高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋の腐食性状について†

小林 孝一* 中村 士郎**
服部 篤史*** 宮川 豊章***

Steel Corrosion in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag

by

Koichi KOBAYASHI*, Shiro NAKAMURA**, Atsushi HATTORI***
and Toyo MIYAGAWA***

This paper deals with the corrosion of steel bar in concrete with ground granulated blast furnace slag (ggbfs). The steel corrosion in it were investigated with the aid of electrochemical measurement. The ability of ggbfs concrete to protect steel from corrosion was superior to the one of the ordinary Portland cement concrete, although the chloride binding capacity of ggbfs concrete is inferior to the one of ordinary Portland cement concrete. On the other hand, the carbonation rate of ggbfs was faster and there was the risk of steel corrosion due to carbonation of ggbfs concrete. And the steel corrosion in ggbfs concrete exposed to both chloride and carbonation was produced earlier and more severe than the one in ordinary Portland cement concrete.

Key words: Ground granulated blast furnace slag, Steel corrosion, Chloride, Carbonation, Polarization resistance

1 緒 言

今日、コンクリート構造物の早期劣化が問題となっている。その原因の主なものとしては塩害、中性化、アルカリ骨材反応等があげられ、さらにこれらが同時に作用する複合劣化の場合には、より激しく劣化が生じるという報告もある。

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、一般に耐久性が優れ、普通コンクリートと比較して、塩分浸透に対して高い抵抗性を有しているとされており、海洋構造物等、環境作用が激しい場合にはその使用が極めて有効であると考えられる。しかし一方、低水セメント比でなく、組織が十分緻密でない場合には中性化が進行しやすいという面も持ち合わせている。

さらに、コンクリートの混和材として高炉スラグ微粉末を用いた場合の鉄筋防食性能には、明らかでない点も多い。例えば、高炉スラグ微粉末を用いた場合には、鉄筋の電気化学特性が通常と異なる場合があることが報告されている^{1), 2)}など、普通ポルトランドセメント単味の場合と同様には扱うことができない場合もあると考えられる。

そこで、本研究では高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに塩害と中性化が同時に作用する場合を想定して、その複合劣化性状を電気化学的手法を用いて検討することとした。

2 実験概要

2.1 配合

使用材料を Table I に示す。結合材としては普通ポル

トランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、水結合材比、結合材中の高炉スラグ微粉末の置換率などがコンクリート中の鉄筋の腐食性状に与える影響について検討を行うため、Table II に示す 5 配合 (A シリーズ) を基本配合とした。また、コンクリート中の塩分量の違いが鉄筋の電気化学的特性に与える影響について検討を行うため、コンクリート中の Cl^- イオン量を 0, 1.3, 3.0, 5.0 kg/m^3 の 4 レベルとした (B シリーズ, Table III)。これらの塩分量は、従来複数の研究者によって報告されている鉄筋発錆に対するコンクリート中の塩分量のしきい値である Cl^- が 1.2 ~ 2.5 kg/m^3 の下限値および上限値を若干上回る量と、それを十分上回る量に相当する^{3), 4)}

Table I. Properties of materials.

Ordinary Portland cement	Specific gravity : 3.15, Blane fineness : 3260 cm^2/g
Ground granulated blast furnace slag	Specific gravity : 2.90, Blane fineness : 4080 cm^2/g
Fine aggregate	River sand, Specific gravity : 2.56, Absorption : 1.93%, Fineness modulus : 2.86
Coarse aggregate	Crushed stone, Specific gravity : 2.65, Maximum size : 15mm, Fineness modulus : 6.18
Water reducing agent	Compound of lignosulfonic acid and polyol
Air entraining agent	Rosin based anionic surfactant

† 原稿受理 平成 10 年 10 月 19 日 Received Oct. 19, 1998

* 正 会 員 中部大学工学部土木工学科 〒487-8501 春日井市松本町, Dept. of Civil Eng., Chubu Univ., Matsumoto-cho, Kasugai, 487-8501

** 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 〒551-0021 大阪市大正区南恩加島, Cement/Concrete Research Lab., Sumitomo Osaka Cement Co. Ltd., Taisho-ku, Osaka, 551-0021

*** 正 会 員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

さらに塩分の存在と中性化による複合作用の影響についても検討するため、中性化促進も行った (C シリーズ, Table IV). 中性化促進期間は 45 日間および 95 日間の 2 種類とした。

