

# 論文 鉄筋コンクリートへの炭素繊維シートを用いる電気防食・補強工法の適用性に関する基礎研究

小林 俊秋\*1・呉 承寧\*2

**要旨:** 炭素繊維シートを用いる電気防食工法は、炭素繊維シートの特性を利用しコンクリート構造物を電氣的に防食しながら補強する工法である。本実験は、この新しい電気防食・補強工法を、先ず使用材料の性能を調査しコンクリート構造物に対する防食・補強の効果を検討した。その結果、通電試験、電気化学的非破壊試験、付着試験、曲げ試験により、本工法の防食・補強効果が確認された。

**キーワード:** 電気防食, 炭素繊維シート, 補強

## 1. はじめに

電気防食工法は、コンクリート中の鉄筋に微小電流を流し電位を卑な方向に移行させ腐食反応を停止させる工法である。一方、炭素繊維は、高強度、高弾性係数、軽量、耐久性など構造材料として優れた性質をもち、炭素棒は、地下構造物の電気防食の不溶性陽極として用いられている。この炭素繊維シートを鉄筋コンクリート地上構造物に外部電源方式の陽極として用いると、容易にコンクリートに接着することができ面状に設置する方式なので鋼材に均一な防食電流を与えることができ、さらに、陽極の面積が大きいので、通電電圧が小さくなり、塩素ガス発生の問題も解決することになる。また床版の電気防食などではこの陽極としての炭素繊維シートが補強を兼ねることが可能である。本研究では腐食させた鉄筋コンクリート試験体に対して、炭素繊維シートを用いる電気防食を実施し、8ヶ月間の通電を行い、電気化学的非破壊試験により防食効果を確認し、炭素繊維シート補強実験で補強効果を確認した。

供試体は、本工法の鉄筋の腐食に及ぼす効果を検討するために、W/Cを55%とし、本工法を施したものと施さないものとした。供試体の一覧を表-1に示す。表-2は、使用材料の一覧、表-3はコンクリートの配合表である。厳しい腐食環境を模擬するため、コンクリートには12.4kg/m<sup>3</sup>の塩化ナトリウムを混入した

表-1 防食効果検討用試験体の一覧

記号	電気防食	
	あり	なし
L		○
LP	○	

表-2 使用材料の一覧

コンクリート	セメント	普通ポルトランドセメント
	細骨材	岩瀬産砕砂
	粗骨材	岩瀬産2005碎石
	混和剤	ポリカルボン酸系
陽極材	炭素繊維シート	一方向織物、高弾性系
	含浸接着剤	構造補強用エポキシ樹脂
プライマー	エポキシ樹脂	
照合電極	飽和銀塩化銀電極	
鉄筋	SD295A D13	

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	混和剤	NaCl
55	46	180	327	812	953	2.29	12.4

## 2. 実験の概要

### 2.1 防食効果検討実験試験体

\*1 オリエンタル建設(株)技術研究所 研究員 (正会員)

\*2 オリエンタル建設(株)技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

供試体の形状寸法を図-1に示す。40×20×12 cmの寸法とし、D13を縦横に3本を組合わせた鉄筋を埋込、鉄筋の電位を測定するために照合電極を設置した。打設4週間後通電面（底面）以外はエポキシ樹脂を塗り絶縁した。

