

## グラウト充填不足部腐食PC鋼材の漏洩磁束法での検知と梁耐荷性能への影響

京都大学  
京都大学  
(株) 四国総合研究所 正会員  
京都大学 正会員

○加藤 亮平  
中森 翔大  
廣瀬 誠  
山本 貴士

Abstract : This paper presents the load-carrying behavior of post-tensioned PC beams with the corroded PC strand in the un-grouted region. Experimental results revealed that the load-carrying behavior of the corroded PC beam depended on the difference of the location of un-grouted region and the amount of corrosion, while the stiffness was not affected significantly. The corrosion detection of the PC strand in the un-grouted region was also examined by the magnetic flux leakage method. The possibility that could detect a section loss of the PC strand without the complete fracture by the magnetic flux leakage method was provided.

Key words : Post-tensioned PC beam, Corrosion of PC strand in un-grouted region, Load-carrying capacity, Magnetic flux leakage method

## 1. はじめに

PC 構造は適切な設計, 施工, 維持管理のもとでコンクリート自体の高い耐久性が発揮され, 構造物に長期の耐久性を持たせることができる。しかし, とくに高度経済成長期に建設された構造物で, ひび割れや剥離といった変状や劣化が報告されている<sup>1)</sup>。ポストテンション方式 PC 構造物特有の劣化現象として PC 鋼材とグラウトに関連するもの, および定着部と偏向部の劣化が挙げられる。ノンブリーディングタイプのグラウト開発やグラウト施工技術の発展以前では, シース内にグラウトを完全に充填できていなかった可能性があり, このような原因で生じたグラウトの充填不足と塩害や中性化などの劣化要因が組み合わさると, 定着部を含めた PC 鋼材の腐食が加速する恐れがある。

また, グラウト充填不足部に飛来塩分や凍結防止剤の塩化物イオンが侵入して PC 鋼材に腐食が生じた場合, PC 鋼材とシース間に空隙が存在するため, PC 鋼材の腐食膨張圧がコンクリートに伝わりにくいことに起因して, 構造物表面にひび割れが現れない可能性が指摘されている<sup>2)</sup>。そのため, 外観上に変化が見られないまま PC 鋼材の腐食が進行し, PC 鋼材の破断に至る危険がある。PC 鋼材の腐食あるいは破断を検知する手法として, 本研究では, 非破壊検査手法の一つである漏洩磁束法に着目した。漏洩磁束法は, 鋼材が強磁性体である一方で, コンクリートはほぼ非磁性体であることに着目した検査手法である。対象鋼材を着磁し, 磁気計測ユニットを用いて磁束密度分布を計測する。鋼材が破断している場合, 着磁することにより破断部が磁極となり, 磁束密度グラフに N-S 極の連続したピークを持つ S 字波形として表れる<sup>3)</sup>。

一方, グラウト充填不足部で PC 鋼材の腐食がポストテンション PC 部材の曲げ剛性および曲げ耐力に与える影響は不明な点が多いのが現状である<sup>4) 5)</sup>。また, PC 構造の耐荷性能を維持するためには, PC 部材の耐力に最も影響を与える PC 鋼材の腐食もしくは破断を検知し, 対策を施すことがきわめて重要である。

そこで本研究では, ポストテンション方式 PC 梁部材を対象として, グラウト充填不足部で PC 鋼より線を腐食させた PC 梁供試体の曲げ耐荷特性を明らかにすることを目的とした。あわせて, 漏洩磁束法を用いたグラウト充填不足部での PC 鋼より線の腐食検知の可能性を検討した。

表-1 PC鋼材の物理および力学的性質

公称直径	公称断面積	単位質量	降伏強度	破断荷重	引張強度	弾性係数
[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[g/m]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]
12.7	98.7	774	1.58	188	1.9	191

表-2 グラウトおよびコンクリートの力学的性質

グラウト	コンクリート			
	圧縮強度	弾性係数	引張強度	曲げ強度
[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
34.7	60.7	36.0	4.54	4.6