なお、供試体名は、“W/B-Sg/(C+Sg)-Cl⁻量”とした。

2・2 供試体の作成

コンクリート中への Cl⁻ の混入は NaCl を用い、NaCl を水に溶かしてから練り混ぜる塩水練りにより行なった。また NaCl の増量分は単位細骨材量を減じた。供試体は 10 × 10 × 40cm の角柱供試体とし、長さ 30cm の鉄筋 (D10) の端部を研磨後、長さ 50cm の絶縁被覆付きコード (14Ω/m vs 100V) をハンダ付けし、この部分を自己融着テープとエポキシ樹脂で被覆したもの 2 本を Fig. 1 のように配置した。かぶりは、打設時にテフロン線とアクリル板を用いて打設下面から 2cm とした後、これらを静かに除去することによって確保した。供試体は各配合につき 3 体ずつ作製した。なお、各配合のスランプは 7.5cm を目標としたが、塩分を混入した供試体について

は塩分無混入の配合と同一の単位水量としたために 13 ～ 20cm となった。

2・3 養生、環境条件

供試体は材齢 1 日で脱型を行い、材齢 14 日まで 20℃ の恒温室内で湿布養生を行った。その後材齢 28 日までほぼ大気中にある実験室内で気中乾燥させ、材齢 28 日以降は毎日 1 回ずつ水道水を散水し乾湿繰返し条件となるようにして腐食を促進させた。脱型後、供試体は打設面を下に静置した。

また中性化促進を行なう供試体は他の供試体と同様の養生を行った後、材齢 28 日から“促進条件 a1”では約 45 日間、“促進条件 a2”では約 95 日間、温度 20 ± 2℃、相対湿度 60 ± 5%、炭酸ガス濃度 5 ± 0.2% の促進槽内で中性化促進を行い、その後上記と同様の乾湿繰返し環境においた。

2・4 測定項目

コンクリート中の鉄筋の、矩形波電流法 (電流 10 ～ 100μA、周波数 800Hz と 0.1Hz の矩形波重畳パルス) による見掛けの分極抵抗を、おおよそ材齢 10 日までは 1 日おき、それ以降材齢 7 週までは 1 週おき、それ以降は 2 週おきに測定し、経時変化を調べた。照合電極には飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対極には 10 × 40cm の銅板を用いた。測定時には、対極を供試体の打設時の底面に湿布を介して密着させ、照合電極は供試体側面のかぶり部分の鉄筋中央位置において測定を行なった。

コンクリート中の塩分量は、鉄筋を含まない 10 × 10 × 40cm の角柱供試体を作製し、材齢 6 か月まで他の供試体と同様の養生条件、および乾湿繰返し環境下においた後に測定を行なった。測定は JCI-SC4⁴⁾ にしたがって、電位差滴定法を用いて、全塩分量と 50℃ 温水可溶性塩分量を測定した。

また、中性化促進による供試体の中性化深さを確認するために、鉄筋を含まない 10 × 10 × 40cm の角柱供試体を作製し、2・3 節に示したのと同じ条件で中性化促進を行なったうえで、各中性化促進期間終了時に、その中性化深さの測定を行なった。中性化深さの測定は、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案) 同解説」⁵⁾ にしたがって行なった。

また材令 270 日の時点で供試体から鉄筋のはつり出しを行ない、鉄筋の腐食面積率を調査した。その後、JCI-SC1⁶⁾ にしたがって、鉄筋の腐食減量の測定を行った。

3 結果と考察

数体の供試体を割裂して鉄筋のかぶりを調査したところ、いずれも所定のかぶりが確保されていることが確認された。

3・1 塩分の分布

供試体 55-0-5.0 の材令 6 か月における塩分の分布を Fig. 2 に示す。なお、ここに示したのは全塩分量で、供試体の打設面から 0 ～ 3cm、3 ～ 7cm、7 ～ 10cm の部分の塩分量のそれぞれ平均値である。

その結果、塩分量は供試体の打設面側の方が若干多かった。本研究においては脱型後、供試体は打設面を下に、

Table II. Mix proportions (A series).

W/B* (%)	s/a (%)	Sg/(C+Sg) (%)	Unit mass(kg/m³)					
			W	C	Sg	S	G	Cl ⁻
55	49	0	185	336	0	889	957	0
		30		235	101	885	953	
		60		134	202	882	950	
70	49	0	185	264	0	917	988	0
		60		106	158	912	982	

Table III. Mix proportions (B series).

