

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22780219

研究課題名（和文） 水利コンクリート構造物の中性化詳細評価技術の開発

研究課題名（英文） Development on Specific Evaluation Technique for the Prediction Of Neutralization of Hydraulic Concrete Structures

研究代表者

佐藤 周之（SATO SHUSHI）

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号：90403873

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンクリートの中性化詳細評価のための技術開発と、適切な水利コンクリート構造物の中性化診断の実施に向けた課題解決を試みた。前者では、従来の発色試薬を用いる技術の適用限界を明らかにするとともに、新たな発色試薬の導入により、簡便かつ正確な中性化深さの詳細な予測技術を提案することができた。後者では、既設水利コンクリート構造物を対象とした実験結果から、水利コンクリート構造物の中性化評価の考え方を整理することができた。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to achieve the following two purposes; technical development for specific evaluation on neutralization of concrete and solution for appropriate diagnosis of neutralization against hydraulic concrete structures. Against the former subject, application limits of general coloration reagent were clarified. Furthermore, adoption of newly coloration reagent suggested it possible to predict specific evaluation method on neutralization depth accurately. Against the latter subject, author arranged the point of view for the evaluation of neutralization based on test results obtained from existing actual hydraulic concrete structure.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：コンクリート、中性化、詳細評価技術、画像解析

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの中性化は、どのような構造物であっても生じる代表的かつ普遍的な劣化である。一般に広く用いられる鉄筋コンクリート構造物への中性化評価方法はフェノールフタレイン法（以下、PP法とする）であ

る。PP法はPP溶液が塩基性溶液と化学反応をして発色する性質を利用したものであり、その発色領域はpH8.2～10とされる。判別方法としては、コンクリート表面をはつりPP溶液を散布し、発色の有無を測定するものであるが、以下の四点が本方法ならびに中性化

全般に係る課題である。

(1) PP 溶液の発色領域が広すぎ (pH8.2~10), 発色領域との境界の pH を特性することができない。

(2) 鉄筋の発錆限界とされる pH は 11 であるため, PP 溶液が発色しても既に中性化している危険性がある。

(3) 水利コンクリート構造物は特有の劣化であるすり減りが生じるため, 中性化深さを正確に評価できるのかが不明確である。

(4) 水利コンクリート構造物特有の劣化として溶脱も原因の可能性が挙げられており, 中性化評価に対しても複合劣化としての位置付け, 適切な評価方法の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では, 現場での調査の簡便性を基本とし, 客観的かつ定量的な精度の高いコンクリートの中性化詳細評価技術を確立することを目的とする。さらに, 農業用水などに代表される水利コンクリート構造物における中性化評価の考え方を確立するとともに, 水利コンクリート構造物の特有の変状である表面摩耗を加味した適切な中性化の診断方法を体系化することを目的とする。

3. 研究の方法

中性化促進試験装置を用いて中性化が進行した状態のモルタル供試体を用意し, 異なる pH を再現したモルタル供試体を作成した。そして, 高アルカリ条件下での発色指示薬である三種類 (フェノールフタレイン溶液, アリザリンイエロー溶液, トロペオリン溶液, 以下それぞれ PP, Ay, Tr 溶液と呼ぶ) を対象として, 目視および画像解析による数値データの取得を行った。

(1) 画像解析方法の検討: 液晶ディスプレイやデジタル画像においては, R, G, B 各色の明度 (以下, RGB 明度と呼ぶ) の組み合わせによって色を表現している。したがって, デジタル画像で表現されている色を RGB 明度に分解することも可能である。既往の研究から, デジタル画像を RGB 明度に分解することにより, 分光光度計や比色計の代替としての利用が可能であることが報告されている。本研究でも同様に, 汎用的なデジカメ (R 社製, 600 万画素) にて撮影したデジタル画像を RGB 明度に分解し評価した。

(2) モルタルの酸塩基指示薬の変色反応: 実験には同一の配合条件で作製した 40×40×160mm のモルタルバーを用いた。セメントには普通ポルトランドセメント使用し, 水セメント比は 65% に設定した。供試体はモルタルバーを 40×40mm の断面で約 10mm の幅にカットして作製した。モルタル供試体を用いるのは, 粗骨材が RGB 明度へ与える影響を排除するためである。ここで, pH の異なるモル

タル供試体が必要であるため, 模擬的に pH の異なる条件を再現した。NaOH 水溶液の pH は, PP 溶液では 7.8~13.6 の 23 段階, Ay 溶液および Tr 溶液では 9.8~13.2 の 18 段階で設定した。それぞれ 24 時間浸漬後, 引き上げて乾燥した布で表面の水分を除去した後, 各指示薬を散布した。

