

[1073] コンクリート中の鉄筋の腐食抑制効果の評価試験方法に関する一提案

正会員 ○千歩 修 (建設省建築研究所)
正会員 馬場明生 (建設省建築研究所)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の寿命は、主に中性化の進行による鉄筋の腐食によって論じられている。コンクリート表面の仕上げ、改修構法などの中には鉄筋の腐食を抑制する効果をもつと考えられるものも多いが、その程度については明らかにされておらず、また、評価試験方法も確立されていない。

本論文では、外装の鉄筋腐食抑制効果を検討する新しい試験方法を提案し、コンクリートの調合、塩分の含有量、外装補修構法の要素のひとつである含浸系材料を変化させた試験体を用い、促進発錆試験を行ったものであり、この結果、この試験法の有効性が明らかとなった。

2. 試験方法の提案

従来から鉄筋の腐食条件を検討する方法としては、種々の方法が提案されているが、外装の鉄筋腐食抑制効果を検討する方法としては、福士、福島〔1〕に代表される方法がある。この方法は図1に示すようにみがき鋼棒を埋め込み、促進中性化の後、促進発錆試験を行い、内部鉄筋の腐食の程度（発錆面積率、腐食減量率、最大孔食深さ等）を調べ、表面材の鉄筋腐食抑制効果の評価を行っている。しかしながら、この試験方法は鉄筋をはり出すのに手間がかかるという問題と腐食可能深さの数値的評価が難しいという問題がある。

本論文で提案する方法は、コンクリート中に発錆条件を検知する材料をあらかじめ混入し、発錆促進試験あるいは屋外暴露を行うもので、図2に示すように切断することによって発錆可能深さを測定するものである。この方法では比較的容易に時間の経過とともに鉄筋の腐食深さの進行状況をとらえることができる。ここでは、この試験方法を、仮にCorrosion Indicator Methodと名づけることにする。発錆条件を検知する材料としては、コンクリートの品質を変化させないものが望ましいが、本研究では、鉄粒子を用いた試験法を採用した。試験体の条件によっては、鉄粒子の混入によってコンクリートの品質が変化することも考えられるが、外装の鉄筋腐食抑制効果を検討する試験方法としては利用可能であると考えられる。

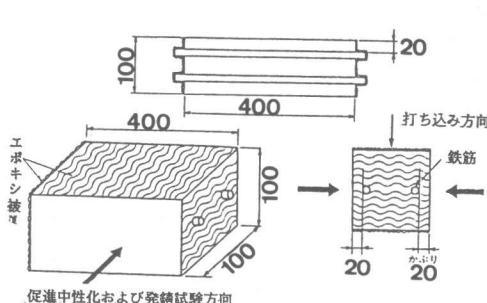


図1. 既往の表面仕上げ材の
鉄筋腐食抑制実験 (1)

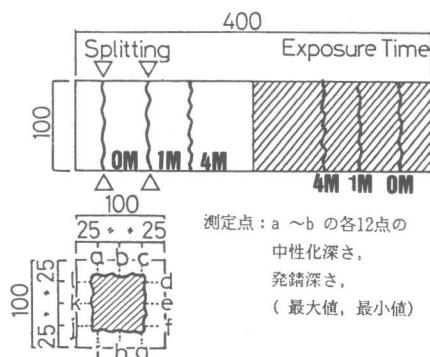


図2. Corrosion Indicator Methodの試験方法

表1. コンクリートの調合・品質

シリ ーズ	名 称	粗骨材 最大寸法 (mm)	W/C (%)	S/A (%)	単位容積重量							スランプ (cm)	Air (%)	圧縮強度* (kg/cm²)
					W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	減水剤 (kg/m³)	鉄筋 (kg/m³)	NaCl (g/m³)			
1	FB450RF	25	45	36.2	160	356	525	1198	—	400	—	9.0	3.9	377
	FB450RFN01	25	45	36.2	160	356	525	1198	—	400	356	9.0	3.7	367
	FB490RF	25	49	37.0	161	329	543	1193	—	416	—	10.0	3.9	343
	FB550RF	25	55	38.2	163	297	566	1185	—	431	—	10.5	5.6	286
	FB550RFN01	25	55	38.2	163	297	566	1185	—	431	297	10.5	5.8	251
2	KS4510F	20	45	43.0	178	396	609	1031	2.376	460	—	15.0	4.0	383
	KS5010F	20	50	44.0	178	356	634	1031	2.136	479	—	11.5	4.7	479
	KS5510F	20	55	45.0	178	324	659	1026	1.944	498	—	12.0	4.3	388
	KS4510FN02	20	45	43.0	178	396	609	1031	2.367	460	792	15.0	4.0	357
	KS4510FN05	20	45	43.0	178	396	609	1030	2.367	460	1980	11.0	5.5	296

