

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

尾崎 潤¹・野末 秀和²・阿南 健一³・小椋 明仁⁴・吉本 正浩⁵

¹正会員 東京電力パワーグリッド株式会社 工務部（〒100-8560 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号）
E-mail:ozaki.jun@tepcoco.jp

²パルステック工業株式会社 技術部（〒431-1304 静岡県浜松市北区細江町中川7000-35）
E-mail:hide-nozue@pulsotec.co.jp

³正会員 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部（〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 9F）
E-mail:jana@tepsco.co.jp

⁴東京電力パワーグリッド株式会社 工務部（〒100-8560 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号）
E-mail:ogura.akihito@tepcoco.jp

⁵正会員 東京電力パワーグリッド株式会社 工務部（〒100-8560 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号）
E-mail:yoshimoto.m@tepcoco.jp

従来RC構造物の鉄筋の応力度を測定する手法として，部材のはつりや鉄筋切断を伴う応力解放法が用いられてきた．一方，非破壊で応力度測定が可能な手法として機械分野などで活用されているX線回折法が挙げられ，近年の測定機器の小型化で電力洞道の様な狭隘な環境への搬入も可能となっている．

しかし，実用的な精度で測定が行えるかが明確でなく，鉄筋の曲げ加工による残留ひずみの影響も明らかでないため鉄筋への適用事例はない．

本報告では，X線回折法によるRC構造物の鉄筋の応力度測定の現場適用を目指し，基礎的な検討として，鉄筋引張試験の過程でX線回折法による応力度測定を行い，その結果として鉄筋の応力度を精度良く測定できることが示された．また，測定により得られる半価幅を用いると過去の降伏履歴を推定できる可能性が示された．

Key Words : X-ray stress measurement, reinforcing bar, residual stress, residual strain, cosa method

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見られるようになっている¹⁾．

既設構造物を効果的に補強するためには，現状の応力状態を精度良く評価することが重要となる．応力状態の測定方法として，鉄筋にひずみゲージを貼り付けてから切断し，ひずみの変動量を計測する応力解放法（鉄筋切断法）が挙げられる．しかし，応力解放法は鉄筋を切断するため鉄筋の発生応力度が大きい場合，既設構造物の健全性に影響を与えることになり，適用に制約を受ける．

これに対して，近年，鋼材の応力測定方法として機械分野などで適用が広がっているX線を用いた応力測定方法の適用が考えられた．しかし，X線を用いた応力測定方法は，鋼板などがおもな対象であり，セグメント等の

土木構造物に使用されている鉄筋への適用性や精度が不明であった．このため，X線による応力測定方法をセグメントの鉄筋に適用することを目的として，室内の要素試験を行った．

2. X線回折による応力度測定の原理

X線回折による応力度の算出は，Braggの法則を基本にして導かれる²⁾．規則正しく原子が並んだ回折格子面を想定し，この格子面間の間隔 d とする．ここに，波長 λ のX線が回折角 θ で入射したとき，格子面間隔 d ，波長 λ ，回折角 θ ，回折次数 n の関係はBraggの法則により式(1)の様に表せる．

