

論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する電気化学的検討

中村土郎^{*1}・小林孝一^{*2}・服部篤史^{*3}・宮川豊章^{*4}

要旨:高炉スラグ微粉末を結合材量の60%まで置換したスラグコンクリート中の鉄筋の自然電位、分極抵抗などを材齢250日程度までモニタリングし、鉄筋の電気化学的特性に対するスラグ置換率、塩分量、中性化深さなどの影響について検討した。その結果、同水結合材比のコンクリート中の鉄筋腐食について以下の結論が得られた。(1) 塩分を含まない場合には、スラグ置換率の違いにより自然電位、分極抵抗に顕著な差は見られない。(2) 塩分が多量に混入している場合には、スラグ置換率が小さいものほど腐食傾向にある。(3) 中性化が腐食に与える影響は大きく、塩分の存在と中性化の複合作用によって腐食がかなり促進されると推定される。

キーワード:高炉スラグ微粉末、鉄筋腐食、自然電位、分極抵抗、腐食速度

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考えるには、鉄筋の腐食メカニズムを明らかにする必要がある。塩害、中性化などが作用した結果、鉄筋腐食が生じる場合が一般的であるが、これらの原因がそれぞれどのように鉄筋腐食に影響を与えるかについての研究例¹⁾は少ない。また多量の結合材を使用する必要がある高流動・高強度コンクリートなどでは、水和熱の抑制などを目的として高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどを結合材の一部として用いる場合が多いが、結合材の種類や使用量が鉄筋腐食に与える影響についても定量的な検討例は少ないので現状である。またコンクリート中の鉄筋腐食に対しては、現在自然電位などの電気化学的特性を測定する非破壊検査が多く行われているが、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合、腐食がほとんどない鉄筋でも普通コンクリートの場合と異なり腐食傾向にあると判定される可能性があるとの指摘もある²⁾。そこで本研究では高炉スラグ微粉末（以下、スラグ）を用いたコ

ンクリート中の鉄筋に対して電気化学的測定を行い、塩害や中性化の複合的な作用がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響およびその電気化学的特性値との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験要因

2.1 配合

水結合材比、スラグの置換率などがコンクリート中の鉄筋の自然電位など電気化学的特性に与える影響を調べるために、表-1に示す8配合（基本シリーズ）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を調べるために、コンクリート中のCl⁻量を0, 1.3, 3.0, 5.0kg/m³の4レベルとした（塩分シリーズ）。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（中性化シリーズ）。

2.2 供試体の作成

塩分を混入させる配合では、予めNaClを水に溶かしてから練り混ぜる塩水練りとした。セメント

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 京都大学大学院助手 工学研究科土木システム工学専攻 工修（正会員）

*3 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 工修（正会員）

*4 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

表-1 基本配合および実験要因

配合名 *1	W/B (%)	s/a (%)	Sg/(C+Sg) (%)	単位量(kg/m ³)				AE*2 減水剤	AE 助剤	Cl ⁻ 量(kg/m ³)				中性化	
				W	C	Sg*3	S			0	1.3	3.0	5.0	1	2
55-0-0	55	49	0	336	0	889	957	420	672	○	○	○	○		
55-30-0			30	235	101	885	953	420	672	○		○			
55-60-0			60	134	202	882	950	420	672	○	○	○	○	○	
70-0-0			0	264	0	917	988	330	528	○		○		○	○
70-60-0			60	106	158	912	982	330	528	○		○		○	○

*1：配合名は“W/B(%)”－“スラグ置換率(%)”－“塩分量(kg/m³)”*2：AE減水剤、AE助剤は(cc/m³) *3：高炉スラグ微粉末

は普通ポルトランドセメント、スラグは比重 2.90, 比表面積 4080cm²/g の高炉スラグ微粉末、砂は滋賀県野州川産川砂（比重：2.56, F.M. : 2.86）, 砂利は滋賀県土山産碎石（比重：2.56, 最大寸法 15mm, F.M. : 6.29）を使用した。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 : 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 本を図-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。供試体は各要因 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℃ の恒温室で湿布養生を行った。その後材齢 28 日までは大気温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。また中性化シリーズの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 1’ では約 45 日間、‘促進 2’ では約 95 日間、気温 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ていた。