注) * 10φ×20cmシリンドー、標準養生

2. 実験の方法

2. 1 使用材料

鉄筋の腐食度の判定に用いた鉄粒子は、鑄、油、よごれ、表面コーティングなどのないもので2.5mm～0.15mmの粒度範囲に入るるものとし、コンクリート中の細骨材の体積の20%を内割で置き換えることとした。

使用したコンクリートの調合・品質とコンクリートの使用材料をそれぞれ表1、表2に示す。ここで、試験体名称は、製造メーカーの記号(英字2文字)、水セメント比、目標スランプ(それぞれ数字2文字)と促進条件の記号であるFからなり、塩分を含む試験体については、このあとにNと塩分のセメントに対する重量パーセント(数字2文字)がつけてある。なお、本実験は川砂、川砂利を用いたシリーズ1と碎砂、碎石を用いたシリーズ2からなり、水セメント比、スランプの影響のほかに、一部で塩分の効果も検討している。また、ここで用いられたコンクリートはP C板用コンクリートと同等のものであり、最高温度約60°Cの蒸気養生を行っている。

鉄筋の腐食抑制効果を検討した含浸系材料とその平均使用量を表3に示す。

2. 2 実験の手順

実験の手順を図3に示す。10×10×40cmの角柱試験体として成型、養生された鉄粒子入り試験体の半数は、2ヶ月間の促進中

表2. 使用材料

	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
シリーズI	普通 ポルトランド セメント	川砂 F.M.=2.65 $\rho=2.56$	川砂利 F.M.=6.94 $\rho=2.65$	—
シリーズII		碎砂 F.M.=2.95 $\rho=2.60$	碎石 F.M.=6.57 $\rho=2.65$	減水剤

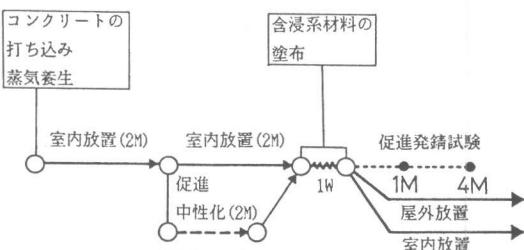


図3. 実験の手順

表3. 含浸系材料

記号	説 明	平均使用量 (g/m³)
A	特殊調合のケイ酸アルカリ水溶液	119.7
B	防錆材(多価アルコール、ニトロエステルカルシウム塩)	153.3
C	アクリル系トップコート	77.3

表4. 実験の水準

含浸系材料	促進中性化 (2M) 後	室内放置後
なし	○	○
A	○	○
A + B	○	○
A + B + C	○	○

性化にさらされた。なお、促進中性化の試験条件は、温度30°C、湿度60%RH、炭酸ガス濃度5%である。促進中性化させた試験体は、中性化させない試験体と同様に表4に示すように、なにも塗らないものと、含浸系材料（3種）を塗り重ねた表面処理を行ったものを用い、促進発鉄試験を行った。なお、今回の実験では測定回数に比べて試験体が長いため、ひとつの試験体を真中からふたつに分け、2種類の表面処理を行っている。促進発鉄試験の試験条件は温度50°C、湿度95%RHであり、試験開始直前と試験開始後1ヶ月、4ヶ月において試験体を端部から切断し、切断面の発鉄深さと中性化深さの測定を行った。

また、促進発鉄試験とは別に、促進発鉄試験に用いたものと同様の試験体を作製し、屋外および屋内に放置しており、促進発鉄試験と発鉄の進行状況を比較する予定である。

2.3 測定方法

試験体は測定時に順に端部から割裂によって切断し、発鉄深さと中性化深さについて、各面につき4等分点の3点、計12点と各面の最大値、最小値、計8点を測定した。また、ここで用いる発鉄深さと中性化深さは各面の4等分点の12点の平均値を用いた。なお、中性化の測定にはフェノールフタレン法を用いた。

3. 結果および考察

3.1 発鉄状況

Corrosion Indicator Methodによる発鉄状況は、試験体の外側から鉄粒子が赤褐色に錆びてくるもので、その境界線は比較的はっきりしている。より明確に発鉄状況をとらえるためには鉄粒子の量、粒度分布あるいは発鉄条件を検討する新しい材料を検討する必要があると考えられる。全体的傾向としては、中性化は各面ともそれほど差がなく、一様に進行していくのに対し、発鉄は面によって深さが大きく異なるもの、あるいは同じ面においても発鉄深さに大きな差のあるものなども認められた。

促進発鉄試験以前に促進中性化試験を行ったものの発鉄状況と中性化の関係を図4に示す。ここで、発鉄深さ（Dr）と中性化深さ（



図4. 発鉄状況と中性化の関係

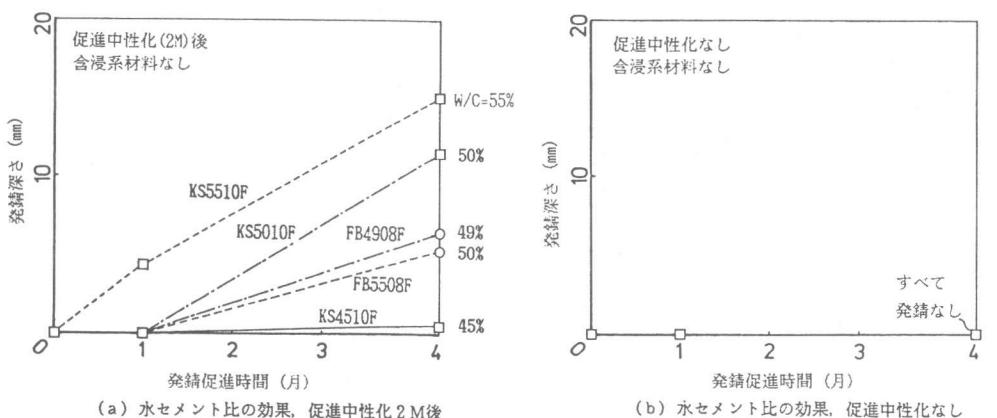


図5. 促進発鉄時間と発鉄深さの関係(水セメント比の影響)

D_n)の関係は図に示すように3つのタイプが認められた。

(i) は、中性化していない部分においても錆が発生しているもので、塩分を含んだ試験体についてのみ認められた。これは、これらの試験体が比較的ポーラスなためであるか、あるいは、蒸気養生の不均一さまたは蒸気の不足によるものと考えられる。鉄粒子が反応してガスを発生したと考え、Corrosion Indicatorとしての鉄粒子を考え直す必要があると考えられる。また、今回用いた鉄粒子の形状が比較的細長かったため、混練時に空気を巻き込んだことも考えられ、鉄粒子の粒形、粒度分布、混入量などについても検討する必要がある。

(ii) は、中性化深さまで錆が発生しているもので、水セメント比の大きな試験体について顕著であり、中性化の境界線と発錆の境界線が全く一致する試験体も認められた。

(iii) は、中性化深さに比べ発錆深さが小さなもので、水セメント比の小さな、密実な試験体あるいは含浸系材料(B)を使用した試験体について認められた。このことはコンクリートの品質が発錆を遅らせるここと、あるいはある種の含浸系材料が発錆抑制効果の大きいことを示すものと考えられる。また、このタイプの試験体においては、より長期間の促進発錆条件にさらされれば、より深い部分まで錆が進行することも考えられる。

3. 2 発錆状況における水セメント比、含浸系材料および塩分の効果

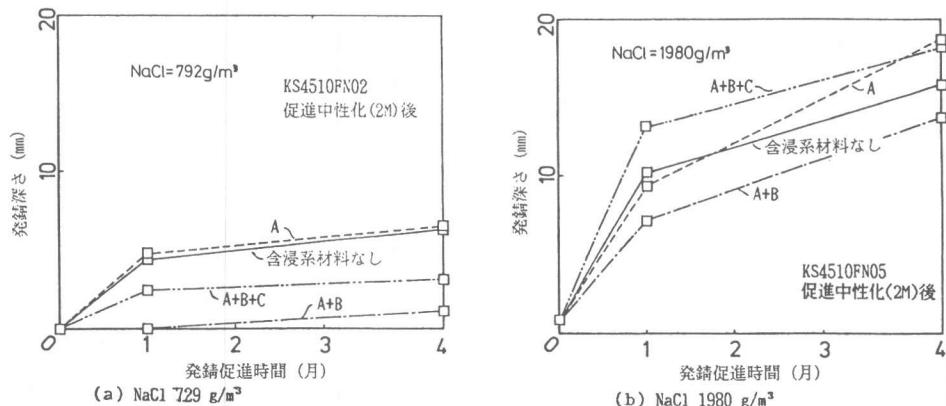


図6. 促進発錆時間と発錆深さの関係(高塩分混入試験体における含浸系材料の影響)

