

電磁誘導加熱による PC 電化柱の耐震補強工法の開発

土井 至朗*¹・西村 知晃*²

概 要

大規模地震により PC 電化柱が被害を受け、鉄道の早期運行再開の妨げとなる事例が多く見られたことから、PC 電化柱の耐震補強工法の開発に着手した。本工法では、PC 鋼線が高温履歴を受けると降伏強度が下がる性質を利用し、電磁誘導加熱装置を用いて試験体内部の PC 鋼線の降伏強度を部分的に下げることで塑性ヒンジを形成し、電化柱の脆性破壊を防ぐ工法である。要素試験として、電磁誘導加熱装置でコンクリート内部の PC 鋼線を加熱する実験を行った結果、PC 鋼線の降伏強度を規格値の約 1/2 まで下げることができ、塑性ヒンジ形成の可能性が確認できた。

キーワード：地震対策，変形性能向上，PC 鋼線

DEVELOPMENT OF A SEISMIC RETROFIT TECHNIQUE FOR PRESTRESSED CONCRETE
POWER POLES USING ELECTROMAGNETIC INDUCTION HEATINGShiro DOI*¹, Tomoaki NISHIMURA*²

Abstract

In view of the numerous documented instances of damage to prestressed concrete (PC) power poles in major earthquakes, which have hindered the timely resumption of railway operations, we have initiated the development of a seismic retrofit technique for PC power poles. This technique exploits the property of PC steel wires to lose yield strength when exposed to high-temperature conditions, and employs an electromagnetic induction heating device to partially reduce the yield strength of the PC steel wires within the test specimen. This process forms a plastic hinge and prevents brittle fracture of the power pole. As an element test, PC steel wires inside concrete were heated using an electromagnetic induction heating device. The results demonstrated that the yield strength of the PC steel wires could be reduced to approximately half of the standard value, thereby confirming the possibility of plastic hinge formation.

Keywords: Seismic countermeasures, Improved deformation performance, PC steel wires

*1 Foundation / Structure Group, Research & Development Center

*2 Manager, Foundation / Structure Group, Research & Development Center

電磁誘導加熱による PC 電化柱の耐震補強工法の開発

土井 至朗*1・西村 知晃*2

1. はじめに

大規模地震による鉄道施設の被害では、高架橋等の本体構造物の損傷だけでなく、PC 電化柱の折損・傾斜も多く見られ、鉄道運行の早期再開のために PC 電化柱の地震対策が求められている。地震対策として PC 電化柱から鋼管柱への取替えが考えられるが、対策が必要な電化柱の数量が非常に多いことから、より迅速に対応を進めるために既存の電化柱への対策工法が既に開発されている¹⁾。この耐震補強工法は、電化柱を内部の PC 鋼線ごとワイヤーソーで切断した後、中空部分にモルタルを充填して鋼板巻き RC 構造に改築するものであり、電化柱の脆性的な折損を防止し、残留傾斜を抑制することができる。しかし、この工法では、壁高欄の改修も必要になる場合があることや、電化柱を切断した直後は構造上不安定になることが課題となっている。

そこで、PC 鋼線が高温履歴を受けることで降伏強度が下がる性質を利用し、電磁誘導加熱装置を用いて、加熱箇所の PC 鋼線の降伏強度を下げ、変形性能を向上させる新たな耐震補強方法の開発に取り組むこととした。

本検討では、まず PC 鋼線の加熱温度と機械的性質の関係を確認するために、PC 鋼線を電気炉内で加熱した要素試験¹を実施した。次に、電磁誘導加熱装置によるコンクリート内部の PC 鋼線の加熱の可否を確認するための要素試験²を行った。