2.4 測定項目

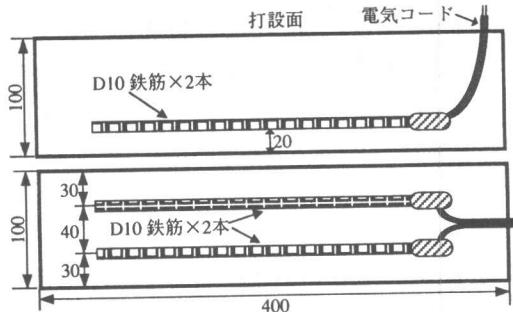


図-1 鉄筋入り供試体

材齢 28 日、180 日で φ10×20cm の円柱供試体を用いて、コンクリートの圧縮強度試験を行った。またコンクリートをウェットスクリーニングして作成した 4×4×16cm のモルタル供試体を用いて、モルタル圧縮強度試験も行った。

また、材齢 28 日、180 日でコンクリートをウェットスクリーニングして作成したモルタル供試体を所定の材齢までコンクリート供試体と同様の養生を行なった後、オイルカッターで 1cm 角の立方体に切断した。その後 24 時間エタノールに浸漬、さらに 1 週間真空乾燥させたものの 6nm~2μm の細孔径分布を水銀圧入法によって測定した。

さらにコンクリート中の鉄筋の自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を定期的に測定し経時変化を調べた。照合電極には飽和塩化銀電極 (Ag/AgCl) を用い、打設下面中央部での自然電位を測定した。分極抵抗の測定は矩形波電流法 (電流 10~100μA, 周波数 800Hz と 0.1Hz の矩形波重疊パルス) で行い、対極には 10×40cm の銅板を用いた。自然電位は腐食の可能性を判定する方法

として従来からよく用いられているASTMの判定基準を適用して検討を行った。分極抵抗 R_p はその逆数が腐食速度と比例関係にあると考えられることから、腐食速度指標として $1/(R_p \times A)$ (A :各鉄筋の全表面積) を用いて検討を行った。

3. 実験結果

3.1 強度発現と細孔構造

材齢 28, 180 日の基本シリーズ ($W/B=55, 70\%$) の圧縮強度を図-2に示す。スラグを用いた場合の強度発現は遅く、スラグ置換率が高いほど材齢 28 日での圧縮強度は小さいのに対し、材齢 28 日から材齢 180 日の間の強度増加率はスラグ置換率が高いほど大きくなる傾向があり、材齢 180 日の圧縮強度はスラグ置換率 60% で最も大きい。図-3に、材齢 28 日, 180 日の基本シリーズの全細孔量（細孔径 $6\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ ）と、細孔径 $6 \sim 20\text{nm}$ と $20\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ のそれぞれの細孔量を示す。材齢の経過とともに全細孔量は減少する傾向にあるが、スラグ置換率 30%, 60% の場合には特に細孔量の減少が大きく、長期材齢まで細孔構造の緻密化が進み、長期強度増進に寄与していると考えられる。図-4にモルタルの細孔径 $20\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の細孔量とモルタル圧縮強度の関係を示す。スラグ置換率の違いを考慮しないと相関は見られないが、スラグ置換率が同じ配合同士では比較的良い相関が見られ、グラフ上の細孔量と強度の関係を表す直線は、スラグを用いた場合には傾きが小さくなる。したがって、圧縮強度 70MPa 程度までは同じ強度のコンクリートでもスラグを用いたコンクリートの方が細孔量が小さくなり、イオン透過性などの耐久性が物理的に向上していると考えられる。

3.2 鉄筋腐食モニタリング

3.2.1 基本シリーズ

基本シリーズ $W/B=55\%$ で塩分を含まない供試体中の鉄筋の自然電位、分極抵抗から算出した腐食速度指標、コンクリート抵抗の経時変化を図-5～7に示す。グラフは各要因の供試体 3 体中の計 6 本の鉄筋の平均値で表している。なおこれらの測定値は供試体上での照合極の位置により顕著な違

