

## コンクリート柱用鉄筋破断診断装置「新型CPチェッカー」の開発

(株)四国総合研究所 産業応用技術部	高岡 哲也
(株)四国総合研究所 産業応用技術部	山地 洋一郎
(株)四国総合研究所 産業応用技術部	平田 和也
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	中西 美一
(株)四国総合研究所 経営企画部	内田 徹
(株)四国総合研究所 経営企画部	三島 敏裕

キーワード： CPチェッカー  
漏洩磁束法  
鉄筋破断  
コンクリート柱  
TMR センサー

Key Words : CP Checker  
Magnetic Flux Leakage  
rebar breakage  
concrete poles  
TMR sensor

### The development of “Advanced CP Checker,” A Rebar Breakage Diagnostic Device for Concrete Poles

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department

Tetsuya Takaoka, Yoichiro Yamaji, Kazunari Hirata

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Shikoku Research Institute, Inc., Corporate Planning Department

Toru Uchida, Toshihiro Mishima

### Abstract

Concrete poles, which are important infrastructure equipment for achieving a stable power supply, are installed on the assumption that they will be used for a long period. Also, deterioration over time occurs during that time, causing surface peeling, cracking, etc., too. Therefore, the electric power company that manages the concrete poles regularly inspect these poles by visual inspection and tapping to confirm their soundness.

The strength of the concrete pole is closely related to the condition of the rebars. If the condition of rebars being broken or corroded can be confirmed in advance, the concrete pole will be able to rebuild at an earlier stage than when the deterioration can be visually confirmed from the surface. If it is possible to find such rebar breakage, the risk of breaking concrete poles will be suppressed.

In response to such demands, in 2004, we developed a rebar breakage diagnostic device "CP Checker", a device that can non-destructively confirm the rebar breakage in concrete poles and has sold more than 500 products so far. Recently, electronic devices, such as sensors, have undergone remarkable evolution. Since these devices can be expected to make a significant contribution to the diagnosis of rebar breakage, we have developed the "Advanced CP checker" that uses the latest magnetic sensors.

## 1. はじめに

電力安定供給の実現において重要なインフラ設備である電柱は、コンクリート製のものが主体となっている。コンクリート柱は長期の利用を前提として設置されているが、その間に経年劣化が生じ、表面の剥離、ひび割れ、接合面の割れなどが発生することが知られている。電力会社など電柱を管理するインフラ事業者においては、コンクリート柱に対して目視や打音などにより定期的に点検を実施して健全性を確認している。

コンクリート柱の強度は鉄筋の状態と密接に関係している。鉄筋が破断、腐食しているなどの状態が予め確認できれば、表面から目視で確認できる状態に至るよりも早い段階でコンクリート柱の建て替えなどを判断することができるため、折損などの発生リスクを抑えることができる。

このような要求を受け、当社では 2004 年に鉄筋破断診断装置「CPチェッカー」という、コンクリート柱の鉄筋破断を非破壊で確認できる装置を開発し、これまで 500 台以上の製品を販売している。

販売開始から 18 年経過した現在、センサ等の電子部品はめざましい進化を遂げており、鉄筋破断診断への活用においても大きな貢献が期待できる。今回、最新の磁気センサを活用した「新型CPチェッカー」を開発したため、その概要について報告する。

## 2. コンクリート柱製造工程と鉄筋破断のメカニズム

コンクリート柱の製造工程を以下に、製造工程概念図を図 1 に示す<sup>1, 2)</sup>。

- ① 主鉄筋と螺旋筋とを溶接あるいは手編みにより組み立てる。
- ② 組み立てた鉄筋を 2 分割された型枠内に配置する。
- ③ 主鉄筋に所定の緊張力（プレストレス）を与えた状態でコンクリートを型枠内に入れ、電柱を周方向に回転させながらコンクリートを注入し、遠心力によって締め固める（遠心成形）。
- ④ 遠心成形後、蒸気養生して型枠を外し、検査工程を経て完成となる。

上記工程③の遠心成形時には、型枠の合わせ目から僅かな水分が出るが、完成後はこれが通り道

となり水分が浸入しやすくなること、経年劣化によるコンクリートのひび割れ箇所からも水分が浸入しやすくなることなど、外部からの雨水の浸入による腐食が懸念される。更に、そのような状況下において、製造時に主鉄筋に与えたプレストレスや電柱のたわみなどによる応力が発生することにより、水素脆化が原因となる遅れ破壊によって鉄筋破断が発生する可能性もある<sup>2, 3)</sup>。

コンクリートを研り、鉄筋を目視で確認した結果に関して、当社で調査した範囲では、鉄筋破断はコンクリートのひび割れ箇所や型枠の合わせ目跡付近に集中して発生する傾向が確認されている。一方、コンクリートのひび割れがあっても鉄筋破断が発生していない事例も多く確認されており、ひび割れ確認を中心とした目視点検だけでなくコンクリート柱内部の鉄筋の状態も確認できれば、無駄に建て替える割合を減らすことができるため、現場からは鉄筋の状態を確認する手法が求められていた<sup>4)</sup>。

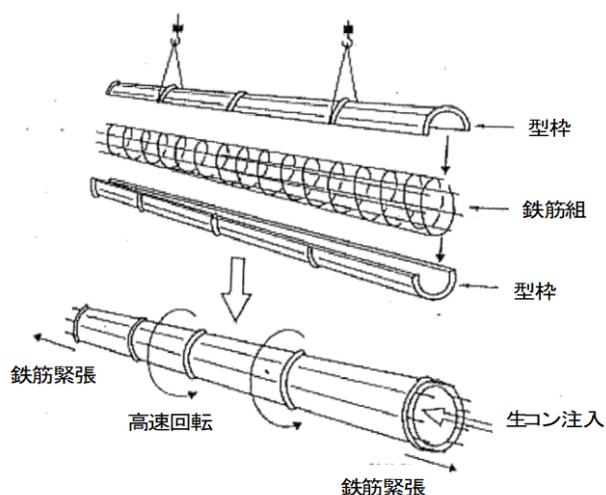


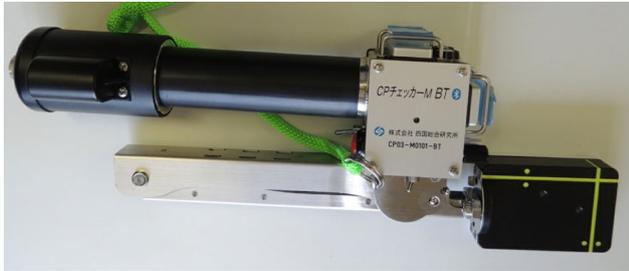
図 1 コンクリート柱の製造工程概念図<sup>1)</sup>

## 3. CPチェッカーによる鉄筋破断診断

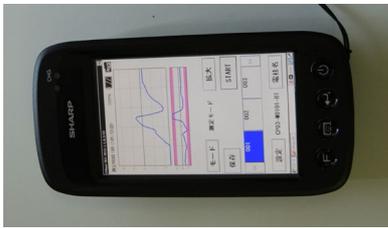
### 3.1 CPチェッカー

このようなニーズに基づき、2003 年頃から当社では CP チェッカーの開発に着手した。CP チェッカーの外観を図 2 に示す。CP チェッカーは本体であるセンサユニット、測定波形のグラフ表示と記録を行うレコーダユニット、コンクリート柱の鉄筋を磁化させるための磁石ユニットの 3 ユニットで構成される。CP チェッカーではコンクリート柱の鉄筋を磁石ユニットで磁化させた

後、磁化範囲をセンサユニットで走査させて破断箇所の有無を診断する。破断の可能性が高い箇所付近でセンサを走査させた場合には、CPチェッカーがLEDランプとブザー音で破断ありを警告する。



(a) センサユニット



(b) レコーダユニット



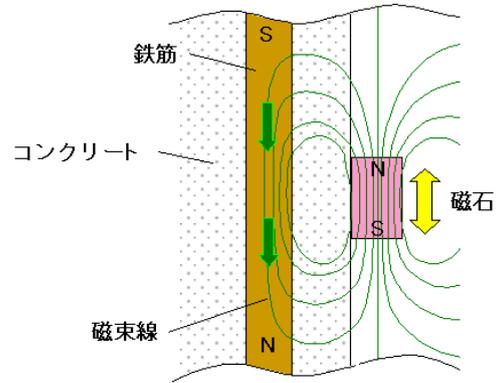
(c) 磁石ユニット

図2 CPチェッカーの外観

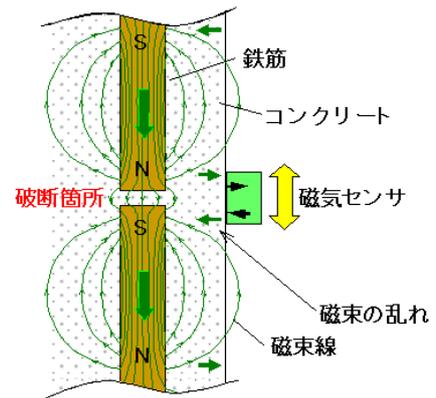
### 3.2 漏洩磁束法

CPチェッカーによる鉄筋破断診断では、コンクリート表面から永久磁石で内部の鉄筋を磁化するステップ1と、破断箇所における磁束の乱れを磁気センサで検出して破断箇所を特定するステップ2の2ステップで破断診断を行う。各ステップにおける主鉄筋および磁石、磁気センサ周辺の磁束線を図3に示す。ステップ1で鉄筋を磁化すると、破断がある箇所ではそこで鉄筋が不連続な端部となるため、そこにN/Sの磁極が発生する。ステップ2では、この磁極から漏れ出る磁束を磁気センサで検出し、その局所的な変化を捉えて破断の有無を判定する。この手法は、破断部分から漏れ出る磁束を測定して破断箇所を特定する方法であり、漏洩磁束法と呼ばれる<sup>5)</sup>。

コンクリート柱内部では主鉄筋はコンクリートで固められているが、空気中もコンクリート中も透磁率はほぼ同じとして扱える。そのため、漏洩磁束法ではコンクリートを使わずにモックアップを構築することが可能である。



(a) STEP1 磁石で鉄筋を磁化



(b) STEP2 センサで磁束の乱れを検出

図3 鉄筋周辺の磁束密度分布例

### 3.3 破断点検出

CPチェッカーにおける鉄筋の破断点検出では、2個の磁気センサを用いる。2個の磁気センサを同じ直線上に一定間隔をおいて配置し、検査対象となる主鉄筋の直上を2個の磁気センサが同じ直線上を移動するよう走査する。破断のない鉄筋上を走査する場合は、図4(a)に示すような磁束線が発生し、端部を除く区間では概ね線形的に滑らかに変化する。

仮に、主鉄筋に破断箇所があった場合、破断箇所には図4(b)に示すような磁束線が発生しており、コンクリート柱の軸中心から表面に向かう方向、即ち図4にて上向きの方向の磁束を測定す

ると、破断箇所付近の短い区間に N/S 極が発生することで磁束密度の極大／極小値が発生し、S 字曲線の特徴を示す。

図 4 (b) に赤色で示す磁束密度波形では、極大・極小値の中間位置を破断点とすると、破断点は磁束密度波形を微分した波形において、傾きが最大となる箇所である。波形の微分は、数値計算では微小区間の差分を求めることに相当するが、これにヒントを得て、CPチェッカーでは2個のセンサ測定値の差分を求め、その絶対値が一定値以上大きく変化する箇所を破断点の候補として検出する<sup>5)</sup>。

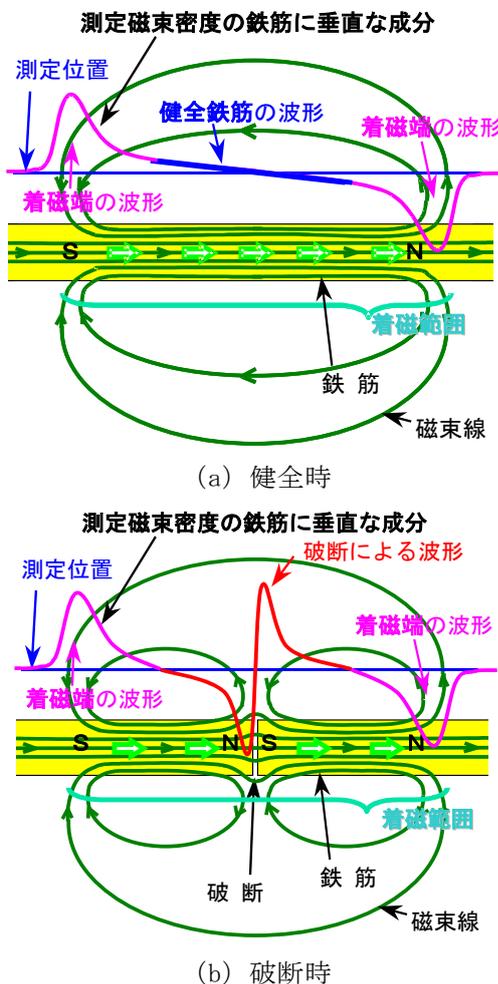


図 4 健全および破断時の磁束密度分布

#### 4. 新型センサによる鉄筋破断診断の性能向上

CPチェッカー開発時は、当時最新のセンサであり、小型、高感度のMI（磁気インピーダンス）センサを用いていたが、現在はより小型で高感度、低消費電力などの特徴をもった高性能なセンサ

が登場しており、このようなセンサを活用した高性能な鉄筋破断診断を行うため、CPチェッカーの性能向上について検討した。

#### 4.1 新型センサの活用

新型CPチェッカーでは、TMR（トンネル磁気抵抗）センサという最新の磁気センサを活用した。TMRセンサの仕様を表1に示す。

表 1 TMR センサの仕様例

項目	内容
種別	磁気抵抗
軸	3 軸 (X, Y, Z)
センシング範囲	感度：10nT/LSB レンジ：±1.2mT
デジタル出力	18 ビット
供給電圧	1.7V～1.98V
供給電流	2.5mA
電流消費	0.5 $\mu$ A (電源断時) 0.03mA～0.20mA (測定モードによる)
動作温度	-30℃～85℃
パッケージ	11-pin LGA
サイズ	1.6mm×1.6mm×0.58mm

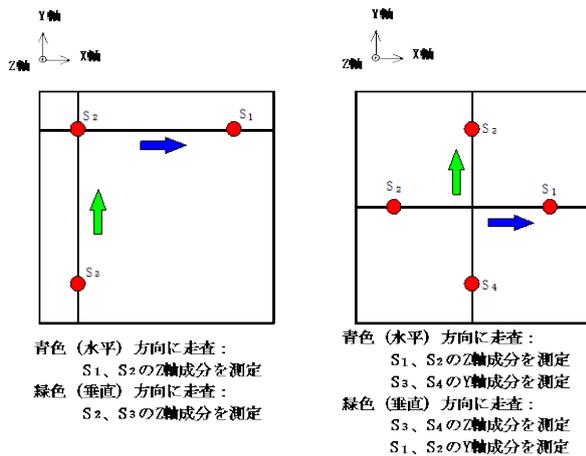
TMRセンサは絶縁体を2層の強磁性体で挟んだ磁気トンネル接合で構成され、外部磁界の方向に対して鋭敏に電気抵抗が変化するトンネル磁気抵抗効果を利用したセンサである。その特徴としては、小型、低消費電力、広い測定レンジなどが挙げられるが、従来のMIセンサは単軸型であるのに対して、今回のTMRセンサは3軸型であるという点も大きな特徴の一つである。

図5に従来および新型CPチェッカーにおけるセンサの配置を示す。従来のCPチェッカーでは、Z軸方向のみの単軸のMIセンサ3個を配置し、走査方向と同じ方向に配置したセンサ2個で測定する。これに対して、新型CPチェッカーでは、3軸のTMRセンサ4個を配置し、走査方向と同じ方向に配置したセンサ2個で従来のCPチェッカーと同じZ軸方向の測定を行い、それに直交する方向に配置したセンサ2個でY軸方向の測定を行う。新型CPチェッカーでは、走査方向に直交する方向に配置した2個のセンサにより、破断箇所から漏洩する磁束線を走査方向から見た両側面からも測定することができる。

なお、従来のCPチェッカーにおいては、セン

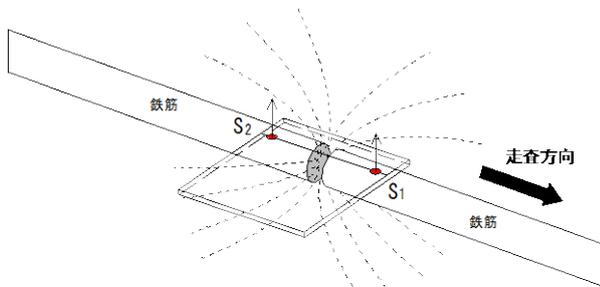


(a) センサヘッド部分

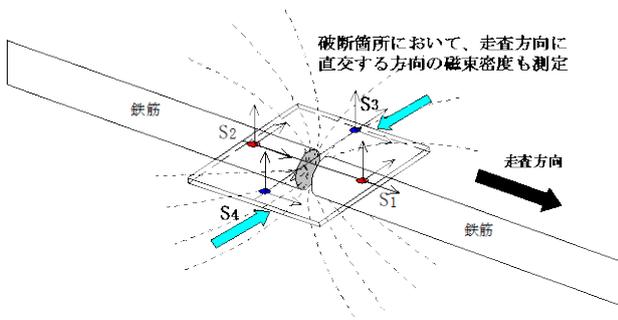


(b) 従来のCPチェッカー (c) 新型CPチェッカー

図5 センサヘッド部分のセンサ配置



(a) 従来のCPチェッカーによる測定例



(b) 新型CPチェッカーによる測定例

図6 従来および新型CPチェッカーの破断箇所測定方法の比較

サ S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> の中点を破断箇所として推定し、新型CPチェッカーにおいては、センサ S<sub>1</sub>~S<sub>4</sub> の中点を破断箇所として推定する。図6に従来のCPチェッカーと新型CPチェッカーにおける測定方法の比較を図示する。

新型CPチェッカーの S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> については、従来のCPチェッカーの S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> と同じデータを測定しており、新型CPチェッカーの測定結果は、従来のCPチェッカーの測定結果と互換性を有している。

#### 4.2 3D(3次元)破断判定手法

新型CPチェッカーでは、前述の4個のセンサでの測定値を用いて下記のように破断判定を行う。

##### 【3D破断判定手法】

以下の2段階のスクリーニングにより、立体的に破断箇所を検出する。

##### ① 1次スクリーニング

図5(c)のセンサ S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> について Z 軸方向の磁束密度の差分の絶対値が、設定閾値以上となった場合に、その位置を破断判定候補とする。閾値に以上なった点(開始点:  $t_s$ )と閾値以下に戻った点(終了点:  $t_e$ )を求める。

##### ② 2次スクリーニング

1次スクリーニングの開始点と終了点における図5(c)のセンサ S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub> の Y 軸方向の磁束密度を求める。これらの値が、下記の式(1)から(3)を満足すれば、測定結果を破断であると判断する。

$$|S_{3y}(t_s) - S_{3y}(t_e)| > A \quad (1)$$

$$|S_{4y}(t_s) - S_{4y}(t_e)| > B \quad (2)$$

$$(S_{3y}(t_s) - S_{3y}(t_e)) \cdot (S_{4y}(t_s) - S_{4y}(t_e)) < 0 \quad (3)$$

ここで  $S_{3y}(t_s)$ ,  $S_{3y}(t_e)$  は、①の開始点  $t_s$  および終了点  $t_e$  のセンサ S<sub>3</sub> の Y 軸方向の磁束密度測定値であり、同様に  $S_{4y}(t_s)$ ,  $S_{4y}(t_e)$  は、センサ S<sub>4</sub> の Y 軸方向の磁束密度測定値である。また、A および B は変化に対する閾値である。

破断点はセンサが破断箇所を走査して通過した後のタイミングで判定されるため、推定される破断点は1次スクリーニングで抽出した  $t_s$  と  $t_e$  の

中点としている。

破断を示す波形例を図7に示す。これは、新型CPチェッカーのレコーダユニット画面に表示されるグラフである。上側のグラフはS1、S2のZ軸方向の磁束密度を青と赤、S3、S4のY成分の磁束密度を緑と茶で表したもので、縦軸に磁束密度( $\mu T$ )、横軸に測定時間(秒)をとったものである。下側のグラフは、S1、S2のZ軸方向の磁束密度の差分値を表示しており、この値が閾値を超える開始/終了点の点線を上側のグラフと共有している。上側のグラフで2次スクリーニングを行い、破断と判定される場合は、上下のグラフで桃色の破断推定位置の線を共有する。図7のような典型的な破断を示す例では、S3およびS4の波形が交差する形で表される。

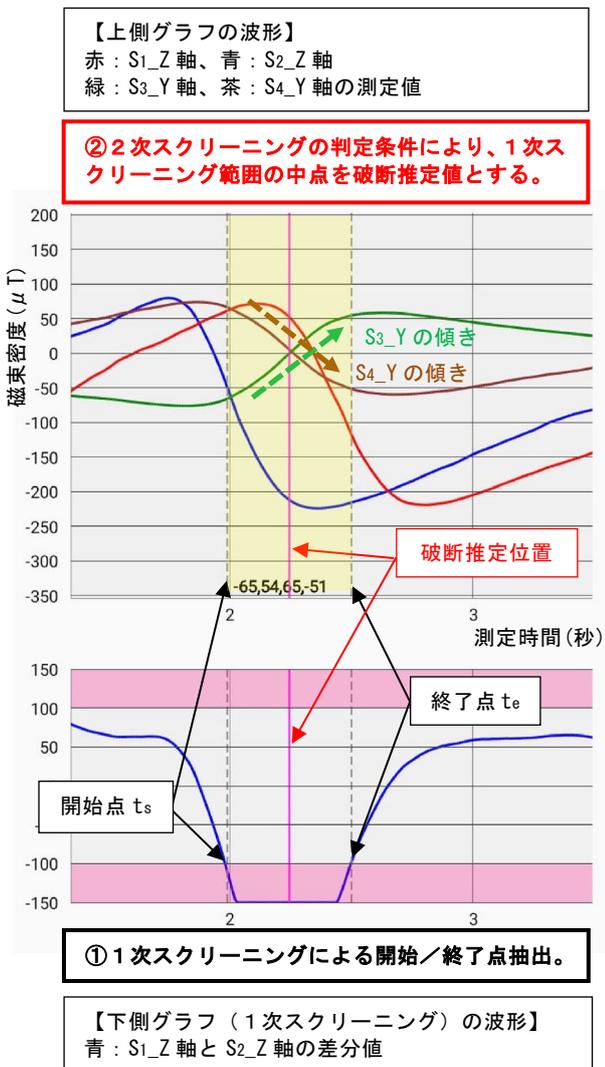


図7 破断を示す波形例

## 5. 新型CPチェッカーの性能評価

### 5.1 新型CPチェッカーの試作

図8に新型CPチェッカーの外観を示す。従来と同様に新型CPチェッカーにおいても、センサユニット、レコーダユニット、磁石ユニットの3ユニットでの構成とした。

センサユニットに関しては、現場での聞き取り調査を実施して筐体の大幅な見直しを行い、使用頻度の少ない機構部分を簡素化することで、従来よりも小型、軽量化を図った。中でもTMRセンサの特徴である低消費電力を活かすことにより、CPチェッカーのバッテリー持続時間を、これまで単3乾電池4本で8時間であったものを、単3乾電池2本で50時間以上に延長することができ、電池本数の削減により軽量化にも貢献した。

また、レコーダユニットにおいてもAndroidOSへの変更や、BLE (Bluetooth Low Energy) への対応、3D破断判定手法による判定結果表示などの機能アップが行われている。



(a) センサユニット



(b) レコーダユニット



(c) 磁石ユニット

図8 新型CPチェッカーの外観

## 5.2 コンクリート柱モックアップの作成

CPチェッカーの性能評価を行うにあたり、実際のコンクリート柱を忠実に模擬したモックアップを作成した。前述のように、コンクリート中も空気中も透磁率はほぼ同じとみなせるため、モックアップの鉄筋は空間中に配置し、内部の鉄筋や破断の位置を確認しながら測定が行えるような構造とした。模擬破断は鉄筋を切断して0～5mm程度のギャップで模擬した。モックアップの外観を図9に示す。



図9 コンクリート柱モックアップの外観

## 5.3 測定例

測定例として、モックアップを用いて螺旋筋の直下にある主鉄筋が破断している場合と、主鉄筋の直上にある螺旋筋が破断している場合について測定を行った。

### (1) 螺旋筋直下の主鉄筋が破断している場合

螺旋筋の直下に主鉄筋の破断がある場合の測定例として、測定結果と該当部分の写真を図10に示す。

螺旋筋直下の破断ということで、主鉄筋の破断部分から漏洩する磁束が上側の螺旋筋に遮られて測定値が低下する可能性が懸念されたが、特に大きな影響はなく、主鉄筋の破断が検出できていることを確認した。

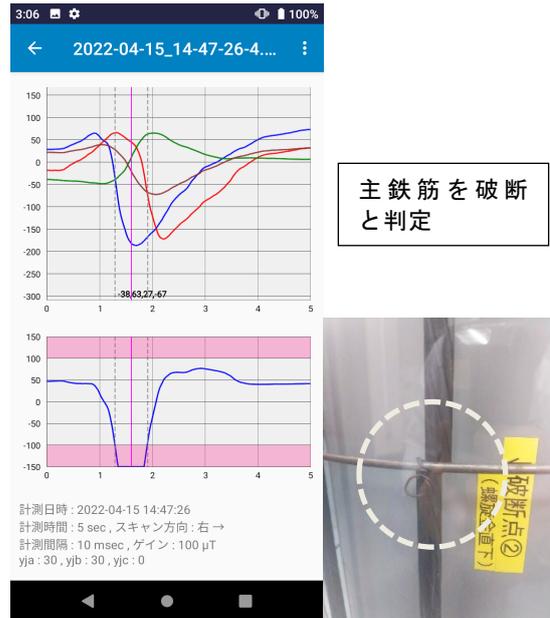


図10 螺旋筋直下の主鉄筋模擬破断の測定例

### (2) 主鉄筋直上の螺旋筋が破断している場合

主鉄筋には破断が無く、主鉄筋と交差する箇所螺旋筋のみが破断している場合の測定例として測定結果と該当部分の写真を図11に示す。

主鉄筋上を走査しているため、主鉄筋と螺旋筋が交差する部分は磁束密度が局所的に変化するため、部分的に1次スクリーニングで検出されているが、S3、S4のY軸方向の磁束密度の変化が小さいため2次スクリーニングでは破断として検出されないことを確認した。

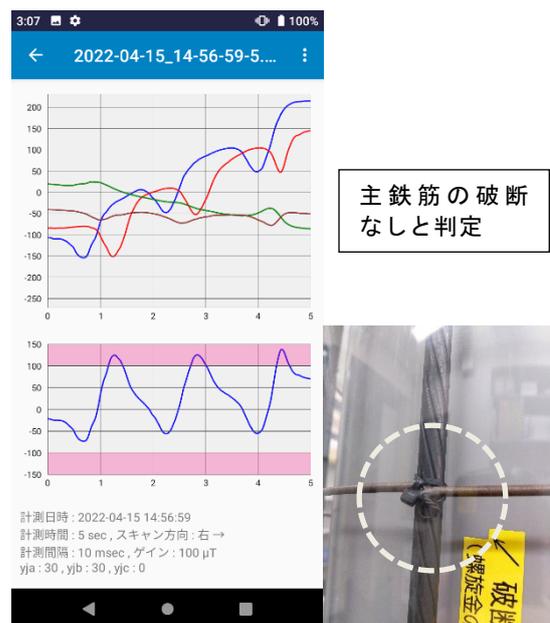


図11 主鉄筋直上の螺旋筋模擬破断の測定例

## 6. まとめ

当社が 2004 年から販売を開始した鉄筋破断診断機「CPチェッカー」において、最新型の磁気センサである TMR センサを活用し、高性能な鉄筋破断診断を実現した「新型CPチェッカー」を開発した。実際のコンクリート柱を忠実に再現したモックアップを作成して各種模擬破断の測定結果について性能評価を行った結果、従来のCPチェッカーよりも詳細に破断診断できることを確認した。

今後、製品の量産化を進めて行き、現在のCPチェッカーの後継機種として販売する予定である。

### 【参考文献】

- 1) (株)四国総合研究所：「コンクリート柱用鉄筋破断非破壊診断装置 CPチェッカー-MBT」, CPチェッカー-MBT取扱説明資料(2022)
- 2) 大日コンクリート工業(株)：「コンクリートポール点検手引書」, 大日コンクリート工業(2017)
- 3) 上庄拓哉ら：「コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術」, NTT 技術ジャーナル 2021.4 (2021)
- 4) 四国電力(株)：「旧規格電柱の折損事故とその対策について(電柱の点検等の実施に係る国からの指示について)」, 四国電力プレスリリース(平成18年12月8日)(2006)
- 5) (株)四国総合研究所：「CPチェッカー-MBT簡易操作説明資料」, CPチェッカー-MBT製品資料(2019)
- 6) 上田洋、工藤輝大、佐々木孝彦「コンクリート電柱の劣化診断と維持管理」, 鉄道総研報告, 第18巻, 第10号, pp.3-8(2004)