

# 論文 高炉スラグ微粉末がコンクリートの鉄筋防食性能に与える影響について

小林 孝一\*<sup>1</sup>・竹本 豊\*<sup>2</sup>

**要旨**：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは、普通ポルトランドセメント単体のコンクリートとは鉄筋防食性能が異なることが知られている。そこで、高炉スラグ微粉末の有無による影響を調査するため鉄筋の分極抵抗、自然電位のモニタリング、腐食減量、可溶性塩分量の調査を行った。その結果、以下のような結論が得られた。(1)高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは、鉄筋の腐食を抑制する効果があり、塩害に対する抵抗性があるとの結果となった。(2)本研究の範囲では、自然電位より分極抵抗の方が腐食状況との対応がよく、分極抵抗の腐食判定基準を提案した。

**キーワード**：高炉スラグ微粉末、腐食減量、分極抵抗、自然電位、可溶性塩分量

## 1. はじめに

コンクリートは、耐久性に優れたメンテナンスフリーの建設材料として広く普及し、社会生活に様々な形で貢献してきた。

しかし、近年コンクリート構造物の耐久性に関し疑問がもたれるようになってきた。その原因の一つに、除塩の不十分な海砂の使用、沿岸構造物における飛来塩分の侵入などによる塩害が挙げられる。

高炉スラグ微粉末を混和材料として使用することは、コンクリートをより緻密な硬化体にし、塩化物イオンの拡散、浸透を抑制することから、その対策として有効であると考えられている。また、高炉スラグ微粉末の使用は、産業副産物の有効利用という点からも、近年注目されており、使用方法の検討も行われている。

本研究では、高炉スラグ微粉末の有無が、コンクリート中の鉄筋腐食に与える影響について調査を行った。また、分極抵抗、自然電位を測定し、コンクリート中の鉄筋の腐食の進展を非破壊的に調査することを試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 配合

コンクリートの配合を表-1に示す。今回の試験では、水結合材比を一定にして、高炉スラグ微粉末の使用の有無が鉄筋の腐食に与える影響を調査した。

セメントは密度  $3.16\text{g/cm}^3$  の普通ポルトランドセメント、スラグは密度  $2.91\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $3920\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグ微粉末で石こう無混入のものを使用し、石こうの有無が鉄筋防食性能に与える影響についても調査することにした。細骨材は密度  $2.63\text{g/cm}^3$ 、F.M.3.04、粗骨材は密度  $2.60\text{g/cm}^3$ 、最大寸法  $15\text{mm}$ 、F.M.6.69のものを使用した。

また、鉄筋の腐食レベルを変えるため、コンクリート中の  $\text{Cl}^-$  量を  $1, 3, 6, 12\text{kg/m}^3$  とした。配合名は、(高炉スラグ微粉末の質量置換率( $\%$ ) $\cdot\text{Cl}^-$ 量( $\text{kg/m}^3$ ) $\cdot$ 石こうの高炉スラグ微粉末に対する質量置換率( $\%$ ))とした。

### 2.2 使用供試体

分極抵抗、自然電位および鉄筋の腐食減量の測定に用いた供試体は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$  の

\*1 中部大学講師 工学部土木工学科 博(工) (正会員)

\*2 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻

表-1 配合表

配合名 <sup>*1</sup>	W/B (%)	Sg/B (%)	p/S (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						AE減水剤 (cc)
					W	C	Sg <sup>*2</sup>	Gp <sup>*3</sup>	S	G	
0-**-0	55	0	0	45.8	175	318	0	0.00	811	951	796
60-**-0	55	60	0	45.8	175	127	191	0.00	805	944	796
60-**-2	55	60	2	45.8	175	127	187	3.82	804	943	796

(\*\*:1, 3, 6, 12)

\*1:(高炉スラグ微粉末の質量置換率-CI<sup>-</sup>量-石こう混入率)

