

[145] 加熱を受けたエポキシ樹脂塗装鉄筋の付着特性

正会員 岸谷孝一 (東京大学工学部)
 正会員 白川 潔 (住友金属工業(株)中央技術研究所)
 正会員 ○小山清一 (住友金属工業(株)中央技術研究所)

1 まえがき

鉄筋コンクリート構造物の塩害対策の一つに防食鉄筋の利用が考えられる。この中で、エポキシ樹脂塗装鉄筋(以下、エポキシ鉄筋と略記)は腐食作用の厳しい海洋環境下でも優れた耐食性を示すことが認められており¹⁾、床版など一部の土木構造物に適用されつつある。これに対して、建築構造物へ適用する場合には、耐食性以外に火災後のエポキシ鉄筋コンクリート部材の性能を明らかにしておく必要がある。

以上の観点から、ここでは、コンクリート中に埋設されたエポキシ鉄筋を200、300、400、550℃の各温度で1時間加熱し、エポキシ鉄筋加熱後の付着並びに梁の曲げ性能、及び重ね継手強度について実験的に検討したので、その結果につき報告する。

2 実験概要

2.1 使用材料

試験に用いたエポキシ鉄筋(記号Ep)の種類と機械的性質を表1に示す。エポキシ樹脂は、静電粉体塗装法によって、いずれの鉄筋径も膜厚が200 μ mとなるよう塗装されている。

2.2 加熱方法

加熱には、内容積280 ℓ の電気炉(最高温度:750℃)を用い、各試験体とも、かぶり厚さが3cmの鉄筋温度が図1に示すヒートパターンになるよう、目標温度まで加熱した。さらに、目標温度で1時間保持した後、炉内にて放冷した。一般の耐火試験では、鋼材温度が550℃に達すると加熱が停止されることを考えると、今回の加熱条件は、鉄筋にとって非常に厳しいものとなっている。

2.3 試験方法

(1) 付着試験

JIS原案法に基づく引抜き付着試験により付着強度を求めた。試験体の形状寸法を図2に示す。コンクリートの一辺を6D(D:鉄筋径)とし、補強筋は用いていない。D10~D25の4種類の鉄筋のうち、D10、D19を加熱試験に供した。加熱温度は200、300、400、550℃で、いずれも同一条件で3体試験を行った。

表1. エポキシ鉄筋の種類と機械的性質

鉄筋径	降伏点 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	ふし高さ h(mm)	ふしピッチ p(mm)
D10	39.5	55.2	2.8	0.7	6.4
D16	36.8	56.5	2.1	1.0	10.4
D19	37.5	57.7	1.9	1.6	12.3
D25	36.2	56.0	1.9	2.1	15.5

ふし形状:横ふし

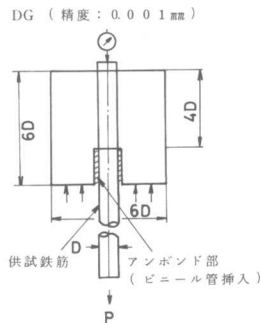


図2. 引抜き付着試験体

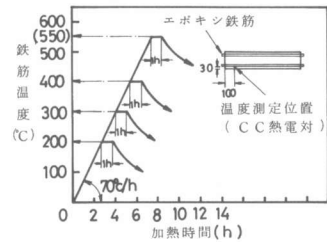


図1. エポキシ鉄筋の加熱温度曲線

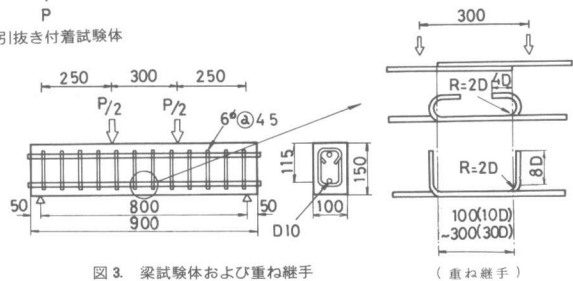


図3. 梁試験体および重ね継手

(重ね継手)

