

論文 水利コンクリート構造物の中性化の評価方法に関する一考察

長谷川 雄基*1・崔 萬權*2・佐藤 周之*3・野中資博*4

要旨：本研究では、コンクリート製開水路の側壁 1 スパンを対象として、同一部材における供用条件の違いが中性化に及ぼす影響を評価した。結果として、本対象水路の中性化深さは水中部において最大となり、測定値の変動は気中部で最大となった。また、変色深さの測定にフェノールフタレイン溶液とトロペオリン溶液という二種類の指示薬を使用することで、コンクリートの内部 pH を詳細に評価できる可能性を示した。さらに、変色深さの変動特性を考慮し、供用条件ごとの適切な測定点数を明らかにするとともに、変色深さの測定値のばらつきを小さくするためのデータの処理方法を提案した。

キーワード：水利コンクリート構造物, 中性化特性, 中性化深さ, 変動係数, 溶脱

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC とする）の中性化は、内部鋼材の腐食を生じさせ、ひび割れ、かぶりの剥離・剥落を引き起こし、構造耐力を低下させる原因となる。よって、中性化は RC 構造物の維持管理を行う上で極めて重要な評価項目の一つである。一方、供用中の RC 構造物が曝される環境条件は、中性化の進行に大きな影響を及ぼすことが知られている¹⁾。本研究で対象とする水利コンクリート構造物の一種である RC 開水路は、常時水中に位置する部分と常時大気中に位置する部分、さらにその境界領域となる部分（各々以下、水中部、気中部、喫水部とする）と、同一部材で三種類の異なった供用条件を有する、という特徴を持つ。つまり、RC 開水路の中性化を評価する際には、上記の供用条件の違いが中性化へ及ぼす影響を明確化する必要がある。

中性化の評価ならびに進行予測を行う際には、一般に中性化深さおよび中性化速度係数を用いる。中性化深さの測定方法としては、主としてフェノールフタレイン（以下、PP とする）溶液を指示薬とした PP 法が適用される。PP 法では、採取コアあるいははつり面に PP 溶液を噴霧し、赤色の発色領域と未発色領域との境界を視認し、表面からその境界までの距離を測定する。測定点数に関する規定はないが、概ね数箇所を測定し、その平均値を中性化深さとする。ここで注意を要する点は、中性化深さのばらつきである。和泉らは、95 件の既存建築コンクリート構造物の中性化を調査した結果、中性化深さのばらつきの分布型はほぼ正規分布となり、その変動係数は 40%前後となることを報告している²⁾。平松は、中性化深さの変動係数は平均中性化深さが大きくなるほど小さくなる傾向があることを示している³⁾。しかしながら、上記のような中性化深さの変動特性を反映した測定点数

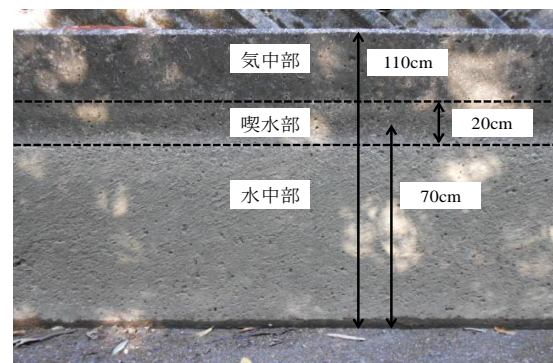


写真-1 対象とした水路の外観

の規定化ならびに測定データの処理方法は確立されているとは言い難いのが現状である。

一方、評価方法としての PP 法に対する課題がある。PP 溶液を使用した中性化深さの測定において、PP 溶液の発色域は pH10.0 以上⁴⁾であるが、内部鋼材は pH11.0 が腐食限界の上限となるため⁵⁾、PP 溶液が発色したとしても、完全に RC 構造物の健全性が確保できたとはいえない。著者らはこれまでに、複数の酸塩基指示薬を複合利用し、鉄筋の腐食域を含む中性化の詳細な評価を進めている。現在までに、室内実験において PP 溶液とトロペオリン O（以下、Tr とする）溶液の二種類の指示薬を用いてコンクリート内部の pH 分布を詳細に推定する方法を示した⁴⁾が、実構造物への適用には至っていない。