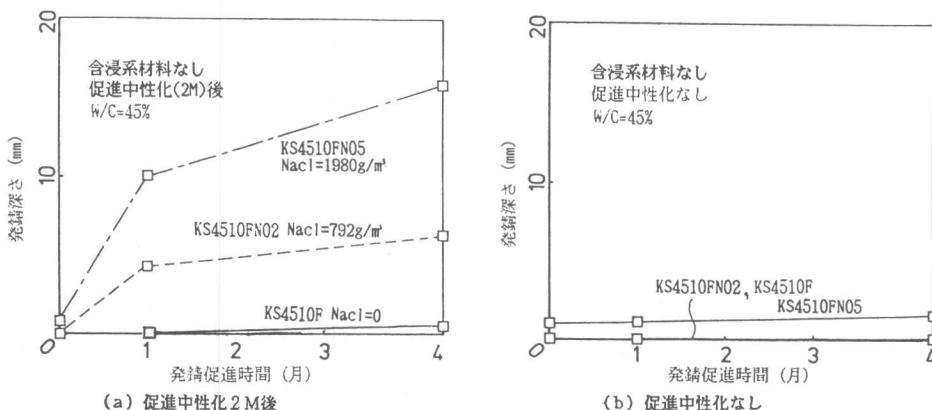


図7. 促進発錆時間と発錆深さの関係(塩分混入量の影響)

促進発鉄時間と発鉄深さの関係の代表的な例を図5～図7に示す。

4ヶ月程度の促進発鉄条件では、鉄の発生した試験体は時間に伴い、鉄の進行が認められる。図5は含浸系材料を使用しない、スランプ8～10cmの試験体について水セメント比の違いで比較したもので、中性化させていない試験体(b)はほとんど鉄を発生していないが、中性化させた試験体(a)については、水セメント比が大きくなるほど、発鉄深さが大きくなる傾向が認められる。

図6は、比較的発鉄深さの大きな、塩分混入試験体について含浸系材料種類別に促進発鉄時間と発鉄深さの関係を示したものである。ここで塩分の混入量が729g/m³の試験体(a)では、A+B、A+B+Cの組み合わせの含浸系材料を用いたものは、発鉄が少なくなっていると考えることができるが、塩分が1980g/m³と多量に含まれている試験体(b)ではどの含浸系材料の効果もほとんど認められない。

図7は、シリーズ2の水セメント比が45%の試験体について塩分の量別に促進発鉄時間と発鉄深さの関係を示したものである。この図によると中性化させてない試験体(b)についてはほとんど鉄を発生していないが、中性化させた試験体については、塩分が多くなるに従って発鉄深さが大きくなっている。また、中性化させてない試験体で鉄を発生している試験体は、促進発鉄試験以前に鉄を発生しており、養生段階で発生したものと考えられる。

3.3 塩分量と発鉄深さの関係

塩分量と促進発鉄試験4ヶ月における発鉄深さの関係を図8に示す。この図によると塩分量が300g/m³程度では、ある種の含浸系材料の鉄筋腐食抑制効果が認められるが、塩分が多くなるに従って、その効果が小さくなると考えられ、塩分量が200g/m³程度になるとほとんどその効

