

論文 X線回折法による鉄筋の残留応力推定手法の開発

小田切 勝也*1・田中 樹由*2・野末 秀和*3・岩波 光保*4

要旨：本研究では、構造物の応力推定手法としてX線回折法に着目し、コンクリート構造物に用いられている鉄筋への適用性に関して検討を行った。一連の応力測定試験の結果から、異形鉄筋での応力測定位置としては節間が適切であることがわかった。また、酸化皮膜に覆われている鉄筋に対して精度よく測定を行うためには、酸化皮膜を除去し、さらに電解研磨を行う表面処理が効果的であることがわかった。そして、これらの方法で測定を行えば、おおよそ±30MPa程度の誤差範囲で応力を推定できることがわかった。

キーワード：コンクリート構造物, 鉄筋, 残留応力, X線回折法, 維持管理

1. はじめに

インフラの維持管理において、構造物の状態を正確に把握することはとても重要なことである。現状では、構造物の状態は外観の目視点検などにより定性的に判断されているが、もし構造物に発生している応力を適切に推定することができれば、災害時の健全度判定や鉄筋の部分腐食による応力の評価、遊間異常による鋼桁の変形の評価、偏心した構造物の評価（照明柱などの管理）など目視では明確に判断できないところでの評価や判定が可能となり、より効果的な対策を実施することができるようになる。したがって、構造物に発生した応力を測定することはインフラを維持管理していくうえで非常に重要であると考えられる。そこで本研究では、X線回折法の鉄筋の残留応力推定手法に対する適用可能性を検討することを目的とする。

破壊的手法には、切断法や穿孔法などがある。これらは、測定対象物にひずみゲージを貼った上で応力を開放することによって、開放ひずみを直接測定し残留応力を推定する方法である。この方法は、原理が感覚的にわかりやすいものであるが、方法によっては結果的に測定対象物が完全に破壊してしまうことになる場合や、加工による応力を発生させてしまう恐れがある。

一方、非破壊的手法には、光弾性法や音弾性法、磁歪法、X線回折法などがある。これらは、応力の変化によって生ずる測定対象物固有の性質の変化を測定することによって、残留応力を推定するものである。しかし、光弾性法は無色の材料にしか適用できず、音弾性法や磁歪法は技術的に未発達である¹⁾。一方、X線回折法はすでに測定技術がほぼ確立されており、自動車部品などの他分野ではすでに適用されてきている。コンクリート構造物中の鉄筋に対してX線回折法を適用する場合には、コンクリートのはつり作業は伴うが、測定対象の鉄筋に対しては、非破壊的に応力を推定することが可能であり、測定後の補修作業も軽微となると考えられる。そこで本研究では、このX線回折法に着目した。

2. 残留応力推定手法

2.1 破壊的手法と非破壊的手法

一口に残留応力推定手法といっても、図-1に示すように、様々な方法があり、それらは、大きく破壊的手法と非破壊的手法に分けられる。

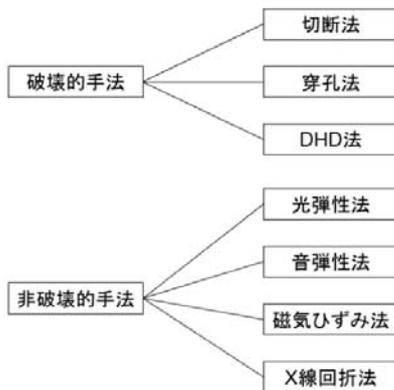


図-1 様々な残留応力推定手法

2.2 X線回折法の原理

一般に、金属材料は無数の結晶粒の集合体であり、格子面間隔は金属原子固有のものである。そこに、応力が加われば、図-2に示すように、その応力に応じて格子面間隔が変化する。X線を入射させると、散乱する際に、Braggの法則を満たすようにX線がリング状に回折してくる。これをデバイリングと言ひ、無応力試料におけるデバイリングを基準とし、測定試料のデバイリングとの差を求めることで格子面間隔の変化を測定し、発生している応力を推定する方法がこのX線回折法である²⁾³⁾。

