

博士論文

散水によるコンクリート表層品質の簡易評価に関する研究

西尾 壮平

概 要

本研究では、鉄筋コンクリート(RC)構造物におけるかぶりコンクリートの密実性をコンクリートの「表層品質」と定義し、鉄道高架橋等の検査の実務に導入可能な表層品質の非破壊評価技術を確立することを目的に、散水による表層品質の簡易な評価方法を検討した。

RC構造は所定の寸法を有したコンクリートが所定の位置に鉄筋を内包することによって成立するため、RC構造の耐久性は鉄筋を腐食から保護するかぶりコンクリートの厚さと表層品質に依存する。かぶりコンクリートの厚さが構造物の施工時の型枠と鉄筋の位置関係によって一義的に定まると考えられるのに対して、実構造物におけるコンクリートの表層品質は、使用材料、施工方法、環境条件など複数の要因で変動する。また、長期間の供用を前提とする構造物やかぶりの設計条件に制限のある構造部材においては、コンクリート表面から作用する劣化因子の侵入に抵抗するバリアとしてのコンクリート表層部の密実性、すなわち表層品質が耐久性確保の面で重要となる。

近年、かぶりコンクリートの品質向上、品質確保に向けた産官学の連携した取り組みが活発化しており、外観の見た目で評価することが困難な実構造物の表層品質に対する非破壊評価のニーズが高まっている。かぶりコンクリートの透気性や透水性を評価する試験方法が提案され、実構造物への適用事例も複数報告されている。しかしながら、それらの報告は研究上の適用事例に過ぎず、適用された表層品質の評価手法は構造物の建設や保守の実務への導入が困難な技術となっている。実構造物で表層品質を評価する仕組みを社会に実装するためには、実務者が使用可能な簡易評価技術を確立する必要がある。

以上の背景の下、本研究では鉄道構造物の検査実務に対するコンクリート表層品質に関する検査の導入を想定し、簡便性を重視した非破壊評価手法に関する検討を行った。検討の結果、約 0.1mg/mm^2 の散水を 60 秒間隔で同一箇所に対して繰り返し行うことにより、コンクリート表面における吸水現象の停滞が目視によって識別でき、吸水現象の停滞までに要した時間あるいは散水の繰り返し回数に基づいて表層品質の簡易評価が可能であることが明らかとなった。また、表層品質の非破壊評価において不可避となるコンクリート内部の含水状態の影響について、実構造物では含水状態の正確な評価が困難であることを示すとともに、本研究で提案する方法では他手法の適用が困難な脱型直後 1 日から 7 日の高含水状態で測定を実施することにより表層品質の絶対的な優劣が判別できる可能性を示した。

本研究で得られた知見に基づき、表層品質の簡易評価手法として、乾燥したコンクリート表面に微量の水を散布し、測定者が目視でコンクリート表面における微量水分の吸水特性を定量化して表層品質を判定する「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」を提案する。散水試験は、構造物の発注や保守を担う実務者が単独で使用可能である。また、養生完了の翌日から表層品質をその場で可視化できるため、建設時に表層品質を対象とした発注者と施工者の協働を促すことができ、コンクリート構造物の耐久性向上に活用できる。

目次

第1章	序論	5
1.1	背景と目的	7
1.2	本論文の構成	10
第2章	既往の研究	13
2.1	概説	15
2.2	表層品質の非破壊評価に関する研究	16
2.2.1	表層透気試験	16
2.2.2	表面吸水試験	19
2.2.3	流水試験	20
2.3	他用途の非破壊試験手法による表層品質の非破壊評価に関する研究	22
2.4	第2章のまとめ	23
第3章	表層品質の簡易評価の着想と試行的検討	31
3.1	概説	33
3.2	簡易評価手法の開発コンセプト，着想と事前検討	34
3.2.1	開発コンセプト	34
3.2.2	表層品質の簡易評価に関する着想	34
3.2.3	表面色の定量化技術の概要	36
3.2.3.1	表面色の定量化の基礎	36
3.2.3.2	モルタル・コンクリートの表面色の測定例	38
3.2.4	事前検討	40
3.2.4.1	散水後の水分逸散状況の定量化に関する事前検討	40
3.2.4.2	コンクリート表面における物質付着性状に関する事前検討	43
3.2.4.3	事前検討のまとめ	45
3.3	考案した簡易評価手法の概要	46
3.4	表層品質の異なる実構造物を測定対象とした試行的検討	48
3.5	第3章のまとめ	52
第4章	散水時の表面色変化特性に関する実験的検討	55
4.1	概説	57
4.2	モルタル試験体を用いた室内試験による基礎的検討	58
4.2.1	実験の概要	58

4.2.1.1 試験体	58
4.2.1.2 試験条件.....	59
4.2.2 実験の結果および考察.....	61
4.2.2.1 圧縮強度.....	61
4.2.2.2 吸水特性.....	61
4.2.2.3 散水時の明度変化特性.....	63
4.2.2.4 散水時の明度の詳細な経時変化.....	65
4.2.2.5 実構造物との測定面の相違が及ぼす影響に関する検討と考察	68
4.2.3 モルタル試験体による実験のまとめ.....	72
4.3 コンクリート試験体による検証実験.....	73
4.3.1 実験の概要.....	73
4.3.1.1 試験体	73
4.3.1.2 試験条件.....	74
4.3.2 実験の結果および考察.....	76
4.3.2.1 ラウンドロビン試験.....	76
4.3.2.2 室内試験.....	78
4.3.3 コンクリート試験体による実験のまとめ.....	85
4.4 RC 高架橋を模擬した屋外曝露試験体による検証実験.....	86
4.4.1 実験の概要.....	86
4.4.1.1 試験体	86
4.4.1.2 試験条件.....	87
4.4.2 実験の結果および考察.....	88
4.4.3 RC 高架橋を模擬した屋外曝露試験体による実験のまとめ.....	91
4.5 実構造物における測定結果の再現性に関する検討.....	92
4.5.1 実験の概要.....	92
4.5.2 実験の結果および考察.....	93
4.5.2.1 測定位置の相違の影響.....	93
4.5.2.2 含水状態の影響.....	95
4.5.2.3 散水試験で得られる代表的な測定値の分析.....	96
4.5.3 測定結果の再現性に関する知見.....	98
4.6 測定手順の簡略化に関する検討.....	99
4.6.1 検討の概要.....	99
4.6.2 検討の結果および考察.....	99
4.6.3 散水時の表面色変化特性の簡易な評価手順.....	103
4.7 第4章のまとめ.....	107

第 5 章	散水後の水分挙動の目視評価による簡便性の追求	109
5.1	概説	111
5.2	水平面の上面における余剰水の滞留現象に関する実験	113
5.2.1	実験の概要	113
5.2.2	実験の結果および考察	114
5.2.3	余剰水の滞留現象に関する知見	116
5.3	鉛直面における余剰水の流下現象に関する実験	118
5.3.1	概説	118
5.3.2	水の流下現象の発生と評価に適した散水方法の検討	119
5.3.2.1	検討の概要	119
5.3.2.2	流下の発生部位の散水形状に関する検討	119
5.3.2.3	流下距離の計測を省略する散水方法の検討	121
5.3.2.4	鉛直面での流下現象の評価に適した散水形状の考案	123
5.3.3	画像解析による流下発生メカニズムの解明	124
5.3.4	試験体による検証実験	126
5.3.4.1	検証実験その 1	126
5.3.4.2	検証実験その 2	128
5.3.4.3	検証実験その 3	130
5.4	散水による表層品質の簡易評価手法「散水試験」の提案	134
5.4.1	散水試験の概要および測定手順	134
5.4.2	表層品質の評価指標および判定方法	138
5.4.3	手法の特徴および特長	139
5.5	実構造物の含水状態の変動を考慮した散水試験の適用方法	142
5.5.1	概説	142
5.5.2	実構造物における含水状態の変動に関する考察	142
5.5.3	高含水状態における散水試験による表層品質の判定	145
5.6	第 5 章のまとめ	150
第 6 章	散水試験の影響要因，活用事例と応用技術	152
6.1	概説	154
6.2	影響要因	155
6.2.1	概説	155
6.2.2	散水量	155
6.2.3	測定方向	155
6.2.4	測定時の環境条件	155
6.2.4.1	蒸発速度	155

6.2.4.2	降雨および日射.....	157
6.2.4.3	温度.....	15761
6.2.5	測定位置および測定部材.....	161
6.2.6	その他の影響要因.....	163
6.2.7	影響要因に関する知見のまとめ.....	165
6.3	活用事例.....	166
6.3.1	散水試験の普及を目的とした技術開発.....	166
6.3.2	鉄道事業者による活用事例.....	167
6.3.3	行政機関における活用事例.....	168
6.3.4	研究機関による活用事例.....	168
6.4	応用技術.....	169
6.4.1	概説.....	169
6.4.2	散水試験用の画像解析プログラムの開発.....	169
6.4.3	画像データを活用した散水試験に関する基礎的検討.....	172
6.4.3.1	検討内容.....	172
6.4.3.2	散水範囲の拡大に関する検討.....	175
6.4.3.3	画像データによる表層品質の測定システムの開発.....	177
6.4.3.4	検証実験.....	179
6.4.4	応用技術に関する検討のまとめ.....	185
6.5	第6章のまとめ.....	186
第7章	結論.....	189
7.1	本研究の総括.....	191
7.2	今後の展望.....	194
付録	既発表論文等一覧.....	197

第1章 序論

1.1 背景と目的

1.2 本論文の構成

1.1 背景と目的

本研究でも用いる「表層品質」という用語は、2000年代後半になって国内の土木・建築分野で頻繁に使われ始めた比較的新しいキーワードで、明確な定義はないが主に鉄筋コンクリート（RC）構造物におけるかぶりコンクリートの密実性あるいは物質透過抵抗性を指し示す言葉として位置付けられ、一般化しつつある。表層品質という用語あるいは概念の一般化には、コンクリートの表層品質の定量的な評価の重要性に着目した学会活動[1.1]である、土木学会コンクリート委員会「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335委員会）」が大きな役割を果たした。同委員会の関係者による2005年9月から2012年7月の第二期成果報告会までを一区切りとした約7年に渡る精力的な活動は、「実構造物におけるコンクリートの表層品質を定量的に確認する」という考え方を広めると同時に、関連した研究の活発化を促した。土木学会が例年9月に開催する全国大会の講演を例にとると、2008年の時点で表層品質をキーワードに指定した講演が1件と関連の講演が数件であったものが年々増加し、2015年には講演の標題に表層品質を含む講演が10件、キーワードに表層品質、透気性や透水・吸水性を指定した講演を含めると30件以上もの研究事例が見られる状況となった。

RC構造は所定の寸法を有したコンクリートが所定の位置に鉄筋を内包することによって成立するため、一般的なRC構造物の耐久性は鉄筋を腐食から保護するかぶりコンクリートの厚さと密実性に依存すると考えることができる。ここで、かぶりコンクリートの厚さはRC構造物の施工時の型枠と鉄筋の位置関係によって一義的に定まると考えられる。そのため、コンクリートが打ち込まれる前の段階で実施される配筋状態の検査、ならびにコンクリートが硬化して型枠が撤去された後に実施される非破壊検査で測定あるいは推定されるかぶりの値により、設計で想定した耐久性を確保するために必要なかぶりが確保されていることを実際の構造物で確認することが可能である。一方、実構造物におけるコンクリートの密実性は、使用材料、施工方法、施工後の環境条件など複数の要因で変動する。また、長期間の供用を前提とする構造物やかぶりの設計条件に制限のある構造部材においては、コンクリート表面から作用する劣化因子の侵入に抵抗するバリアとしてのコンクリート表層部の密実性が耐久性確保の面で重要となる。しかしながら、実構造物におけるコンクリートの密実性の優劣は、明らかに視認できるひび割れや表面気泡などの不具合の有無や多寡による場合を除き、外観の見た目ですべてを評価することは困難である。そのため、従来は施工と同時期に製作された標準供試体による圧縮強度、ならびに施工プロセスの管理によって実構造物のコンクリートには一定の密実性が確保できるものと見なし、コンクリートの密実性に関する直接的な情報については検査や評価の対象外とされてきた。表層品質は、RC構造の耐久性を支配する二要素の一つであるにもかかわらず、実構造物での状況は未確認で済まされてきたのである。

標準供試体の圧縮強度は、構造材料であるコンクリートの物性値として設計上は重要な指標であるものの、実構造物のコンクリートとは施工条件、曝露環境が異なるため、かぶり

コンクリートの密実性を代表する指標とするには不適當である。かぶりコンクリートの密実性に直接的な関係のある指標として考えられるのが、二酸化炭素、塩化物イオンや水といった各種物質の透過に対する抵抗性を表す、透気性や透水性に関する係数、塩化物イオン拡散係数や中性化速度係数といった指標である。これらの指標を実構造物から取得するためにコンクリートコア試験体のようなサンプルを採取することは、構造物の外観上あるいは構造上の理由などから実現が難しい場合が多い。そのため、塩化物イオン拡散係数ならびに中性化速度係数に関する実測値を実構造物から得ることは容易でない。一方、透気性や透水性に関連した指標については、構造物の表面に空気圧や水圧を強制的に作用させる器具を設置して非破壊的に評価値を取得する試験装置が実用化されており、実構造物への適用事例が複数報告されている。

近年、コンクリート構造物の耐久性確保の観点から実構造物におけるかぶりコンクリートの密実性を直接的に評価することの重要性が再認識されており、実構造物でコンクリートの透気性や透水性を評価するための各種の方法、すなわち表層品質の非破壊評価手法に関する研究が国内で活発化している。また、実際の構造物に対するかぶりコンクリートの品質向上、品質確保を達成するための産官学の連携による取り組みが盛んに行われており、国土交通省や地方公共団体の取り組みのほか、鉄道事業者では JR 西日本での取り組みなどが一般の雑誌等でも取り上げられている[1.2][1.3]。これらの事例において研究開発あるいは実構造物への適用の対象とされている表層品質の非破壊評価技術のうち、装置が市販されている実用化技術には、表層透気試験(トレント法[1.4][1.5])、表面吸水試験(SWAT 法[1.6][1.7])の二つの手法がある。

表層透気試験ではかぶりコンクリートの透気性に関する測定値が、表面吸水試験では吸水性に関する測定値が、それぞれ完全な非破壊で実構造物から取得可能である。しかしながら、両手法による表層品質の非破壊評価が構造物の検査実務に対して本格的に導入されることの実現性は低いと考えられる。その最大の理由は、両手法による測定に要する各種のコストである。両手法ではいずれも実構造物での測定実施に際して、高額な試験装置の使用、装置を駆動するための電源と作業スペースの確保、機材の運搬等を考慮した複数名の作業人員、といった費用、時間、労力の発生を念頭に置く必要がある。また、1 回の測定時間は最大でも 10 分程度であるが、機材の設置から作動に要する準備時間が 1 時間程度必要であるため、測定箇所は厳選する必要がある。

さらに、両手法に限らず、実構造物で表層品質を測定することに対する根本的な課題として、コンクリートが内部に水分を保持しており、かつその保持状態が屋外環境下では常に変動することの影響が不可避となる点がある。例えば高含水状態のコンクリートを対象としてトレント法による表層透気係数の測定を行った場合、内部の空隙を満たす水分が空気の移動を阻害するため、高い透気抵抗性を意味する測定結果がコンクリート本来の品質よりも割増しされた形で取得される。トレント法ではコンクリートの含水状態を考慮した補正方法が提示されているほか、若材齢のコンクリートで内部含水状態が比較的高い時期は

避けて測定を実施するといった配慮がなされることがある。しかし、実構造物の内部の含水状態を非破壊で正確に把握することは困難である。また、実構造物の内部含水状態は構造物の曝露環境によって常に変動し、含水率が低下あるいは上昇のいずれの過程にあるかを特定することは、型枠の取り外し直後で含水率が低下過程であると断定できる一部の時期を除くと困難である。そのため、実構造物を対象とした場合、トレント法などによって得られた測定値は、含水率の影響を除外できないことを前提とした不確かな値と見なす必要があり、そのような測定値を取得するために相応のコストを投じることに対して合理性を見出すことは難しい。

以上の背景の下、本研究では、今後建設される RC 構造物の耐久性向上に資すること、ならびに RC 構造物の保守に要する労力の低減に資することを目的として、構造物の検査あるいは調査の実務に対して導入可能なかぶりコンクリートの密実性（表層品質）に関する簡易な非破壊評価技術を確立し、社会に実装するための検討を行った。具体的には、乾燥したコンクリート表面に微量の水を散布してコンクリート表面における微量水分の吸水特性を定量化して表層品質を判定する「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」の着想を具現化し、一般に普及可能な技術の開発を行った。また、表層品質の非破壊評価において不可避となるコンクリートの内部含水状態の影響を、不確実な含水状態の評価値に依存しない方法で解消する測定手順を検討した。

1.2 本論文の構成

本論文は、全7章で構成される。第1章は序論とし、第2章ではコンクリート表層品質の非破壊評価に関する既往の研究を整理する。第3章から第5章は、本研究で開発、提案する表層品質の簡易評価手法「散水試験」の着想と手法開発に向けた試行の結果、また各種試験体や実構造物を対象とした屋内外での実験的検討の結果について述べる。第6章では散水試験の影響要因を整理するとともに、実用化した試験キットによる表層品質の簡易評価に関する一般での活用事例を紹介する。第7章は本論文の最終章として本研究の結論を示し、今後の展望を述べる。図 1.2.1 に、本論文の構成を示す。以下に、各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、ならびに本論文の構成を示した。

第2章「既往の研究」では、コンクリート表層品質の非破壊評価に関する既往の研究について概説する。

第3章「表層品質の簡易評価の着想と試行的検討」では、本研究で提案するコンクリート表層品質の簡易評価手法である「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」の着想ならびにその具現化に向けた事前検討内容、実構造物を測定対象として実施した試行的検討の結果を整理した。また、散水試験の検証において重要な要素となる表面色の定量的表現に関する基礎について記述するとともに、コンクリート表面色の定量的評価に関する既往の検討事例の概要、ならびにコンクリート構造物における表面色の測定結果を示す。

第4章「散水時の表面色変化特性に関する実験的検討」では、第3章における試行的検討によって得られた知見、明らかとなった課題を背景に、散水によって意図的に引き起こしたコンクリート表面色の変化特性を詳細に把握することを目的として実施した各種の試験体による実験的検討の結果を整理する。また、散水時の表面色変化特性に関する測定を実構造物の表層品質評価に適用するために重要となる測定作業の簡略化に関する検討結果を述べる。

第5章「散水後の水分挙動の目視評価による簡便性の追求」では、散水試験において副次的に発生する、散水によって瞬間的に吸収されない余剰の水分の滞留あるいは流下現象に着目し、これらの現象の発生メカニズムを検証するとともに、水の滞留および流下現象を利用した表層品質の簡易評価の実用性、散水試験の簡便性の追求について検討した結果を述べる。それらの検討結果に基づいて、測定者の手動による散水と目視による観察によって表層品質の簡易評価を行う「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」を提案する。

第6章「散水試験の影響要因、活用事例と応用技術」では、本研究で提案する散水試験の基本仕様を示すとともに、散水試験の影響要因に関する検討結果を整理する。また、散水試験を一般に普及するために開発した試験キットの概要、ならびに実用化した試験キットによる一般での散水試験の活用事例を紹介する。

第7章「結論」では、以上の結果を総括するとともに、今後の展望を示した。

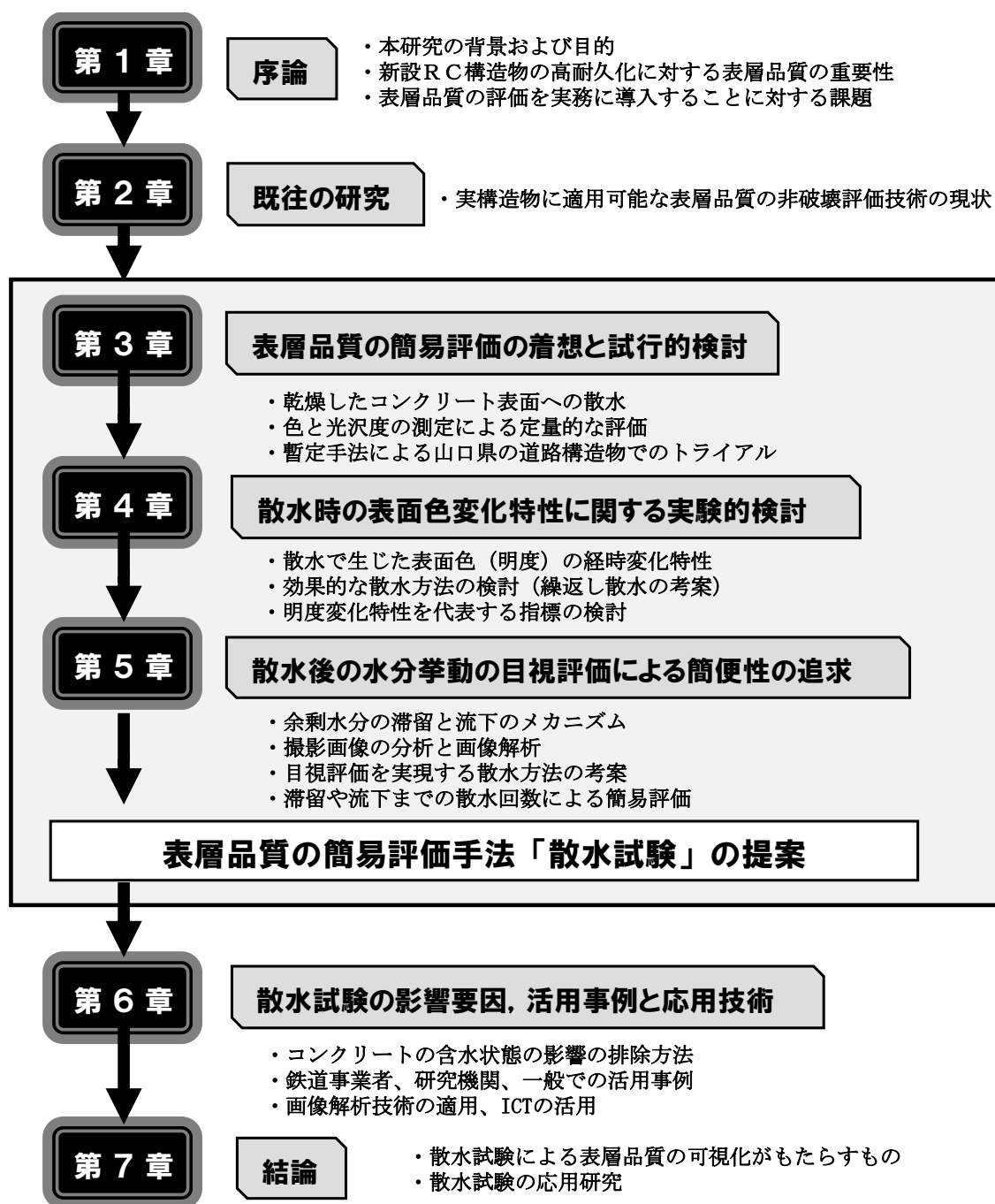


図 1.2.1 本論文の構成

◆ 手法の名称に関する補足

上述のような背景の下，本研究では，実構造物の表層品質に関する非破壊評価手法の開発に関して，検査の実務に対する適用性の観点から簡便性に優れた手法を確立することを目指し，コンクリート表面における散水時の水分逸散性状に着目した研究開発を2010年度より行ってきた。研究開発の当初，乾燥したコンクリート表面に少量の水分を散水した際の表面色の経時変化特性が各種品質のコンクリートで大きく異なった特徴を有することから，意図的な散水の前後の表面色を測定することで表層品質の評価を試みる独自の試験手法を「散水測色試験」と称し，表層品質の非破壊評価に活用可能な情報を簡易に取得できる可能性のある手法として提案した。研究の進展に伴い，「測色」は「散水」によって生じたコンクリート表面での諸々の変化を評価する一手段であり，「散水」という行為自体が手法の主たる特徴となる可能性が見い出されたことから，考案した独自の手法の名称を「散水試験」と改めている。また，散水試験の開発における主目的と位置付けている簡便性を追求した検討を進める中で，鉛直面に手法を適用した際に観察される水の滞留に伴う流下現象に新たな着想を得て，測定機器を要しない簡易版の手法を「散水試験・A法」，表面色の計測を行う詳細版の手法を「散水試験・B法」として整理し，手法を再構成した論文を発表している。

本論文は，名称に関して上述のような変遷を経た，散水によってコンクリートの表層品質を簡易に評価する手法である「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」の開発，ならびに実構造物の検査実務への導入に関する一連の研究成果を取りまとめたものである。

参考文献

- [1.1] 公益社団法人土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，土木学会コンクリート技術シリーズ，No.97，2012.7
- [1.2] 日経BP社：特集記事 新設コンクリート革命，日経コンストラクション，2014年11月24日号，p.34，2014
- [1.3] 熱血ドボ研 2030：新設コンクリート革命 長持ちするインフラのつくり方，日経BP社，2017
- [1.4] Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, July 1992
- [1.5] Torrent, R. and Frenzer, G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992. 1995
- [1.6] 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013.3
- [1.7] 林和彦，細田暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011

第2章 既往の研究

2.1 概説

2.2 表層品質の非破壊評価に関する研究

2.2.1 表層透気試験

2.2.2 表面吸水試験

2.2.3 流水試験

2.3 他用途の非破壊試験手法による表層品質の非破壊評価に関する研究

2.4 第2章のまとめ

2.1 概説

本章では、実構造物の表層品質を非破壊で評価する各種の手法に関する既往の研究を整理する。実構造物で表層品質を測定する技術に関する研究は海外で 1970 年前後から見られ、Levvit は吸水性を評価する試験法として ISAT (Initial Surface Absorption Test) [2.1]を 1969 年に、Figg は吸水性と透気性を評価する試験法[2.2]を 1973 年に発表している。黎明期ともいえる時期に考案された手法は、給水容器や測定装置の支持あるいは物質を透過させるために削孔を伴う方法あるいは樹脂等で接着する方法となっている。1992 年に Torrent が提案した透気性の測定技術であるトレント法[2.3][2.4]は、真空ポンプを利用することで完全な非破壊での測定を実現し、かつ圧力を作用させるチャンバーを二重構造とすることで測定精度を向上させた。トレント法は、2003 年にはスイスの標準規格 SIA262 においてかぶりコンクリートの品質に関する非破壊検査に適用する手法として例示される標準的な手法となっている[2.5][2.6]。ここでは、特に本研究の目的とした実構造物の検査の実務に導入可能な技術の観点に立ち、装置が市販化されている実用化技術であり国内での報告事例が多数見られる、トレント法による表層透気試験、SWAT 法による表面吸水試験[2.7][2.8]を中心に、実構造物の表層品質評価に関する現状を論じる。トレント法および SWAT 法は完全に非破壊で実施できるため実構造物への適用事例が増えているほか、表層品質の向上効果の確認や品質向上技術の検証を目的とした利用事例も複数報告されている。国土交通省東北地方整備局が 2015 年 12 月に発行した「コンクリート構造物の品質確保の手引き (案)」では、コンクリート表層の緻密性の評価に使用する非破壊試験手法としてトレント法と SWAT 法を活用することが明記され、表層品質の非破壊評価手法を実務に活用することで新設コンクリート構造物の品質向上に寄与することが期待されている。以下、2.2 節では、コンクリート表層の透気性あるいは透水性を評価する手法に関する既往の研究について述べる。また、2.3 節では、他用途で実用化された非破壊試験装置を表層品質の非破壊推定に適用した既往の研究について述べる。

2.2 表層品質の非破壊評価に関する研究

2.2.1 表層透気試験

表層透気試験は各種の手法が提案されているが、いずれの手法も基本的には実構造物のコンクリート表面に空気圧を作用させることで得られる表層の透気係数によってコンクリートの透気性を評価する手法である。図 2.2.1 に、表層透気試験の概略を示す。国内における近年の報告事例においても、空気圧を作用させる際にコンクリート表面の削孔を伴う方法と、コンクリート表面に吸引カップを設置して完全な非破壊で実施する方法とがあるが、ここでは吸引カップによる非破壊試験方法について述べる。

表層透気試験による透気係数の測定は構造物の表面に設置した吸引カップに圧力を作用させて、圧力の変化速度を測定することによって行われる。実構造物で透気係数を測定できる試験装置が国内外で複数提案されているが、吸引カップの構造により、トレント法に代表されるダブルチャンバー方式のほか、シングルチャンバー方式、トリプルチャンバー方式と呼ばれる方式が存在する。シングルチャンバー方式はダブルチャンバー方式に比べて装置の構造が単純であるため、測定時の操作が容易かつ測定時間を短くできるという利点を有していたが、装置の量産化と市販化が達成され近年広く使用されているダブルチャンバー方式のトレント法の装置では気圧の制御等の操作が自動化されており、シングルチャンバー方式の有していた利点は装置の利用者の立場においてはほとんど意味をなさなくなっている。

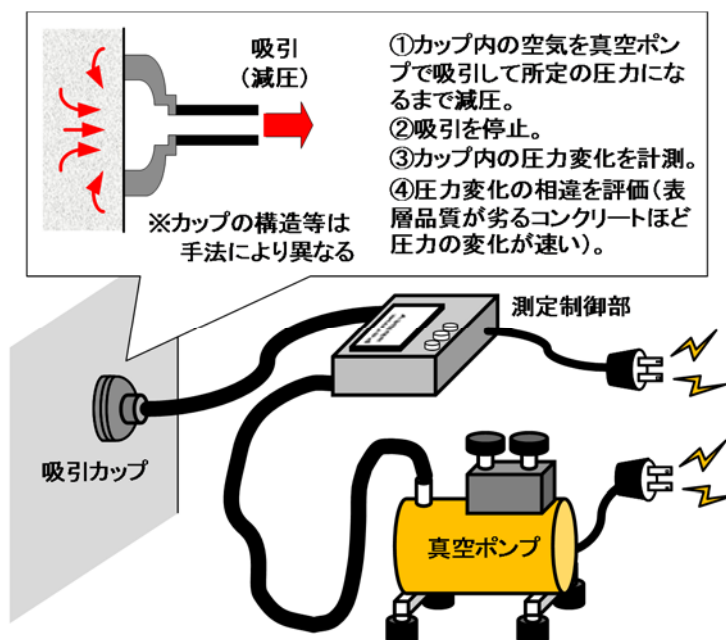


図 2.2.1 表層透気試験の概略

いる。また、ダブルチャンバー方式ではシングルチャンバー方式で影響が大きいとされるコンクリートのごく表層部が透気の経路となる点が軽減され则认为られている。しかしながら、シングルチャンバー方式の測定装置を使用して表層品質を検証した研究の歴史は古く[2.9]、知見が蓄積されている。そのため、シングルチャンバー方式は近年でも研究上のツールとして活用されている[2.10][2.11]。そのほかに、シングルチャンバー方式で樹脂被覆による透気領域の制限を併用したシール法と呼ばれる方法[2.12][2.13][2.14]、吸引カップ内を同心円状に3層の構造としたトリプルチャンバー方式と呼ばれる方式[2.15]のほか、同一の装置で透気性と吸水性を計測するダブルチャンバー方式[2.16][2.17][2.18]が提案されているが、いずれも開発した研究機関等における検討事例の報告に留まっており、一般での導入を検討可能な段階にない。そのため、論文等による国内での表層透気試験に関する報告事例の多くはダブルチャンバー方式での装置が市販されているトレント法によるものである。そこで、ここではトレント法を適用して実施された表層透気試験に関して既往の研究による知見を整理する。

図2.2.2に、トレント法による表層透気試験の測定風景を示す。室内試験での検討により、透気係数と促進中性化速度に相関が見られることが示されている[2.19]。また、材齢40年程度を経過したRC建築物において表層透気係数が0.1以下の場合には中性化の進行がほとんど見られなかったことが報告されている[2.20]。一方で、透気係数はコンクリートの含水状態の影響を受け、材齢の経過に伴って測定値が変化することが多くの報告により明らかとなっている[2.21][2.22][2.23]。材齢の経過に伴う含水状態の変化は、表層透気試験のみならず表層品質を実構造物で評価するすべての方法において避けることのできない影響要因となる。田中らは、新設構造物に対して表層透気試験を適用する際は、屋内環境において材齢28



図 2.2.2 トレント法による表層透気試験の測定風景

日以上を経過した段階であれば材齢初期の含水状態あるいは空隙構造の変化の影響を低減できるとしている[2.24]。しかしながら、屋外環境下では含水状態の変化が緩慢であり表層透気試験において含水状態の影響が無視できる段階に至るまでには相当の年月を要することと言及した報告もある[2.25]。表層透気試験ではコンクリートの表層の水分量が影響することから、水分量の挙動に依存して生じる乾燥収縮による微細ひび割れの発生程度と透気係数には関係性が見られること、微細ひび割れの密度が一定値以上となるとその関係性に変化が生じることが寺澤らによって明らかにされている[2.26]。加藤らによる一連の研究において、ブリーディング水の挙動の影響によると考えられる高さ方向での透気係数の相違が指摘されており、コンクリートのブリーディング量や打込み高さによって透気係数が変化する可能性が示唆されている[2.27][2.28][2.29]。表層透気試験の検証を通じて得られた知見はブリーディング水の挙動に関する研究[2.30][2.31]に活かされており、トレント法が研究上のツールとして有用であることは多くの事例が証明している。一方、表層透気試験による実構造物の評価に対する信頼性に関して、同一の試験体でも測定位置により測定結果が大きく異なる場合があるといった課題も指摘されている[2.32][2.33]。また、トレント法では表面から最大で深さ 50mm までの範囲が測定の影響領域となることが示唆されているが[2.34]、ごく表層に透気性の高い脆弱層を設定した試験体の実験により、最表層部が透気係数の支配的要因となることが明らかとなっている[2.35]。同様に、表面に仕上げ材が施されたコンクリートにおいては最表面の仕上げ材が測定対象となり、背面側の母材コンクリートの透気係数は取得できないことも確認されている[2.36]。

以上、吸引カップにより透気性を評価する手法の概略を述べた。なお、削孔を伴う方法については、国内では笠井らが 1990 年前後に確立した手法[2.37]に始まり、野中らが近年提案した手法[2.38]においても変わることなく構造物に対して直径 10mm、深さ 50mm 程度の規模で損傷を与えることになる。そのため、非破壊ではなく微破壊試験として区別される場合もある。しかしながら、削孔を伴う方法に関して、削孔によってコンクリートの表層だけでなく内部の品質を捉えることができるため、吸引カップによる方法において指摘されている仕上げ材を有するコンクリートに対する適用性の課題[2.36]や、表面の脆弱層が透気係数に及ぼす影響[2.35]を回避できることから、適用の条件によっては吸引カップによる方法に比べて有用となる場合がある。削孔による方法と吸引カップによる方法を組み合わせて使用する方法も提案されている[2.11]。

一方、従来は透気性を計測するために真空ポンプ等で圧力を作用させた上で計器により圧力を制御し、精緻に圧力変化を計測することで透気係数を測定する技術の確立に目が向けられてきたが、近年、注射器のようなシリンダーを用いた方法が考案され、実用化が進められている[2.39][2.40][2.41]。シリンダーを用いた方法によりトレント法による表層透気係数と同様の評価が可能であることが示されており、表層透気試験の導入に対する費用面の課題を解消し得る手法となることが期待されている。

2.2.2 表面吸水試験

コンクリート表面から水分を供給し、コンクリート内部に吸収された水量に基づいて吸水抵抗性を評価する手法は表層透気試験と同様に各種が提案されている。物質透過抵抗性の評価対象とする物質として空気よりも水の方が制御は容易と考えられるためか、透気性に関する試験よりも吸水抵抗性に関する試験の歴史は古く、1973年にFiggが透気性試験を発表する3年前の1970年にはイギリスで吸水試験がBritish Standard[2.42]として規定されている。前に述べた表層透気試験と同様に実構造物を測定対象とした表面吸水試験においても、削孔を伴う微破壊試験と給水用の容器を接着等の方法で設置する非破壊試験がある。ここでは、削孔を伴わない非破壊試験方法としての表面吸水試験について概要を述べる。

表面吸水試験は、構造物の表面に給水用のカップを設置し、カップ内に注入した一定量の水が一定の時間内にコンクリート内部へと吸収される量を計測することによって吸水速度を算出し、コンクリートの吸水抵抗性を評価する方法である。図 2.2.3 に、表面吸水試験の概略を示す。給水カップの設置に接着剤を使用する方法と、近年、林・細田らによって提案された SWAT 法(Surface Water Absorption Test)[2.7][2.8]のように圧力を付加する装置によって支持する方法がある。また、吸水量の計量はメスシリンダーの目盛を目視で読み取る方法によって行うのが一般的であったが、SWAT 法では水圧センサを給水カップに内蔵し、水圧

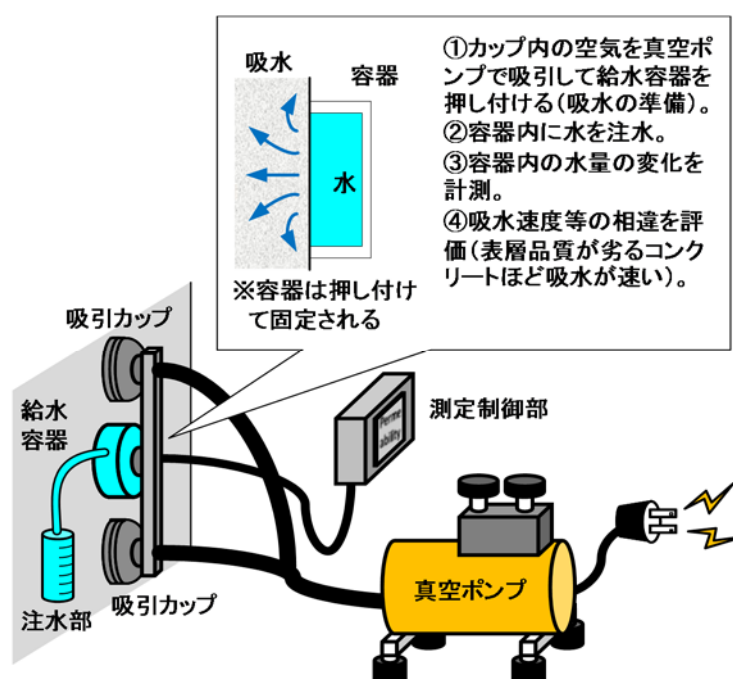


図 2.2.3 表面吸水試験の概略 (SWAT 法をイメージ)

の変化に基づいて吸水初期からの吸水量を連続的に測定する方式が採られており、作業性が大幅に改良されている。SWAT 法の試験装置が開発される以前は、樹脂等を用いて給水容器を設置し、水量を目視で計測する方法を用いた吸水試験方法が一般的であり、SWAT 法の原型となった方法も同様であった[2.43][2.44][2.45]。これは、測定対象が実構造物であり非破壊での計測に強いニーズがあり削孔による方法は敬遠されたこと、国内で規格化された表面含浸材の試験方法(JSCE-K571)や建築用仕上塗材に対する透水試験方法(JIS A 6909)が目盛りの付いた給水用の器具を樹脂等で固定して使用するものとなっており、それをベースに検討がすすめられたことが大きな理由と考えられる。2006 年に成果報告が行われた土木学会コンクリート委員会（325 委員会）において、コンクリートの表面被覆材料や表面改質技術の性能を実構造物で検証するための試験方法の検討が行われており、複数の機関で表面吸水試験装置の開発が進められた。壁や柱などの鉛直面の測定に適用可能な試験装置を検討した例があり、試験装置と壁面との間からの漏水が問題となるなど、試験装置の設置方法と測定方法に対する課題が報告されている[2.46][2.47]。これらの既往の知見を受けて細田らによる実験的検討[2.48][2.49]が進められ、2011 年に提案された SWAT 法は、実構造物に適用する表面吸水試験として国内で一定の地位を確立しており、国土交通省東北地方整備局が 2016 年に定めた「コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）」に記載された吸水抵抗性の測定に関する唯一の試験手法となっている。

SWAT 法による表層品質の評価指標は、10 分間の吸水量、10 分時点での吸水速度が提案されている。実環境下における鋼材腐食、凍害、アルカリ骨材反応といった各種の劣化現象は、加圧を伴ったコンクリート内部への物質移動現象を捉えた評価値とは必ずしも対応しない可能性があるとの見解に基づき、SWAT 法では加圧による水の圧入は行われていない。

SWAT 法によるコンクリート内部の水分移動に関する分析、測定装置の改良に関する報告などが見られ、近年でも関連の研究が精力的に進められている[2.50][2.51][2.52][2.53]。また、表層品質に関連した研究での適用例のほか、前述のように国土交通省の手引きにも記載された SWAT 法は、建設現場でのコンクリート品質向上に対する取組みの検証手法としての活用事例が増えている[2.54][2.55][2.56]。しかしながら、SWAT 法は本研究で求めるレベルの簡便性を手法の開発コンセプトにしたものではなく、Levvit が 1969 年に提案した ISAT に起源を有したコンクリートの吸水抵抗性を実構造物で精緻に計測する手法である。SWAT 法の試験装置は実務者が容易に扱えるものではなく、実務への導入は難しい手法と言える。

2.2.3 流水試験

流水試験とは、コンクリート表面に少量かつ一定量の水を付与した際に水が流下する距離を計測し、水の流下距離によって表層品質を評価する手法である。従来、コンクリート表面からの吸水を抑制するために施工された含浸材等の効果を確認する際などに、コンクリート表面へ少量の水をかける方法が実務者の間では行われてきた。水掛法[2.43]とも呼ばれるこのような定性的な評価方法を定量的に扱うことを目的とした検討例[2.44]が見られ、浸

透性吸水防止材の施工の有無が 5ml ほどの水を散布した際の水の流下距離で比較可能であり、簡易かつ定量的な手法としての可能性が提示された。しかしながら、研究の進展は報告されておらず汎用的な手法として確立されるには至らなかった。検討の詳細は報告されていないため不明であるが、一定量の水を安定的に付与する方法が見い出されなかった、流下距離のばらつきに対する懸念、流下距離の計測を必要とすることが作業性の面で問題視された、といった事由が課題となったものと推測される。これらの課題のうち、一定量の水を安定的に付与する方法として、マイクロピペットと呼ばれる理化学実験用の器具を用いることが家辺・岸らにより提案された[2.57][2.58]。家辺・岸らの提案する繰返し流水試験は、地濃らがコンクリート表面の劣化事象を把握する指標として検討した水の流下距離に関する実験の方法[2.59]を参考としたとされている。地濃らの採用した方法では詳細が論文中で明記されていないものの、水量は 0.2ml で 1 回の付与であったのに対して、繰返し流水試験では 15 μ l という微量の水を同一箇所で繰返し付与する方法となっている。繰返し流水試験では、マイクロピペットによる微量の水滴の滴下を同一箇所に対して一定の時間間隔で繰返し行い、水滴の流下距離を計測し、表層品質の劣るコンクリートでは流下距離が小さくなるという仮定に基づいて表層品質の簡易評価が行われる。繰返し流水試験の開発段階において、土木学会 335 委員会の活動を通じて本研究の知見を提供したため、繰返し回数を指標とした簡易評価の方法など、本研究で提案する散水試験と通ずる部分がある。なお、流下距離のばらつきに対する懸念に関して、繰返し流水試験においては鉛筆等を用いてコンクリート表面にあらかじめ流下経路の罫書きを行う方法が考案され、流下距離の安定化が図られている[2.60]。繰返し流水試験では、水を 5mm 程度の幅で 100~300mm 程度の長さまで流下させる必要があるため、流下経路上に存在するコンクリート表面の気泡や不陸などの水の流下を阻害する要因による影響を受ける。また、300mm 程度の流下領域におけるどの範囲を評価対象としているのかが不明確な点は根本的な課題とも考えられる。しかしながら、使用する測定機材が有する利点として、本研究で提案する散水試験と同様に小規模であること、トレント法や SWAT 法に比べて 1/50 程度のコストで入手可能であること、付与する水の量を一定量とできることなどの特長があることから、知見の蓄積が進められており[2.61]、研究のさらなる進展が期待されている。

2.3 他用途の非破壊試験手法による表層品質の非破壊評価に関する研究

主にコンクリートの強度推定で利用される既存の検査機器により表層品質の間接的な評価を試みた検討例が見られる[2.62][2.63]。例えば、衝撃弾性波や超音波を利用した手法があり、コンクリート表面に衝撃弾性波や超音波を作用させることで得られる種々の測定値から圧縮強度を推定する試験装置が市販されており、それを表層品質の推定に用いるものである。これらの手法はバッテリー駆動の小型機器を用いるなど作業性に優れるため、実構造物の検査に対する適用が比較的容易であり、強度推定に対する実績は相応にあるものと推測される。しかし、測定値の解釈や測定の実施に専門性を要するため、測定は専門業者に依頼するのが一般的であり、検査の実務に対する適用性は低い。反発度法のように測定原理と測定値の理解が比較的容易な技術および測定機器を利用した表層品質の簡易評価手法を確立することができれば有用となるが、現状では見当たらない。反発度法に関しては、表層品質の評価に対する適用性が低いことを報告した事例も見られる[2.64][2.65]。

森濱は、土研法で得られる超音波伝搬速度の分布によりコンクリート試験体の内部と表層部とでの品質差を判定できる可能性を提示しており[2.62][2.66]、また音速分布が衝撃弾性波を発生させる際の鋼球接触時間[2.63]や貫入抵抗値 [2.67]と相関を有することを報告している[2.68]。しかしながら、波動の伝搬物質であるコンクリートの力学的な性質に依存すると考えられるこれらの評価指標を物質透過性の推定に適用することの妥当性については検証がなされていない。岩野ら[2.69]は、衝撃弾性波法と微破壊試験を併用することで構造物コンクリートの圧縮強度が 15%程度の誤差で推定できることを報告している。また、コンクリートの細孔容積と圧縮強度が相関を有することも明らかにされている[2.70]。一方で、酒井ら[2.71]が指摘しているように、物質透過性は細孔容積の総量ではなく物質の透過に影響する特定の空隙径の存在に依存する可能性があり、コンクリートの力学特性、例えば圧縮強度が同等でも物質透過性が異なる場合があるのは確実である。そのため、力学特性により変化し得ると考えられる評価指標で物質透過性の絶対的な評価指標を推定するためには、力学特性と物質透過性の依存度を明らかにする必要がある。

以上のことから、測定原理が物質透過性との直接的な関係性を有していない手法を表層品質の非破壊評価に適用することについて、本研究では合理的な理由はないものと判断した。

2.4 第2章のまとめ

本章では、表層品質の非破壊評価に関する研究の現状を整理した。実構造物の表層品質を評価することを目的とした手法に関する研究は多々あるものの、本研究で手法開発の主眼に置いている「構造物検査の実務への適用性」に関して詳細な検討を行った事例はほとんどないことが確認された。現在、提案されている各種の試験手法は、専門家によって調査や研究に使用されるものである。

表 2.4.1 に、実構造物の表層品質に関する非破壊評価手法の現状を簡易手法と詳細手法およびその他の 3 種類に大別して整理したものを示す。ここでの簡易手法と詳細手法の区別は、竣工検査員が実務で利用可能かどうか、また機材等の規模やコストが実務に導入可能かどうかを筆者が主観的に判断した。また、本章で整理した非破壊評価手法とは別に、目視でコンクリート品質を項目別に 5 段階程度の評価を行う目視評価法[2.72]が提案されており、表層品質の簡易な評価手法と表現される場合があるが、評価の対象がひび割れや表面気泡といった不具合の有無や多寡であり、本研究で対象とする表層品質とは異なる項目であるため、表 2.4.1 では「その他」として区別した。

簡易手法には、表層透気試験を簡易に行う方法が近年検討されているほか、水を利用する手法と、表層品質とは異なるコンクリートの特性を評価するために開発された技術を表層品質の推定に応用した手法がある。水を利用した簡易手法には、本研究で提案する散水試験のほか、繰返し流水試験、電気抵抗率試験の 3 手法がある。本研究と同様に簡便性に主眼を置いた繰返し流水試験は、コンクリート表面に少量の水を流下させた際の水の流下距離から表層品質を評価する手法で、表層透気試験などと同程度の精度で表層品質を評価できる可能性が示唆されており、さらなる研究開発の進展が期待されている。しかしながら、コンクリート表面の気泡や不陸などの水の流下を阻害する要因の影響度合いが散水試験より大きく現れる点が原理的に不可避の課題となる。電気抵抗率試験は散水試験や繰返し流水試験とは異なり、水の挙動ではなく水の供給による電気抵抗の変化を測定して表層品質を推定する手法である[2.73]。そのため、次に述べる実用化技術の応用による簡易手法に近い手法となる。実用化技術の応用による簡易手法には、コンクリートの圧縮強度の非破壊検査を目的とした既存技術で表層品質を間接的に評価する方法がある。例えば、衝撃弾性波や超音波を利用した手法である。これらの手法は実構造物の非破壊検査用に実用化されたものであり、作業性に比較的優れているものの、表層品質の評価に対する適用性には課題が残されている。

実構造物の表層品質評価を目的に開発された詳細手法として、コンクリート表面から内部の透気性や吸水性を直接的に評価する表層透気試験、および表面吸水試験が国内外で実用化されている。これらの手法のいくつかは製品化されており、大学等の研究機関、大手の建設会社や調査専門のコンサルティング業者等によって実構造物の表層品質評価に適用されている。また、表層品質の向上効果や施工技術の進歩を実証するための手法として使われることも多い。しかしながら、いずれの手法も外部電源を必要とし、測定場所や設備の確保

などで相応の事前準備を伴うほか、真空ポンプの作動状況が測定結果にも影響する表層透気試験では、装置の暖気運転とキャリブレーションに数十分～1時間程度の時間を割く必要があるという作業性の面での課題がある。そのため、これらの手法を検査の実務に適用する場合、測定箇所を絞り込んだ上での詳細検査用や、物質透過性に関する精緻な検証用といった用途とするのが現実的と思われる。

なお、ここでは「その他」に区分した目視評価法は、コンクリートの外観上の不具合を建設に携わる施工者が自ら確認(Check)することで、施工上の改善や工夫の方法を検討して実施し(Action)、施工の計画(Plan)と実施(Do)に反映させるPDCAサイクルを機能させるために考案された手法である。目視評価法では、コンクリートの外観上の不具合の有無や多寡が、

表 2.4.1 表層品質の非破壊評価手法

区分	名称	手法の概要	特徴	留意点
簡易手法	簡易透気試験 [2.41]	コンクリート表面に注射器状のシリンダーを接着し、シリンダー内の圧力変化を評価する	軽装、機材が安価、準備にやや時間を要する、測定は容易だが時間を要する	研究段階の手法 接着剤を使用する
	散水試験	スプレーで散水して吸水性状を評価する	軽装、機材が安価、準備が短時間、測定が容易	本研究で提案する手法
	繰返し流水試験 [2.60]	ピペットで水を滴下して水の流下性状を評価する	軽装、機材が安価、準備が短時間、測定が容易	コンクリート鉛直面のみに適用可能
	電気抵抗率試験 [2.73]	コンクリートを水で濡らして電気抵抗率を評価する	軽装、準備が短時間、測定はやや特殊	含水状態等の推定技術で専門性が求められる
	衝撃弾性波法 [2.69]	鋼球で打撃を行い衝撃弾性波の発生状況等を評価する	軽装、準備が短時間、測定はやや特殊	強度特性の推定技術で専門性が求められる
詳細手法	超音波法 [2.68]	発信端子と受信端子間の超音波の伝播性状を評価する	軽装、準備が短時間、測定はやや特殊	強度特性の推定技術で専門性が求められる
	表層透気試験 (トレント法) [2.3]	コンクリート表面に設置した吸引カップ内の圧力変化	機材が多い、準備に1時間程度を要する、測定が容易、装置は高額	ダブルチャンバー方式、装置は市販化されており小型化した最新式が近年登場した
	表層透気試験 (その他) [2.11][2.12][2.15]	状況で透気性を評価する	詳細不明(提唱者以外の実施は困難と思われる)	シール法、シングルチャンバー法、トリプルチャンバー法など
	表面吸水試験 [2.7]	コンクリート表面に設置するカップ内に満たした水の吸水性状を評価する	機材が多い、準備にやや時間を要する、測定はやや特殊、装置は高額	SWAT法の装置は市販化
	透水性・透気性試験 [2.16]	ダブルチャンバー方式で表層透気試験と表面吸水試験を同一箇所で行う	機材が多い、準備にやや時間を要する、測定はやや特殊、装置は高額	透水性の測定時には接着剤を使用する
その他	目視評価 [2.72]	コンクリート表面の状態を目視で評価する	軽装、機材は不要、準備が短時間	コンクリート品質の管理手法のひとつ

施工を原因として発生することが多い不具合の種類ごとに目視で採点され、点数によって定量的に表現される。目視評価法によってコンクリートの出来栄は確実に改善され、物質透過抵抗性としての表層品質も結果的に向上することが確認されている[2.74]。近年、新設される構造物の品質確保、品質向上に取り組む実施工の現場における活用や検証の事例が複数報告されている[2.54][2.55][2.75][2.76]。

鉄道高架橋のような RC 構造物では調査箇所が膨大となるという避けがたい現実がある。例えば、新幹線に限った場合でも高架橋柱の数量は全国で 15 万本を超す量がある。また、踏切による交通遮断の解消を目的とした高架化工事では高架化区間の規模にもよるが数 100 本のオーダーで RC 高架橋柱が新設される。このように膨大な数量の構造物に対して表層品質の調査を実施することを考えた場合、可能な限り簡易な方法による一次的な診断を実施し、その結果を受けて必要に応じて詳細な調査を実施する、というように段階的な調査を実施するのが合理的である。人体の診察においても検査が段階的に実施されるのと同じである。そのため、本研究の目的とした簡易な評価手法の確立こそが急務と言える。

参考文献

- [2.1] Levitt, M. : An assessment of the durability of concrete by the initial surface absorption test, International Symposium Durability of Concrete -1969 Preliminary Report Part 1, Academia, Prague, pp.A29-A42, 1969
- [2.2] Figg, J. W.: Methods of measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-219, 1973.12
- [2.3] Torrent, R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, July 1992
- [2.4] Torrent, R. and Frenzer, G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992. 1995
- [2.5] 半井健一郎, Roberto J. Torrent : 表層透気試験（トレント法）の実務展開, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.595-600, 2014
- [2.6] 半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治 : かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査～スイスにおける指針案～, コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011
- [2.7] 林和彦, 細田暁 : 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.3
- [2.8] 林和彦, 細田暁 : コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1769-1774, 2011
- [2.9] Basheer, P. A. M. : A brief review of methods for measuring the permeation properties of concrete in situ, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings,

Vol.99, Issue1, pp.74-83, 1993.2

- [2.10] 山崎順二, 今本啓一, 田中章夫, 加藤猛: 透気性試験における繰返し測定および試験機の検定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1921-1926, 2017
- [2.11] 加藤猛, 今本啓一, 清原千鶴, 山崎順二: 仕上材を有するコンクリートの透気性評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.595-600, 2017
- [2.12] 河合慶有, 國方翔太, 氏家勲: 現場透気試験によるかぶりコンクリートの耐久性能評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2140-2145, 2014
- [2.13] 村上賢晃, 氏家勲, 河合慶有: 自然環境下の表層コンクリートに対する透気試験を用いた耐久性能推定手法の適用可能性, Vol.38, No.1, pp.2007-2012, 2016
- [2.14] 氏家勲, 岡崎慎一郎, 中村翼: コンクリート構造物における現場透気試験方法の改善に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, pp.189-195, 2009
- [2.15] 蔵重勲, 廣永道彦: コンクリートに内在する深さ方向の透気性分布を評価可能な非破壊試験法の開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-009, pp.17-18, 2012
- [2.16] 高橋典子, 白谷祐太, 豊福俊泰, 永松武則: ダブルチャンバー透水性・透気性試験機による表層コンクリートの非破壊検査法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2025-2030, 2016
- [2.17] 大久保誠, 中井裕司, 辻総一郎, 豊福俊泰: ポリマーセメントモルタルの耐久性能の非破壊検査による評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1953-1958, 2016
- [2.18] 豊福俊泰, 高橋典子, 永松武則, 細川土佐男: ダブルチャンバー透気性試験・ダブルチャンバー透水性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の技術開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1801-1806, 2015
- [2.19] 今本啓一: コンクリート表層の透気試験方法の課題と現状, 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ No.80, pp.333-344, 2008.4
- [2.20] 田中章夫, 今本啓一: 表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.691, pp.1539-1544, 2013
- [2.21] 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012
- [2.22] 蔵重勲, 廣永道彦: 脱型材齢や曝露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.623-628, 2010.6
- [2.23] 古賀裕久, 渡辺博志, 木村嘉富: 含水率が現場透気試験結果に与える影響に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-257, 2010.9
- [2.24] 田中章夫, 今本啓一, 清原千鶴: 新設コンクリート部材における水分特性と表層透気性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 733, pp. 313-320, 2017
- [2.25] 蔵重勲, 西田孝弘, 秋山仁志, 岸利治: 中規模柱試験体を対象とした非破壊評価によ

- る表層品質の要因分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1835-1840, 2011
- [2.26] 寺澤正人, 槇島修, 川里麻莉子, 鈴木基行: 乾燥収縮による微細ひび割れの発生程度と透気試験結果の関係性に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.4, pp.338-347, 2015
- [2.27] 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012
- [2.28] 早川健司, 加藤佳孝: かぶりコンクリートの品質に及ぼす配合および施工方法の影響, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4 pp.399-409, 2012
- [2.29] 加藤佳孝, 早川健司: 表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の係に關する一考察, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.410-421, 2012
- [2.30] 三田勝也, 加藤佳孝: コンクリートの表面欠陥が塩分浸透性に及ぼす影響に關する実験的検討, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.1, pp.93-106, 2017
- [2.31] 三田勝也, 加藤佳孝: 型枠界面に生じるブリーディング水の挙動に關する実験的検討, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.4, pp.385-397, 2015
- [2.32] 古賀裕久, 大石龍太郎, 渡辺博志, 田口史雄, 遠藤裕丈: 実橋床版を用いた透気試験の適用性検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.45-50, 2009.10
- [2.33] 古賀裕久, 山田宏, 渡辺博志: 材料分離を生じたコンクリートへの非破壊試験の適用性に關する実験的検討, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.345-352, 2012.8
- [2.34] 渡邊晋也, 野島昭二, 藤原貴央, 谷倉泉: コンクリート中の水分量が表層透気試験の透気係数および測定深さにおよぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2001-2006, 2016
- [2.35] 温品達也, 坂田昇, 渡邊賢三, 柳井修司: 表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に關する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1738-1743, 2012
- [2.36] 庭野究, 今本啓一, 陣内浩, 清原千鶴: 非破壊透気試験を用いた仕上げ材を有するコンクリートの中性化速度の評価方法に關する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.722, pp. 655-663, 2016
- [2.37] 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 簡易な試験による構造体コンクリートの品質評価の試み, セメント・コンクリート, No.559, pp.20-28, 1993.9
- [2.38] 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.711, pp.727-734, 2015
- [2.39] 面矢建次郎, 渡辺健, 関川昌之, 橋本親典: 各種シリンダーを用いた簡易透気試験による表層透気性の評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1975-1980, 2017
- [2.40] 三宅純平, 山田悠二, 渡辺健, 橋本親典: 各種要因がシリンダーを用いた簡易透気試験

- に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1995-2000, 2016
- [2.41] 渡辺健, 山口喜堂, 廣本達也, 橋本親典, 石丸啓輔: シリンダーへの空気流入を利用した簡易透気試験に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.15, pp.319-324, 2015.10
- [2.42] British Standard Institution : Methods of testing hardened concrete Part5, BS1881, 1970
- [2.43] 浅野幸男, 加藤久也, 六郷恵哲: コンクリート用撥水材の防水効果を現場で簡便に評価するための透水試験方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2009-2014, 2006.6
- [2.44] 芦澤良一, 松田芳範, 林大介, 坂田昇: 実構造物に塗布した浸透性吸水防止材の長期耐久性および現位置吸水試験方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.655-660, 2008.6
- [2.45] 石川真穂, 細田暁, 小林薫, 松田芳範: 表面含浸材を施した実構造物における吸水抑止効果の評価方法に関する研究, 第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.324-325, 2007.5
- [2.46] 綱島和彦, 松田芳範, 津吉毅, 石橋忠良: 撥水・浸透系防水塗膜材の曝露試験 3 年目の評価について, コンクリート技術シリーズ 68, コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告, pp.225-236, 2006
- [2.47] 叶健児, 石川一郎, 守屋進: 浸透性コンクリート保護材の性能評価に関する検討, コンクリート技術シリーズ 68, コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告, pp.255-264, 2006
- [2.48] 細田暁, 林和彦, 下田智也, 吉田早智子: コンクリート表層のマイクロクラックが表面の吸水性と透気性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.196-203, 2010.2
- [2.49] 下田智也, 細田暁, 松田芳範, 小林薫: 含水率による表層の吸水抵抗性と表面含浸材の効果の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1613-1618, 2010.6
- [2.50] 林和彦, 細田暁, Usman AKMAL, 藤原麻希子: コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1804-1809, 2012.6
- [2.51] 林和彦, Usman AKMAL, 細田暁: 埋込みセンサーを用いたコンクリートの表面吸水試験における水分移動の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1789-1794, 2013.6
- [2.52] 小松怜史, 田島涼, 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験における計測データのノイズ処理アルゴリズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2043-2048, 2016
- [2.53] 増尾敬, 林和彦: コンクリートの様々な角度の面に適用可能な表面吸水試験装置の開発, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, V-477, pp.953-954, 2016
- [2.54] 高橋雅, 佐伯岳洋, 小穴信太郎, 阿波稔: 橋梁下部工におけるコンクリート構造物品質

- 確保への取組み, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1605-1610, 2016
- [2.55] 阿波稔, 迫井裕樹, 金濱巨晃, 音道薫: 函渠工・橋梁下部工におけるコンクリート構造物の品質確保の取組とその検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1611-1616, 2016
- [2.56] 笹倉伸晃, 畑宏幸, 佐藤和徳, 細田暁: 公共生コンクリートプラントにおける覆工コンクリートの品質確保—国道 45 号新鍬台トンネル (仮称) —, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1617-1622, 2016
- [2.57] 家辺麻里子, 秋山仁志, 岸利治: 水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.670-675, 2012
- [2.58] 家辺麻里子, 岸利治, 西尾壮平, 上田洋: 水の流下試験によるコンクリート構造物の表層品質評価に関する研究, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, pp.94-95, 2012
- [2.59] 地濃茂雄, 佐藤茂治: 打放しコンクリート外壁面における雨水の吸水・流下に関する検討, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.156-157, 2011
- [2.60] 菊池健人, 岸利治: コンクリート表層品質の簡易判定手法としての繰り返し流水試験の安定性向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1873-1878, 2013
- [2.61] 阿部睦樹, 岸利治: コンクリート高架橋の変状未発生部位の劣化リスク評価に向けたかぶり厚さと表層品質指標に関する一検討, Vol.39, No.2, pp.1261-1266, 2017
- [2.62] 森濱和正: コンクリート表層の品質評価に関する超音波法 (土研法) による検討, 日本非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査」論文集, Vol.4, pp.121-130, 2012.8
- [2.63] 岩野聡史, 森濱和正: コンクリート構造物表層の品質評価装置の開発, セメント・コンクリート, No.797, pp.36-41, 2013.7
- [2.64] 門井康太, 澤本武博, 樋口正典, 臺哲義: 高炉セメント B 種を用いたコンクリートの養生方法の相違が透気性, 透水性および表面硬さに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1981-1986, 2017
- [2.65] 舌間孝一郎ら: 群馬県における新設コンクリート構造物の表層品質調査, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, V-436, pp.871-872, 2015
- [2.66] 森濱和正, 野田一弘, 田中秀治, 河野広隆: 超音波法による構造体コンクリート表層部の強度, 緻密性の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1739-1744, 2003
- [2.67] 皿井剛典, 田中徹, 澤口啓希: 孔内局部載荷試験による構造物の深さ方向のコンクリート物性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1828-1833, 2012.7
- [2.68] 森濱和正: コンクリート内部の音速分布と接触時間, 貫入抵抗値の関係, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, V-257, pp.513-514, 2017

