

電磁誘導加熱による電化柱耐震補強工法の開発

欧陽 笛雲*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電化柱内部の 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。加熱後の電化柱の残存プレストレスやコンクリートの残存強度を把握する試験を行って、RC 部材として曲げ耐力を推定できる可能性があることを確認した。

キーワード：高周波電磁誘導加熱，残存プレストレス，PC 鋼材緊張力

DEVELOPMENT OF SEISMIC REINFORCEMENT METHOD FOR ELECTRIFICATION POLES
USING ELECTROMAGNETIC INDUCTION HEATINGDiyun OUYANG*¹, Tomoaki NISHIMURA*²

Abstract

Considering that PC (prestressed concrete) electrification poles were damaged by large earthquakes and often hindered the early resumption of railway operations, we launched the development of seismic reinforcement methods for PC electrification poles. It is generally known that PC steel wires tend to decrease in yield strength after exposure to high temperatures; taking advantage of this property, this method is intended to generate a plastic hinge to prevent electrification poles from brittle collapse by partially reducing the yield strength of PC steel wires inside the electrification pole using an electromagnetic induction heating device. Through tests to comprehend the residual prestress of the electrification pole and the residual strength of the concrete after heating, it was confirmed that the flexural strength of the pole can be estimated as an RC member.

Keywords: High-frequency electromagnetic induction heating, Residual prestress, PC steel tensile force

*1 Foundation/ Structure Group, Research & Development Center

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

電磁誘導加熱による電化柱耐震補強工法の開発

欧陽 笛雲*1・西村 知晃*2

1. はじめに

これまでの大規模地震による鉄道施設の被害には、高架橋等の構造物本体の損傷のみならず、PC 電化柱の折損・傾斜が多く見られた。鉄道の早期運行再開のためには、電化柱の復旧がクリティカルとなることもあり、電化柱の耐震化が望まれている。

既存の PC 電化柱耐震補強工法¹⁾は、電化柱を 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変形性能に富む鋼板巻き 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。この工法は、比較的工期を要すること、切断時にワイヤーソーが壁高欄に支障し壁高欄の改修も必要になる場合があること、一時的に構造上不安定になることなどが課題として挙げられる。そこで、PC 鋼線を切断することなく、PC 電化柱の変形性能を向上させる工法の開発に取り組むこととした。

開発工法は、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（以下、誘導加熱と呼ぶ）により電化柱内部の PC 鋼線を改質するものである。この改質によって伸び性能の向上と引張強度およびプレストレスの低下を図る。これにより、地震時に曲げ降伏を促進し、地震エネルギーの吸収を期待するものである。これまでの要素試験により、高周波誘導加熱装置を用いてコンクリート中の PC 鋼線の加熱・改質が可能であること、改質に要する加熱時間が確認され、技術的な成立性が確認された²⁾。

本検討では、PC 電化柱の誘導加熱後の残存プレストレスの把握を目的に、コンクリート内部の

PC 鋼線や緊張力を作用させた PC 鋼線を誘導加熱し、冷却後の機械的性質や緊張力の推移を確認した。

2. 緊張力開放試験

2.1 試験概要

過年度に実施した試験では、PC 鋼線を誘導加熱し組織が変態した後に常温まで温度低下させてから引張試験を行い、引張強度や降伏強度が低下し、弾性係数はあまり変化しないことを確認した²⁾。一方、高温の状態における PC 鋼線の機械的性質は、冷却後のそれとは違って、さらに強度が低く弾性係数も小さいことが分かっている³⁾。

しかしながら電化柱内部の PC 鋼線は、供用時には常温であるが、緊張力が作用した状態で誘導加熱された後に常温まで温度低下することから、電化柱に導入されたプレストレスがこの温度変化に伴いどう変化するかは明らかではない。そこで、誘導加熱後の PC 電化柱の残存プレストレスの推定を目的に、PC 鋼線単体に緊張力を作用させて、長さを一定に保ったまま加熱・冷却し、温度の変化に伴う緊張力の推移を確認した。

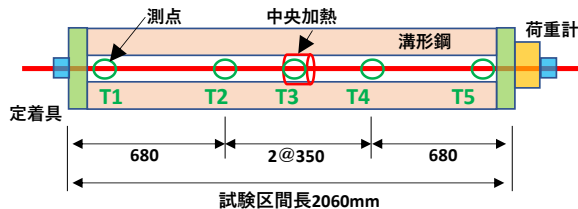
試験に用いた PC 鋼線の機械的性質を表-1に、試験概要図を図-1に、試験状況を写真-1に示す。試験は、表-1に示す PC 鋼線φ9mm に緊張力を作用させて試験フレームに定着し、中央を誘導加熱した後に自然冷却させた。加熱区間の温度上昇に伴う伸びによる緊張力低下の影響を小さくするために、試験区間長は 2.06m とした。計測は PC 鋼線温度 5 か所 (T1~T5) と、端部で荷重計にて緊張力を測定した。表-2 に試験ケースを示す。試験ケースは、PC 鋼線の初期引張応力度

*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

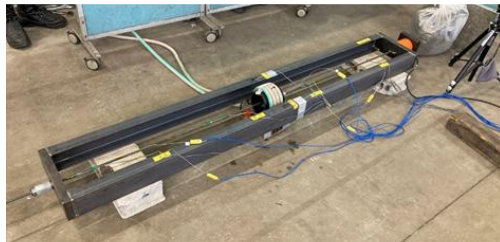
*2 建設技術総合センター 研究開発センター 基礎・構造グループ グループリーダー

表－1 試験に用いた PC 鋼線の機械的性質

JIS記号	公称断面積 (mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
SWPD1L	63.62	1226	1417



図－1 試験概要図



写真－1 試験状況

表－2 試験ケース

試験ケース	初期引張応力度	試験本数
1	900	2
2	750	2
3	600	2

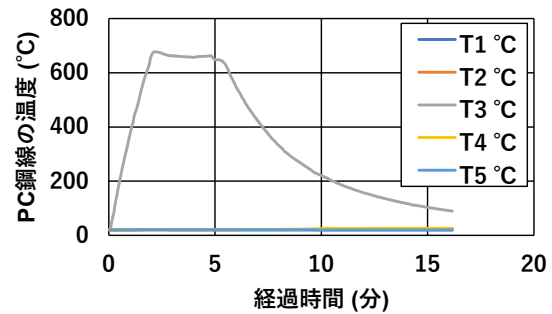
引張応力度単位：N/mm²

をパラメータに3ケースとし、各ケース2体試験を行った。

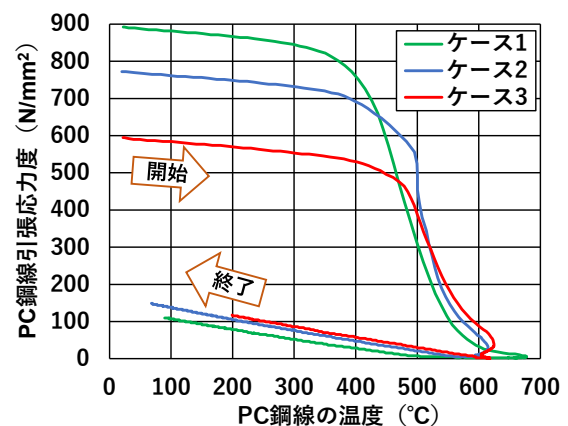
2.2 試験結果

図－2 にケース 1 における PC 鋼線温度の推移を示す。他のケースも同様であった。加熱開始 2 分程度で誘導加熱部 T3 の温度が約 700℃に達し、それ以降はほぼ一定となった。これは、キュリー温度⁴⁾に達し、磁性を失って加熱効率が大きく低下したためと考えられる。開始から 6 分程度で加熱を停止して、自然冷却にて 15 分程度で 100℃以下となった。それ以外の計測点では、温度変化はほぼ確認されなかった。

図－3 に加熱部の温度と、荷重計で計測した緊



図－2 PC 鋼線の温度の推移



図－3 引張応力度の推移

張力から算出した引張応力度の推移を示す。いずれのケースも、300℃付近までは同じ勾配で引張応力度が低下した。これは、PC 鋼線の線膨張係数を 12μ/℃、弾性係数を 190kN/mm²、温度上昇区間を 150mm、上昇温度 300℃と仮定して算出した PC 鋼線の伸びによる引張応力度の推定低下量 50N/mm²と同程度であることから、温度変化に伴う伸縮が原因と考えられる。

一方 300℃を超えると、引張応力度が大きいケースほど低下量が大きくなり、3 ケースとも 500℃付近で引張応力度が 400 N/mm²程度となった。これは、参考文献³⁾に示される PC 鋼線の 500℃における降伏応力(400 N/mm²程度)に近いことから、導入した緊張力により引張降伏したと考えられる。

また 500℃以降は、3 ケースとも同様に引張応力度が低下しており、温度上昇に伴う降伏強度の低下によるものと考えられる。さらに加熱を継続すると、引張応力度が 0 となった。キュリー温度



写真-2 試験体作成状況(左)と加熱状況(右)

表-3 圧縮強度試験ケース

試験ケース	0	1	2	3	4	5
コンクリート 温度 (°C)	20 (室温)	20 (室温)	381	419	393	495

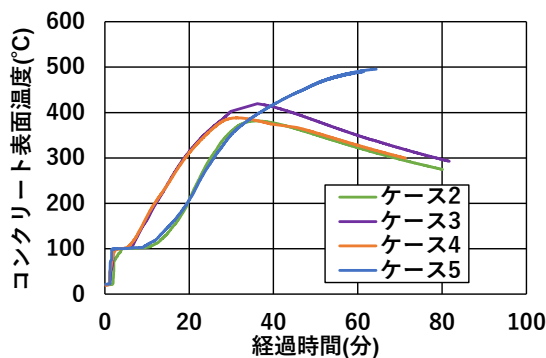


図-4 コンクリート表面温度

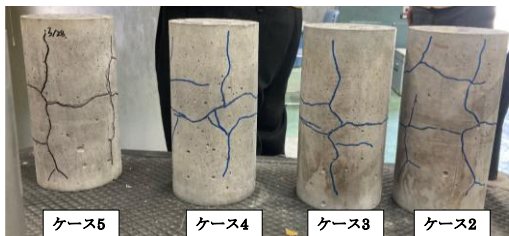


写真-3 加熱後の試験体

に達し、組織変化する際に降伏強度が極めて小さくなり、緊張力が解放されたと考えられる。

その後、自然冷却時には温度の低下に伴って徐々に引張応力度が増加した。これは、増加勾配が加熱初期の応力度低下勾配に近いことから、温度変化に伴う収縮によるものと考えられる。なお、PC 鋼線がコンクリート内部に定着されている場合は、コンクリートにも温度低下による収縮が発生するため、PC 鋼線の引張応力度はほぼ変化しないと考えられる。

表-4 圧縮強度試験結果

試験ケース	0	1	2	3	4	5
圧縮強度 (N/mm ²)	90.0	99.9	47.1	55.1	44.7	34.6
弾性係数 (kN/mm ²)	39.9	43.7	12.2	9.9	8.8	5.7

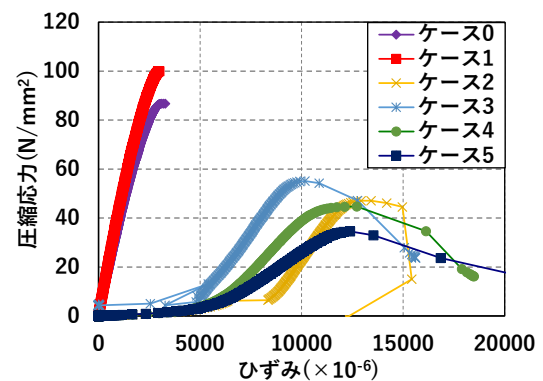


図-5 応力ひずみ関係

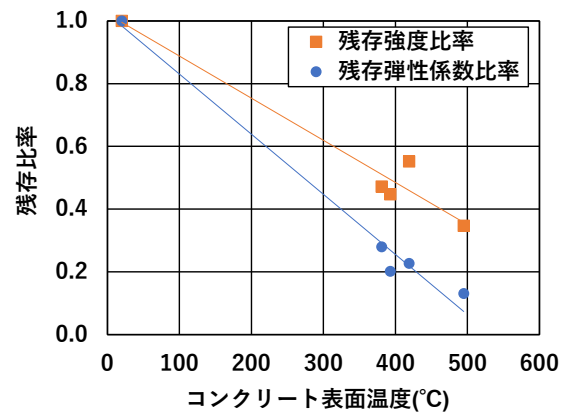


図-6 強度と弾性係数の残存比率

以上より、PC 電化柱の PC 鋼線を誘導加熱でキュリー温度（700°C程度）まで昇温して組織変化させることにより、プレストレスを解放させることが可能と考えられる。

3. コンクリート圧縮強度試験

3.1 試験概要

誘導加熱した PC 鋼線周囲のコンクリートの残存強度比（加熱後／加熱前）を把握するため、コンクリートの圧縮強度試験を行った。写真-2 に試験体作成状況と加熱状況を示す。圧縮強度試験

体は、一般的な $\phi 100\text{mm}$ のコンクリート供試体の内部に $\phi 9\text{mm}$ のPC鋼線4本を上下面かぶり25mm、外周かぶり20mmで配置し、コンクリートを打設した。誘導加熱は、水冷ホース（外径20mm）の中に $\phi 8\text{mm}$ の銅線を入れた誘導コイルを、試験体中間の100mmの範囲に4周させて行った。加熱部のコンクリート表面温度は熱電対にて3か所測定した。試験ケースを表-3に示す。試験ケース0はPC鋼線を配置せず、試験ケース1～5は、コンクリート表面温度をパラメータとした。

3.2 試験結果

(1) 加熱結果

誘導加熱した試験ケース2～5のコンクリート表面平均温度の経時変化を図-4に示す。いずれの試験ケースも 100°C で一度温度が停滞しその後温度上昇する傾向を示した。試験ケース2～4は加熱を30分程度とし、試験ケース5はコンクリート温度が 500°C に達するまで1時間程度加熱した。加熱後の試験体を写真-3に示す。PC鋼線とコンクリートの膨張量の違いによると思われるひび割れが発生していた。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を表-4に、応力ひずみ関係を図-5に示す。試験ケース2～5はひび割れが発生していたため、ひずみが 5000μ （載荷点変位で 0.5mm 程度）を超えてから荷重が増加した。そこで、ひび割れが閉じるまでの変形を除外するために、試験ケース2～5の弾性係数は圧縮応力度が 15N/mm^2 から 25N/mm^2 の区間で算定した。図-6に試験ケース1を1.0とした圧縮強度と弾性係数の残存比率と表面温度の関係を示す。温度の上昇に伴って、強度と弾性係数の残存比率が低下する傾向が示された。

4. 小規模な梁の曲げ載荷試験

4.1 試験概要

PC鋼線を配置したコンクリート梁の誘導加熱後の曲げ耐力の変化や、プレストレスの解放状況について確認するため、小規模な梁を製作し曲げ

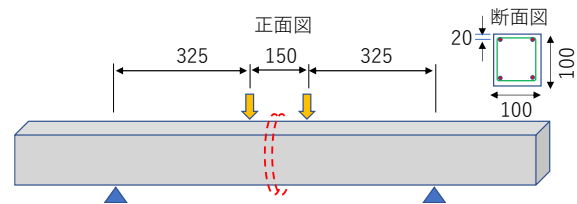


図-7 梁の曲げ載荷試験概要図

表-5 使用材料強度

	加熱前 0.2%耐力	加熱後 降伏強度
PC鋼線	1333	600
	加熱前 圧縮強度	加熱後 圧縮強度
コンクリート	90	36

単位： N/mm^2

表-6 試験ケース

試験ケース	プレストレス	誘導加熱
1	無	無
2	無	有
3	有	無
4	有	有

載荷試験を行った。曲げ載荷試験概要図を図-7に示す。試験体は同じ配筋で4体製作した。試験体断面の4隅に $\phi 9\text{mm}$ PC鋼線を配置し、スタップは $\phi 3.2\text{mm}$ の鉄線を20mm間隔で配置して曲げ破壊型とした。鋼材比やかぶり厚さ、プレストレスは電化柱と同程度となるように設定した。使用材料の強度を表-5に示す。加熱前の材料強度は材料試験結果である。加熱後のPC鋼線引張強度は過年度実施の試験結果²⁾、コンクリート強度は3.の試験結果から推定した値である。

試験ケースを表-6に示す。試験パラメータはプレストレスの有無と誘導加熱の有無とした。プレストレスは、プレテンションにてPC鋼線4本均等に合計 250kN を導入した。載荷試験時の有効緊張力の計算値は約 200kN である。写真-4に誘導加熱状況を示す。コイルを試験体スパン中央の100mmに4周巻いて、PC鋼線温度が平衡になるまで加熱した。



写真-4 誘導加熱状況

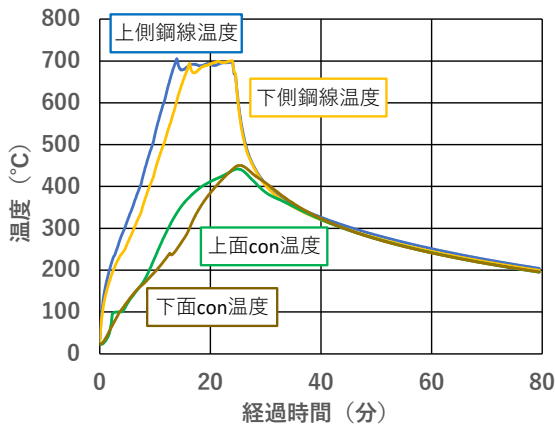


図-8 PC 鋼線とコンクリート表面の温度



写真-5 荷重試験状況

4.2 試験結果

(1) 加熱結果

図-8 に試験ケース 2 のコイル設置箇所の PC 鋼線とコンクリート表面温度の経時変化を示す。試験ケース 4 の結果も同様であった。コンクリートの表面温度は 450℃まで上昇した。加熱部のコンクリート表面には、ひび割れ発生を確認した。

(2) 破壊状況

荷重試験状況を写真-5 に、荷重終了後の荷重点付近の損傷状況を写真-6 に、荷重と荷重点変位の関係を図-9 に示す。

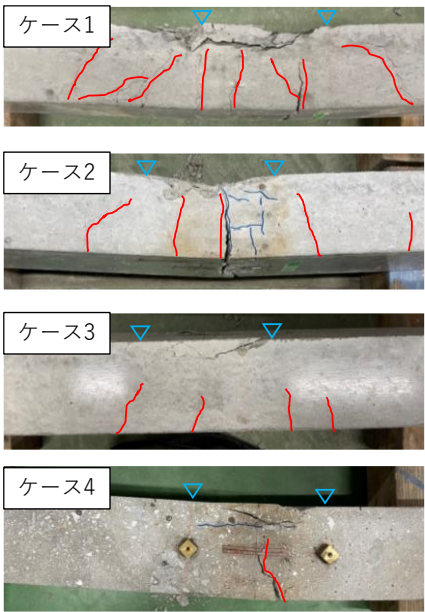


写真-6 荷重点付近損傷状況

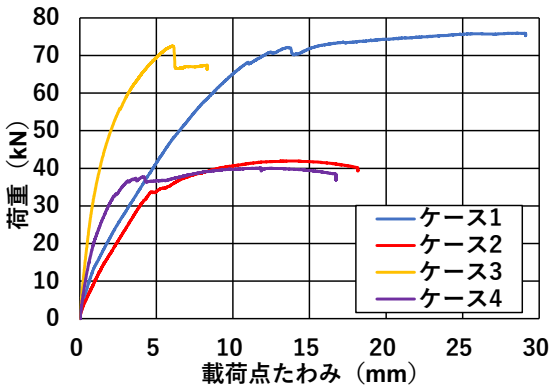


図-9 荷重と荷重点変位の関係

表-7 試験値と計算値の比較

試験ケース		2	4
降伏荷重 (kN)	計算値(A)	31.4	31.4
	試験値(B)	33.5	37.0
	B/A	1.07	1.18
最大荷重 (kN)	計算値(C)	31.8	31.8
	試験値(D)	41.9	40.1
	D/C	1.32	1.26

試験ケース 1 は荷重 70.6kN で引張鋼材が降伏したあと、コンクリートが圧壊した。損傷状況からも一般的な曲げ引張破壊であった。

試験ケース 2 は荷重 33kN で荷重の増加が緩やかになり、青線で示した加熱時に発生したひび割れが荷重に伴って拡大してコンクリートが圧壊

した。荷重 33kN 付近で加熱された PC 鋼線が降伏したと考えられる。

試験ケース 3 は荷重 65kN 付近で PC 鋼線が降伏点に達したあと、たわみ 6mm でコンクリートが圧壊した。曲げひび割れは少なく、除荷後はひび割れが閉じて確認できなかった。

試験ケース 4 は荷重 37kN で荷重の増加が緩やかになり、その後コンクリートが圧壊した。荷重 37kN 付近で加熱された PC 鋼線が降伏したと思われる。曲げひび割れは 1 本しか発生しなかった。

(3) 各ケースの比較

まず誘導加熱した試験ケースで、プレストレスの影響を考察する。試験ケース 2 と 4 を比較すると、降伏荷重や最大荷重は同程度であることから、加熱により試験ケース 4 のプレストレスがほぼ除荷されていると考えられる。また、同じ荷重でのたわみは試験ケース 4 が小さく、かつせん断スパン内にひび割れが発生していないことから、加熱範囲外にはプレストレスが残存していると考えられる。

次にプレストレスを導入していない試験ケースで、誘導加熱の影響を考察する。試験ケース 1 と 2 を比較すると、降伏荷重は試験ケース 2 が小さく、加熱に伴う PC 鋼線の降伏強度低下が主たる原因と考えられる。また同じ荷重でのたわみは試験ケース 2 が大きく、加熱によるコンクリートの弾性係数低下が原因と考えられる。

続いてプレストレスを導入した試験ケースで、誘導加熱の影響を考察する。試験ケース 3 と 4 を比較すると、最大荷重変位と降伏変位の比は試験ケース 4 が大きく、靱性が向上した。よって、PC 電化柱の誘導加熱により高靱性化できる可能性が示唆された。

(4) 計算値との比較

表-7 に試験ケース 2 と 4 の降伏荷重と最大荷重の試験値と計算値を示す。計算値は、表-5 の加熱後の材料強度を用いて、鉄道構造物等設計標準同解説（コンクリート構造物）に準拠して算定した。なお、加熱後のプレストレスは 0 とし、加熱によるコンクリート弾性係数の低下は考慮し

ていない。

この結果より、加熱後の降伏荷重は精度よく算定できることが明らかとなった。一方、最大荷重は多少小さく算定されており、これはコンクリート強度を表面の最高温度を基に推定したが、断面内の温度分布を考慮すると過少評価になっている可能性があることや、PC 鋼線のひずみ硬化を考慮していないことが原因と考える。

5. まとめ

誘導加熱した PC 電化柱の部材性能推定を目的に、コンクリート強度や残存プレストレスを把握する試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 緊張力が作用した PC 鋼線は、キュリー温度まで誘導加熱すると、改質されて緊張力が開放される。
- 2) 誘導加熱されたコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、温度の上昇に伴い低下する傾向を示した。
- 3) 内部の PC 鋼線がキュリー温度に達するまで誘導加熱したプレストレストコンクリート梁の曲げ降伏耐力は、加熱に伴い低下した材料強度を用い、かつプレストレスを 0 として算定できる。

今後は、実物大の実験により加熱後の電化柱の断面耐力や変形性能を確認し、電化柱の高靱性化に向けた実用化検討を進める予定である。

謝辞

本開発は、株式会社ナスコ、株式会社 FABSPACE JAPAN、神鋼鋼線工業株式会社と共同で実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

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
- 2) 土井至朗, 西村知晃: 電磁誘導加熱による PC

電化柱の耐震補強工法の開発, 鉄建建設株式会社, 技術報告集, 2024 No.38

- 3) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, pp.190-196, 2017

- 4) 誘導加熱できない金属とは? 材料の適合性と加熱効率に関するガイド: <https://jp.kindle-tech.com/faqs/what-metals-cannot-be-induction-heated>