X線回折法は、同じ放射線の一種である中性子線に比

*1 東京工業大学 工学部 土木・環境工学科 (学生会員)

*2 (株)オリエンタルコンサルタンツ 保全防災事業部門 道路保全部

*3 パルステック工業 (株) 技術部

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 (正会員)

べて侵入深さが浅いため、測定対象物のごく表面の応力測定となる。一方、計測装置は小型で持ち運びも可能であり、計測時間も短いことから、コンクリート構造物への適用可能性は十分にあると考えられる。

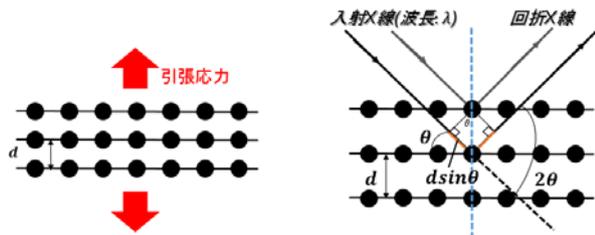


図-2 X線回折法の原理

3. 実験目的と概要

3.1 実験目的

X線回折法は、測定技術自体はすでに確立されており⁴⁾、自動車部品などの多くの分野ですでに適用されている。しかし、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋などに対して適用された事例はほとんどなく、また鉄筋には、表面が酸化皮膜で覆われていることや、リブや節などといった特有の形状があることなどの特殊な条件がある。そこで、X線回折法でコンクリート構造物中の鉄筋の残留応力を推定するための手法について検討を行った。

3.2 実験概要

図-3に実験概要を示す。載荷試験機を用いて長さ780mmの鉄筋に所定の引張応力を加え、その鉄筋にX線測定装置を用いてX線回折法により推定した「測定応力」と、実際に載荷試験機によって加えた「公称応力」とを比較することで推定値の精度などを分析した。



図-3 実験概要

この装置は、X線を用いた残留応力推定手法のひとつである $\cos \alpha$ 法を採用した装置である。従来のX線を用いた残留応力推定手法である $\sin^2 \psi$ 法はデバイリングの一部の範囲しか利用しておらず、角度を変え複数回X線を照射する必要があった。しかし、 $\cos \alpha$ 法はデバイリング全体を利用するため、X線の単一入射のみで応力を測定でき、装置の小型化や測定時間の短縮が可能となっている³⁾。そのため、この装置では1か所あたりおよそ90秒程度で測定を行うことができ、装置自体の小型化および

軽量化が図られ、持ち運びが可能である。また、この装置は低出力(30KV・1mA)のX線を使用しており、2m離れば自然界とほぼ同等の線量となり、安全に作業することが可能となっている。

4. 実験結果

4.1 入射角揺動法

X線回折法による応力推定には、推定値の精度を向上させる方法として、入射角揺動法という方法がある。入射角揺動法とは、X線の入射角以外の光学的条件を一定に保ちつつ、露光中に入射角 ψ_0 を揺動させることで、回折に寄与する結晶粒の数を増加させ、推定値の精度を向上させる方法である²⁾。この方法によって測定した場合には、単にX線を照射させた場合よりも推定値の精度が向上し、より小さな誤差範囲で応力を推定できることが期待される。鉄筋のような結晶粒が比較的粗大な材料では、単にX線を入射させただけでは推定値の精度が著しく劣る可能性があるため、入射角揺動法の必要性を検討した。

図-4にSD345 D16の鉄筋で入射角を揺動させた場合と揺動させなかった場合の測定値の比較を示す。なお、図中の赤線は測定応力が公称応力に等しい場合を示した直線であり、青点線は誤差範囲を示した点線である。揺動させた場合の誤差範囲は $\pm 30\text{MPa}$ 程度であるが、揺動させなかった場合の誤差範囲は $\pm 90\text{MPa}$ 程度となった。したがって、入射角揺動法によって測定の精度は格段に向上することがわかった。鉄筋の応力測定においては入射角揺動法を用いて応力を測定することが望ましいと考えられる。そこで、これ以降はすべて揺動ありとした。