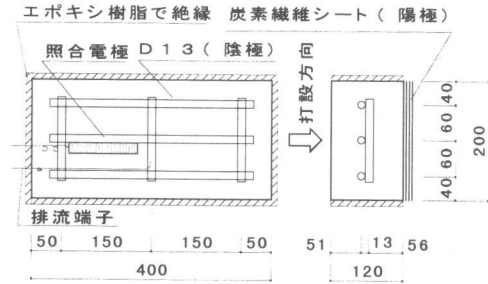


図-1 防食効果検討試験体形状寸法

鉄筋腐食を促進するために、7日間の乾燥および7日間の湿潤を1サイクルとする乾湿繰り返し実験を1年間行った。実験期間の環境温度は40℃で乾燥時の相対湿度60%、湿潤時95%とした。促進試験終了後、陽極設置面の下地処理を行いプライマーを塗布しコンクリートと接着剤の付着を良くする。その際塗布量を約0.05kg/m<sup>2</sup>と少量とした。これは、プライマーは、体積抵抗率は1×10<sup>12</sup>Ω・cm程度と極めて大きくコンクリート面に十分塗布した場合、絶縁体になるからである。プライマーの硬化後、供試体に炭素繊維シートをエポキシ樹脂で浸漬接着させて1方向に設置した。シート貼付状況を図-2に示す。通電方法は、図-3で示すように陽極と鉄筋間に定電流方式で通電した。炭素繊維シート陽極を接着する際は、シートを繊維方向に束ねて端部に金属製端子を挟み込み圧着させ、各炭素繊維間の電気的導通を確保させた。防食基準は、電気防食を行わない場合の自然電位からの電位変化量が-100mV以上とする。カソード分極試験により、電流と鉄筋の電位の関係を求め、防食電流量を決定し、復極試験により電位変化量を確認する。電源装置は、ポテンシオンガルバノスタット（容量1A、15V）を用いた。電気防食期間における環境条件は、鉄筋腐食促進試験と同様の乾湿繰り返し養生とした

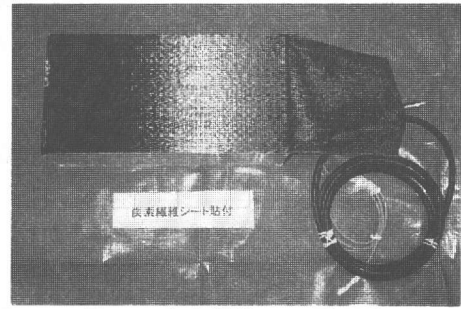


図-2 炭素繊維シート貼付状況

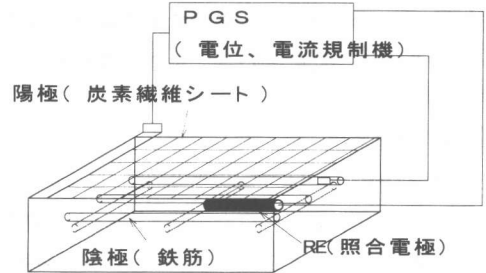


図-3 試験体の通電回路

## 2.2 測定項目および測定方法

### (1) 鉄筋の電位

電位の測定は、外部および埋込電極を用いた。測定値を銅硫酸銅電極電位に換算した。表-4に示すASTMによる電位と腐食確率評価の判定基準により、鉄筋の腐食状況を判定する。

### (2) 鉄筋の分極抵抗

鉄筋の分極抵抗の測定は、20kHzから10MHzまでの10周波数について、自然電位を基準に、±10mVの交流電圧を流したときの応答電流および位相差を計測した。通常、コンクリート中の鉄筋における正確な分極抵抗は得られない。ただし相対腐食速度を評価する際には、見掛けの分極抵抗が利用できる。分極抵抗による評価基準を表-5に示す。

### (3) 鉄筋のアノード分極曲線

鉄筋のアノード分極曲線を測定し、自然電位から+0.2V～0.6V間の最高電流密度Imaxを求め、コンクリート中の鉄筋に不働態被膜が形成されるかどうかの判定を試みた。アノード分極曲線の評価基準を表-6に示す。

表-4 ASTMの腐食判定基準<sup>1)</sup>

電位 (mV vs CSE)	腐食の確率
-200mVより貴	90%以上腐食なし
-200~-350mV	不確定
-350mVより卑	90%以上腐食あり

表-5 腐食速度の判定基準<sup>2)</sup>

分極抵抗 (kΩ・cm <sup>2</sup> )	腐食速度の判定
130-260より大	不働状態
52以上130以下	低から中程度の腐食速度
26以上52以下	中から高程度の腐食速度
26未満	激しい、高い腐食速度