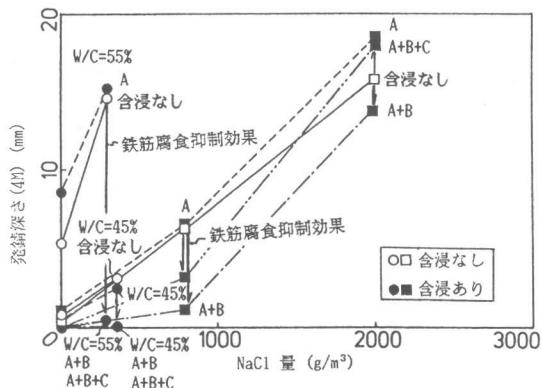


図8. 塩分量と発鉄深さの関係

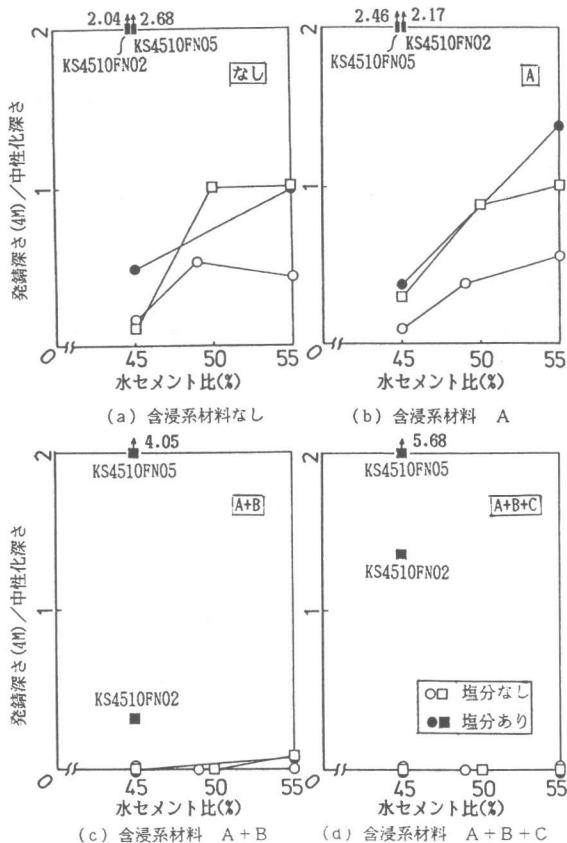


図9. 水セメント比と発鉄深さ/中性化深さの関係

果は認められなくなっている。

3.4 中性化深さ一発錆深さ比と水セメント比の関係

2ヶ月の促進中性化を行った発錆促進試験4ヶ月において発錆深さと中性化深さの比率と水セメント比の関係を図9に示す。この図によると含浸系材料を塗らないもの(a)と含浸系材料(A)のみを塗ったもの(b)については、塩分が含まれないかぎり、中性化深さより深い部分に発錆が進むことはなく、水セメント比が大きくなるほど発錆深さが中性化深さに近づいてくる。これに対し、多量に塩分を含んだ試験体では中性化の進んでいない部分にまで発錆深さが進んでいるものがある。この傾向を示すものは塩分を多量に含むものと、塩分が比較的少量

でも水セメント比の大きなものである。含浸系材料A+B, A+B+Cを用いた試験体では、含浸系材料Bの効果があらわれていると考えられ、塩分を含まない試験体についてはほとんど発錆していない。しかしながら、塩分を多量に含んだものについては、発錆深さが中性化深さを大きく超えている。

3.5 含浸系材料の効果

含浸系材料の効果を促進発錆試験4ヶ月での発錆深さを用いて示したものが図10である。この図は2ヶ月の促進中性化を行った試験体についてのものであるが、Bの含浸系材料を用いたものは、塩分が多く含まれない限り、防錆効果があることが明らかに認められる。

4. 結論

(1) コンクリート中の鉄筋の腐食条件を検討する試験方法として、コンクリート中にあらかじめ発錆条件を検知する材料を混入する "Corrosion Indicator Method" を提案した。

(2) Corrosion Indicator として鉄粒子を用いた促進発錆試験では、以下の項目が観察された。

- ① 塩分を多量に含まない限り、未中性化部分の鉄粒子は腐食しない。
- ② 中性化部分の鉄粒子の腐食の進行は、水セメント比が小さいほど遅い。
- ③ 塩分を多く含むほど、鉄粒子の腐食の進行は早い。

(3) Corrosion Indicator Methodを用いて、含浸系材料の鉄筋腐食抑制効果を評価する試験を行った結果、効果の有無が明確に現れ、この種の材料の鉄筋腐食抑制効果の評価試験方法として Corrosion Indicator Methodは有効である。

謝辞

Corrosion Indicator Method のヒントをいただいた、オーストラリア、メルボルンのCSIRO 研究所、建築研究部の研究者である R.Lewis 氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 福士、福島、仕上塗材によるコンクリートの中性化および鉄筋腐食の抑制、セメント・コンクリート No. 463, Sept. 1985

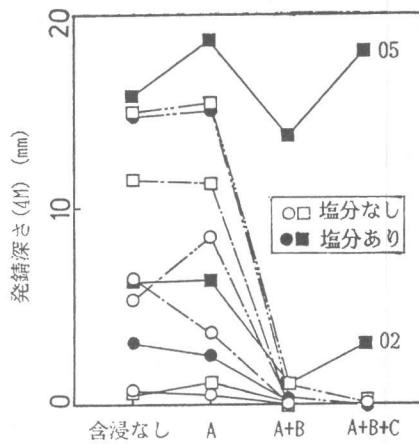


図10. 含浸系材料の効果