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体

PC鋼より線の物理および力学的性質を表-1に、グラウトおよびコンクリートの力学的性質を表-2に示す。コンクリートは、水セメント比40%、目標配合強度 $f_{cr}=40\text{N/mm}^2$ の配合とした。供試体の形状、寸法を図-1に示す。供試体は、幅×高さ(有効高さ)×全長(スパン長)=100×200(133)×1600(1400)mmの矩形断面PC梁とした。φ12.7mmの7本よりPC鋼より線(SWPR7BN)を鋼製シース内に1本配置し、ポストテンション方式により緊張力を導入した。PC鋼より線に与える緊張力は、引張強度の約70%の138kN、プレストレスは断面下縁の目標応力9.8N/mm<sup>2</sup>とする三角形分布を与えた。

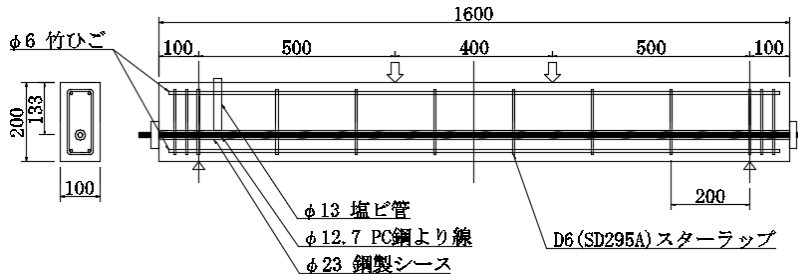


図-1 供試体形状、寸法

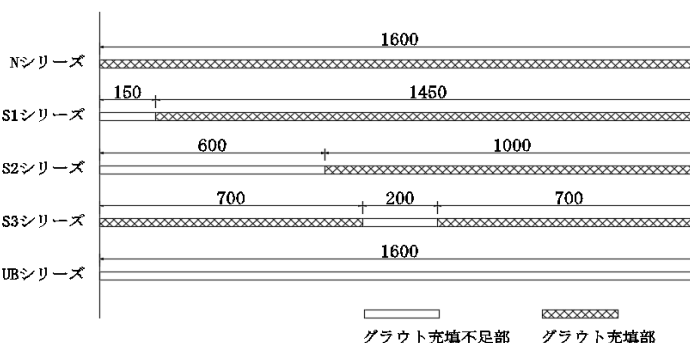


図-2 グラウト充填不足部一覧



図-3 ひずみゲージ設置図

2.2 実験要因

実験要因はグラウトの充填状況とPC鋼より線の腐食量の2点とした。グラウト充填不足部一覧を図-2に示す。グラウト充填不足部を設ける供試体では、グラウト充填時に供試体外部からシース内を目視観察し、グラウトの注入状態を確認するためのφ13mmの塩ビ管を鋼製シースに取り付けた。取り付けは、コンクリート打ち込み前に鋼製シースにグラインダーで切り込みを入れて設けた穴に2液型のエポキシ樹脂を用いて行った。

コンクリートの打ち込みの翌日に脱型し、2週間以上の散水湿布養生を行った。散水湿布養生後の供試体は、室内に静置した。PC鋼より線の腐食促進はグラウト充填不足部への塩水注入、もしくは電食で行った。塩水注入ではPC鋼より線の質量減少率が1~2%で素線が破断しない程度を、電食ではPC鋼より線の素線が破断する程度を目標とし、グラウト充填不足部のPC鋼より線の腐食促進を行った。

2.3 測定および荷重方法

図-3に示す位置のコンクリート表面にひずみゲージを貼り付け、ひずみの経時変化を測定した。電食によってグラウト充填不足部のPC鋼より線を腐食させる供試体では、電食開始後に永久磁石を内蔵した磁石ユニットを用いて、供試体の側面(かぶり50mm)からPC鋼より線を軸方向全長に1度だけ着磁を行った。その際、整磁を行うことでスターラップの影響をできるだけ抑制した。その後、PC鋼より線上のPC梁側面に垂直な方向成分の磁束密度分布<sup>3)</sup>を磁気計測ユニットを用いて計測した。また、電食によりグラウト充

