

論文 誘導加熱方式を利用した鉄筋コンクリート部材の解体性評価に関する研究

林 明寛^{*1}・野口 貴文^{*2}・北垣 亮馬^{*3}

要旨：現在，各産業分野では 3R（Reduce, Reuse, Recycle）とそのための分解性を考慮した材料設計が重要視されつつある。このような材料設計は，解体後の再利用及びリサイクルのためだけではなく，メンテナンスとアップグレードを容易に行えるようにするため，多くの産業分野で導入されており，建築設備分野でも重要な設計要素で位置づけられている。そこで本研究では，金属加工に利用されてきた誘導加熱方式を用いて，出力量の違いによる鉄筋の温度上昇率の違いを測定するとともに，コンクリート中の鉄筋を加熱してその周囲のコンクリートの脆弱化を図り，誘導加熱方式による鉄筋コンクリートの解体性を評価した。

キーワード：解体工法，誘導加熱，分解性，熱伝導，脆弱化

1. はじめに

高周波誘導加熱は交流磁界内部に置かれている誘電性物質内に発生する渦電流損失，またはヒステリシス損失を利用して被加熱物質を加熱させる方式である。

コイルに交流電流が流れると電磁誘導の原理で磁界が発生し，交流電流のため磁界が変化する。そのため，図-1 に示すようにコイル中の被加熱物質内の金属体には導線不要の誘導渦電流が発生し，これによって抵抗損失による発熱が起こる。また，コイルに交流電流を流すと，コイルに取り囲まれた金属体の内部に磁束が生ずる。もしこの金属体が鉄のような磁性体であれば，磁束は交流電流に対してヒステリシスループを描く。このループを一回描くごとに，そのループで閉じられた面積に相当する分だけのエネルギーが外部の磁界から磁性体に供給される。その磁気エネルギーは熱エネルギーに変換される。しかし，一般に誘導加熱の時は被加熱体が変圧器のように閉磁路を作らない場合が多く，磁束密度も 1T（tesla=1Wb/m²）程度と極めて大きいので，実効透磁率とヒステリシス係数も少ない。また，使用周波数が 10kHz 以上に高くなれば，周波数の 2 乗に比例して増加する渦電流損失ははるかに大きくなるため，ヒステリシス損失はほとんど無視しても差し支えない。^{1, 2)}

被加熱物質としては，電気抵抗が適度にある鉄，ステンレスなどの金属が適し，電気伝導性が高い銅，アルミニウムでは発熱が十分ではなく不適である。表-1 に各種材料の浸透深さ δ を示す。導体に高周波電流が流れる場合，表面に内部より多い量の電流が流れる現象が発生する。これを表皮効果と言って，この効果によって電流が表面の $1/e$ (36.8%) 程度減少する浸透深さは以下の式

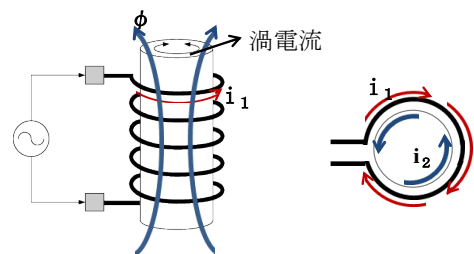
(1) のように示される。

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (1)$$

* δ = 浸透深さ， σ = 抵抗率， f = 周波数， μ_0 = 真空の透磁率， μ_r = 被加熱体の相対透磁率

表より導電率が大きい金・銀・銅・アルミニウムなどの材質ほど浸透深さは浅く，ステンレス・チタン・鋼鉄のような導電率が小さいほど深いことが分かる。発熱状況も前者は損失が少ないため発熱も少なく，後者は損失が大きく発熱も大きくなることを示している。³⁾

このような原理を用いて，本研究では，省エネルギーで簡便に建築物を解体する技術の確立を目的として，鉄筋コンクリートの鉄筋に直接触れることなく鉄筋を加熱できる誘導加熱を利用した鉄筋コンクリート部材の解体技術を考案し，その解体性能を評価することで，技術のフィージビリティについて検証するものとする。



