

令和 2 年 4 月 24 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06523

研究課題名(和文)改良版・鉄粉散布法による既設コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度測定

研究課題名(英文) Measurement of limit ion concentration for steel corrosion in existing concrete by modified iron powder dispersion method

研究代表者

青木 優介 (AOKI, Yusuke)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号：70360328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：既設のコンクリート中における鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は、構造物の塩害の判定や予測を行うために重要な値である。研究代表者は、その測定方法として鉄粉散布法なる方法を考案し、さらにそれを改良した改良版・鉄粉散布法を考案した。本研究の目的は、同方法の実用性を実証することにあった。

モルタル中に鉄筋を埋め込んだ試験体に塩水を浸透させ、内部の鉄筋が腐食した時点を特定し、直後に試験体を割裂して、同方法を実施した。その結果、割裂面に散布した鉄粉の腐食範囲が鉄筋表面にまで達した時点で鉄筋の腐食が開始されるという理想的な実験結果を得ることができた。今後も検討を継続する所存である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究では実用性を完全に実証するには至らなかったが、本研究で検討してきた「改良版・鉄粉散布法」の実用性が実証され、任意の既設コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を測定できるようになれば、今後のコンクリート構造物の塩害の判定や予測に、大きな進展を生み出せるものと考えている。今後も、研究を継続していきたい。

研究成果の概要(英文)： The limit ion concentration for steel corrosion in existing concrete is an important value for determining and predicting salt damage in concrete structures. The principal investigator devised a method called iron powder dispersion method for measuring the limit chloride ion concentration, and further improved the method. The purpose of this study was to demonstrate the practicality of the method.

Some specimens embedding rebar in mortar was prepared, and salt water was continuously infiltrated into the its specimens. The self-potential of rebar was continuously measured to identify the sorrosion initiation time of rebar. Immediately, the specimen was split, and the above method was performed on the split surface. As a result, the ideal experimental result was obtained that the corrosion of rebar initiated when the corrosion range of the iron powder dispased on the split surface reached the surface of the rebar. We will continue to investigate.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：塩害 鉄粉散布法 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 塩化物イオン

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の塩害劣化が問題視されて久しい（図-1）。塩害環境下にあるコンクリート構造物を効率的に維持管理していくためには、予防保全型管理の実施が望まれるが、そのために必要となるのが構造物における塩害の開始時点の予測である。そして、そのための重要な要素となるのが、コンクリート中において鋼材が腐食し始める際の塩化物イオン濃度、すなわち、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を特定することである。

現在、既設コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度として「全塩化物イオン量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 」が多く用いられているが、実務者からは「実際の値はもっと高い。しかし、その測定方法がない」という意見が寄せられている。実際の値を測定できる方法を確立できれば、既設コンクリート構造物の塩害の開始時点の正確な予測につながり、今後の構造物の効率的な維持管理に貢献できると考えられる。

研究代表者は、上記の限界濃度の測定方法として「鉄粉散布法」という独自の方法を考案し、さらに同方法を、15分程の測定時間で確実な結果が得られる「改良版・鉄粉散布法」へと改良した。同方法は、構造物から採取したコアの切断面に鉄粉を散布し、続いて、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液（以降、ヘキサ水溶液）を噴霧し、さらに、炭酸カルシウムの粉末を散布することで、コンクリート中の塩化物イオン濃度が限界濃度に達している範囲を特定しようとする方法である。ヘキサ水溶液は通常は黄色を呈しているが、鉄粉から溶出した 2 価の鉄イオンと反応すると青色沈殿を生成する。図-2 では、青色沈殿が生成した範囲が鋼まで達しているが、棒鋼周辺に青色沈殿が現われている。これは、鉄粉の腐食範囲が棒鋼に達すると、棒鋼表面の不動態皮膜が破壊されて鉄イオンが溶出し始めることを示している。このことは、構造物から採取したコアの切断面に 15 分ほどで終了する上記の簡単な作業を施すことで、コア内で塩化物イオン濃度が限界濃度に達している位置を特定することができる可能性を示唆している。

以上、深刻な塩害劣化、それを予測するために必要となる鋼材腐食発生限界濃度の特定、そして、既設コンクリートにおいて同値を簡易かつ迅速に測定しうる「改良版・鉄粉散布法」の提案、これらが、研究開始当初の背景である。課題は、同方法の実用性を検証することにある。



図-1 塩害劣化した構造物の例

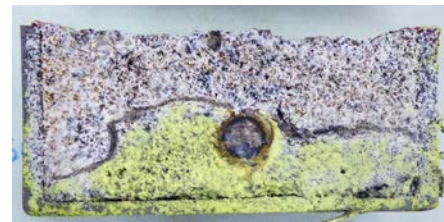


図-2 改良版・鉄粉散布法の実施例

2. 研究の目的

本研究の目的は、塩害環境にさらされてきた実部材や暴露供試体を対象に「改良版・鉄粉散布法」を実施し、その実用性を検証することである。

3. 研究の方法

当初は、既設のコンクリート構造物からコアを採取し、それを用いて検証実験を行おうと考えていた。しかし、実際にコアを採取してみると、施工時の段階で鉄筋が腐食しているなど、検証実験の条件にかなうコアを多数本確保することは難しいとわかった。一方、塩化物イオンの浸透による鉄筋の腐食開始時点特定できる実験方法が、堀口氏（大成建設株式会社技術研究所）らによって提案されていた。そこで、堀口氏らの実験方法をリメイクした実験方法を確立し、検証実験を進めることとした。

図-3 は、今回行った、塩水の浸透による鉄筋の腐食開始特定実験の様子である。個々の供試体の詳細は図-4 に示す。また、供試体に用いたモルタルの配合を表-1 に示す。本実験方法は、側面に一部水平面を持つ円柱のモルタル供試体の内部へと塩水を浸透させ、内部に埋設した鉄筋の自然電位を連続的に測定し、それが急落した時点を鉄筋の腐食開始と判定する。堀口氏らは角柱のコンクリート供試体を用いていたが、本実験では実験の省スペース化をはかること、のちに実施する改良版・鉄粉散布法の結果を確認しやすくすることを考え、図-4 のような円柱のモルタル供試体を作製した。ただし、供試体に用いたモルタルの配合は、堀口氏らと同様に水セメント比を 45, 55, 65% とし、一般的なコンクリート中に含まれるモルタルの配合を意識して設定した。予備実験を行い、実施に支障がないことを確認し、本番の実験に移った。



図-3 鉄筋の腐食開始特定実験

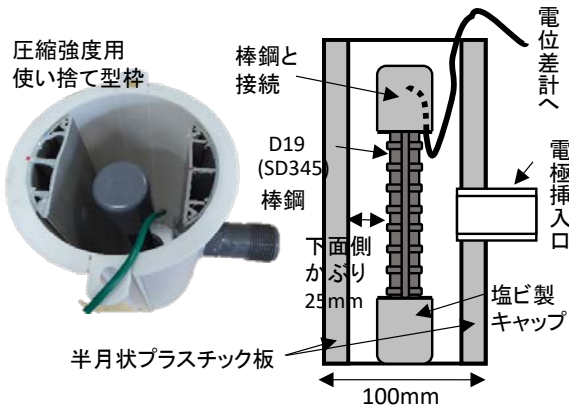


図-4 実験に用いた供試体の詳細

表-1 実験に用いたモルタルの配合

W/C (%)	空気量 (%)	単体量 (kg/m ³)				
		W	C	S	Ad.1	Ad.2
45	7.6	255	567	1277	1.77	0.0284
55	6.5	260	472	1399	1.48	0.0236
65	8.0	263	404	1385	1.26	0.0202
W	上水道水					
C	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)					
S	君津産山砂(表乾密度2.63g/cm ³ , 粗粒率2.31)					
Ad.1	リグニンスルホン酸系AE減水剤					
Ad.2	アルキルエーテル系AE剤					
供試体の呼称 (各3本)	W/C45% ⇒	WC45-A, WC45-B, WC45-C				
	W/C55% ⇒	WC55-A, WC55-B, WC55-C				
	W/C65% ⇒	WC65-A, WC65-B, WC65-C				

4. 研究成果

(1) 鉄筋の自然電位連続計測結果

各供試体で測定された鉄筋の自然電位連続計測結果を図-5に示す。鉄筋の自然電位は、供試体間で日数に差はあるものの、いずれも明確に急落しており、実験が失敗なく行えたものといえる。急落後の自然電位の値も鋼材の腐食開始と判断して相応しいといえる。

(2) 改良版・鉄粉散布法の結果

図-6に、鉄筋の自然電位が急落した後に供試体を割裂し、割裂面で改良版・鉄粉散布法を実施した結果を示す。なお、上の写真から順に、水セメント比45, 55, 65%の供試体における結果である。

図中の赤点線は、埋設されていた鉄筋の表面の位置を表している。いずれの供試体においても、下面側から浸透した塩化物イオンによって、割裂面上に散布した鉄粉が腐食した(青色沈殿が発生している)ことが確認される。そして、青丸で囲んだ付近において、その範囲の限界が鉄筋の表面の位置に達していることが確認される。これらの結果は、割裂面に散布した鉄粉の腐食範囲が鉄筋の表面位置に達した際に鉄筋が腐食し始めることを示唆する結果である。つまり、鉄粉が腐食した範囲の限界(青色沈殿が発生している範囲の限界)のところの塩化物イオン濃度こそが、当該コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度になりうることを示唆している。本研究で得たいとしていた、理想的な結果が得られたと考えられる。

(3) 今後の課題

ただし、図-5のグラフ横軸からもわかるように、本実験では供試体内部への塩化物イオンの浸透を待つ関係上、実験結果が得られるまでに1年以上の長期間を必要とする。今回、図-6のような理想的な結果が得られたものの、実用性を実証するためには、実験結果数が不足していると言わざるを得ない。そのため、本実験の迅速化について検討することとした。具体的には、塩水を真空含浸させること、また、かぶりを小さくすることで、鉄筋への塩化物イオンの到達を早めることを検討した。

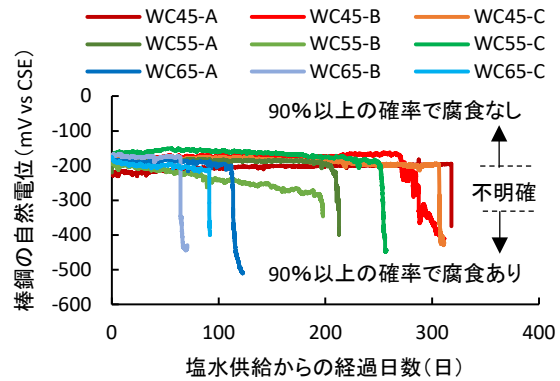


図-5 鉄筋の自然電位連続計測結果

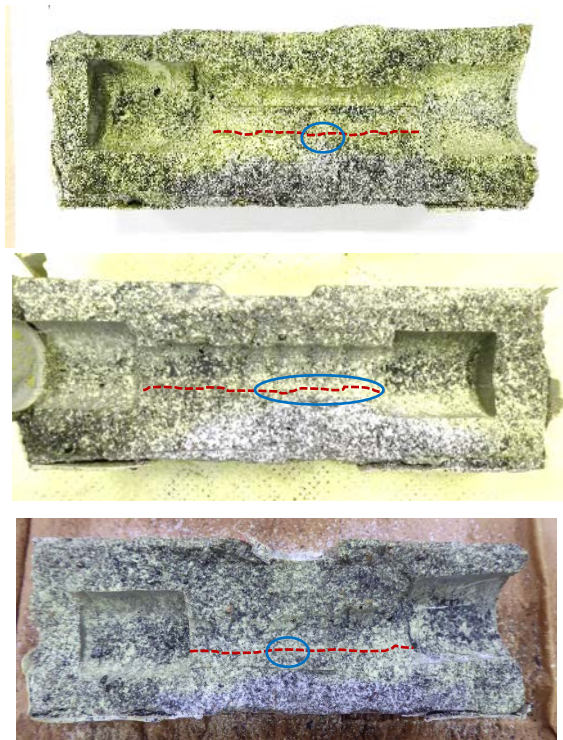


図-6 改良版・鉄粉散布法の結果例

しかし、以上の検討では満足する結果を得ることができなかった。塩水を真空含浸させる場合、塩水の浸透速度を速めることはできるが、その速度を制御することは不可能だと判明した。また、かぶりを小さくした場合、図-7のように、供試体の表面に収縮ひび割れが生じ、そこから塩水が浸透することで、数日もしないうちに鉄筋が腐食してしまうことが判明した。



図-7 収縮ひび割れから塩水が浸透した例

今後は、図-5のように時間を要するとしても、地道に実験結果を蓄積していくことが必要と考えられる。ただし、実験迅速化の検討結果については、コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性の評価や、かぶり不足のコンクリート構造物における耐久性確保の観点からは有用な結果だと考えられる。よって、検討を継続し、本研究助成で得られた成果として今後発表していきたいと考えている。

<引用文献>

- ① Yusuke AOKI, Takashi SUGAWARA, Tomoki YKOO: METHOD FOR MEASURING THE PENETRATION DEPTH OF CHLORIDE IONS INTO HARDENED CONCRETE USING IRON POWDER, 42th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, Proceedings, pp.135-142, August 24-25, 2017, Singapore
- ② 青木優介, 森本健太, 澤本武博: 硝酸銀溶液の噴霧によって現われる変色境界と鋼材の腐食との関係, コンクリート工学年次論文集, 第41巻, pp.731-736, 2019.7
- ③ 佐藤一鉄, 青木優介: 塩化物イオンを含むコンクリート断面上に散布した鉄粉の発錆に及ぼす温度と水分の影響, 第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2019.3
- ④ Takumi ENOMOTO, Yusuke AOKI: RELATIONSHIP BETWEEN CORROSION OF STEEL MATERIALS AND DISCOLORED BOUNDARY APPEARED BY SILVER NITRATE SOLUTION SPRAYING METHOD IN ACTUAL STRUCTURAL CONCRETE, Fifth International Workshop on Effective Engineering Education, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 青木優介, 森本健太, 澤本武博	4. 巻 41
2. 論文標題 硝酸銀溶液の噴霧によって現われる変色境界と鋼材の腐食との関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 登載確定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke AOKI, Takashi SUGAWARA, Tomoki YKOO	4. 巻 1
2. 論文標題 METHOD FOR MEASURING THE PENETRATION DEPTH OF CHLORIDE IONS INTO HARDENED CONCRETE USING IRON POWDER	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 42th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, Proceedings	6. 最初と最後の頁 135-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青木優介, 森本健太, 澤本武博, 森濱和正, 川俣孝治
2. 発表標題 硝酸銀溶液の噴霧による変色境界と鋼材の腐食開始との関係に関する一実験
3. 学会等名 第73回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤一鉄, 青木優介
2. 発表標題 塩化物イオンを含むコンクリート断面上に散布した鉄粉の発錆に及ぼす温度と水分の影響
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本健太, 青木優介, 嶋野慶次, 澤本武博
2. 発表標題 硝酸銀溶液噴霧法の変色境界と鋼材の腐食開始との関係に関する一実験
3. 学会等名 第35回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----