# 論文 実環境下に暴露した HPFRCC の鉄筋腐食に対する耐久性の評価

平石 陽一\*1·宮里 心一\*2·柳井 直樹\*3·西松 英明\*4

要旨:本研究では、実構造物の構造上ひび割れが生じ易い部位に HPFRCC が適用されたことを想定し、ひび割れを有する供試体 (小型,大型)を用いて、実環境下における塩害による鉄筋腐食の抑制効果を確認した。その結果、 HPFRCC は、普通コンクリートと比較して、生じるひび割れ幅が小さいことから、腐食要因物質の供給が低くなり、その結果発錆の時期が遅くなること等が明らかにかった。

キーワード:実環境,複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC),鉄筋腐食,腐食形態

#### 1. はじめに

近年,複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(High Performance Fiber Reinforced Cement Compsite 以下 HPFRCC)が開発され<sup>1)</sup>,構造性能に関する多くの研究<sup>例えば2)3)4)5)</sup>がなされた。その結果,従来のセメント系材料とは異なる,高い性能(ひずみ硬化特性,複数微細ひび割れが生じる等)を有していることが明らかになった。したがって今後 HPFRCC は,ひび割れが生じ易い部位(マクロセル腐食が生じ易い部位)において積極的に使用されることが予想される<sup>5)</sup>。

著者らは、これまでに HPFRCC を用いた部材における 鉄筋腐食速度の抑制効果を明らかにするため、人工的に 作られた腐食促進環境下(20℃の定常な気温下で乾燥お よび湿潤環境の繰り返しを実施) において HPFRCC およ び普通モルタルにより作製された小型供試体を暴露し、 両者の物質透過性、腐食速度および腐食形態を比較した。 その結果, HPFRCC は、普通モルタルと比較して、ひび 割れ分散効果により腐食要因物質の浸透の場所および 量が異なることから、腐食形態に違いが生じること、ま たそれに伴い腐食速度が抑制されることを明らかにし た <sup>6</sup>。これにより、鉄筋腐食に対する耐久性の向上を目 的とした HPFRCC のさらなる利用の拡大が予想される。 しかしながら得られた結果は、人工的に作られた腐食促 進環境下における結果であり, また小型供試体を用いて 得られた結果であることから, 鉄筋腐食に対する耐久性 の向上を目的とした HPFRCC の利用つまりは実用化を 図るためには、実環境下における既存部材あるいはそれ と同等の大型供試体を用いて検討する必要がある。以上 の背景を踏まえ本研究では、実構造物の構造上ひび割れ が生じ易い箇所に HPFRCC が適用されたことを想定し、 ひび割れを有する供試体(小型,大型)を用いて,実環

境下における鉄筋腐食の抑制効果を確認した。

#### 2. 小型梁供試体試験

### 2.1 実験概要

### (1) 供試体概要

図-1 および図-2 に実験に使用した供試体の概要を 示す。100×100×400mm の角柱供試体のかぶり 40mm の 位置に鉄筋が埋設されている。さらにコンクリート比抵 抗を測定するために円柱供試体も同時に作製した。実験 では埋設された鉄筋の腐食速度を測定した。 HPFRCC 梁供試体は、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合 材料設計・施工指針(案) りにて示されている押出し成 型により作製された厚さ 10mm の押出し成型により作製 された HPFRCC 板を梁供試体の引張応力が主に作用す る位置(かぶり側表面)に埋設し、その他の部分は普通 コンクリートを用いて作製した。ここで押出し成形法と はセメント系材料の工業的な製造方法の一つであり,外 装用パネル、型枠材、床板などの製造に広く利用されて いる。その特徴として、キャスティングなどに比べ一貫 した連続生産が可能であり、かつ緻密な製品が得られる ことが特長である。実験では、比較のために用いる普通 コンクリートのみにより作製された梁供試体も作製し た。使用した HPFRCC の引張り性能を確認した。なお、 試験および評価は文献 7)に従い実施した。供試体の形状 を図-3 に示す。本試験に用いた装置は鋼製フレーム中 で、上下の掴み具により供試体の肩部を掴んで引張力を 伝達させる構造となっている。引張試験における載荷は 建研式付着試験装置を用い、上面に取り付けたロードセ ルにより荷重を検出した。また,変位を供試体に直接取 り付けた高感度変位計(検長 80mm)により測定した。 図-4に測定結果を示す。測定は Specimen1~6の計6体 実施した。この図より、引張終局ひずみが 0.5%以上であ