表-6 アノード分極曲線の評価基準<sup>3)</sup>

レベル	評価基準
0	電流密度が1度でも100 μA/cm <sup>2</sup> を越えるもの (全く不動態がないもの)
1	電流密度が10~100 μA/cm <sup>2</sup> にあるもの (不完全ではあるが、若干は不動態があるもの)
2	電流密度が1度でも、10 μA/cm <sup>2</sup> を越え、且つグレード0, 1又は3に含まれないもの
3	電流密度が1~10 μA/cm <sup>2</sup> にあるもの
4	電流密度が1度でも、1 μA/cm <sup>2</sup> を越え、且つグレード0, 1, 2又は3に含まれないもの
5	電流密度が1 μA/cm <sup>2</sup> を越えないもの (非常に良好な不動態があるもの)

(4) 鉄筋の腐食面積および腐食量

所定養生後、試験体から鉄筋を取り出し、腐食部分をトレースし、画像処理ソフトにより写し取った腐食部分の面積を求める。その後、鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム溶液に48時間浸漬後、腐食による質量減少率を求める。

2.3 補強効果検討用供試体

陽極として使用されている炭素繊維シートの補強機能を検討するために付着および曲げ試験を行った。またシートの剥離進行を抑制するための機械的定着方法として図-4に示すUアンカー<sup>4)</sup>についても検討する。

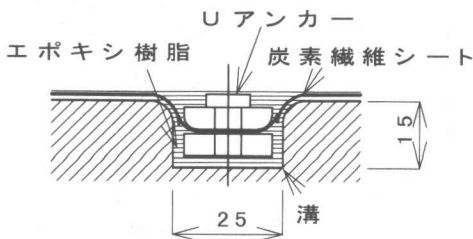


図-4 Uアンカー断面図

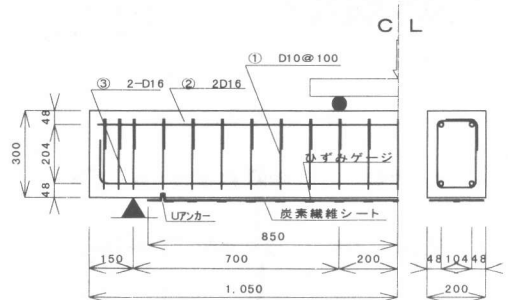
曲げ実験は、無補強、1層 (Uアンカーなし)、1層 (Uアンカーあり) および2層 (Uアンカーあり) の計4供試体を製作し、付着実験は、1種につき3個とし計15体制作する。補強効果検討用試験体の一覧を表-7に示す。

表-7 補強効果検討用試験体の一覧

実験項目	記号	シート補強		Uアンカー		
		なし	1層	2層	あり	なし
曲げ	S0	○				○
	S1		○			○
	S1U		○		○	
	S2U			○	○	
付着	S0-1	○				○
	S1-1		○			○
	S1U-1		○		○	
	S2-1			○		○
	S2U-1			○	○	

曲げ供試体は、図-5に示すようにはり型とし、幅20cm、高さ30cm、スパン180cm、主鉄筋はD16、スターラップは、D10を10cm間隔に配置した。打設後温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に設置して3週間で炭素繊維シートを接着し、その後1週間程度樹脂の養生を行った後に実験を行う。炭素繊維シートの繊維方向は全て供試体軸方向と同じである。載荷は油圧式ジャッキにより行い2点載荷とし、各荷重におけるひずみ、スパン中央のたわみを測定する。

付着試験は、土木学会規準「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」に準拠して図-5に示すように供試体にUアンカーを設置して実験を行った。