\*2:高炉スラグ微粉末

\*3:石こう

角柱供試体とし、長さ30cmの鉄筋D10(SD295)の端部を研磨後、長さ50cmの絶縁皮膜付きリード線をはんだ付けし、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を図-1のようにかぶり2cmで配置した。

また、コンクリートの練り混ぜは、強制練りミキサ(容量100リットル)を使用して行い、予めNaClを水に溶かしてから練り混ぜる塩水練りとした。脱型はいずれも打設後1日で行い、その後約1ヶ月間室内で湿布養生を行った。

各配合の供試体はそれぞれ2体ずつ作成した。なおスランプは、CI<sup>-</sup>量によって差があり、6~21cmとなった。

塩分量の測定に用いた供試体は、コンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタル(寸法40×40×160mm)とし、分極抵抗、自然電位測定用供試体と同じ養生を行った。

### 2.3 測定方法

#### (1) 分極抵抗、自然電位の測定

コンクリート中の鉄筋の分極抵抗、自然電位を定期的に測定し経時変化を調べた。分極抵抗は、測定器にコロージョンモニター(電流10nA~10mA, 周波数0.1Hzと800Hzの重畳矩形波)、照合電極に飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)、対極に100×400mmの銅板を使用した。測定は、照合電極を供試体側面の鉄筋中央位置の真横、対極をかぶり面に設置し、測定初期段階では7日毎に、測定値に安定した傾向が見られてからは1ヶ月毎に行った。

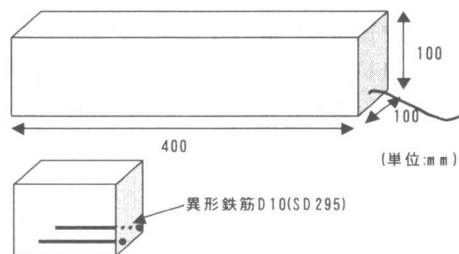


図-1 供試体図

#### (2) 腐食減量の測定

作成した供試体(12×2体)のうち1体は材齢128日で、もう1体は材齢491日で解体し鉄筋をはつり出した。まず、取り出した鉄筋の腐食状況をOHP用フィルムに写し取り、腐食面積率を算出した。その後、JCI-SC1に基づき<sup>1)</sup>腐食減量を求めた。

#### (3) 塩分量の測定

材令91日の時点で供試体をハンマで破壊し、供試体表面を含まない内部モルタル片を150μmふるいに通るまで粉砕し、混入CI<sup>-</sup>量1, 3kg/m<sup>3</sup>のものは1g程度、6, 12 kg/m<sup>3</sup>のものは0.5g程度ずつ取り分け、試料とした。これを、JCI-SC4に基づき<sup>1)</sup>電位差滴定装置を使用して全塩分量、可溶性塩分量を測定した。