(3) 複数の酸塩基指示薬による pH 域の推定方法: 本研究で使用する指示薬は, PP 溶液 (1.0%濃度), Ay 溶液 (0.1%濃度), Tr 溶液 (0.4%濃度) の 3 種類である。供試体は 100×100×50mm のコンクリート角柱供試体とし, 使用セメントは普通ポルトランドセメント, 普通ポルトランドセメント+フライアッシュ II 種 (置換率 10%, 20%) の 3 種類とした。セメント 1 種類につき供試体を 3 体作成した。

供試体には 100×50mm の向かい合う 2 側面以外にエポキシ系樹脂を塗布し, 2 側面からのみ CO₂ が侵入するようにした。供試体は, 環境条件を温度 20°C, 相対湿度 60%, CO₂ 濃度 5% に設定した中性化促進試験機内に静置し, 促進期間 26 週において実験を行った。

実験では, 供試体を CO₂ 侵入面に対して垂直に割裂した。割裂面は 1 供試体につき 3 断面用意し, 割裂面をブローで清掃後, 対となる割裂面の一方に PP 溶液を, もう一方に Ay 溶液または Tr 溶液を散布した。指示薬を散布した供試体の概要を図 1 に示す。指示薬散布後, 表面から変色境界までの距離を 1 断面につき 10 ヶ所測定し, 3 断面分の計 30 ヶ所の平均値を各指示薬の変色深さとした。

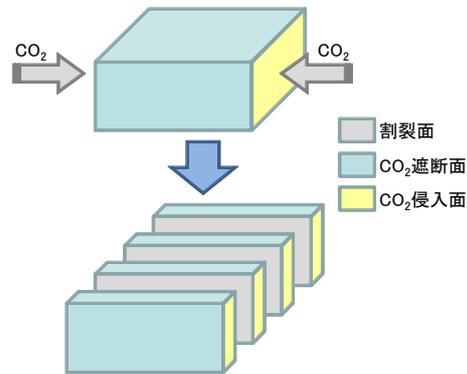


図 1 供試体の概要

(4) 鉄筋の腐食 pH の特定: 不動態被膜と pH の関係を把握するため, 鉄筋の発錆実験を行った。pH を調整した溶液に, 実験試料を浸漬させ, pH の推移と目視による試料の状態観察から腐食を判断した。実験に用いた試料はホームセンター等で市販されている丸形および異形鉄筋 (φ6mm) を 27.7 (±1.4) mm に切断した後, ワイヤブラシにより表面を十分に研磨したものをを用いた。試料を浸漬させる溶液には, 水酸化ナトリウム液では

(NaOH) 水溶液を用い、pH10.0~13.0 の15段階で実験を行った。

4. 研究成果

(1) 画像解析方法の検討：画像処理ソフトを用いて、デジカメで撮影した画像から RGB 明度を算出することで、画像内の物体の色調を定量化できることが確認された。コンクリートを対象とした RGB 明度の算出においては、ヒストグラム法（評価したい領域全体を範囲指定し、その範囲内に存在するすべてのピクセルの平均 RGB 明度を算出する方法）を用いることで RGB 明度の算出誤差を低減できることがわかった。また、ヒストグラム法において、画像の輝度を一定に調節することで撮影時の照度の違いが RGB 明度に与える影響を低減できることがわかった。したがって、コンクリートを対象とした画像解析においては、ヒストグラム法の使用および輝度の調節が必須といえた。

(2) モルタルの酸塩基指示薬の変色反応：デジカメで撮影した供試体の画像から、輝度を調節した上で RGB 明度を算出した。0.04%濃度の PP 溶液の結果を図 2 に示す。pH の上昇に伴って R と B の明度は増加し、G の明度は減少する傾向がある。各色について見てみると、R と G の明度は、pH7.8~10.8 の領域ではばらつきは小さく安定しているが、pH10.8 以上で変化が見られ、実験の最大設定値である pH13.6 まで線形的に変化していることが確認できる。したがって、0.04%濃度の PP 溶液をコンクリートに散布した場合、R、G の明度より pH10.8~13.6 の領域を推定可能と考えられる。B の明度からもおおよその傾向は掴めるが、色調が安定していると思われる pH7.8~10.8 の領域においてもばらつきが大きく、変色量の小さな変化を見るには不適といえる。RGB 明度の変動特性が異なることについては、現段階で原因を特定することはできないが、PP 溶液の散布量、使用したセメントや骨材の量や品質の違いなどが考えられる。したがって、散布量についての検討および異なるセメントや骨材を用いての検討が今後必要と考えられる。