2. 開発工法の概要

開発工法概念図を図-1 に示す。電化柱にはプレストレスが導入されており、地震時に電化柱

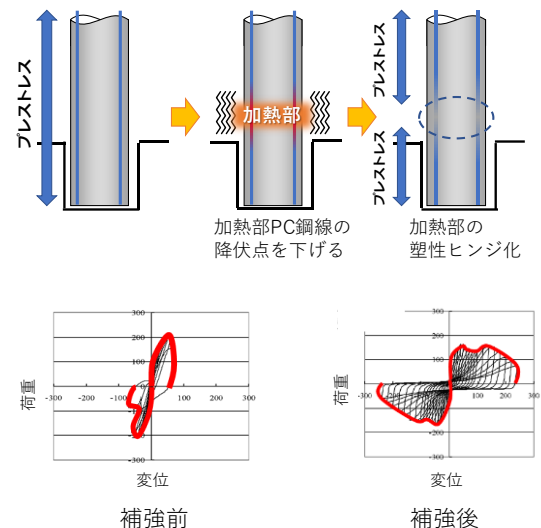


図-1 開発工法のイメージ

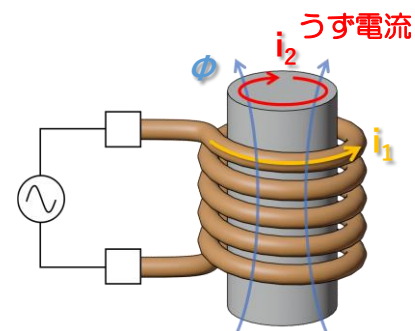


図-2 電磁誘導加熱の概念図

が変形すると、PC 鋼線の降伏よりも先にコンクリートが圧壊し、電化柱は脆性的な破壊となる。これに対し、対策後は加熱箇所の PC 鋼線の降伏強度を下げ、塑性ヒンジを形成し、更に既存の工法と同様に、中空部にはモルタルを充填し、鋼板あるいは有機繊維等を巻き立てることで部材の変形性能の向上を図り、脆性的な破壊を防ぐものである。

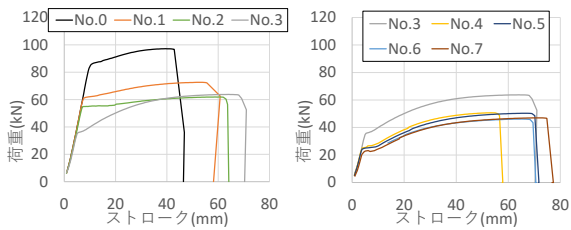
図-2 に電磁誘導加熱の概念図を示す。図のように、交流電源に接続されたコイルに電流(i_1)を流

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 基礎・構造グループ

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 基礎・構造グループ グループリーダー

表－1 試験ケース（要素試験 1）

No.	加熱温度	冷却方法
0	未加熱	—
1	600℃	室温
2	700℃	室温
3	850℃	室温
4		3分で100℃低下
5		30分で100℃低下
6		60分で100℃低下
7		120分で100℃低下



加熱温度の違い 徐冷時間の違い
図－3 PC 鋼線の引張試験結果

表－2 PC 鋼線の引張試験結果

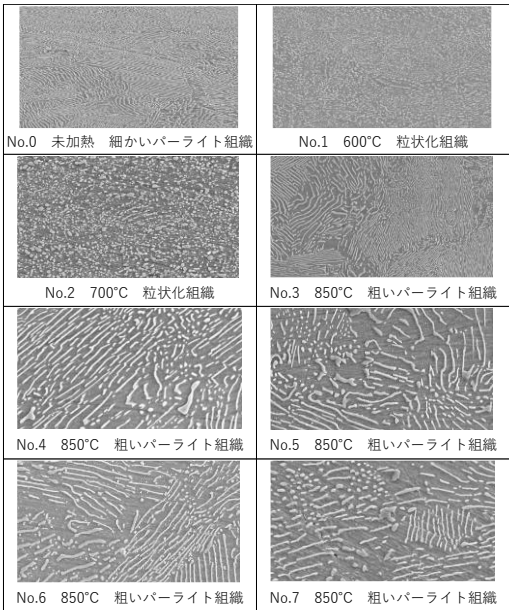
	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
降伏強度 (N/mm ²)	1359	968	868	566	400	395	データ 欠損	366
破断時スト ローク (mm)	46.8	60.8	63.7	71.0	56.6	70.2	69.5	74.8

すと、その周りには磁力線(Φ)が発生し、周辺の金属には磁束の変化を妨げる方向にうず電流(i_2)が流れる。金属のもつ電気抵抗により発生するジュール熱により、金属自体が発熱する。本工法は、この性質を利用したものである。

3. 要素試験 1

3.1 試験概要

要素試験 1 では PC 鋼線（JIS G3536 異形 PC 鋼線 SWPD1L φ 9mm）単体を電気炉内で加熱し、PC 鋼線の加熱温度に応じた降伏強度を確認した。試験ケースを表－1 に示す。加熱温度は 600℃、700℃、850℃とし、加熱後は試験片を炉内から実験室内（室温 10～20℃）に出し徐冷した。No.4～No.7 の試験体については、加熱後に炉の温度を徐々に下げ、徐冷速度を 100℃あたり 3 分～120 分の範囲で調整した。徐冷後、引張試験および電子顕微鏡による組織の確認を行った。



図－4 加熱後の PC 鋼線の組織

3.2 試験結果

PC 鋼線の引張試験結果を図－3および表－2 に示す。降伏強度は未加熱の No.0 に対し、No.1～No.3 では、それぞれ 71%、64%、42%と加熱温度が高くなるほど低下し、No.2, No.3 では PC 鋼線の緊張後の定着荷重である 54.1kN 以下で降伏した。また、破断時の伸びはそれぞれ 130%、136%、152%と増加した。徐冷速度を遅くした No.4～No.7 については、降伏強度は室温で徐冷した No.3 の 566N/mm² に対し 400N/mm² 前後と低く、No.4～No.7 で比較すると、徐冷速度が遅いほど降伏強度は若干下がり、破断時の伸びは増大する傾向であった。徐冷速度を遅くした場合、金属組織の結晶粒が大きくなり、伸びは大きくなることが知られている。