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

従来はX線を用いた応力測定法としては $\sin^2\psi$ 法が

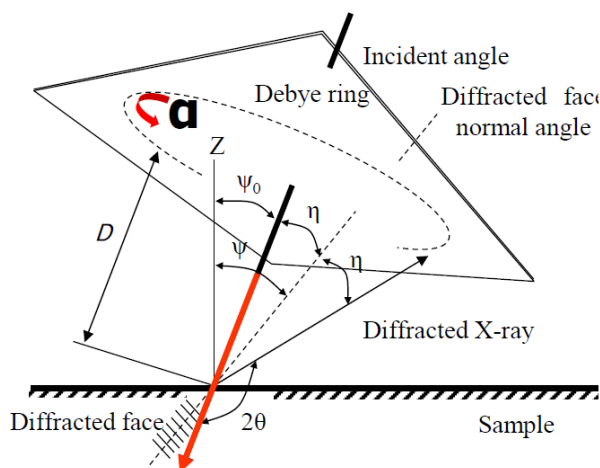


図-1 cos α法の概念図

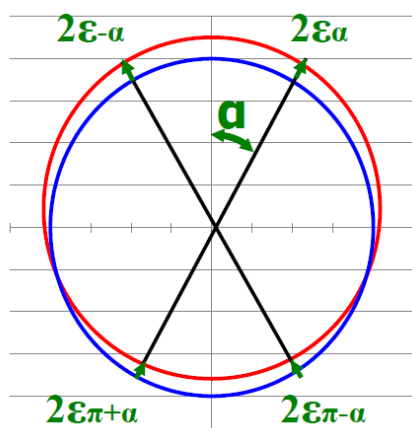


図-2 デバイ環の変化

一般的であった²⁾。しかし、 $\sin^2 \psi$ 法を用いた計測装置はやや大きいことから屋外設備の測定には適していなかった。一方で、佐々木ら³⁾によってcosα法と呼ばれる手法を用いた携帯型計測装置が開発され、屋外設備への適用が可能となっており本検討ではこの手法を用いた。

図-1にcosα法の概念図を示す。ηはBragg角の補角、 ψ_0 は試料面法線と入射X線ビームのなす角、Dは測定試料から2次元検出器までの距離である。

多結晶材料に対して、X線を照射すると照射領域内にはBraggの法則を満たす異なる方向性を有する結晶が複数存在している。これらの結晶からの回折線は、円錐状に生じる。この回折線による円錐を入射X線に垂直な面で切るとその断面は円環となる。この円環はデバイ・シェラー環（以下、デバイ環とする）と呼ばれる。

材料に、ある応力が作用すると、その大きさに応じて回折角度が変わり、デバイ環の位置が変化する。図-2はその様子を示したものであり、応力が発生した際に、デバイ環が矢印の方向に移動することを示している。ここで ε_α はデバイ環の角度αの位置におけるひずみを示している。cosα法はこのデバイ環全周の位置変化の情報を処理することで応力を算出する。X線回折により応力を算

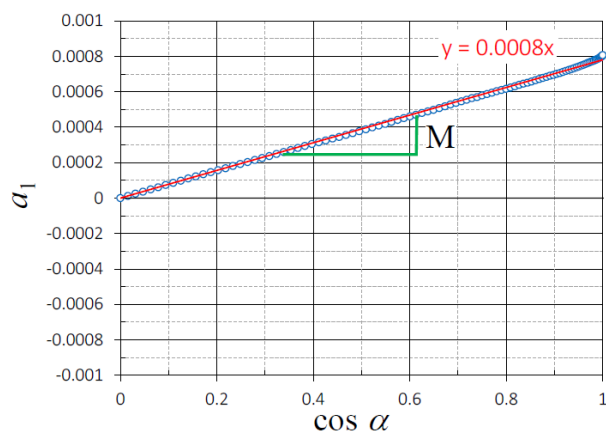


図-3 cosαとa₁の関係図

出する基本式は、式(2)で表される。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{\sin 2\eta} \cdot \frac{1}{\sin 2\psi_0} \cdot M \quad (2)$$

ここで、Eは縦弾性係数、νはポアソン比である。

また、Mは図-3に示すようなcosαとa₁の関係を線形近似した傾きであり、a₁は式(3)で定義される。

$$a_1 = \frac{1}{2} \{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})\} \quad (0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

3. 検討内容

cosα法によるシールドセグメントの鉄筋応力度測定の適用性を判断するために、以下の5項目について検討を行った。

(1) 鉄筋の応力度を測定した際の精度

X線回折による応力度の測定は、鋼板や溶接部などでは十分な実績があるが、鉄筋について検証が行われた例は見られない。したがって、本検討では土木構造物で用いられる鉄筋に対して十分な精度の測定が可能か検討を行うものとした。

(2) 揺動の有無による測定精度の違い

上述したとおり、cosα法による応力度の算出は、単一入射X線に対して円錐状に発生した回折X線（デバイ環）を用いて行われる。

今回用いた測定装置では、デバイ環360度を500分割して回折X線の情報を読み取って応力度を算出しているが、X線の照射域内に十分な結晶数がない場合、デバイ環から十分な情報が得られないことがある。

このような場合に、回折X線の情報を増やす手法として、揺動法が用いられる。

揺動法とは、X線を照射する装置を照射点を中心に、ある角度で揺動させながらX線の照射およびデバイ環の測定を行うことで回折X線の情報を増やし、測定精度を

表-1 鉄筋供試体の種類

鉄筋種類	鉄筋径
SR235	φ 13
SD295	D13

向上させる方法である。本検討で用いた装置では、装置を±5度で揺動させながら測定することができる。

したがって、揺動法を用いるケースと用いないケースの両方で応力度の測定を行い、その精度に差があるか検証を行うものとした。

(3) 鉄筋の残留ひずみの影響の有無およびその程度

シールドセグメントの多くは円弧形状であり、用いられる鉄筋には曲げ加工が施されている。鉄筋の曲げ加工は一般的には冷間加工により行われており、この加工による応力が残留していることが懸念される。本検討では、このような残留応力がX線回折法による応力測定値に対して影響があるのか検証するものとした。

