

博士論文

排水湿潤連続養生によるコンクリートの
表層品質向上に関する研究

臼井 達哉

論文の内容の概要

論文題目 排水湿潤連続養生によるコンクリートの表層品質向上に関する研究

氏名 白井 達哉

これまでに構築されてきた社会資本の維持管理費用が今後急激に増大していくことが予想されているなかで、新設の構造物に対しては品質の良いコンクリートを施工し、必要に応じた予防保全を施すことで、将来の維持管理費用や労力を低減させるライフサイクルコストの考え方が浸透してきている。コンクリートの耐久性向上技術は、主に初期ひび割れの防止とコンクリート自体の品質向上の観点から検討が行われており、設計、材料・配合、運搬、打込み、養生の各工程において様々な技術が開発されている。

このうち養生に関しては、型枠内部に織布や専用のシートを設置して打込み直後の余剰水や気泡を排出する透水型枠や、脱型後のコンクリート面に設置して表面の湿潤状態を保つ湿潤養生マットなどについて研究が行われ、実用化されている。これらはそれぞれに良好な効果が確認されており、透水型枠はコンクリート表面部の水セメント比の低減による高耐久化や気泡の減少による美観の改善が期待でき、湿潤養生はセメントの水和反応を十分に進行させ、緻密な空隙構造を形成することで耐久性の向上を図ることができる。現状では、養生はこのような打込み初期の排水または硬化後の給水や乾燥防止のどちらか一方を行う場合がほとんどであり、大きな労力や費用を伴わずに両者を複合して実施できる養生方法があればさらなる品質向上が期待できる。

本研究では、以上のような背景を踏まえた上で、打込み直後のコンクリートから生じるブリーディング水などの余剰水や気泡を排出する作用と凝結後の速やかな給水による湿潤養生を脱型せずに連続で行うことができる養生技術「排水湿潤連続養生 (W キュアリング)」を開発した。その後、本技術の適用による品質向上効果の検証、水セメント比等の適用範囲の検証を行った。最後に、様々な構造物の適用に向けた湿潤養生方法や型枠の設置方法の改良、改善に関する検討を行った。

本論文は、全 6 章から構成され、第 1 章では、上記した本論文の研究の背景と目的について論じ、論文の構成について述べた。

第 2 章では、初期の排水および給水・保水養生に関する既往の知見を整理した。まず、コンクリート標準示方書における養生の変遷の中で、養生に求められる機能、基準となる養生期間について整理した。次に、湿潤養生技術に関して近年開発されている脱型後に型枠面に

実施する給水養生、保水養生技術、その品質向上効果についてまとめた。最後に、初期の排水に関する技術について整理した。初期の排水に関する技術では、コンクリートの脱水（排水）のメカニズムについて概説し、コンクリートの排水（脱水）方法、その品質向上効果に関するこれまでの研究成果についてまとめた。

第3章では、排水湿潤連続養生の型枠材料の選定、施工方法の確立、耐久性を主とした養生効果に関する検証、実構造物として壁高欄の一部への試験適用を行った。まず、型枠材として内部に水を供給することができる中空構造をもつポリプロピレン製の透水板をせき板として使用することとした。この型枠材の表面に市販の透水性シートを設置する型枠構造を用いることで、初期の余剰水の排出と湿潤養生の連続養生が可能となる施工方法を構築した。次に、排水と湿潤を連続で行うことによる相乗効果の検証として、排水と湿潤の個々の養生、連続で行う養生がコンクリートの表層に与える影響について検討した。その結果、初期の余剰水の排出のみを行った場合は、コンクリート表層から10mm程度まで緻密化するが、排水湿潤連続養生では10-20mmの内部まで緻密な空隙構造を形成しており、連続で行うことによる相乗効果があることを確認した。次に、排水後の湿潤養生の開始材齢が表層品質に与える影響について検討した。その結果、排水後の給水の開始材齢は、凝結始発が最適であり、最も品質向上効果が大きい結果であった。また、材齢24時間の給水開始でも、十分な品質向上効果を確認できたが、凝結始発よりも早い材齢では、凝結始発、材齢24時間の給水開始よりも表層品質の低下が確認され、実際の施工時には、凝結始発から材齢24時間までに湿潤養生を開始することが適切であることを示した。その後、現場施工において標準的な施工方法を構築するために、壁高欄を想定した実大規模の部材を製作し、各種の耐久性試験を実施した。壁高欄模擬部材の耐久性試験から排水湿潤連続養生の効果により、通常の木製型枠の存置による養生と比較して、透気係数の減少、空隙構造の緻密化、中性化の抑制、塩化物イオンの浸透抑制などの優れた効果が実証された。以上の検討を踏まえ、実構造物として壁高欄の一部への試験適用を行い、排水湿潤連続養生システムの施工性、および実構造物においても室内試験と同様の表層品質の向上効果があることを確認した。

第4章では、前章の結果を踏まえて、耐久性以外の品質向上効果とコンクリートの適用範囲について検証した。まず、低水セメント比への適用した際の品質向上効果を確認することで水セメント比の適用範囲について検討した。その結果、W/C40%におけるコンクリートでは、排水湿潤連続養生により表層から30mm程度までコンクリートの空隙構造が緻密化すること、W/C30%では、表層から10mmまでの範囲の空隙構造の緻密化であり、養生による品質向上効果の範囲が縮小することを確認した。以上の試験結果から、排水湿潤連続養生の品質向上効果は、W/C40%程度以上のコンクリートに対して特に有効であることを示した。次に、表層が緻密化することによる自己収縮・乾燥収縮の低減効果、実構造物における乾燥収縮ひび割れの低減のメカニズムについて検証した。収縮試験結果から、W/C40%ま

では自己収縮と乾燥収縮を含めたコンクリートの収縮ひずみが減少すること、W/C30%では収縮ひずみの低減効果が低下することが明らかになった。実構造物では、コンクリート表層部の水分逸散抑制による乾燥収縮ひずみが低減、コンクリートの内部の水分の移動が抑制されることによって乾燥収縮が緩やかに進行すること、コンクリート表層からの吸水が少なく、乾湿繰り返しによる影響を受けにくいことといった総合的な効果により乾燥収縮ひび割れを著しく抑制できることを示した。最後に、長期養生が効果的であるフライアッシュコンクリートへの適用効果について検討した。検討した結果、材齢 91 日までの長期の封かん養生よりも材齢 7 日までの排水湿潤連続養生のほうが内部まで空隙構造が緻密化しており、短い養生期間でも品質向上効果が高いことを確認した。

第 5 章では、各種構造物への適用に向けた改良として頂版を同時施工する際の給水方法、トンネルの覆工コンクリートの SL 下部への適用について検討した結果を示した。側壁、頂版を同時にコンクリートの打込みを行う施工条件では、壁高欄のように天端からの給水ができず、これまでの給水方法では均一な湿潤養生を容易に実施することが難しい。そのため、このような施工条件では、透水型枠を分割し、最上部に 4 面シールした小型の透水型枠を設置する改良を行った。余剰水の排出後に透水型枠内部をホース等で注水し型枠内部を満水にすることで、透水シートを通じてコンクリート上部から下部まで均一な湿潤養生とすることが可能となった。覆工コンクリートの SL 下への適用では、SL 下のセントルを内空間側にセットバックし、セットバックした空間に透水板、透水性シート等が一体となったユニットを設置する改良を行った。この改良によりセントルが移動後も透水板、透水性シートを残置することができるため、脱型をせずに湿潤養生ができ、トンネルの施工サイクルを維持することができた。

第 6 章は、本論文で得られた成果についてまとめた。

目次

第1章 序論	
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の概要と構成	3
第2章 養生に関する既往の研究	
2.1 概要	6
2.2 コンクリート標準示方書における養生の変遷	6
2.3 給水・保水養生技術と養生効果	11
2.3.1 給水・保水技術の概要	11
2.3.2 給水養生技術	12
2.3.3 保水養生技術	15
2.3.4 養生がコンクリート品質に与える影響	16
2.4 初期の排水に関する技術	22
2.4.1 排水（脱水）に関する技術の概要	22
2.4.2 透水型枠の分類と排水量	23
2.4.3 初期の排水による品質向上効果	26
2.5 まとめ	32
第3章 排水湿潤連続養生の開発	
3.1 概要	36
3.2 型枠材料の選定と施工方法の確立	36
3.3 排水湿潤連続養生の相乗効果の検証	40
3.3.1 試験の目的	40
3.3.2 供試体の製作と養生方法	40
3.3.3 養生効果の確認試験	42
3.3.4 試験結果	44
3.4 給水開始時間がコンクリート表層品質に及ぼす影響	54
3.4.1 試験の目的	54
3.4.2 供試体の製作と養生方法	54
3.4.3 測定項目	56
3.4.4 試験結果	58
3.5 壁高欄模擬部材の製作と耐久性向上効果の検証	67
3.5.1 概要	67
3.5.2 部材の製作と養生方法	67

3.5.3	養生効果の確認試験	69
3.5.4	試験結果	71
3.6	橋梁上部工壁高欄への試験施工	80
3.6.1	構造物の概要	80
3.6.2	施工方法	80
3.6.3	非破壊試験による品質確認試験	83
3.7	まとめ	86
第4章 排水湿潤連続養生によるコンクリートの品質向上効果		
4.1	概要	88
4.2	水セメント比の適用範囲	89
4.2.1	試験の目的	89
4.2.2	供試体の製作と養生方法	89
4.2.3	測定項目	91
4.2.4	水セメント比 40%における試験結果	93
4.2.5	水セメント比 30%における試験結果	101
4.3	自己収縮・乾燥収縮に与える影響	111
4.3.1	試験の目的	111
4.3.2	試験方法	112
4.3.3	試験結果	114
4.3.4	実構造物における乾燥収縮ひび割れの抑制の要因	120
4.4	フライアッシュコンクリートへの適用効果	123
4.4.1	試験の目的	123
4.4.2	供試体の製作と養生方法	124
4.4.3	測定項目	126
4.4.4	試験結果	128
4.5	まとめ	138
第5章 様々な構造物への適用に向けた改良		
5.1	概要	141
5.2	壁部材と頂版を同時施工する条件における給水方法	141
5.2.1	改良の概要	141
5.2.2	給水方法の改良	142
5.2.3	模擬部材の作製と効果の検証	143
5.3	覆工コンクリートへの適用	147
5.3.1	改良の概要	147

5.3.2	覆工コンクリート用の型枠構造	148
5.3.3	模擬部材の作製と効果の検証	148
5.3.4	実構造物への適用	157
5.4	まとめ	165
第6章 結論		
6.1	本研究の成果とまとめ	167
6.2	今後の展望	169
	謝辞	170
[付録]	排水湿潤連続養生の適用による表層部の水セメント比の低減効果	171

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

我が国では、高度経済成長期を中心に道路や鉄道をはじめ様々な社会基盤施設が集中的に整備され、今後急速に老朽化が進行すると想定されている。これまでに構築されてきた社会資本の維持管理費用が今後急激に増大していくことが予想されているなかで新設の構造物に対しては品質の良いコンクリートを施工し、必要に応じた予防保全を施すことで、将来の維持管理費用や労力を低減させるライフサイクルコストの考え方が浸透してきている。近年の技術提案型の入札制度の拡大とも合わせてコンクリートの品質として耐久性向上技術に関する関心が高まり、盛んに研究開発が行われている。

コンクリートの耐久性向上技術は、主に初期の温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの抑制とコンクリート自体の品質向上の観点から検討が行われており、設計、材料・配合、運搬、打込み・締固め、養生の各工程において様々な技術が開発されている。このうち養生に関しては、現行のコンクリート標準示方書¹⁾において「コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、水密性、鋼材を保護する性能などの所要の品質を確保するため、打込み後の一定期間を硬化に必要な温度および湿度を保ち、有害な作用の影響を受けないように保護する作業」と定義されている。このように養生は、コンクリートを適切に育て、所要の強度、耐久性を保有、発揮させる上で極めて重要な工程であるため、これまで図 1.1.1 に示すように様々な養生手法が研究開発されており、型枠内側に織布や専用のシートを設置して打込み直後の余剰水や気泡を排出する透水型枠^{2), 3)}や、脱型後のコンクリート面に設置して表面の湿潤状態を保つ湿潤養生マット^{4), 5)}などについて研究開発が行われ、実用化されている。

これらはそれぞれに良好な品質向上効果が確認されており、透水型枠はコンクリート表面部の水セメント比の低減による高耐久化や空気泡の減少による美観の改善が期待でき、湿潤養生はセメントの水和反応を十分に進行させ、緻密な空隙構造を形成することで耐久性の向上を図ることができる。しかし、単なる乾燥防止を上回る効果を狙った積極的な養生技術、養生方法を採用する場合でも、硬化前の余剰水の排水または硬化後の給水のどちらか一方を行う場合がほとんどである。コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比を低減させた上で、コンクリート強度が脱型可能な強度に達していなくても、セメントの水和反応が活発な凝結終了後から速やかに湿潤養生を開始させることが実施できる養生方法があれば、コンクリート表層の空隙構造を著しく緻密化させて、耐久性の飛躍的な向上効果が期待できると考えた。

本研究では、以上のような背景を踏まえた上で、打込み直後のコンクリートから生じるブリーディング水などの余剰水や気泡を排出する作用と凝結後の速やかな給水による湿潤養生を脱型せずに連続で行うことができる養生技術「排水湿潤連続養生(Wキュアリング)」の開発を試みた。まず、実構造物への適用を考慮し、より施工性がよくかつコンクリートの側圧に耐えられる型枠材や施工方法を選定した。次に、材齢初期の排水と湿潤養生を各々、

または連続で行うことによる品質向上効果に関する検証と排水湿潤連続養生における給水開始時間が表層品質に与える影響について検証することで品質向上の観点から最適な給水開始時間と実務上適用可能な給水時間について検討を行った。そして、現場施工において標準的な施工方法を構築するために、排水湿潤連続養生を施した壁高欄を模擬した部材を製作し、表層の品質向上、耐久性向上効果を確認した。その後、実構造物への試験適用を行い、実構造物での様々な埋設物や周囲との取り合いがある条件下において所定の施工方法と性能が確保されるかを確認した。

さらに、適用範囲を検証するため低水セメント比への適用した際の品質向上効果について検証するとともに、表層の緻密化による耐久性以外の品質向上効果として自己収縮、乾燥収縮を含む収縮ひずみに与える影響、フライアッシュコンクリートへの適用効果について検討した。

最後に、様々な構造物の適用に向けた湿潤養生方法や型枠の設置方法等の改良、改善に関する検討を行った。

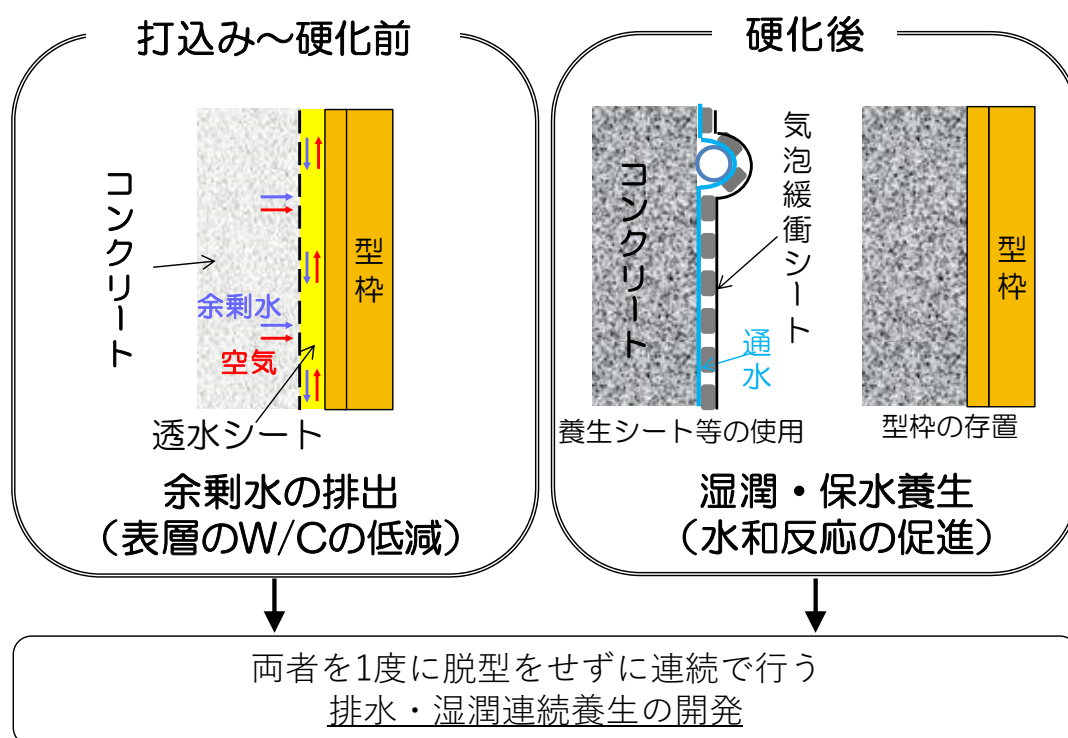


図 1.1.1 既往の養生技術と本技術の概念

1.2 本論文の構成と概要

本論文の構成を図 1.2.1 に示す。全 6 章で構成される。

第 1 章は、本章であり、研究の背景と目的、論文の構成について述べた。

第 2 章では、養生に関する既往の知見として、コンクリート標準示方書における養生の変遷を整理した。加えて、打込み初期の排水または湿潤養生によるコンクリート表層の品質改善に関する既往の研究を整理した。

第 3 章では、排水連続養生技術の開発を行った。まず、実構造物への適用、施工性を考慮した型枠材の選定、施工方法について検討を行った。次に、材齢初期の排水と湿潤養生を各々、または連続で行うことによる表層品質の検証を行うことで、連続で行うことでの品質向上効果について考察した。その後、施工方法の中で、排水終了後の湿潤養生の開始材齢がコンクリートの表層品質に与える影響について検討し、品質向上の観点から最適な給水開始時間と実務上適用可能な給水時間について検討を行った。最後に、現場施工において標準的な施工方法を構築するために、壁高欄を模擬した部材を作成し、耐久性向上効果の検証を行った。

第 4 章では、まず、低水セメント比への適用した際の品質向上効果を確認することで水セメント比の適用範囲について検討した。次に、本技術の適用による耐久性向上以外の効果として、自己収縮、乾燥収縮の低減効果について検証した。加えて、ポゾラン反応は緩やかに進行することから長期養生が効果的とされていたフライアッシュコンクリートへの適用効果について検討した。

第 5 章では、様々な実構造物への適用に向けた改良について記載した。まず、ボックスカルバートや橋梁の PC 箱桁等で側壁、頂版を同時にコンクリートの打込みを行う施工条件における給水方法について検討した。頂版を同時施工する際は、余剰水の排出は問題なくできるが第 4 章で検討した壁高欄のように天端からの給水を行うことができない。そのため、排水後の湿潤養生を適切に行う給水方法について検討を行った。次に、トンネルの覆工コンクリートの SL 下部への適用に向けた改良について検討した。覆工コンクリートの SL 下部は、凍結防止剤による塩害劣化を受けるため、耐久性の向上が求められている地域がある。一般的に覆工コンクリートは、通常セントルを内型枠としてセットし、防水シートとのスペースにコンクリートの打込みを行うため、排水湿潤連続養生用の型枠の設置方法について検討を行った。以上の適用部位にあわせた改良について整理した。

第 6 章は、結論であり、本研究で得られた成果についてまとめる。

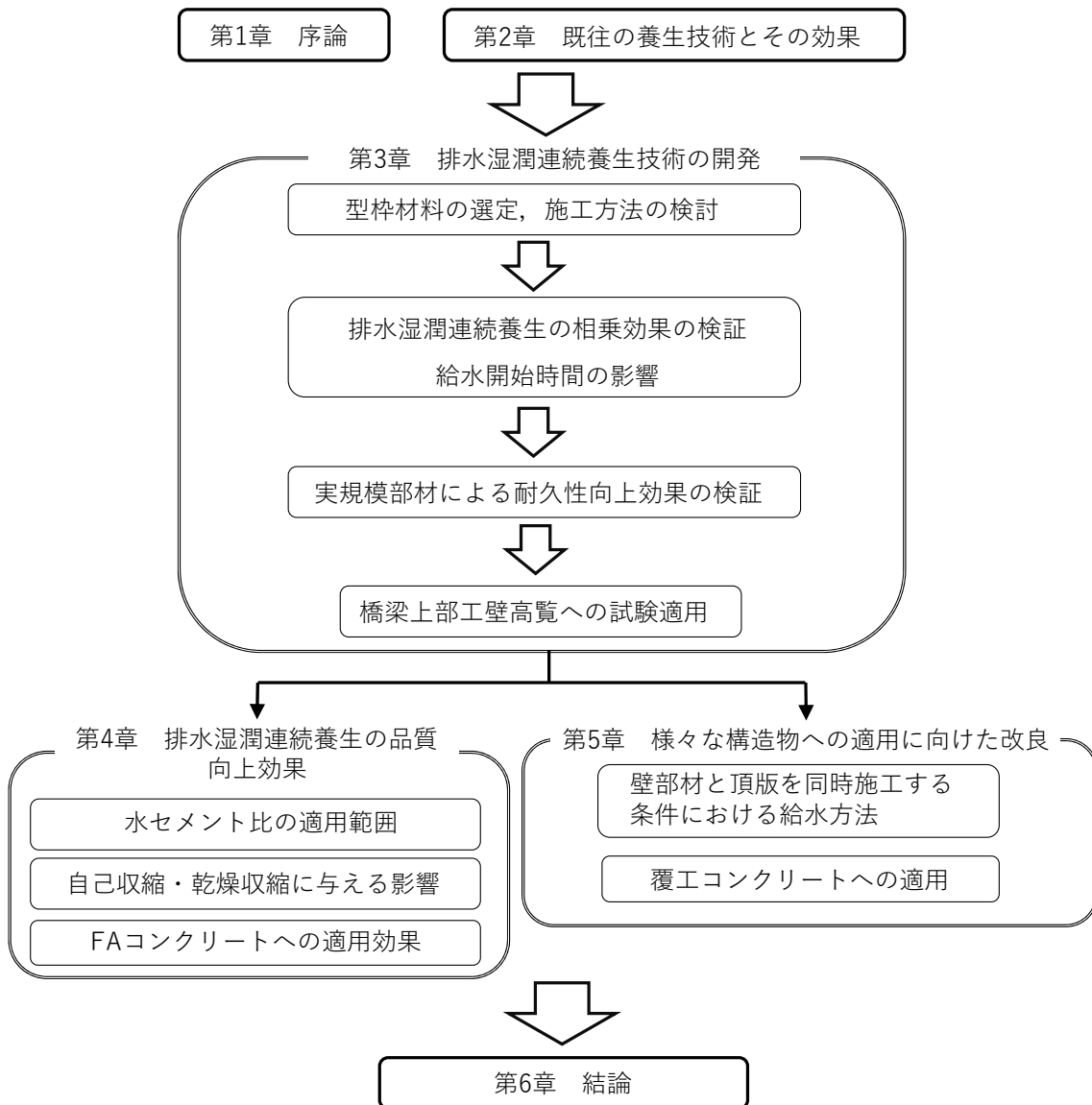


図 1.2.1 本論文の構成図

第1章の参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，2018.3
- 2) 田中健治郎：透水型枠，建築技術，pp.124-125，1990.7
- 3) 笠井芳夫，長野基司，佐藤孝一，菅一雅_透水性型枠および合板型枠を用いたコンクリートの品質判定に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.10, No.2, pp441-446, 1988.6
- 4) 野乃目洋，月永洋一，高柳彰宏，藤井真之：吸水性ポリマ及び水膨潤ウレタンを用いたコンクリート養生マットの養生効果に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.56, pp.325-332, 2002
- 5) 古川幸則，福留和人，庄野昭：コンクリートの浸水養生システムー型枠の取り外し後の給水養生工法の実用化と効果ー，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol.49, No.3, 2011.3

第2章 養生に関する既往の研究

2.1 概要

第2章では、初期の排水および給水・保水養生に関する既往の知見を整理した。

まず2.2にて、コンクリート標準示方書における養生の変遷の中で、養生に求められる機能、基準となる養生期間について整理した。次に2.3にて湿潤養生技術に関して近年開発されている脱型後に型枠面に実施する給水養生、保水養生技術、その品質向上効果についてまとめた。2.4では、初期の排水に関する技術について整理した。初期の排水に関する技術では、コンクリートの脱水（排水）のメカニズムについて概説し、コンクリートの排水（脱水）方法、その品質向上効果に関するこれまでの研究成果についてまとめた。2.5では、第2章のまとめについて記載する。

2.2 コンクリート標準示方書における養生の変遷

現行のコンクリート標準示方書¹⁾では、養生とは「コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、水密性、鋼材を保護する性能などの所要の品質を確保するため、打込み後の一定期間を硬化に必要な適切な温度および十分な湿度に保ちかつ有害な作用の影響を受けないように保護する作業」と定義されている。つまり養生には、コンクリートが所要の性能を確保するため十分な水和反応が進行するように、①湿潤状態に保つこと②適切な温度制御、③有害な作用からの保護が求められている。表2.2.1に示方書に示されている養生の基本を示す。この中でセメントを十分に水和反応させ、所要の強度、耐久性を保有、発揮させるためにコンクリート全般に対して重要な養生となるのが湿潤に保つこと（湿潤養生）である。このことは、昭和15年制定のコンクリート標準示方書において養生に関して、「養生作業の中で硬化中に十分湿気を与えることが最も大切」と明記されているおり、吉田徳次郎先生の『コンクリート及鉄筋コンクリート施工法』²⁾に同様の内容が記載されていることから従来より養生の基本となるものである。

コンクリート標準示方書に記載されている標準的な湿潤養生期間¹⁾を表2.2.2に示す。セメントの種類と日平均気温に応じて養生期間が定められており、この期間中は湿潤養生に保つことが必要であると記載されている。これは、コンクリートを湿潤状態に保つことで水和反応に必要な水分を供給または閉じ込めておくことで水和反応が持続することで、コンクリートの所要の品質を発揮させることができる。そのため、水和反応の速度が異なるセメントの種類や水和反応に影響を与える環境温度によって場合わけされていると考えられる。しかし、この養生期間の明確な根拠については、不明である³⁾。

表 2.2.1 養生の基本¹⁾

目的	対象	対策	具体的な手段
湿潤状態に保つ	コンクリート全般	給水	遮断, 散水, 湿布, 養生マット等
		水分逸散抑制	せき板存置, シート・フィルム被膜, 膜養生剤等
温度を制御する	暑中コンクリート	昇温抑制	散水, 日覆い等
	寒中コンクリート	給熱	電熱マット, ジェットヒーター等
		保温	断熱性の高いせき板, 断熱材等
	マスコンクリート	冷却	パイプクーリング等
		保温	断熱性の高いせき板, 断熱材等
工場製品	給熱	蒸気, オートクレーブ等	
有害な作用に対して保護する	コンクリート全般	防護	防護シート, せき板存置等
	海洋コンクリート	遮断	せき板存置等

表 2.2.2 湿潤養生期間の標準¹⁾

日平均気温	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種
15°C以上	3日	5日	7日
10°C以上	4日	7日	9日
5°C以上	5日	9日	12日

表 2.2.3 に示方書における養生の記述の変遷, 表 2.2.4 に示方書における具体的な養生方法のまとめを示す. 昭和 15 年制定の鉄筋コンクリート標準示方書⁴⁾において養生に関して明記されている. その中で「養生作業の中で硬化中に十分に湿気を与えることが最も大切」と記述されており, 養生方法としては, 筵, 布, 砂等で覆い, 散水すること, せき板が乾燥の恐れがある場合には, せき板にも散水することと明記されている. その後, 昭和 24 年の示方書⁵⁾では, 「水和の観点から, 理想は少なくとも 6 ヶ月間湿潤状態に保つ必要がある」とされ, 現在では考えられないような長期間の湿潤養生がもとめられており, 当時は養生による水分保持がコンクリートの水和反応に与える影響が大きく, 湿潤状態に保つこと(湿潤養生)を重要視していたと考えられる. また, 「しかし, このように長時間の湿潤養生は, 一般の構造物では不可能であり, また不経済でもある. それは, 硬化した普通の厚さのコンクリート中の自由水が蒸発によって失われるには, 相当の日時を要するから内部のコンクリートは, その間に相当に硬化すること, コンクリートは材齢の初期において強度の増進が著しく, 湿潤養生の利益の大部分は初期の養生期に得られ, 長い湿潤養生をしても得るところが割合に少ないこと, 等の理由による.」とされ, 経済的な概念が考慮されている. この記載から当時はコンクリートの表層の品質(強度)は期待されていないこと, 理想とする養生に対して実施可能な養生と構造物の要求品質の考え方が明確に示されている. 昭和 49 年の示方書⁶⁾では, 養生方法として初めて膜養生の記述が追加された. ただし, 「膜養

生は、一般にむしろ、砂等をぬらしたり散水するなどの湿潤養生が困難な場合に用いられるもので、コンクリートの表面に膜のできる養生剤を散布して水の蒸発を防ぐ養生方法である。」とされ、湿潤養生ではなく、水分逸散抑制の効果を期待したものとなっており、その使用も一般的な湿潤養生が困難な場合という限定的な記述となっている。

昭和 61 年の示方書⁷⁾では、「強度増進のためには、できるだけ長いのがよいが、コンクリートは材齢の初期における硬化増進が著しく、長期間湿潤養生をすることは一般の構造物については困難であり、また不経済である」とされ長期的な養生に対して否定的なコメントが記載されている。加えて、養生は強度増進のためと記載されており、ここまではコンクリートの品質＝強度と考えられており、その他の品質についての記載はない。平成 3 年の示方書⁸⁾では、「コンクリートの強度、耐久性、水密性等の品質を高めるためには、できるだけ長く湿潤状態を保つことがよい。これは、コンクリートを十分に硬化させることと、硬化中の乾燥による収縮をできるだけ小さくするためである。」と改定され、強度に加えて、耐久性、水密性、収縮低減とコンクリートの品質の確保に向けた記載となった。さらに、平成 3 年の示方書における特殊型わくおよび特殊支保工では、「最近では、ポリマーセメントモルタルあるいはポリマー含浸コンクリート等により製作され、そのまま部材の一部として使用される型枠や、水セメント比を低減させかつ気泡やあばたをなくしてコンクリート表面部の密実性を向上させる透水型型わくや吸水型型わくが、特に耐久性を要求される環境において使用されている。」と記載されてことから、耐久性がコンクリートの品質の中で重要な項目となったこと、耐久性を向上することができる新たな工法が開発されてきたことが確認できる。平成 8 年の改定⁹⁾では、「本文に型枠で保護されていないすべてのコンクリート面に対して養生を施す」との記載がある。2002 年の改定では、この記述がなくなっていることから、平成 8 年の制定までの養生は型枠面以外のコンクリートを対象としていたと考えられていた。しかし、2002 年の改定¹⁰⁾以降は、工期短縮に伴う型枠の転用に伴う早期脱型する場合や、コンクリートの耐久性、水密性の観点から、型枠面についても脱型後において養生が必要であると考えられ始めてきたと推測される。そのため、現在では、脱型後も何らかの方法で養生を実施することが一般的になってきているが、壁などの垂直面に養生を実施することは非常に難しいため、様々な養生工法が研究開発され、技術対案への適用等の実績を積んでいる状況である。

養生方法についても 2012 年¹¹⁾に大きく改定されており、せき板存置等による「水分の逸散を抑制する養生」がせき板を取り外した際に濡れ状態になっている場合は、給水養生と同様の効果が得られると記載され、コンクリートの品質を確保するため最も理想的な方法である給水養生と水分の逸散を抑制する養生が同等であるといった記述に変更となっている。しかし、これまでの示方書の変遷を見ると、水分一散養生は、あくまで湿潤養生が困難な場合において実施する養生であり、コンクリートは、基本的に水和反応に伴って自己乾燥していることを考慮すると給水養生と水分の逸散を抑制する養生を行ったコンクリートの表層品質が同等ではないと考えられる。

表 2.2.3 示方書における養生技術の変遷

制定年	解説の記載内容の抜粋
昭和15年	コンクリート養生作業の中で、普通の場合には、コンクリートが過早に乾燥しない様に、硬化中に十分 湿気を与えることが最も大切 である。
昭和24年	セメントの主成分の 水和作用の点 から考えると、理想としては、少なくとも 6ヶ月間コンクリートを湿潤状態に保つ必要がある 。しかし、このように 長時間の湿潤養生は、一般の構造物では不可能であり、また不経済 でもある。それは、硬化した普通の厚さのコンクリート中の自由水が蒸発によって失われるには、相当の日時を要するから内部のコンクリートは、その間に相当に硬化すること、コンクリートは材齢の初期において強度の増進が著しく、湿潤養生の利益の大部分は初期の養生期に得られ、 長い湿潤養生をしても得るところが割合に少ないこと 、等の理由による。
昭和42年 昭和49年	セメントの水和作用の点から考えると、コンクリートを できるだけ長く保つのがよい 。しかし、長時間の湿潤養生を行なうことは、一般の構造物では不可能であり、また、不経済でもある。硬化した普通の厚さのコンクリート中の自由水が蒸発によって失われるには、相当の時間を有するから、内部のコンクリートはその間に相当硬化する。また、コンクリートは材齢の初期における硬化の増進がいちじるしく、湿潤養生の利益の大部分は初期の養生期に得られ、 長い湿潤養生をしても利益は割合に少ない 。
昭和61年	コンクリートの強度増進のためには、できるだけ長く湿潤状態に保つのがよい。しかし、コンクリートは材齢初期における硬化の増進が著しく、 長期間湿潤養生をすることは、一般の構造物については困難であり、また、不経済 でもある。
平成3年	コンクリートの強度、 耐久性、水密性等 の品質を高めるためには、できるだけ長く湿潤状態に保つのがよい。これは、コンクリートを十分に硬化させることと、硬化中の乾燥による収縮をできるだけ小さくするためである。しかし、 長期間湿潤養生をすることは、一般の構造物においては困難であり、また不経済 である。しかも、湿潤養生の効果の大部分は初期の養生期に限られている。
平成8年	普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いる場合の標準的な養生日数を、 型枠で保護されていないすべての面のコンクリートに対し、それぞれ5日間、3日間以上とした 。

表 2.2.4 示方書における具体的な養生方法

制定年	記載内容の概要
昭和15年	筵、布、砂等で覆い、散水すること、せき板が乾燥の恐れがある場合には、せき板にも散水すること
昭和49年	膜養生 は、一般にむしろ、砂等をぬらしたり散水するなどの湿潤養生が困難な場合に用いられるもので、コンクリートの表面に膜のできる養生剤を散布して水の蒸発を防ぐ養生方法である。
2007年	せき板(型枠)へ散水することが湿潤状態を保つことに直接つながらないため削除された。また、膜養生の使用にあたっては、湿潤養生と同等の効果を得ることが難しく、施工方法等の影響も受けやすいため、目的を明確にしたうえで、目的および要求性能に応じた膜養生剤の選定し、散布量や施工方法等について信頼できる資料あるいは試験によって確認するのがよい。
2012年	コンクリートの品質を確保する 最も理想的な方法としての「給水養生」と 、実務における現実的な制約条件から採用されることの多いせき板存置等による 「水分の逸散を抑制する養生」の違いを示し 、コンクリートの打上がり面は できる限り給水養生をすることが望ましい 。せき板に接するコンクリート表面が、せき板を取り外した際に濡れ状態になっている場合は、その面が給水状態と同程度の養生がなされているものとみなせ、 せき板に接するコンクリート表面は、給水養生と同様の効果が得られる。

表 2.2.5 平成3年版コンクリート標準示方書における特殊型わくに関する記載内容

制定年	解説の記載内容の抜粋
平成3年	最近では、ポリマーセメントモルタルあるいはポリマー含浸コンクリート等により製作され、 そのまま部材の一部として使用される型枠 や、水セメント比を低減させかつ気泡やあばたをなくしてコンクリート表面部の密実性を向上させる 透水型型わく や 吸水型型わく が、特に 耐久性を要求される環境 において使用されている。

2.3 給水・保水養生技術と養生効果

2.3.1 概要

ここでは、近年開発されている脱型後に型枠面に実施する給水養生、保水養生技術について、代表的なものについて整理した。2.3.2 に、給水養生技術、2.3.3 に保水養生（封かん養生）技術を記載する。加えて、給水養生、保水養生がコンクリートの品質に与える影響について整理した。

2.3.2 給水養生技術

(1) 浸水養生工法(アクアカーテン)^{12)・13)}

浸水養生工法は（以降、アクアカーテンと記載）、浸水養生シートとコンクリートとの間の空気を吸引することによってシートをコンクリート表面に密着させ、密着した空間に水を供給することにより、コンクリート表面に水膜を形成するものである。これにより、型枠を取り外した後のコンクリート鉛直面や傾斜面に対し、給水養生を可能とした養生技術となっている。アクアカーテンの構成概要を図 2.3.1、養生システムの構成を写真 2.3.1 に示す。実施手順として、型枠等を脱型後、①給水ホースを取付け、浸水養生シートの仮留めをする。②浸水養生シートの下端部に吸引口を取り付け、吸引管と吸引器を取付け、吸引器を稼動し、養生シートをコンクリート面に密着させる。③密着後、給水ポンプに接続した給水ホースから余剰水を供給することで、給水養生を開始する。浸水養生シートは、親水性の不織布と気泡緩衝シートの 2 層からなるシートで保水性を確保しているものである。

本工法を適用した際の品質向上効果として、厚さ 0.3m、高さ 1.2m、長さ 7.2m の壁状試験体を作成し、各種試験を実施し検証している。図 2.3.2 に材齢約 4 ヶ月におけるトレント式表層透気係数の試験結果を示す。木製型枠存置 5 日より給水養生を 1 週間を行った供試体の方が透気係数が小さくなっており、本工法を適用することによる表層の品質向上を確認している。なお、コンクリートは、水セメント比 55% の普通ポルトランドセメントを使用している。

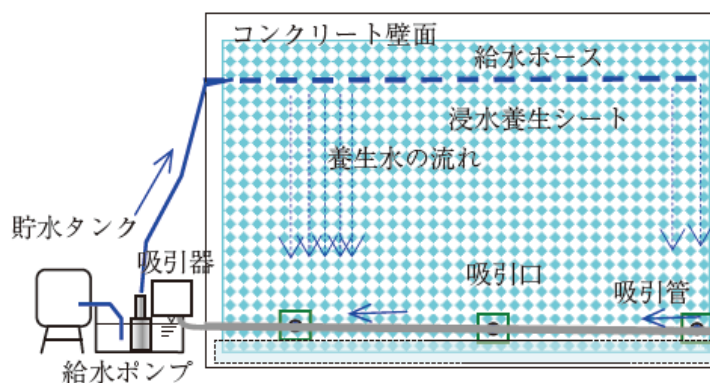


図 2.3.1 浸水養生システムの構成¹²⁾



写真 2.3.1 浸水養生システムの構成¹²⁾

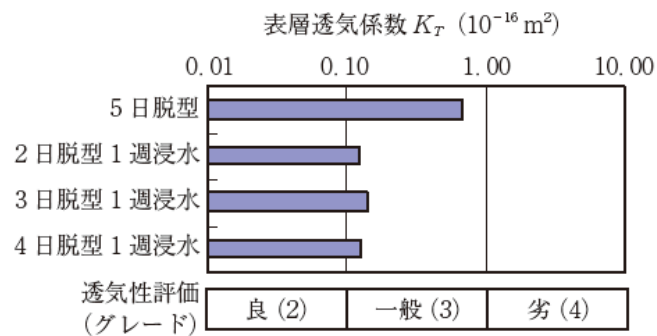


図 2.3.2 トレント式透気係数の試験結果¹²⁾

(2) コンクリート湿潤養生マット (うるおんマット)^{14) 15)}

このコンクリート湿潤養生マットは、図 2.3.3 のように湿潤養生と保温養生を同時に行えるマットとして開発された。厚さ 1.3mm の不織布に水膨潤ウレタンを点在させた湿潤養生層と厚さ 10mm の発砲ポリエチレンの保温層を積層した二重構造のマットである。養生マットにハトメ加工を施すことにより、鉛直面にも適用可能なマットとなっている。

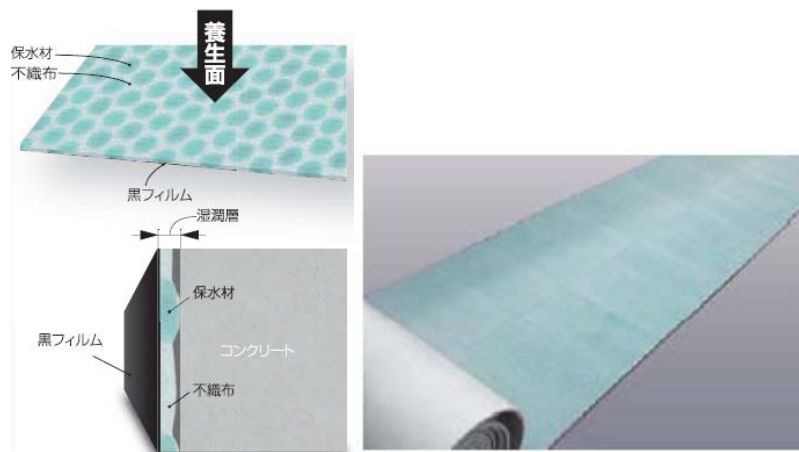


図 2.3.3 うるおんマット¹⁵⁾

(3) 覆工コンクリートの給水養生工法 (キュアマイスター)^{16)・17)}

覆工コンクリートのトンネル軸方向の打設延長は 10.5 - 12.5m であり，周長が 23m 程度あるため，1 回あたりの養生面積は約 230m²となる．また，養生面は図 2.3.4 に示すように曲面であり，天端部は天地逆，肩部から側壁部にかけては鉛直壁へと変化する．このため，覆工コンクリートの養生は，重力に逆らう天端部への均一な給水を行い，肩部から側壁部にかけては養生水の速やかな分散をはかる必要がある．

覆工コンクリートの給水養生工法 (以降，キュアマイスターと記載)では，写真 2.3.2 に示す 2 種類の特殊養生マット(「特殊薄膜不織布」，「特殊凸凹マット・不織布」)と給水システムを組み合わせることで，1m³当たり 1.8 リットルと少ない給水量で均一な湿潤養生を実施することができる．実施手順として①トンネル天端部分では 2 種類の特殊養生マット (覆工コンクリート側に「特殊薄膜不織布」，トンネル内空側に「特殊凸凹マット・不織布」)を用い，両マットで多数の孔の空いた給水管を挟み込むように配置する．②トンネル側壁部分では天端部分で使用した「特殊凸凹マット・不織布」をそのまま連続して使用し，覆工コンクリート面を覆うように配置する．これらの特殊養生マットの配置後に，空気膨らむバルーンなどの抑え部材を用いて，トンネル内空側から特殊養生マットを覆工コンクリート面に押し付け，給水管を介して給水を行う．加えて，天端部から供給した養生水は，肩部から側壁部を経て，最終的に覆工コンクリート脚部に到達する．養生水をそのまま流下させると路盤が泥濘化し，路床の支持力を損なう可能性もあることから，キュアマイスターでは図 2.3.5 に示すように覆工コンクリート脚部のマットを折り曲げて集水し回収できる構造としている．

本工法を適用した際の品質向上効果を検証するために，高さ 1m，幅 0.5m，奥行き 0.3m の覆工の側壁部を模擬した供試体を作製し各種試験を通じて養生効果を確認している．供試体は，打ち込み翌日に，養生面となる面のみ脱型し材齢 7 日まで養生を行った．コンクリートは，実際の工事で使用した二次覆工で用いたコンクリート (30-18-20N, W/C: 53.5%)

を用いた。表 2.3.1 にトレント式表層透気係数の試験結果，図 2.3.6 に濃度 3%の NaCl 水溶液に 6 ヶ月間浸漬した時の各深さの全塩化物イオン濃度を示す。トレント式の表層透気係数では，材齢 12 ヶ月においてキュアマイスターの方が封緘養生や養生なしよりも値が小さく，塩化物イオンの濃度分布において，キュアマイスターを適用することで内部への塩分浸透が抑制されており，表層コンクリートの品質向上効果を確認している。

