

載荷状態にある RC 構造物における X 線を用いた鉄筋応力度の測定

東京電力ホールディングス(株) 正会員 岡 滋晃, 正会員 斉藤 仁
 東京電力パワーグリッド(株) 非会員 嘉賀 大樹
 東電設計(株) 正会員 本田 中, 正会員 阿南 健一

1. はじめに

図-1 に示すような開削トンネルとシールドトンネルといった RC 構造物中における鉄筋の応力度を測定する一般的な方法として、鉄筋切断法¹⁾がある。しかし、鉄筋切断法は鉄筋を破壊して測定するため、構造物に負担がかかることから、検査として好ましくない。一方、測定対象物を破壊しない非破壊検査法として X 線応力度測定法がある。図-2 に示すように、X 線応力度測定法は測定対象物に X 線を照射した際、対象物の結晶面で回折される X 線によって反射板上にできる円環状の回折像のひずみを利用して応力度を測定するもので、とくに $\cos\alpha$ 法と呼ばれる方法では、式(1)により応力度を求める。

$$\sigma_{XRAY} = \frac{E_{XRAY}}{1+\nu_{XRAY}} \frac{1}{\sin(2\theta_0)} \frac{1}{\sin(2\psi_0)} \left(\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (1)$$

ここに、

σ_{XRAY} : X 線応力度測定値
 E_{XRAY} : X 線のヤング率 (鋼材では 223GPa)
 ν_{XRAY} : X 線のポアソン比 (鋼材では 0.273)
 θ_0 : X 線の回折角 (鋼材では 78.2°)
 ψ_0 : 結晶面の試料表面に対する角度
 a_1 : 図-2 に示す角度 α におけるデバイ環のひずみ

本方法は、主に自動車鋼板など比較的結晶状況が良好な鋼材の応力度の測定に使用されてきた。そのため、結晶状況に精度を必要としない土木構造物の鉄筋などの鋼材にも適用できるか、確認する必要がある。

そこで今回、載荷状態にある鉄筋に対して、パルステック工業株式会社製 X 線応力度測定器「 μ -X360s」を用いて ψ_0 角を変化させる角度揺動法を用いた X 線応力度測定法の実験を行い、その測定結果を考察した。なお、 ψ_0 角の変化の幅は、 $25^\circ \sim 35^\circ$ とした。

2. 実験ケース

実験は、図-3 に示すように(a)(b)2 ケースを実施した。

図-3(a)は、開削トンネルへの適用を想定し、アムスラー試験機により直線鉄筋を載荷状態にして応力度を測定する実験で、以下、「直鉄筋ケース」と呼ぶ。図-3(b)は、シールドトンネルへの適用を想定し、測定用の箱抜き部を有する実規模のセグメントを製作して載荷ジャッキにより背面から載荷する。これによりセグメント内部の曲げ加工鉄筋を載荷状態にして応力度を測定する実験で、以下、「曲げ鉄筋ケース」と呼ぶ。このケースでは、同一の主鉄筋に対して 2 箇所測定を実施した。

測定面は、図-4 に示すように成形した。まず、鉄の結晶面を確実に露出させるため、鉄筋表面から左右 45°

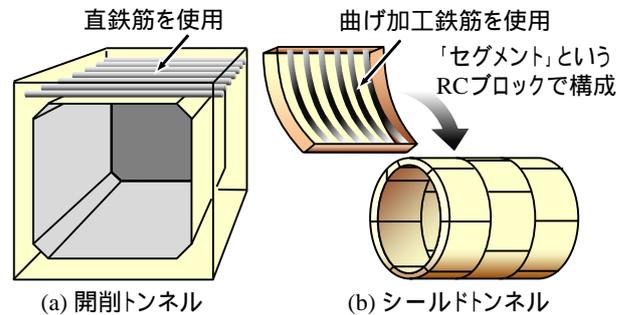


図-1 鉄筋切断法でののはつり範囲

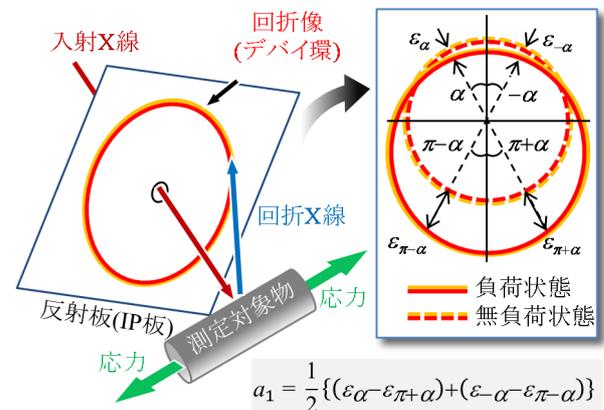


図-2 主鉄筋の発生応力度分布のイメージ

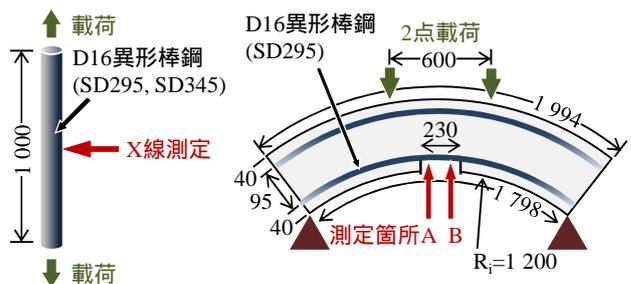


図-3 測定実験のケース

キーワード 維持管理, 非破壊検査法, X 線応力度測定法, 応力度測定

連絡先 〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3 東京電力ホールディングス TEL090-6720-3449(直)