加熱後の PC 鋼線の電子顕微鏡画像を図－4 に示す。600℃～700℃まで加熱すると、未加熱の通常組織（細かいパーライト組織）から粒状化組織に変化し、さらに、850℃まで加熱すると粗いパーライト組織に変化している様子が確認できた。粒状化組織では、引張強度が低下し延性がやや向上する性質を持つ。パーライト組織ではさらに引張強度が低下し延性が向上するといわれている。内部組織の観察結果は、機械的性質の変化と相関が認められるものであった。

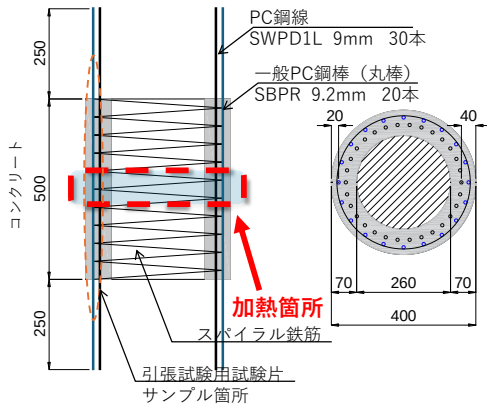


図-5 試験体概要 (要素試験 2)

4. 要素試験 2

4.1 試験概要

要素試験 2 では、図-5 に示すような実大の断面寸法で電化柱の一部を模擬した試験体を製作した。内部の鋼材は、実物と同様に異形 PC 鋼線 SWPD1L ϕ 9mm と一般 PC 鋼棒 (丸棒) SBPR ϕ 9.2mm、およびスパイラル鉄筋 ϕ 3mm を配置した。中空部にはモルタルを充填した。なお、今回の試験では、プレストレスの導入は行っていない。この試験体を用いて電磁誘導加熱装置による、内部の PC 鋼線の加熱の可否、およびコンクリートの表面温度、変状の有無を確認した。また、加熱後の試験体中央から取り出した PC 鋼線 (ϕ 9mm) の引張試験を行い、降伏強度を確認した。

図-6 に温度計測箇所を示す。鋼材の温度計測には熱電対を使用し、コンクリート表面温度についてはサーモグラフィカメラによる測定を行った。写真-1 に加熱状況を示す。加熱コイルは ϕ 8mm の銅線とホースで構成されており、ホースと銅線の隙間に冷却水を循環させた。加熱箇所は試験体中央とし、加熱装置の周波数を 10kHz 以下、出力を 20kW となるよう調整した。

4.2 試験結果

(1) PC 鋼線の温度履歴

図-7 に加熱時の PC 鋼線の温度履歴を示す。概ね 15 分間から 20 分間の加熱で 700°C 程度まで上昇したが、700°C 到達後は、加熱装置の稼働を継続しても温度の上昇は見られなかった。これは、

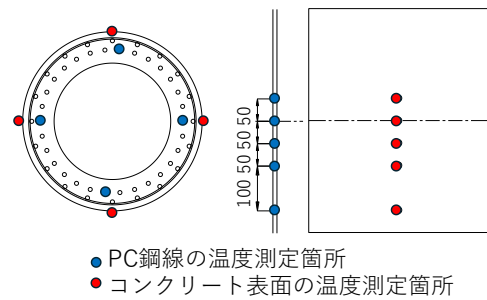


図-6 計測箇所



写真-1 加熱状況

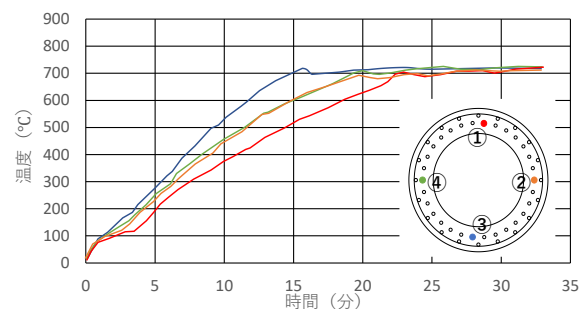


図-7 PC 鋼線の温度履歴

金属材料の組織が変化し、磁性が失われるキュリー温度に起因すると推測される。すなわち、鉄のキュリー温度は約 770°C であり、今回の実験でもキュリー温度に近づいたため、鉄の誘導加熱の効率が下がり、温度の上昇が見られなくなったと考えられる。図-8 に部材軸方向の PC 鋼線の温度分布の経時変化を示す。PC 鋼線は加熱中心から 100mm 離れると温度は大幅に低くなり、200mm 離れた箇所では 65°C 程度であった。このように温度勾配が急であったのは、加熱中心から離れた箇所では、PC 鋼線の熱がコンクリートに奪われたためと考えられる。