曲げ供試体

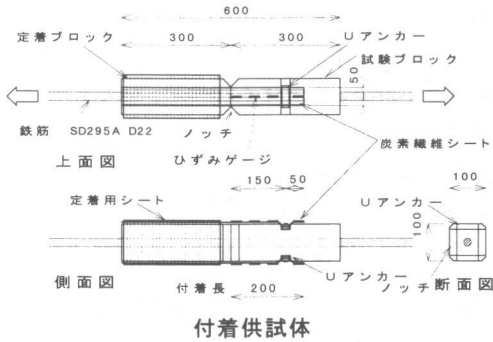


図-5 供試体形状寸法

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 通電前の状況

材齢 11 ヶ月の段階での鉄筋の自然電位の測定結果の例を図-6に示す。同図より L 供試体の電位分布は、ASTM の判定基準より、「90%以上の確率で腐食あり」であった。L 供試体の鉄筋を取り出し、腐食の程度を測定した。質量減少率の平均値は 1.4%、腐食面積率の平均値は 9.2%であった。図-7は L 供試体鉄筋の腐食発生位置を示す。同図より、鉄筋の腐食は十分進行しており、L 供試体について非破壊試験の測定結果による腐食確率評価との良好な対応が確認できた。L 供試体は、防食効果を明確に判断できる腐食状態であると考えられる。そこで L 供試体に本工法を実施する。

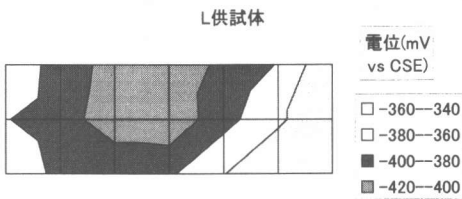


図-5 等電位線図



図-6 鉄筋の腐食発生位置

#### 3.2 通電試験の結果

L 通電供試体 (W/C=55%) における通電停止 24 時間後の電位および L 無通電供試体の自然電位の経時変化を図-8に示す。L 通電供試体は、通電処理前に比較して 200mV 程度貴側に移行している。ASTM の判定基準より、通電処理前には「90%以上の確率で腐食あり」であったものが通電処理後 8 ヶ月の鉄筋腐食状況は、「90%以上の確率で腐食なし」へ変化し、改善されていることがわかる。一方 L 無通電供試体は、殆ど変化は認められない。

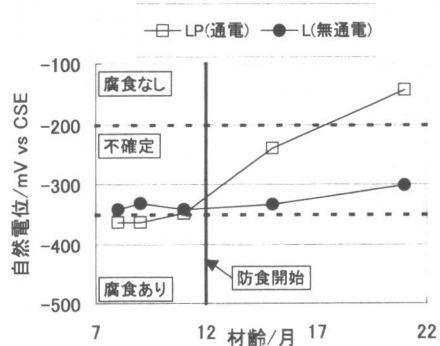


図-8 電位の経時変化

分極曲線、鉄筋の分極抵抗、鉄筋のアノード分極曲線の測定は、全て通電を一時中断して通電停止 24 時間後に行った。通電 8 ヶ月までのカソード分極試験の結果を図-9に示す。同図の分極曲線の傾きは、通電前に比較して通電後は大きい。これは鉄筋腐食の電気化学反応が起こりにくいことを表している。すなわち、8 ヶ月間の通電によって、鉄筋の腐食が抑制され、防食効果が得られたことを示している。

