

論文

[1115] 透水性コンクリート中における鉄筋の評価と防食

玉井元治*¹・辻野文三*²

1. はじめに

連続した空隙を有するコンクリート（まぶしコンクリート, No-Fines Concrete : NFC）は極めて大きな透水性や通気性があるため種々の機能を持ったコンクリートとして利用できる。その利用目的としては、降雨水の地下への浸透や排水させる透水性舗装用材料、水際域における微生物および小動物類を生息させる環境保全用材料[1]、騒音を吸収させる吸音用材料[2]などが挙げられる。

その使用に際して板状あるいは大型化する場合、当然のことながら補強材料が必要となる。筆者らは既に透水性コンクリートにおける鉄筋の腐食に関して若干の考察を試みた[3], [4]が、本論では系統的な結論を求めるために既報の結果と併せて、電気化学的手法と長期間の浸漬試験より検討したので報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試材

(1) 電気化学的手法用の試験片

NFC中の鉄筋の腐食速度を電気化学的手法より評価する予備実験としての供試材は軟鋼(SS400)を用い、20mm×20mm×1mmの寸法に切断した。この試験片の全面を研磨紙で500メッシュまで研磨した後、アセトンで脱脂し、その重量を0.01mgまで秤量した。試験終了後の試験片は腐食生成物を取り去った後、アセトンで脱脂し、その重量を0.01mgまで秤量した。

鉄筋は異形棒鋼(SD295A, 公称寸法; 直径13mm, 以後黒皮鉄筋と称する)を用いた。防食用のエポキシ樹脂塗装鉄筋(公称寸法; 直径13mm, 以後エポキシ鉄筋と称する)はビスフェノール系塗料を静電粉体塗装で100, 200, 300 μmの塗膜厚さとした。これらの試験片は40mmに切断し、リード線部分はエポキシ系補修用塗料で被覆した。

(2) 浸漬試験用の試験片

浸漬試験用の鉄筋は電気化学的手法用と同じものを用いた。エポキシ鉄筋の処理方法は前者と同様で、塗膜厚さは200 μmとした。試験片の寸法は300 mmあるいは500mmとした。

2. 2 腐食試験溶液

腐食試験溶液は市販特級NaClを用い、純水(300 KΩ-cm)に溶解して各濃度のNaCl水溶液にした後、所定のpHに調整した。

さらに、前述の予備実験用の腐食水溶液として各条件のセメント模擬水溶液を用いた。セメント模擬水溶液はポルトランドセメントの飽和水溶液(pH; 12.57)を基本水溶液とした。この基本水溶液にポンプを用いて空気を吹き込み、セメントの主成分である強アルカリ性の水酸化カルシウムを弱アルカリ性の炭酸カルシウムあるいは炭酸水素カルシウムに変化[5]させて、各pHに調整

*1 近畿大学教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 大阪府立大学助教授 総合科学部計測科学コース、工博

した。

2. 3 NFC の作製とその性質

NFC 作製の供試材は普通ポルトランドセメント、骨材（6号砕石）、シリカフューム（スラリー状）および高性能減水剤（ナフタリン系）を用いた。その代表的な配合および作製手順を表1および図1に示す。電気化学的手法用のNFCの寸法は100mmx100mmx400mmの直方体で、浸漬試験用のNFCの寸法は150mmx150mmx550mmの直方体とした。鉄筋のかぶり厚さは10、20、30、40mmとした。なお、表1のNFCの空隙率は26~27%、透水率は12~13mm/s、材令28日の圧縮強度は18~21MPaである。

2. 4 腐食速度の評価

電気化学的手法における腐食速度の評価は試験片と対極である白金間に流れる短絡電流によって求めた[6]。短絡電流の測定は試験片と白金をほぼ同じ表面積 ($A_{Pt}/A_{specimen} \approx 1, A$; 見掛けの表面積) として、演算増幅器を内蔵した無抵抗電流計（入力インピーダンス; $10^{14}\Omega$ 以上、応答速度; $2 \times 10^{-5} \text{sec}$ 、精度; $\pm 1\%$ 以内）で行なった。

浸漬試験は試験槽にNFCの高さの半分を浸漬した。浸漬期間は39日間とし、蒸発分は随時純水を補給した。腐食速度の評価は試験後の状況を目視観察によって行なった。

3. 実験結果および考察

3. 1 電気化学的手法

(1) 短絡電流と重量減少から求めた腐食速度の関係

透水性コンクリートにおける鉄筋の腐食速度の評価法を確立するために、次の実験を試みた。セメント模擬水溶液および腐食水溶液中で軟鋼と白金のカップル ($A_{Pt}/A_{steel} = 1, A$; 表面積) における短絡電流と重量減少から算出した腐食速度の関係を図2に示す。重量減少から求めた腐食速度と短絡電流との関係は直線関係を示し、最小二乗法を用いて求めた関係式を式(1)に示す。

$$Y = 1.700 + 4.64 \cdot X$$

(1)