<sup>\*1</sup> 倉敷紡績(株)(元金沢工業大学大学院)博(工)(正会員)

<sup>\*2</sup> 金沢工業大学 環境・建築学部 准教授 博(工) (正会員)

<sup>\*3</sup> 倉敷紡績(株)技術研究所 工修 (非会員)

<sup>\*4</sup> 倉敷紡績(株)技術研究所 修(工) (正会員)

ることが確認できる。また、生じたひび割れが 0.2mm 以 下であることから HPFRCC に求める所要の性能を満足 していることが確認された。HPFRCC の使用材料および 配合を表-1に示す。W/C=0.5 とした。補強繊維には、 ビニロン繊維(繊維長 6mm, 繊維径 0.04mm)を用いた。 パルプ、増粘剤は押出し成形助剤として添加した。押出 成形において, 各原料種はミキサー内で混合した後, ニ ーダーを用いて混練を行った。混練後の原料生地は粘土 状となり、押出しに適当な可塑性および流動性が得られ る。押出成形にはスクリュー型の押出機を用いた。原料 生地は, スクリューにて圧縮され, 真空スペースで十分 に締め固められながら押出機先端に取り付けられた金 型の形状どおりに押出成形された。なお、普通コンクリ ートも HPFRCC と同様に W/C=0.5 とした。全ての供試 体は、普通コンクリート打設後初期養生を 28 日間行っ た後に3点曲げ載荷により両供試体にひび割れが生じる 荷重 19.6kN を載荷し、曲げひび割れを導入した。その結 果、HPFRCCでは、0.1mm以下の複数の微細ひび割れが 発生した。一方普通コンクリートでは、2mm~4mmのひ び割れが1本発生した。ひび割れが導入された全ての供 試体は、実環境にて暴露される。暴露は、石川県の海岸 線より約6kmに位置する場所において実施した。そのた め, 発錆に必要な塩化物イオンが供給されにくいことか ら,石川県の海岸線において1年間に飛来する塩化物イ オン量  $^{8)}$  (=0.0668kg/m<sup>2</sup>·year) と同等になるまで、3% の食塩水を3日毎に噴霧した。なお暴露中の全ての供試 体は、冶具により拘束し、ひび割れ幅を保持した。

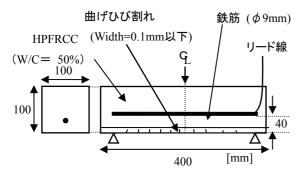


図-1 HPFRCC 小型梁供試体概要

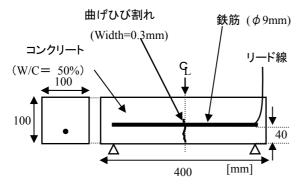


図-2 普通コンクリート小型梁供試体概要

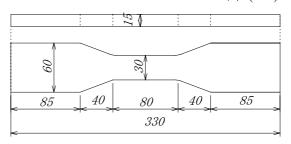


図-4 供試体形状

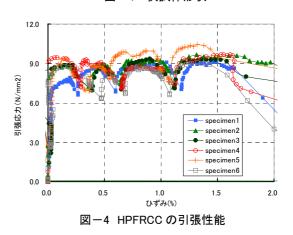


表-1 HPFRCC の使用材料および配合例 [質量比]

セメント	珪石粉	ビニロン	パルプ	増粘剤
1.00	0.60	0.05	0.01	0.01

\*ビニロン: 4vol%, W/C=0.5

# (2) 測定概要

測定項目は、マクロセル腐食速度、ミクロセル腐食速度、気温および湿度である。マクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度は、文献9)を元に、連続的にマクロセル腐食速度を解析する手法により算出した。以下にその概要を述べる。