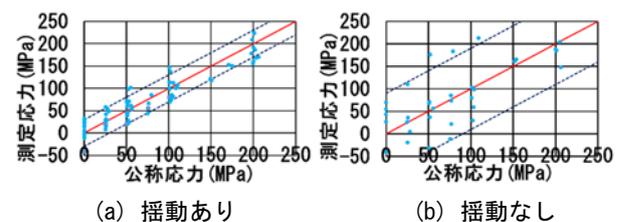


図-4 入射角揺動法の比較

4.2 測定位置

異形鉄筋には図-5に示すように、節やリブなどといった特徴的な形状があり、鉄筋の応力を推定する際、どこで測定するのがふさわしいのかを調査するため、

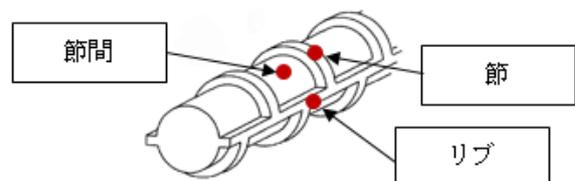


図-5 測定位置

SD345 D16 の異形鉄筋を用いて、節・リブ・節間のそれぞれの中心1点で測定した。また、節やリブがない場合の比較として、SR235 D16 の丸鋼でも測定を行った。また、測定する節間を変えた場合や節間内で測定位置を円周方向に変化させた場合についても検討した。

図-6 に丸鋼における X 線回折法による応力推定結果を示す。なお、図中の赤線は測定応力が公称応力に等しい場合を示した直線である。丸鋼で測定した場合、公称応力が増えていくにしたがって測定応力も線形的に増えていく傾向が見られた。

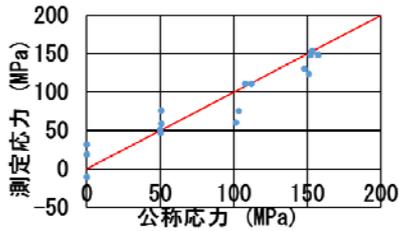


図-6 丸鋼の場合の結果

図-7 に示すように、異形鉄筋の節で測定した場合には、公称応力が増えていっても測定応力が増えていくというような有意な傾向は見られなかった。同様にリブで測定した場合にも、有意な傾向は見られなかった。