1.0%濃度の PP 溶液の結果を図 3 に示す。0.04%濃度の PP 溶液と同様、R と G の明度が pH11 付近から変化しており、PP 溶液の変色量が段階的に変化していることがわかる。しかし、0.04%濃度の結果と異なる点として、pH13.2 以上での PP 溶液の退色が見られる。退色によって図 3 の pH12.8 と pH13.6 のように明度が同等となる pH が生じるため、明度による pH の推定においては 1.0%濃度よりも 0.04%濃度の PP 溶液のほうが適していると考えられる。

0.1%濃度の Ay 溶液および 0.4 濃度の Tr 溶液の結果をそれぞれ図 4、5 に示す。Ay 溶

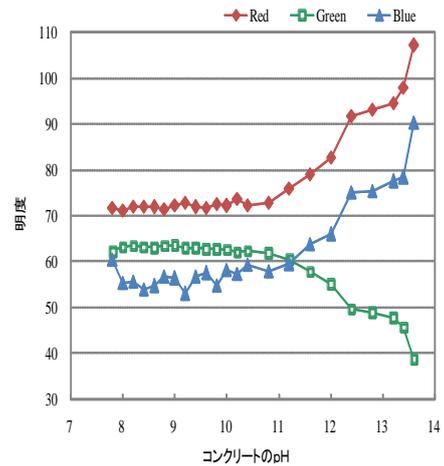


図 2 コンクリートの pH と PP 溶液 (0.04%濃度) の変色量の関係

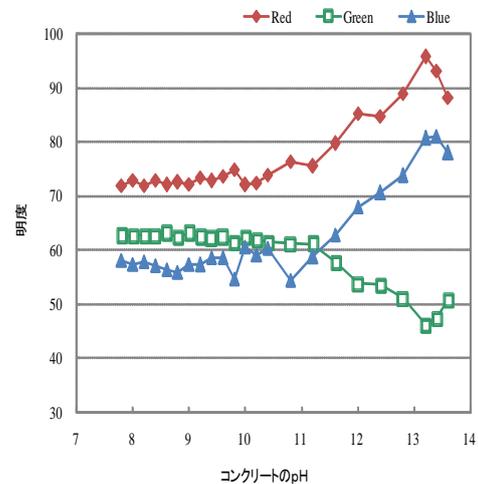


図 3 コンクリートの pH と PP 溶液 (1.0%濃度) の変色量の関係

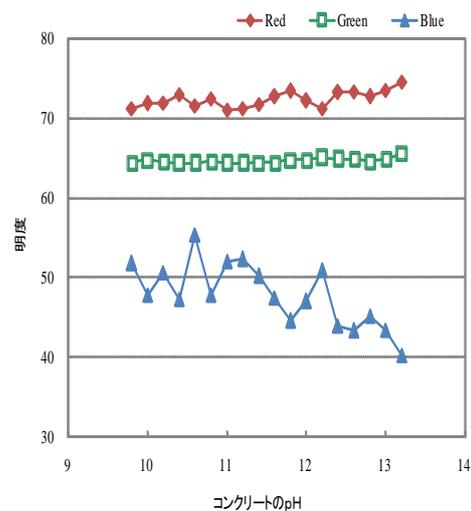


図 4 コンクリートの pH と Ay 溶液 (0.1%濃度) の変色量の関係

液では、全体として見ると pH の上昇に伴い、R、B の明度が変化しているが、各 pH 間の明度のばらつきが大きいので、pH による明度の変化を正確に捉えることができない。このばらつきは Ay 溶液の色調が影響していると考えられる。また、G の明度においては全ての pH において同等の値を取っており、明度の変化は示されていない。したがって、Ar 溶液の変色量から pH を推定することは困難といえる。

Tr 溶液では R と G の明度から、約 pH12.6 以上でわずかに変色量の変化が見られる。一方、B の明度は各 pH 間のばらつきが大きく、変色量の変化を捉えることはできない。したがって、R と G の明度を見ることで、Tr 溶液の変色量から pH を推定できる可能性がある。ここで、健全なコンクリートの pH は 12~13 である。Tr 溶液で評価可能な領域が pH12.6 以上の高アルカリ領域であることを考えると、Tr 溶液はコンクリートの健全部の評価において有用といえる。

本実験より、0.04%濃度および 1.0%濃度の PP 溶液と 0.4%濃度の Tr 溶液において変色量の変化が見られた。その際、PP 溶液では R と G の明度が、Tr 溶液では G の明度が変色量の変化を捉えており、全体的に G の明度は変色量の評価に適しているといえる。