(4) 降伏応力度を超過した場合の傾向把握

X線回折法を用いた応力度測定は、基礎理論が弾性力学に基づいて構築されていることもあり、材料の弾性範囲内の測定に用いられることがほとんどであった。

一方で、本稿が対象とするシールドトンネルの補強検討に適用する場合では、鉄筋応力度が降伏応力度前後の値となっていることを想定する。

このような場合に、X線回折法による応力度測定を適用した際にどのような傾向が見られるか確認を行うものとした。

(5) 半価幅と降伏の関係

$\cos\alpha$ 法による応力度算出の過程で、半価幅という物理量が算出される。半価幅とは、回折プロファイルのピーク値に対して、半分の値になる幅を示している²⁾。既往の研究では、材料の降伏後に半価幅が上昇するという結果がある。したがって、この半価幅の値を指標にして既設シールドセグメントの鉄筋降伏状態を判断できれば、補強要否の判断を行う際に有益であると考えられる。

本検討では、半価幅と鉄筋の降伏の関係についても調べるものとした。

4. 鉄筋引張試験

(1) 試験概要

本検討では、鉄筋に対する引張試験を行い、載荷荷重から算出される鉄筋応力度とX線回折により算出される鉄筋応力度を比較した。試験の諸元などを以下に示す。

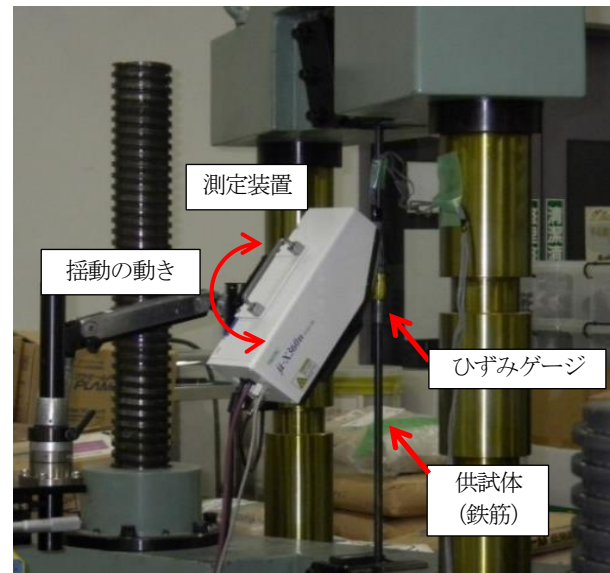


図-4 X線による鉄筋応力の測定状況

a) 試験供試体

試験に用いた鉄筋は、既設シールド用RCセグメントを参考に表-1に示す2ケースとし、各ケースについて、3本の供試体の試験を行った。

供試体の長さは、載荷試験装置への設置を考慮して1,000mmとした。

b) 測定装置

本検討で用いた測定装置と測定の仕様を以下に示す。

- ・測定装置 μ -X360 (パルステック工業 (株) 製)
- ・計測方法 $\cos\alpha$ 法

c) 測定項目