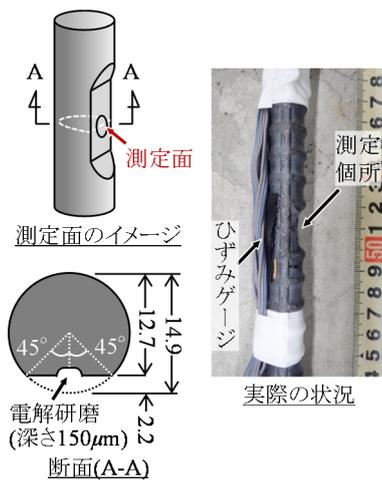


図-4 測定面の加工状況

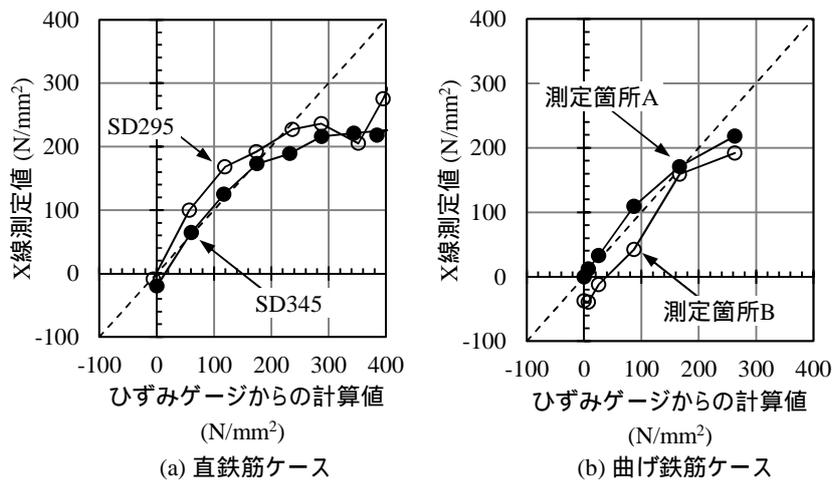


図-5 測定結果

方向の深さまでベルトサンダにより切削加工した。つぎに、尾崎ら²⁾の研究成果を参考に、ベルトサンダによる加工付加応力の影響を排除するため、電解研磨により径 5mm、深さ 150 μm の測定面を成形した。

3. 実験結果および考察

まず、図-5(a)に直鉄筋ケースでの結果を示す。ここで、ひずみゲージの値による計算値は、図-4 に示す断面欠損に伴う偏心量を考慮して計算している。図-5(a)に示すとおり、200N/mm² 程度までの弾性域の範囲で、SD345 の場合は X 線応力度測定の結果がひずみゲージの値による計算値とほぼ一致していた。一方、SD295 の場合、最大で約 50N/mm² 程度、測定結果が計算値を上回る傾向を示した。この理由は、ベルトサンダによる切削加工が SD295 の場合には数 μm 予定よりも大きくなり、荷重点の偏心がより大きくなったことが考えられる。したがって、X 線応力度測定による結果は正しい値を示していると考えられる。以上より、少なくとも 200N/mm² 程度までの弾性域の範囲で、X 線による応力度測定は精度が高いと考えられる。

つぎに、図-5(b)に曲げ鉄筋ケースでの測定結果を示す。まず、原点(0N/mm²)の位置では、測定箇所 A の測定結果がほぼ 0N/mm² であるのに対し、測定箇所 B の測定結果は約 40N/mm² 低かった。ただし、0N/mm² ~ 200N/mm² 程度までの弾性域の範囲で、どちらの測定結果もグラフの傾きがほぼ 1 となっている。したがって、原点で約 40N/mm² のバラツキが生じた理由は、鉄筋を曲げ加工する際の残留応力によるものと考えられる。

4. おわりに

載荷状態にある鉄筋について、X 線応力度測定法による応力度を測定することで、以下の結論を得た。

- 直鉄筋では、200N/mm² 程度までの弾性域の範囲で、ひずみゲージの値による計算値とよく整合する。
- 曲げ加工鉄筋では、曲げ加工時の残留応力により、測定結果のバラツキが大きい。しかし、グラフの傾きのみに着目すると、直鉄筋とほぼ同等の測定結果が得られ、測定精度は高いと考えられる。

今後は、200 N/mm² 程度を超えた範囲で X 線応力度測定結果と計算値が異なる原因の解明や補正方法、また曲げ加工鉄筋の残留応力分を補正する方法について検討する予定である。

謝 辞 本研究の実験の実施および結果の考察にあたり、金沢大学、佐々木敏彦教授に多大なご指導をいただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献 1) 岡滋晃,高梨晋成,吉本正浩:鉄筋切断法を用いたひび割れ直下の異形鉄筋の応力度推定と降伏履歴判定,電力土木,Vol.398,pp.120-123,2018. 2) 尾崎潤,野末秀和,阿南健一,小椋明仁,吉本正浩:RC セグメントの鉄筋応力計測への X 線回折法の適用に関する要素試験,トンネル工学報告集,Vol.27,II-8,2017. 3) 平修二,田中啓介,山崎利春:細束 X 線応力測定の一方法とその疲労き裂伝ば問題への応用,材料,27(294),pp.251,1978. 4) 佐々木敏彦,広瀬幸雄:2 次元 X 線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射 X 線応力測定,材料,44(504),pp.1138,1995. 5) 佐々木敏彦,広瀬幸雄:イメージングプレートによる二次元検出回折像を用いた X 線三軸応力解析,日本機械学会論文集,A 編 61(590),pp.2288,1995.