(2) 梁試験

梁試験体の形状寸法を図3に示す。主筋にはD10を用い、かぶり厚さを3cmとした。鉄筋比は0.62%で、せん断補強筋にもエポキシ鉄筋を使用した。加熱温度は300, 400, 550°Cの3条件とし、加力は2点一方単調載荷とした。

重ね継手試験体の形状寸法は、梁試験体と同一とし、等モーメント区間に継手を設けた。継手の形状は、図3に示すストレート、90°フック、180°フックの3種類で、いずれも重ね長さ10D, 20D, 30D、について300及び550°Cの加熱を行なった。

2.4 コンクリートの配合及び強度

付着及び梁試験に用いたコンクリートの配合を表2に示す。また、同一炉内に併置した圧縮試験体の加熱後の強度は表3に示すとうり550°Cの加熱を受けると常温より60%程度の強度低下を示した。

表2 コンクリート配合

設計基準強度 F_c (kg/cm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	ホセメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	G ⁽²⁾	混和剤 ⁽³⁾
240	15	15	62	160	258	738	1130	0.645

(1) 早強ポルトランドセメント (2) 茨城県鹿嶋町産砂、陸砂利 (3) ポゾリス70L

表3 加熱後のコンクリートの圧縮強度

加熱温度 (°C)	圧縮強度 σ_c (kg/cm ²) ⁽¹⁾	強度比
RT	288	1.00
200	271	0.94
300	259	0.90
400	213	0.74
550	110	0.38

(1) 100φ, 200Lmm

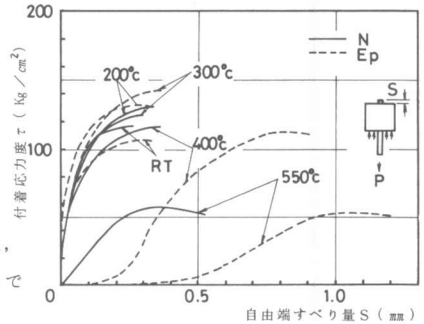


図4 加熱を受けたエポキシ鉄筋のτ-S曲線 (D19の場合)

3 実験結果と考察

3.1 加熱を受けたエポキシ鉄筋の付着強度

(1) 加熱温度の影響

加熱を受けたエポキシ及び裸鉄筋(D19)の平均付着応力度τと鉄筋自由端すべり量Sとの関係を図4に示す。これより、加熱温度が300°C以下の場合、エポキシ鉄筋、裸鉄筋両者のτ-S曲線に大きな差異は認められないが、400°C以上ではエポキシ鉄筋の初期すべりが卓越してくることが判る。この初期すべりは、エポキシ樹脂の炭化により、ふし前面の支圧抵抗及びコンクリート界面での密着力が失われるために発生すると考えられ、550°C×1h加熱後は、塗膜厚さに相当するすべりを生じている。

図5はエポキシ鉄筋の付着強度(初期付着強度 τ_o 、最大付着強度 τ_u)の裸鉄筋 τ_N に対する比 τ_{EP}/τ_N が加熱温度でいかに変化するかを示したものである。ここに、初期付着強度 τ_o とは自由端すべり量が $2 \times 10^{-3} D$ (D:鉄筋径)のときの値である。図より明らかなように、200~300°C加熱後の初期付着強度比 τ_{EP}/τ_N は、D10とD19のいずれの場合も常温のそれよりも高く出ている。これは、試験後の鉄筋表面の観察結果、エポキシ鉄筋のふし山間にコンクリートが固着していたことから考えて、加熱により一度軟化したエポキシ樹脂が再硬化するときにコンクリートとの密着性が向上するものと推定される。しかし、400°C以上での初期付着強度は期待できない。

他方、最大付着強度は、常温から300°Cの場合、鉄筋径に関係なく $\tau_{EP}/\tau_N = 0.9 \sim 1.15$ の範囲にあり、加熱による影響は認められない。加熱温度が400°C