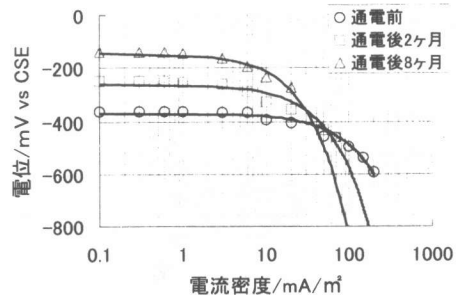


図-9 カソード分極試験の結果

鉄筋の分極抵抗を測定し処理後8ヶ月までの測定値を図-10に示す。L通電供試体の分極抵抗は、通電前  $8.6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  であったものが、通電後8ヶ月では  $26.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  に増加している。しかし表-5 腐食速度の判定基準より「激しい、高い腐食速度」の領域である鉄筋のアノード分極曲線を測定し処理後8ヶ月までの最高電流密度を図-11に示す。L通電供試体は、表-5 不働態<sup>グレイド</sup>の判定基準より、通電処理前には  $110 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  とグレード0 (全く不働態がないもの) の領域であったものが通電処理後8ヶ月では、 $83 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  とグレード1 ((不完全ではあるが、若干は不働態があるもの)の領域へと移行しており、不働態被膜再形成の方向へ移行している。一方L無通電供試体は、殆ど変化は認められない。

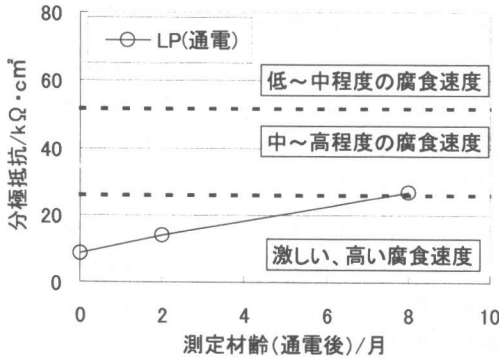


図-10 鉄筋の分極抵抗

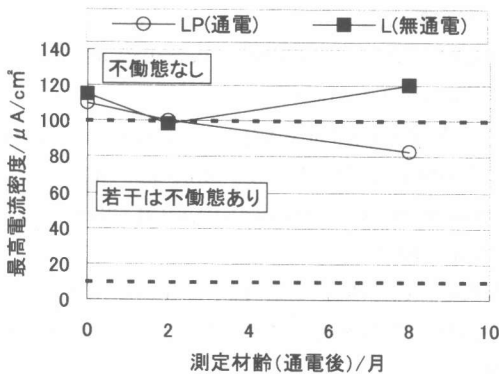


図-11 アノード分極試験の結果

表-8に通電状況の結果を示す。防食電流密度は、通電処理後8ヶ月で大幅に減少している。

一方通電回路の抵抗は増加している。これは材齢の経過によるコンクリートの含水率の低下による電気抵抗の増加、鉄筋の分極抵抗が増加したためと考えられる。防食電流を調整することにより必要以上にカソード分極させることなく復極量は100mVを維持した。電流遮断直後の電位は、通電処理後大幅に貴方向へ移行している。引き続き分極試験を行い適当な電流密度で通電試験を行う。

表-8 通電状況の結果

通電処理	電流密度 mA/ m <sup>2</sup>	電源電圧 V	電流遮断直後の電位mV vs CSE	復極量 mV	抵抗率 kΩ ・cm
前	50	4.37	-443	100	171
後2ヶ月	20	2.54	-356	114	249
後8ヶ月	15	4.33	-255	114	566

### 3.3 付着試験の結果

実験結果一覧を表-9に示す。荷重の増加に伴い、中央ノッチ部にひび割れが発生し、その後シートの剥離が発生し終局はシートの破断であった。図-12に2層Uアンカー供試体の引張荷重とシート各点のひずみの関係を示す。中心から15mmの位置では、ひずみが約120μで変曲点がある。この点は、コンクリート表面から付着切れを起こし始めた地点であると考えられる。付着試験で得られた荷重とシート各点のひずみの曲線から読みとった変曲点での引張荷重と試験体中心からの距離の関係を図-13に示す。引張荷重を比較すると、1層に比べ1層Uアンカー供試体は、アンカー定着によりシートの剥離が防止されより高い引張応力を負担したと考えられる。