測定項目は以下の通りである。なお、鉄筋ひずみは供試体にひずみゲージを添付し、試験時にデータロガーにより連続して記録した。測定時の状況を図-4に示す。

- ・鉄筋応力 (X線回折による測定結果)
- ・半価幅
- ・載荷荷重
- ・鉄筋ひずみ

(2) 測定手順

今回行った引張試験では鉄筋の曲げ加工の影響を確認するために、残留ひずみを発生した状態での測定も行うものとし、各供試体に対してつぎの2回の載荷を行った。

載荷1回目は初期状態から、鉄筋の応力を適宜測定し、鉄筋が降伏した後、7,000 μ 程度のひずみが生じた段階で除荷する。

載荷2回目は残留ひずみが生じた状態で再度荷重を加え、降伏後に鉄筋が破断するまで載荷する。

なお本検討では、載荷1回目の除荷後にひずみが残留していることをひずみゲージの測定値で確認した。載荷

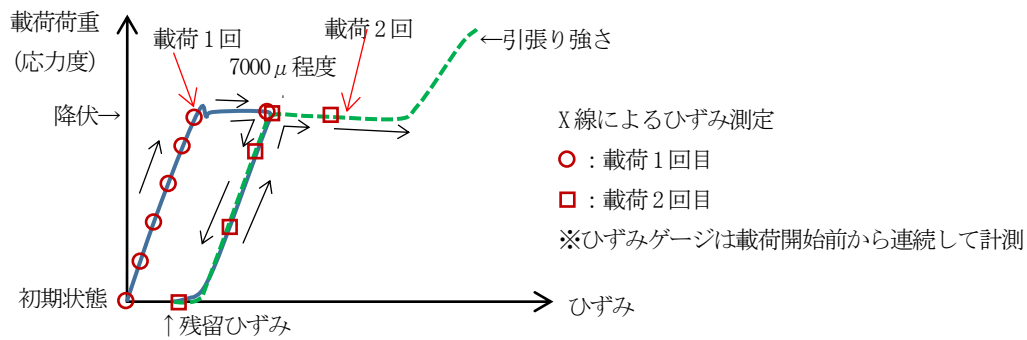
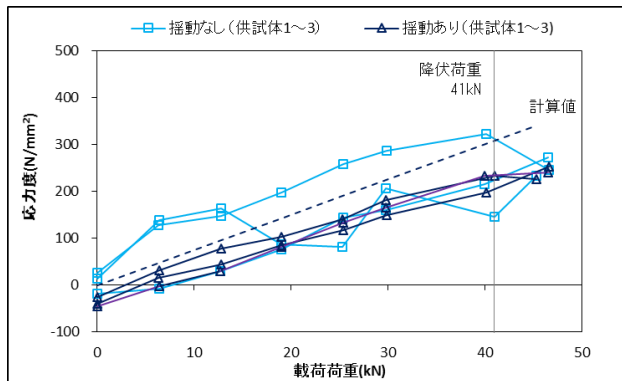
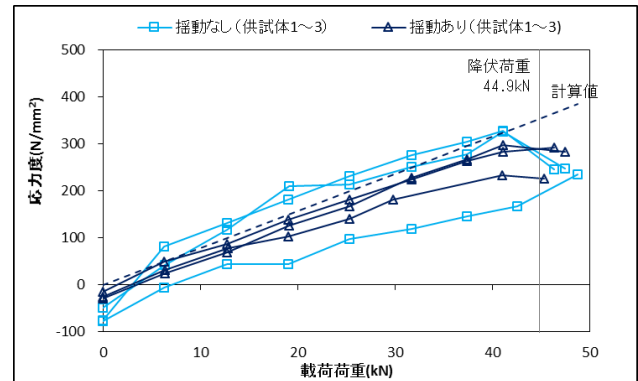


図-5 試験の荷重手順

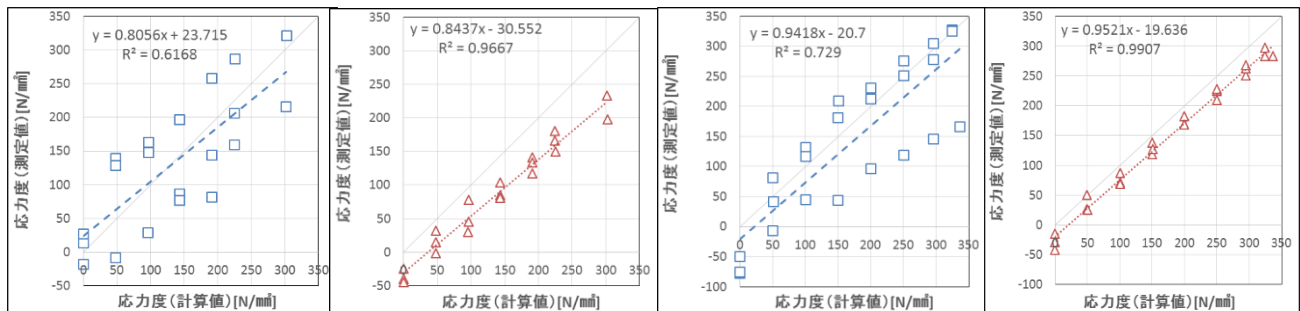


a) SR235



b) SD295

図-6 荷重1回目の結果



a) SR235 揺動なし

b) SR235 揺動あり

c) SD295 揺動なし

d) SD295 揺動あり

図-7 計算値と測定値の相関

を行う手順を図-5に示す。

(3) 試験結果

a) 測定精度および揺動の有無による結果の相違

荷重1回目のX線回折による鉄筋応力測定結果を図-6に示す。

横軸が荷重荷重、縦軸がX線回折により測定された鉄筋応力の値であり、プラス方向が引張りである。また、グラフ中の降伏荷重は、鉄筋ひずみと荷重の関係から鉄筋が降伏したと判断される荷重値を示している。

