

論文 航路標識構造物外壁の鉄筋腐食に関する実態調査

川瀬 みなみ^{*1}・青木 孝義^{*2}・佐藤 大輔^{*3}

要旨：航路標識構造物の維持管理に重要な鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度を設定するため、20～77 年間供用されている実航路標識構造物の実態調査により鉄筋の腐食要因を検討した。その結果、本調査範囲において、(1)屋内側のモルタル塗り厚さが 20mm 以上確保されていることは中性化に対する耐久性において優位な条件であること、(2)屋外側仕上材を健全に保つことが重要であること、(3)屋外側のかぶり厚さ 80mm 以上かつ鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度 5kg/m³ 以下の条件にある鉄筋は腐食していなかったこと、が明らかとなった。

キーワード：鉄筋腐食、全塩化物イオン濃度、中性化深さ、かぶり厚さ、航路標識構造物、耐久性

1. はじめに

近年、スクラップアンドビルドの風潮からストックアンドフローへの転換が図られ、構造物の長期的な維持管理が課題となっている。国土交通省では、高度成長期以降に整備された道路、トンネル、橋梁、ダム、航路標識などの社会インフラが今後急速に老朽化することが見込まれるなか、社会資本全般に関する本格的なメンテナンス時代に向け、2013 年を「メンテナンス元年」と位置づけ、本格的な対策を始動させた¹⁾。国土交通省が開設した「インフラメンテナンス情報（ポータルサイト）²⁾」において示された 2014 年 3 月時点における航路標識（施設総数：5,380 基）のストックピラミッドによれば、2023 年度に建設後 50 年以上経過する施設は全体の 38%となる。さらに、航路標識（灯台、灯標等）の鉄筋コンクリート造（点検対象総数 2,400 基）のうち、2014 年度までの点検実施率は 9%（218 基）とされており、2023 年度までに点検完了することを目標としている。点検を実施した航路標識の健全性評価の割合は、早急に対策が必要であるもの（重度劣化）が半数を超えている。

鉄筋の腐食が進行すると構造物全体の耐力の低下につながる恐れがあるため、鉄筋コンクリート造構造物の耐久性を評価する上で鉄筋の腐食状況を把握することは重要である。通常、コンクリート中の鉄筋は強アルカリ性環境下にあり、その表面に不動態皮膜を形成しているため、鉄筋は腐食作用から保護されている。しかし、アルカリ成分の溶出や中性化によってコンクリート中の pH が低下、あるいは塩化物イオンにより不動態皮膜が破壊されると、鉄筋は活性状態となり、腐食しやすい状態となる。このため、コンクリート標準示方書【維持管理編】³⁾（以下、示方書）では鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度を水セメント比によって定め、鉄筋近傍におけ

る全塩化物イオン濃度がこの値を上回らないように規定している。

鉄筋の腐食要因を特定することは、構造物の置かれている環境条件、設計条件、コンクリートの品質、経過年数や劣化等が複雑に影響するため難しく、実構造物の実態調査および裏付けとなる実験との比較が必要である。実構造物の実態調査については、建築物⁴⁾や橋梁⁵⁾、土木施設⁶⁾など構造種別毎に実施されているが、航路標識構造物に注目した実態調査は行われていない。示方書では、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、対象構造物における点検に基づき、鉄筋の腐食状況と鉄筋近傍におけるコンクリート中の全塩化物イオン濃度との関係から設定することを原則としている。

そこで、航路標識構造物の維持管理に重要な鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度を設定するため、まずは鉄筋腐食に関する現状を明らかにすることを目的として、20～77 年間供用されている実航路標識構造物の実態調査により鉄筋の腐食要因を検討した。

2. 調査概要

2.1 調査対象

調査対象とした航路標識構造物は、表 1 に示す中国、四国、近畿および東海地方に分布している 40 基である。調査時点における経過年数の範囲は 20～77 年であり、多くは 1950～1980 年代に建設されたものである。

2.2 調査方法

鉄筋の腐食状況を確認するためはつり調査を行い、同時にかぶり厚さを実測した。はつり箇所は、原則外観目視調査によりひび割れが認められた箇所とした。ひび割れから腐食因子（酸素や水分、塩分等）が侵入しやすくなるため、構造物において最も不利な箇所であると考え

