打継ぎ部におけるコンクリートの中酸化現象が 鉄筋腐食の速度に及ぼす影響とその対策†

西 田 孝 弘* 大 即 信 明* 小長井 彰 祐**

Corrosion Rate of Steel Bar at Joint and Its Control Method in Reinforced Concrete Members Induced by Carbonation

by

Takahiro NISHIDA*, Nobuaki OTSUKI* and Akihiro KONAGAI**

Recently, it has been reported that corrosion in reinforced concrete members can be attributed due to defects in construction such as joint. And concrete near the joint is easily penetrated by carbon dioxide and thus the steel bar becomes corrosive. However, there are only few researches that investigate the corrosion rate of the steel bars at the joint in carbonated concrete members. Therefore the following investigations are carried out in this study. First, to investigate the corrosion rate of the steel bar near the joint in carbonated concrete members in laboratory. Second, to investigate which control method, electrodeposition method or surface-sealing method, is effective to reduce the corrosion rate on the steel bar near the joint in carbonated concrete members in laboratory. And lastly, to verify the results of the first two objectives in existing reinforced concrete member induced by carbonation.

In summary, it was shown that the corrosion rate on the steel bar generally becomes high at or under the joint. And it was confirmed that electrodeposition method was more effective as control method for the reduction of the corrosion rate on the steel bar near the joint in carbonated concrete member than surface-sealing method.

Key words : Joint, Corrosion rate, Control method, Carbonation

1 は じ め に

現在、我が国には数多くの鉄筋コンクリート部材が機能している。そして、これらは、我々の社会生活において重要な役割を担っている。しかしながら、これらの鉄筋コンクリート部材の中には、建設時の不手際により、初期欠陥が存在するものもある。これらの初期欠陥のひとつとして、「打継ぎ部」が挙げられる。

鉄筋コンクリート部材の作製において、打継ぎ処理が不適切な場合、あるいは打ち重ね時間が長い場合、そのコンクリートには打継ぎ部が発生する可能性が高い。また、一般に、打継ぎ部での物質透過性は高いと言われている。したがって、打継ぎ部に二酸化炭素、水、あるいは酸素などの腐食要因物質が浸透した場合、この部分での鉄筋腐食が懸念される。

鉄筋コンクリート部材において鉄筋腐食が進行した場合、ひび割れの発生やかぶりのはく落が生じる。特に、打継ぎ部では、局所的な腐食（マクロセル腐食）が進行すると考えられるため、その鉄筋腐食速度は大きくなると考えられる。¹⁾したがって、打継ぎ部での鉄筋腐食は、鉄筋コンクリート部材の耐久性に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、これまで打継ぎ部の存在を認めることははばかれ、かつ、打継ぎ部での鉄筋腐食速

度を検討した事例は数少ない。さらに、適切な対応を行う必要があるにも拘わらず、実際に打継ぎ部での鉄筋腐食速度を抑制する場合も数少ない。したがって、鉄筋コンクリート部材における打継ぎ部での鉄筋腐食速度を把握し、その抑制工法を提案することは、社会的および技術的に大きな意義があると考えられる。

以上の背景より、本論文では以下の3項目を目的とする。すなわち、(1) 中性化した鉄筋コンクリート供試体における打継ぎ部での鉄筋腐食速度を把握すること、(2) 中性化した鉄筋コンクリート供試体における打継ぎ部での鉄筋腐食速度の抑制工法を検討すること、(3) 上記(1)および(2)で得られた結果を、中性化した既存鉄筋コンクリート部材における打継ぎ部での鉄筋腐食において検証すること、を目的とする。なお、本論文では、鉄筋コンクリート供試体中に意図的に打継ぎ部を作製して検討する。また、本研究では、腐食要因物質は二酸化炭素、水、および酸素とし、中性化した鉄筋コンクリート部材を対象とする。

2 打継ぎ部での鉄筋腐食速度の把握

本章では、打継ぎ部を意図的に作製した高さ180cmの鉄筋コンクリート供試体を用い、打継ぎ部での鉄筋腐食速度を把握した。

† 原稿受理 平成14年8月22日 Received Aug. 22, 2002

* 正 会 員 東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山, Graduate school of Sci. and Eng., Tokyo Inst. of Tech., Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

** 国土交通省東北地方整備局 〒980-8602 仙台市青葉区二日町, Tohoku Regional Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Aoba-ku, Sendai, 980-8602