測定は、配合ごとに2回行い、コンクリートの単位体積あたりに換算した。

## 3. 実験結果

### 3.1 腐食減量

鉄筋の腐食減量は、打設前の鉄筋重量とクエン酸水素二アンモニウム水溶液による錆洗浄後

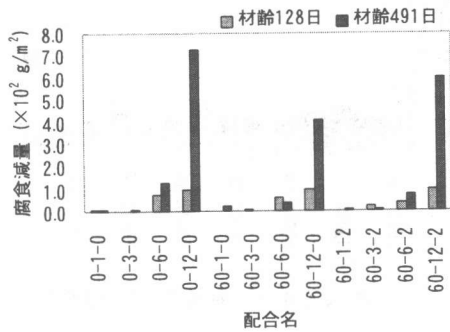


図-2 腐食減量

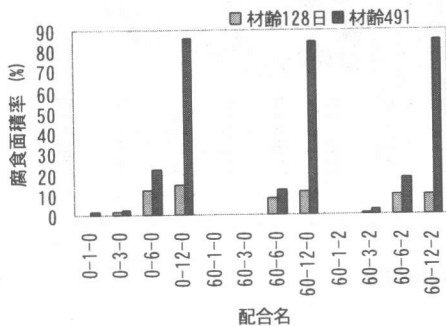


図-3 腐食面積率

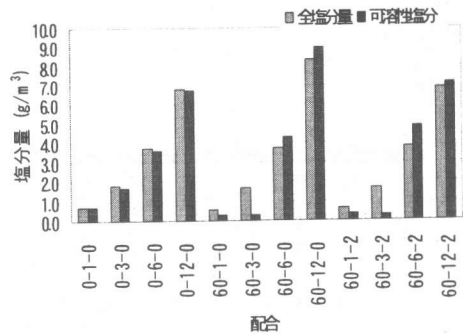


図-4 全塩分量と可溶性塩分量

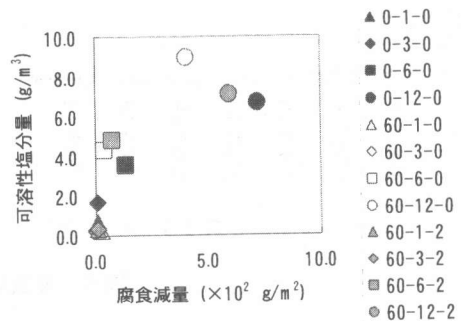


図-5 可溶性塩分量と腐食減量

の鉄筋重量の差とした。この測定結果を図-2に示す。また、腐食面積率を図-3に示す。

まず、材齢128日の時点では、 $\text{Cl}^-$ 量が多いほど腐食減量は大きい。供試体解体までの期間が短いため、それほど大きな腐食量にはならなかった。また、高炉スラグ微粉末の有無で比較すると、高炉スラグ微粉末を使用することによりわずかに腐食減量が小さくなっていった。また、石こうの影響はあまりなかった。

材齢491日の時点でも、 $\text{Cl}^-$ 量が多いほど、腐食減量は大きくなっている。なかでも、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $12\text{kg/m}^3$ の場合、他の $\text{Cl}^-$ 量に比べて明らかに大きい値を示している。

また、高炉スラグ微粉末の有無で比較した場合、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $1, 3\text{kg/m}^3$ では腐食減量にあまり差がないのに対し、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $6, 12\text{kg/m}^3$ では大きな差を示していた。このことより、特

に多量の $\text{Cl}^-$ が存在する場合、高炉スラグ微粉末には鉄筋腐食を抑制する効果があると考えられる。

また、石こうの有無で比較した場合には、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $1, 3\text{kg/m}^3$ ではあまり差がないが、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $6, 12\text{kg/m}^3$ では石こうを混入した配合の方が腐食減量が大きくなっていった。

### 3.2 可溶性塩分量と腐食減量の関係

図-4にコンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量を示す。高炉スラグ微粉末の有無で比較すると、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $3\text{kg/m}^3$ 以下の場合、可溶性塩分量は小さくなっていった。このことより、混入 $\text{Cl}^-$ 量 $3\text{kg/m}^3$ 以下では高炉スラグ微粉末を混入すると、塩化物イオンを固定する能力が高くなるものと考えられる。しかし、高炉スラグ微粉末を使用した上に、多量の $\text{Cl}^-$ を混入した場合、全塩分量よりも可溶性塩分量の方が多