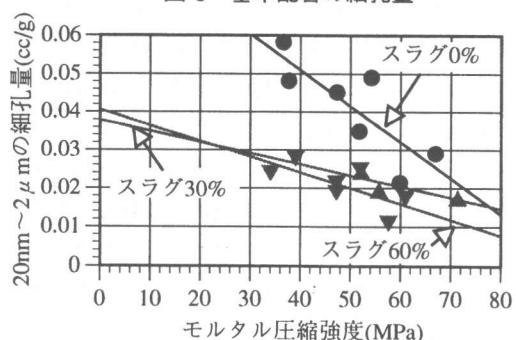
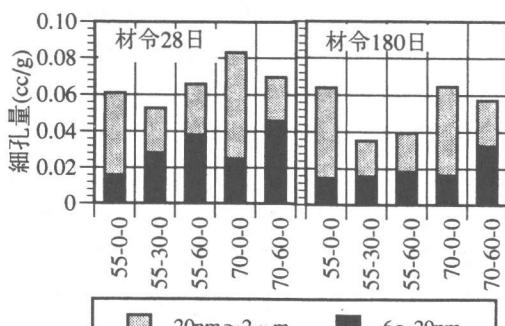
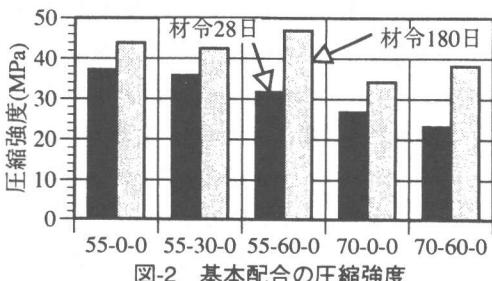
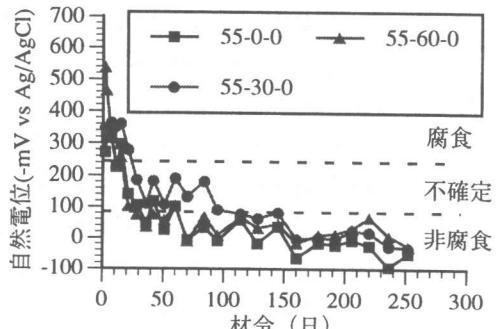


図-4 20nm～2μmの細孔量と圧縮強度の関係



いは見られなかったため、供試体の打設下面の中央部に照合極をおいた場合の測定値のみに対して考察を加えることとする。

図-5に示すように、自然電位は材齢初期には非常に卑な値となり腐食傾向を示すが、材齢の経過とともに貴な方向に変化し、材齢250日の時点ではスラグ置換率に関わらず非腐食領域に分類される。スラグ置換率の変化が自然電位に与える影響はほとんど見られない。図-6に示すように、腐食速度指標も自然電位と同様にスラグの影響はほとんど見られず、いずれの配合でも腐食速度は非常に小さいと推定される。一方で図-7に示すようにコンクリート抵抗にはスラグ置換率の影響が顕著に現れている。材齢の経過とともにスラグ置換率が大きいほどコンクリート抵抗は増大し、材齢250日の時点でのスラグ置換率60%のコンクリート抵抗は、スラグ置換率0%の場合と比較して4~5倍程大きい。3.1節で示したスラグコンクリートの細孔構造の緻密化が、コンクリート抵抗の増加の原因の一つであると考えられるが、さらに原因を検討する必要がある。また、図-5~7は同要因の鉄筋6本の平均値で表しているが、自然電位、分極抵抗の測定値は同要因の鉄筋間のばらつきが小さかったのに対して、コンクリート抵抗の測定値はばらつきが大きく、経時的な変動も大きかった。これは、コンクリート抵抗がコンクリートの含水状態の影響を受けやすいためと考えられる。