填不足部の PC 鋼より線を腐食させた供試体で、PC 鋼より線の腐食状況を確認するため、X 線を用いて放射線透過写真の撮影を行った。載荷試験は図-1 に示す曲げスパン 400mm の対称 2 点 1 方向漸増繰返し曲げ試験とした。載荷試験終了後、PC 鋼より線を取り出し、除錆後、PC 鋼より線の直径を測定し、最小部の直交 2 方向の値の平均値を最小直径とした。

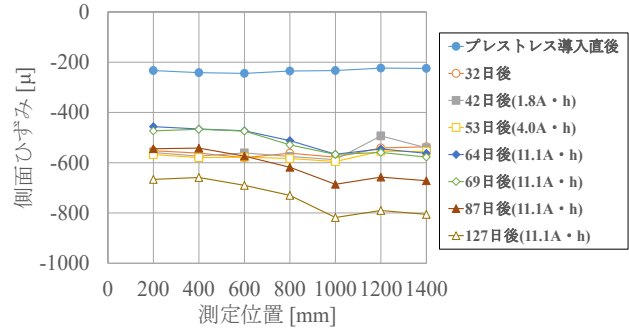


図-4 ひずみの経時変化 (S2-電食)

### 3. 実験結果および考察

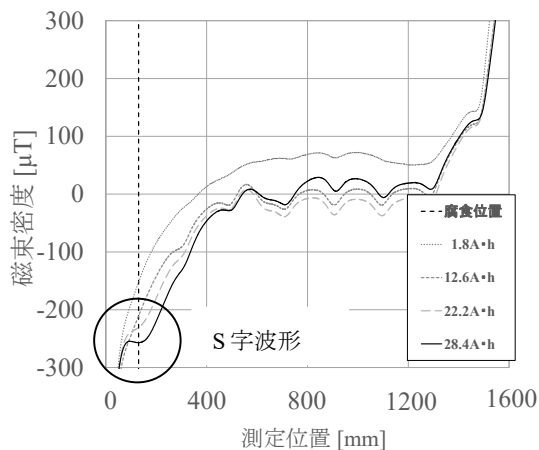
#### 3. 1 プレストレス導入および電食後のひずみの経時変化

グラウト充填不足部がせん断スパン全長 (S2 シリーズ) の電食供試体の側面ひずみの経時変化を図-4 に示す。グラウト充填不足部位 (測定位置 600mm まで) のひずみが電食開始から 64 日後までに、一度引張 (正) 側へ変化し、プレストレスが減少した。しかし、グラウト充填不足部との界面 (600mm) から 200mm 以遠では大きなひずみ変化がないことから、プレストレスの減少範囲は限定的になっていると考えられる。ほかの電食供試体でも、グラウト充填不足部の界面からのひずみの挙動は同様であった。なお、電食を停止した 64 日後以降は、クリープにより圧縮 (負) 側へひずみが増加した。

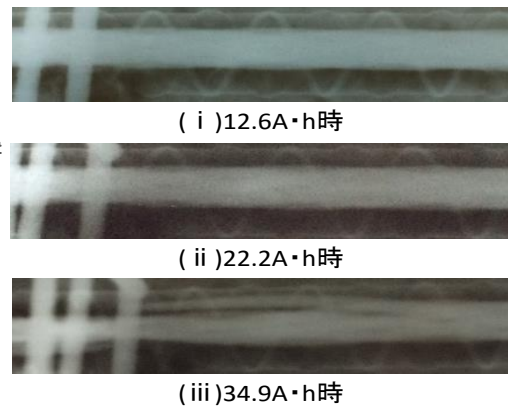
#### 3. 2 漏洩磁束法による PC 鋼より線腐食検知

グラウト充填不足部の PC 鋼より線を電食で腐食促進した供試体について、着磁後から電食終了後までの各積算電流量における磁束密度分布と X 線撮影結果を図-5 および図-6 に示す。X 線撮影結果より、PC 鋼より線が局所的に断面欠損しており、その位置で磁束密度分布に S 字波形が現れた。素線の破断にともない磁極が現れ、破断の本数が増えるにつれ磁極が明瞭になってきたものと考えられる。なお、腐食位置から離れた位置での周期的な波形はスターラップの影響と考えられる。このことから腐食により PC 鋼より線の素線が破断した場合でも漏洩磁束法で検知でき、素線破断の本数が増えるにつれて S 字波形のピーク差が大きくなることがわかった。S2-電食供試体の X 線撮影結果から、PC 鋼より線の腐食が進行し、素線が破断すると PC 鋼より線のよりが解放される様子が確認できた。