表-1 まぶしコンクリートの配合

Kind of binder	SF/(C+SF) (%)	W/(C+SF) (%)	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	SF	G	Sp
	—	30	82.0	273	—	1540	3.0
C+SF	20	30	77.7	207	52	1540	4.5

C: Normal portland cement (SG:3.16), SF: Silica fume (SG:2.18), G: Crushed stone (SG:2.69), Sp: Superplasticizer, Void ratio of crushed stone: 42.7%

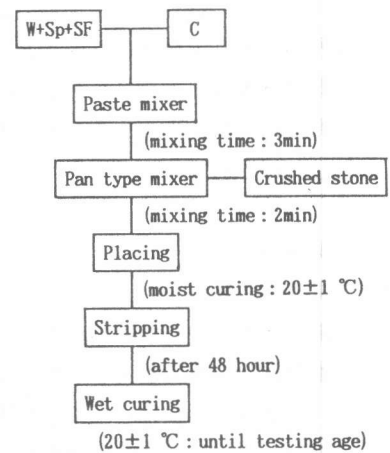


図-1 まぶしコンクリートの作製方法

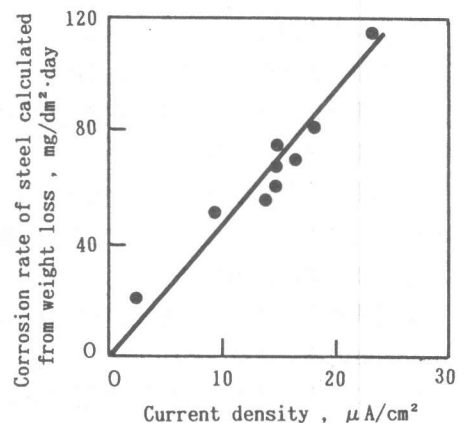


図-2 短絡電流と重量減少から求めた腐食速度の関係

ここで、Yは軟鋼の腐食速度 ($\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$)、Xは短絡電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)である。

コンクリート中のアルカリ性環境あるいは海水などの中性環境中において白金のような貴な金属と電氣的に短絡された軟鋼の腐食反応は次のようになる。すなわち、アノードとなった軟鋼は $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ の鉄の溶解反応が主に起こり、カソードの白金では $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ の溶存酸素の還元反応が主に起こる。さらに、アルカリ性あるいは中性環境下における軟鋼の腐食速度は溶存酸素の濃度に比例すると報告されている [7]。既報 [3] で述べたように、軟鋼と白金の面積を等しくすると短絡電流が溶存酸素の還元電流に等しくなるので、短絡電流すなわち無抵抗電流計に現われた電流から腐食速度が求めることができるものと考えられる。なお、アルカリ性あるいは中性環境下における多くの構造用鋼材の腐食速度はほとんど差がなく、その腐食速度は溶存酸素の濃度に比例すると報告されている [7]。また、図2および式 (1)と重量減少から算出した腐食速度との平均誤差は±23.13%になった。この程度の誤差であれば [8]、この種の測定法として十分に使用できるものと考えられる。

以上の予備実験を基にして、NFCにおける鉄筋の腐食挙動と防食法について検討した。材料側因子としてはNFCの空隙率と鉄筋のかぶり厚さについて求めた。さらに、コンクリート中の鉄筋の腐食において重要な環境側因子としてはコンクリートの中性化すなわちpH、水分、酸素、塩分などである。これらのうち酸素と水分は不可欠であり、NFCでは常に存在する。したがって、環境側因子としてはpH、塩分について調べた。

(2) 材料側因子

(2)-1 空隙率およびかぶり厚さ

図3は3%NaCl, pH7.4水溶液におけるNFCの空隙率および黒皮鉄筋のかぶり厚さの影響を示す。この結果、いずれの条件においても短絡電流はほとんど変わらなかった。式 (1)より腐食速度を求めると、既報 [4] で述べたNaCl濃度に鉄筋を浸漬した腐食速度とほぼ同じ程度となった。耐食性の判定基準 [9] より、耐食性なし ($>215.7\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$)ではないが、耐食性あり ($10.8\text{--}215.7\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$)の範囲で、腐食速度が大きいことが解る。この理由は、NFCでは多孔質であるため、多少空隙率を変化させてもその防食効果がほとんど現われないものと考えられる。したがって、かぶり厚さの影響もほとんど現われないことと推定される。この結果を基にして、NFCの空隙率を27%、かぶり厚さを20mmとして以後の実験を行なった。