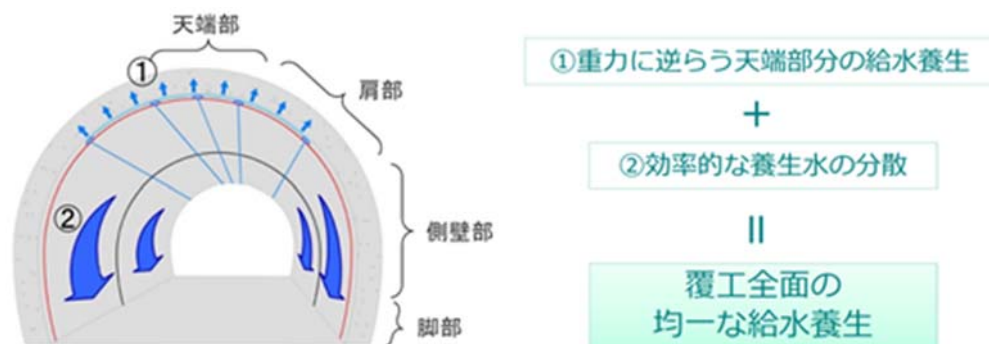
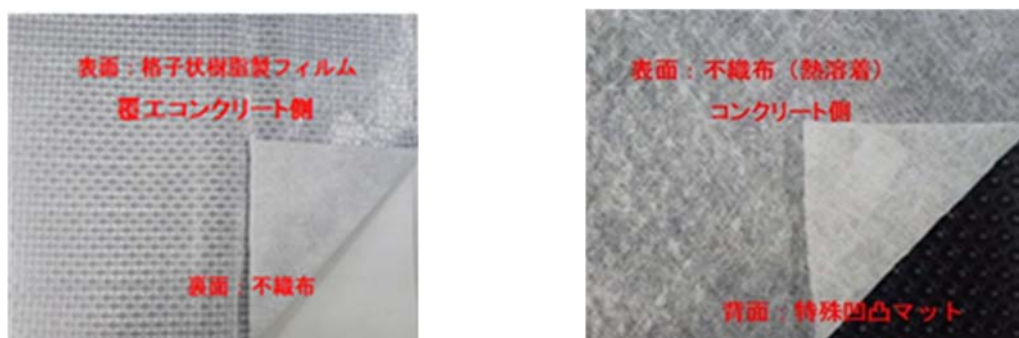


図 2.3.5 覆工コンクリートの給水養生工法の概念図¹⁶⁾



特殊薄膜不織布(天端部分) 特殊凹凸マット・不織布(側壁部分)・形状拡大

写真 2.3.2 特殊養生マット¹⁶⁾

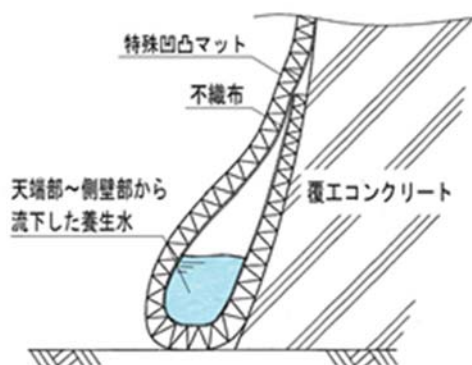


図 2.3.6 余剰水の端末処理方法¹⁶⁾

表 2.3.1 トレント式透気係数の測定データ [単位: $10^{-16}m^2$]

材齢	①キュアマイスター	②封緘養生	③養生無し
材齢 28 日	0.029	0.495	1.243
材齢 6 か月	0.385	1.178	1.775
材齢 12 ヶ月	0.263	1.093	1.268

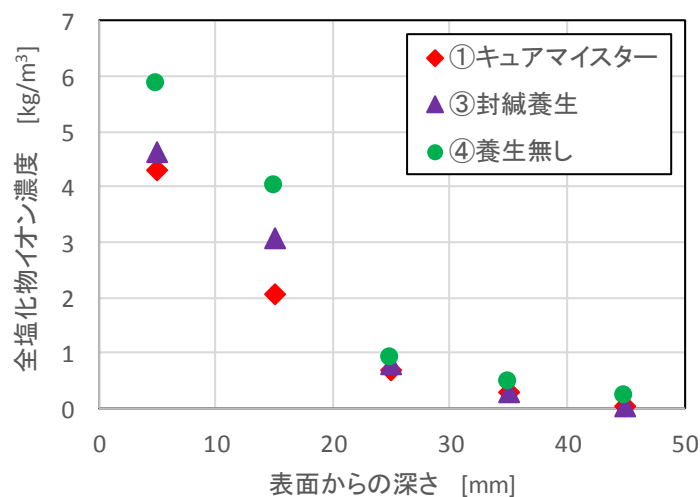


図 2.3.7 全塩化物イオン濃度

2.3.3 保水養生技術

(1) コンクリート保水養生テープ¹⁸⁾

このコンクリート保水養生テープは、図 2.3.8 に示すとおり、ポリオレフィン系白色フィルムの基材に、コンクリートに接着し易いアクリル系粘着剤を塗布した片面粘着テープである。型枠を取り外した直後のコンクリート表面に貼りつけることで、コンクリート表面からの水分蒸発を防ぐ保水養生技術である。その効果は、気中養生と比較して圧縮強度の増加、中性化の抑制、水分逸散の抑制を付与できるとしている。

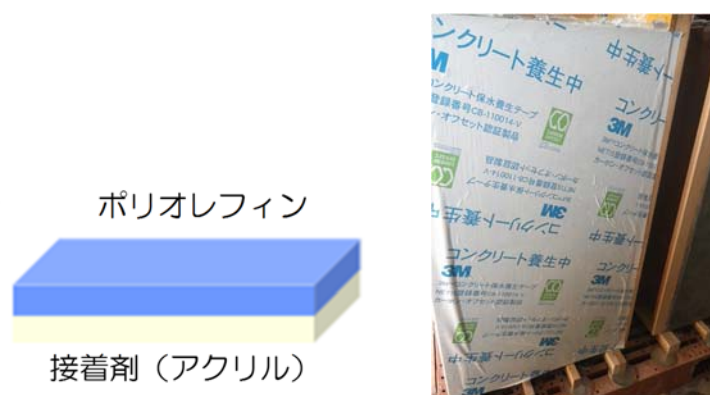


図 2.3.8 保水養生テープの構造とコンクリートへの設置状況

(2) 高撥水性シール工法 (美シール工法) 19)・20)

高撥水性シール工法は、高い撥水性を有する熱可塑性樹脂シートをあらかじめ型枠に内面に貼付し、図 2.3.9 に示すようにコンクリートを打ち込み、型枠を取り外し後は、コンクリート表面にシートを残置することで水分逸散を防止することができる工法である。型枠を取外し後、コンクリート表面を外気に触れることなく、長期間に渡り養生することが可能な技術となっている。

本工法を適用した際の品質向上効果として、シートの撥水効果によりコンクリート表層の気泡が抑制すること、長期間の養生を実施することでコンクリートの中性化の抑制、収縮ひずみの減少することを確認している。フライアッシュセメントのような水和反応の遅い混合セメントにおいては、長期養生を容易に実施できるこの工法を適用することでコンクリート本来のポテンシャルを引き出すことができる。

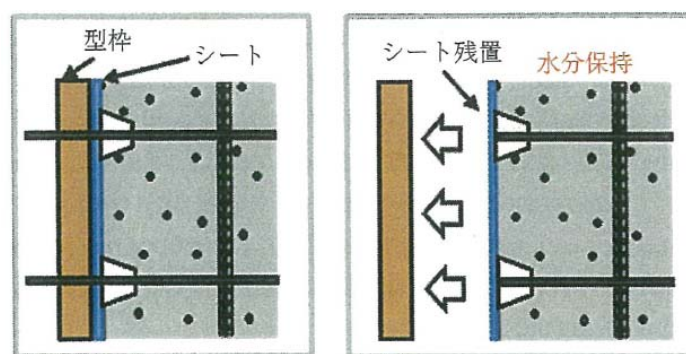


図 2.3.9 高撥水性シール工法の概要 19)・20)

2.3.4 養生がコンクリート品質に与える影響

(1) 圧縮強度、表層強度に与える影響

給水、保水養生は、コンクリートの圧縮強度と相関性があり、多くの研究成果^{例えば 21)・22)}、^{23)・24)} が報告されている。代表的な試験結果として、連続湿潤、乾燥における W/C50% のコンクリートの圧縮強度として、図 2.3.10 に示した結果²¹⁾が得られている。この結果から、湿潤養生を継続することで圧縮強度は材齢とともに増加するのに対して、コンクリート打ち込み後の乾燥開始材齢が早ければ早いほど水和反応が妨げられ、強度増加が停止してしまうことがわかる。壇らの研究における試験結果²⁴⁾を表 2.3.2、図 2.3.11 に示す。これは、普通ポルトランドセメント (N) と普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50% 置換した高炉セメント B 種 (BB) を用いた W/B : 55% のコンクリートにおける標準養生材齢 28 日の圧縮強度に対する強度比を示したものである。脱型直後より乾燥環境に暴露される D1 では強度発現が停滞しており、N では標準養生の 80% 程度、BB では 60% 程度であった。また、結合材によらず養生期間が長くなればなるほど、強度が高くなることがわかる。長期材齢における強度発現を考慮すると N では養生条件や日数による影響は大きくないが BB では、養生が不足すると強度発現に影響がある結果となっている。

養生条件がコンクリートの表層強度であるリバウンドハンマーの反発度に与える影響を 図 2.3.12²⁵⁾に示す. 反発度は, 湿潤養生では, 材齢初期から高い値を示すが, 長期材齢では, 無養生においても材齢の経過とともに徐々に上昇し, その差が小さくなる傾向とあることがわかる. ただし, 長期材齢においてもその差が逆転することはない.

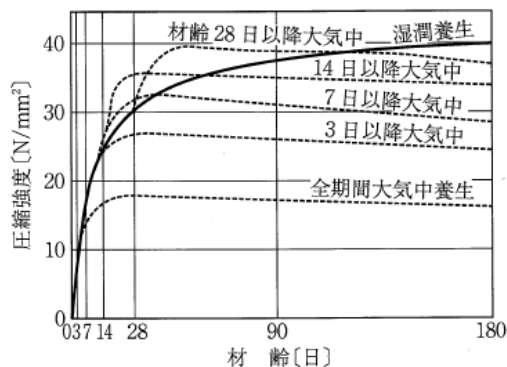


図 2.3.10 湿潤養生期間と圧縮強度¹⁹⁾

表 2.3.2 養生方法と養生期間の一覧²⁴⁾

養生期間	養生方法			
	(1)乾燥 D	(2)湿布 C	(3)水中 W	(4)封緘 S
1	D1	-	-	-
3	-	CD3	WD3	S3
5	-	CD5	WD5	-
7	-	CD7	WD7	S7
28	-	C28	W28	S28

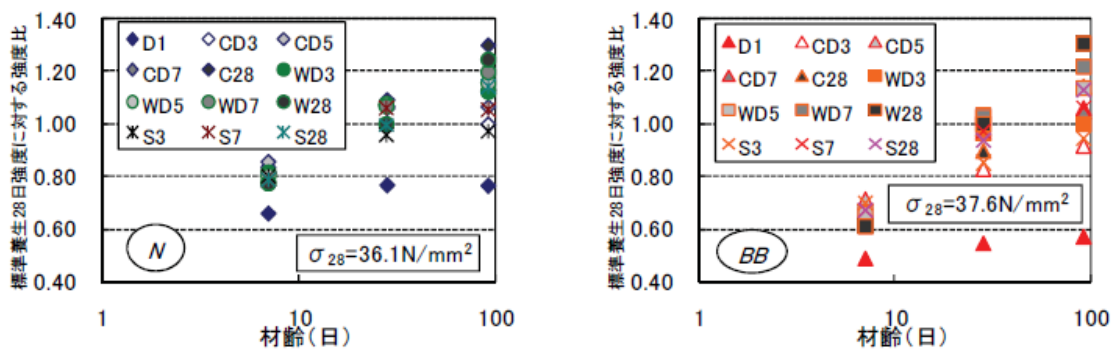


図 2.3.11 N および BB の養生条件が異なる場合の圧縮強度発現²⁴⁾

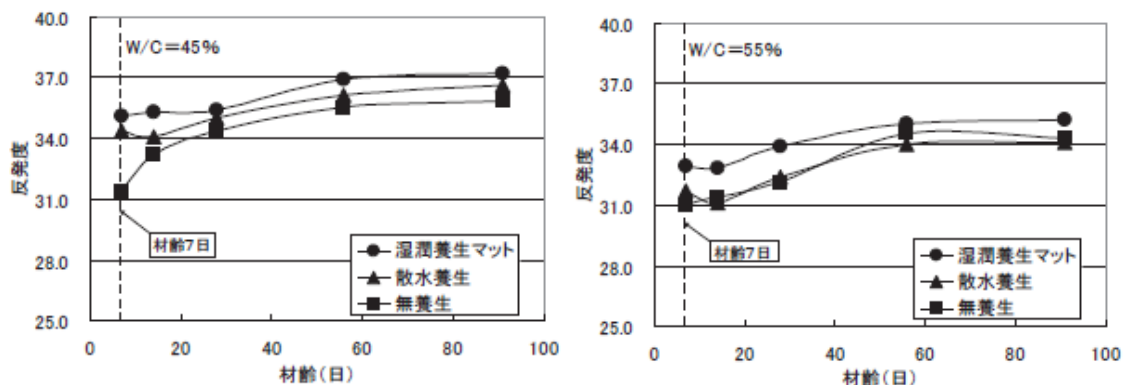


図 2.3.12 養生条件が異なる場合の反発度の経時変化²⁵⁾

(2) コンクリートの内部組織構造，耐久性に与える影響

これまでに養生時の水分の供給の有無により，セメントの水和反応の進行が変化すること，それに伴いコンクリートの内部組織構造や物質移動抵抗，耐久性と相関があることを指摘した研究成果が多数報告^(例えば 22), 24), 26)されている。

各種養生条件が水和の進行に与える影響を図 2.3.13 に示す．ここでは，普通ポルトランドセメントのペーストにおける水和の進行度を水和物として取り込まれた水分量である結合水率で示している．この結果から水中養生や封かん養生，湿度 98%の曝露条件では，水和の進行が確認できるが，湿度の低下に伴い水和の進行が停滞していることがわかる．また，同じ環境条件で水銀圧入法で測定した空隙分布を図 2.3.14 に示す．この測定結果によると，水和の停滞する湿度 50%では，コンクリート内部には粗大空隙が残存しているのに対して，水中養生や封かん養生，湿度 98%では空隙が小径化しており空隙構造が緻密化していることが確認できる。

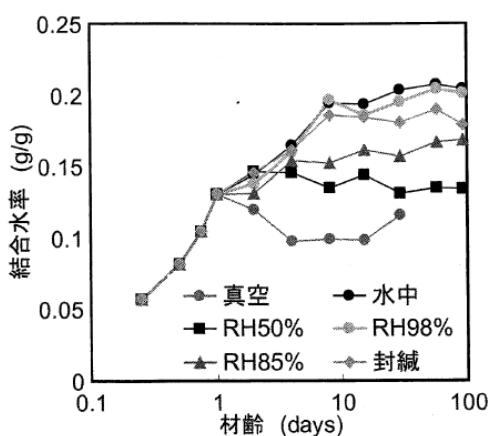


図 2.3.13 養生条件の相違が水和反応に与える影響²⁶⁾

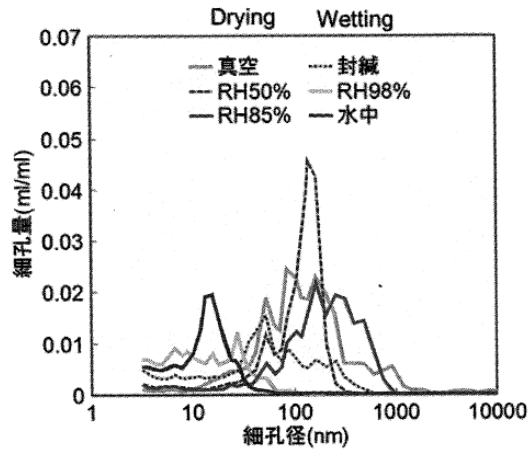


図 2.3.14 養生条件の相違が空隙構造に与える影響²⁶⁾

水セメント比，養生方法を変化させた際のコンクリートのトレント式表層透気係数の試験結果を図 2.3.15 に示す．各水セメント比において水中養生と気中養生では，1 オーダー程度透気係数が異なっており，養生の影響によってコンクリートの表層の緻密性が大きく変化することを示している．なお，この試験には，普通ポルトランドセメントを用いている．

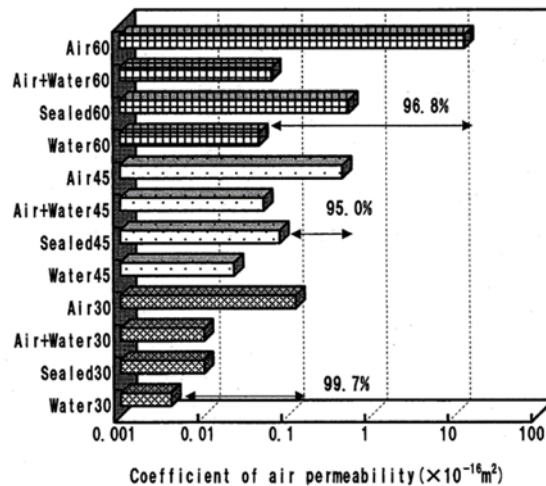


図 2.3.15 水セメント比，養生方法を変化させた際ののトレント式表層透気係数²²⁾

図 2.3.16 は，普通ポルトランドセメント，高炉セメント B 種を用いたコンクリートにおいて養生方法を変化させた際の促進試験結果から算出された中性化速度係数である．普通ポルトランドセメント，高炉セメント B 種を用いたコンクリートで中性化速度係数は大きく異なるが，乾燥養生では，中性化速度係数が大きくなる傾向があり，特に高炉セメント B 種では，著しく大きくなっておることがわかる．ただし，養生を施せばその日数や養生方

法によって徐々に速度係数は小さくなっている。

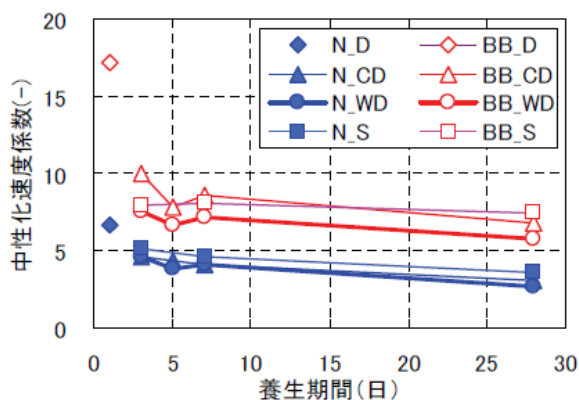


図 2.3.16 中性化速度に係数に与える養生の影響²⁴⁾ [凡例は表 2.3.2 参照]

図 2.3.17 は、各養生条件の塩分浸透性を評価したものである。気中養生>封かん養生>水中養生の順に塩化物イオンの浸透深さが低減していることが確認できる。図 2.3.18 は、水中養生期間が塩分の実効拡散係数に与える影響についてまとめたものであるが、水中養生期間の延長に伴い拡散係数が抑制されていることがわかる。また、図 2.3.19 に示すように混和材を併用した場合の塩分浸透は、水結合材比よりも水中養生期間の影響が大きいとの報告もある。

このように、養生方法、期間によって、コンクリートの水和の進行、それに伴う内部空隙構造が著しく異なる。そのため、養生は、中性化や塩分浸透といったコンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼすことがわかる。

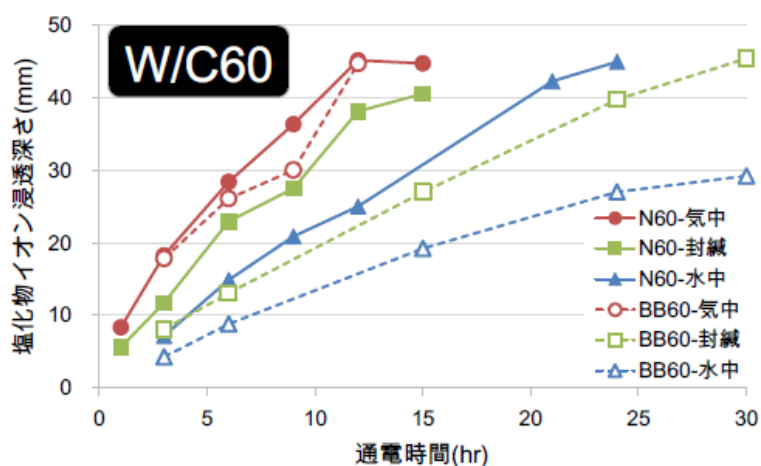


図 2.3.17 各養生条件における塩化物イオンの浸透深さ²⁷⁾

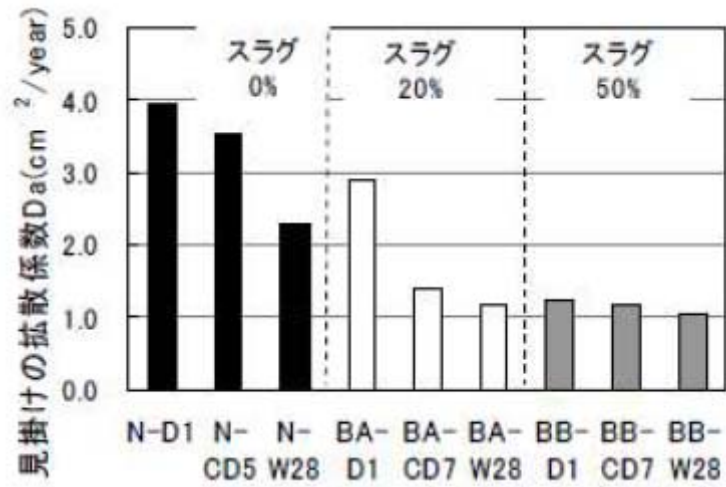


図 2.3.18 水中養生期間が塩分の実効拡散係数に与える影響²⁸⁾

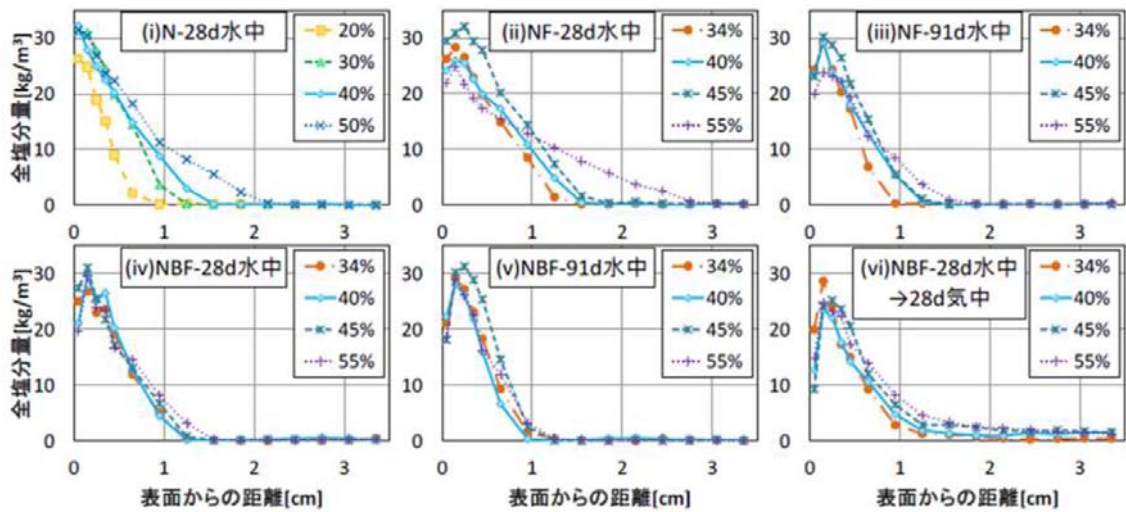


図 2.3.19 水中養生期間と使用する混和剤が塩化物イオンの浸透に与える影響²⁹⁾

2.4 初期の排水（脱水）に関する技術

2.4.1 排水（脱水）に関する技術の概要

骨材が良質なものであれば、セメントペーストに比べ、骨材の方が強く、耐久性的であると考えられていたため、セメントペーストの量を減らし、セメントペーストの濃度を高く（水セメント比の低い）することでより品質の高いコンクリートを施工しようと古くより鋭意努力されてきた。しかし、単位水量を減らし、セメントペーストの水セメント比と低くしすぎてしまうとワーカビリティが悪化し適切にコンクリートの締固めを行うことができなくなってしまったため逆にコンクリートの品質が低下してしまう。こうしたことから、近年まで、所定のワーカビリティが得られる範囲で単位水量をできるだけ減らした上で、入念な締固めを行うことが基本となっていた。昭和の前半では、AE 減水剤のような混和剤が開発されていなかったため、コンクリートのワーカビリティを確保するためには単位水量を大きくする必要があり、ランマーなどを用いて締固め、コンクリート中の水を搾り出し排出された水をウエスなどでふき取って除去するなどの工夫がなされていた。100 年以上供用し、現在も使用されている土木構造物の多くには、こうした工夫^{30)・31)}が適用されていた。吉田徳次郎博士が樹立した当時の世界最高の圧縮強度のコンクリートも加圧成型によってコンクリート中の水を搾り出し、その搾り出した水量を管理すること、その後の養生を工夫することで達成された記録³²⁾である。また、第一大戸川橋梁の PC 桁の作製では、気泡の除去対策としてフランジ部の堰板に布、木綿 2 枚を設置し施工してしたと報告³³⁾されており、現在の透水型枠と同じ機能を有していたと考えられる。このようにコンクリートの排水（脱水）は、古くから行われていた技術である。

現在土木工事で使用されている一般的なコンクリートは、十分なワーカビリティ、ポンパビリティを得るために施工上の要求から一定の単位水量が必要となること、加えてコンクリートの圧縮強度や耐久性の観点から 50-55%のコンクリートが製造、打込みが行われていることが多い。図 2.4.1³⁴⁾に硬化したセメントペースト中の一般的な構成割合を示す。水セメント比 0.4 (W/C=40%) 以上のコンクリートでは、硬化したセメントペースト中に、空隙部となる毛細管水の占める割合が存在し、水セメント比が大きくなるにつれて、この毛細管水の占める割合も大きくなる。また、水セメント比 0.4 未満では、毛細管水が占める空隙がなくなり、ゲル水や連行空気、セメントゲル中の空隙が対象となるが、これらの空隙についても水セメント比が小さくなるほど減少する。このように、水セメント比 40%以上では、セメントの水和反応に必要な水よりも多い余剰水が存在すること、水セメント比 40%未満でも水セメント比の低減によりさらに密実なコンクリートとなることを示している。

このような事実を踏まえ、これまでに打込み後にコンクリート内部から余剰水を抜く方法として種々の方法が考案されているが、本章では、本研究で対象としている型枠に改良を施すことで透水・脱水することができる透水型枠に関する既往の研究についてとりまとめた。

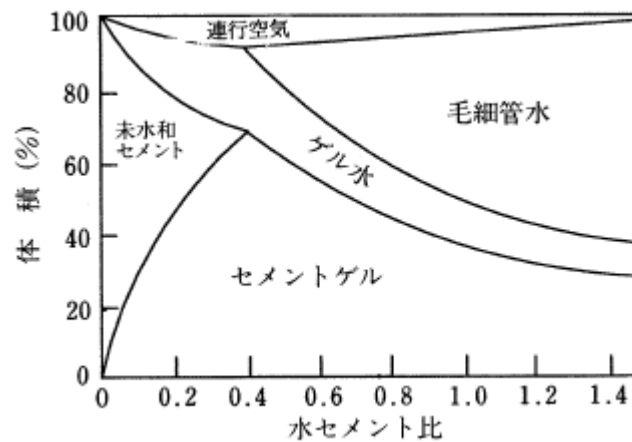


図 2.4.1 硬化したセメントペーストの構成³⁴⁾

2.4.2 透水型枠の分類と排水量

透水型枠は、型枠に用いられる材料や構成の違いにより①織布系の透水シート³⁵⁾、②織布、不織布、フィルムを用いた積層系シート^{36)・37)}、③吸水ポリマー系を用いた積層シート³⁸⁾、④スリット型枠³⁹⁾に分類できる。

現在、使用されている透水型枠のほとんどは、①または②であり、打込み直後のコンクリートから透水層や排水層等の透水シートを経て余剰水を型枠の外部に排出する方法である。代表的な透水シートを図 2.4.2、図 2.4.3 に示す。両透水性シートともコンクリート中のセメント粒子などの流出を防止するフィルム系または織布系のシートとそのシートを通過した余剰水や空気が不織布を通じて型枠の外に排出される機構となっている。吸水シートは、型枠面に吸水性を有するシートを設置して、締固め時に吸水材料の吸水膨潤力と毛細管圧を利用してフレッシュコンクリートの余剰な水や気泡を減少させる機構となっている。さらに、吸水材料の持つ保水性を利用したコンクリートの保水養生を行うことができる。スリット型枠の概要を図 2.4.4 に示す。スリット型枠は、鋼製型枠のスキンプレートに微細なスリット（長さ：約 100mm，幅：約 150 μ m）加工を施し，その上からセラミックスをコーティングすることで，セラミックス間の微細な孔からコンクリート中の余剰水や気泡を排出させる型枠である。

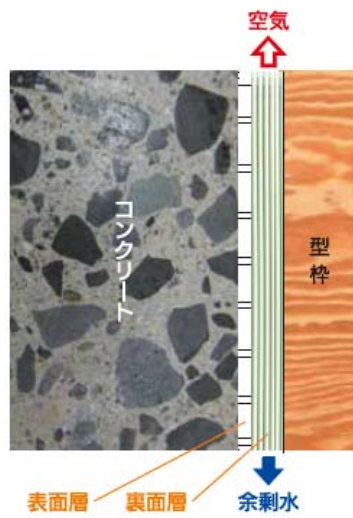


図 2.4.2 FS フォーム工法の概要 ³⁷⁾

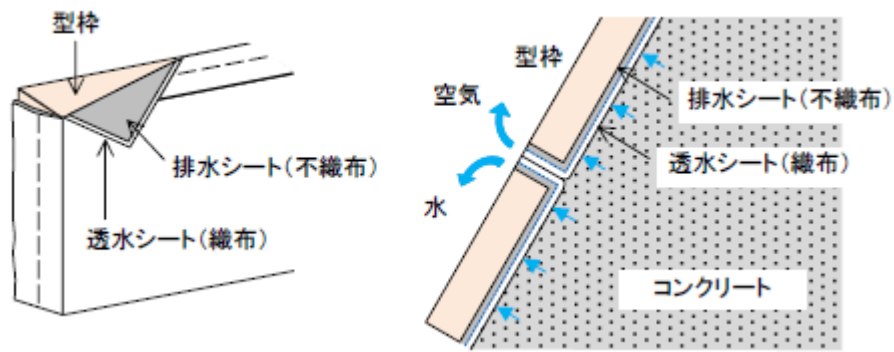


図 2.4.3 透水性型枠用シートの概要 ³⁶⁾

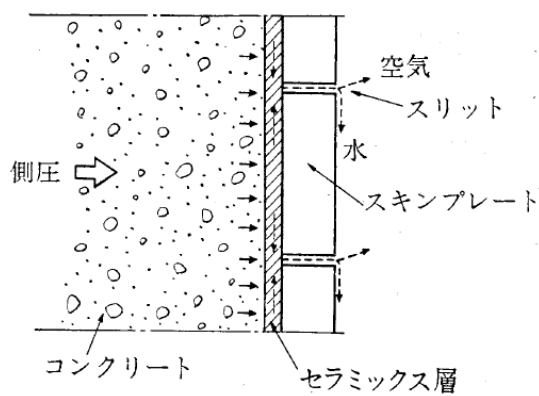


図 2.4.4 スリップ型枠の概要 ³⁹⁾

基本的に透水型枠による排水は、コンクリートの締固めによる材料分離に伴う余剰水やコンクリートの自重により間隙水圧上昇に伴う余剰水によって発生する。図 2.4.5⁴⁰⁾に各種透水型枠を用いた場合の排水量と経過時間の関係を示す。この結果によると、透水型枠では、コンクリート打込み直後およびバイブレータの締固めによる比較的早い段階で生じる排水とその後自重によってゆっくりと時間をかけて発生する排水があると推測できる。既往の研究では、水セメント比約 57%、スランプ 15cm のコンクリートの排水量を測定したところ約 400~600ml/m²の排水が確認⁴¹⁾され、W/C 約 41%、スランプ 18cm のコンクリートの排水量を測定したところ約 1000ml/m²に相当する排水量⁴²⁾が得られている。また、透水型枠を使用した場合、型枠に余剰水が排出されるため、コンクリート天端へのブリーディング水の上昇が減少することが報告⁴³⁾されている。

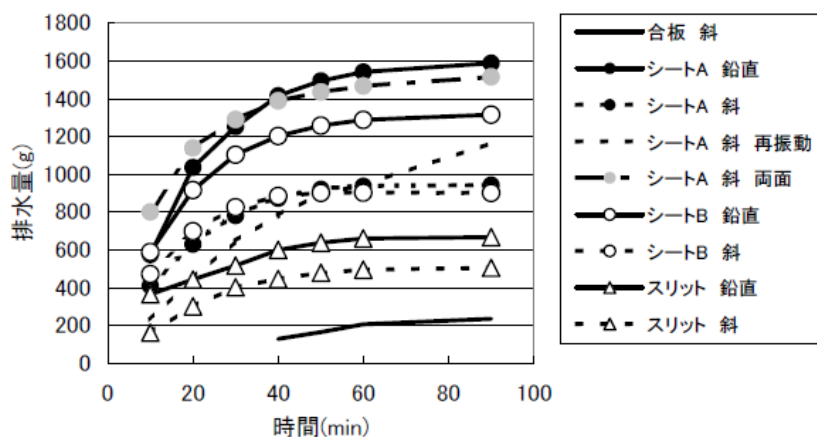


図 2.4.5 透水型枠の排水量と経過時間の測定例⁴⁰⁾

2.4.3 初期の排水による品質向上効果

(1) 表層の空気泡の低減効果

図 2.4.6⁴⁴⁾は、透水型枠と木製型枠を用いた際の表面の空気泡率の関係をあらわしたものである。供試体の大きさに関わらず、表面の美観が飛躍的に改善されると報告されている。また、図 2.4.7⁴⁵⁾に、コンクリートの流動性、締固めエネルギーの異なる条件における透水型枠と木製型枠を用いた際の表面気泡面積率をあらわしたものである。この結果から、同一のコンクリート、締固め条件において、透水シート（透水型枠）を用いることによってコンクリート表面に発生する空気泡を大幅に低減している。

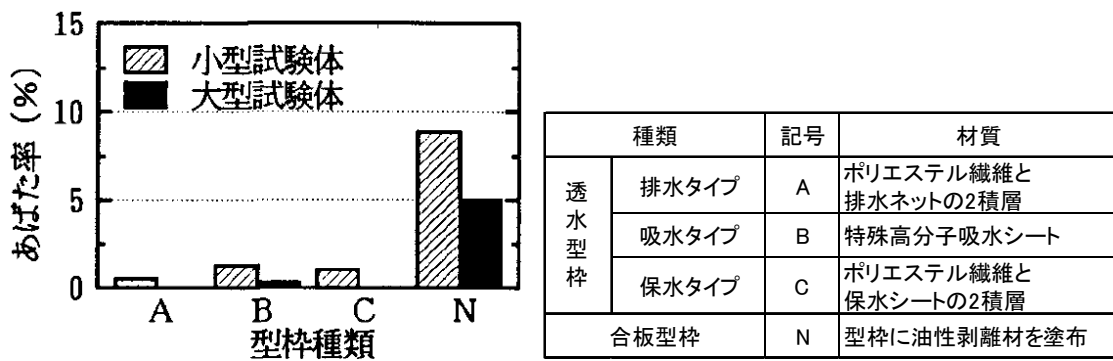


図 2.4.6 透水型枠と木製型枠を用いた際の表面の空気泡率の関係⁴⁴⁾

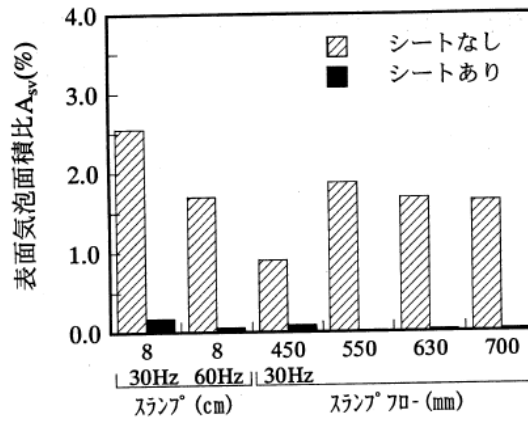


図 2.4.7 コンクリートの流動性、締固めエネルギーの異なる条件での表面気泡面積率⁴⁵⁾

(2) 表面強度

図 2.4.8⁴⁶⁾に透水型枠を用いたときの表層の圧縮強度を反発度から推定した値を試験体の高さ毎に所定の材齢で測定した結果を示す。なお、供試体の大きさは 450mm×180mm×1000mm である。この結果から透水型枠を使用したコンクリートの推定強度は木製型枠よりも大きく、中下層部においてその差は大きい。また、透水型枠と木製型枠を使用した際の推定強度の差は、材齢初期において最も大きくなっており、材齢経過において両者の差は小さくなってきている。次に、表層強度の改善効果に及ぼす透水シートの種類による影響についての試験結果を図 2.4.9⁴⁴⁾に示す。この試験では、排水タイプ(A)、給水タイプ(B)、保水タイプ(C)と異なる透水シートを用いた時の反発度を測定し表層強度に換算している。この試験結果では、保水タイプの透水性シートが最も大きな表層強度を示しており、排水後の初期の保水養生が表層強度に影響している可能性が考えられる結果となっている。

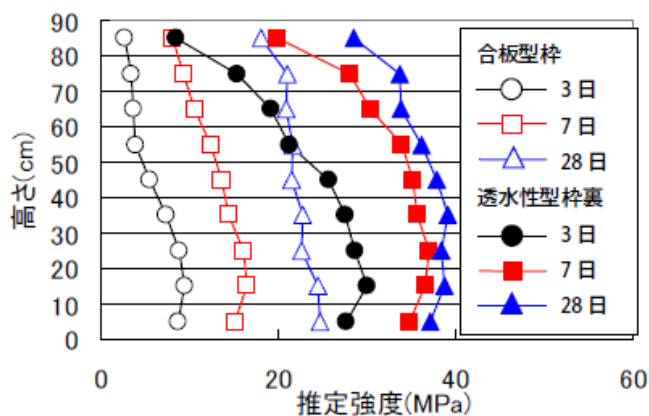


図 2.4.8 各材齢における表面強度⁴⁶⁾

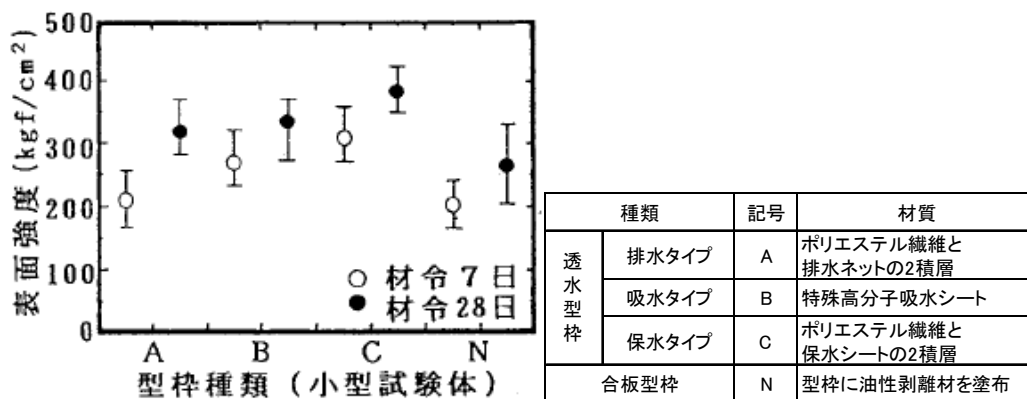


図 2.4.9 透水シートの違いが表面強度に与える影響⁴⁴⁾

(3) 空隙構造の緻密化

図 2.4.10⁴⁷⁾に透水型枠, および木製型枠を用いた壁厚 200mm の壁の材齢 28 日における総有効細孔量分布を示したものである。コンクリートは, 水セメント比 57%, スランプ 15.9cm, 空気量 5.2%であり, 打込み後, 材齢 3 日で型枠を取り外している。木製型枠によるコンクリートは, 表層 0-10mm のみ内部よりも細孔量が多いのに対して, 透水型枠を使用したコンクリートは, 0-10mm の表層のみ細孔量が減少していることがわかる。この結果から, 排水の効果による空隙構造の緻密化は, 表層 10mm 程度までであること, 木製型枠の場合には, 表層 10mm における空隙量が増加すると報告されている。図 2.4.11 は, 表層および内部の細孔径分布を示したものである。この結果から透水型枠を使用することで, 木製型枠よりも 40nm-1000nm の空隙量が減少しており, 空隙構造が緻密化されていることがわかる。

材齢 3 日で型枠を取り外した際の試験結果において, 透水性型枠と木製型枠の表層 10mm の細孔径分布に顕著な差がないといった報告⁴⁸⁾や材齢 7 日まで散水養生を行った際の試験結果で表層 30mm まで影響しているといった報告⁴⁹⁾もあるが, 透水型枠による表層改善効果は, 排水後の養生によって異なっているようである。なお, 排水のみの効果では, 文献によって若干異なるが, 概ね表層 10mm までの品質改善効果となっている。

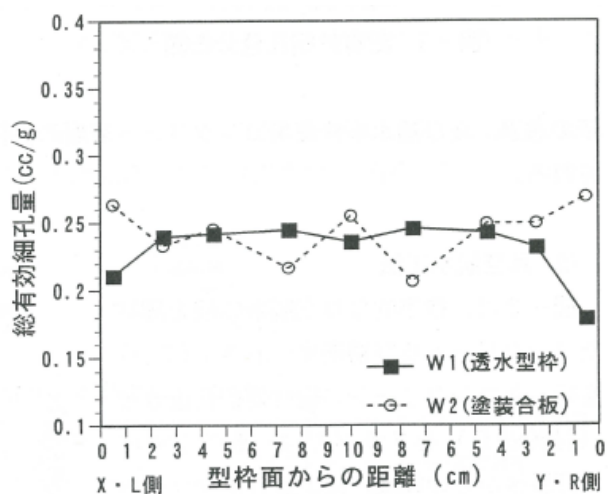


図 2.4.10 深さ方向と総有効細孔量の関係⁴⁷⁾

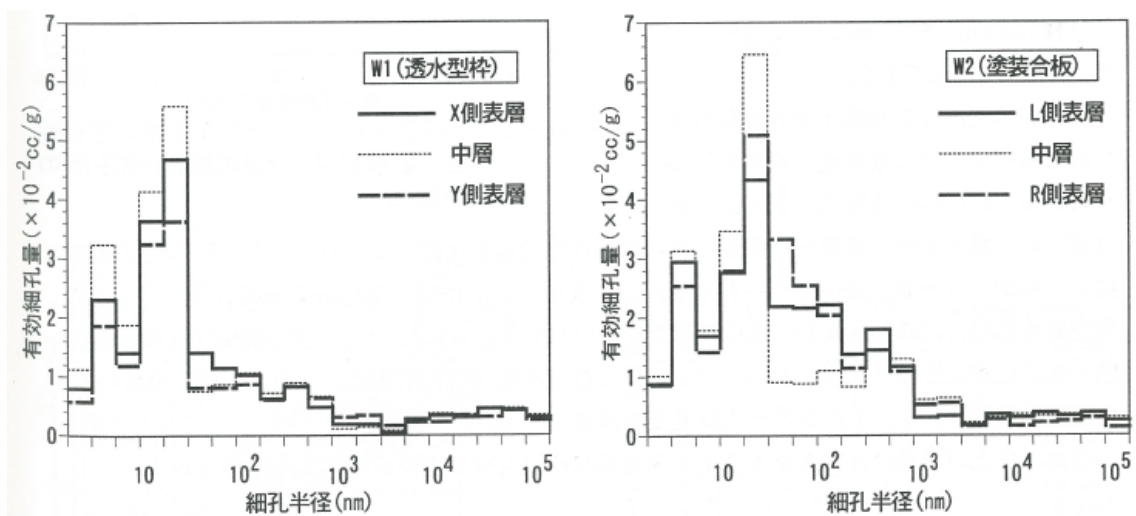


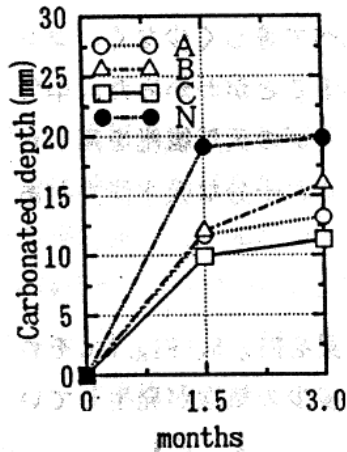
図 2.4.11 各層の細孔径空隙分布⁴⁷⁾

(4) 中性化深さ

表 2.4.2⁵⁰⁾は、透水シート、吸水シート、木製型枠を用いたコンクリートの促進中性化深さである。コンクリートは水セメント比 63%、スランプ 12.5cm であり、打込み後、材齢 3 日で型枠を取り外しているものである。図 2.4.12⁴⁸⁾は、異なる透水シートを使用したコンクリートの促進中性化深さである。コンクリートの水セメント比は、60%、スランプ 8cm であり、打込み後、材齢 3 日で型枠を取り外しているものである。いずれの試験結果においても打込み直後の余剰水の排出している透水シート、吸水シートの方が木製型枠よりも中性化深さが小さくなっており、余剰水排出によるコンクリート表層の緻密化によって中性化が抑制される結果となっている。

