

# 論文 橋梁床版内の PC 鋼材破断検出のための漏洩磁束法による車両走行着磁と計測に関する研究

白石 浩造\*1

**要旨:** 本研究では、経年や疲労および塩害等による劣化が懸念されている高速道路橋上の床版における PC 鋼材破断を検出するため、大型電磁石搭載型牽引車両を使用した着磁や、大型計測器を使用した漏洩磁束計測作業の効率化を中心に検討を実施した。その結果、速度 50km/h で車両走行しながら着磁や計測が可能であること、電磁石や計測器から PC 鋼材が 300~500mm 離れた状態でも破断が検出できる可能性があることなどを明らかにした。

**キーワード:** 漏洩磁束法, 橋梁, 床版, PC 鋼材, 非破壊検査, 車両走行, 電磁石

## 1. はじめに

コンクリート内部の鋼材の破断検知を調査する非破壊検査技術として、図-1 に示すように鋼材を磁化させた際に鋼材破断位置で漏洩磁束が急変することを利用した漏洩磁束法による手法があり、これまで、汎用的な鋼材破断非破壊検査装置をはじめ、コンクリート柱専用の簡易型検査装置などの開発が行われている<sup>1)~4)</sup>。本論文は、道路橋の PC 橋に配置された PC 鋼材調査への漏洩磁束法による破断検知手法の適用を積極的に進めることから、着磁・計測の合理化の研究を行ったものである。

これまでの筆者らの研究において、漏洩磁束法に関して、道路橋床版への適用について検討を進めてきており、大型電磁石を使用した人力による床版への着磁方法や、漏洩磁束の手動計測による床版内部の PC 鋼材の破断検出についての良好な効果が確認できたことから、本研究では「漏洩磁束法による車両走行計測」に関する研究(以下、本研究)として、大型電磁石搭載型牽引車両を使用した着磁および、大型計測器を使用した漏洩磁束計測作業の効率化の検討について得られた結果について述べる。

## 2. 試験機材の概要

### 2.1 大型電磁石を搭載した牽引車両

約 3t の大型電磁石を吊り下げた状態での着磁走行(電磁石 ON かつ最高 50km/h)や、一般道や高速道路上での移動走行(電磁石 OFF かつ最高 90km/h)を実現するため、図-2 に示すように車両母体にトレーラを採用した大型電磁石搭載型牽引車両を製作した。さらに、様々な着磁や計測条件に対応するため、着磁の高さや方向を簡便に変更できる電動の上下・旋回装置等を設置した。



図-2 大型電磁石搭載型牽引車両(検査車両)

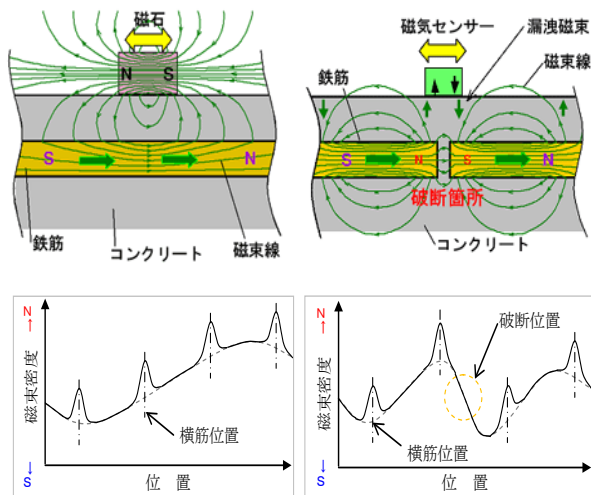


図-1 漏洩磁束法による鉄筋破断診断の原理

### 2.2 漏洩磁束測定用の大型計測器

大型電磁石の着磁により発生する漏洩磁束を広範囲に測定するため、図-3 に示す磁気センサ 15 個を最大 100mm おきに配置、かつ計測高さを自由に調整できる大型計測器(最大計測幅 1.4m)を製作し、大型電磁石搭載型牽引車両の後部に接続できるようにした。なお、大型計測器には漏洩磁束測定の際に必要な走行距離を得るための車輪を取付けているが、高速道路上を車線規制なしに計測走行する際には走行用以外の車輪は容易に使用できないため、本研究の車両計測技術の開発のための実験装置として製作したものである。