S3-電食供試体の X 線撮影結果で、陰極の銅板近くの PC 鋼より線の大きな断面欠損が確認できていない (部分グラウト注入用の穴より確認) 積算電流量 5.7A・h 時の段階で磁束密度分布に S 字波形を確認できた。



(a) 磁束密度分布



(b) X 線撮影結果  
(28.4A・h 時に撮影できなかったため)

図-5 磁束密度分布と X 線撮影結果 (S2-電食)

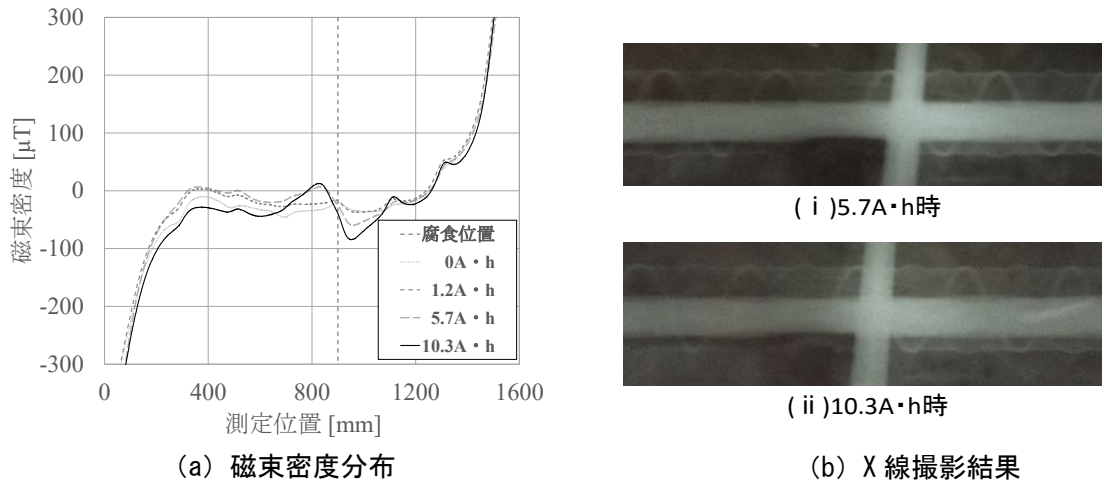


図-6 磁束密度分布とX線撮影結果 (S3-電食)

この供試体では、電食期間中プレストレスの大きな減少を示すひずみの増加が、側面、下縁ともに見られていないことから、PC鋼より線の断面欠損は小さい段階といえる。このことから、漏洩磁束法を用いることで、プレストレスの変化では捉えられない腐食量が小さい段階でも、PC鋼より線の断面欠損を検知できる可能性がある。ただし、側面かぶり 50mm での着磁および磁束密度測定で得られた結果であり、実際の PC 桁に相当するウェブの状況やかぶりでの検討が必要である。

