

# X線回折法によるコンクリート構造物の 鉄筋残留応力測定

○牧野敏明<sup>1</sup>・有澤希<sup>1</sup>・宮城敏明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(株)沖縄建設技研（沖縄県浦添市字前田1124番地）

キーワード：RC構造物の劣化、維持管理、鉄筋応力、X線回折法、ASR

## 1. はじめに

金属などの結晶格子を持つ材料の応力測定方法として知られているX線回折法を用いて、劣化したコンクリート構造物内部の応力測定法および評価方法の検討を行った。産業界では実用化されているX線回折法を用いることで、実構造物に現在生じている応力状態が測定できるため、構造物の現状を力学的観点から評価できる可能性がある。本論文では、本測定手法の紹介と実構造物へ適用した結果を報告する。

推定できることが確認されている<sup>3)</sup>。本報では文献3)の方法に準じて測定を行った。また、現場の不安定な環境で、屋内環境と同程度の精度を確保する方法についても検討対象となる。

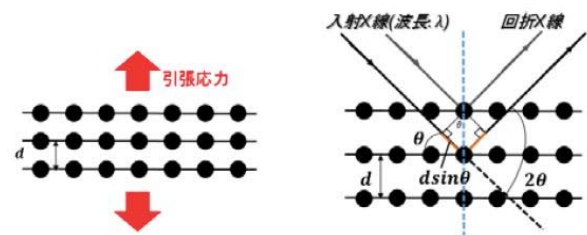


図-1 X線回折法の原理

## 2. X線回折法による残留応力測定

### (1)測定原理

金属材料は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。そこに応力が加わると、応力に応じた格子面間隔が変化する(図-1)。ここに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X線回折法である<sup>1),2)</sup>。

鉄筋の屋内引張試験に本方法を適用することで、±30MPa程度の誤差範囲で応力を



図-2 ポータブル型X線残留応力測定装置

### (2)残留応力測定器概要

使用した測定器を図-2に示す。この測定器は、X線を用いた残留応力推定手法の一つである $\cos \alpha$ 法を採用した装置である。この方法の特徴は、X線の単一入射のみで応力を測定でき、従来の測定器に比べ小型化、測定時間の短縮化を実現したことから、現場計測が可能となったことである。なお、

本報では残留応力を、現在鋼材に生じている応力と定義する。

### (3)測定の前処理

本方法は鋼材の残留応力を測定するものであり、コンクリート構造物の応力評価をする際は、コンクリート内部の鋼材をはつり出す必要がある。また、鉄筋表面の平面処理および酸化被膜を除去することを目的にディスクサンダーなどで物理的に研磨したのち、さらに電解研磨を行う。これによりコンクリート中の鉄筋に生じた応力を±30MPaの精度で計測することが可能となる<sup>3)</sup>。図-3にかぶりコンクリートをはつり出し、研磨処理した状況の一例を示す。



図-3 測定前のはつり出しおよび電解研磨状況

## 3. 対象構造物

今回の報告では、ASR劣化した橋脚および塩害劣化したRCT桁橋主桁を対象にX線回折法による応力測定を行った。

### (1)ASR劣化した橋脚

ASRにより劣化した橋梁橋脚の鉄筋の残留応力を測定した。対象構造物には、図-4に示すように、コンクリート表面全面に0.3~1.5mmの亀甲状のひび割れが生じており、コンクリート橋脚内部の鉄筋は、ASRによる膨張力により引張状態にあると予想される。

### (2)塩害劣化したRC単純T桁橋主桁

本手法は、試験室のような一定条件での測定に対しては、安定的な結果を得ること



図-4 RC橋脚のひび割れ状況

ができるが、実構造物に適用した場合、現場条件により測定困難となることも想定される。そこで、昭和29年に架設され、塩害劣化が著しく進行し、補修工事が行われたRC単純T桁橋(橋長9.4m)の主桁において測定可能性を評価した。