表 2.4.2 透水シート、吸水シートを使用した際の促進中性化深さ⁵⁰⁾ [単位:mm]

Type of form	At 1 month	At 3 months
Water absorptive form	7.2	12.0
Water permeable form	10.2	16.0
Plywood form	16.6	24.8



種類		記号	材質
透 水 型 枠	排水タイプ	A	ポリエステル繊維と排水ネットの2積層
	吸水タイプ	B	特殊高分子吸水シート
	保水タイプ	C	ポリエステル繊維と保水シートの2積層
合板型枠		N	型枠に油性剥離材を塗布

図 2.4.12 透水シートの違いが促進中性化深さに与える影響⁴⁸⁾

(6) 塩分浸透抵抗性

図 2.4.13⁵¹⁾に透水シートを用いたコンクリートを人工海水に 2 ヶ月浸漬した際の塩分浸透深さを測定した結果である。コンクリートは、水セメント比が 45%、60%、使用しているセメントは、普通ポルトランドセメント (NP)、中庸熱ポルトランドセメント (MP) であり、打込み後、材齢 3 日で型枠を取り外しているものである。この結果によると、木製型枠よりも塩分浸透深さが小さくなっており、特に中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合には、水セメント比 45%、60%とも塩分浸透深さが半分以下になっており、塩分浸透抵抗性が向上している。

図 2.4.14⁴⁸⁾は、異なる透水シートを使用したコンクリートのコンクリート表層から 0 - 30mm における塩化物イオン濃度分布である。試験条件として、室内温度 40°C の条件下で、塩水濃度 3% の溶液を、3 日間連続噴霧、その後 4 日間 50°C 乾燥を 1 サイクルとして 8 サイクル実施している。また、コンクリートの水セメント比は、60%、スランプ 8cm であり、打込み後、材齢 3 日で型枠を取り外しているものである。この結果では、表層 0-10mm における塩化物イオン量は、透水シートと木製型枠で差がなかったが、10mm 以深では透水性シートの方が、塩化物イオン量が大きく低減していることがわかる。これは、初期の余剰水の排出によるコンクリートの表層の緻密化によって塩化物イオンの浸透を抑制しているためと報告されている。

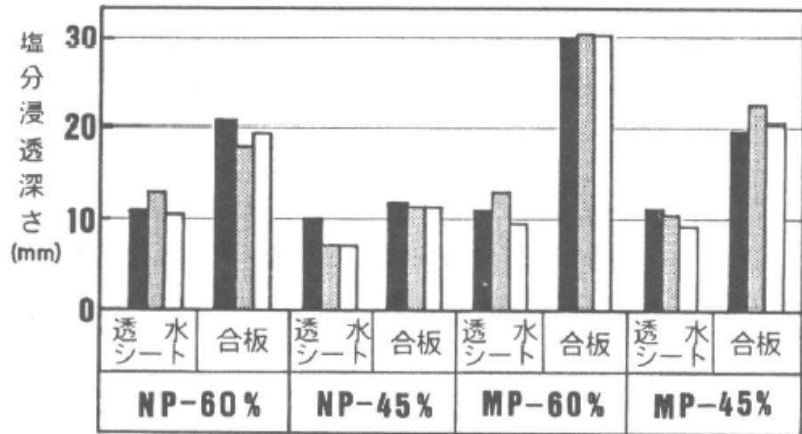


図 2.4.13 人工海水浸漬試験結果⁵¹⁾

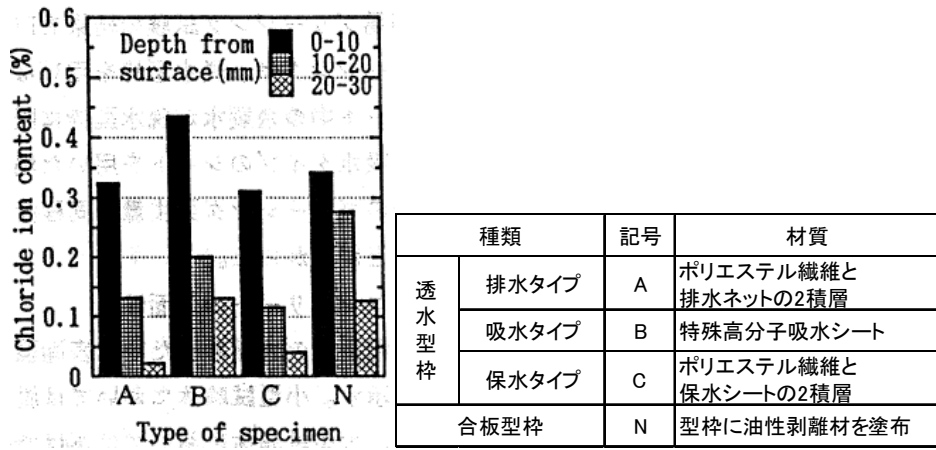


図 2.4.14 透水型枠を使用した場合の塩分噴霧促進試験結果⁴⁸⁾

2.5 まとめ

本章では、本研究の対象となるコンクリート打込み直後の余剰水の排出と湿潤養生に関する既往の知見について整理した。湿潤養生については、まず、コンクリート標準示方書における養生の変遷の中で近年、様々な養生工法が研究開発され、技術対案への適用されている背景について記載した。次に、近年開発されている代表的な湿潤養生技術、保水養生技術について紹介するとともに湿潤養生の有無がコンクリートの表層品質に与える影響について整理した。コンクリート打込み直後の余剰水の排出については、その技術の概要、生まれた背景について整理し、余剰水の排出のために開発された透水性型枠の分類について記載した。加えて、初期の余剰水の排水による品質向上効果として表面強度、空隙構造、中性化深さ、塩分浸透性についてとりまとめを行った。

以上の知見の整理により、余剰水の排出と湿潤養生を連続で行う技術がないことがわかった。ほとんど既往の文献において、透水型枠で余剰水の排出を行ったとしても、型枠存置を行うのみで、さらに型枠存置の日数も3-4日程度と短期間であり、その後の湿潤養生について着目していないことが明らかになった。そのため、本研究では、打込み直後のコンクリートから生じるブリーディング水などの余剰水や気泡を排出する作用と凝結後の速やかな給水による湿潤養生を脱型せずに連続で行うことを可能とする材料選定、排水・湿潤連続養生がもたらす品質向上、耐久性向上効果について検討に加えて、湿潤養生の有無、給水開始時間が表層品質に与える影響についても検討した。

第2章の参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2018.3
- 2) 吉田徳次郎：コンクリート及鉄筋コンクリート施工法，丸善出版，1948
- 3) 伊代田岳史：コンクリートの養生と表層品質－養生の本質的な理解－，コンクリートテクノ，Vol.34，No.3，pp47-52，2015.3
- 4) 土木学会：昭和15年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書，1940
- 5) 土木学会：昭和24年土木学会制定鉄筋コンクリート標準示方書，1949
- 6) 土木学会：昭和49年度版コンクリート標準示方書，1974.9
- 7) 土木学会：昭和61年度版コンクリート標準示方書[施工編]，1986.10
- 8) 土木学会：平成3年版コンクリート標準示方書[施工編]，1991.9
- 9) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書[施工編]，1996.3
- 10) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3
- 11) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2013.3
- 12) 古川幸則，福留和人，庄野昭：コンクリートの浸水養生システム－型枠の取り外し後の給水養生工法の実用化と効果－，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol.49，No.3，2011.3
- 13) 福留和人，古川幸則，庄野昭：ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生条件の影響評価手法，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.68，No.1，pp.26-37，2012
- 14) NETIS 登録情報「うるおんマット タイプ S，タイプ R」
http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=CG-090024
- 15) うるおんマットカタログ：
http://www.hrc.co.jp/item/wpcivil/uruonmat/AQUAMAT_URUONMAT.pdf
- 16) 須藤敏明，臼井達哉，岸利治：覆工コンクリート給水養生工法『キュアマイスター®』の開発，建設機械，2016年7月号，2016.7
- 17) 檜山将太，須藤敏明，臼井達哉，岸利治：覆工コンクリート給水養生工法の開発と養生効果－覆工コンクリート全面の均一な給水養生－，土木学会第71回年次学術講演会，VI-430，pp.859-860，2016.9
- 18) 天谷公彦，原幹夫，濱岡弘二，森本仁志：保水養生テープを用いたコンクリートの養生に関する実験的検討，プレストレストコンクリート工学会，第21回シンポジウム論文集，pp.579-582，2012.10
- 19) 渡邊賢三，坂井吾郎，坂田昇，石田哲也：高撥水性シール工法によるコンクリートの表層品質向上技術，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol.54，No.11，2016.11
- 20) 石田哲也，坂田昇，渡邊賢三，温品達也：表層品質向上へ「美シール工法」を開発，コンクリートテクノ，Vol.33，No.12，pp9-15，2014.12
- 21) 小林一輔ほか：図解コンクリート辞典，オーム社出版局，p127，2001

- 22) 岡崎慎一郎, 八木翼, 岸利治, 矢島哲司: 養生と強度が物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp227-234, 2006
- 23) 吉田行, 田口史雄: コンクリートの強度と耐久性に及ぼす養生条件の影響, 寒地土木研究所月報, No.705, 2012.2
- 24) 壇康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, vol.65, No.4, pp431-441, 2009
- 25) 野々目洋, 権代由範, 藤井真之, 菅原隆: 湿潤養生マットによるコンクリート組織の緻密化と耐久性の向上に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, 第20巻第1号, pp23-32, 2009.1
- 26) 伊代田岳史: コンクリートの養生と表層品質ー養生の本質的な理解ー, コンクリートテクノ, Vol.34, No.3, pp47-52, 2015.3
- 27) 亀山敬宏, 黒田伸吾, 伊代田岳史: 非定常状態電気泳動試験を用いた養生方法および期間の違いによる塩分浸透の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 28) 高鳴笛, 濱田秀則, 佐川康貴, 壇康弘: 高炉セメントコンクリートの塩化物イオン拡散係数, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.64, 2009
- 29) 小柳翔平, 高橋佑弥, 石田哲也: 高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討, コンクリート工学年次論文集報告集 Vol.37, No.1, 2015, 2015
- 30) 中村信之, 木村克俊: 小樽港の百年コンクリート, セメント・コンクリート, No.527, pp8-17, 1991
- 31) 長瀧重義監修: コンクリートの長期耐久性 (小樽港百年耐久性試験に学ぶ), 技報堂出版, 1995
- 32) 吉田徳次郎: 最高強度コンクリートの製造に就いて, 昭和15年4月4日第4回工学会大会講演会に於て, 土木学会誌, 第26巻, 第11号, 1940.11
- 33) 仁杉巖: 支間30mのプレストレストコンクリート鉄道橋(信楽線第一大戸川橋梁)の設計, 施工及びこれに関連して行った実験研究の報告, 土木学会論文集第27号, 1955.7
- 34) 竹本国博, 内川浩: 養生の理論ー常温養生, セメント・コンクリート, No271, pp18-20, 1969
- 35) テキスタイルシートカタログ:
<http://www.adjustbook.com/doc/Index/show/us/5843/bk/9755>
- 36) NETIS 登録情報「アバノン(透水性型枠用シート)」
http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KK-140008&TabType=&nt=
- 37) 透水性型枠シート「フィルターシート」(FS フォーム工法) カタログ
<https://www.fujimori.co.jp/wp/wp-content/uploads/2016/09/FilterSheet.ver3->

1.pdf#search=%27FS%E3%82%B7%E3%83%BC%E3%83%88%27

- 38) 大友健, 新藤竹文, 金子誠二, 内藤隆史: 高吸水ポリマーシートをもちいたコンクリート型枠面の物性改良工法, vol.9, No.1, pp311-314, 1987
- 39) 出頭 圭三, 篠田 佳男, 北川 勉: スリット付型わくを用いて打設したコンクリートの基礎的物性, vol.26, No.4, pp51-58, 1988.4
- 40) 浅井一彦, 国枝稔, 犬飼利嗣, 石原誠一郎: 透水性型枠によるコンクリートの品質改善, コンクリート工学年次論文集, vol.26, No.1, 2004
- 41) 石原誠一郎, 木村健治, 立松和彦: 脱水・脱気型枠 (ドライフォーム) による高強度コンクリートの耐久性に関する研究 (その 2), 浅沼組技報, pp.30-35, 1990
- 42) 北村律太郎, 栗原哲夫, 野々目洋, 江頭正基: FS フォーム工法 (透水性型枠工法) の開発, 戸田建設研究広告 17, pp.177-187, 1991
- 43) 牛島栄, 酒井芳文, 原田和樹: 各種脱水型枠を用いたコンクリートの表面性状および耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp450-455, 1993
- 44) 駒田憲司, 原田和樹, 牛島栄: 透水性型枠工法 (保水タイプ) の硬化コンクリートに及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会, Vol.48, V-179, pp.384-385, 1993.9
- 45) 日本コンクリート工学協会: 透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム 委員会報告書・論文集, pp107-108, 2004.9
- 46) 前田哲弘, 松田孝允, 三島直生, 畑中重光_透水性型枠を使用したコンクリートの表層および内部強度性状に及ぼす再振動締固めの影響, コンクリート工学年次論文集, vol.24, No.1, pp345-350, 2002
- 47) 日本コンクリート工学協会: 透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム 委員会報告書・論文集, pp39-40, 2004.9
- 48) 牛島栄, 酒井芳文, 原田和樹: 各種脱水型枠を用いたコンクリートの表面性状および耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp450-455, 1993
- 49) 笠井芳夫, 長野基司, 佐藤孝一, 菅一雅_透水性型枠および合板型枠を用いたコンクリートの品質判定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol10, No.2, pp441-446, 1988.6
- 50) 永田幹雄, 米田俊一, 松永篤: 脱水型わくを適応したコンクリートの表層部の品質, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.336-341, 1990
- 51) 竹田宣典, 平田隆祥, 十河茂幸, 志賀孝成_透水性シートを用いた型わくによるコンクリート表面の品質改善, コンクリート工学年次論文集, vol11, No.1, pp.638-688, 1989.6

第3章 排水湿潤連続養生の開発

3.1 概要

本章では、排水連続養生の施工方法の開発、養生効果の検証、現場試験適用の検討を行った。まず、実構造物への適用を考慮した型枠材の選定、施工方法に関する検討を行った。次に、材齢初期の排水と湿潤養生を各々、または連続で行うことが表層品質に与える影響について検討し、連続で行うことでの相乗効果について検証した。加えて、施工方法の中で排水終了後の湿潤養生の開始材齢がコンクリートの表層品質に与える影響について検討することで、品質向上の観点から最適な給水開始時間と実務上適用可能な基準となる材齢を設定した。最後に、現場施工において標準的な施工方法を構築するために壁高覧を模擬した部材を製作し、耐久性向上効果の確認を行い、実構造物へ適用した。

3.2 型枠材料の選定と施工方法の確立

コンクリートの養生は、表層部の乾燥収縮ひび割れや劣化因子の侵入を抑制し、鉄筋の保護機能を確実なものにするために極めて重要な工程である。既往の養生技術として型枠の内側に織布や専用のシートを設置して打込み直後の余剰水や気泡を排出する透水型枠¹⁾や、脱型後のコンクリート面に設置して表面を湿潤状態に保つ湿潤養生マット²⁾などが開発・実用化されており、これらはそれぞれに良好な効果が確認されている。しかし、打設直後の余剰水の速やかな排水と、養生期間中の給水は相反する機能であり、それぞれ別途の段取りが必要になっていた。そのため、単なる乾燥防止を上回る効果を狙った積極的な養生方法の場合でも、硬化前の余剰水の排水または硬化後の給水のどちらか一方を行う場合がほとんどであった。同一の型枠でコンクリート打込み直後に余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比を低減させた上で、コンクリート強度が脱型可能な強度に達していなくてもセメントの水和反応が活発な打込み翌日からは速やかに湿潤養生を開始することが実施できる新たな型枠・養生方法があれば、コンクリート表層の空隙構造を著しく緻密化させて、耐久性の飛躍的な向上効果が期待できると考えた。そのためには、①コンクリート接触面には透水性を、部材全体としては保水が可能となる型枠構造、②給排水条件が切り替えることができるシステムが必要と考え、それらに適した材料や構造を検討した。

試作した型枠構造を写真 3.2.1、写真 3.2.2 に示す。型枠の構造は、木製型枠に内側に透水層となる連続空隙を有する部材と排水時にセメント粒子の流失をブロックする透水性シートの3種類の材料で構成されているものである。写真 3.2.1 では、透水層として透水性のモルタル板を使用したものである。しかし、モルタル板を使用した構造は、重量があるため、実構造物において通常の木製型枠のように使用することは困難であった。次に、軽量で成型しやすい材料として写真 3.2.2 に示す発泡スチロールのリサイクル材である EPS 骨材³⁾を用いた透水層をした。この透水層は確かに軽量であったが、型枠材としての強度、剛性は十分ではなく、実構造物で使用した場合、コンクリートの側圧により変形してしまう可能性があった。また、両者とも材料費が非常に高くなってしまうことが懸念されたため、更なる型

枠材の選定を行った。



写真 3.2.1 試作した型枠構造（透水性のモルタル板を使用）



写真 3.2.2 試作した型枠構造（発泡スチロールのリサイクル材を使用）

本技術を実現するためには、木製型枠と同程度の十分な強度をもち平滑、軽量でかつ廉価の透水板を選定する必要がある。しかし、建設分野の材料の中では適した材料がなかったため、建設分野以外にも幅広い材料を求め、試行錯誤の上、写真 3.2.3 に示すポリプロピレン製の透水板⁴⁾を選定した。この材料は、プラスチックダンボールやコンテナボックスに使用されている材料で、軽量かつ剛性に優れており、内部が中空構造となっている。このボードの周囲をシールし、コンクリート打込み面側のみに穴あけ加工することでコンクリートからの余剰水の排出とコンクリートへの給水を可能とした。

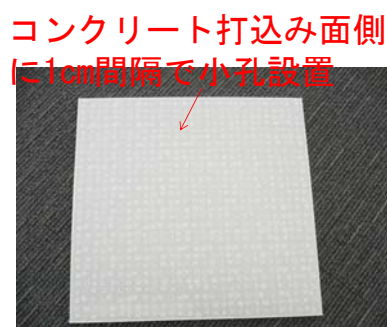


写真 3.2.3 ポリプロピレン製の透水板

選定した型枠構造と養生の手順を図 3.2.1、図 3.2.2 とともに示す。

- ①中空構造を有し内部に水を供給することができる樹脂製の透水板をせき板として使用し、コンクリートとの接触面には透水性のシートを設置して型枠を組み立てる（図 3.2.2）。
- ②コンクリートを打ち込む。打込み中および打込み直後は透水板下部に設置した水抜き栓を開いて、コンクリート表層の余剰水や空気泡を排出し、表層部の水セメント比を低減させる（図 3.2.2 ②）。
- ③凝結終了後に水抜き栓を閉じて透水板に給水することにより、湿潤養生を行う（図 3.2.2 ③）。

使用する透水板はコンクリートの側圧に対して十分な強度を持ち、打込み面側のみに直径約 1mm の小孔を 1cm 間隔で設けることで透水性シートを介したコンクリートへの給排水を可能にしたものである。透水シートは織布と不織布を組み合わせたもので、透水型枠用に開発された市販の透水性シートを使用した。また、透水板下部には水抜き孔を設置し、透水板内に貯まった水を排水できる構造としている。これにより、コンクリート打込み直後の余剰水や気泡の排出と凝結終了後の速やかな湿潤養生を一つの型枠で連続して実施することができる構造となっている。

実際の工事で使用した型枠を写真 3.2.4 に示す。透水層とせき板が 1 つの部材となっていることから、外観は通常の木製型枠と同一である。

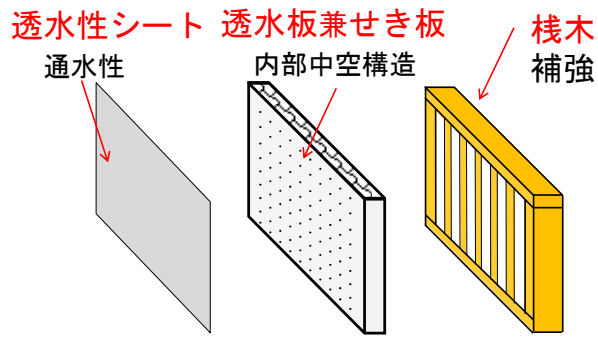


図 3.2.1 排水湿潤連続養生に使用する型枠構造

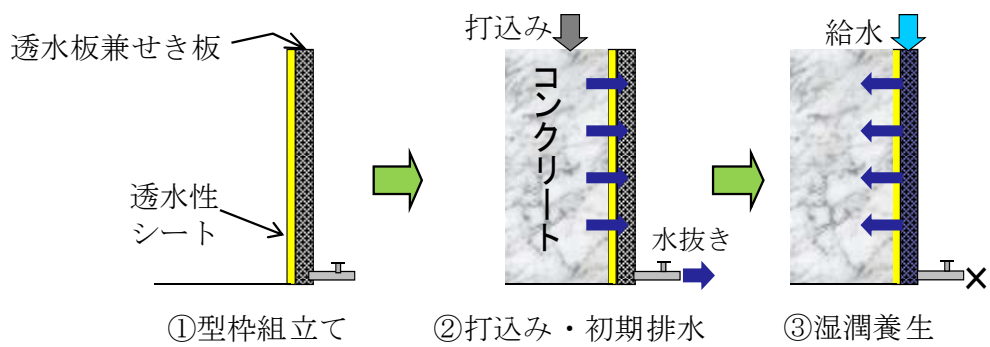


図 3.2.2 排水湿潤連続養生の実施手順



写真 3.2.4 排水湿潤連続養生に使用する型枠の外観

3.3 排水湿潤連続養生の相乗効果の検証

3.3.1 試験の目的

排水湿潤連続養生は、コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比が低減された上に、脱型作業を経ずに硬化直後から速やかに湿潤養生を開始することにより、コンクリート表層に緻密な空隙構造を形成することができると考えられる。この効果を機構面から考察すると、まず、余剰水を排出してコンクリート表層部の水セメント比を低減させることにより、水和物で埋めるべきセメント粒子間の空隙が減少し、セメント粒子間隔が狭くなる。更に、脱型が可能な強度の発現を待つことなく、速やかにコンクリート表面に液状水の供給を行うことにより、初期数日間のセメントの活発な水和反応による練り混ぜ水の消費による自己乾燥現象を利用してコンクリート表層に効率的に吸水させることが可能となり、脱型後に実施する通常の湿潤養生よりも更に高い効果を与えることができると考えられる。

ここでは、余剰水の排出と湿潤養生を連続で行うことでの相乗効果について検証するために、排水と湿潤の個々の養生、および排水と湿潤を連続で行うことがコンクリートの表層に与える影響について把握することを目的に供試体を製作し、各種試験を実施した。

3.3.2 供試体の製作と養生方法

コンクリートの配合を表 3.3.1、使用材料を表 3.3.2 に示す。コンクリートは、30-8-20N、水セメント比 52.2%のレディーミクストコンクリートを使用した。供試体は、高さ 500mm、幅 500mm、奥行き 300 mm の大きさとした。コンクリートは 2 層に分けて、各層とも内部振動機を用いて 15 秒間締固めを行った。

表 3.3.1 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単用量 kg/m ³						
				W	C	S	G1	G2	G3	Ad
30-8-20N	52.2	4.5	46.5	157	301	849	398	296	305	2.41

表 3.3.2 使用材料

記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
S	細骨材	千葉産山砂 55%, 高知産砕砂 25% 三重産砕砂 20%	表乾密度 2.62g/cm ³
G1	粗骨材	東京都八王子市産	表乾密度 2.65g/cm ³
G2	G1:G2:G3 40:30:30	山梨県大月市産	表乾密度 2.62g/cm ³
G3		埼玉県秩父郡産	表乾密度 2.70g/cm ³
Ad	AE 減水剤(標準型)	フローリック	フローリック SV10H

コンクリートの養生条件を表 3.3.3 に示す。養生条件①、②の排水湿潤連続養生では、透水板をせき板も兼ねて使用し、透水板には、コンクリート打込み面側に透水性シートを設置して型枠の組立てを行った。排水湿潤連続養生では、打込み開始から透水性シート、水抜きを通して余剰水を排出した。打込み完了後 24 時間にて打込み面を湛水し、透水性シート、透水板に水を供給し続けて湿潤状態を保持した。養生条件①では、材齢 5 日で湿潤養生を終了したのち脱型し、養生条件②では、材齢 3 日で湿潤養生を終了し脱型した。養生条件①、②を比較することで、排水湿潤連続養生の中で湿潤養生期間の短縮がコンクリートの表層品質に与える影響について検討した。

養生条件③は、木製型枠を使用し、コンクリート面側に透水性シートを設置して型枠の組立てを行った。打込み後、透水性シートを通じて、余剰水の排出を行い、材齢 5 日まで木製型枠を存置したのち脱型した。排水後、木製型枠を存置し水分逸散抑制を抑制する条件とすることで、排水後に給水養生を実施しないことがコンクリートの品質に与える影響について検討した。養生条件④、⑤は、木製型枠を使用した。養生条件④では、打込み後、材齢 24 時間にて型枠を脱型し、脱型した面に養生マットを設置し、散水することで湿潤養生を材齢 5 日まで行った。養生条件⑤では、コンクリートを打込み、材齢 5 日まで型枠を存置したのち脱型した。養生条件④、⑤は、湿潤養生と水分逸散抑制がコンクリートの表層品質に与える影響について検討した。

表 3.3.3 コンクリートの養生条件

養生方法	材齢(日)				
	1	2	3	4	5
①排水湿潤養生(5日)	打込み+排水	湿潤養生			脱型, 曝露
②排水湿潤養生(3日)	打込み+排水	湿潤養生	脱型, 曝露		
③排水+木枠存置(5日)	打込み+排水	木製型枠存置 (水分逸散抑制)			脱型, 曝露
④湿潤養生(5日)	打込み	脱型後, 湿潤養生			曝露
⑤木枠存置(5日)	打込み	木製型枠存置 (水分逸散抑制)			脱型, 曝露

3.3.3 養生効果の確認試験

養生効果の確認として実施した試験項目を表 3.3.4, 測定位置を図 3.3.1 に示す.

コンクリートの反発度は, 材齢 32 日, 材齢 12 ヶ月において JIS A 1155 に準拠し実施した. 表層透気係数は, 材齢 32 日, 材齢 12 ヶ月において測定開始圧制御型の Torrent 法 (測定開始圧設定値 30mbar) による透気試験⁵⁾により測定し, あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため, 電極間隔を 50mm とした正負交替直流電流を用いた Wenner 法によって電気抵抗率の測定を行った. 細孔径分布は, 材齢 35 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面から 0-10mm, 10-20mm の各深度から 5×5×5mm の試料を多数切り出し, D-dry 乾燥を 7 日間施したのち, 水銀圧入式ポロシメータにより 2nm-200 μm の空隙量を測定した. 中性化深さの測定には, 材齢 35 日で採取したコア供試体を用いて型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 中性化深さは, 20℃, RH60%, CO₂ 濃度 5% の条件で 26 週間, 92 週間中性化を促進したのち, 割裂した面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し, 開放面からの非呈色深さを測定することにより求めた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出には, 材齢 12 ヶ月で採取したコア供試体を用いて, 型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するために, 浸せき試験により塩化物イオンの濃度分布を測定した. 型枠面側を開放面としたコア供試体を 3% の NaCl 水溶液へ 9 ヶ月間浸せきした後, ドライカッターで表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の平板を切り出し, JIS A 1154⁶⁾ に準じて, 電位差滴定法により各深さの全塩化物イオン濃度を測定した. 見掛けの拡散係数は, JSCE-G 572 2013⁷⁾ に準じて, 測定した塩化物イオン濃度分布を Fick の第二法則の一般解である 式(3.3.1)を用いて最小二乗法をもとに回帰分析を行い, 表面塩化物イオン濃度とともに算出した.

$$C(x,t) = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad \text{式(3.3.1)}$$

ここで, $C(x,t)$: 任意の深さにおける塩化物イオン濃度 (kg/m³), C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m³), x : 表面からの深さ (cm), D : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/年), t : 浸せき期間 (年) である.

表 3.3.4 試験項目

試験項目	測定方法・規格	測定頻度
反発度	JIS A 1155	材齢 32 日, 材齢 12 か月
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	材齢 32 日, 材齢 12 か月
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータ	材齢 35 日 コア供試体採取 コンクリート表層から 0-10mm, 10-20mm を測定
促進中性化試験	20°C, RH60%, CO ₂ 濃度 5%	材齢 35 日 コア供試体採取 促進期間 26 週, 92 週
塩分浸透試験	測定: JIS A 1154: 電位差滴定法 JSCE-G 572 2007 により 見かけの拡散係数算出	材齢 12 ヶ月 コア供試体採取 3%NaCl 溶液浸漬 9 か月 表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の測定

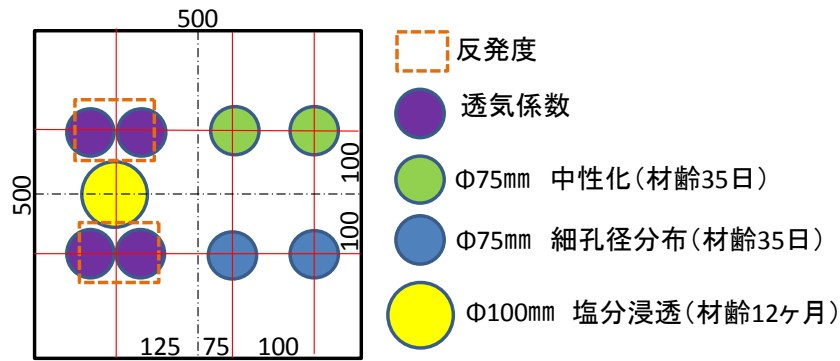


図 3.3.1 各試験における測定位置とコア供試体採取位置 (単位: mm)

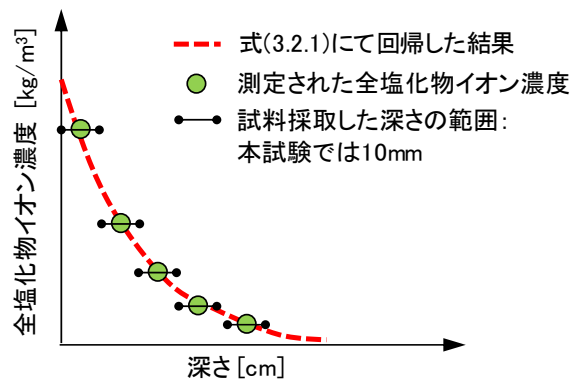


図 3.3.2 測定結果と見かけの拡散係数の算出のイメージ

3.3.4 試験結果

(1) コンクリートの反発度

材齢 32 日、材齢 12 ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を図 3.3.3 に示す。材齢 32 日の測定では、余剰水の排出を行った条件①-③の方が、余剰水の排出を行っていない条件④、⑤よりも約 1.2 倍大きな値を示しており、表層部分の硬度(強度)が向上している結果となった。材齢 12 ヶ月でも、余剰水の排出を行った条件①-③の方が、大きな値を示しているが、既往の研究結果⁸⁾と同様にその差は小さくなっている。

条件①-③の反発度を比較すると、排水後の湿潤養生の有無による差は確認されていない。加えて、条件④、⑤の反発度も差が確認できないことから、コンクリートの反発度は、余剰水の排出による効果によって表層部分の硬度(強度)が向上するが、排水後の湿潤養生や湿潤養生のみでは、向上しないことが示された。

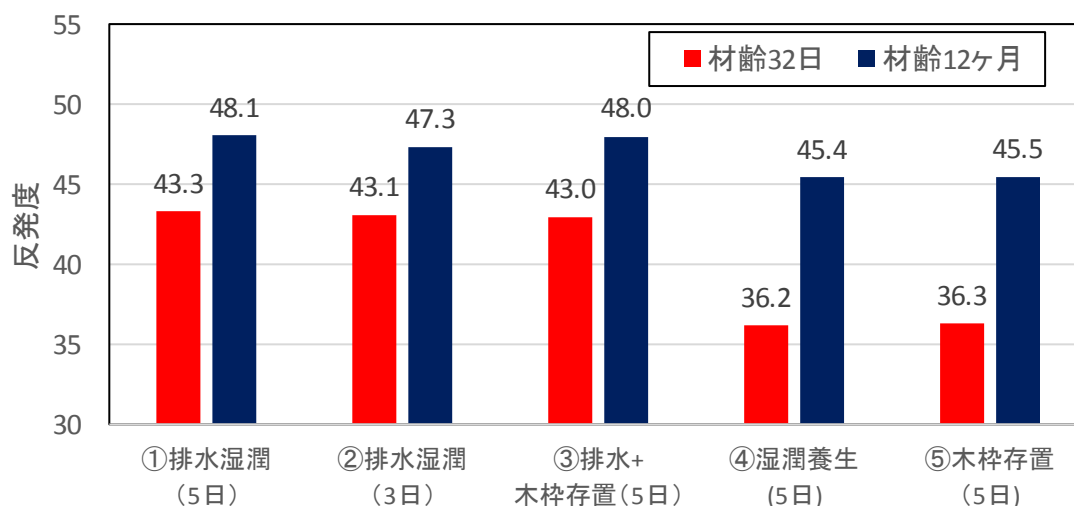


図 3.3.3 反発度の試験結果

(2) 表層透気係数

トレント式の表層透気係数の試験結果を表 3.3.4, 図 3.3.4 に示す. 図 3.3.4 は, Torrent らが提案している⁵⁾はコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し, 表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを 5 段階に区分評価したものである.

材齢 32 日, 材齢 12 ヶ月の測定結果ともに, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が最も表層透気係数が小さい値を示し, その次に排水のみを行った条件③が小さな値となっている. この結果から, 排水後の湿潤養生の有無が, コンクリートの表層品質に影響を与えており, 湿潤養生を連続で行うことで表層品質が向上していることが確認できた. また, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②の表層透気係数に優劣の明瞭な差がないことから, 湿潤養生が材齢 3 日であっても材齢 5 日と同等の品質向上効果であると評価できる.

余剰水の排出を行っていない条件④, ⑤は, 条件①-③よりも大きな値であり, 余剰水の排出の方が, 表層品質に与える影響が大きい. ただし, 湿潤養生を行った条件④のほうが, 木製型枠存置である⑤よりも小さな値を示しており, 湿潤養生を行うことによる表層品質の向上を確認することができた.

一方, 養生条件に関わらず材齢の経過とともに表層透気係数が増加していることが分かる. コンクリート表層の含水率を間接評価している電気抵抗率も増加していることから, コンクリートの乾燥に伴う透気経路の拡大によって, 表層透気係数の見かけ上増加⁹⁾したことによるものと考えられる.

表 3.3.4 表層透気係数の試験結果

(a) 表層透気係数 [単位: $\times 10^{-16}m^2$]

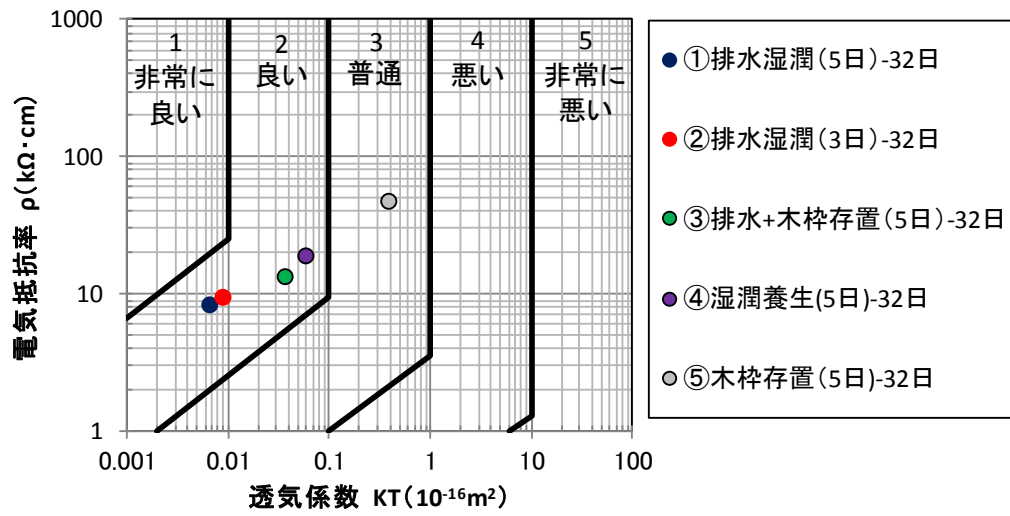
養生方法	①排水湿潤 (5 日)	②排水湿潤 (3 日)	③排水+ 木枠存置(5 日)	④湿潤養生 (5 日)	⑤木枠存置 (5 日)
材齢 32 日	0.007	0.009	0.039	0.062	0.403
材齢 12 ヶ月	0.068	0.092	0.268	1.03	1.80

測定値は 4 点の平均値

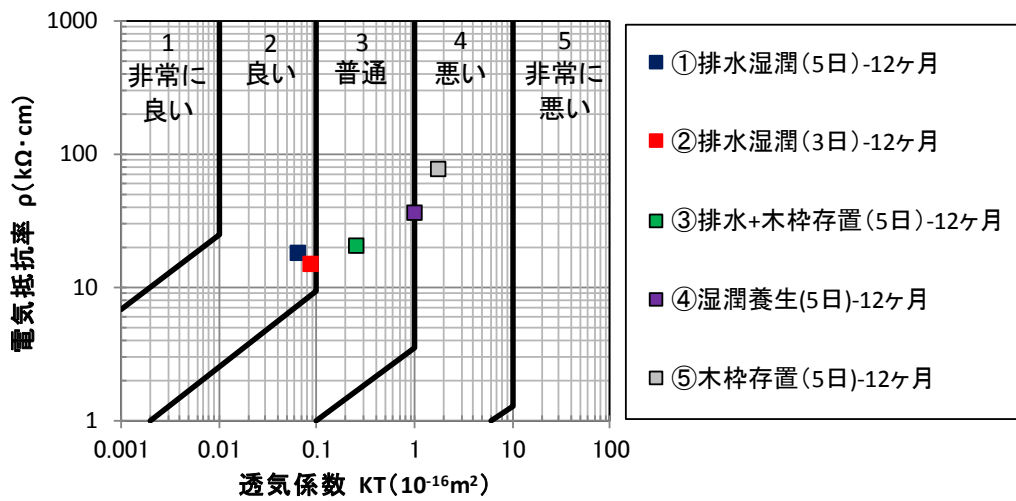
(b) 電気抵抗率 [単位: $k\Omega \cdot cm$]

養生方法	①排水湿潤 (5 日)	②排水湿潤 (3 日)	③排水+ 木枠存置(5 日)	④湿潤養生 (5 日)	⑤木枠存置 (5 日)
材齢 32 日	8.0	9.3	12.8	18.1	46.1
材齢 12 ヶ月	17.5	14.4	19.6	34.9	73.6

測定値は 4 点の平均値



(a) 材齢 32 日



(b) 材齢 12 ヶ月

図 3.3.4 表層透気係数の試験結果

(3) 細孔径分布

水銀圧入法によって計測された空隙量の結果を図 3.3.5, 細孔径分布, 累積空隙量を図 3.3.6, 図 3.3.7 に示す.

排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が 0-10mm, 10-20mm とともに, 最も空隙量が少なく, 小径化していることがわかる. 排水のみを行った条件③の表層の 0-10mm における空隙量は, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②と同程度であるが, 100 μ m 以上の粗大な空隙が残っている. また, 条件③の 10-20mm における空隙量は, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②だけではなく, 排水を行っていない条件④, ⑤よりも大きくなっており, 加えて累積空隙量から粗大な空隙が多いことが確認できる. これは, 排水するのみでは, 排水された箇所の一部がそのまま空隙として残り, その後の給水がないことで水和反応が十分に進行しないためであると考えられる. つまり, 余剰水の排水のみでは水セメント比の低減効果とうプラスの効果はあるが, 水和反応に必要な水も抜いてしまうことによるマイナスの効果もあることを示しており, 表層 0-10mm ではプラスの効果の方が大きいものに対して, 10mm 以深の内部では, マイナスの効果の方が大きくなっていると考えられる. 排水湿潤連続養生は, 水和反応に必要な水を補うことでコンクリートの内部まで空隙構造を緻密化することができる.

一方, 余剰水の排出を行っていない条件④, ⑤では, 条件③のような粗大な空隙は発生していないが, 0-10mm の空隙量は, 排水のみを行った条件③よりも大きな値を示しており, 排水と湿潤の効果と比較すると, 排水によるコンクリートの表層の水セメント比の低減の効果の方が大きい. また, 条件④, ⑤を比較すると 0-10mm, 10-20mm とともに空隙量は同程度あるが, 0-10mm の細孔径分布は, 条件④の方が小径化しており, 湿潤養生による空隙構造の緻密化が確認できた.

排水湿潤連続養生では, 0-10mm における空隙量だけではなくコンクリート内部の 10-20mm においても空隙量が大きく減少し, 緻密な空隙構造を形成している. これは, 排水, 湿潤のそれぞれの単体では確認できない効果であり, 連続で行うことによる相乗効果であると評価できる.

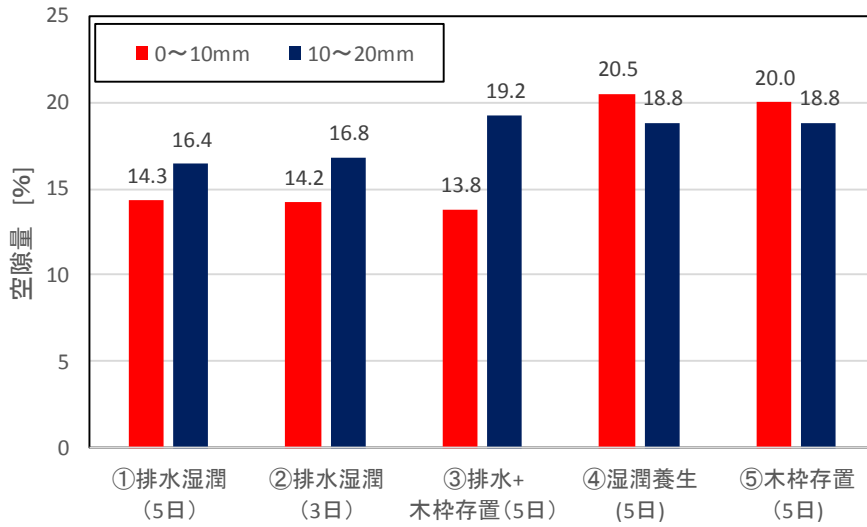


図 3.3.5 空隙率の試験結果

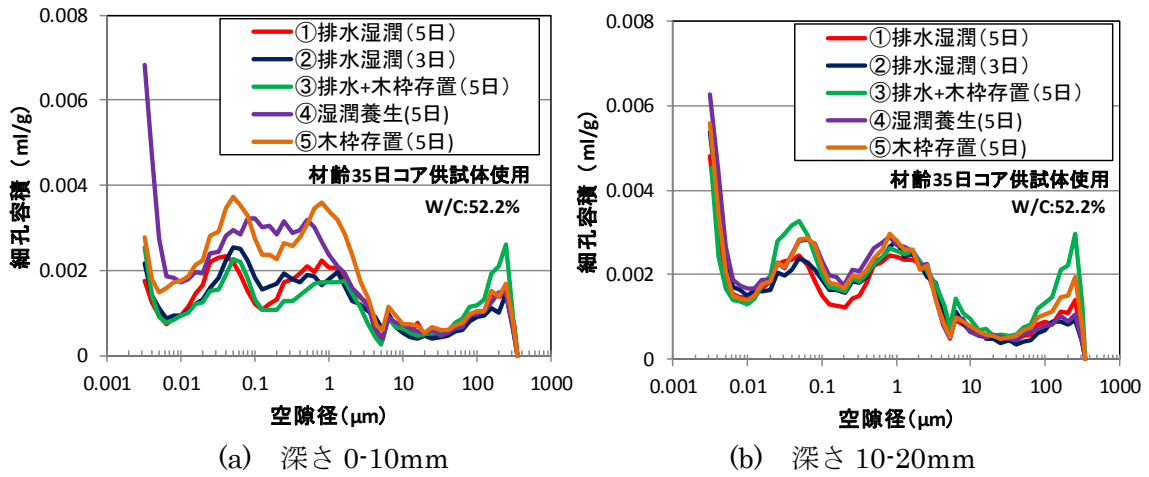


図 3.3.6 細孔径分布

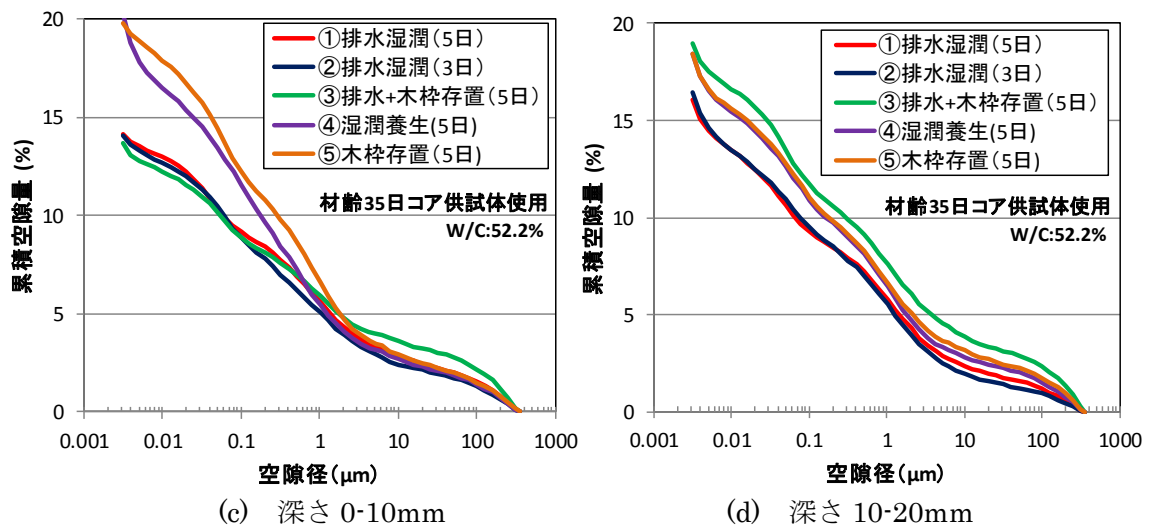


図 3.3.7 累積空隙率

(4) 促進中性化試験結果

促進期間 26 週, 92 週における中性化深さの試験結果を表 3.3.5, 写真 3.3.1, 3.3.2 に示す. 排水湿潤連続養生では, 0mm であり, 顕著に抑制された結果であった.