3.2.2 塩分シリーズ

コンクリート中にCl⁻をそれぞれ0, 1.3, 3.0, 5.0 kg/m³含んだ塩分シリーズ(W/B=55%)のスラグ置換率がそれぞれ0, 60%の場合の自然電位の経時変化を図-8, 9に示す。図-8に示すように、スラグ置換率0%ではCl⁻量の増加とともに自然電位は卑変し、腐食傾向となる。しかし材齢250日程度経過した時点ではCl⁻=3.0kg/m³以下の場合には、自然電位は非腐食領域に分類される。従来の研究では3年間の暴露試験(温度20°C, 相対湿度90%)でCl⁻=2.5kg/m³以上になると鉄筋の発錆面積が顕著に増大する³⁾などの報告があるが、本研究では若干異なる推定結果となっている。本実験では材齢が250日程度であることや環境条件の違いなどが主たる理由であると考えられ、本実験の供試体でも今後腐食が進展する可能性もある。一方で図

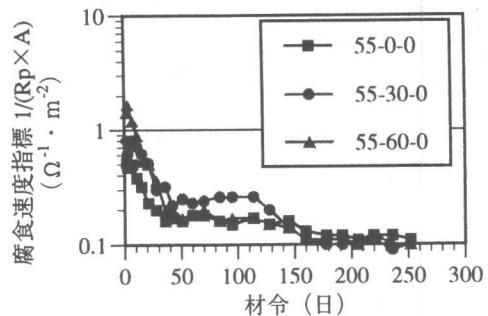


図-6 腐食速度指標経時変化(基本シリーズ)

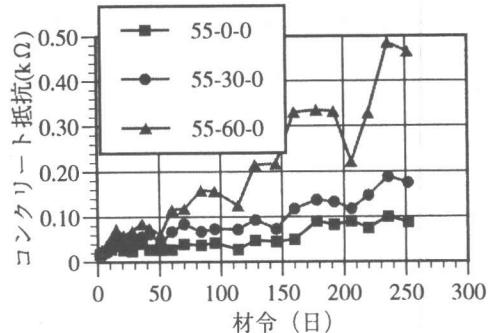


図-7 コンクリート抵抗経時変化(基本シリーズ)

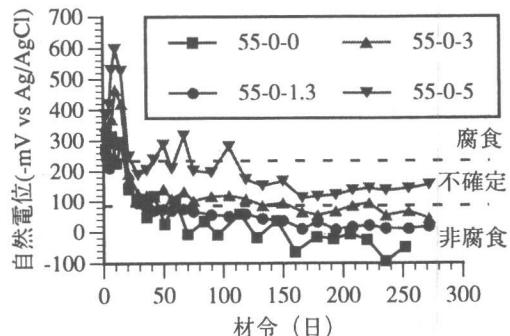


図-8 自然電位経時変化
(塩分シリーズ: スラグ0%)

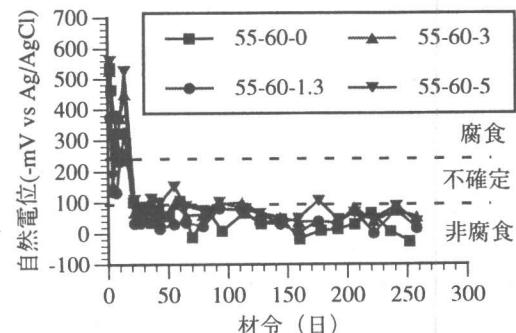


図-9 自然電位経時変化
(塩分シリーズ: スラグ60%)

-9に示すスラグ置換率60%の場合の自然電位は、スラグ置換率0%の場合にくらべ、 Cl^- 量の影響が小さい。材齢250日の時点でスラグ置換率0%の場合には不確定領域に分類された $\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$ の場合の自然電位も、スラグ置換率60%の場合には非腐食領域となっている。また腐食速度指標を時間積分して求められ、腐食反応物生成量に対応すると考えられる腐食量指標と塩分量の関係を図-10に示すが、腐食量指標はスラグ置換率0%の場合はコンクリート中の塩分量の増加に伴い大きくなっているのに対して、 $\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$ 以下の範囲では、スラグ置換率60%の場合には塩分量に関わらず腐食量指標は小さい。したがって塩分を多量に含む場合には、スラグ置換率を60%とした方が腐食の進展を抑制できるという推定結果となった。この原因としては、スラグを用いることによりコンクリート抵抗が増大し、腐食電流が流れにくい環境になるためだと考えられるが、今後さらに検討する必要がある。

3.2.3 中性化シリーズ

中性化促進を行った3種類の基本配合($\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$)の中性化深さと中性化速度係数を図-11に示す。W/Bが大きいほど、またスラグ置換率が高いほど中性化は促進されている。中性化速度はW/B=55%，スラグ置換率60%の場合と、W/B=70%，スラグ置換率0%の場合でほぼ同等、W/B=70%，スラグ置換率60%の場合にはその約1.7倍である。W/B=70%，スラグ置換率0%， $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ で中性化促進を行った場合の鉄筋の自然電位を図-12に示す。この要因では中性化深さは13mmで中性化は鉄筋まで到達していない。図-12に示すように、中性化促進を行った場合の自然電位は、中性化促進期間中は供試体が乾燥しているため非常に貴な値となるが、その後は非中性化の場合とほとんど変わらない。一方スラグ置換率60%で中性化深さが22mmと鉄筋位置まで中性化が達している場合の鉄筋の自然電位を図-13に示す。自然電位は中性化促進期間中から卑変し、変動は大きいものの常に腐食領域に分類されている。このように塩分を含まない場合には、中性化が鉄筋に達している

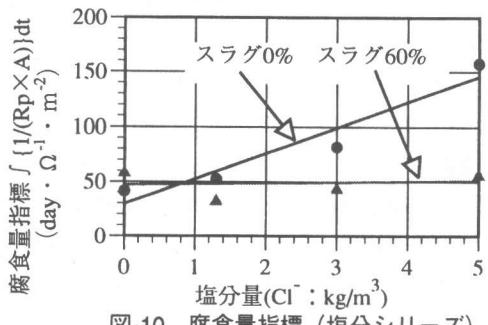


図-10 腐食量指標（塩分シリーズ）

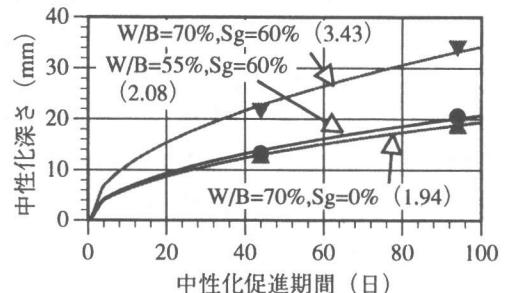


図-11 中性化深さ（カッコ内の数字は中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{day}}$)）

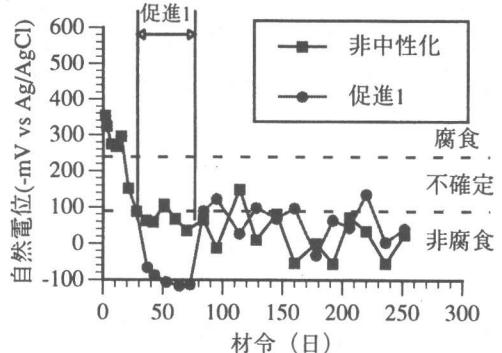


図-12 自然電位経時変化（中性化シリーズ： $\text{W/B}=70\%$, スラグ0%, $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ ）

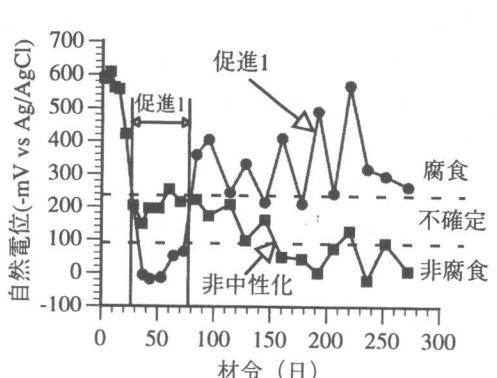


図-13 自然電位経時変化（中性化シリーズ： $\text{W/B}=70\%$, スラグ60%, $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ ）