*1 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科（正会員）

*2 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 教授 工博（正会員）

*3 株式会社コンステック 研究開発本部 博士（工学）（正会員）

表－1 調査対象構造物の概要

No.	所在地	竣工(改築)年(年)	調査時の経過年数	外装仕上げ材の種類	海からの距離(m)	海面からの高さ(m) ^{※2}
1	愛知県	1929	69 年 8 月	モルタル上吹付けタイル	1	0
2	山口県	1936	77 年 9 月	モルタル上吹付けタイル	2	2
3	岡山県	1938	76 年 11 月	モルタル上吹付けタイル	40	22
4	香川県	1942	72 年 10 月	モルタル上モザイクタイル	10	6.5
5	和歌山県	1951	63 年 7 月	モルタル上モザイクタイル	185	126
6	三重県	1946	63 年 5 月	モルタル上吹付けタイル	33	34.3
7	愛媛県	1955	58 年 7 月	モザイクタイル上アクリル系塗膜	40	23.2
8	広島県	1961	54 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	0	0
9	広島県	1958	56 年 1 月	モルタル上モザイクタイル	69	80.6
10	和歌山県	1960	54 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	31	67.3
11	岡山県	1962	51 年 4 月	モルタル上モザイクタイル	7	1.3
12	三重県	1963	53 年 4 月	モルタル上モザイクタイル	41	44.1
13	香川県	1963	52 年 1 月	モルタル上エマルジョンペイント	49	46
14	和歌山県	1963	51 年 0 月	モルタル上吹付けタイル	62	25
15	愛媛県	1966	47 年 9 月	モルタル上モザイクタイル	12	25.1
16	愛媛県	1969	43 年 10 月	モルタル上モザイクタイル	38	42
17	愛媛県	1970	43 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	113	55
18	愛媛県	1971	42 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	3	8
19	愛媛県	1972	40 年 11 月	モルタル上モザイクタイル	32	20
20	岡山県	1973	41 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	0	0
21	広島県	1973	41 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	0	1.8
22	大阪府	1974	40 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	6	2
23	愛媛県	1975	38 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	101	57
24	愛媛県	1975	38 年 9 月	モルタル上モザイクタイル	0	2
25	愛知県 ^{※1}	1975	41 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	2	2.7
26	山口県	1976	38 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	0	0
27	愛媛県	1976	37 年 9 月	モルタル上モザイクタイル	14	8.9
28	香川県	1978	37 年 5 月	モルタル上モザイクタイル	0	0
29	大阪府	1982	32 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	4	3
30	岡山県	1982	31 年 3 月	モルタル上モザイクタイル	2	3.6
31	大阪府	1983	31 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	3	5
32	愛知県	1962	31 年 8 月	モルタル上モザイクタイル	0	0
33	香川県	1985	29 年 4 月	モルタル上モザイクタイル	0	1.2
34	岡山県	1985	28 年 4 月	モルタル上モザイクタイル	4	2
35	愛媛県	1987	26 年 11 月	モルタル上モザイクタイル	0	0
36	愛知県 ^{※1}	1990	26 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	2	2.7
37	山口県	1988	25 年 9 月	モルタル上モザイクタイル	109	98.4
38	愛媛県	1988	24 年 10 月	モルタル上モザイクタイル	86	65.5
39	愛媛県	1991	22 年 1 月	モルタル上モザイクタイル	11	12.4
40	山口県	1994	20 年 0 月	モルタル上モザイクタイル	31	4

^{※1} No.25 と No.36 は同一構造物であるが、施工年により分けることとした。

^{※2} 海面からの高さは、灯台表⁷⁾中の灯高から高さを差し引いた値とする。

られる。鉄筋の腐食状況については、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説⁸⁾」に基づき表－2 による評価としている。その他、中性化と塩害の複合劣化等について検討するためコンクリートの中性化深さと塩化物イオン濃度を測定している。塩化物イオン濃度は、目視から判別されたひび割れ発生箇所以外の箇所採取したコアを用いて JISA 1154（電位差滴定法）あるいは JCI-SC4（イオンクロマトグラフ法）に準じて行い、全塩化物イオン濃度を測定している。全塩化物イオン濃度は、深さ方向に 20mm 毎に 3 スライスしたもの、5 スライスしたもの、スライスしないものが混在している。中性化深さは、フ