\*1 (株) 四国総合研究所 産業応用技術部 主席研究員 工博(正会員)

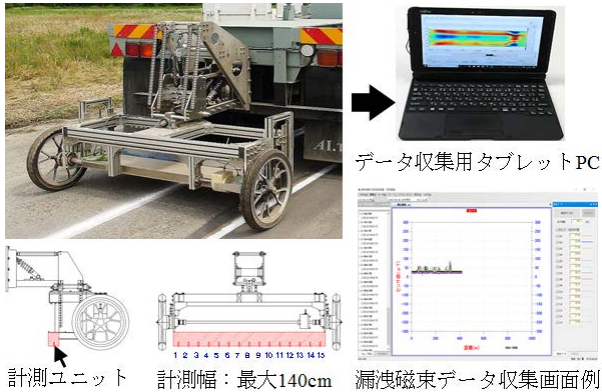
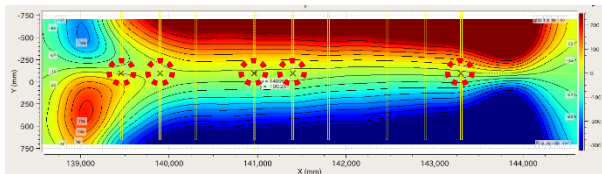


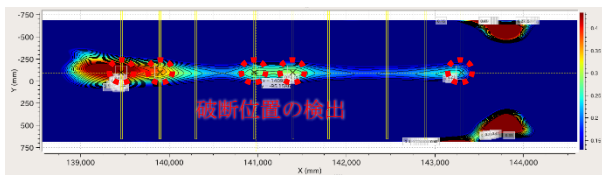
図-3 漏洩磁束測定用大型計測器

### 2.3 信号処理による破断検出の効率化

PC 鋼材の破断位置においては、鋼材方向に対して漏洩磁束が急変するため、破断位置の検出には微分演算の適用が有効である。測定で得られるデータについては、磁気センサの配置方向に対して 100mm 間隔の離散的なデータであるため、スプライン補間による計測データの連続化、バンドパスフィルタによる不要な信号の除去を行い(図-4(1))、微分演算(差分)を適用可能とした。微分演算によって得られた漏洩磁束の変化率を計測した平面上にプロットし、コンター図を作成することで、鋼材破断位置の検出の効率化を行った(図-4(2))。



(1) 着磁データ(補間+バンドパス)



(2) 微分演算後(着磁データを微分)

図-4 微分演算(差分)による破断位置の検出

### 2.4 供試体(床版)の概要

PC 鋼材の破断を模擬するため、表-1 に示す PC 連続合成桁床版を模擬した供試体 1 (図-5) と、横締め PC 床版を模擬した供試体 2 (図-6) を製作した。それぞれ橋軸方向の PC 鋼材 7 本(PC 鋼棒, PC 鋼線, PC より線)と、橋軸直角方向の PC 鋼材が 3 本×3 組(PC 鋼棒, PC 鋼線, より線)が挿入可能であり、PC 鋼材の種類や挿入方向の違いが着磁や破断検出等に及ぼす影響を確認できるようにした。さらに、様々な破断を模擬するため、供試体ごとにそれぞれ全 10 パターンの破断を作成して PC シース内に挿入できるようにした。なお、両供試体とも PC シース芯のかぶりを 100mm とした。

表-1 供試体の緒元

供試体 No.	供試体 1	供試体 2
模擬床版名	PC 連続合成桁床版	横締め PC 床版
外形寸法	L5.0×W5.5×T0.25m	L5.0×W5.5×T0.25m
PC シース	7 本(橋軸方向)	3 本(橋軸直角方向)×3 組
外形寸法	L5.0×W5.5×T0.25m	L5.0×W3.0×T0.25m
PC かぶり	100mm	100mm
鉄筋量	213kg/m <sup>3</sup>	230kg/m <sup>3</sup>
挿入する PC 鋼材	PC 鋼棒(Φ32) PC 鋼線(12Φ7) PC 鋼より線(IS28.6) <鋼材比 <sup>①</sup> 約 150mm>	PC 鋼棒(Φ32) PC 鋼線(12Φ7) PC 鋼より線(IS28.6) <鋼材比 <sup>①</sup> 約 500mm>