W/B* (%)	s/a (%)	Sg/(C+Sg) (%)	Unit mass(kg/m³)					
			W	C	Sg	S	G	Cl ⁻
55	49	0	185	336	0	889	957	1.3, 3.0, 5.0
		60		134	202	882	950	
		30		235	101	885	953	3.0
70	49	0	264	0	917	988		
		60	106	158	912	982		

Table IV. Mix proportions (C series).

W/B* (%)	s/a (%)	Sg/(C+Sg) (%)	Unit mass(kg/m³)					
			W	C	Sg	S	G	Cl ⁻
55	49	60	185	134	202	882	950	0. 3.0
70		0		264	0	917	988	
		60		106	158	912	982

Fig. 1. Dimensions of specimen (unit: mm).

鉄筋のかぶり面が上となるように静置し、かぶり面側から、すなわち Fig. 1 あるいは Fig. 2 における下側から散水を行なったために、供試体中の塩分が水とともに打設面側に移動したためと考えられる。また全塩量の損失が見られるが、これはフレッシュ時におけるブリーディング水とともに供試体外部に失われた、あるいは乾湿繰返し環境下において、散水によって供試体から塩分が溶出したこと等が原因として考えられる。

また、各配合の供試体から得られた供試体中央部（打設面から3～7cm）における全塩分量および可溶性塩分量の測定結果を Fig. 3 に示す。いずれの供試体においても前述のように塩分量の減少が見られるが、全塩分量に関しては高炉スラグ微粉末の置換率にかかわらず、その減少量は若干量にとどまっている。それに対し、可溶性塩分は同一の塩分を練混ぜ時に混入したものでも、配合により量の差が大きい。

そこで、供試体中央部（打設面から3～7cm）における全塩分量と可溶性塩分量の関係を Fig. 4 に示す。一般に塩化物イオンは、ポルトランドセメントの重量の0.4%程度までは、セメント水和物中に安定したフリーデル氏塩の形で取り込まれる。⁷⁾ さらに、高炉セメント、あるいは高炉スラグ微粉末を用いた場合の方が、普通ポルトランドセメント単味の場合と比較して、アルミネート相の

含有量が大きいために、固定塩分量が多いとの報告もあるが、⁸⁾ 塩化物イオンとアルミネート水和物の反応は、その接触時期、その時のアルミネート相の形態に大きく左右されるものと考えられ、必ずしもスラグの水和物の塩化物固定量が大きくはならないものと考えられる。ここでは、高炉スラグ微粉末を用いたものの方が、全塩分量に対する可溶性塩分量の割合が大きく、固定塩分量が少ないという結果となった。

さらにコンクリート中の塩化物イオンの形態を明らかにするために、供試体中央部から得られた試料を用いて行なった粉末X線回折による定性分析の結果を Fig. 5 に示す。ともに塩化物イオンを 3.0kg/m^3 混入した、水結合材比55%の供試体から得られた結果であるが、高炉スラグ微粉末を用いていない55-0-3では、フリーデル氏塩のピークが得られているのに対して、高炉スラグ微粉末を用いた55-60-3ではこのピークが不明瞭で、フリーデル氏塩がこの供試体内部にはあまり存在していないということになる。

したがって、本研究の範囲では、電位差滴定法、粉末X線回折のいずれによっても、高炉スラグ微粉末を用い

Fig. 2. Example of distribution of total chloride ion in specimen.

Fig. 3. Chloride ion content (total chloride and soluble chloride) in middle part of specimen.

Fig. 4. Relationship between total chloride ion content and soluble chloride ion content.

Fig. 5. X-ray diffraction intensity.