(2)-2 エポキシ鉄筋の塗膜厚さ

上記と同条件におけるNFCにおけるエポキシ鉄筋の塗膜厚さの結果を図4に示す。いずれの塗膜厚さにおいてもほとんど短絡電流は流れず、式 (1)より200 μm の腐食速度を求めると3.3 $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ となり、これは完全耐食 ($<10.3\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$)の範囲にある。当然のことながら、塗膜が厚くなるほど耐食性はよくなるものと考えられる。使用したエポキシ鉄筋の種類は異なるが、エポキシ樹脂塗装鉄筋の設計施工指針 (案) [10] および付着強度、耐衝撃性などの力学特性 [11] などから判断すると、NFCに使用する場合は普通コンクリートと同様に200 μm の塗膜厚さが適当

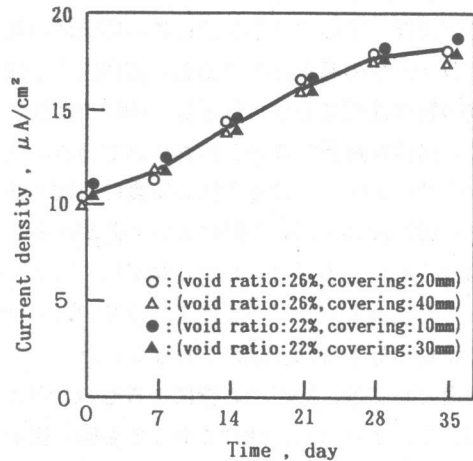


図-3 まぶしコンクリート中における黒皮鉄筋の短絡電流の経時変化 (3%NaCl, pH7.4)

であると考えられる。

(3) 環境側因子

(3)-1 NaCl濃度の影響

各NaCl水溶液, pH7.4において、かぶり厚さ20mmのNFC 中における黒皮鉄筋およびエポキシ鉄筋 (200 μm) の短絡電流の経時変化を図5および図6に示す。黒皮鉄筋ではNaCl濃度の低下とともに腐食速度が低下した。この結果は各NaCl濃度に浸漬した軟鋼の腐食速度とほぼ同様な傾向となった。一方、エポキシ鉄筋はいずれのNaCl濃度においても短絡電流はほとんど流れず、十分に耐食性があることが判明した。

(3)-2 pHの影響

3%NaCl水溶液の各pHにおけるNFC 中における黒皮鉄筋の短絡電流の経時変化を図7に示す。一般的にpH4-pH10の範囲では鋼の腐食速度がほぼ一定の値を示し[7]、この領域は酸素拡散支配型の腐食反応である。pH10以上では鋼の腐食速度は急激に低下し、pH13ではほとんど腐食が進行しないと述べられている。コンクリート中における鉄筋の腐食に及ぼすpHの影響はpH10-pH12の間において差があると報告されている[12]。しかしながら、図7に示した黒皮鉄筋についてはアルカリ側における腐食の低下は余り認められなかった。この理由としては、NaClの影響によるものと考えられる。すなわち、pH12であっても極く僅かなNaClが存在すると、鉄の溶解反応が認められるという報告[5]と一致する。一方、エポキシ鉄筋の結果は図示しなかったが、いずれのpHにおいても短絡電流はほとんど認められなかった。

3.2 浸漬試験

既報[3], [4]より本報までは、NFC 中の鉄筋の腐食挙動および防食法について主に電気化学的手法より検討した。その間に長期間の浸漬試験を同時に試みており、目視観察により評価した。

写真1に浸漬試験後、NFC より取り出した

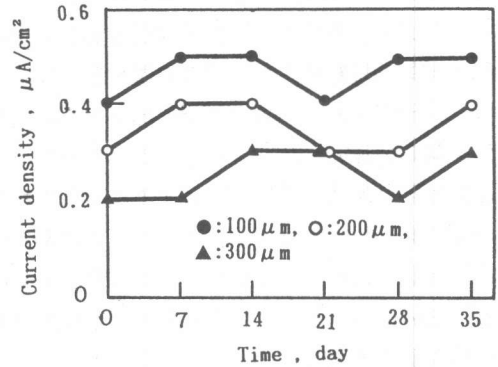


図-4 まぶしコンクリート中におけるエポキシ鉄筋の短絡電流の経時変化 (3%NaCl, pH7.4)