湿潤養生である条件④と木製型枠の存置である条件⑤では, 92 週において 30mm 以上中性化が進んでいるのに対して, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②および排水のみを行った条件③では, 促進期間 92 週においても中性化深さは 0mm であった. 中性化の抑制に対しては, 余剰水の排出によって表層の水セメント比を低下させる効果の方が大きいことが伺える. また, 排水を行わない場合の一般的な養生の範囲では, 湿潤養生を行うことで若干中性化が抑制できると考えられる.

表 3.3.5 促進中性化試験結果

養生条件	26 週	92 週
①排水湿潤(5 日)	0.0	0.0
②排水湿潤(3 日)	0.0	0.0
③排水+木枠存置(5 日)	0.0	0.0
④湿潤養生(5 日)	22.1 mm	31.2 mm
⑤木枠存置(5 日)	21.3 mm	36.1 mm

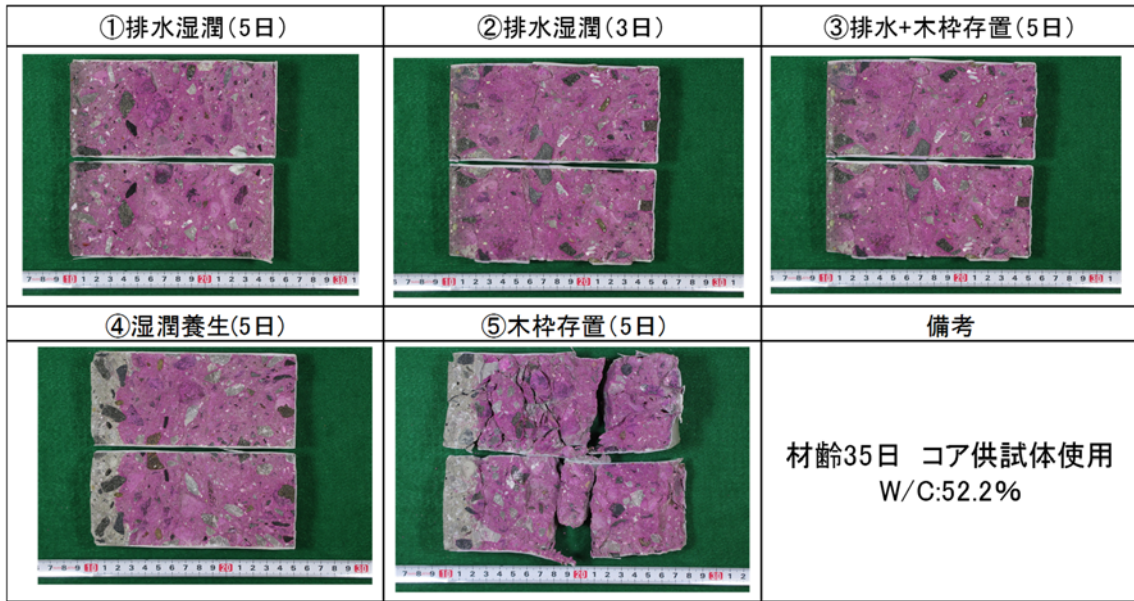


写真 3.3.1 促進期間 26 週の促進中性化深さ

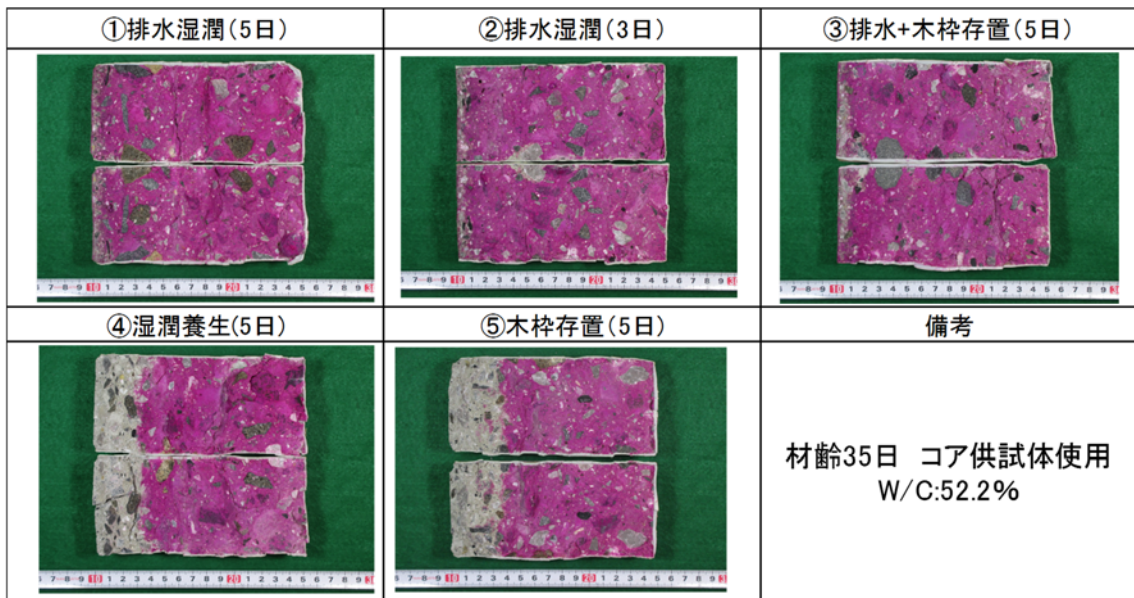


写真 3.3.2 促進期間 92 週の促進中性化深さ

(5) 塩分浸漬試験

3%NaCl 溶液に 9 ヶ月浸漬したコア供試体の各深さにおける全塩化物イオン濃度を図 3.3.7 に示す。

排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が 10mm 以深への塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる。排水のみを行った条件③では, 排水を行っていない条件④, ⑤よりも 10mm 以深への塩化物イオンの浸透が抑制されているが, 排水湿潤連続養生よりも 10-20mm の塩分イオン濃度が若干高く, 塩分浸透が進行しており, 排水湿潤連続養生による相乗効果を確認できた。しかしながら, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②と排水のみを行った条件③の空隙分布ほど塩分浸透には差が出なかった。これは, 本試験における浸漬期間では, 0-10mm における表層品質の影響が卓越する浸漬期間であったこと, 粗大空隙が独立した空隙であり拡散浸透に影響しなかった可能性があったこと, 塩分浸漬により水が供給されるため, 表層の未水和のセメントが再水和したことで影響が低減した可能性等が考えられる。

一方, 余剰水の排出を行っていない条件④, ⑤の結果を比較すると, 湿潤養生を行った条件④の方が, 条件⑤よりも塩分浸透が抑制されており, 湿潤養生による塩分浸透抑制効果の向上を確認することができた。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (D) および表面塩化物イオン濃度 (C_0) の両係数を変数として最小二乗法で求めた値を表 3.3.7, 図 3.3.8 に示す。見掛けの拡散係数は, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が最も小さく, 木製型枠存置である条件⑤の 1/7 程度小さな値となり, 塩分浸透抵抗性が大きく向上していることが確認できる。また, 排水のみを行った条件③は, 条件⑤の 1/5 程度小さな値となっており, 湿潤養生のみを実施するよりも余剰水の排出のみの効果の方が大きい結果となった。湿潤養生である条件④は, 条件⑤よりも見掛けの拡散係数が 16%小さな値となっており, 湿潤養生による塩分浸透抑制効果の向上を確認することができた。

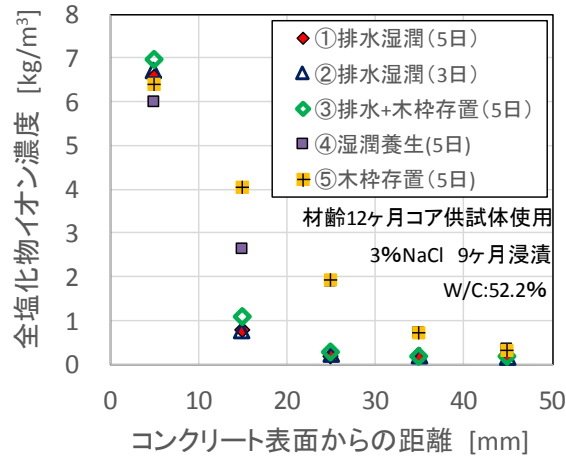


図 3.3.7 全塩化物イオン濃度分布

表 3.3.7 算出した表面塩分濃度と拡散係数

養生方法	表面塩分濃度 C_0 [kg/m ³]	拡散係数 D [cm ² /年]	⑤木製型枠との比 (拡散係数)
①排水湿潤(5日)	11.9	0.40	0.13
②排水湿潤(3日)	11.4	0.42	0.14
③排水+木枠存置(5日)	11.4	0.57	0.18
④湿潤養生(5日)	7.2	2.59	0.84
⑤木枠存置(5日)	7.9	3.09	1.00

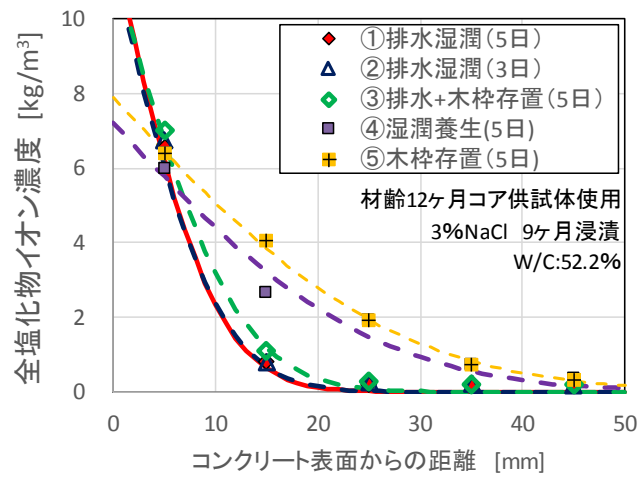


図 3.3.8 算出した表面塩分濃度と拡散係数

いずれの試験結果においても排水湿潤連続養生による相乗効果が確認された。これは、コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比が低減されて緻密な空隙構造が形成された効果と、脱型作業を経ずに凝結直後から速やかに開始した湿潤養生により水和反応に必要な水が十分に供給された効果により、排水と湿潤のみを実施する養生を上回る品質が得られたと考えることができる。本試験では余剰水の排出後の湿潤養生期間 5 日間, 3 日間の違いがコンクリートの表層品質に与える影響は小さかった。

3.4 給水開始時間がコンクリートの表層品質に与える影響

3.4.1 試験の目的

排水湿潤連続養生は、コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比が低減された上に、脱型作業を経ずに硬化直後から速やかに開始した湿潤養生により、コンクリート表層に緻密な空隙構造を形成することができる。この効果を機構面から考察すると、まず、余剰水を排出してコンクリート表層部の水セメント比を低減させることにより、水和物で埋めるべきセメント粒子間の空隙が減少し、セメント粒子間隔が狭くなる。更に、脱型が可能な強度の発現を待つことなく、速やかにコンクリート表面に液状水の供給を行うことにより、初期数日間のセメントの活発な水和反応による練り混ぜ水の消費による自己乾燥現象を利用してコンクリート表層に効率的に吸水させることが可能となり、脱型後に実施する通常の湿潤養生よりも更に高い効果を与えることができると思われる。

この中で、湿潤養生を開始の材齢は、一般的には余剰水の排出完了後、直ちに行うことがよいと考えられるが、その一方で、極若材齢でコンクリートの空隙構造の骨格が形成しないうちに養生水を供給すると、逆に空隙構造の骨格を壊し表層の水セメント比が増加してしまい、表層品質に悪影響を与える可能性がある。そこで、適切な給水開始材齢を評価することを目的に、給水開始時間の異なるコンクリート供試体を製作し、各種試験を実施した。

3.4.2 供試体の製作と養生方法

コンクリートの配合を表 3.4.1, 使用材料を表 3.4.2 に示す。事前に JIS A 1147¹⁰⁾:2007 コンクリートの凝結時間試験方法を行った (表 3.4.3, 図 3.4.1)。その試験結果から得られた凝結始発時間をもとに給水の開始時期を①材齢 1 時間, ②材齢 3 時間, ③材齢 6 時間, ④材齢 24 時間と 4 ケースを設定した。供試体は、幅 200 mm, 高さ 300 mm, 奥行き 180 mm とし、コンクリートは内部振動機を用いて 10 秒間締固めを行った (写真 3.4.1)。供試体の側面 2 面に排水湿潤連続養生を適用し、打込み完了後 24 時間まで余剰水を排出し、その後、打込み面を湛水することで湿潤状態を保持した。

湿潤養生を材齢 3 日まで実施した後、各給水時間に対して温度 20℃, 湿度 60% の環境に曝露し、各種試験を行った。

表 3.4.1 コンクリートの配合

配合名	SL (cm)	Air (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						W	C	S	G		Ad (C×%)
									G1	G2	
N55	15	4.5	20	55.0	47.5	166	302	863	385	578	1.0%

表 3.4.2 使用材料

記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
S	細骨材	千葉県君津産	表乾密度 2.61g/cm ³
G1	粗骨材	東京都青梅産	碎石5号 表乾密度 2.66g/cm ³
G2	粗骨材	東京都青梅産	碎石6号表乾密度 2.65g/cm ³
Ad	AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターポゾリス No.70

表 3.4.3 コンクリートの凝結特性

配合名	凝結始発	凝結終結
N55	5:50	8:00

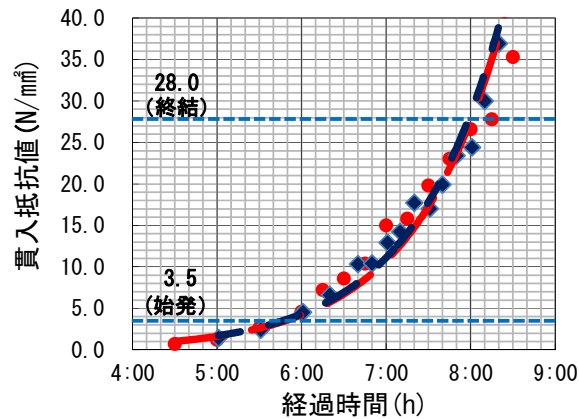


図 3.4.1 N55 の凝結試験結果



写真 3.4.1 供試体の型枠と供試体の作製状況

3.4.3 測定項目

測定項目を表 3.4.4, 測定位置を図 3.4.2 に示す.

表層透気係数は, 材齢 28 日, 材齢 6 ヶ月, 材齢 12 ヶ月において測定開始圧制御型の Torrent 法 (測定開始圧設定値 30mbar) による透気試験⁵⁾により測定し, あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため, 電極間隔を 50mm とした正負交替直流電流を用いた Wenner 法によって電気抵抗率の測定を行った. 細孔径分布は, 材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面から 0-10, 10-20, 20-30, 50-60mm の各深度から 5×5×5mm の試料を多数切り出し, D-dry 乾燥を 7 日間施したのち, 水銀圧入式ポロシメータにより 2nm-200 μ m の空隙量を測定した. 中性化深さの測定には, 材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 中性化深さは, 20°C, RH60%, CO₂ 濃度 5% の条件で 10 ヶ月間中性化を促進したのち, 割裂した面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し, 開放面からの非呈色深さを測定することにより求めた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出には, 材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するために, 浸せき試験により塩化物イオンの濃度分布を測定した. 型枠面側を開放面としたコア供試体を 3% の NaCl 水溶液へ 9 ヶ月間浸せきした後, ドライカッターで表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の平板を切り出し, JIS A 1154 に準じて, 電位差滴定法により各深さの全塩化物イオン濃度を測定した. 見掛けの拡散係数は, JSCE-G 572 2013 に準じて, 測定した塩化物イオン濃度分布を Fick の第二法則の一般解である 式(3.3.1)を用いて最小二乗法をもとに回帰分析を行い, 表面塩化物イオン濃度とともに算出した.

表 3.4.4 測定項目

試験項目	測定方法・規格	測定頻度
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	材齢 28 日, 材齢 6 か月, 材齢 12 か月
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータ	材齢 28 日 コア供試体採取 表面から 10mm ずつ 30mm まで 3 深度と 50-60mm の全 4 点の測定
促進中性化試験	20°C, RH60%, CO ₂ 濃度 5%	材齢 28 日 コア供試体採取 曝露期間 10 ヶ月
塩分浸透試験	測定: JIS A 1154: 電位差滴定法 JSCE-G 572 2007 により 見かけの拡散係数算出	材齢 28 日 コア供試体採取 3%NaCl 溶液浸漬 9 か月 表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の測定

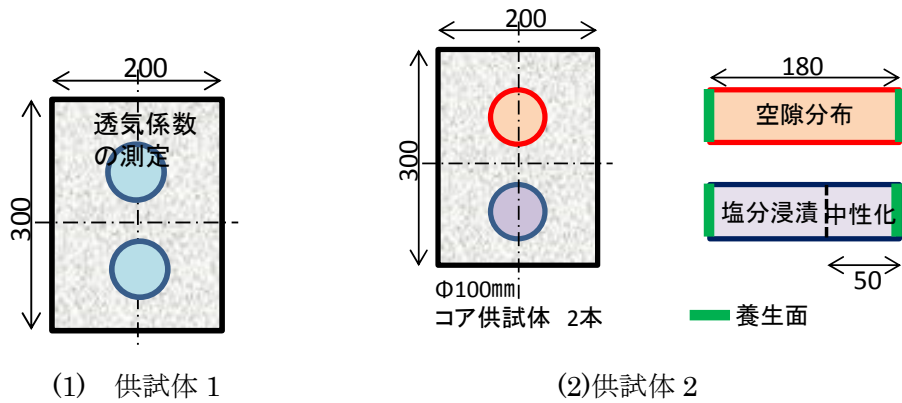


図 3.4.2 測定位置

3.4.4 試験結果

(1)表層透気係数

トレント式の表層透気係数，電気抵抗率，コンクリートの表層の含水率の試験結果を表 3.4.5, 図 3.4.3 に示す. コンクリートの表層の含水率の測定には含水計 (Tramex, Concrete Encounter CMEX II) を使用¹¹⁾した. 図 3.4.3 は, Torrent らが提案している⁵⁾はコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し, 表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを 5 段階に区分評価したものである.

表層透気係数は, 材齢とともに増加していることが分かる. コンクリート表層の含水率を評価している電気抵抗率も増加していることから, コンクリートの乾燥に伴う透気経路の拡大によって, 表層透気係数の見かけ上増加⁹⁾したことによるもの考えられる.

表層透気係数では, 給水開始時間による表層透気係数の差がない結果となっており, 表層透気係数からは給水開始時間がコンクリートの品質に与える影響を確認できなかった.

表 3.4.5 表層透気係数の試験結果

(a) 表層透気係数 [単位: 10^{-16}m^2]

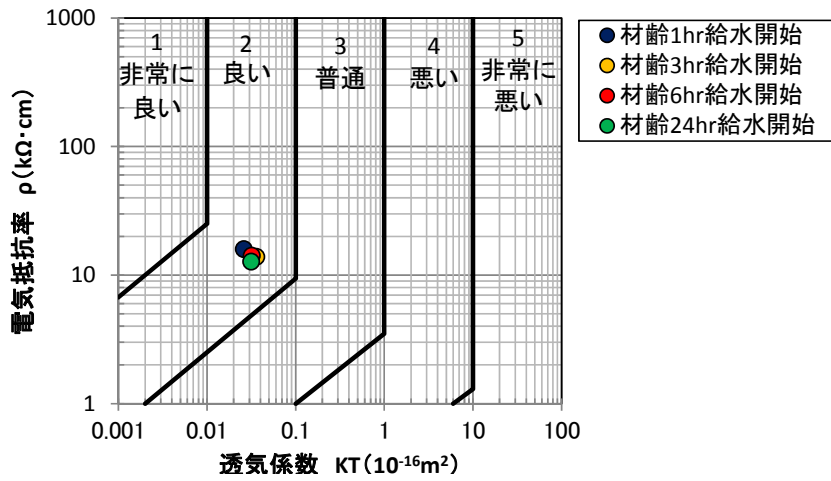
給水開始時間	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後
材齢 28 日	0.026	0.036	0.032	0.032
材齢 6 ヶ月	0.175	0.295	0.250	0.195
材齢 12 ヶ月	0.685	0.605	0.575	0.565

(b) 電気抵抗率 [単位: $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$]

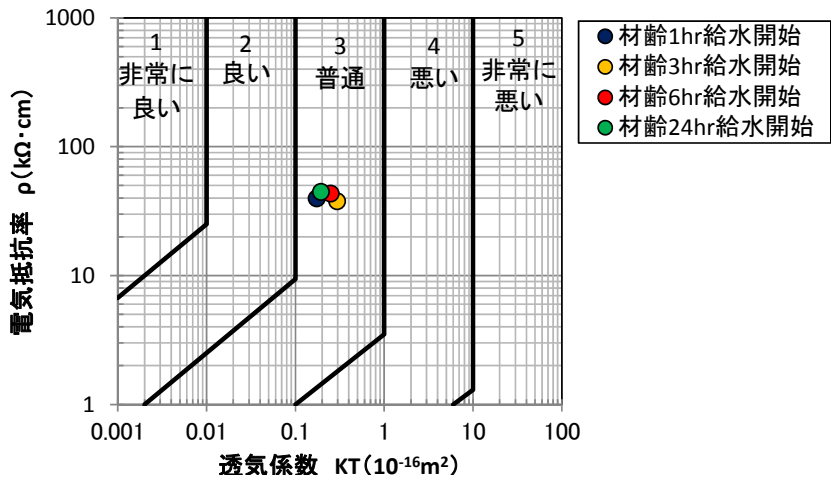
給水開始時間	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後
材齢 28 日	15.9	13.9	14.2	12.7
材齢 6 ヶ月	39.7	37.6	43.2	44.4
材齢 12 ヶ月	68.6	72.1	75.8	82.2

(3) 含水率 [単位: %]

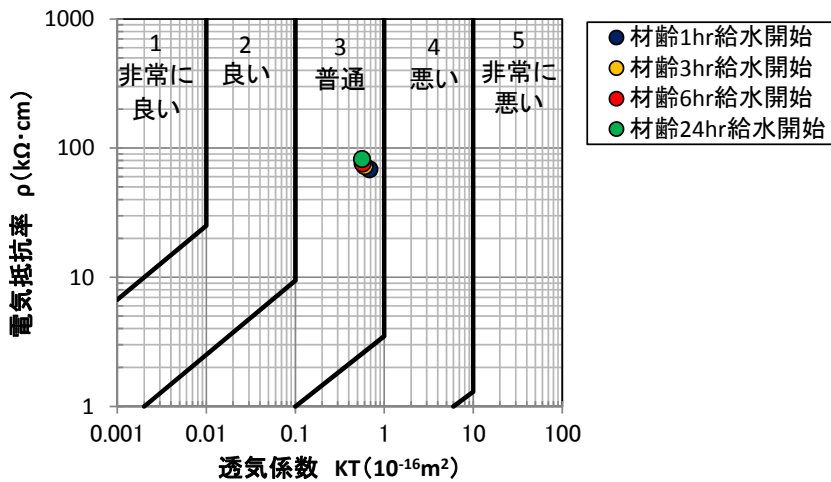
給水開始時間	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後
材齢 28 日	4.5	4.5	4.2	4.6
材齢 6 ヶ月	4.4	4.6	4.3	4.3
材齢 12 ヶ月	3.9	4.1	4.0	4.0



(a) 材齢 28 日



(b) 材齢 6 ヶ月



(c) 材齢 12 ヶ月

図 3.4.3 表層透気係数の試験結果

(2) 空隙分布

水銀圧入法によって計測された空隙量の結果を図 3.4.4, 細孔径分布, 累積空隙量を図 3.4.5-図 3.4.8 に示す.

1 時間後の給水開始では, 3-24 時間後の給水開始よりも 0-10mm の空隙量が多く, また粗大な径の空隙も残存している. これは, 給水開始時間が余剰水の排出が完全に完了しておらず, 加えて給水に対して耐えうるだけのコンクリートの組織構造が構築する前の段階であったため, 吸水量が多くなってしまい, 余剰水の排出が不十分であることと相まって表層のコンクリートの水セメント比が他の給水開始時間よりも低下しなかったためと考えられる.

3 時間後の給水開始では, 0-10mm において 6 時間, 24 時間後の給水開始よりも累積空隙量が大きく, $0.1\mu\text{m}$ 付近の空隙量が多くなっており, 1 時間後の給水開始と同様に給水に対して十分に耐えうるだけのコンクリートの組織構造が構築する前の段階であったと推察される. しかし, 表層から 20-30mm では, 6 時間, 24 時間後の給水開始よりも $0.01-0.1\mu\text{m}$ 付近の空隙量が減少している. これは, 表層のコンクリートの組織構造が十分に構築されていないことによって, 水和反応による自己乾燥現象によってコンクリート内部まで吸水されたため, 内部における水和反応が進行したと推察される.

6 時間後の給水開始では, 0-10mm において他の給水開始時間よりも空隙量が少なく, $0.1\mu\text{m}$ 付近の空隙量も減少している. これは, 6 時間後の給水開始では給水に対して耐えられる十分な組織構造が構築され, 余剰水の排出による水セメント比の減少とその後の給水がバランスよく作用し, 水和反応が進行したためであると考えられる. 効率よくコンクリートの表層を緻密化するためには, 凝結始発時間に給水することがよいことが示された.

24 時間後の給水開始では, 0-10mm において, 6 時間の給水開始よりも累積空隙量, $0.1\mu\text{m}$ 付近の空隙が多いが, 3 時間の給水開始との比較では, $0.1\mu\text{m}$ 付近の空隙が少なく, 緻密な空隙構造を形成している. さらに, 10-20mm では, 3 時間の給水開始よりも累積空隙量が少なく, 図 3.4.6 から若干空隙も小径化していることが確認できる. 24 時間後の給水開始でも給水開始が遅すぎることはなく, 十分な品質向上効果を検証できた.

以上より, 給水開始時間がコンクリートの表層品質に影響を与えていることから, 余剰水の排出のみならず湿潤養生を適切に行うことが重要であることを示している.

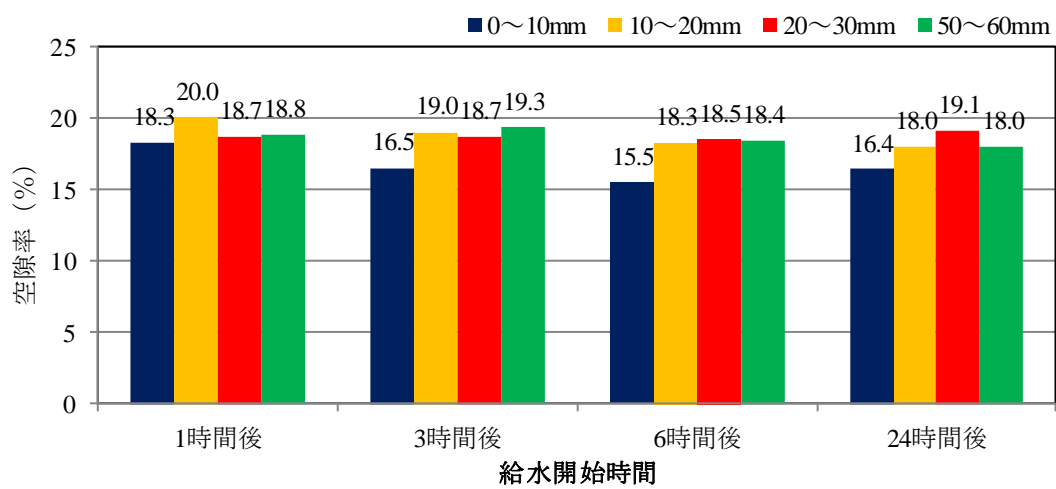


図 3.4.4 空隙率の試験結果

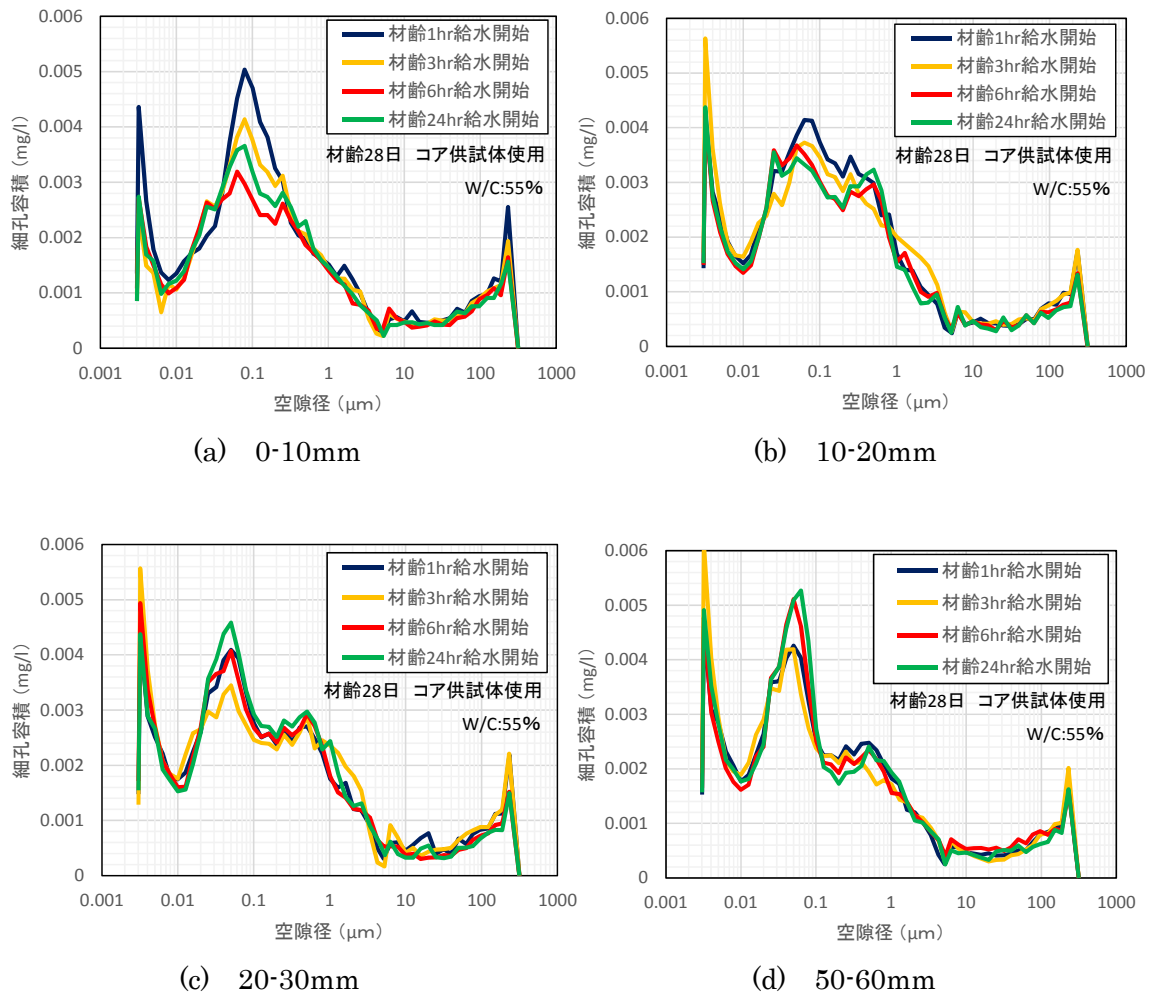


図 3.4.5 20°C-RH60%暴露における空隙分布

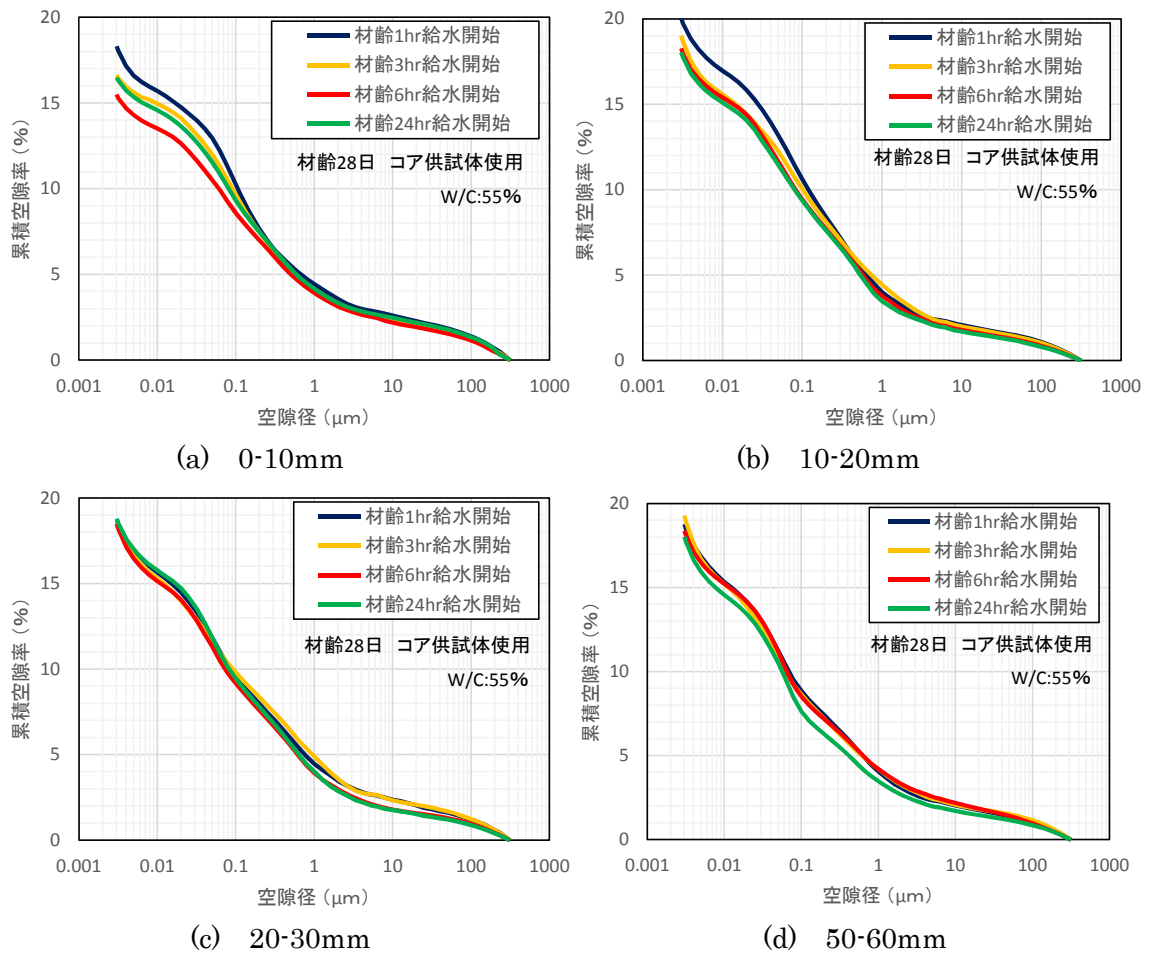


図 3.4.6 20°C-60%暴露における累積空隙率

(3) 促進中性化試験結果

促進期間 10 ヶ月における中性化深さの試験結果を表 3.4.5, 写真 3.4.2, 写真 3.4.3 に示す.

1 時間後の給水開始では, 3-24 時間後の給水開始よりも中性化が進行しており, 表層の品質を低下させている. 3 時間後の給水開始では, 中性化深さが 12.7 mm と 1 時間後の給水開始と同程度の中性化深さとなっており, 水銀圧入法による空隙分布の結果と同様の傾向を示している. 6 時間後の給水開始では, 最も中性化が進行しておらず, 最も中性化を抑制できていることが示された. 24 時間後の給水開始では, 6 時間の給水開始よりも中性化が進行しているが, 3 時間の給水開始よりも中性化は進行していない結果となっている.

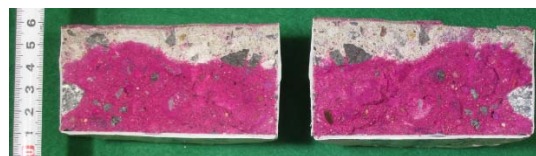
いずれの試験結果も水銀圧入法による空隙分布の結果と同様の傾向を示しており, 1 時間後>3 時間後>24 時間後>6 時間となった. 中性化抑制の観点では, 給水開始時間は凝結始発時間 (6 時間) から材齢 24 時間以内の実施が有効であることが示された.

表 3.4.5 促進中性化試験結果 [材齢 28 日コア供試体使用, W/C : 55%]

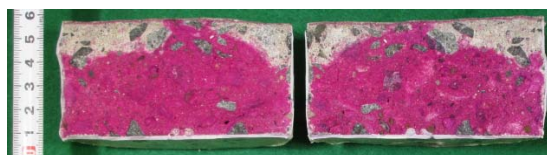
給水開始時間	促進中性化深さ [mm]
1 時間	13.6
3 時間	12.7
6 時間	5.2
24 時間	10.2



(a) 給水開始時間 1 時間



(b) 給水開始時間 3 時間



(c) 給水開始時間 6 時間



(d) 給水開始時間 24 時間

写真 3.4.2 促進中性化深さ [材齢 28 日コア供試体使用, W/C : 55%]

(4) 塩分浸漬試験

3%NaCl溶液に9ヶ月浸漬したコア供試体の全塩化物イオン濃度分布を表3.4.6, 図3.4.7, 3.4.8に示す。算出した表面塩分イオン濃度と見かけの拡散係数を表3.4.7, 3.4.8に示す。表面塩分イオン濃度と拡散係数は、両者を変数とするケースと表面塩分イオン濃度を24時間後の給水開始時間と同じとして固定したケースの2ケースにおいて算出した。

1時間後の給水開始では、3-24時間後の給水開始よりも塩化物イオン濃度が高く、内部まで浸透している結果となっている。そのため、算出された拡散係数も最も大きな値となっており、塩分浸透抵抗性が低い結果となった。3時間後の給水開始では、6時間後、24時間後の給水開始と比較すると0-10mm, 10-20mmの塩化物イオン濃度が高く、表面塩分濃度を一定として算出した拡散係数も大きな値であり塩分浸透しやすい結果となっており、水銀圧入法による空隙分布の結果と同様の傾向を示している。6時間後、24時間後の給水開始は、同程度の塩化物イオン濃度分布となっている。3時間後の給水開始よりも0-10mm, 10-20mmの塩化物イオン濃度が低く、表面塩分濃度を一定として算出した見かけの拡散係数も小さな値であり塩分浸透抵抗性が高い結果となっている。

いずれの試験結果も水銀圧入法による空隙分布の結果や中性化の進行と同様の傾向を示しており、1時間後>3時間後>24時間後>6時間後となった。塩分浸透の抑制の観点からも、他の試験結果と同様に給水開始時間は凝結始発時間（6時間）から材齢24時間の間に開始することがよいことを確認した。

表 3.4.6 全塩化物イオン濃度の測定結果 [単位: kg/m³]

表面からの距離(mm)	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後
0~10	11.34	10.05	8.98	8.67
10~20	5.00	3.96	3.74	3.48
20~30	1.89	1.49	1.55	0.93
30~40	0.34	0.26	0.30	0.21
40~50	0.38	0.24	0.27	0.02

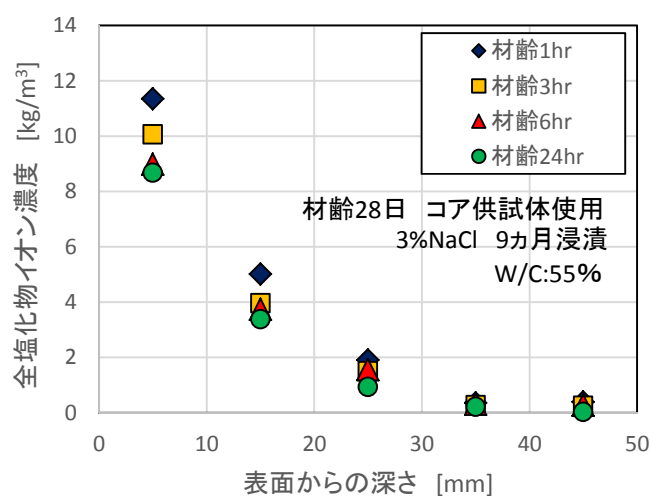


図 3.4.7 全塩化物イオン濃度分布

表 3.4.7 表面塩化物イオン濃度と拡散係数

(a) 最小 2 乗法をもとに表面塩分濃度と拡散係数を算出した場合

給水開始時間	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後
表面塩分濃度 [kg/m ³]	15.0	13.6	11.9	12.0
拡散係数 [cm ² /年]	1.60	1.38	1.54	1.24

(b) 表面塩分濃度を一定として算出した場合

給水開始時間	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後
表面塩分濃度 [kg/m ³]	12.0	12.0	12.0	12.0
拡散係数 [cm ² /年]	1.60	1.73	1.52	1.24

3.5 壁高欄模擬部材の製作と耐久性向上効果の検証

3.5.1 概要

実構造物の施工において標準的な施工方法を構築すること目的に壁高欄を想定した実大規模の部材を製作し，加えて品質向上効果の確認するために各種の耐久性試験を実施した．壁高欄を模擬した部材の形状および配筋を図 3.5.1 に示す．壁面部の形状は 3600×300×1200mm とし，既往の壁高欄の図面を参考に D16 の鉄筋を縦方向に 250mm，横方向に D13 を 200mm 間隔で配置した．部材は排水湿潤連続養生により製作するものと，比較用として通常の木製の型枠を存置して製作するものの 2 体とした．

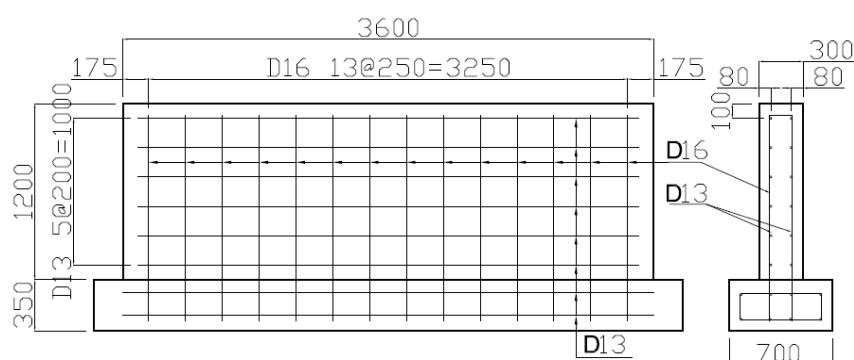


図 3.5.1 部材立面図

3.5.2 部材の製作と養生方法

写真 3.5.1 に型枠組立後の状況を示す．排水湿潤連続養生用の型枠は，透水板として内部に中空構造を有して湛水が可能な樹脂製の板をせき板も兼ねて使用した．透水板の背面は，栈木で補強し，コンクリート打込み時の側圧によるたわみを防止した．栈木を取り付けたのち，コンクリート打込み面側に透水性シートを設置して型枠の組立を行った．

コンクリートは，一般的な壁高欄に用いられる 30-8-20N の水セメント比 51.8% のレディーミクストコンクリートを使用した．コンクリートの配合を表 3.5.1，使用材料を表 3.5.2 に示す．コンクリートの打込みから仕上げまではコンクリート標準示方書に準拠¹²⁾して標準的なコンクリート施工方法に準じて実施した．表 3.5.3 に養生期間を示す．

排水湿潤連続養生では，打込み開始から下部に設置した水抜きを通して余剰水を排出した．3.4 の給水開始時間に関する検討結果をもとに，材齢 1 日から透水板を水で満たし，それ以降は打込み面から少量の水を供給し続けて湿潤養生を実施した．材齢 3 日（給水期間は 2 日）で水の供給を止め，透水板内の水を排出して湿潤養生を終了したのち，材齢 5 日において脱型した．木製型枠を使用して製作した比較用の部材は，打込み面を散水した養生マットで覆いながら材齢 5 日まで型枠を存置したのちに脱型した¹²⁾．

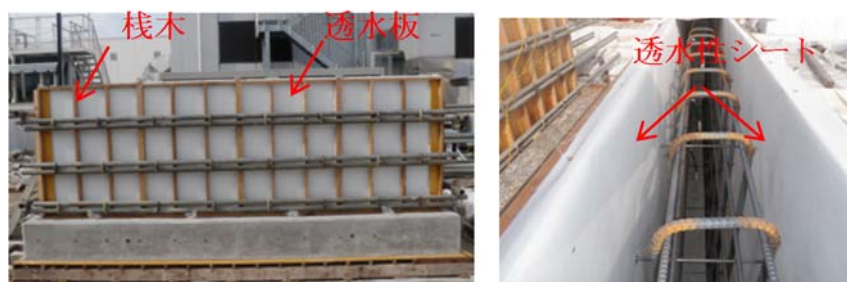


写真 3.5.1 型枠の組立状況

表 3.5.1 コンクリートの配合

配合名	SL (cm)	Air (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	S		G		Ad (C × %)
								S1	S2	G1	G2	
30-8-20N	8	4.5	20	51.8	46.2	156	302	595	255	694	308	0.8%

表 3.5.2 使用材料

記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
S1	細骨材	千葉県富津市産: 70% 高知県仁淀川産: 30%	表乾密度 2.61g/cm ³
S2		埼玉県秩父郡産	表乾密度 2.63g/cm ³
G1	粗骨材	山梨県大月市産	表乾密度 2.62g/cm ³
G2		埼玉県秩父郡産	表乾密度 2.70g/cm ³
Ad	AE 減水剤(標準型)	フローリック社	フローリック SV10H

表 3.5.3 養生期間

養生方法	材齢(日)				
	1	2	3	4	5
排水湿潤 連続養生	打込み	湿潤養生		型枠存置	
木製型枠 存置		型枠存置			脱型

3.5.3 養生効果の確認試験

(1)測定項目と測定方法

測定項目を表 3.5.4 に示す。養生による耐久性の向上効果を表層透気係数の測定と、部材から採取したコア供試体を対象とした細孔径分布、促進中性化深さ、塩化物イオンの見掛け拡散係数の測定により検証した。部材の高さ方向の品質の差を確認するために、測定は壁面の上部および下部で実施した。上部は壁面の天端から 200mm 下、下部はフーチング上面から 200mm 上の地点とした。

表層透気係数は、材齢 1 ヶ月および 7 ヶ月、材齢 5 年 2 ヶ月において測定開始圧制御型の Torrent 法（測定開始圧設定値 30mbar）による透気試験⁵⁾により測定し、あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため、電極間隔を 50mm とした正負交替直流電流を用いた Wenner 法によって電気抵抗率の測定を行った。反発度は、JIS A 1155 に準拠し、材齢 5 年 2 ヶ月において測定した。細孔径分布は、材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて、型枠面から 0-10, 10-20, 20-30mm の各深度から 5×5×5mm の試料を多数切り出し、D-dry 乾燥を 7 日間施したのち、水銀圧入式ポロシメータにより 2nm~200 μ m の空隙量を測定した。中性化深さの測定および塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出には、材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて、型枠面側を開放面とし、側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた。中性化深さは、20°C、RH60%、CO₂濃度 5%の条件で 13 週間中性化を促進したのち、割裂した面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、開放面からの非呈色深さを測定することにより求めた。塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するために、浸漬試験により塩化物イオンの濃度分布を測定した。型枠面側を開放面としたコア供試体を 3%の NaCl 水溶液へ 13 週間浸せきした後、ドライカッターで表面から 10mm ずつ 50mm まで、5 深度の平板を切り出し、JIS A 1154⁶⁾に準じて、電位差滴定法により各深さの全塩化物イオン濃度を測定した。見掛けの拡散係数は、JSCE-G 572 2007⁷⁾に準じて、測定した塩化物イオン濃度分布を Fick の第二法則の一般解である式(3.3.1)を用いて最小二乗法をもとに回帰分析を行い、表面塩化物イオン濃度とともに算出した。

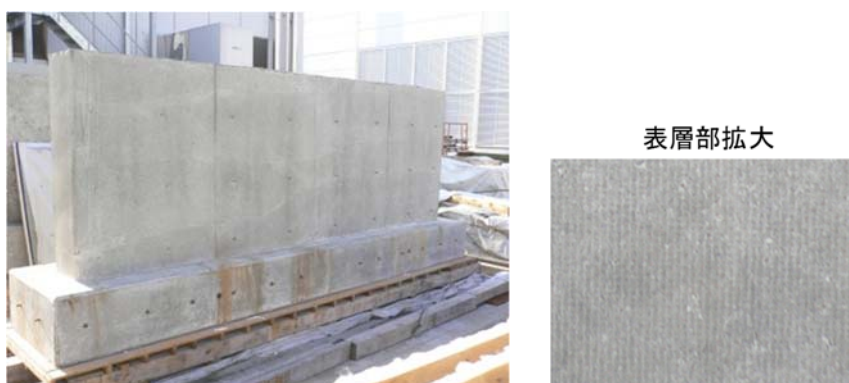
表 3.5.4 試験項目と試験箇所

試験項目	測定方法・規格	測定頻度
外観	目視	脱型後, 材齢 5 年 2 ヶ月後
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	上部・下部 4 箇所 材齢 28 日, 材齢 7 か月, 材齢 12 か月
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータ	材齢 28 日 コア供試体採取 表面から 10mm ずつ 30mm まで 3 深度と 50-60mm の全 4 点の測定
促進中性化試験	20°C, RH60%, CO ₂ 濃度 5%	材齢 28 日 コア供試体採取 曝露期間 13 週間
塩分浸透試験	測定: JIS A 1154: 電位差滴定法 JSCE-G 572 2007 により 見かけの拡散係数算出	材齢 28 日 コア供試体採取 3%NaCl 溶液浸漬 13 週間浸漬 表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の測定

3.5.4 試験結果

(1) コンクリートの出来型

脱型後の部材の状況を写真 3.5.1 に示す。排水湿潤連続養生した部材は、表面には、透水性シートの子布の細かな編目が転写されていたが、空気泡は非常に少なく良好な仕上がりであった。また、木製型枠の部材と比較すると表面の色は、やや濃い灰色であった。同一のコンクリートでも表面の状態によって色は異なり、表面の組織が粗である場合は、光が乱反射されて白味を帯びるのに対し、緻密である場合は、セメントに近い濃色を示す¹³⁾。以下で示すように、排水湿潤連続養生により表層部分の組織が緻密化されたと考えられる。材齢5年2ヶ月まで屋外曝露した部材の状況を写真 3.5.2 に示す。排水湿潤連続養生を施した部材は、大きな変化は見られないが、木製型枠の部材は、乾燥収縮と考えられる微細な亀甲上のひび割れが発生していた。排水湿潤連続養生による表層品質の向上により乾燥収縮ひび割れが低減したものと推察される。なお、乾燥収縮ひび割れの低減に関するメカニズムに関しては4.3.4で検討を行った。



(a) 排水湿潤連続養生を実施した部材



(b) 木製型枠による部材

写真 3.5.1 脱型直後の部材の外観状況



(a) 排水湿潤連続養生を実施した部材



(b) 木製型枠による部材

写真 3.5.1 材齢 5 年 2 ヶ月経過における部材の外観状況

(2) トレント法による表層透気係数試験結果

材齢 28 日，7 ヶ月および 5 年 2 ヶ月における Torrent 法による表層透気係数の測定結果を表 3.5.5，図 3.5.2 に示す。透気係数は，4 側点の平均値である。図 3.5.2 は，Torrent らが提案している⁵⁾はコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し，表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを 5 段階に区分評価したものである。材齢 28 日の測定では，両部材ともに小さな透気係数を示しており，養生方法による差はほとんど見られなかった。若材齢での測定では，コンクリート中の含水率がまだ高いため，コンクリートの含水率が高く透気しにくかった⁹⁾ものと考えられる。材齢 7 ヶ月における透気係数は，排水・湿潤連続養生した部材では，上部，下部の全測定結果の平均値で木製型枠の存置による養生の 1/5 程度の値となった。透気試験では，上部と下部の測定値に優劣の明瞭な傾向は現れなかった。材齢 5 年 2 ヶ月における測定結果では，排水・湿潤連続養生した部材は，材齢 7 ヶ月の測定結果とほとんど変化せず同等の透気係数であるが，木製型枠の部材では，材齢 7 ヶ月の測定結果よりも 20 倍程度大きな透気係数となっ

ており、排水湿潤連続養生した部材では、木製型枠の部材よりも 1/50-1/100 の透気係数となった。一般的に材齢の経過とともにコンクリートの乾燥に伴う透気経路の拡大によって表層透気係数の見かけ上増加する⁹⁾。しかし、排水湿潤連続養生では、材齢の経過とともに電気抵抗率が増加していることから、乾燥に伴って透気経路が拡大しているはずであるが、透気係数は大きく変化していない。この結果は、トレント式における表層透気係数は、材齢が経過し、十分に乾燥が進んだ後に計測しなければ、適切な評価ができないことを示している。なお、木製型枠を用いた部材では、材齢 5 年 2 ヶ月のコンクリートの表層において、乾燥収縮と思われる亀甲状の微細なひび割れが確認できており、この微細なひび割れの影響あったことも、透気係数が大きくなった一因と考えられる。

表 3.5.5 表層透気係数の試験結果

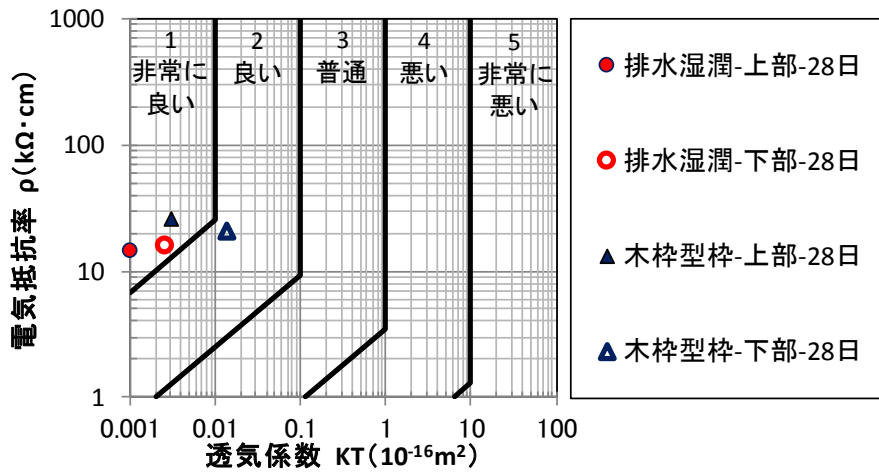
(a) 表層透気係数 [単位 $10^{-16}m^2$]

測定箇所	木製型枠			測定箇所	排水湿潤連続養生		
	材齢28日	材齢7ヶ月	材齢5年2ヶ月		材齢28日	材齢7ヶ月	材齢5年2ヶ月
上部	0.003	0.021	0.502 (4.4%)	上部	0.001	0.012	0.011 (3.6%)
下部	0.014	0.054	1.348 (4.8%)	下部	0.003	0.004	0.014 (3.8%)

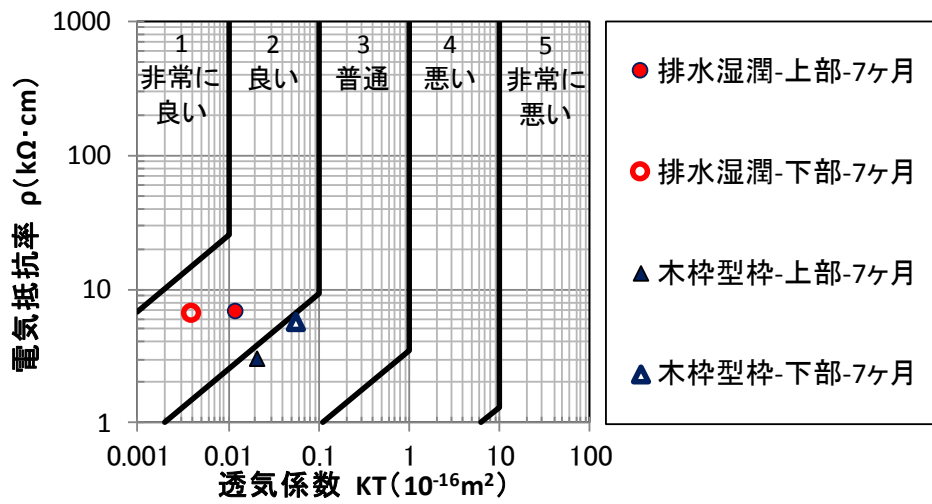
()内の数値は、Tramex 社 CMEX2 CMEXpert II Moisture Meter によるコンクリート表層含水率

(b) 電気抵抗率 [単位 $k\Omega \cdot cm$]

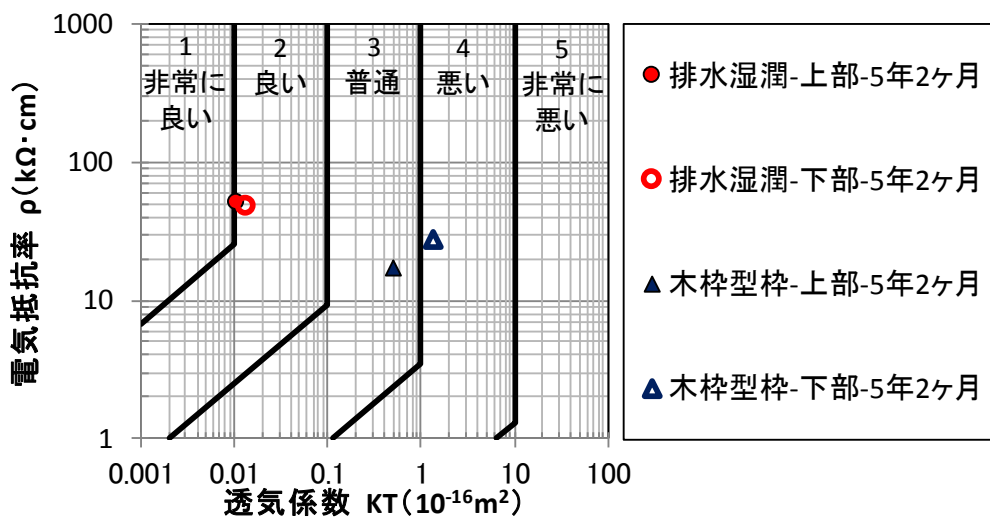
測定箇所	木製型枠			測定箇所	排水湿潤連続養生		
	材齢28日	材齢7ヶ月	材齢5年2ヶ月		材齢28日	材齢7ヶ月	材齢5年2ヶ月
上部	26.1	3.1	17.3	上部	14.4	6.8	51.7
下部	20.8	5.7	27.6	下部	16.0	6.5	47.8



(a) 材齢 28 日



(b) 材齢 7 ヶ月



(c) 材齢 5 年 2 ヶ月

図 3.5.2 表層透気係数の試験結果

(3) 反発度

材齢5年2ヶ月における反発度の測定結果を表3.5.5に示す。排水湿潤連続養生を施した部材では、木製型枠による部材の約1.1倍となっており、長期材齢においても表層のコンクリート強度が高くなっていることを確認することができた。

表 3.5.5 反発度の測定結果

測定箇所	木製型枠	排水湿潤連続養生
上部	47.1	52.3
下部	45.5	52.3

(4) 空隙量と空隙分布

図3.5.3および図3.5.4に水銀圧入法による累積空隙率および細孔径分布を示す。排水湿潤連続養生の累積空隙率は、木製型枠による養生よりも、いずれの深さにおいても小さな値であり、養生の効果が現れた。特に、型枠面から0-10mmにおいて効果が顕著であり、木製型枠よりも20%以上空隙率が低下していた。

細孔径分布に関しては、0-10mmにおいて排水湿潤連続養生では木製型枠の存置による養生と比較して1 μ m以下の空隙が大幅に減少し、緻密な空隙構造が形成されていることがわかる。型枠面からの深さ10-20mm、20-30mmにおいては、養生方法による差が小さくなっているが、0.01 μ m以下の空隙量は減少しており、さらに小径側の空隙にシフトしている。この結果から、排水湿潤連続養生では、コンクリートの表層から30mm程度までコンクリートの空隙構造が緻密化されていると評価できる。

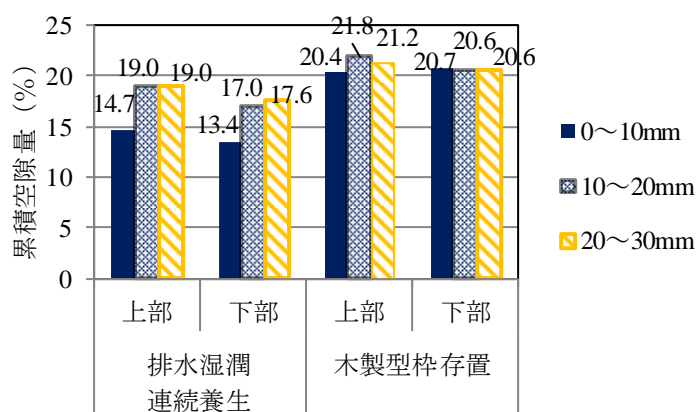
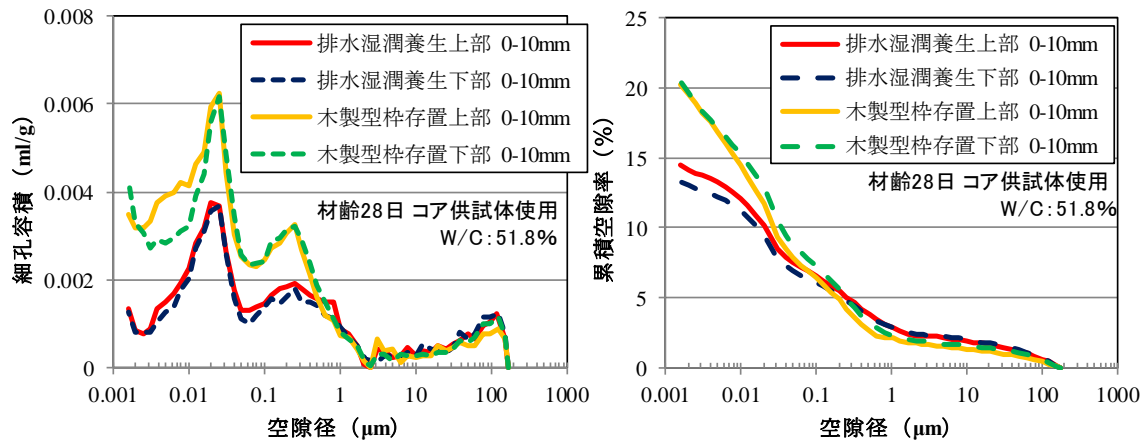
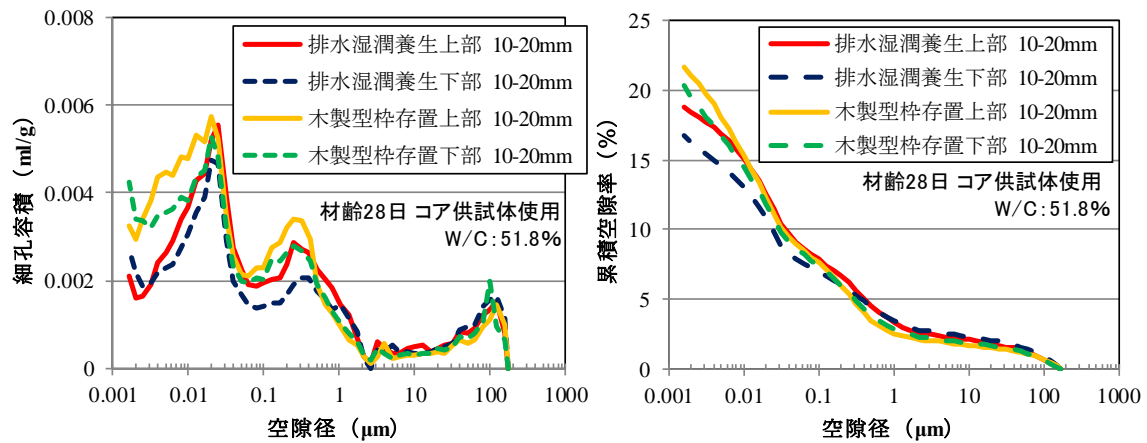


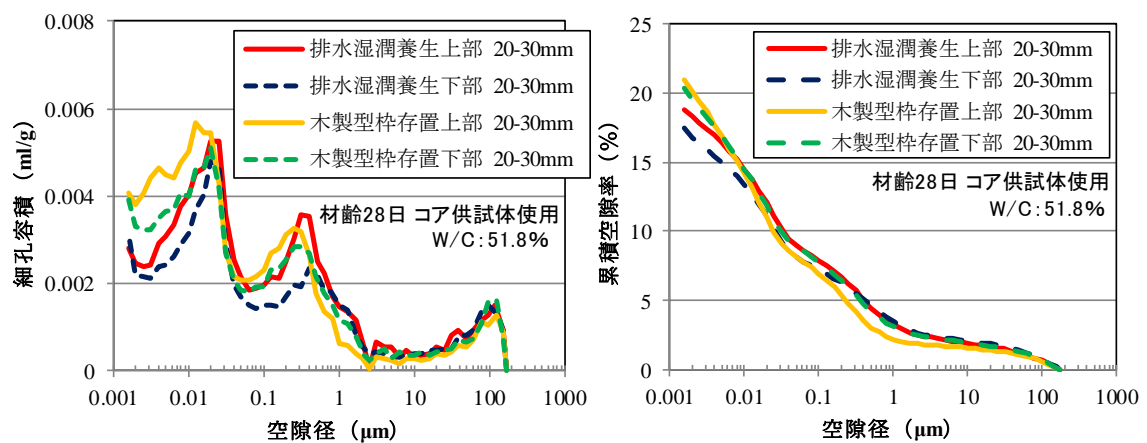
図 3.5.3 細孔径分布から算出した累積空隙量



(a) コンクリート表層から 10mm



(b) 深さ 10-20mm



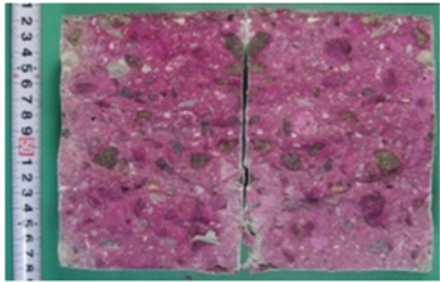
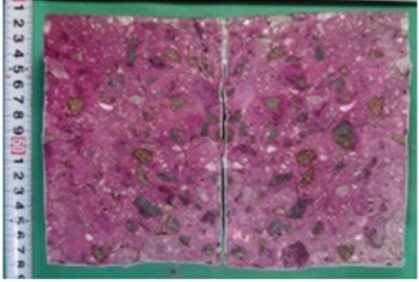
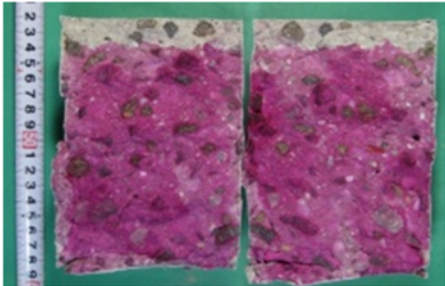
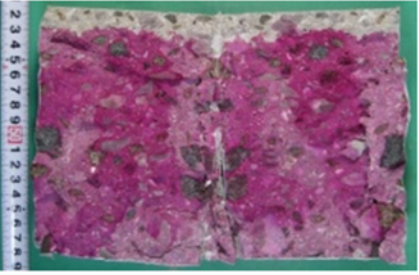
(c) 深さ 20-30mm

図 3.5.4 各深度毎の細孔径分布と累積空隙量

(5) 中性化

促進中性化試験による 13 週間での中性化深さを表 3.5.6 に示す。木製型枠の存置による養生では、13-16mm 以上中性化が進んでいるのに対して、排水湿潤連続養生では、0mm であり、顕著に抑制された。

表 3.5.6 促進中性化試験結果 [材齢 28 日コア供試体使用, W/C : 51.8%]

養生	上部	下部
排水湿潤 連続養生	 <p>中性化深さ0mm</p>	 <p>中性化深さ0mm</p>
木製型枠 存置	 <p>中性化深さ16mm</p>	 <p>中性化深さ13mm</p>

(6) 塩分浸透性

3%の NaCl 水溶液へ 13 週間浸漬した時の各深さにおける全塩化物イオン濃度を図 3.5.5 に示す。排水湿潤連続養生では、開放面から 10mm 以深への塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる。算出された塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を表 3.5.7 に示す。見掛けの拡散係数は、木製型枠の存置による養生と比べて 1/2-1/3 程度小さな値となり、塩分浸透抵抗性が大きく向上していることが確認できた。

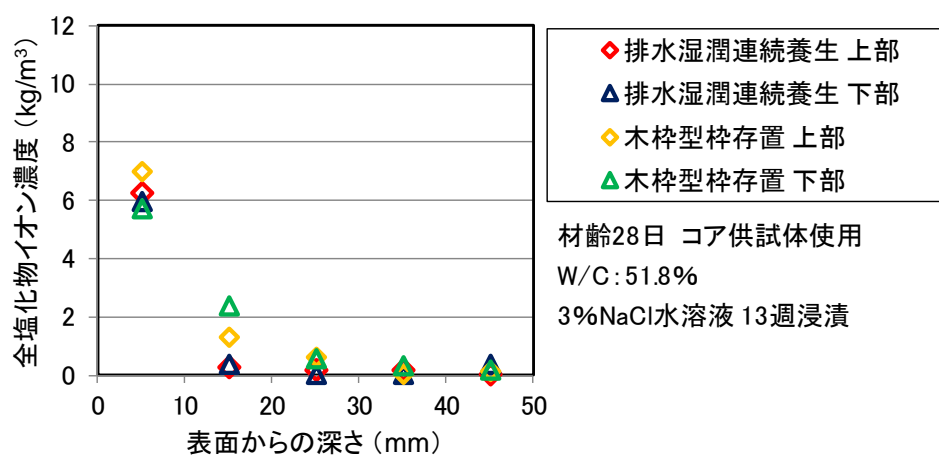


図 3.5.5 全塩化物イオン濃度分布

表 3.5.7 表面塩化物イオン濃度と拡散係数

(a) 最小 2 乗法をもとに表面塩分濃度と拡散係数を算出した場合

養生方法	コア採取位置	表面塩化物イオン濃度 [kg/m³]	拡散係数 [cm²/年]
排水湿潤 連続養生	上部	10.2	1.57
	下部	9.8	1.40
木枠型枠 存置	上部	9.6	2.99
	下部	7.2	5.25

(b) 表面塩分濃度を一定(木製型枠における上部・下部の平均値)として算出した場合

養生方法	コア採取位置	表面塩化物イオン濃度 [kg/m³]	拡散係数 [cm²/年]
排水湿潤 連側養生	上部	8.4	1.88
	下部		1.77
木枠型枠 存置	上部		3.15
	下部		3.52

いずれの試験においても排水湿潤連続養生による優れた養生効果が実証することができた。これは、コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比が低減されて緻密な空隙構造が形成された効果と脱型作業を経ずに凝結直後から速やかに開始した湿潤養生によりコンクリート内部まで水和反応に必要な水が十分に供給された効果により、3日間の養生期間でも一般的な5日間の木製型枠の存置による養生を大きく上回る品質が得られたと考えることができる。また、以上の結果は、養生期間を端出することができ、型枠の転用や工程の短縮に寄与する技術であることを示している。

3.3の小型供試体を用いた実験において、排水湿潤連続養生による品質向上効果を確認してきたが、実規模の大型の部材であっても同様の効果が期待できることを確認した。また、本試験では壁の上下方向の品質の違いは大きくなく、コンクリートの自重による影響は小さい結果であった。

3.6 橋梁上部工壁高欄への試験施工

3.6.1 構造物の概要

3.5において実規模部材における耐久性の確認試験の結果を受けて、排水湿潤連続養生を壁高欄の一部において適用した。実際の構造物は、様々な埋設物や周囲との取合いがあるため、そのような制約のある状況においても所定の施工方法と性能が確保されるかを確認することを主な目的とした。

排水湿潤連続養生は図 3.6.1 にハッチングで示す橋台の延長 9m、高さ約 1.1m の壁高欄において、ハンチを除いた面（図 3.6.1 の赤線部）に適用した。上下線の壁高欄のコンクリートを同日に打込みを行ったが、排水湿潤連続養生は上り線において適用し、下り線は比較用として通常の木製型枠を用いて施工した。

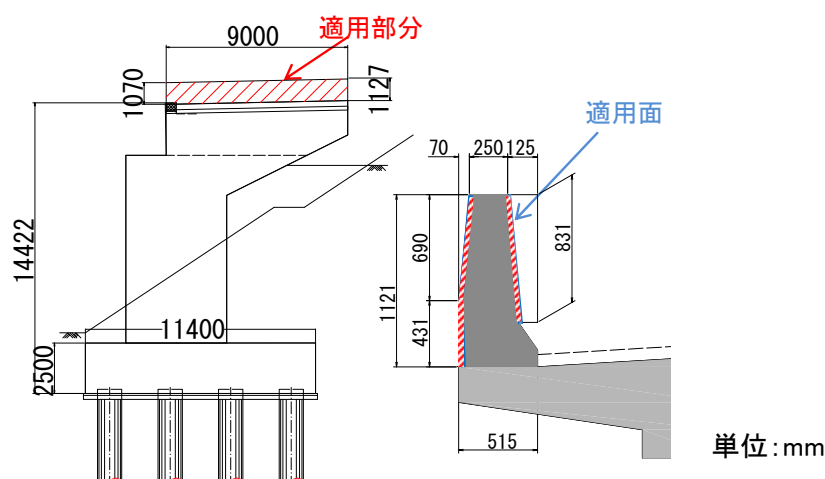


図 3.6.1 排水湿潤連続養生の適用位置

3.6.2 施工方法

型枠の組立て状況を写真 3.6.1 に示す。透水板は、壁高欄模擬部材製作時と同様にコンクリート面側を透水性シートで覆い、外面は栈木で補強を行い使用した。透水板の幅は、1.8mとし、5枚をつなげて型枠を組立てた。コンクリートは、表 3.6.1 に示す 27-8-20N の水結合材比 53.0%のレディーミクストコンクリートを使用した。打込みはコンクリートポンプ車で行った。締固めは、通常の壁高欄の施工と同様に行い、打込み開始から水抜き孔より余剰水の排水を行った。コンクリートの施工状況と打込み時の余剰水の排出状況を写真 3.6.2 に示す。水抜き孔は幅 1.8m、高さ約 80cm の透水板 1枚につき 1ヶ所取り付けしたが、この範囲から多量の余剰水が排出されていることが確認できる。余剰水の排出量は、約 1.0kg/m²であった。

養生期間を表 3.6.2 に示す。施工が冬期であったため、打込み翌日から打込み面を電熱式の加熱養生シートで覆って保温養生するとともに、湿潤養生を実施した。現場は水を供給

し続けることができる環境であったため、打込み面に常時給水して透水シートを湿潤に保った。材齢 4 日（湿潤養生 3 日間）で水の供給を終了して、7 日まで加熱養生シートによる保温養生を行い脱型した。木製型枠を使用した壁高欄は加熱養生シートによる保温のみを実施して、同じく材齢 7 日で脱型した。

施工後の調査として、コンクリートの仕上がり面の目視確認を行った。その後、コンクリートの材齢 42 日、15 ヶ月において、非破壊で試験可能なリバウンドハンマーによる反発度および Torrent 法による表層透気係数を測定した。測定位置を図 3.6.2 に示す。排水・湿潤連続養生では、幅 1.8m で 5 枚設置したそれぞれの透水板の上部、下部の各 5 カ所の位置、木製型枠の存置による養生では、上部、下部の各 2 ヶ所の位置で測定を行った。

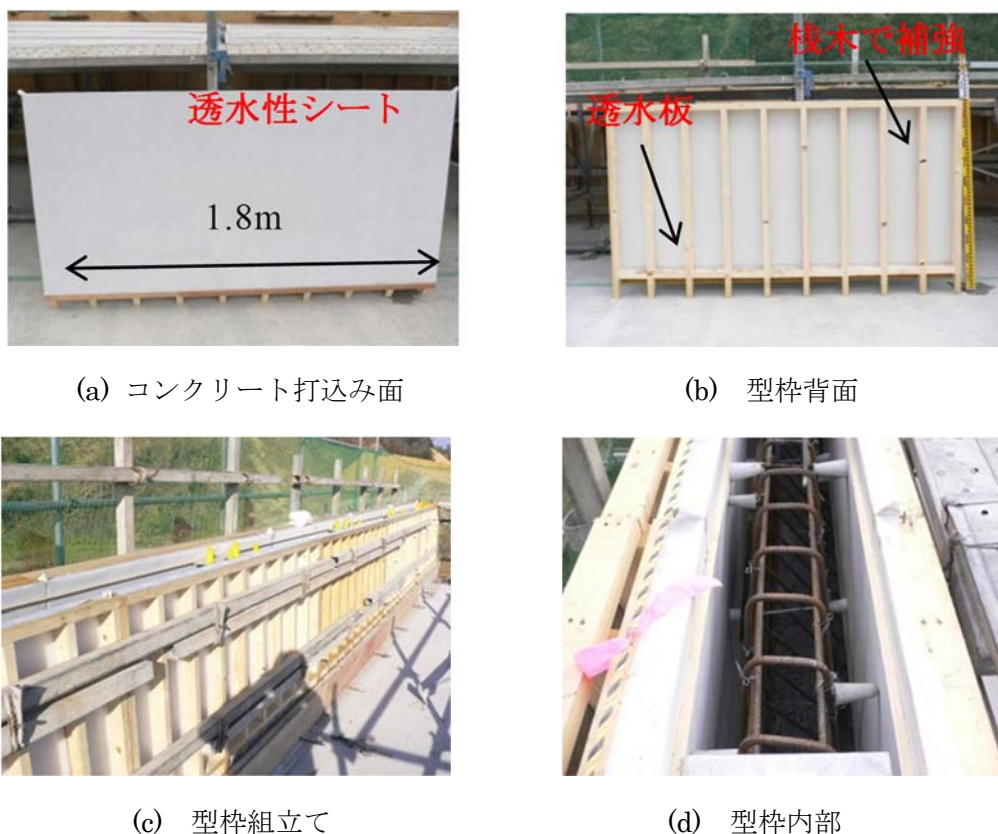


写真 3.6.1 型枠の組立て状況

表 3.6.1 コンクリートの配合 [27-8-20 N+Ex]

配合名	SL	Air	Gmax	W/B	s/a	単体量 [kg/m ³]					
	[cm]	[%]	[mm]	[%]	[%]	W	C	Ex	S	G	Ad
27-8-20N	8	4.5	20	53.0	47.7	165	291	20	868	967	2.86



(a) コンクリート施工状況



(b) 余剰水の排出

写真 3.6.2 コンクリートの施工と余剰水の排出状況

表 3.6.2 養生期間

養生方法	材齢(日)							
	1	2	3	4	5	6	7	
排水湿潤連続養生	打込み+排水	湿潤養生			型枠存置(保温養生)			脱型
木製型枠	打込み	木製型枠存置(保温養生)						

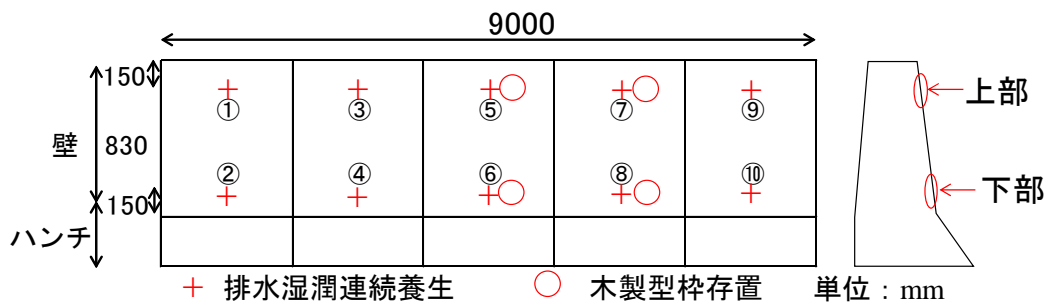


図 3.6.2 非破壊調査実施位置

3.6.3 非破壊試験による品質確認試験

脱型後の壁高欄の仕上り状況を写真 3.6.3, 写真 3.6.4 に示す. 部材実験の場合と同様に, 排水湿潤連続養生したコンクリートは表面に透水シートの織布の網目が残るが, 空気泡もほとんどなく良好な仕上がりであった.



(a) 排水湿潤連続養生



(b) コンクリート表面

写真 3.6.3 コンクリートの仕上がり状況 (排水湿潤連続養生)



(a) 木製型枠



(b) コンクリート表面

写真 3.6.4 コンクリートの仕上がり状況 (木製型枠)

反発度の計測結果を表 3.6.2 に示す。排水湿潤連続養生における反発度は、材齢、部位に関わらず、木製型枠の存置による養生よりも大きく、材齢 15 ヶ月経過した時点でも、上部、下部ともに排水湿潤連続養生の方が約 1.1 倍大きな値を示しており、表層部分の硬度(強度)が向上していることが確認できた。

表 3.6.2 反発度の試験結果

測定位置	排水湿潤連続養生		木製型枠存置	
	材齢 42 日	材齢 15 ヶ月	材齢 42 日	材齢 15 ヶ月
上部	43.1	46.1	36.4	42.6
下部	47.7	49.1	36.9	43.1

透気係数の計測結果を表 3.6.3, 図 3.6.3 に示す。材齢 42 日では、早期材齢で試験したこともあり、養生による差は顕著ではないが、材齢 15 ヶ月では、排水湿潤連続養生における透気係数は、木製型枠の存置による養生と比べて、上部で 1/5 以下、下部では 1/20 以下となっており、コンクリート表面の品質が大きく向上していることが示された。

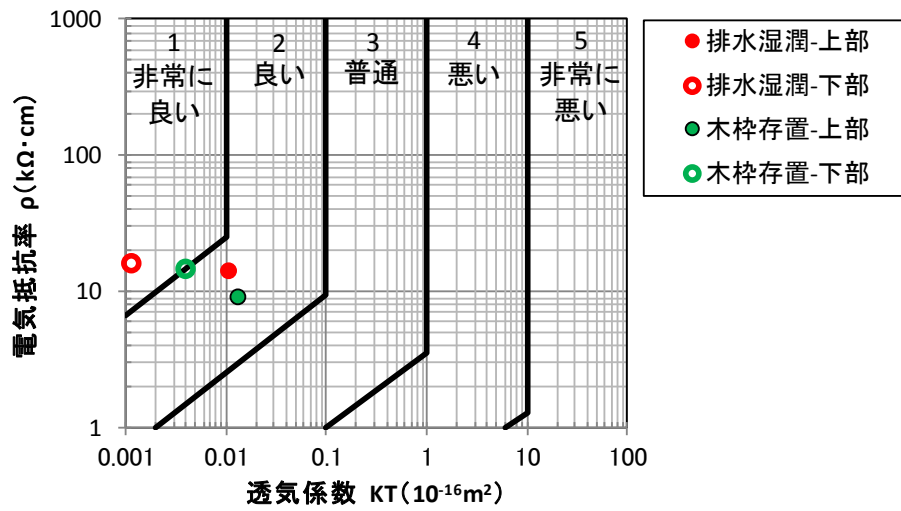
表 3.6.3 表層透気係数の試験結果

(a) 表層透気係数 [単位 $10^{-16}m^2$]

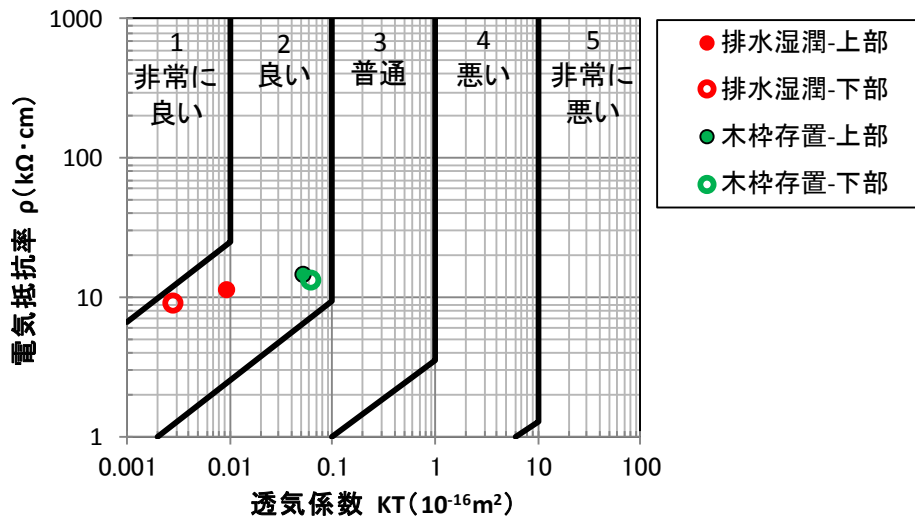
測定箇所	排水湿潤連続養生		測定箇所	木製型枠存置	
	材齢42日	材齢15ヶ月		材齢42日	材齢15ヶ月
上部	0.011	0.010	上部	0.014	0.054
下部	0.001	0.003	下部	0.004	0.064
平均	0.006	0.006	平均	0.009	0.059

(b) 電気抵抗率 [単位 $k\Omega \cdot cm$]

測定箇所	排水湿潤連続養生		測定箇所	木製型枠存置	
	材齢42日	材齢15ヶ月		材齢42日	材齢15ヶ月
上部	13.8	11.1	上部	8.8	14.3
下部	15.4	8.9	下部	14.1	12.8
平均	14.6	10.0	平均	11.4	13.6



(a) 材齢 42 日



(b) 材齢 15 ヶ月

図 3.6.3 表層透気係数の試験結果

3.7 まとめ

本章では、排水湿潤連続養生の施工方法の開発、養生効果の検証、模擬部材の製作による施工方法、養生効果の検討、実構造物として壁高欄の一部への試験適用を行った。

本章で検討した結果から得られた知見を以下に示す。

- ・内部に水を供給することができる中空構造をもつポリプロピレン製の透水板をせき板として使用し、表面に透水性シートを設置する型枠構造を用いることにより、初期の余剰水の排出と湿潤養生の連続養生が可能となる施工方法を構築した。
- ・初期の余剰水の排出のみを行った場合は、コンクリート表層から 10mm 程度まで緻密化するが、排水湿潤連続養生では表層から 10-20mm においても緻密な空隙構造を形成しており、連続で行うことによる相乗効果があることを確認した。
- ・排水湿潤連続養生では、排水後の湿潤養生期間を 5 日間から 3 日間へ短縮しても、コンクリートの表層品質の差はほとんどなく、一般的な湿潤養生 5 日間よりも大きな品質向上効果が得られる。
- ・排水後の湿潤養生の開始材齢は、凝結始発が最適であり、最も品質向上効果が大きい結果であった。材齢 1 日に開始でも、十分な品質向上効果を確認できたが、凝結始発よりも若材齢の開始では、凝結始発、材齢 1 日の開始よりも品質が低下した。そのため、実構造物では、給水開始時間は凝結始発時間（6 時間）から材齢 24 時間の間に開始することがよい。
- ・壁高欄模擬部材の耐久性試験から排水湿潤連続養生の効果により、通常の木製型枠の存置による養生と比較して、透気係数の減少、空隙構造の緻密化、中性化の抑制、塩化物イオンの浸透抑制などの優れた効果が実証された。
- ・排水湿潤連続養生の効果により、乾燥収縮による微細なひび割れが大幅に減少する。
- ・実構造物として壁高欄の一部への試験適用により、排水湿潤連続養生システムの施工性、および実構造物においても室内試験と同様の表層品質の向上効果があることを確認できた。

3 章の参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム 委員会報告書・論文集，2004.9
- 2) 野乃目洋，月永洋一，高柳彰宏，藤井真之：吸水性ポリマ及び水膨潤ウレタンを用いたコンクリート養生マットの養生効果に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.56，pp.325-332，2002.
- 3) 長瀬公一，田端淳，檜垣貫司，屋祢下亮：再生 EPS 骨材を用いたリサイクル材の開発－再生 EPS 骨材の開発と 4 種類の建設材料への適用事例－，大成建設技術センター報第 38 号，pp19-1-19-9，2005
- 4) 宇部エクシモツインコーンカタログ，
http://www.ube-exsymo.co.jp/products/PDF/industrial_materials_series.pdf
- 5) R.J.Torrent and G.Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the concrete, Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp-985-992,1995.9
- 6) 2013 年制定土木学会コンクリート標準示方書[基準編：JIS 規格集]，pp625-639，2013.11
- 7) 2013 年制定土木学会コンクリート標準示方書[基準編：土木学会基準および関連基準]，pp372-376，2013.11
- 8) 前田哲弘，松田孝允，三島直生，畑中重光_ 透水性型枠を使用したコンクリートの表層および内部強度性状に及ぼす再振動締固めの影響，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp345-350，2002
- 9) 蔵重勲，廣永道彦：透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案，セメント・コンクリート論文集，No.65，pp225-23.3，2011
- 10) 2013 年制定土木学会コンクリート標準示方書[基準編：JIS 規格集]，pp544-546，2013.11
- 11) 国土交通省東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編），2016.5
- 12) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2013.3.
- 13) 山本光彦，井出敬善，花房賢治，小川秀男：コンクリート表面の色が語る，BASF ポゾリス開発センターレポート，No.16，PP.76-88，2007.5

第 4 章 耐久性以外の品質向上効果と適用範囲

4.1 概要

本章では、まず、低水セメント比への適用した際の品質向上効果を確認することで水セメント比の適用範囲について検討した。次に、第 3 章で検証した本技術の適用による耐久性向上以外の効果として自己収縮・乾燥収縮の低減効果について検証した。加えて、長期養生が効果的とされていたフライアッシュコンクリートへの適用効果について検討を行った。

4.2 水セメント比の適用範囲

4.2.1 試験の目的

一般にコンクリートから発生するブリーディング量は、セメント量が多く、低水セメント比の配合になるほど少なくなる。排水湿潤連続養生では、コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比を低減するがセメント量が多く、低水セメント比の配合になればなるほど排出される余剰水が減少し、養生による品質向上効果が相対的に低下することが想定される。

そこで、排水湿潤連続養生の水セメント比の適用範囲について把握することを目的に W/C40%、W/C30%のコンクリート供試体を製作し、各種試験を行った。なお、W/C50-55%のコンクリートについては、第3章で検討しているためここでは実施していない。

4.2.2 供試体の製作と養生方法

コンクリートの配合を表 4.2.1、使用材料を表 4.2.2 に示す。コンクリートは、W/C40%、W/C30%とし、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。供試体の形状は、高さ 500mm、幅 500mm、奥行き 300mm の大きさとした。500mm×500mm の片面を透水シート、透水板、もう一方は、木製型枠を使用した。コンクリートは 2 層に分けて、各層とも内部振動機を用いて 15 秒間締固めを行った。

表 4.2.1 コンクリートの配合

配合名	SL or SF (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	S	G		AE or SP C×%
								G1	G2	
N40	SL:18	4.5	40	44.7	170	425	759	382	573	AE:1.5%
N30	SF:60	4.5	30	45.5	170	567	719	350	526	SP:1.05%

表 4.2.2 使用材料

記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
S	細骨材	千葉県君津産	表乾密度 2.61g/cm ³
G1	粗骨材	東京都青梅産	砕石 5号 表乾密度 2.66g/cm ³
G2	粗骨材	東京都青梅産	砕石 6号 表乾密度 2.65g/cm ³
AE	AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターポゾリス No.70
SP	高性能 AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターグレニウム 8SV



写真 4.2.1 供試体の作製状況

コンクリートの養生条件を表 4.2.3 に示す。排水湿潤連続養生では、打込み開始から余剰水を排出した。余剰水の排出量は、W/C40%の配合で約 2.4kg/m^2 、W/C30%の配合で約 0.8kg/m^2 であり、水セメント比の低下に伴い余剰水の排出が大きく減少した。材齢 24 時間において打込み面を湛水し、少量の水を透水シート、透水板に供給し、湿潤養生を実施した。材齢 3 日で水の供給を止め、脱型を行った。木製型枠を使用して面は、打込み面をしながら材齢 5 日まで型枠を存置したのちに脱型した¹⁾

表 4.2.3 養生条件

養生条件	材齢 [日]					
	1	2	3	4	5	6
排水湿潤連続養生	打込み+排水	湿潤養生		脱型		
木製型枠存置	打込み	木製型枠存置			脱型	



(1) W/C40% (排水量 2385 g/m^2)



(2) W/C30% (排水量 766 g/m^2)

写真 4.2.2 排水湿潤連続養生における排水量

4.2.3 測定項目

養生効果の確認として実施した試験項目を表 4.2.4, 測定位置を図 4.2.1 に示す.