図-5 に、鉄筋コンクリート中に形成するマクロセルを単純にモデル化した電気回路を示す。電気回路は、分極抵抗およびコンクリート抵抗により構成される。ここで分極抵抗およびコンクリート抵抗は、既存鉄筋コンクリート部材において、非破壊試験により測定可能である。さらに、非破壊試験で測定可能な鉄筋電位を、電気回路の境界条件として代入する。ここで、式(1)に示すオームの法則に基づき、任意の2点間を流れる電流を算定する。

$$I = \frac{V_j - V_k}{R} \tag{1}$$

ここに I:電流 (A)

 $V_i$ ,  $V_k$ : 任意の点における電位 (V)

### R: 電気抵抗 $(\Omega)$

また、コンクリート内部の任意の点において、隣接する点から流入する電流の和は 0 となる。例えば、 $\mathbf{Z}-\mathbf{G}$  に示す点  $\mathbf{G}$  においては、次式が成立する。

$$\sum_{n} I_i = I_1 + I_2 + I_3 = 0 \tag{2}$$

式(2)に、式(1)を代入すると、次式が導かれる。

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} = 0 \tag{3}$$

対象部材内部の全点において、式(3)に相当する式を構築する。その後、全ての式を連立方程式として、全点の電位を算定する。最後に、隣接する2点の電位および2点間の電気抵抗を式(1)に代入して、要素間を流れるマクロセル腐食電流を算定する。すなわち、既存鉄筋コンクリート部材において、コンクリート抵抗、分極抵抗および鉄筋電位を測定し、それらよりマクロセル腐食電流を解析する。

なお解析に用いたコンクリート抵抗は、円柱供試体で測定されるコンクリート比抵抗を、任意の測定点間の距離や断面積に応じて換算する。また解析されたマクロセル腐食電流は、測定対象となる鉄筋要素の表面積で除し、マクロセル腐食電流密度に変換する。さらに、腐食電流密度は、式(4)を用いて腐食速度に変換できる。すなわち  $100\,\mu\,\text{A/cm}^2$  の腐食電流密度は約  $1.2\,\text{mm/year}$  の腐食速度に相当する。本研究では、得られたマクロセル腐食速度 および分極抵抗より算出されるミクロセル腐食速度 和である総腐食速度を用いて評価する。

$$V = \frac{mI_{corr}t}{zF} \tag{4}$$

ここに V: 腐食速度(mm/year)

m:鉄の原子量(=55.8 g/mol)

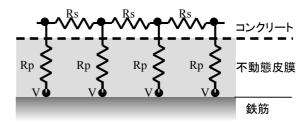
Icorr:腐食電流密度(A/cm²)

t:時間(60sec×60min×24hour×365day)

z:鉄のイオン価数(=  $2: Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ )

F:ファラデー定数(= 96500 C/mol)

図-7 に測定状況を示す。総腐食速度の測定は、1 時間毎に実施し気温および湿度等の環境変化に伴う腐食速度の変化をモニタリングした。そのため同時に気温および湿度もモニタリングした。なお、本研究では非腐食であると考えられる暴露開始前の腐食速度を基準として、それらを明らかに上回る2倍の腐食速度に加速した時点を腐食の発生時期とみなした。



Rp: 分極抵抗 (Ω),

Rs: コンクリート抵抗 (Ω) , V: 電位 (V)

図-5 マクロセルを模擬した電気回路

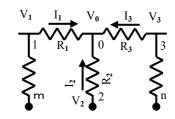
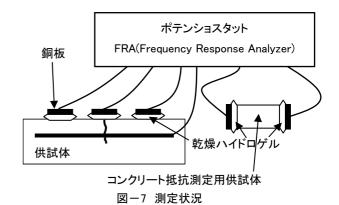


