸鋼），SR235　　b)鉄筋の種類：D13（異形鉄筋），SD295

図 2 鉄筋の引張り試験の X 線による測定結果

4．おわりに

要素試験の結果，塑性ひずみが残留した鉄筋においても，X 線の計測値は発生している応力度に応じた結果が得られた．このため，既設のセグメントの鉄筋応力の計測においても，曲げ加工による残留ひずみを考慮する必要はないと考えられる．ただし，計測値は実際の応力度より若干小さくなる傾向がある．また，本検討は引張り試験により曲げ加工の影響を考慮したものであった．このため，今後は，曲げ加工の前後の計測や計測値のばらつきの評価などについて，さらに検討をかさね，現場計測への適用を目指す予定である．

また，X 線を用いた計測では，「半価幅[1)]」や「標準偏差[2)]」と呼ぶ結果も得られ，これらの結果は，塑性化することで値が変化する傾向が見られた．既設構造物の塑性化の有無を評価することは重要と考えられるため，今後，「半価幅」や「標準偏差」の精査や検討などについても，研究を進める予定である．

［参考文献］1)例えば，鷹合ら：X 線回折による硬さ測定技術の研究，石川県工業試験場 HP 平成 27 年度研究報告（http://www.irii.jp/randd/theme/2006/pdf/study03.pdf），2015．2)例えば，パルステック工業株式会社：X 線応用機器 HP（http://www.pulstec.co.jp/pr/xray/pr_x01_02.html）．