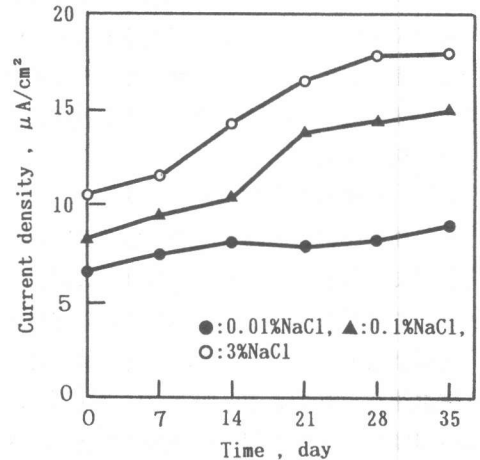


図-5 まぶしコンクリート中における黒皮鉄筋の短絡電流の経時変化 (pH7.4, void ratio:26%, covering:20mm)

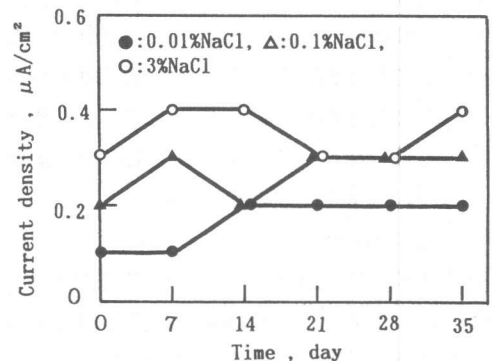


図-6 まぶしコンクリート中におけるエポキシ鉄筋の短絡電流の経時変化 (3%NaCl, void ratio:26%, covering:20mm)

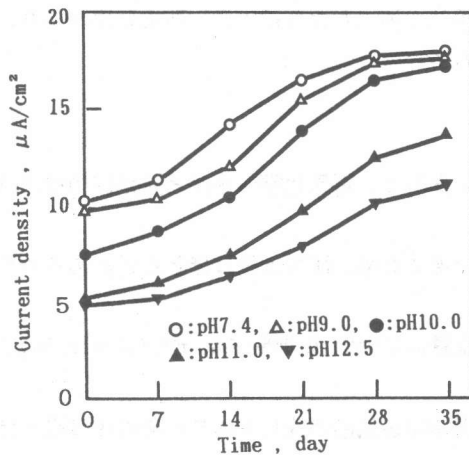


図-7 まぶしコンクリート中における黒皮鉄筋の短絡電流の経時変化 (3%NaCl, void ratio:26%, covering:20mm)

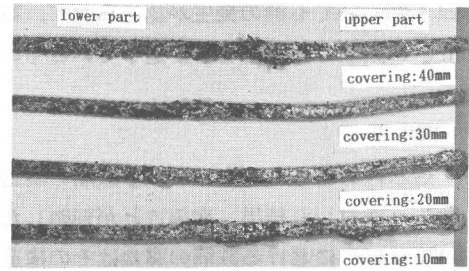


写真-1 まぶしコンクリートより取出した黒皮鉄筋 (3%NaCl, 39month)

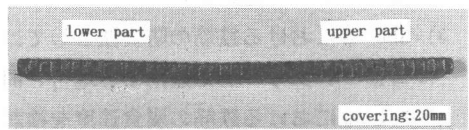


写真-3 普通コンクリートより取出した黒皮鉄筋 (3%NaCl, 39month)

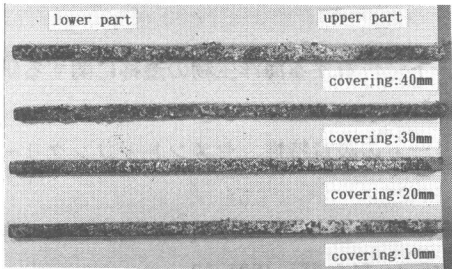


写真-2 シリカフェーム混入のまぶしコンクリートより取出した黒皮鉄筋 (3%NaCl, 39month)

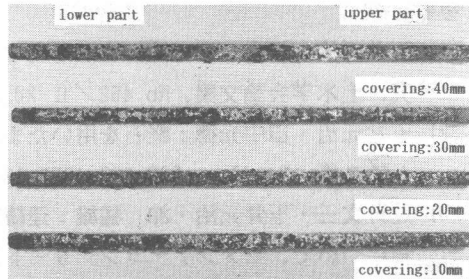


写真-4 まぶしコンクリートより取出した亜鉛めっき鉄筋 (3%NaCl, 39month)