たコンクリートは塩化物イオンの固定能力が小さいという結果となった。

3・2 中性化深さ

促進中性化を行なった各供試体の中性化深さを Fig. 6 に示す。なお、これらの値は、鉄筋を含まない供試体から得られた結果であり、また中性化の深さが進展が時間の平方根に比例すると仮定して、その近似曲線も示した。

各供試体の中性化深さは、95 日間の中性化促進期間 (a2) が終了した後は、いずれも鉄筋位置にほぼ達している。ただし、その進展速度は供試体によって異なり、高炉スラグ微粉末を用いた 70-60-0-a の中性化速度は、水結合材比が同一の 70-0-0-a と比較してかなり大きい。

高炉スラグ微粉末を用いた場合、用いない場合と比較して、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により、材齢の極初期を除いて、コンクリートの組織は緻密になることが報告されている。⁹⁾ したがって炭酸ガスの浸透に対する抵抗性は大きいと考えられる。一方、高炉スラグ微粉末は、その水和反応の際に水酸化カルシウムを消費するため、コンクリートのアルカリ性が低下する。このように、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは中性化抵抗性に対して相反する性質を持っているが、水結合材比が高い場合にはアルカリ性の低下が卓越し、中性化深さが大きくなるという報告がある。¹⁰⁾

本研究において中性化促進を行なった供試体は、比較的水結合材比が高いため、高炉スラグ微粉末を用いた配合は中性化速度が大きくなったものと考えられる。した

Fig. 6. Carbonated depth of concrete specimen without steel bars.

Fig. 7. Corrosion loss and corroded area of steel bar.

がって水結合材比が小さいために気体透過抵抗性に優れた 55-60-0-a の中性化速度は、組織がより粗である 70-0-0-a の中性化速度にほぼ等しくなったものと考えられる。

3・3 鉄筋の腐食

各供試体から得られた鉄筋の腐食面積率および腐食減量を Fig. 7 に示す。なお、いずれの供試体においても、鉄筋腐食による軸方向ひび割れは生じていなかった。

3・3・1 塩分の影響 塩分無混入で、かつ中性化促進を行っていない場合には、いずれの供試体においても、腐食面積率、腐食減量ともに、ほぼ 0 であり、腐食は生じていないと考えられる。

それに対し、塩分を混入した供試体では若干の腐食が生じていると考えられる。鉄筋の腐食量が微量の場合には、腐食減量の測定誤差が大きく、その値の信頼性が低いと考えられるため、¹¹⁾ 混入塩分量と腐食面積率の関係を Fig. 8 に示す。その関係は高炉スラグ微粉末の使用の有無で傾向が異なり、高炉スラグ微粉末を用いていない供試体においては塩化物イオンを 1.3kg/m^3 混入したものにも腐食が観察され、塩化物イオンの混入量が大きくなるとともに腐食面積率は増大する傾向にある。それに対し、高炉スラグ微粉末を用いた配合の場合には、塩化物イオンを 5.0kg/m^3 混入したものにおいても腐食面積はわずかであった。また水結合材比 70% の供試体においても同様の傾向が見られた。

一般に高炉セメント、あるいは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、塩害に対して鉄筋の防食性能に優れていることが報告されている。^{12), 13)} 高炉スラグを用いた場合には、水和物組織が緻密化することにより物質透過抵抗性が向上し、不動態被膜を破壊する外来塩分、あるいは腐食反応を律速する酸素、水分のコンクリート中への拡散、浸透が減少、さらにはコンクリート抵抗が向上し、鉄筋防食上有利であると考えられるが、本研究においては塩分は打設時に混入したために、少なくとも塩分透過性は腐食の発生に影響を与えないものと考えられる。

また既に述べたように、高炉セメントあるいは高炉スラグ微粉末は塩分の固定能力が大きいために、腐食に関与する塩化物イオンが少なくなり、腐食が生じにくいという考え方もあるが、⁸⁾ 本研究の場合には Fig. 4 に示したように、全塩分量に対する可溶性塩分量の割合は、高炉スラグ微粉末を用いた供試体の方が大きく、塩分量だけ

Fig. 8. Corroded area of steel bar in specimen with chloride ion (series B).

から見れば必ずしも腐食の生じにくい環境にあるとはいえない。

コンクリート中に塩分が存在する場合、鉄筋の腐食の発生は塩化物イオン濃度だけではなく、 $[Cl^-/OH^-]$ 比など、細孔溶液の化学組成にも大きな影響を受ける。¹⁴⁾ この場合、高炉スラグ微粉末の水和物の組成が大きく影響していると考えられるが、高炉スラグ微粉末は前述のようにアルカリ性が低く、 OH^- イオンの濃度が低いため、鉄筋発錆に関する $[Cl^-/OH^-]$ 比が一定とすれば、その時の Cl^- イオン濃度は低くなるはずである。したがって、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合には、鉄筋が発錆する $[Cl^-/OH^-]$ 比が普通ポルトランドセメント単味のコンクリートとは異なるものと考えられる。