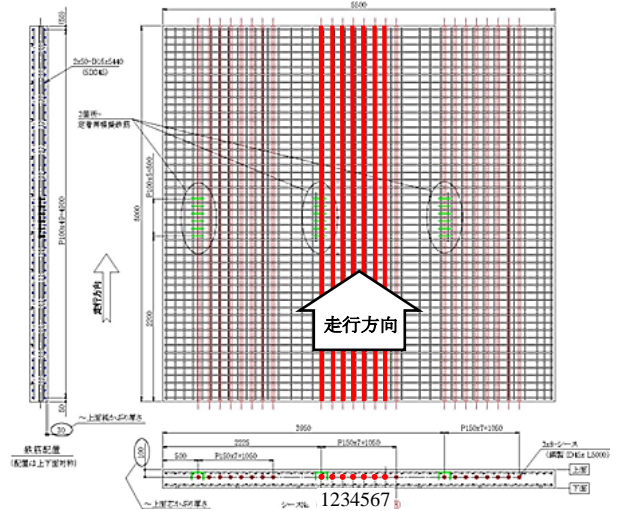


図-5 供試体 1 (PC 連続合成桁床版を模擬)

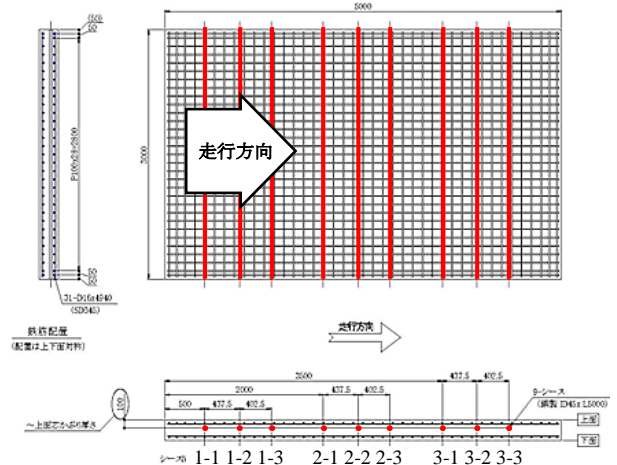


図-6 供試体 2 (横締め PC 床版を模擬)

### 2.5 走行試験路の概要

検査車両による PC 床版の着磁走行や PC 鋼材からの漏洩磁束の計測走行を実現するため、図-7 に示す走行試験路を設置した。「供試体 2」→「供試体 1」→「金属継手を模擬した金属板」を走行試験路の試験区間に埋設しており、供試体上には実橋梁を模擬するため、厚さ 100mm のアスファルトを敷設した。さらに、検査車両が供試体上を通過する際に最高速度 50km/h を満たす必要



があるため、試験区間を含む全長 270m の直線道路を整備した。また、検査車両の転回場所や PC 鋼材交換用ピット、および着磁された PC 鋼材の脱磁などを実施するための作業スペースを設けた。

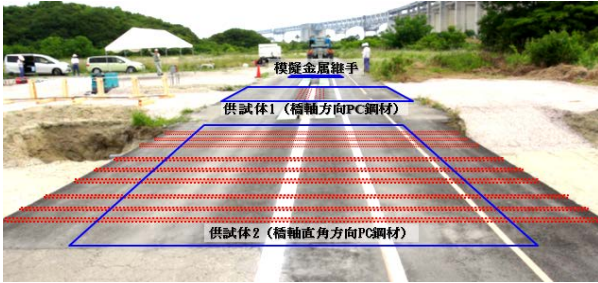


図-7 走行試験路

### 3. 供試体を用いた漏洩磁束法の車両走行計測

#### 3.1 着磁+計測の同時実施による影響確認

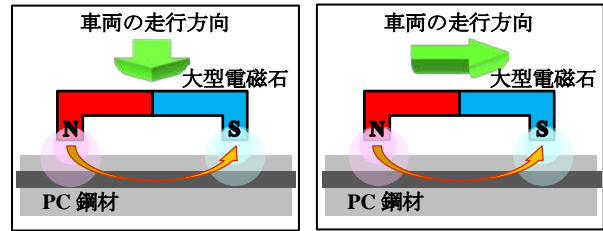
図-2 で示したように、本研究にて製作した検査車両は大型電磁石の後方に大型計測器を配置することで、着磁と計測を同時に実施することが可能である。しかし、同時の場合、着磁の強力磁界が計測に悪影響を与える可能性があるため、着磁と計測を個別に実施した場合のコンター図（一階微分）と比較評価した。