2・1 実験概要

(1) 供試体概要

Fig. 1 に供試体概要を示す。本論文で意図的に作製した打継ぎ部の高さは150cmとした。これは、一般の施工における打重ね高さが約150cmと考えられるためである。また、打継ぎ部の下部を母材部、上部を継足部と称した。さらに、鉄筋を流れる電流を直接測定するため、18個の要素に分割した鉄筋（分割鉄筋と称す）を用いた。

次に分割鉄筋の作製方法を示す。まず、D19の異形鉄筋（SD345）を所定の長さ（0.5、1.0、5.0、10.0、20.0 cm）に切断し、両端部にリード線をはんだにより接続した。次に、Fig. 1 に示したように、鉄筋要素をエポキシ樹脂により接続した。最後に、隣接する鉄筋要素に接続されたリード線をそれぞれつなぎ合わせることで、電氣的に一本の鉄筋とした。なお、本論文では、打継ぎ部近傍において詳細に検討できるように、打継ぎ部近傍の鉄筋要素長さを0.5cmとした（Fig. 1 参照）。また、腐食速度の測定に際して、リード線に沿う空隙およびはんだと鉄筋間での異種金属の接触等の影響が考えられる。そのため、使用したリード線は測定に影響を与えない範囲で可能な限り細いもの（φ1.0mm）を使用した。また、はんだと鉄筋の接触部はエポキシ樹脂により被覆し、外

部環境との接触を防止した。

以下に使用材料を示す。本論文では、セメントとして普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm³、比表面積3.27m²/kg）、細骨材として小櫃産陸砂（表乾密度2.59g/cm³、F.M.2.51、吸水率1.94%）、粗骨材として青梅産碎石（表乾密度2.64g/cm³、F.M.7.00、吸水率0.93%）を使用した。また、混和剤として、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤、メチルセルローズ系増粘剤を使用した。Table I に本論文で検討した配合を示す。なお、水セメント比は30%、55%、80%の3水準とした。また、ブリーディング率は0.5%以下の場合と1.0%以上の場合の2水準とした。ここで、ブリーディング率が0.5%以下の場合を「低い」とし、ブリーディング率1.0%以上の場合を「高い」とした。

(2) 打設方法および養生方法

打設方法を示す。まず、分割鉄筋をかぶりが3cmとなる位置に垂直に配置し、母材部（底面から高さ150cmまで）を打設した。母材部の打設終了後から18時間後に、後述する打継ぎ処理を行い、継足部（高さ150cmから180cmまで）を打設した。なお、この18時間は、母材部の打設終了時刻を16時、継足部の打設開始時刻を翌日10時と想定し設定した。

次に養生方法を示す。継足部の打設終了後から24時間気中養生（温度20℃、相対湿度60%）した。脱型後、東京都目黒区（平均気温20℃、平均降水量80mm/month）にて28日間屋外暴露した。その後、中性化促進環境下（二酸化炭素濃度10%、温度40℃、相対湿度90%）にて120日間養生した。

(3) 打継ぎ処理方法

本論文では打継ぎ処理方法を2水準設けた。すなわち、母材上面のレイタンスをワイヤブラシで十分（5mm程度）除去した場合を「良い」とし、レイタンス除去を行わず、かつ降雨があったことを想定し水道水を平均水深5mmとなるよう投入した場合を「悪い」とした。

(4) 実験ケース

Table II に本章で検討した実験ケースを示す。パラメータは、水セメント比3水準（30、55、80%）、ブリーディング率2水準（低、高）、打継ぎ処理2水準（良、悪）とし、全9ケースを対象とした。なお、1ケースにつき2供試体とし、それらの平均値を用いた。

Fig. 1. Configuration of Specimen.

Table I. Mixing Proportion.

W/C (%)	(kg/m ³)				(g/m ³)		Slump (cm)	Air (%)	Bleeding Ratio (%) ^{*4}	Compressive Strength (MPa)
	W	C	S	G	Ad ^{*1}	T ^{*2}				
30	165	550	621	958	3437	—	6.4	1.7	0.10 (Low)	73.7
	165	550	621	958	6875	—	13.0	2.0	1.00 (High)	54.7
55	173	315	771	1037	—	—	9.0	2.2	0.27 (Low)	38.2
	216	392	682	922	—	—	42 ^{*3}	1.5	1.90 (High)	35.3
80	206	258	826	912	—	3000	59 ^{*3}	2.5	0.42 (Low)	17.7
	375	469	587	636	—	2600	73 ^{*3}	2.0	5.00 (High)	11.7

^{*1} High-range water-reducing agent, ^{*2} Viscosity control agent, ^{*3} Slump flow, ^{*4} JIS A 1123

Table II. Experimental Cases.

Bleeding Ratio	Joint Treatment	W/C		
		30	55	80
Low	Good	—	○	—
	Bad	—	○	—
High	Good	○	○	○
	Bad	○	○	○
Non Joint		—	○	—

(5) 検討項目

鉄筋腐食は、電気化学反応により起こる。したがって、この反応過程において電子の授受があるため、電流を測定することにより鉄筋腐食速度が算定できる。一般に、腐食電池が広範囲に渡って形成されている場合の腐食はマクロセル腐食と呼ばれる。一方、腐食電池が近傍で均一に形成されている場合の腐食はミクロセル腐食と呼ばれる。Fig. 2にマクロセル腐食およびミクロセル腐食の概念図を示す。本論文では、分割鉄筋を使用することにより、隣り合う鉄筋要素間から流入する電流をマクロセル電流、同一の鉄筋要素内のみを流れる電流をミクロセル電流と定義し、区別して測定した。¹⁾次に、マクロセル電流密度の正の値とミクロセル電流密度の和を全腐食電流密度とした。最後に、全腐食電流密度を鉄筋腐食速度に換算した。同時に、物質透過性を評価するため、コンクリートの酸素透過量を測定した。以下にそれぞれの測定値および算定値の測定方法および算定方法を示す。

a) 電流密度

マクロセル電流密度は、隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続して測定し、隣り合う鉄筋要素から流入する電流の和を鉄筋表面積で除することにより算定した。ここで、マクロセル電流密度の値が正の部分はアノード部、負の部分はカソード部を意味する。

また、ミクロセル電流密度は、水流らの研究²⁾を参考とし算定した。すなわち、鉄筋要素を流れるミクロセル電流密度 I_i は交流インピーダンス法にて測定されるそれぞれの鉄筋要素の分極抵抗を用い、式 (1)より算定される。

$$I_i = K_i / R_{pi} \quad (1)$$

ここで、 I_i : 鉄筋要素 i でのミクロセル電流密度 (A/cm^2)

R_{pi} : 鉄筋要素 i での分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)

K_1 : 定数 = $0.0209 (V)^2$

Fig. 2. Conceptual Scheme of Macro-Cell Corrosion and Micro-Cell Corrosion.

さらに、全腐食電流密度は、マクロセル電流密度の正の値とミクロセル電流密度の和とした。

b) 鉄筋腐食速度

電流密度が $100 \mu A/cm^2$ で腐食する時の腐食速度は、 $1.16 mm/year$ である。¹⁾これを基に、本論文では、全腐食電流密度を鉄筋腐食速度に換算した。

c) 酸素透過量

供試体中の鉄筋とステンレス板の間にポテンシオスタットを接続し、鉄筋を陰極、ステンレス板を陽極として、 $860 mV$ の電位差を設けた。³⁾この電位差は、あらかじめ同様の供試体のカソード分極曲線を測定し、限界電流密度となる電位であり、しかも水素の発生のないことを確認済みである。コンクリートの酸素透過量 dQ/dt は、この限界電流密度を用い、式 (2)より算定される。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{I_{lim}}{n \cdot F} \quad (2)$$

ここで、 dQ/dt : 単位時間あたりの任意の鉄筋要素への酸素供給量 ($mol/cm^2/sec$)

I_{lim} : 限界電流密度 (A/cm^2)

n : カソードで消費される酸素の価数 ($n = 4$)

F : ファラデー定数 = $96500 (C/mol)$

2・2 実験結果

(1) 鉄筋腐食速度分布

Fig. 3に水セメント比が55%の場合、打継ぎ処理が悪い場合、かつブリーディング率が高い場合の鉄筋腐食速度分布を示す。また、Fig. 4に同一条件の場合の打継ぎ部近傍の切断面にフェノールフタレイン 1.0wt% エタノール溶液を噴霧した様子を示す。Fig. 3から、打継ぎ部およびその下部において、局所的に鉄筋腐食速度は大きくなることが確認される。これは、Fig. 4より説明される。すなわち、打継ぎ部では、健全部と比較して腐食要因物質の浸透量が多く、中性化領域が深くまで進行しているため、打継ぎ部近傍での鉄筋腐食速度が大きくなると考えられる。特に、Fig. 4より、中性化領域は、継足部と比較して、母材部の方が深く進行していることが確認される。このため、打継ぎ部およびその下部において、局所的に鉄筋腐食速度は大きくなると考えられる。これは、打設上面でのブリーディング水により、母材上部が粗な

Fig. 3. Distribution of Corrosion Rate. (W/C : 55%, Joint Treatment : Bad, Bleeding Ratio : High)

Fig. 4. Cross Section near Joint after Spreading Phenolphthalein 1.0wt% Ethanol Solution.
(W/C : 55%, Joint Treatment : Bad, Bleeding Ratio : High)

構造となったためと考えられる。

ここで、鉄筋コンクリート部材において、鉄筋腐食の影響が最も大きく現れるのは鉄筋腐食速度が最大の部位であると考えられる。したがって、以下の検討では、打継ぎ部あるいはその下部で算定された鉄筋腐食速度の最大値について検討する。

(2) 水セメント比が鉄筋腐食速度の最大値に及ぼす影響

Table IIIに、ブリーディング率が高い場合、かつ打継ぎ処理が良い場合の水セメント比が鉄筋腐食速度の最大値および打継ぎ部での酸素透過量に及ぼす影響を示す。これより、鉄筋腐食速度の最大値は、水セメント比の上昇に伴い、増大することが確認される。これは、水セメント比の上昇に伴い、打継ぎ部での酸素透過性、すなわち物質透過性が上昇し、腐食要因物質の浸透量が増加するためと考えられる。

(3) ブリーディング率が鉄筋腐食速度の最大値に及ぼす影響

Table IVに、水セメント比が 55% の場合、かつ打継ぎ処理が良い場合のブリーディング率が鉄筋腐食速度の最大値および打継ぎ部の酸素透過量に及ぼす影響を示す。

Table III. Influence of W/C on Maximum Value of Corrosion Rate and Oxygen Permeability in Joint.
(Bleeding Ratio: High, Joint Treatment: Good)

W/C (%)	Maximum Value of Corrosion Rate (mm/year)	Oxygen Permeability ($\times 10^{-11}$ mol/cm ² /sec)
30	0.00049	0.53
55	0.01192	1.80
80	0.02896	4.69

Table IV. Influence of Bleeding Ratio on Maximum Value of Corrosion Rate and Oxygen Permeability in Joint.
(W/C : 55%, Joint Treatment : Good)

Bleeding Ratio	Maximum Value of Corrosion Rate (mm/year)	Oxygen Permeability ($\times 10^{-11}$ mol/cm ² /sec)
Low	0.00099	1.31
High	0.01192	1.80

これより、鉄筋腐食速度の最大値は、ブリーディング率が高い場合、増大することが確認される。これは、ブリーディング率が高い場合、打継ぎ部での酸素透過性、すなわち物質透過性が上昇し、腐食要因物質の浸透量が増加するためと考えられる。

(4) 打継ぎ処理が鉄筋腐食速度の最大値に及ぼす影響

Table Vに、水セメント比が 55% の場合、かつブリーディング率が高い場合の打継ぎ処理が鉄筋腐食速度の最大値および打継ぎ部の酸素透過量に及ぼす影響を示す。これより、鉄筋腐食速度の最大値は、打継ぎ処理が悪い場合、増大することが確認される。これは、打継ぎ処理が悪い場合、打継ぎ部での酸素透過性、すなわち物質透過性が上昇し、腐食要因物質の浸透量が増加するためと考えられる。

(5) 打継ぎ部の有無が鉄筋腐食速度の最大値に及ぼす影響

Table VIに、打継ぎ部の有無が鉄筋腐食速度の最大値に及ぼす影響を示す。これより、鉄筋腐食速度の最大値は、打継ぎ部が無い W/C55% の場合に対し、打継ぎ部が有り W/C55% の場合は 15 倍、打継ぎ部が有り W/C80% の場合は 36 倍となることが確認される。

3 打継ぎ部での腐食速度抑制工法の提案

前章では、中性化した鉄筋コンクリート供試体における打継ぎ部での鉄筋腐食速度を把握した。その結果、打継ぎ部およびその下部において、局所的に鉄筋腐食速度は大きくなることが確認された。また、鉄筋腐食速度の最大値は、水セメント比が高い場合、ブリーディング率が高い場合、および打継ぎ処理が悪い場合、増大することが確認された。本章では、前章の結果を踏まえ、打継ぎ部を意図的に作製した高さ 40cm の鉄筋コンクリート供試体を用い、打継ぎ部での鉄筋腐食速度の抑制工法を提案した。なお、打継ぎ部の位置は供試体底部から 20cm の位置とした。

Table V. Influence of Joint Treatment on Maximum Value of Corrosion Rate and Oxygen Permeability in Joint.
(W/C : 55%, Bleeding Ratio : High)

Joint Treatment	Maximum Value of Corrosion Rate (mm/year)	Oxygen Permeability ($\times 10^{-11}$ mol/cm ² /sec)
Good	0.01192	1.80
Bad	0.02532	3.85

Table VI. Influence of Existing of Joint on Maximum Value of Corrosion.