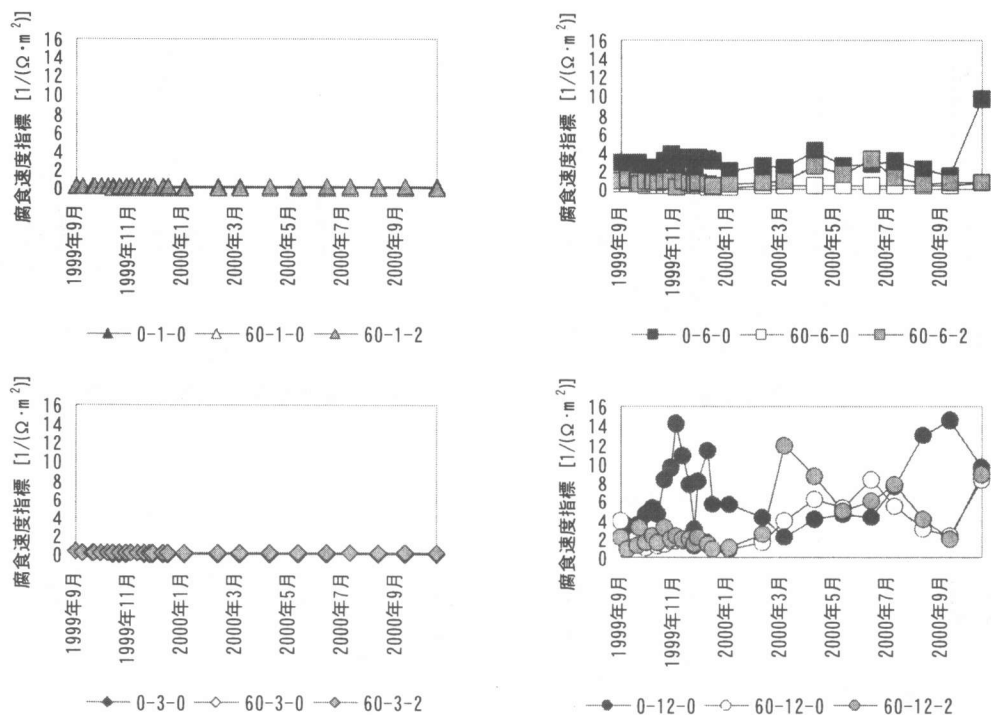


図-6 腐食速度指標経時変化

くなるものも存在し、今回用いた  $\text{Cl}^-$  量測定の方法は不適切である可能性もあると考えられる。

コンクリート中の可溶性塩分量と腐食減量との関係を図-5 に示す。この図より、可溶性塩分量が多いほど腐食減量は大きくなる傾向を示している。しかし、混入  $\text{Cl}^-$  量が  $6\text{kg/m}^3$  以上の場合、高炉スラグ微粉末を使用した場合の方が、可溶性塩分量が大きいかかわらず、腐食減量が小さいという結果となった。前述のように、多量の塩化物イオンが存在する場合には、今後その測定方法に関して詳細な検討が必要であると考えられるが、今回の測定結果からは、高炉スラグ微粉末を混入することにより腐食減量が減少することから、高炉スラグ微粉末には鉄筋腐食を抑制する効果があることが確認できた。

### 3.3 鉄筋腐食モニタリング

腐食減量は、分極抵抗と以下の関係がある。

$$G = K \times M / 2Fa \times \int (1/R_p) dt \quad (1)$$

G:腐食減量( $\text{g/m}^2$ ), M:鉄の原子量(=55.8), Fa:ファラデー数(=96500C),  $R_p$ :分極抵抗( $\Omega \cdot \text{m}^2$ ), K:比例定数(V)

そこで、分極抵抗の逆数を腐食速度指標と呼ぶこととし、その経時変化を図-6 に示す。この図によると、 $\text{Cl}^-$  量が多いほど腐食速度指標は大きくなる傾向にあり、腐食が確実に進んでいると考えられる。また、混入  $\text{Cl}^-$  量  $1, 3\text{kg/m}^3$  の場合、高炉スラグ微粉末の有無に関わらず腐食速度指標は同程度の小さな値を示しており、明確には影響が確認できなかった。しかし、混入  $\text{Cl}^-$  量  $6\text{kg/m}^3$  の場合、高炉スラグ微粉末を用いた場合の方が、腐食速度指標は小さな値を示しており、腐食減量の調査から得られた結果と同様に、高炉スラグ微粉末には腐食速度を抑制する効果があると考えられる。また、石こうの有無で比較した場合、石こうを用いた場合の方が若干腐食速度は大きい、あまり顕著な影響は見られなかった。

