

論文 コンクリート水路における骨材露出の評価に関する基礎的研究

佐藤 周之*¹・緒方 英彦*²・野中 資博*³・服部 九二雄*⁴

要旨: 長期供用されたコンクリート水路に特有な変状の一つに骨材露出がある。本研究では骨材露出をモデル化した実験により、現象としての骨材露出の特性を明らかにした。骨材露出は表面から経時的に進行する。しかし増加し続けるのではなく、表面からの距離が粗骨材の最大寸法を超えるとほぼ一定になった。また、表面から粗骨材第一層までの最短距離を算出した結果から、水セメント比に関わらず 6mm 程度モルタル分が消失すれば骨材露出が顕在化することが分かった。上記結果から、コンクリート水路における各種性能への影響について考察し、特に今後の課題となるのが水理性能および耐久性能との関連であることを指摘した。

キーワード: コンクリート水路, 骨材露出, 粗骨材面積率, 構造性能, 水理性能, 耐久性能

1. はじめに

コンクリート水路における特徴的な変状の一つに骨材露出がある。これは、特に長期供用されたコンクリート水路の喫水位（最多頻度流量時の水位）以下の水中部で顕著に現れる現象の一つであり、補修・改築の一因として取り扱われる場合があることも報告されている¹⁾。この骨材露出とコンクリートの摩耗は密接な関連があり、骨材露出が風化・老朽化と位置づけられる一方で、コンクリートの摩耗は劣化として位置づけられ、主たる摩耗の発生機構は、加わる外力および影響を受ける材料特性により表面疲労摩耗、アブレイジョン摩耗、凝着摩耗、トライボ化学摩耗に分類されるとする報告がある²⁾。上記摩耗の発生機構は主として物理的な外力の作用に由来するものとなるが、一方では特に常時水と接するコンクリートにおいて、化学的な作用による影響があることも報告されている。その代表的な発生機構は溶脱であり、セメントペースト部から流水中に経時的にカルシウムイオンが溶出することにより組織構造が脆弱化するというものである³⁾。

いずれの発生機構にせよ、摩耗そのものは経時的に進行するものであり、劣化の一つであることは確かである。特にコンクリート水路のように自然環境下で供用される場合、比較的厳しい環境条件下での供用もさることながら、一般の土木構造物とは異なり常時水と接するという特殊な使用条件下にある。したがって、表面的には骨材露出という老朽化に分類される変状が生じたとしても、その発生機構の解明には、コンクリートの物理・化学的性質の両面からの研究が必要と考えられる。

一方で、現象として顕在化する骨材露出という変状の特性を正確に理解することも重要と考える。確かに、摩

表-1 骨材の物理的性質

	密度 (g/cm ³)	粗粒率 F.M.	吸水率 (%)
細骨材 (陸砂)	2.59	1.83	1.59
粗骨材 (碎石)	2.59	6.68	1.62

耗はコンクリート構造物の設計・施工・維持管理においても耐久性に影響を及ぼす因子である。しかし、摩耗の発生機構が明確化されず、劣化としての定量的な診断手法も存在しない中で、現在も鋭意導入が進められている農業水利関連の施設に対する性能設計を具現化するためには、骨材露出の変状特性を正確に把握し、骨材露出がコンクリート水路の要求性能のうち、どの性能に影響を及ぼすのかということを明確化しておかなければならない。

本研究では、コンクリート水路における骨材露出に焦点を当て、骨材露出の経時的な進行をモデル化して実験的に検証する。そして、骨材露出とコンクリート水路の要求性能の関係を整理し、骨材露出が劣化度診断を実施する上での性能指標となりうるかを検討する。

2. 実験の概要

2.1 コンクリート供試体の概要

実験で使用した材料は普通ポルトランドセメント、水道水、鳥取市産陸砂（細骨材）、鳥取県産碎石（粗骨材）、高性能 AE 減水剤（レオビルド SP8N, エムエヌビー）である。骨材の物理的性質を表-1 に示す。コンクリート水路における水セメント比は、水密性が求められるため一般的に 55%以下となる。しかし、施工年度の古い構造

*1 高知大学 農学部生産環境工学科 准教授 博士（農学）（正会員）

*2 鳥取大学 農学部生物資源環境学科 准教授 博士（農学）（正会員）

*3 島根大学 生物資源科学部地域開発科学科 教授 農学博士（正会員）

*4 鳥取大学 農学部生物資源環境学科 教授 農学博士（正会員）

表-2 基本としたコンクリートの示方配合 (W/C:55%)

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	8	55	6	39.7	150	273	723	1098	0.246

物については、厳密に55%以下で設計されていない可能性もある。そこで、水セメント比55%を基本配合として、水量だけを調整した水セメント比45、50、60、65%の五種類の角柱供試体(10×10×40cm)を作製した。基本となるW/C:55%の示方配合を表-2に示す。全供試体は打設して24時間静置後、20℃恒温水槽内で標準水中養生を行った。なお、各水セメント比のフレッシュコンクリートのスランブ量、材齢28日における密度および圧縮強度試験の結果を表-3に示す。材齢28日強度は、同時に作製した3本の円柱供試体の平均値である。

2.2 骨材露出のモデル化と検討方法

コンクリート水路の構造的な特徴としては、容積と比較して表面積が大きいこと、部材厚が小さいことが挙げられる。コンクリート水路における骨材露出は、常時水中にある底版および側壁部分で、特にモルタル部分が失われることにより顕在化する。ここで角柱供試体とコンクリート水路との関係について整理する。まずコンクリートの諸特性に及ぼす打設時の影響要因として、粗骨材の分布が挙げられる。特に構造体コンクリートの場合には、粗骨材が締固めの影響により打込み方向下部ほど多くなることが実験的に明らかになっている^{4,5)}。つまり、コンクリート水路において骨材露出が生じる底版上面は角柱供試体におけるコンクリート打設面、側壁は角柱供試体における左右の面に相当するといえる。

そこで、角柱供試体の10×10cmの端面を用いてコンクリートカッターで僅かずつ切断していき、切断を終えるたびに切断した長さの記録と端面のデジタル画像撮影を行った。各水セメント比の角柱供試体に対して、上記手順により各々三端面ずつの記録を行った。撮影した画像に対しては、Adobe Photoshopを用いて写真-1に示すように粗骨材だけを着色した。切断面だけでは粗骨材の判定ができないものがあるが、本実験では全体的な粗骨材の分布を把握することを目的としたため、画像上で5mm以上と判断されるもののみを粗骨材とした。まず、角柱供試体の全断面のピクセル数と、粗骨材と判定された粒径5mm以上の粗骨材断面のピクセル数の総和を求め、以下の式(1)により粗骨材面積率を算出した。

$$A = A_c / A_T \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここにA:粗骨材面積率(%), A_c:粗骨材のピクセル数の総和, A_T:全断面のピクセル数である。続いてコンクリート表面と粗骨材との最短距離を、角柱供試体の打設

表-3 各供試体のスランブ、密度と圧縮強度

W/C	スランブ (cm)	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (MPa)
45%	0.5	2.280	31.5
50%	4.0	2.253	19.8
55%	5.5	2.233	18.0
60%	12.5	2.193	14.8
65%	17.0	2.178	12.2



写真-1 画像処理後の角柱供試体断面

面(上面)、底面(下面)、両側面に分けて計測した。なお、側面は二面存在するため、以下の図における側面の各数値は、2で除した値を用いている。

3. 結果と考察

3.1 表面からの距離と粗骨材面積率の関係

骨材露出は、モルタル部分だけが消失する現象であり、コンクリートの表面から部材内部に向かって進行する。コンクリート打設時には骨材は見え、モルタル層のみが選択的に失われていくことによって徐々に粗骨材が現れてくる。つまり、角柱供試体の端面を徐々に切断していけば、露出する粗骨材面積の変化を評価することが可能となる。

そこで、角柱供試体端面からの距離と粗骨材面積率の関係を水セメント比ごとにまとめた結果を図-1に示す。なお、特に表面近傍の粗骨材の分布に注目するため、端面からの距離は対数表示としている。図-1の全てには、粗骨材がコンクリートマトリックス中に占める理論上の割合(42.4%)を参考として一点鎖線で示している。

この割合は、表-2 で示した示方配合を基に算出したものである。

全体的に粗骨材面積率は端面からの距離が 20mm 程度まで直線的に増加し、20mm を超えると理論値に収束していくと考えられた。しかし実際には、理論値よりも小さい値でほぼ一定になる傾向を示す。これは、角柱供試体の切断面の画像において、粗骨材と判断したものを最小寸法 5mm 以上のものに限定したためと考えられる。また、水セメント比に関わらず全ての供試体において同様の傾向を示す結果が得られたことから、この 20mm という閾値は水セメント比よりも使用した粗骨材の最大寸法に大きく影響を受けると考えられた。

以上の結果をコンクリート水路の骨材露出という現象と併せて考えると、粗骨材面積率の結果からもわかるように、摩耗が進行して骨材が露出し始める初期の段階においては、骨材露出そのものを粗骨材面積率と表すことで、劣化度診断のための指標の一つとなり得る。しかし、摩耗深さが使用した粗骨材の最大寸法を超えると、骨材の抜け落ちが生じ始め、結果として粗骨材面積率はほぼ一定の値に収束し、摩耗が進行しても粗骨材の露出割合はほとんど変化しないといえる。

重要な点は、粗骨材面積率に水セメント比がほとんど影響を及ぼさないという点である。なぜなら、長期供用されたコンクリート水路などの維持管理にあたって必要となる設計諸元が保存されず、水セメント比などの基本情報の収集さえ困難な場合がある。しかし、本来の部材厚からどれくらいモルタル分が消失しているのかを、骨材露出が生じていない水中部分以外の場所から計測することができれば、その消失深さと露出した粗骨材の最大寸法を計測した上で、粗骨材面積率をコンクリート水路の変状診断のための管理指標の一つとして使用できる場合もあると考えられる。

3.2 コンクリート表面付近の粗骨材数

コンクリート中の粗骨材の分布は様でなく、締固め時の振動エネルギーとブリーディングの影響により、モルタルよりも密度の大きい粗骨材は下方に沈降して集積しやすくなる^{4,5)}。コンクリート水路において、大規模な基幹の水路では鉄筋コンクリート構造とするものが多く、加えて先述した部材厚そのものの小ささと、側壁のように高さのある部材の打設時には、配筋の存在から十分な締固めが求められ、結果として粗骨材の不均一性が高まる可能性がある。

そこで、粗骨材面積率がほぼ一定となる端面からの距離 20mm 以上の 3 断面に対して、打設面、底面、両側面から粗骨材までの個数を計測した。なお、前項の結果を踏まえ、各表面から最短距離で 20mm 以内に粗骨材が位置するものを全て抽出している。まず、表面から 20mm

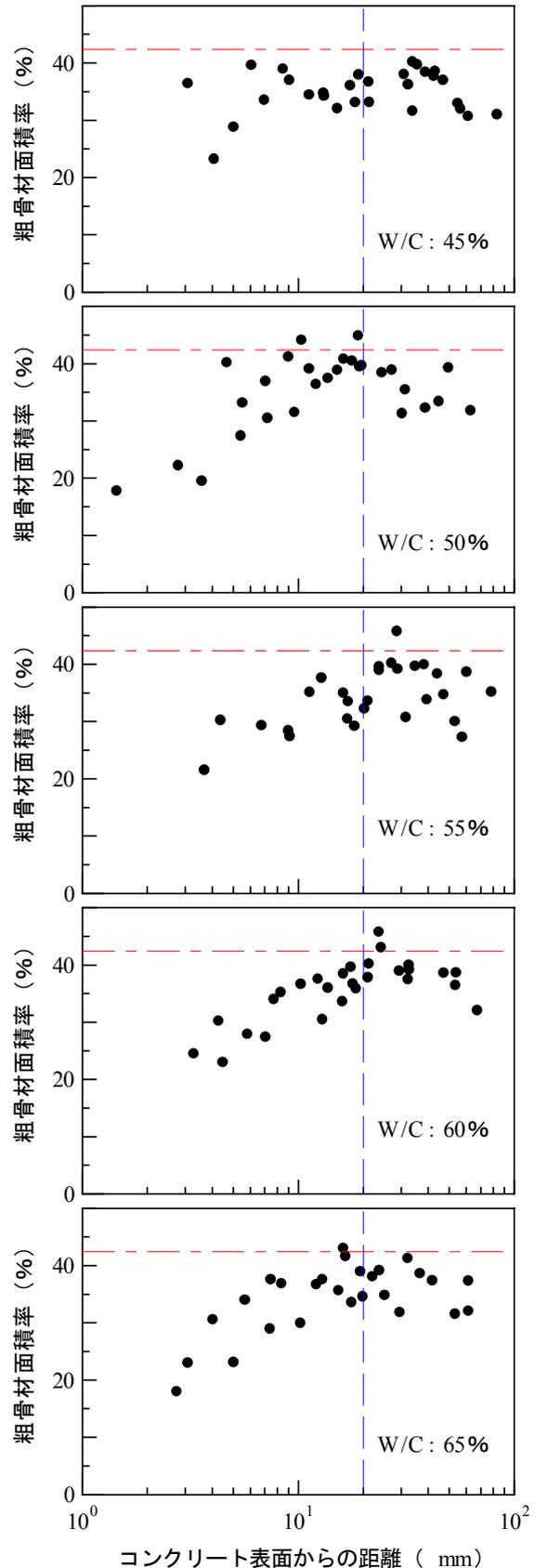


図-1 端面からの距離と粗骨材面積率の関係

以内に最短距離が位置する粗骨材の数を打設面、底面、側面で分けて集計した結果を図-2 に示す。なお、図中では一断面当り (10×10cm) の骨材数を示している。

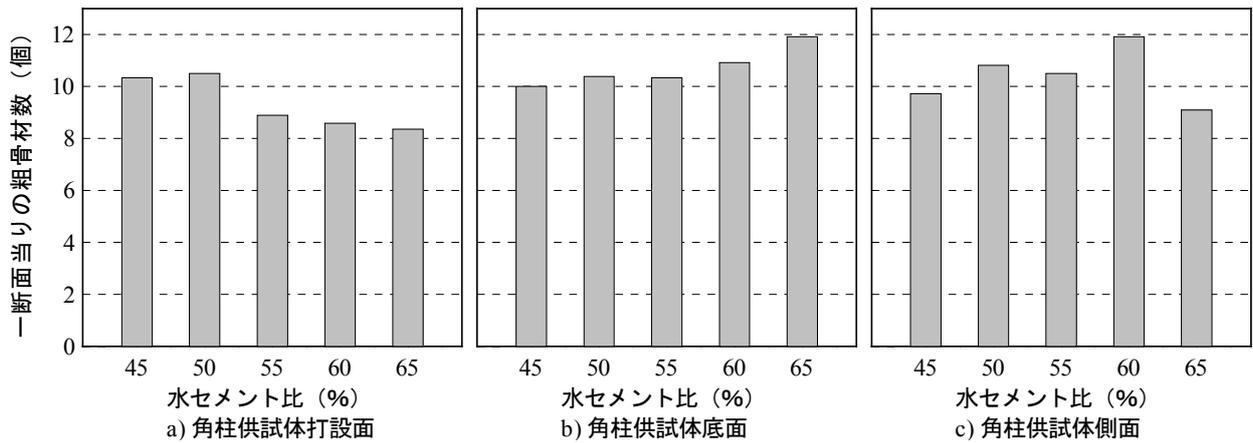


図-2 角柱供試体表面から 20mm 以内に位置する粗骨材の数

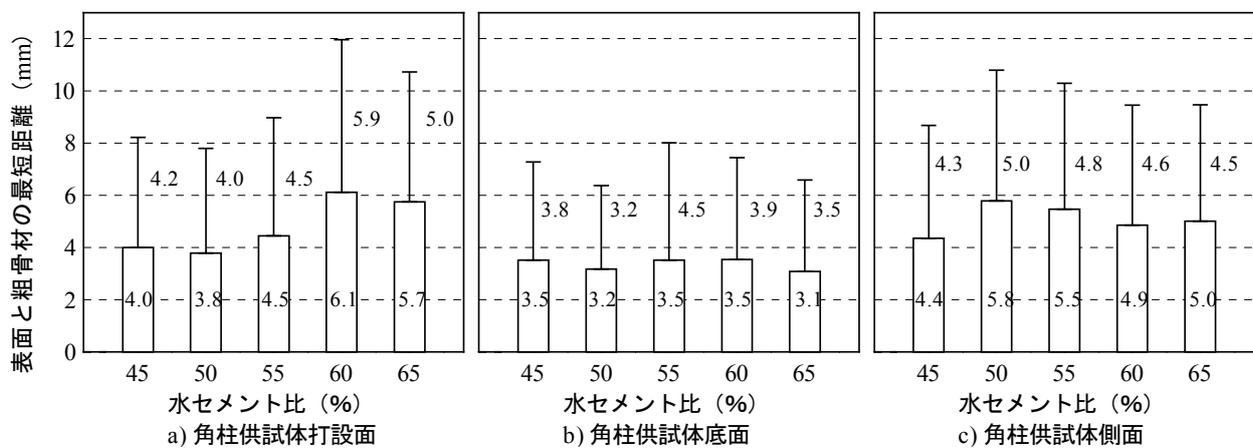


図-4 角柱供試体表面から第一層の粗骨材までの距離の平均と標準偏差

面の違いによる粗骨材の数に顕著な差をみることはできないが、水セメント比の違いによる傾向は確認できる。水セメント比が 45, 50%では打設面、底面、側面付近の骨材数に大きな差は認められず、ほぼ同じ数となることが確認できる。しかし、水セメント比が 55%以上になると、打設面と比較して底面の粗骨材数が大きくなるのがわかる。ただし、この時の側面の粗骨材数は打設面と底面の粗骨材数の間で変動しているが、これは供試体の高さが僅か 10cm であることから、粗骨材数としては明確な差にならなかったと考えられる。しかし逆に、僅か 10cm の高さの供試体であっても、水セメント比が大きければ打設面と底面付近の粗骨材数に変化があるということになる。先述したコンクリート水路工の特徴からも、水セメント比の適切な設定が骨材の均一性を確保する上で重要になるといえる。

3.3 コンクリート表面と粗骨材間の最短距離

コンクリート水路において、ジャンカ等を除けば、建造当初から粗骨材がコンクリート表面に出ることはほとんどない。供用開始後、表面からモルタル分がまず消失し、粗骨材が表面に露出を始めた段階から骨材露出と認識される。そこで、図-3 に示すように、モルタル分

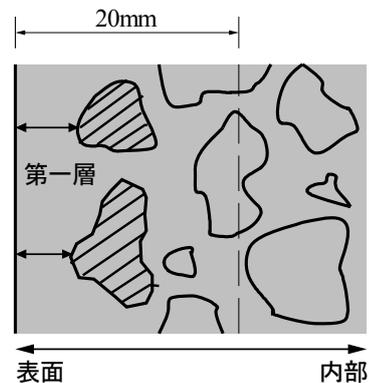


図-3 第一層の粗骨材の模式図

が消失して最初に露出する粗骨材までの層を第一層と定義し、角柱供試体打設面、底面、側面までの表面からの距離を集計した結果を図-4 に示す。なお、図中には各表面からの深さの平均を棒グラフで、標準偏差を誤差棒で示している。

図より、表面から第一層までの粗骨材の距離の平均値は、水セメント比が異なるとしても 6mm 以下であることが分かる。打設面と底面の第一層の粗骨材までの距離は異なり、底面の方が小さくなる。また、底面では表面

から第一層の粗骨材までの距離に水セメント比の影響がほとんど見られないのに対し、打設面では水セメント比が大きくなるほど第一層の粗骨材までの距離が大きくなる。側面も底面と同様に、水セメント比の違いによる影響をほとんど確認することができない。

一方、各距離の標準偏差に注目してみると、面の違いおよび水セメント比の違いに関係なく、全てにおいて標準偏差が各距離の平均値と同等の値を示していることがわかる。仮に表面と第一層の粗骨材までの最短距離が正規分布に従うとすれば、表面から各平均値の範囲内に粗骨材が位置する確率は、第一層の粗骨材のうち5割となり、平均値+標準偏差の範囲内に少なくとも第一層の粗骨材の8割以上が存在することになる。

本実験の結果のうち、コンクリート水路の骨材露出と関係がある表面は打設面と側面であり、それぞれコンクリート水路通水部の底版上面と側壁に位置する。この両者において言えることは、水セメント比に関係なく6mm程度モルタル部分が消失すると間違いなく骨材が露出を始める状況になるということである。打設面および側面は一般にスキン層と呼ばれる水セメント比の比較的大きい層が存在するが、その部分を含めた6mmが消失するだけで骨材露出は生じることになる。また、本研究では断面を切断した状態での粗骨材面積率を検討しているが、実水路の場合にはモルタル分だけが消失して骨材は残ったままである。図-3の模式図と併せて考えると、第一層の粗骨材までのモルタルがまず消失するということは、実コンクリート水路の粗骨材面積率が40%を大きく越えていくことを意味する。しかし、コンクリート水路の摩耗機構を考えてみると、水流およびその中に含まれる砂礫による物理要因と、溶脱による化学要因の影響を大きく受けるのは、粗骨材でなくモルタルである。つまり、粗骨材が一旦露出してしまえば、それ以降の摩耗の進行はきわめて小さくなるとも考えられる。

以上から、骨材が露出した状態をもって全て老朽化したと表現することは適切ではなく、まず骨材露出によって生じる本質的な問題とは何かを改めて整理する必要がある。そのためには、骨材露出(変状)と摩耗(劣化)の関係を明確化すること、骨材露出により影響を受ける性能を明確化することが重要となる。

4. 骨材露出と関連するコンクリート水路の各種性能

コンクリート水路の性能と骨材露出という変状の関連を検討する上では、コンクリート水路として要求される各種性能との関連と同時に、コンクリート材料としての耐久性能との関連について考える必要がある。

まずコンクリート水路としての性能について述べる。コンクリート水路の要求性能は、一般に水利用性能、水

理性能、構造性能、社会的安全性能に大別できる。そのうち骨材露出が影響を及ぼすものとしては、主として構造性能と水理性能にあたりと考えられる。構造性能との関連としては、骨材露出により断面欠損が進行すると、構造耐力の低下に繋がることである。ここで改めて確認しておかなければならない点は、構造性能に影響を及ぼす骨材露出という現象は何か、という点である。例えば構造計算を考えてみても、構造耐力に大きく影響を及ぼすのは、消失したモルタルの深さであり、骨材露出が生じた面積が問題になるのではない。本実験の結果から、骨材露出そのものは表面から僅か6mm程度のモルタル分の消失で顕在化する変状であり、部材厚が大きければその面積がいかに大きくとも構造耐力的に大きな問題とはならないと考えられる。

水理性能と骨材露出の関連としては、骨材が露出していくにつれてコンクリート表面の粗度が悪化し、必要な水量を輸送するための性能(通水性能)が低下することとされる。開水路の断面決定には、一般的に式(2)に示すマンニングの平均流速公式が用いられている。

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 V : 平均流速(m/s)、 R : 径深(m)、 I : 動水勾配、 n : マンニングの粗度係数(現場打ちコンクリートフルーム: 0.012~0.016⁶⁾)である。この式の中で、骨材露出と関連のある指標がマンニングの粗度係数であり、骨材露出が進行すれば粗度係数が大きくなり、所定の流量を所要の水深で流すことが困難になるとされる。しかしながら、本研究の成果から骨材露出と粗度係数の関係を考えてみると、骨材の露出状態が一定になれば、それ以上に粗度係数が大きくなることは考えにくい。したがって、構造耐力と同様に、粗骨材面積率が一定になるまでは粗度係数を表わす性能指標として利用することは可能と考えられるが、粗骨材の最大寸法を超える深さまでモルタル分が消失すると、その後の粗度係数は一定になる可能性がある。また、同じ流量を流す際に粗度係数のみが変われば性能低下につながるが、消失したモルタル分の厚さだけ通水断面が拡大することにもなる。つまり、ある一定水量を流す性能を要求されるとしても、粗度係数の増大分を相殺する通水面積の拡大があれば、水理性能そのものの低下に繋がらない場合も考えられる。さらに、本実験の結果からは、僅かに6mm程度モルタル分が消失すると骨材露出は始まることになる。つまり、骨材が露出した状態を「変状」と位置付けるのではなく、骨材が露出した状態こそがコンクリート水路における本質的な姿として位置付け、水理性能との関連性を構築することも一つの考え方である。

いずれにせよ、骨材露出とコンクリート水路の粗度係

数の悪化に関する研究はほとんどなされていないのが現状であり、粗度係数そのものをどう取り扱うのが今後の重要な検討課題の一つである。

一方、コンクリート材料としての耐久性能を考える際には、骨材露出は更に大きな意味を持つと考えられる。例えば表面から進行するコンクリートの劣化としては、中性化、塩害、凍害、化学的侵食などがある。これら要因により劣化の始まった既設コンクリート構造物に対して、その耐久性を評価する場合、はつり試験やドリル試験を行い、劣化因子の侵入深さから現状性能の評価と将来予測を行う。しかし、骨材が露出した状態での試験の実施は、消失したモルタル分を無視したみかけの劣化診断となる可能性がある。下水道分野におけるコンクリートの硫酸腐食による劣化速度は、本来の躯体の断面が維持されている場合は時間の平方根に比例するが、表面躯体が腐食を受け断面欠損が進む場合は時間に直線的に比例するとされる。コンクリート水路工についても、耐久性上問題となる劣化因子の侵入深さが問題となる場合には、調査から得られた結果を診断する際に留意する必要がある。例えば本実験の結果を利用すると、角柱供試体底面および側面の第一層粗骨材までの最短距離の平均は 6mm 弱であった。そこで、骨材露出が生じた RC 開水路側面の中性化試験をする際には、得られた中性化深さをみかけの中性化深さとし、ここに安全側を見込んでモルタル分が 6mm 既に消失していたとして加えて評価すれば、現実の中性化をより正確に表せると考えられる。ただし、このようにして求めた劣化の状態評価から将来予測を行う際には、改めて劣化予測の考え方そのものに対する研究が必要となる。

5. まとめ

本研究では、コンクリート水路に生じる骨材露出が現象としてどのように表れるのかをモデル的に検証した上で、この変状とコンクリート水路の性能との関係を検討した。得られた結果を以下に整理する。

- (1) 骨材露出を粗骨材面積率で表現した結果、粗骨材面積率は使用したコンクリートの水セメント比の違いによる影響をあまり受けず、使用した粗骨材の最大寸法と関係する可能性が示唆された。
- (2) 粗骨材面積率は表面からの距離が大きくなるほど線形的に増加するが、使用した粗骨材の最大寸法を超える距離ではほぼ一定になることが明らかとなった。
- (3) コンクリート表面付近の粗骨材の数は打設面と底面で異なり、打設時の締め固めの違いがコンクリート表面付近の粗骨材の分布に影響することが確認できた。
- (4) コンクリート表面から第一層の粗骨材までの最短距離は、供試体底面では水セメント比に関わらずほぼ

一定であるが、打設面では水セメント比が大きいほど最短距離が大きくなった。また、全体として、表面から 6mm のモルタル分が消失すれば骨材露出が顕在化することが分かった。

- (5) コンクリート水路における骨材露出は、表面から僅か 6mm の摩耗で顕在化する変状であることから、骨材露出が生じているからといって構造性能が低下したとは一概に言えない。
- (6) 骨材露出の生じたコンクリート水路の耐久性性能診断に際しては、消失したモルタル分を加味した診断と劣化予測を行う必要がある。

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には貴重なご意見を賜りました。また、鳥取大学農学部基盤造構学研究室ならびに満生喜幸氏を始めとする高知大学農学部流域水工学研究室の学生諸氏に多大なるご協力を頂いた。さらに、本研究の一部は、文部科学省科学研究費（若手研究(B)(2)、課題番号 19780179）の補助を受けて行った。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長束勇, 甲本達也, 青山成康, 野中資博, 服部九二雄: 農業水利コンクリート構造物の更新と維持管理, 農業土木学会誌, Vol.70, No.12, pp.3-6, 2002.12
- 2) 石田知子: 水理構造物のコンクリートの摩耗評価に関する試験方法の現状, コンクリート工学, Vol.45, No.3, pp.50-54, 2007.3
- 3) 土木学会コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究委員会: コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No.53, 2003
- 4) 佐藤周之, 服部九二雄, 緒方英彦, 高田龍一: 各種コンクリート供試体の強度発現特性と養生・締め固め効果—非破壊試験方法によるコンクリート強度の推定, 農業土木学会論文集, No.199, pp.83-88, 1999
- 5) 佐藤周之, 服部九二雄, 緒方英彦, 高田龍一: 初期養生条件の異なるマッシュなコンクリート供試体の諸特性に関する研究, 農業土木学会論文集, No.214, pp.41-48, 2002
- 6) 農林水産省農村振興局: 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」 基準書 技術書, (社) 農業土木学会, p.152-159, 2001