W/C (%)	Maximum Value of Corrosion Rate with Joint	Maximum Value of Corrosion Rate without Joint
55	0.01192 ^{*1}	0.00079 ^{*2}
80	0.02896 ^{*1}	—

^{*} Bleeding Ratio: High, Joint Treatment: Good

^{*} Bleeding Ratio: High

3・1 実験概要

(1) 供試体概要

Fig. 5 に供試体概要を示す。本章で使用した鉄筋は $\phi 9$ の丸鋼 (SR235) とした。また、分割鉄筋作成方法、配合、鉄筋以外の使用材料、および打設方法は、前章で示した供試体と同様とした。水セメント比は、30%、55%、80% の 3 水準とした。また、ブリーディング率および打継ぎ処理は、打継ぎ部での鉄筋腐食速度が最大となる場合、すなわちブリーディング率が高い場合、かつ打継ぎ処理が悪い場合とした。

(2) 養生方法

継足部の打設後から 24 時間湿空養生 (温度 20℃, 相対湿度 90%) した。脱型後, 28 日間湿空養生 (温度 20℃, 相対湿度 90%) した。そして, 暴露面以外をエポキシ系樹脂により被覆した。その後, 中性化促進環境下 (二酸化炭素濃度 10%, 温度 40℃, 相対湿度 90%) にて 56 日間養生した。さらに, 中性化促進環境下から取り出した供試体に対し, 腐食速度抑制工法を適用した。その 3 日後から, さらに中性化促進環境下にて 28 日間養生した。

(3) 検討項目

本章では, 前章と同様に鉄筋腐食速度を算出した。その後, 得られた鉄筋腐食速度から, 既往の研究を参考にし, ひび割れ発生推定年数を算出した。

a) 鉄筋腐食速度および酸素透過量

鉄筋腐食速度および酸素透過量の算定方法は前章と同様である。

b) ひび割れ発生推定年数

前田⁴⁾は, コンクリート中铁筋に直流電流を通じ, 強制的に腐食を起こさせることにより, 鉄筋コンクリート部材のひび割れが発生するまでに必要な鉄筋腐食量を測定している。その結果, ひび割れの発生までに必要な単位面積当りの鉄筋腐食量は, かぶりが 3cm の場合, 10 mg/cm² であるとしている。本章では, この腐食量を基に, ひび割れ発生推定年数を算出した。

以下に算定方法を示す。鉄のアノード反応は, 式 (3) のように表すことができる。

したがって, 腐食電流密度が $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の場合, 1 年間の鉄筋腐食量 W_{cor} は式 (4) のように計算される。

$$W_{cor} = I_{cor} \times T \times M_{Fe} + C = 9.15 \quad (4)$$

Fig. 5. Configuration of Specimen.

ここで, W_{cor} : 鉄筋腐食量 (mg/cm²/year)

I_{cor} : 腐食電流密度 = 0.000001 (A/cm²)

T : 1 年間の秒数 = $31\,536\,000$ (sec)

M_{Fe} : 鉄 1mol の質量 = $56\,000$ (mg)

C : 電子 2mol の電気量 = $193\,000$ (C)

この値と前述したひび割れが発生するまでに必要な鉄筋腐食量を考慮すると, 腐食電流密度が $1.09\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の場合, コンクリートには 1 年でひび割れが発生すると推定される。また, 前述したように, 鉄筋が $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ で腐食する場合, 腐食速度は, $0.0116\text{mm}/\text{year}$ である。¹⁾

以上を整理すると, 腐食電流密度が $1.09\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の時, 腐食速度は $0.0127\text{mm}/\text{year}$ となり, ひび割れ発生までの推定年数が 1 年となる。したがって, ひび割れ発生推定年数 T_{cr} は式 (5) より算定される。

$$T_{cr} = K_2 / R_{cor} \quad (5)$$

ここで, T_{cr} : ひび割れ発生推定年数 (year)

R_{cor} : 鉄筋腐食速度 (mm/year)

K_2 : 定数 = 0.0127 (mm)

3・2 腐食速度抑制工法の概要

本章では, 中性化した鉄筋コンクリート部材における打継ぎ部での腐食速度抑制工法について検討した。しかしながら, 現在までに打継ぎ部を対象とした腐食速度抑制工法は存在しない。したがって, ひび割れを対象とした補修工法である電着工法および表面処理工法の 2 種類を検討した。なお, 鉄筋コンクリート部材のひび割れ補修工法には上記の他にも, 断面修復工法や樹脂注入工法などが挙げられる。しかしながら, 断面修復工法については, 著者らの既往の研究⁵⁾より, 新たなマクロセル腐食が既存部と新設部の間に形成されることが確認されている。一方, 樹脂注入工法については, 打継ぎ部での母材部と継足部間の隙間が微細なため, 深部への樹脂の注入は期待できない。よって, 断面修復工法や樹脂注入工法は検討しないこととした。以下に電着工法および表面被覆工法の概要を示す。

(1) 電着工法

Fig. 6 に電着工法の原理を示す。まず, 内部鉄筋を陰極, 外部電極を陽極に接続し, 両電極間に電解質溶液を介し直流電流を通ずる。これより, 電解質溶液中に存在する陽イオンを打継ぎ部へ移動させる。この結果, 電着通電に伴い析出する物質 (電着物と称す) により鉄筋コンクリート部材の打継ぎ部を被覆する。なお, 本論文で

Fig. 6. Principle of Electrodeposition to Concrete.

電着工法を採用した理由として、本工法により、打継ぎ部の被覆と同時にコンクリートの再アルカリ化ができることが挙げられる。

電着工法は、①腐食速度の大きい部分のコンクリートを改質すること、および、②その部分への腐食要因物質の透過を抑制すること、を目的とする。ここで、腐食速度の大きい部分は、前章の結果より定義した。すなわち、Fig. 3に示したように、腐食速度の大きい部分とは、打継ぎ部およびその下部を示し、局所的に鉄筋腐食速度が大きくなる部分である。したがって、電着工法は、腐食速度の大きい部分、すなわち、打継ぎ部から上部2cm、下部8cm、合計10cmの範囲に対し適用することとした(Fig. 7参照)。また、電着条件は既往の研究を参考とし、⁶⁾外部溶液として酢酸マグネシウム水溶液(0.10mol/l)を用い、電着期間7日間、電流密度1.0A/m²とした。なお、実際の施工においては、パネルを用いて対象とする部位のみに電着工法を適用すると考えられるため、暴露面以外はエポキシ樹脂により被覆し、電着工法による補修効果の影響が現れないように配慮した。

(2) 表面被覆工法

表面被覆工法とは、コンクリート表面を樹脂により被覆し、コンクリートへの腐食要因物質の浸透を抑制する工法である。なお、使用した樹脂は、ひび割れの補修に使用されているものであり、ひび割れ浸透接着用エポキシ樹脂と呼ばれている。この樹脂は、粘性が低く微細なひび割れに対する浸透性が高い。これより、打継ぎ部深部への浸透が期待できるため、本樹脂を使用した。Table VIIに本樹脂の性状を示す。

表面被覆工法は、腐食速度の大きい部分への腐食要因物質の透過を抑制することを目的とする。したがって、樹脂を被覆する面は、電着工法と同様に腐食速度の大きい部分、すなわち打継ぎ部から上部2cm、下部8cm、合計10cmの範囲とした(Fig. 7参照)。

3・3 実験結果

(1) 鉄筋腐食速度および酸素透過量

Table VIIIに腐食速度抑制工法適用前後の鉄筋腐食速度の最大値を、Table IXに酸素透過量をそれぞれ示す。これらより、コンクリートのW/Cが30%および50%の場合、何れの抑制工法を適用しても鉄筋腐食速度の最大値

Fig. 7. Applied Area of Control Method.

(The concrete surfaces except the exposure surface are covered with epoxy resin)

Table VII. Property of Resin.

Property	Unit	Value	Testing Method
Before Hardening	Viscosity	mPa·s	400
	Useable Time	Min.	60
	Shrinkage Ratio	%	1.4
After Hardening	Bond Strength	MPa	5.0
	Decreasing Ratio of Bond Strength	%	76

Table VIII. Corrosion Rate in Joint after and before Applying Control Method.

Control Method	W/C(%)		
	30	55	80
Before	0.00129	0.06578	0.12947
EDM ^{*1}	0.00029	0.00026	0.12779
SSM ^{*2}	0.00102	0.00079	0.12215

Unit: mm/year

*1 EDM: Electrodeposition Method

*2 SSM: Surface-Sealing Method

は抑制され、同程度の値になることが確認される。特に、電着工法を適用した場合、表面被覆工法を適用した場合と比較して、その効果が高いことが確認される。これは、電着工法を適用した場合、①腐食速度の大きい部分への腐食要因物質(酸素、水等)の浸透量が減少したため、および②中性化したコンクリートが再アルカリ化され、再び不導体被膜が再形成されたためと考えられる。一方、表面処理工法を適用した場合、上記①と同様に、腐食速度の大きい部分への腐食要因物質の浸透量は減少したが、中性化したコンクリートの再アルカリ化は達成されない。この結果、本論文で対象とした中性化した鉄筋コンクリート部材の打継ぎ部での鉄筋腐食のように局所的に鉄筋腐食速度が大きくなる場合、その部分の腐食要因物質の浸透抑制のみならず、コンクリートの再アルカリ化も期待できる電着工法を適用することが望ましいと考えられる。一方、コンクリートのW/Cが80%の場合、腐食速度抑制工法を適用しても腐食速度に差は見られなかった。これは、W/Cが80%の場合、コンクリートが非常に多孔質となり、腐食速度抑制工法を適用した部分以

Table IX. Oxygen Permeability in Joint after and before Applying Control Method.

Control Method	Oxygen Permeability in Joint (*10 ⁻¹¹ mol/cm ² /sec)
Before	4.67
EDM ^{*1}	3.67
SSM ^{*2}	1.10

*1 EDM: Electrodeposition Method

*2 SSM: Surface-Sealing Method

Table X. Estimated Years of Cracking after and before Applying Control Method.

Control Method	W/C(%)		
	30	55	80
Before	9.84	0.19	0.10
EDM ^{*1}	44	49	0.10
SSM ^{*2}	12	16	0.11

Unit: year

*1 EDM: Electrodeposition Method

*2 SSM: Surface-Sealing Method

外での腐食要因物質の浸透が容易となるためと考えられる。すなわち、非常に多孔質なコンクリートの中に存在する鉄筋の腐食速度を抑制する場合、打継ぎ部近傍での腐食要因物質の抑制のみならず、部材全体での腐食抑制物質（特に酸素）の抑制が必要であると考えられる。

(2) ひび割れ発生推定年数

Table X に腐食速度抑制工法適用前後のひび割れ発生推定年数を示す。これより、W/C が 30% および 55% の場合、いずれの腐食速度抑制工法を適用しても、同程度の値になることが確認される。一方、W/C が 80% の場合、いずれの工法を適用しても、ひび割れ発生推定年数の増加は確認されない。これは、先に示したように、非常に多孔質なコンクリートの中に存在する鉄筋の腐食速度を抑制する場合、打継ぎ部近傍での腐食要因物質の抑制のみならず、部材全体での腐食抑制物質の抑制が必要であるためと考えられる。

また、以下に、ひび割れ発生推定年数を用いた、適切な腐食速度抑制工法の選定例を示す。まず、中性化した鉄筋コンクリート部材の条件として、水セメント比が 55% であり、ひび割れ発生が許されない年数が 30 年間の場合を想定する。この場合、Table X より、ひび割れ発生推定年数が 44 年間の電着工法が選定される。また、ひび割れ発生が許されない年数を 10 年間とした場合、電着工法あるいは表面被覆工法の何れを用いた場合も目標とする効果を得ることができる。このように、Table X により、それぞれの条件に基づき適切な腐食速度抑制工法を選定することが可能となる。

4 既存鉄筋コンクリート部材における打継ぎ部での鉄筋腐食速度の把握とその抑制工法の適用

前章までに、中性化した鉄筋コンクリート供試体における打継ぎ部での腐食速度の把握、およびその抑制工法を検討した。本章では、既存鉄筋コンクリート部材における鉄筋腐食速度を把握した。次に、腐食速度抑制工法を適用した。以上の結果より、前章までの鉄筋コンクリート供試体より得られた結果を既存陸上鉄筋コンクリート部材において検証した。

4.1 実験概要

(1) 既存鉄筋コンクリート部材の概要

対象とした既存鉄筋コンクリート部材は、東京都目黒区地上 20m 位置し、竣工後 36 年が経過した東側壁面である。打継ぎ部およびその下部のかぶりが一部はく落し、

錆汁が散見された。外部環境を考慮すると、中性化により生じた腐食と判断された。また、シュミットハンマー法によるコンクリートの推定圧縮強度は 35MPa であった。さらに、フェノールフタレイン法により測定した結果、健全部の中性化深さは 43mm であった。

(2) 既存鉄筋コンクリート中鉄筋の腐食速度の算定方法

前章までの検討では、分割鉄筋を用いることにより、マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を区別し測定し、鉄筋腐食速度を算出した。しかしながら、既存陸上鉄筋コンクリート部材においては、マクロセル電流密度を直接測定することは出来ない。そこで、本論文では、著者らにより開発された既存鉄筋コンクリート部材中鉄筋のマクロセル電流密度の推定方法を用いた。⁷⁾本方法は、まず、既存鉄筋コンクリート部材において、自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗を測定する。これらを電気回路モデルに代入することにより、既存コンクリート中鉄筋におけるマクロセル電流密度を推定するものである。なお、腐食速度抑制工法適用後、腐食速度を安定させるため、各工法を適用してから 1 ヶ月間放置し、測定を行った。

4.2 打継ぎ部での腐食速度の把握

Fig. 8 に測定箇所の様子および鉄筋腐食速度分布を示す。これより、打継ぎ部およびその下部において、局所的に鉄筋腐食速度は大きくなることが確認される。これは、鉄筋コンクリート供試体より得られた結果と同様の傾向である。

4.3 打継ぎ部での腐食速度抑制工法の適用

前節より、鉄筋腐食速度は打継ぎ部およびその下部において大きくなることが確認された。そこで本節では、Fig. 8 の点線部分に対し、電着工法および表面被覆工法を適用することとした。なお、電着工法の適用の際には、脱塩工法や再アルカリ化工法で用いられるように、補修対象面と同寸法のパネルを取り付け、ポンプにより外部溶液を循環させて行った。⁸⁾

Fig. 9 に腐食速度抑制工法適用前後の鉄筋腐食速度分布を示す。これより、何れの工法を適用した場合も、鉄筋腐食速度が抑制されることが確認される。特に、電着

Fig. 8. Outline of Measuring Point and Distribution of Corrosion Rate of Steel Bar.

(a) Electrodeposition Method

(b) Surface-Sealing Method

Fig. 9. Distribution of Total Corrosion Rate after Applying Control Method.

工法を用いた場合、表面被覆工法を用いた場合と比較して、鉄筋腐食速度が大幅に抑制されることが確認される。これらは、鉄筋コンクリート供試体より得られた結果と同様の傾向である。なお、式(5)を用いると、ひび割れ発生推定年数は、電着工法を適用した場合29年間延長され、表面被覆工法を適用した場合6年間延長された。

5 結 論

本論文では、中性化したコンクリート部材における打継ぎ部での鉄筋腐食速度の把握とその抑制工法の提案を行った。以下に本論文で得られた結論を示す。

(1) 中性化した鉄筋コンクリート部材に存在する打継ぎ部においては、打継ぎ部およびその下部において、局所的に鉄筋腐食速度は大きくなることが確認された。ま

た、水セメント比が高い場合、ブリーディング率が高い場合、打継ぎ処理が悪い場合、鉄筋腐食速度の最大値は増大することが確認された。さらに、鉄筋腐食速度の最大値は、打継ぎ部が有る場合、無い場合と比較し、最大で36倍となることが確認された。

(2) 上記(1)の鉄筋腐食速度に対し、腐食速度抑制工法を提案した。その結果、本論文の実験範囲内では、中性化した鉄筋コンクリート部材における打継ぎ部での鉄筋腐食速度のように局所的に鉄筋腐食速度が大きくなる場合、その部分の腐食要因物質の浸透抑制のみならず、コンクリートの再アルカリ化も期待できる電着工法を適用することが望ましいことが確認された。

(3) 既存鉄筋コンクリート部材に対する調査を行った結果、中性化した鉄筋コンクリート部材における打継ぎ部での鉄筋腐食速度およびその抑制工法の効果は、上記(1)および(2)と同様の傾向であることが確認された。

本論文は、平成13年度科学研究費補助金基盤研究(B)(2)「土中および陸上鉄筋コンクリート構造物のひび割れ補修に対する電着工法の実用化, No.13555122」の一部として行った。また、本論文を作成するに当たり、金沢工業大学講師宮里心一先生に多大なるご助言を頂いた。深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 宮里心一, 大即信明, 木村勇人, 水流 徹, 土木学会論文集, **690/V-53**, 83 (2001).
- 2) 水流 徹, 前田 龍, 春山志郎, 防食技術, **28**, 638 (1979).
- 3) 木内芳夫, 宮川豊章, 岡田 清, 土木学会第38回年次学術講演概要集, **5**, 265 (1983).
- 4) 前田孝一, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 499 (1984).
- 5) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一, 土木学会論文集, **544/V-32**, 109 (1996).
- 6) 大即信明, 西田孝弘, 宮里心一, 皆川 浩, 材料, **51**, 573, (2002).
- 7) 宮里心一, 大即信明, コンクリート工学論文集, **12**, No.2, 93 (2002).
- 8) 土木学会, “電気化学的防食工法設計施工指針(案), コンクリートライブラリー107”, p.125 (2001).