補修工事は桁全体的に断面修復が行われ、その後含浸工法を施すものであった。主桁の主鉄筋の応力測定では、図-5に示すように桁下面から上向き作業となるため、側面を測定する橋脚に比較し難易度が高くなる。



図-5 鉄筋はつり出し状況(断面修復)

## 4 測定結果および考察

### (1)ASR劣化した橋脚

ASR劣化した橋脚の側面の帯鉄筋をはつり出し鉄筋の応力を測定した。応力測定状況を図-6に示す。応力測定位置は、図-7に示す4箇所において5回ずつ測定した。表-1に測定結果を示す。

本構造物はASRによりコンクリートが膨張しているため、内部の鉄筋の応力は引張状態と想定される。表-1からP3以外の鉄

筋の応力状態は、引張状態となっており、また、P1、P2 では大きな引張応力が生じていることも確認できる。しかし、P3 での応力状態は圧縮であり、想定と異なる。これは、測定箇所が重ね継手の位置であることから、応力発生機構が他の3点と異なっていることが原因と推測される。

コンクリートと鉄筋が付着している場合は鉄筋とコンクリートに生じるひずみは同値であり、ヤング係数比  $n = E_s / E_c = 7.14$  程度とすると、鉄筋の応力をヤング係数  $n$  で除すことで、コンクリートの引張応力は、 $8.4 \sim 12.9 \text{MPa}$  程度の値と推定できる。一方、コンクリートの設計基準強度  $f'_{ck}$  を  $30 \text{MPa}$  と仮定すると、コンクリートの引張強度  $f_t = 0.23 f'_{ck} = 2.2 \text{MPa}$  と推定され、コンクリート引張応力は引張強度を大きく超えるため、ひび割れが生じる応力レベルであることがわかる。

表-2 に、鉄筋応力をコンクリート応力に換算した値を示す。このように、本手法によりコンクリート内部の鉄筋の応力状態を測定することが可能で、ここからコンクリート応力の推定も可能である。しかしながら測定された鉄筋の応力からコンクリートの応力へ換算する方法については、基礎的な検討が不十分であり、今後の検討課題である。また、測定結果に基づく耐荷性能に関する評価方法についての詳細も今後の検討課題である。

## (2) 塩害劣化した RC 単純 T 桁橋主桁

次に、塩害劣化した RC 単純 T 桁橋の主桁主筋に対して応力測定を行った結果を示す。

図-8 に T 桁の断面図を示す。前述の橋脚同様に主筋 D25 を研磨したのち、応力測定を行った。図-9 に測定した4箇所を、図-10 に測定状況を示す。

主桁主筋では、上向き測定となるため、



図-6 応力測定状況

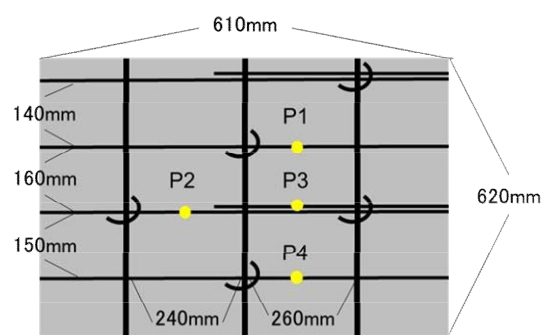


図-7 応力測定箇所

表-1 計測結果(単位: MPa) 正: 引張, 負: 圧縮

	1	2	3	4	5	平均
P1	107	110	60	87	92	91.2
P2	86	99	95	92	94	93.2
P3	2	-81	-8	-61	-63	-42.2
P4	66	60	96	65	45	66.4

表-2 換算結果(単位: MPa) 正: 引張, 負: 圧縮

	鉄筋応力 測定値	コンクリート 換算応力	コンクリート 引張強度
P1	91.2	12.8	>
P2	93.2	13.1	>
P3	-42.2	-5.9	<
P4	66.4	9.3	>