表－2 鉄筋腐食度評価基準⁸⁾

グレード	鉄筋の状態
1	腐食がない状態、または表面にわずかな点さびが生じている状態。
2	表面に点さびが広がって生じている状態。
3	点さびがつながって面さびとなり、部分的に浮きさびが生じている状態。
4	浮きさびが広がって生じ、コンクリートにさびが付着し、断面積で 20%以下の欠損を生じさせている箇所がある状態。
5	厚い層状のさびが広がって生じ、断面積で 20%を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態。

エノールフタレイン 1%溶液を噴霧して測定した。

3. 調査結果

3.1 かぶり厚さとモルタル塗り厚さの傾向

竣工（改築）年毎の屋内外のかぶり厚さとモルタル塗り厚さの分布を図-1、図-2に示す。なお、モルタル塗り厚さは、コア採取およびはつり調査によって複数確認された場合はその平均値を採用した。かぶり厚さには、モルタル塗り厚さは含まない。屋内側かぶり厚さは約 50～200mm、屋外側かぶり厚さは約 30～120mm の範囲でばらつきがみられた。また、屋内側モルタル塗り厚さは約 0～25mm、屋外側モルタル塗り厚さは約 5～40mm の範囲でばらつきがみられた。

3.2 鉄筋の腐食状況

鉄筋の腐食グレードは、表-1 中 No.1 を除いたすべてで評価した。経過年数毎の鉄筋の腐食グレードの分布を外装仕上げ材別に図-3に示す。調査時の経過年数が 50 年未満は全てモザイクタイル仕上げである。経過年数が小さいにもかかわらず鉄筋の腐食グレードの大きい場合があるため、鉄筋腐食に対する建設年代による耐久性の向上は読み取れない。

3.3 腐食グレードと中性化深さの関係

腐食グレードと中性化率の関係を図-4に示す。中性化率は、中性化深さをかぶり厚さで除した値であり、1.0 以上となれば中性化がかぶり厚さまで達していることを示す。中性化深さは、はつり箇所における実測値を優先して採用し、はつり箇所にて実測できていない箇所については、採取したコアの割裂面で実測した中性化深さの平均値を採用した。採用する値は、採取した 3 本のうち最大のものとした。なお、中性化深さにはモルタル塗り厚さは含んでいない。データ数は、屋内側 33 点、屋外側 19 点である。図-4 により、中性化が鉄筋位置まで達している航路標識構造物は、屋内側では No.12 および No.34、屋外側では No.6 であった。括弧内の数値はかぶり厚さで深の中性化深さの距離を示す。一般に、鉄筋が腐食し始める時点の中性化深さは、湿潤あるいは乾湿繰り返し環境における屋外側ではかぶり厚さ、湿度の低い環境における屋内側ではかぶり厚さから 20mm 奥に達した時とされている⁹⁾。

屋内側コンクリートで中性化深さがかぶり厚さで深 20mm 未満である No.12 は腐食グレード 1、中性化深さがかぶり厚さで深 20mm 以上である No.34 は腐食グレード 5 であった。また、それぞれに含まれる平均全塩化物イオン濃度は、No.12 で 0.00kg/m³、No.34 で 6.86kg/m³ であった。No.6 に含まれる平均全塩化物イオン濃度は 0.80kg/m³ であった。No.6 および No.34 は、中性化と塩害の複合劣化作用を受けて鉄筋腐食に至ったと考えられる。

見かけの中性化速度係数として $\sqrt{t}$ 則に従い式(1)⁹⁾により求めた屋内側の見かけの中性化速度係数とモルタル塗り厚さの関係を仕上げ材別に図-5(a)に示す。

$$C = A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、C：中性化深さ(mm)、A：中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)、t：調査時の経過年数(年)である。