図-6 任意の点における電流



# 2.2 実験結果

図-8 に時間の経過に伴う総腐食速度の変化を示す。こ の図によれば、暴露開始直後すなわち塩水噴霧後から普 通コンクリート梁供試体では急激に腐食速度が加速し, その後高い腐食速度を維持していることが確認できる。 一方、HPFRCC 梁供試体では暴露開始後も腐食速度が低 い値を示していることが確認できる。これらより、普通 コンクリート梁供試体では、暴露直後から腐食が発生し たのに対し、HPFRCC 梁供試体では暴露後も腐食が発生 していないことが確認できる。図-9 に普通コンクリー ト梁供試体における測定位置ごとのマクロセル腐食速 度およびミクロセル腐食速度の値を示す。図-10 に HPFRCC 梁供試体の結果を示す。これらの図によれば、 普通コンクリート梁供試体では、ひび割れが生じた供試 体中央部においてマクロセル腐食速度が加速しており, マクロセル腐食が進行していることが確認できる。一方 HPFRCC 梁供試体では、マクロセル腐食速度およびミク ロセル腐食速度の両値が低く、図-8を踏まえると腐食 が生じていないことが確認できる。

ここで、著者らが以前に実施した同形状のモルタル供 試体を用いた室内試験 6の結果 (平均腐食速度および腐 食形態)と本研究で実施した実環境試験の結果を比較し た。結果をまとめ表-2に示す。はじめに、室内試験お よび実環境試験における平均的な腐食速度を比較する と, 両値はほぼ同等であった。なお, 最高腐食速度を比 較すると、普通コンクリートあるいは HPFRCC 共に実環 境試験の最高腐食速度(普通コンクリート: 0.178mm/年, HPFRCC: 0.018mm/年) が室内試験の最高腐食速度(普 通コンクリート: 0.082mm/年, HPFRCC: 0.004mm/年) と比較して速かった。これは、実環境試験では、1時間 毎に連続して腐食速度をモニタリングしており,外部環 境の変化に伴う一時的に加速した腐食速度を測定した ためであると考えられる。次に腐食形態を比較すると普 通コンクリートでは, 両試験においてマクロセル腐食が 進行した。一方 HPFRCC の室内試験ではミクロセル腐食 が進行し、実環境試験では、発錆しなかった。これは、 普通コンクリートでは, ひび割れが局所的に生じたのに 対し、HPFRCCでは、微細な複数のひび割れが生じたこ とにより腐食要因物質の供給に違いが見られたためで あると考えられるり。

表-2 室内試験と実環境試験の比較

	室内試験		実環境試験	
	腐食速度	腐食形態	腐食速度	腐食形態
普通コン	0.071	マクロセル	0.094	マクロセル
HPFRCC	0.003	ミクロセル	0.011	非腐食

注) 腐食速度は平均腐食速度(mm/年)を示す。

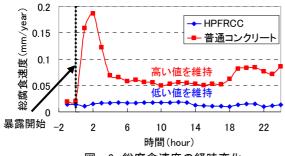


図-8 総腐食速度の経時変化

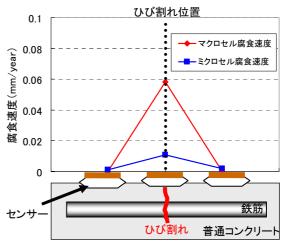


図-9 普通コンクリート供試体の腐食形態

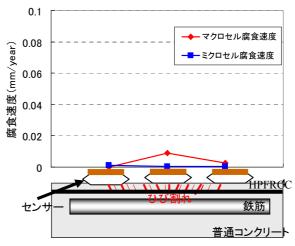


図-10 HPFRCC 供試体の腐食形態

## 3. 大型梁供試体試験

# 3.1 実験概要

# (1) 供試体概要

図-11 に実験に使用した供試体の概要を示す。150×300×1200mm の角柱供試体のかぶり 50mm の位置に鉄筋が埋設されている。2 節と同様に、HPFRCC 梁供試体および普通コンクリート梁供試体の2種類の供試体を作製した。HPFRCC 梁供試体では、かぶり表層部に厚さ15mmの HPFRCC 板を埋設した。使用材料および作製方

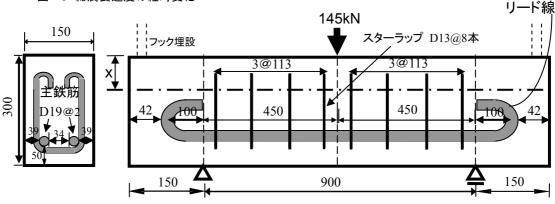


図-11 大型梁供試体概要

法は、2節と同様である。全ての供試体は、普通コンクリート打設後初期養生を28日間行った後に3点曲げ載荷により両供試体にひび割れが生じる145kNの荷重を載荷し、曲げひび割れを導入した。その結果、HPFRCC梁供試体では、0.1mm以下の複数の微細ひび割れが発生した。一方普通コンクリート梁供試体では、0.2mm~0.3mmのひび割れが3本発生した。暴露方法、暴露場所ひび割れ保持方法等は、2節と同様である。