(2) コンクリートの温度分布

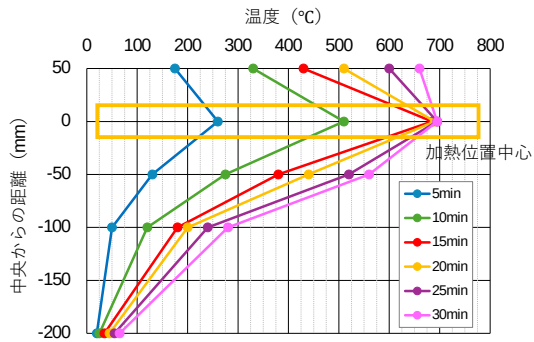


図-8 PC 鋼線の温度分布

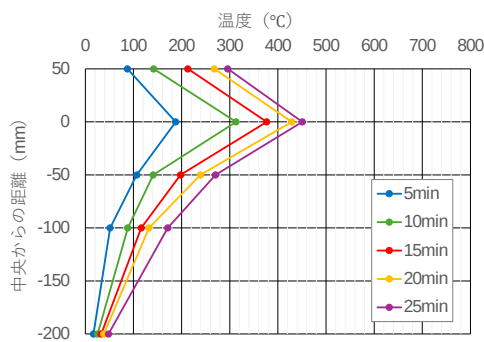


図-9 コンクリート表面の温度分布

コンクリート表面の温度分布を図-9 に示す。試験体中央では、加熱開始 25 分で最高 460℃程度まで温度が上昇した。PC 鋼線では 15 分以降、加熱位置中心の温度上昇がほぼ見られなくなったが、その後もコンクリート中を熱が伝わり、コンクリートの表面温度は上がり続けた。試験終了後のコンクリート表面の状況を写真-2 に示す。加熱箇所を中心にスパイラル筋、PC 鋼線に沿ったひび割れが発生した。

(3) PC 鋼線の降伏強度

加熱後に試験体から取り出した PC 鋼線の引張試験の結果を表-3 に示す。加熱後の PC 鋼線の降伏強度は、約 600N/mm² であり、要素試験 1 の電気炉で 700℃まで加熱した試験体よりも降伏強度の低下は大きかった。この原因としては、加熱後、コンクリートにより PC 鋼線の徐冷速度が遅くなったためではないかと考えられる。

5. まとめ

電磁誘導加熱装置により、コンクリート内部の PC 鋼線を加熱する実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) PC 鋼線は 600℃以上に加熱すると降伏強度が下がり、降伏後の伸びが大きくなることが確認できた。
- (2) 今回用いた電磁誘導加熱装置により、PC 鋼線は 15～20 分間程度で 700℃程度まで加熱され、それ以降加熱装置の稼働を続けても温度の上昇はみられなかった。
- (3) PC 鋼線が高温になる範囲は、局所的であった。

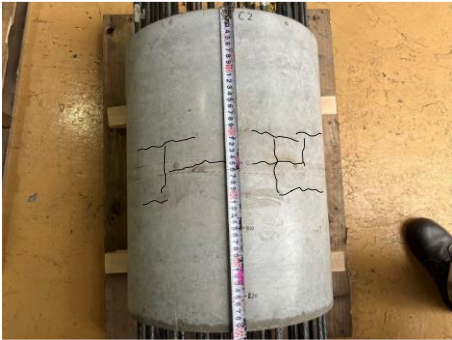


写真-2 試験後のコンクリート表面

表-3 PC 鋼線の引張試験結果

	加熱後					未加熱
	サンプル 1	サンプル 2	サンプル 3	サンプル 4	平均	
降伏強度 (N/mm ²)	552	590	606	600	587	1395

- (4) 700℃まで加熱された PC 鋼線の降伏強度は、未処理の場合の約 1/2 程度まで低下した。
- (5) PC 鋼線を加熱することにより、コンクリート表面に鋼材に沿ったひび割れが発生した。

以上から、電磁誘導加熱により電化柱内部の PC 鋼線の降伏強度を下げるができることが確認できた。今後は実用化に向け、鋼材が高温となった場合の影響範囲や、コンクリートの損傷程度、補修補強の要否等に関する検討が必要である。

本開発は鉄建、ナスコ、FABSPACE JAPAN、神鋼鋼線工業の 4 社による共同開発である。

参考文献

1) 岩田道敏, 草野英明, 築島大輔 : PC 電化柱の耐震補強工法, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013.7