### 3. 3 曲げ載荷試験

#### (1) 曲げひび割れ発生荷重から求めたプレストレス残存割合

各供試体の最小直径比 (最小直径/公称直径) とプレストレス残存割合の関係を図-7 に示す。プレストレス残存割合は、曲げひび割れ発生荷重から残存緊張力を計算し、導入直後の緊張力で残存緊張力を除すことで求めた。したがって、すべての供試体のプレストレス低下には、クリープおよび乾燥収縮による低下が含まれており、N シリーズ (健全) の供試体で約 85~90% の残存割合になっている。また、塩水注入によりグラウト充填不足部の PC 鋼より線を腐食させた供試体では、最小直径比が 0.9 以上あり、PC 鋼より線の腐食が軽微であった。塩水がシース内に滞水し、酸素の供給が十分でなかったため、グラウト充填不足部で PC 鋼より線の腐食が進行しにくい環境であったと考えられる。プレストレスの残存割合は、曲げひび割れ発生荷重から求めたものであるため、曲げスパン内の断面での残存割合を示している。一方、最小直径比は、必ずしも曲げスパン内でなく、スパン内の PC 鋼材の最小断面で測定したもので、プレストレス残存割合と最小直径比の関係は一对一の線形関係にない。とくに、定着部付近にグラウト充填不足がある S1 シリーズの供試体では、PC 鋼より線の断面欠損が残存プレストレスの低下に大きな影響を与えなかった。定着部付近で素線が破断するほどの大きな断面欠損を生じても、グラウト充填部で PC 鋼より線が再定着し、プレストレスの減少範囲が限定されたことで曲げひび割れ発生の対象となるスパン中央でのプレストレス低下が小さかったと考えられる。

一方、S2 シリーズと S3 シリーズの供試体は PC 鋼より線の断面欠損に伴ってプレストレス残存割合が大きく低下した。これらの供試体のグラウト充填部でも PC 鋼より線が再定着し、プレストレスの減少範囲は限定されているが、スパン中央で大きくプレストレスが減少しているため、

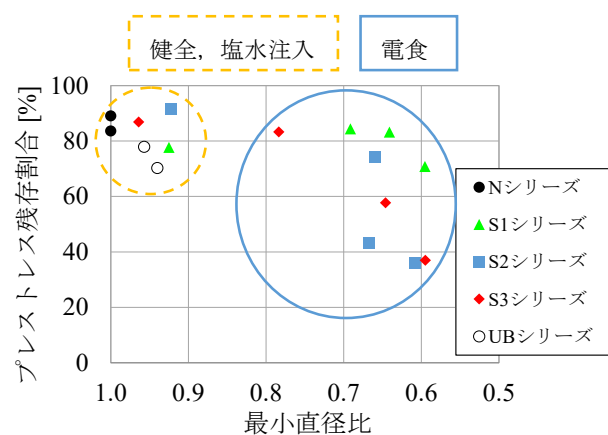


図-7 プレストレス残存割合

PC 鋼より線の断面欠損量が曲げひび割れ発生荷重から算定したプレストレス残存割合に大きな影響を与えたと考えられる。

(2) 荷重 - 変位関係に与える PC 鋼材腐食の影響

荷重 - 変位関係を図-8 に示す。多少のばらつきは認められるものの、グラウトの充填状況および PC 鋼より線の腐食状況にかかわらず、曲げひび割れ発生以前の曲げ剛性に明確な差は見られなかった。このことから、使用状態におけるたわみの変化から PC 鋼材の腐食位置や腐食量を判断することは困難だと考えられる。一方、腐食量の大きい電食供試体で、せん断スパン全長に充填不足部のある S2 シリーズ、および曲げスパンに充填不足部のある S3 シリーズの N シリーズからの耐力低下が大きい傾向にあった。また、塩水注入による腐食促進を行った腐食が軽微な段階の供試体では、アンボンドの UB 供試体の最大耐力が低い値となった。ただし、塩水注入により腐食促進を行った供試体の腐食量は 1%程度にとどまっており、健全より耐力が小さくなったことに対しては、グラウト充填不足部の影響が大きいと考えられる。ここで、載荷終了後のひび割れ性状を図-9 に示す。グラウト充填不足部が大きい、あるいは曲げスパンにあることで、ひび割れの分散性が低下している様子が伺える。また、腐食の軽微な塩水注入よりも腐食量の大きな電食供試体で PC 鋼より線の断面欠損が大きくなると、ひび割れ分散性がさらに低下しているようである。このことから、アンボンド区間が作用曲げモーメントの大きい部位にあると、PC 鋼より線の断面減少に加え、腐食によりひび割れの分散性がさらに低下したことで、曲げひび割れ断面の曲率が局所化し、その断面での上縁コンクリートの圧壊が先行して生じ、最大荷重が低下したと考えられる。