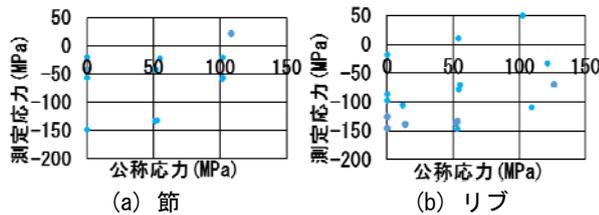


図-7 節とリブでの測定結果

一方、図-8 に示すように、節間で測定した場合、公称応力が増えていくにしたがって測定応力も線形的に増えていく傾向が丸鋼と同様に見られた。

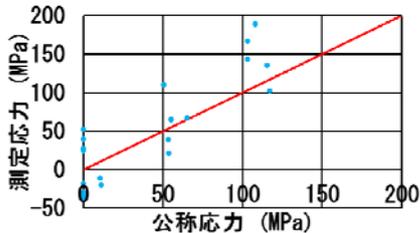


図-8 節間での測定結果

したがって、節やリブなどがある異形鉄筋の応力の測定位置としては、節間がふさわしいと考えられる。

図-9 に測定する節間を変えた供試体を示す。図-10 に示すように、測定する節間を変えた場合、節間の違いによる有意な差は見られなかった。

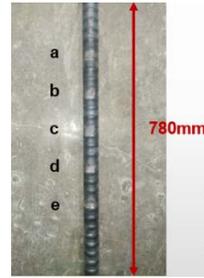


図-9 測定する節間を変えた供試体

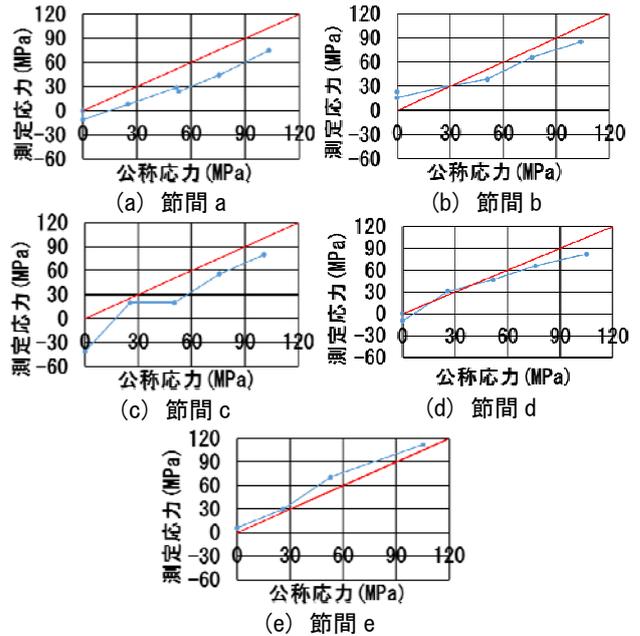


図-10 測定する節間を変えた場合の結果

図-11 に示すように、節間内で測定位置を円周方向に変化させた場合、図-12 に示すように、誤差範囲は±30MPa 以内であり、節間内の位置の違いに有意な差は見られなかった。

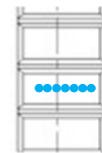


図-11 節間内で測定位置を円周方向に変化させた場合の測定概要

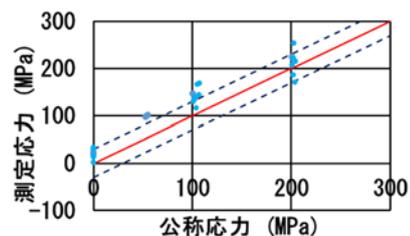


図-12 節間内で測定位置を円周方向に変化させた場合の結果

4.3 表面処理

一般に、図-13に示すように、鉄筋の表面は黒い酸化皮膜で覆われている。この状態のまま節間で測定した場合、図-14に示すように、測定応力と公称応力との間に非常に大きな乖離があったことから、酸化皮膜に覆われた状態のままでは応力の測定はできないものと考えられる。これは、X線が材料表面から数ミクロンしか侵入できず金属結晶の格子面間隔の変化を捉えることができなかつたためであると考えられる。したがって、応力を正しく測定するには、酸化皮膜を除去する必要がある。



図-13 黒い酸化皮膜で覆われた状態の供試体

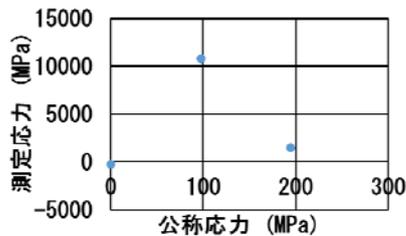


図-14 黒い酸化皮膜で覆われた状態での測定結果

図-15に示すように、グラインダーやサンドペーパーなどを使って物理的に酸化被膜を除去して応力を測定した。使用したサンドペーパーの番手は#240、グラインダーの砥石はA#120である。しかし、図-16に示すように、公称応力が増えていくにしたがって応力が増えていく傾向は見られたものの、公称応力よりも測定応力が一貫して250MPaから300MPaほど低くなった。これは、グラインダーやサンドペーパーを使って酸化皮膜を除去することによって、金属結晶の格子面間隔の変化自体は捉えることができたものの、材料表面にグラインダーなどによる切削加工における機械的エネルギーによって、結晶粒の変形が生じている加工硬化層が形成された影響であると考えられる。したがって、この加工硬化層を除去する必要がある。