モルタル塗り厚さが 20mm 未満の場合は 0～14mm/ $\sqrt{\text{年}}$

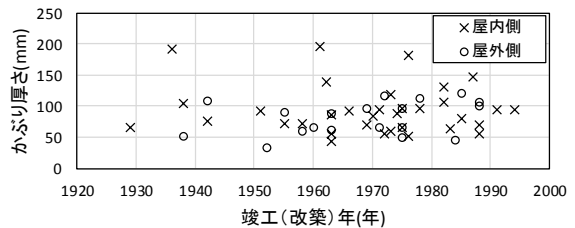


図-1 竣工（改築）年毎のかぶり厚さの分布

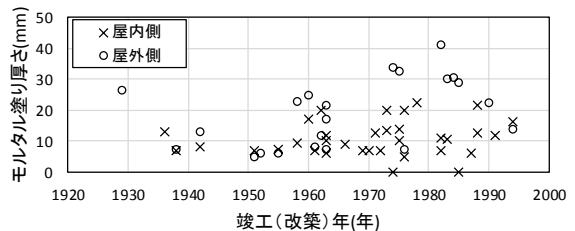


図-2 竣工（改築）年毎のモルタル塗り厚さの分布

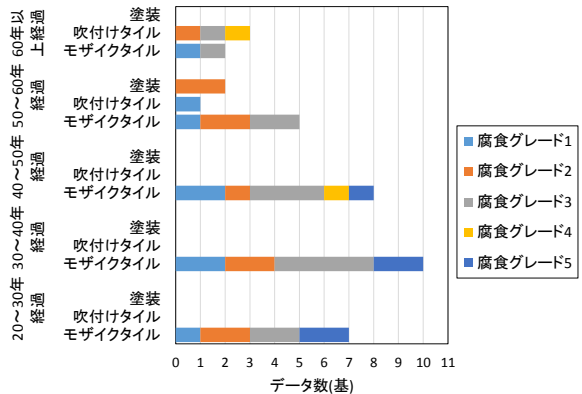
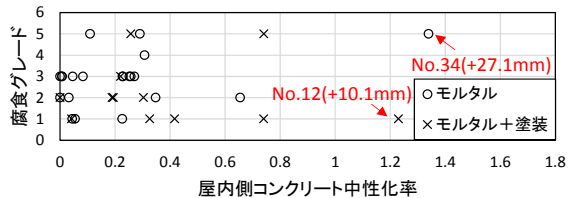
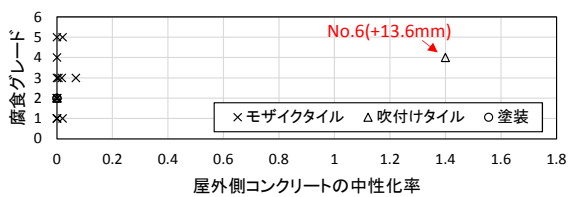


図-3 経過年数毎の鉄筋の腐食グレードの分布



(a) 屋内側



(b) 屋外側

図-4 腐食グレードと中性化率の関係

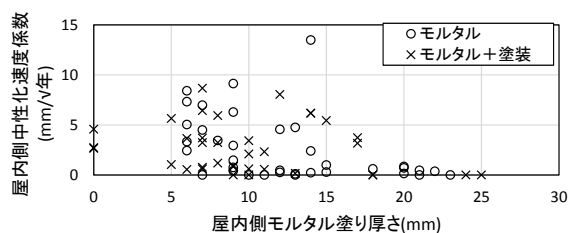
年でばらついているが、20mm 以上では中性化速度係数が $1\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ 以下を示していることから、屋内側コンクリートの中性化抑制のためにモルタル塗り厚さを厚くすることは有効であると考えられる。

屋外側の見かけの中性化速度係数とモルタル塗り厚さの関係を仕上げ材の劣化状況別に図-5(b)に示す。外壁仕上げ材にひび割れ、浮きや剥離等の劣化のある場合の中性化速度係数が劣化のない場合よりも大きいことが分かる。屋外側コンクリートで特に中性化の著しかった No.6 は、モルタルの塗り厚さが 10mm 以下と薄く、吹付けタイル仕上げである。外観目視調査において塗膜のひび割れや摩耗、剥離などが確認されており、仕上げ材の劣化によりモルタルおよびコンクリートへの二酸化炭素の侵入が起こりやすい状態となるため、中性化速度係数が大きくなったと考えられる。

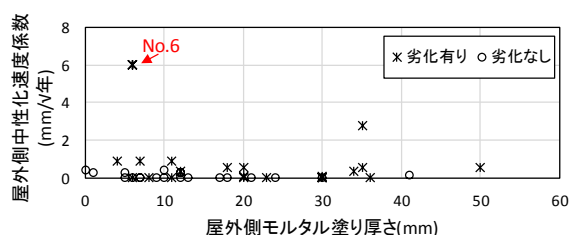
3.4 腐食グレードとひび割れの関係

全塩化物イオン濃度の測定は、深さ方向 20mm 毎に 3 スライスした試料が 23 本、5 スライスした試料が 16 本である。ここで、腐食グレード別の全塩化物イオン濃度の分布を図-6に示す。なお、図-6には、普通ポルトランドセメント使用と仮定して示方書に従って算出した腐食発生限界塩化物イオン濃度の最低値 $1.75\text{kg}/\text{m}^3$ と最高値 $2.50\text{kg}/\text{m}^3$ および日本建築学会⁹⁾で劣化要因の強さが大とされる $1.20\text{kg}/\text{m}^3$ 、日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示される $2.00\text{kg}/\text{m}^3$ を参考に示す。

腐食グレード 1～3 において、全塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を下回る航路標識構造物の外壁には No.11, 25 以外でひび割れは確認されていない。No.11, 25 では、 $0.15\sim 0.5\text{mm}$ 幅程度の乾燥収縮によると考えられるひび割れが散見された。全塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上である航路標識構造物の外壁には、ほとんどで $0.1\sim 1.0\text{mm}$ 幅の乾燥収縮によると考えられるひび割れが確認



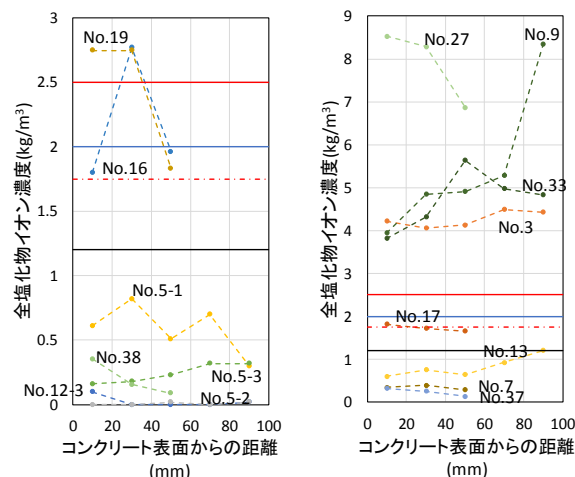
(a) 屋内側 (仕上げ材別)



(b) 屋外側 (劣化状況別)

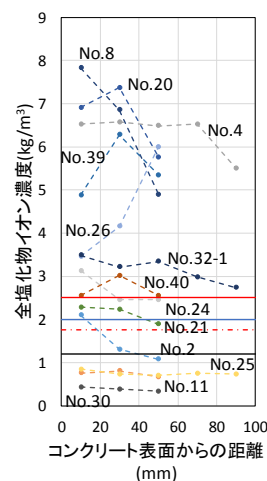
図-5 中性化速度係数とモルタル塗り厚さの関係

され、No.20, 26 では $0.5\sim 2.0\text{mm}$ 以上の鉄筋腐食に起因すると考えられるひび割れが確認されている。腐食グレード 4 の No.6 の外壁には 0.2mm 未満の乾燥収縮によると考えられるひび割れが、No.18 の外壁には 2.0mm の鉄筋腐食に起因すると考えられるひび割れが確認されている。腐食グレード 5 では、全てにおいて幅 $0.9\sim 2.0\text{mm}$ の主筋に沿ったひび割れが確認されており、鉄筋腐食に起

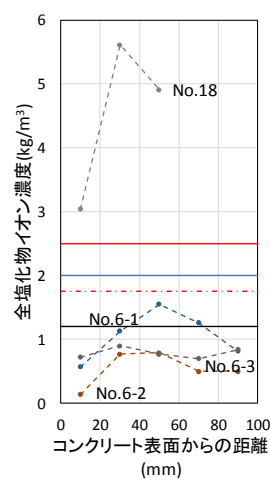


(a) 腐食グレード 1

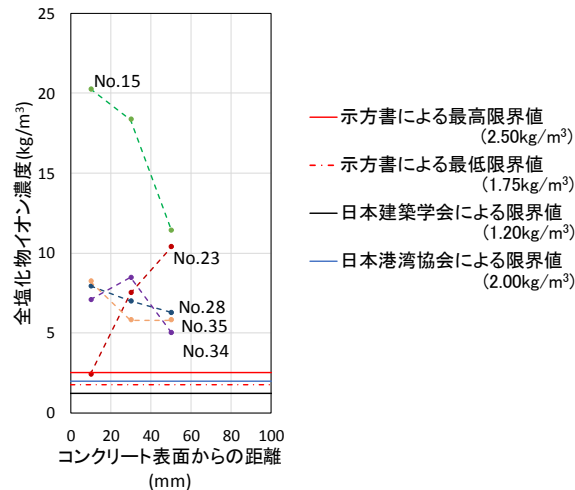
(b) 腐食グレード 2



(c) 腐食グレード 3



(d) 腐食グレード 4



(e) 腐食グレード 5

図-6 腐食グレード別全塩化物イオン濃度の分布

因するひび割れであると考えられるが、これらのひび割れが鉄筋位置まで達しているか否かについては確認できていない。ひび割れが発生している航路標識構造物は共通して全塩化物イオン濃度が高く、ひび割れにより外部からの塩化物イオンの浸透が促進されている可能性が高い。したがって、塩害に対しては仕上げ材を健全に保つことが重要であり、ひび割れが認められた際には早急に補修することが望ましい。

3.5 塩化物イオン濃度の分布

一般に、構造物の外部からもたらされる塩分が構造物の内部に侵入する場合の全塩化物イオン濃度分布では、コンクリートの表層で最大値を示す。前項で外部からの塩化物イオンの浸透の可能性について述べたが、図-6に示す全塩化物イオン濃度分布は、コンクリートの表層よりも内部で全塩化物イオン濃度の最大測定値を示すものがほとんどである。コンクリート内部の全塩化物イオン濃度が著しく大きいものもあり、海砂使用など内在塩分の影響もあると考えられるため、本調査範囲においては、Fickの拡散方程式の適用による全塩化物イオン濃度分布の将来予測は難しいと判断した。

コンクリートの表層よりもコンクリート内部で全塩化物イオン濃度が最大値を示す要因としては、まず、コンクリートの炭酸化による濃縮現象³⁾が挙げられる。ここで、全塩化物イオン濃度の測定位置を躯体厚さあるいはかぶり厚さを1.0とした場合の倍率で表した全塩化物イオン濃度の分布をそれぞれ図-7、図-8に示す。例えば図-7中No.9では、全塩化物イオン濃度が最大値を示す位置と中性化深さが同じ位置にあるため、コンクリートの炭酸化による濃縮現象によりコンクリート内部で全塩化物イオン濃度が最大値を示したのと考えられる。

全塩化物イオン濃度の最大値を示す位置と中性化深さが異なる場合の要因としては、コンクリートの乾湿繰り返しによる塩化物イオンの移動^{10), 11)}、ひび割れ部やタイル目地等における雨水による塩化物イオンの洗い出し作用が考えられるほか、セメント硬化体への固定化現象^{12), 13)}、あるいは内在塩分の移動^{14), 15)}などが考えられる。本調査で確認された全塩化物イオン濃度分布がどのように形成されたかについては、水セメント比、含水率を指標としたコンクリート表層部の乾湿状態や透水・透気性能との関係を明らかにする必要がある。