(3) 載荷時の磁束密度分布

電食で PC 鋼より線を腐食させた供試体で、破断音とともに荷重が低下し、しばらく荷重を維持した後、再び破断音とともに荷重低下を生じる現象が繰返し認められた。このことから、破断音とともに PC 鋼より線の素線破断が生じたものと推察される。そこで、この素線破断と見られる現象を確認するために、破断音後に磁束密度分布の測定を行った。例として、S2-電食供試体の載荷前、破断音後の磁束

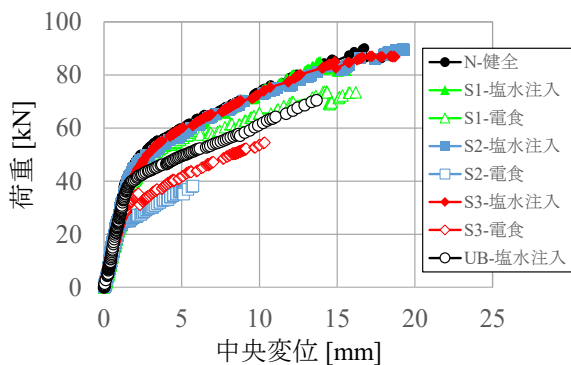


図-8 荷重-変位関係

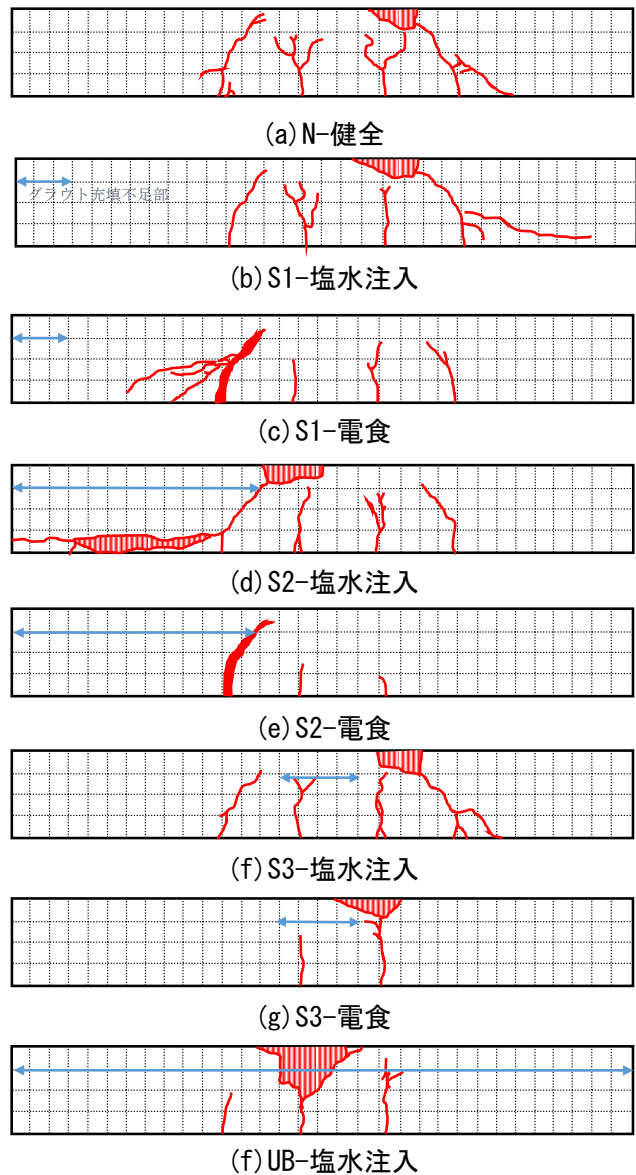


図-9 ひびわれ性状

密度分布を図-10 に示す。なお、載荷試験後に供試体を解体したところ PC 鋼より線は完全に破断されていた。この傾向は、電食で PC 鋼より線を腐食させたすべての供試体で見られた。このことから、漏洩磁束法で PC 鋼より線の断面欠損を素線単位で検知できる可能性がある。この結果から、実構造物において漏洩磁束法でグラウト充填不足部の PC 鋼材の腐食を検知し、グラウトを再注入するなどの補修を行った場合、磁束密度分布のデータを蓄積しておくことで、PC 鋼材の腐食抑制効果のモニタリングなどに適用できる可能性がある。