橋軸直角方向の PC 鋼材（図-8(1)：大型電磁石を橋軸直角方向に固定して着磁走行した場合）については、図-9 に示すように個別実施に比べて同時実施の破断箇所の色合いが薄くなっており、検出感度は低下するが 5 箇所の破断検出に与える影響が軽微であることがわかる。ただし、破断検出の際は図-9 の赤い点線で囲んだ領域において、着磁された供試体（鉄筋）末端部からの磁束変化の重なりにより、鋼棒の破断は強調され、より線の破断は抑圧されて表示されることに注意する必要がある。

橋軸方向の PC 鋼材（図-8(2)：大型電磁石を橋軸方向に固定して着磁走行した場合）については、図-10(1) に示すように同時実施の場合は 4 箇所の破断すべてが検出不能であり、同時実施が破断検出に与える影響が大きいことがわかる。これは、大型電磁石からの磁場が前後方向に広がっており、後部にある大型計測器付近の磁場に大きな影響を与えているものと考えられる。

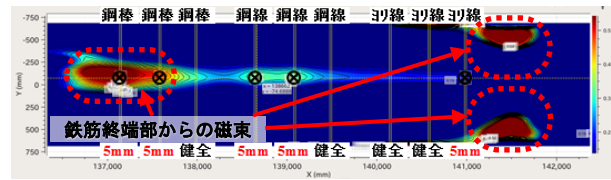
なお、個別実施の場合（図-10(2)）においても、2 箇所の破断が検出できておらず、本研究における橋軸方向の着磁方法では「橋軸方向の残留磁化が弱い」、「上下方向の残留磁化がノイズ源になっている」といった問題が発生している可能性が高い。

また、破断の検出感度の違いについては、表面積の大きい鋼線やより線の破断は検出でき、表面積の小さい鋼棒の破断が検出困難となったと考えられるが、PC 鋼材への着磁メカニズムとの関係が証明されていないため、磁場解析シミュレーション等による確認が必要と思われる。

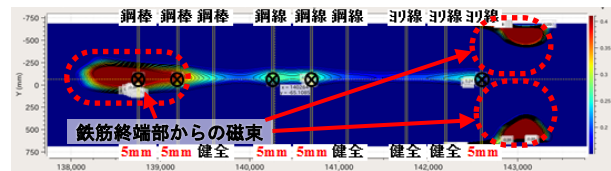


(1) 橋軸直角方向の鋼材 (2) 橋軸方向の鋼材

図-8 PC 鋼材と着磁方向



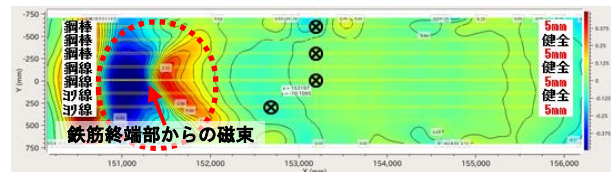
(1) 着磁+計測 同時実施 ⊗: 破断箇所



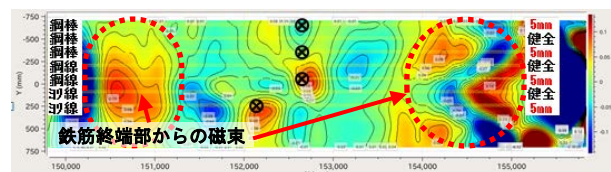
(2) 着磁, 計測 個別実施 ⊗: 破断箇所

図-9 着磁+計測 同時走行の影響確認

(橋軸直角方向 PC 鋼材：微分)



(1) 着磁+計測 同時実施 ⊗: 破断箇所



(2) 着磁, 計測 個別実施 ⊗: 破断箇所

図-10 着磁+計測 同時走行の影響確認

(橋軸方向の PC 鋼材：微分)