側面を測定する橋台と異なり難易度が高く、測定精度にもばらつきが予想された。

測定結果を表-3 に示す。同表備考欄に示す「鉄筋解放」とは、はつり出した後に鉄筋が緩んでいる状態であり、完全に応力が解放されたと推測されることを意味する。



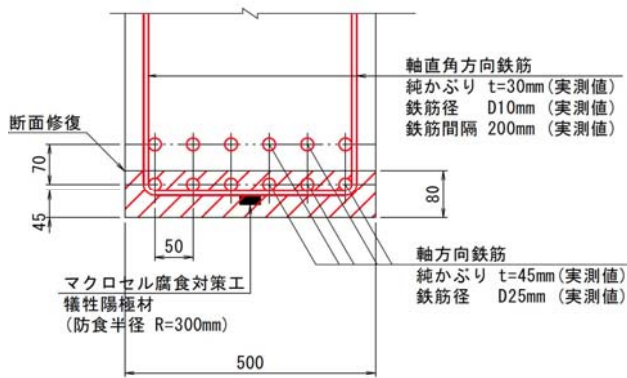


図-8 主桁断面修復計画

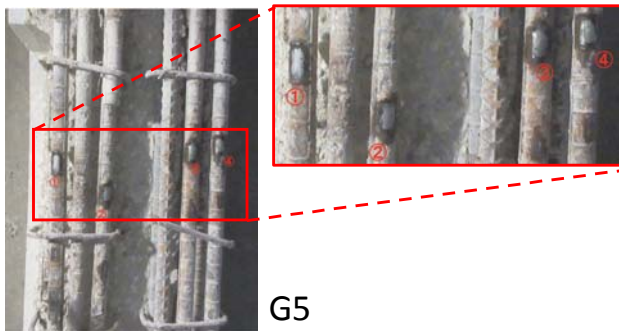


図-9 研磨および測定箇所



図-10 応力測定状況

表-3 より、同一測定位置においても結果にばらつきがあり、一部圧縮（負値）が生じている場合もある。また、本測定時には、基準試料の測定値が 72(MPa)となったため、測定値を補正している。

鉄筋開放されている No. 2 以外の補正後測定値は  $0 \pm 30$  (MPa) の範囲にあり、概ね妥当な測定結果と判断できる。

以上、主桁主筋の応力測定が可能であるが、測定方法、測定結果の判定や利用につ

表-3 測定結果（正：引張，負：圧縮）

No.	測定回数	$\Sigma x$ (MPa)	平均 $\sigma_x$ (MPa)	補正 $\sigma_x$ (MPa)	備考
1	1	93	73	1	鉄筋解放
	2	76			
	3	49			
2	1	21	5 (13.3)* <sup>1</sup>	-59	
	2	17			
	3	-20			
	4	2			
3	1	13	14 (50.3)* <sup>1</sup>	-22	鉄筋解放
	2	-95			
	3	51			
	4	87			
4	1	63	100	28	鉄筋解放
	2	106			
	3	143			
	4	89			

\*1: マイナスを除く平均値

いては課題が残った。今後詳細な検討を行う予定である。

## 5 まとめ

- (1) ASR 劣化した橋脚および塩害劣化した単純T桁橋主桁を対象に鉄筋の応力測定が可能であることがわかった。
- (2) 測定対象によってはばらつきのある値が得られたことから、現場計測での測定方法の検討が必要である。
- (3) 得られた値の精度保証や、その結果に基づく構造物の耐荷性能評価等、維持管理への応用について今後取り組む。

本報は、富山潤琉球大学准教授との共同研究を取りまとめたものであり、田中樹由氏（(株)オリエンタルコンサルタンツ）、山口真氏（パルステック工業(株)）の助言・協力を得た。付記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 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
- 2) 郡亜美，高久泰弘，鈴木健次，中代雅士：cos  $\alpha$  法を用いた残留応力測定の有効性の確認，IIC REVIEW, No. 53, pp. 48-53, 2015
- 3) 小田切勝也，田中樹由，野末秀和，岩波光保：X 線回折法による鉄筋の残留応力推定手法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39, No. 1, pp. 1867-1872, 2017