このように、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートにおいて、塩化物イオンの存在下でも鉄筋の発錆が抑制された原因は本研究の範囲からでは明らかでない。したがって、試料中の塩分の抽出方法および測定方法も含めて、今後さらに検討を行う必要がある。

3・3・2 中性化の影響 塩分を含まない供試体の中性化と鉄筋の腐食面積率の関係を Fig. 9 に示す。

これらの供試体のうち、大部分の供試体においては腐食はほとんど観察されなかったが、供試体 70-60-0-a1 のみは鉄筋の腐食面積率が大きかった。供試体 70-60-0-a1 は高炉スラグを用いているうえに、水結合材比が高く、中性化深さが鉄筋位置まで達していたと考えられるためである (Fig. 6 参照)。

ただし、鉄筋を含む供試体に関しては、中性化促進期間中も定期的に対極を湿布を介して設置したため、供試体の湿潤状態が異なり、若干 Fig. 6 に示したのものよりも小さな中性化深さになっている可能性もある。しかし、中性化の進行から考えた場合には、鉄筋の腐食の発生、進行に対しては安全側の評価を行うこととなるため、Fig. 6 に示したものと同様に中性化が進行するとみなした。

3・3・3 塩害と中性化の影響 塩分を含み、さらに中性化促進を行なった供試体中の鉄筋の腐食面積率および腐食減量を Fig. 10 に示す。

塩分を含み中性化した供試体中の鉄筋腐食は、いずれも中性化あるいは塩分単独による腐食の場合よりも、大きな腐食面積率、腐食減量を呈している。これらの供試体はいずれも $3kg/m^3$ の塩分があらかじめ混入されているが、Fig. 8 に示したように、中性化促進を受けていな

Fig. 9. Corroded area of steel bar in neutralized specimen without chloride.

いBシリーズの供試体のうち、塩分量が $3kg/m^3$ のものは鉄筋の腐食面積率がいずれも2%以下で、供試体 55-30-3, 70-0-3, 70-60-3 も同様に低い腐食面積率であった。

中性化深さに関しては、塩分の存在によって影響を受けないという報告¹⁵⁾ 逆に塩分の存在によって中性化が促進されるという報告¹⁶⁾ ともにあり、まだ定説がないのが現状であるが、少なくとも鉄筋腐食発生時の $[Cl^-/OH^-]$ 比を一定と考えると、¹⁴⁾ 環境中に塩分が存在する場合には、含まない場合と比較して、中性化によって鉄筋の腐食が生じやすくなる。^{15), 16)}

本研究においても塩化物イオンの存在と中性化の進行によって、それぞれが単独に存在した場合よりも腐食がより進行したと考えられる。

また、Cシリーズの供試体のうち、水結合材比が高く、高炉スラグ微粉末を用いた供試体 70-60-3-a2 の鉄筋の腐食が最も激しかった。これは Fig. 9 に示したように、中性化の進行が他の供試体と比較して速く、中性化促進期間が95日間の場合には、中性化深さが供試体のかぶり面から見て鉄筋の裏側にまで達しているためであると考えられる。

3・4 鉄筋の腐食の進展

分極抵抗の測定において、同一鉄筋内において自然電位が異なり、分極抵抗に影響を与えることも予想されたが、実際には照合電極の設置位置を変えて測定を行なっても、ほぼ同一の値が得られたため、以後、照合電極の設置位置は2・4節に示したものに統一した。また対極の設置位置によって異なる分極抵抗が得られることが考えられる。しかし、対極からの分極電流の試料極上での流入範囲は明らかではないため、本研究では供試体全面を被う対極を用い、鉄筋全体の平均値を用いて評価することとした。

Fig. 10. Corroded area and corrosion loss of steel bar in neutralized specimen with chloride.