(a) グラインダー (b) サンドペーパー

図-15 酸化皮膜除去供試体

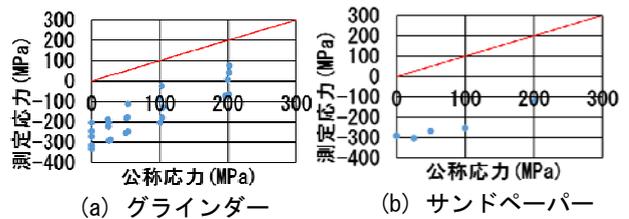


図-16 酸化皮膜を除去した場合の結果

加工硬化層を除去する方法として、電解研磨用電解液（鉄鋼・ステンレス用、中性）による電解研磨を採用した。なお、電解研磨する際に流す電流は1A、電解研磨する時間は3分とした。この電流1A-時間3分の組み合わせは、研磨速度や研磨量、研磨面の形状などを考慮して決定した。研磨量は電流と時間に比例し、ある研磨量において、電流を大きくすると研磨速度は速くなり時間を短縮できるが、研磨面の形状が綺麗に仕上がらない。一方、電流を小さくすると研磨速度が遅くなり時間がかかってしまう。したがって、研磨速度をなるべく早くかつ、測定に悪影響の出ない研磨面の形状となるよう、また加工硬化層を除去できる研磨量となるよう、電流1A-時間3分の組み合わせとした。

図-17に電解研磨後の供試体を示す。

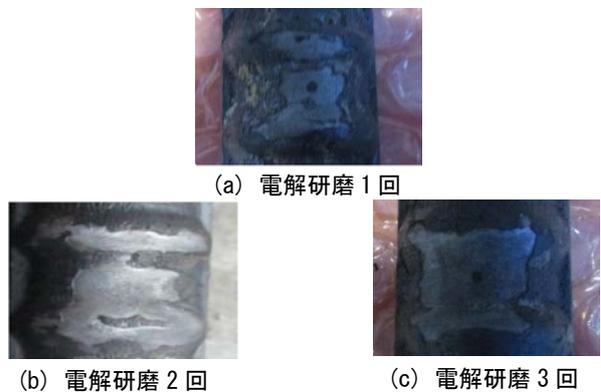


図-17 電解研磨供試体

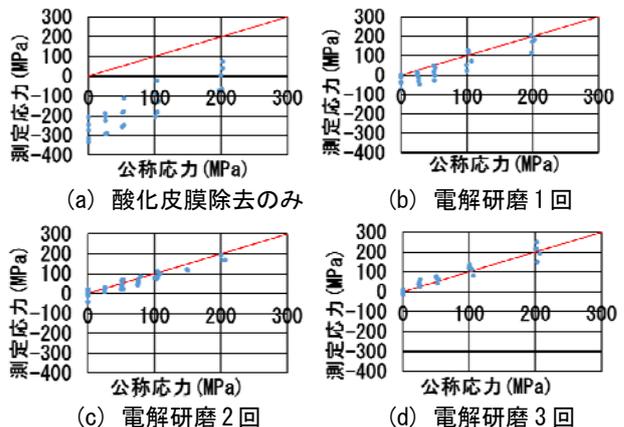


図-18 表面処理の比較

図-18 に示すように、電流 1A-時間 3 分の電解研磨を 1 回行うと、公称応力との差が 50MPa 程度となった。また、電解研磨を 2 回あるいは 3 回行っていくと、公称応力との差がほぼなくなったことから、加工硬化層は除去されたものと考えられる。

次に、電解研磨の回数について検討した。応力をかけていない SD345 D16 の節間 3 点のそれぞれ同じ位置で酸化皮膜除去および電流 1A-時間 3 分の電解研磨を行っていき、逐次応力を測定した。図-19 に示すように、3 回以上行った場合、測定応力は安定したことから、電解研磨の回数としては 2 回で十分であると考えられる。これは、電解研磨を 2 回行うことによって、研磨量がグラインダーなどによる切削加工により発生した加工硬化層の深さ⁵⁾に達し除去できたためである。