### (2) 測定概要

測定項目および測定手法は,2節と同様である。

図-12 に測定状況を示す。総腐食速度の測定は, 2.5 時間毎に実施し気温および湿度の環境変化に伴う腐食速度の変化をモニタリングした。そのため同時に気温および湿度もモニタリングした。

### 3.2 実験結果

図-13 に時間の経過に伴う総腐食速度の変化を示す。この図によれば、暴露開始直後すなわち塩水噴霧後から普通コンクリート梁供試体では急激に腐食速度が加速し、その後高い腐食速度を変動していることが確認できる。一方、HPFRCC 梁供試体では暴露開始後も腐食速度が低い値を示していることが確認できる。これらより、普通コンクリート梁供試体では、暴露直後から腐食が発生したのに対し、HPFRCC 梁供試体では暴露後も腐食が発生していないことが確認できる。

図-14 に普通コンクリート梁供試体における測定位置ごとのマクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度の値を示す。図-15 に HPFRCC 梁供試体の結果を示す。これらの図によれば、普通コンクリート梁供試体では、最もひび割れ幅の大きい箇所の鉄筋において局所的にマクロセル腐食速度が加速しており、マクロセル腐食が進行していることが確認できる。一方 HPFRCC 供試体では、マクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度の両値が低く、図-13 を踏まえると腐食が生じていないことが確認できる。

# 4. 考察

2 節および 3 節両節において、普通コンクリート供試体では、暴露開始直後より腐食が発生した。一方、

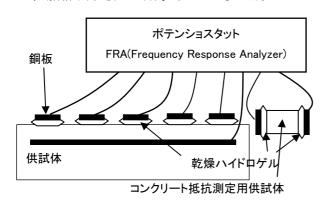


図-12 測定状況

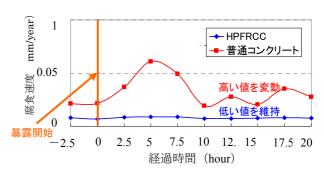


図-13 総腐食速度の経時変化

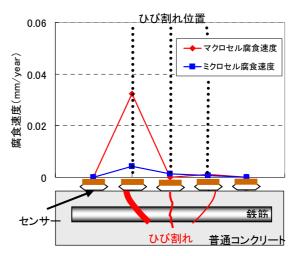
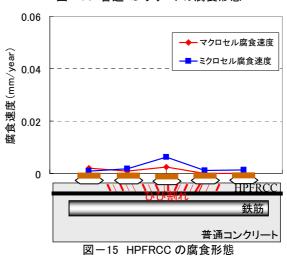


図-14 普通コンクリートの腐食形態



HPFRCC供試体では、腐食の発生は確認されなかった。 以上の考察を示すため、3 節の供試体を対象としてひび割れの許容を前提とした鉄筋位置における塩化物イオンの浸透を式(5)に示すフィックの拡散方程式を用いて予測した。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - erf \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right)$$
 (5)

ここに

C(x,t): 深さ x (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン 濃度  $(kg/m^3)$ 