コンクリートの反発度は, 材齢 28 日, 材齢 6 ヶ月, 材齢 12 ヶ月において JIS A 1155 に準拠し実施した. 表層透気係数は, 材齢 28 日, 材齢 6 ヶ月, 材齢 12 ヶ月において測定開始圧制御型の Torrent 法 (測定開始圧設定値 30mbar) による透気試験²⁾により測定し, あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため, 電極間隔を 50mm とした正負交替直流電流を用いた Wenner 法によって電気抵抗率の測定を行った. 細孔径分布は, 材齢 35 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面から 0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 50-60 mm の各深度から 5×5×5mm の試料を多数切り出し, D-dry 乾燥を 7 日間施したのち, 水銀圧入式ポロシメータにより 2nm-200 μ m の空隙量を測定した. 中性化深さの測定には, 材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 中性化深さは, 20°C, RH60%, CO₂ 濃度 5% の条件で 52 週間中性化を促進したのち, 割裂した面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し, 開放面からの非呈色深さを測定することにより求めた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出には, 材齢 28 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するために, 浸せき試験により塩化物イオンの濃度分布を測定した. 型枠面側を開放面としたコア供試体を 3% の NaCl 水溶液へ 18 ヶ月間浸漬した後, ドライカッターで表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の平板を切り出し, JIS A 1154³⁾ に準じて, 電位差滴定法により各深さの全塩化物イオン濃度を測定した. 見掛けの拡散係数は, JSCE-G 572 2013⁴⁾ に準じて, 測定した塩化物イオン濃度分布を Fick の第二法則の一般解である式 (3.2.1) を用いて最小二乗法をもとに回帰分析を行い, 表面塩化物イオン濃度とともに算出した.

$$C(x,t) = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad \text{式(4.2.1)}$$

ここで, $C(x,t)$: 任意の深さにおける塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3), x : 表面からの深さ (cm), D : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), t : 浸せき期間 (年) である.

コンクリートの表層付近の水分分布は, 既往の研究成果における測定方法⁵⁾に準じ K 社製の電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計を用いて行った. 測定状況の概要を図 4.2.3 に示す. 測定は, φ6mm の孔を 30mm 間隔で 2 箇所削孔し, それぞれの孔にブラシ型センサを挿入し, 先端にある端子(長さ 20mm)間の抵抗を測定することによって, コンクリートの水分状態を推定する. 測定結果は, コンクリート試料の抵抗に対応して 0 から 1000 まで等分表示されるカウント値とこの値をもとに換算した含水率として表示される.

表 4.2.4 試験項目

試験項目	測定方法・規格	測定頻度
反発度	JIS A 1155	材齢 28 日, 材齢 6 ヶ月, 材齢 12 ヶ月
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	材齢 28 日, 材齢 6 ヶ月, 材齢 12 ヶ月
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータ	材齢 28 日 コア供試体採取 コンクリート表層から 0-10mm, 10-20mm, 20-30mm, 50-60mm を測定
促進中性化試験	20°C, RH60%, CO ₂ 濃度 5%	材齢 28 日 コア供試体採取 促進期間 52 週
塩分浸透試験	測定: JIS A 1154: 電位差滴定法 JSCE-G 572 2007 により 見かけの拡散係数算出	材齢 28 日 コア供試体採取 3%NaCl 溶液浸漬 18 ヶ月 表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の測定
水分分布 (含水率)	K 社製電気抵抗式 コンクリート・モルタル水分計	材齢 7 日, 91 日, 182 日, 12 ヶ月 表層から 20mm, 30mm, 40mm, 60mm, 80mm を測定

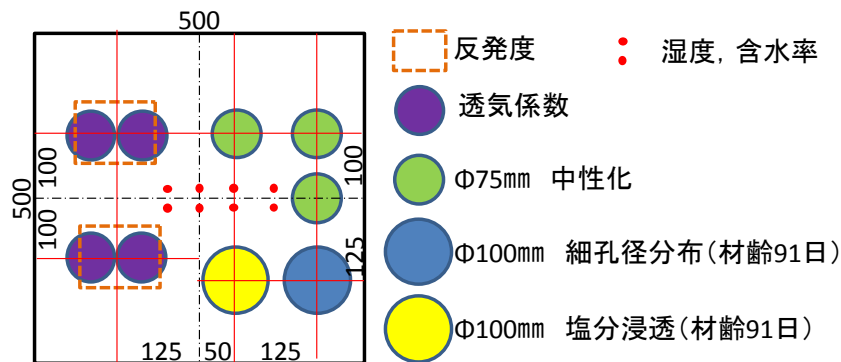


図 4.2.1 各試験における測定位置とコア供試体採取位置 (単位: mm)

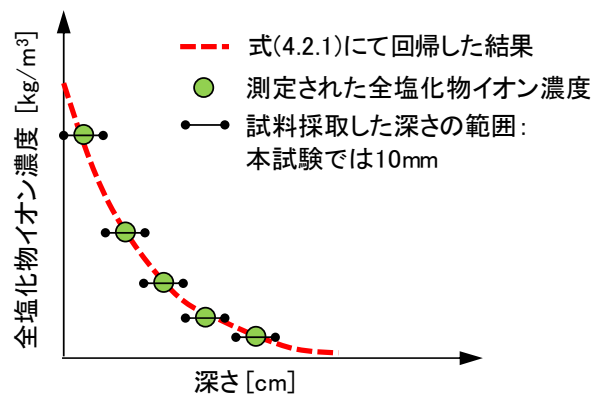


図 4.2.2 測定結果と見かけの拡散係数の算出のイメージ

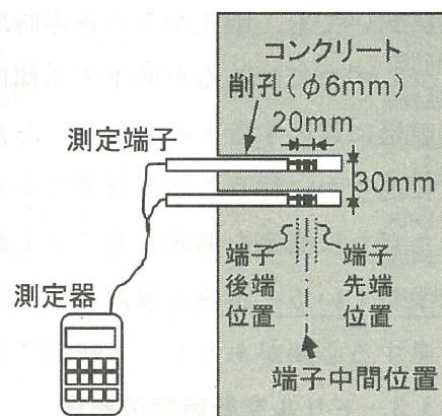


図 4.2.3 水分分布の測定方法¹⁾

4.2.4 水セメント比 40%における試験結果

(1) コンクリートの反発度

材齢 28 日, 材齢 6 ヶ月, 材齢 12 ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を図 4.2.4 に示す. 材齢 28 日, 材齢 6 か月の測定結果では, 排水湿潤連続養生の方が木製型枠存置よりも約 1.2 倍大きく, 材齢 12 ヶ月でも, 排水湿潤連続養生の方が, 約 1.1 倍大きな値を示している. 既往の研究結果⁶⁾と同様に材齢の経過とともに養生による差は小さくなっているが, 排水湿潤連続養生の方が, 表層部分の硬度(強度)が向上している結果となった.

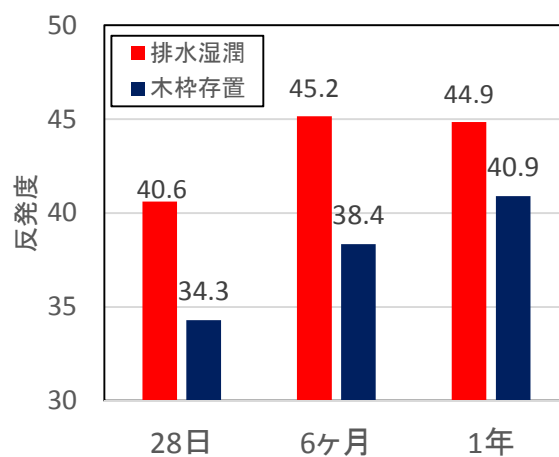


図 4.2.4 反発度の試験結果

(2) 表層透気係数

材齢28日, 材齢6ヶ月, 材齢12ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を表4.2., 図4.2.5に示す. コンクリートの表層の含水率の測定には含水計 (Tramex, Concrete Encounter CMEX II) を使用した. 図4.2.5は, Torrentらが提案している²⁾はコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し, 表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを5段階に区分評価したものである.

水セメント比40%では, 排水湿潤連続養生の方が木製型枠存置よりも透気係数が1/10以下になっており, 排水湿潤連続養生による表層品質の向上が確認された.

また, 一般的に材齢の経過とともに, コンクリートの乾燥に伴う透気経路の拡大によって, 表層透気係数の見かけ上増加すると報告されている⁸⁾. しかし, 排水湿潤連続養生では, 材齢の経過とともにコンクリート表層の含水率を間接評価している電気抵抗率が増加しているが, 透気係数がほとんど変わっていないのに対して, 木製型枠存置では乾燥の進行とともに透気係数が大きくなり, 材齢1年においては1/40程度とその差が大きくなっている. これは, 排水湿潤連続養生によって表層組織が緻密化したため, 乾燥が進んでも透気経路が拡大しなかったものと考えられる. これらの結果は, 養生による表層の品質向上効果は, コンクリートの乾燥が進んでいない材齢初期では評価することが難しく, 適切に評価するためには材齢1年程度経過し, 乾燥が十分に進行した後に試験を行う必要があることを示唆している.

表4.2.5 表層透気係数の試験結果

(1) 表層透気係数 [単位 KT : $10^{-16}m^2$]

養生条件	材齢28日	材齢6ヶ月	材齢1年
排水湿潤連続養生	0.025	0.049	0.040
木製型枠存置	0.213	0.575	1.75

測定値は, 4点の平均値

(2) 電気抵抗率 [単位 : $k\Omega \cdot cm$]

養生条件	材齢28日	材齢6ヶ月	材齢1年
排水湿潤連続養生	12.0	26.8	56.2
木製型枠存置	8.8	23.2	50.7

測定値は, 4点の平均値

(3) 含水率 [単位 : %]

養生条件	材齢28日	材齢6ヶ月	材齢1年
排水湿潤連続養生	4.2	4.4	4.1
木製型枠存置	5.4	5.0	4.2

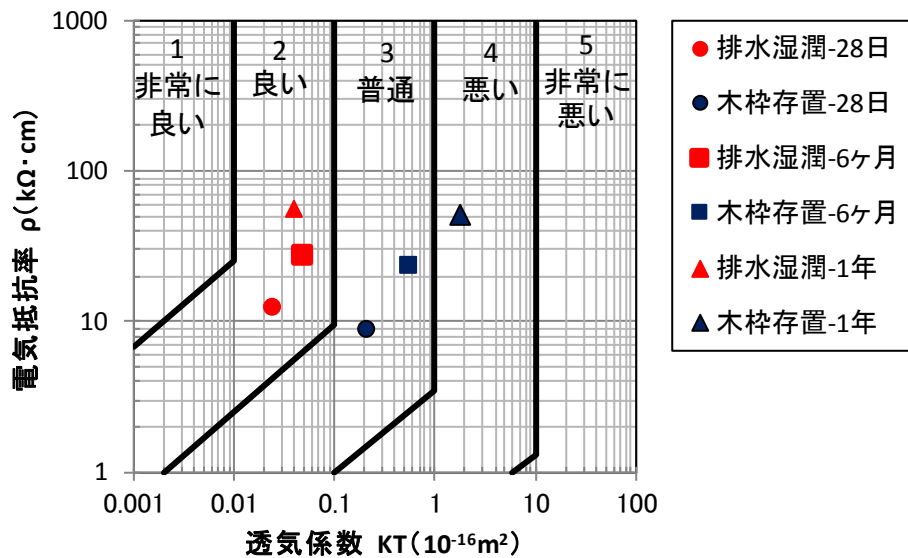


図 4.2.5 表層透気係数の試験結果

(3) 細孔径分布

水銀圧入法によって計測された空隙量の結果を図 4.2.6, 細孔径分布, 累積空隙量を図 4.2.7, 図 4.2.8 に示す。

排水湿潤連続養生の累積空隙率は, 木製型枠存置による養生よりも 0-30mm まで小さな値を示しており, 養生の効果が現れた. 特に, 型枠面から 0-10mm において効果が顕著であり, 木製型枠よりも 20%程度空隙率が低下していた。

細孔径分布に関しては, 0-10mm において排水湿潤連続養生では木製型枠存置による養生と比較して $1 \mu m$ 以下の空隙が大幅に減少し, 緻密な空隙構造が形成されていることがわかる. 型枠面からの深さ 10-20mm, 20-30mm においては, 養生方法による差が小さくなっているが, $0.01 \mu m$ 以下の空隙量は減少しており, さらに小径側の空隙にシフトしている. この結果から, 排水湿潤連続養生では, コンクリートの表層から 30mm 程度までコンクリートの空隙構造が緻密化されており, W/C : 51.8%の壁高覧模擬部材と同様の傾向を示している. なお, 表層から 50-60mm では, 空隙量, 空隙分布ともに養生による差は確認されなかった。

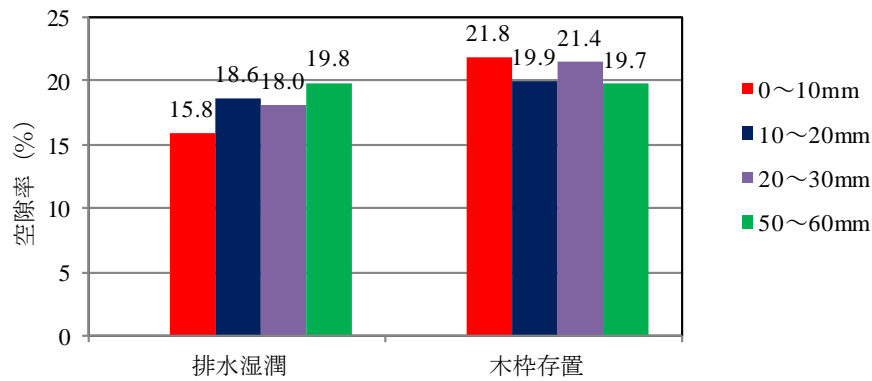


図 4.2.6 空隙率の測定結果

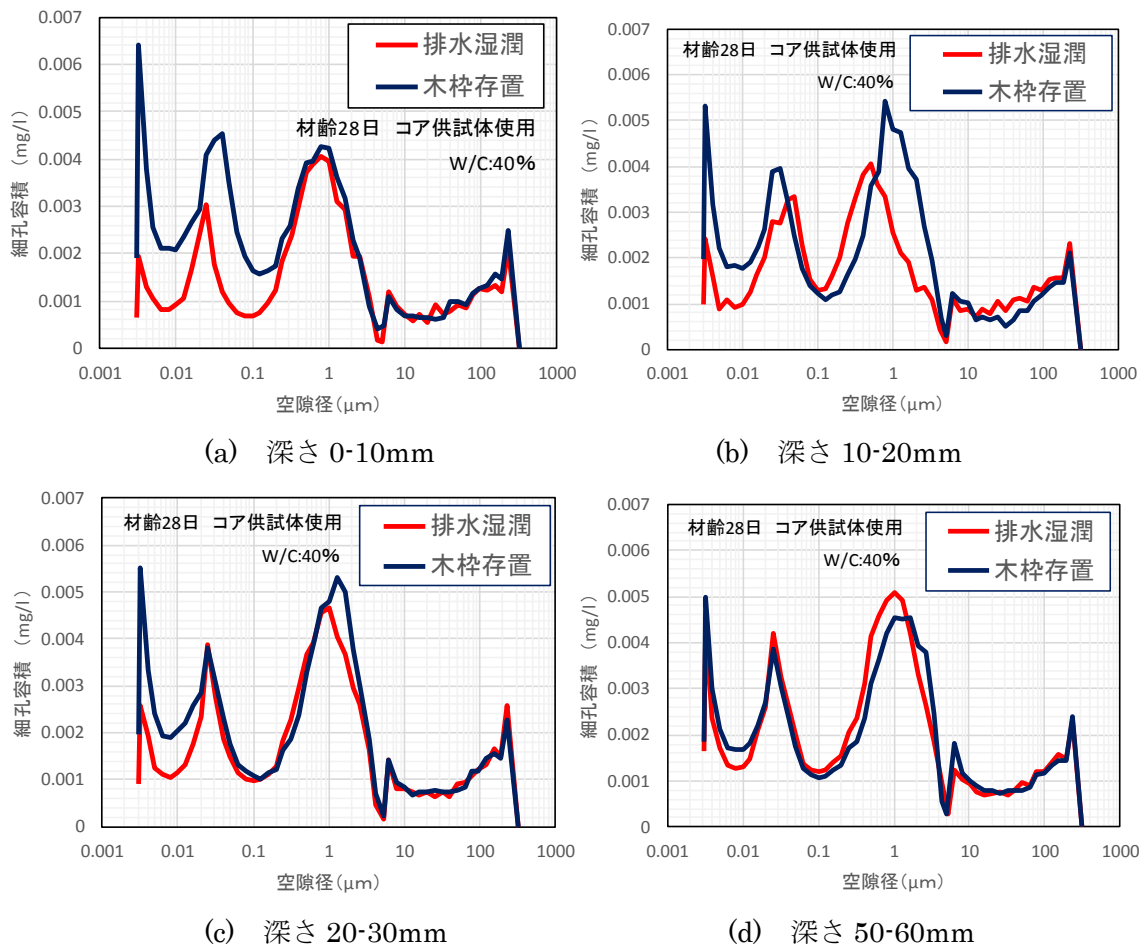
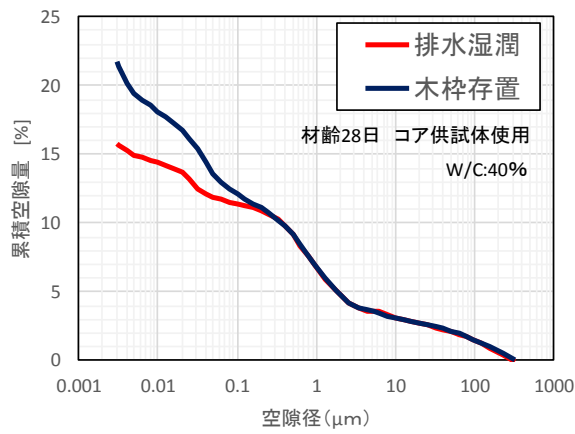
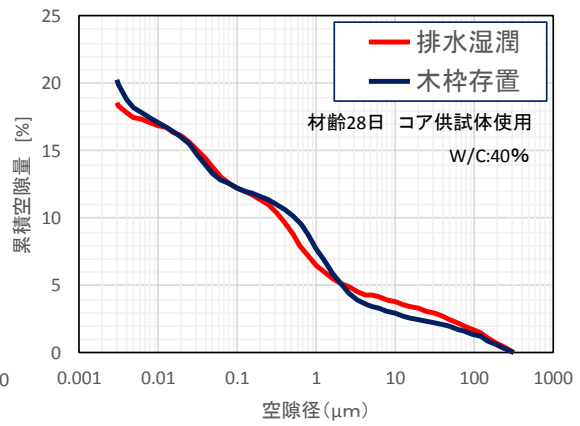


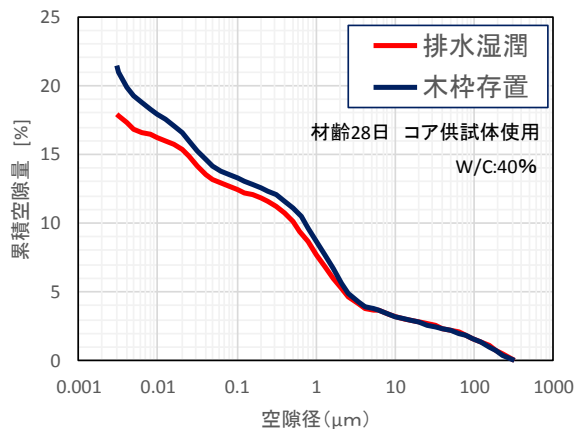
図 4.2.7 細孔径分布



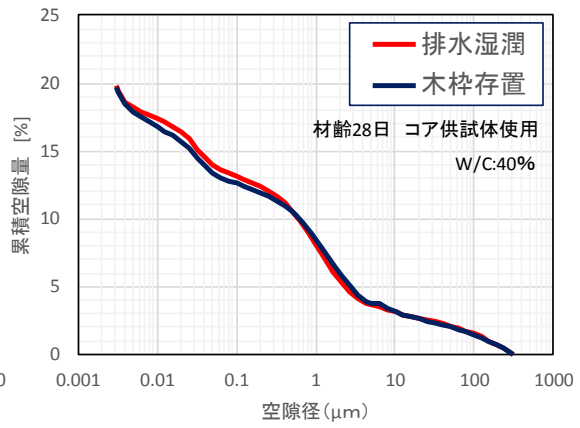
(a) 深さ 0-10mm



(b) 深さ 10-20mm



(c) 深さ 20-30mm



(d) 深さ 50-60mm

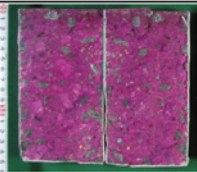
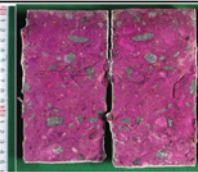
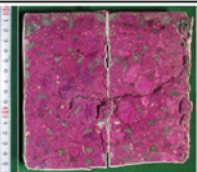
図 4.2.8 累積空隙率

(4) 促進中性化試験結果

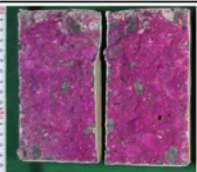
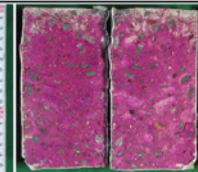
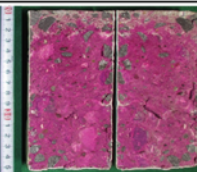
促進期間 52 週における中性化深さの試験結果を表 4.2.6 に示す。木製型枠存置では 3.9mm だったのに対して、排水湿潤連続養生では、0mm であり、中性化が抑制された結果であった。しかし、コンクリートの W/C が 40% と低いため、中性化の進行が非常に遅くなることから養生による差は小さかった。

表 4.2.6 促進中性化試験結果（材齢 28 日コア供試体使用，W/C40%）

(a) 排水湿潤連続養生

排水湿潤連続養生		
		
0mm	0mm	0mm
平均 0mm		

(b) 木製型枠存置

木製型枠存置		
		
2.6mm	4.4mm	4.6mm
平均 3.9mm		

(5) 塩分浸漬試験結果

3%NaCl 溶液に 18 ヶ月浸漬したコア供試体の各深さにおける全塩化物イオン濃度を図 4.2.9 に示す。

排水湿潤連続養生では，開放面から 10mm 以深への塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる．算出された塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を表 4.2. に示す．見掛けの拡散係数は，木製型枠の存置による養生と比べて 1/5 程度小さな値となり，塩分浸透抵抗性が大きく向上していることが確認できた。

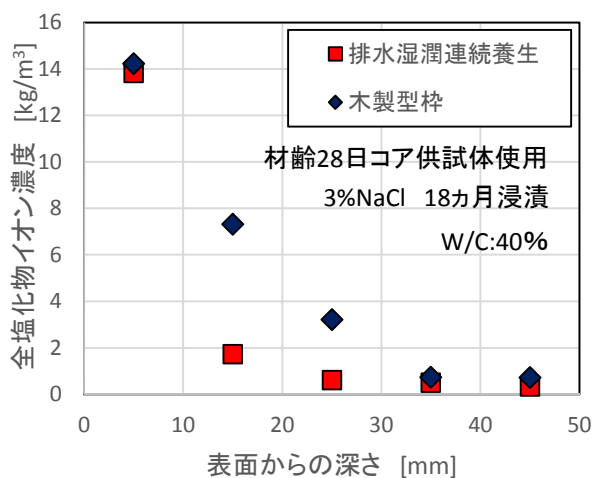


図 4.2.9 全塩化物イオン濃度分布

表 4.2.7 表面塩化物イオン濃度と拡散係数

W/C 40%	排水湿潤連続養生	木製型枠
表面塩分濃度 [kg/m³]	24.6	18.2
拡散係数 [cm²/年]	0.21	1.05

(6) 水分分布の測定結果

材齢 7 日, 91 日, 182 日, 12 ヶ月におけるコンクリート表層からの水分分布を図 4.2.10, 図 4.2.11 に示す. 材齢 182 日までの水分分布では, 排水湿潤連続養生と木製型枠存置で大きな差がない. 材齢 12 ヶ月における木製型枠存置では, 表層~8cm まで, 含水率が低下しているに対して, 排水湿潤連続養生では 8cm における含水率が高く, 含水率の低下が緩やかに進行している. これは, 排水湿潤連続養生によってコンクリートの表層が緻密化されたことにより, コンクリートの内部の水分逸散が抑制されたためであると考えられる.

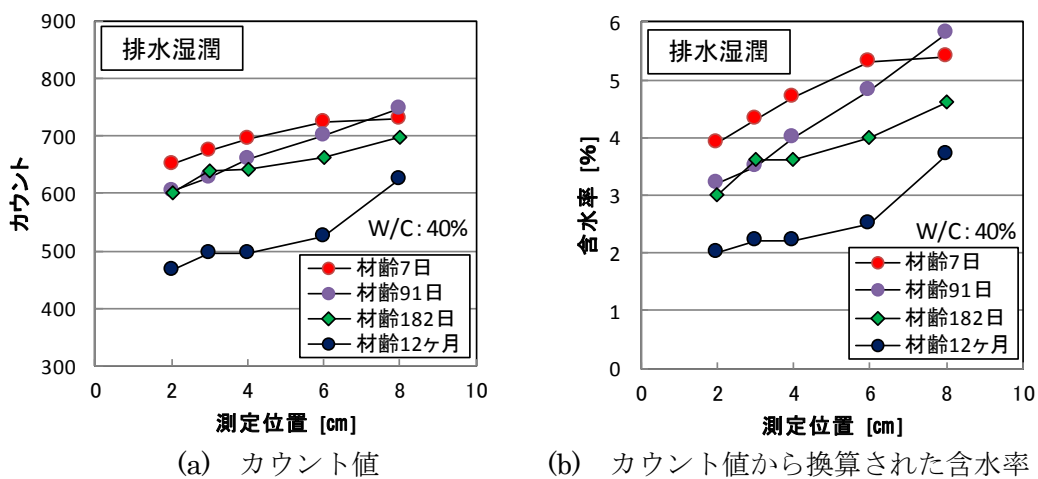


図 4.2.10 排水湿潤連続養生における水分分布

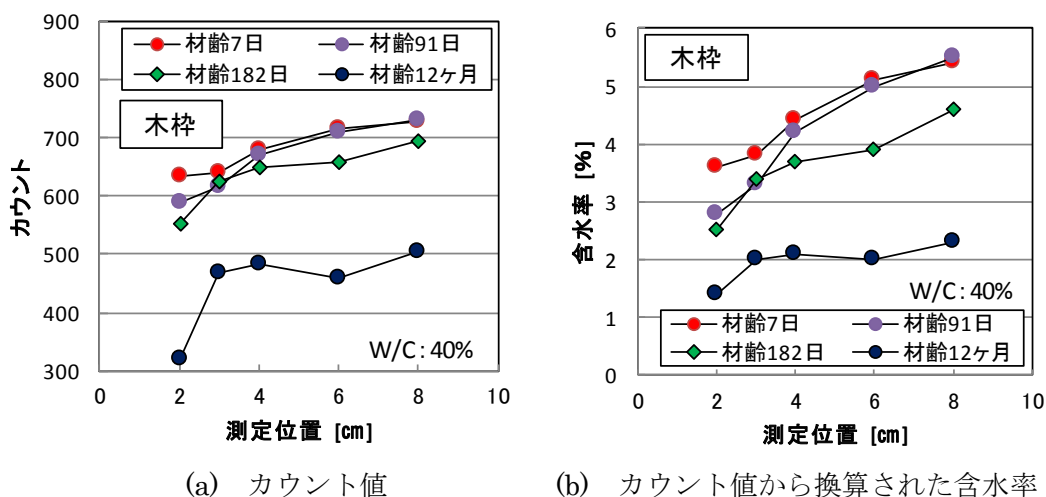


図 4.2.11 木製型枠存置における水分分布

いずれの試験においても W/C40%のコンクリートでは, 排水湿潤連続養生による優れた養生効果を確認することができた. 特に, 空隙構造では, 表層から 30mm 程度まで緻密化しており, 養生による品質向上効果は, 前章の W/C : 51.8%の壁高覧模擬部材と同範囲であった.

4.2.5 水セメント比 30%における試験結果

(1) コンクリートの反発度

材齢28日, 材齢6ヶ月, 材齢12ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を表4.2.9, 図4.2.12に示す. 材齢に関わらず, 排水湿潤連続養生と木製型枠存置の反発度は同程度の値を示しており, 養生による差がない. W/C30%では, 排水湿潤連続養生による表層部分の硬度(強度)の向上は確認できなかった.

表 4.2.9 反発度の試験結果

(a) 排水湿潤連続養生

材齢	28日	6ヶ月	1年
上部	47.1	49.6	50.6
下部	46.3	48.3	50.3
平均	46.7	49.0	50.5

(b) 木製型枠存置

材齢	28日	6ヶ月	1年
上部	45.8	48.9	49.6
下部	45.3	49.6	50.4
平均	45.5	49.3	50.0

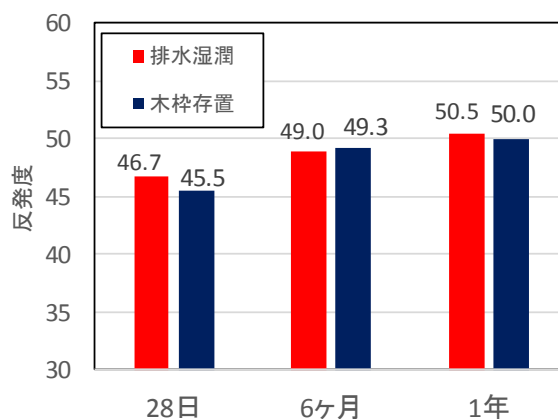


図 4.2.12 反発度の測定結果

(2) 表層透気係数

材齢28日, 材齢6ヶ月, 材齢12ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を表4.2.10, 図4.2.13に示す. コンクリートの表層の含水率の測定には含水計 (Tramex, Concrete Encounter CMEX II) を使用した. 図4.2.3は, Torrentらが提案している²⁾はコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し, 表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを5段階に区分評価したものである.

水セメント比30%では, 排水湿潤連続養生と木製型枠存置は, 材齢28日, 6ヶ月では同程度であった. 材齢1年では, 木製型枠存置では乾燥が進行するとともに透気係数が若干大きくなっており, 排水湿潤連続養生の透気係数は木製型枠存置の1/3程度であった. しかし, W/C40%では, 材齢1年において1/40の差があったことを考慮すると養生による差が減少している結果であった.

表4.2.10 表層透気係数の試験結果

(1) 表層透気係数 [単位 KT : $10^{-16}m^2$]

養生条件	材齢28日	材齢6ヶ月	材齢1年
排水湿潤連続養生	0.012	0.027	0.028
木製型枠存置	0.016	0.024	0.093

測定値は, 4点の平均値

(2) 電気抵抗率 [単位 : $k\Omega \cdot cm$]

養生条件	材齢28日	材齢6ヶ月	材齢1年
排水湿潤連続養生	11.8	29.5	62.5
木製型枠存置	11.0	26.5	53.4

測定値は, 4点の平均値

(3) 含水率 [単位 : %]

養生条件	材齢28日	材齢6ヶ月	材齢1年
排水湿潤連続養生	4.4	4.5	4.2
木製型枠存置	5.4	5.3	4.8

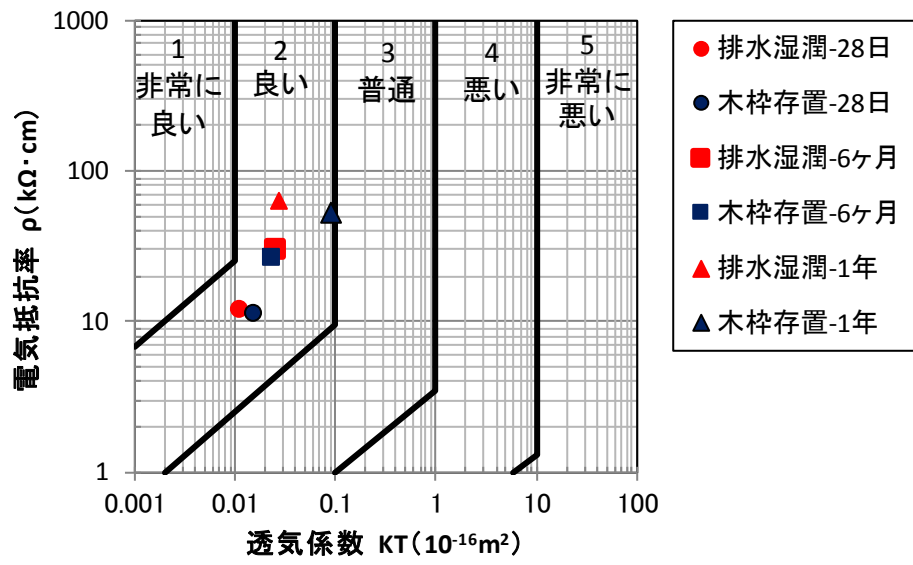


図 4.2.13 表層透気係数の試験結果

(3) 細孔径分布

水銀圧入法によって計測された空隙量の結果を図 4.2.14, 細孔径分布, 累積空隙量を図 4.2.15, 図 4.2.16 に示す.

W/C30%の排水湿潤連続養生の累積空隙率は, 0-10mm では木製型枠存置による養生よりも, 20%程度小さな値を示しており, 養生の効果を確認することができる.

細孔径分布に関しては, 0-10mm において排水湿潤連続養生の方が木製型枠存置による養生と比較して $0.1\mu\text{m}$ 以下の空隙が大幅に減少し, 緻密な空隙構造が形成されていることがわかる. しかし, 型枠面からの深さ 10-20mm, 20-30mm においては, 養生方法による差が非常に小さくなっている.

以上の結果から, W/C30%の排水湿潤連続養生では, コンクリートの表層から 10mm 程度までのコンクリートの空隙構造が緻密化となっていることが確認できた. W/C40%以上のコンクリートを用いた場合には, 表層から 30mm まで空隙構造が緻密化していたのとは, 大きく異なっており, W/C では, 養生効果の範囲が狭くなっている.

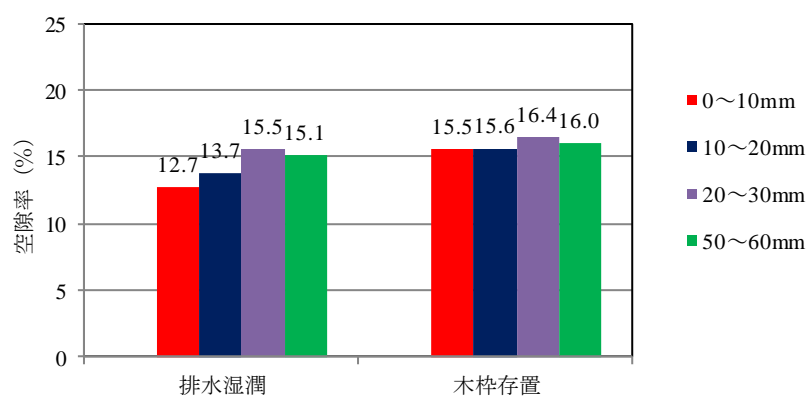
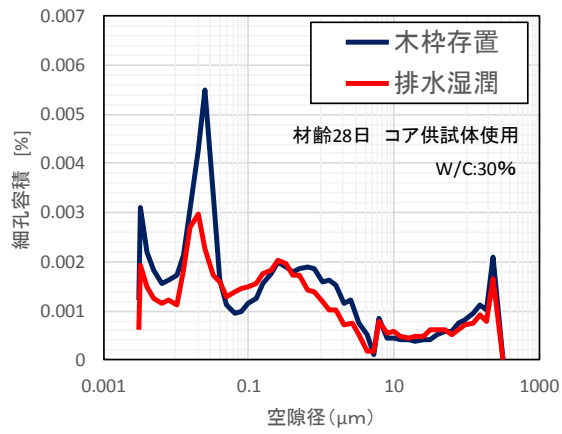
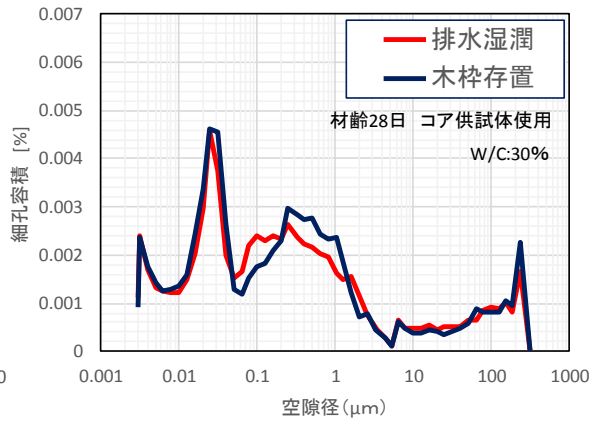


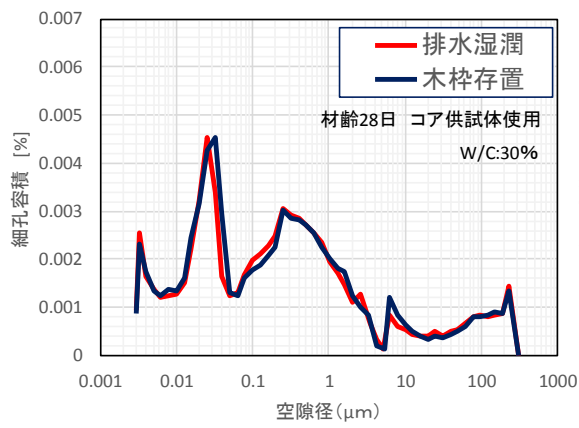
図 4.2.14 空隙率の試験結果



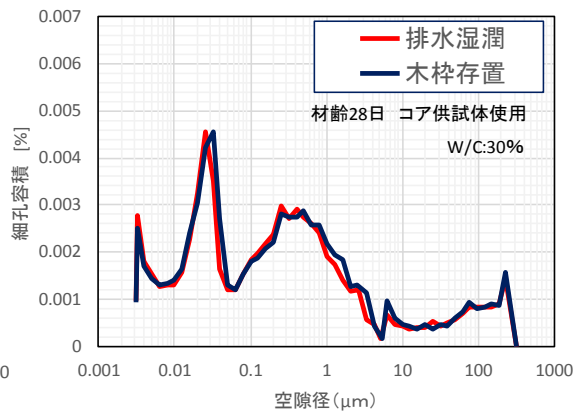
(a) 深さ 0-10mm



(b) 深さ 10-20mm

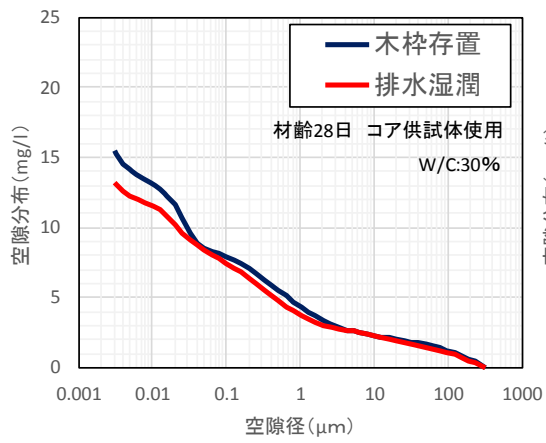


(c) 深さ 20-30mm

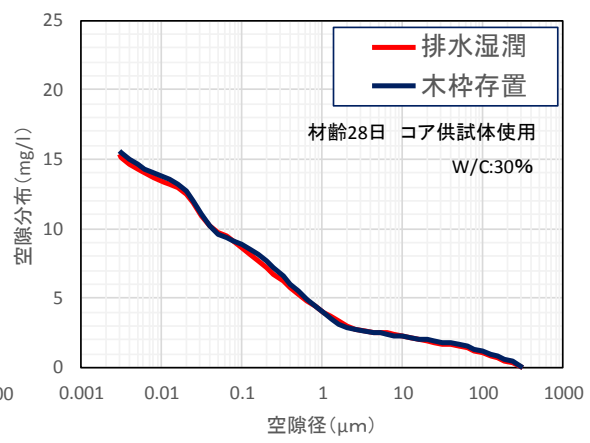


(d) 深さ 50-60mm

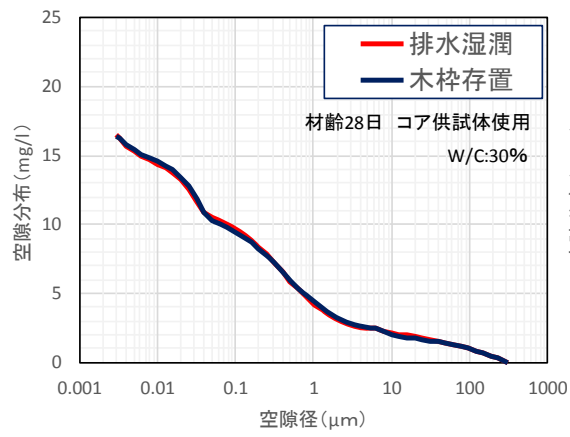
図 4.2.15 細孔径分布



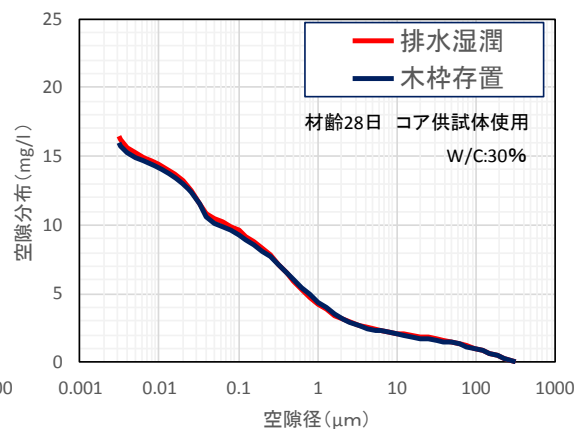
(a) 深さ 0~10mm



(b) 深さ 10~20mm



(c) 深さ 20~30mm



(d) 深さ 50~60mm

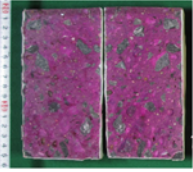
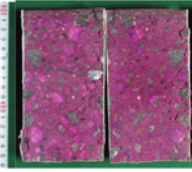
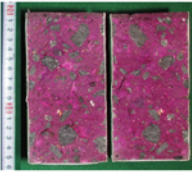
図 4.2.16 累積空隙率

(4) 促進中性化試験結果

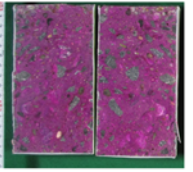
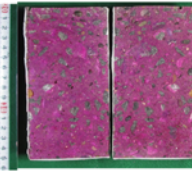
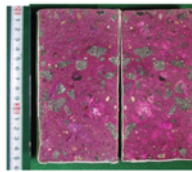
促進期間 52 週における中性化深さの試験結果を表 4.2.11 に示す。木製型枠存置，排水湿潤連続養生ともに中性化深さは 0mm であった。土木学会コンクリート標準示方書[設計編]における中性化速度係数を求める算定式では，普通ポルトランドセメントを用いた場合，W/C : 39.6%で中性化速度係数は 0 となる。そのため，本試験における W/C は 30%であることから中性化が進行しなかったと考えられる。

表 4.2.11 促進中性化試験結果（材齢 28 日コア供試体使用，W/C30%）

(a) 排水湿潤連続養生

排水湿潤連続養生		
		
0mm	0mm	0mm
平均 0mm		

(b) 木製型枠存置

木製型枠存置		
		
0mm	0mm	0mm
平均 0mm		

(5) 塩分浸漬試験

3%NaCl 溶液に 18 ヶ月浸漬したコア供試体の各深さにおける全塩化物イオン濃度を図 4.2.17 に示す。

排水湿潤連続養生では、開放面から 10mm 以深への塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる。算出された塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を表 4.2.11 に示す。見掛けの拡散係数は、木製型枠の存置による養生と比べて 1/2.5 程度小さな値となり、排水湿潤連続養生による空隙構造の緻密化は表層から 10mm 程度と限定的であったが、その効果は大きく、塩分浸透抵抗性が向上していることが確認できた。しかし、W/C40%の試験結果では、見掛けの拡散係数は木製型枠の存置と比べて 1/5 程度であったこと、排水湿潤連続養生を適用した W/C40%と W/C30%のコンクリートの見かけの拡散係数が同程度あることを考慮すると、W/C30%のコンクリートの排水湿潤連続養生による塩分浸透抵抗性の向上効果は、相対的に低下していることを確認した。

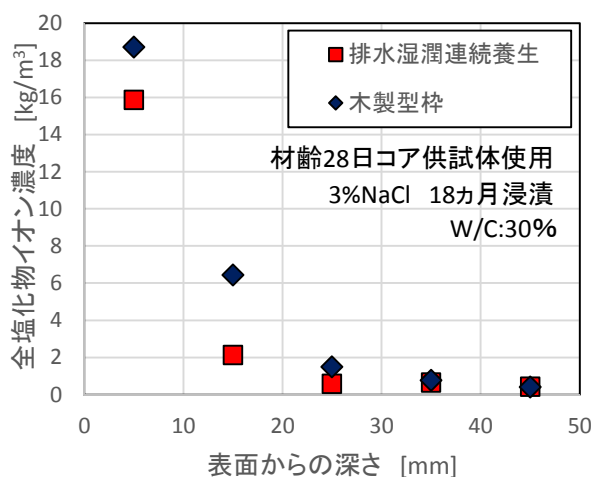


図 4.2.17 全塩化物イオン濃度分布

表 4.2.11 表面塩化物イオン濃度と拡散係数

W/C 30%	排水湿潤連続養生	木製型枠
表面塩分濃度 [kg/m³]	28.4	26.6
拡散係数 [cm²/年]	0.21	0.53

(6) 水分分布の測定結果

材齢 7 日, 91 日, 182 日, 12 ヶ月におけるコンクリート表層からの水分分布を図 4.2.18, 図 4.2.19 に示す. 材齢 182 日の水分分布をみると, 排水湿潤連続養生よりも木製型枠存置の方が若干含水率は低いが, 材齢 12 ヶ月では排水湿潤連続養生と木製型枠存置で大きな差がなく, W/C40%とは異なり, 木製型枠存置においても 8cm における含水率が高く, 含水率の低下が緩やかに進行している.

W/C30%では, もともとの空隙構造が緻密であるため表層からの水分逸散が緩やかであることに加え, 排水湿潤連続養生による養生効果の範囲が表層から 10mm 程度と限定的であることから, 養生による差がほとんどない結果となったと考えられる.

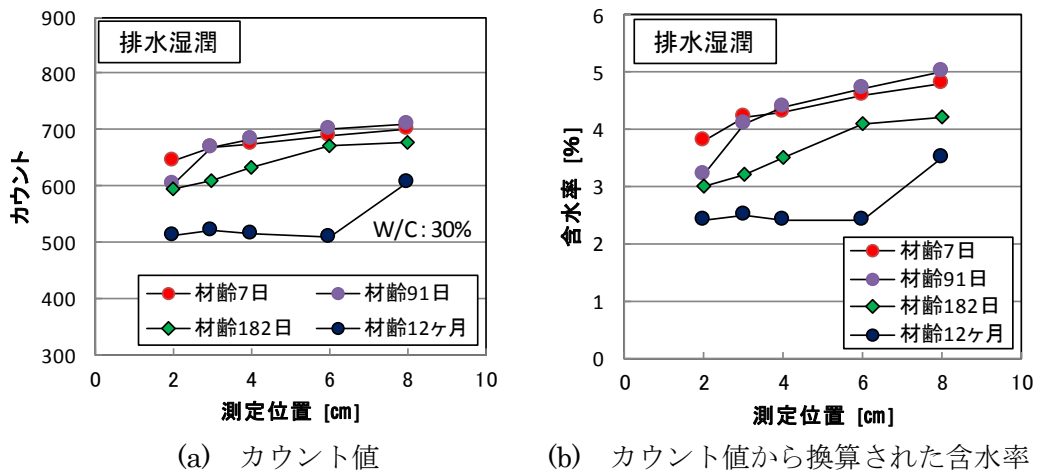


図 4.2.18 排水湿潤連続養生における水分分布

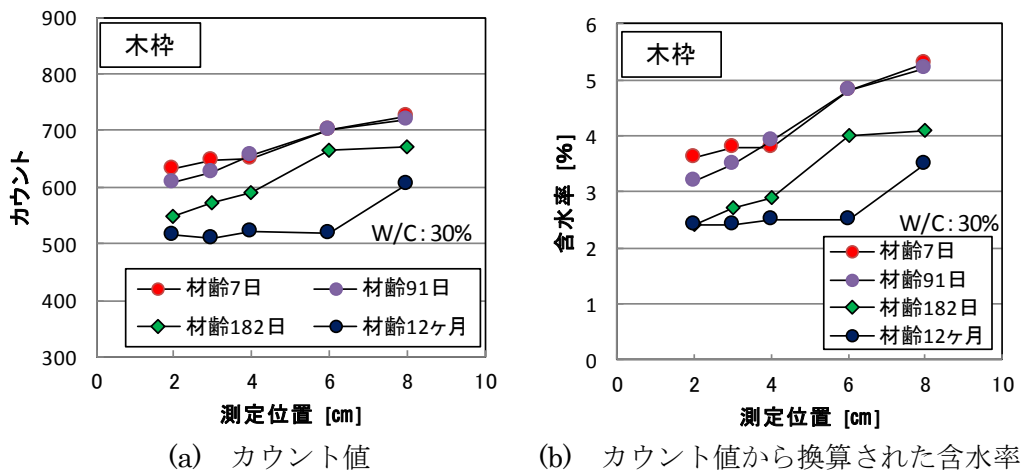


図 4.2.19 木製型枠存置における水分分布

以上の結果から、W/C30%では、表層から 10mm までの範囲の空隙構造の緻密化であり、養生による品質向上効果の範囲が縮小すること、その結果、塩分浸透の抑制されるが W/C40%よりも効果が相対的に低下していることが示された。これは、W/C30%では、W/C40%以上のコンクリートのよりも排水効果が小さくなることが最も影響していると考えられる。しかし、排水を行わなくても十分に緻密なコンクリートであるということは、コンクリート内部は自己乾燥して水を欲している状態であることが想定されるため、低水セメントになるほど初期の排水効果よりも若材齢からの湿潤養生の効果の方が影響が大きくなることが推測される。

4.3 自己収縮・乾燥収縮に与える影響

4.3.1 試験の目的

排水湿潤連続養生は、コンクリート打込み直後の余剰水の排出と凝結直後から速やかに湿潤養生を実施することで表層コンクリートを緻密化し、コンクリートの耐久性を著しく向上することができる養生である。耐久性の向上だけでなく、若材齢から湿潤養生を開始することで自己乾燥現象を利用した効率的な給水を行うことできるため、コンクリートの自己収縮の低減効果や表層の緻密化による乾燥収縮の低減効果といった耐久性向上以外の効果も期待することができる。実際に壁高覧模擬部材では、材齢 5 年 2 ヶ月において乾燥収縮ひび割れが抑制されていることが確認されている。

そこで、排水湿潤連続養生の適用による自己収縮・乾燥収縮の低減効果について把握することを目的に W/C55%、W/C40%、W/C30%のコンクリート供試体を製作し、各種試験を行った。加えて、本試験結果等をもとに乾燥収縮ひび割れの抑制の要因について検討した。

4.3.2 試験方法

コンクリートの配合を表 4.3.1, 使用材料を表 4.3.2 に示す. コンクリートは, W/C55%, W/C40%, W/C30%とし, セメントは普通ポルトランドセメントを使用した. 養生条件を表 4.3.3 に示す. 収縮ひずみ供試体の寸法は, 100×100×400mm とし, 各配合・養生条件毎に 2 体の供試体を作製した. 収縮ひずみ供試体とは別に質量変化率を測定するための供試体を各配合・養生条件毎に 1 体作製した. 供試体は縦打ちとし, コンクリートの打込みは, 木槌で叩きながら行い, 打込み後振動台バイブレーターによる振動を 15 秒与えた. (写真 4.3.1)

排水湿潤連続養生では, 型枠は木製型枠を使用した. 排水湿潤連続養生を行う供試体については, 木製型枠の内部に透水性シートを設置した透水板を木製型枠の内側に設置した. 打込み開始から余剰水を排出し, 材齢 1 日において打込み面を湛水することで湿潤養生を実施した. 材齢 3 日 (給水期間は 2 日) で透水板から水を抜き, 材齢 5 日で脱型した. 木製型枠存置では, 木製型枠を使用し, 打込み後, 打込み面をラップで封かんし, 材齢 5 日まで木製型枠を存置したのち脱型した. 水中養生では, 木製型枠を使用し, 材齢 24 時間にて型枠を脱型し材齢 5 日まで水中養生を行った. 各供試体は, 養生完了後, 暴露面となる側面 2 面以外にポリエステルフィルムを貼り付け, 温度 20℃, 湿度 60%の環境下で曝露し, 収縮ひずみと質量変化率を測定した. 質量変化率は, 乾燥開始から 1 週, 4 週, 13 週, 26 週, 50 週で測定を行った.

収縮ひずみは, 供試体中央に設置した低弾性の測温付埋込み型ひずみ計(剛性: 約 40N/mm²)を用いて測定した⁹⁾. 各配合・養生条件の収縮ひずみは, 2 体の供試体の平均値とした. 収縮ひずみの起点は既往の研究¹⁰⁾を参考に凝結終結時間の 1.2 倍とし, 熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度によるひずみの補正を行った. 加えて, 曝露開始時の乾燥開始を起点とした乾燥収縮ひずみについても算出した.

表 4.3.1 コンクリートの配合

配合名	SL or SF (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE or SP C × %
					W	C	S	G		
								G1	G2	
N55	SL:15	4.5	55	47.7	166	302	870	385	578	AE:1.0%
N40	SL:18	4.5	40	44.7	170	435	759	382	573	AE:1.5%
N30	SF:60	4.5	30	45.5	170	567	719	350	526	SP:1.05%

表 4.3.2 使用材料

記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
S	細骨材	千葉県君津産	表乾密度 2.61g/cm ³
G1	粗骨材	東京都青梅産	砕石 5号 表乾密度 2.66g/cm ³
G2	粗骨材	東京都青梅産	砕石 6号 表乾密度 2.65g/cm ³
AE	AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターポゾリス No.70
SP	高性能 AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターグレニウム 8SV

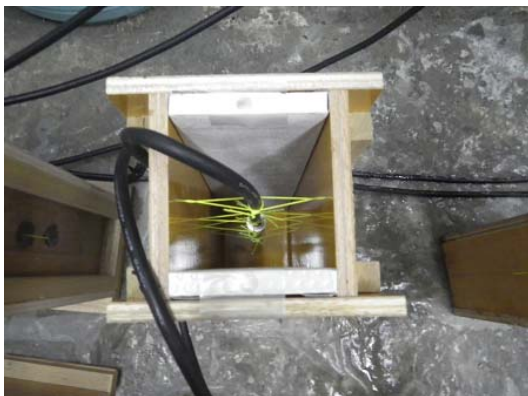


写真 4.3.1 W キュアリング供試体の型枠と供試体の作製状況

表 4.3.3 養生条件

養生条件	材齢 [日]					
	1	2	3	4	5	6
①排水湿潤連続養生	打込み+排水	湿潤養生		型枠存置		20℃ RH60% 曝露
②木製型枠存置	打込み	木製型枠存置 (水分逸散抑制)				
③水中養生	打込み	水中養生				



写真 4.3.2 供試体の曝露状況

4.3.3 試験結果

(1) 収縮ひずみ（自己収縮+乾燥収縮）

収縮ひずみの測定結果を図 4.3.1～図 4.3.3 に示す。すべての水セメント比において排水湿潤連続養生は、水中養生、木製型枠存置より収縮ひずみが小さくなっており、収縮ひずみの低減効果があることがわかる。これは、材齢 1 日からコンクリートに給水することにより、自己収縮が W/C55%で約 55×10^{-6} 、W/C40%、30%で約 100×10^{-6} 低減するためである。特に水セメント比 55%、40%では、給水することで材齢 5 日まで自己収縮が発生しておらず、自己収縮と乾燥収縮を合算した収縮ひずみの低減効果も大きい結果となっている。4.2 において水セメント比の適用範囲の検証結果から W/C30%では、十分にコンクリートが緻密であるため、排水湿潤連続養生による適用効果の範囲が 0-10mm 程度と W/C40%以上のコンクリートと比較して養生効果の範囲が狭い結果であった。そのため、収縮ひずみにおいても W/C30%では、低減効果が小さくなったと考えられる。また、水中養生と木製型枠存置を比較すると、水中養生の方が収縮ひずみは小さくなっており、このことは、水分一散抑制よりも湿潤養生の方がコンクリートの収縮ひずみを低減することができることを示している。

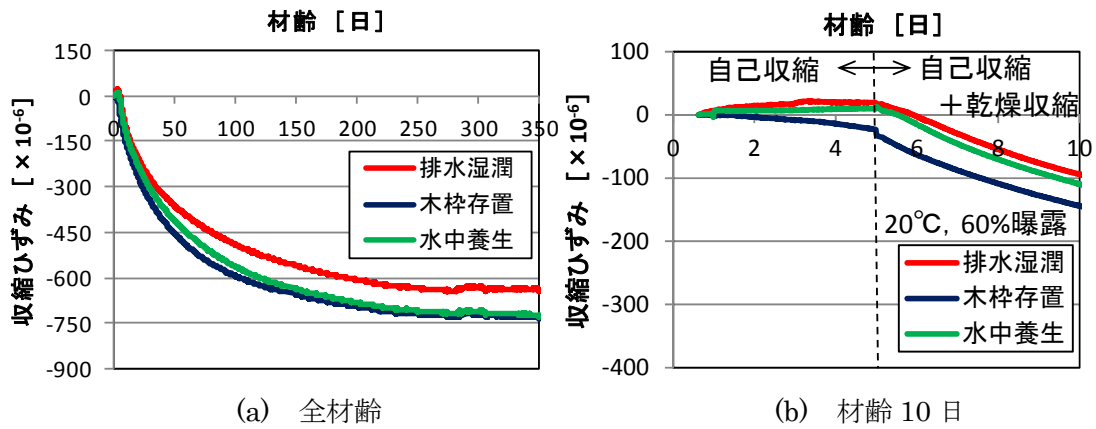


図 4.3.1 W/C55%の自己収縮+乾燥収縮ひずみ

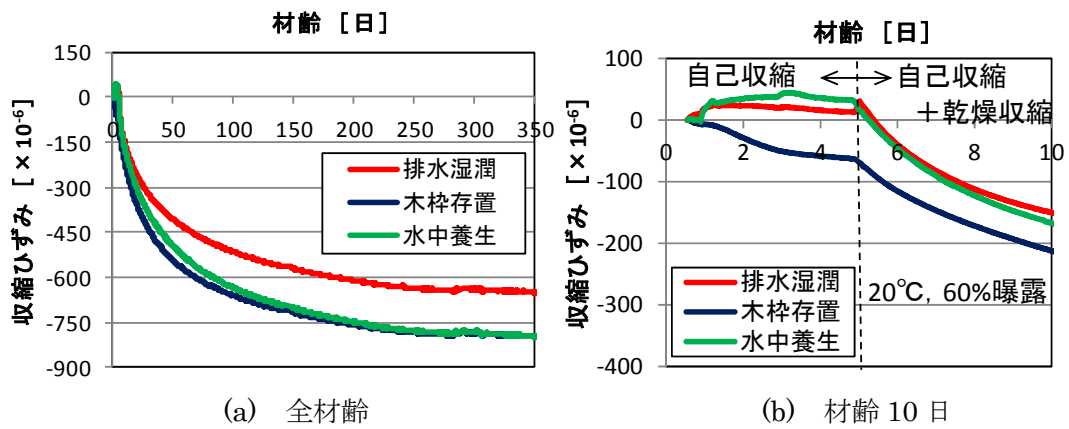


図 4.3.2 W/C40%の自己収縮+乾燥収縮ひずみ

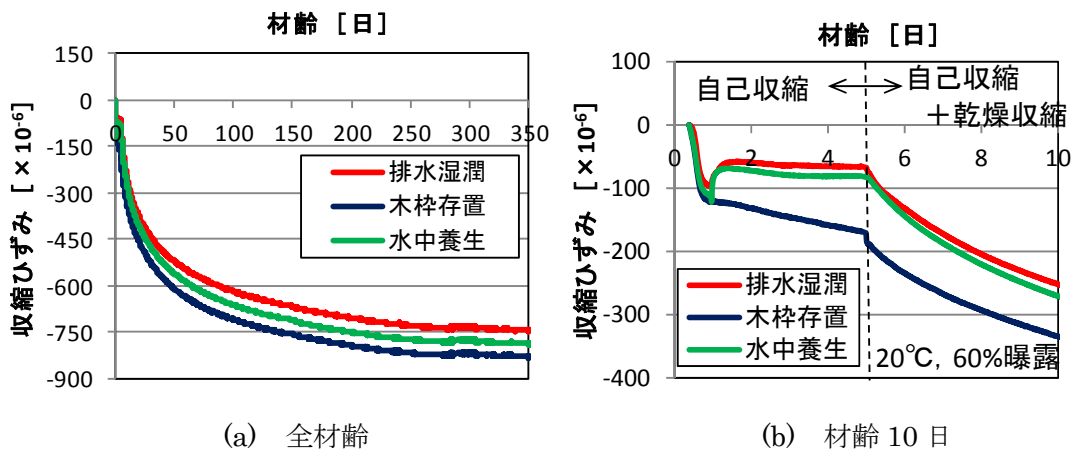


図 4.3.3 W/C30%の自己収縮+乾燥収縮ひずみ

(2) 乾燥収縮ひずみ

材齢 5 日を収縮ひずみの起点として算出した乾燥収縮ひずみを図 4.3.4～図 4.3.6, 乾燥による質量変化率を図 4.3.7 に示す.

水セメント比 55%, 40%では, 排水湿潤連続養生が最も乾燥収縮が小さくなっており, その次に木製型枠存置, 水中養生の順となっている. 自己収縮も含まれる収縮ひずみでは, 木製型枠存置の方が水中養生よりも大きな収縮であったが, 乾燥収縮のみでは, 乾燥開始前に給水することの影響が大きく, 給水する事でその後の質量減少率が大きくなってしまい, その結果乾燥収縮が増加していると考えられる. 排水湿潤連続養生も初期に給水しているが, 水中養生のみならず給水をおこなっていない木製型枠存置よりも乾燥収縮は小さくなっている. これは, 排水湿潤連続養生によって表層コンクリートの水セメント比が低下し, コンクリート表層が緻密化しているためであり, 乾燥開始直後は表層のコンクリートの自由水が逸散するため木製型枠存置よりも収縮が大きくなっているが, 長期的にはコンクリート内部の水分逸散が抑制しているためである.

水セメント比 30%では, 木製型枠存置が最も乾燥収縮が小さくなっておりその次に排水湿潤連続養生, 水中養生の順となっている. 水セメント比 30%では, 低水セメント比であるため, 自由水量が少ないため質量減少率も水セメント比 55%, 40%よりも少ない. その結果, 排水湿潤連続養生による品質向上効果よりも, 乾燥前の給水の有無の影響の方が大きくなったと考えられる. 4.2 において水セメント比の適用範囲の検証結果と同様に W/C30%への排水湿潤連続養生の品質向上効果は小さいものであった.

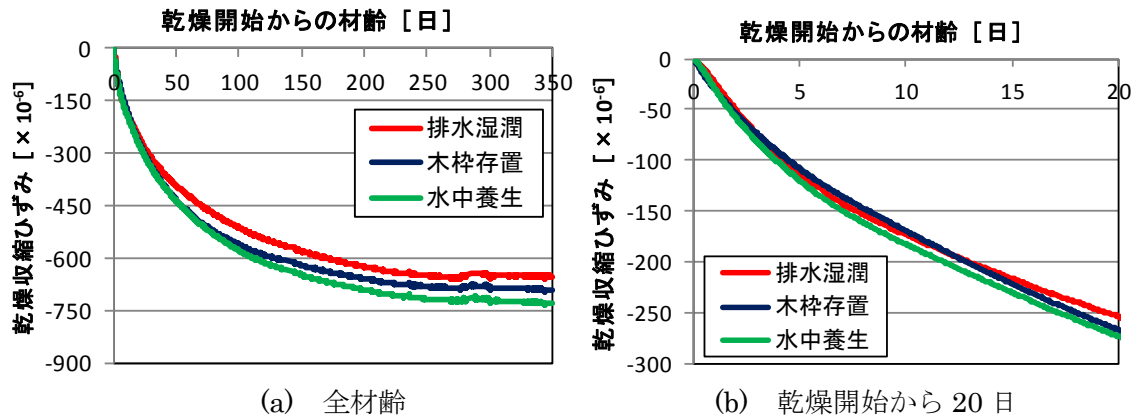


図 4.3.4 W/C55%の乾燥収縮ひずみ

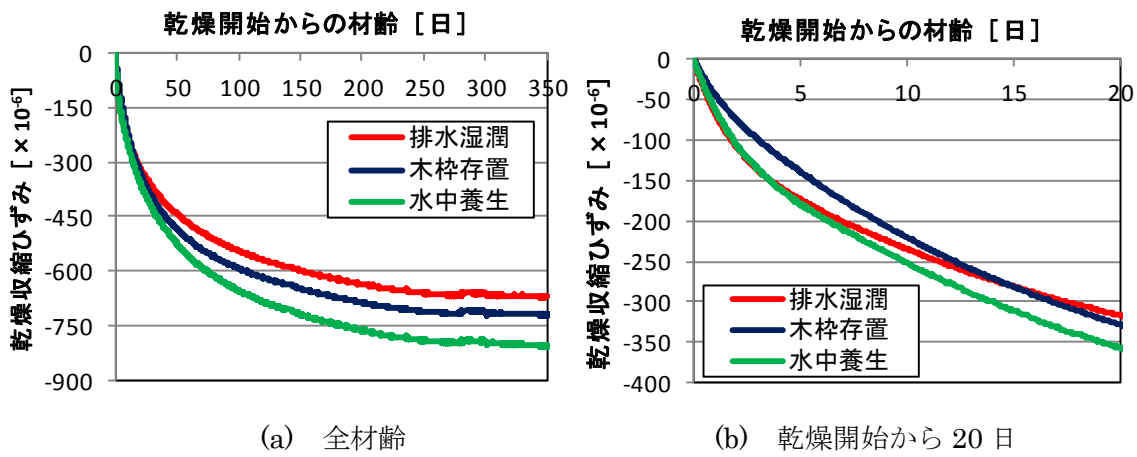


図 4.3.5 W/C40%の乾燥収縮ひずみ

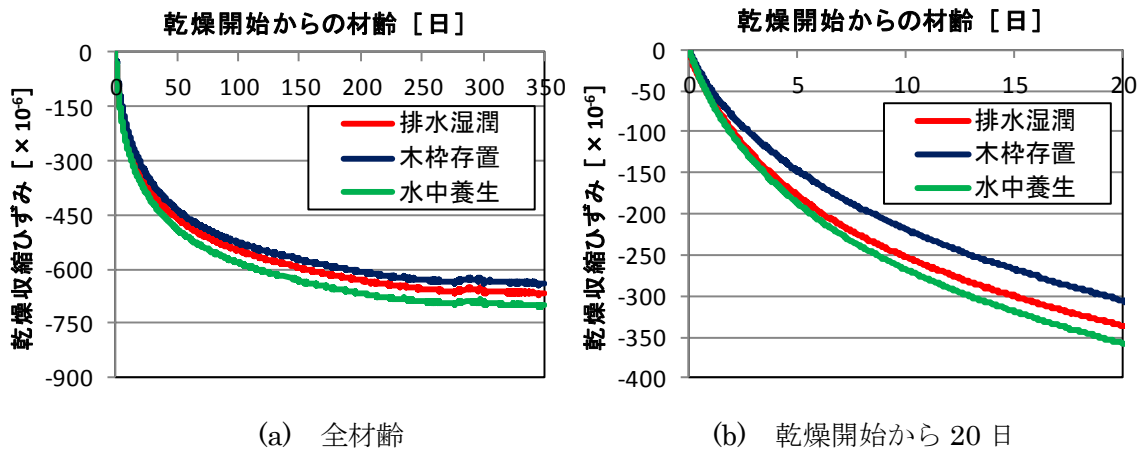


図 4.3.6 W/C30%の乾燥収縮ひずみ

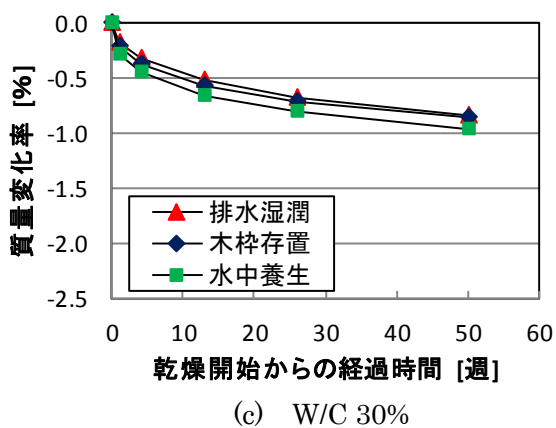
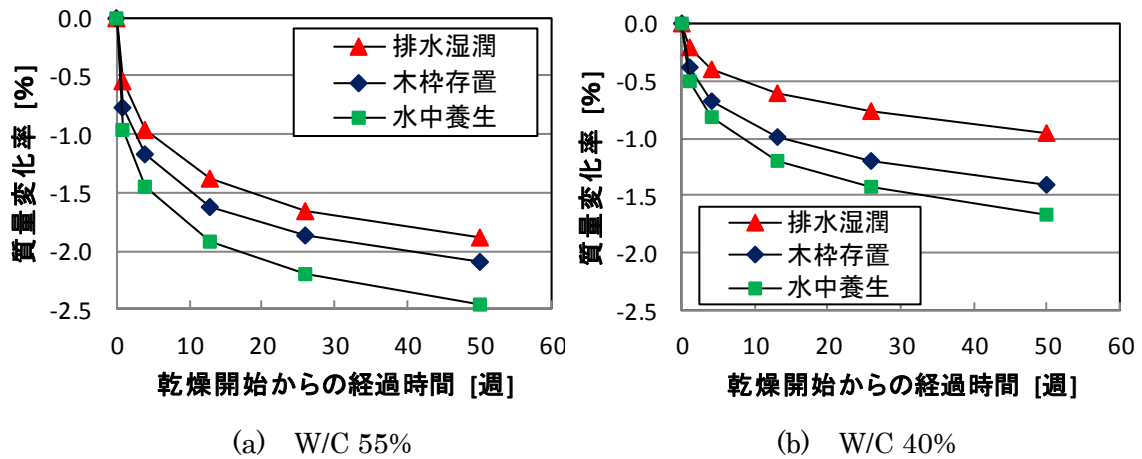


図 4.3.7 各水セメント比に乾燥による質量変化率

質量変化率と乾燥収縮ひずみの関係を図 4.3.8 に示す。いずれも質量の減少に伴い収縮ひずみが増大しているが、いずれの水セメント比においても同じ質量変化率では、排水湿潤連続養生がもっとも乾燥収縮ひずみが大きい結果となっている。これは、乾燥収縮のメカニズムとして用いられる毛細管張力説¹¹⁾によって説明できる。コンクリート細孔内の水分が逸散する際に毛細管張力は、細孔径が小さいほど大きくなる。そのため、水セメント比が小さいコンクリートほど、細孔が緻密となるため同じ質量変化率において、より多くの緻密な細孔から水分が逸散することになることで毛細管張力が大きくなり結果として収縮ひずみは大きくなる。このことは、本試験結果において排水湿潤連続養生を適用することによって空隙構造が緻密化していることを示している。一方、空隙構造が緻密なコンクリートほど細孔内の水分は逸散しにくくなるため、収縮ひずみが小さくなる。排水湿潤連続養生を適用したコンクリートでは、後者の効果が大きいことで木枠存置や水中養生よりも乾燥収縮が低減したと推察される。

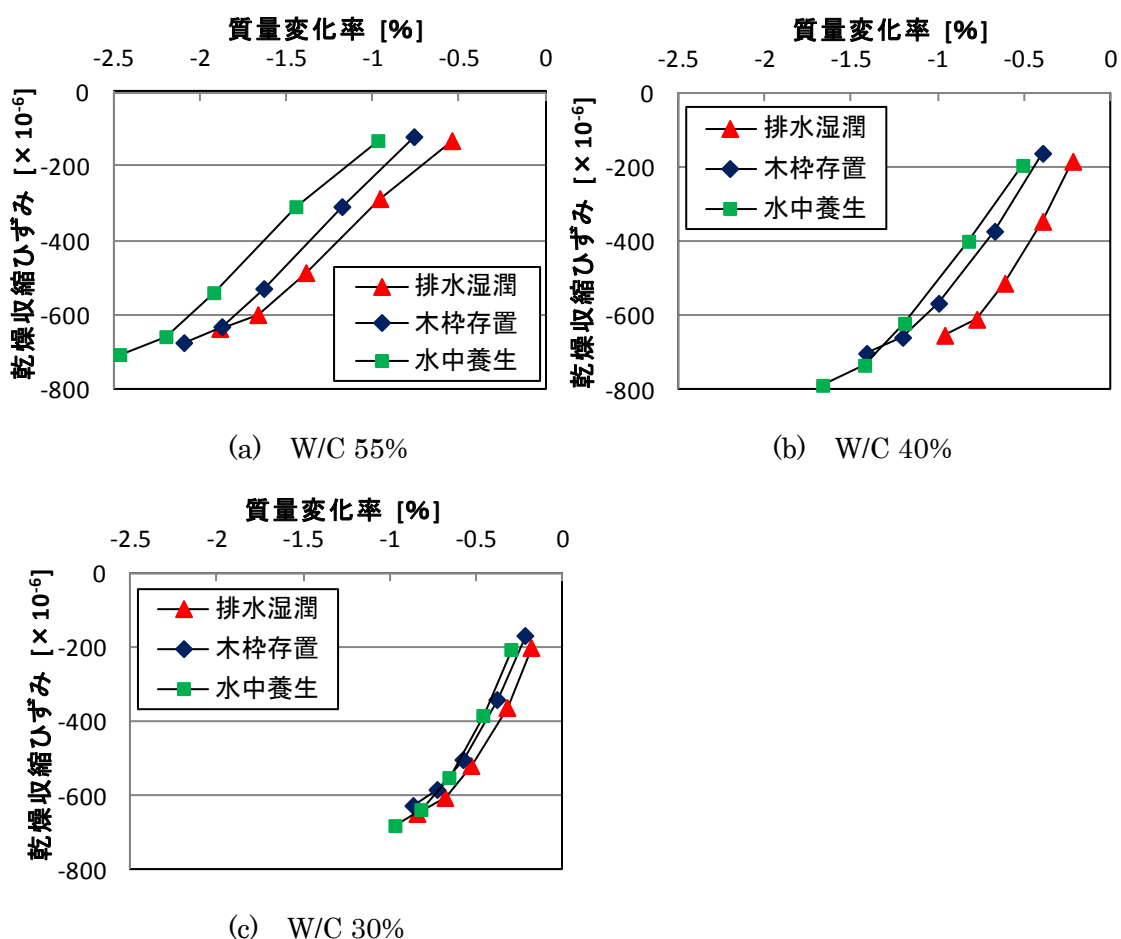


図 4.3.8 質量変化率と乾燥収縮ひずみの関係

4.3.4 実構造物における乾燥収縮ひび割れの抑制の要因

本節における実験において、 $\square 100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の小型の供試体による計測により、排水湿潤連続養生の適用によって収縮ひずみが低減することが示された。しかし、実構造物では、部材寸法の影響で $\square 100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の供試体よりも乾燥収縮ひずみの進行が遅くなり、加えて乾燥収縮ひずみ量も小さくなるため^{12) 13)}、養生技術によって乾燥収縮ひび割れを抑制できるといった報告はこれまでほとんどない。その一方で、5年2ヶ月間屋外曝露を行った壁高覧模擬部材では、排水湿潤連続養生を適用することで木製型枠を5日間存置とした部材よりも乾燥収縮ひび割れの発生が顕著に抑制されていた。 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の供試体における収縮低減効果は、木製型枠存置と比較すると10%程度であることを考慮すると、収縮ひずみの低減効果以上の乾燥収縮ひび割れの抑制効果があることが推定される。以上を背景を踏まえ、排水湿潤連続養生による乾燥収縮によるひび割れの抑制の要因について検討を行った。

一般的な乾燥収縮ひび割れの概要を図4.3.9に示す。コンクリートの乾燥は表面から進行するため、コンクリート内外とで収縮の差が生じる。その結果、コンクリート内外で収縮差が生じることで、コンクリート表面部が内部に拘束されることによる内部拘束によってひび割れが発生する。この乾燥収縮ひび割れは、深さが浅く亀甲状の微細なひび割れとなることが多い。

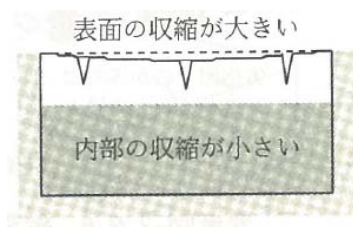


図 4.3.9 乾燥収縮ひび割れの概要¹⁴⁾

それに対して、排水湿潤連続養生を行った部材では、乾燥収縮ひび割れがほとんど発生していない。収縮ひび割れが減少している要因について、その概要を図 4.3.10, 図 4.3.11 に示す。乾燥収縮ひび割れの減少として3つの要因が考えられる。1つ目(①)は、コンクリート表層が W/C が低く、緻密化していることによるコンクリート表層部の水分逸散抑制、乾燥収縮ひずみが低減するためである。図 4.3.6, 図 4.3.7 の試験結果から、排水湿潤連続養生を適用することで、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体における質量減少率は抑制され、収縮ひずみが低減している。実構造物においてもコンクリート表層の収縮ひずみが低減することで内外の収縮の差が小さくなり、ひび割れが抑制されると考えられる。2つ目(②)は、表層が緻密な空隙構造のため、内部の水分の移動が抑制され、乾燥収縮が緩やかに進行するためである。これは、4.2 の W/C40%の供試体におけるコンクリートの含水率の分布(図 4.2.16)において、排水湿潤連続養生のほうが、木製型枠存置よりも内部の含水率が高く、水分逸散速度が緩やかなとなっていることから推定することができ、その結果内外の収縮の差が小さくなり、ひび割れが抑制されると考えられる。3つ目(③)は、表層が緻密な空隙構造のため、実環境下における雨による吸水が小さく、乾湿繰り返しによる影響を受けにくいためことが考えられる。既往の研究¹⁵⁾において W/C50%のコンクリートは、屋外の環境では、乾湿繰り返し作用がコンクリートの表面に微細なひび割れを発生させ初期の吸水速度と高めるが、低水セメント比では、乾湿繰り返しに対する吸水性状の変化が小さいと報告されている。排水湿潤連続養生は、コンクリート表層を緻密化していることで、表層の吸水速度が低下する(5章の図 5.3.13 参照)ことから、乾湿繰り返しの影響を受けにくく、その結果、収縮ひび割れが減少していると考えられる。

排水湿潤連続養生では、1つ1つの単体の効果ではなく3つの総合的な効果により、壁高覧模擬部材において、乾燥収縮ひび割れを著しく抑制されたと考えることができる。(図 4.2.17) また、排水湿潤連続養生を適用することにより、高耐久のコンクリート埋設型枠の適用と類似した効果が期待できると考えられる。

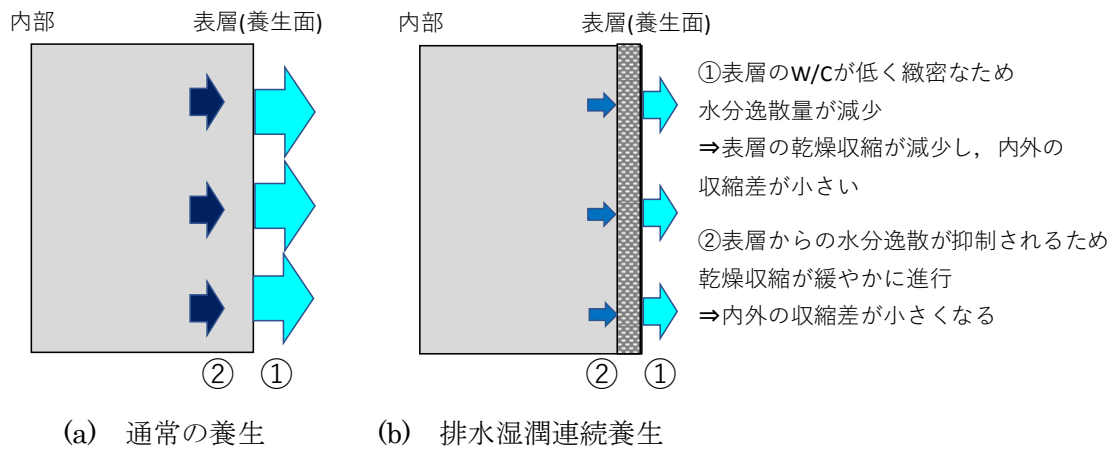


図 4.3.10 収縮ひび割れの減少の概要 [乾燥時]

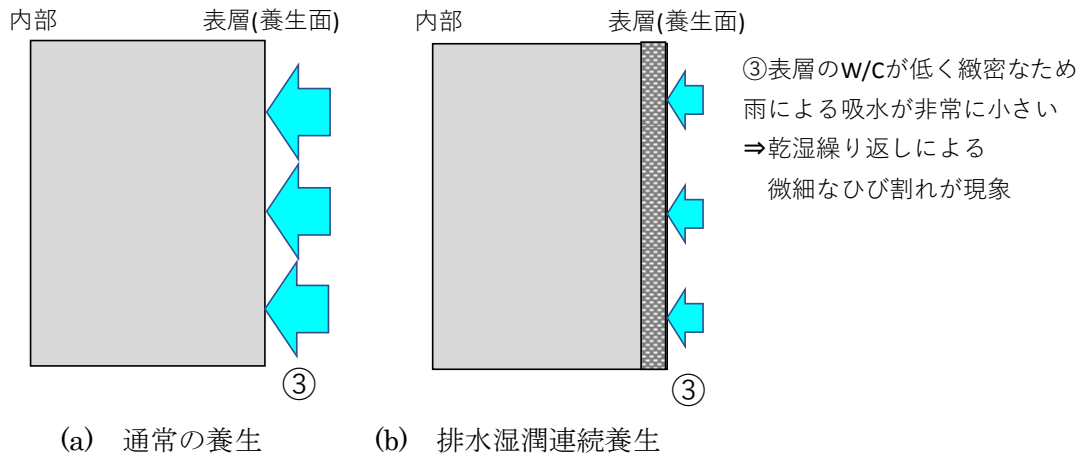


図 4.3.11 収縮ひび割れの減少の概要 [屋外環境]

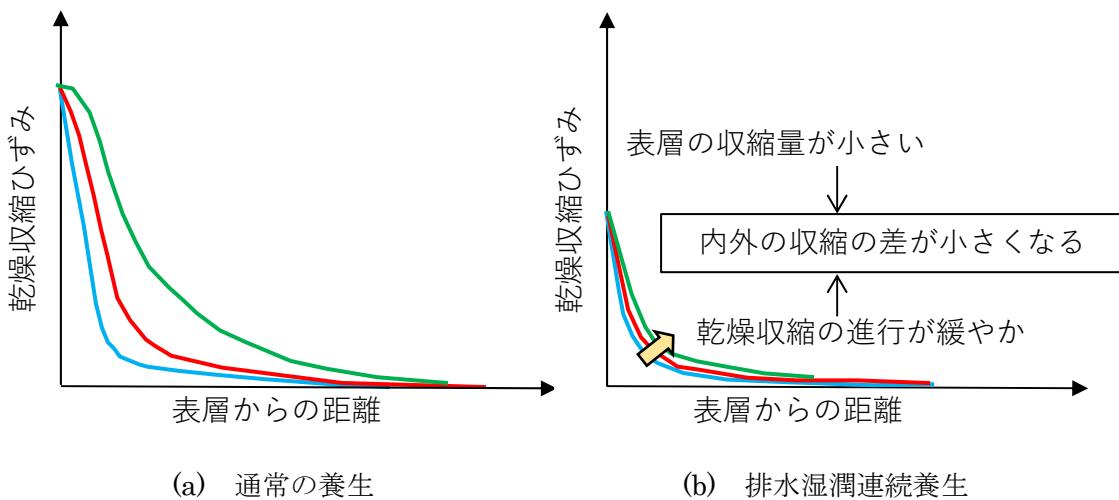


図 4.3.12 乾燥収縮ひずみの進行のイメージ

4.4 フライアッシュコンクリートへの適用効果

4.4.1 試験の目的

フライアッシュのコンクリートへの利用は、施工性能の向上、温度ひび割れの低減、アルカリシリカ反応の抑制、塩分浸透の抑制等の耐久性の向上など、コンクリートの性能向上に関わる利点に加え、セメント代替による CO₂ 削減など地球環境の保全の観点からのメリットも兼ね備えている¹⁶⁾。しかし、フライアッシュを使用することによるポゾラン反応は、セメントの水和反応よりも緩やかに進行するため、コンクリートの表層品質は、養生方法や養生期間の影響を大きく受ける¹⁷⁾。そのため、フライアッシュコンクリートでは、ポルトランドセメント単味の場合に比べて養生期間を長くとる必要があり、長期養生を行うほど塩分浸透抑制等の耐久性には効果的であるといった報告¹⁸⁾がされている。一方で、排水湿潤連続養生は、材齢初期の排水と湿潤養生を連続で行うことによる相乗効果によりコンクリートの表層品質を著しく向上することができるため、一般的な方法による長期養生よりも短い養生期間でより表層品質を向上させることができる。そこで、排水湿潤連続養生のフライアッシュコンクリートへの適用効果について把握することを目的に養生方法、養生期間の異なるフライアッシュコンクリートを使用した供試体を製作し、各種試験を行った。

4.4.2 供試体の製作と養生方法

コンクリートの配合を表 4.4.1, 使用材料を表 4.4.2 に示す. コンクリートは, W/B55%, とした. 結合材は, セメントは普通ポルトランドセメントを使用し, 混和材としてフライアッシュをセメントの内割で 20%置換した. 供試体の形状は, 高さ 500 mm, 幅 500 mm, 奥行き 300 mm の大きさとした. 500mm×500mm の片面を透水シート, 透水板, もう一方は, 木製型枠を使用した. コンクリートは 2 層に分けて, 各層とも内部振動機を用いて 15 秒間締固めを行った.