また、これまで全塩化物イオン濃度の分布を把握する際に、表面から20mm毎に試料を採取していたが、図-8に示すように鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度を実測できていなかった。図-1に示すように航路標識構造物のかぶり厚さは50～100mm、あるいは100mm以上と厚いため、100mm以深まで20mm毎に分割する場合は試料が5以上となる。圧縮強度や中性化深さ試験に比べて塩化

物イオン濃度の測定にかかる試験費用は大きいと、限られた予算の中で多数の構造物に対して実施することは経済的とは言えないと考えられる。Fickの拡散方程式を用いた将来予測が難しいことから、鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度を優先的に把握することが望ましい。

3.6 腐食グレードとかぶり厚さの関係

かぶり厚さと鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度の関係を図-9に示す。かぶり厚さは、屋外側からはつり調査を行った場合は実測値を、屋内側からはつり調査を行った場合はコアを貫通させて採取できた場合のみ躯体厚さから屋内側かぶり厚さと鉄筋径を差し引いた値を屋外側かぶり厚さの推定値として採用した。実測および推定できたデータは19基である。鉄筋近傍の全塩化物イオン

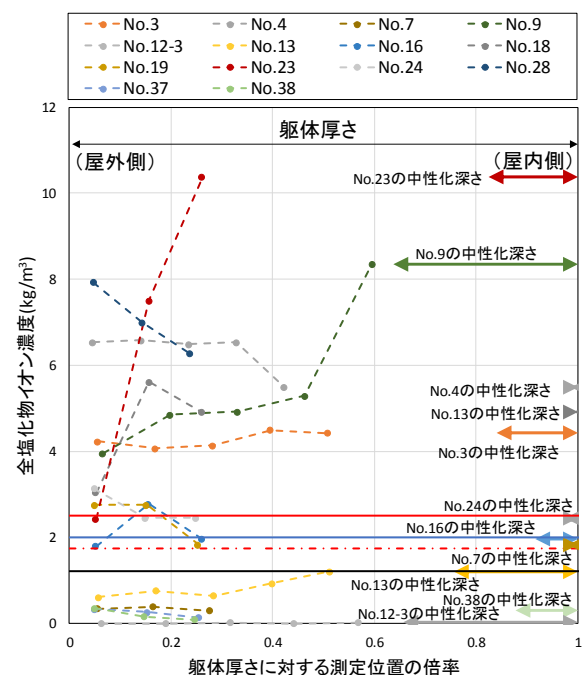


図-7 躯体厚さに対する全塩化物イオン濃度の分布と屋内側中性化深さの関係

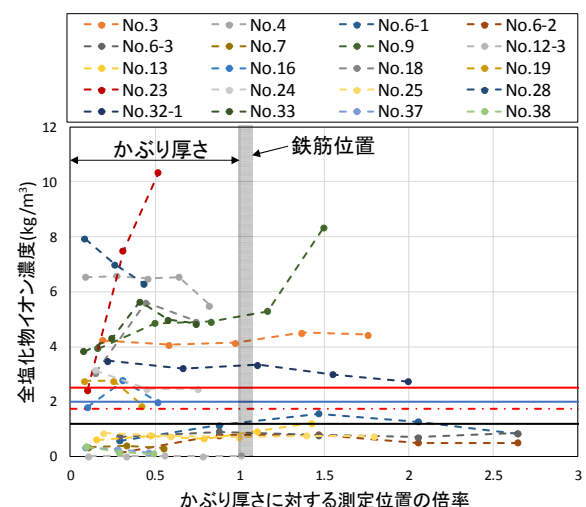


図-8 鉄筋位置に対する全塩化物イオン濃度の分布

濃度を測定できていない場合は、最深位置の濃度が鉄筋近傍まで一定であると仮定して推定値として採用した。

図-9 より、かぶり厚さが大きく、鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度が小さい場合には、鉄筋腐食が起きにくいことが分かる。かぶり厚さが大きい場合には鉄筋近傍までのコンクリートに水や酸素が供給されにくいいため、腐食発生限界塩化物イオン濃度は高くなる。本調査範囲において、かぶり厚さ 80mm 以上、かつ、鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度 5kg/m^3 以下の条件にある鉄筋は、全塩化物イオン濃度が既往の規準類に示される腐食発生限界値以上であっても腐食していなかった。