本研究では、水利コンクリート構造物の中性化特性を明確にし、その特性に応じた劣化度診断を行うための基礎的研究を行った。コンクリートの品質が同一と考えられる RC 開水路の側壁 1 スパンを対象として、詳細な中性化深さの測定を行った。気中部、水中部、喫水部という供用条件ごとに中性化特性の詳細評価を行うとともに、中性化深さの変動特性を考慮した測定点数の設定方法、

*1 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科 農学専攻 (学生会員)

*2 愛媛大学大学院 連合農学研究科 修士 (非会員)

*3 高知大学 農学部農学科 准教授 博士 (農学) (正会員)

*4 島根大学 生物資源科学部 教授 農学博士 (正会員)

測定データの処理方法について検討した。指示薬には、PP 溶液と Tr 溶液を併用し、実供用中のコンクリートに対する二種類の指示薬の適用性を検証した。

2. 調査の概要

2.1 調査対象水路の概要

本研究では、供用後 39 年が経過した RC 開水路（建造年次 1973 年）の側壁 1 スパンを対象として詳細な中性化試験を行った。対象とした水路の外観を写真-1 に示す。水路壁の高さは 110cm であり、喫水位（最多頻度流量時の水位）は底版から約 70cm である。変状を目視で確認した結果、喫水部および水中部の表面にわずかながら表面粗さの増加と部分的な粗骨材の露出が存在した。気中部に顕著な表面粗さの増加や粗骨材の露出は確認できなかった。中性化深さの測定は、気中部、水中部および喫水部の供用条件ごとに行った。なお、本研究では、最多頻度流量時の水位から±10cm を喫水部と定義した。

2.2 指示薬の概要および変色深さの測定方法

本研究では、コンクリートに噴霧する指示薬として、既往の研究を踏まえ、一般的に PP 法で用いられる 1.0% 濃度の PP 溶液と、0.4% 濃度の Tr 溶液を使用した。両指示薬の概要を表-1 に示す。本研究では、PP 溶液と pH の発色領域が異なる 0.4% 濃度の Tr 溶液を併用し、長期供用された RC 開水路に対する二種類の指示薬の適用性を検討した。Tr 溶液の発色領域となる pH は、PP 溶液のものと比較して高くなるため、Tr 溶液は躯体内部の高アルカリ領域の評価に対して有効と考えられている⁴⁾。

変色深さは、躯体表面のはつり面に指示薬を噴霧し、最小読み取り値 0.02mm のノギスを使用して測定した。測定断面は、コンクリートチッパーを用いて水路側壁の長手方向に 1m 程度の長さを幅約 50mm、深さ約 50mm はつり取り、断面の両端を測定対象とした。はつり面には、同一供用条件でのデータ数を確保するため、1~2 断面を設定した。変色深さの測定の際には、上記のはつり面に対して PP 溶液を噴霧し、発色が最も大きい 1 分⁶⁾を目安に中性化深さを測定した。続いて、PP 溶液で発色した部位を完全に除去できるよう、同じ方法で幅を広げる方向へと約 50mm 程度はつり、Tr 溶液を噴霧してその変色深さの測定を行った。

3. 二種類の指示薬を併用した中性化の詳細評価

3.1 PP 溶液を噴霧した場合の中性化深さの評価

PP 溶液を噴霧した場合の中性化深さの評価結果を表-2 に示す。同表中の中性化深さの平均値は、供用条件ごとの全測定点における算術平均値である。すべての供用条件において、中性化深さの平均値は 6mm 以下である。よって、調査対象とした水路は供用後 39 年が経過し

表-1 指示薬の概要

略称	変色域 (pH)	色	濃度 (W/V%)
PP	10.0	無色→赤紫	1.0
Tr	12.6	黄色→茶色	0.4

表-2 PP 溶液を噴霧した場合の
中性化深さの評価結果

供用条件	測定点数	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	最大値 (mm)	最小値 (mm)
気中部	87	2.12	1.05	7.10	0.10
水中部	122	5.91	1.80	9.96	1.80
喫水部	128	4.37	2.27	10.00	0.42