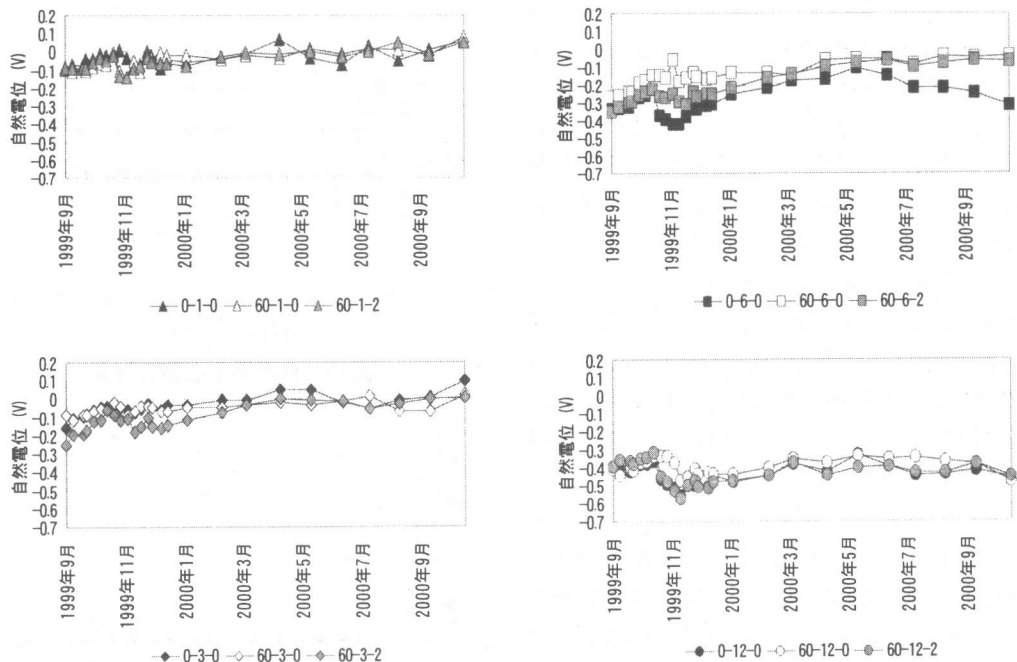


図-7 自然電位経時変化

つぎに、分極抵抗と同時に測定した自然電位の経時変化を図-7 に示す。図-7 によると CI-量が大きいほど自然電位は卑になり、腐食の傾向が大きいものと考えられる。また、混入 CI-量  $3\text{kg/m}^3$  以下の場合、高炉スラグ微粉末の有無に関わらず自然電位は同程度の値を示しており、その影響が確認できなかった。しかし、混入 CI-量  $6\text{kg/m}^3$  の場合、材齢 270 日以降では、高炉スラグ微粉末無混入の配合 0-6-0 は、ASTM 規準<sup>2)</sup>によれば腐食領域 ( $-0.24\text{V vs. Ag/AgCl}$  以下)の値を示しているのに対し、高炉スラグ微粉末を混入した配合 60-6-0、60-6-2 は非腐食領域 ( $-0.09\text{V vs. Ag/AgCl}$  以上)の値を示している。したがって、腐食減量、分極抵抗の場合と同様に CI-量  $6\text{kg/m}^3$  程度の場合、高炉スラグ微粉末の影響が最も顕著であった。

しかし、配合 60-6-0、60-6-2 のいずれも図-2 に示したように腐食が生じている。したがって高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに対し

ては、前述の ASTM 基準は適応できない可能性があると考えられる。

一方、石こうの影響であるが、高炉スラグ微粉末を混入して石こうの有無で比較した場合、自然電位には若干卑の傾向があるが、あまり顕著な影響はみられなかった。

### 3.4 鉄筋腐食モニタリングと腐食減量の関係

材齢 491 日の時点での腐食減量と分極抵抗あるいは自然電位との関係を図-8、9 に示す。図-8 より腐食減量と自然電位は比較的良好な相関関係にあり、腐食減量が多いほど自然電位は卑になることを示している。しかし、図-8 と図-9 を比較すると、腐食減量とより相関が高いのは分極抵抗であり、自然電位の場合よりも腐食の有無の境界が明瞭である。そこで、図-9 から鉄筋腐食に関する分極抵抗による判定基準として、以下を提案する。