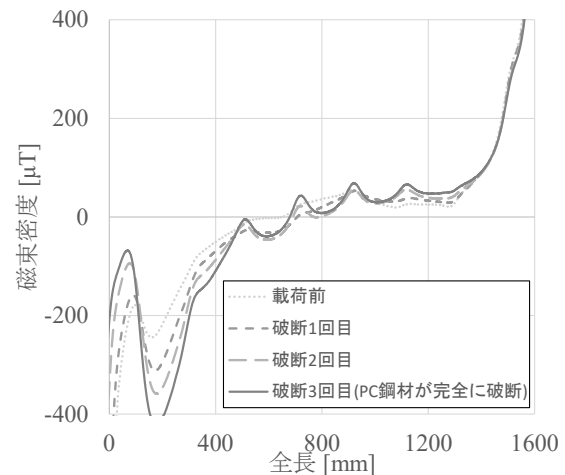


図-10 磁束密度分布の変化 (S2-電食)

#### 4. おわりに

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて本研究の結論とする。

- (1) グラウト充填不足部の PC 鋼より線の腐食が進行し、素線が破断する程度まで大きく断面が欠損すると、充填不足部位のプレストレスが大きく低下する。しかし、PC 鋼より線とグラウトの付着作用によりグラウト充填部で PC 鋼より線が再定着し、プレストレスの減少範囲は限定的となる。
- (2) PC 鋼より線のかぶり量が 50mm の条件下で、漏洩磁束法を用いることで、PC 鋼より線の断面欠損が小さく、プレストレスが大きく低下していない段階で腐食を検知することができた。また、断面欠損が大きくなるにつれて磁束密度分布の S 字波形のピーク差が大きくなった。ただし、実際の PC 桁の PC 鋼材の配置状況に対して、磁束密度変化の検知が可能であるか否かについてはさらに検討が必要である。
- (3) グラウト充填不足位置にかかわらず、PC 鋼より線の腐食が進行しても曲げひび割れ発生以前の曲げ剛性に明確な差は見られなかった。使用状態におけるたわみの変化から PC 鋼材の腐食位置や腐食量を判断することは困難であると考えられる。
- (4) グラウト充填不足区間が作用曲げモーメントの大きな部位に存在すると、腐食による PC 鋼より線の断面減少に加え、ひび割れの分散性がさらに低下したことで、曲げひび割れ断面の曲率が局所化し、その断面での上縁コンクリートの圧壊が先行して生じ、最大荷重が低下したものと考えられる。

#### 謝辞

研究の遂行にあたり、京都大学大学院工学研究科助教 高谷哲先生、(株)四国総合研究所 木村美紀氏にご協力を賜った。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 52, PC 構造物の現状の問題点とその対策, 2006
- 2) 鈴木佑典ら：ポストテンション式 PC 中のシースおよび PC 鋼材の腐食がひび割れに与える影響, 平成 22 年度土木学会関西支部年次学術集, V-31, 2010.5
- 3) 廣瀬誠ら：漏洩磁束法によるポストテンション実橋における PC 鋼材破断調査, プレストレストコンクリート工学会 第 23 回シンポジウム論文集, 2014.10
- 4) 阪上啓介祐ら：PC 曲げ部材の耐荷性能に与える PC 鋼材腐食の影響, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, V-619, pp1237-1238, 2002.9
- 5) Lin AN ら：EFFECT OF GROUTING VOID ON ULTIMATE TENDON STRESS IN POST-TENSIONED CONCRETE MEMBER, コンクリート工学年次論文集, Vo-25, No.2, pp751-56, 2003.7