ここで、鉄筋の分極抵抗と腐食量の関係は、腐食反応において鉄がすべて二価のイオンになると仮定すると、次式のようになる。

$$G = \frac{M}{2F_a} \int I_{corr} dt = K \times \frac{M}{2F_a} \times \int \frac{1}{R_p \times A_s} dt \quad (1)$$

ここで、 G :腐食減量 (g/cm^2)、 M :鉄の原子量 (=55.8)、 F_a :ファラデー数 (=96500C)、 I_{corr} :腐食電流密度 (A/cm^2)、 K :比例定数 (V)、 R_p :分極抵抗 (Ω)、 A_s :鉄筋の表面積 (cm^2)である。

そこで、測定した腐食減量測定時までの見掛けの分極抵抗と鉄筋の表面積の逆数を時間積分し、 $M/2F_a$ を乗じた値と、実際に測定した腐食減量との関係を Fig. 11 に示す。腐食の大きな範囲では、両者の関係は良好であり、腐食減量が $0.001\text{g}/\text{cm}^2$ 以上の範囲では、両者の関係を表す比例定数 K 値は 0.0160V となった。そこで、分極抵抗を用いて、腐食の進展を検討することとする。

分極抵抗と鉄筋の表面積の積の逆数は、式 (1) から明らかなように、腐食量と正比例の関係にあるので、この値を腐食速度指標と定義し、Fig. 10 に示したものと同一供試体について、その経時変化を Fig. 12 に示す。塩化物イオンを $3\text{kg}/\text{m}^3$ 混入し、中性化促進を行っていない供試体、あるいは塩分を含まないが中性化促進された供試体中の鉄筋の腐食速度指標は、おおむね小さく、Fig. 8 に示した腐食の傾向と一致する結果となった。

それに対し、塩化物イオンを混入し、さらに中性化促進を行なった場合には、両者の複合の影響は明らかで、中性化促進期間中、あるいは終了後から腐食速度指標が大きくなった。コンクリートの中性化の進展により、鉄筋の腐食が開始されたものと考えられる。

例えば、供試体 70-60-0-a1 は Fig. 6 に示したように、中性化促進期間 a1 (45 日間) 終了時には中性化深さが鉄筋位置程度まで達していると考えられるが、その時点での腐食速度指標は $0.01 (\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)^{-1}$ 程度と非常に小さく、乾湿繰返し環境に置かれて以降に大きくなっている。それに対し、供試体 70-60-3-a1 においては、中性化促進を開始して 34 日 (材齢 62 日) の時点から急激に腐食速度指標が大きくなっており、中性化単独の場合と比

Fig. 11. Relationship between measured corrosion loss and calculated corrosion loss indexes.

較して、腐食の開始が早くなっている。

高炉スラグ微粉末を用いていない供試体 70-0-3-a1、70-0-3-a2 と高炉スラグ微粉末を用いた供試体 70-60-3-a1、70-60-3-a2 を比較すると、高炉スラグ微粉末を用いた場合には腐食速度指標が大きくなり、大きくなった材齢も早い。塩害が単独で作用する場合には高炉スラグ微粉末を用いたほうが鉄筋の防食性能は高かったが、さらに加えて中性化の作用を受ける場合には、高炉スラグ微粉末を用いたほうが早期に劣化が生じ、また鉄筋の不動態被膜の破壊の範囲も大きいものと考えられる。

また、塩分の有無に拘らず、中性化により腐食が生じたと考えられる供試体では、いずれも中性化促進終了時から乾湿繰返し環境暴露初期にかけて腐食速度指標が大きくなった。中性化促進期間中は、供試体は相対湿度 $60 \pm 5\%$ の環境中に置かれていたため、供試体は比較的乾燥した状態にあったものと考えられる。鉄筋の腐食反応は、カソード部において水の還元反応が必要であるため、コンクリートが乾燥している場合には、腐食反応はそれほど活発ではなく、促進期間が終了して供試体が乾湿繰返し状態におかれ、水分が十分に供給されるようになって、腐食速度が大きくなったものと考えられる。また、コンクリートが乾燥している場合には、コンクリート抵抗が大きいために、腐食反応が進展し難いことも考えられる。

Fig. 12. Corrosion rate indexes of steel bar.

さらに, 中性化深さがほぼ同一と考えられる供試体 70-60-3-a1 と 70-0-3-a2 の腐食量は異なり, 高炉スラグ微粉末を用いた 70-60-3-a1 の方が腐食量が多いが, 中性化促進が終了した後の両者の腐食速度指標は, それほど変わらない。ただし, 両者の腐食減量および腐食面積率は, 同一材齢において測定されているため, 中性化促進後の腐食におけるカソード反応が容易な乾湿繰返し環境におかれた期間が異なり, 腐食量が異なったものと考えられる。

一方, 供試体 70-60-3-a1 と 70-60-3-a2 は中性化深さが異なると考えられるにもかかわらず, その腐食速度および腐食量にはそれほど大きな差はない。中性化あるいは塩害による鉄筋の腐食は, コンクリート中の鉄筋の不動態被膜が破壊されることによって生じるが, それ以降の腐食の進行は, カソード反応, すなわち酸素と水分の供給量によって律速される。したがって, 供試体 70-60-3 の場合には, 中性化促進期間 a1 (45 日間) が終了した時点で既に鉄筋の不動態被膜が破壊されており, また両者とも高水結合材比でカソード反応で消費される物質の移動も比較的容易であるため, 中性化促進期間以降の腐食速度に差が見られなかったものと考えられる。

4 結 言

本研究では, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋の腐食性状に関する検討を行った。腐食に与える塩化物イオン, 中性化, および両者の複合の影響を検討したところ, 本研究の範囲からは以下のような結論が得られた。

- (1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは, 塩水練りを行なった場合, 塩化物イオンの固定能力が低いという結果になった。
- (2) 内在塩分によって塩害が単独で作用した場合には, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは鉄筋防食性能に優れていた。
- (3) 中性化が単独で作用した場合には, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは中性化速度が速く, 鉄筋腐食が生じやすかった。
- (4) 塩害と中性化の両者が作用した場合には, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは鉄筋の腐食が早期に生じ, 腐食量も大きくなった。

従来, 高炉セメント, あるいは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは遮塩性に優れているため, 環境条件の厳しい海洋構造物等に用いるのに適していると考えられてきた。本研究においても, 塩害が単独で作用した場合には, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは優れた鉄筋防食性を示したが, さらに中性化が作用する複合劣化環境に置かれた場合には, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは必ずしも耐久性に優れるわけではない

ことが明らかになった。したがって, 耐久性の向上を目指して高炉セメント, あるいは高炉スラグ微粉末を用いる場合には, 環境条件等を十分考慮したうえで配合の検討を行うことが必要となろう。

また, 本研究においては, 主に高水結合材比のコンクリートを対象として検討を行った。しかし, 近年施工例が増加している高強度コンクリート, 高流動コンクリートにおいては水和熱低減, フレッシュ性状の改善を目的として, セメントの一部を高炉スラグ微粉末と置換して用いることが多い。したがって, 今後はこのような低水結合材比の領域においても検討を行う必要があるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) D. E. Macphee and H. T. Cao, Magazine of Concrete Research, **162**, 63, (1993).
- 2) 小林孝一, 中村士郎, 服部篤史, 宮川豊章, 土木学会自己充填コンクリートセミナー論文報告集, p.133 (1997).
- 3) 大即信明, 横井聡之, 下沢 治, 土木学会論文報告集, **360/V-3**, 111 (1985).
- 4) 宮川豊章, "Early chloride corrosion on reinforcing steel in concrete" 京都大学博士論文 (1985).
- 5) 日本建築学会, "高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案) 同解説", p.179 (1991).
- 6) 日本コンクリート工学協会, "コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準 (案)", p.1, (1987).
- 7) 岸谷孝一, 西澤紀昭編, "塩害 (I)", p.32 (1986) 技報堂出版.
- 8) G. Blunk, P. Gunkel and H. G. Smolczyk, 8th Int'l Cong. Chem. Cement, Rio de Janeiro, **V**, 85, (1986).
- 9) 中村士郎, 小林孝一, 服部篤史, 宮川豊章, コンクリート工学年次論文報告集, **20-1**, 305 (1998).
- 10) 土木学会, "高流動コンクリートに関する技術の現状と課題", p.183 (1996).
- 11) 小林孝一, 渡邊佳彦, 服部篤史, 宮川豊章, 土木学会論文集, 投稿中.
- 12) 笹谷輝彦, 鳥居和之, 川村満紀, コンクリート工学年次論文報告集, **16-1**, 787 (1994).
- 13) 東 邦和, 小西正郎, 白石祐彰, 福田聡之, コンクリート工学年次論文報告集, **16-1**, 781 (1994).
- 14) G. K. Glass and N. R. Buenfeld, Corrosion Science, **39**, 1001 (1997).
- 15) 北後征雄, 小林茂広, 菊池保孝, 宮川豊章, 藤井 學, 材料, **45**, 1048 (1996).
- 16) 岸谷孝一, 小林一輔, 櫻野紀元, 宇野祐一, コンクリート工学論文集, **2-1**, 77 (1991).