ているにもかかわらず、中性化深さは全体的に小さいことが確認できた。

供用条件ごとに比較すると、中性化深さの平均値は、気中部で最小となり、水中部で最大となることが確認できる。一般に、常時大気に曝される気中部では炭酸ガスの侵入が容易であるため、中性化の進行は水中部より気中部の方が早いと考えられている¹⁾。一方、長期供用されたコンクリート製開水路の水中部は、常時コンクリートと水が接していることから、溶脱に起因する劣化が生じることが知られている⁷⁾。つまり、Ca(OH)₂ が溶脱したコンクリート内部の pH は低下するため、溶脱と二酸化炭素の侵入が複合的に作用する水中部の中性化深さが大きくなった可能性が考えられた。

コンクリートの中性化に影響を与える環境条件としては、二酸化炭素濃度、温度、湿度および降雨が挙げられている⁸⁾。一方、本結果をみると、水利コンクリート構造物の水中部における中性化は、二酸化炭素の侵入に加え、溶脱に起因するコンクリート内部 pH の低下も作用して、複雑に進行する可能性がある。さらに、摩耗による表面の消失および粗骨材露出が著しく確認できる水路を対象とする場合には、モルタルの消失分を加味した中性化の評価を行う必要があることが示されている⁹⁾。

以上のことから、RC 開水路のような水利コンクリート構造物における中性化の劣化度診断を行う際には、当該構造物が曝されている環境条件のみならず、摩耗や溶脱に起因するコンクリートの表面状態を含めた多角的な分析が必要となる。その上で、同一部材内で最も中性化の進行が早い部材位置を特定し、安全側での評価に基づいた劣化度の判定をすることが必要と考えられた。

3.2 Tr 溶液を噴霧した場合の変色深さの評価

PP 溶液および Tr 溶液をそれぞれ噴霧した場合の変色深さを図-1 に示す。PP 溶液を噴霧した場合と同様に、変色深さの大きさは気中部で最小、水中部で最大となった。また、すべての供用条件において、Tr 溶液の変色深さが PP 溶液の変色深さを上回る結果となった。

著者らは既往の研究において、コンクリートおよびモルタル供試体を対象とした実験結果から、PP 溶液と Tr 溶液の変色深さおよび発色 pH の違いに着目した中性化の予測手法を提案している⁴⁾。同手法は、PP 溶液と Tr 溶液の発色を視認することが可能な pH をそれぞれ pH10.0, pH12.6 と定義し、各指示薬を噴霧した際の変色深さとの関係を利用して近似式を算出するというものである。同実験において、促進試験で 20~30mm 程度中性化させたコンクリート供試体における PP 溶液と Tr 溶液の変色深さの差が約 1mm 程度であった。一方、本調査では、すべての変色深さが 10mm 以下であるものの、各供用条件における PP 溶液の変色深さと Tr 溶液の変色深さの差は、気中部で 2mm 程度、水中部および喫水部で 4mm 程度であった。つまり、促進試験における中性化と実供用下にある構造物の中性化では、コンクリート内部の pH の勾配に大きな違いがあると考えられた。今後の課題の一つとして、原位置における中性化深さのデータ蓄積および蓄積したデータに基づいた劣化予測に関する知見の集積が必要と考えられた。

3.3 変色深さの測定値における変動特性の評価

変色深さの測定値における変動特性を評価するために、変色深さの平均値と変動係数との関係を図-2に示す。変動係数は、表-2、3中の各変色深さの標準偏差を、対応する平均値で除すことにより算出した。