破線で示した計算値は、荷重荷重値を鉄筋の有効断面積で除した値であり、X線回折法による測定の精度を比較するために記載した。この計算値とX線回折法による測定値の相関関係を図-7に示す。

揺動法を用いない場合は供試体によって測定値の傾向が異なり、計算値より高い傾向、計算値より低い傾向、

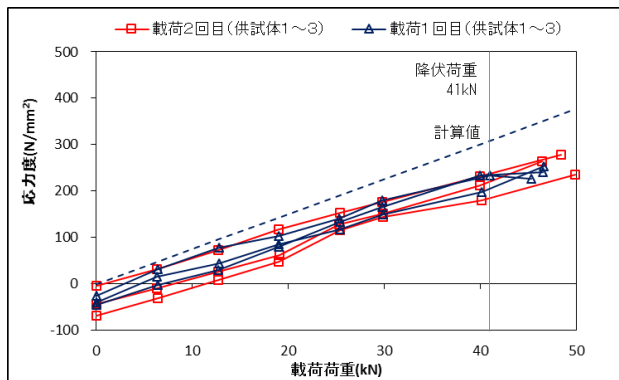
表-2 測定条件別の相関係数

	揺動なし	揺動あり
SR235	0.79	0.98
SD295	0.85	0.99

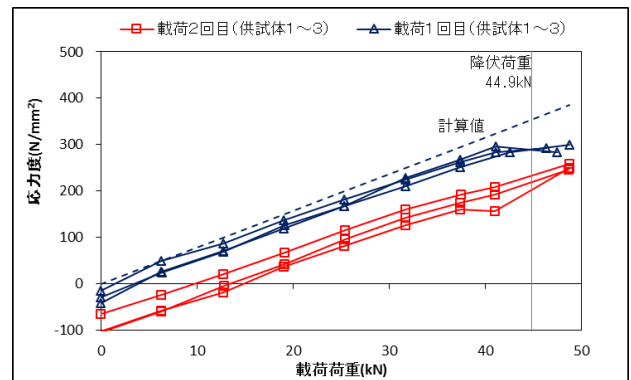
計算値に対して値が振れる傾向と三様の傾向が見られ、とくにSR235では顕著であった。一方、揺動法を用いた場合の結果は、供試体による傾向の差はなく計算値よりも小さい傾向のみが見られた。

また、表-2に示す各条件における相関係数を比較すると揺動ありの方が計算値と強い相関係数にあることがわかる。

なお図-7に示す最小二乗法による単回帰直線の傾きを示す回帰係数の値はいずれも1.0以下であり、とくにSR235では揺動ありの場合でも0.85程度と緩やかな勾配となっている。このような傾向を示す理由としてX線の弾性定数の設定値が考えられる。



a) SR235



b) SD295

図-8 載荷1回目と2回目の比較

表-3 載荷2回目開始前の鉄筋ひずみの平均値 $[\mu]$

	供試体1	供試体2	供試体3
SR235	1767	1798	1475
SD295	2654	3080	5014

X線の弾性定数とは式(2)における $E/(1+\nu)$ の値であり、今回の測定ではフェライト系鉄鋼材料の一般値³⁾である175GPaを用いた。しかし、本来は材料の組成が異なればX線の弾性定数も異なると考えられる。

鉄筋に用いられる鋼材も種類や製造メーカーにより組成が異なると考えられることから、このような分類に応じたX線の弾性定数を適切に定めることで、更に精度を向上できる可能性がある。

本項についてまとめるとX線回折法を鉄筋に適用すると揺動法を用いた方が測定精度が高く、X線の弾性定数を適切に設定することでさらに精度を向上させることが可能と考えられる。

実構造物に対してかぶりコンクリートをはつり、鉄筋を露出させることを考えた場合、揺動法を用いると装置が揺動する分だけ範囲は広がるが、測定の精度および安定性を踏まえると揺動法を用いるのが望ましいと考えられる。

本稿ではこの結果を踏まえ、これ以降の結果は揺動法を用いた測定結果のみを示す。

b) 残留ひずみの影響

載荷1回目および2回目の測定結果を図-8に示す。また、載荷2回目を行う前の残留ひずみを表-3に示す。

載荷1回目と2回目の結果を比較すると、グラフの勾配には大きな違いは見られない。一方で載荷2回目では荷重をかけていない状態で50N/mm²以上の圧縮応力度が測定されており、この値を初期値にして応力度が増加する傾向が見られる。

この無載荷状態での圧縮応力は、鉄筋を引張る際に鉄筋の表面と内部で生じた応力勾配が荷重除荷後も残留したものと考えられる。

一般的には鉄筋の応力状態の評価を行う際は、荷重を鉄筋の有効断面積で除した平均的な応力度が用いられるが、X線回折法により測定される応力度はこの様な平均的な応力度とは異なり鉄筋表面の局所的な応力度である。このため今回の試験では、降伏後および荷重除荷後の応力再配分の影響で鉄筋表面に生じた圧縮力が測定されたと考えられる。

また、SD295の結果はSR235の結果に比べて載荷1回目と2回目の傾向の相違が明確であるがこの原因も応力再配分の影響と考えられ、異形鉄筋であるSD295は節やリブ以外の部分により高い応力が発生することから荷重除荷後の応力再配分の影響をより強く受けていると推察される。

なお、載荷1回目の結果についても載荷前には圧縮側の応力度が測定されている。これは製造時の加工により鉄筋表面に圧縮力が発生しているためと考えられる。

X線回折法の現場適用に向けてはこの様な形状の影響や加工の影響も踏まえて適切な評価が行えるよう、さらに詳細な検討が必要である。

c) 鉄筋降伏後の挙動

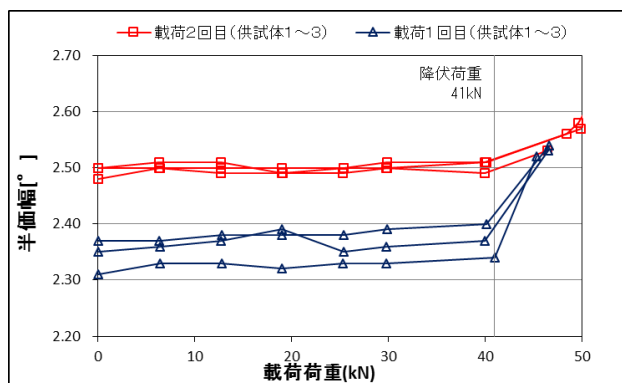
鉄筋降伏後の挙動は降伏前から大きく変化せず荷重の増加に比例して応力度の測定値も増加するケースが多いが、載荷1回目では荷重増加に伴う応力度の測定値の増加が鈍化あるいは減少するケースも見られる。

また、計算値との差は100N/mm²以上となるケースも見られる。

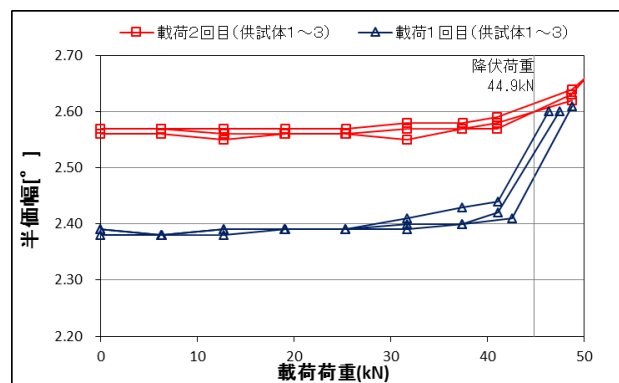
今回の試験では、鉄筋降伏後は載荷荷重を増加させなくてもひずみが増加し載荷荷重が安定しないことから、載荷荷重を一定に保たせる様に調整しながら測定を行なった。試験で用いた測定装置では測定に1分程度の時間を要することから測定中も鉄筋ひずみは変動しており、十分な精度があるとは言い難いため、今後は測定条件を改善して詳細な検討が必要である。

d) 半価幅と降伏の関係

各ケースにおける載荷荷重と半価幅の関係を図-9に示



a) SR235



b) SD295

図-9 载荷1回目, 2回目の半価幅の比較

す。半価幅の値は、鉄筋降伏後に約0.2度上昇していることがわかる。

SR235の場合、降伏前の半価幅は2.3度～2.4度の範囲にあり、降伏後は2.5度～2.6度の範囲となる。SD295の場合、降伏前の半価幅は2.4程度であり、降伏後は2.5度～2.6度の範囲となる。また、载荷2回目の結果を参照すると、除荷により半価幅が低下しないことがわかる。

この結果を踏まえると半価幅を測定することにより鉄筋が降伏しているか、あるいは過去に降伏した履歴があるかを推定できる可能性がある。ただし、今回の試験では、鉄筋降伏後に半価幅が相対的に上昇することが示されたのみに留まる。実用に向けてはさらに試験ケースを増やし、その傾向を分析する必要があると言える。

5. まとめ

本報告は、引張り試験を行った鉄筋に対して、 $\cos\alpha$ 法を用いたX線回折による応力度測定を行いその傾向について検討を行ったものである。

その結果、以下の点が明らかになった。

a) 鉄筋の応力度を測定した際の精度

鉄筋に対して $\cos\alpha$ 法による計測を行なった結果、測定値は载荷荷重から計算される応力度との相関が強く、特に揺動法をもちいた場合は0.98以上の相関係数が得られた。

b) 揺動の有無による測定精度の違い

揺動法を用いるケースと用いないケースで結果を比較したところ、揺動法を用いた方が安定した測定結果が得られることがわかった。

c) 鉄筋の残留ひずみの影響の有無およびその程度

本報告では、残留ひずみが測定値に及ぼす影響を確認するために、降伏後に残留ひずみを発生させ除荷した後に再度载荷を行なった。その結果、载荷前の初期値が低下し、荷重载荷に伴い計算値と同等の勾配で応力度が増

加する傾向が見られた。

d) 降伏応力度を超過した場合の傾向把握

降伏以降の応力度についての測定では、载荷荷重が安定せず十分な精度は得られなかったが、降伏後も荷重の増加に伴い応力度の測定値が増加する傾向が見られた。

e) 半価幅と降伏の関係

応力度測定に関連して半価幅の測定も行なったところ、降伏後は値が上昇し、除荷した後も上昇した値は保たれることが確認された。

以上の結果、 $\cos\alpha$ 法を用いた鉄筋の応力測定は実用性が高いと考えられる。

今後は現場での適用に向けてさらに試験ケースを増やし、曲げ加工の影響や降伏後の応力度の評価を行う予定である。

謝辞：本稿の執筆にあたり金沢大学大学教授佐々木敏彦先生にご指導、ご助言をいただきましたことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡滋晃,阿南健一,実広拓史,吉本正浩：シールドトンネルの鉄筋残存量の評価と補強設計に関する研究,土木学会論文集 F1 (トンネル工学),Vol.72,No.3,P.108-112,2016
- 2) 日本材料学会, X線応力測定法,養賢堂,1966
- 3) 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, Vol.44, No.504, Sep.1995
- 4) 日本材料学会, X線応力測定法標準 (2002年度版) -鉄鋼編-,2002
- 5) 丸山洋一, 宮崎利行, 佐々木敏彦：イメージングプレートを用い $\cos\alpha$ 法に適した X線応力測定装置の開発と検証, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.64, No.7, July 2015.
- 6) 田中啓介, 秋庭義明, 鈴木賢治：残留応力の X線評価-基礎と応用-,養賢堂,2006.
- 7) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, 菖蒲敬久：放射光による応力とひずみの評価,養賢堂,2009.
- 8) Koichi Maekawa et al.:Mechanism of Long-Term Excessive

ELEMENT TEST FOR STRESS MEASUREMENT OF REINFORCING BAR IN SEGMENT BY USING X-RAY STRESS MEASUREMENT

Jun OZAKI, Hidekazu NOZUE, Kenichi ANAN,
Akihito OGURA and Masahiro YOSHIMOTO

X-ray stress measurement is a non-destructive measure of stress, and recent miniaturization of measuring instruments makes it possible to carry in to a narrow environment like tunnel for electric power cable.

In this report, stress measurements by X-ray stress measurement were carried out during reinforcing steel tension test for the purpose of on-site application to RC structures. As a result, it was found that the stress of the reinforcing bars can be measured with high accuracy by X-ray stress measurement. In addition, the possibility of estimating the past yield history using the full-width at half maximum (FWHM) was shown.