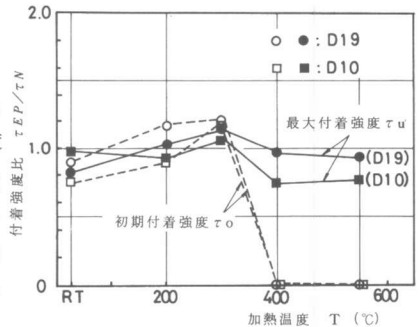


図5 加熱温度と付着強度との関係

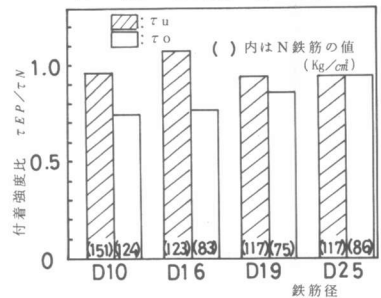


図6 鉄筋径がエポキシ鉄筋の付着強度に及ぼす影響

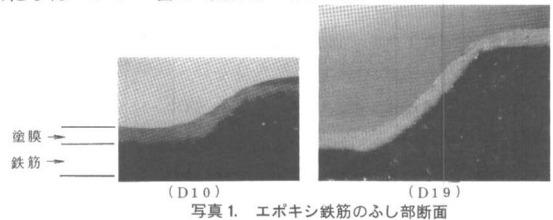


写真1 エポキシ鉄筋のふし部断面

以上になると、D19では $\tau_{EP}/\tau_N = 0.92 \sim 0.96$ とほとんど変化しないのに対し、D10では0.74~0.78と加熱による低下が認められた。これは、400°C×1h以上の加熱を受けると、樹脂が炭化し始め、後述するようにふしの支圧面積が減少するためと考えられる。

(2) 鉄筋径の影響

常温下におけるD10~D25のエポキシ鉄筋の初期並びに最大付着強度は図6に示すようで、鉄筋径が細くなるに従って初期付着強度比 τ_{EP}/τ_N は低下する傾向にある。これは、池田らが指摘しているように、D10~D16の細径になると塗装後のふし勾配がゆるやかになるためと考えられる。写真1は試験に用いたエポキシ鉄筋のふし部の断面を示したもので、D10はD19に比べふし底部及び頂部で丸味を帯び、ふし勾配がゆるくなっていることが判る。しかし、最大付着強度比 τ_{EP}/τ_N はD10~D25の範囲では0.95~1.08であり、鉄筋径の影響はない。

一方、図5に示したように、400°C以上の加熱を受けるとD10エポキシ鉄筋の最大付着強度は裸鉄筋より約25%低下した。これは、樹脂の炭化によってふし部の塗膜に支圧抵抗が期待できなくなり、実質上支圧面積が減少し、コンクリートの割裂破壊に先行して支圧破壊が生じるためと考えられる。図7は、樹脂が完全に炭化した550°Cにおける最大付着強度と支圧面積係数BAに塗膜欠損による支圧面積の減少割合 $(h-t_{EP})/h$ (ここに、h:ふし高さ、 t_{EP} :塗膜厚さ)を乗じた値との関係を示したもので、これより、 τ_u と $BA \times (h-t_{EP})/h$ はほぼ直線関係にあり、D10のごとくふし高さに対する塗膜厚さの比が大ききBAが小さい鉄筋は加熱による塗膜欠損の影響を受け易いことが判かる。

3.2 加熱を受けたエポキシ鉄筋RC梁の曲げ性能

鉄筋加熱温度を300, 400, 550°Cとしたときのエポキシ鉄筋RC梁の荷重-たわみ曲線を図8に、試験結果の一覧を表4に、裸鉄筋と対比して示す。主筋に用いたD10は、先に述べたとおり付着に対する加熱の影響が最も顕著に表われた鉄筋である。図より明らかなように、加熱温度が550°Cになると、エポキシ鉄筋RC梁のたわみは荷重の増加に伴って裸鉄筋のそれより大きくなるものの、両者の降伏荷重は等しく、降伏以後の変形能、最大荷重も裸鉄筋と大差ない。

表4には、加熱によるコンクリートの圧縮強度、弾性係数の低下を考慮してe関数法により求めた降伏荷重の計算値及び建築学会規準に示される終局強度算定式による最大荷重の計算値を示している。降伏荷重の計算値と実験値の比は、常温で1.20~1.22, 550°C加熱時で1.16~1.26と加熱による耐力低下を概ね推定し得た。

なお、等モーメント区間の相対変位より求めた各加熱温度の常温に対する曲げ剛性比 E_{IT}/E_{IRT} は図9に示すようで、加熱温度が400°C以上にな

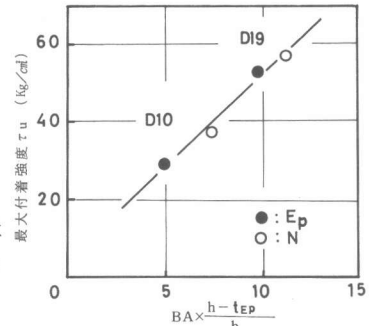


図7. 550°C 加熱後の最大付着強度

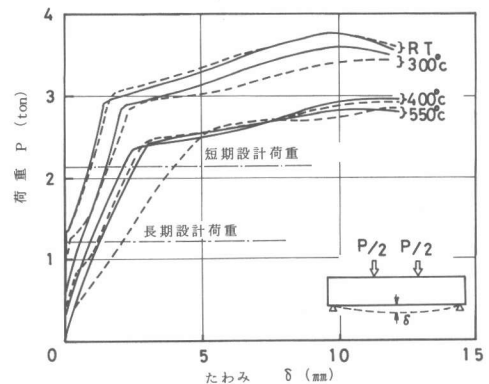


図8. 加熱を受けたエポキシ鉄筋RC梁の荷重-たわみ曲線

表4. 加熱を受けたエポキシ鉄筋RC梁の曲げ試験結果

加熱温度 (°C)	塗装の有無	降伏荷重			最大荷重		
		実験値 (t)	計算値 (t)	実/計	実験値 (t)	計算値 (t)	実/計
常温 (RT)	Ep	2.97	2.44	1.22	3.87	2.92	1.33
	N	2.93		1.20	3.94		1.35
300	Ep	2.92	2.35	1.24	3.43	2.71	1.27
	N	2.86		1.22	3.67		1.35
400	Ep	2.55	2.26	1.13	2.93	2.50	1.17
	N	2.38		1.05	3.12		1.25
550	Ep	2.60	2.07	1.26	2.90	2.25	1.29
	N	2.40		1.16	2.88		1.28

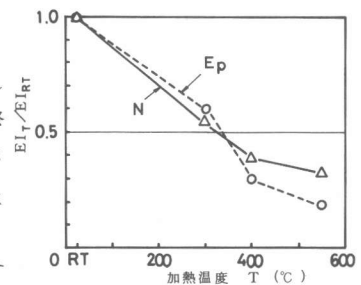


図9. 加熱による剛性低下

るとエポキシ鉄筋の剛性は裸鉄筋のそれより小さくなり、引抜き付着試験における初期すべりの影響が認められた。しかし、一般に、加熱を受けて付着劣化したRC梁の変形は、鉄筋の定着方法、せん断スパン長、梁断面形状寸法によって影響されると考えられる。本実験では、付着すべりの影響が最も顕著に表われるよう鉄筋端部にフックを設けていないが、一般のRC建造物では、梁主鉄筋が柱断面内に折曲げ定着されており、加熱による初期すべりの影響は相当緩和されるものと考えられる。

3.3 加熱を受けた重ね継手の強度

(1) 重ね長さの影響

重ね長さや梁強度との関係を図10、11に示す。図の縦軸は通し筋を用いた梁強度に対する比で示している。フックのない重ね継手の場合、常温ではエポキシ、裸鉄筋とも20D以上の重ね長さで通し筋と同等の耐力を示した。550℃の加熱を受けると重ね長さ20Dのエポキシ鉄筋は梁降伏前に継手部で付着破壊を示したが、重ね長さを30Dとした場合には通し筋とほぼ同等の耐力を示した。他方、継手端にフックを設けた重ね継手では、550℃加熱後も20Dの重ね長さがあれば通し筋と同等の耐力、変形能を示した（図12）。なお、90°フックでは、フックの先端が圧縮領域に定着される構造となり重ね長さ10Dにおいても通し筋と同等の耐力を示した。

(2) 重ね継手試験から推定される付着強度

フックのない重ね継手の強度試験結果から、550℃加熱を受けたエポキシ鉄筋の付着強度を推定した。結果は表5に示すとおりで、重ね継手試験から得られた最大平均付着強度 τ_{uj} は42kg/cm²と、引抜き付着試験で得られた値より大きく、建築学会規準に示される短期許容付着応力度の1.2倍となった。一般的には、加熱による最大付着強度の低下がほとんどないD19以上の鉄筋が主鉄筋として用いられることが多く、重ね継手としての安全率はさらに高くなると考えられる。

4 まとめ

エポキシ鉄筋を建築構造物へ適用する際の基本性能となる加熱の影響を調査した。結果を要約すると以下のとおり。(1)鉄筋温度が400~550℃で1時間加熱を受けたエポキシ鉄筋は、加力初期に付着すべりを生じるものの、 t_{EP}/h の小さいD19以上の鉄筋を用いれば、裸鉄筋とほぼ同等の最大付着強度を示す。(2)エポキシ鉄筋RC梁の強度は、550℃加熱後も裸鉄筋と同等で、20D~30Dの重ね長さがあれば、鉄筋降伏点以上の継手強度を有する(コンクリートの設計基準強度24.0kg/cm²の場合)。

○参考文献

- 小林, 伊藤, 武若: エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する実験的研究, コンクリート工学 Vol.21 Feb. 1983, PP91-106
- 池田, 山口, 伊藤: エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着に関する研究, 土木学会40周年講, 第5部, 昭和60年9月, PP157-158
- 国分, 岡村: 太径鉄筋の使用に関する研究, コンクリートライブラリー第43号, 1977, 8月, PP19-29

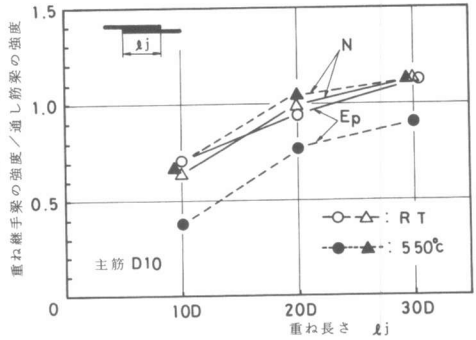


図10. 重ね長さの影響(ストレート)

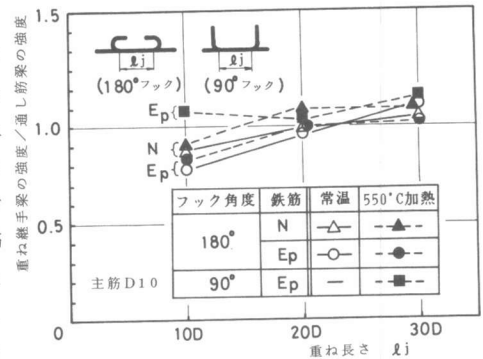


図11. 重ね長さの影響(フック付)

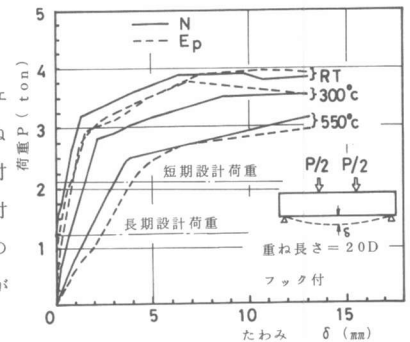


図12. 重ね継手を有するエポキシ鉄筋RC梁の荷重-たわみ曲線

表5. 重ね継手試験から求めた550℃加熱後の最大平均付着強度

鉄筋の種類	鉄筋径	重ね継手試験から求めた最大付着強度 τ_{uj} (kg/cm ²)	引抜き試験から求めた最大付着強度 τ_u (kg/cm ²)	短期許容付着応力度 τ_u (kg/cm ²)
Ep	D10	42	29	35
	D19	—	53	
	D19	—	57	
N	D10	≥49	37	35
	D19	—	57	

- 重ね長さ20Dにおける値鉄筋応力=3340(Ep), 3950(N)(kg/cm²)と仮定。
- $F_c = 24.0$ kg/cm²のときの値(建築学会規準)