全体的な傾向として、気中部の変動係数は水中部のものよりも明らかに大きくなり、既往の調査結果で示されている変動係数²⁾と比較しても大きくなること、変色深さの平均値が大きくなるにつれて変動係数は小さくなること、という二点が確認できる。前者の傾向の理由については、コンクリート表面が曝されている状態の違いが変色深さの変動に影響を及ぼした可能性が考えられた。具体的には、水中部はほぼ年間を通じて水と接触している環境下にあるため、温度や湿度などといったコンクリート表面の環境条件が安定している。一方、気中部は年間を通して降雨や日射、あるいは乾湿の繰り返しや躯体表面温度の変動などの多様な状況に曝される、という違いである。後者の理由については、既往の研究³⁾において、同一の既存建築物における中性化深さの平均値と変動係数との関係性を評価した結果と同様の傾向を示していることに注目すべきと考える。中性化は表面から内部へと進行する劣化であるが、その際に深さ方向に対して不均一に進行していく。つまり、中性化の進行メカニズムとして、コンクリートの表面近くでは内部と比較して、より pH の不均一性が高まるという可能性が考えられた。

本研究結果のみからでは、上記二点の理由のどちらの影響がより卓越したのかを判断することは難しい。今後、RC 開水路における中性化のデータを蓄積・分析するこ

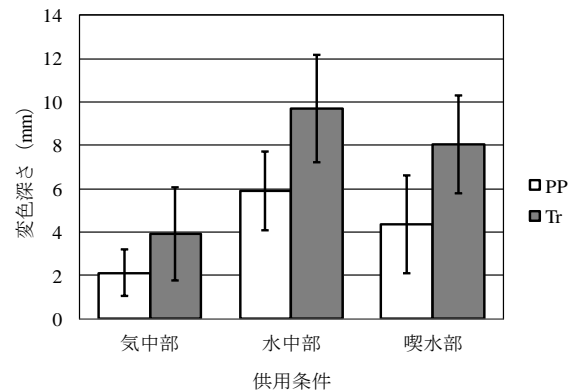


図-1 供用条件ごとの各指示薬の変色深さ

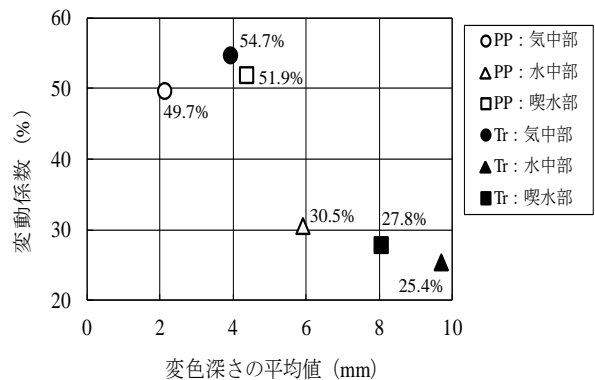


図-2 変色深さの平均値と変動係数の関係

とで、詳細を解明していく必要がある。

3.1 節で述べたように、本調査で対象とした水路は供用後 39 年が経過しているにもかかわらず、既往の研究データ⁹⁾と比較して、中性化深さは比較的小さい。そのため、全体的に標準偏差の数値自体が小さく、一見すると測定値の変動を考慮する必要性はないと考えられる。しかしながら、より中性化深さの測定値が大きい水路を対象とする場合には、測定値の変動は評価結果に大きく影響を及ぼす可能性がある。そこで、次章では変色深さの測定値が有する変動特性を加味した測定点数の設定方法ならびに測定データの処理方法について検討した。

4. 変色深さの変動特性を考慮した測定手法の検討

4.1 変色深さの測定点数の設定方法

前章で述べたように、中性化に対する劣化度診断を正確に行うためには、変色深さの変動特性を考慮した適切な評価が必要となる。そこで、正確な変色深さを評価するための測定点数について検討した。統計処理における標本数の決定方法は、母分散や変動係数が既知の場合、許容誤差率や信頼区間を加味した算出方法が存在する¹⁰⁾。しかし、本研究で取り上げる水利コンクリート構造物の中性化に関するデータでは、母分散も変動係数も明確でない。また、RC 建築物における中性化深さの測定データは正規分布に従うことが示されている²⁾ものの、