ここで、Ay 溶液や Tr 溶液のように有色の指示薬の場合、変色量の変化を捉えにくい可能性がある。特に、本実験で用いた Ay 溶液と Tr 溶液は黄色系から黄色系への変色を示す指示薬であるために RGB 明度の変動量が小さくなった可能性もある。有色の指示薬であっても、大きく色が変化する指示薬であれば画像解析による pH 評価に適する可能性もあるため、pH の評価に適した指示薬の検討が必要である。また、本実験より、コンクリートに指示薬を散布した場合、その指示薬の変色域よりも高い pH で変色量が増加し始める傾向が見られた。今後、他の指示薬において pH の評価を試みる際は、上記の傾向を考慮した指示薬選びが必要と考えられる。

(3) 複数の酸塩基指示薬による pH 域の推定方法：コンクリート供試体における各指示薬の変色深さの結果を図 6 に示す。ここで、Ay 溶液については、わずかな変色は見られたものの、変色境界が不明瞭であり変色深さを測定できなかった。つまり、0.1%濃度の Ay 溶液は変色深さの測定には不適であると考えられる。一方、図 6 より、全ての供試体で Tr 溶液の変色深さ（以下、D-Tr）が PP 溶液の変色深さ（以下、D-PP）を上回る結果となり、供試体ごとの D-PP と D-Tr の差は、最小で 0.2mm、最大で 1.2mm 程度であった。

PP 溶液と Tr 溶液の変色域の違いを考えると、D-PP と D-Tr の差の範囲内に、PP 溶液の変色域と Tr 溶液の変色域の間の pH 域が存在

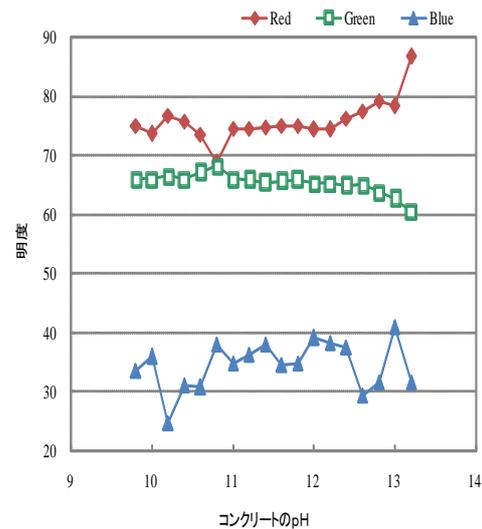


図 5 コンクリートの pH と Tr 溶液 (0.4%濃度) の変色量の関係

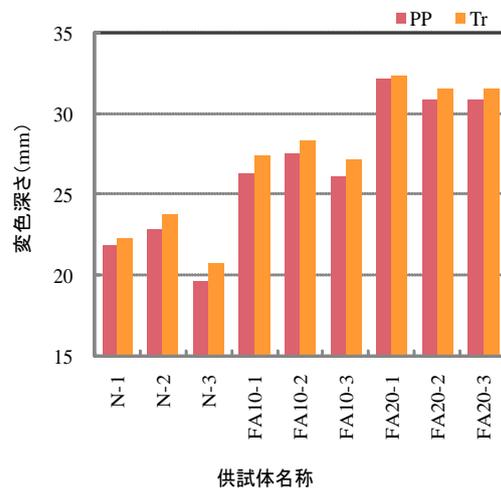


図 6 供試体における各指示薬の変色深さ

すると考えられる。しかし、ここで留意すべきは、各指示薬の変色域は範囲が広く、各指示薬の変色深さにおけるコンクリートの pH が明確でないという点である。つまり、各指示薬の変色境界となる pH を明らかにしなければ、各指示薬の変色深さによって示される領域の詳細な pH の範囲は評価できない。

1.0%濃度の PP 溶液は pH11.2 以上で、0.4%濃度の Tr 溶液は pH12.6 以上で変色量の変化が見られた。これらを考慮すると、本実験において示された PP 溶液の変色領域は pH11.2 以上と考えることができる。同様に、Tr 溶液の変色領域は pH12.6 以上と考えられる。すなわち、本実験で判別した pH 域はそれぞれ $pH < 11.2$ 、 $11.2 \leq pH < 12.6$ 、 $12.6 \leq pH$ の 3 種類である可能性がある。しかし、上記結果は画像解析を用いた際の結果であるた

め、本実験のように目視で変色が確認可能な pH と画像解析で変色が確認可能な pH とでは値が異なることが予想される。今後、本実験で示された領域の pH 域の検討が必要である。