(a) 交流電流 i_1 による磁束 ϕ (b) 誘導電流（渦電流 i_2 ）

図-1 誘導加熱のメカニズム⁴⁾

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻大学院生

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻特任助教

修士（工学）（正会員）

博士（工学）（正会員）

博士（工学）（正会員）

表－1 各種材料の導電率と浸透深さ⁴⁾

材質	誘電率 ($\times 10^7 \text{S/m}$)	抵抗率 ($\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	浸透深さ (μm)	材質	誘電率 ($\times 10^7 \text{S/m}$)	抵抗率 ($\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	浸透深さ (μm)
銀	6.17	1.62	1.30	黄銅	2.6	3.85	2.00
銅	5.92	1.69	1.32	ニッケル	1.5	6.67	2.63
金	4.66	2.15	1.49	鋼鉄	1.0	10.00	3.22
アルミニウム	3.82	2.62	1.65	SUS304	0.14	71.43	8.60
ニクロム線	0.10	100	1.65	チタン	0.18	55.0	7.58

2. 誘導加熱による鉄筋の昇温特性

2.1 実験因子および水準

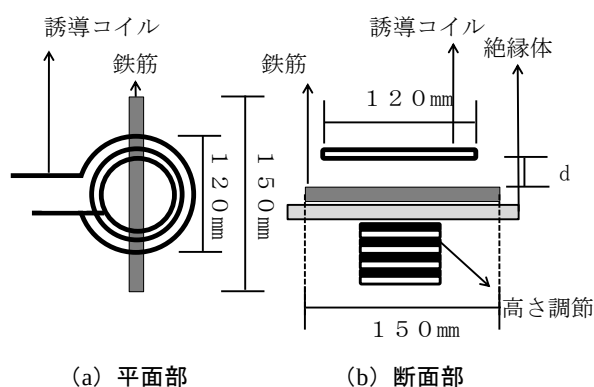
本実験においては、鉄筋の種類および加熱コイルまでの距離・出力量を実験因子として試験を行った。用いた鉄筋は長さ 150mm の D6, D10, D19, D25, D32(5 種類)、加熱距離は 10mm, 20mm, 30mm, 50mm (4 種類)、出力量は 5kW, 6kW である。表－2 に実験因子および水準を示す。

2.2 誘導加熱による鉄筋加熱の実験方法

誘導加熱は基本周波数 120kHz (動作周波数 60～120 kHz)、最大高周波出力 6kW の実験用装置を使用した。加熱コイルはパンケーキ型で寸法 $\phi 120$, 巻き数 3, コイルの太さ $\phi 10$ のものを使った。長さ 150mm で切断した 5 種類の鉄筋をコイル面の中心部と平行になるように配置させ、コイルまでの距離を調節しながら加熱させ中央部の最高点の温度を測定した。温度変化はサーモグラフィーを利用して 0℃ から 800℃ までの温度範囲を測定した。誘導加熱方式を用いた鉄筋の加熱実験方法を 図－2 に示す。

表－2 実験因子および水準

実験因子	水準
鉄筋種類 (長さ 150mm)	D6, D10, D19, D25, D32
コイルまでの距離 (d)	10mm, 20mm, 30mm, 50mm
出力	5kW, 6kW



図－2 鉄筋の誘導加熱実験方法

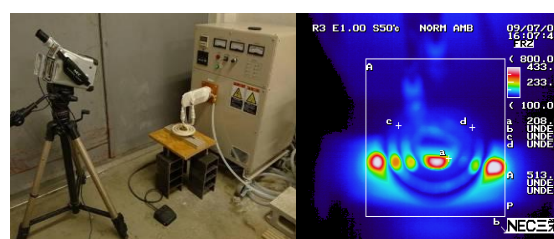
3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋の昇温特性

サーモグラフィーで測定している実験写真と熱画像データの画面を写真－1 に示し、誘導加熱による鉄筋の昇温特性結果を 5kW と 6kW の順に 図－3, 図－4 に示す。図の通り 5kW と 6kW の結果は大きな差を示さなかった。

時間と温度との関係では、加熱コイルから鉄筋表面までの距離が 10mm, 20mm, 30mm の場合、60 秒以内に目標温度 (コンクリート脆弱化温度) 300℃ にまで到達する結果を示した。距離が近いほど、温度が急速に上昇する結果を示し、600℃ 以上まで急速な温度上昇を示した。また、10mm および 20mm の場合、600～800℃ の間で熱的平衡状態になり、30mm の場合は 500～700℃ の間で熱的平衡状態となった。しかし、50mm の場合、300℃ まで約 300 秒以上の時間が必要であった。結果的にコイルが鉄筋に近いほど、加熱直後の短い時間で急激に温度が上昇し、その後はほぼ一定の温度を保つ。逆に、コイルが遠いと、緩やかに温度が上昇する結果となった。従って、最大出力 6kW で加熱した場合、解体性能およびエネルギー効果を勘案すると、温度上昇率が急勾配を示す 30mm 以下の距離が適当だと考えられる。

各々鉄筋別の昇温特性は、D6, D10, D19, D25 の場合、急速な昇温特性を示したが、D32 の場合、他の種類の鉄筋に比べ昇温特性が低下する傾向を示した。これは、誘導加熱の場合、鉄筋の表面を急速に加熱するのに対し、径が太い鉄筋の場合、表面加熱による温度差が無くなるまで鉄筋内の分子運動に対する時間経過が大きかったためと考えられる。



写真－1 サーモグラフィーと測定された熱画像画面

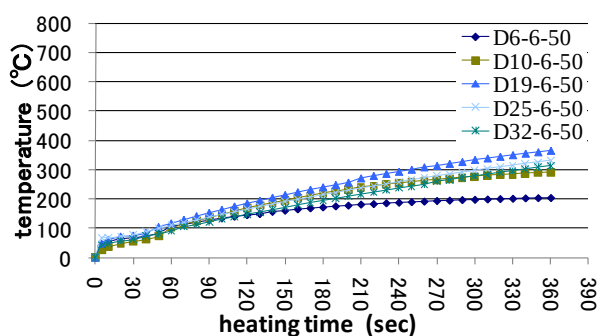
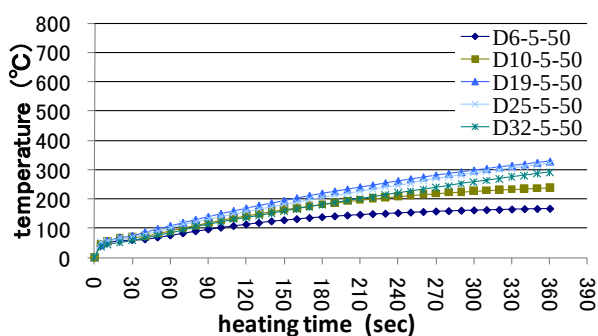
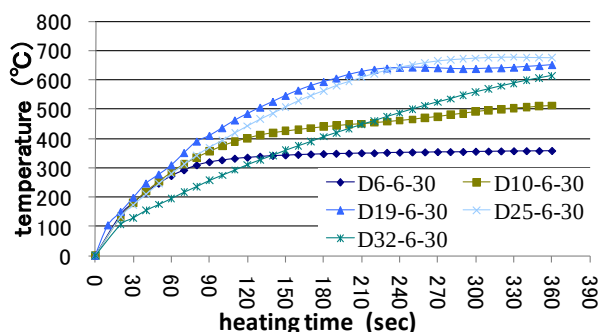
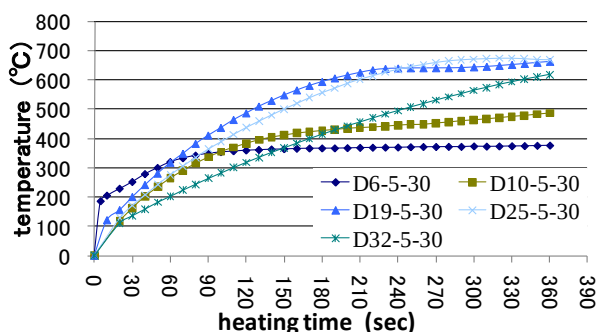
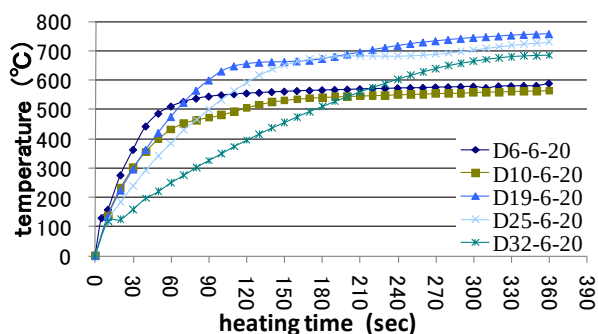
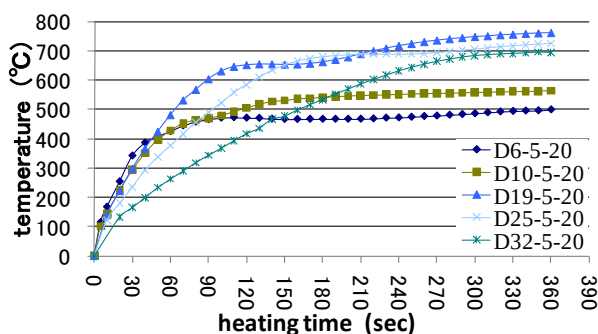
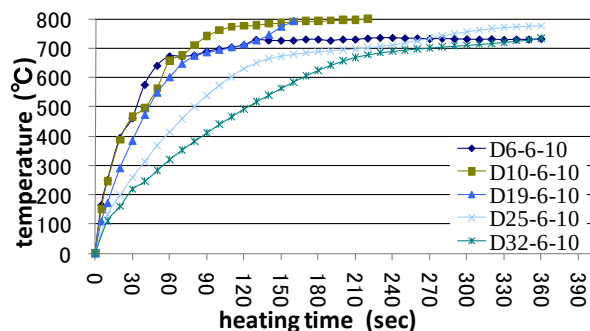
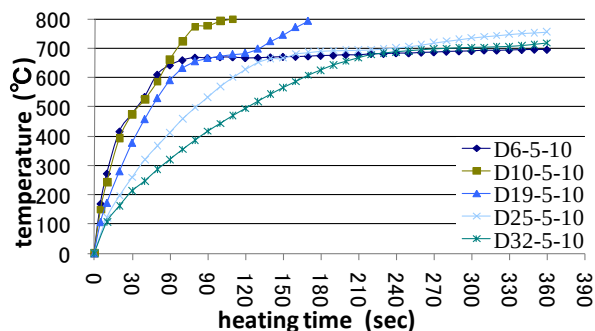


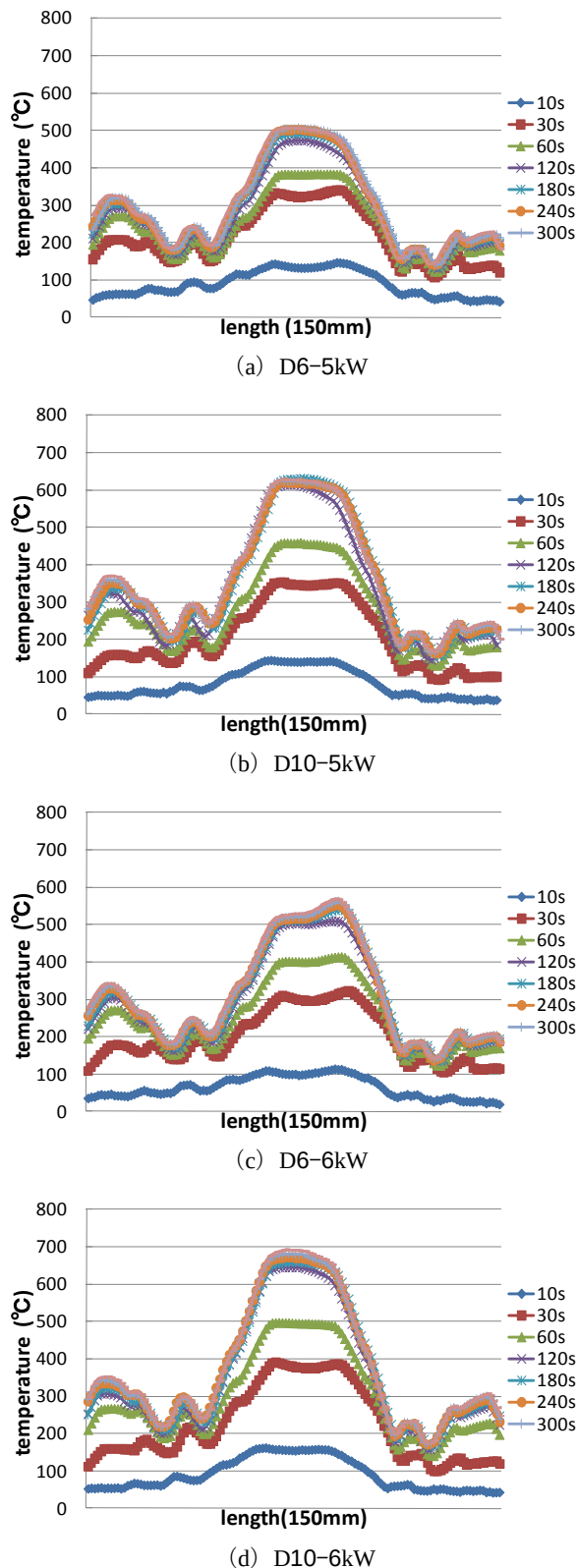
図-3 誘導加熱による鉄筋の昇温特性(5kW)
(D00-0-0 : D 鉄筋種類-出力 kW-距離 mm)

図-4 誘導加熱による鉄筋の昇温特性(6kW)

3.2 鉄筋の温度分布特性

誘導加熱器を利用した鉄筋の加熱過程で必要以上の加熱や加熱不足、昇温におけるムラは温度上昇によるコンクリート脆弱化において問題になることがある。赤外線放射温度測定方法を利用し、5kW、6kWの誘導加熱条件で、鉄筋における昇温時の温度分布を分析した結果、温度上昇率が一番高かった10mmの結果を図-5に示す。図の横軸は試験体の長さである150mmであるが、

赤外線温度測定の際、放射熱のため温度範囲により領域上での多少の誤差はあり得る。図-5のx軸は平均的に $160 \pm 5\text{mm}$ の範囲であり、放射熱による $10 \pm 5\text{mm}$ の誤差は中央部と端部加熱現象の測定においては大きな影響はないと判断される。ほとんどの試験体で端部に比べ中央部が集中的に加熱される現象を示した。直径120mmの加熱コイルから外れる部位の鉄筋は中央部と比較して $150 \sim 450^\circ\text{C}$ を示しており、以後の加熱条件においては、温度偏差に対する考慮が必要だと考えられる。



図－5 誘導加熱による鉄筋の温度分布

4. 誘導加熱による鉄筋コンクリートの解体実験

4.1 実験因子および水準

本実験においては、コンクリート中の鉄筋の種類および加熱コイルまでの距離・出力量を実験因子として試験を行った。用いた鉄筋は D10, D19, D32 (3 種類), 加

熱距離は 20mm, 30mm, 40mm (図－6 の A), 出力量は 6kW である。表－3 に実験因子および水準を示す。

4.2 誘導加熱によるコンクリート中の実験方法

誘導加熱は基本周波数 120kHz (動作周波数 60～120kHz), 最大高周波出力 6kW の実験用装置を使って鉄筋コンクリートを加熱し, 温度上昇の様子と鉄筋とコンクリートとの付着特性の変化を測定した。

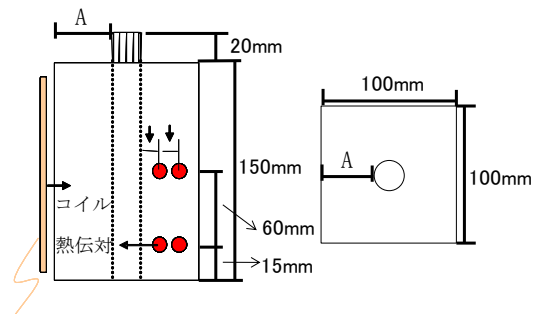
100×100×150mm のコンクリート (W/C=50%) に長さ 180mm の異型鉄筋 1 本を埋設した試験体を作製し, 誘導加熱によって加熱し, 熱電対による鉄筋コンクリートの温度測定および鉄筋押抜き試験による付着強度の測定を実施した。

鉄筋の太さとかぶり厚さの組み合わせは, D10－30mm, D19－20mm, D19－30mm, D19－40mm, D25－30mm の 5 種類である。押抜き試験については, 同じ条件の試験体を 3 体ずつ作製して試験を行った。

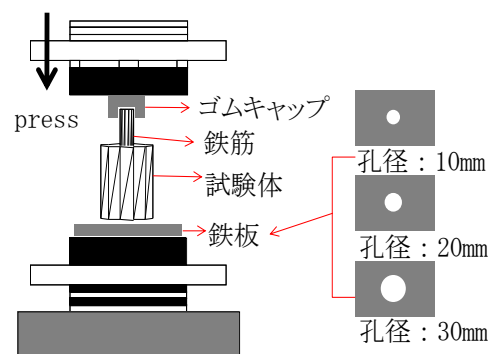
鉄筋コンクリート試験体, 鉄筋の押抜き試験方法およびコンクリートの調合をそれぞれ図－6, 図－7 および表－4 に示す。

表－3 実験因子および水準

実験因子	水準
鉄筋種類	D10, D19, D32
コイルまで距離	20mm, 30mm, 40mm
出力	6kW



図－6 鉄筋コンクリート試験体と熱電対の位置



図－7 鉄筋の押抜き付着試験方法

表-4 コンクリートの調合

調合強度 (N/mm ²)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)
24	12	3	50	45

W _{unit} (kg/m ³)	質量(kg/m ³)			混和剤
	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
180	360	799	1003	(0.3%)

5. 結果および考察

5.1 誘導加熱による鉄筋コンクリートの温度測定結果および特性

熱伝対を用いた鉄筋周辺のコンクリート昇温特性の結果を図-8に示す。

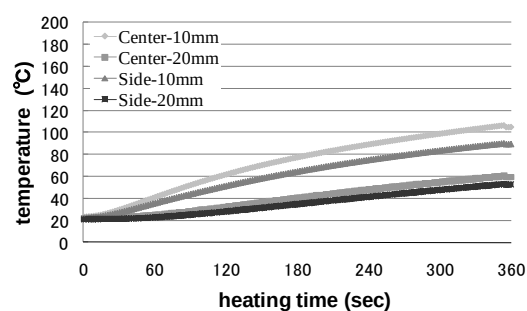
凡例において、Centerはコンクリート試験体の150mmの間中である75mm部分を示し、Sideの場合は、試験体の下端から15mm部分を表わす。また、凡例における10mm、20mmは試験体内部の鉄筋表面から熱伝対までの距離を表わす。

6kWで360秒加熱した場合、鉄筋中心部から10mm、20mmの部分と鉄筋端部から10mm、20mmの部分で熱電対によるコンクリートの温度変化を測定した。

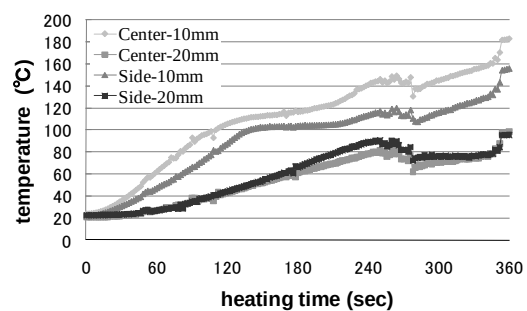
誘導加熱を行った結果、鉄筋中心部10mm、端部10mm、中心部20mm、端部20mmの順で温度が上昇する結果を示し、鉄筋中心部から10mmと20mmの位置における温度差は46～90℃を示した。

図-8(d)のようにD19を利用した試験体で加熱コイルからの距離が40mmの場合、鉄筋の中心部から10mmと20mmの位置における温度差は微弱であった。端部では74～83℃の温度差が生じ、中心部に比べて多少温度差が生じた。しかし、最高温度と最低温度の差が30℃以内の温度差を示してコンクリート熱伝導においては大きい影響はないと判断される。

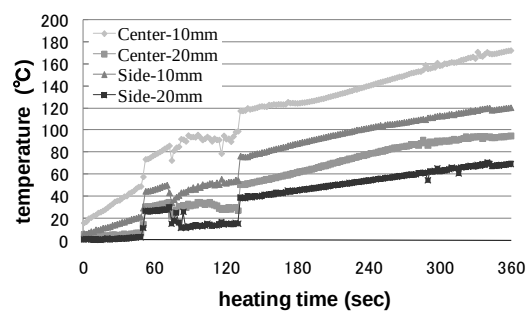
鉄筋D10のみを距離30mmで360秒加熱した場合、鉄筋の中心部で最高温度510℃を示したが、図-8(a)のようにコンクリートに挿入した鉄筋を加熱した場合、鉄筋表面の中心部から10mm離れたコンクリートの最高温度は106℃を示した。また、D19およびD25の場合も鉄筋のみを加熱した最高温度は各々651℃及び613℃であったが、図-8(c)、(e)のようにコンクリート中に挿入された鉄筋を加熱した場合には、鉄筋表面の中心部から10mm離れた部分の最高温度はそれぞれ171℃及び139℃を示して鉄筋表面からコンクリート外部までの熱伝導に時間がかかることを確認した。



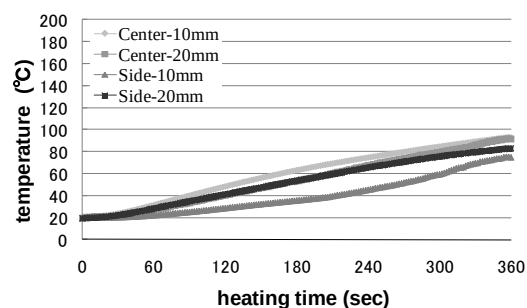
(a) D10-30mm



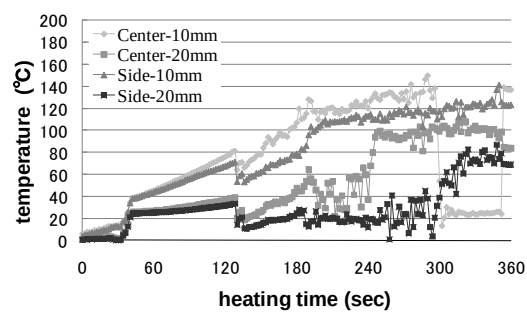
(b) D19-20mm



(c) D19-30mm



(d) D19-40mm



(e) D32-30mm

図-8 誘導加熱による鉄筋コンクリートの昇温特性

5.2 誘導加熱による鉄筋コンクリートの亀裂および鉄筋付着強度試験の結果

誘導加熱方式を用いてコンクリート部材を加熱した後、生成されたひび割れ状態を写真-2に、押抜き試験で得られた鉄筋付着強度の測定結果を図-9、表-5に示す。

D19で距離20mmの場合、加熱後約50秒以内にコンクリート表層部にひび割れが生じた。大部分の試験体でも3分以内にひび割れが発生した。加熱コイルからの距離が短くなるほどひび割れが発生する時間が短く、ひび割れの大きさや幅も大きくなる傾向が見られた。

試験体の加熱前と加熱後に対する鉄筋の押抜き付着試験結果を比べて残存強度を計算し、鉄筋加熱によるコンクリートの脆弱化特性を評価した。D32の場合、加熱後の残存強度が最も低く測定され、D10の場合最も高い残存強度を現わした。また、D19の場合、20、30、40mmの距離による大きな差異は現われなかった。

本実験の場合、試験体サイズを統一し、鉄筋の位置のみを移動させ実験を行った。したがって、鉄筋径によってコンクリート厚さと加熱距離が異なることが残存強度に影響を及ぼしたと判断される。

しかし、ひび割れは鉄筋に接したコンクリート面から表層部まで発生しており、試験体中心に鉄筋が配置されたD19-40mmの場合も強度率が31%低減された。このことから、誘導加熱を用いて鉄筋を加熱した場合、コンクリートと鉄筋との付着強度を低減し、また、ひび割れを発生させ鉄筋とコンクリートを分離解体するための基本技術として適用できると判断される。



写真-2 誘導加熱後の試験体のひび割れ状態一例

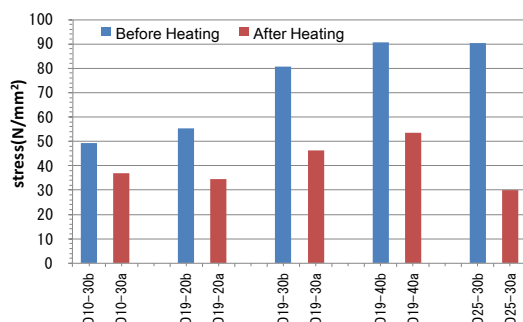


図-9 押し抜き実験による鉄筋の付着強度
(D00-000 : D 鉄筋種類・距離 mm, 加熱有・無)

表-5 誘導加熱による鉄筋付着の変化

	誘導加熱 なし	誘導加熱 あり	強度残 存比
D10-30mm	49.25kN	36.79kN	0.75
D19-20mm	55.42kN	34.41kN	0.62
D19-30mm	80.75kN	46.15kN	0.57
D19-40mm	90.75kN	53.46kN	0.59
D32-30mm	90.35kN	30.10kN	0.33

6. まとめ

本研究では、誘導加熱方式を利用した鉄筋コンクリート部材の昇温特性および解体性に関する実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 誘導加熱方式を用いて望む部位の鉄筋を一定距離及び一定出力で局部加熱させることが可能である。
- 2) 誘導加熱を分解性メカニズムとして用いた場合、出力6kWで鉄筋径20mm以下・被覆厚さ30mm以下のコンクリート部材の場合では、鉄筋付着強度を30%以上脆弱化させることが可能であった。
- 3) 誘導加熱を用いたコンクリート脆弱化において、鉄筋の種類、及び加熱距離の選定が分解効率の点で重要であると判断される。

本実験の結果より、誘導加熱の出力を高めた場合、既存部材に適用が可能であると考えられる。しかし、加熱によるコンクリート部材内の水蒸気圧の挙動とコンクリート内部から表層部に至る熱伝導特性に関する研究及びひび割れ発生以後の鉄筋とコンクリートの完全な分離方法に関する研究が必要である。

参考文献

- 1) Pack-keun : 急速金型加熱システム開発のための高周波誘導加熱過程の有限要素解析, 韓国塑性加工学会集, 第16冊, 第2号, pp.113-119, 2007
- 2) 李俊弦・太田福男 : 電磁誘導加熱鉄筋によるかぶりコンクリートのひび割れ発生応力について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1分冊, p.133-134, 1997
- 3) 瀬谷胖, 「誘導加熱を用いたRC構造物解体工法に関する基礎的研究(その1) 実験概要および実験結果」 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 材施・防火・海洋・電算分冊, p.527-528, 1985
- 4) 安宰徹 : 建築材料および部品の易分解性を考慮したセメント系接合技術の開発, 東京大学学位論文, 2010年3月