か否かが、自然電位に大きな影響を与えると考えられる。また Cl^- を 3.0kg/m^3 含むコンクリートに対して中性化促進を行った場合の鉄筋の自然電位を図-14 に示す。中性化深さは‘促進 1’で 13mm , ‘促進 2’で 22mm となっている。図-14 に示すように、塩分を含む場合には、中性化が鉄筋に達していない‘促進 1’でも自然電位が卑変し腐食領域にある。一方、中性化促進を行わない場合には Cl^- を 3.0kg/m^3 含んでいても、自然電位は非腐食領域にある。したがって塩分の存在のみでは腐食がほとんど生じない場合でも、それに中性化の作用が加わることによって鉄筋が腐食するという推定結果となった。また腐食量指標と中性化深さの関係を図-15 に示す。塩分を含まない場合には、中性化深さが増えても腐食量指標はあまり増加しないが、塩分を含む場合には、中性化深さの増加とともに腐食量指標は直線的に増大している。中性化によってフリーデル氏塩の再分解がおこり、濃度拡散によって未中性化領域に移動して濃縮を起こすという報告⁴⁾ もあり、塩分の存在と中性化の複合作用によって腐食が大きく促進される可能性がある。

4.まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) スラグを用いたコンクリートでは、材齢 28 日以降での細孔量の減少が大きく、長期強度の増加が大きい。
- (2) 室内乾湿繰返し環境にあるコンクリート中の鉄筋の自然電位、分極抵抗は、塩分を含まない場合、スラグ置換率の影響が小さい。しかし、コンクリート抵抗は、スラグ置換率の増加とともに顕著に増大する。
- (3) (2) と同条件で塩分を含む場合には、スラグ置換率を 60% とすると、スラグ置換率 0% の場合に比べて腐食は抑制されるという推定結果となる。
- (4) (2) と同条件で、中性化促進を行った場合、中性化が鉄筋に達しているか否かで自然電位が大きく異なる。しかし、塩分を含む場合には中性化との複合作用で腐食が進展する可能性がある。

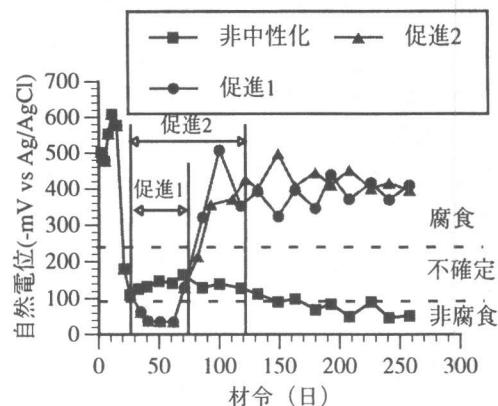


図-14 自然電位経時変化（中性化シリーズ：
 $\text{W/B}=70\%$, スラグ 60%, $\text{Cl}^- = 3 \text{ kg/m}^3$ ）

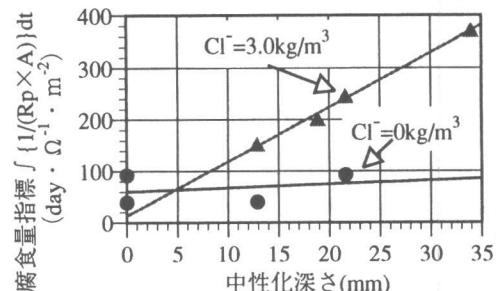


図-15 中性化深さと腐食量指標の関係
($\text{W/B}=70\%$)

参考文献

- 1) 北後征雄ほか：コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する複合要因の影響、材料、Vol.45, No.9, pp.1048-1054, 1996.9
- 2) 中村士郎ほか：高炉スラグ微粉末を用いた併用系高流動コンクリートの耐久性、土木学会第 51 回年次学術講演会概要集第 5 部, pp.714-715, 1996.9
- 3) 宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策、コンクリート工学、Vol.32, No.6, pp.66-71, 1994.6
- 4) 岸谷孝一ほか：塩化物を含むコンクリート中ににおける鉄筋腐食と中性化の関係、コンクリート工学論文集、Vol. 2, No.1, pp.77-83, 1991.1