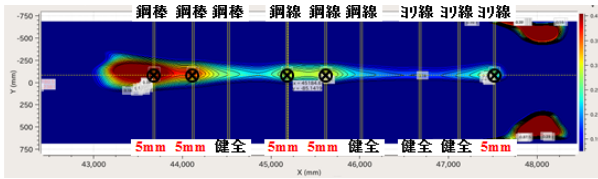
#### 3.2 着磁・計測走行時における各種試験条件の確認

着磁・計測走行時における走行速度や PC 鋼材との距離等の試験条件が破断検出に与える影響を確認するため、橋軸直角方向の PC 鋼材（供試体 2）を対象に、以下の各種試験条件に応じた試験を実施した。

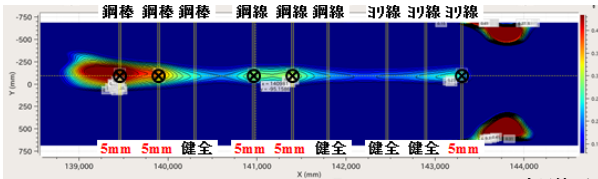
##### (1) 走行速度が計測等に与える影響の確認

高速道路上を車線規制なしに着磁走行や計測走行するためには、速度 50km/h 以上で走行する必要がある。そこで、供試体 2 上を速度 5km/h と 50km/h で走行した場合のコンター図を図-11 に示す。同図より速度 50km/h で走行した場合のコンター図は 5km/h とほとんど変わっておらず、破断の検出感度が同等であることがわかる。

なお、速度 50km/h での着磁や計測の走行事例は海外の論文等でも発表されていないため、本研究が初めての試みとなった。



(1) 走行速度 5km/h



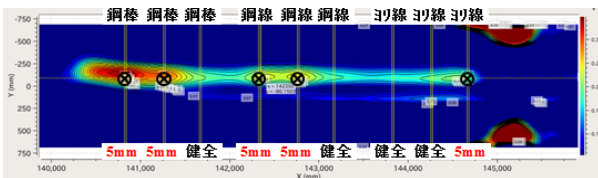
(2) 走行速度 50km/h

図-11 走行速度が計測等を与える影響の確認  
(橋軸直角方向 PC 鋼材：微分)

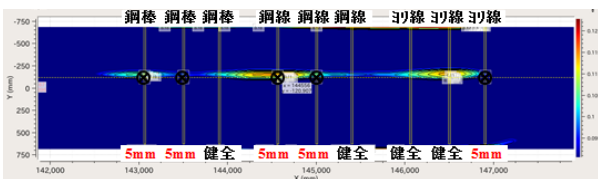
(2) PC 鋼材の距離が計測等を与える影響の確認

本研究で製作した供試体の PC かぶりやアスファルト厚をそれぞれ 100mm としたが、実橋梁ではこれよりも厚いケースが存在する可能性がある。また、今回は大型電磁石や大型計測器の基準高さを舗装面から 100mm に設定したが、高速道路上の起伏や傾斜等を考慮するとより高い方が望ましい。

そこで、大型電磁石や大型計測器から PC 鋼材までの距離が着磁や計測に与える影響について調査した。図-12 に PC 鋼材との距離を 300mm (基準値) と 500mm にした場合のコンター図を示す。大型計測器が PC 鋼材から離れると感度が急激に下がる傾向にあるが、PC 鋼材との距離が 500mm の場合でも破断を検出できる可能性があることを確認した。



(1) PC 鋼材との距離：300mm (基準値)



(2) PC 鋼材との距離：500mm

図-12 PC 鋼材の距離が計測等を与える影響の確認  
(橋軸直角方向 PC 鋼材：微分)

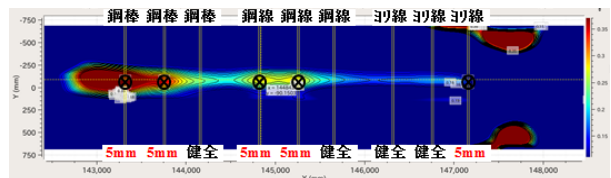
なお、通常の漏洩磁束法において鉄筋破断を検出できる距離 (コンクリートのかぶり) は約 160mm が限界<sup>1)</sup>とされており、それを大幅に上回る研究成果となった。おそらく、大型電磁石による広範囲の磁束が距離の離れた PC 鋼材の着磁にも有効であることが原因と思われる。