本実験より、促進中性化させたコンクリート供試体に PP 溶液と Tr 溶液という変色域の異なる指示薬を散布することで、中性化したコンクリートの複数の pH 域を判別することが可能と考えられた。しかし、判別された領域の pH 域の明確化が課題である。

(4) 鉄筋の腐食 pH の特定：発錆実験に用いた浸漬液の pH の遷移を図 7 に示す。丸形および異形ともに pH12.0 以上の強アルカリ域では、ほとんど変動は見られず、安定した値を得たため、同図には示していない。一方、pH11.0 以下の浸漬液の pH は、わずかながら低下し、pH10.0 では顕著な低下が見られた。目視により発錆の有無を確認したところ、pH の低下が確認できた pH10.0~11.0 において、試料の浸漬から 24 時間以内に赤褐色の発錆が見られた。発錆は鉄筋破断面付近から生じ、浸漬から 2 日以降では、鉄筋表面へと発錆が進行した。両種ともに鉄筋表面に孔食を生じていた。

以上の結果から、通説通り鉄筋は pH11.0 以下で発錆したため、不動態被膜は pH11.0 以下で破壊されると考えられる。今回の試験では、発錆の進行とともに孔食を確認した。腐食にはマクロセル腐食、ミクロセル腐食と 2 種類の形態が存在するが、本実験では腐食形態について考慮していない。詳細な腐食の動態を把握するには、腐食形態も考慮した実験を行う必要があると考えられた。

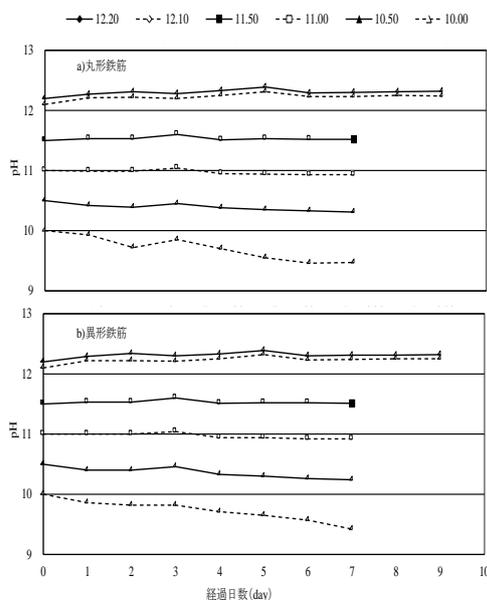


図 7 浸漬液における pH の推移

以上の成果を総括すると以下のとおりと

なる。まず、コンクリート中の鉄筋の腐食限界となる pH は概ね pH11 を閾値とすることが確認できた。このことから、一般のフェノールフタレイン溶液を用いた中性化の診断結果と鉄筋の腐食限界は一致せず、的確な中性化診断技術の開発が必要であることが明らかとなった。

コンクリートの中性化の詳細評価を実施する方法としては、濃度の小さいフェノールフタレイン溶液 (0.04%) と RGB 値の解析の組み合わせという手法、あるいは濃度の大きいフェノールフタレイン溶液 (1.0%) とトロペオリン-0 溶液の複合利用による手法の二つが可能であることが明らかとなった。ここで、現実の適用性を考えると、後者のほうが簡便さからも優位と考えられた。

現在までに、上記二種類の発色試薬を用いて、既設の農業用コンクリート開水路を対象とした中性化の実験を完了している。実構造物のうち、特に農業用コンクリート水利施設は、調査期間が農閑期に限られているため、調査時期が平成 24 年 3 月に限定されたことによる。この実験の成果は現在公表の準備中であるが、水利コンクリート構造物の供用環境条件の違いが中性化に及ぼす影響について解明するものであり、具体的な中性化評価手法についても有用性を確認する内容となっていることを最後に付記する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① S. Sato, 他 5 名 (計 6 名中 1 番目), Development on Specific Evaluation Technique for the Prediction of Neutralization of Concrete, 36th Conference of Our World in Concrete & Structures, Abstract 査読有, 平成 23 年 8 月 15 日, シンガポール

[学会発表] (計 2 件)

- ① 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する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, 平成23年10月20日, 高知県高知市
- ② 増馬義裕, 佐藤周之, 横井克則, 野中資博, トロペオリン0を用いた中性化した躯体内の発錆領域の特定に関する基礎的研究, 平成23年度農業農村工学会大会講演会, 平成23年9月7日, 福岡県博多市

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 周之 (SATO SHUSHI)

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号：90403873

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし