

# X線回折法によるASR劣化した コンクリート構造物の鉄筋残留応力測定

古田 泰佑<sup>1</sup>・富山 潤<sup>2</sup>・須田裕哉<sup>2</sup>・藍檀オメル<sup>2</sup>・牧野 敏明<sup>3</sup>・宮城 敏明<sup>3</sup>・  
黒川 直哉<sup>4</sup>・田中 樹由<sup>4</sup>・青野 嘉幸<sup>5</sup>・山口 真<sup>5</sup>

<sup>1</sup>琉球大学大学院 理工学研究科 環境建設工学専攻（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地）

<sup>2</sup>琉球大学 工学部工学科 社会基盤デザインコース（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地）

<sup>3</sup>（株）沖縄建設技研（〒901-2102 沖縄県浦添市字前田1124番地）

<sup>4</sup>（株）オリエンタルコンサルタンツ（〒151-0071 東京都渋谷区本町3丁目12番1号）

<sup>5</sup>パルステック工業（株）（〒431-1304 静岡県浜松市北区細江町中川7000-35）

本研究では、アルカリシリカ反応（ASR）により劣化したコンクリート構造物に対して、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線回折法を用いたコンクリート内部の応力測定法および評価方法の検討を行っている。本技術は、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、ASR劣化したコンクリート橋脚を対象に、鉄筋に生じた応力測定を実施した、また、塩害劣化したコンクリートT桁橋の主桁主筋に対しての適応性を検討した。本論文では、本測定手法の紹介と本計測技術を実構造物へ適用した結果について報告する。

キーワード 維持管理、応力測定、X線回折法、アルカリシリカ反応(ASR)、塩害

## 1. はじめに

社会インフラ施設を適切に維持管理するためには、構造物の現状を正しく把握する必要がある。外力などが作用した構造物内部では、応力が生じ、その応力が構造物の耐えうる許容応力を超えると、構造物は大きなダメージを受けることになる。その応力状態を、致命的な損傷に至る前に知ることができれば、最適な対策を講じることができ、適切な維持管理が可能となる。

コンクリート構造物においては、コンクリートの弱点を補うため鉄筋など鋼材がコンクリート内部に配筋され、コンクリートと一体化することで要求性能を保証する。従って、コンクリート構造物内部に埋設された鋼材の応力状態を知ることが維持管理において重要である。

一方で、金属などの結晶格子を持つ材料の残留応力測定方法として、X線回折法<sup>1)</sup>による方法があり、産業界では実用化されている。近年、その方法に着目し、コンクリート分野において基礎的な検討が行われている<sup>3)</sup>。そこで本研究では、本測定技術の実構造物への実装を目指し、ASR劣化したコンクリート橋脚を対象に、鉄筋の応力測定を実施し、その結果と実現象との整合性を評価した。また、塩害劣化したコンクリートT桁橋の主桁主

筋を対象に本測定手法の適応性を検討した。

## 2. X線回折法による残留応力測定

### (1) 測定原理

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-1に示すように、応力に応じた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X線回折法である<sup>1)</sup>。

この原理を利用し、コンクリート分野への適用性を検討し、鉄筋の引張試験による屋内試験において、±30MPa程度の誤差範囲で応力を推定できることが確認されている<sup>3)</sup>。本研究では文献<sup>3)</sup>の方法に準じて測定を行った。ただし、現場の不安定な環境では、屋内環境と同様の方法が必ず実施できるとは限らない。このため、現場での測定方法についても検討対象である。

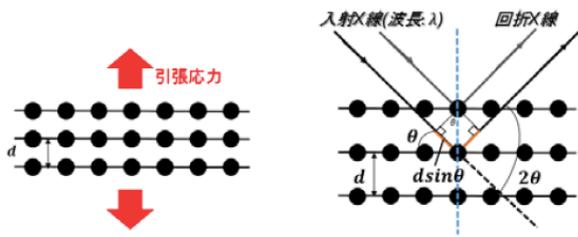


図-1 X線回折法の原理<sup>3)</sup>



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<sup>4)</sup>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、現場計測が可能である。なお、本稿では残留応力を、現在鋼材に生じている応力と定義する。

## (3) 測定の前処理

本測定方法は、鋼材の応力を測定するものであることから、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グライ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。そうすることで、鉄筋に生じた応力を $\pm 30\text{MPa}$ の精度で測定可能である<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。

## (3) 測定方法

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、露光中に入射角を揺動させることで、解説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<sup>1)</sup>。本研究においても入射角揺動法を用いた計測を行った。



図-3 測定前のはつり出しおよび電解研磨の状況 (例)



図-4 ひび割れ発錆状況図

## 3. 対象構造物

本研究では、ASR劣化した橋脚と塩害劣化したRC T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

対象とした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。劣化状況としては、図-4に示すように、コンクリート表面全面に $0.3\sim 1.5\text{mm}$ の亀甲状のひび割れが生じている。したがって、コンクリート橋脚内部の鉄筋は、ASRに起因した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ができるが、屋外の構造物が対象では、建設された位置や測定箇所などで、測定できないことも想定される。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)の主桁に着目し、測定可能性を評価した。

補修工事は、図-5に示すように桁全体に対して断面修復が行われ、その後含浸工法が施された。図-5に示すように主桁の主鉄筋の応力測定は、測定器を上向きに測定する必要があり、上述した橋脚に比較し、はるかに測定が難であると予想される。なお、本橋梁は、河川橋であるため、測定には、足場が架設されていることが必要である。



図-5 鉄筋はつり出し状況 (断面修復工法)



図-6 応力測定状況

#### 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膨張によりコンクリートにひび割れが生じているため、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であると考えられる。

P3を除く測定された鉄筋の応力は、60~90MPa程度の引張応力となっている。これをコンクリートの応力へ換算する場合は、コンクリートと鉄筋が一体化している場合は、鉄筋とコンクリートに生じるひずみは同値であることを利用し求めることができる。たとえば、ヤング係

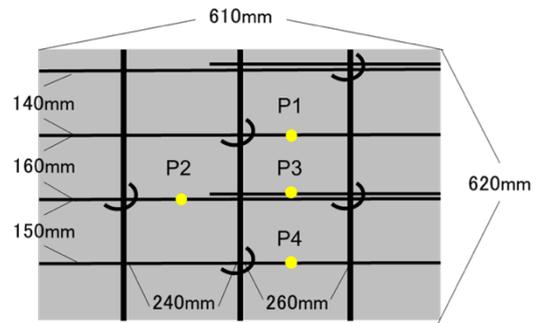


図-7 応力測定ポイント

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

	測定値	換算応力	推定引張強度	判定
P1	91.2	12.8	2.2	NG
P2	93.2	13.1		NG
P3	-42.2	-5.9		-
P4	66.4	9.3		NG

数比 $n=Es/Ec=7.14$ 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、8.4~12.9MPa程度の値と推定できる。コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}$ を30MPaと仮定すると、コンクリートの引張強度 $f_t=0.23f_{ck}^{2/3}=2.2$ MPaと推定され、測定値から推定した値は、コンクリートの引張強度をはるかに超え、ひび割れが生じる応力レベルであることがわかる。

表-2 にコンクリートの応力へ換算した値を示す。このように本手法は、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ある。また、得られた値からコンクリートに生じている応力レベルの推定も可能である。しかし、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、基礎的な検討から始める必要があり、今後の検討課題である。また、測定結果に基づく構造物の耐荷性能評価法について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-6にT桁の断面修復工法の計画図を示す。この図より、主筋は12-D25(2段)が配筋されているのがわかる。また、計測は、はつり出した1段目の鉄筋を対象とした。

測定対象はG5桁とし、主筋をディスクグラインダーにより機械的研磨を施した後、電解研磨した。図-7に測定4ポイントを示す。また、図-8に測定状況を示す。

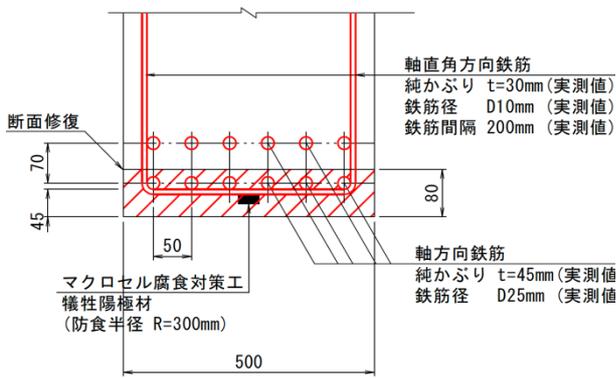


図-6 主桁断面修復工法計画図

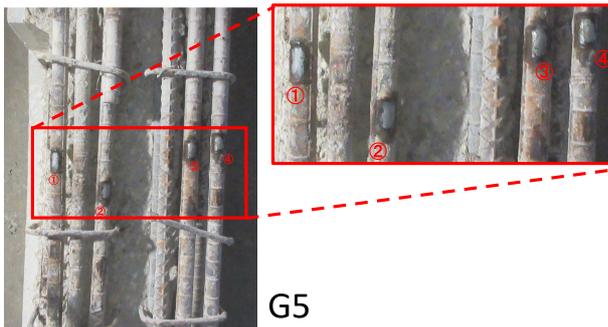


図-7 研磨および測定ポイント (G5)



図-8 測定状況

図-8からもわかるように、主桁主筋の計測は、測定器を上向きにして行うことから、前節の橋台と異なり測定に対する難易度ははるかに高く、測定結果にもばらつきが予想された。

測定結果を表-3に示す。今回の計測は時間の制約があり、測定数は、No.1は3回、それ以外は4回ずつ測定とした。また、表-3備考に示す「鉄筋解放」とは、はつり出した後、継手部分が緩み、わずかな力でも動く状態であり、完全に応力が解放された状態と推測されることを意味する。

表-3の結果は、同測定位置においてもばらつきがあり、一部圧縮（負値）が生じている場合もある。しかし、鉄筋解放のないNo.2のマイナスを除いた平均値が13.3MPa程度であることを考えると、応力が解放されたと推測される鉄筋の応力は大きな値である。

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)	備考
1	1	93	73	鉄筋解放
	2	76		
	3	49		
2	1	21	5 (13.3)*1	
	2	17		
	3	-20		
	4	2		
3	1	13	14 (50.3)*1	鉄筋解放
	2	-95		
	3	51		
	4	87		
4	1	63	100	鉄筋解放
	2	106		
	3	143		
	4	89		

\*1:マイナスを除く平均値

この値は、鉄筋とコンクリートの一体化が崩れた状態であることから、塑性化した残留応力の可能性も考えられる。

今回の計測で、主桁主筋の応力測定が可能であることが明らかとなったが、測定方法、精度につ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

本研究では、ASR劣化したコンクリートRC橋脚および塩害劣化したRC単純T桁橋主桁の鉄筋を対象にX線回折法を用いた応力測定を行った。得られた知見と課題を以下に示す。

- (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が測定可能であることがわかった。また、得られた結果を用いた構造物の耐荷性能評価の可能性が示唆された。
- (2) 今後は、現場計測での測定方法の検討、得られた値の精度保証およびその結果に基づく構造物の耐荷性能評価方の検討について取り組む予定である。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたり、測定現場をご提供頂いた橋梁管理者に感謝の意を表す。

## 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
- 4) パルステック工業 HP：<https://www.pulstec.co.jp/>