(3) 着磁電流が計測等を与える影響の確認

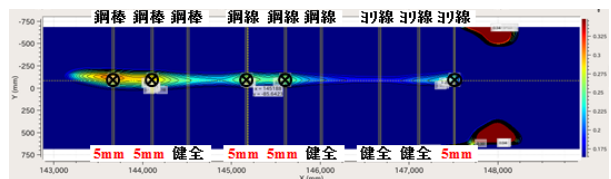
本研究の着磁に使用している大型電磁石については、着磁電流の最大値が 45A かつ最大 1 時間の通電を可能 (通電時間が長いと大型電磁石の耐熱温度 60℃以上に温度が上昇する) とするため重量が約 3t となっているが、軽量化することができれば実用化の際において検査車両の設計自由度を広げることができる。

そこで、着磁電流が着磁や計測に与える影響について調査した。図-13 に着磁電流を 40A と 5A とした場合のコンター図を示す。同図より着磁電流 5A では破断検出感度が低下しているように見えるが、ノイズ信号も低下するため、破断検出が十分可能であることがわかった。

仮に、着磁電流 10A での実用化を想定した場合、コイル線径を着磁電流に比例して細くしてもコイルからの発熱を抑えられるとともに、着磁電流に比例した磁束が発生するため、電磁石内の磁束の通り道である鉄芯の重量も着磁電流に比例して軽くすることができることから、大型電磁石の重量を現状の 1/3 以下にできる可能性が高いことがわかった。



(1) 着磁電流：40A



(2) 着磁電流：5A

図-13 着磁電流が計測等を与える影響の確認  
(橋軸直角方向 PC 鋼材：微分)

(4) 着磁回数が計測等を与える影響の確認

PC 鋼材への着磁を強化する方法として着磁回数を増加させる方法が考えられる。

そこで、着磁回数等が着磁や計測に与える影響について調査した。図-14 に着磁回数を 1 回と 3 回にした場合のコンター図を示す。同図より着磁を 3 回実施しても PC 鋼材への着磁強度を増加させることができないことがわかった。



本試験結果から、大型電磁石からの磁束強度が PC 鋼材内の飽和磁束と同等あるいはそれ以上の強度であるため、着磁回数を増加させても着磁強度が増加しなかったと考えられる。

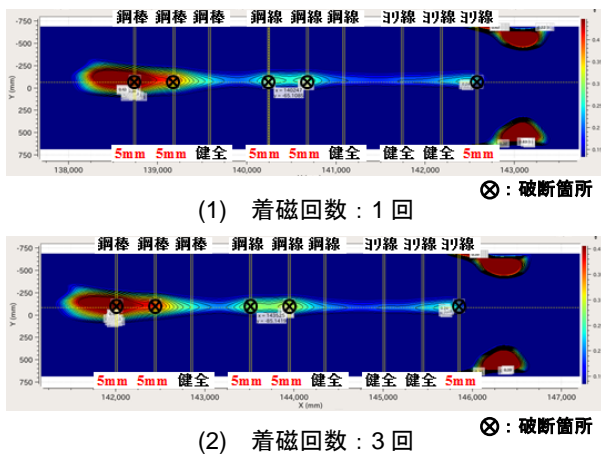


図-14 着磁回数が計測等と与える影響の確認  
(橋軸直角方向 PC 鋼材：微分)

#### 4. 実橋梁における漏洩磁束法の車両走行計測

##### 4.1 着磁走行・計測走行可否の確認

実橋梁における着磁や計測走行の問題点を確認するため、旧虻田洞爺湖 IC の実橋梁（以下、本実橋）を対象に着磁走行と計測走行を実施した。ただし、本実橋において PC 鋼材の破断等は発生していないと思われることや破断検出対象としている床版とは異なる構造(PC 中空床版橋)であることなどから、実橋梁上での着磁や計測走行可否の確認を主目的とした。