- [2.69] 岩野聡史, 森濱和正, 渡部正: 衝撃弾性波法と微破壊試験の併用による構造体コンクリートの圧縮強度推定方法の提案, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2 pp.138-153, 2013
- [2.70] 齋藤淳, 福留和人, 古川幸則, 庄野昭: 湿潤養生条件がコンクリートの細孔径分布に及ぼす影響評価手法に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.3, pp.270-280, 2013
- [2.71] 酒井雄也, 中村兆治, 岸利治: コンクリートの物質移動抵抗性を代表する空隙構造指標の抽出と検証, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.4, pp.390-401, 2014
- [2.72] 坂田昇, 渡邊賢三, 細田暁: コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.601-606, 2012
- [2.73] 皆川浩, 久田真, 榎原彩野, 齊藤佑貴, 石川聖芳, 井上浩男: コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.119-131, 2010
- [2.74] 細田暁, 坂田昇, 田村隆弘, 二宮純: 目視評価を活用した山口県のひび割れ抑制システムによる表層品質向上の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1837-1842, 2013
- [2.75] 宮田和実, 目崎浩二, 河内正道, 細田暁: NATM トンネル覆工コンクリートの施工目地近傍の変状の抑制対策と効果, pp.1623-1628, 2016
- [2.76] 渡邊賢三, 小林聖, 吉田裕麻, 細田暁: 目視評価法によるコンクリート構造物の表層品質評価の継続的適用と各種品質向上施策の効果の検証, pp.1405-1410, 2017

第3章 表層品質の簡易評価の着想と試行的検討

3.1 概説

3.2 簡易評価手法の開発コンセプト，着想と事前検討

3.2.1 開発コンセプト

3.2.2 表層品質の簡易評価に関する着想

3.2.3 表面色の定量化技術の概要

3.2.4 事前検討

3.3 考案した簡易評価手法の概要

3.4 表層品質の異なる実構造物を測定対象とした試行的検討

3.5 第3章のまとめ

3.1 概説

第2章「既往の研究」で整理したように、実構造物の表層品質に関する非破壊検査手法として各種の技術が国内外で考案されているものの、鉄道高架橋のように長大な構造物の全体に適用することは、作業時間、労力等が過大となるため現実的には難しいと考えられる。表層品質の重要性とその非破壊評価の有用性が認識されるだけに留まっている現状を打破し、実構造物で表層品質を評価する仕組みを社会に実装するためには、効率的かつ合理的に表層品質の評価を実行できる実用的な技術の確立が必要である。

本章では、表層品質の非破壊評価に関する現状を踏まえ、本研究における手法開発の基本的な考え方と試行的な検討の結果について述べる。以下、3.2節において、手法開発の具体的なコンセプト、着想ならびに簡易な実験による事前検討の内容を述べる。3.3節では、事前検討で実用的技術の具現化に対する可能性が見い出された、散水によってコンクリート表層品質に関する情報を取得する方法の概要を整理し、3.4節において実構造物を測定対象として実施したトライアルの結果を述べる。3.5説は第3章の総括として、散水によってコンクリート表層品質を評価する手法の確立に向けた課題等の知見を整理する。

3.2 簡易評価手法の開発コンセプト，着想と事前検討

3.2.1 開発コンセプト

本研究では，効率的かつ合理的に表層品質の評価を実行できる実用的な技術の確立を目標とし，構造物検査の実務に導入可能な実用的な技術として，「構造物の保守管理を担当する実務者が容易に取り扱うことが可能なレベルの簡便性を有する手法の開発」を基本的なコンセプトとし，具体的には，以下の4項目の達成を念頭に置いた。

- (1) 物質透過抵抗性の直接的な評価
- (2) 電源設備不要（測定機器の作動に外部電源の確保が不要であること）
- (3) 省力（準備段階を含めた各種作業が省力的で1名で実施可能であること）
- (4) 省スペース（測定機器および付随品で占有するスペースが可能な限り小さいこと）

表層透気試験，表面吸水試験のように構造物表面から強制的に気圧ないし水圧を作用させることによって表層品質に関する評価値を取得する方法の有用性は，多数の研究事例，実構造物の評価への適用事例が示すところであるが，上記(2)から(4)の3項目を満たしていないことがこれらの方法による測定の普及を妨げる一因となっている。また，それと対極にあるのが例えば反発度法，超音波法や衝撃弾性波法のような実用化技術を応用した表層品質の推定である。これらの方法では上記の(2)から(4)の3項目を満足しているものの，上記(1)に示した表層品質の本来の意味である物質透過抵抗性を直接的に評価していないという点が根本的な課題となり，表層品質の非破壊評価を目的として適用することの合理性は示されていない。上記(1)から(4)の4項目を既存の各種技術によって達成するためには，市販装置の大幅な改良，あるいは測定機構の見直しが不可欠となる。そのため，本研究では次節にて述べる独自の着想に基づいて新たな手法の開発を目指すこととした。なお，上記のコンセプトでは明記していないが，手法が非破壊試験でコンクリートに損傷を与えないという点は，実構造物に対して広く適用する上で非常に重要と捉え，大前提とした。

3.2.2 表層品質の簡易評価に関する着想

表層品質の簡易評価に関する独自の着想とは，以下に示す2種類である。

- (1) 乾燥したコンクリート表面における散水後の水分逸散状況に関する定量化の検討
- (2) コンクリート表面における物質付着性状に関する検討

上記(1)の着想は，著者が過去に実施した実構造物調査において経験した事象に着想を得たものである。乾燥したコンクリート表面に散水した際に，対象のコンクリートの品質が著しく劣る場合はコンクリート表面からの水の逸散が速くなるという傾向を経験的に見い出してきた。図 3.2.1 に，コンクリート表面における散水後の状況のイメージを示す。散水という行為に特殊な試験装置は不要であり，また表面色の測定は市販のハンディタイプの測色機器を使用すれば手軽に実施可能である。そこで，人間の視覚で定性的に認識してきた図 3.2.1 のような現象を，物体の表面色を定量的に測定できる測色機器によって数値化し，乾燥したコンクリート表面に散水した際に生じる現象の解明と評価を試みることにした。

続いて、前述の着想(2)は、コンクリートが多孔質であることに着目したアイデアである。コンクリート表面では塵埃などの微粒分が付着する。微粒分の付着性状はコンクリート表面における凹凸、すなわち空隙の多寡や密実性と関連する可能性があると考えられるため、この着想は微粒分の付着性状から表層品質との関連性を見い出そうというものである。微粒分の付着性状の評価方法について、例えば微粒分の色を測定することで、着想(1)と同様に測色機器によって表面色の変化量として数値化し、定量的に評価できる可能性があると考えた。

以上の2種類の着想に共通するのは、測定者の“目視で認識できる現象”を基にしている点である。さらに、コンクリート表面に対して“手軽な方法”によって意図的に変化を発生させて、その変化の程度の相違から表層品質に関する情報を取得するという基本的な概念も共通である。これらは実用化されている表層透気試験および表面吸水試験における、気圧ないし水圧をコンクリート表面から負荷し、その変化を厳密に計測するという考え方とは大きく異なるものである。気圧や水圧の作用や微細な変化を測定者の目視によって認識することは不可能であり、気圧や水圧を正確に制御するには相応の電力を消費する装置を使用する必要がある。そのため、表層透気試験や表面吸水試験では、電源設備不要、省力、省スペースという観点で実用性に課題があり、実務への導入の実現が難しくなっていると言える。また、前述の2種類の着想に共通するもう一つの特徴として、コンクリート表面色の

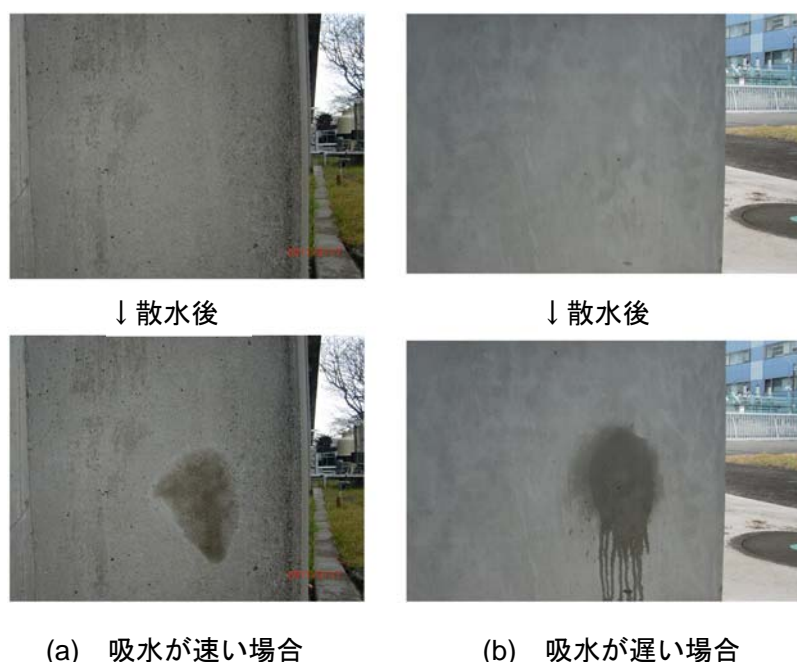


図 3.2.1 コンクリート表面への散水後の状況

定量化技術の適用がある。物体の色を数値化した色彩値による非破壊評価は、色の品質管理が重要となる製造分野などで活用事例が多い。色彩値は人間の視覚によって感じ取られる定性的な特性を定量的に評価することが可能な指標であるため、非破壊で得られる測定値でありながら、測定者の感覚的な評価と相互補完が可能なデータが採取されることにも特徴がある。本研究でも表面色の定量化技術を利用することで、測定者の“目視で認識できる現象”を定量的に解明できる可能性があると考えた。

本研究では、上述のような本研究における着想の優位性を立証するための本格的な実験に着手する前に、手法の実現性を確認するための簡易な実験による事前検討を行った。また、上記の2種類の着想においては、いずれも表面色の定量化に関する技術が必須となる。次節以降、3.2.3節において表面色の定量化技術の概要を整理し、3.2.4節において事前検討の結果を述べる。

3.2.3 表面色の定量化技術の概要

3.2.3.1 表面色の定量化の基礎

色の発現には、光を出す光源、光源からの光を反射する物体の表面、物体で反射した光を検出する存在、この3つの要素が必要である。人間が視覚によって感じ取る物体の表面色は、色を数値で表現する方法、すなわち表色系を定めた上で、色を測定する測色機器によって数値化し、定量的に表現することができる。人間の感覚には個人差があるが、測色機器を使用することで光源と検出の条件を統一することができ、物体の表面における可視光の反射に関する特性の現れとしての表面色が定量的に比較可能となる。色は多面的であるため表色系が多数あるが、本研究では、代表的な表色系のひとつでありコンクリート表面色の評価に対する適用事例が多数見られる $L^*a^*b^*$ 表色系(正確にはCIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間、以下、CIELABとする。)を用いることとした。

図3.2.2に、CIELABによる色の表現イメージを示す。CIELABでは、色の三属性である明度、色相、彩度のうち明度を L^* と表記し、残りの色相と彩度は a^* および b^* という指標の組み合わせによって表記される形となる。以下、本論文では表面色の明るさの度合いを端的に表現する場合を「明度」と表記し、CIELABにおける明度の測定値としての表現を「明度 L^* 」と表記して区別する。

明度 L^* は0～100の値を取り、0＝黒、100＝白である。 a^* および b^* は、明度や色相によって異なる範囲内で正負の値を取り、絶対値が大きいほど彩度が高く鮮やかな色であることを示す。つまり、無彩色の場合は $a^*=b^*=0$ となる。また、 $+a^*$ は赤、 $-a^*$ は緑、 $+b^*$ は黄、 $-b^*$ は青の色合いを示す。CIELABは均等色空間のひとつであり、図3.2.2に示すように明度 L^* 、 a^* および b^* の三指標を直交軸とした座標空間内において、距離の差が人間の視覚に基づいて近くされる色差と等しくなるように意図された色空間となっている。つまり、ある2色間の色差とはCIELABにおける空間内の2点間のユークリッド距離に相当し、色差の算出においては明度 L^* 、 a^* および b^* の各指標の影響の度合いは同一となる。すなわち、2色

の各指標をそれぞれ (L1, a1, b1) および (L2, a2, b2) とした場合、色差 E は次式(3.2.1)で表される。

$$E = \sqrt{(L1 - L2)^2 + (a1 - a2)^2 + (b1 - b2)^2} \quad (3.2.1)$$

測色機器を用いた色の測定値による非破壊評価が製造分野の品質管理などで活用される理由は、色が商品価値を左右する重要な要素となる場合が少なからずあるためである。コンクリート構造物の表面色の定量的な評価に関しても同様に、測色機器によって得られた各種の指標により、工場製品や打放しコンクリートの仕上がりの状態、色調、色むら、美観や汚れといった観点で表面色の評価を行った例[3.1][3.2][3.3][3.4]が見られるほか、表面色の測定値を用いてコンクリートの各種物性値の推定を試みた例[3.5]が報告されている。また、コンクリートの表面色の測定値には、配合、養生、型枠、脱型時期、セメントや細骨材の色などが影響を及ぼすものとされ、美観や仕上がりに対する性能が求められる構造物におけるコンクリート表面の色調制御に関して重要となる知見[3.6] [3.7]が報告されている。これらの既往の研究でも示されているように、骨材の露出などのない通常のコンクリートにおける表面色はいわゆる「灰色」で彩度が低いため、CIELAB における a^* 、 b^* の測定値は比較的小さい値となる。また、明度 L^* の測定値はコンクリートの湿潤状態に依存して大きく変化し、これは雨後のコンクリート表面色が黒味を帯びるように、経験的にも広く知られている。色の測定値は、人間の視覚によって感じ取られる定性的な特性を定量的に表現するための指標と言える。例えば、雨で表面の濡れた箇所のコンクリートは乾燥した箇所に比べて明らかに黒っぽく感じられるが、水分の存在によって大きく変化した「コンクリートの黒っぽさ」

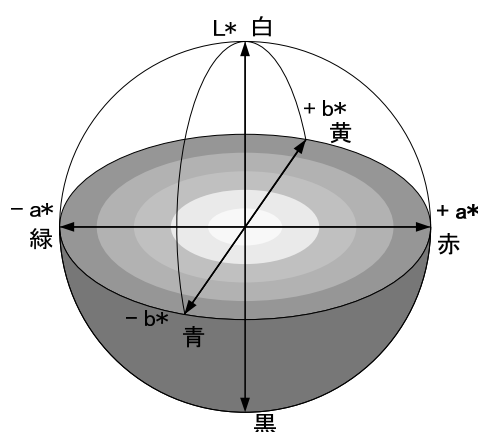


図 3.2.2 CIELAB による色空間の概念

という感覚的な指標を、測色機器を用いることで「明度 L^* 」のような指標で定量的に評価し、数値として再認識することが可能となる。つまり、定量化された色の数値に対しては、数値の異常を測定者の視覚による定性的な情報に基づいて検証することが可能であり、個人差こそあるものの、機器によって得られた測定値についてのエラーチェックがある程度その場で実施可能な指標と考えることができる。

表 3.2.1 に、本研究で使用した 2 機種 of 測色機器の概要を示す。本研究では、測色方式などの異なる A 機、B 機の 2 種類の測色機器を使用した。A 機と B 機はいずれも測定者が携帯して使用することが可能な小型・軽量の機種で、測定に要する人員は 1 人である。測色に必要な光源は内蔵され、バッテリーで駆動するため、測定に外部からの電源供給は不要であり、作業スペースも測定者の手元周辺程度しか必要としない。A 機は、よりコンパクトな機種で作業性に優れるほか、測色と同時に照射角度 60 度の光沢度が測定されるため、色の測定値だけでなく物体表面の光沢度に関する情報も取得できる。本研究に着手した当初は A 機のみを使用していたが、B 機では、測定領域が A 機の直径 10mm に対して 50mm であること、最短 3 秒間隔での連続測定が可能であることから、第 4 章以降に示す本格的な検討においては B 機を採用している。A 機と B 機で機器の校正用の均質な材料を測定した場合、測定値は同等となる。材料が元来不均質であり、測定面における凹凸や気泡の存在が不可避となるコンクリートに対して平均的な評価を行う場合は、測定径の大きい B 機が適している。

3.2.3.2 モルタル・コンクリートの表面色の測定例

表 3.2.2 に、本研究で得られた各種の実構造物および試験体における乾燥時の表面色の概略を示す。測定対象は、実際に供用されている各種土木構造物（RC 造の高架橋柱、橋脚、橋台、ボックスカルバート）における柱や壁の側面、各種試験体の側面である。測定環境として、実構造物は雨水などのかかっていない平常時の状態に屋外にて、屋内曝露の試験体は温度 20℃、相対湿度 60% の試験室内における気中乾燥状態にて、それぞれ測定を行った結果である。いずれも研磨などの表面処理は行っていない。本研究の測定結果では、ある程度の乾燥状態にあるコンクリートでも明度 L^* は 50～80 程度の範囲に分布し、 a^* および b^* に比べて幅広い分布を示した。コンクリートにおける色彩値の特徴は明度の測定値に強く現れるものと考えられる。一方、試験体に比べて実構造物における b^* の測定値および標準偏差が大きい傾向にある。これは実構造物が試験体に比べてやや黄色い色合いであったことを示しており、屋外環境下における塵埃などの影響の蓄積が数値に現れた可能性がある。表面色の変化を色差 dE^*ab で評価し、実構造物と室内試験データを比較するような際には b^* の影響を留意する必要がある。また、経年に伴う擦り減りなどの作用によって骨材が露出した場合は、骨材の表面色により色彩値が変動するものと予測される。

表 3.2.3 に、本研究で得られた湿潤時の色彩値の概略を示す。測定対象および測定条件は乾湿の状態を除いて表 3.2.2 と同一であり、乾燥時と湿潤時の測定位置は位置決め用の器具

表 3.2.1 本研究で使用した測色機器の概要

機種	表色系	測色方式	測定領域	照明・受光方式	光源	視野角度
A 機	L*a*b*	分光測色式	φ 11mm	環状照明垂直受光方式	標準イルミナント C	CIE 2°
B 機		刺激値直読式	φ 50mm	拡散照明垂直受光方式		

表 3.2.2 乾燥時のコンクリート・モルタルの色彩値

測定対象	実構造物			モルタル試験体			コンクリート試験体		
測定箇所数	117 (6 構造物)			864 (12 試験体)			259 (44 試験体)		
使用機器	A 機			A 機			B 機		
色彩値種別	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
最低値	53.4	-2.2	6.5	54.3	-1.2	1.7	48.4	-0.8	3.1
最高値	79.8	0.3	18.2	82.4	-0.5	10.5	75.3	0.4	8.6
平均値	71.1	-0.5	10.9	69.8	-0.8	6.4	66.8	-0.3	5.6
標準偏差	6.0	0.5	2.6	6.1	0.2	1.8	4.9	0.3	1.1

表 3.2.3 湿潤時のコンクリート・モルタルの色彩値

測定対象	実構造物			モルタル試験体			コンクリート試験体		
測定箇所数	117 (6 構造物)			864 (12 試験体)			259 (44 試験体)		
使用機器	A 機			A 機			B 機		
色彩値種別	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
最低値	40.5	-1.8	9.7	36.8	-1.2	3.8	37.2	-0.4	5.7
最高値	62.2	1.2	20.8	71.7	-0.3	12.8	63.4	0.9	11.4
平均値	54.6	0.0	14.5	51.2	-0.8	9.4	47.6	0.1	8.0
標準偏差	4.1	0.6	2.2	7.5	0.1	2.0	5.8	0.2	1.1

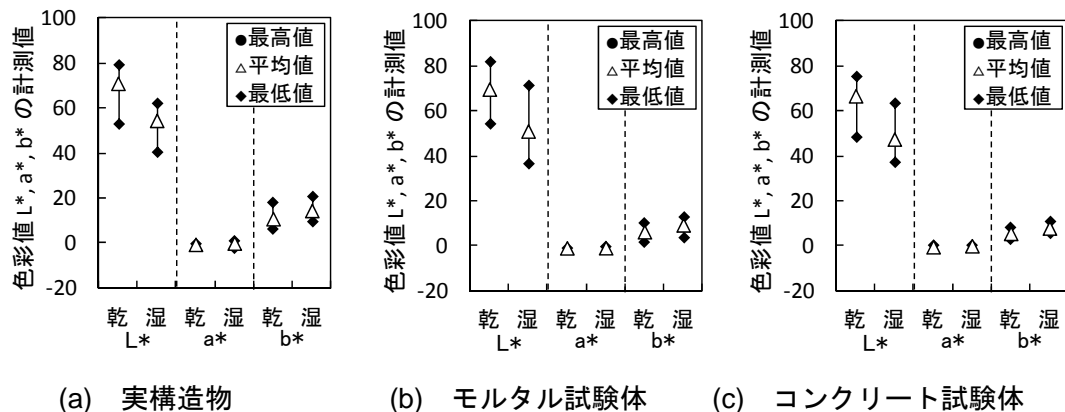


図 3.2.3 乾燥時と湿潤時の表面色の比較

で一致させている。ここで、湿潤時とは、コンクリート表面にスプレーで純水を散布し、目視でコンクリート表面が濡れ面と感じられる程度に表面を湿らせた状態とした。図 3.2.3 に、乾燥時と湿潤時の表面色を比較して示す。湿潤時の表面色は明度だけが顕著に変化し、全ての測定データについて湿潤時には明度 L^* が 40 程度まで低下することを確認した。色彩値の全体の傾向について、実構造物と試験体で大きな差異は認められない。

以上に示した測定データの概要を整理すると以下のとおりである。

- 1) 明度 L^* は a^* と b^* に比べて測定値の分布の幅が広い。
- 2) 湿潤による変化は主に明度 L^* の低下として現れる。
- 3) 試験体より実構造物で b^* の測定値と標準偏差が大きい傾向にあるが、色彩値の全体の傾向については試験体と実構造物で大きな差異は認められない。
- 4) コンクリート表面の明度は湿潤状態によって大きく異なるほか、材料、配合、養生など各種の影響を受けるため、諸元の不明なコンクリートから得られた測定値を絶対的な数値として評価することは困難であると考えられる。

以上のことから、散水によるコンクリート表面色の変化特性は明度に代表されるものと判断し、以降の検討では明度変化特性のみに着目することとした。一方、既往の研究でも指摘されているように、コンクリートの明度は湿潤状態のほか各種の影響を受ける。そのため、コンクリートの明度は測色機器によって容易に定量化が可能であるものの、明度の測定値そのものをコンクリートの物性値を推定するための指標として扱うことは不適切と言える。そのため、本研究の基本的な方向性として、明度の絶対的な数値による表層品質の非破壊評価を目指すのではなく、散水で意図的に湿潤状態を変化させた際の明度の変化特性から表層品質との関連性を見い出すこととした。

3.2.4 事前検討

3.2.4.1 散水後の水分逸散状況の定量化に関する事前検討

水温が 20℃ に設定された水槽に長期間保存されていた 2 体のコンクリート試験体を用い、3.2.2 項の着想(1)で述べた、散水後の水分逸散状況の定量化に関する簡易な検討を行った。いずれも形状は 100×100×300mm の直方体で、長さ 400mm で製作した試験体を 100mm 切り落としたものである。切り落とした 100mm の部分は、後述する 3.2.2 項の着想(2)に対する事前検討に使用した。コンクリートに関する詳細は不明であるが、2 体のコンクリートは配合が異なるものの、同時期に同等の条件下で製作されたもので、試験体表面に記載された情報から水セメント比が 40% と 70% と大きく異なることだけが判明しているものである。このような試験体を対象として、乾燥したコンクリート表面に散水した際に生じる明度の変化を、測色機器で定量的に計測することとした。

試験体は長期間水中に浸漬されていたため完全に飽水状態となっていた。そこで、表乾状態における重量を計測したのち、温度と湿度が 20℃、60% に制御された試験室内における蒸発に伴う重量変化を測定した。図 3.2.4 に、24 時間経過時点までの重量変化曲線を示す。

W/C=70%の試験体の蒸発による重量減少が明らかに速いことがわかる。詳細の不明な試験体であったが2体の試験体には相当の品質差があることが確認できた。続いて、24時間が経過した時点での測定結果、ならびに一般的なコンクリートの乾燥に要する時間から、試験体の乾燥は不十分と考え、60℃の乾燥炉にて試験体の乾燥を促進させることとした。28時間の強制的な乾燥を施したのち、再び試験室内に試験体を静置し、試験体の表面温度は6時間ほどで20℃になったことを確認した。さらに4日間、試験室内に試験体を静置して表面温度および重量の変化がほとんど見られないことを確認し、2体の試験体は気中乾燥状態として統一できたものと見なして散水による湿度変化に関する検討を行った。図3.2.5に、ここでの検討に使用した散水器具を示す。散水量は0.8mlとし、100×300mmの試験体底面に

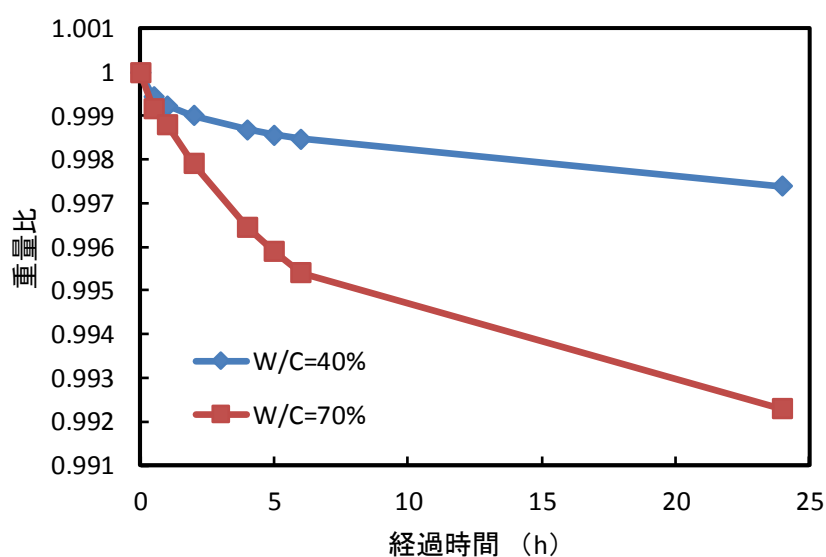


図 3.2.4 水分飽和状態のコンクリート試験体の重量変化



図 3.2.5 使用した散水器具

対して、おおよそ直径 100mm の円状となるように散布した。測色機器は A 機を用い、散水箇所を中心付近 1 箇所にて、散水の実施後に 30 秒間隔で定期的に測定を行った。

図 3.2.6 に、散水による明度の変化量の経時変化を示す。散水によって暗色化するため、明度は急激に低下し、時間をかけて復元していく様子が確認された。また、明度変化の絶対値は W/C=70% の試験体で大きくなり、W/C=40% の試験体より暗色化した。また、図 3.2.6(b) からわかるように、時間当たりの明度の復元量が W/C=70% の試験体で大きくなった。

A 機では、明度を含む表面色の測定値の取得と同時に、表面における光沢感を数値化した光沢度が計測されるため、光沢度の変化を確認した。図 3.2.7 に、W/C=70% の試験体の散水直後に見られた光沢度の変化を示す。散水による光沢度の変化は、散水から 30 秒後の時

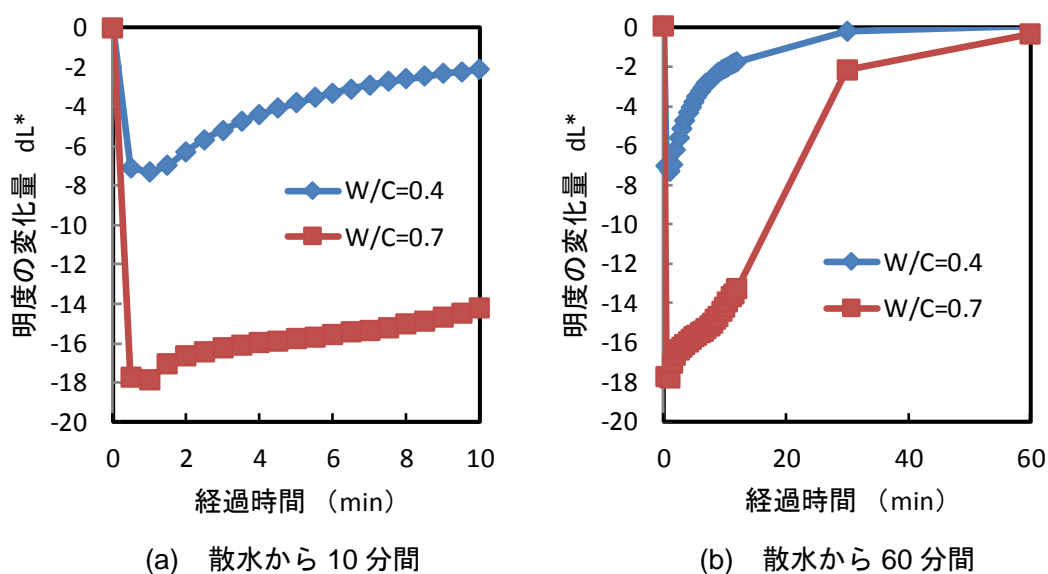


図 3.2.6 散水による明度変化

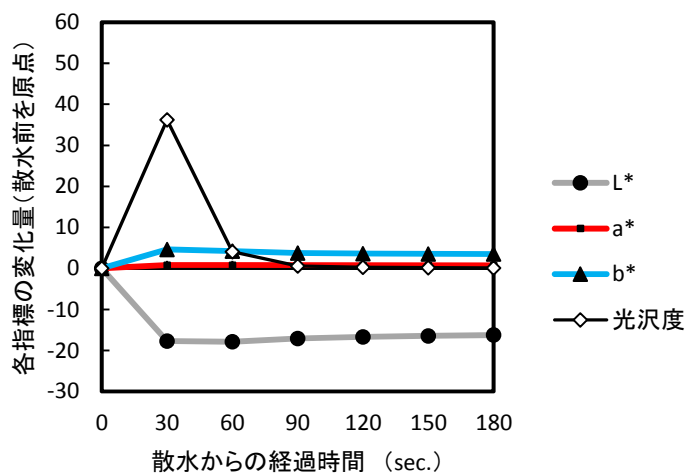


図 3.2.7 散水による光沢度の変化 (W/C=70% 試験体)

点では顕著に上昇したものの、散水の 60 秒後には初期値と同程度まで復元した。つまり、光沢度はコンクリート表面における散水の影響を反映するものの、短時間で変化が完了するため、30 秒のような時間間隔で散水による変化を追跡する指標としては不適當となる。

以上のような簡易な検討ではあるが、当初の想定どおり、散水によってコンクリートの表面に生じた明度の変化は定量化できることが確認され、また明度の変化特性がコンクリートの品質を反映する可能性が示唆された。散水の方法や測定手順を整理する必要はあるものの、市販されている手動のスプレーによりある程度安定的な散水が可能であり、明度の測定についても測色機器を使用することで高精度な測定の実施が可能であることから、簡便性を備えた手法開発に向けて、本着想による検討を本格化することは妥当であると判断した。

3.2.4.2 コンクリート表面における物質付着性状に関する事前検討

水温が 20℃に設定された水槽に長期間保存されていた 2 体のコンクリート試験体を用い、3.2.2 項の着想(2)で述べた、コンクリート表面における微粒分の付着性状に関する簡易な検討を行った。いずれも形状は 100×100×100mm の直方体で、長さ 400mm で製作した試験体の端部を 100mm 切り落として試験体としたものである。コンクリートに関する詳細は不明であるが、2 体のコンクリートは配合が異なるものの、同時期に同等の条件下で製作されたもので、試験体表面に記載された情報から水セメント比が 40%と 70%と大きく異なることだけが判明しているものである。試験体は長期間の水中浸漬で飽水状態となっていたため、気中乾燥状態に移行させてから試験に使用した。

図 3.2.8 に測定手順を示す。平滑な平面である試験体の側面と底面を測定面とし、微粉末の付着による表面色の変化を測色機器によって測定した。使用した微粉末は、ピンク色のチョーク粉末であり、篩によって粒度を 3 段階に区分して使用した。微粉末の塗付は、上向きとなるように設置した測定面に対して、表面色の測定領域を含む直径 15mm ほどの範囲内に微粉末を盛り付けたのち、乾いた清潔なウェスで微粉末を念入りに擦り付けながら拭き取ることによって行った。また、微粉末は粒径の大きな方から順に塗付し、塗付の都度、表面色の変化を測定した。

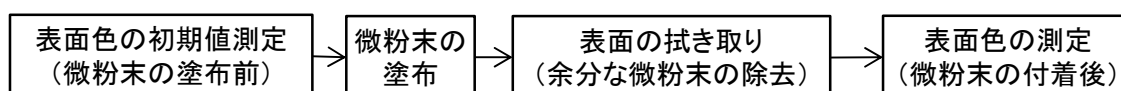


図 3.2.8 物質付着性状の測定手順

図 3.2.9 に、底面における微粉末の塗付前後での表面色の変化を示す。微粉末の塗付により、微粉末のピンク色の成分に相当する a^* の数値が大きく変化し、数値の変化量は水セメント比の高い試験体で顕著であることがわかる。つまり、水セメント比の高い試験体ではより多量の微粉末が表面に付着したものと考えられる。また、塗付する微粉末の粒径が小さいほど表面色の変化量が大きくなったことから、より粒径の細かい空隙に微粉末が充填されて付着したものと考えられる。そのため、使用する微粉末の粒度を適切に設定することで、コンクリート表面に存在する微細な空隙の粒度分布のような情報を取得できる可能性がある。

続いて、測定面を側面に変更して同様の測定を行った。ここでは微粉末の塗付方法の再現性を確認するため、最も細かい粒度の微粉末による再塗付を行った条件でも測定を行った。

図 3.2.10 に、側面における微粉末の塗付前後での表面色の変化を示す。底面の場合と異なり、水セメント比による違いがほとんど見られなかった。また、同一箇所で 2 回目の塗付を行うことによって数値が上昇しており、1 回目の塗付では微粉末の付着が不十分となったこ

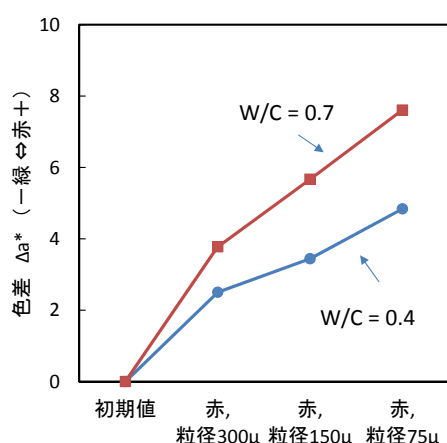


図 3.2.9 微粉末の塗付による表面色の変化（底面）

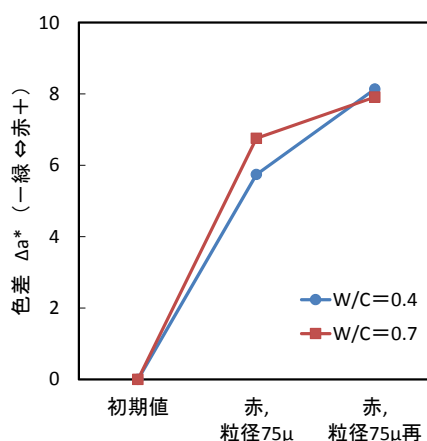


図 3.2.10 微粉末の塗付による表面色の変化（側面）

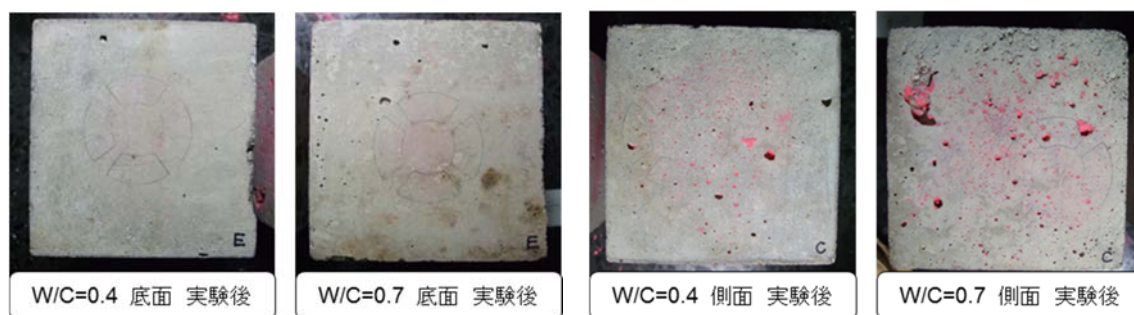


図 3.2.11 チョーク微粉末の塗付状況

とが示唆された。図 3.2.11 に、塗付前後の状況写真を示す。試験体の側面では底面とは異なり粗大な気泡が目立つことがわかる。微粉末の粒径に比して粗大な空隙が目立つ部位においては、粗大な空隙に収まった微粉末の量が表面色の変化に対して支配的となることが示唆された。本検討に示す手法では、気泡の存在する部位での測定が困難となることが判明した。

以上のことから、微粉末をコンクリート表面に塗布することによって表層品質を評価するという着想に関しては、微粉末の塗付方法に関する詳細な検討が必要であり、また微粉末の粒度調整のほか材質に関する検討が必要と考えられることが判明した。さらに、測定面の状態として、直径数 mm ほどの気泡が存在する部位に適用する場合は、事前に気泡を埋めるというような処置が必要となる可能性があると考えられることがわかった。そのため、「コンクリート表面における物質付着性状」による表層品質の簡易評価については、現状では検討課題が多いものと判断した。

3.2.4.3 事前検討のまとめ

表層品質の簡易評価手法に対する 2 種類の着想について簡易な実験で検討した結果、いずれの着想についても当初の見込みどおり表層品質との関連性を示唆する結果が得られた。しかしながら、「コンクリート表面における物質付着性状」に関しては研究の進行に大きく影響する課題が予見されたことなどを総合的に勘案し、本研究では、「散水後の水分逸散状況の定量化」に関する研究開発に注力することとした。次節、3.3 節において、散水後の水分逸散状況を定量化するために考案した測定手順などの詳細を述べる。

3.3 考案した簡易評価手法の概要

3.2 節で整理したように、乾燥したコンクリート表面に少量の水を散布した際の水分逸散状況を定量的に評価することで、表層品質に関連した情報が取得できる可能性が示唆された。そこで、3.2.4 節で述べた事前検討の結果に基づいて暫定的な測定手順等を考案し（以下、暫定手法とする。）、検討を本格化することとした。図 3.3.1 に、暫定手法の概要を示す。本研究では本節で示す暫定手法をベースに、研究の進展に伴って段階的に測定手順の改良を行い、最終的に提案する手法を「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」と表記することとした。本研究にて提案する散水試験に関する測定手順などの概要は第 5 章の 5.4 節にて後述する。また、散水試験の影響要因については第 6 章の 6.2 節にて、さらに実構造物における含水状態の変動を考慮した散水試験の適用方法を第 6 章の 6.3 節にて、それぞれ述べる。

図 3.3.2 に、暫定手法を起点とした散水試験の開発の流れ、本論文中での言及箇所を整理したものを示す。散水方法および計測時間などは試行錯誤を繰り返しながら適宜改良を加えているため、試験条件は必要に応じて各記述箇所で個別に示した。試験条件として大きく変化したのが散水量である。コンクリートの吸水性状に関する研究は Levvit による例に代表されるように古くからある[3.8][3.9][3.10][3.11][3.12][3.13]。しかしながら、いずれも本研究の試験条件に比較して長時間での吸水速度、あるいは多量な水の付与という条件での実験によるものであり、本研究のような微量水分の吸水現象を対象としていない。そのため、微量水分の付与の程度について見当がつかない状況であったことから、本研究では手動で操作する霧吹きとして一般的なサイズのものを利用して検討を開始した。検討を進めるうちに、散水量が多い場合には鉛直面での流下による付与水量の減少の影響が見られ、測定対

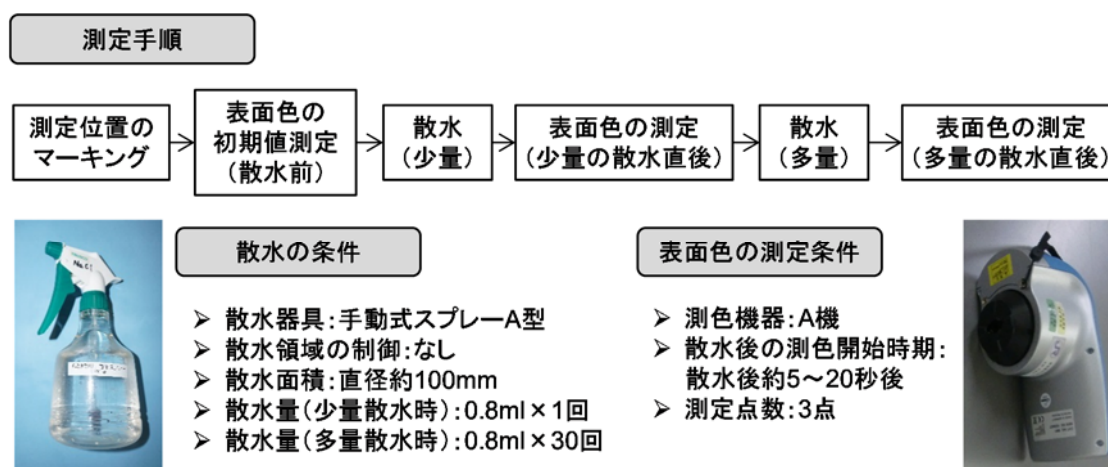


図 3.3.1 暫定手法の概要

象とした例えば表面色の時間当たりの変化量が小さくなり感度が低下する，計測時間が長時間化するといった課題が明らかとなった。散水量を減ずることが望ましいこと，その一方で散水量と散布面積の両立が困難となるという新たな課題が浮上するなど，紆余曲折を経て最終的に提案する散水方式に至った。



図 3.3.2 散水試験の開発の流れ

3.4 表層品質の異なる実構造物を測定対象とした試行的検討

本研究の初期段階において、室内試験による精緻な検証に着手する前に、実構造物を対象とした表層品質の調査に参加する機会が得られたため、3.3 節に示した暫定手法を実構造物に対して試行的に適用し、散水試験に関する着想の妥当性の検証を行った。

実構造物の表層品質の調査は、比較的経年の小さいボックスカルバートおよび橋台を対象として、透気性や吸水性などに関する各種の非破壊試験手法を用いて実構造物の表層品質の評価を試みることを目的として、土木学会コンクリート委員会「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会」（以下、335 委員会とする。）により、企画、実施されたものである[3.14]。表 3.4.1 に、調査対象構造物の概要を示す。これらの構造物は山口県が管理する道路構造物で、ひび割れ発生の抑制を目的とした設計・施工上の各種対策（以下、ひび割れ抑制対策とする）の効果が実構造物で検証できるという特色がある。各種非破壊試験ならびに採取コアを用いた実験による検証結果が報告されている[3.15][3.16]。

表 3.4.2 に、実構造物調査における散水時の明度変化に関する測定条件を示す。複数の研究機関が参加して行われた調査のため測定箇所や時間の制約があったことから、現地で測定が可能な項目を検討し、散水量を極端な 2 段階に設定した上で、少量散水時と多量散水時の明度 L^* を A 機で測定した。多量散水時は過剰に水分を付与するため、コンクリート表面は完全に濡れた状態となるが、測定部位は鉛直な壁面であり、余剰な水分は流下し、当該箇所の明度 L^* の最低値が確実に計測されることを事前に確認した。測定点は散水 1 箇所あたり 3 点とした。各測定点は 1 辺が約 5cm の三角形の頂点に位置するように配置し、三角形の重心が散水領域の中心とおおむね一致する。測定位置はマーキングし、散水前後での位置がほぼ同一となり、位置の微小なずれによる誤差が無視できることを確認している。散水 1 箇所あたり 1 台の測色機器で 3 点を測定したため、各測定点での測定完了時刻は、測定順

表 3.4.1 調査対象構造物の概要[3.10]

呼称	対策の有無 ^{*1}	測定部位	測定時の材齢	特徴
Box A	なし	壁面	約 7 年	W/C=54%, 呼び強度 24, セメント: BB
Box B	有	壁面	約 1 年	W/C=55%, 呼び強度 27, セメント: BB, 追加養生 ^{*2}
橋台 A	なし	壁面	約 8 年	W/C=55%, 呼び強度 24, セメント: BB
橋台 B	有	壁面	約 3.5 年	W/C=54%, 呼び強度 24, セメント: BB, 追加養生 ^{*2}
橋台 C	有	壁面	約 3.5 年	W/C=54%, 呼び強度 27, セメント: BB, 追加養生 ^{*2}

^{*1}: 山口県におけるコンクリートのひび割れ抑制対策[3.15][3.16]

^{*2}: 型枠脱型時期の延伸, 散水養生など[3.15][3.16]

に約 10 秒の時間差が生じている。各構造物の測定箇所は、1 箇所あたり高さ方向に約 500mm 間隔の 3 箇所とした。高さ方向の影響には一定の傾向が見られなかったため、測定結果は 1 箇所 3 点×高さ方向 3 箇所＝9 点の平均値で評価した。

図 3.4.1 に、各構造物の散水前後の明度を示す。各測定箇所で測定値の絶対値は大きく異なるが、いずれの測定箇所でも明度は散水前が最高値となり、多量散水後が最低値となる点は共通している。一方、各測定箇所における少量散水後の測定値は、各測定箇所の最高値に近いデータと最低値に近いデータが偏在する傾向が見受けられる。そこで、散水前の初期値に対する変化量の比率に着目し、各測定値について散水前の初期値に対する明度の変化量 dL^* を算出し、多量の散水によって生じた最大の明度変化量を 1 とした場合の比率を明度変化の飽和度として算出した。式(3.4.1)に、明度変化飽和度 SL の算出式を示す。

$$SL = (LI - LE)/(LI - LMIN) \quad (3.4.1)$$

ここに、 LI ：明度 L^* の初期値、 LE ：少量散水時の測定値、 $LMIN$ ：多量散水時の測定値である。 SL が小さいほど、少量散水後の明度の復元量が大きいこと、つまり、表面からの水

表 3.4.2 散水による明度変化の測定条件

測色機器	A 機
散水方法	散水量（少量散水時）：約 0.8 ml×1 回 散水量（多量散水時）：約 0.8 ml×30 回 散水面積：約 150cm ² 散水方向：水平
環境	屋外（降雨の影響は受けにくい箇所）
測定項目	(1) 散水前の明度 (2) 少量散水後（約 10～30 秒後）の明度 (3) 多量散水直後の明度

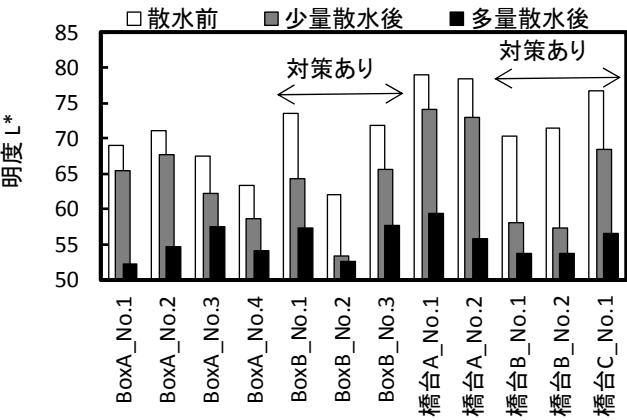


図 3.4.1 散水前後の明度の測定結果

の消失が速いことを示す。

表 3.4.3 に、明度 L^* の測定値および明度変化飽和度を示す。図 3.4.2 に、各構造物の明度変化飽和度を示す。ひび割れ抑制対策有の構造物では明度変化飽和度が高い傾向にあり、他機関により調査された透気抵抗性および吸水抵抗性に関する測定結果[3.15][3.16]におおむね一致することから、脱型時期の延伸などによる表層品質の向上を反映した可能性がある。なお、Box B では No.1 と No.3 の明度変化飽和度が No.2 に比べて小さいが、他機関による測定結果[3.15][3.16]と測定箇所の詳細を照合したところ、同様の傾向が示されていた。No.1 と No.3 は、構造物全体の端部に近い施工ブロックであったため、日射などの影響による表

表 3.4.3 明度の測定値および明度変化飽和度

測定箇所	明度の測定値			明度変化飽和度 SL (LI - LE) / (LI - LMIN)
	散水前 LI	少量散水後 LE	多量散水後 LMIN	
Box A No.1	68.9	65.3	52.1	0.24
Box A No.2	71.1	67.7	54.6	0.22
Box A No.3	67.4	62.2	57.5	0.53
Box A No.4	63.4	58.7	54.0	0.53
Box B No.1	73.5	64.3	57.3	0.56
Box B No.2	62.0	53.3	52.5	0.92
Box B No.3	71.9	65.6	57.7	0.45
橋台 A No.1	79.1	74.1	59.4	0.26
橋台 A No.2	78.3	73.0	55.7	0.24
橋台 B No.1	70.2	58.0	53.6	0.74
橋台 B No.2	71.5	57.4	53.8	0.81
橋台 C No.1	76.7	68.5	56.5	0.41

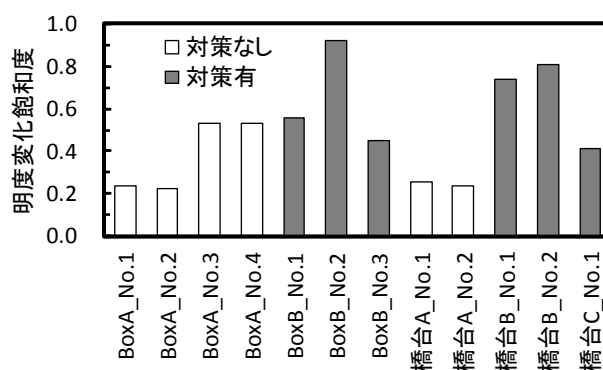


図 3.4.2 各構造物における明度変化飽和度

層品質の低下が明度変化飽和度に現れた可能性がある。3.2 節で言及したように、明度 L^* の絶対値による評価は各種要因の影響が判別できないため困難となるが、本手法のように、意図的な水分付与による明度変化に着目することで、表層品質と関連性を有した情報を取得できることが示唆された。

以上のように、実構造物を対象として暫定手法による試行的な検討を行った結果、散水によってコンクリート表面色の変化を意図的に引き起こすことで表層品質との関連性を有する情報を取得するという本研究の着想の有用性が見い出された。また、簡易な器具の利用のみで構成された評価手法は実構造物の調査に対して容易に適用できることが確認された。なお、ここでの散水方法は吐出量が 0.8ml の手動式のスプレーを直径 100mm ほどの範囲に散布する方法としたが、散水後の明度変化に関する定量的かつ精緻な検討を行うためには散水器具を改良して面積当たりの散水量を安定化させる必要があると考えられる。

3.5 第3章のまとめ

本章では、表層品質を実構造物で手軽に評価するための新手法の開発に対する本研究での基本コンセプト、ならびに独自の着想を整理し、暫定的な測定方法を構築して実構造物への試行的な適用実験を行った。乾燥したコンクリート表面に対して一定量の水分を散布し、水分の存在下で変化するコンクリート表面色の変化特性に着目することで、表層品質に関連した情報を非破壊的に取得できる可能性が見い出された。本章で行った実験的検討により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 乾燥したコンクリート表面に水分を付与すると、コンクリートの表面色は暗色化し、時間の経過とともに散水前の灰色へと復元していく。このような現象は、表面色の計測機器（測色機器）によって定量的に表現することが可能であることを確認した。
- 2) 散水によりコンクリートの表面色を変化させた場合、色の三要素のうち彩度と色彩はほとんど変化せず、明度だけが大きく変化する。そのため、本研究においては散水によるコンクリート表面の明度の変化特性のみに着目し、検討を進めることとした。
- 3) 散水によって乾燥状態から湿潤状態へ強制的に移行させた際の明度の変化特性は、養生の差異などで生じた表層品質の差を反映する可能性がある。
- 4) コンクリートへの散水の方法を、「少量の散水」と「多量の散水」のように工夫することで、散水による明度の変化特性を段階的に取得することができ、情報量を増加することができる。
- 5) 少量散水後の明度の変化量を多量散水後の明度の変化量で除した「明度変化飽和度」は、多量の散水によって生じた最大の明度変化量を 1 とした場合の明度変化の比率であり、少量の散水後における水分の消失の程度を示す指標と考えられることから、表層品質の簡易評価指標として活用できる可能性がある。
- 6) ここでの散水方法は吐出量が 0.8ml の手動式のスプレーを直径 100mm ほどの範囲に散布する方法としたが、散水後の明度変化に関する定量的かつ精緻な検討を行うためには散水器具を改良して面積当たりの散水量を統一する必要がある。

以上のように、実構造物での測定を試行的に実施し、散水によってコンクリート表面色の変化を意図的に引き起こすことで表層品質との関連性を有する情報を取得するという本研究の着想の有用性が見い出された。また、簡易な器具の利用のみで構成された評価手法は実構造物の調査に対して容易に適用できることも確認された。しかしながら、測定対象としたコンクリートの諸元は不明であり、考案した評価手法は暫定的で測定手順も不確実なものであったことから、表層品質の非破壊評価手法としての信頼性については検証が不十分と言わざるを得ない。そこで、次章において、各種の試験体ならびに実構造物を測定対象として詳細な検討を実施した。

参考文献

- [3.1] 大塚秀三ほか：調合および施工要因の違いがコンクリート表面の色むらに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.2，pp.271-276，2007
- [3.2] 劉靈芝ほか：打放しコンクリートの色彩に及ぼすセメントおよび細骨材の色彩の影響，日本建築学会構造系論文集，No.612，pp.17-22，2007.2
- [3.3] 高橋宏樹ほか：コンクリート表面の仕上がり性状に関する実験的研究その1-その2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.439-442，2004.8
- [3.4] 地濃茂雄：降雨濡れによるコンクリート表面の色調変化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.285-288，1993
- [3.5] 藤森繁ほか：モルタルの色彩値と力学的特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.555，pp.17-24，2002.5
- [3.6] 小林俊秋：材料・養生方法がコンクリートの色調に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.949-954，1999.3
- [3.7] 柏木隆男：打放しコンクリートの色調制御，セメント・コンクリート，No.630，pp.34-41，1999.8
- [3.8] Levitt, M.: The ISAT A non-destructive test for the durability of concrete, British Journal of NDT, pp.106-112, 1971.7
- [3.9] Levitt, M.: An assessment of the durability of concrete by the initial surface absorption test, International Symposium Durability of Concrete -1969 Preliminary Report Part 1, Academia, Prague, pp.A29-A42, 1969
- [3.10] Figg, J. W.: Methods of measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-219, 1973.12
- [3.11] Montgomery, F. R. and Adams, A.: Early experience with a new concrete permeability apparatus, Proceedings of the International Conference of Structural Faults and Repair, pp. 359-363, 1985
- [3.12] Basheer, P. A. M.: A brief review of methods for measuring the permeation properties of concrete in situ, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Vol.99, Issue1, pp.74-83, 1993.2
- [3.13] 温品達也：実建造物の表層品質を対象とした非破壊試験による耐久性の検証，コンクリート工学，Vol.55，No.6，pp.537-543，2017.6
- [3.14] 公益社団法人土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335 委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，土木学会コンクリート技術シリーズ，No.97，2012.7
- [3.15] 吉田早智子ほか：表面吸水試験および透気試験による山口県の建造物の表層品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1823-1828，2011

- [3.16] 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦 : ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.4, pp.336-355, 2014
- [3.17] JIS Z 8781-4 測色－第 4 部 : CIE 1976 L*a*b*色空間

第4章 散水時の表面色変化特性に関する実験的検討

4.1 概説

4.2 モルタル試験体を用いた室内試験による基礎的検討

4.2.1 実験の概要

4.2.2 実験の結果および考察

4.2.3 モルタル試験体による実験のまとめ

4.3 コンクリート試験体による検証実験

4.3.1 実験の概要

4.3.2 実験の結果および考察

4.3.3 コンクリート試験体による実験のまとめ

4.4 RC 高架橋を模擬した屋外曝露試験体による検証実験

4.4.1 実験の概要

4.4.2 実験の結果および考察

4.4.3 RC 高架橋を模擬した屋外曝露試験体による実験のまとめ

4.5 実構造物における測定結果の再現性に関する検討

4.5.1 実験の概要

4.5.2 実験の結果および考察

4.5.3 測定結果の再現性に関する知見

4.6 測定手順の簡略化に関する検討

4.6.1 検討の概要

4.6.2 検討の結果および考察

4.6.3 散水時の表面色変化特性の簡易な評価手順

4.7 第4章のまとめ

4.1 概説

第 3 章のまとめに記載したように、散水時の表面色の変化特性を計測することによって表層品質に関する情報を実構造物から取得できる可能性が示唆された。すなわち、コンクリートの建設や保守に携わる実務者によって経験的に見い出されてきた、吸水抵抗性に劣るコンクリートにおいて散水時の水分逸散が速くなるという傾向が、表面色の定量的な評価によって裏付けできる可能性が高いと考えられる。

本章では、乾燥したコンクリート表面における散水時の表面色変化特性を明らかにするため、配合と養生により品質差を設定したモルタル製、コンクリート製、鉄筋コンクリート製の各種の試験体ならびに実構造物を対象として行った実験の結果について整理する。以下、4.2 節では、容量 1 リットル程度の小規模のモルタル試験体による実験について、4.3 節では容量 4 リットル程度の小規模なものから 1m³ 程度の規模まで大小各種のコンクリート試験体による実験について述べる。4.4 節では、屋外で作製され曝露された実大規模の RC 高架橋試験体による検証結果を述べる。4.5 節では、経年 30 年以上の実構造物を測定対象として実施した散水時の表面色変化特性に関する測定の再現性に関する検討結果を述べる。4.6 節では、散水時の表面色の変化特性による表層品質の評価を簡易に実施するための測定手順の簡略化に関する検討結果を述べる。4.7 節では、本章を総括するとともに、表層品質の簡易評価手法としての課題、改良に向けた着眼点を整理する。

4.2 モルタル試験体を用いた室内試験による基礎的検討

4.2.1 実験の概要

4.2.1.1 試験体

水セメント比, 脱型時期, 脱型後の初期養生により表層部の物質移動抵抗性に関わる品質の差異化を図った小型のモルタル試験体により, 明度変化特性と物質移動抵抗性に関する検討を行った。表 4.2.1 に, モルタル試験体の作製条件を示す。試験体は 1 辺が 100mm の立方体型のモルタルで, セメントは普通ポルトランドセメントを使用し, 細骨材は標準砂とした。配合は水セメント比を $W/C = 40, 50, 60\%$ の 3 段階に設定し, 細骨材量はセメントに対する質量比を 3.0 で統一した。初期養生により表層品質の差異化を図るため, 脱型時期を材齢 1 日と 7 日の 2 段階に, 脱型後から材齢 28 日までの初期養生条件を 20°C の標準水中養生と気中養生 (20°C , 60%RH) および乾燥気中養生 (20°C , 40%RH) の 3 段階に設定した。初期養生を終えた試験体は温度 20°C , 相対湿度 60% に制御された試験室内に静置した。試験体の数量は作製条件ごとに 1 体とし, 各種の測定に連用した。なお, 試験体の連用により, 水の供給による未水和成分の水和進行のほか, 材齢の相違の影響が想定されたものの, 本研究で行う散水による給水量は少量のためこれらの影響が過大となる可能性は低いものと判断した。

初期養生の完了後, 水中養生試験体については, 含水状態を気中養生試験体と同程度まで早期に移行させるため, 水中養生の完了から数日間, 40°C の恒温乾燥器内で乾燥を促進させた。乾燥期間は, 経時的な重量変化を比較用の試験体とともに計測することで, 個別の試験体ごとに判断した。すべての試験体について, 各種の測定を実施する時の含水状態は, 試験室内 (20°C , 60%RH) にて重量がおおむね恒量となった気中乾燥状態とした。

なお, モルタルの強度性状を把握することを目的として 100mm の立方体型のモルタル試験体と同時に直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体を作製し, 材齢 56 日で圧縮強度試験を実施した。試験条件ごとの円柱供試体の本数は各 3 本とした。

表 4.2.1 モルタル試験体の作製条件

W/C (%)	S/C	脱型時期	初期養生方法（材齢 28 日まで）
40	3.0	1 日	・ 標準水中養生 ・ 気中養生（20℃， 60%RH） ・ 乾燥養生（20℃， 40%RH）
50		1 日	
		7 日	
60		1 日	

4.2.1.2 試験条件

表 4.2.2 に、モルタル試験体による実験の流れを示す。散水時の明度変化に関する実験を中心に据えて各種の測定を計画的に実施した。なお、初期養生が完了した段階で養生条件の異なる試験体ごとに含水状態が異なるため、試験体が気中乾燥状態と判断される状態に至るまでに要する期間には差が生じる。そのため、円柱供試体による圧縮強度試験を除き、各試験体における各種の測定実施時点での材齢は統一されていない。

まず、材齢 28 日までの初期養生の完了後に、散水時の表面色変化に関する実験を順次実施した。散水および測色は測定対象面を水平となるよう設置した上方から行った。測色機器は A 機を用い、3.4 節の実構造物での試行と同様に、少量散水と多量散水の 2 段階で散水を行った際の明度変化を測定した。明度の測定は、各測定面について 9 箇所で行った。少量散水時の散水量は測定面内に約 2.5ml とし、多量散水時は測定面全体にスプレーで十分に散水して表面に浮き水を生じた状態とした。なお、散水に関して、本研究では基本的に常温の純水と市販の手動式スプレーによる散水方式を採用している。付与する水分の量および領域は、スプレーのノズル部分の調整および試作した器具を装着することにより安定化を図っている。散布する水の粒径についてはスプレーのノズル部分の性能に依存しており、特段の配慮を行っていない。図 4.2.1 に、ここでの検討に使用した散水器具を示す。また、図 4.2.2 に、後述する 2 回目の実験時の条件と併せて、散水および測色に関する試験条件を示す。

次に、モルタル試験体の物質移動抵抗性について評価を行うため、散水時の表面色変化に関する実験を順次実施したのち、材齢約 10 週で、特殊な試験装置を要しない水中浸漬による吸水試験を実施した。吸水試験で得られる情報がコンクリートの耐久性の評価に有用であることを示すデータとして、例えば古賀らは、試験体の乾燥条件等が本研究とは異なるものの、圧縮強度よりも吸水量の方が塩化物イオンの拡散係数と高い相関を有することを報

表 4.2.2 モルタル試験体による実験の流れ

材齢	項目
1 日	早期脱型試験体の脱型
7 日	脱型時期延伸試験体の脱型
28 日	初期養生期間終了
56 日	圧縮強度試験(円柱供試体), 明度変化実験(A 機)
約 2 箇月	水中浸漬による吸水試験
約 7 箇月	明度変化実験(B 機, 詳細な経時変化の検証)
約 8 箇月	明度変化実験(B 機, 散水量の影響の検証)
約 11 箇月	明度変化実験(B 機, 測定方向の影響の検証)

告している[4.1]。また、コンクリートに作用する水の影響は各種の劣化に対する支配的な要因となり得ることが数多くの論文等で指摘されている[4.2][4.3][4.4][4.5]。そのため、物質透過抵抗性のうちコンクリートの吸水性状に関するデータを提示することは学術的に有益であると考えられる。吸水試験の水中浸漬時間は最大4時間とし、最短で10分後から、所定

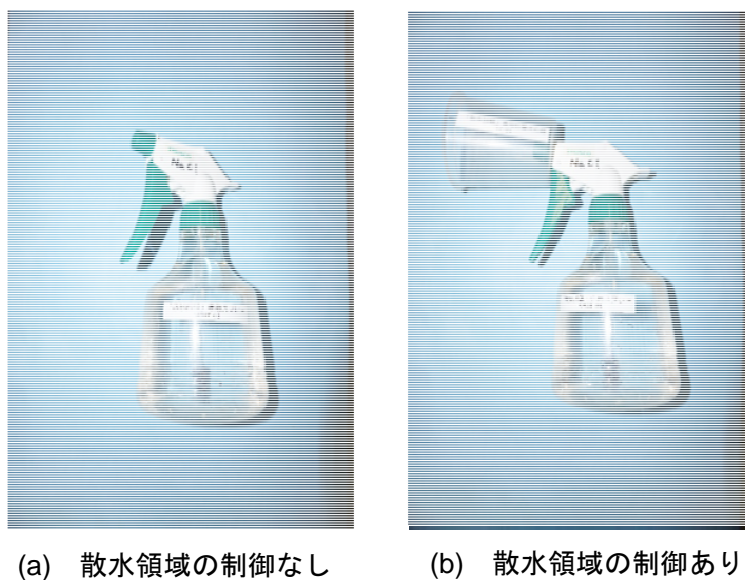


図 4.2.1 実験で使した散水器具

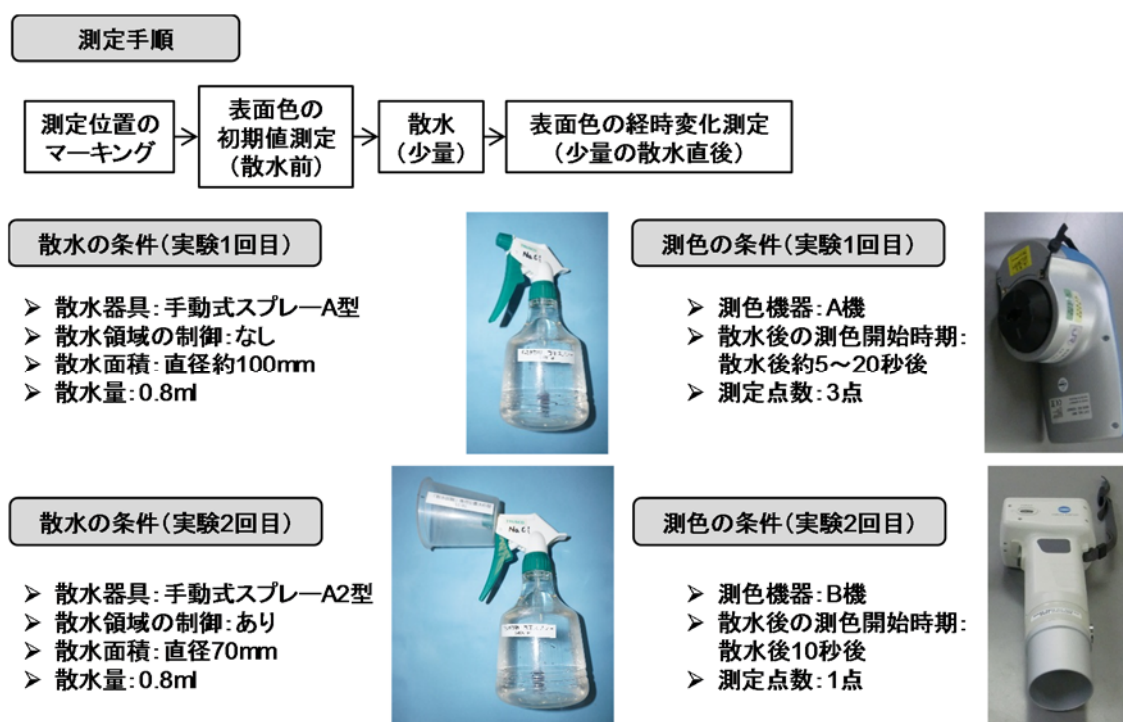


図 4.2.2 実験の概要

の浸漬時間を経過した段階で水中から試験体を取り出したのち、直ちに表乾状態の試験体の重量を測定した。水中浸漬による吸水量は、所定時間水中浸漬後の試験体重量と浸漬前の試験体重量の差により算出した。なお、試験体の活用性を考慮し、試験体には極力損傷を与えないようにするため、絶乾状態での重量測定を行うための強制的な乾燥は行っていない。

最後に、吸水試験の実施後に試験体を試験室内（20℃、60%RH）に約5箇月間静置して乾燥させた後、材齢約7箇月で散水時の明度変化特性に関する2回目の実験を実施した。これは、初期養生の完了後に実施した1回目の実験において、散水直後の明度変化に関する詳細な経時変化の計測の重要性が見い出されたことによる。新たに導入したB機により、散水領域の中心部にて直径50mmの領域の明度を、散水の約10秒後から10秒間隔で計測した。明度の測定点数は、各測定面で中心付近の1箇所となる。明度の計測開始時間は厳密に制御できていないが、ここでは便宜上いずれの測定データにおいても散水後10秒として扱うものとした。計測開始以後の計測の時間間隔は、測色機器により正確に10秒で制御されている。また、散水領域をB機の測色領域が確実に含まれるように安定化させるため、散水領域と測色領域の中心を一致させることができ、同時に散水領域を直径70mmの円内に制限させることができる位置決め用の器具を導入した。散水量は約0.8mlとした。

4.2.2 実験の結果および考察

4.2.2.1 圧縮強度

図4.2.3に、材齢56日で実施した円柱供試体の圧縮強度試験結果を示す。養生条件の違いによる圧縮強度の差は、水セメント比の低い $W/C=40\%$ で顕著である。養生環境の乾燥化に伴って試験体表層の水分逸散が促進されるものと捉えた場合、水セメント比の低い $W/C=40\%$ では供試体内部の余剰な水分が少ないため、乾燥の影響を大きく受け、強度の低減が大きくなったものと考えられる。養生条件の影響は、脱型時期を遅らせた $W/C=50\%$ の7日脱型の供試体で最も小さく、気中養生および乾燥養生条件下では、1日脱型時の $W/C=40\%$ より高い圧縮強度を示した。脱型時期の延伸により、養生条件の乾燥化に伴って生じる供試体表層からの水分逸散が抑制されたものと思われる。

4.2.2.2 吸水特性

図4.2.4に、水中浸漬させたモルタル試験体の累積吸水量の経時変化を示す。累積吸水量は所定の時期に水中から取り出した試験体の重量から試験開始前の気乾状態における重量を差し引いて算出した。同図より、配合、養生および脱型時期により吸水特性が大きく異なることが明らかである。同一配合内で比較すると、7日脱型のシリーズを除き、初期養生時の条件が乾燥環境であるほど吸水量が多くなり、吸水曲線が高い位置を取ることが分かる。7日脱型のシリーズで初期水中養生による吸水抑制効果が明瞭でない原因は、打込面の影響が考えられる。今回の試験体は他試験への用途を確保するため、吸水面を特定の面に限定するような被覆などの処置は行っていない。そのため、型枠存置期間の影響が現れない打込面

からの吸水については誤差要因となる。

脱型条件について整理してみると、図 4.2.4(a)(b)(c)に示すように、1 日脱型の試験体では気中養生に比べて水中養生で吸水量が小さく、水セメント比が高いほどその傾向は顕著である。しかし、図 4.2.4(d)に示す 7 日脱型の試験体では養生の差が小さくなり、わずかながら水中養生の吸水量が大きい。脱型時期の延伸で吸水抵抗性が顕著に向上し、脱型後の初期養生の影響は小さくなる可能性がある。次に、各配合間で比較すると、水中養生の $W/C=60\%$ と $W/C=50\%$ で吸水曲線の位置関係が水セメント比から推測される品質に沿ったものとならず、 $W/C=60\%$ で吸水曲線が下に位置し、最終的な吸水量も少なくなっている。この

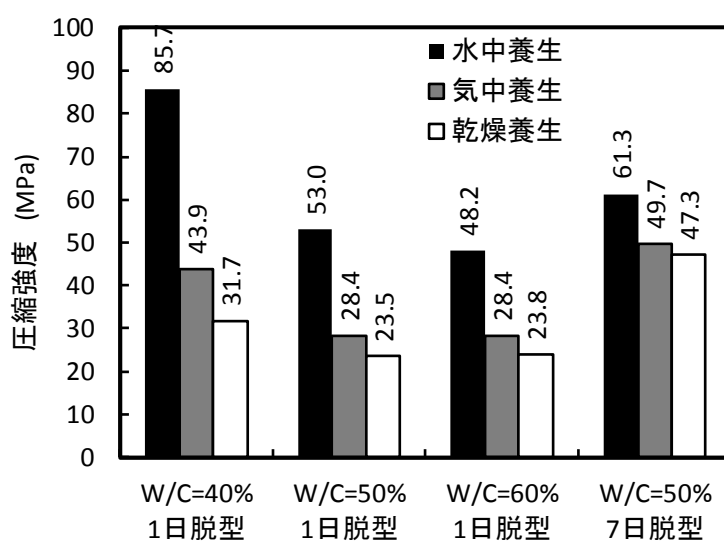


図 4.2.3 圧縮強度試験の結果

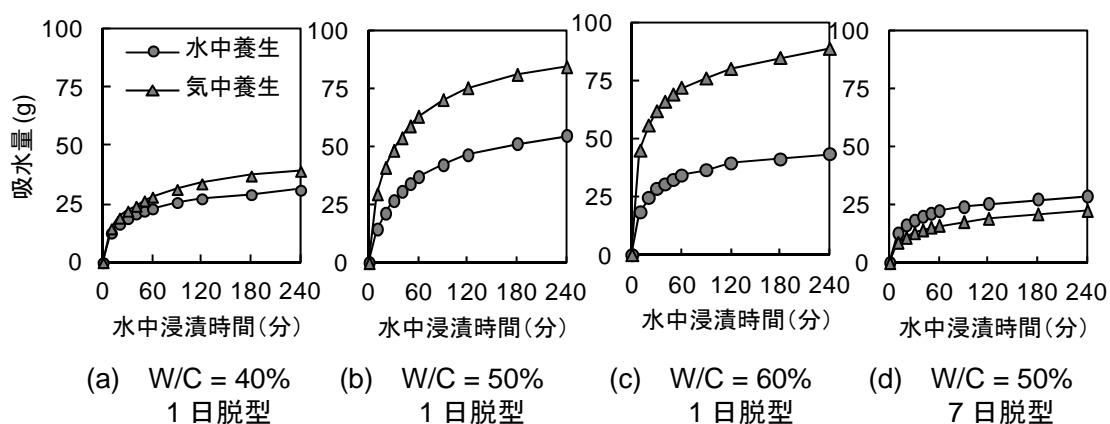


図 4.2.4 水中浸漬試験の結果

原因について詳細は解明できていないが、試験開始時における気乾状態の設定誤差が現れた可能性が考えられる。本検討においては、初期養生として水中養生を行った試験体については気中乾燥状態への移行を促進させるための措置として 40℃の乾燥炉による強制的な乾燥を行った。40℃環境下での乾燥により、20℃環境下では逸散しない領域の水分まで蒸発した可能性が考えられる。

4.2.2.3 散水時の明度変化特性

図 4.2.5 に、A 機によるモルタル試験体の気乾状態における明度 L^* を示す。測定値は試験体各面 9 箇所の平均値を示し、側面については 4 面、36 箇所の平均値となる。初期養生方法が異なる試験体間で比較すると、水中養生を行った試験体で明度が高いことがわかる。これは水槽内に養生されることで表面に析出したカルシウム塩類の影響と推測される。測定面の種別で比較すると、明度は打込面で高く、底面で低い傾向にあり、脱型時期を延伸した 7 日脱型の試験体で顕著である。養生方法および型枠の脱型時期が乾燥状態のモルタル表面の明度に影響を及ぼすことが確認された。

図 4.2.6 に、モルタル試験体の湿潤状態における明度 L^* を示す。同図より、散水によって明度が全体的に低下したことが明らかである。また、気乾状態と比較すると、水中養生時および打込面における明度の向上が、より明瞭となった。つまり、気乾状態から湿潤状態へ散水によって強制的に移行したことで、モルタルの表面付近に付与された水分の影響により表面の明度は変化し、明度 L^* の変化量は、養生の程度や部材の部位などによって生じていると思われるモルタル表層付近の品質差を反映している可能性があることを示唆している。

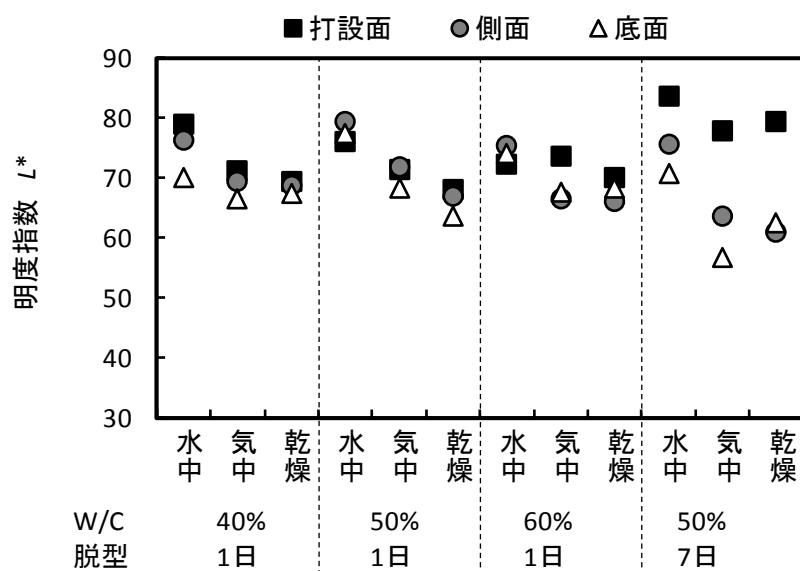


図 4.2.5 気中乾燥状態における明度

図 4.2.7 に、モルタル試験体の散水前後に生じる明度差 dL^* を示す。数値の絶対値の大小が明度変化量の大小を示し、正負は正が明度の向上を、負が明度の低下を示す。同図より、水中養生で明度変化量が小さい。一方、打込面でも明度変化量が小さい。組織が緻密化して物質移動抵抗性が向上するものと仮定した場合に、水中養生による緻密化に対し、測定面種別における打込面の位置付けを考えると両者の関係は相反する。また、全体として、モルタル試験体における圧縮強度や吸水性状に現れたような明瞭な品質の差異を明度 L^* の変化量

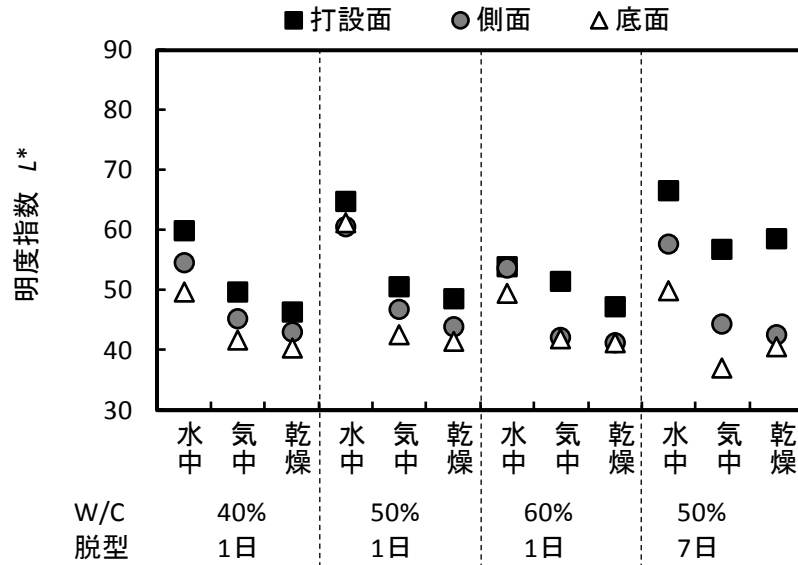


図 4.2.6 湿潤状態における明度

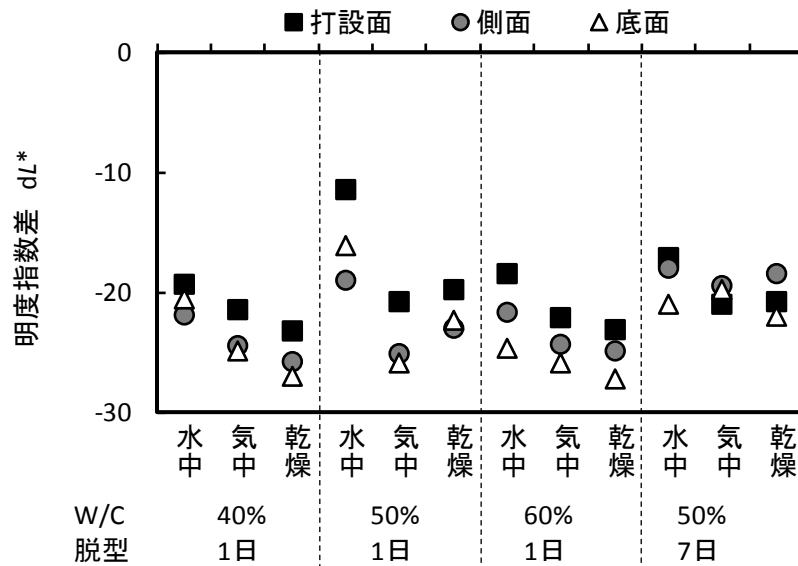


図 4.2.7 乾湿による明度差

である明度差 dL^* のみから得ることはできていない。これらのことから、気乾状態と湿潤状態における色彩値の単純な比較のみによって物質移動抵抗性に対する評価を行うことは困難であるものと考えられる。

4.2.2.4 散水時の明度の詳細な経時変化

著者らは、実構造物のコンクリート表面において、散水後の水分の逸散状況には、コンクリート品質との関連性を窺わせるような特徴が現れることを経験的に見い出してきた。そこで、散水後の明度の経時変化に関する検討を行った。

表面に付与した水分は、内部への浸透や蒸発により、表面からは徐々に消失していく。つまり、色彩や明度で表現すると、黒から白へ徐々に明るくなっていくため、散水によって生じた明度差 dL^* は時間の経過に従って 0 へと漸近する。図 4.2.8 に、少量の散水を行ったモルタル試験体における明度差 dL^* の経時変化を示す。ここでは、A 機によりモルタル試験体の 4 側面×9 箇所にて測定した結果をすべてプロットした。同図より、明度変化量が最大となる経過時間に差が見られ、特に、7 日脱型の試験体で長時間化することがわかる。また、経過時間 100 秒までの測定値は、明度差 dL^* で -10 ～ -25 程度に幅広く分布し、全体的には水中養生の測定値の分布が上下にばらついている傾向にある。以上の測定結果は、A 機による測定径 10mm の測定値を各測定面 9 箇所で採取した色彩値に基づく評価である。A 機では色彩値の分光分布や光沢度が計測される利点があるものの、測定径が小さいため、測定点数を多く取ることとした。そのため、測定位置を固定して秒単位での経時変化を詳細に測定することは不可能であった。図 4.2.8 において、測定値に幅広い分布が示された理由として、同一測定面とはいえ厳密には測定位置の異なる 9 箇所の測定結果を同一の時間軸上にすべてプロットしたことが考えられる。また、秒単位で測定値が変化することが示唆されたため、厳密には測定時期も異なる 9 箇所の測定値を、平均化して評価することも詳細な経時変化を把握する上では不適當である。

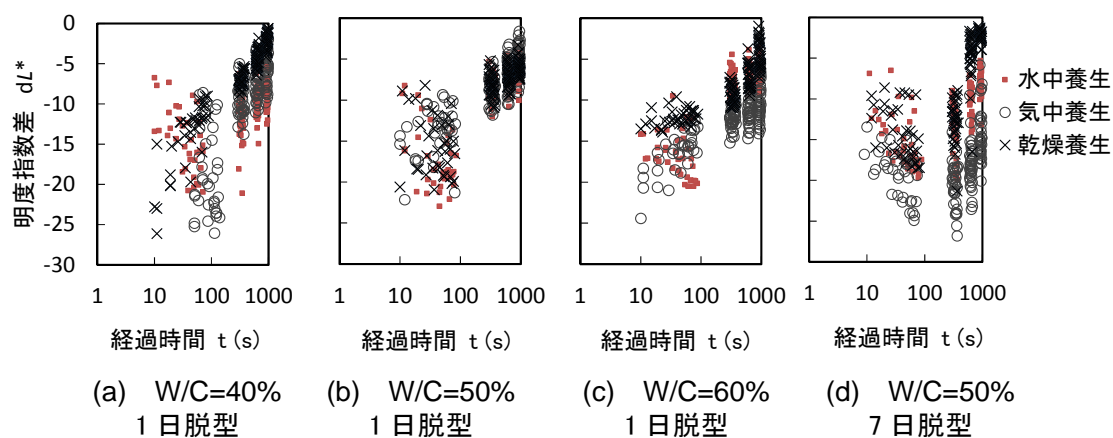


図 4.2.8 少量散水により生じた明度差の経時変化

以上のことから、散水处理を行った直後の数秒から数分の間に生じる明度の経時変化について、測定点を固定して詳細に捉えることが重要であるものと推測した。そこで、散水直後に秒単位で変化する色彩値に対して、より詳細な経時変化を計測するため、B機を用いて検討を行った。B機では、測定位置を固定した上で、測定径 50mm の範囲における色彩値を最短 3 秒間隔で自動的に計測することが可能となる。

図 4.2.9 に、少量の散水を行ったモルタル試験体における明度差 dL^* の詳細な経時変化を示す。各試験体の測面 1 面について、散水領域を治具により直径 70mm の円内に制限して均一化を図った上で約 0.8ml の散水を行い、B機により、中心位置の直径 50mm の領域を 10 秒間隔で計測した結果である。同図より、水セメント比が低いほど、また、水中養生や型枠脱型時期を延伸した場合に、明度変化量が最大となる経過時間が長時間化することがわかる。さらにこれらの試験体では、明度変化量の最大値を記録した直後における経時変化曲線の勾配が緩やかとなることが明らかとなった。散水による明度差 dL^* の経時変化曲線において、明度変化量が最大となる経過時間と曲線の勾配は、コンクリートの配合、養生および脱型時期の相違によって生じる品質差を示す指標となる可能性がある。

ここで、明度差 dL^* の数値の大小のみによって評価を行うことが適切でない可能性が 4.2.2.3 の検討においてすでに示唆されている。また、上記で考察した明度変化量が最大となる経過時間、ならびに曲線の勾配については、散水により生じた明度差ではなくコンクリート表面における明度自体の経時変化曲線においても同等の数値が取得可能である。すなわち、明度の経時変化曲線における、最低明度の計測時間、ならびに曲線の勾配に相当する明度変化速度が、散水による明度変化特性を代表した指標となるものと考えられる。

図 4.2.10 に、散水による明度の経時変化として代表的な例を示す。同図に示すように、各測定箇所における明度 L^* は、初期値である散水前の測定値が最高値をとり、散水によって急激に低下する。散水で表面に付与した水分は、内部への拡散あるいは表面からの蒸散により、時間の経過とともに表面からは徐々に消失する。そのため、散水後の表面の明度 L^*

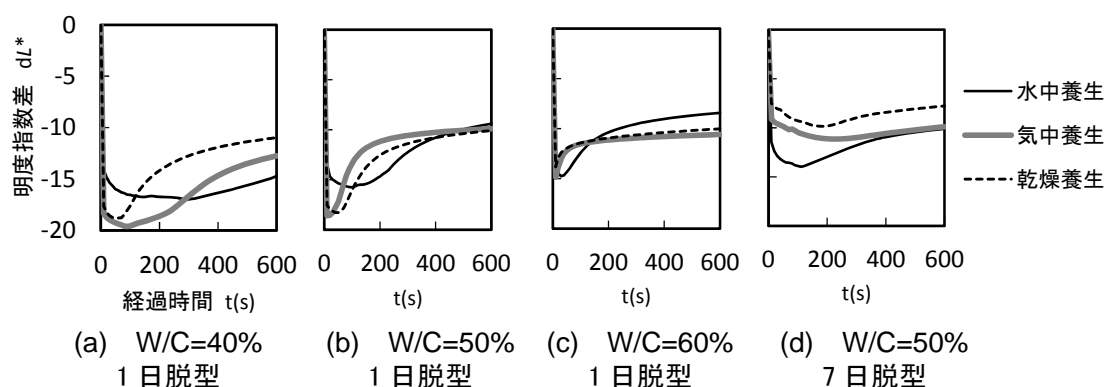


図 4.2.9 少量散水により生じた明度差の詳細な経時変化

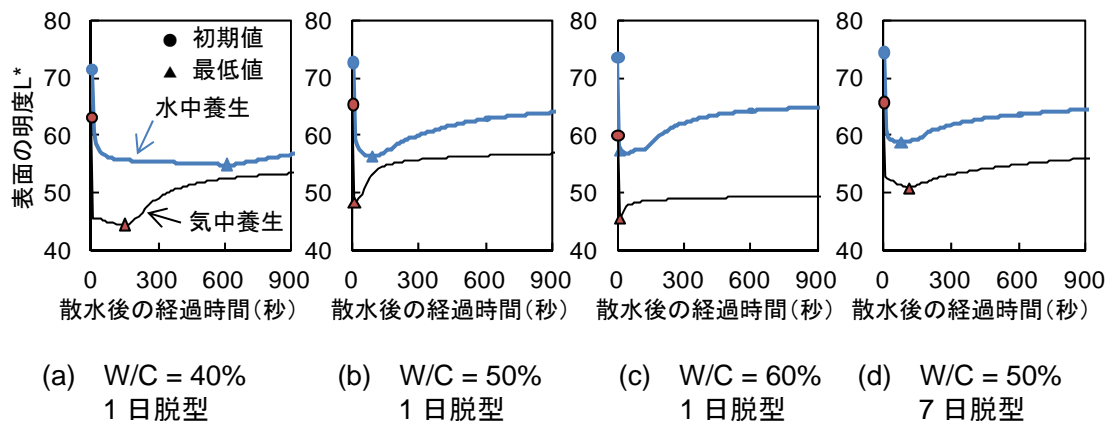


図 4.2.10 散水後の明度の経時変化の代表例と評価指標の抽出

表 4.2.4 明度変化特性および吸水量の測定結果

W/C (%)	脱型 時期	初期養生	明度 L*		T _L (s)	V _H	W _A (g/m ²)
			初期値	最低値			
40	1 日	水中	71.4	54.8	600	0.008	518
		気中	63.1	44.3	150	0.043	653
水中		72.7	56.3	90	0.027	910	
気中		65.4	48.4	10	0.098	1402	
60		水中	73.5	57.0	40	0.037	723
		気中	60.0	45.6	10	0.091	1477
50	7 日	水中	74.4	58.9	80	0.025	477
		気中	65.7	50.8	110	0.015	373

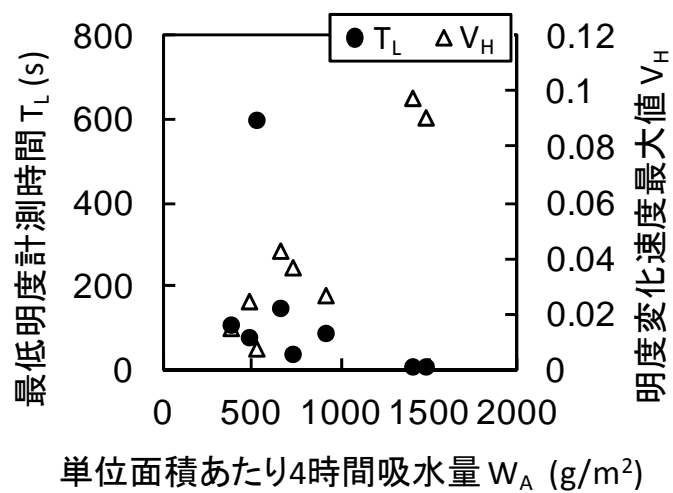


図 4.2.11 明度変化特性と吸水量の関係

は経時的に初期値へと漸近していくが、明度 L^* の経時変化は試験体の品質により大きく異なる。散水によって明度が変動する主要因は、表層部の水分の存在である。そのため、明度の経時変化曲線における以上のような特徴の相違は、各試験体の表層の水分移動特性を反映したものと考えられる。そこで、明度変化特性を代表する指標として、明度 L^* の最低値が計測された散水後の経過時間（以下、最低明度計測時間 TL とする）、ならびに散水後の明度 L^* が初期値へと復元していく速度の最大値（以下、明度変化速度最大値 VH とする）を算出し、考察を行った。表 4.2.4 に、各試験体の最低明度計測時間 TL および明度変化速度最大値 VH を、試験体の水中浸漬による吸水試験で得られた浸漬 4 時間後の単位面積あたりの吸水量（以下、吸水量 WA とする）と併せて示す。表より、吸水量 WA は低水セメント比あるいは水中養生の場合に小さいのに対して、散水後の明度変化特性を見ると、最低明度計測時間 TL は長時間化し、明度変化速度の最大値 VH は小さくなる傾向がある。これらの関係を、図 4.2.11 に示す。同図より、吸水量の大きい試験体では TL の低下と VH の上昇が明確に現れている。吸水に対する抵抗性の高さを評価する指標として、最低明度計測時間 TL は正の相関を、また、明度変化速度の最大値 VH は負の相関を有する指標としてそれぞれ活用できる可能性が示された。

4.2.2.5 実構造物との測定面の相違が及ぼす影響に関する検討と考察

小型の試験体による作業台上での測定作業は、水平面の上面を測定面とするのが作業性の面では最適である。そのため、本章でこれまでに示した室内試験のデータは、試験体を水平に設置した上面を対象とした測定によって取得したものである。一方、第 3 章の 3.4 節に示した実構造物での試行の結果は、橋台あるいはボックスカルバートの壁面を対象とした測定により得られたデータに基づいており、鉛直面を対象とした結果である。実構造物での表層品質の測定を行う場合、柱や壁などの鉛直面を対象とする機会が多いと考えられるため、水平面の上面と鉛直面を対象として、測定面の方向の相違が与える影響を検証した。なお、水平面の下面については、実構造物においても床版下面での測定を行う状況が想定されるものの、安定した測定を実現できる環境が構築できなかったため、本研究では実験を行っていない。

図 4.2.12 に、測定面の相違が散水による水分の付与に及ぼす影響を例示する。散水量は 0.8ml を直径 70mm の円内に散布する形としたが、鉛直面では散水後に瞬間的に吸収されない水が余剰分となって流下することが判明した。つまり、明度の変化を測定する測色領域において、散水によって付与した水分は内部への吸水に加えて流下によっても消失されることとなる。しかし、散水領域は測色領域に対して 10mm ほどの余裕を持った直径 70mm の領域であるため、測色領域の上方からの流水による水分の供給もまた同時に発生することになる。これらのことから、測定面の方向の相違が明度変化に及ぼす影響は、散水量の増減による影響と同時に検証する必要があると考えた。そこで、散水量の影響を確認するため、水平面の上面を測定対象とした上で、散水量を 2 倍に増加させた際の明度変化特性を測定

した。散水量の検証に用いた試験体は、 $W/C=60\%$ 、1日脱型のシリーズで、脱型後の初期養生条件が異なる3体とした。明度変化特性の測定は、散水量約0.8mlでの測定後、1箇月間、測定面を乾燥させた後、スプレーによる散水回数を2倍にした散水量約1.6mlで実施し、比較を行った。また、散水量の検証を実施してから約3箇月後に、同じ試験体を用いて測定面の方向の検証を実施した。

図4.2.13に、散水量を変化させた際の明度変化特性の測定結果を示す。また、表4.2.5に、測定結果から抽出した最低明度計測時間 TL および明度変化速度最大値 VH を示す。図より、散水量の増加により明度 L^* の最低値がさらに低下することがわかる。図4.2.13(a)(b)に示すように、散水量の増加によって TL は長時間化し、VH は小さくなるものと考えられるが、図4.2.13(c)に示すとおり TL に差が生じなかった乾燥気中養生の試験体では、散水量が多い場合に VH が増大した。乾燥気中養生の試験体では、TL は散水量によらず10秒となっており、付与した水分が10秒以内に全て表面から消失したことを表している。なお、図4.2.4で示したとおり、当該試験体の吸水抵抗性が最も劣ることが吸水試験により確認されている。明度変化の発生メカニズムとしては、散水量が増加するほど表層での水の移動経路が満たされることで表面からの水の消失が遅延し、明度変化が緩慢化すると考えるのが妥当と思われる。そのため、乾燥気中養生の試験体で散水量の増加による明度変化特性の大小が逆転した原因としては、散水後の測定開始時間の影響を想定している。図4.2.13(b)(c)に示した測定結果のように、吸水抵抗性が低い試験体における明度の経時変化曲線は、初期に急激な明度変化を生じた後、急速に明度変化が安定する傾向にある。一方、今回の検討における明度変化特性の測定方法では、散水後の初回測定は散水から10秒後である。そのため、著しく吸水抵抗性の低いコンクリートでは、散水量が少ない場合、散水から10秒以内に急激な明度変化が完了し、初期の明度変化を捕捉できない可能性が考えられる。図4.2.13(b)(c)においては、その影響が表れた可能性がある。



(a) 水平面の上面

(b) 鉛直面での流下

図 4.2.12 測定面の相違が水分付与状況に及ぼす影響の例

図 4.2.14 および図 4.2.15 に、測定面の方向を水平面の上面から鉛直面に変化させた際の明度変化特性を示す。いずれの試験体においても、鉛直面の経時変化曲線が上方に位置している。鉛直面の測定で生じる余剰水分の流下により、明度変化特性は影響を受けることが確認された。余剰水分の流下によって散水時の実効的な水分の付与量が減少したものと考えられる。一方、図 4.2.14 に示した水中養生試験体による測定結果は、図 4.2.15 に示した気中養生試験体の結果に比べて、測定面の方向の違いによる経時変化曲線の相違が大きい。また、気中養生試験体においても、図 4.2.15(a)に示す $W/C = 40\%$ の試験体、あるいは、図 4.2.15(d)に示す脱型時期を延伸した試験体で測定面の方向の違いによる経時変化曲線の相違が大きい。これらのことから、吸水抵抗性が高いコンクリートの場合、測定面の方向の違いによる経時変化曲線の相違が大きくなること、散水によって付与した水分の流下による消失量が大きくなることが予測される。つまり、吸水抵抗性が高いコンクリートでは、散水による余剰水分の流下量が増大するものと考えられる。

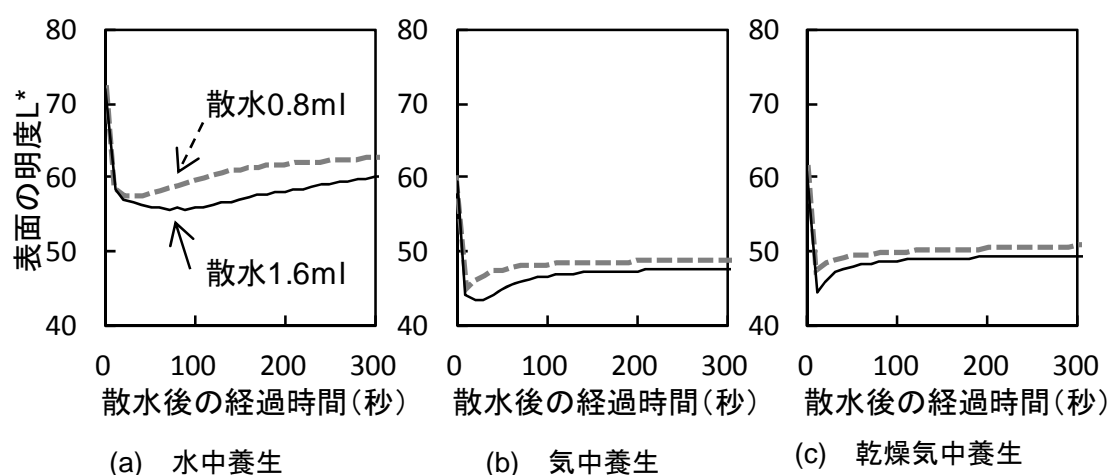


図 4.2.13 散水量が明度変化特性に及ぼす影響

表 4.2.5 最低明度計測時間と明度変化速度最大値 ($W/C = 60\%$, 1 日脱型)

初期養生	散水量(ml)	$T_L(s)$	V_H
水中	0.8	30	0.041
	1.6	70	0.030
気中	0.8	10	0.099
	1.6	20	0.078
乾燥気中	0.8	10	0.097
	1.6	10	0.137

柱や壁などの鉛直面を測定対象とした場合、散水によって付与した水分のうち瞬間的に吸水されない余剰分が表面を流下することにより、明度変化に寄与する水量が減少し、明度変化特性に影響することを確認した。鉛直面における余剰水分の流下に伴う実効的な水量の減少による影響は、測定対象となるコンクリートの吸水抵抗性が高いほど大きい。なお、散水後、瞬間的に吸収される水分の量はコンクリートの吸水抵抗性と直結するため、付与した水量を一定とした場合、吸水されない余剰水分の量も同様にコンクリートの吸水抵抗性と直結すると考えられる。そのため、鉛直面においては吸水による明度変化特性ではなく、余剰となった水分の挙動を把握し、定量的に評価することによってコンクリートの品質を評価できる可能性がある。散水時の余剰水分の挙動とコンクリート品質の関係性については第5章で述べる。

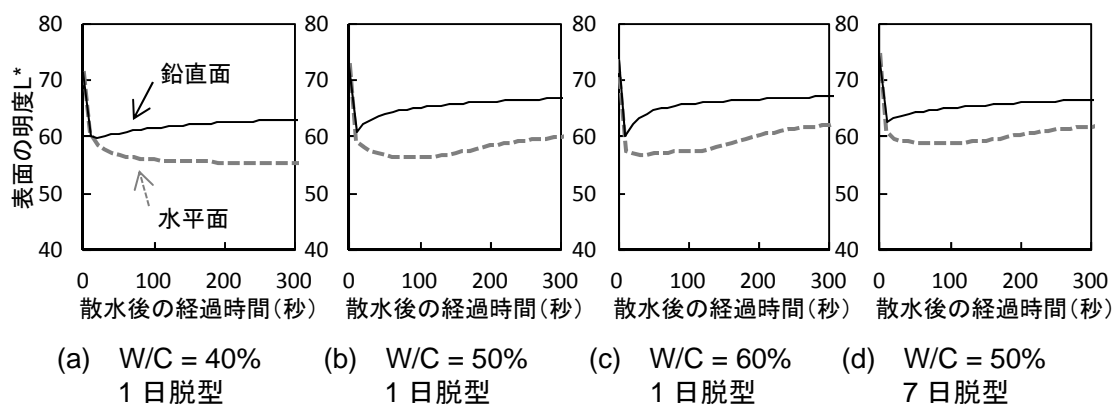


図 4.2.14 測定面の方向が明度変化特性に及ぼす影響（水中養生）

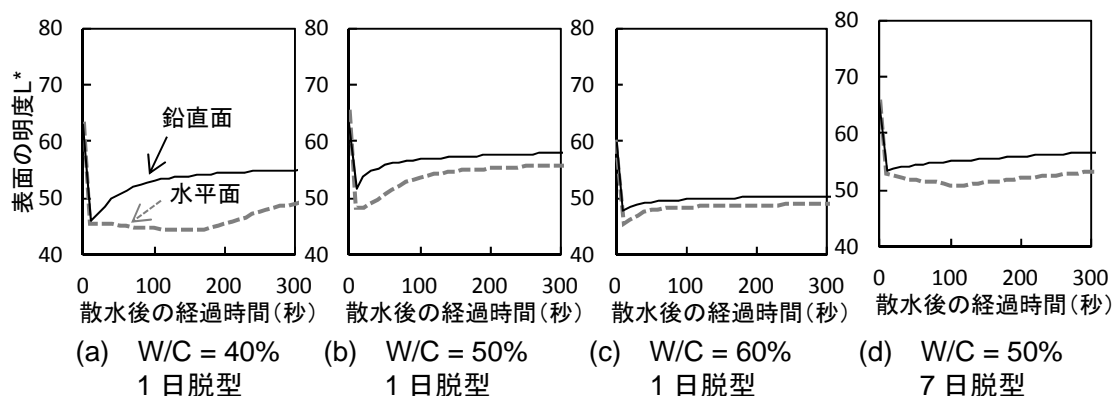


図 4.2.15 測定面の方向が明度変化特性に及ぼす影響（気中養生）

4.2.3 モルタル試験体による実験のまとめ

型枠の脱型時期および脱型後の初期養生によって異なる表層品質を設定したモルタル試験体を用いた各種試験により、以下のような知見が得られた。

- 1) 型枠の脱型時期を延伸することで、脱型後の初期養生方法に起因する乾燥によって生じる品質に対する悪影響は小さくなる。
- 2) 型枠の脱型時期の延伸および脱型後の湿潤養生は、モルタルの吸水抵抗性を向上させる。
- 3) 直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体による圧縮強度試験の結果、脱型後の養生条件が圧縮強度に及ぼす影響は、型枠脱型時期を延伸した供試体で小さく、1 日脱型では低水セメント比ほど顕著であった。
- 4) モルタルおよびコンクリートの表面色は表層付近の含水状態に依存して変化する。
- 5) 表面色の変化は明度（CIELAB 表色系では明度 L*）に顕著に現れる。
- 6) 同条件で打ち込まれたモルタルの場合、水槽内にて水中養生を行った試験体の表面は明度が高くなる。また、打込面では明度が高くなり、型枠に接する底面は明度が低くなる。
- 7) モルタルの表面色は脱型時期および脱型後の養生方法など多くの影響要因によって変化するため、表面色の測定値のみで絶対的な評価を行うのは困難である。
- 8) 散水時の明度変化に関する経時変化曲線には、コンクリートの表層品質に関する情報が含まれている。
- 9) 直径 70mm 程度の円内に約 0.8ml の散水を行った場合、明度の特徴的な経時変化は散水直後の数秒から数分の間で現れる。
- 10) 散水時の明度変化特性を代表する指標として、明度の最低値が計測されるまでの経過時間（最低明度計測時間）、明度変化速度最大値を抽出した。これらの指標により、コンクリートの表層品質を簡易に評価できる可能性が見い出された。
- 11) 散水によってコンクリート表面に付与した水分の挙動は測定面の角度によって変化する。鉛直面では水分の流下による測定領域からの消失を考慮する必要がある。
- 12) 散水量の減量によって鉛直面における水分の流下による消失の影響を軽減することができるが、散水量が少なすぎる場合は散水による明度変化の初期の挙動を正確に捉えられない可能性がある。
- 13) 鉛直面においては散水によって付与した水のうち吸水されない余剰の水が流下するため、余剰となった水の流下挙動を把握することによってコンクリートの表層品質を評価できる可能性がある。

4.3 コンクリート試験体による検証実験

4.3.1 実験の概要

モルタル試験体の室内試験による基礎的検討で確認された表層品質に依存する散水時の明度変化特性について，土木学会 335 委員会により実施されたラウンドロビン試験[4.6]に参加して各種コンクリート試験体を対象とした測定を行い，実構造物の表層品質評価への適用を想定した状況における適用性を検証した。また，その結果明らかとなった散水方法に対する課題を解消するため，小型のコンクリート試験体による試験室内での実験を行った。

4.3.1.1 試験体

ラウンドロビン試験は，同一の中規模コンクリート試験体を対象として，各種の非破壊試験手法による表層品質の評価を試みることを目的として土木学会 335 委員会により 2010 年 11 月～2011 年 5 月にかけて実施された。表 4.3.1 に，ラウンドロビン試験体の概要を示す。ラウンドロビン試験体には，いずれもレディーミクストコンクリートが使用された。ラウンドロビン試験体の総数は 18 体で，形状はいずれも幅 450×奥行 900×高さ 1200mm の直方体で，水セメント比と養生条件により表層品質の差異化が図られている。表 4.3.2 に，ラウンドロビン試験体に使用されたコンクリートの特徴を示す。セメントの種類として普通ポル

表 4.3.1 ラウンドロビン試験体の概要

呼称*	セメント種	W/C (%)	脱型時期と初期養生
BB-40-A～C	BB	40	A：9 日脱型，材齢 28 日まで密封養生 B：9 日脱型，気中養生（屋外） C：1 日脱型，気中養生（屋外）
BB-50-A～C		50	
BB-60-A～C		60	
N-40-A～C	OPC	40	A：7 日脱型，材齢 28 日まで密封養生 B：7 日脱型，気中養生（屋外） C：1 日脱型，気中養生（屋外）
N-50-A～C		50	
N-60-A～C		60	

*：セメント種-水セメント比-養生ランク

表 4.3.2 ラウンドロビン試験体に使用されたコンクリートの特徴

セメント種	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)
BB	40	48.9	175	438	20	23.5	3.3
	50	50.9		350		23.0	3.0
	60	52.4		292		18.0	4.8
OPC	40	49.3		438		21.5	3.3
	50	51.3		350		19.0	3.2
	60	52.7		292		18.0	3.9

トランドセメント（以下、OPC とする。）と高炉セメント B 種（以下、BB とする。）の 2 種類が設定され、単位水量は 175kg/m^3 に統一された。目標のスランプと空気量がそれぞれ 21cm と 4.5% に設定されたものの、OPC を用いた N シリーズに比べて BB を用いた B シリーズで変動が大きくなっている。試験体の曝露環境は屋根のある屋外環境で、降雨の影響がない実構造物に近い条件で試験が可能のように配慮されたものである。

ラウンドロビン試験に続いて実施した試験室内における実験では、水セメント比、脱型時期、脱型後の初期養生により表層部の物質移動抵抗性に関わる品質の差異化を図った小型のコンクリート試験体による実験を行った。試験体の形状は 2 種類で、150mm 角の立方体、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の直方体の角柱試験体である。150mm 角の立方体型試験体は、水中浸漬による吸水試験およびトレント法による表層透気試験に使用した。100×100×400mm の角柱試験体は、散水時の明度変化に関する測定に使用した。表 4.3.3 に、配合およびスランプ、空気量を示す。細骨材と粗骨材の単位量を統一した上で、水セメント比を $W/C=40\%, 50\%, 60\%$ の 3 段階に設定した。スランプの調整は行わず、空気量のみを同程度となるよう AE 減水剤および助剤で調整した。試験体は表層品質の差異化を図るため、脱型時期をコンクリートの打込みから 1 日後および 7 日後の 2 段階に、試験室内における材齢 28 日までの初期養生条件を水中養生と乾燥気中養生（ 20°C 、 $40\%\text{RH}$ ）の 2 段階に設定した。試験体は 28 日間の初期養生の完了後に温湿度が管理された試験室内に静置し、気中乾燥状態とした。

4.3.1.2 試験条件

表 4.3.4 に、ラウンドロビン試験における散水および測色に関する試験条件を示す。測色は測定径 50mm の B 機を用いて散水 1 箇所あたり 1 点で実施した。散水領域は直径約 70mm の円内、散水量は約 0.8ml である。各試験体における測定位置は、他の試験手法との重複を避けて設定し、西向きに設置された幅 450×高さ 1200mm の面における右側の端部とし、高さ方向は中央部とした。高さ方向については一部の試験体で 4 等分点にあたる 3 箇所での測定値を比較した結果、大きな差異はないと判断した。散水時の明度変化特性に関する測定は、ラウンドロビン試験体の材齢 182 日で実施した。

表 4.3.5 に、小型のコンクリート試験体による実験の流れを示す。試験開始時の試験体の含水状態は、温度が 20°C 、相対湿度が 60% に管理された試験室内における気中乾燥状態とした。150mm 角の試験体による吸水試験は材齢約 1 年で実施し、吸水試験から 45～50 日後に表層透気試験を実施した。吸水試験の水中浸漬時間は最大 4 時間とし、最短で 5 分後から、所定の浸漬時間を経過した段階で水中から試験体を取り出したのち、直ちに表乾状態の試験体の重量を測定した。表層透気試験には、Materials Advanced Services 社製の Permea TORR を用い、試験体の打込側面 4 面のうち無作為に選定した 1 面について測定を行った。

表 4.3.6 に、コンクリート試験体による検討における散水後の明度変化に関する測定の試験条件を示す。詳細は 4.3.2.1 にて後述するが、ラウンドロビン試験において、鉛直面における散水による水分の実効的な付与量の減少による影響があらためて確認され、1 回のスプ

表 4.3.3 コンクリート試験体の配合

W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)
40	43.0	155	388	762	1050	8.2	4.1
50	43.0	170	340	762	1050	16.0	3.6
60	43.0	182	303	762	1050	19.5	3.6

表 4.3.4 ラウンドロビン試験における試験条件

測色機器	B 機
散水方法	散水量（少量散水時）：約 0.8 ml×1 回 散水量（多量散水時）：約 0.8 ml×11 回 散水面積：直径 70mm 円形 散水方向：水平
環境	屋外（降雨には曝されていない）
測定項目	(1) 散水前の明度 (2) 少量散水直後の明度および経時変化 (3) 多量散水直後の明度

表 4.3.5 コンクリート試験体による実験の流れ

材 齢	項 目
1 日	早期脱型試験体の脱型
7 日	脱型時期延伸試験体の脱型
28 日	初期養生期間終了
約 1 年	150mm 角柱試験体の水中浸漬による吸水試験 100×100×400mm 試験体の明度変化測定
約 1 年 2 箇月	150mm 角柱試験体の表層透気試験

表 4.3.6 コンクリート試験体における試験条件

測色機器	B 機
散水方法	散水量：0.3 ml 散水面積：直径 70mm 円形 散水方向：水平 散水の繰返しあり（約 200 秒間隔）
環境	試験室内（気温 20 度，相対湿度 60%）
測定項目	(1) 散水前の明度 (2) 散水直後の明度および経時変化 (3) 散水・明度測定の繰返し

レー操作により散布される水量を減少させることの必要性が明らかとなった。一方で、図 4.2.13 にて示したように、散水量を減じた場合には明度の変化量が小さくなるのがすでに判明している。つまり、散水量の過多および過少の両面で課題が発覚したことになる。そこで、同一の測定箇所において、少量の散水と測色を繰り返し行うという新たな方法を考案し、方法の改良の効果を検証した。散水時の明度変化特性に関する測定は材齢約 1 年で実施した。測定面の方向は水平面の上面とした。試験体の $100 \times 400\text{mm}$ 側面を被測定面とし、1 側面あたり 1 箇所にて測定を行った。明度 L^* の初期値を計測したのち散水を行い、散水の 15 秒後から 5 秒間隔で明度 L^* の経時変化を散水の 175 秒後まで計測した。散水量を減ずるために使用する散水器具を変更し、散水量は 1 回の散水あたり 0.3ml とした。散水の繰り返しは、明度 L^* の経時変化を計測したのち直ちに行うこととし、ここでは繰り返しの時間間隔は正確に制御されたものではなく、約 200 秒となった。繰り返し回数は最大で 4 回とした。

4.3.2 実験の結果および考察

4.3.2.1 ラウンドロビン試験

図 4.3.1 に、ラウンドロビン試験時の各試験体における少量散水前後の明度 L^* の経時変化曲線を示す。N-40-A を除いて散水直後に明度 L^* の最低値が記録され、最低明度計測時間 TL には差が生じなかった。これは、測定面が試験体側面のため散水および測定方向が水平方向（測定面が鉛直面）となったことによる影響が大きいものと考えられる。試験室内で小

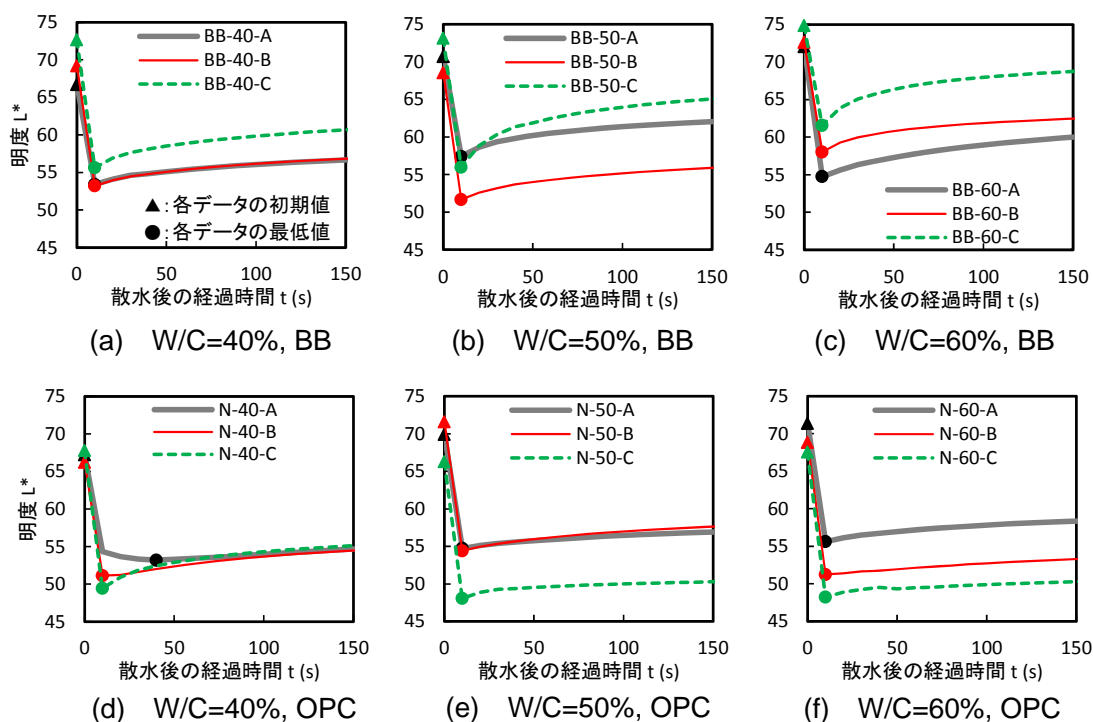


図 4.3.1 ラウンドロビン試験体における散水時の明度の経時変化

規模の試験体を用いた検討の段階では、被測定面を水平面の上面として設置した試験が可能である。水平面の上面を測定対象とした状況下では、散水によりコンクリート表面に付与した水は蒸発により失われる量を除いて、ほぼ全量がコンクリート内部へと徐々に吸収されていく。それに対して、実構造物の壁面のように被測定面が鉛直面となる状況下では、散水により付与した水は吸収されると同時に余剰分の水は壁面を流下するため、本手法の測定領域で実際にコンクリート内部へと吸収され得る水の量は減少する。さらに、瞬間的な吸水量がコンクリートの表層品質によって大きく異なると予想されるため、測定面の方向が明度の変化に及ぼす影響は測定対象のコンクリート表層品質にも依存すると考えられる。

表 4.3.7 に、各試験体の明度変化速度最大値 VH を示す。セメントに BB を用いたシリーズでは、水セメント比が高いほど、また、養生の程度が劣る養生 C では明度変化速度最大値 VH が大きい傾向にある。セメントに OPC を用いたシリーズでは、同じ水セメント比で養生差の影響をみるとおおむね養生の程度の順に数値が対応している。しかし、養生 C では水セメント比が高いほど VH の数値が小さくなっており、水セメント比から想定される表層品質は反映されていない。この原因として、鉛直面における付与水量の減少による影響のほか、少量散水時の散水量が過剰であった可能性があるものと考えている。散水量が過剰な場合、意図的に付与した水分が瞬時に移動できる領域は水で満たされてしまい、表層の水分移動が鈍化する。その結果、表面における明度変化速度は全体的に小さくなり、表層品質の差が反映され難くなるものと考えられる。また、OPC を用いたシリーズでは、全体的に散水後の明度 L^* の経時変化が緩やかな傾向にあるが、これに関しても少量散水時の散水量

表 4.3.7 ラウンドロビン試験体の明度変化速度最大値 VH

セメントの種類	W/C (%)	養生 A	養生 B	養生 C
BB	40	0.073	0.078	0.128
	50	0.123	0.091	0.284
	60	0.088	0.125	0.233
OPC	40	0.015	0.041	0.144
	50	0.040	0.054	0.082
	60	0.050	0.025	0.068

表 4.3.8 ラウンドロビン試験体の明度変化飽和度 SL

セメントの種類	W/C (%)	養生 A	養生 B	養生 C
BB	40	0.65	0.76	0.71
	50	0.59	0.77	0.59
	60	0.78	0.61	0.46
OPC	40	0.79	0.78	0.74
	50	0.77	0.79	0.82
	60	0.77	0.86	0.85

が過剰であった可能性が考えられる。

表 4.3.8 に、試行的検討段階で実構造物の評価に適用し、有用性が見い出された指標である明度変化飽和度 SL について、ここでは各試験体に少量散水を行ってから 30 秒後の明度変化量を用いて算出した値を示す。第 3 章の 3.4 節において表 3.4.3 で示したように、実構造物における試行段階では表層品質の異なる各構造物で明度変化飽和度が 0.2～0.9 程度に幅広く分布したのに対し、ラウンドロビン試験では BB で 0.5～0.8 程度、OPC は水セメント比と養生の程度によらず約 0.8 となり、差が明確でない。これは、散水量の影響であると思われる。ラウンドロビン試験では、実構造物での試行段階と異なる測色機器 B 機を導入したため散水方法を変更し、少量散水時の散水量は同等としたものの、散水面積は約 1/3 となった。つまり、面積あたりの散水量は、実構造物調査時と比較して概算で約 3 倍となる。その結果、少量散水時と多量散水時の明度変化の差は小さくなり、その影響が明度変化飽和度に現れたものと考えている。

以上のとおり、前章の実構造物調査では本手法の有効性が確認できたのに対して、ラウンドロビン試験では測定方向および散水量の影響を受けることが課題として明らかになった。なお、実構造物での試行段階において明度変化飽和度による比較が有効となった要因として、第一に、セメントの種類が BB であったことが挙げられる。これは、ラウンドロビン試験の結果も BB を用いた試験体の測定結果についてはおおむね良好であったことによる。一般に、高炉セメントを用いたコンクリートでは初期養生の程度が品質に与える影響が大きいとされている。散水時の明度変化速度は、高炉セメントを用いたコンクリートで養生の差異による表層の水分移動特性の差が大きく現れたことを、より敏感に反映している可能性がある。また、実構造物での試行段階の測定結果が良好であった第二の要因としては、面積あたりの散水量が少ないことが、表層品質の差を反映する上で良好な散水の条件となったものと考えている。

4.2 節で示したモルタル試験体の室内試験による検討の段階で明らかになった鉛直面における水分の実効的な付与量の減少による影響がラウンドロビン試験においてあらためて確認された。つまり、本研究において 1 回のスプレー操作により散布される水量を減少させることの必要性が明らかとなった。

4.3.2.2 室内試験

図 4.3.2 に、コンクリート試験体の吸水試験結果を示す。水中浸漬時の吸水量は、試験体の作製条件から最低品質と想定される $W/C = 60\% \cdot 1$ 日脱型・乾燥気中養生の試験体で最大となり、最高品質と想定される $W/C = 40\% \cdot 7$ 日脱型・水中養生の試験体で最小となった。全試験体の順列は、水中浸漬時間 90 分以降で $W/C = 40\% \cdot 1$ 日脱型・乾燥気中養生と $W/C = 50\% \cdot 7$ 日脱型・水中養生が入れ替わるが、それ以外の順列は浸漬時間によらず同様であった。 W/C が同じ試験体では、脱型時期および初期養生の条件が良好であるほど吸水量が小さくなっている。図 4.3.3 に、水中浸漬 4 時間の総吸水量と表層透気試験による透気係数

kT の関係を示す。全体的には相関関係が見られるものの、両端のプロットを除いた中間的な品質の試験体の結果に着目すると、吸水量と透気係数 kT とで試験体の順列は対応していない。データ数が少ないため断定的な見解は避ける必要があるが、吸水性と透気性とは移動の対象となる物質が水と空気異なるため、中間的な品質のコンクリートに対する評価は試験方法によって差が生じる可能性がある。

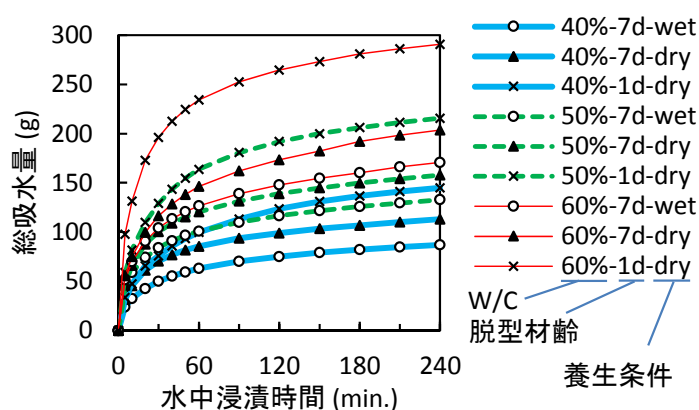


図 4.3.2 吸水試験結果

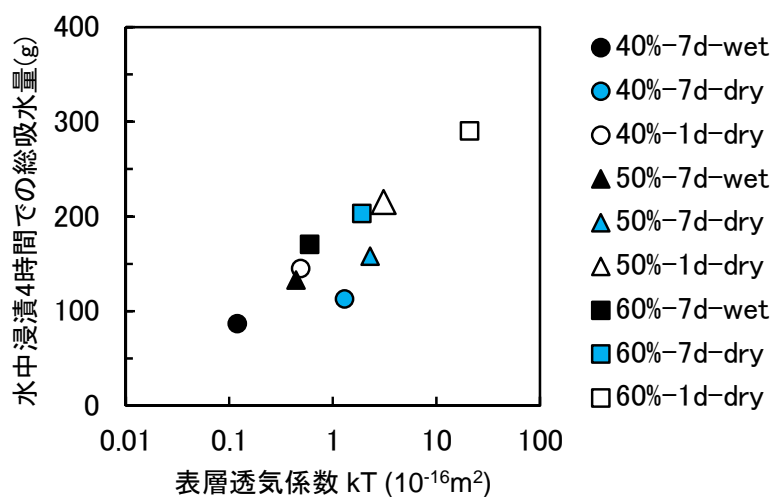


図 4.3.3 吸水量と透気係数の関係

図 4.3.4 に、散水時の明度変化に関する測定結果の例として、W/C=40%と 60%の測定結果を示す。いずれの測定結果においても、明度は散水前が最高値を示すこと、散水によって急激に低下したのち経時的に初期値へと復元していくこと、という挙動に加え、ここで新たに導入した同一箇所での散水の繰返しによって、明度の復元段階における挙動が細分化して取得されることが確認された。新たに導入した、同一箇所での散水を繰り返すという散水

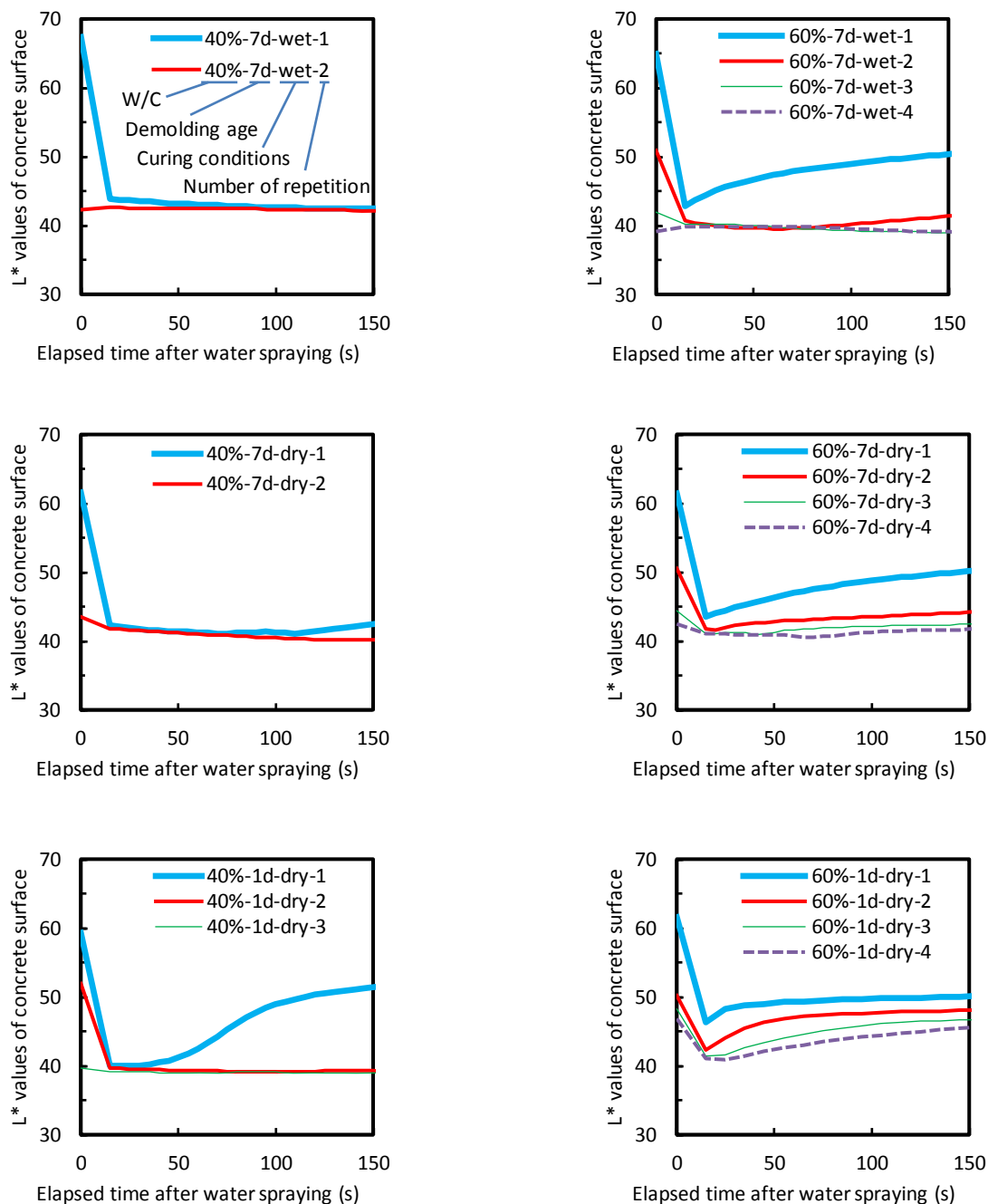


図 4.3.4 散水時の明度変化

方法の影響に関して、散水の繰返しにより明度の時間当たりの変化が緩慢になり、W/C = 40%の場合、2 回目の散水で時間の経過に伴う明度変化がほとんど生じない状態となった。一方、W/C = 60%の場合、明度は散水の繰返しによって W/C = 40%の場合に比べてさらに低下した。また、明度の変化は繰返し回数の増加に伴って底打ちとなっており、これは表層における含水状態の飽和を捉えた挙動と考えることができる。

次に、各試験体の明度変化特性を代表する指標として、最低明度計測時間 TL および明度変化速度最大値 VH を抽出し、散水の繰返しがこれらの指標に及ぼす影響を考察する。ここでの測定条件から、TL の最小値は 15 秒、最大値は 175 秒となる。図 4.3.5 に、1 回散水時の最低明度計測時間 TL および明度変化速度最大値 VH を示す。水セメント比が 40%の場合、脱型条件あるいは養生条件が良好なほど TL は長時間化し、VH は低下した。これは、図 4.2.11 に示したモルタル試験体による実験で得られた知見と合致する。しかし、図 4.3.5

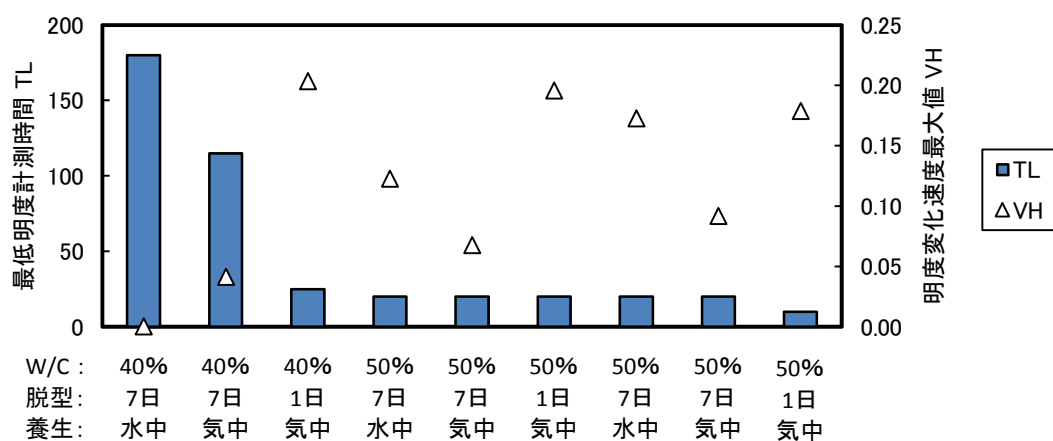


図 4.3.5 散水時の明度変化特性（散水 1 回）

表 4.3.9 明度変化特性（散水繰返し時）

W/C (%)	脱型日	初期養生	散水 2 回目		散水 3 回目	
			T _L	V _H	T _L	V _H
40	7 日	水中	180	0.000	180	0.000
40	7 日	気中	175	0.008	175	0.000
40	1 日	気中	165	0.060	180	0.005
50	7 日	水中	125	0.024	130	0.005
50	7 日	気中	55	0.016	110	0.008
50	1 日	気中	20	0.244	20	0.105
60	7 日	水中	70	0.025	160	0.007
60	7 日	気中	25	0.084	45	0.049
60	1 日	気中	10	0.167	10	0.095

に示すように、水セメント比が 50%と 60%の場合、TL は脱型条件および養生条件の違いによらず散水のほぼ直後に計測された。また、水セメント比が 50%と 60%の場合、VH は水中養生試験体で高い値を記録しており、図 4.2.11 に示したモルタル試験体による実験で得られた知見と合致しなかった。

表 4.3.9 に、各試験体の繰返し散水時の最低明度計測時間 TL および明度変化速度最大値 VH を示す。また、図 4.3.6 および図 4.3.7 に、最低明度計測時間 TL および明度変化速度最大値 VH の抽出方法、ならびに各試験体の明度変化特性と繰返し回数の関係を示す。図より、繰返し回数の増加に伴い、TL は上昇し、VH は低下する傾向が明らかであり、少量の水分を繰返して付与したことによるコンクリート表面近傍における水分の飽和に伴う水の移動の鈍化を反映したものと思われる。各試験体の順列については、最高品質である W/C = 40%・7 日脱型・水中養生の試験体では繰返し回数によらず TL が最大、VH が最小となり、正確に捉えられている。しかし、VH における低品質側の評価については、繰返し回数 3 回までの結果では、W/C = 60%・1 日脱型・乾燥気中養生の試験体が W/C = 50%・1 日脱型・乾燥気中養生よりも VH が小さく、良い評価の数値となった。この原因としては、散水後の測定開始時間の影響を想定している。図 4.3.4(b)に示したとおり、W/C = 60%・1 日脱型・乾燥気中養生の試験体のように吸水抵抗性が著しく低いコンクリートにおける明度 L^* の経時変化は、初期に急激な明度変化を生じた後、急速に明度変化が安定する傾向にある。一方、ここでの明度変化特性の測定方法では、散水後の初回測定は散水から 15 秒後である。そのため、著しく吸水抵抗性の低いコンクリートでは、散水量が少ない場合、散水から 15 秒以内に急激な明度変化が完了し、散水の直後に生じた明度変化速度の高さを捕捉できていない可能性があると考えられる。

図 4.3.8 に、VH の抽出位置を明示した散水試験の測定結果を示す。図 4.3.8(a)に示すように、最低品質の試験体では、繰返し回数 2 回目まで散水後の初回の計測点で VH が記録されている。最低品質の試験体における 1 回目、2 回目の測定結果から抽出した VH は、初回の明度測定時間を短縮することでさらに高い値となった可能性がある。さらに、繰返し回数 4 回のデータでは、TL と VH のいずれも W/C = 60%・1 日脱型・乾燥気中養生の試験体が最低の順列となった。今回は繰返し回数を最大 4 回としたが、低品質側のコンクリートに対する評価は、繰返し回数をさらに増加させることで評価の確度が向上する可能性がある。

次に、明度変化特性と物質移動抵抗性との関係性について検討を行った。本手法の移動物質は水であるため、ここでは吸水試験結果と比較した。図 4.3.9 に、TL および VH と吸水試験結果の関係を示す。モルタル試験体を用いた検討において、吸水量が大きい試験体ほど TL は小さく、VH が大きくなる傾向が確認されている。しかし、図 4.3.9(a)に示した繰返しを行わない 1 回目の散水試験結果では、TL については 4 時間吸水量が 100g 程度を超えたあたりで吸水量によらず一定値となった。これらは W/C = 50%と W/C = 60%の場合に TL が散水の直後に計測され、いずれも最低値の 15 秒となったためである。また、VH に関しては、4 時間吸水量 200g 付近でばらつきが大きい、吸水量が大きいほど VH が大きい傾

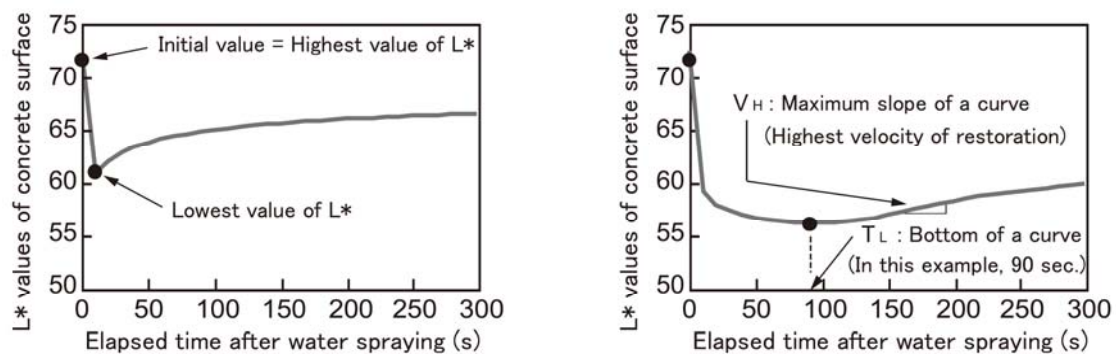


図 4.3.6 明度変化特性の抽出

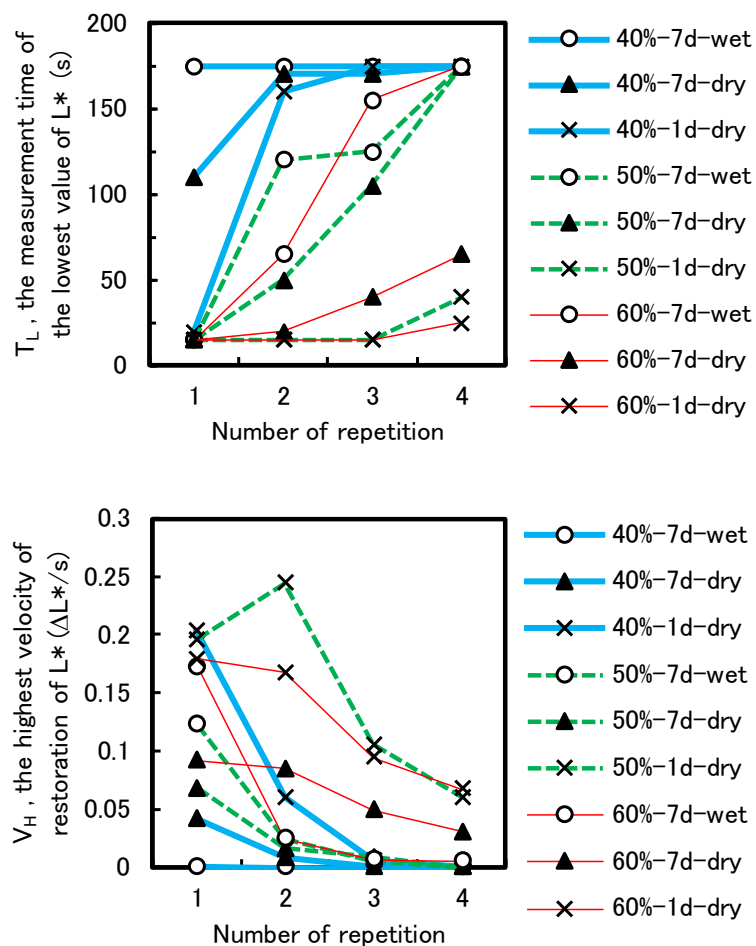


図 4.3.7 散水時の明度変化特性と繰返し回数の関係

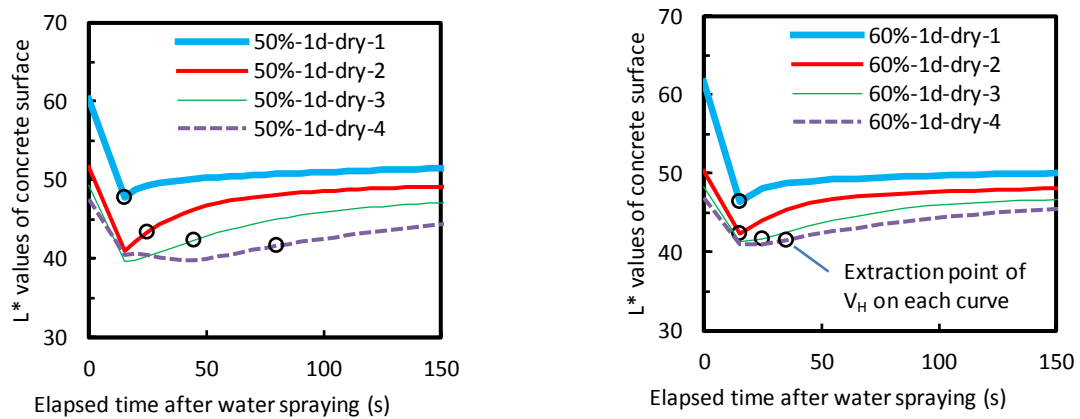


図 4.3.8 明度変化速度最大値の抽出位置

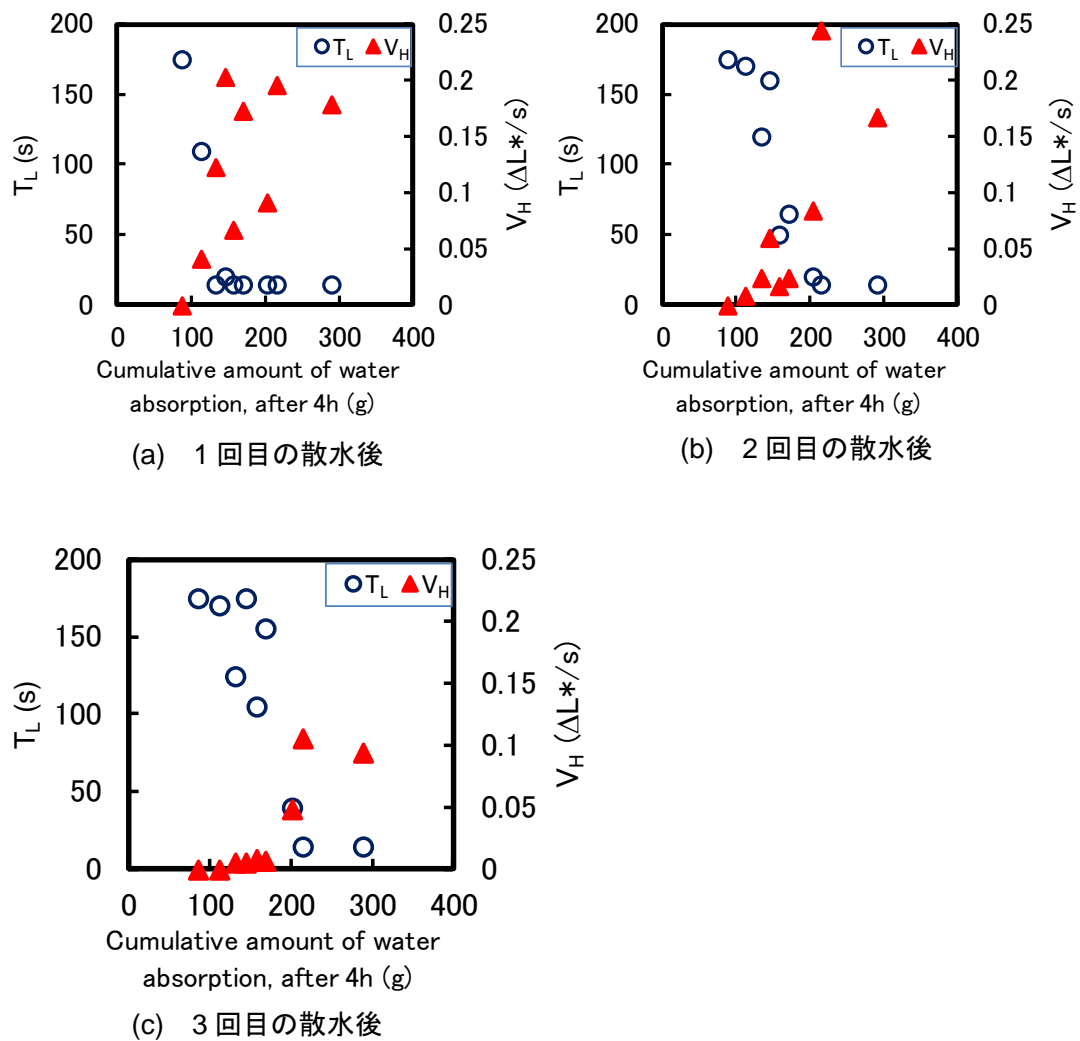


図 4.3.9 散水時の明度変化特性と吸水量の関係

向にある。次に、図 4.3.9(b)に示すように、繰返し 2 回目の結果では、4 時間吸水量 200g 付近で TL の増加と VH の減少が顕著である。また、図 4.3.9(c)に示す繰返し 3 回目の結果では、4 時間吸水量 200g 程度を境にしてデータがほぼ二極化し、吸水量が小さい場合に TL が増加し、VH はほぼ 0 となった。

以上の結果から、TL および VH の値は本手法の繰返しによって変化し、繰返し時の変化傾向は、対象となるコンクリートの品質によって大きく異なることが明らかとなった。本手法では、少量の散水を繰り返し実施し、繰返し回数を考慮した上で TL および VH を活用することにより、評価の確度が向上するものと考えられる。なお、散水の繰返し時間間隔について、ここでは約 200 秒としたが、図 4.3.6 から図 4.3.9 に示した明度の経時変化曲線に見られるように、明度は散水の直後に急激な変化を生じたのち、散水から 60 秒程度を経過すると緩やかに推移することが明らかとなった。散水の繰返し時間間隔は、断続的に付与された水をコンクリートが内部に吸収する時間と考えることができる。そのため、散水の繰返し時間間隔の設定は表層品質を評価する上で統一する必要がある。本検討で得られた知見を基に、また測定の実作業上の取り扱いが容易であることも考慮し、散水の繰返し時間間隔は 1 分あるいは 2 分を基本とし、以降の検討を進めることとした。

4.3.3 コンクリート試験体による実験のまとめ

各種のコンクリート試験体による検証の結果、散水時の明度変化特性に関する測定に関して、以下のような知見が得られた。

- 1) 散水時の明度の経時変化曲線において、最低明度の計測時間および明度変化速度の最大値は、コンクリートの吸水特性と相関がある。
- 2) 散水量を段階的に変化させた測定によって得られる明度の変化量の比率は、表層品質に関する簡易な評価指標となる可能性がある。
- 3) 散水時の明度変化特性は、高炉セメントを用いたコンクリートの初期養生の程度を敏感に反映する可能性がある。
- 4) 散水時の明度変化特性は測定方向の影響を大きく受けるため、実効的な水分の付与量を考慮する必要がある。
- 5) 散水時の明度変化特性に関して、水平面の上面および鉛直面における測定手順を定めるとともに、散水後の明度変化勾配に着目した表層品質の簡易な評価指標を提案した。
- 6) 散水時の明度変化特性の測定に適した散水方法として、1 回の散水量を 0.3ml 程度の少量とし、1～2 分程度の時間間隔で同一箇所への散水を繰り返し行うという方法を考案した。
- 7) 散水時の明度変化特性の測定において、少量の散水と測色を繰り返し行い、繰返し数を考慮した評価を行うことで、表層品質に関するさらなる情報が得られ、品質評価の確度が向上することが判明した。

4.4 RC 高架橋を模擬した屋外曝露試験体による検証実験

4.4.1 実験の概要

4.4.1.1 試験体

鉛直面における実効的な散水量の減量による影響を軽減するためには散水量を低減する必要がある。一方、散水量の低減に伴って付与された水分量の減量による明度変化に関する感度の低下という問題が生じる。このような問題を解消するために考案した、同一箇所での少量の水分の散布を一定の時間間隔で繰り返すという測定方法の効果を検証するため、屋外環境下で施工・曝露された実物規模の RC 高架橋試験体[4.7]を活用し、実構造物の鉛直面を対象とした条件下での測定を実施した。RC 高架橋試験体は東京大学生産技術研究所の千葉実験所（当時）内にて製作、設置されたもので、総数 20 本の柱に対してコンクリートの品質差を設定するため、配合と養生方法を変えた 5 本×2 列の 10 本の柱が夏季と冬季の 2 回の時季に分けて施工された。本検討においては、RC 高架橋試験体の 20 本の柱（以下、柱試験体とする）のうち 5 本を対象とした。表 4.4.1 および図 4.4.1 に、柱試験体の概要を示す。柱試験体は、いずれも 300×400mm の矩形断面で高さは 2,350mm である。柱試験体の上部にはスラブが施工されている。柱試験体の作製にはレディーミクストコンクリートが用いられ、コンクリート標準示方書施工編の施工標準に準拠した施工手順により、ポンプ圧送、打込み、振動締固めが行われた。測定対象の 5 本の柱試験体には、普通ボルトランドセメントが用いられ、配合および養生条件により品質の差異化が図られている。

表 4.4.1 柱試験体の概要

No.	呼び強度 (MPa)	養生条件	脱型材齢	設定
S1	60	早期脱型	1 日	高強度配合
N3	24	ラップ養生 ^{*2}	5 日	養生の追加
S3	24	早期脱型	1 日	養生の不足
S4	24	標準養生	5 日	標準
S5	24 ^{*1}	標準養生	5 日	材料の不具合

【注釈】 *1：打込み直前に約 20kg/m³ を加水、*2：材齢 28 日まで



図 4.4.1 柱試験体

4.4.1.2 試験条件

柱試験体の物質透過性を代表するコンクリートの物性値として塩化物イオンの拡散係数を取得するため、材齢約 1 年で採取されたコア試験体による塩水浸漬実験を JSCE-G572 に準拠して行った。塩水浸漬期間は約 7 箇月とした。また、家辺らにより測定された柱試験体の中性化深さの実測値[4.8]に基づいて、中性化速度係数を算出した。中性化速度係数は柱試験体の表面を一部で 50mm×50mm 程度の範囲ではつとり、フェノールフタレイン溶液を噴霧して実測した値を用いて算出されたものである。

表 4.4.2 に、散水に関する試験条件を示す。散水時の明度変化に関する測定は材齢約 2 年で実施した。各試験体の測定は 2 月下旬の異なる日時で実施しており、測定時の外気温や湿度といった環境条件は統一できていない。測定面は降雨と日射の影響を避けた高架橋の内面側とした。測定位置は、地上高が約 1,000mm で、幅 400mm の面の中央付近とし、各柱試験体の測定点数は 1 点とした。測色と散水の中心位置は治具で一致させた。明度の初期値を計測したのち散水を行い、散水の 10 秒後から 3 秒間隔で明度を経時的に計測した。ここでの TL の最小値は 10 秒となる。散水量は 1 回の散水あたり約 0.3ml とし、繰返し回数は 10 回とした。ここでは繰返しの時間間隔は散水のタイミングにより正確に制御し、前回の散水から 120 秒後に次の散水を行った。これにより、散水後の明度の経時変化は散水から 91 秒後までの計測となった。

1 回に散布する水量を減じて複数回の散水を行うという散水方法に変更した結果、散水領域から余剰となって流下する水の発生状況が従前とは変化した。1 回あたりの散水量が 0.8ml であった従前の方法においては、散水領域における余剰水分の流下がほとんどの場合で発生していた。測定領域ではない下方の領域への水分供給を避けるため、余剰水は即座にウェスで吸い取って除去していた。1 回あたりの散水量を 0.3ml に減じた結果、1 回の散水によって流下する水量も同様に減少し、流下が発生しない、あるいは 10mm ほどしか流下しないような場合が多く見られるようになった。余剰水となる水分量の多寡は、コンクリートの吸水抵抗性に依存すると考えられるため、流下現象の発生を定量的に捉えることを目的として、散水後に表面を流下した水に関して、流下が止まった時点における散水領域の中心からの流下長さを計測し、これを流下距離として記録することとした。

表 4.4.2 試験条件

測色機器	B 機
測定環境	屋外、日射等の影響の少ない高架の内面側
測定方向	鉛直面（柱の側面）
散水方法	散水量：0.3 ml，散水領域：φ 58mm， 繰返し間隔：120 秒，回数：10 回
測色時間	散水 10 秒後から 3 秒間隔で散水 91 秒後まで

4.4.2 実験の結果および考察

図 4.4.2 に、柱試験体の中性化速度係数、塩化物イオン拡散係数を示す。柱試験体に設定された品質差が各物性値に反映されていることが確認された。

図 4.4.3 に、散水時の明度変化特性の測定結果を示す。いずれのデータにおいても、本手法を繰り返して実施した際の明度の経時変化曲線として前節までに示した例と同様の挙動を示す結果が得られていることがわかる。すなわち、明度は、初期値である散水前の測定値が最高値を示し、1 回目の散水の直後に低下する。ここで、散水によってコンクリート表面に付与した水分は時間の経過とともに表面からは徐々に消失するが、これは主にコンクリート内部への拡散によって生じることが本研究で確認されており、詳細は 6.2 節で述べている。散水によって引き起こされた明度の変動の主要因はコンクリート表面における水分の存在に他ならないため、散水後の明度はコンクリート表面における水分の消失状況と対応し、経時的に初期値へと復元していく。一方、同一の測定箇所に対する散水の繰り返しにより明度はさらに低下する。また、散水の繰り返し回数の増加に伴って明度は底打ちとなり、時間あたりの変化が緩慢になる。これらは表層における含水状態の飽和を捉えた挙動と見なすことができる。なお、図 4.4.3 に示した経時変化曲線の一部、例えば S3 の測定結果にデータの乱れが見られるが、これは屋外環境下の測定で、かつ測定面の方向が鉛直面であったために生じた測色機器の微動の影響によるノイズである。このようなノイズは明らかなノイズとして認識可能であり、異常値として除外することが可能であるため、評価指標の抽出に対する影響はない。

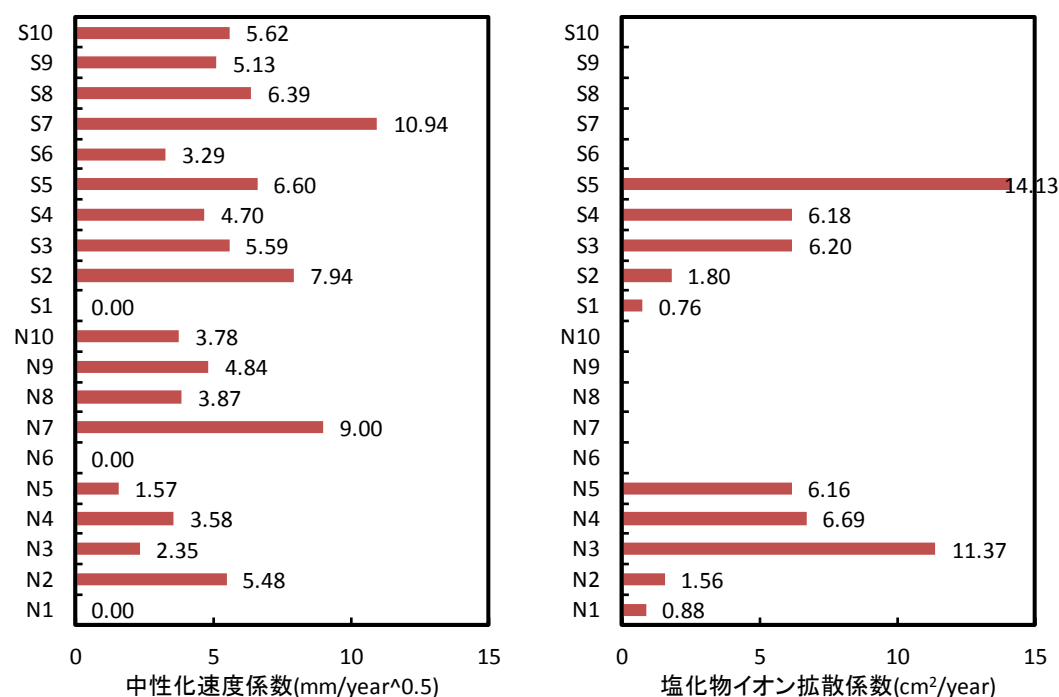


図 4.4.2 柱試験体の中性化速度係数と塩化物イオン拡散係数

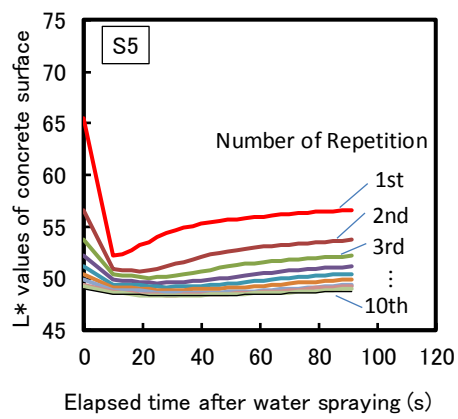
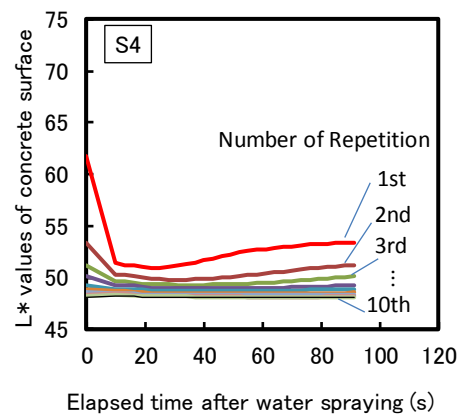
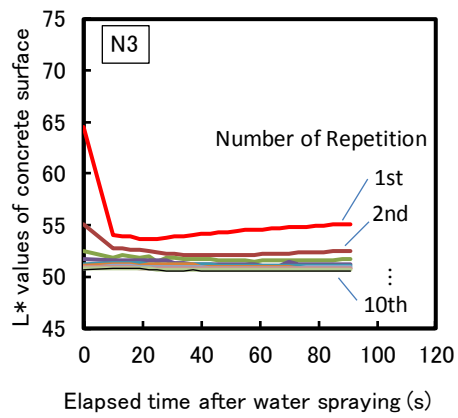
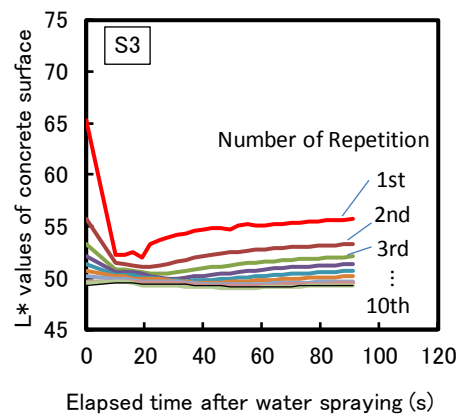
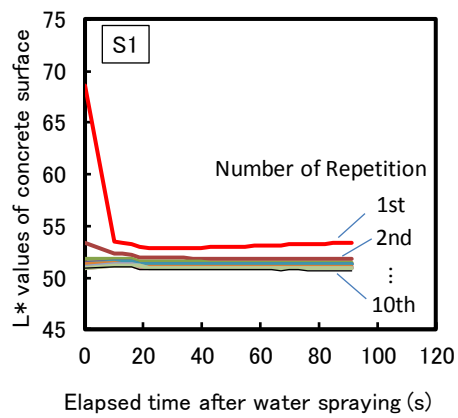


図 4.4.3 散水時の明度変化特性

図 4.4.4 に、柱試験体の明度変化特性と繰返し回数の関係を示す。図 4.4.4(a)に示すように、最低明度計測時間 TL についてはいくつかのデータが上下に変動して繰返し回数との関係性が一定でない。これは、散水後、初期の明度の経時変化が鈍化した段階で TL が抽出された場合に見られ、TL を抽出するための明度の最低値が突出した値とならず、機器の測定誤差の範囲内で変動した明度の計測値の影響を受けたためである。最低明度計測時間は明度の経時変化データにおける明度の最低値の測定精度に依存する。そのため、明度の経時変化が鈍化した段階における TL の抽出方法については検討の余地があるほか、明度の最低値については機器の測定精度や分解能を考慮した上で数値の定義を見直す必要があると考えられる。しかしながら、図 4.4.4(a)において、材料不具合として約 20kg/m^3 の加水を行った S5 の結果は明らかに TL が低い数値を示しており、最低品質であることが判別可能である。そのため、実構造物の鉛直面を想定した状況においても散水時の明度変化特性による表層品質の評価に対する TL の活用性が見い出される結果となった。一方、図 4.4.4(b)に示すように、明度変化速度 VH に関しては最低明度計測時間 TL に比べてさらに良好なデータが得られている。散水の繰返しで VH は低下し、高強度配合の S1 や密封養生を行った N3 では 3 回程度の散水で VH がほぼ 0 となった。材料不具合として約 20kg/m^3 の加水を行った S5 や 1 日脱型の S3 では、散水の繰返しで VH は 0 に漸近するものの、5 回程度の散水の時点では VH が 0.03 程度と明度の変化が継続している状態となり、10 回の散水でも VH は収束しなかった。VH の数値の大小による比較のほか、VH の収束に要する散水回数を評価指標として活用できる可能性が見出された。

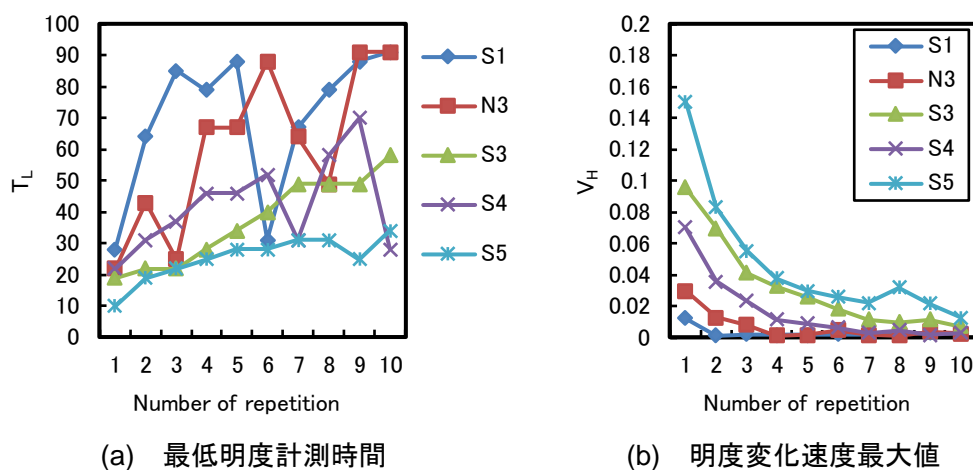


図 4.4.4 散水時の明度変化特性と繰返し回数の関係

図 4.4.5 に、各試験体の流下距離の累積値と散水回数の関係を示す。散水の繰返し回数が増加するほど各試験体の差が明瞭となった。再考品質の S1 と最低品質の S5 では明確な差が現れたものの、標準養生の S4 と密封養生を追加した N3 では、S4 の流下距離が大きくなった。試験体に設定した品質を想定すると N3 の流下距離が大きくなると予想されるが、流下距離の計測においては流下の経路の途中に存在する表面気泡などが水の流下に対する妨げとなって流下距離を低下させることがあり、その影響で N3 の流下距離が小さくなった可能性が考えられる。ここでの測定結果から、流下距離は瞬間的に吸収されない余剰水分の量、すなわち吸水抵抗性の高さとある程度の関連性を有すると考えられることが示唆されると同時に、特に比較的高品質あるいは劣悪な品質のコンクリートの判別に適用できる可能性が見い出された。

4.4.3 RC 高架橋を模擬した屋外曝露試験体による実験のまとめ

鉛直面における実効的な散水量の減量による影響を軽減するために考案した、同一箇所での少量の水分の散布を一定の時間間隔で繰り返すという散水方法を採用し、実構造物の鉛直面を対象とした条件下での測定を実施した。その結果、散水による明度変化特性を同一箇所に対して一定の時間間隔で測定する方法により、実構造物の鉛直面を対象とした場合においても、表層品質との関連性を有した評価指標が取得できることを確認した。また、鉛直面への散水後に流下した余剰な水分の流下距離を計測し、散水の繰返し回数と流下距離の関係性を把握することによって、表層品質の簡易評価ができる可能性が示唆された。

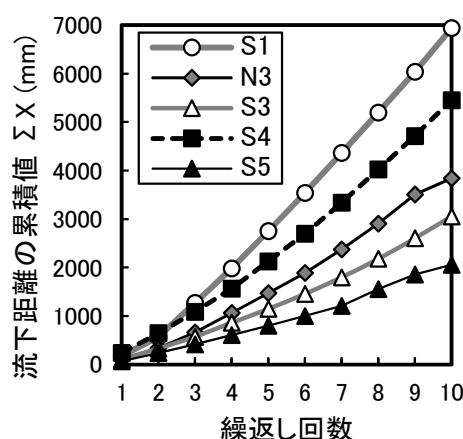


図 4.4.5 余剰水分の流下距離の累積値と散水繰返し回数の関係

4.5 実構造物における測定結果の再現性に関する検討

4.5.1 実験の概要

本章においてこれまでに示した検討結果は、いずれも実験用に製作された試験体のコンクリートを対象として得られたものである。試験体の製作は一般の実構造物の施工に比べて入念な施工がなされていると考えられるため、試験体から得られた良好な試験データが必ずしも一般の実構造物に適用できるとは限らない。そこで、長期間供用されている実構造物を測定対象として散水時の表面色変化特性に関する測定の再現性に関する検討を行った。測定の対象は旧国鉄時代に建設された宮崎リニア実験線 RC 高架橋の柱である。使用されたコンクリートに関する正確な記録等が確認できていないが、材齢は 30 年程度と予想される。配合等の諸元についても不明であるが、呼び強度が 24MPa、最大の粗骨材径が 40mm との記録があり、特殊なコンクリートが使用されたことは考えにくい。

表 4.5.1 に、散水時の明度変化特性に関する試験条件および検討項目を示す。検討項目は、第一に、同一の柱における測定位置の相違の影響、第二に、内部の含水状態の影響とした。測定位置の相違の影響は、外観上の特徴が異なる 2 箇所において各 2 点で測定を行い検討した。なお、ここでの散水方法について、散水後 1 分ないし 2 分の時点では復元段階の明度変化の速度が比較的大きいことが確認されたことから、繰返し時間間隔を通常よりも長い 4 分間隔とした。また、散水量は 0.8ml のスプレーを採用した。図 4.5.1 に、測定箇所の状況を示す。測定箇所は、地上からの高さが約 1m で、柱の両側面から内側に約 10cm 入った 2 箇所(D1, W2)、さらに約 10cm 入った 2 箇所(D2, W1)の計 4 箇所である。向かって右側の 2 箇所(W1, W2)は上部工からの漏水の影響で表面が汚れた箇所とした。以下、D1 と D2 を合わせて乾燥箇所と、W1 と W2 を合わせて漏水箇所とそれぞれ表記する。乾燥箇所と漏水箇所では外観上の色合いや付着物等の状況が異なっており、表面の付着物は 4 箇所ともに測定の実施前に乾いたスポンジで磨いて除去した。含水状態の影響は乾燥箇所と漏水箇所の比較のほか、乾燥箇所において測定を実施したのちドライヤーで強制乾燥を行い、再度、測定を行うことで検討した。表 4.5.2 に、含水状態の調整手順を示す。

表 4.5.1 試験条件

測定対象	RC 高架橋柱
測定環境	屋外、日射の影響の少ない日陰の東側の 1 面、 天候：晴、気温：28～32℃、湿度：不明
測定方向	鉛直に近い直立面（柱の側面）
散水方法	散水量：0.8 ml、散水領域：φ 70mm、 繰返し間隔：240 秒、回数：5 回
測色時間	散水 20 秒後から 5 秒間隔で散水 210 秒後まで
検討項目	測定位置の影響、内部の含水状態の影響

4.5.2 実験の結果および考察

4.5.2.1 測定位置の相違の影響

図 4.5.2 に、測定結果を示す。乾燥箇所内の 2 点(D1, D2)ならびに漏水箇所内の 2 点(W1, W2)の結果がそれぞれ類似し、乾燥箇所と漏水箇所ですぐ測定結果が異なることがわかる。図 4.5.3 に、同一の繰返し回数で比較した測定結果を示す。図 4.5.3(a)が示すように、1 回目の測定結果において、各測定箇所ですぐ初期値には差が見られるが散水後の明度 L^* の経時変化はほぼ同等となった。また、測定回数 n が増加しても、乾燥箇所内の 2 点および漏水箇所内の 2 点では散水後の明度 L^* の経時変化はそれぞれ同等となった。

以上のことから、測定箇所の状況に差がない場合、散水時の明度変化特性に関しては測定位置の影響がほとんどないことが確認された。また、今回の乾燥箇所と漏水箇所ですぐ生じると推定される表層品質や含水状態に対する差異は、繰返し回数 2 回目以降の測定結果に現れることが明らかとなった。

表 4.5.2 含水状態の調整手順

手順 1	1 度目の散水試験実施（散水量 0.8ml，繰返し回数 5 回）
手順 2	多量の散水で表層を飽和させる（散水量 0.8ml を 30 回）
手順 3	ドライヤーで強制的に乾燥させる（10 分程度）
手順 4	明度 L^* が試験前の初期値まで復元していることを確認
手順 5	表面温度が試験前と同等となっていることを確認
手順 6	2 度目の散水試験実施（散水量 0.8ml，繰返し回数 5 回）

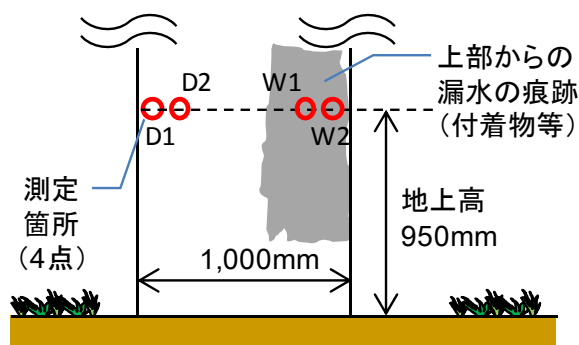
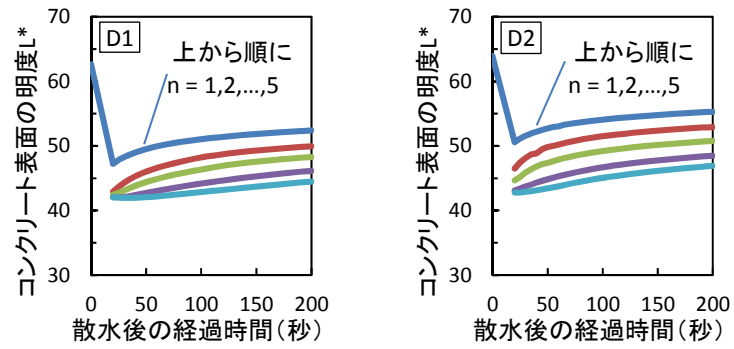
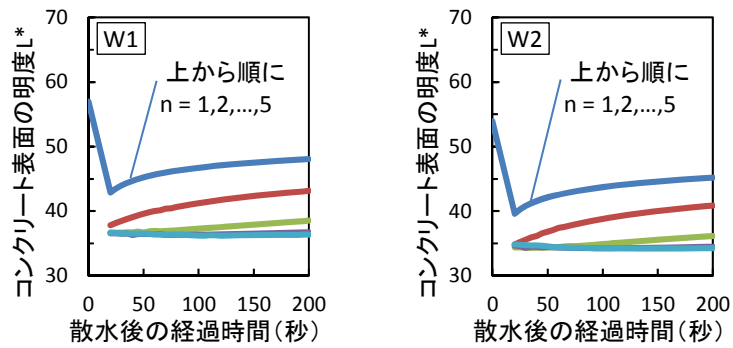


図 4.5.1 測定箇所の状況

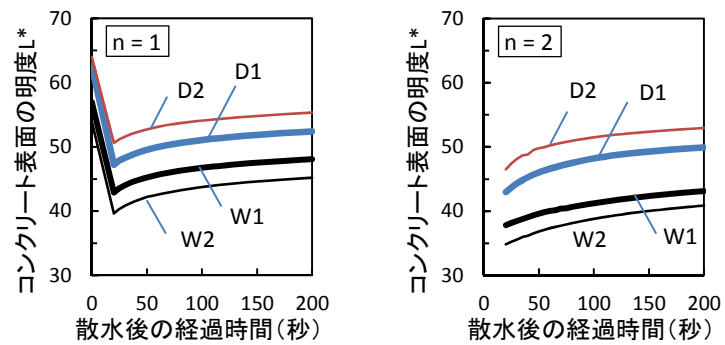


(a) 乾燥箇所(D1, D2)



(b) 漏水箇所(W1, W2)

図 4.5.2 測定結果



(a) 散水 1 回目

(b) 散水 2 回目

図 4.5.3 測定結果 (同一の散水回数での比較)

4.5.2.2 含水状態の影響

乾燥箇所と漏水箇所の比較においても表層の含水状態の影響が示唆される結果が得られたが、乾燥箇所において含水状態を強制的に変化させた状態で再度測定を行い、同一箇所でも異なる含水状態を想定した状況下における測定を行った。図 4.5.4 に、含水状態調整後の測定結果を示す。図 4.5.2(a)と比べて、散水 3 回目以降の明度 L^* の経時変化が鈍化し、漏水箇所の測定結果（図 4.5.2(b)）のような挙動に近づいていくことがわかる。なお、図 4.5.4 では、D1 に比べて D2 における明度 L^* の経時変化が大きい。今回の検討においては強制乾燥の程度が統一できなかったため、乾燥の度合いに差があると考えられる。図 4.5.4 の結果によれば、D2 の方がより乾燥していた可能性がある。図 4.5.5 に、含水状態調整前後の測定結果を同一繰返し回数で比較したものを示す。図 4.5.5(a)に示すように、1 回目の散水後の明度 L^* の経時変化は調整前後ではほぼ完全に一致した。 $n=2$ 以降、調整後の測定結果が低明度側に推移し、 $n=3$ で両者の差が明瞭となった。含水状態の調整は給水とドライヤーによる強制乾燥によって行い、明度 L^* と表面温度は 1 度目の測定前と同等に戻ったことを確

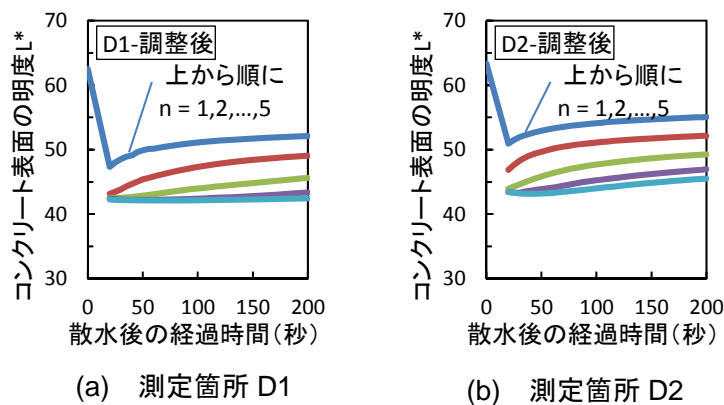


図 4.5.4 測定結果（含水状態調整後）

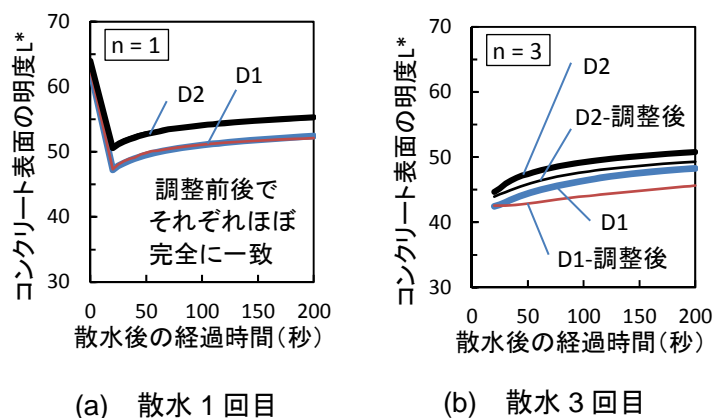


図 4.5.5 測定結果（含水状態調整後、同一の散水回数での比較）

認した上で 2 度目の測定を実施したが、内部に吸収された水はドライヤーによるコンクリート表面からの 10 分程度の処置では除去されなかったものと推定される。

以上のことから、測定を同一箇所を繰り返した際の明度の経時変化は、内部の含水状態に関連する情報を含んでいる可能性が示唆された。また、含水状態調整の前後で 1 回目の測定結果がほぼ完全に一致したことから、表面からの強制的な乾燥の効果の及ぶ範囲内で、含水状態の影響を排除した測定が実施できる可能性が見い出された。

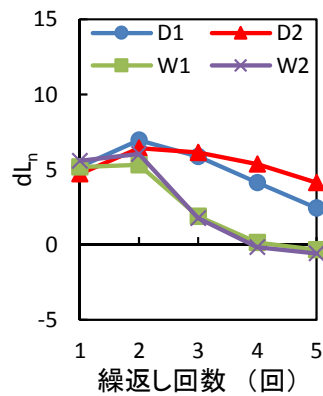
4.5.2.3 散水試験で得られる代表的な測定値の分析

図 4.5.2 から図 4.5.5 で示した測定結果について、代表的な測定値を詳細に分析し、測定箇所の相違の明確化および各測定箇所における類似性の再現を試みるとともに、水分挙動と関連付けた考察を行った。

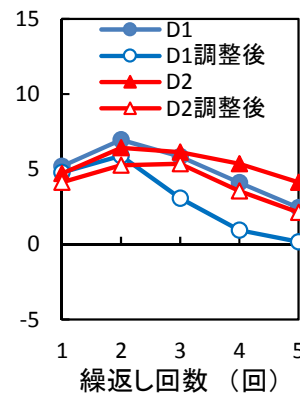
図 4.5.6 および図 4.5.7 に、散水各回の明度変化量 dL_n およびその総和 ΣdL_n と繰り返し回数との関係を示す。ここで、 dL_n は、 n 回目の測色時における開始時から終了時までの明度 L^* の変化量であるが、言い換えると、散水後の明度 L^* の復元量である。明度 L^* の復元は主にコンクリートの吸水で引き起こされるものと見なすと、 dL_n は内部へ吸収された水量と関連性を有した測定値と考えることができる。 dL_n が負の値を示す場合は、 n 回目の測色開始から終了までの間に明度 L^* が復元せず、さらに明度低下が生じたことを意味する。これは、時間をかけて表層に水が浸透したということ、つまり、コンクリートがほとんど吸水しないという状況を表すものと考えられる。図 4.5.6(a)に示すように、繰り返し回数 4 回目以降に漏水箇所(W1, W2)では dL_n が負の値となった。一方、図 4.5.6(b)に示すように、含水状態調整後の D1 における dL_n は、D2 に比べて漏水箇所(W1, W2)の測定結果に近い。

図 4.5.7 に示した明度変化量の総和 ΣdL_n は、散水の繰り返しで付与した水分のうちコンクリート内部へ吸収された水の総量に関連した測定値と考えることができる。図 4.5.7 より、 ΣdL_n は含水状態などの差を明瞭に示すことがわかる。なお、上述のように散水の繰り返しで dL_n が負の値となった場合、総和である ΣdL_n は最大値をとったのち微減する。そのため、評価に用いる場合は ΣdL_n の最大値による評価が適切と考えられる。

図 4.5.8 に、散水各回における測色開始時の明度 L^* と最低値 L_{MIN} との差である $dLMS_n$ と繰り返し回数との関係を示す。 $dLMS_n$ は、明度 L^* の最低値 L_{MIN} を基準とした際の、散水直後の時点における明度 L^* の相対的な位置を示した値であり、最低値 L_{MIN} までの明度変化量の余裕分に相当する。ここでは散水の 20 秒後であるが、散水によって付与した水が吸水され始めた直後の表面における水の存在を意味する数値であると仮定すると、表面における水の飽和度と言い換えることができる。図 4.5.8(a)に示すように、乾燥箇所と漏水箇所の $dLMS_n$ の差は比較的小さく、また、図 4.5.8(b)に示すように、含水状態の調整前後で $dLMS_n$ はほぼ一致する結果となった。 $dLMS_n$ は測定対象のコンクリートの表面における水分状態あるいは凹凸等の表面性状を捉えた数値である可能性が考えられる。

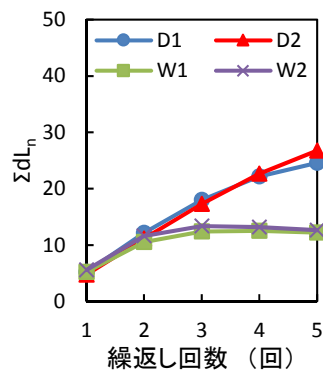


(a) 各測定箇所

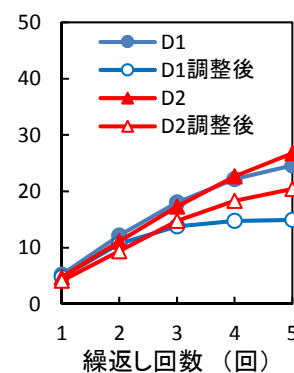


(b) 含水状態の調整前後

図 4.5.6 明度変化量と繰返し回数の関係

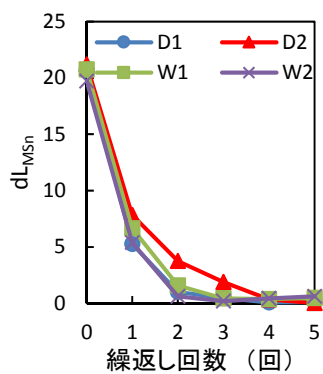


(a) 各測定箇所

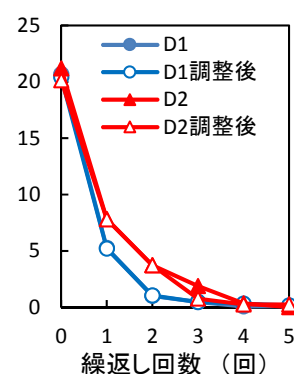


(b) 含水状態の調整前後

図 4.5.7 明度変化量の総和と繰返し回数の関係



(a) 各測定箇所



(b) 含水状態の調整前後

図 4.5.8 測色開始時明度の変化量と繰返し回数の関係

4.5.3 測定結果の再現性に関する知見

散水時の明度変化特性について、実構造物における測定結果の再現性および含水状態の影響を検討するとともに、コンクリート表層部における水分の移動と関連付けた考察を行った。ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) 測定環境が同等の場合、散水試験では測定箇所の影響は小さく、再現性の高い測定結果が得られる。
- 2) コンクリート表面からの強制的な乾燥により、散水試験では内部の含水状態の影響を除去した測定が可能となる。なお、乾燥の効果が及ぶ範囲については別途検討が必要である。
- 3) 散水試験で得られる測定値を詳細に分析することにより、コンクリートの吸水性状だけでなく表面性状に関する情報が取得できる可能性がある。

4.6 測定手順の簡略化に関する検討

4.6.1 検討の概要

前節までの検討において、散水による明度の経時変化を詳細に計測することで得られる経時変化曲線の分析により、表層品質に関する有益な情報が取得できることを示した。図 4.6.1 に、散水による明度の経時変化を詳細に測定したデータの例を示す。同図に示すようなデータは、散水前の初期値 L_i を測定した後、散水の 10 秒後から測定を開始し、次の散水の直前まで明度の経時変化を可能な限り測定するという方法により取得される。経時変化曲線の勾配に相当する明度変化速度と散水回数に基づいて、表層品質の簡易な評価が可能となることを確認している。しかしながら、本研究では開発する手法の簡便性に主眼を置いており、検査実務への適用性、手法の普及や測定データ蓄積の容易さを視野に入れると、評価指標の取得手順は可能な限り簡易なものが望ましい。そこで、現象把握の正確性を期すことを目的とした、明度の詳細な経時変化の計測を伴う測定手順ではなく、より簡略化した手順の構築を検討した。具体的には、4.4 節で示した RC 高架橋を模擬した柱試験体（図 4.4.1）による測定結果を用い、明度の詳細な経時変化データから所定の経過時間における測定値を抽出することで測定データ量の削減を試みるとともに、適した評価指標に関する検討を行った。

4.6.2 検討の結果および考察

明度の詳細な経時変化データから所定の経過時間における測定値を抽出し、簡易評価を試みた。測定値の抽出は、散水直後（10 秒後）、最終の計測までを 3 等分した経過時間における測定値（31, 61, 91 秒後）とした。ここで、3.4 節に示した実構造物を対象とした試行

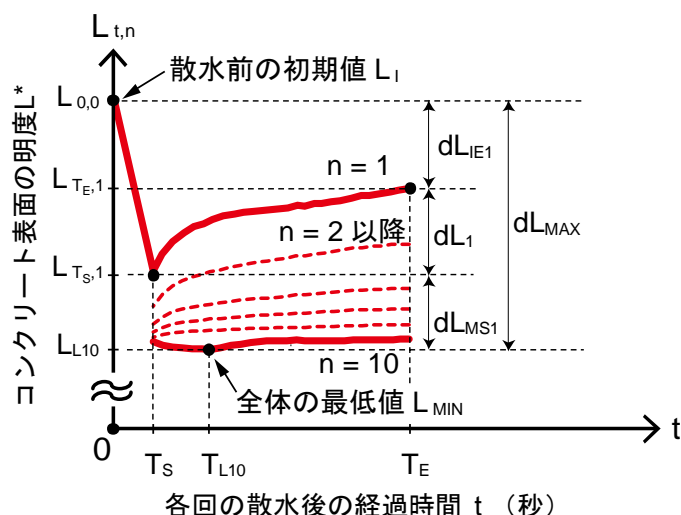


図 4.6.1 散水時の明度の経時変化曲線

的測定において、詳細な経時変化データが測定されていない場合に有効な評価指標となり得ることが示唆された「明度変化飽和度」の概念を当てはめることとした。すなわち、各測定値について散水前の初期値に対する明度の変化量 dL^* を算出し、散水の繰返しによって生じた最大の明度変化量を 1 とした場合の比率を明度変化飽和度として算出した。式(4.6.1)に、明度変化飽和度 SL の算出式を示す。 SL が小さいほど、所定の時間経過後の明度の復元量が多いこと、つまり、表面からの水の消失が速いことを示す。また、明度変化飽和度は、明度 L^* の初期値を基準($SL = 0$)にとり、散水の繰返しにより到達した明度 L^* の最低値を完全に飽和した状態($SL = 1$)と見なした際の、任意の時点における明度の変化量を比率で表している。そのため、明度変化飽和度 SL は、任意の経過時間の明度で算出可能である。

$$SL = (LI - LN)/(LI - LMIN) \quad (4.6.1)$$

ここに、 LI : 明度 L^* の初期値, LN : 任意の時点における明度, $LMIN$: 測定箇所における明度 L^* の最低値である。

表 4.6.1 に、 SL の算出例を示す。ここでは、繰返し 9 回後の散水 31 秒後の測定値が明度の最低値 ($L^* = 48.33$) となったものの、繰返し 10 回後の散水 31 秒後の測定値も同様と見なせる値である。散水直後である散水 10 秒後の測定値が最低値とならない理由は、散水の繰返しで表層付近の含水状態が飽和状態に近づいた段階では水の移動が停滞し、表面張力

表 4.6.1 明度変化飽和度 (柱試験体 S5)

n	t (s)	L^*	dL^*	S_L
0	初期値	65.50	0.00	0.00
1	10	52.16	-13.34	0.78
	31	54.66	-10.94	0.63
	61	56.03	-9.47	0.55
	91	56.61	-8.89	0.52
2	10	50.90	-14.60	0.85
	31	51.39	-14.11	0.82
	61	53.07	-12.43	0.72
	91	53.71	-11.79	0.69
3…8	スペースの都合上ここでは省略			
9	10	48.60	-16.90	0.98
	31	48.33* ³	-17.17* ³	1.00
	61	48.59	-16.91	0.98
	91	49.01	-16.49	0.96
10	10	48.49	-17.01	0.98
	31	48.34	-17.16	1.00
	61	48.49	-17.01	0.98
	91	48.78	-16.72	0.97

【注釈】 n : 繰返し回数, t : 散水後の経過時間 (秒), dL^* : 明度変化量,

*3 : 最低明度 (明度変化量の絶対値が最大)

で滞留した水が時間をかけて拡散していくためと推定される。明度の最低値を確実に計測するためには、散水直後だけでなく 30 秒程度経過した時点でも測定を行うのがよいと考えられる。図 4.6.2 に、柱試験体の SL と繰返し回数の関係を示す。SL により VH と繰返し回数の関係（図 4.4.4(a)）を上下反転したような関係が得られ、経過時間が増加するほど各試験体の差が明瞭となった。SL は測定対象のコンクリートの吸水性に依存するため、乾燥の度合いの影響を受ける可能性がある。しかし、散水を繰り返した際の SL には、表層の含水状態が飽和状態に至るまでの過程が反映され则认为される。そのため、図 4.6.2 に示すように、SL の大小と繰返し回数の関係から、表層品質の優劣を判別できる可能性がある。また、SL を算出するデータの計測時間は 31 秒、61 秒、91 秒としたが、計測時間が大きくなるほど 5 体のコンクリートのデータが区別しやすくなることがわかる。これは、散水後の経過時間が長いほど水分の逸散による明度の復元が顕著となるためと推定される。つまり、明度の最低値を確実に計測するためには 30 秒程度の間隔での明度データの取得が好ましいが、

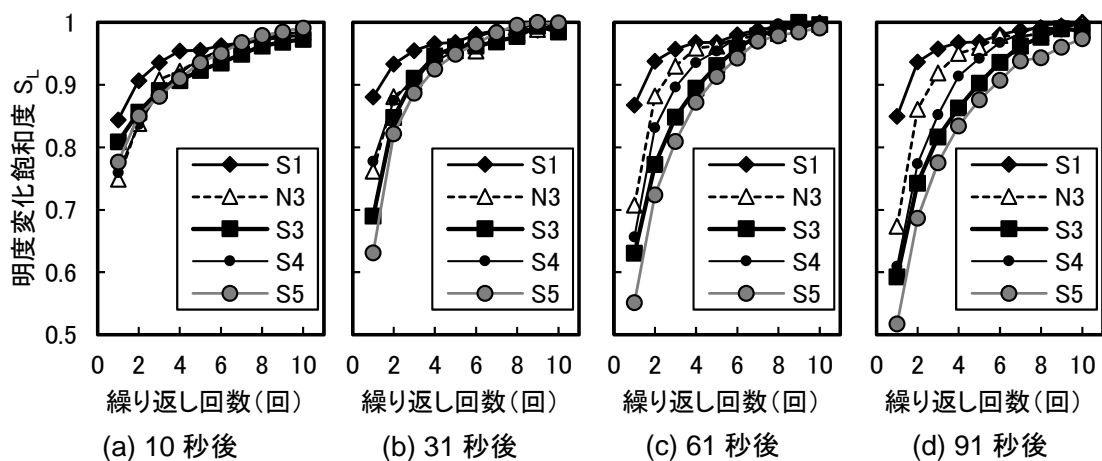


図 4.6.2 明度変化飽和度と繰返し回数の関係

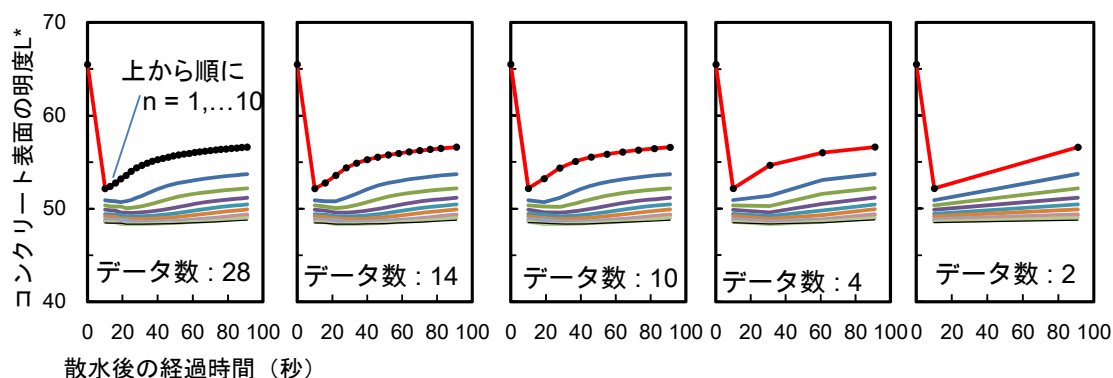


図 4.6.3 明度の計測データの減量

SL を算出する上ではより遅い時間で明度データを取得すればよい。明度の最低値は、一連の測定作業が終了した段階で多量の散水を行ってから明度を測定するなどの方法により、別途取得することが可能である。そのため、明度変化の簡易な測定手順としては、散水の直後である 10 秒後、次回の散水直前である 90 秒後のように 2 回の測定としてよいと考えられる。図 4.6.3 に、散水 10 秒後の明度と次の散水直前の明度の 2 点にまで単純化した測定データを示す。散水 1 回あたりのデータ数を 2 点とすることで明度変化曲線が単純化するものの、散水の繰返しによる明度変化の停滞が表現されていることがわかる。

データ数を 2 点に削減した測定結果を採用し、散水各回における最終の測定値 LE に関する SL を算出し、繰返し回数との関係性を調べた。表 4.6.2 に、SL の算出値の例を、また、図 4.6.4 に、SL と繰返し回数 n の関係を示す。柱試験体 S1 のように高品質なコンクリートでは SL が散水 1 回目の段階で 0.85 と大きな値を示し、散水 2 回目には 0.9 を超えるのに対して、低品質な柱試験体 S5 のコンクリートでは SL が低く、0.9 を超えるのは散水 6 回目以降である。なお、S5 では 10 回の散水で明度変化が停止せず、付与した水が内部へ吸収され続けたため、最後の測定まで $SL = 1.00$ に達しなかった。

以上の結果から、散水時の明度変化特性に関して、明度 L^* の測定項目は、散水前の初期値 L_I 、散水直後の明度 L_S および次の散水直前の明度 L_E の 3 項目とし、 L_E に関する明度変化飽和度 SL を算出して繰返し回数 n との関係性に基づいて簡易に評価できることが判明した。図 4.6.5 に、散水時の明度変化特性に関する測定手順を示す。なお、 L_S の値は散水試験の繰返しを 10 回未満で終了する際の明度変化停止の判断に必要となる。散水時の明度変化特性に関して詳細な経時変化を計測する場合は測色機器の固定など相応の手段や配慮が必要であったが、明度の測定項目の絞り込みにより手順が簡略化され、測定作業は大幅に簡易化された。

表 4.6.2 明度変化飽和度 SL の算出例
(柱試験体 S1, S5)

S1		S5	
n	SL	n	SL
1	0.85	1	0.52
2	0.94	2	0.69
3	0.96	3	0.78
4	0.97	4	0.83
5	0.97	5	0.88
6	0.98	6	0.91
7	0.99	7	0.94
8	0.99	8	0.94
9	0.99	9	0.96
10	1.00	10	0.97

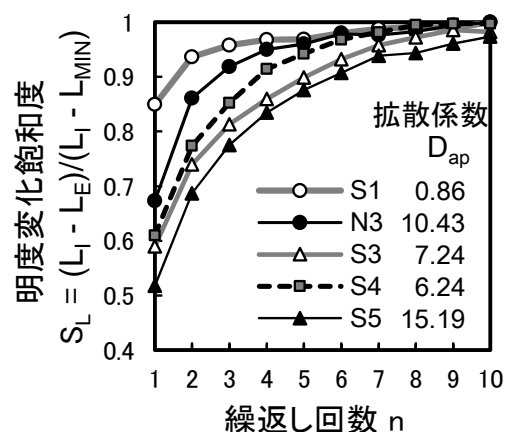


図 4.6.4 明度変化飽和度と繰返し回数
の関係

4.6.3 散水時の表面色変化特性の簡易な評価手順

これまでの検討結果を踏まえ、実構造物の検査への活用を想定して散水時の明度変化特性に関する具体的な測定手順を定めた。図 4.6.6 および表 4.6.3 に、測定手順と、測定条件および測定項目を示す。測定作業を開始するにあたって、まず明度 L^* の初期値 L_I を測定する。明度変化が停止した段階、あるいは繰返し回数が 10 回に到達した段階で、明度 L^* の全体の最低値 L_{MIN} を抽出する。続いて、記録した測定値に基づいて、最終的な判定に必要な明度変化飽和度 S_L を算出する。まず、初期値 L_I と全体の最低値 L_{MIN} の差を算出し、こ

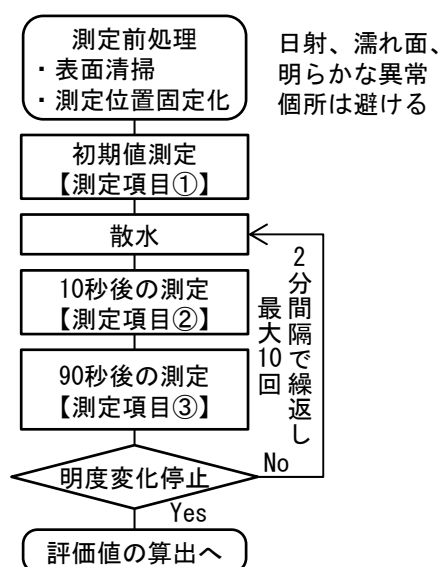


図 4.6.5 散水時の明度変化特性に対する測定手順の検討例

測定結果記録シート

- ① 明度の初期値 L_I を記入
 - ② 各回の 10 秒後の測定値 L_S を記入
 - ③ 各回の 90 秒後の測定値 L_E を記入
- ※ 明度が同等＝明度変化停止

測定日時	2013/1/15 10:30	天候	晴
測定箇所	●◆▲■高架橋 3P		
明度 L^* の初期値 L_I	①	75.82	
回数 n	明度 L^* の測定値		
	10 秒後 L_S ②	90 秒後 L_E ③	
1	59.63	66.36	
2	57.35	62.12	
...	
9	54.19 ※	54.21	
10	54.19 ※	54.19 ※	

評価値算出シート

- ④ 明度の最低値 L_{MIN} を抽出・記入
- ⑤ 最大明度変化量 dL_{MAX} を算出・記入
- ⑥ 各回の明度変化量 dL_E を算出・記入
- ⑦ 各回の明度変化飽和度 S_L を算出・記入

明度L*の最低値 L_{MIN} ④		54.19
最大明度変化量 dL_{MAX} ⑤ = ① - ④		21.63
回数 n	明度変化量 dL_E ⑥ = ① - ③	明度変化飽和度 S_L ⑦ = ⑥ ÷ ⑤
1	9.46	0.44
2	13.70	0.63
...
9	21.61	1.00
10	21.63	1.00

図 4.6.6 散水時の明度変化に関する測定項目の検討例

れが SL 算出式の分母である最大明度変化量 dLMAX となる。次に、初期値 LI と散水各回の LE との差 dLEn をそれぞれ算出する。これが SL 算出式の分子となり、dLMAX で除することで散水各回の SL が算出される。以上のような測定値の記録から評価値算出までの作業は、紙と電卓程度の準備で対処できる。次に、SL の閾値を例えば 0.90 とし、閾値を超過するまでの繰返し回数 n の大小によって表層品質を判定する。

図 4.6.7 に、表層品質の判定例を示す。柱試験体 S1 と S5 を対象として 3 回の異なる時季に測定を実施して取得したデータにより検証を行った。図中の凡例には、柱から採取したコンクリートコア試験体の見掛けの拡散係数 D_{ap} を併記した。図より、物質透過性の大きく異なるコンクリートでは、SL と n の関係が大きく異なることがわかる。図 4.6.7 の中に破

表 4.6.3 散水時の明度変化飽和度の測定条件と測定項目

1 回の散水量	0.3ml
散水領域	直径 58mm 円形
表色系 (推奨)	CIELAB 表色系
測色開始時間	散水 10 秒後
測色終了時間	散水 90 秒後
散水時間間隔	120 秒
繰返し回数 n	最大 10 回
測定面の凹凸	鋳仕上げ程度の平面性
測定面の乾湿	濡れ面は不可
測定面の前処理	ウェスでの拭取り
測定面の方向	鉛直面，水平面の上面
測定項目 (3 項目)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 散水前の明度初期値 L_i ・ 散水 10 秒後の明度 L_s ・ 散水 90 秒後の明度 L_e

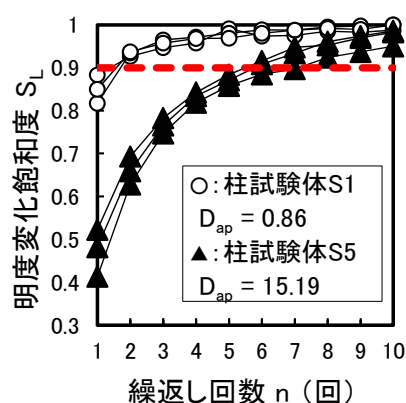


図 4.6.7 散水時の明度変化特性の判定例

線で示した SL の閾値を超過するまでの繰返し回数 n の大小によって品質が判定できる。すなわち、塩化物イオン拡散係数 D_{ap} が小さい高品質なコンクリート(S1)では SL が散水 1 回目の段階で 0.8 以上の大きな値を示し、散水 2 回目には 0.9 を超えるのに対して、低品質なコンクリート(S5)では SL が低く、0.9 を超えるのは散水 6 回目以降である。ここでの SL の閾値 0.90 は検証データ数が些少であるため参考値となるが、低品質のコンクリートでは所定の SL の値に到達するための繰返し回数 n が大きくなることは確実と考えられる。このように、散水時の明度変化特性に基づく表層品質の判定指標は「散水の繰返し回数」であり、「何回」という基準値とする回数を任意に設定して使用方法となる。散水の繰返し回数 n の値は、数値の算出方法が土質の分野で一般的な標準貫入試験の N 値と同様に単純な回数であり、数値の根拠が比較的容易に理解できる。評価値である明度変化飽和度 SL の算出と繰返し回数 n による判定には特殊な技能を必要としないと考えられる。

一方、図 4.6.8 は、散水時の明度変化の測定結果に対して、散水によって副次的に観測された流水の流下距離を付記した結果であるが、散水の繰返し回数 n の増加に伴って明度変化飽和度 SL が高くなるとともに、水の流下距離 x も長くなる傾向が確認されている。流下距離 x に関しては数値が漸増していないが、これは水の流下経路となるコンクリート表面に点在する気泡や凹凸などによって流下が一時的に妨げられたり、流下経路が分岐したりすることの影響が現れたものである。なお、ここでは散水後の明度変化と流下距離の計測を確実に実施するため、散水の繰返し時間間隔を 120 秒とした上で、散水 10 秒後から 90 秒後まで明度変化を計測した後に流下距離を計測するという手順で測定を実施した。このように、測定値に不確実性が見られるという課題はあるものの、水の流下距離が所定値に到達するまでの散水回数によって表層品質の優劣を判定するという評価方法が成立する可能性

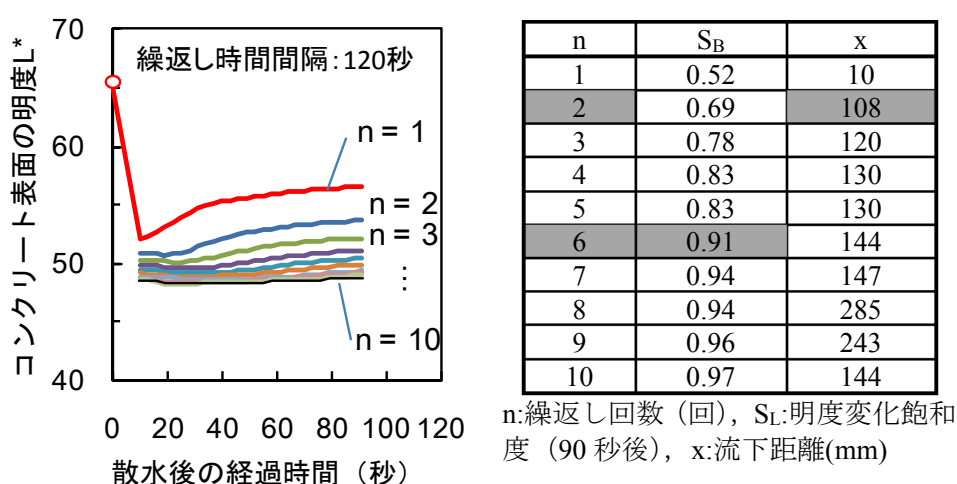


図 4.6.8 散水時の明度変化特性と水の流下距離

がある。水の流下距離については、明度変化の計測に必要な測定機器のように特殊な装置を使用せずに計測が可能である。そこで、鉛直面における水の流下に着目して、明度変化の評価に代わるさらなる簡易評価手法に関する検討を行うこととした。次章、第 5 章にて詳述する。

4.7 第4章のまとめ

本章では、各種のコンクリート試験体および実構造物を測定の対象として、散水時の表面色の変化特性と表層品質の関係を把握するための実験を行った。また、散布する水の量、散水の方法、使用する器具の改良を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) モルタルおよびコンクリートの表面色は含水状態に依存して変化し、その変化特性は主に明度の変化として表現することができる。
- 2) 同条件で打ち込まれたモルタルの場合、水槽内にて水中養生を行った試験体の表面は明度が高くなる。また、打込面では明度が高くなり、型枠に接する底面は明度が低くなる。
- 3) モルタルおよびコンクリートの表面色は脱型時期および脱型後の養生方法など多くの影響要因によって変化するため、表面色の測定値のみで絶対的な評価を行うのは困難である。
- 4) 散水によって乾燥状態から湿潤状態へ強制的に移行させた際の明度の変化特性は、養生の差異などで生じた表層品質の差を反映する可能性がある。
- 5) 散水によって表面に付与した水分の吸水による消失は、明度の経時変化として定量化できる。すなわち、明度が散水によって急激に低下し、時間の経過とともに散水前の初期値へと徐々に復元していく様子が測色機器によって評価できる。
- 6) 直径 70mm 程度の円内に約 0.8ml の散水を行った場合、明度の特徴的な経時変化は散水直後の数秒から数分の間で現れる。明度変化の特徴を代表する指標として、明度の変化速度、明度の最低値が計測されるまでの経過時間がある。
- 7) 散水量が過剰な場合、水の移動できる領域が飽和して余剰な水は滞留するため、表層の水分移動が鈍化する。その結果、明度の変化勾配が小さくなり、表層品質の差が判別され難くなる。
- 8) 鉛直面では、散水量が多いほど水分の流下による損失が大きく、明度変化特性にも大きく影響する。そのため、散水量は可能な限り少量とするのが良い。
- 9) 吸水抵抗性の低いコンクリートでは散水による明度の低下と復元が短時間で起こり、明度の変化特性が正確に捕捉できないことがある。
- 10) 散水方法に関する以上の知見により、散水量は少量とし、散水と測色を所定の時間間隔と回数で繰り返して実施し、その都度の明度変化特性を評価することとした。室内試験による検証の結果、散水量を約 0.3ml に減量し、散水領域を直径約 60mm の円形とし、散水の繰り返し時間間隔は 1 分～2 分で最大 10 回繰り返すこととした。
- 11) 散水量を減量した上で同一箇所での繰り返しを行う方法は実環境を想定した状況でも有効である。繰り返しによって散水時の明度変化特性に関する情報が細分化されることで情報量が増加し、表層品質の評価の確度が向上する。
- 12) 散水試験の評価指標と繰り返し回数との関係を整理することでコンクリートの表層品

質の差が評価可能となる。

- 13) 初期養生の程度が品質に与える影響が大きいと考えられる高炉セメントが使用されたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントで同程度の強度レベルのコンクリートと比べて散水時の明度変化が速い傾向にある。
- 14) 鉛直面で見られる余剰水分の流下現象について、散水領域からの水の流下距離は、極端に品質の異なるコンクリートであれば表層品質の優劣を判別できる可能性が示唆された。水量にもよるものの、密実なコンクリートでは流下距離が 1m にも達した。しかしながら、水の流下経路の途中に水の流下を妨げる因子が存在した場合、コンクリートの品質によらず水の流下が停止し、期待される流下距離に到達しない。流下距離を表層品質の評価指標とするには、流下距離の抑制、水分の付与方法や流下経路の操作といった工夫が必要と考えられる。

参考文献

- [4.1] 古賀裕久，河野広隆，渡辺博志：実構造物から採取したコアの吸水性状と耐久性能の関係，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.429-436，2013.2
- [4.2] 松田芳範：コンクリートの劣化・損傷に及ぼす水の影響について，コンクリート工学，Vol.51，No.10，pp.814-818，2013
- [4.3] 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010.6
- [4.4] 古賀一八：建築物の維持管理と水，セメント・コンクリート，No.812，pp.36-42，2014
- [4.5] 岸利治，上田洋：水の理解とその制御・活用に向けて，セメント・コンクリート，No.812，pp.1-7，2014
- [4.6] 公益社団法人土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335 委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，土木学会コンクリート技術シリーズ，No.97，2012.7
- [4.7] 蔵重勲・西田孝弘・秋山仁志・岸利治：中規模柱試験体を対象とした非破壊評価による表層品質の要因分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1835-1840，2011
- [4.8] 家辺麻里子：コンクリート表層品質の各種評価手法の相互比較と簡易流水非破壊試験法の提案，東京大学修士論文，2012

第5章 散水後の水分挙動の目視評価による簡便性の追求

- 5.1 概説
- 5.2 水平面の上面における余剰水の滞留現象に関する実験
 - 5.2.1 実験の概要
 - 5.2.2 実験の結果および考察
 - 5.2.3 余剰水の滞留現象に関する知見
- 5.3 鉛直面における余剰水の流下現象に関する実験
 - 5.3.1 概説
 - 5.3.2 水の流下現象の発生と評価に適した散水方法の検討
 - 5.3.3 画像解析による流下メカニズムの解明
 - 5.3.4 試験体による検証実験
- 5.4 散水による表層品質の簡易評価手法「散水試験」の提案
 - 5.4.1 散水試験の概要および測定手順
 - 5.4.2 表層品質の評価指標および判定方法
 - 5.4.3 手法の特徴および特長
- 5.5 実構造物の含水状態の変動を考慮した散水試験の適用方法
 - 5.5.1 概説
 - 5.5.2 実構造物における含水状態の変動に関する考察
 - 5.5.3 高含水状態における散水試験による表層品質の判定
- 5.6 第5章のまとめ

5.1 概説

本研究で確立を目指す表層品質の評価技術においては、構造物の検査あるいは調査の実務に対する導入を実現するための簡便性を備えていることが重要である。表層品質の簡易評価を目的とした場合、第4章で示した測定手順のように、コンクリート表面色の変化を機器で計測する方法では作業性の面で不十分と言わざるを得ない。微量水分の散水による吸水性状を定量化するために測色機器による表面色の測定を行うことが有効であることは第4章で示したとおりであるが、測色機器による表面色の測定という行為によらない表層品質の簡易評価技術を構築するためには新たな発想が必要となる。

一方、第4章の検討において、鉛直面に対して手法を適用した際に観察された余剰な水分の流下現象には、例えば図4.4.5で示したように、流下距離の累積値によって表層品質の簡易な評価ができる可能性が示唆された。しかしながら、流下距離を計測するためには表面色の場合と同様に何らかの測定作業が発生するため、簡便性の追求という点では表面色による評価の場合と同様に課題が残る。

ここで、散水による余剰水の発生についてのメカニズムを簡単に考察してみる。一般的な土木構造物に使用されるコンクリートの組織は多孔質で無数の空隙を有するため、散水によって表面に付与された水分はそれらの空隙を移動経路として内部に浸透する。コンクリート表面に付与された水分のうち、内部への浸透が瞬時に完了しない場合に生じる余剰の水分は、しばらくの間、コンクリート表面に滞留することになる。第4章で言及したように、散水によってコンクリート表面に付与した水分のうち余剰となった水分の挙動は、散水の対象となる平面を水平面とした場合と鉛直面とした場合で異なる。床版の上面など水平面の上面に散水した際は余剰水の滞留現象が見られ、柱や壁などの鉛直面に散水した際には重力による余剰水の流下現象が発生する。散水による水分の付与量を一定とした条件において、水分付与の対象とするコンクリートの吸水抵抗性が高い場合には、散水によって付与された水分の吸水に要する時間が長くなる。対象が鉛直面の場合、余剰水の水量の増加あるいは滞留時間の長時間化によって、余剰水の流下現象が発生しやすくなるものと予想できる。同様に、吸水抵抗性が低いコンクリートではそれと逆の状況が発生するものと考えられることから、余剰水の発生状況を簡易に定量化する方法を構築することで、コンクリートの吸水抵抗性、すなわち表層品質を簡易かつ定量的に評価できる可能性がある。

本章では、散水時に発生する余剰水分の滞留および流下現象に関する実験的検討を行った。第4章で提示した手法では散水後の表面色の変化を評価するために測色機器を利用する必要があったが、余剰水分の滞留および流下は測定者の目視によって認識できる現象であることから、目視によって得られる情報を定量化する方法を構築することにより、散水によるコンクリート表層品質の評価に伴う測定作業のさらなる簡略化が実現できると考えた。以下、5.2節において、水平面の上面における散水時の水の滞留現象に関する定量化について述べる。コンクリート表面における水の滞留から吸水による消失に至るまでの挙動をデジタルビデオカメラで撮影し、撮影した画像を分析することによって余剰水の発生状況と

表面色の経時変化を考察した。5.3 節では、鉛直面への散水によって生じる水の流下現象の定量化に関する検討の結果を述べる。鉛直面における水の流下現象の発生と観察およびその評価に特化した散水方法を検討し、また独自の画像解析技術を利用した測定システムを構築して水の流下現象の発生メカニズムを検証した。5.4 節では、散水時の水の滞留および流下現象に基づくコンクリート表層品質の簡易評価手順を整理し、表層品質に関する新たな簡易評価手法として「散水試験」を提案する。5.5 節では、表層品質の評価における影響要因として考慮が不可欠であるコンクリートの含水状態の影響に関して、高含水状態での適用が可能な散水試験の特長を活かし、含水状態に起因する測定結果の不確実性の排除方法について検討した結果を述べる。5.6 節では本章で得られた知見を整理する。

5.2 水平面の上面における余剰水の滞留現象に関する実験

5.2.1 実験の概要

散水後の余剰水分の滞留現象について、品質の異なるコンクリート表面における滞留現象の発生状況の相違を定性的に把握するための実験を行った。図 5.2.1 に、実験方法の概要を示す。試験体は、水セメント比を 40%・50%・60% の 3 水準、材齢 28 日までの養生方法を標準気中養生 (20℃, 60%RH)、乾燥気中養生 (20℃, 40%RH) の 2 水準に設定した 6 種類で、寸法は 40×40×160mm である。脱型はすべて材齢 1 日で実施した。すべての試験体は材齢 28 日で所定の養生を完了したのち、温度と湿度を制御した試験室内に保管した。余剰水の滞留に関する検討は、試験体の材齢が約 6 年の時点で実施した。試験体は保管中の約 6 年の期間内に本検討以外の実験に供していない。なお、試験体の吸水抵抗性を把握するため、余剰水の滞留に関する検討を実施してから 2 週間、試験体を試験室内で乾燥させたのち、水中浸漬試験を行った。図 5.2.2 に、余剰水の滞留に関する測定状況を示す。作業台上に設置した試験体の上面に対して散水を行い、その状況を上方に設置した撮影機材により撮影した。撮影機材の周囲には白色 LED 灯を設置して測定面全体を照射した。散水は同一箇所に対して 2 分間隔で、5 回の繰り返しを行った。5 回の散水の完了後、光沢感が消失するまで約 20 分間の観察を行った。コンクリート表面における吸水の状況に関して、作業中に目視による状況の観察と記録を行うとともに、撮影した動画による分析を行った。

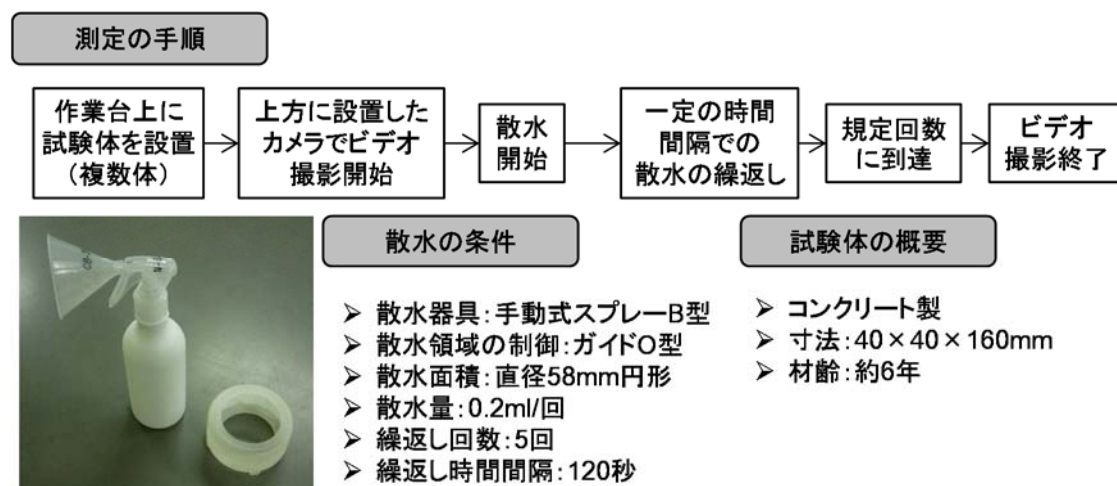


図 5.2.1 実験の概要

5.2.2 実験の結果および考察

図 5.2.3 に、撮影画像の例を示す。画像を分析した結果、散布した水分の滞留による光沢の発生が確認された。光沢の発生状況には試験体による差が見られ、吸水抵抗性に劣るコンクリートでは散布した水が瞬時に吸水されるため光沢は視認されなかった。同一箇所での散水の繰り返しを行った場合、あるいは対象のコンクリートの吸水抵抗性が高い場合、光沢の発生する領域が広くなり、また光沢がしばらくの間保持されることから光沢の確認が容易となった。コンクリート表面に気泡が存在する場合、周辺で気泡のない領域の光沢が喪失してからも気泡の輪郭に沿った周囲だけで光沢が保持される状況が見られた。そのため、光

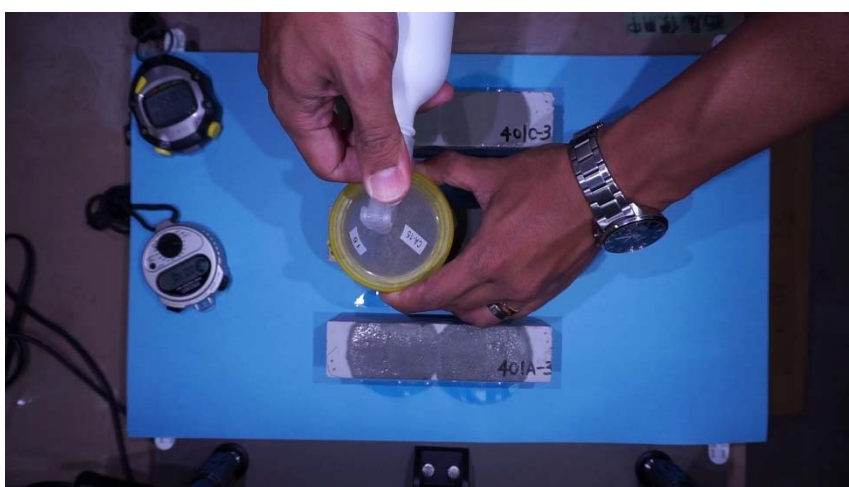


図 5.2.2 測定の状態



図 5.2.3 撮影画像の例

沢の保持時間の計測においては、表面気泡の周辺における光沢の保持は無視することとした。なお、光沢感は反射光の受光角度により変化するため、観察の方向を変化させる、あるいは入射光ないし反射光の角度を変化させることで反射部位における光沢感の有無の判別が容易となる。図 5.2.4 に、光の反射角度による光沢感の相違の例を示す。コンクリートの表面およびコンクリートを置いた台紙の表面において、滞留した水の表面で反射した光が白く見える部位とそうでない部位が見受けられることがわかる。ここでは、入射する光の角度を固定したが、例えば実構造物での測定においては測定者が手で保持したペンライトを一定の範囲で振りながら照射するなどの方法によって目視による光沢感の有無の識別性が向上できると考えられる。

図 5.2.5 に、光沢保持時間の測定結果を示す。ここでの測定条件から 4 回目までの散水後の光沢度保持時間は 120 秒が上限となる。水セメント比が高い場合、また乾燥気中養生のシリーズで光沢保持時間が小さくなることがわかる。図 5.2.6 に、光沢保持時間と吸水抵抗性との関係を示す。吸水抵抗性の指標としてここでは水中浸漬試験により算出した吸水率を単純な指標として採用した。吸水率の高い試験体で光沢保持時間が小さくなり、また散水の繰返しによって光沢保持時間が長時間化した。これらは、第 4 章で示した最低明度計測時間と散水の繰返し回数との関係性と類似している。すなわち、光沢保持時間は吸水性状を反映した指標と見なすことができると考えられる。そこで、散水部位における明度変化特性を画像解析によって取得し、光沢保持時間との関係について分析した。その結果、散水後の余剰水によって光沢が生じること、明度の最低値（最低明度）は必ず光沢の消失後に計測されること、光沢の保持時間と最低明度の計測時間が一致する場合があること、といった特徴が判明した。つまり、光沢保持時間は第 4 章で提示した散水時の明度変化特性に関する評価指標である最低明度計測時間に準じた値として扱うことができる。最低明度計測時間を取得するためには表面色に関する定量的な測定値を連続的に取得する必要があるが、光沢保持時

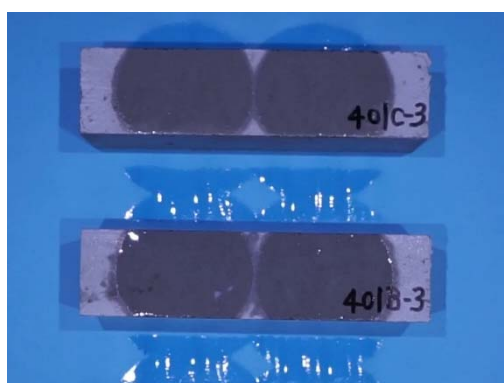


図 5.2.4 反射角度による光沢感の相違

間は目視で識別できる光沢感の有無を利用して取得することが可能である。すなわち、測色機器による方法と同等の表層品質に関する評価が、目視による光沢感の観察という簡易な手段によって実現可能であることが示された。

5.2.3 余剰水の滞留現象に関する知見

本検討により、散水によってコンクリート表面で発生した光沢は目視で認識することが可能であり、光沢の保持時間を計測することによってコンクリートの品質の差異を比較できることが確認された。光沢の保持に対する目視での判定に関して、表面気泡の周辺では光沢が保持されやすく、判定時に測定者を困惑させる要因となることが判明した。しかし、表面気泡の影響は容易に認識できるため、あらかじめ測定者が知識として備えておくことで判定の誤差要因から容易に排除できると考えられる。そのため、水平面への散水時に発生する光沢の保持時間による表層品質の簡易評価は、実務への導入が可能と考えられる。

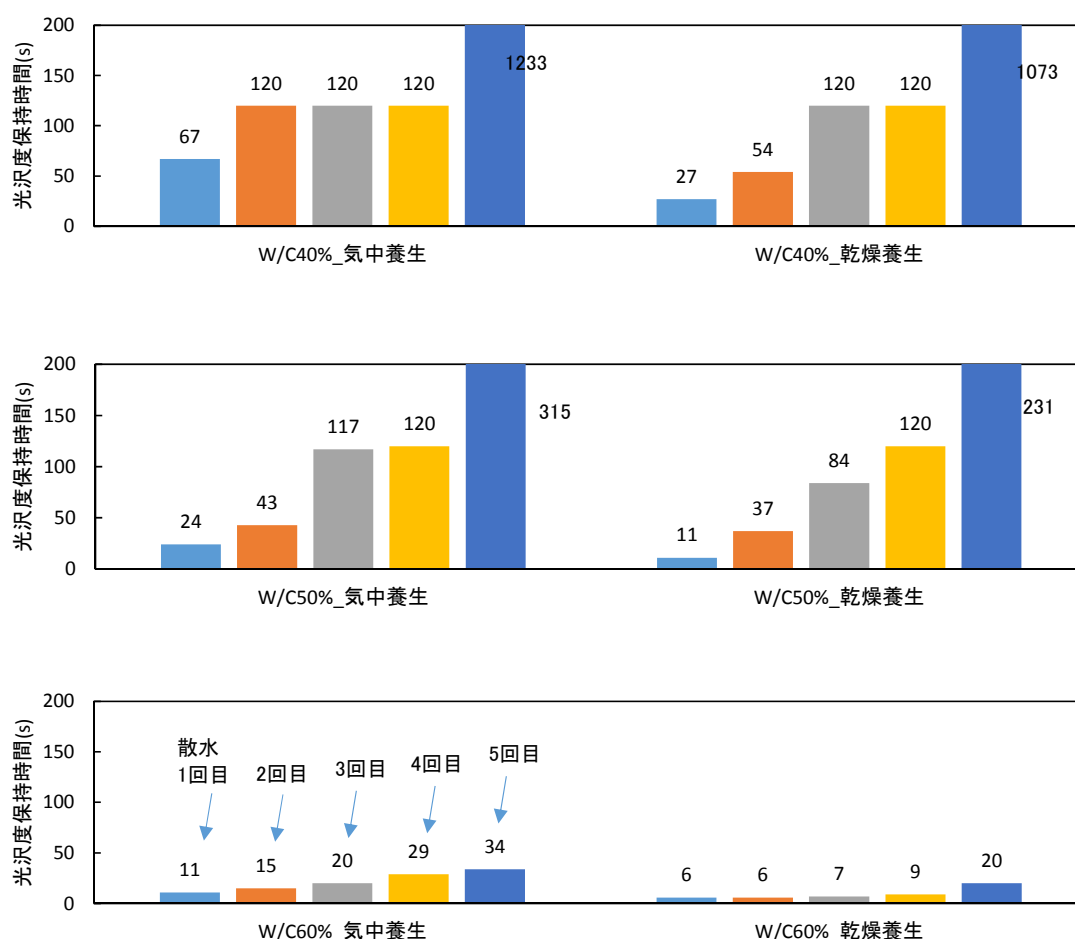


図 5.2.5 散水後の光沢保持時間

以下、ここで得られた余剰水の滞留現象を活用した目視による表層品質の評価に関する知見を整理する。

- 1) 散水によって付与した水がコンクリート表面で滞留する様子は、コンクリート表面での水の存在による光の反射に起因する光沢感の有無として、人間の目視によって認識できる。
- 2) 光沢感は反射光の受光角度により変化するため、観察の方向を変化させる、あるいは入射光ないし反射光の角度を変化させることで反射部位における光沢感の有無の判別が容易となる。
- 3) 目視で散水後の光沢感を識別し、光沢の保持時間を計測することで、散水後の最低明度計測時間と同等の表層品質に関する評価が可能である。

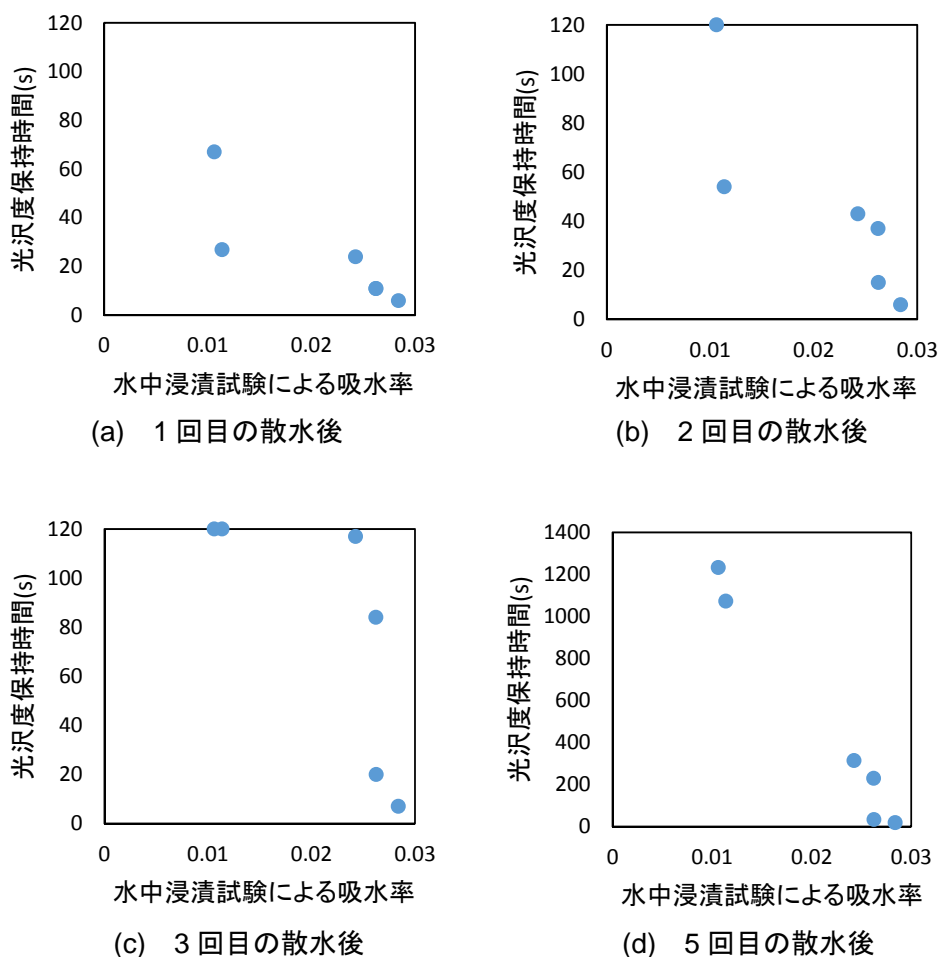


図 5.2.6 光沢保持時間と吸水抵抗性の関係

5.3 鉛直面における余剰水の流下現象に関する実験

5.3.1 概説

4.4 節で示したとおり、対象は鉛直面に限定されるが、鉛直面での水の流下距離は散水試験による表層品質評価の有効な評価指標となる可能性を見い出した。また、既往の研究において示した地濃ら[5.1]、あるいは家辺・岸ら[5.2][5.3][5.4][5.5]の手法では、マイクロピペットを利用して一定量の液滴をコンクリートの鉛直面に斜め上方から滴下する方法によりコンクリート表面に水分を付与し、流下した水の移動距離を指標としたコンクリートの品質評価が提案されている。特に、家辺らの方法においては、本研究により示された知見を参考に、少量の水を同一箇所を繰り返し付与するという、コンクリートの表層品質評価において効果的な水分付与方法も採用されている。これらの知見が示すように、鉛直面での水の流下距離を評価指標とすることで、簡易な表層品質の評価手法が構築できる可能性がある。

水の流下距離は、メジャーのような長さを測る器具があれば容易に取得できる。水の流下距離を評価指標とした手法においては、測色機器のような特殊な装置が不要となるため、装置の導入コストの面でメリットがあると言える。しかし、流下距離を評価指標とするということは、流下距離を計測する必要があるということを意味する。流下距離を計測するためには、測定者は例えば散水によって水分を付与すると同時に、メジャーなどを扱うことを求められることになる。図 5.3.1 に、実構造物での表面色の測定風景を示す。つまり、作業の内容上はハンディタイプの測色機器で表面色を行うのと同様であり、使用する道具が「機器」か「器具」かの違いがあるに過ぎない。そのため、流下距離を評価指標とした手法は、本研究の理想である簡便性を追求した手法の概念には程遠く、本研究ではさらなる発想の転換が必要であると考えた。そこで、まずは散水によって発生する水の流下現象の詳細な分析を行うため、流下の発生状況の観察に特化した散水方法の検討を行った。次に、コンクリート表面における散水後の流下現象の発生状況を撮影した画像の解析を行い、流下現象の発生メカニズムを考察した。最後に、それらの知見を基に考案した、鉛直面における散水時の余剰水の流下現象を利用した簡易な評価手法による検証実験について述べる。



図 5.3.1 表面色の測定風景

5.3.2 水の流下現象の発生と評価に適した散水方法の検討

5.3.2.1 検討の概要

測定部位の面積当たりの散水量は測定結果に大きく影響するため、本研究では散水器具の散水量と散水領域の面積を試験条件として考慮してきた。散水量は散水器具の性能に依存するため、所定の散水性能を有する器具を選定して使用している。一方、散水領域の形状については、明度の測定に使用する測色機器の形状に合わせた円形としてきた。しかし、鉛直面における流下現象の観察と評価を目的とした場合、散水領域の形状を円形とする必要はなく、円形とは異なる形状で散水することで手法の精度や作業性を向上させられる可能性がある。そこで、散水時の流下現象の評価に適した散水形状の検討を行った。また、評価指標としての有用性が見い出されている「流下距離」に関して、器具での計測という行為を伴うことが作業性の面で課題となっていることは前述のとおりである。そこで、散水方法を工夫することで流下距離の計測を省略する方法についても同時に検討した。

検討を簡易に実施するため、測定は手近な実構造物の壁面で行った。コンクリートの経年は5～10年程度で使用材料などの詳細は不明である。そのため、表層品質の調査や測定値の比較といった詳細検討は行っていない。なお、測定部位は直射日光や雨がかりの影響が少ない箇所とした。流下が発生するまで同一箇所です約1秒に1回のペースで散水を繰り返し行い、流下の発生後に状況の観察を行った。

5.3.2.2 流下の発生部位の散水形状に関する検討

本研究でこれまでに示した検討においては、明度の計測に使用する測色機器の直径に2mm程度の余裕を加えた直径約60mmの円形で散水できるように、真円を繰り抜いた開口部を有する治具（以下、散水ガイドとする。）を測定部位のコンクリート表面に設置し、かつ使用するスプレーの先端に円錐状の器具を装着して使用している。図5.3.2に、散水試験における散水器具の構成と使用状況を示す。散水ガイドは、同一箇所での散水と測定とを交互に何度も繰り返す際に、測定位置を一定の範囲内で再現するための位置決めガイドとしても重要な役割を果たしている。



(a) スプレー



(b) 位置決め用の散水ガイド



(c) 使用状況

図 5.3.2 散水器具の構成

ここで、鉛直面での流下現象の発生に特化させることを考えた場合、散水の形状によって余剰水の挙動が変化して、水の流下に影響を及ぼすことは想像に難くない。図 5.3.3 に、鉛直面における水の流下現象と散水形状の関係性を模式的に示す。散水直後にコンクリートに吸水されない水は重力で下方に流下するが、散水領域の縁部では表面張力が作用するため下縁部に沿って左右から中央に向かって集積する。そのため、散水形状の下縁部を下方に引き延ばした縦長の形状とすることで、水が中央に集積しやすくなり、流下現象の発生を促すことができる。また、縁部を円弧とするか直線とするかによって流下の様子は異なることが予想される。そこで、散水ガイドの開口部の形状を従来の円形とは極端に異なる下向きの二等辺三角形とし、流下性状を比較した。二等辺三角形の頂角は 30 度刻みで 120 度までの 4 段階で検討を行った。図 5.3.4 に、散水形状の比較と流下状況の例を示す。ここでの検討

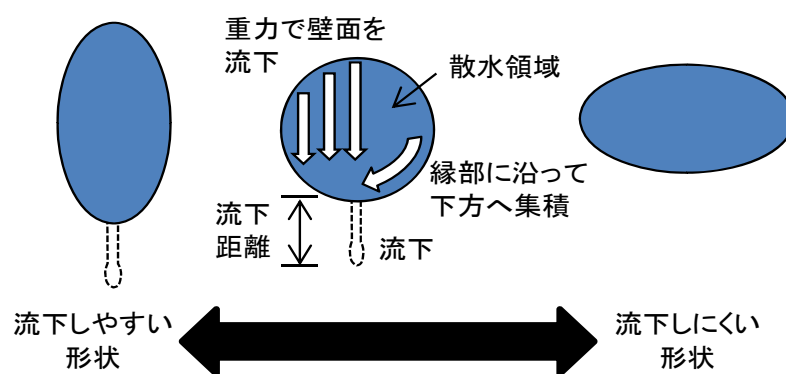


図 5.3.3 鉛直面における水の流下現象と散水形状の関係性

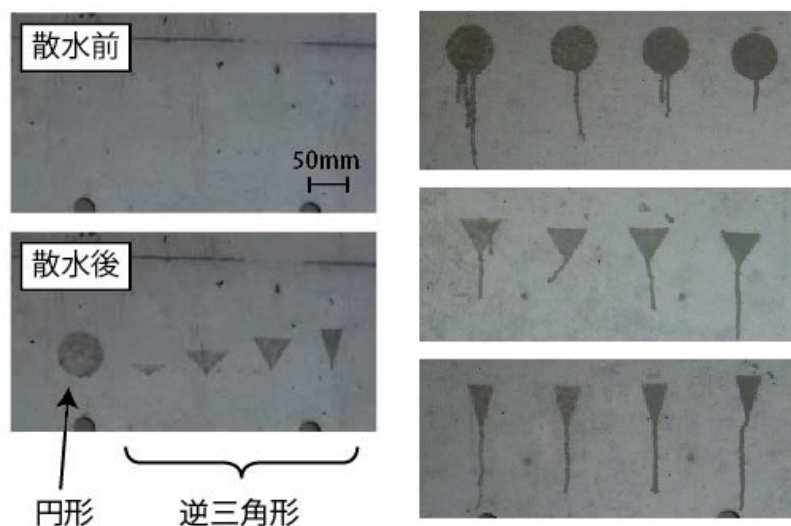


図 5.3.4 散水形状の比較と流下状況の例

の結果得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 散水面積あたりの散水量が同等であっても散水の形状により流下の様子は大きく異なる。
- 2) 縁部が直線であるか曲線であるかによらず、水の流下は散水領域の最下端以外からも生じることがある。
- 3) 散水領域の下縁部を鋭角にすることで流下の発生位置を散水領域の最下端に導くことができる。ただしその場合でも水は必ずしも真下に流下しない。
- 4) 円形以外の散水形状では形状に方向性があり、散水ガイドの設置時に下縁部の先端が正確に鉛直下向きとならない場合がある。鉛直下向きとの角度のずれによる影響は、下縁部を鋭角とするほど大きくなる。
- 5) 散水試験で散水と測定を交互に繰り返す際の散水位置のずれの影響は、散水形状の下縁部が鋭角であるほど大きい。

これらの知見を基に、鉛直面における散水試験では散水領域の下縁部の形状を円弧とすることとした。

5.3.2.3 流下距離の計測を省略する散水方法の検討

流下距離の計測を省略する方法として、次の3つのステップで検討を行った。

- (A) 流下距離を計測しない
- (B) 流下距離の計測準備を事前に行う
- (C) 流下距離の計測を省略可能とする散水方法の考案

上記(A)は、次の考え方によるものである。コンクリートの吸水抵抗性が劣るほど表面で所定の距離を水が流下するのに必要な水量が多くなるということは、付与した水量が瞬時に吸水される量より少ない場合は流下が生じない、すなわち流下距離が 0 となるものと考えることができる。第4章での検討において、一定量の水分を付与した際の表面色の変化特性を確実に取得するため、余剰水の流下による損失の発生を抑えることを目的として編み出した散水方法が、微量の水分を繰り返し散布するという方法であった。この散水方法により、吸水抵抗性に劣るコンクリートでは1回の散水では余剰水が生じないため流下が発生しない状況となった。その結果、流下までの散水回数によって吸水抵抗性の優劣、すなわち表層品質を評価できる可能性があるとの発想に至った。水の流下が発生した時点を1とし、流下距離ではなく流下の発生の有無を目視で0か1かで捉えて判断することとし、これにより流下距離の計測を省略するものである。図 5.3.5 に、上記(A)の概念で流下の有無による判定を検討した例を示す。吸水抵抗性の高いコンクリートなど、1回から数回の散水で10mm以上の明確な水の流下が発生した場合であれば、流下の発生を視認して判定することは容易であった。流下の兆候が見られてから即座に水が流下するためである。しかし、図 5.3.5 の右側の例に示すように、吸水抵抗性が劣るコンクリートの場合、散水領域の縁部で滲みを生じて流下の兆候が不明瞭となった。また、図 5.3.6 に示すように、流下の発生が著

しく遅いコンクリートでは、流下ではなく滲みによる散水領域の拡大が見られ、拡大の進展の速度は数分間で 1mm のような遅いものであった。そのため、散水領域からの水の流下と滲みの拡大とを一定の精度で区別することは困難となることから、流下の有無で判定を行うことにより流下距離の計測を省略するという方法は適当ではないものと判断した。

続いて検討を行った上記(B)の考え方は、流下距離の計測を省略するために測定位置周辺への目印や寸法の書込み、目標物やメジャーの貼付けなどを行うという単純な方法である。これらの方法は 1 箇所あたり数分程度で完了できる単純な作業ではあるものの、いくつかの課題が明らかとなった。一つは、4.2 節に示したように流下の発生位置が不確実な点である。散水領域の下縁部を円弧とした場合、流下距離の目印などは直線ではなく同心円を書き込む必要がある。そのほか、図 5.3.6 のような滲みが進展していく際には流下距離の目安とする位置のマーキング精度が求められるといった留意点があり、作業がやや煩雑となることがわかった。

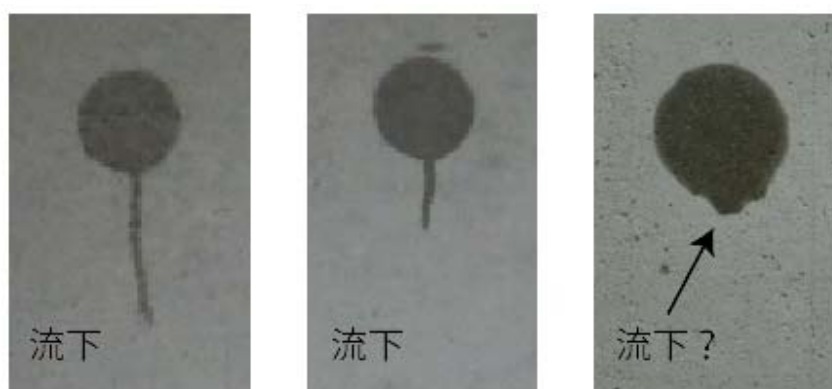


図 5.3.5 流下の有無の判定

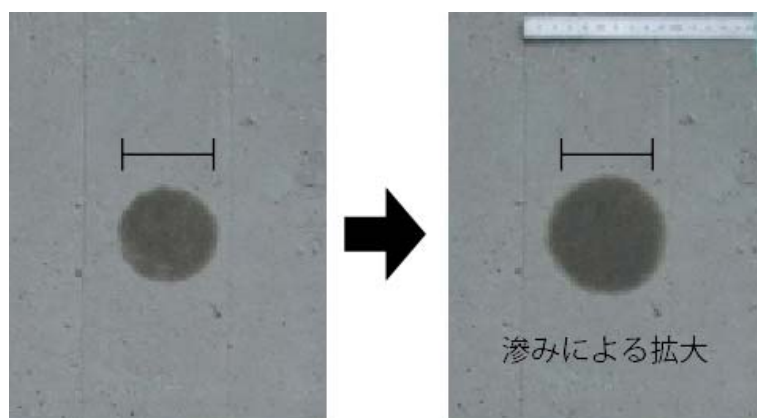


図 5.3.6 滲みによる散水領域の拡大

最終的に検討した上記(C)の考え方は、散水ガイドの開口部の形状を工夫し、散水時の余剰な水分によって散水と同時に目印を付加するという着想に基づくもので、詳細は次項 5.3.2.4 で述べる。

5.3.2.4 鉛直面での流下現象の評価に適した散水形状の考案

図 5.3.7 に、考案した散水形状と水の流下状況を示す。図 5.3.7(a)に示すように、散水形状の最大の特徴は、円形の散水領域を上下に分割した点である。下方の三日月状の領域が上方のラグビーボール状の領域からの流下距離の目安となる部分で、両者の距離は最短で 20mm となっている。つまり、流下距離が 20mm に到達しない段階（図 5.3.7(b)）と 20mm を超過した段階（図 5.3.7(c)）を即座に視認することが可能な形状となっている。なお、図 5.3.7(c)に示すように、上方から流下した水が下方の三日月状の領域に到達した場合、下方の三日月状の領域からさらに下方まで水が流下する状況が多く見受けられる。一方、流下しにくいコンクリートでは滲みによって散水形状が徐々に拡大する（図 5.3.7(d)）。

図 5.3.7(a)に示した散水形状での散水によって得られた知見を整理すると以下のとおりである。

- (1) 散水領域を上下に分割することで流下の完了や流下しないコンクリートの判定が容易となる。
- (2) 上部の散水領域の下端から流下が始まらない場合が見受けられるものの、位置ずれの影響が抑制できるため下縁部は円弧とするのが良い。
- (3) 下部の散水領域の上縁部についても円弧とすることで、上部からの流下がいずれの位置で発生してもほぼ同等の流下距離で流下の判定ができる。

以上、本節で得られた知見に基づき、鉛直面に対する散水においては図 5.3.7(a)に示す上下二分割型の形状での散水を行うこととした。

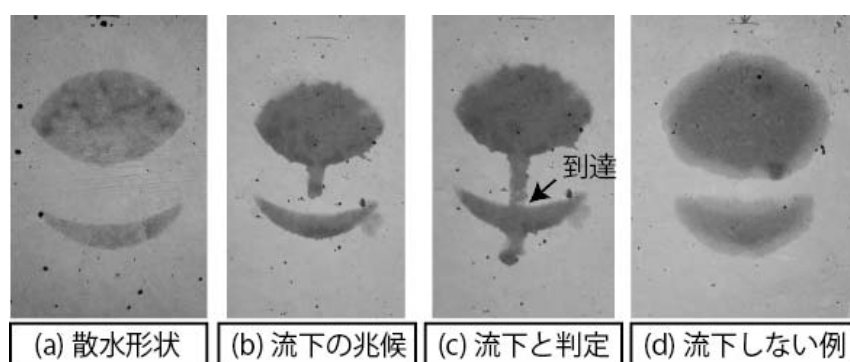


図 5.3.7 流下の判定に特化させた散水形状

5.3.3 画像解析による流下発生メカニズムの解明

鉛直面における散水による流下の発生状況を撮影した画像を解析し、流下発生メカニズムを検証した。画像解析の解析においては、散水によってコンクリート表面に付与した水分の挙動を解析するという目的に合致した画像解析技術は存在しないため、独自の画像解析プログラムを開発して使用した。同プログラムの詳細については、第6章にて応用技術のひとつとして後述する。

試験体は、レディーミクストコンクリートを使用して作製した。表5.3.1に、コンクリートの配合とフレッシュ性状を示す。粗骨材の最大径は20mmのAEコンクリートで呼び強度を24で発注したものである。試験体の寸法は150mm×150mm×高さ200mmとし、側面と底部の端面が丸みを帯びた形状となる型枠を使用して作製した。

図5.3.8に、測定状況を示す。撮影機材を設置して撮影を開始してから試験体の側面に対して散水を行った。散水は同一箇所に対して1分間隔で、流下するまで繰り返し行った。撮影した動画の解析を行い、水の流下状況と散水領域における表面色の変化の状況を分析した。

表 5.3.1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

セメント 種	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)
OPC	56.9	49.5	167	294	908	934	10.0	4.7



図 5.3.8 測定状況

図 5.3.9 および図 5.3.10 に、解析画像と表面色の解析結果の例を示す。画像解析の結果、水平面での検討と同様に、鉛直面においても散布した水分の滞留による光沢の発生が確認された。同一箇所での散水の繰り返しを行った場合、あるいは対象のコンクリートの吸水抵抗性が高い場合には光沢の発生する領域が広くなり、光沢の保持時間も長くなった。水平面での検討と異なる状況として、光沢の喪失は散水領域の上方から開始する点がある。2 分割

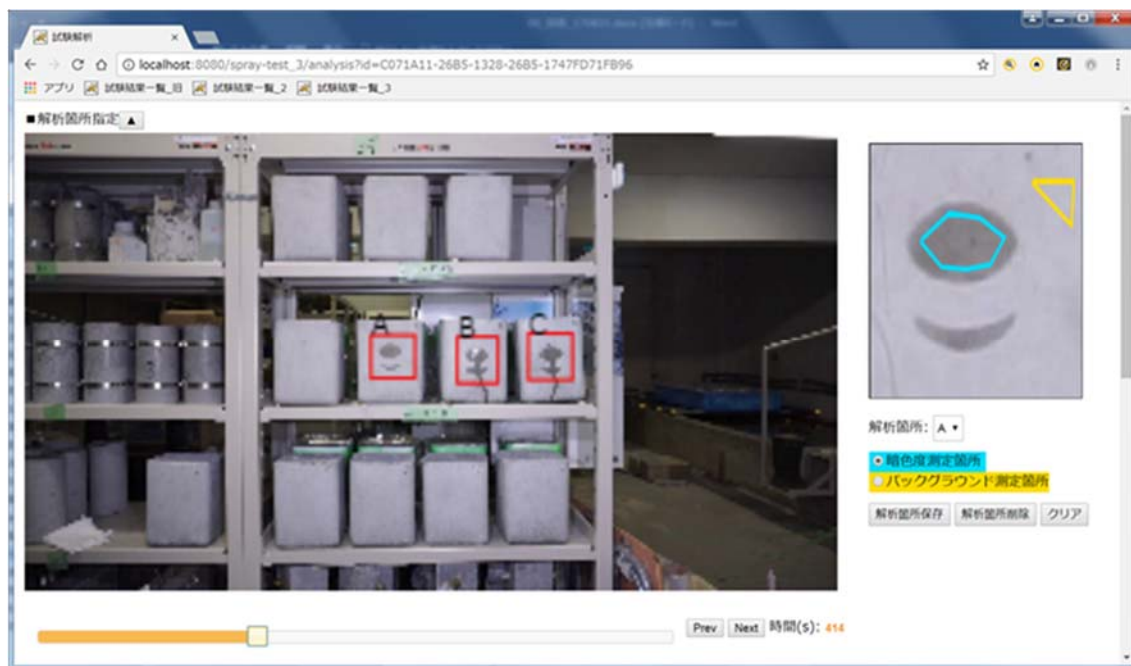


図 5.3.9 解析画像の例

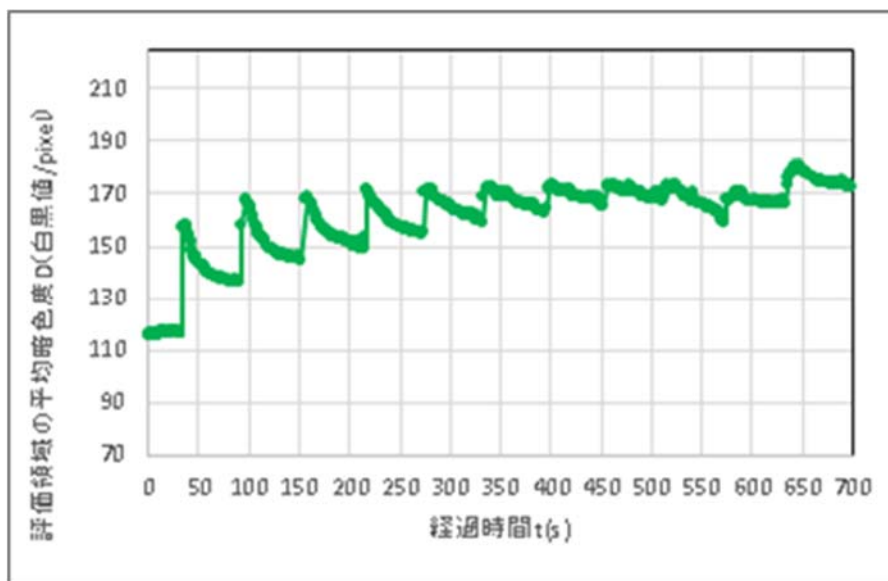


図 5.3.10 表面色の解析結果の例

の散水形状の上方の散水領域において余剰となった水分が散水領域の下部に集積し、やがて流下するという様子が確認された。

続いて、光沢の保持時間と流下発生の関係について分析を行った。光沢は余剰水の発生に起因するため、光沢の発生していない段階では流下は生じない。また、散水の繰り返し時間をここでは 60 秒としたが、光沢が発生しても保持時間が散水の繰り返し時間となる 60 秒を超過しない段階では流下は生じない。そのため、流下が発生する条件として、光沢保持時間が散水繰り返し時間を超過する、という条件が定まる。つまり、散水の繰り返し時間が 60 秒間隔の場合、60 秒を超過するかどうかを判定基準とすることができる。次に、流下の発生状況を記録した画像から無作為に 8 箇所分を選定し、流下が発生した際の散水の完了後、光沢の消失までに要した経過時間を分析して流下発生時の光沢保持時間を算出した。図 5.3.11 に、流下発生時の光沢保持時間を示す。光沢保持時間にはばらつきが見られるものの、平均で約 2 分、最短で約 90 秒となった。散水の繰り返し時間が 60 秒間隔の場合、流下の発生時には少なくとも 90 秒程度の光沢保持時間が発生し、光沢保持時間が 60 秒～90 秒の間は流下が発生しない可能性が示唆された。

5.3.4 試験体による検証実験

5.3.4.1 検証実験その 1

第 4 章の 4.4 において示した RC 高架橋を模擬した実物規模の柱状の試験体[5.6]を対象とし、鉛直面における流下の開始までの散水回数による簡易な表層品質の評価の適用性を検証した。図 5.3.12 に、柱試験体の外観を再掲する。柱試験体は東京大学生産技術研究所の岸研究室主導の下に作製されたもので、総数 20 本の柱試験体はコンクリートに品質差を設定するため、配合と養生方法を変えた 10 本ずつが夏季と冬季の 2 回の時季に施工された。

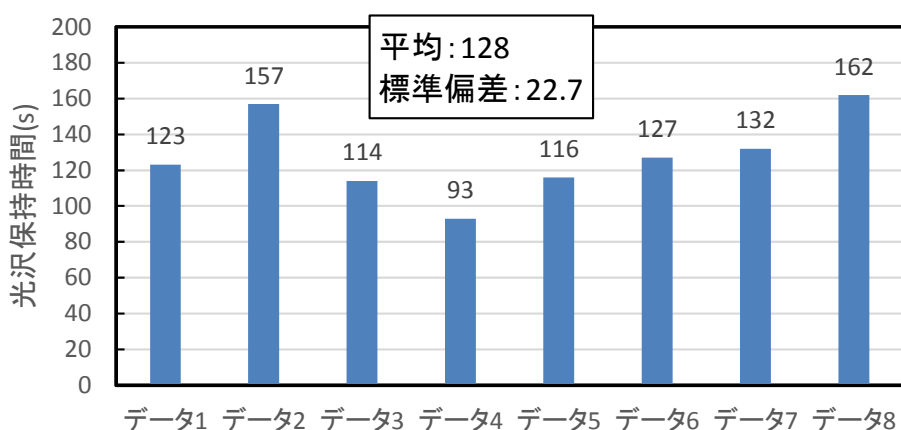


図 5.3.11 流下発生時の光沢度保持時間

ここでは、各種調査データが揃っている夏季に施工された 4 本を対象とした調査結果を示す。表 5.3.2 および表 5.3.3 に、柱試験体と調査の概要を示す。調査項目は、流下までの散水回数およびトレント法による非破壊での調査のほか、コンクリートの物質透過性に関する特性値として、柱試験体から採取されたコンクリート試験体を用いて塩化物イオンの拡



図 5.3.12 柱試験体の外観

表 5.3.2 柱試験体の概要

番号	呼び強度	養生条件	脱型材齢	試験体の設定
S1	60	早期脱型	1 日	高強度配合
S3	24	早期脱型	1 日	養生不足
S4	24	標準養生	5 日	標準
S5	24 ^{*1}	標準養生	5 日	材料不具合 ^{*1}

*1：打込みの直前に約 20kg/m³ 加水

表 5.3.3 柱試験体の調査概要

調査項目	方法	試験条件など
表層品質の 非破壊評価	トレント法	測定点数 3, 平均値
	流下までの 散水回数	散水量 0.3ml, 測定点数 4, 平均値
	明度変化測定	測定点数 1
中性化速度係数	JIS A 1152	測定材齢 15 箇月, 測定点数 8, 平均値
見掛けの塩化物 イオン拡散係数	JSCE G 572	浸漬開始材齢 15 箇月, 浸漬期間 32 週, 測定点数 1

散係数と中性化速度係数を調査した。調査はいずれも直射日光や雨がかりの影響の少ない高架橋の内面側を対象とした。

図 5.3.13 に、調査結果を示す。物質透過に対する抵抗性の低いコンクリート（中性化・塩化物の各係数が大きい）ほど、散水回数ならびにトレント法による透気係数 kT が大きくなった。流下までの散水回数に関しては、ほとんどの柱試験体において散水回数 1 回で水が流下したが、物質透過に対する抵抗性が最も低い試験体 S5 では散水回数が平均 3 回程度となった。つまり、最も作業が簡易な流下までの散水回数による評価を一次診断的に活用することで、耐久性上の問題が生じる可能性のあるコンクリートを容易に選別できる可能性が見い出された。1 回に散布する水量を減量することにより、流下までの散水回数は増加させることが可能であり、散水回数が 1 回で流下した柱についても区分を細分化できる可能性がある。そのため、以降の検討においては散水量を減じた散水器具を使用することとした。

5.3.4.2 検証実験その 2

壁状の鉄筋コンクリート製試験体（以下、壁状試験体とする。）を製作し、流下開始までの散水回数を調査した。表 5.3.4 および図 5.3.14 に、壁状試験体の概要を示す。壁状試験体は型枠の脱型条件が異なる 2 体をレディーミクストコンクリートで作製し、屋外で屋根の下に設置して降雨が直接かからないようにした。表 5.3.5 に、コンクリートの配合とフレッシュ性状を示す。粗骨材の最大径は 20mm の AE コンクリートで呼び強度を 24 で発注したものである。測定は日射の影響を受けにくい北側の面（図 5.3.14 の左側の面）で実施し、測定位置の高さは壁状試験体の底面から 600mm 付近とし、8 箇所で測定を行った。測定時のコンクリートの材齢は約 2 箇月である。また、流下までの散水回数の測定を実施する直前に、異なる 12 箇所で表層透気試験を実施した。

図 5.3.15 および図 5.3.16 に、壁状試験体の測定結果を示す。1 日で脱型を行った W1 試験体では、7 日脱型の W2 試験体に比べて散水回数および表層透気係数のいずれも数値が顕

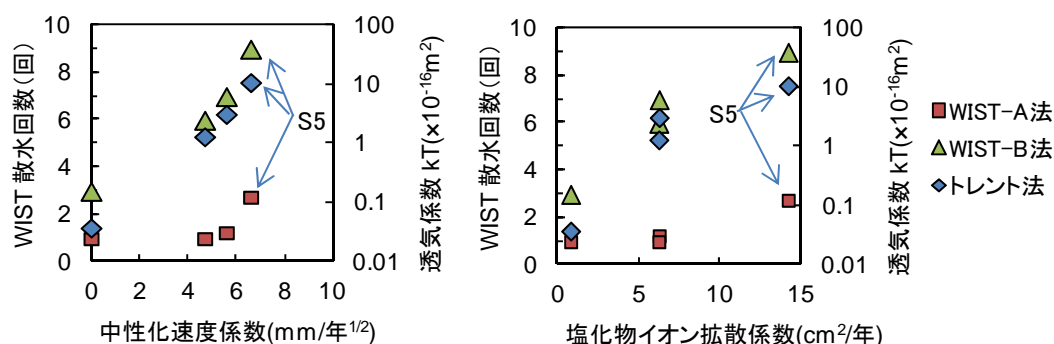


図 5.3.13 測定結果

表 5.3.4 壁状試験体の概要

コンクリートの特徴	レディーミクストコンクリート，呼び強度 24MPa，最大粗骨材径 20mm，スランプ 8cm，普通セメント，W/C=57%
寸法・形状	1200×1200×400mm・壁状
脱型条件	1 日（W1 試験体），7 日（W2 試験体）
養生条件	屋外気中曝露
測定時の材齢	約 2 箇月
測定時の環境条件	冬季の屋外環境（約 10℃，約 30%RH）



図 5.3.14 壁状試験体

表 5.3.5 壁状試験体のコンクリートの配合とフレッシュ性状

セメント種	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)
OPC	56.7	46.4	164	290	855	994	9.5	4.1

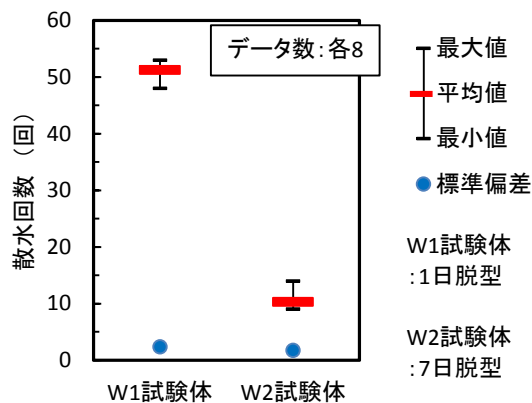


図 5.3.15 壁状試験体における流下までの散水回数

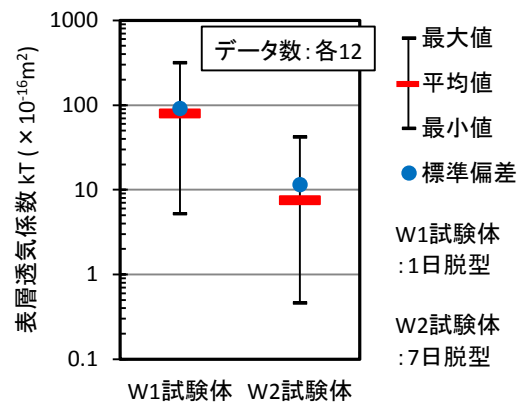


図 5.3.16 壁状試験体の表層透気係数

著に増大した。作製条件を変えて同時に作製したコンクリートでは、表層透気係数の相対的な差異が流下までの散水回数による簡易な方法でも容易に判定可能であることが確認された。すなわち、流下するまでの散水回数の大小によって表層品質を簡易に判定し、散水回数が少ないほど表層品質の優れたコンクリートと判定することが可能である。なお、図 5.3.16 に示した表層透気試験のデータに見られるように、部材寸法が 1,000mm 程度となる試験体や実構造物での測定結果は、小規模な試験体による試験室内での測定結果に比べてデータのばらつきが大きくなる傾向が確認されている。100mm～500mm 程度の小型試験体を室内で作製する場合は比較的な施工が可能であり、コンクリートの打込みや締固めの作業におけるムラが小さいものと想定されるため、その影響が現れたことが考えられる。実構造物の表層品質を評価する際は、1 箇所あたり 4 点～8 点程度の測定を実施し、測定値のばらつきを確認した上でデータの比較を行う必要がある。

5.3.4.3 検証実験その 3

同時期に建設工事が進められていた 2 箇所のボックスカルバート建設現場で、実構造物の近傍の屋外にて実構造物と同じ条件で製作された逆 T 型の壁状の RC 試験体（以下、RC 試験体とする。）[5.7]を対象として実施した検証実験の結果を述べる。

表 5.3.6 に、散水に関する試験条件を示す。散水の繰返し時間間隔は 1 分とし、水の流下が生じるまで散水の繰返しを行った。測定時の材齢は約 3 箇月であり、コンクリート表層の含水状態を把握するために散水の実施直前に同じ箇所で高周波容量式水分計による表面含水率の計測を実施した。RC 試験体は使用材料、部材厚さ、配筋を実構造物と同一とし、養生条件を A・B・C の 3 水準に設定してボックスカルバート建設工事の請負事業者により各 1 体が作製され、複数の研究機関が連携した各種の測定に供された。表 5.3.7 および表 5.3.8 に、コンクリートの配合と養生条件を示す。2 箇所の建設現場ではコンクリートの配合と壁厚が異なっており、試験体のシリーズ名はセメント種に合わせて BB および OPC と表記した。すべての RC 試験体について、降雨と日照の影響を避けるために試験体の上方と周囲をビニールシートで囲い込んで曝露がなされた。図 5.3.17 に、RC 試験体の概略および測定位置を示す。測定位置は壁部分の高さを 4 等分したライン上とし、左右の端部から 100mm 程度を除いた範囲で 4 点ないし 8 点とした。ただし、測定実施時の時間的な制約により全試験体の全ライン上での測定は実施していない。試験体の壁部分 1,500×1,500mm の 2 面に対しては、使用する木製型枠の状態に関して転用の有無の 2 条件を設定して試験体を作製された。しかしながら、測定値に及ぼす一定の影響が見い出されなかったため、ここに示す測定結果では面の区別をしていない。

表 5.3.9 に、測定結果の一覧を示す。表面含水率は追加養生を行った養生 A で明らかに高い数値を示した。ビニールシートによる封緘養生によってコンクリートからの水分の逸散が抑制されたものと考えられる。流下までの散水回数に関しては、おおむね 10 回程度より大きい場合は総じてばらつきも大きくなった。散水回数の平均値による評価を行う場合、極

表 5.3.6 試験条件

散水器具	手動式スプレーB
散水量	0.15ml/回
散水領域	φ 58 mm
繰返し間隔	1 min

表 5.3.7 RC 試験体のコンクリートの配合

シリーズ名	セメント種	W/C (%)	スランプ (cm)	単位量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
BB	高炉 B 種	52.5	8.0	159	303	795	1042
OPC	OPC	55.0	8.0	162	295	816	1029

表 5.3.8 RC 試験体の養生条件

養生 A (追加養生)	脱型直後にビニールシートで封緘
養生 B (標準養生)	示方書相当 (BB は 7 日脱型, OPC は 5 日脱型, 気中曝露)
養生 C (養生不足)	1 日で脱型して気中曝露

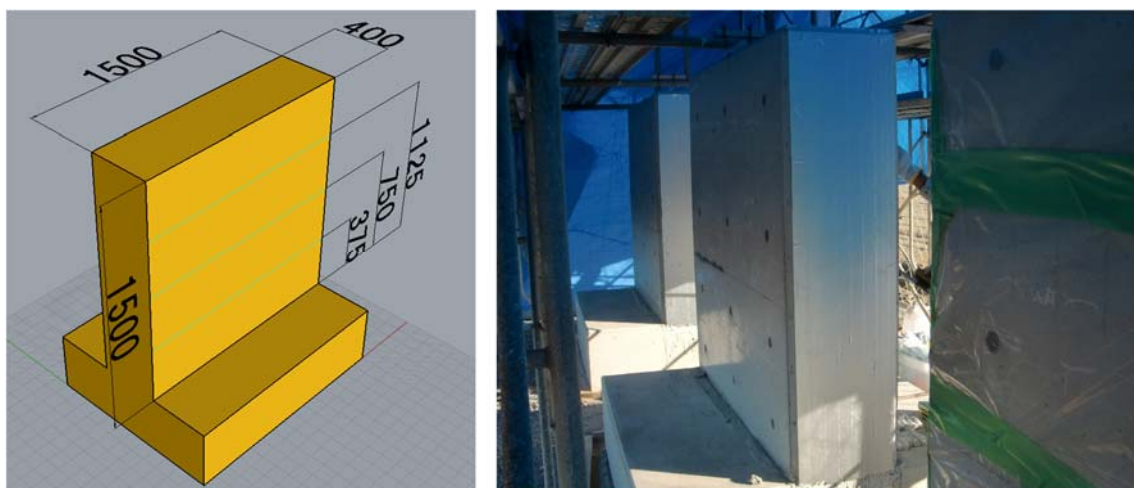


図 5.3.17 RC 試験体の概略

端な数値の影響を避けるためには平均値に対する偏差で測定値の採否を判定するなどの方法を検討する必要がある。しかし、散水回数の測定値のばらつきは単なる測定誤差ではなく、コンクリート表層における微量水分の吸水現象や流下の発生に対する何らかの差異を反映している可能性があると考えられる。そのため、極端な数値を一概に異常値として棄却することは現象解明の観点からは望ましくない。図 5.3.18 および図 5.3.19 に、養生および測定高さの影響を示す。BB シリーズで流下までの散水回数が相対的に大きく、特に養生 B と養生 C で著しく増加した。BB シリーズではセメント種が高炉スラグ B 種であったため養生の不足によって密実性が失われたものと推測され、養生不足による散水回数の増加は高炉スラグを使用したコンクリートで顕著となることが示唆される結果となった。図 5.3.18 に示すとおり、BB シリーズ、OPC シリーズともに流下までの散水回数は追加養生を行った養生 A で減少し、1 日脱型で気中曝露を行った養生 C で増大し、養生条件の良否による表層品質の差異が流下までの散水回数によって評価できることが明らかとなった。また、図 5.3.19 に示すとおり、流下までの散水回数が多い養生不足の試験体では測定高さの影響が表れており、低い位置の測定点で散水回数が減少した。表面含水率の測定結果では高さ方向の差は見られないため、散水回数の差は表面含水率計の測定領域と考えられる表面から 4～5cm 程度の範囲の平均的な含水状態を反映したものではないと考えられる。

以上のとおり、実構造物と同等の条件で作製した壁状の試験体において、追加養生を行ったコンクリートでは流下までの散水回数が少なく、散水回数のばらつきは小さくなり、測定高さの影響は見られなかった。一方、流下までの散水回数が多いコンクリートでは散水回数のばらつきが大きくなるとともに測定高さの影響を受ける傾向が見い出された。養生の不足したコンクリートで流下までの散水回数が大きく増加したことから、散水回数の大小によって表層品質を簡易に判定できる可能性を確認することができた。なお、流下までの散水

表 5.3.9 測定結果

シリーズ名	養生	測定高さ H (mm)	散水試験の散水回数 (回)				表面 含水率 (%)	測定 点数
			平均値	最小値	最大値	標準 偏差		
BB	A	375	8.0	7	9	0.82	5.3	4
		750	6.8	6	7	0.50	5.3	4
		1,125	9.5	8	11	1.07	5.8	8
	B	1,125	35.3	26	50	8.63	4.7	8
		375	34.8	31	41	4.50	4.3	4
		750	87	75	93	8.49	4.2	4
OPC	C	1,125	73.3	50	95	19.81	4.4	4
	A	750	3.6	3	4	0.52	8.2	8
		750	13	9	16	2.56	5.1	8
	B	375	10.8	8	13	2.63	4.7	4
		750	16.1	10	25	4.64	4.9	8
		1,125	17.5	14	22	3.42	4.8	4

回数は散水量に依存して増減するが、ここでは表層品質の差異に対する感度を高めることを目的として散水量を 0.15ml まで減量したスプレーを用いた。散水回数が数十回に至り測定が長時間化するケースも見受けられたが、構造物検査の実務においては測定時間の増大は好ましくないため、散水量を 0.2ml~0.3ml 程度まで増量して表層品質が著しく劣るコンクリートの判別に特化させるといった使い分けが必要となると考えられる。

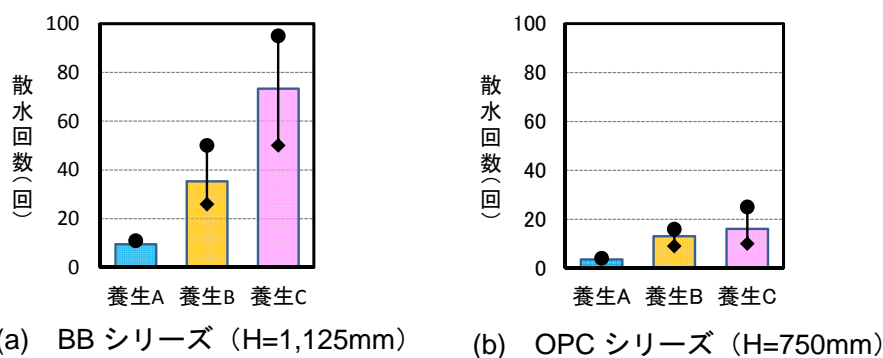


図 5.3.18 養生の影響

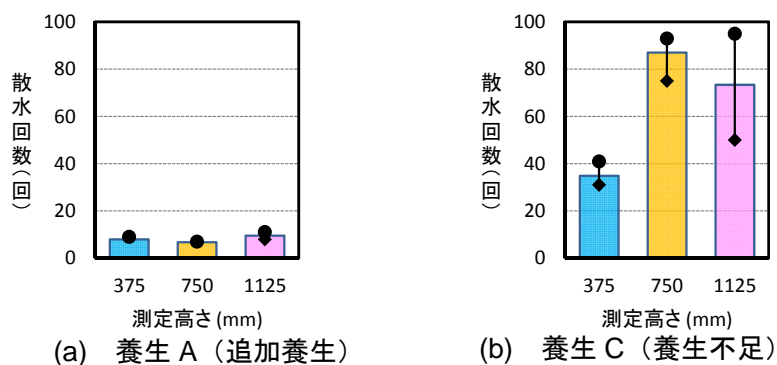


図 5.3.19 測定高さの影響 (BB シリーズ)

5.4 散水による表層品質の簡易評価手法「散水試験」の提案

5.4.1 散水試験の概要および測定手順

コンクリートは無数の空隙を有しているため、表面に水をかけると吸水する。吸水されない量の水が供給された場合は余剰となった水がコンクリートの表面に溜まり、壁面などであれば水が流れ出すことになるが、吸水しやすいコンクリートでは水が表面に溜まらないため流れ出しにくい。本研究では、このようなコンクリート表面へ意図的に水を与えた際に観察可能な現象を表層品質と結び付けて各種の実験による検証を行った。得られた知見に基づいて、「乾燥したコンクリート表面へ意図的に散布した少量の水の消失や流れ出しの挙動を、可視光の反射・吸収特性として測定者の目視で識別し、コンクリート表層での吸水現象を評価する手法」として構築した。このような手法を「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」と表記し、散水による表層品質の簡易評価手法としてここに提案する。以下、本研究で提案する「散水試験」の概要を整理する。

図 5.4.1 に、散水試験の概略を示す。散水試験ではコンクリート表面の同一箇所に対して少量の散水を一定の時間間隔で繰り返し行いつつ、目視によって水がコンクリート表面から内部に吸収されていく状況の観察を行う。散水試験は、手動の器具による散水と目視という軽微な作業で表層品質の簡易評価を行う手法である。

散水試験では、付与した水分の挙動が測定の対象とする面の方向によって異なることを考慮する必要がある。本研究では柱や壁などの鉛直面、スラブなどの水平面の 2 パターンに対する適用方法を提案する。水平面の上面と下面では水の移動方向が 180 度異なり、本研究では下面に対する検証のデータが少ないものの、同様の方法で評価が可能であると考えている。なお、鉛直あるいは水平以外の傾斜面に対しても同様の方法が適用可能と予想される

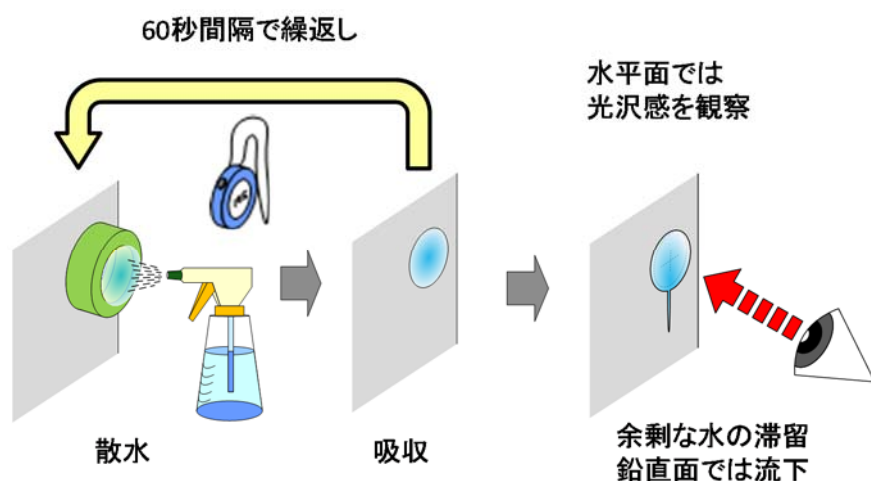


図 5.4.1 散水試験の概要

が、傾斜の角度に応じた補正方法についての検討を現段階では行っていない。

鉛直面における散水試験では、測定者は目視で散水後の水が流れ出したかどうかを観察する。なお、水が流れ出したかどうかを目視で判定することを容易とするために開発した専用の散水器具を使用し、特徴的な形状での散水を行う。散水後に水が流れ出した時点で測定は終了となり、それまでの散水回数で評価を行う。吸水しない緻密なコンクリートでは、水の流下までに要する散水回数が少なくなる。例えば、散水の繰返し時間間隔を 60 秒とし、1, 2 回の散水で測定が終了した場合、測定の所要時間は 2 分程度となる。一方、緻密さに劣るコンクリートの場合では、水が吸い込まれ続けることで測定の終了までの散水の繰返し回数が増加するため、所要時間はそれに依りて増大する。

水平面における散水試験では、測定者は目視で散水領域のコンクリート表面の光沢感の保持状況を観察する。散水からの経過時間をストップウォッチなどで計測し、光沢感が喪失するまでの時間の長短によって表層品質の評価を行う。吸水しない緻密なコンクリートでは、光沢の保持時間が長くなる。なお、光沢の保持時間による評価は鉛直面でも適用できる。

図 5.4.2 および図 5.4.3 に、散水試験の測定手順を示す。散水試験では、同一の箇所における散水を一定の時間間隔で繰り返すことが重要である。散水の時間間隔は、60 秒を基本としている。時間間隔の短縮、延長のいずれも散水回数ないし光沢保持時間に影響を及ぼすため、時間間隔の統一は必須である。散水の時間間隔を 60 秒と設定した根拠は第 4 章で示したとおりであるが、散水の時間間隔と散水量はトレードオフの関係にある。散水量を減量した場合は散水の時間間隔も短縮し、次の散水による水分の付与を早めることが可能である。

散水試験における散水の時間間隔は、測定の待機時間として無駄に経過する時間ではない。散水試験において散水器具を用いて測定者が行う水の散布は、一般の霧吹きで液体を噴霧するのと同様の行為にすぎない。ただし、位置決め用のガイド器具を併用する必要がある。そのため、水の散布に要する時間は 1 箇所あたり 2~3 秒である。つまり、60 秒の時間間隔を利用して、近傍で最大 20 箇所ほどの異なる箇所に対して水の散布が可能である。例えば、第 6 章で示す鉄道事業者での活用事例においては、近傍の 12 箇所に対する測定が同時進行で行われた。本研究では時間間隔を厳密に 60 秒で管理した測定を安定的に実施することを優先し、60 秒の時間間隔における同時進行の測定箇所数を 8 箇所とした。

散水試験で用いる水を散布するために使用する器具は一般的な手動式のスプレーで、散水の量と面積を専用の器具で安定化させている。また、散水を一定の精度で行うために測定面とスプレーの距離および角度を固定する必要があり、専用の位置決めガイド器具を使用する（図 5.4.4）。図 5.4.4 の左に示したものが、鉛直面での目視による水の流れ出しの判定を容易とするために開発した特徴的な開口部を有する散水試験専用の位置決めガイド器具である。

鉛直面の場合

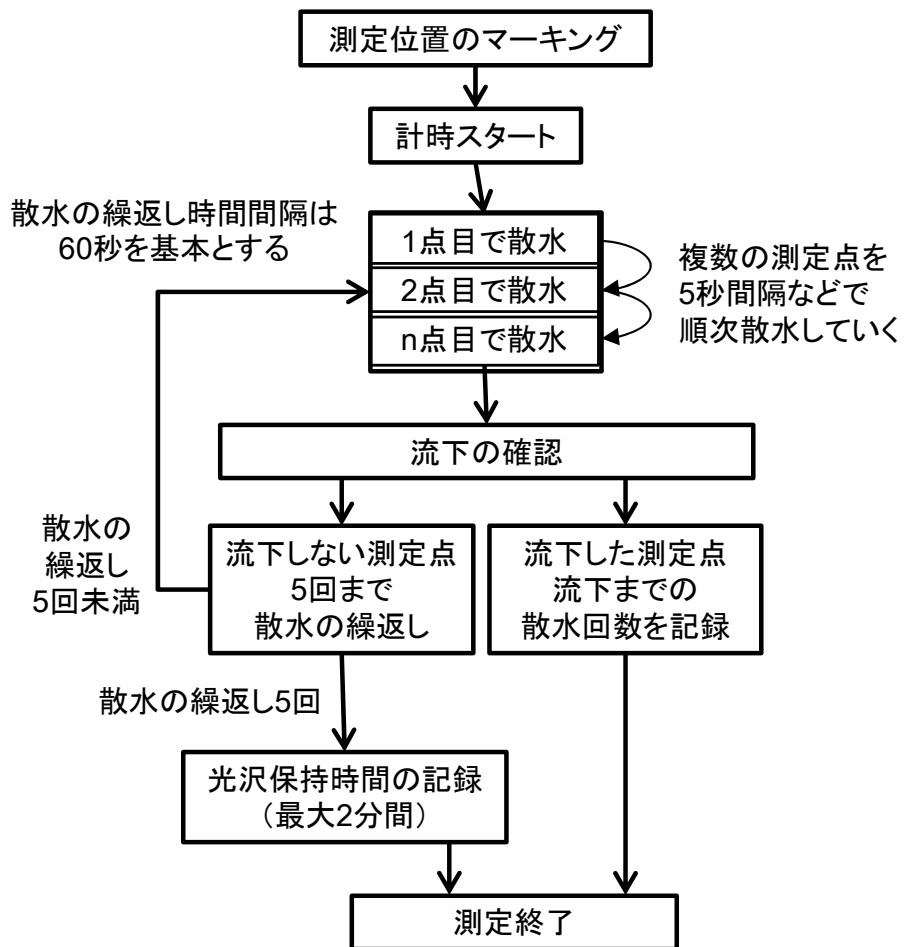


図 5.4.2 散水試験の測定手順（鉛直面）

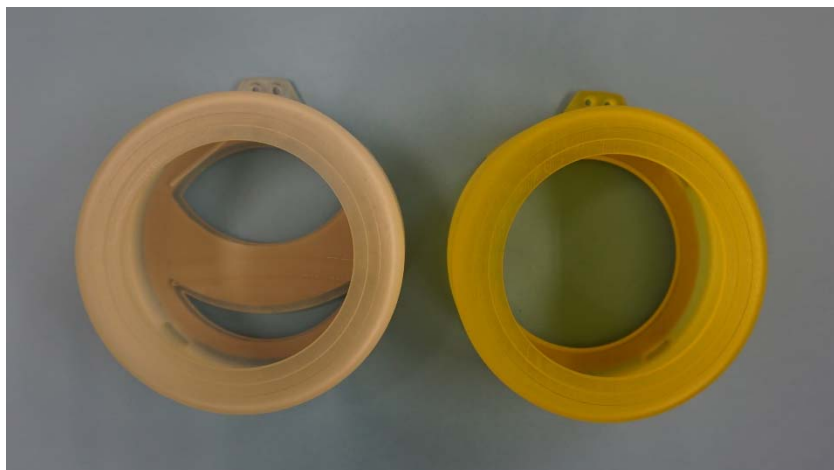
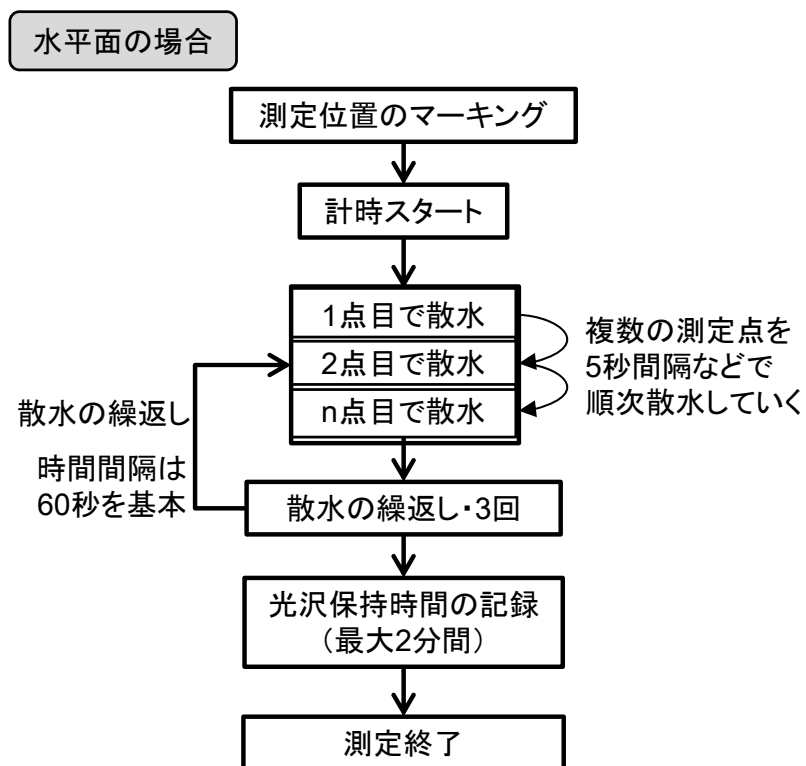


図 5.4.4 散水試験で使用するガイド器具
(左が鉛直面用, 右が水平面用)

5.4.2 表層品質の評価指標および判定方法

散水試験による表層品質の評価指標は、測定の対象が水平面の場合と鉛直面の場合とで異なる。スラブなどの水平面においては、散水完了後の光沢保持時間を評価指標とする。1分間隔で同一箇所に対して3回の散水を行い、散水の完了後、光沢保持時間を計測し、記録する。柱や壁などの鉛直面においては、流下までの散水回数または散水完了後の光沢保持時間を評価指標とする。1分間隔で同一箇所に対して最大で5回までの散水を行い、流下が生じた際の散水回数を記録する。5回の散水で流下が生じなかった場合、光沢保持時間を計測し、記録する。なお、光沢保持時間の計測を行わない場合は、10回まで散水の繰返しを行い、散水回数を記録する。

散水試験による表層品質の判定は、散水回数の大小、光沢保持時間の長短によって行う。散水回数の大小、光沢保持時間の長短によって絶対的な評価を行うためには、散水試験の試験条件を統一することが前提となる。試験条件のうち、散水に関する条件を統一するため、本研究では独自の散水器具を開発した。開発した散水器具の詳細は第6章にて後述する。一方、試験条件に関して実構造物では測定時の環境条件を統一することは不可能であるため、測定環境に対する補正などを行う必要がある。また、第4章で示したように、高炉セメントを使用したコンクリートでは散水回数が増加する傾向が確認されており、すべてのコンクリートに対して一律で利用できる評価基準値を提案することは困難と予想される。そのため、散水試験による表層品質の判定は、同等の条件下における相対的な評価に留めておくのが理に適っている。しかしながら、実務での活用を考えた場合、表層透気試験における「優・良・並・劣・極劣」の5段階判定のように、おおよその品質を区分する判定基準を設定することが有用である。そこで、本研究で得られた知見を基に、散水試験による表層品質の判定基準を定めた。表5.4.1に、散水試験による表層品質の判定基準の例を示す。同表に示すよ

表 5.4.1 散水試験による表層品質の判定基準の例

判定		判定基準（脱型あるいは養生完了後の経過日数ごと）						
		1 日	2 日	3 日	4 日	5 日	6 日	7 日
A 吸水しにくい	流下までの散水回数	3 回未満		5 回未満				
	光沢保持時間	90 秒以上						
B 普通	流下までの散水回数	5 回未満		10 回未満				
	光沢保持時間	30 秒以上～90 秒未満						
C 吸水しやすい	流下までの散水回数	5 回以上		10 回以上				
	光沢保持時間	30 秒未満						

測定時の環境条件：気温 20±10℃，直射日光なし，降雨なし

散水方法：鉄道総研式の散水試験キット（散水量 0.2ml，約 0.1mg/mm²）

適用したコンクリートの配合：表 5.5.2

うに、散水試験は脱型あるいは養生の完了後 1 日から 7 日程度の期間内に適用することで表層品質の判定区分を可能とした。これは、散水試験を含むすべての表層品質評価手法において考慮すべき影響要因であるコンクリートの含水状態が及ぼす影響を軽減するための適用条件であり、詳細は 5.5 節にて後述する。なお、表 5.4.1 において判定基準として例示した散水回数や光沢保持時間の数値は、散水方法や散水器具などの試験条件のほか、手動の器具を扱う測定者によっても数値が増減するため、留意が必要である。そのほか、同表において考慮されていない配合や型枠種別などの影響の度合いは不明である。同表に示した条件と異なる条件で適用する場合は、基準となる測定対象との相対比較により、判定基準とする数値を個別に設定するのが良い。

5.4.3 手法の特徴および特長

表 5.4.2 に、散水試験の特徴を示す。散水試験の最大の特長である手法の簡便さは作業の規模および作業時間として明確に現すことができる。例えば、表層透気試験および表面吸水試験（以下、他手法とする）では、使用機材がトランクケース 2～数個程度の容量にもなり、発電機の設置を要するため、作業人員が 1 名では困難な作業となる。表中で示した作業時間とは、測定箇所の選定が完了してからの作業時間である。他手法では使用機材が多いため本作業に取り掛かるまでの準備に 30 分程度の時間を要するほか、表層透気試験においては試験装置のキャリブレーションで 1 時間以上の時間を要する。散水試験の主な使用機材は、散水器具とタイマーだけであり、手荷物として携行可能である。作業人員は 1 名で問題なく、測定箇所の選定が完了してからの作業時間は準備に 5 分程度、測定に最大 10 分程度である。散水試験はこのような軽微な作業で完了できるため、測定時の機動性にも優れている。他手法では、試験装置を一旦設置すると、ケーブル類の届く範囲内での測定位置の変更程度にしか機動性を有していない。装置コストに関して、他手法の製品価格は 400 万円前後と聞き及んでいるが、散水試験に関しては散水器具をオーダーメイドで製作しても 10 万円ほどで導入が可能である。量産体制が整っていない現状でも他手法と比較して 5% 以下という圧倒的なレベルとなっている。

表 5.4.3 に、コンクリートに水を付与する試験方法における水の付与方法の比較を示す。液状水を使用する点は共通しているものの、散水試験ではスプレーを使用して散布するという方法を採用しているのに対し、流水試験では直径 2～5mm 程度の水滴がピペットで滴下され、表面吸水試験では直径 80mm 程度の開口部を有した容器に満たすことで水が付与される。付与する水の量に関して、散水試験だけが水滴あるいは水の粒の大きさ、粒径のような概念が当てはまると考えられるが、本研究では散布する水の粒径が及ぼす影響に関しての検討を行っていない。また、表面吸水試験では数分から数時間程度の時間をかけて水を供給するのに対して、散水試験と流水試験では少量の水を繰返し付与するという特徴がある。そのため、面積当たりの水の付与量を比較する上での単位が統一できないものの、散水試験における付与量は流水試験の 10% ほどとなり、表面吸水試験において 1 時間程度で付与さ

れる量のおよそ 10%以下と見なせる量となっている。流水試験における水の付与量が他手法に比べて大きく、流水試験では「必ず水を流下させる必要がある」という特徴があることが付与量に表れている。散水試験は水が流下するまでの現象を捉えようとしている手法であり、水の付与量が極めて少ないこと、また、散水試験は表面吸水試験におけるごく初期の吸水現象を対象とした水量に相当すると考えられることが表 5.4.3 より読み取れる。

散水試験ではコンクリート表面の同一箇所に対して少量の散水を一定の時間間隔で繰り返し行いつつ、水の状態の観察を行う。少量の水分を付与する以外にコンクリートへの影響はないため、散水試験は同一箇所での繰り返しが可能である。同一箇所での少量の散水の繰り返しによって、内部含水状態を意図的に変化させながら測定を行うという点は、他手法にない散水試験の特徴と言える。散水試験と同様に流水試験でも繰り返しという行為があるものの、流水試験では流下することが前提の水量となっており、同一箇所における内部の含水状態を少しずつ飽和させていく散水試験とは大きく異なると考えられる。このような散水試験の特徴は、含水状態だけでなく各種劣化現象などと密接な関係のある、コンクリート表面から内部における水分の移動機構に対する現象解明の糸口となる可能性を秘めている。

表 5.4.2 散水試験の特徴

装置コスト	10 万円（個別受注生産による製作費）
作業規模	作業人員 1 名，リュックサック 1 個
作業時間	準備：5 分，測定：1 分～10 分
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・準備は位置決め器のマーキング程度 ・近傍で複数の個所を同時に測定（8 ± 4 箇所程度） ・軽装のため測定時の機動性が高い ・必要最小面積：直径 60mm 円形

表 5.4.3 散水試験における水の付与方法の特徴

試験方法の名称	散水試験 (本研究)	繰返し流水試験 [5.8]	表面吸水試験 (SWAT 法) [5.9]
水の付与方法	スプレーによる 散布	ピペットによる 滴下	給水容器の開口部 との接触
付与水量	0.2ml/回 (繰返し付与)	0.02ml/回 (繰返し付与)	約 150ml 実際の吸水量は 5～10ml と仮定
付与面積	直径 60mm 円形 約 2,800mm ²	直径 2～5mm 程度 約 20mm ² と仮定	直径 80mm 円形 約 5,000mm ²
面積当たりの水量 (mm ³ /mm ² = mm)	約 0.1mm/回	約 1mm/回	1～2mm/h

5.5 実構造物の含水状態の変動を考慮した散水試験の適用方法

5.5.1 概説

実構造物の表層品質を評価する上では、コンクリートの含水状態の影響を考慮する必要がある。本研究で提案する散水試験も例外ではない。各種の非破壊評価値がコンクリートの含水状態に依存して変動することに関しては多数の報告例があるほか、気体と液体の移動経路としてのコンクリート内部の空隙が水で満たされることによって物質の透過性状が影響を受けると考えるのは当然のことである。

ここでは、まず実構造物におけるコンクリート内部の含水状態の評価において一般的に使用されている高周波容量式水分計による含水率計測に関して、実用上の問題を論じる。次に、降雨による水分供給の環境が異なる屋外曝露の試験体から得られた実測データにより、降雨による水分供給がコンクリートの物性に及ぼす影響を示す。それらを踏まえて、実構造物において取得可能な含水率に関する数値は不確実なものであるということを前提とした上で、コンクリートの含水状態を考慮した散水試験の適用方法を提案する。

5.5.2 実構造物における含水状態の変動に関する考察

一般には、材齢の経過に伴う乾燥の影響によってコンクリートの内部含水率は低下していくが、実構造物の表面近傍では降雨や漏水によって外部から供給される水分の影響を受けるため、含水率は必ずしも一方向的に低下しない。そこで、あらかじめ内部に水分センサを埋設した実物規模の角柱試験体を2体作製し、屋根の有無により降雨の作用環境に差を設定した上で屋外に曝露することによって、降雨がコンクリートの内部含水状態に及ぼす影響を検証した。また、若材齢時のコンクリートにおける内部含水状態の変化が表層透気係数に及ぼす影響についても検証した。さらに、降雨がコンクリートの強度に及ぼす影響を検証するため、強度試験用の円柱供試体（直径 100mm×200mm）を同様の条件で作製して角柱試験体の付近に曝露した。表 5.5.1 および図 5.5.1 に、角柱試験体の概要を示す。角柱試験体の寸法は 1100mm×1100mm×高さ 1100mm で、実際に建設中の鉄道高架橋の柱と同じレディーミクストコンクリートを用いて、標準的な施工方法により作製した。角柱試験体の1体には直接の雨がかりを避けるための屋根を設置した。表層透気係数の測定は、それぞれの角柱試験体で2箇所を材齢の影響の検証用として確保し、位置をマーキングして毎回同

表 5.5.1 試験体の概要

コンクリートの 特徴	実構造物と同じレディーミクストコンクリート，呼び強度 30MPa， 最大粗骨材径 20mm，スランプ 12cm，普通セメント，W/C=49%
寸法・形状	700×700×約 1000mm・角柱状
脱型条件	実構造物と同条件（5 日）
養生条件	屋外気中曝露
その他	屋根あり・屋根なしの 2 体，内部に水分センサを埋設（深さ 10mm から 50mm まで 10mm 刻み）

じ位置で測定を実施した。内部に埋設した水分センサによる内部含水率の計測と併せて、異なる 2 機種の高周波容量式表面含水率計により表面含水率の計測を行った。

図 5.5.2 に、高周波容量式含水率計による表面含水率の経時変化を示す。表面含水率は脱型直後に高い値を示し、3 箇月程度でおおよそ安定化する傾向にあるが、雨がかりのある場合、降雨の影響で表面含水率は大きく上昇することがわかる。また、機種により測定値が異なることが確認された。また、実用上の課題として、温度補正の設定がある機種では、コンクリートの表面温度の手入力による補正と装置による自動温度補正とでは数値に差が見られることが判明した。

図 5.5.3 に、角柱試験体におけるコンクリートの材齢初期における内部含水状態と表層透気係数の経時変化を示す。屋根の有無で明確な差が見られ、降雨による水分供給が屋根で遮断された影響が現れたものと考えられる。つまり、表層透気試験の適用材齢に関して、降雨や漏水による水分供給の環境条件を考慮せずに一律に 6 箇月などと定めた場合、含水状態に相応の差がある状態で表層品質の評価を行うこととなる。また、同図より、コンクリートの内部含水率は材齢の経過とともに低下するものの、深さ 10mm 程度の比較的浅い位置においても材齢 1 年程度では低下の途中段階にあることがわかる。一方、表層透気係数の測定データはプロットが少ないものの、材齢 6 箇月の測定値を境にして変化が小さくなり、測定値がある程度安定化する傾向が見られた。図 5.5.4 に、角柱試験体と同条件で作製、曝露した円柱供試体による材齢 1 年での圧縮試験結果を示す。屋根なしの条件では圧縮強度および静弾性係数が高くなり、特に圧縮強度の増進が著しいことが判明した。これは、降雨の影響で乾燥が抑制されたことにより、コンクリート表層付近の硬化体が緻密化したためと思われる。

以上に示したように、屋外曝露環境下においては水分供給の条件によってコンクリートの含水状態、透気性、圧縮強度といった物性が材齢の経過に従って大きく変動することが確認された。



図 5.5.1 試験体の概要

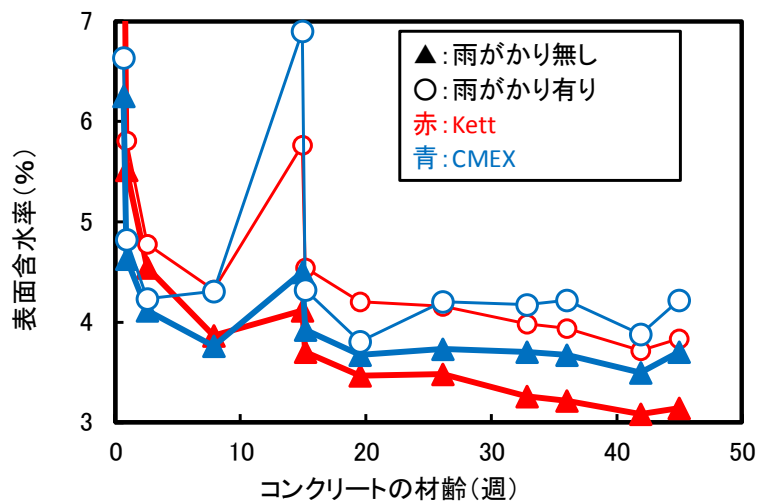
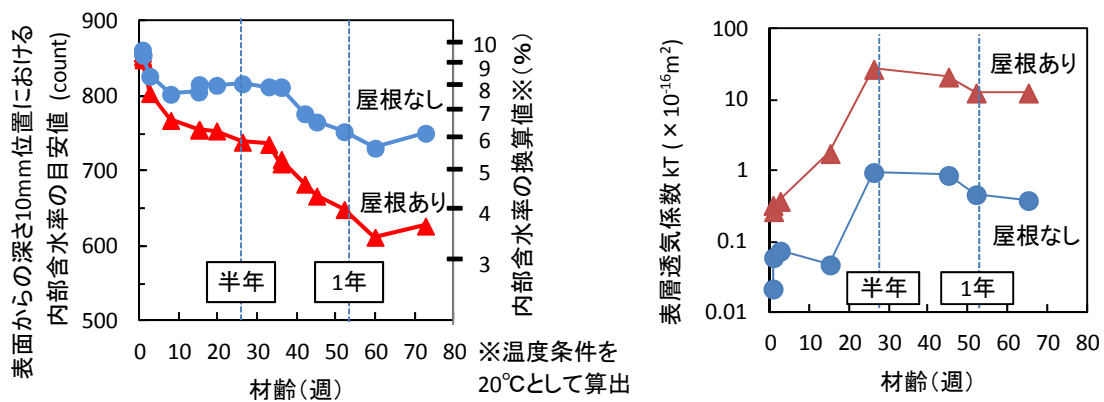


図 5.5.2 表面含水率の経時変化



(a) 内部含水率

(b) 表層透気係数 (2点での平均値)

図 5.5.3 内部含水状態と表層透気係数の経時変化

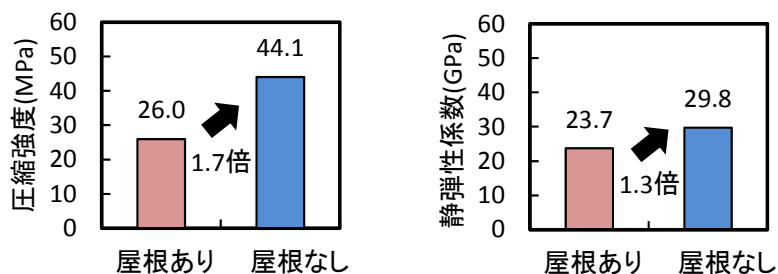


図 5.5.4 圧縮試験結果

5.5.3 高含水状態における散水試験による表層品質の判定

実構造物と同様の環境下で製作して曝露した実物規模のコンクリート試験体により、降雨による水分供給の影響が材齢の経過に従って大きく表れることが確認された。試験室内に曝露された小型の試験体とは異なり、実構造物では含水状態が気中乾燥状態に到達することはないと考えられる。そのため、室内試験結果に基づいてキャリブレーションが行われた装置により求められた実構造物の表面含水率は、実構造物の表面付近の含水状態に関する目安値としては有効であるものの、正確な数値として例えば表層透気係数の補正に利用することは不適切と考えられる。つまり、含水状態の影響で変動する表層透気係数などの表層品質に関する測定値は、表面含水率と同様に目安値として扱うのが適切であり、含水状態が常に変動する実構造物において表層品質の絶対的な評価指標として扱うことは不適切である。表面含水率、表層透気係数などの数値は、同等の測定条件と見なせる場合における相対的な評価指標として扱うべきものと考えられる。本研究で提案する散水試験で得られる評価指標についても、含水状態の影響を受けることは確実であることから、同様に相対的な評価指標として活用するのが妥当である。

供用中の実構造物で含水状態を正確に把握することは困難であるが、外気との接触の開始点となる脱型直後においては、コンクリート内部の含水状態は一律に高い状態にあることが確実と考えられる。脱型の直後、表面が即座に濡れる状況でもない限り、外気はコンクリート内部より乾燥した雰囲気であるため、コンクリートは表面から徐々に乾燥していく。直接の降雨や漏水に曝される状況でなければ、脱型からしばらくの若材齢の段階においては、コンクリートは高含水状態から徐々に乾燥していく段階と判断できる。そこで、脱型直後の高含水状態において測定を行うことにより、含水状態に関する条件についてはおおよそ統一した上での相対評価が可能となり、含水状態の影響を排除することが可能と考えた。

脱型時期を変えたコンクリート試験体をレディーミクストコンクリートで作製し、脱型直後の高含水状態における散水試験を行った。表 5.5.2 に、コンクリートの配合とフレッシュ性状を示す。粗骨材の最大径は 20mm の AE コンクリートで呼び強度を 24 で発注したものである。試験体の寸法は 150mm×150mm×高さ 200mm とし、側面と底部の端面が丸みを帯びた形状となる型枠を使用して作製した。測定面は鉛直面とし、流下までの散水回数を測定した。同一箇所での測定を連続することによる水分供給が散水回数に影響する可能性を考慮し、試験体は 8 体を用意した。試験体の含水状態の変化を把握するため、散水試験の実施スケジュールに合わせてすべての試験体の重量を測定し、脱型直後からの水分蒸発量を

表 5.5.2 コンクリートの配合とフレッシュ性状

セメント 種	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)
OPC	56.9	49.5	167	294	908	934	10.0	4.7

測定した。また、参考のため道路床版用の高周波容量式含水率計により表面含水率の計測も行った。試験体の強度特性を把握するため、円柱供試体を作製して材齢 28 日で圧縮強度試験を行った。

図 5.5.5 に、圧縮強度を示す。水中養生を行わない場合、脱型時期を延伸するほど強度が増進した。一方、水中養生を行った場合では、早期に脱型するほど強度が増進した。水中養生の日数が強度の増進に寄与するものと考えられる。水中養生のように、型枠の存置による乾燥の抑制よりも湿潤効果が期待できる養生方法を実施する場合、脱型時期を早めることが効果的と考えられる結果となった。型枠の存置による養生効果は水中養生よりも劣ることが確認された。しかしながら、早期の脱型による強度の低下は著しく、また実構造物で全面的に湿潤養生を行うには相応の労力を要するため、脱型時期の延伸によりコンクリートの品質向上を図ることは有効であると考えられる。これらの結果は、管理供試体の強度発現性に関する西脇らの検討結果[5.8]、せき板の存置期間に関する桜井らによる検討結果[5.9]、あるいは水の作用が圧縮強度発現性に及ぼす影響に関する検討[5.10]等に見られる既往の知見と合致する

図 5.5.6 に、試験体の重量変化を示す。脱型時期の延伸による蒸発水分量の低減が明らかである。試験開始時の重量を基準にした蒸発水分量の比率は早期脱型の試験体で約 3% となった。李ら[5.11]は、材齢 28 日程度までの水分逸散率が大きいほど促進中性化深さが大きくなることを報告しており、脱型後の水分逸散率は中性化速度に対する湿潤養生の影響を表す指標として有用であるとしている。図 5.5.7 に、表面含水率の経時変化を示す。重量変化と同様の挙動を示す傾向が見られるが、重量変化に比べて数値の挙動が不安定であることがわかる。これらの結果から、既往の研究でも示されているように、コンクリートの脱型直後からの水分逸散に関する数値を計測することで表層品質に関する情報を取得できる可能性が示唆されるものの、図 5.5.7 に示すとおり実構造物で表面含水率計を使用して取得でき

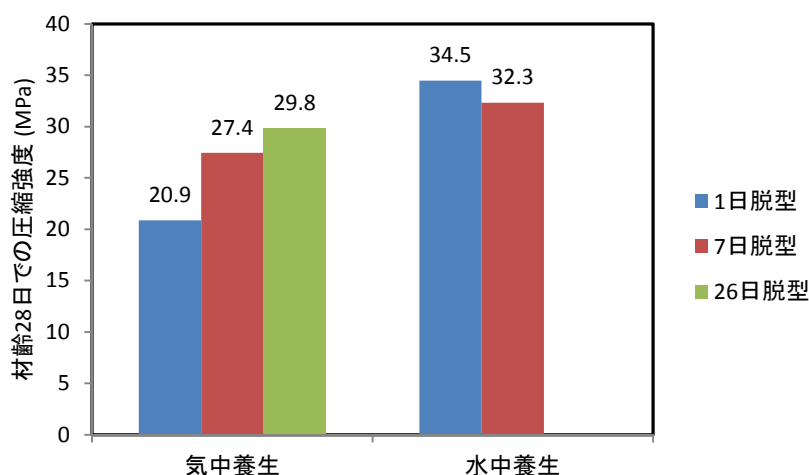


図 5.5.5 圧縮強度試験結果

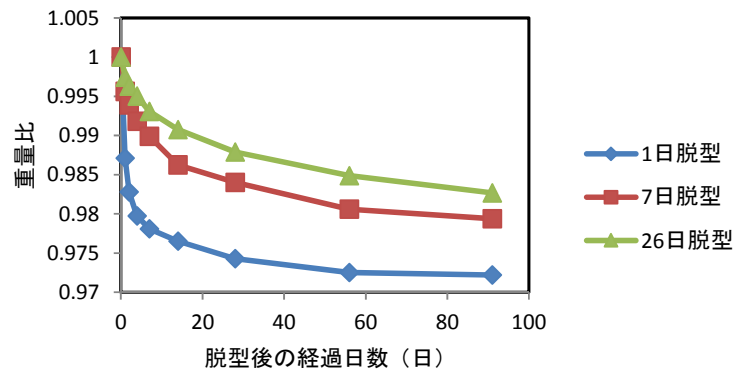


図 5.5.6 重量変化

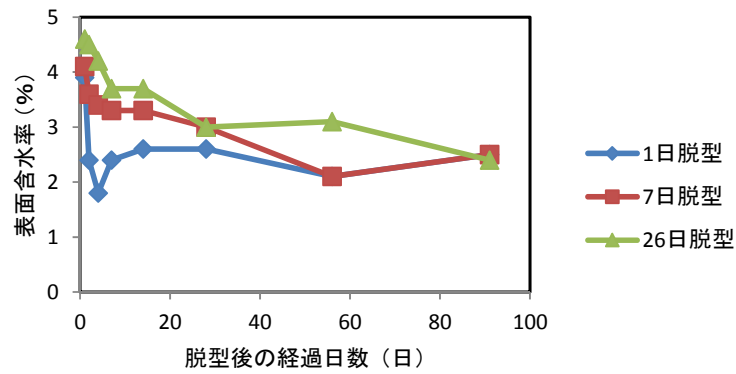


図 5.5.7 表面含水率の経時変化

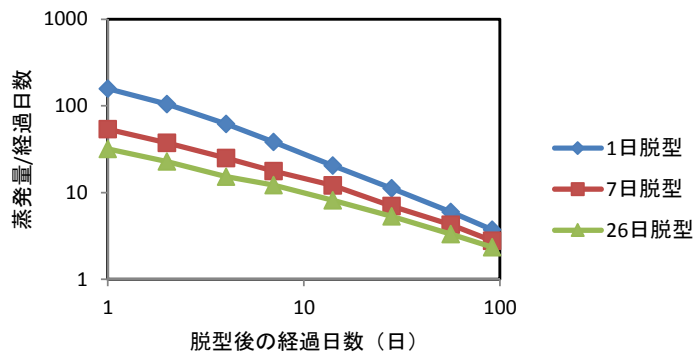


図 5.5.8 蒸発速度

表 5.5.3 蒸発速度の近似係数

脱型時期	近似曲線 $y = ax^b$	
	a	係数 b
1 日	161.45	-0.72
7 日	54.61	-0.58
26 日	32.20	-0.53

る数値による評価は正確性に問題があるため、水分逸散量あるいは蒸発水分量による表層品質の評価は試験体を対象とした検証に適していると考えられる。図 5.5.8 に、各試験体の脱型 1 日後から 91 日後までの蒸発速度と経過日数の関係を示す。両対数グラフ上で直線的な挙動を示すことがわかる。表 5.5.3 に、各試験体の蒸発速度の近似曲線および係数を示す。この近似曲線は林ら[5.12]が SWAT 法の測定結果の分析において引用した Levitt による吸水速度の式と一致し、コンクリート内部における水分移動に関する速度を表現する式として妥当と考えられる。ここでの測定結果から、係数 a および係数 b の絶対値の大小はコンクリート内部における水分の移動速度の大小に対応すると考えることができる。

図 5.5.9 に、散水試験による流下までの散水回数の経時変化を示す。ここでの試験条件により散水の繰返しは 10 回で打ち切りとした。脱型時期の延伸により蒸発速度の係数の低減が確認された試験体において、散水回数の減少が明らかである。また、脱型後の経過日数に応じて散水回数が増加した。同一の経過日数で比較した場合、脱型時期が早く表層の物質透過抵抗性の劣る試験体ほど散水回数が増加した。ここでは試験体の作製条件による品質差を脱型時期によって設定したが、蒸発速度の異なる試験体間で散水回数には差が見られたと表現することができ、物質透過抵抗性すなわち表層品質の優劣を散水回数の大小によって判別できることが示されたものと考えられる。

以上のことから、脱型の 1 日後から 1 週間ほどの期間に散水試験を実施することにより、表層品質の評価が可能であることが示された。実構造物における表層品質の評価においては、材齢 6 箇月程度などの所定の期間を経過した段階で含水状態の変動が落ち着いたものと仮定して、各種の手法を適用することが一般的となっている。特に表層透気試験に関しては、高含水状態のコンクリートに適用することで装置が水分を吸引してしまうことで装置本体が故障する可能性があるため、高含水状態での適用は避ける必要がある。散水試験は高含水状態のコンクリートに適用することが可能であり、またここで示したように、脱型直後

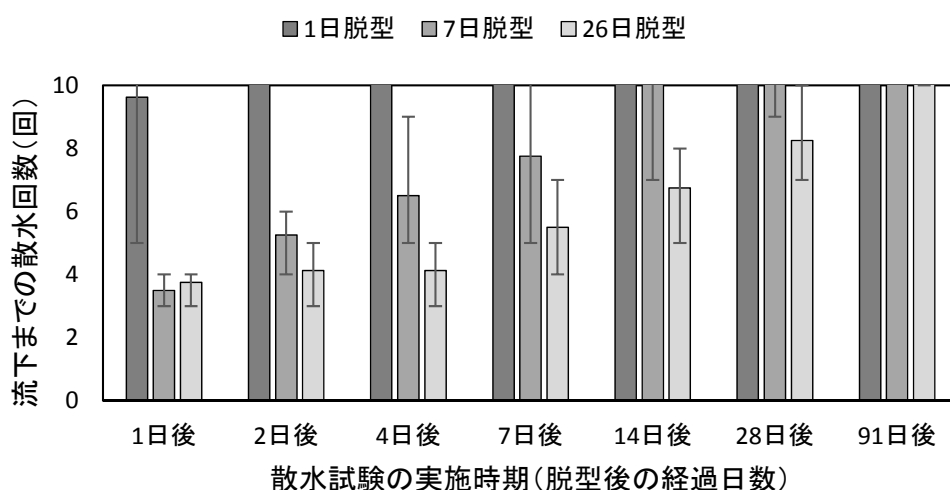


図 5.5.9 散水試験の結果

の高含水状態で散水試験を適用することで含水状態の変動の影響を軽減した条件下で表層品質の優劣を判定できる。

表 5.5.4 に、本検討で得られた知見を基に設定した散水試験による表層品質の判定例を再掲（表 5.4.1）する。同表は、脱型あるいは養生完了後の経過日数が 1 日～7 日以内のコンクリートに対して適用する。しかしながら、判定基準として例示した散水回数や光沢保持時間の数値は、散水方法や散水器具などの試験条件のほか、手動の器具を扱う測定者によっても数値が増減するため、留意が必要である。そのほか、同表において考慮されていない配合や型枠種別などの影響の度合いは不明である。同表に示した条件と異なる条件で適用する場合は、基準となる測定対象との相対比較により、判定基準とする数値を個別に設定するのが良い。

散水試験により「C（吸水しやすい）」と判定された場合、追加養生を行うなどの措置を講じることができる。一般に、コンクリートにおける初期の養生の不足は追加養生によって補うことができることが知られている。そのため、表層品質に関する不具合を散水試験では脱型直後という早期の段階で確認することができるため、迅速な対応が可能となる。散水試験による表層品質の評価は、不具合が発覚した状況を想定した場合においても構造物の耐久性向上に資する方法であると言える。

表 5.5.4 散水試験による表層品質の判定基準の例

判定		判定基準（脱型あるいは養生完了後の経過日数ごと）						
		1 日	2 日	3 日	4 日	5 日	6 日	7 日
A 吸水しにくい	流下までの散水回数	3 回未満		5 回未満				
	光沢保持時間	90 秒以上						
B 普通	流下までの散水回数	5 回未満		10 回未満				
	光沢保持時間	30 秒以上～90 秒未満						
C 吸水しやすい	流下までの散水回数	5 回以上		10 回以上				
	光沢保持時間	30 秒未満						

測定時の環境条件：気温 20±10℃，直射日光なし，降雨なし

散水方法：鉄道総研式の散水試験キット（散水量 0.2ml，約 0.1mg/mm²）

適用したコンクリートの配合：表 5.5.2

5.6 第 5 章のまとめ

本章では、散水時に発生する余剰水分の滞留および流下現象に着目し、散水後の吸水性状に関する測定作業の簡便性を追求した評価手法の検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 散水によって付与した水がコンクリート表面で滞留する様子は、コンクリート表面での水の存在による光の反射に起因する光沢感の有無として、画像上、さらに人間の目視によっても認識できる。
- 2) 光沢感は反射光の受光角度により変化するため、観察の方向を変化させる、あるいは入射光ないし反射光の角度を変化させることで反射部位における光沢感の有無の判別が容易となる。
- 3) 目視で散水後の光沢感を識別し、光沢の保持時間を計測することで、散水後の最低明度計測時間と同等の表層品質に関する評価が可能である。
- 4) 散水面積あたりの散水量が同等であっても散水の形状により流下の様子は大きく異なる。
- 5) 縁部が直線であるか曲線であるかによらず、水の流下は散水領域の最下端以外からも生じることがある。
- 6) 散水領域の下縁部を鋭角にすることで流下の発生位置を散水領域の最下端に導くことができる。ただしその場合でも水は必ずしも真下に流下しない。
- 7) 円形以外の散水形状では形状に方向性があり、散水ガイドの設置時に下縁部の先端が正確に鉛直下向きとならない場合がある。鉛直下向きとの角度のずれによる影響は、下縁部を鋭角とするほど大きくなる。
- 8) 散水と測定を交互に繰り返す際の散水位置のずれの影響は、散水形状の下縁部が鋭角であるほど大きい。
- 9) 鉛直面における余剰水の流下現象に関する知見に基づいて、流下の発生と評価に適した散水方法を開発した。
- 10) 鉛直面における水の流下は、散水領域における光沢感の保持時間が散水の繰り返し時間間隔を超過し始めてから 1～3 回程度の散水の繰り返しを経たのちに発生する。
- 11) 脱型あるいは養生完了後の経過日数が 1 日～7 日以内のコンクリートに対して散水試験を実施することで、実構造物における含水状態の変動を考慮した表層品質の判定が可能となる。

参考文献

- [5.1] 地濃茂雄, 佐藤茂治: 打放しコンクリート外壁面における雨水の吸水・流下に関する検討, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.156-157, 2011
- [5.2] 家辺麻里子, 秋山仁志, 岸利治: 水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.670-675, 2012
- [5.3] 家辺麻里子, 岸利治, 西尾壮平, 上田洋: 水の流下試験によるコンクリート構造物の表層品質評価に関する研究, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, pp.94-95, 2012
- [5.4] 菊池健人, 岸利治: コンクリート表層品質の簡易判定手法としての繰り返し流水試験の安定性向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1873-1878, 2013
- [5.5] 阿部睦樹, 岸利治: コンクリート高架橋の変状未発生部位の劣化リスク評価に向けたかぶり厚さと表層品質指標に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1261-1266, 2017
- [5.6] 蔵重勲, 西田孝弘, 秋山仁志, 岸利治: 中規模柱試験体を対象とした非破壊評価による表層品質の要因分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1835-1840, 2011
- [5.7] 半井健一郎ら: ボックスカルバートおよび附属試験体における表層品質測定, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, V-435, pp.869-870, 2015
- [5.8] 西脇康二, 酒井宏, 加藤修通, 関村尚人: コンクリートの管理供試体強度に及ぼす初期養生に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.433-438, 2017
- [5.9] 桜井邦昭, 平田隆祥, 竹田宣典, 十河茂幸: セキ板の存置期間や配合条件がコンクリート表層部の品質および耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.481-486, 2017
- [5.10] 忽那惇, 大塚邦朗, 岩波光保, 網野貴彦: 水の作用がコンクリートの圧縮強度および塩分浸透抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.559-564, 2017
- [5.11] 李曉赫, 杉山央, 小野克也, 藤本 郷史: コンクリートの初期材齢における温度および湿潤養生条件が中性化進行性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集 Vol.79, No.703, pp.1215-1225, 2014
- [5.12] 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.3

第6章 散水試験の影響要因，活用事例と応用技術

6.1 概説

6.2 影響要因

6.2.1 概説

6.2.2 散水量

6.2.3 測定方向

6.2.4 測定時の環境条件

6.2.5 測定位置および測定部材

6.2.6 その他の影響要因

6.2.7 影響要因に関する知見のまとめ

6.3 活用事例

6.3.1 散水試験の普及を目的とした技術開発

6.3.2 鉄道事業者による活用事例

6.3.3 行政機関による活用事例

6.3.4 研究機関による活用事例

6.4 応用技術

6.4.1 概説

6.4.2 散水試験用の画像解析プログラムの開発

6.4.3 画像データを活用した散水試験に関する基礎的検討

6.4.4 応用技術に関する検討のまとめ

6.5 第6章のまとめ

6.1 概説

本章では、本研究で提案する表層品質の簡易評価手法である「散水試験」に関する影響要因を整理する。また、散水試験を一般に普及するために開発した試験キットの概要と一般での活用事例を紹介するとともに、散水試験の応用技術の開発について述べる。

以下、6.2 節では散水試験の影響要因として本研究で検証した事項を整理する。6.3 節では散水試験キットの概要を整理し、散水試験キットを導入した研究機関などでの活用事例を紹介する。6.4 節では、散水試験をコンクリート表層品質の可視化技術と捉えた応用技術の開発に関する検討結果を示す。6.5 節は、本章の総括として散水試験の影響要因に関する本研究の見解を整理し、活用事例および応用技術に関する検討から得られた知見を整理する。

6.2 影響要因

6.2.1 概説

散水試験における影響要因として本研究で検討した内容を以下に整理する。なお、一部の検討においては散水試験ではなく表層透気試験による測定結果に基づいて、表層品質の非破壊評価に関する観点で影響要因を論じた。これは、散水試験では微量の水分をコンクリートに供給するため、供給された水分が攪乱要因となって検討の対象とした要因に関する検証ができない可能性がある点を考慮したためである。

6.2.2 散水量

第4章のモルタル試験体による検討において明らかにしたように、散水試験では散水によって付与する水量が測定結果の支配的要因となる。散水量が多いほど瞬時に吸収されない余剰な水分の量が増加し、光沢保持時間が長時間化する。そのため、散水試験に用いる散水器具が異なる場合の測定結果の比較には散水量の相違を確認する必要がある。散水器具にはメンテナンスが必要であり、散水性能を定期的に確認し、検定するといった配慮が求められる。

6.2.3 測定方向

散水量と同様に、第4章のモルタル試験体による検討において明らかにしたように、散水試験では測定面の方向によって水分の挙動が異なるため、測定方向によって測定結果が異なることを理解しておく必要がある。1回の操作あたりの水の散布量が多い散水器具を使用した場合は測定方向の相違の影響が大きくなる。

6.2.4 測定時の環境条件

6.2.4.1 蒸発速度

コンクリート表面における微量の水分の吸水性状は、コンクリートおよび外気の温度と湿度によって変化すると考えられる。気温、湿度による影響として具体的には蒸発速度の相違が考えられる。そこで、簡易な室内試験により散水試験におけるコンクリート表面から外部への蒸発量に関する検討を行った。表 6.2.1 に、試験体の概要を示す。試験体は他用途の実験にて作製した角柱試験体で、作製直後から約7年間、標準水中養生を行ったまま水槽内に静置されたものである。長期間の水中養生で飽水状態となった試験体を利用し、水槽から取り出した直後からの表面の明度変化および蒸発量を計測した。なお、蒸発量の計測には、秤量を0.01g単位とするために断面が100×100mmで厚さ10mmの小型の試験片を切り出して用いた。

図 6.2.1 および図 6.2.2 に、飽水状態の試験体における蒸発量および表面の明度と経過時間の関係を示す。蒸発量の経時変化は計測開始の直後が最大であるのに対し、明度 L^* は計測開始から6時間以上経過してから緩やかに上昇した。明度 L^* の経時変化は24時間後付近

表 6.2.1 試験体の概要

W/C	50% ($W = 165\text{kg/m}^3$, $C = 330\text{kg/m}^3$)
セメント	普通ポルトランドセメント
フレッシュ性状	スランプ 10cm, 空気量 4.9%
圧縮強度	54.3MPa (材齢 28 日, 標準水中養生)

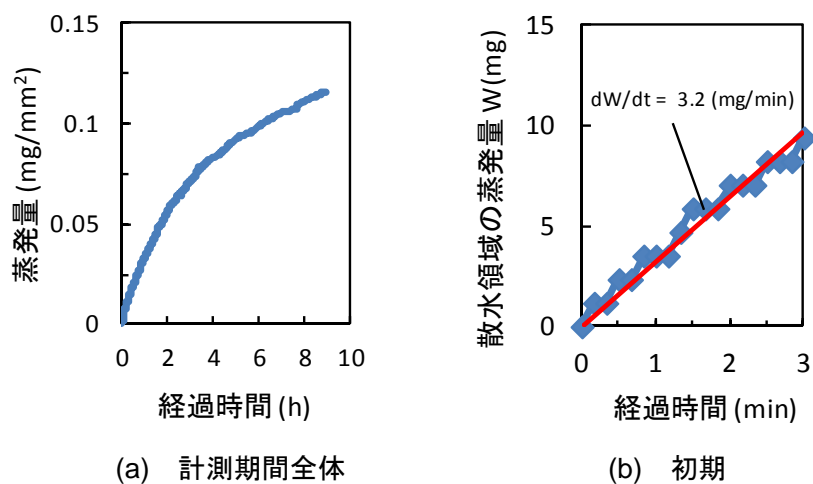


図 6.2.1 蒸発量の変化

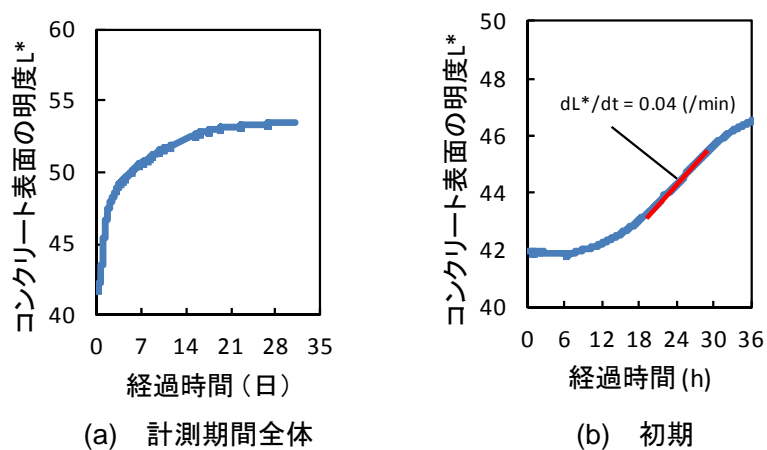


図 6.2.2 表面の明度変化

表 6.2.2 蒸発の影響の算出結果

最低量とした際の 1 回あたりの散水量	約 250mg
散水領域からの蒸発による水の消失量	約 3.2mg/min
蒸発による明度 L^* の変化量の最大値	約 0.04/min

で最大となり、それ以降、蒸発量と同様に経時的に変化量が小さくなった。飽水状態のコンクリート表面では表面からの蒸発によって内部の水分が表面側に移動すると考えられるため、蒸発量と明度変化にタイムラグが生じたものと推定される。これらの結果から、経時変化曲線の最大勾配に基づいて、散水試験における散水領域の面積を考慮した蒸発による水の消失量、ならびに、明度変化量の最大値を算出した。表 6.2.2 に、算出結果を示す。散水量に比べて蒸発による消失量は 1%程度となり、蒸発による明度 L^* の上昇は 1 分間に最大で約 0.04 となった。飽水状態から蒸発させた状況において、コンクリート表面から外部への蒸発による明度変化はほとんどないことがわかった。散水試験における明度変化特性は主に内部方向への移動による水分の消失を捉えている見なせることが明らかとなった。

6.2.4.2 降雨および日射

鉄道用 RC 高架橋の建設現場において、実構造物と同等の条件下で試験体を作製して屋外に暴露し、試験体の半数に仮設の屋根を設置することで降雨がコンクリートの圧縮強度および含水状態に及ぼす影響を検証した。表 6.2.3 および表 6.2.4 に、試験体と測定の概要を示す。試験体前面の中層部には内部の含水状態を把握するための水分センサをあらかじめ設置して埋設した。

表 6.2.3 試験体の概要

コンクリートの特徴	実構造物と同じレディーミクストコンクリート、呼び強度 30MPa, 最大粗骨材径 20mm, スランプ 12cm, 普通セメント, W/C=49%, 5 日脱型 (合板型枠)
形状と寸法	角柱試験体: 700×700×約 1000mm 円柱試験体 (強度試験用): 直径 100×200mm
曝露条件	屋外 (屋根あり・屋根なしの 2 条件)
その他	内部に水分センサを埋設 (深さ 10mm から 50mm まで 10mm 刻み, 本稿では深さ 10mm のデータのみ)

表 6.2.4 測定の概要

測定項目	測定方法, 測定条件など
圧縮強度	JIS A 1108, 材齢 1 年, 試験前の 48 時間水中養生
表層透気試験	ダブルチャンバー式トレント法, 測定時間 6 分間
内部含水率	静電容量式, 外気温による温度補正を実施

図 6.2.3 に、降雨が圧縮強度特性に及ぼす影響を示す（図 5.5.4 の再掲）。屋根の有無により降雨が強度特性に及ぼす影響を検討した例であるが、屋根で直接の降雨に曝されない条件下で曝露した円柱供試体で圧縮強度が顕著に増加した。曝露期間は 1 年間である。降雨に曝される部位と曝されない部位のコンクリートでは 1 年程度の期間でコンクリートの物性自体には相当な差異が生じ得ることを考慮する必要があると言える。図 6.2.4 に、降雨が内部含水率および表層透気係数に及ぼす影響を示す（図 5.5.3 の再掲）。屋根の有無で明確な差が見られ、内部含水率は材齢の経過と共に低下し、表層透気係数は材齢の経過と共に上昇し、その傾向は屋根がある場合に促進された。降雨による水分供給が屋根で遮られることによりコンクリートの乾燥が促進されたものと考えられる。実構造物では降雨や水がかりによる水分供給の程度を定量的に把握することは困難であるため、降雨に曝される部位や水がかりによって水分が供給される部位で表層品質の評価を一律に行うことは難しいと思われる。

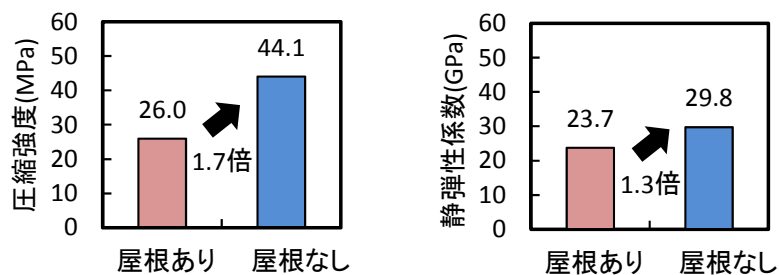


図 6.2.3 降雨が圧縮強度特性に及ぼす影響（図 5.5.4 の再掲）

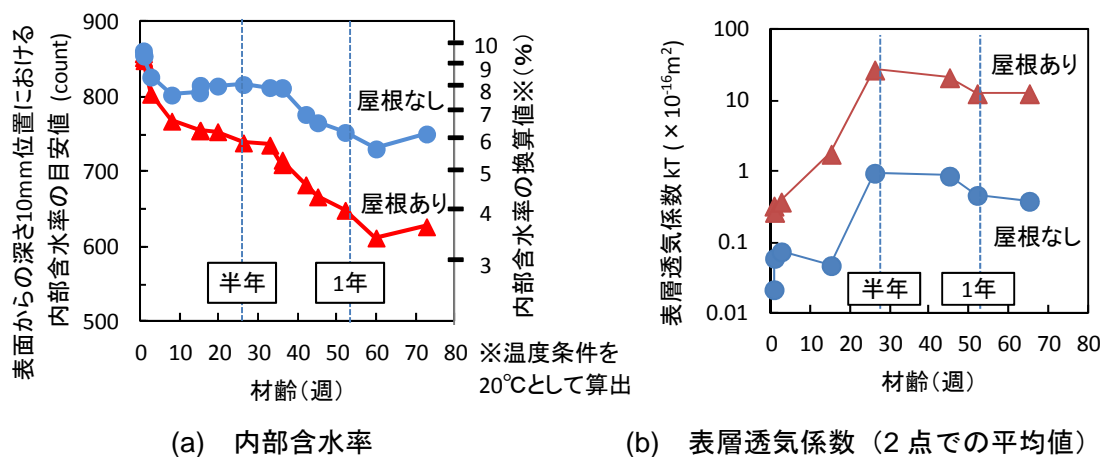


図 6.2.4 降雨が内部含水状態と表層透気係数に及ぼす影響（図 5.5.3 の再掲）

次に、レディーミクストコンクリートを用いて作製した鉄筋コンクリート製の壁状の試験体（図 5.3.14）により、日射が散水試験による流下までの散水回数と表層透気係数に及ぼす影響を検証した。表 6.2.5 および表 6.2.6 に、試験体と測定の概要を示す。前述の考察に基づき、試験体には降雨の影響を避けるための屋根をコンクリートの打込み直後に設置している。散水試験および表層透気試験は材齢約 2 箇月で行った。

図 6.2.5 に、日射が散水試験および表層透気試験の測定値に及ぼす影響を示す。また、表 6.2.7 に、散水試験と表層透気試験の測定時における表面温度と表面含水率を示す。表面温度は外気温と合わせて変動するため条件を統一することが困難であったため、ここでは約 10℃でほぼ同程度の条件と見なすこととした。表面含水率は接触式温度計で計測されたコンクリート表面温度で補正を行った。図 6.2.5 および表 6.2.7 より、日射の影響で表面含水率計の測定値は約 0.5%低下すること、散水回数の平均値は約 8 回あるいは約 50%増加すること、透気係数の平均値は約 10 倍（1 グレード）大きくなることが確認された。

以上のように、降雨はコンクリート表面から内部の含水状態を変化させるだけでなく、セメント硬化体であるコンクリートの水和反応に直接的な影響を及ぼすことでコンクリートの強度や物質透過に関する特性を変化させることが確認された。また、日射の作用によりコンクリートが乾燥して含水状態が変化することにより、測定時の外気の温度と湿度、ならびにコンクリートの表面温度が同等の条件下でも表層品質の測定値には差異が現れることが確認された。表層品質の非破壊評価を実構造物に適用する場合は、降雨および日射の影響を受ける部位と受けない部位とでは異なる測定値が得られること、あるいは降雨および日射の影響を含んだ測定値が取得されることを認識した上で実施する必要がある。しかしなが

表 6.2.5 試験体の概要

コンクリートの特徴	レディーミクストコンクリート，呼び強度 24MPa，最大粗骨材径 20mm，スランプ 8cm，普通セメント，W/C=57%，7 日脱型（合板型枠）
寸法・形状	1200×1200×400mm・壁状
測定時の環境	冬季の屋外，晴天時（9～11℃，40～50%RH）

表 6.2.6 測定の概要

測定項目	測定方法，測定条件など
散水試験	散水量：約 0.1mg/mm ² /回，散水繰返し時間間隔：60 秒，散水器具：鉄道総研式散水試験キット
表層透気試験	ダブルチャンバー式トレント法，測定時間 6 分間
表面含水率	静電容量式，表面温度による補正
表面温度	接触式温度計，分解能 0.1℃，測定誤差±1℃

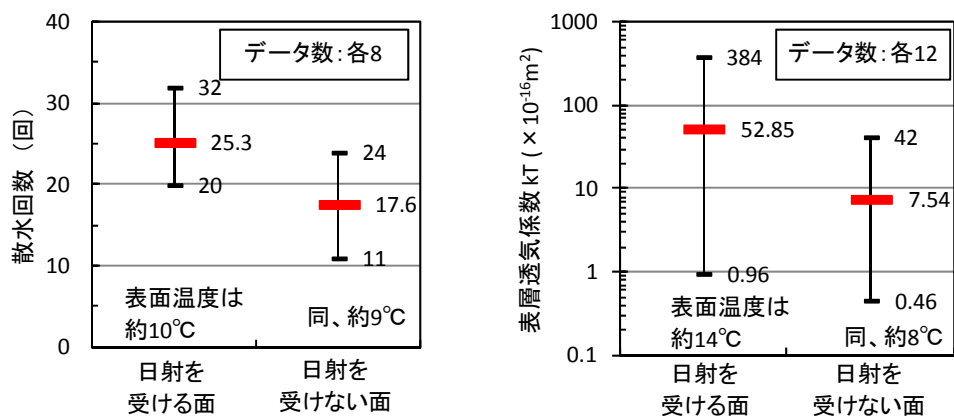


図 6.2.5 日射の影響

表 6.2.7 表面温度と含水率

測定面	表面温度 (°C)		表面含水率 (%)
	散水試験	表層透気試験	
日射を受けない面	8.5~8.7	6.5~7.8	4.7~4.9
日射を受ける面	10.2~10.6	14.8~17.0	4.2~4.5

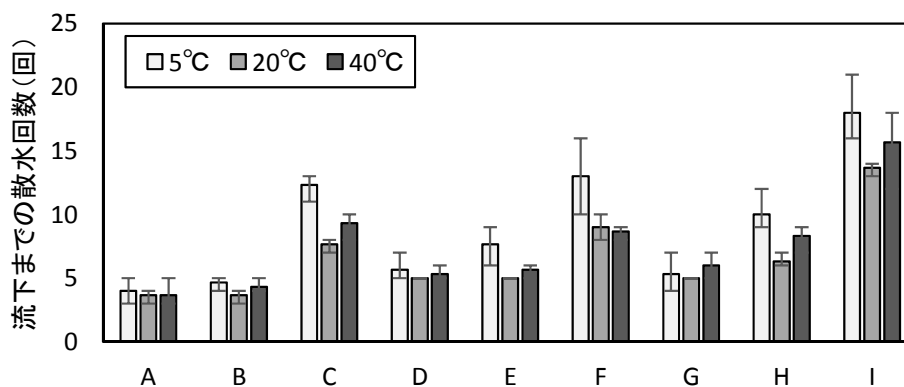


図 6.2.6 コンクリート表面温度の影響

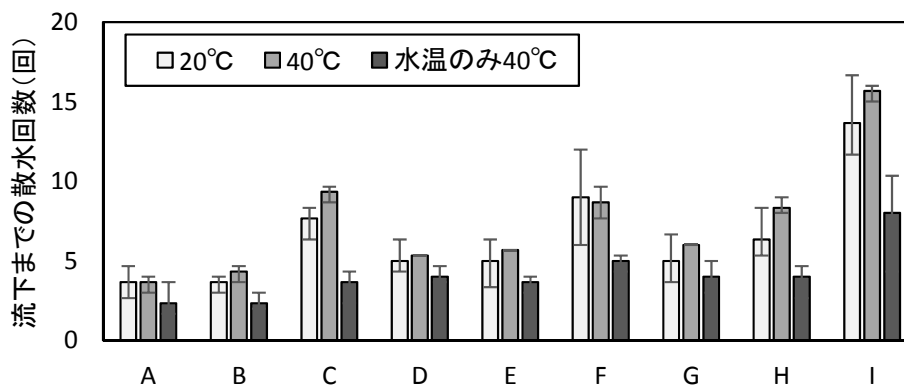


図 6.2.7 水温の影響

ら、降雨や日射といった自然現象の頻度や実構造物に及ぼす作用の程度は一定でない。そのため、それらが及ぼす影響の定式化や一律の評価を正確に行うことは不可能であり、また合理的でない。実構造物の表層品質の非破壊評価においては、日射のほか降雨などによる水がかりの作用を受ける部位を避けて測定を実施するのが妥当であると考えられる。

6.2.4.3 温度

水は温度によって様々な特性が変化する。散水試験においても、外気温、コンクリートの表面温度、使用する水の水温が測定結果に影響を及ぼす。温度が高い場合、水の粘性が低くなり流下が生じやすくなる。また、反対に低温環境下では水の粘性が高まり、流下は生じにくくなる。図 6.2.6 および図 6.2.7 に、流下までの散水回数に及ぼす温度の影響を示す。測定対象は厚さ 10mm で 100mm×100mm のモルタル製の板状の試験体である。A から I まで 9 種類の試験体を試験室内の鉛直な壁面に設置して、散水試験を実施した。試験体および使用する水の温度は所定の温度に設定した恒温槽によって調整した。図 6.2.6 より、コンクリート表面温度の影響に関しては、20℃の条件より低温時も高温時も散水回数が 10%程度増加する結果となった。これは、40℃の条件では水の粘性の変化とコンクリートの含水状態の変化が相殺したためと考えられる。図 6.2.7 に示すように、水温だけを 40℃とした場合は散水回数が減少し、水の粘性の低下による影響が確認された。これらの結果から、20℃±10℃程度の範囲であれば、散水試験では水温に留意することで温度の影響はおおよそ無視できると考えられる。

6.2.5 測定位置および測定部材

表層品質の非破壊評価を実構造物に適用する際に考慮すべき影響要因として、ここでは測定位置および測定部材の影響に関する検討結果を述べる。

測定部材の相違の影響は実物規模での検討が必要となるため、精緻な室内試験での検討が可能な測定面の相違の影響に関する実験を先行的に実施した。測定面の相違に関する検討として、各種品質の小型コンクリート試験体を用いて、上面（打込面）、側面および下面（底面）で表層透気試験を実施し、測定値の比較を行った。表 6.2.8 に、小型コンクリート試験体の概要を示す。次に、測定部材の相違に関する検討として、実構造物の各所で表層透気試験および散水試験を実施し、比較を行った。表 6.2.9 に、測定対象とした実構造物の概要を示す。

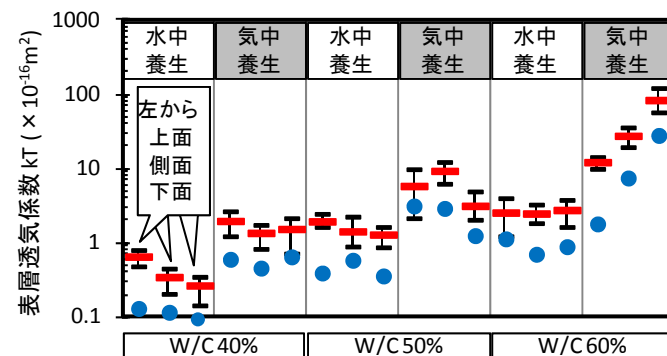
図 6.2.8 に、小型コンクリート試験体による表層透気試験の測定結果を示す。測定は試験体の 100×400mm の面を 4 等分した 4 点で、上面、片側の側面、下面の 3 面に対して実施した。水セメント比(W/C)が 60%で養生方法が気中養生の試験体を除いて、面の種類による表層透気係数の差はほとんど見られない。第 5 章において、図 5.3.16 で示した壁状試験体の表層透気試験では同一の試験体における 12 箇所の測定結果が 3 グレードにわたってばらつく結果となったが、ここでは試験体の各面 4 箇所での測定値が 1 グレード内に収まる結

表 6.2.8 試験体の概要

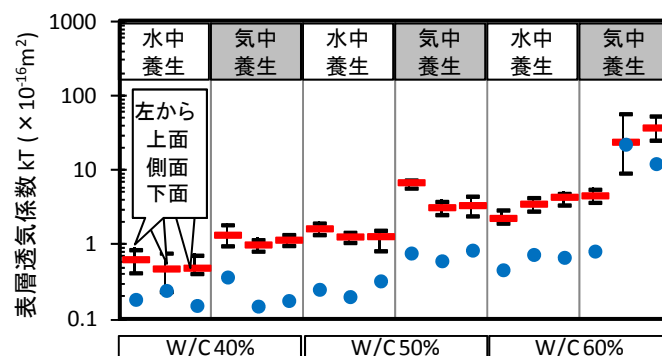
コンクリートの 特徴	水セメント比 40・50・60%の3水準，細骨材粗骨材の単位量を統一，セメントの種類（普通と高炉B種）
寸法・形状	100×100×400mm・角柱
脱型条件	1日，7日の2水準
養生条件	材齢28日まで，気中（20℃，60%RH），水中（20℃）の2水準
養生後の曝露条件	気中（20℃，60%RH）
測定時の材齢	約4年
測定時の環境条件	試験室内（20℃，60%RH）

表 6.2.9 測定対象構造物の概要

構造物の概要	新設の鉄道高架橋
部材の種類	<ul style="list-style-type: none"> ・ラーメン高架橋の柱 ・ラーメン高架橋の縦梁 ・ラーメン高架橋の床版下面 ・橋台
測定時の材齢	約1年～2年
測定時の環境条件	異なる複数の時季のため一定でない
測定箇所の条件	直射日光，降雨の作用がない部位



(a) 1日脱型のシリーズ



(b) 7日脱型のシリーズ

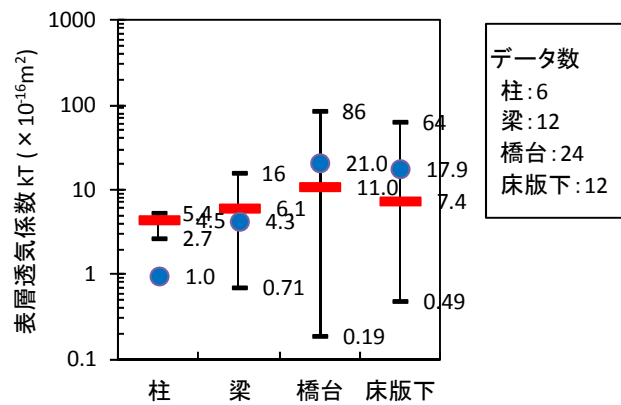
図 6.2.8 測定面による表層透気係数の比較

果となった。室内で作製される小規模な試験体では比較的人念な施工が可能であり、コンクリートの打込みや締固めの作業におけるムラが小さいものと想定されるため、その影響が現れたものと考えられる。W/C が 60% の気中養生の試験体で、上面（打込面）の表層透気係数が小さくなっており、これは一般的に考えられるコンクリートの高さ方向の品質差とは逆の傾向となる。その理由として、次の 2 つが推測される。底面側では粗骨材が沈降して集積することで打込面に比べて表面近傍に粗骨材が多く存在する。粗骨材とモルタル分との境界面（以下、骨材界面とする。）は、一般に硬化体の組織が粗くなるとされており、表層透気試験における空気の移動経路としての骨材界面の比率が打込面より底面で高まり、水セメント比が 60% 程度でその影響が強く現れた可能性がある。もう 1 つの理由は、炭酸化による硬化体の緻密化の影響が水セメント比 60% 程度で強く現れたというものである。本研究の範囲では硬化体組織の細孔構造の解明などを行っていないため、以上の理由は推測となる。いずれにせよ、表層透気係数の測定値は測定面の方向の種別によってほとんど差がないと考えて良いことがわかった。

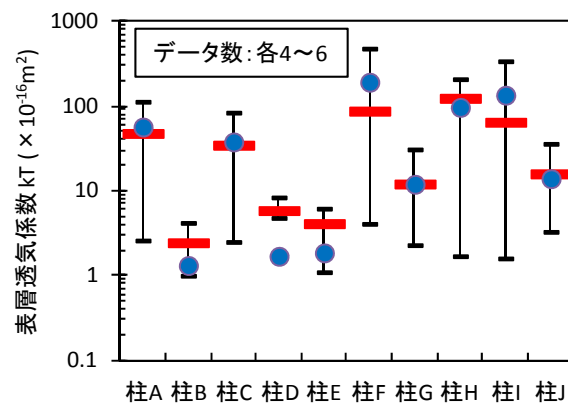
図 6.2.9 に、実構造物による測定部材の比較を示す。全体的に、実構造物では測定結果のばらつきが図 6.2.8 で示した小型試験体の測定結果と比べて著しく大きくなる傾向が見られた。柱、梁、床版下面、橋台といった部材間の比較を正確に検証することは難しいことから、部材寸法が測定結果に及ぼす影響などについては今後の検討課題としたい。図 6.2.10 は図 6.2.9 における梁の測定結果を測定面で区分したデータである。データ数は少ないものの比較的ばらつきが小さく、側面と底面ではおおむね同等の測定値が得られた。図 6.2.8 で示した小型試験体による検証結果も踏まえると、実構造物でも測定面の相違が表層透気係数の測定値に及ぼす影響は小さいものと思われる。

6.2.6 その他の影響要因

散水試験ではコンクリート表面の微量水分の吸水挙動に対する変動要因が影響要因となるものと考えられる。そのため、型枠面に塗布された剥離剤の種類が影響する可能性がある。また、コンクリート表面の凹凸の程度、濡れ性のような表面状態の相違が影響すると考えられる。本研究では常温の純水を使用した。水温だけでなく水質が水分挙動に影響を及ぼす可能性が考えられる。以上のような影響要因について本研究では精緻な実験による検証を行っていないが、いずれもコンクリート表面における微量水分の吸水現象を根本から覆すほどの要因となるとは考えにくいものと推測される。



(a) 同一のラーメン区間内における部材の比較



(b) 同一のラーメン区間内における柱の比較

図 6.2.9 実構造物における測定部材の測定結果の比較

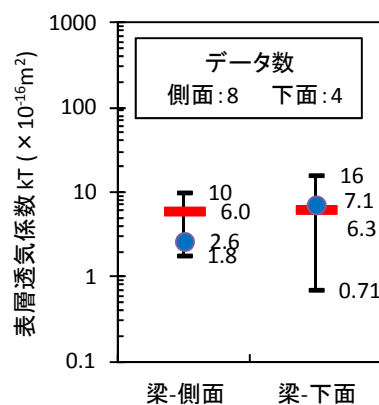


図 6.2.10 梁の測定結果

6.2.7 影響要因に関する知見のまとめ

散水試験に対する影響要因として、散水量、測定方向、測定時の環境条件、測定位置及び測定部材に関する内容を整理した。本研究で得られている知見は以下のとおりとなる。

- 1) 散水試験では散水量が支配的な要因となるため、散水器具の散水量を管理する必要がある。
- 2) 散水試験では測定面の角度による水分挙動への影響を考慮する必要がある。
- 3) 気温 20℃、相対湿度 60%の環境下では、コンクリート表面から外部への蒸発が散水時の明度変化特性に及ぼす影響はほとんど見られなかったことから、一般的な環境条件下であれば蒸発が散水試験の測定結果に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。
- 4) 降雨に曝される部位や水がかりのある部位では水分の供給によってコンクリートの強度が増進するだけでなく、含水状態も水分供給の影響で変動するため表層品質の評価を一律に行うことは困難と考えられる。
- 5) 日射を受ける部位では、含水率が低下することによって散水試験の散水回数および透気係数が増加する。
- 6) 日射、降雨および水がかりの影響を受ける部位においてそれらの影響の度合いを定量的に扱うことは困難なため、実構造物の表層品質を評価する場合はそれらの影響を受けにくい箇所を選定するのが良い。
- 7) 水が低温の場合に散水回数が増加し、高温の場合には散水回数が減少するが、水温が $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲においては温度が散水回数に与える影響は無視して良い。

6.3 活用事例

6.3.1 散水試験の普及を目的とした技術開発

散水試験の真の実用化を達成するには、鉄道事業者等で散水試験を実務に適用できる状況を整える必要がある。具体的には、試験手法の確立に留まらず、試験キットを製品レベルで具現化することが要求される。そこで、散水試験で使用する試験キットのプロトタイプの試作を行った。また、散水試験では 60 秒間隔で同一箇所での散水を繰り返す必要があり、さらに 60 秒の待機時間で複数箇所の測定を同時に進行することで作業の効率性を向上させている。そのため、散水のタイミングや測定箇所を測定者が正確に把握しておく必要がある。研究開発の当初は一般的なストップウォッチをタイマーとして使用していたが、散水試験に適したタイミングでの鳴動が可能な機種は見当たらないことから、専用のタイマー機能およびアナウンス機能を有したアプリケーションソフト（以下、アプリとする。）を独自開発し、スマートフォンなどのタブレット端末にインストールして使用することを検討した。

図 6.3.1 に、開発した試験キットを示す。試験キットは、スプレー、散水ガイド、タイマーおよび附属品で構成される。スプレーと散水ガイドは、散水試験における測定作業の根幹



(a) キット全景



(b) 散水器具



(c) ガイド



(d) アプリ

図 6.3.1 散水試験キット（プロトタイプ）

となる「散水」をコントロールする器材となるため、これらの器材を合わせたものを「散水器具」と呼んでいる（図 6.3.1(b)）。スプレーのノズル部分およびボトルに関しては一般に流通している手動の霧吹きを採用しているが、散水試験で重要な散水量を制御するためにノズルの先端には専用の加工を施した円錐状のカップを装着している。さらに、散水試験に適した一定の散水を行うために、カップを散水ガイドと密着させて使用する。散水ガイドは、カップの吐出側の開口部とフィットし、散水試験に適した散水形状を実現するための所定の形状の開口部を有している必要がある。近年、3D プリント技術が一般化し、各種の材料でさまざまな形状の物体を造り出すことが可能となっている。そこで、3D プリント技術を利用して散水ガイドを試作した（図 6.3.1(c)）。散水ガイドおよび指定のスプレーを使用することにより、コンクリート表面に対して一定の距離および角度から適量の水を散布することが可能となる。市販のタブレット端末で起動するタイマーアプリ（図 6.3.1(d)）は、散水試験の将来的な改良などへの拡張性を持たせて開発した。アプリの動作保証やバージョンアップ対応などの管理体制の構築に課題があるため、製品化は実現していない。タイマーアプリは、タイマー機能、測定者への音声案内機能、測定結果の記録機能を備えており、ストップウォッチを利用した散水試験と比べて作業の正確性が向上し、かつスピーディーな測定が可能となる。

6.3.2 鉄道事業者による活用事例

近年、散水試験を実構造物の調査に適用した事例が複数報告されている。既設の鉄道用 RC ラーメン高架橋への適用事例[6.1]では、経年約 15 年の高架橋の柱と梁における散水回数が 1～3 回程度であった。また、建設中の鉄道用 RC ラーメン高架橋など 83 構造物への適用事例[6.2]では、散水回数が平均して 2 回程度であった。各事例では、筆者が個別に散水試験の実施に対する指導を行った。以下、鉄道事業者における活用事例の一例を紹介する。



図 6.3.2 鉄道事業者による散水試験の試行の様子

本研究では、散水試験の試験キットのプロトタイプを鉄道事業者 1 社に提供し、新設構造物の品質管理、品質確認を想定した用途での試行的な導入の支援を行った。図 6.3.2 に、鉄道事業者による散水試験の実施風景を示す。散水試験は測定原理が単純であること、測定の作業性が優れていることが評価され、建設担当部署で制定に向けた検討が進められている「コンクリート品質向上の手引き」の原案において、コンクリート品質の簡易判定手法として散水試験が採用される運びとなった。同手引きの原案において、散水試験は目視による構造物の出来栄の評価と組み合わせる形で活用されている。散水試験の具体的な活用方法としては、吸水により流下せず測定時間が長時間化するような表層品質が良くないものをチェックする手段としてではなく、短時間で測定が完了する、すなわち「数回で水が流下する＝表層品質が優れている」ことを確認する手段として用いられている。また、測定が手軽に実施できる散水試験は、建設に携わる実務者に対して実構造物の表層品質に関する情報を取得する機会を提供することになる。目視評価による構造物の出来栄の確認に加え、表層品質が優れているかどうかをチェックする散水試験が導入されることで、施工者と発注者間でコンクリートの品質に対する共通認識が得られ、さらなる品質向上に向けた意識が高まることが期待される。散水試験は、実構造物の品質向上に加え、実務者の技術レベル向上にも寄与するものと考えられる。

6.3.3 行政機関における活用事例

群馬県では、道路構造物を新設する事業が数年来継続して進められており、新設構造物の耐久性向上を目的としたコンクリートの施工品質の確保に向けた取り組みが活発化している。群馬県県土整備部が策定を進めている「コンクリート品質確保の手引き」において、施工管理を担当する県職員による表層品質の評価が試行的に取り入れられており、使用する評価手法として散水試験が採択された。県職員らにより実施された散水試験の測定データが掲載された資料は発行されていないものの、県職員による散水試験の実施状況などが講演会等の場において一般に公表されている[6.3]。

6.3.4 研究機関による活用事例

前橋工科大の舌間らによる各種の新設コンクリート構造物への適用事例[6.4]では、散水回数が 1 回から 10 回程度まで広く分布し、トレント法による表層透気試験で得られた透気係数との相関性が見い出されているほか測定時の環境条件の影響が指摘されている。広島大学の半井らによる新設のボックスカルバートと同条件で製作・曝露された試験体での検証事例[6.5]では、材料に高炉セメント B 種を使用して不十分な養生を行った試験体で散水回数が顕著に増大し、20 回を超過した事例が示されている。ここでも散水回数をトレント法の透気係数と比較したデータが見られ、両者には概ね相関性が見い出されている。

6.4 応用技術

6.4.1 概説

本研究で提案する散水試験では、乾燥したコンクリート表面に微量の水分を少しずつ散布することによって、測定者の目視によるコンクリート表面における吸水特性の把握と定量的評価を実現している。つまり、散水試験とは散水によって表層品質を可視化する手法と表現することができる。散水試験において可視化された現象は可視光によって識別できる情報であることから、一般的なカメラによって撮影し、画像として記録することが可能である。第5章においては、散水試験の実施状況を撮影した画像の分析ないし解析を行い、散水によって生じる余剰水の挙動を考察し、水分の滞留に関する知見を得て散水試験の提案に繋げた。

ここでは、第5章の検討においても活用した散水試験に関する画像解析技術について紹介するとともに、デジタル画像の電子データを活用した応用技術に関する検討結果を述べる。また、画像解析技術の活用により散水試験の測定領域の拡大が見込めることを想定して実施した広範囲への散水方法に関する検討の結果について述べる。

6.4.2 散水試験用の画像解析プログラムの開発

散水試験では、コンクリート表面の同一箇所に対して一定の時間間隔で微量の水分を繰り返し散布し、付与した水分の吸水挙動を捉えることによって表層品質の評価を行う。実構造物の測定に対する簡便性を優先し、吸水挙動を目視で判定する方法を採用したが、第4章で示したように表面の明度変化を捕捉することによって、微量水分の吸水挙動に関する詳細なデータが取得できることが判明している。

昨今、携帯電話を筆頭とした情報通信機器に関わる技術の発展と普及は著しく、デジタルカメラの技術を搭載した小型の機器が身近なあらゆる場所、場面に存在しており、写真やビデオの撮影という行為が誰にでも、いつでもできるものとなっている。目視での評価を行う散水試験において棄却されることとなった表面の明度変化に関して、一般に普及しているデジタルカメラで取得した画像データから同等の情報を取得することができれば、目視による方法と同等の手軽さを有した上で、明度変化に関する情報に基づいた、より精度の高い散水試験が成立する可能性がある。また、散水試験で目視による表層品質の判定の基準とした余剰な水分の滞留現象についても、画像データでの識別が可能と考えられる。

これらのことから、画像の撮影と解析技術を散水試験の概念に取り込むことにより、散水試験の機械化あるいは自動化が実現できると考えた。そこで、散水試験による表層品質の評価を機械化した応用技術に関する基礎的検討として、第4章における検討で実施した測色機器による表面色の測定、ならびに第5章で実施した測定者の目視による余剰水の発生状況の観察の両行為を一般的なデジタルカメラによる撮影画像の解析によって代替するための画像解析プログラムの開発を行った。

図 6.4.1 に、開発した画像解析プログラム（以下、本プログラムとする。）における解析

フローの概要を示す。撮影された画像が動画の場合は静止画ファイル群に変換し、時系列順にファイル名のリネームを行ってから解析に使用する。画像処理フローのうち流下判定と表面色解析の各処理において、散水試験の研究成果が解析アルゴリズムに反映されている。

図 6.4.2 に、本プログラムを搭載したソフトウェアの UI (User Interface) を示す。ソフトウェアには、流下判定、表面色解析、評価指標算出、解析結果出力の 4 種類の機能を実装した。UI は 5 つの要素に大別されており、使用者が必要に応じて各要素への数値入力などを行うことで静止画ファイル群全体の解析が実行可能となる。図 6.4.3 に、画像解析結果の一例を示す。本プログラムで得られた表面色の経時変化データを表計算ソフトに入力してグラフ化し、説明文と写真などを付記したものである。解析対象とした静止画ファイル群は 1 秒間隔での撮影画像である。本プログラムの流下判定機能により、鉛直面における散水試験の評価指標である「流下までの散水回数」に相当する情報「流下までの経過時間」が正確に取得された。また、本プログラムの表面色解析機能により、散水箇所における明度変化を数値化したグラフが取得できる。詳細は後述するが、測色機器によって取得される「コンクリート表面の明度変化」と同様と見なせて、かつ高精細なデータが取得可能である。以上のように、本プログラムによって散水試験の状況を撮影した画像データより散水試験の評価指標に関する複数のデータが一度に取得可能となる。また、散水後の明度変化に関しては、従来の測色機器による方法では散水前後の 10 秒間の測定値を取得することができず、かつ測定値を取得できる時間間隔は最短で 3 秒であった。本プログラムでは、解析対象とする静止

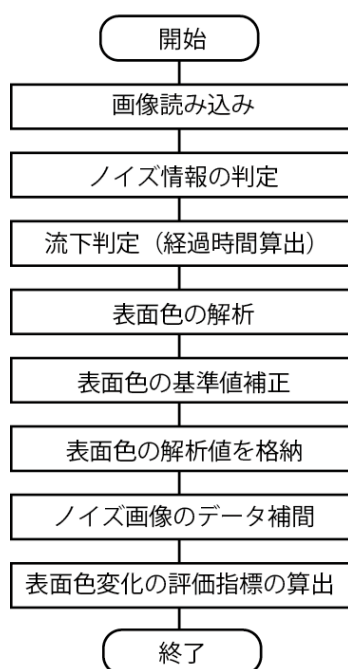


図 6.4.1 画像解析フロー

画ファイル群の時間刻みに依存するが、例えば毎秒 60 フレーム撮影の動画ファイルから作成した静止画ファイル群を利用した場合、理論上は 1/60 秒間隔での測定値が取得可能である。

画像解析の所要時間に関しては使用するパソコンの性能に依存するが、例えば図 6.4.3 で示したような 1 秒間隔の 15 分間の撮影データを含む静止画ファイル群約 1,000 枚を対象と

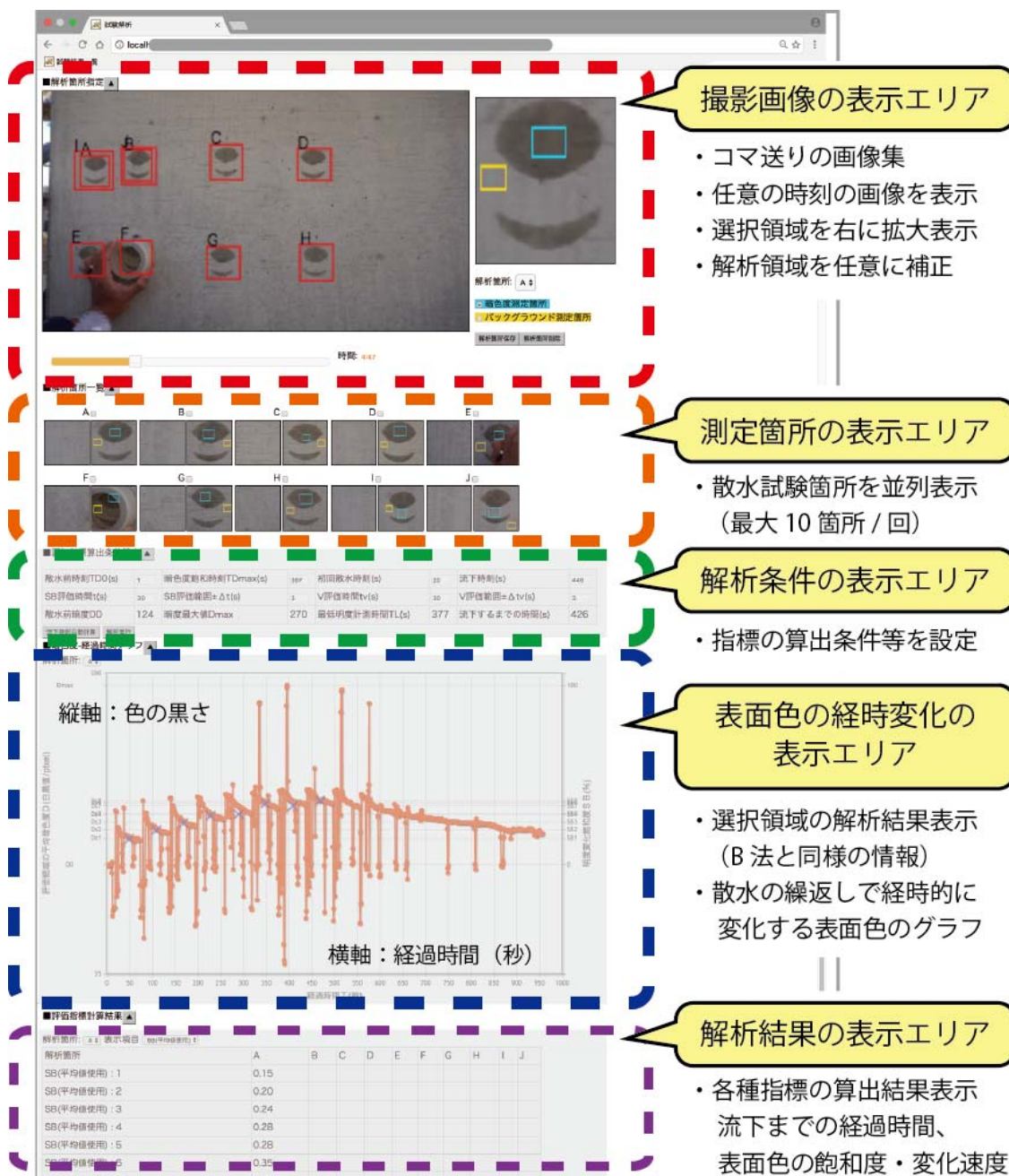


図 6.4.2 画像解析ソフトウェアの画面

した場合、2015 年製造の市販のノートパソコン（CPU：3.1GHz Intel Core i7，GPU：Intel Iris Graphics 6100）による解析時間は、1 箇所の流下判定が約 15 秒，1 箇所の表面色解析が約 30 秒となった。

6.4.3 画像データを活用した散水試験に関する基礎的検討

6.4.3.1 検討内容

本研究で開発した画像解析プログラムにより、散水試験で測定者が行う目視観察および表面色計測はデジタルカメラによる画像撮影で代替できることを確認した。撮影画像はデジタルデータであり、ICT 機器による処理の対象とすることができるため、散水試験の基本的な考え方に、画像データおよび ICT 機器による処理の概念を組み合わせることで、より

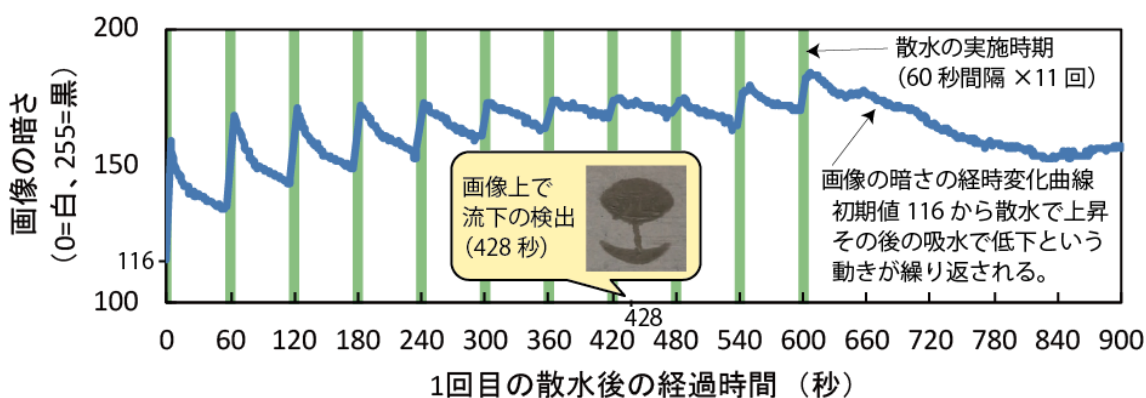


図 6.4.3 画像解析結果の例

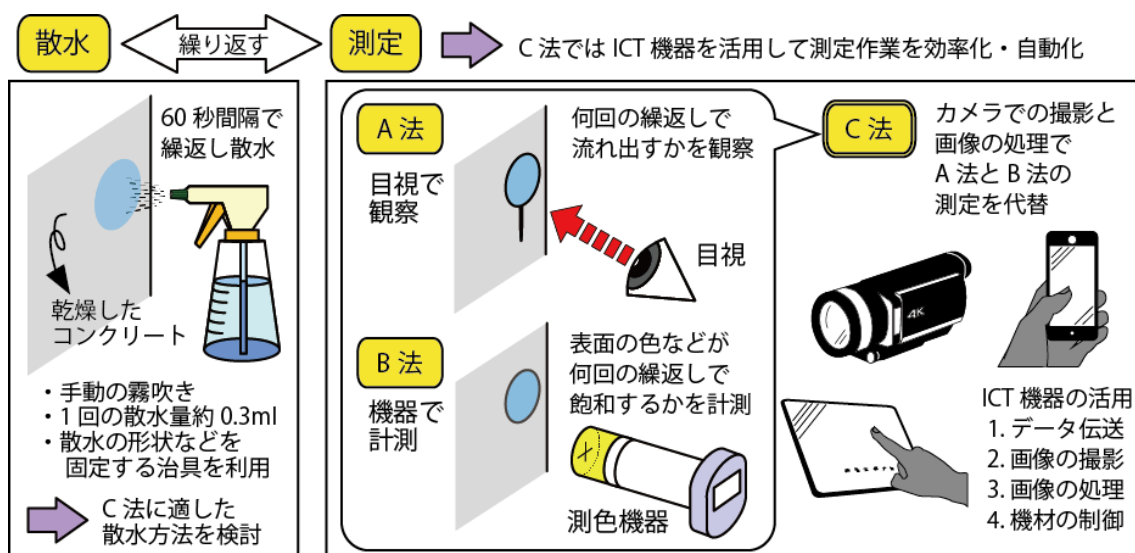


図 6.4.4 画像データを活用した散水試験の概念

（図中で A 法が「目視」、B 法が「測色」、C 法が「画像データ」による方法）

効率的に構造物の表層品質評価が実施できる可能性があると考えられる。例えば、表面色計測を行う場合、測定箇所が直径 5cm ほどの範囲であり、点でのデータを 1 点ずつ取得する形となっていたが、デジタルカメラの撮影画像による評価が可能となれば一度に広範囲のデータが取得できる。図 6.4.4 に、画像データを活用した散水試験の概念を示す。ICT によって効率的に実構造物の表層品質の簡易評価を行う新たな散水試験のイメージとなる。

画像データを活用した散水試験に関する応用技術の検討に着手するにあたり、具体的な検討項目の絞り込みを行い、また簡易な事前検討を行って基本的な考え方を整理した。表 6.4.1 に、画像データを活用した散水試験の開発に向けた検討項目の概要を示す。また、各検討項目に対する基本的な考え方を以下に補足する。

表 6.4.1(1)の測定の実施方法については、散水を人が行い、各種 ICT 機器の操作も人が行

表 6.4.1 検討項目

検討項目	検討内容	本テーマでの基本的な考え方
(1) 測定の実施方法	<ul style="list-style-type: none"> UAV の技術を採用するか 測定に必要な人員と構成 	<ul style="list-style-type: none"> UAV の技術は不採用とする UAV の関連技術の開発は行わない 各種機器（散水器具、画像の撮影と解析）の操作を人間が実施する 最低人員は 1 名を目標とする
(2) 散水方法	<ul style="list-style-type: none"> 散水量を従来手法から変更するか 散水方式を従来手法から変更するか 散水器具を新規開発するか 	<ul style="list-style-type: none"> 散水量は従来手法と同等とする ($5\sim 10\text{mg}/\text{cm}^2$) 散水方式は従来同様の人力による方式とする 散水器具の新規開発は行わない 市販の器具などによる散水方式の変更、散水領域の拡大を検討する
(3) 画像撮影方法	<ul style="list-style-type: none"> 撮影機材の選定 赤外線カメラなどの特殊なカメラを採用するか ウェアラブルカメラの技術を採用するか(撮影点の移動を考慮するか) 撮影距離 	<ul style="list-style-type: none"> 市販のデジカメ、タブレット型端末に搭載されるカメラを対象とする 赤外線カメラなど特殊なカメラの利用も可能な範囲で検討する ウェアラブルカメラは不採用とし、固定点からの撮影とする 撮影距離は市販の一般的な望遠レンズで対応可能なレベルとする 動画のリアルタイム処理の技術開発は困難なため実施しない
(4) 画像解析方法	<ul style="list-style-type: none"> 解析対象のデータの種別 画像解析用の機材の選定 	<ul style="list-style-type: none"> カメラで取得された画像（動画、静止画）のデータをパソコンやタブレット型端末上で解析するプログラムを開発する 各種機材（カメラ、パソコン、タブレット）間のデータ伝送は各種の方法を検討する
(5) 測定者と各種機器間の連携方法	<ul style="list-style-type: none"> 音声などによる画像情報への記録を行うかどうか 散水試験の専用アプリの応用で対処するか タブレット型端末で作動する専用アプリなどを開発するか 	<ul style="list-style-type: none"> 記録した音声などの情報の解析が必要で非効率なため画像情報への記録の付加は行わない 既存の散水試験の専用アプリでの対応は不可能である 測定者、撮影機材、画像解析機材の 3 者を連携させる専用のアプリを開発する

う形とした。測定の作業に必要な人員は1名とした。近年、発展の著しい技術に UAV（無人航空機、一般にはドローンあるいはマルチコプター）があり、土木インフラの保守の分野への導入が近年盛んに検討されている。画像データを活用した散水試験においても UAV の技術が活用できる可能性があるものの、下記に理由を示すように、UAV の活用は検討の対象外とした。

散水試験で第一に必要な行為は散水であり、UAV を採用する場合、UAV には散水と撮影の両方の行為を代替できる機能を搭載する必要がある。

UAV に散水装置と撮影機材を搭載することは技術的に可能と思われるが、散水試験に適した散水量（5～10mg/cm²）を実現する特殊な散水装置の開発が必要となる。

散水と撮影を両立するための UAV の開発、散水装置の開発、撮影機材の開発、これらの達成には相応の時間を要する。

表 6.4.1(2)の散水方法については、表 6.4.1(1)にて理由を記載したとおり UAV による機械化は検討の対象外とし、測定者の操作による散水を行う方式とした。また、従来の散水試験では手動のハンドポンプ型のスプレーによる方式を採用してきたが、測定範囲の拡大を考慮し、電動のポンプ等を用いた散布方式による散水領域の拡大を検討することとした。

表 6.4.1(3)の画像撮影方法については、三脚等を使用した固定点からの撮影によるものとし、撮影画像の種類は動画および静止画の両方を対象として検討を進めることとした。撮影用の機材は一般のデジタルカメラ、スマートフォンなどの携帯可能な小型端末に搭載されるカメラを対象とした。また、赤外線カメラ等の特殊なカメラについては可能な範囲で検討を加えることとした。一方、上記の UAV と同様に近年発展の著しい ICT 関連の技術にウェアラブル端末（メガネ型など撮影者が着用して使用するカメラ、スマートウォッチなど）があるが、本研究では下記を理由として採用しないこととした。

ウェアラブル端末を使用した移動点からの撮影による画像を解析の対象とした場合、画像の撮影条件が変動するため、画像解析における技術上の課題が増加する。

散水試験では、散水箇所の状況を数秒から数分間継続して観測する必要がある。現状の画像解析プログラムでは撮影地点の移動に対処ができていないため、測定者がウェアラブル端末を使用して撮影する場合は散水箇所の近傍に居続ける必要が生じることから、作業効率が悪くなる。

表 6.4.1(4)の画像解析方法については、上記表 6.4.1(1)(2)(3)の条件で取得された散水試験の動画あるいは静止画を対象として画像解析を行う専用アプリケーションソフト（以下、アプリとする。）を開発することとした。画像解析のプログラムの実行環境は端末の基本ソフト（OS：Operating System）に依存しないものが好ましいと考え、Web ブラウザ上で動作するアプリの開発を行うこととした。

表 6.4.1(5)の測定者と各種機器間での連携方法については、散水試験では散水を一定の時間間隔で繰り返す必要があり、散水に関わる時刻情報の共有が重要となるため、画像データを活用した散水試験で必須の検討項目となる。そこで、上記の基本的な考え方に基づいた測

定システムを想定し、散水を行う測定者、撮影機材、画像解析を行う端末、これらの三者に対して散水時刻の情報を共有化させる方法を検討することとした。具体的には、従来の散水試験で使用している散水試験の作業補助用アプリの開発におけるノウハウ等を応用し、近距離無線通信に対応したタブレット等の ICT 機器上で動作する、専用アプリの開発を行った。

図 6.4.5 に、上記の基本的な考え方に基づく画像データを活用した散水試験の測定システムの構成イメージと開発項目を示す。なお、本研究では各要素を個別に検討したものの、技術的にはここで示した撮影、画像解析などの各要素に類するすべての機能を 1 台の端末に搭載させることが可能と思われる。

6.4.3.2 散水範囲の拡大に関する検討

画像データを活用した散水試験における測定箇所の広範囲化を念頭に置くと、散水領域の面積についても従来の直径 5cm 程度の範囲から拡大することで、測定が効率化できる可能性がある。そこで、従来の手動のスプレーによる方式と同等の $5\sim 10\text{mg}/\text{cm}^2$ の散水を広範囲に行う方法について検討した。具体的には、液体を散布可能な市販の各種器具から代表的なものを 7 種類選定し、所定の条件における散水量の測定を行い、散水試験に適した散水量を達成するための散水条件を整理した。

表 6.4.2 に、選定した器具の概要を示す。従来の散水試験では手動のハンドポンプ式のスプレーを使用しているが、本検討においては UAV 技術の応用などによる将来的な機械化に対する発展性を考慮し、すべて電動の器具を選定した。なお、散水量の比較的少ない「超音



図 6.4.5 測定システムの構成と開発項目

波加湿器型」の 2 種類の器具では単体での散水の規模が従来の手動スプレーによる方式と同等以下となるが、同種の器具を複数個同時に使用することで広範囲への安定的な散水が達成できる可能性があり、検討の対象とした。散水量の測定方法は、散水量の比較的多い「スプレーガン型」の 5 種類の器具と、散水量の比較的小さい「超音波加湿器型」の 2 種類の器具で散水条件などを変えている。また、広範囲への散水が可能なスプレーガン型の器具のうち、散水試験への適合性が見い出されたスプレーガン型の散水器具 E について、散水領域内での散水量の偏りについて検証した。

表 6.4.2 散水器具の概要

タイプ	スプレーガン型					超音波加湿器型	
器具名	A	B	C	D	E	F	G
概略寸法 (mm)	135×70×250	250×180×100	350×140×250	500×250×350	100×250×270	75×75×250	30×30×140
重量 (kg)	1.9	0.9	3.3	3.3	2.5	0.9	0.2
電源	単 3 乾電池×2	単 3 乾電池×4	充電式バッテリー	AC100V	AC100V	充電式バッテリー	単 4 乾電池×2
特徴など	・噴霧量は安定している ・水の粒が比較的粗い	・噴霧量は安定している ・軽量	・噴霧量は安定している ・噴霧範囲が調節可能	・噴霧量は安定している ・噴霧範囲が調節可能	・噴霧量は安定している ・噴霧範囲が調節可能	・噴霧量が安定しない ・ミスト状 ・勢いが弱い	・噴霧量が安定しない ・ミスト状 ・勢いが弱い
外観							

表 6.4.3 散水量の測定結果

タイプ	スプレーガン型					超音波加湿器型	
器具名	A	B	C	D	E	F	G
測定時の散水距離(mm)	100	100	100	100	500	100	60
散水範囲の直径の概略寸法 (mm)	150	150	250	250	250	60	10
概算の散水面積(cm ²)	180	180	490	490	490	28	0.79
1 秒あたり散水量(g/s)	2.68	1.27	3.85	8.27	0.90	0.00056	0.023
散水性能 (mg/s・cm ²)	15.14	7.20	7.85	16.85	1.84	0.020	29.44
散水試験に適した散水量の散布時間(s)	0.33～0.66	0.70～1.39	0.64～1.27	0.30～0.59	2.72～5.44	252～505	0.17～0.34
1 秒で散水試験に適した量を散布する場合の散水距離(mm)	約 120～170	約 80～120	約 90～130	約 130～180	約 210～300	約 4～6	不可能
上記の場合における散水範囲の直径(mm)	約 180～260	約 130～180	約 220～310	約 320～460	約 110～150	約 3～4	不可能
散水試験への適合性	散布時間の制御が困難				適合可能	複数台の同時使用が前提	

表 6.4.3 に、散水量の測定結果を示す。単位時間および単位面積あたりの散水量を当該器具の散水性能として算定し、散水試験に適した 5~10mg/cm² の散水を達成するための散水条件を逆算した。表 6.4.3 より、散水量の多いスプレーガン型では散布時間を短時間とする必要があり、0.01 秒単位などでの散布時間の制御が求められることがわかる。一方、超音波加湿器型では散水量が少なく、1 台の器具で散布できる範囲は直径数 mm から 10mm 程度とすることがわかった。

図 6.4.6 に、スプレーガン型の散水器具 E における散水の偏りに関する測定結果を示す。直径約 250mm の範囲で散布した場合、中心付近の直径約 50mm の範囲と比べて外縁部の約 50mm の範囲では散水量が最少で 20%程度まで減少することがわかった。スプレーガン型散水器具により 1 台の散水器具で従来よりも広範囲に散水を行うことが可能であるが、散水領域の中心部と外縁部では散水量が異なることを考慮する必要がある。

以上の結果から、市販の電動の散水器具により散水を行う条件では従来のハンドポンプを使用した方式による散水条件と同等の散水量を達成することは困難であると判断した。散水試験に適した散水を広範囲に行うためには、治具等を装着して散水領域を制限することで散水量の分布状況を改善するなどの工夫が必要であり、専用の装置開発が必須となる。そのため、以降の検討においては従来の方式による散水条件を採用した。

6.4.3.3 画像データによる表層品質の測定システムの開発

デジタルカメラの撮影画像データは汎用的な電子情報であることから、情報コミュニケーション技術（ICT）の利用によるデータの処理が容易である。つまり、近年発展の著しい ICT、IoT といった分野の技術との融合によって革新的な技術、アプリケーション、サービ

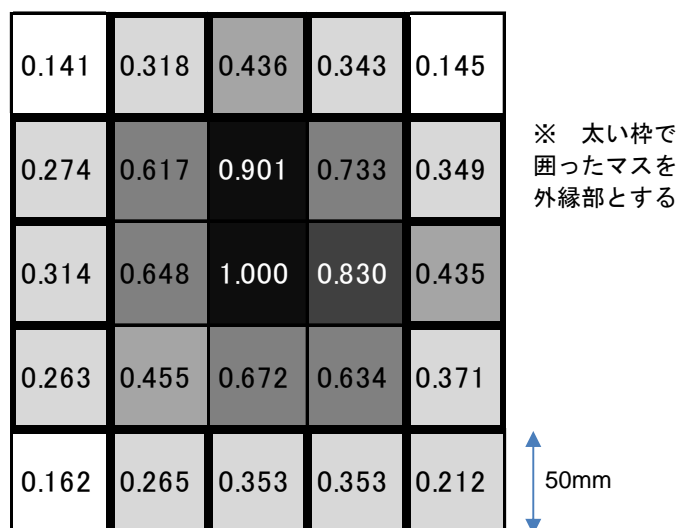


図 6.4.6 散水の偏り

スなどが創出できる可能性を秘めていると考えられる。そこで、散水試験と ICT の融合による新たなコンクリート品質評価システムの実現可能性を検証するため、市販の ICT 機器を活用した測定システムに関する検討を行った。

画像データを活用した散水試験の測定システムにおいて、画像解析プログラムの次に重要となる要素が ICT 機器との連携を実現する撮影機材である。そこで、国内で一般に流通しているカメラ（業務用の特殊なカメラを除く）のうち、カメラのユーザーが作成したプログラムにより機器の制御を行うための API (Application Programming Interface) が公開されている機種に関する調査を行い、散水試験に適したタイミングでの画像取得を実現可能なカメラを選定した。なお、スマートフォンなどの携帯端末に搭載されたカメラについては、カメラの性能やレンズ選択の自由度を勘案し、検討の対象外とした。

次に、図 6.4.5 で示したように、画像データを活用した散水試験の測定システムでは測定者が手元でタブレットなどの携帯端末（以下、手元端末とする。）を操作して各種機器の制御等を行う方式が想定される。手元端末についてはアプリ開発が一般に認められており、端末を動作させる OS に応じたプログラムを作成することで端末に搭載されたカメラを含む各種の機能を制御することができる。アプリ開発における端末への依存度が高い OS を避けて本研究で利用する端末ならびに OS を選定し、専用アプリの開発を行うこととした。

散水試験では、コンクリート表面への散水を一定の時間間隔で繰り返し行う必要がある。測定者の作業ミスを予防するため、従来の散水試験では専用の作業補助用アプリを開発して使用してきた。ここで使用するアプリについては、従来の作業補助用アプリと同様に測定者への散水タイミングを案内する機能が求められるほか、従来のアプリにはない、撮影機材との連携機能、画像処理端末との連携機能、データ伝送機能といった、外部の機器とのデータのやり取りに関する機能が必要となる。そこで、これらの機能を搭載したアプリ開発を行った。図 6.4.7 に、散水試験の測定者が携帯する手元端末で作動する、測定システム構成用アプリのメイン画面を示す。測定者は手元端末上で各種の情報を入力したのち、アプリでデジタルカメラを遠隔操作して撮影を開始する。その後、測定者はアプリによる音声案内に従

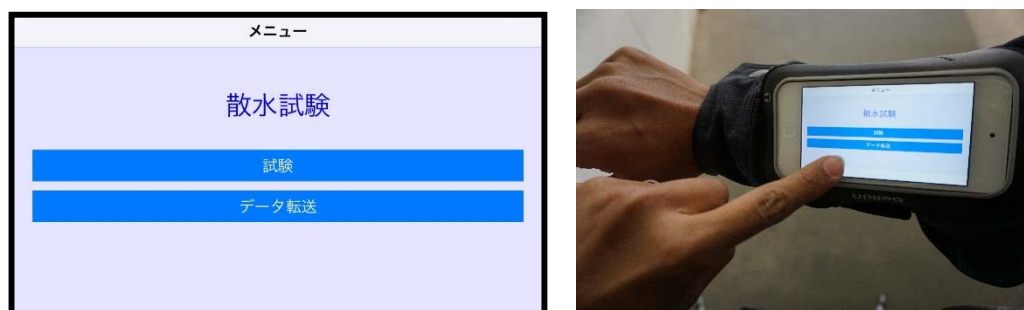


図 6.4.7 散水試験アプリ

って散水を実施し、一定の回数の散水を繰り返したのち測定作業を終了する。なお、今回開発したアプリと画像解析プログラムはリアルタイムでの連動を実現できていない。そのため、測定作業の終了タイミングは測定者の判断あるいは前もって規定した散水回数によって決定する必要がある。測定作業の終了後、測定者はアプリ上でデータ転送の処理を行う。画像解析プログラムを搭載したパソコン等の端末で画像データを受信し、画像解析を行うことで作業は完了となる。

6.4.3.4 検証実験

画像データによる表層品質評価を行う散水試験の実現性を検証するため、市販の各種機器と内製のアプリケーションソフトで測定システムを構成し、実物規模の壁状 RC 試験体を利用して屋外での実構造物の測定を想定した状況下での試行を実施した。また、開発した画像解析プログラムによるコンクリート表層品質の簡易評価の妥当性を検証するため、壁状 RC 試験体および各種品質のコンクリートで作製した試験体による検証実験を行った。表 6.4.4 に、コンクリート試験体と壁状 RC 試験体の概要を示す。また、図 6.4.8 に、測定システムの試行の様子を示す。

表 6.4.4 コンクリート試験体と壁状 RC 試験体の概要

名称	コンクリート試験体	壁状 RC 試験体
コンクリートの 特徴	室内練りコンクリート，W/C=40・50・60%の3水準，28日強度34～58MPa，最大粗骨材径20mm，スランプ8～20cm，空気量約4%，普通セメント，単位骨材料を統一	レディーミクストコンクリート，呼び強度24MPa，最大粗骨材径20mm，スランプ8cm，空気量約4%，普通セメント，W/C=57%，屋外にて施工（10℃，30%RH程度）
寸法	高さ40×幅40×長さ160mm	高さ1200×幅1200×奥行400mm
養生条件	材齢1日脱型，養生3水準	材齢7日脱型，屋外気中曝露
測定時の条件	材齢約6年，試験室内（20℃，60%RH）	材齢約1年，10℃，30%RH，晴天，直射日光なし（北側の面）



図 6.4.8 測定システムの試行の様子

図 6.4.9 に、壁状 RC 試験体の測定結果を示す。同一面の 8 箇所（測定箇所 A～H）に対して同時進行で散水を行い、三脚上に設置したデジタルカメラによって撮影した動画の画像解析によって得られた表面色の経時変化データである。画像上では各散水箇所に対する測定者の映り込みがノイズとして経時変化データ上に現れる。図 6.4.10 に、ノイズ画像および解析結果の例を示す。測定箇所の相互の位置、また撮影機材の位置との関係によって各散水箇所の撮影画像における測定者の映り込みの頻度や影響時間に差が生じるため、ノイズの影響度合いは各測定箇所によって異なる。表 6.4.5 に、壁状 RC 試験体の測定結果におけるノイズの影響を示す。今回の測定条件では測定箇所 A, E, F などでは映り込みが頻繁に発生し、表面色の経時変化データのノイズが増大した。なお、開発した画像解析プログラ

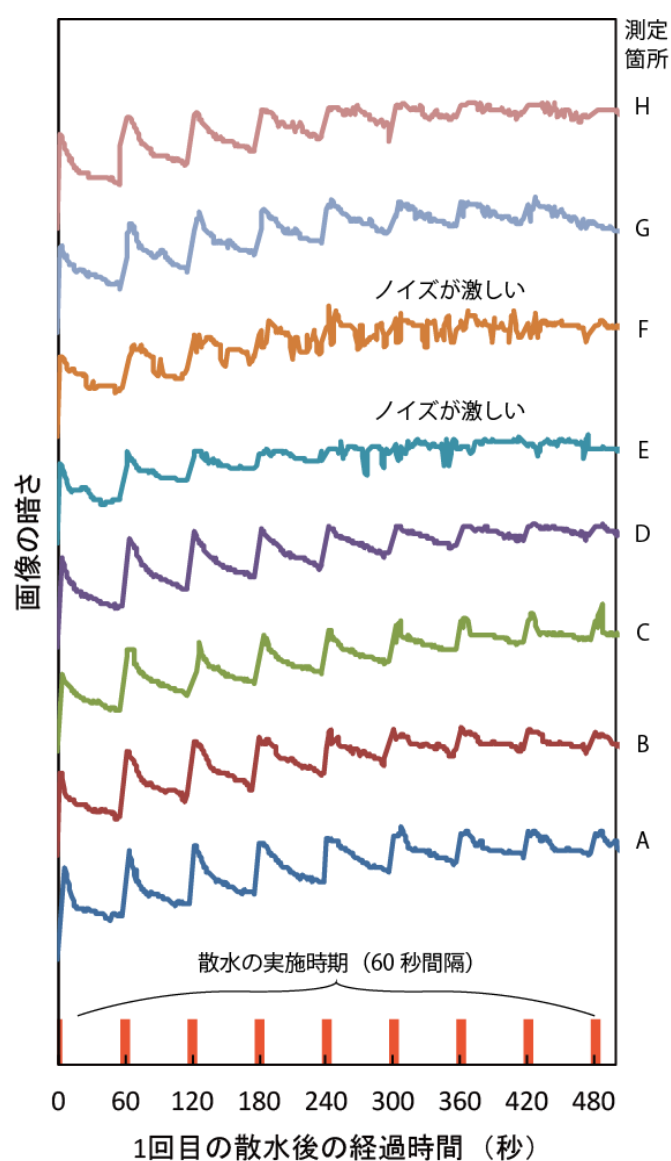


図 6.4.9 測定結果

ムでは、ノイズの影響を軽減するために独自のノイズ除去アルゴリズムを用いている。図 6.4.11 に、ノイズ除去の効果を示す。図 6.4.9 で示した測定結果はノイズ除去後のデータであるが、測定箇所 E と F などではノイズが残っており、ノイズ除去の精度向上についてはさらなる改善の余地が残されている。

表 6.4.5 ノイズの影響

測定箇所	経時変化曲線の長さ（ノイズが多いほど数値が増加）	
	ノイズ除去前	ノイズ除去後
A	8,130	738
B	5,905	623
C	4,903	812
D	3,308	716
E	8,260	621
F	6,982	942
G	4,617	785
H	5,046	776

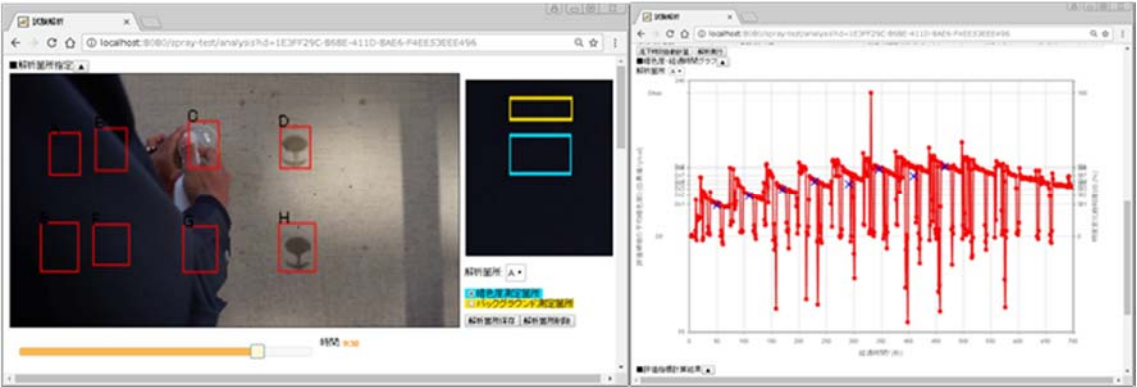


図 6.4.10 ノイズ画像と解析データの例

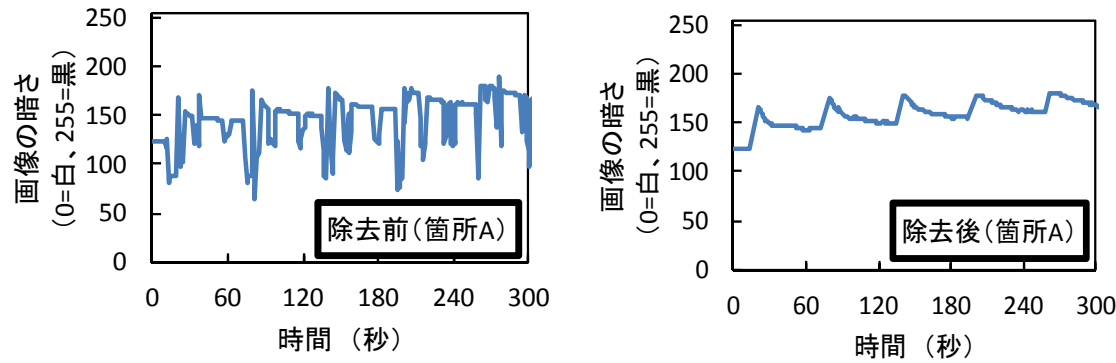


図 6.4.11 ノイズ除去の効果

図 6.4.12 に、コンクリート表面色の経時変化データに関する比較を示す。同図で示した明度データとは物理量ではないが、散水によって一旦暗色化したコンクリートの表面色が水の吸収で徐々に明色化するという現象が定量的に表現できる指標である。なお、画像解析プログラムでは散水の繰り返しによってコンクリート表面色が徐々に暗色化する様子を表現するために画像の暗さを 256 段階で取得しているが、測色機器では色の明るさを示す明度が計測される。そのため、測色と画像解析では数値の正負が逆転する。そこで、ここでは画像解析で取得した画像の暗さを反転させて測色による明度に相当する指標に置換して表示した。図 6.4.12 に示すとおり、測色機器で取得されたデータは、算術的な処理を行うことで画像解析による詳細な経時変化データの代表点として重ね合わせることができることが確認された。

図 6.4.13 に、データの相関関係を示す。測色機器で画像解析と異なる 4 箇所の測定を実施し、画像解析で最もノイズの少ないデータが取得された測定箇所 D の結果との比較を行ったものである。図 6.4.13 より、両データは単純な一次近似が可能であることがわかる。測色機器の測定データは画像解析で連続的に取得される経時変化データの一部と相関係数 $R^2 = 0.98$ の精度で合致することが確認された。なお、測色機器では散水の 10 秒前と 10 秒後の表面色のデータ取得を基本としている。また、測色機器の能力を最大限使用することにより、散水前後 10 秒間を除き、最短で 3 秒間隔での表面色データが取得できる。それに対して、画像解析では画像の時間当たりフレーム数に応じて 1 秒未満の時間間隔でのデータ取得が可能である。例えば一般にハイスピードカメラと呼ばれる高速撮影が可能な機材を使用した場合、数万分の 1 秒間隔などの単位でデータの高精細化が可能となる。

以上のことから、画像解析では測色機器と同様の情報が取得できるほか、表面色の経時変化に関して測色機器よりも高精細なデータが取得できることが示された。

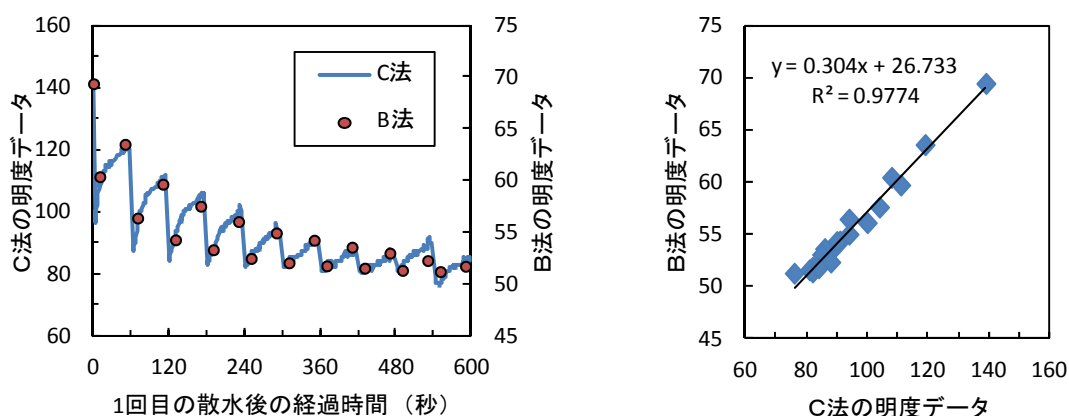


図 6.4.12 明度の経時変化データの比較 図 6.4.13 明度の経時変化データの相関関係

続いて、コンクリート試験体による検証実験の結果を整理する。試験体は水セメント比と脱型後の養生をそれぞれ 3 水準に設定して 9 種類を試験室内で作製し、温湿度が制御された試験室内（20℃、相対湿度 60%）で約 6 年間保管したものである。試験体の打込み面に対して鉛直上方から散水試験を適用して画像情報を取得したのち、試験体の物性値として、吸水率、中性化速度係数、総細孔容積を順に測定した。吸水率は、散水試験の実施から約 2 週間後に試験体を 4 時間水中に浸漬させた際の吸水重量を浸漬前の気中乾燥状態の重量で除して算出した。次に、試験体を長手方向の中心で切断し、試験体の中性化深さの実測値と材齢の関係より中性化速度係数を算出した。最後に、試験体の打込み面側の表層を約 3mm の厚みで切り出した薄片のセメントペースト部分を試料として水銀圧入法による細孔径分布の測定を実施し、総細孔容積を求めた。表 6.4.6 に、試験体の物性値を示す。また、図 6.4.14 に画像解析で取得した表面色の経時変化データの代表例を示す。ここでは散水前の表面色を原点とした。散水の時間間隔は 120 秒、繰返し回数は 5 回とした。図 6.4.14 より、物性値の異なるコンクリート試験体では表面色の経時変化に差異が見られることがわかる。散水直後の経時変化曲線の形状はコンクリート表面における微量水分の吸水状況を捉えているため、測定対象のコンクリートの吸水性に依存して変化する。従来の測色機器による方法では測定手順を簡略にするため経時変化曲線を 2 点のデータによる直線近似で評価する形としていたが、画像解析では連続的な経時変化曲線が取得できることから、コンクリート表面における微量水分の吸水現象の詳細把握が可能となった。なお、経時変化曲線の形状や近似方法等について、本研究では十分に解明できていないため、図 6.4.14 で注釈として示した定性的な解釈に留めているが、おおむね次のような知見を得ることができた。

- 1) 水中養生を行った試験体では、1 回目の散水直後に急激な表面色の変化を生じたのち、30 秒程度で表面色の変化の一次的な停滞が発生する。また、その後の散水繰返しによって表面色の経時変化に逆勾配が出現する。
- 2) 表面色の経時変化に逆勾配が出現した段階でコンクリート表面には水の滞留が見られる。水の滞留の有無は測定者の目視によって光沢感として認識できる。
- 3) 吸水しやすいコンクリートでは、表面色の経時変化曲線の鈍化が緩やかである。

表 6.4.6 コンクリート試験体の物性値

供試体名	水セメント比	養生*1	標準供試体の圧縮強度 (MPa) *2	吸水率 (%) *3	中性化速度係数 (mm 年 ^{0.5})	総細孔容積 (×0.01cm ³ /g)
40A	40	水中	58.2	1.07	0.68	5.62
40B		気中	実施なし	1.06	2.79	4.49
40C		乾燥	実施なし	1.14	3.54	4.77
50A	50	水中	45.0	1.40	2.23	5.23
50B		気中	実施なし	2.43	6.15	5.39
50C		乾燥	実施なし	2.62	8.05	5.52
60A	60	水中	34.4	2.11	2.90	5.47
60B		気中	実施なし	2.63	8.15 以上 *4	6.01
60C		乾燥	実施なし	2.84	8.15 以上 *4	6.64

*1 養生について：水中（20℃水中）、気中（20℃、60%RH）、乾燥（20℃、40%RH）

*2 圧縮強度について：直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体、材齢 28 日、標準水中養生、3 体の平均値

*3 吸水率について：水中浸漬 4 時間での吸水重量／気中乾燥状態の重量

*4 60B と 60C の中性化速度係数について：供試体の全域まで中性化が進行したため計測不能となった

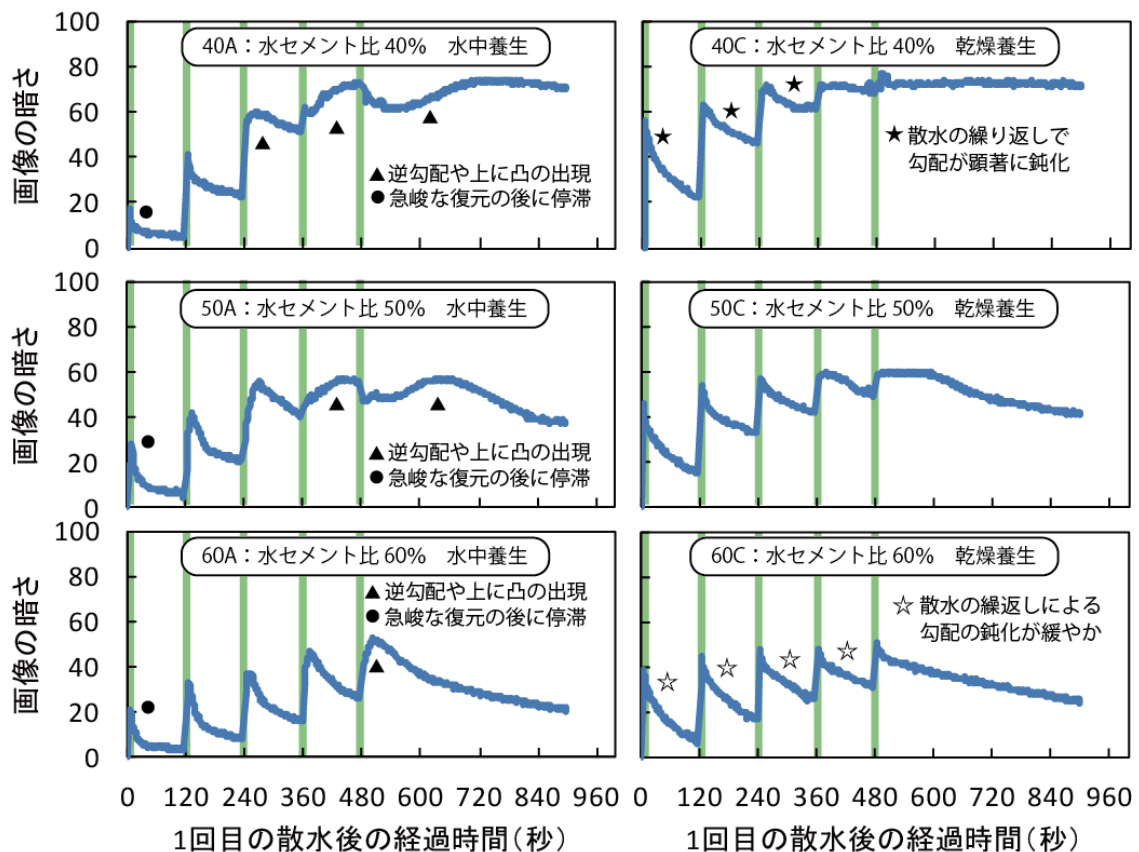


図 6.4.14 明度の経時変化

6.4.4 応用技術に関する検討のまとめ

測定者が手動のスプレーで散水を行い、散水箇所の撮影画像の解析によってコンクリート表層品質に関するデータを取得する方法で画像データを活用した散水試験の検証を行った。屋外での実建造物の測定を想定した状況下での試行の結果、市販の各種機器と内製のアプリケーションソフトで構成した測定システムにより、従来の散水試験よりも効率的にコンクリート表層品質に関する情報が取得可能となることが確認された。開発成果である「画像解析プログラム」と「測定システム構成用アプリ」を活用することで、測定者が散水をするだけという軽微な作業によって撮影範囲内のコンクリート表層品質を評価する、新しい検査が実現できる可能性がある。一方、本検討においては発展の著しい ICT 機器を利用したため、ICT 関連での新技術の普及によって測定システムが様変わりする可能性が高い。また、散水の方式についても測定者が手動で行う方式ではなく、UAV の技術等を応用することで機械化や自動化が実現できる可能性があり、技術的に改良の余地がある。しかしながら、画像データを活用した散水試験の根幹となる画像解析技術の基本概念は不変であり、表層品質評価に対する実用性と妥当性は本検討において十分に示されたと言える。

本検討の結果を踏まえ、以下に画像データを活用した散水試験の使用性を向上するための課題、技術開発の方向性を示す。

- 1) 画像解析プログラムの改良が必要である。例えば、8 箇所の散水試験実施箇所のうちノイズの影響が最も強く現れた 1 箇所において流下判定が正常に機能しなかった。ノイズの原因として、測定者の映り込みによる影響のほか、明るさ変化、フォーカスのずれが影響することを確認している。
- 2) 自作の iOS アプリを実機で作動させるために必要な設定（プロビジョニングプロファイル）を更新するため、アプリの再インストール作業を頻繁に行う必要がある。本研究では、最短 1 週間でプロビジョニングプロファイルの有効期限切れによりアプリが作動不能となる状況を確認している。この問題を解消するには、iOS アプリを製品化して Apple 社のストア上で公式にリリースする必要がある。
- 3) カメラの画像処理エンジンに散水試験の画像処理に必要な要素を組み込むことができれば、撮影動画を即時に解析し、1 台の手元端末で撮影と画像解析の処理を完結することなどが実現できる可能性がある。
- 4) 広範囲への散水を行うことは難しい。専用の装置開発が必須である。

6.5 第 6 章のまとめ

本章では、散水試験の影響要因を整理し、活用事例と応用技術を紹介した。本研究における散水試験の影響要因に関する検証の結果は、表 6.5.1 のように整理することができる。なお、散水試験を含む、実構造物のコンクリート表層品質の非破壊評価における影響要因として考慮が不可欠であり、また既存の表層品質評価技術においては排除が不可能と考えられるコンクリートの含水状態の影響に関して、以下の知見を得た。

- 1) コンクリートの含水状態はコンクリートの環境条件の変化によって常時変動するため、屋外に曝されたコンクリートの含水状態を正確に評価することは不可能と考えるべきである。
- 2) 市販の機器で取得可能なコンクリート構造物における表面含水率の測定値は、コンクリート表面における不陸やコンクリートの不均質性により、測定箇所によって 0.5% 程度のばらつきを持つ値となるため、参考値と見なすのが良い。
- 3) 実構造物におけるコンクリートの含水状態は常時変動するものの、コンクリート施工時の型枠脱型直後においては確実に高含水状態と見なすことができる。
- 4) 散水試験は表層透気試験が適用不可能な型枠脱型の翌日から適用可能であり、かつ型枠脱型の翌日から 1 週間程度の期間に散水試験を適用することにより対象としたコンクリートの表層品質の優劣を判別可能である。
- 5) 実構造物のコンクリートに対する散水試験の適用方法を提案し、含水状態に起因する表層品質の評価の不確実性が散水試験においては軽減できることを示した。すなわち、含水状態が支配的要因となり得る表層品質の非破壊評価において、実構造物を対象とした評価値の取得を、散水試験では合理的かつ効率的に実現できることを示した。

表 6.5.1 散水試験の影響要因

区分	項目	機構や理由	本研究での見解
散水条件	散水量	瞬時に吸水されない余剰水が発生	5～10mg/cm ² が適当
	散水方向	重力の作用	水平面と鉛直面で異なる測定手順を考案
	水質や水温	粘性などの水の性質が変化	本研究では常温の純水を使用 水温は 20±10℃の範囲とする
環境条件	外気温	蒸発速度に影響	20℃・60%RH では蒸発の影響がほとんどないことを確認
	湿度	蒸発速度に影響	
	日射	蒸発速度に影響	日射で散水回数が約 50%増加したが日照時間や温度変化を考慮すると定量的な補正は困難
測定対象の コンクリートの条件	温度	蒸発速度に影響	水温の影響の方が大きい
	含水状態	水分移動に影響	脱型直後の高含水状態が見込める タイミングで散水試験を適用する
	曝露環境	コンクリートの物性の変化	水がかりや日射を受けやすい部位での測定は避ける
	使用材料	コンクリートの物性の変化	高炉セメントを使用したコンクリートで散水回数が増加した
	その他	表面状態など	未検証

散水試験の活用事例として、土木構造物の建設の発注機関におけるコンクリート構造物の品質確認に関する実務上の活用事例を 2 例、研究機関における研究用のツールとしての活用事例を 2 例、紹介した。それらの事例における活用により明らかとなった散水試験の実用上、あるいは普及に向けた課題は、以下のとおりである。

- 1) 散水試験で使用する散水器具は手動式であるため、測定者の操作方法によって散水量に差が生じ、測定結果に影響を及ぼす。そのため、測定結果に一定の信頼性を求める場合は、散水試験の実施者の熟練度を考慮する必要がある。
- 2) 散水器具の消耗により散水量が減少し、測定結果に影響を及ぼす。そのため、測定結果に一定の信頼性を求める場合は、散水器具の散水性能を定期的に確認しておく必要がある。
- 3) 散水試験を一般に普及させる場合、散水試験に関する技術的な講習の方法、散水器具の検定の方法に関する仕組みを構築する必要がある。

散水試験では、微量の水分を繰り返し付与することでコンクリート表面における吸水挙動の可視化を行っている。可視化されたコンクリートの吸水挙動に関する情報は、人の目視で認識されるだけでなく、工学的な画像素子などにより非接触で遠隔地から検出することが可能となる。本章では、一般的なデジタル撮影機材を使用して吸水挙動のデータを取得する、散水試験の応用技術について検討を行った。その結果、散水後の水分挙動を画像解析により評価することが可能であることが確認された。本研究では、散水と目視を測定者が実施する手法を散水試験として提案するが、散水と測定という行為のみならず、表層品質の判定までの一連の作業を機械化することが将来的には可能と考えられる。

参考文献

- [6.1] 松田康紀, 井口重信, 松田芳範: 実構造物におけるコンクリート構造物品質向上施策の検証, SED - STRUCTURAL ENGINEERING DATA -, No.47, pp.2-9, 2016
- [6.2] 半井恵介, 横田直倫, 西尾壮平: 鉄道構造物への散水試験と目視評価の試行と一考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, V-311, pp.621-622, 2016
- [6.3] 土木学会関東支部群馬会: コンクリート研究会 (第 15 回)「新設コンクリート構造物の品質確保」,
https://www.jsce.or.jp/branch/kanto/01_08_kakukai/03_gunma/29_0111kenkyukai.html,
2017.1
- [6.4] 舌間孝一郎ら: 群馬県における新設コンクリート構造物の表層品質調査, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, V-436, pp.871-872, 2015
- [6.5] 半井健一郎ら: ボックスカルバートおよび附属試験体における表層品質測定, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, V-435, pp.869-870, 2015

第7章 結論

7.1 本研究の総括

7.2 今後の展望

7.1 本研究の総括

本研究では、今後建設される RC 構造物の耐久性向上に資すること、ならびに RC 構造物の保守に要する労力の低減に資することを目的として、構造物の検査あるいは調査の実務に対して導入可能なかぶりコンクリートの密実性（表層品質）に関する簡易な非破壊評価技術を確立し、社会に実装するための検討を行った。具体的には、乾燥したコンクリート表面に微量の水を散布してコンクリート表面における微量水分の吸水特性を定量化して表層品質を判定する「散水試験(Water Intentional Spraying Test)」の着想を具現化し、一般に普及可能な技術の開発を行った。また、表層品質の非破壊評価において不可避となるコンクリートの内部含水状態の影響を、不確実な含水状態の評価値に依存しない方法で解消する測定手順を検討した。

本章では、全 7 章で構成した本論文の各章の内容を総括するとともに、今後の展望について述べる。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的、ならびに本論文の構成を示した。

第 2 章「既往の研究」では、コンクリート表層品質の非破壊評価に関する既往の研究について概説した。

第 3 章「表層品質の簡易評価の着想と試行的検討」では、本研究で提案するコンクリート表層品質の簡易評価手法である「散水試験」の開発コンセプト、独自の着想を示すとともに、着想を評価手法として具現化するために実構造物を測定対象として試行的な実験を行った。検討の結果、「乾燥したコンクリート表面に対して微量の水分を散布し、微量の水分がコンクリートに吸収される状況を定量的に把握することで表層品質に関する情報を取得する」という「散水試験」の基本概念の、表層品質に関する簡易評価に対する妥当性と有用性が示された。

第 4 章「散水時の表面色変化特性に関する実験的検討」では、第 3 章における試行的検討によって得られた知見、明らかとなった課題を背景に、散水によって意図的に引き起こしたコンクリート表面色の変化特性を詳細に把握することを目的として、各種の試験体および実構造物を対象とした実験を行った。その結果、散水による表面色の変化は明度の変化に代表されることが確認され、また散水による明度の変化に関して、散水の実施直後からの経時的な変化を詳細に計測することで多様な情報を含むデータが取得できることが判明した。散水方法に関する重要な知見として、一度に散布する水量は可能な限り減量した上で、一定の時間間隔を置いて同一箇所へ繰り返し散布するという方法を見い出した。散水試験に適した散水方法を実現するため、同一箇所への散布の繰り返しに関わる精度を確保し、散布した水を確実にコンクリート表面に付与するための機能を有した散水器具を開発した。

散水試験で取得する表層品質の評価指標に関する知見としては、散水時の明度の経時変化を測色機器で詳細に計測したデータを分析することにより、表層品質との相関を有した指標となる「明度変化速度最大値」、「最低明度計測時間」が取得可能であることを示した。これらの評価指標を取得するための測定手順では、始終、測色機器を作動させて明度に関する連続的なデータを取得する必要があるとあり、作業性の面で改良の余地があると考え、明度に関する離散的なデータの取得に適応した測定手順を考案し、「明度変化速度最大値」と置き換えが可能な指標として「明度変化飽和度」を提案し、その有効性を示した。

第5章「散水後の水分挙動の目視評価による簡便性の追求」では、本研究で開発する非破壊評価手法に求める「簡便性」を追求するため、散水によって瞬間的に吸収されない余剰の水分の滞留および流下現象に着目し、これらの現象の発生メカニズムを検証するとともに、水の滞留および流下現象を利用した簡易評価手法を検討した。

散水試験で付与した水の挙動の分析においては、独自の画像解析技術の開発を行った。コンクリートが吸水可能な容量に比して微量の水分を断続的にコンクリート表面へ付与するという散水試験特有の状況を撮影した動画の分析、ならびに画像解析により、表層の水分の飽和に伴う吸水現象の停滞、それに伴って生じる表面における余剰水分の滞留、鉛直面における余剰水分の流下、これらの現象とコンクリート表面色の経時的な変化との関係性を整理した。散水試験で付与した水がコンクリート表面で滞留する様子は、コンクリート表面での水の存在による光の反射に起因する光沢感の有無として画像上、さらに人間の目視によっても認識できることが確認された。

鉛直面において発生し得る余剰水の流下現象に関して、既往の研究で見られる水の流下距離を指標とした評価方法ではなく、水の流下発生の有無による評価方法を考案した。流下発生の有無を確実に容易に判定することを可能とする散水器具を新たに開発し、水の流下現象の観察に特化した測定手順を定めた。

これらの知見を基に、水の滞留現象および流下現象の発生に基づいたコンクリート表面における吸水性状の簡易評価手順を構築し、測定者の手動による散水と目視による観察によって表層品質の簡易評価を行う「散水試験」を提案した。また、表層品質の評価に対する影響要因として考慮が不可欠であるとともに、既存の表層品質評価技術においては排除が不可能と考えられるコンクリートの含水状態の影響に関して、コンクリート施工時の型枠脱型直後における高含水状態のコンクリートに対する散水試験の適用方法を提案し、含水状態に起因する表層品質の評価の不確実性が散水試験においては軽減できることを示した。すなわち、含水状態が支配的要因となり得る表層品質の非破壊評価において、実構造物を対象とした評価値の取得を、散水試験では合理的かつ効率的に実現できることを示した。

第6章「散水試験の影響要因、活用事例と応用技術」では、本研究で提案する散水試験の影響要因に関する検討結果を整理した。

また、3D プリント技術等を利用して開発した散水試験専用の試験キットを提供することにより、他機関での散水試験の実施が可能となることを、実際の活用事例の紹介という形で実証した。土木構造物の建設の発注機関におけるコンクリート構造物の品質確認に関する実務上の活用事例を 2 例、研究機関における研究用のツールとしての活用事例を 2 例紹介した。

さらに、散水試験では結果的にコンクリートの表層品質の可視化を実現したものと捉えて、表層品質の可視化が導く将来的な技術開発の先例として、散水試験を画像処理技術と融合させた応用技術について述べた。

第 7 章「結論」では、本研究の結果の総括、および今後の展望を示した。

7.2 今後の展望

第6章の活用事例の紹介でも言及したように、本研究で提案した散水試験は、コンクリート構造物の調査に関する専門家ではなく、コンクリートの表層品質に関する専門知識を備えていない一般の人々にも使用できる、手軽な手法となっている。つまり、散水試験は、従来は評価が不可能なものと見なされてきた実構造物のコンクリートにおける表層品質を、誰にでも確認し得るものに変えるツール、とすることができる。

従来、コンクリートの施工の現場では、コンクリートには外観上の目に見える不具合さえ生じさせなければ良いと考えられてきた。目に見えるひび割れや豆板のような不具合は、工事の竣工前に補修され、出来形検査と呼ばれる寸法と外観の不具合の有無に関する検査に合格することで、何もなかったものとして扱われていく。例えば、工期の都合などで型枠の脱型までの時間を短縮する必要が生じた場合、表層品質に悪影響を及ぼす可能性があるが、従来の施工の考え方に則れば、実構造物での確認が困難かつ検査の対象外である表層品質という項目に対しては特段の配慮がなされことなく施工が進められる可能性が高い。結果的に表層品質に問題のある構造物が完成した場合であっても、竣工時に問題視されることはなく、また供用段階においても表層品質の問題が明らかとなるのは、鉄筋腐食などの変状が顕在化して保守上のコストが増大した段階に至ってからとなる。

近年、コンクリートの品質向上や品質確保を目的とした取り組みが注目されている。コンクリート施工の状況をチェックする仕組みを導入して機能させることで、施工者に丁寧な施工を促す、あるいは施工者による不適切な施工を抑制する効果が見込めるため、結果的にコンクリート施工の品質が向上し、それによって耐久性に優れたコンクリート構造物が構築されるというものである。コンクリート施工の品質が改善されることで表層品質も向上する可能性があるため、国土交通省の東北地方整備局などで導入されたコンクリート品質確保に対する取り組みが有益であることは間違いない。しかしながら、近年取り上げられている取り組みのほとんどは、良質なコンクリート構造物を造ることに対する関係者の情熱に支えられている面があり、一過性の流行として風化したりシステムが形骸化したりする懸念がある。また、表層品質を定量的に評価するという概念が重視されていないため、表層品質に不具合を起こす条件で施工された外観上の不具合のないコンクリート構造物が出来る可能性は残されている。

散水試験の測定作業は、手動の霧吹きを使うだけという軽微なもので少ない人員かつ軽装で実施できる。特に鉛直面において目視で評価を行う散水試験では、「水が流れるかどうか」という測定の状況や結果が“一目瞭然”であることから、測定の実施者、依頼者、監督者、見学者など様々な立場の人々が測定の様子を目で見て、感じて、認識を共有することが可能となる。例えば建設工事の途中で散水試験を実施し、水が流れにくかった場合にはその理由を対象構造物の発注者と施工者が測定の様子を現地で一緒に見ながら議論し、共に考えて施工方法の改善に繋げるというような形で、より良い構造物の実現に向けて協働する理想的な状況を実現させられる可能性がある。あるいは水が流れやすかった場合には、施工

の方法が適切であったこと、施工の技術が優れていたことなどを裏付けるデータとして活用することも考えられる。

散水試験のように可能な限り簡易な評価手法を確立して社会に実装することができれば、出来上がったコンクリート構造物に対して表層品質を実際に評価するという行為が一般化する。実構造物での表層品質が誰にでも当然のように評価される社会では、自ずとコンクリート施工の品質は向上し、耐久性も同様に向上すると考えられる。コンクリート構造物の耐久性向上に資する技術として広く活用されることを期待して、散水試験のさらなる普及に努める所存である。

本研究で提案した散水試験は、コンクリート表層品質の簡易評価ツールの開発を目的とした研究活動の成果として産み出したものであるが、人間の目視による手軽な評価を実現したことで、結果的に実構造物のコンクリートの表層品質に関わる情報を可視化することにも成功した。本研究では表層品質の簡易評価技術を社会に実装することを最大の目的として研究を遂行したため、表層品質の簡易評価ツールの完成に専念したが、本研究で得られた「コンクリート品質の可視化」という観点での知見には広い発展性が見込める点に言及しておきたい。

単位時間当たりの圧力の変化、水量の変化などをコンクリート表面に接触させた精密機器を通じて実測する必要のある既存技術と異なり、散水試験では微量の水分を付与することで生じるコンクリート表面での色合いや光沢感の変化を、非接触で検出することが可能である。この特長は、コンクリート表面での変化の発生方法と検出方法の両者に対して本研究で提示した方法とは異なる、革新的な方法が新たに見い出される可能性を秘めている。例えば、本研究で提示した散水試験においては、試験の名称が示すとおりコンクリート表面での変化の発生方法として単純な水という物質を選択している。水を選択したことは、コンクリートの劣化をはじめとする諸々の現象との関係性を検証していく上では最適と考えられるものの、コンクリートの表層品質あるいはその他の物性の推定に適した特性を有する液体が存在する可能性が考えられる。さらに言えば、液体のみならず、微粒分、固体、気体など物質の形態を制限する必要はない。用途を表層品質の評価に限定したとしても、表層品質の可視化に適した塗付用含浸材、といった物質が開発できる可能性がある。また、可視化された情報の検出技術としては、本研究では一般的なデジタルカメラを利用したが、物体表面の水分量の可視化が可能な撮像技術が実用化されているほか、赤外線による熱画像のように可視外の光を利用した技術などを適用することで、新たな知見が見い出される可能性がある。

近年、構造物のメンテナンスに関連した分野では構造物の点検作業を機械化したり、遠隔化したりするための技術開発が盛んに行われている。本研究で示された、コンクリート表面における微量水分の吸水特性を画像解析によって取得できるという知見は、例えば衛星画像と降雨量を組み合わせることで、コンクリート舗装の表層における透水性の評価を遠隔

地で自動的に判定できるシステムの開発といった形で、メンテナンスを効率化する革新的な技術の実現に繋がる可能性がある。つまり、本研究で提案した散水試験は、評価の対象物をコンクリートとし、識別材として水を利用し、変化の検出手段として目視という方法を採用することにより、コンクリートの表層品質を可視化する技術として完成させたものに過ぎないと考えることができる。本研究で示した散水試験の着想を応用し、発展させることで、従来にない新技術が創出できる可能性がある。

以上、本研究で得られた知見が社会に及ぼし得る影響として期待したいことのほか、さらなる革新的技術の創出に繋がることに対する希望を込めて今後の展望を述べた。本研究で提案した散水試験に関しては、実用的な試験キットを開発して一般への展開を達成したものの、真の意味で一般に普及させるためには試験キットの量産化と低廉化が必須であり、課題は残されている。今後建設される RC 構造物の耐久性向上、ならびに RC 構造物の保守に要する労力の低減に資するため、より良い技術の開発に向けて今後も尽力することを宣言し、本研究の締めくくりとする。

付録 既発表論文等一覧

◆査読付き論文

- 1) 西尾壮平・上田洋・岸利治：表面色によるコンクリート表層部の物質移動抵抗性の非破壊評価に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1751-1756, 2011
- 2) 西尾壮平・上田洋・岸利治：散水時の明度変化によるコンクリート表層品質の非破壊評価に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1732-1737, 2012
- 3) 西尾壮平・上田洋・岸利治：表面色によるコンクリート表層部の物質移動抵抗性評価，コンクリート構造物の非破壊検査論文集，Vol.4, pp.189-196, 2012
- 4) 西尾壮平・上田洋・岸利治：コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価，セメント・コンクリート論文集，No.66, pp.303-310, 2013
- 5) 西尾壮平・上田洋・岸利治：コンクリート表面における散水時の明度変化と水分の挙動に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.1807-1812, 2013
- 6) 森優太・山中翔太・半井健一郎・西尾壮平：コンクリート構造物の表層品質を対象とした各種試験の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.673-678, 2015

◆鉄道総研刊行物

- 1) 西尾壮平・上田洋：コンクリート表層品質の簡易な非破壊評価手法の開発，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp.5-10, 2014.2
- 2) 西尾壮平：散水によるコンクリート表層品質の簡易評価，鉄道総研報告，Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016.6
- 3) Sohei NISHIO : Simple evaluation of water permeability in cover concrete by water spray method, Quarterly Report of RTRI, Vol.58, No.1, pp.36-42, 2017.1
- 4) 西尾壮平：コンクリートの品質を診断する，RRR(Railway Research Review) 鉄道総研レビュー，Vol.74, No.2, pp.20-23, 2017.2
- 5) 西尾壮平：コンクリート品質の簡易な非破壊評価方法－散水試験－，RRR(Railway Research Review) 鉄道総研レビュー，Vol.74, No.5, p.33, 2017.5

◆講演・国際会議等

- 1) 西尾壮平・上田洋・岸利治：表面色によるコンクリート表層部の水分移動特性評価，土木学会第66回年次学術講演会講演概要集，V-058, pp.115-116, 2011
- 2) 西尾壮平・上田洋・岸利治：コンクリート表面への散水時の諸特性による表層品質の

非破壊評価，コンクリート技術シリーズ 97「構造物表層のコンクリート品質と耐久性
能検証システム研究小委員会（土木学会 335 委員会）第二期成果報告書およびシンポ
ジウム講演概要集」，pp.657-662, 2012

- 3) **西尾壮平・上田洋・岸利治**：散水によるコンクリート表層部の品質評価に関する基礎
的検討，第 66 回セメント技術大会講演要旨，pp.250-251, 2012
- 4) **西尾壮平・上田洋・岸利治**：コンクリート表面における散水時の明度変化および水の
流下特性，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，V-017, pp.33-34, 2012
- 5) **西尾壮平・上田洋・岸利治**：コンクリート表面への散水時の明度変化に着目した表層
品質の簡易評価手法の検討，第 56 回日本学会材料工学連合講演会講演論文集，
pp.11-12, 2012
- 6) **西尾壮平・上田洋・岸利治**：コンクリート表面における散水時の明度変化の飽和度
による表層品質の簡易検査，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，V-372, pp.743-
744, 2013
- 7) **西尾壮平**：コンクリート表層部の物質透過性に関する非破壊評価技術，鉄道総研月例
発表会講演要旨，2014.9, < <http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0040/2014/0040002343.pdf>
>
- 8) **Sohei NISHIO**, Hiroshi UEDA and Toshiharu KISHI : A simple non-destructive evaluation
method for the cover concrete quality by spraying small amounts of water onto the concrete
surface, IALCCE 2014, pp.1176-1181, 2014.11
- 9) **Sohei NISHIO** : A simple non-destructive evaluation method for the cover concrete quality by
flow phenomenon of the sprayed water, WECC 2015 Abstract Book, p186, 2015.11
- 10) **西尾壮平・上田洋・岸利治・半井健一郎**：コンクリート構造物の鉛直面における散水
時の水の流下現象による表層品質の簡易評価，土木学会第 70 回年次学術講演会講演
概要集，V-437, pp.873-874, 2015
- 11) 舌間孝一郎・鈴木脩平・半井健一郎・山田真次・**西尾壮平**・上田洋・酒井雄也・岸利
治：群馬県における新設コンクリート構造物の表層品質調査，土木学会第 70 回年次
学術講演会講演概要集，V-436, pp.871-872, 2015
- 12) 半井健一郎・森優太・舌間孝一郎・**西尾壮平**・上田洋・酒井雄也・岸利治・原克則・
永塚健・後藤剛・宮田嗣実：ボックスカルバートおよび附属試験体における表層品質
測定，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，V-435, pp.869-870, 2015
- 13) 森優太・山中翔太・半井健一郎・**西尾壮平**：セメント種の異なるコンクリートの表層
品質評価に関する各手法の比較，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，V-045,
pp.89-90, 2015
- 14) 森優太・山中翔太・半井健一郎・舌間孝一郎・**西尾壮平**・上田洋・酒井雄也・岸利治・
原克則・永塚健・後藤剛・宮田嗣実：コンクリート構造物の表層品質を対象とした 3
段階検査システムの構築に向けた基礎的研究，土木学会中国支部第 67 回研究発表会

講演概要集, V-2, pp.343-344, 2015

- 15) Yuta MORI, Shota YAMANAKA, Kenichiro NAKARAI, **Sohei NISHIO** and Hiroshi UEDA : Comparative Study of Permeability Tests of Covercrete, ICCEE2015, 2015.10
- 16) **西尾壮平**・半井恵介 : 降雨および日射がコンクリート構造物の表層品質評価に及ぼす影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, V-310, pp.619-620, 2016
- 17) 半井恵介・横田直倫・**西尾壮平** : 鉄道構造物への散水試験と目視評価の試行と一考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, V-311, pp.621-622, 2016
- 18) **西尾壮平** : 画像解析によるコンクリート表層における吸水性状の評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, V-263, pp.525-526, 2017

◆雑誌記事等

- 1) **Sohei NISHIO** : Development of a simple non-destructive evaluation method for permeability of cover concrete by supplying small amounts of water onto concrete surface, JSCE Newsletter, No.30, 2012.7
- 2) **西尾壮平** : コンクリート表層品質の簡易な評価手法 (散水試験), コンクリートテクノ, Vol.35, No.8, pp.85-88, 2016.8

◆受賞・表彰

- 1) **西尾壮平** : 表面への水分付与による簡便性に優れたコンクリート表層品質の非破壊評価技術の開発, 公益社団法人土木学会, 平成 23 年度土木学会賞 吉田研究奨励賞, 2012.6.14
- 2) **西尾壮平** : 散水によるコンクリート表層部の品質評価に関する基礎的検討, 一般社団法人セメント協会, 第 66 回セメント技術大会優秀講演者賞, 2012.7.31
- 3) **西尾壮平** : コンクリート表面における散水時の明度変化と水分の挙動に関する基礎的検討, 公益社団法人日本コンクリート工学会, 年次論文奨励賞, 2013.7.11
- 4) **西尾壮平** : コンクリート表面における散水時の明度変化の飽和度による表層品質の簡易検査, 公益社団法人土木学会, 年次学術講演会優秀講演者表彰, 2013.11.11
- 5) **西尾壮平** : 画像解析によるコンクリート表層における吸水性状の評価, 公益社団法人土木学会, 年次学術講演会優秀講演者表彰, 2017.11.10

◆特許等

- 1) 西尾壮平, 上田洋 : 多孔質材料の緻密さ評価方法および多孔質材料の緻密さ評価システム, 特許第 5399338 号, 2010/7/23
- 2) 西尾壮平, 上田洋, 岸利治 : 多孔質材料の含液状態評価方法および多孔質材料の含液状態評価システム, 特許第 5569738 号, 2010/10/1
- 3) 西尾壮平, 上田洋, 岸利治, 家辺麻里子 : 多孔質材料の品質評価方法および多孔質材

料の品質評価装置，特許第 5901011 号，2012/2/13

- 4) 西尾壮平，上田洋，岸利治：多孔質材料の品質評価方法および多孔質材料の品質評価装置，特許第 6011919 号，2012/8/28
- 5) 西尾壮平，上田洋，岸利治：多孔質材料の品質評価方法，特許第 6179893 号，2013/7/8
- 6) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，特許第 6106055 号，2013/9/19
- 7) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1498350 号，2013/9/19
- 8) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1498126 号，2013/9/19
- 9) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1498351 号，2013/9/19
- 10) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1498352 号，2013/9/19
- 11) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1505170 号，2013/12/25
- 12) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1505469 号，2013/12/25
- 13) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，意匠登録 1539683 号，2015/3/9
- 14) 西尾壮平：多孔質材料の品質評価用器具，特開 2016-166756，2015/3/9

謝 辞

本論文は、公益財団法人鉄道総合技術研究所において筆者が2010年度より本格的に着手した、コンクリート表層品質に関する独自の非破壊評価手法の開発ならびに実務への導入を目的とした一連の研究によって得られた成果をまとめたものです。本論文を結ぶにあたり、筆者の研究および本論文の執筆にご指導、ご助力を賜りました方々への謝意を記します。

本論文を審査していただきました、主査・岸利治教授（東京大学生産技術研究所）、副査・石田哲也教授（東京大学工学系研究科）、副査・北垣亮馬講師（東京大学工学系研究科）、副査・酒井雄也講師（東京大学生産技術研究所）、副査・半井健一郎准教授（広島大学）に、心より感謝し、御礼申し上げます。

岸利治先生には、2010年3月に最初の研究打合せで貴重な時間を割いていただいて以来、本論文をまとめる機会を与えていただくとともに、8年の長い期間にわたって筆者の研究に対する懇切丁寧なご指導とご教示を賜りました。岸先生との議論を通じ、本論文は研究に着手した当初に筆者が想定していた内容から格段に充実することとなりました。あらためて深甚の謝意を感じております。

本論文の審査において副査を務めていただいた、石田哲也先生、半井健一郎先生、北垣亮馬先生、酒井雄也先生には、御多忙の中、議論の時間を割いていただき、本論文の取りまとめに向けて貴重なご指導とご助言を賜りました。本論文の学術的な水準を高めることができ、深く感謝しております。半井健一郎先生には、副査としてのご指導とご助言だけでなく、本研究で得られた成果の実用化の後押しをしていただき、また同年代ということもあって特に親しみと熱意を込めたご指導を幾度となく頂戴しました。心より感謝いたします。

鉄道総合技術研究所における筆者の研究活動は、実験の補助業務を実施していただいた方、研究支援部門の方など多くの方によって支えられ継続することができたものです。本研究の機会を与えていただき、研究の遂行に支援をいただきました、鉄道総合技術研究所の役職員の皆様に深く感謝いたします。特に、筆者が所属する鉄道総合技術研究所コンクリート材料研究室に所属された諸先輩方、同僚の皆様には本論文に関係した実験等に対するサポートはもちろんのこと、本研究に筆者が集中して取り組めるよう、各種の業務において多大なる助力をいただきました。

本研究に着手した当時のコンクリート材料研究室長の上田洋博士には、土木学会の委員会活動を通じて岸先生に引き合わせていただき、筆者がコンクリート表層品質に関する研究に取り組むきっかけを与えていただくとともに、初期の研究テーマにおいて立案から完遂に至るまでに多くの議論をさせていただき、真摯なご意見と熱心なご指導をいただきま

した。また、研究支援部門に異動されて以降も、筆者の研究の進捗状況を見守りつつ、お会いした際にはご助言をくださいました。心より感謝いたします。

上原元樹博士には、コンクリート表層品質の非破壊評価手法を実務に展開する段階で、研究室長として全面的に支援してくださいました。同時に、筆者とは異なる新たな視点で貴重なご指摘とご指導をくださいました。久保俊一博士、曾根康友博士には、筆者の所属する材料技術研究部の部長として研究テーマの実施、研究成果の公表に対するご指導を賜りました。水野清氏、飯島亨氏、工藤輝大氏、鶴田孝司氏、玉井譲博士、佐藤隆恒氏、山崎由紀氏には、それぞれの専門分野をベースとして様々な議論をさせていただいたほか、様々な形で筆者の研究に対するサポートをいただきました。

株式会社ジェイアール総研エンジニアリングの荒畑利一氏、松田由紀子氏、上間綾乃氏には、実構造物での調査や試験体の製作で大変お世話になりました。

株式会社ジェイアール総研サービスの黒沢氏をはじめとする物品担当部署の方には資機材等の調達の際に多大なご協力をいただきました。また、同社の森山氏や森田氏をはじめとする運輸部署の方には現地測定での資機材等の運搬でご協力をいただきました。

株式会社ジェイアール総研情報システムの江良隆一氏、松原広氏、川浦美佐子氏、福士純司氏、田中斗志貴博士には、専用ソフトウェアの開発に多大な貢献をいただきました。

本論文では、実構造物や建設中の構造物を対象として取得したデータが多数あり、各種測定の実施に際して多くの方のご協力をいただきました。西日本旅客鉄道株式会社 大阪工事事務所 施設技術課の皆様には、建設中の工事現場での実験をご提案いただき、実験の実施に際して多大なサポートをいただきました。特に、半井恵介氏、横田直倫氏、前田友章氏、畑勇輝氏、廣江正典氏には現場での対応などでお力添えをいただいたほか、本論文の提案手法の実務導入に向けた検討の深度化にご協力をいただきました。細田暁博士のご尽力で実現した山口県の道路構造物を対象とした実験においては、細田暁博士のほか、田村隆弘博士、二宮純博士をはじめとする多くの方にご協力をいただくと同時に、貴重な意見交換をさせていただきました。群馬県内の構造物を対象とした各種測定の実施において、半井健一郎先生、舌間孝一郎博士には本論文の提案手法を実際に活用いただき、研究者および利用者としての視点から数々の貴重なご助言をいただきました。また、群馬県県土整備部ならびに各土木事務所、公益財団法人群馬県建設技術センターの方には、本論文の提案手法の検証と実用化に対して有益な知見を取得する機会を提供いただきました。東京大学生産技術研究所岸研究室の方には、千葉実験所での実験に際して数々のご協力をいただきました。特に、秋山仁志氏、家辺麻里子氏、横山勇氣氏には、柱試験体の実験で得られた知見を共有させていただき、研究室の仲間のように親しみを込めて接していただきました。また、事務上の諸手続きなどで、岸研究室秘書の田畑和泉氏には大変お世話になりました。

ここにすべての方のお名前を挙げることはできませんが、学協会での活動等を通じて出会った研究者の方との意見交換は良い刺激となり、そこで得られた発想が本研究に少なからず良い影響を与えてくれました。本論文の副査を務めていただいた石田哲也先生、半井健一郎先生、酒井雄也先生との出会いの縁となり、筆者にとって思い出深い土木学会コンクリート委員会（335 委員会）において、特に松田芳範博士、細田暁博士、蔵重勲博士、西田孝弘博士、林和彦博士、岡崎慎一郎博士、吉田亮博士とは熱い議論をさせていただきました。各位の研究成果が大いに参考となったのは当然のこと、研究に取り組む姿勢や情熱は筆者が研究を進めていく上での模範となりました。細田暁博士との出会いにより、筆者の世界は大きく広がることとなりました。土木学会 356 委員会等で見聞きした、岩城一郎博士、佐藤和徳博士、子田康弘博士の東北での取り組みや、表層品質に関する最前線の研究者である伊代田岳史博士、温品達也博士、小松怜史博士を交えての議論は、筆者に本研究の位置付けを再認識させると同時に、一人の研究者としてのさらなる情熱を与えて下さいました。そのほかにも数多くの方から陰に陽にご支援をいただき、ここに本論文をまとめることができました。多大なる感謝を申し上げます。

最後に、筆者を伸び伸びと育ててくれた父母、和洋と孝子、常に前に居てくれる兄の健、筆者を最もよく理解して元気付けてくれる最愛の妻、敬子、そして筆者に无尽蔵の活力を与えてくれる愛しの我が子たち、明人、美佑、俊助に心から感謝します。

2018 年 1 月 西尾 壮平