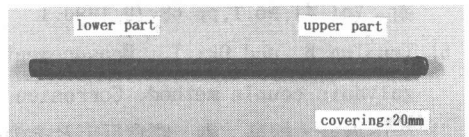


写真-5 まぶしコンクリートより取出したエポキシ鉄筋 (3%NaCl, 39month)

黒皮鉄筋を示す。NFC の長さ方向の約半分が 3%NaCl 水溶液に浸されているため、下部の黒皮鉄筋は相当に腐食されていることが解る。上部は NFC より析出した炭酸カルシウムあるいは炭酸水素カルシウムが付着しており、下部ほど腐食されていない。さらに、写真 2 に示したシリカフェームを混入した NFC 中の黒皮鉄筋は前者より全体的に腐食が少なかった。これは、シリカフェームを混入したペーストは非常に緻密化し、鉄筋の被覆厚さが 0.6mm 程度であってもその効果が現われたものと考えられる。写真 1 および写真 2 より、かぶり厚さの影響は電気化学的手法で述べたようにほとんど現われなかった。なお、比較のための水-セメント比 50% とした普通コンクリート中の黒皮鉄筋は写真 3 に示すように若干錆が認められる程度で、ほぼ健全である。

次に、NFC 中の鉄筋の防食法として、溶融亜鉛めっきとエポキシ鉄筋の結果を写真 4 および写真 5 に示す。溶融亜鉛めっきは写真 1 に示した黒皮鉄筋の腐食状況とほとんど変わらず、NFC に

関してはその防食効果はほとんどないものと考えられる。一方、エポキシ鉄筋はいずれのかぶり厚さにおいても錆の発生が認められず、電気化学的手法で述べたように十分に防食効果があり、NFCの鉄筋の防食法として適しているものと考えられる。

4. 結論

透水性のあるNFC中における鉄筋の腐食と防食法に関して、電気化学的手法と長期間の浸漬試験より検討した結果、次のことが判明した。

- 1) NFC中における鉄筋の腐食はその構造が多孔質であるため、防食効果はほとんど認められなかった。
- 2) NaCl濃度およびpHについて、NFC中における黒皮鉄筋はNaCl;0.01%~3%、pH;7.4~12.5の条件下で腐食を起こした。
- 3) NFC中における鉄筋の防食法としてはエポキシ樹脂塗装鉄筋が適しており、その塗膜厚さは普通コンクリートに適用する場合と同様に200 μm が適当であると考えられる。
- 4) NFC中における鉄筋の腐食速度を検討する場合には、本法の短絡電流の測定は信頼性があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 玉井元治・河合 章：連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究、土木学会論文集、No. 452/II-20, pp. 81-90, 1992. 8
- 2) 玉井元治・田中光徳：軽石を用いたまぶしコンクリートの吸音特性、セメント・コンクリート論文集、No. 46, pp. 892-897, 1992. 12
- 3) 辻野文三・玉井元治・沖 猛雄：連続空隙を有するコンクリート中の鉄筋の評価法とその防食について、セメント・コンクリート論文集、No. 45, pp. 556-561, 1991. 12
- 4) 辻野文三・玉井元治・沖 猛雄：まぶしコンクリート中におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋の防食性、セメント・コンクリート論文集、No. 46, pp. 654-659, 1992. 12
- 5) 山下嗣人・永田 誠：空気中で中性化したセメント模擬溶液における鉄の腐食挙動、表面技術、Vol. 41, No. 1, pp. 69-70, 1990. 1
- 6) Tsujino B. and Oki T.: Measurement of steel and aluminum corrosion rates using the galvanic couple method, Corrosion, Vol. 44, No. 12, pp. 900-905, 1988. December
- 7) 松田誠吾・松島 巖：腐食反応とその制御、産業図書、1979
- 8) 水流 徹・春山志郎：交流インピーダンスによる腐食モニターの製作と均一腐食への適用、防食技術、Vol. 27, No. 11, pp. 573-580, 1978. 11
- 9) 腐食防食協会編：金属防蝕技術便覧、日刊工業新聞社、pp. 792, 1978
- 10) 土木学会編：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー、No. 58, 1985
- 11) 小林一輔、伊藤利治、田中恭一、鉄筋のエポキシ樹脂被覆に関する実験的研究、生産研究、Vol. 29, No. 10, pp. 529-532, 1977. 10
- 12) 岸谷孝一：鉄筋コンクリート構造物の腐食について、防食技術、Vol. 24, No. 3, pp. 137-152, 1978. 3