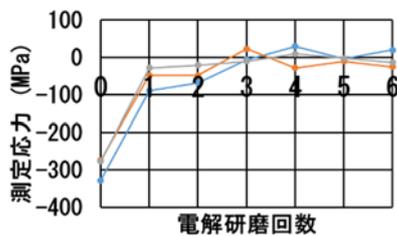
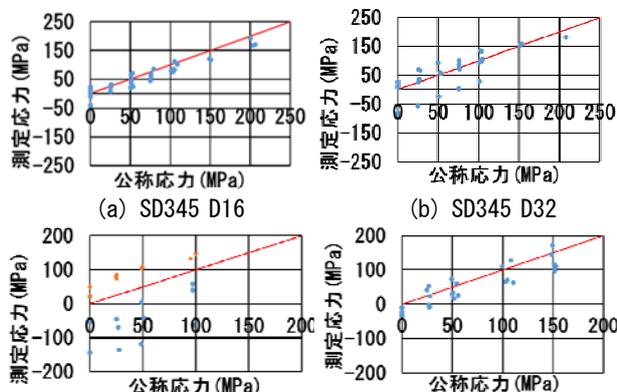


図-19 電解研磨回数(応力無負荷)

したがって、鉄筋の表面処理としては、グラインダーを使って酸化被膜を物理的に除去し、さらに電流 1A-時間 3 分の電解研磨を 2 回以上行うことが有効であると考えられる。

4.4 鉄筋の径・鋼種

鉄筋の径や鋼種を変えた場合、測定位置や表面処理の傾向に違いが見られるのかを調査するため、SD345 D16, SD345 D32, SD345 D51, および SD295 D16 の異形鉄筋を用いて、それぞれの節間 3 点でグラインダーによる酸化皮膜除去および電解研磨の表面処理を行って応力を測定した。



● 節間全体を表面処理した場合
● 表面処理面積を1cm四方程度とした場合

(c) SD345 D51

図-20 鉄筋の径・鋼種の比較

図-20 に示すように、径や鋼種の違いによって、値がばらついているものがあるものの、これまでと同様に公称応力が増えていくにしたがって測定応力も増えていく傾向が見られた。

D51 の鉄筋で値が大きくばらついている一因としては、表面処理の面積が大きかったことによるものと考えられる。当初 D51 の節間全体を表面処理した場合には一貫して 150MPa 程度低い値であったが、図-21 (b) に示すように、表面処理の面積を D16 の場合と同じ 1cm 四方としたところ、図中の橙色点に示すように、ほぼ公称応力と同等になったため、表面処理の面積は 1cm 四方程度とする必要があることがわかった。ただし依然として誤差があり、データ数も少ないため、今後更なる検討が必要である。



(a) 節間全体を表面処理した場合
(b) 表面処理面積を 1cm 四方とした場合

図-21 SD345 D51 供試体

また、SD345 の誤差範囲が ± 30 MPa 程度であるのに対し、SD295 の誤差範囲が若干大きくなっている。これは SD345 に比べ SD295 の鉄の結晶粒がより粗大であり、回折に寄与する結晶粒の数が減少したことにより、測定応力の精度が下がったものと考えられる。したがって、鋼種が変化し結晶粒の粗さが変化することにより、誤差範囲が若干変化することが考えられる。

したがって、径や種類によって表面処理の面積の影響や、誤差範囲に若干の変化があることが見受けられたものの、径は 16mm から 51mm、鋼種は SD295 から SD345 の範囲で適用可能であると考えられる。

4.5 連続照射・再照射

測定装置などを動かさずに連続して X 線を照射し応力を測定する場合(連続照射)や、測定装置などを動かして同じ測定点を狙って X 線を照射し応力を測定する場合(再照射)にどの程度のばらつきが生じるのかを検討した。

連続照射の場合、 $\pm 0\sim 10$ MPa 程度のばらつきを持って測定できることがわかった。これは、主に測定装置そのものの精度の影響であると考えられる。一方、再照射の場合、 $\pm 0\sim 30$ MPa 程度のばらつきを持って測定できることがわかった。これは、金属結晶粒は非常に微細であるため、同じ測定点を狙って X 線を照射したつもりでも、実際には異なる金属結晶粒からの回折 X 線による応力測定となってしまうものと考えられる。

4.6 高応力

ここまでは、どの供試体に対しても 200MPa 以下の範囲で応力測定を行ったが、200MPa 以上の範囲においても、SD345 D16 の節間 3 点で応力を測定し、どのような変化が見られるのかを検討した。

図-22 に示すように、公称応力が 200MPa 以上になると、200MPa 以下の場合とは異なり、測定応力の増え方が鈍くなっていく傾向が見られた。この原因については、今後更なる検討が必要である。