図-15 に実橋梁での検査車両の走行状況を示すとともに、図-16 に PC 鋼材の配置図（コンター図と比較するため、図面を左右反転している。）と図-17(1)に着磁走行後中央（センターライン上）のコンター図を示す。本実橋は橋軸方向の PC 鋼材（PC 鋼線）であるが、橋梁の両端部と中央部において PC 鋼材が路面に近づく構造となっているため、コンター図の両端部と中央部において着磁が強くなっていることがわかる。本着磁状態では PC 鋼材全体が道路面に垂直方向（S 極）に着磁されるため、橋軸（水平）方向の着磁の障害となるため、特に本実橋のように PC 鋼材の距離が変化する場合、破断の検出が困難になる可能性が高い。



図-15 実橋梁（旧虻田洞爺湖 IC）での走行状況

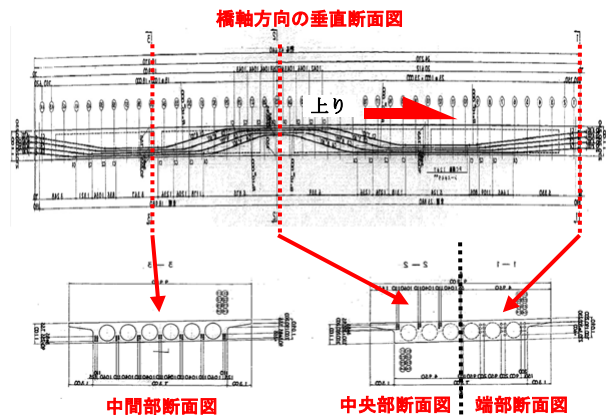


図-16 実橋梁（PC 中空床版橋）における PC 鋼材の配置図（左右反転）

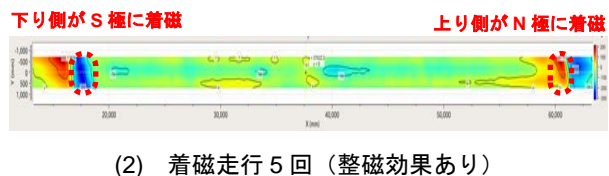
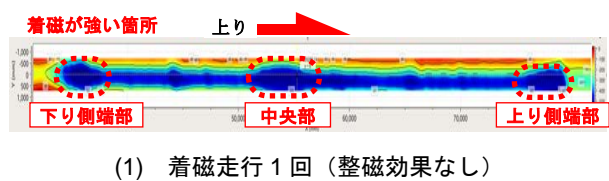


図-17 実橋梁中央における整磁効果の確認  
(橋軸直角方向 PC 鋼材：微分なし)

そこで、通常の PC 鋼材の破断検出に有効とされている整磁方法を実橋梁の着磁走行にも応用し、道路面に垂直方向の着磁の影響を軽減する処理を実施した結果、図-17(2)のコンター図に示す通り、PC 鋼材を橋軸方向のみに着磁することに成功した。ただし、現状では整磁を実施するためには、図-18 に示すように複数回着磁走行を実施する必要があるため、今後 1 回の着磁走行のみで整磁効果を得る方法の検討が必要となる。

以上の結果から、実橋梁においても着磁走行や計測走行が問題なく実施できることが確認できた。

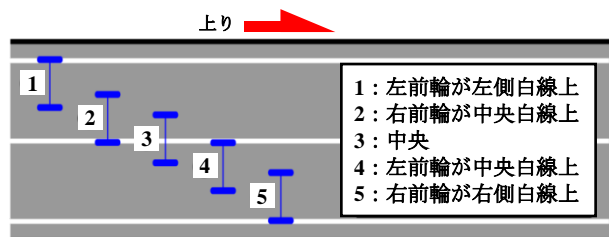


図-18 実橋梁における整磁の手順例

なお、橋軸方向の PC 鋼材全体が道路面に垂直方向に着磁される現象は供試体を使用した試験でも見られたが、試験走行路上では図-18 に示すようなコース取りが不

可能であったため、本実橋のみでの試験結果となった。

#### 4.2 大型電磁石や外部設備等の影響確認

大型電磁石による実橋梁上の金属継手や壁高欄等の外部設備等への影響を調査した結果、磁極から約 1m の範囲にある小さな金属片が吸着される可能性はあるが、無線設備等を含む外部設備への実質的な悪影響がないことを確認した（図-19、表-2）。逆に、磁化された外部設備（路面を除く）や稼働中の無線設備等が計測に影響しないことも確認した（表-2）。



図-19 大型電磁石による外部設備等への影響確認例

表-2 大型電磁石や外部設備等の影響確認結果

大型電磁石による外部設備等への影響の確認結果	
壁高欄等	大型電磁石通過後に壁高欄やガードレール等を固定しているボルト等が緩んでいないことを確認
無線設備	大型電磁石通過時に、ラジオ・携帯・トランシーバの音声にノイズが乗らないことや音声が途切れないことを確認
車両走行	大型電磁石横の車両走行時に車のハンドルが取れたり、エンジン音に変化がないことを確認
ボルト等	固定されていない軽量のボルトや針金等が大型電磁石の磁極の 1m 以内に落ちている場合、磁極に吸着されることがあることを確認
磁化された外部設備等から計測への影響の確認結果	
壁高欄等	大型電磁石通過後の壁高欄やガードレール等の横を通過時に計測値が乱れないことを確認
無線設備	大型計測器が稼働中のラジオ・携帯・トランシーバの横を通過しても計測値が乱れないことを確認
車両走行	大型電磁石通過後の車両が計測器の横を通過時に計測値が乱れないことを確認
磁石等	永久磁石や磁化されたボルト等が大型計測器の下(路面)に落ちている場合、計測値が乱れることを確認

#### 5. 車両走行による漏洩磁束法の課題と対策

着磁や計測走行による橋軸直角方向や橋軸方向の PC 鋼材の破断検出に関する課題を抽出し、その対策について検討した。

・図-17(1)より、橋軸方向の PC 鋼材については、道路面に垂直方向の着磁が障害となっており、その対策として整磁が有効であることが実橋梁においても確認されたが、着磁走行を複数回実施する必要がある。この課題の対策として、電磁石を 2 台以上使用して着磁と整磁を行うことや電磁石の磁極間に磁気センサを

配置して計測することで、道路面に垂直方向の磁界の発生を抑制することができると考えられる。

・図-2 に示した大型電磁石搭載車両は、車両走行による PC 鋼材の破断検出手法の検証のための試作車両であり、大型で非効率的であるため、実橋梁での運用に向けてはさらなる効率化が必要である。3.2(3)で述べた電磁石の軽量化に加え、車両の改造登録が必須となるものの車幅から電磁石や計測機器がはみ出す構造や配置とすることで、車両のコンパクト化および計測の効率化が可能と考えられる。

#### 6. まとめ

本研究では、大型電磁石搭載型牽引車両を使用した着磁や、大型計測器を使用した漏洩磁束計測作業の効率化を中心に検討を実施した。その結果、速度 50km/h で車両走行しながら着磁や計測が可能であること、電磁石や計測器から PC 鋼材が 300~500mm 離れた状態でも破断検出できる可能性があることなどを明らかにした。

本研究は、NEXCO3 社の研究プロジェクトとして、(株) 四国総合研究所と (株) 高速道路総合技術研究所が実施したものであり、車両走行実験により床版横締め PC 鋼材の破断検出を可能とする着磁・計測技術を実現することができた。

今後は、本研究成果を基に、計測車両の開発製作と合わせて効果的な着磁方法についての高度な磁場解析シミュレーションの検証を進めることにより実用化が可能と考えられる。本論文がその一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 廣瀬誠，前田龍己，松田耕作，横田優，服部篤史，宮川豊章：磁気法による鉄筋破断非破壊検査における判定基準の構築，土木学会，構造工学論文集，Vol.58A，pp.867-878，2012.3
- 2) 廣瀬誠，青木圭一，宮川豊章：漏洩磁束法によるポストテンション橋における PC 鋼材破断調査，第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.467-470，2014.10
- 3) 廣瀬誠，木村美紀，萩原直樹，豊田雄介：ポストテンション橋およびプレテン橋における漏洩磁束法による PC 鋼材破断調査，第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.269-272，2016.10
- 4) 広瀬剛：高速道路橋の大規模更新・修繕に関する研究の取組みと今後の展望，コンクリート工学，Vol.54，No.1，2016