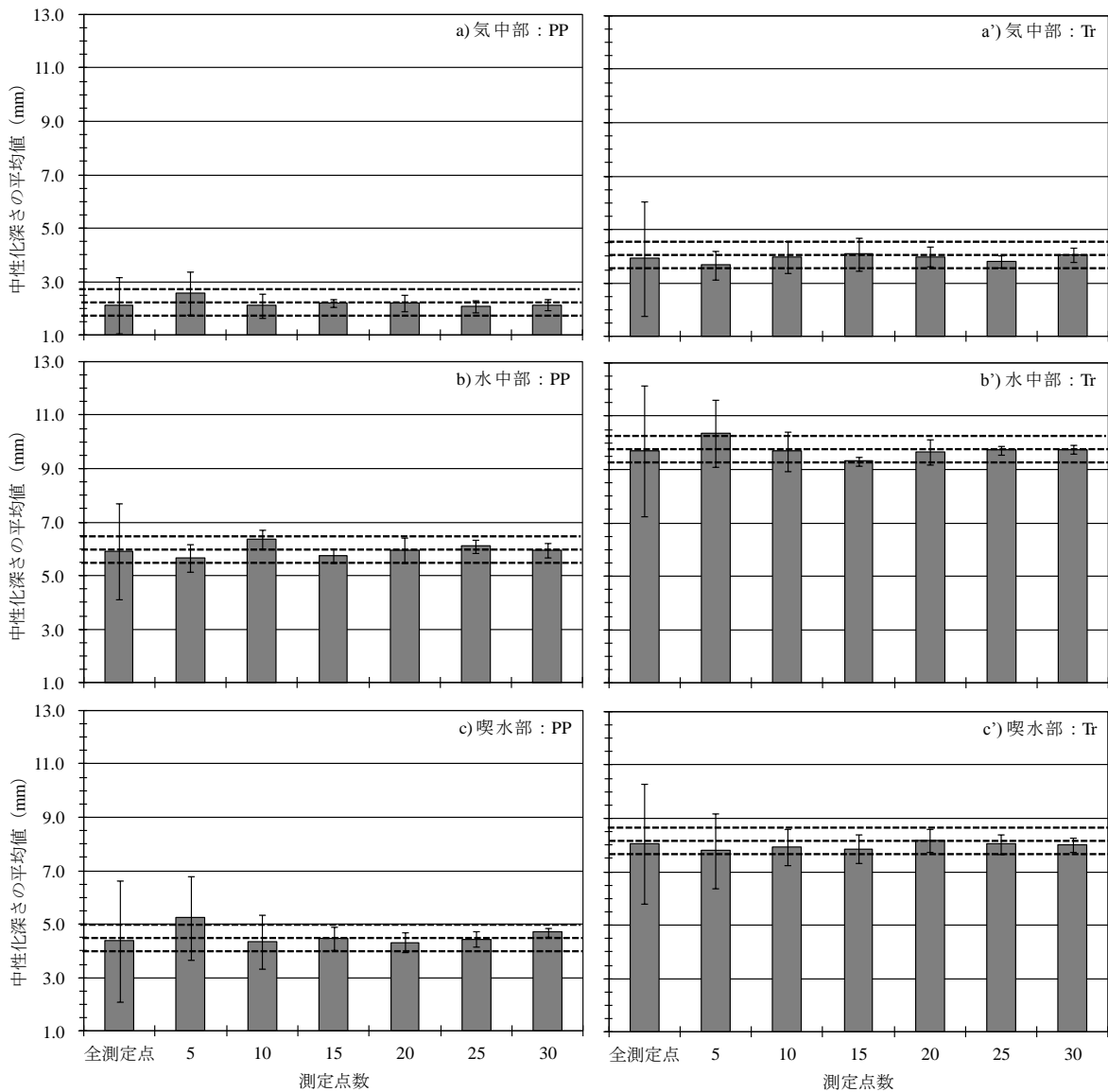


図-3 測定点数と変色深さの平均値との関係

水利構造物においては、粗骨材の露出等の表面状態の影響により、測定データが正規分布に従うかも不明確である。そこで本検討では、実際の測定値を使用して、全測定点から無作為抽出による試行を繰り返す手法により、適切な変色深さの測定点数について検討した。PP 溶液および Tr 溶液をそれぞれ噴霧した場合の各供用条件における測定点数と変色深さの平均値との関係を図-3に示す。同図中には、全測定点に対して、無作為抽出を5回することで得られた平均値および標準偏差と測定点数との関係を示した。一般的に、中性化の進行予測を行う際には以下の式(1)中の中性化速度係数が指標となる¹¹⁾。

$$y = b\sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y ：中性化深さ (mm)、 t ：中性化期間 (年)、 b ：中性化速度係数である。ここで、式(1)において、供用年数が同一である二種類の構造物を考える。両者の中性化深さが0.5mm程度違った場合、中性化速度係数の差は

0.1以下となり、中性化の劣化予測にほとんど影響を及ぼさないことが分かる。したがって、本検討では、各測定点数における平均値±標準偏差と全測定点の平均値との差が0.5mm以下となることを条件として、測定点数の設定を検討した。図-3中には、全測定点における平均値およびその差が0.5mmとなる範囲を破線で示した。

まず、PP 溶液を噴霧した場合に着目すると、気中部においては、測定点数が5点の場合の平均値が全測定点の平均値と比較して大きくなった。また、同条件の平均値±標準偏差と全測定点における平均値との差が0.5mm以下とならないことから、測定点数が5点の場合には、正確な中性化深さを得ることが出来ないと考えられた。一方、測定点数が10点以上の場合には、平均値および標準偏差がすべて同程度となった。このことから、気中部においては、測定点数が10点以上あれば、正確な中性化深さを得られることが確認できた。水中部および喫水部にお

いては、測定点数が 15 点以下の場合は平均値および標準偏差が大きく変動する。一方、測定点数が 20 点以上であれば、各測定点数における平均値±標準偏差と全測定点の平均値との差がすべて 0.5mm 以下となることから、水中部および喫水部の中性化深さを正確に測定するには、測定点数が 20 点以上必要と考えられた。

Tr 溶液を噴霧した場合も PP 溶液の場合と同様に、測定点数の増加に伴い平均値が全測定点の平均値に近づくこと、測定値の標準偏差が小さくなるのが分かる。水中部および喫水部では、PP 溶液の場合と同様に、測定点数が 20 点以上で正確な変色深さを評価できることが明らかとなった。一方、気中部においては、測定点数が 5～15 点の場合において、PP 溶液の場合よりも各測定点数における平均値±標準偏差と全測定点の平均値との差が大きくなっていることが確認できる。よって、Tr 溶液を用いた測定では、供用条件に関わらず、測定点数が 20 点以上必要と考えられた。

前述したように、ここまでの検討は、各測定点数における平均値±標準偏差と全測定点の平均値との差を 0.5 mm として行った。しかしながら、現場でのデータ取得において、0.5mm という測定値の差は容易に発生すると考えられる。また、「JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法」では、構造物のはつり面に対して変色深さを測定する場合には、1mm まで読み取れる測定器具を用いてよいとされている¹²⁾。よって、現場において測定を行う際には、0.5mm 以上の誤差も多いに発生すると考えられる。そこで、図-3において、各測定点数における平均値±標準偏差と全測定点の平均値との差を 1mm として測定点数を再検討すると、供用条件および指示薬の違いに関わらず、測定点数を 10 点以上確保することで、正確な変色深さの評価が可能となることが分かった。

以上のことから、正確な変色深さを評価するために必要な測定点数として、各測定点数における平均値±標準偏差と全測定点の平均値との差を 0.5mm とした場合には、供用条件や指示薬の違いに関わらず 20 点以上となり、1mm とした場合には、10 点以上であることが分かった。

4.2 測定値に含まれる異常値の除去方法に関する検討

前節では、実測したすべての測定値を使用して、実際に試行を繰り返すことで、適切な変色深さの測定点数について検討した。一方、変色深さの測定値は大きなばらつきを有するため、測定の際には極端に大きくなる測定値（以下、異常値）を除去することで、正確な変色深さに基づいた適切な劣化度診断が可能と考えられる。そこで、本節では以下に述べる各手法を用いて、異常値の除去方法を検討した。適用した異常値の除去方法について以下に述べる。「トリム平均値 (20)」とは、すべての測

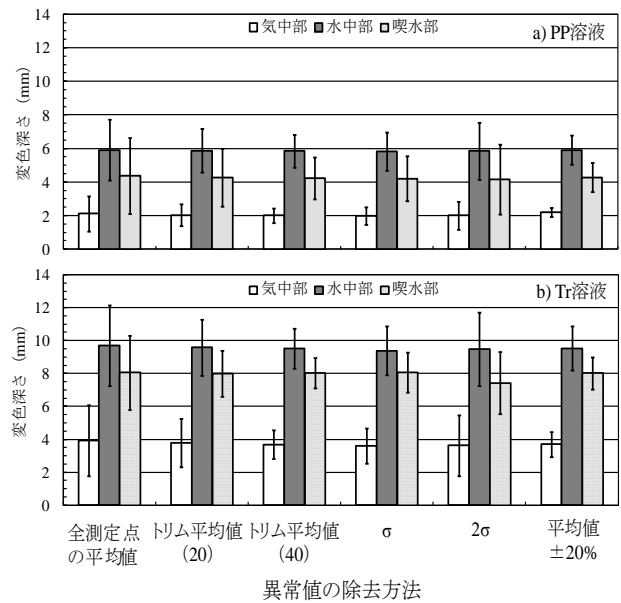


図-4 各手法で異常値の除去を行った後の変色深さ

表-3 各手法を適用した際の変動係数と割増し係数

指示薬および 供用条件		全測定値 の平均値	トリム平均値 (20)	トリム平均値 (40)	σ	2 σ	平均値 ±20%
PP 気中部	変動係数	49.7	31.8	21.9	27.1	42.0	12.1
	割増し係数	1.0	1.2	1.6	1.4	1.0	3.1
PP 水中部	変動係数	30.5	22.4	16.7	19.7	29.0	14.6
	割増し係数	1.0	1.2	1.6	1.5	1.0	2.3
PP 喫水部	変動係数	51.9	40.4	29.4	32.0	49.9	20.0
	割増し係数	1.0	1.2	1.6	1.6	1.0	3.8
Tr 気中部	変動係数	54.7	38.6	23.7	29.5	51.0	20.6
	割増し係数	1.0	1.2	1.6	1.5	1.1	2.6
Tr 水中部	変動係数	25.4	17.8	12.9	15.8	23.5	14.0
	割増し係数	1.0	1.2	1.7	1.5	1.0	1.8
Tr 喫水部	変動係数	27.8	17.4	11.6	15.2	25.4	12.3
	割増し係数	1.0	1.3	1.7	1.4	1.1	1.8

定値を昇順に並べた際に上位と下位のそれぞれ 10%に該当する値を除去したものである。「トリム平均値 (40)」は、上記と同様の手法で、上位と下位のそれぞれ 20%に該当する値を除去したものである。「 σ 」および「2 σ 」は全測定点の平均値±標準偏差、全測定点の平均値±2 倍の標準偏差の範囲外となる値を除去したものである。「平均値±20%」は、全測定点の平均値±20%の範囲外となる値を除去する手法である。この方法は、「JIS A 1155 コンクリートの反発度の測定方法」において、測定対象となるコンクリート表面状態の不安定性による影響を排除するために採用されている¹³⁾。全測定点の結果に対して、それぞれの手法で処理を行った後に得られた変色深さの平均値および標準偏差を図-4に示す。

すべての手法において得られる変色深さに大差はないことが分かる。しかしながら、各手法を適用した場合の標本のばらつきに注目すると、ばらつきの大きさに違いが生じていることが確認できる。とくに、「平均値±20%」の手法を適用した場合、変色深さのばらつきは全体的に小さくなるのが明らかとなった。

異常値の除去後には、測定データ数が減少するため、異常値を除去した後に、正確な変色深さを評価可能な測定点数を確保しておかなければならない点に注意を払う必要がある。すなわち、各手法を適用した後に減少する測定点数を把握しておくことが必要である。本検討結果より算出した、各手法を適用した際の測定点数への割増し係数を表-3に示す。割増し係数は、全測定点数を各手法適用後に残った測定点数で除した値とした。