 $C_0$ : 表面における塩化物イオン濃度  $(kg/m^3)$  D: 塩化物イオンの見かけの拡散係数  $(cm^2/\mp)$ 

#### erf: 誤差関数

予測中では、表面塩化物イオン量を 9.0kg/m³ (海岸線 に相当する)とした。また、0.3mmの最大ひび割れを有 する普通コンクリートの拡散係数を 30cm²/年, 0.1mm の 最大ひび割れを有する HPFRCC の拡散係数を 1cm²/年と した <sup>10)11)</sup>。なお HPFRCC 供試体の予測では, 供試体概要 の通り、かぶり表層から 15mm まで HPFRCC の拡散係数 を用い、15mm の位置から鉄筋までは、普通コンクリー トのひび割れ幅 0.1mm の拡散係数 (10cm²/年) を用いた 11)。図-16 に鉄筋位置(かぶり 5cm) における時間の経 過に伴う塩化物イオン量の変化を示す。なお、目安とし てひび割れのないコンクリート中鉄筋の発錆限界塩化物 イオン量として一般的に広く使用されている 1.2kg/m³ 12)に達する時点を図中に点線で示した。この図によると 普通コンクリート供試体では、約70日で塩化物イオン量 が 1.2kg/m³ に達している。一方 HPFRCC 供試体では、 HPFRCC 部分における拡散が普通コンクリートと比較し て遅いことから,約4年後に塩化物イオン量が1.2kg/m3 に達している。したがって HPFRCC 供試体と普通コンク リート供試体で発錆時期に違いが生じたのは、生じたひ び割れの違いにより腐食要因物質の供給に違いが生じた ためであると考えられる。また、普通コンクリートのひ び割れ部における鉄筋は、ひび割れおよび肌離れにより 不動態皮膜が形成されにくく錆が生じ易い状態 13)にあっ たことも発錆時期の違いが生じた原因であると考えられ る。

### 5. まとめ

本研究では、一定の荷重が載荷される既存鉄筋コンク リート部材を模擬した供試体を実環境にて暴露し、 HPFRCCの鉄筋腐食に対する耐久性の評価を行った。得 られた結果をまとめ以下に示す。

(1) HPFRCC は、普通コンクリートと比較して、生じるひび割れ幅が小さいことから、腐食要因物質の供給

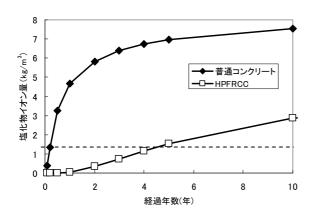


図-16 鉄筋位置における塩化物イオン浸透の予測

が低くなり、その結果発錆の時期が遅くなる。

- (2) 室内試験あるいは実環境試験により測定された平 均腐食速度を比較した結果,両値はほぼ同等であっ た。しかしながら実環境試験では,外部環境の変化 により一時的に腐食速度が加速することから,室内 試験と比較して最高腐食速度は速くなる。
- (3) 普通コンクリートでは、局所的な腐食(マクロセル腐食)が進行する。一方、 HPFRCC では全面的な腐食(ミクロセル腐食)が生じる傾向にあった。

### 参考文献

- V. C. Li, and T. Kanda: Engineered Cementitious Composites for Structural Applications, ASCE J. Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.2, pp.66-69, 1998
- 2) 日本コンクリート工学協会:高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(II) 2004
- 3) 鎌田敏郎ほか: ECC の高性能補修材料としての適用, 第 26 回セメントコンクリート研究討論会論文報告 集, pp.41-46, 1999
- 4) 閑田徹志ほか:実機練り混ぜによる自己充てん型 ECC の性能に関する実験的検討,高靭性セメント複 合材料に関するシンポジウム,pp.125-132,2003
- 5) 国枝稔, 内田祐市, 六郷恵哲: 繊維補強セメント系 複合材料の開発の動向, セメント・コンクリート, No.726, pp7-12, 2007
- 6) 平石陽一ほか:高性能繊維補強セメント系複合材料 の曲げひび割れ部に生じる塩害あるいは中性化に よる鉄筋腐食の形態と速度,コンクリート工学論文 集, Vol.16, No.3, pp.31-38, 2005
- 7) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案): 土木学会, 2007
- 8) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物長 期性能シミュレーションプログラム LECCA Ver.1.0
- 9) 宮里心一, 大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材 中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学 論文集, Vol. 12, No.2, pp.93-103, 2001
- 10) 久保田 憲ほか:マルチプルクラックを有する複数 微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の塩害 に対する耐久性、コンクリート工学年次論文集、 Vol.29、No.1、pp.429-434、2007
- 11) 塚原絵万,加藤佳孝,魚本健人:塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化,コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No.1,pp.573-578,2002
- 12) 腐食防食協会:腐食・防食ハンドブック, p53, 2000
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書施工編, p.24, 2002