表-9 実験結果一覧

供試体	荷重 P (kN)			
	付着試験 最大	曲げ試験		
		ひび割れ発生	軸方向鉄筋降伏	最大
無補強	11	29	94	100
1層	18	44	128	128
1層Uアンカー	21	47	133	133
2層	27	-	-	-
2層Uアンカー	29	54	162	162

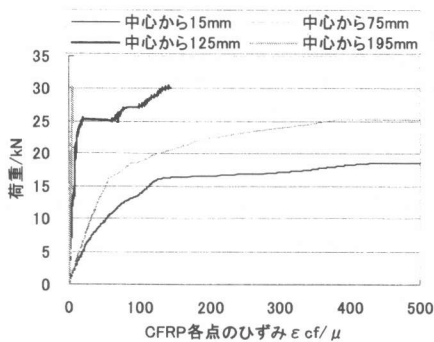


図-12 2層 Uアンカー供試体の引張荷重とシート各点のひずみの関係

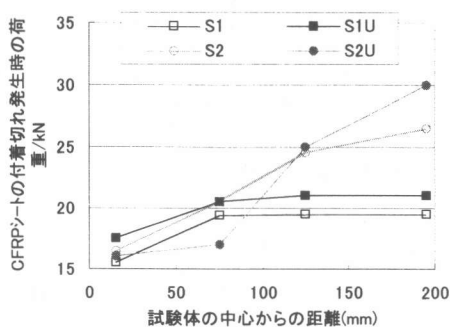


図-13 シートの付着切れ発生時の引張荷重とシート各点の関係

### 3.4 曲げ試験の結果

炭素繊維シートで補強した供試体は、軸方向鉄筋が降伏した後、スパン中央部付近のシートが破断し終局に至った。無補強供試体の最大荷重に比べ炭素繊維シート1層で約28%、1層Uアンカー定着で33%、2層Uアンカー定着で62%向上した。曲げ試験で得られた荷重とシート各点のひずみの曲線から読みとった変曲点における載荷荷重と試験体中心からの距離の関係を図-14に示す。シートの付着切れ発生時での載荷荷重を比較すると、1層に比べ1層Uアンカー供試体は、若干ではあるが大きい。アンカー定着によりシートの剥離が防止されていることがわかる。

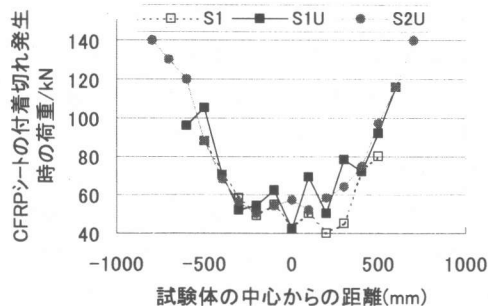


図-14 シートの付着切れ発生時の荷重とシート各点の関係

### 4. まとめ

本試験の範囲内において、以下の結論が得られた。

(1) 本工法の陽極装置は、電気防食工法の陽極装置として使用できることが確認できた。

(2) 本工法により8ヶ月間の電気防食を実施して、鉄筋の腐食性について、自然電位、分極抵抗およびアノード分極試験から評価を行った。その結果、電気防食により、鉄筋の腐食速度が減少し、腐蝕環境が改善される方向に向かっており、電気防食の効果が明らかになった。

(3) 炭素繊維シートで補強した供試体は、無補強供試体の最大荷重に比べ炭素繊維シート1層で約28%、1層Uアンカー定着で33%、2層Uアンカー定着で62%向上した。

### 参考文献

- 1) ASTM C876-80 : Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 2) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion(draft), BBRI-CSTC- WT CB, Dec. 1997
- 3) 大即信明, 池上明夫, 福手勤, 高木兼士: 種々の材料の鉄筋防食性能についての電気化学的評価, コンクリート工学論文集, 第1巻, 2号, pp.1-13, 1990.7.
- 4) Ahmed Khalifa, Tarek Alkhrdaji, Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement, Concrete International, pp49-54, 1999.10