4. まとめ

20～77 年間供用されている実航路標識構造物の実態調査により鉄筋の腐食要因を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 屋内側のモルタル塗り厚さが 20mm 以上確保されていることは、中性化に対する耐久性において優位な条件である。
- (2) 塩害および中性化に対しては、屋外側仕上材を健全に保つことが重要である。
- (3) 屋外側のかぶり厚さ 80mm 以上、かつ、鉄筋近傍の全塩化物イオン濃度 5kg/m^3 以下の条件にある鉄筋は、全塩化物イオン濃度が既往の規準類に示される腐食発生限界値以上であっても腐食していなかった。

今回得られた知見は、環境条件、施工方法、コンクリートの材料や品質など条件が限定されたものであるため、本調査により得られた知見に汎用性があるかについては継続的な検証が必要である。

謝辞

本調査の実施にあたって、海上保安庁、第四管区海上保安本部、第五管区海上保安本部、第六管区海上保安本部の協力を得ました。なお、本研究は、平成 26 年度大幸財団自然科学系学術研究助成、平成 27 年度・28 年度笹川科学研究助成および JSPS 科研費 16H06363 の助成により進められた研究成果の一部です。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 25 年度国土交通白書，p.120，2014
- 2) 国土交通省：社会資本の老朽化対策情報ポータルサイトインフラメンテナンス情報
(<http://www.ml.it.go.jp/sogoseisaku/maintenance/index.html>：最終アクセス 2016.7.11)
- 3) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp.161-183，2013.10

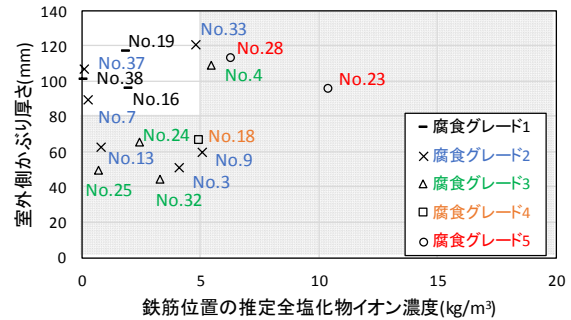


図-9 かぶり厚さと鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係（腐食グレード別）

- 4) 榊田佳寛，安田正雪，友沢史紀，阿部道彦，田中斉，原謙治：RC 造建築物における鉄筋腐食速度に及ぼすコンクリート中の塩化物量の影響，日本建築学会構造系論文報告集，第 383 号，pp.8-16，1988.1
- 5) 親泊宏，伊良波繁雄，古川裕市，比嘉敦：沖縄県石垣島におけるコンクリート構造物の実態調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1933-1938，2003.7
- 6) 長内進，宮本幸始：塩分浸透を受けたコンクリート構造物の実態調査，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.145-148，1986.6
- 7) 海上保安庁：灯台表第 1 巻，一般財団法人日本水路協会，2014.2
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，pp.6-7，1997.1
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説[第 2 版]，2016.7
- 10) 榊田佳寛，天沼邦一，吉崎芳郎，御所窪邦男：コンクリートの乾湿にともなう塩化物の移動について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.787-792，1992.5
- 11) 丸屋剛，SOMNUK. T，松岡康訓：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究，土木学会論文集，No.422/V-16，pp.81-90，1992.2
- 12) 川上英男，脇敬一：コンクリートへの塩分浸透と塩害環境の評価，日本建築学会構造系論文報告集，第 452 号，pp.9-14，1993.11
- 13) 掛川勝，榊田佳寛，松林裕二：セメントモルタル硬化体中の塩化物イオンの移動に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，1994.6
- 14) 岸谷孝一，榎野紀元：海砂を用いたコンクリート中の塩分の移動，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.2，pp.1-4，1980.5
- 15) 福士勲：内部塩化物，コンクリート工学，Vol.25，No.11，pp.40-43，1987