重畳矩形波法を用いた場合、(単位:  $\Omega \cdot \text{m}^2$ )

$$\begin{array}{ll} R_p < 0.5 & \text{腐食領域} \\ 0.5 < R_p < 5.0 & \text{不確定領域} \end{array}$$

5.0 < Rp                      非腐食領域

また、式(1)に分極抵抗の経時変化を代入して比例定数 K を算出した(図-10)。その結果、高炉スラグ微粉末未使用の場合の比例定数 (K=0.0105V) は、高炉スラグ微粉末を使用した場合の比例定数 (K=0.0119V) と比べて若干小さな値となった。したがって、高炉スラグ微粉末を用いた場合、同一の分極抵抗であっても実際の腐食速度は若干大きいという結果となった。

また、石こうを混入した場合の比例定数 (K=0.0075V) は、他の配合と比べて小さくなり、石こう無混入の高炉スラグ微粉末を単独で使った場合と逆の結果となった。

また、本研究で得られたこれらの結果は、従来の研究で報告されている K=0.017~0.052(V) よりも小さくなった<sup>3)</sup>。ここでは、分極抵抗を二つの周波数のみに対応する応答から算出しているためにこのような結果になったものと考えられるため、今後分極抵抗の測定方法に関しても検討の必要があるものと考えられる。

4. まとめ

- (1) 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは、鉄筋腐食を抑制する効果があり、塩害に対する抵抗性がある。
- (2) 本研究の範囲では、腐食減量は分極抵抗と良好な関係にあり、分極抵抗が 5.0 Ω・m<sup>2</sup> 以上の場合には、鉄筋はほとんど腐食していなかった。
- (3) 分極抵抗と腐食減量間の比例定数 K は、高炉スラグ微粉末の使用、石こうの使用に影響される。

参考文献

1) (社)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基準(案)，(株)技報堂，pp. 1-4, 17-37, 1991.  
 2) ASTM C 876-91 : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete, 1999.

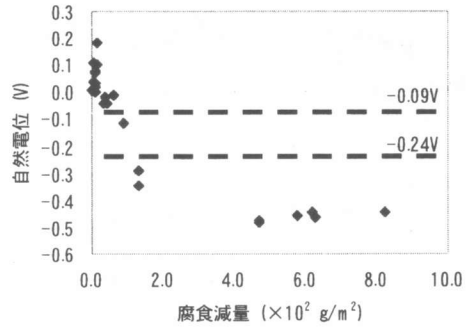


図-8 自然電位と腐食減量

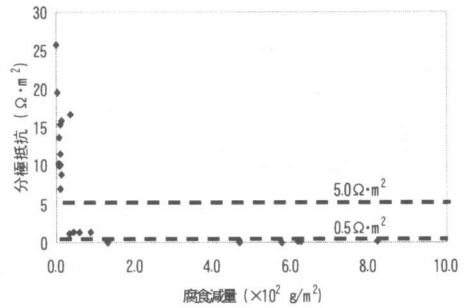


図-9 分極抵抗と腐食減量

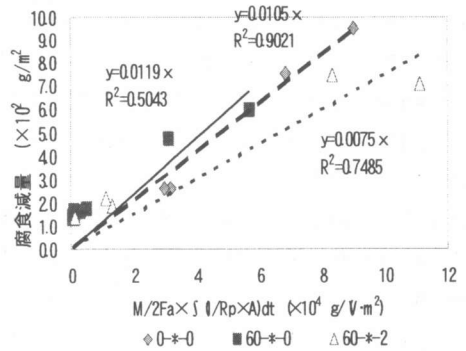


図-10 比例定数 K

3) (社)土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向 -コンクリート委員会腐食防食小委員会報告- , pp. 130-148, 1997.12.