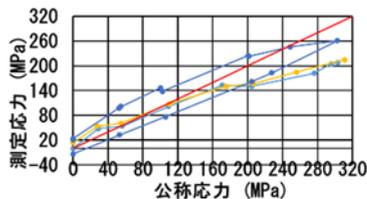


図-22 200MPa 以上負荷した場合の結果

5. X 線回折法による残留応力推定手法の提案

測定位置や表面処理などに関する実験結果から得られた、X 線回折法による鉄筋の残留応力推定手法を以下にまとめる。

(1) 入射角揺動法

入射角揺動法を用いる。

(2) 測定位置

異形鉄筋においては節間で測定を行う。

(3) 表面処理

測定する前に、鉄筋の表面を覆っている酸化被膜を 1cm 四方にわたって、グラインダーなどによって物理的に除去し、さらに電流 1A-時間 3 分の電解研磨を 2 回以上行う。

(4) 鉄筋の径・鋼種

径は 16mm から 51mm、鋼種は SD295 から SD345 の範囲で適用可能である。

この方法で測定すれば、図-23 に示すように、およそ $\pm 30\text{MPa}$ 程度の誤差範囲で応力を推定することができた。ただし、厳密に誤差範囲を規定するにはさらなる実験を行い、データ数を増やす必要がある。

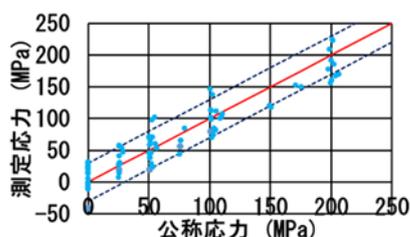


図-23 X 線回折法による残留応力推定手法の誤差範囲

6. まとめ

X 線回折法の鉄筋の残留応力推定手法に対する適用可

能性を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 節やリブをもつ異形鉄筋における応力の測定位置としては、節間が適切である。
- (2) 鉄筋の応力測定のための表面処理としては、グラインダーを使って酸化被膜を物理的に除去し、なおかつ電流 1A-時間 3 分の電解研磨を 2 回以上行うことが有効である。
- (3) 径や鋼種によって表面処理の面積の影響や誤差範囲に若干の変化があることが見受けられたものの、径は 16mm から 51mm、鋼種は SD295 から SD345 の範囲で X 線回折法による残留応力推定手法を適用することが可能である。
- (4) 同一測定位置で X 線を連続照射した場合、測定応力としては $\pm 10\text{MPa}$ 程度、再照射した場合には、 $\pm 30\text{MPa}$ 程度のばらつきが生じうる。
- (5) 入射角揺動法によって測定の精度は格段に向上したことから、鉄筋の応力測定においては入射角揺動法を用いることが望ましい。
- (6) 公称応力が 200MPa 以上の場合には、測定応力の増え方が鈍化した。
- (7) 測定位置や表面処理などに関する実験結果から得られた、X 線回折法による鉄筋の残留応力推定手法で測定を行えば、およそ $\pm 30\text{MPa}$ 程度の誤差範囲で応力を推定することができた。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人首都高速道路技術センターの研究開発助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中代雅士：残留応力の基礎(その 2)残留応力計測方法の紹介, IIC REVIEW, No.39, pp.2-10, 2008
- 2) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明：残留応力の X 線評価, 養賢堂, 2006
- 3) 郡亜美, 高久泰弘, 鈴木健次, 中代雅士： $\cos \alpha$ 法を用いた X 線残留応力測定の有効性の確認, IIC REVIEW, No.53, pp.48-53, 2015
- 4) 高久泰弘, 三谷幸寛, 鈴木健次, 阿部徹, 中代雅士：応力負荷条件下における X 線応力測定値と各種応力の関係, IIC REVIEW, No.53, pp.18-25, 2015
- 5) 引地力男, 油田功二, 原田正和, 上野孝行, 吉満真一：切削加工における切削抵抗が加工硬化層に及ぼす影響, 鹿児島工業高等専門学校研究報告, 34 巻, pp.5-9, 1999