「平均値±20%」を除くすべての手法において、割増し係数は1.5程度となった。前節の検討結果から、各測定点数における平均値と標準偏差と全測定点の平均値との差を1mmとした場合には、測定点数を最低で10点確保すればよいため、割増し係数が1.5程度であれば、現場でのデータ採取の際にも、作業に大きな支障は生じないと考えられる。一方、「平均値±20%」を適用した場合の変動係数は、全測定点を使用した場合の変動係数の二分の一以下とすることができるが、割増し係数が3.0以上となるものもある。つまり、正確な評価に必要な測定点数の3倍もの測定データを採取することが必要であり、現場における適用が困難な場合も想定された。

以上のことから、変色深さの評価に際しては、測定値に含まれる異常値を除去することで、測定値のばらつきを小さくすることが可能であることが分かった。一方、異常値の除去方法については、実用する際に測定値の許容変動幅や現場での適用性などといったことを考慮して決定する必要がある。その上で、あらかじめ設定した測定点数に対して適当な割増し係数を掛けることで、必要となる測定点数を確保することが適当と考えられた。

5. まとめ

本研究では、水利コンクリート構造物の中性化特性に応じた劣化度診断手法を提案するための基礎的研究を行った。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 水利コンクリート構造物の中性化は、同一部材において、供用条件ごとに変色深さやその変動に大きな違いを有することが明らかとなった。
- 2) 実構造物においても、PP溶液とTr溶液という二種類の指示薬を用いたコンクリート内部のpHの評価が可能であることが示された。
- 3) 本研究で対象とした水路では、正確な変色深さを評価するために必要な測定点数として、各測定点数における平均値と標準偏差と全測定点の平均値との差を0.5mmとした場合には、供用条件や指示薬の違いに関わらず20点以上となり、1mmとした場合には10点以上であることが分かった。
- 4) 測定値に含まれる異常値を除去することで、測定値の

ばらつきを抑えることが可能となるが、あらかじめ設定していた測定点数に対して適当な割増し係数を掛け、必要となる測定点数を確保する必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、島根大学生物資源科学部の長束勇教授ならびに石井将幸准教授には、貴重なご指導、ご助言を賜った。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 和泉意登志:コンクリートの劣化と補修がわかる本, セメントジャーナル社, p.15, 2009
- 2) 和泉意登志, 押田文雄:経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, 日本建築学会構造系論文報告集, No.406, pp.1-12, 1989.12
- 3) 平松和嗣:既存 RC 建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.251-252, 2007
- 4) 崔萬權, 長谷川雄基, 松本伸介, 佐藤周之, 横井克則:フェノールフタレイン溶液とトロペオリン溶液を用いたコンクリートのpHの測定方法, 第67回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, pp.133-135, 2012.11
- 5) 増馬義裕, 長谷川雄基, 佐藤周之:コンクリート内部の発錆領域特定に関した中性化評価技術の検討, 第66回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, pp.83-85, 2011.10
- 6) 佐藤周之, 内田健一郎, 横井克則, 野中資博:フェノールフタレイン法によるコンクリート中性化の詳細評価技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2023-2028, 2009
- 7) 森充広, 渡嘉敷勝, 山崎大輔, 加藤智丈:長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.919-924, 2009
- 8) 社団法人 日本コンクリート工学協会:炭酸化研究委員会報告書, pp.38-40, 1993.3
- 9) Man-Kwon Choi, Yuki Hasegawa, Shinsuke Matsumoto, Shushi Sato, Tsuguhiko Nonaka: Evaluation and Prediction Method on Neutralization of Supplied Long-term Hydraulic Concrete Structure, International Journal of GEOMATE, Vol.3, No.2, pp.402-406, 2012.12
- 10) 永田靖:サンプルサイズの決め方, 朝倉書店, 2003.9
- 11) 社団法人 土木学会 コンクリート委員会編:コンクリート標準示方書「維持管理編」, 社団法人 土木学会, p.92, 2007.3
- 12) 社団法人 土木学会:コンクリート標準示方書「規準編」JIS規格集, pp.520-523, 2010
- 13) 社団法人 土木学会:コンクリート標準示方書「規準編」JIS規格集, pp.537-539, 2010