表 4.4.1 コンクリートの配合

配合名	SL (cm)	air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						
					W	C	FA	S	G		AE C×%
									G1	G2	
FA	15	4.5	55.0	48.7	158	230	57	888	380	572	0.8

表 4.4.2 使用材料

記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
W	水	横浜市	上水道
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
FA	フライアッシュ	中部電力	JIS II 種品 密度 2.31 g/cm ³
S	細骨材	千葉県君津産	表乾密度 2.61g/cm ³
G1	粗骨材	東京都青梅産	砕石 5号 表乾密度 2.66g/cm ³
G2	粗骨材	東京都青梅産	砕石 6号 表乾密度 2.65g/cm ³
AE	AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターポゾリス No.70

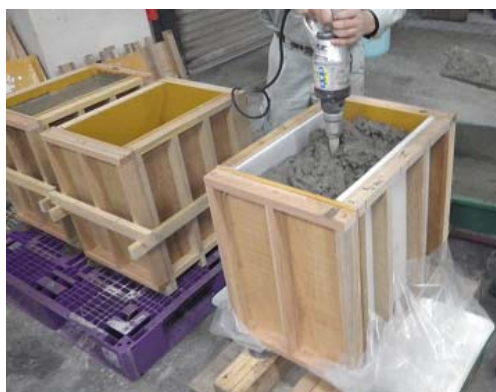


写真 4.4.1 供試体の作製状況 (余剰水の平均排水量 : 1580g/m²)

コンクリートの養生条件を表 4.4.3 に示す。排水湿潤連続養生では、透水板兼せき板を使用し、コンクリート打込み面側に透水性シートを設置して型枠の組立てを行った。打込み開始から余剰水を排出し、材齢 1 日において打込み面を湛水することで少量の水を透水シート、透水板に供給することで湿潤養生を実施した。材齢 5 日（給水期間は 4 日）で水の供給を止め脱型し、その後養生条件①では、気中曝露、養生条件②では、保水養生テープ¹⁹⁾を貼り付け、材齢 28 日まで封かん養生を行った。

養生条件③は木製型枠を使用し、コンクリートを打込み、材齢 5 日まで型枠を存置¹⁾したのち脱型した。養生条件④、⑤では木製型枠を使用し、コンクリートの打込みを行った。材齢 1 日において脱型を行い、保水養生テープを貼り付け、養生条件⑤では材齢 28 日まで、養生条件⑤では、材齢 91 日まで封かん養生を行った。

表 4.4.3 養生条件

養生条件	材齢 [日]									
	1	2	3	4	5	6	7	28	91	
①排水湿潤連続養生	打込み+排水	湿潤養生				脱型, 曝露				
②排水湿潤連続養生+封かん	打込み+排水	湿潤養生				脱型, 保水養生テープ (水分逸散抑制)			曝露	
③木枠型枠存置	打込み	木製型枠存置 (水分逸散抑制)					脱型, 曝露			
④封かん28日	打込み	脱型, 保水養生テープ (水分逸散抑制)						曝露		
⑤封かん91日	打込み	保水養生テープ (水分逸散抑制)								

4.4.3 測定項目

養生効果の確認として実施した試験項目を表 4.4.4, 測定位置を図 4.4.1 に示す.

コンクリートの反発度は, 材齢 15 週, 材齢 7 ヶ月, 材齢 12 ヶ月において JIS A 1155 に準拠し実施した. 表層透気係数は, 材齢 15 週, 材齢 7 ヶ月, 材齢 12 ヶ月において測定開始圧制御型の Torrent 法 (測定開始圧設定値 30mbar) による透気試験²⁾により測定し, あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため, 電極間隔を 50mm とした正負交替直流電流を用いた Wenner 法によって電気抵抗率の測定を行った. 細孔径分布は, 材齢 91 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面から 0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 50-60 mm の各深度から 5×5×5mm の試料を多数切り出し, D-dry 乾燥を 7 日間施したのち, 水銀圧入式ポロシメータにより 2nm-200 μ m の空隙量を測定した. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出には, 材齢 91 日で採取したコア供試体を用いて, 型枠面側を開放面とし, 側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングした供試体を用いた. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するために, 浸漬試験により塩化物イオンの濃度分布を測定した. 型枠面側を開放面としたコア供試体を 3%の NaCl 水溶液へ 9 か月間浸漬した後, ドライカッターで表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の平板を切り出し, JIS A 1154³⁾に準じて, 電位差滴定法により各深さの全塩化物イオン濃度を測定した. 見掛けの拡散係数は, JSCE-G 572 2013⁴⁾に準じて, 測定した塩化物イオン濃度分布を Fick の第二法則の一般解である式 (4.2.1)を用いて最小二乗法をもとに回帰分析を行い, 表面塩化物イオン濃度とともに算出した.

表 4.4.4 試験項目

試験項目	測定方法・規格	測定頻度
反発度	JIS A 1155	材齢 15 週, 材齢 7ヶ月, 材齢 12 か月
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	材齢 15 週, 材齢 7ヶ月, 材齢 12 か月
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータ	材齢 91 日 コア供試体採取 コンクリート表層から 0-10mm, 10-20mm, 20-30mm, 50-60mm を測定
塩分浸透試験	測定: JIS A 1154: 電位差滴定法 JSCE-G 572 2007 により 見かけの拡散係数算出	材齢 91 日 コア供試体採取 3%NaCl 溶液浸漬 9ヶ月 表面から 10mm ずつ 50mm まで, 5 深度の測定

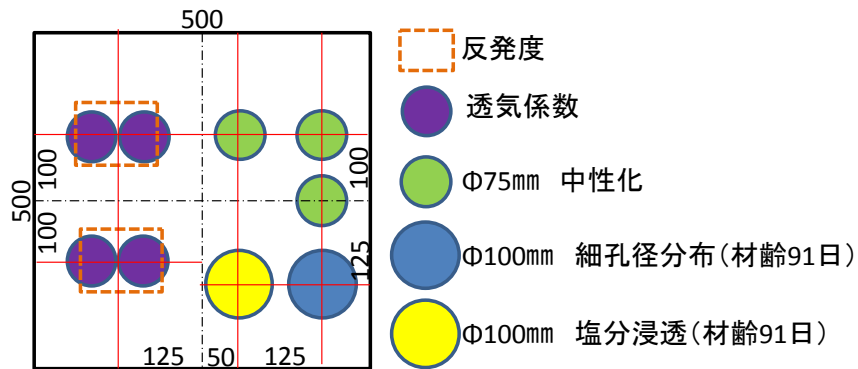


図 4.4.1 各試験における測定位置とコア供試体採取位置 (単位: mm)

4.4.4 試験結果

(1) コンクリートの反発度

材齢15週, 材齢7ヶ月, 材齢12ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を表4.4.5, 図4.4.2に示す. 排水湿潤連続養生を行った養生条件①, ②では, 水分逸散抑制を行った養生条件③, ④, ⑤よりも材齢15週で約1.3倍, 材齢12ヶ月においても約1.2倍大きな値となっており表層部分の硬度(強度)が向上している結果となった. 水分逸散抑制期間が反発度に与える影響についてみてみると, 養生期間91日(養生条件⑤)>養生期間28日(養生条件④)>養生期間7日(養生条件③)となっており封かん養生期間が長いほど高い値となっている. 封かん養生期間を91日としても, 排水湿潤連続養生の5日よりも小さな値であることを考慮すると, 排水湿潤連続養生5日間は, 封かん養生期間91日より品質向上効果は高いと評価できる.

表 4.4.5 反発度の試験結果

養生条件	①排水湿潤	②排水湿潤 +28d封かん	③木枠存置 7d	④封かん 28d	⑤封かん 91d
材齢15週	50.7	50.8	38.6	38.2	37.7
材齢7ヶ月	51.7	51.5	41.1	41.4	42.8
材齢12ヶ月	53.1	53.5	40.4	42.2	44.4

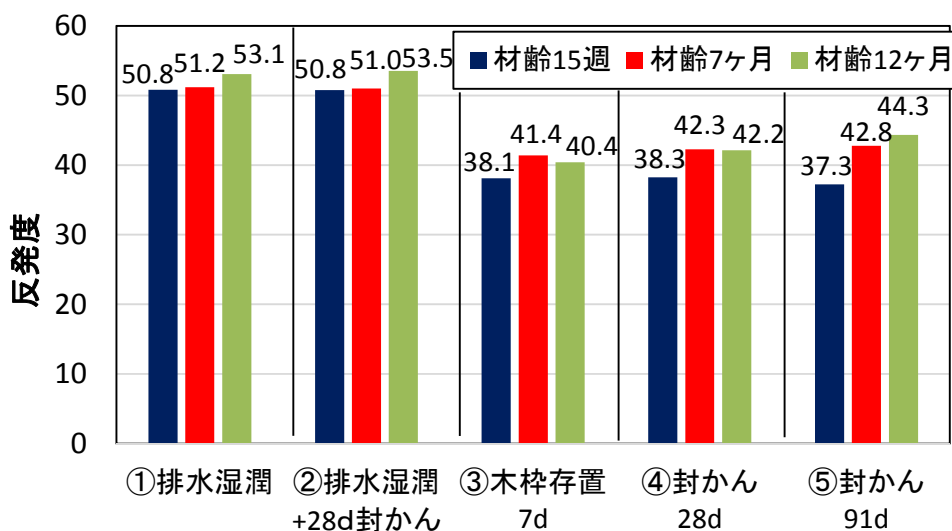


図 4.4.2 反発度の試験結果

(2) 表層透気係数

材齢28日, 材齢6ヶ月, 材齢12ヶ月におけるコンクリートの反発度の試験結果を表4.4.6, 図4.4.3に示す. コンクリートの表層の含水率の測定には含水計 (Tramex, Concrete Encounter CMEX II) を使用した. 図4.4.3は, Torrent らが提案している²⁾はコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し, 表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを5段階に区分評価したものである. すべての材齢において, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が最も表層透気係数が小さい値を示していることがわかる. 封かん養生91日における材齢15週の表層透気係数は, 養生完了からの経過時間が短いため, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②に近い小さな値となっているが, 材齢7ヶ月, 12ヶ月では, コンクリートの乾燥の進行とともに条件④, 条件⑤とほぼ同じ値となっている. このように長期材齢の透気係数は, 封かん養生期間による差が小さい結果であった. また, それぞれの養生条件における材齢7ヶ月と12ヶ月の測定結果を比較すると, 一般的には材齢の経過とともにコンクリート表層の含水率を間接評価している電気抵抗率が増加しコンクリートの乾燥に伴う透気経路の拡大によって, 表層透気係数も増加していく³⁾が, フライアッシュコンクリートでは, 電気抵抗率は増加しているが透気係数は小さくなっていることがわかる. これは, フライアッシュの添加によるポゾラン反応が材齢の経過とともに緩やかに進行することで緻密化しているためであると考えられる. なお, その効果は, 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②の方が, その他の養生よりも大きくなっており, 表層の緻密化により, 内部の水分逸散が抑制されることで水和反応, ポゾラン反応が進行したものと考えられる.

表 4.4.6 表層透気係数の試験結果

(1) 表層透気係数 [単位 KT : $\times 10^{-16}m^2$]

測定箇所	①排水湿潤 湿潤 5d	②排水湿潤 湿潤 5d + 材齢 28d封かん	③木枠存置 7d	④封かん 28d	⑤封かん 91d
材齢 15 週	0.040	0.022	1.235	0.770	0.056
材齢 6 ヶ月	0.019	0.015	1.123	0.898	0.385
材齢 12 ヶ月	0.007	0.002	0.300	0.458	0.293

測定値は、4 点の平均値

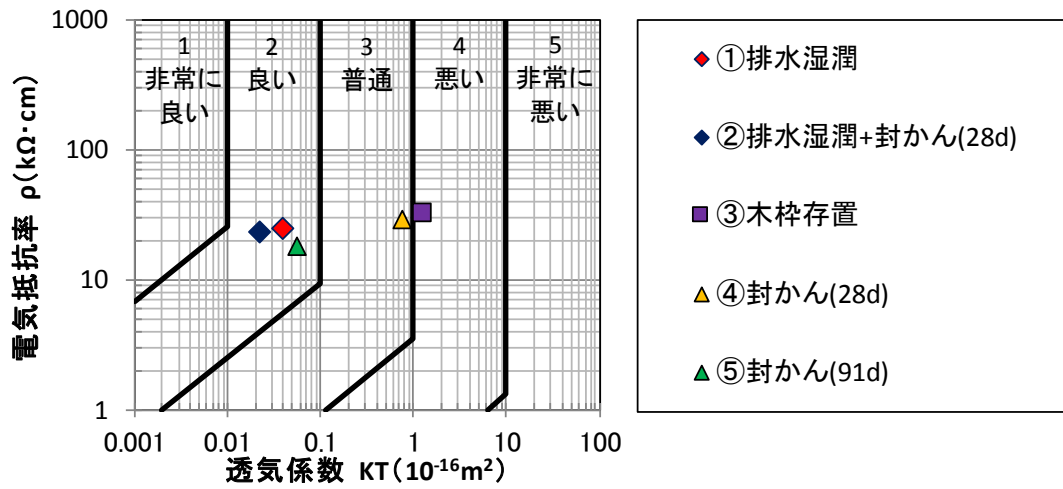
(2) 電気抵抗率 [単位 : $k\Omega \cdot cm$]

測定箇所	①排水湿潤 湿潤 5d	②排水湿潤 湿潤 5d+ 材齢 28d封かん	③木枠存置 7d	④封かん 28d	⑤封かん 91d
材齢 15 週	24.8	22.9	32.3	28.5	18.1
材齢 6 ヶ月	38.6	35.3	42.3	30.4	33.6
材齢 12 ヶ月	118.3	99.0	95.1	100.0	86.5

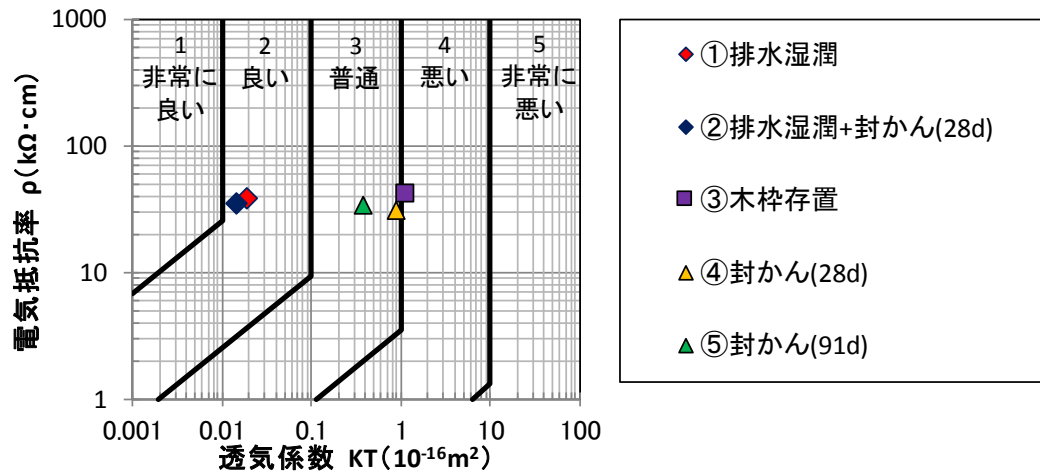
測定値は、4 点の平均値

(3) 含水率 [単位 : %]

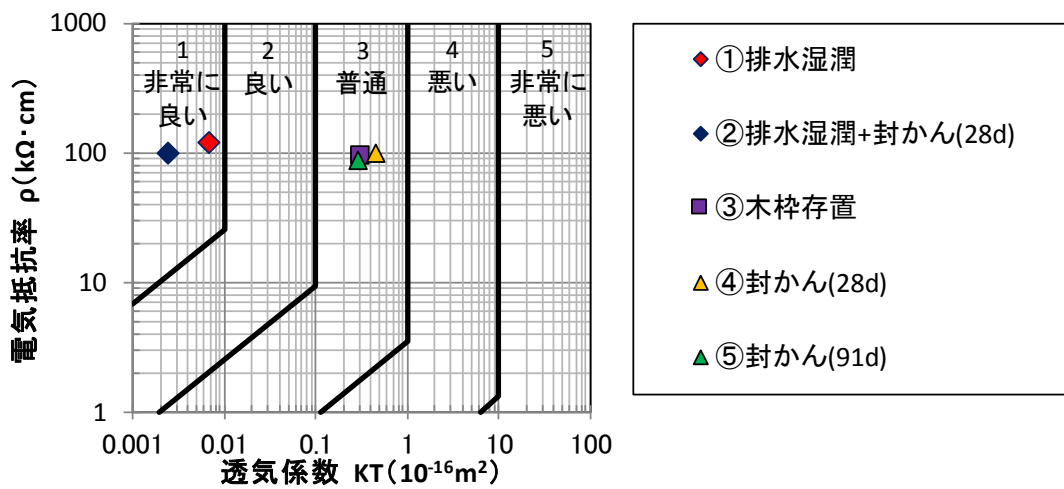
測定箇所	①排水湿潤 湿潤 5d	②排水湿潤 湿潤 5d+ 材齢 28d封かん	③木枠存置 7d	④封かん 28d	⑤封かん 91d
材齢 15 週	3.6	4.1	3.6	3.9	5.9
材齢 6 ヶ月	4.4	4.1	4.1	4.4	4.6
材齢 12 ヶ月	3.9	4.1	3.7	3.8	4.1



(a) 材齢 15 週



(b) 材齢 7 か月



(c) 材齢 12 ヶ月

図 4.4.3 表層透気係数の試験結果

(3) 細孔径分布

水銀圧入法によって計測された空隙量の結果を図 4.4.4, 細孔径分布, 累積空隙量を図 4.4.5, 図 4.4.6 に示す.

排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が 0-10mm において水分逸散養生である条件③, ④, ⑤よりも空隙量が少なく, 小径化していることがわかる. 10-20mm の細孔径分布についても, 同様の傾向であるが, 条件①と②において, 空隙量, 空隙構造に明確な差が出ており, 排水湿潤連続養生後に材齢 28 日まで封かん養生を行った条件②の方が条件①よりも空隙量が大きく減少し, 小径化していることがわかる. このことから, 排水湿潤連続養生を実施するのみでも長期的な封かん養生よりも大きな品質向上効果を得られるが, 排水湿潤連続養生後に封かん養生を追加で行うことで, 10-20mm, 20-30mm といった内部のコンクリートの空隙構造をさらに緻密化することができることがわかった.

水分逸散抑制期間が空隙構造に与える影響についてみると, 空隙率については大きな差がないが, 表層から 0-10mm, 10-20mm の細孔径分布では, 封かん養生期間が長いほど 0.1-1.0 μm の空隙が減少し, 0.1 μm 以下の空隙が増加しており空隙構造の緻密化が確認できた. フライアッシュコンクリートでは, 長期養生による品質改善効果は大きい結果となった.

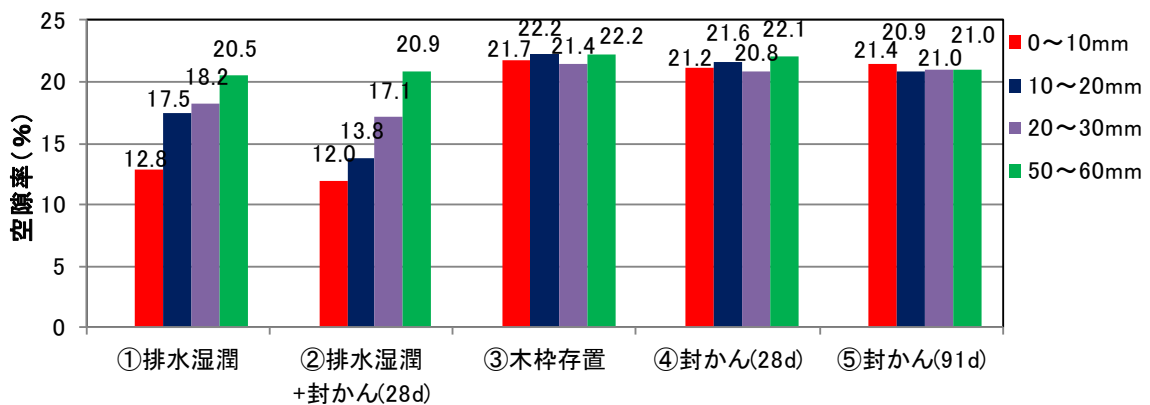
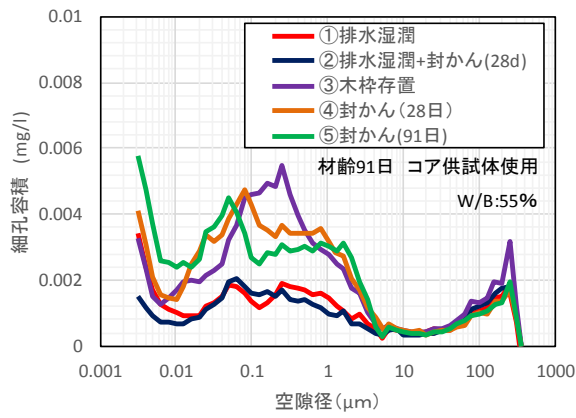
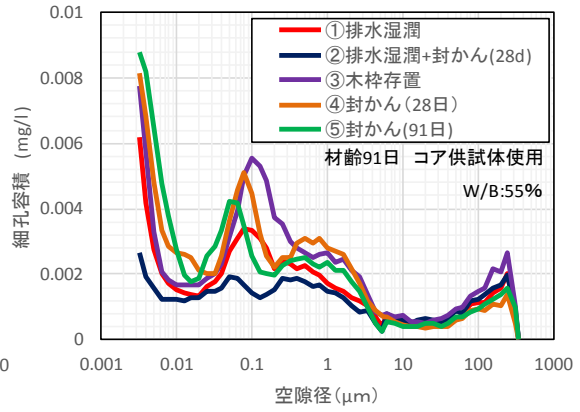


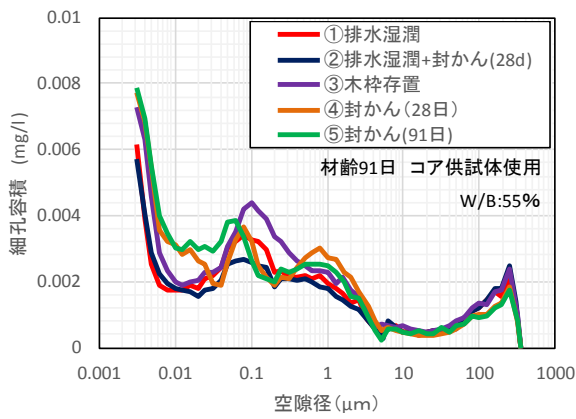
図 4.4.4 空隙率の試験結果



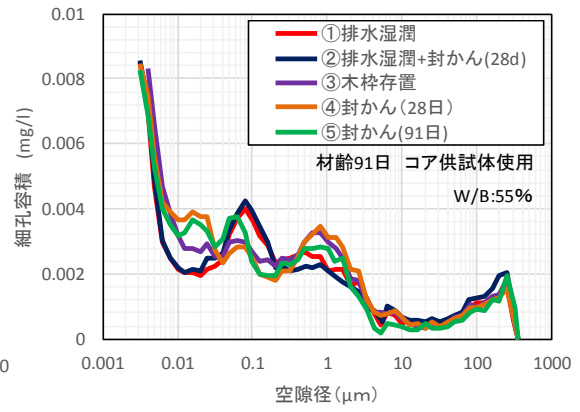
(1) 深さ 0~10mm



(2) 深さ 10~20mm



(3) 深さ 20~30mm



(4) 深さ 50~60mm

図 4.4.5 細孔径分布

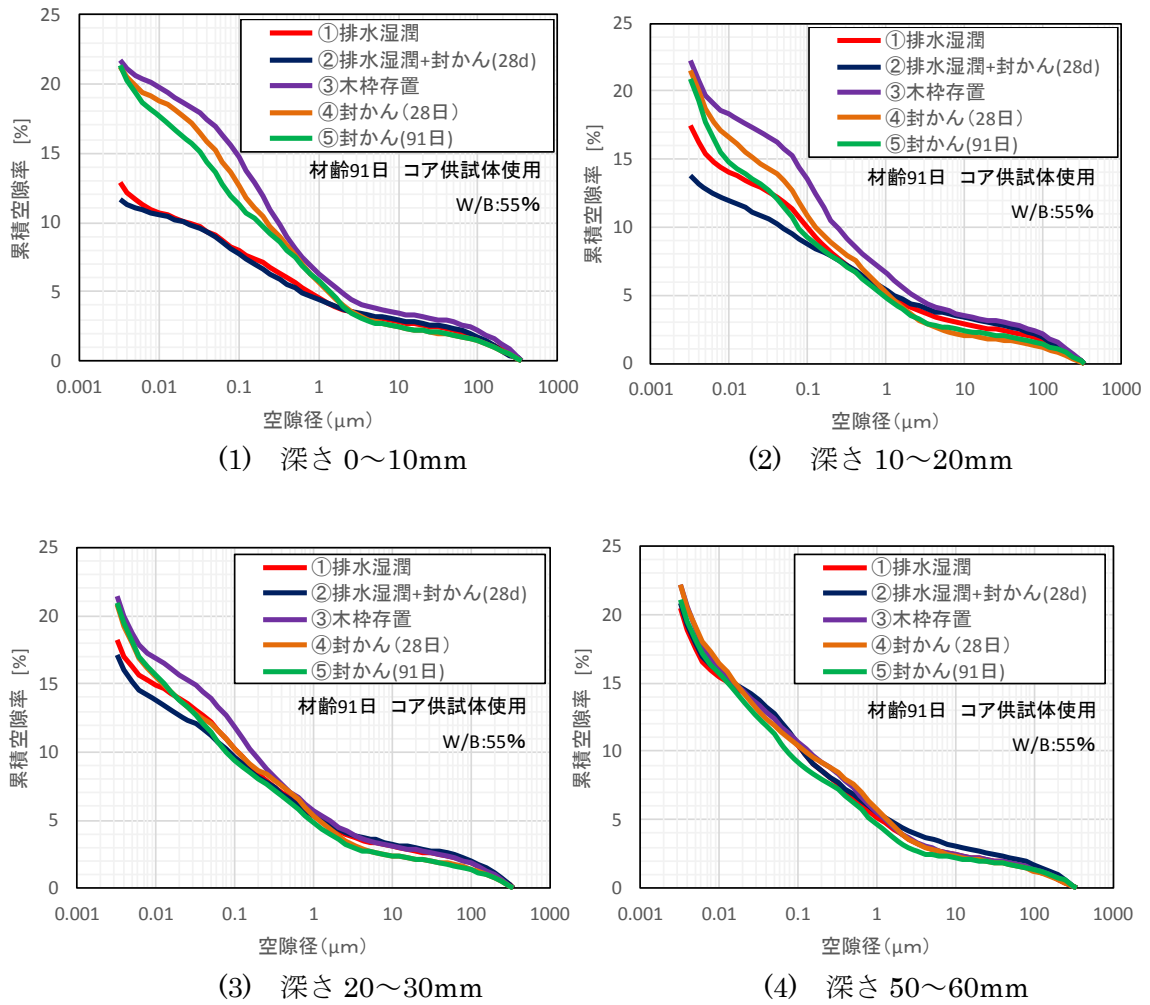


図 4.4.6 累積空隙率

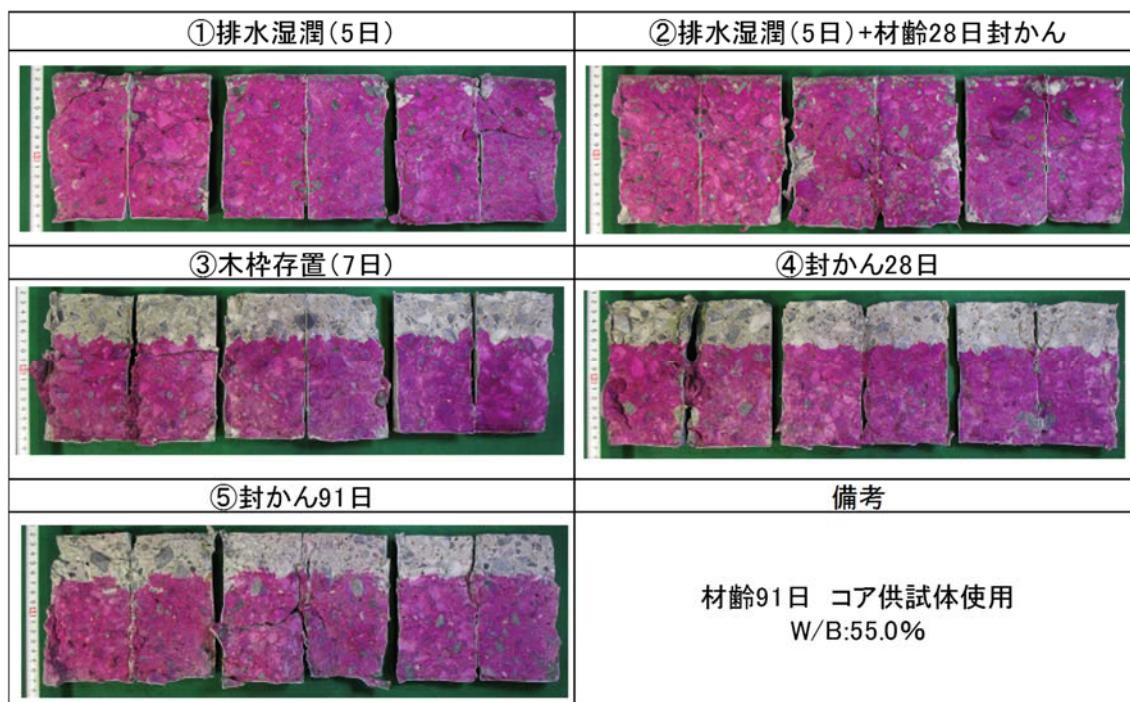
(4) 促進中性化試験結果

促進期間 52 週における中性化深さの試験結果を表 4.4.7, 写真 4.4.2 に示す. 排水湿潤連続養生を行った条件①, ②における促進中性化深さは 1mm 以下であり, 顕著に抑制された結果であった. また, 水分逸散養生である条件③, ④, ⑤を比較すると, 促進中性化深さに大きな差がなく, 養生期間による中性化抑制効果は小さい結果であった.

表 4.4.7 促進中性化試験結果 (材齢 91 日コア供試体使用, W/B55%)

養生条件	曝露期間 52 週
①排水湿潤(5日)	0.3mm
②排水湿潤(5日)+材齢28日封かん	0.1mm
③木枠存置(7日)	46.7mm
④封かん28日	47.1mm
⑤封かん91日	43.5mm

写真 4.4.2 促進中性化深さ



(4) 塩分浸漬試験結果

3%NaCl 溶液に 9 ヶ月浸漬したコア供試体の各深さにおける全塩化物イオン濃度を図 4.4.17 に示す。算出された塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を表 4.4.7 に示す。

排水湿潤連続養生を行った条件①, ②が 10-20mm, 20-30mm において水分逸散養生である条件③, ④, ⑤よりも塩化物イオン濃度, 見かけの拡散係数が低下しており, 塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる。条件①と②における 10-20mm の細孔径分布では, 条件②の方が空隙量が大きく減少し小径化していたが, 塩分浸透では大きな差はなかった。これは, 0-10mm の空隙構造は, 条件①, ②でほぼ同程度であったこと, W/C30% の塩分浸漬試験において 0-10mm の空隙構造の緻密化によって塩分浸透が大きく抑制されていたことから, 塩分浸漬試験では, 0-10mm の表層品質の影響が大きく, 10mm 以深の品質の差の影響を受けにくかったためであると考えられる。フライアッシュコンクリートの塩分浸透は, 浸漬期間が経過しても停滞する^{20), 21)}と報告されていることから, 塩分浸透の抑制については, 排水湿潤連続養生後に封かん養生を実施する効果は小さいと推測される。

水分逸散抑制期間が塩化物イオンの浸透に与える影響についてみると, 養生期間が長いほど, 10-20mm, 20-30mm における塩化物イオン濃度, 見かけの拡散係数が低下しており, 塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる。これは, 封かん養生期間が長いほうが表層から 0-10mm, 10-20mm の空隙構造が緻密化するためである。フライアッシュコンクリートでは, 既往の研究と同様に長期養生による塩分浸透抑制効果が大きい結果²⁰⁾となった。

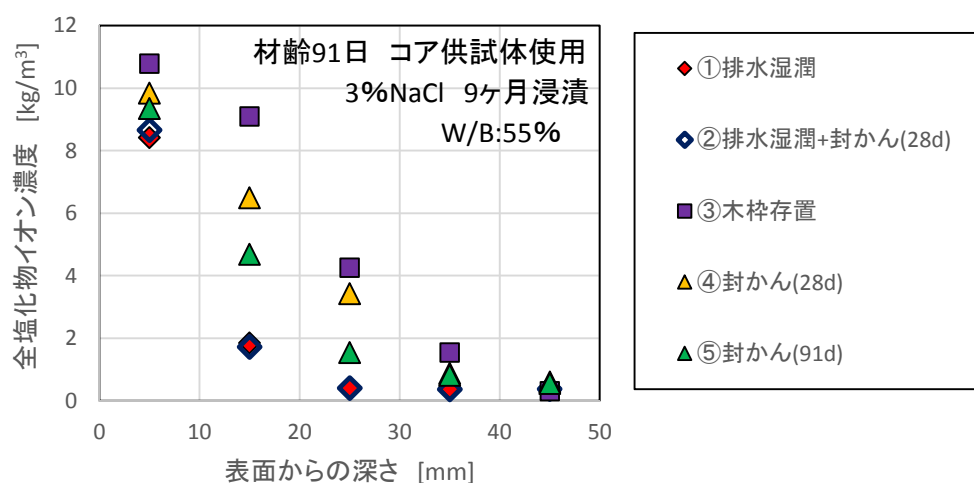


図 4.3.17 全塩化物イオン濃度分布

表 4.4.7 表面塩化物イオン濃度と拡散係数

養生条件	①排水湿潤 5日	②排水湿潤5日 +材齢28日封かん	③木枠存置 7日間	④封かん 28日	⑤封かん 91日
表面塩分濃度 [kg/m³]	13.4	14.8	13.6	12.2	12.1
拡散係数 [cm²/年]	0.64	0.56	4.36	3.28	1.91

いずれの試験結果も長期の封かん養生を行うよりも5日間の排水湿潤連続養生の方が内部まで空隙構造が緻密化しており、短い養生期間でも品質向上効果が高いことが示された。特に、塩分浸透の抑制効果が大きくこれまで長期養生の効果が高いと考えられていたフライアッシュコンクリートに対して短い養生期間でも排水湿潤養生の方が優位性があるといえる。その一方で、耐久性に非常に厳しい環境では、排水湿潤連続養生後に保湿養生を行うことで更なるフライアッシュコンクリートのポテンシャルを引き出すことも可能でことから、要求性能に応じて適切な方法を選定することができる。

4.5 まとめ

本章では、排水湿潤連続養生による耐久性以外の品質向上効果とコンクリートの適用範囲について検討した。まず排水湿潤連続養生の水セメント比の適用範囲を明らかにするために低水セメント比のコンクリートへ適用した際の品質向上効果を検討した。次に、自己収縮・乾燥収縮の低減効果、実構造物における乾燥収縮ひび割れの低減のメカニズムについて検討した。加えて、長期養生が効果的とされているフライアッシュコンクリートへの適用効果について検討を行った。

本章で検討した結果から得られた知見を以下に示す。

- ・排水湿潤連続養生により W/C40%におけるコンクリートでは、表層から 30mm 程度までコンクリートの空隙構造が緻密化することができる。そのため、表層透気係数の低減、塩分浸透の抑制といった表層品質や耐久性が大きく向上する。
- ・W/C30%では、コンクリートの表層から 10mm 程度までしかコンクリートの空隙構造が緻密化しない。そのため、W/C40%以上のコンクリートを用いた場合と異なり、養生による品質向上効果が相対的に小さくなることから、排水湿潤連続養生は、W/C40%以上のコンクリートに対して特に有効である。
- ・排水湿潤連続養生のコンクリート表層の緻密化により W/C40%以上のコンクリートは自己収縮と乾燥収縮を含めたコンクリートの収縮ひずみが減少する。W/C30%では、排水湿潤連続養生を行わなくてもコンクリートは十分に緻密なため、排水湿潤連続養生の適用による収縮ひずみの低減効果はほとんどない。
- ・実規模構造物では、コンクリート表層部の水分逸散抑制、乾燥収縮ひずみが低減、内部の水分の移動が抑制され、乾燥収縮が緩やかな進行、吸水が小さく、乾湿繰り返しによる影響を受けにくいといった3つの総合的な効果により乾燥収縮ひび割れを著しく抑制できると考えられる。
- ・フライアッシュコンクリートでは材齢 91 日までの長期封かん養生よりも材齢 7 日までの排水湿潤連続養生のほうが内部まで空隙構造が緻密化しており、品質向上効果は高い。また、排水湿潤連続養生後に封かん養生を追加で行うことで、よりコンクリート内部まで空隙構造が緻密化することができる。

4 章の参考文献

- 1) 土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書[施工編]，2013.3
- 2) R.J.Torrent and G.Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the concrete, Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp-985-992,1995.9
- 3) 2013 年制定土木学会コンクリート標準示方書[基準編：JIS 規格集]，pp625-639, 2013.11
- 4) 2013 年制定土木学会コンクリート標準示方書[基準編：土木学会基準および関連基準]，pp372-376, 2013.11
- 5) 上田洋，玉井譲：コンクリート構造物の表面付近における水分分布の検討，コンクリート技術シリーズ 87，歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会(216 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集，pp113-120, 2009
- 6) 前田哲弘，松田孝允，三島直生，畑中重光：透水性型枠を使用したコンクリートの表層および内部強度性状に及ぼす再振動締固めの影響，コンクリート工学年次論文集，vol.24, No.1, pp345-350, 2002
- 7) 国土交通省東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編），2016.5
- 8) 蔵重勲，廣永道彦：透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案，セメント・コンクリート論文集，No.65, pp225-232, 2011
- 9) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.58-60, 1996.11.
- 10) 臼井 達哉，宮原 茂禎，丸屋 剛，大友 健：異なる養生温度条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性，土木学会論文集 E2, vol.70, No.1, pp92-103, 2014.3
- 11) 郭度連，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比および養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25, No.1, pp743-748, 2003
- 12) 小林仁，先本勉，綾野克紀，宮川豊章：部材寸法がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響，プレストレストコンクリート工学会，第 21 回シンポジウム論文集，pp357-362, 2012.10
- 13) 綾野克紀，藤井隆史，平喜彦：コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，vol.69, No.1, pp431-437, 2013
- 14) コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2013-，2013
- 15) 千歩修，濱田英介，友澤史紀：乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と対凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25, No.1, pp731-736, 2003
- 16) コンクリートライブラリ 132:循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術ー利用拡大に向けた設計施工指針案ー，土木学会，2009.12
- 17) コンクリートライブラリ 94:フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)，土木学会，1999.4

- 18) 温品達也, 渡邊賢三, 坂井吾朗, 石田哲也, : 種々の結合材を用いたコンクリートに対する長期特殊シート養生の効果, コンクリート工学年次論文集, vol.38, No.1, pp.747-752, 2016
- 19) 天谷公彦, 原幹夫, 濱岡弘二, 森本仁志 : 保水養生テープを用いたコンクリートの養生に関する実験的検討, プレストレストコンクリート工学会, 第 21 回シンポジウム論文集, pp.579-582, 2012.10
- 20) 小柳翔平, 高橋佑弥, 石田哲也 : 高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, vol.37, No.1, pp 109-114, 2015
- 21) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治 : 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.32, No.1, pp 803-808, 2010

5. 様々な構造物への適用に向けた改良

5.1 概要

本章では、各種構造物への適用に向けた改良について検討した。

まず、ボックスカルバートや橋梁の PC 箱桁等で側壁，頂版を同時にコンクリートの打込みを行う施工条件における給水方法について検討した。頂版を同時施工する際は，余剰水の排出は問題なくできるが，壁高欄(第3章)のように天端からの給水を行うことができない。そのような施工条件において湿潤養生を適切に行うことができる給水方法について検討を行った。

次に，トンネルの覆工コンクリートの SL 下部への適用に向けた改良について検討した。覆工コンクリートの SL 下部は，凍結防止剤による塩害劣化を受けるため，耐久性の向上が求められている地域がある。覆工コンクリートは，通常セントルを内型枠としてセットし，防水シートとのスペースにコンクリートの打込みを行う。そのため，排水湿潤連続養生用の型枠の設置方法について検討を行った。

5.2 壁部材と頂版を同時施工する条件における給水方法

5.2.1 改良の概要

壁高欄では，コンクリートの天端から透水板への注水，天端部を湛水することで湿潤養生を行った。しかし，ボックスカルバートや橋梁の PC 箱桁等で側壁，頂版を同時にコンクリートの打込みを行う施工条件におけるでは，壁高欄のように天端からの給水ができず，これまでの給水方法では均一な湿潤養生を容易に実施することが難しいと考えられた。そのため，排水後の湿潤養生を適切に行う給水方法について検討を行った。

5.2.2 給水方法の改良

改良した給水方法を図 5.2.1 に示す。大きな特徴は、透水型枠を分割し、最上部に 4 面シールした小型の透水型枠を設置することで、この小型の透水型枠内部をホース等で注水し型枠内部を満水にすることで、透水シートを通じてコンクリート上部から下部まで均一な湿潤養生とすることが可能となる（写真 5.2.1）。また、改良した給水方法を用いることで、高さ方向に透水型枠を分割しなければならないような施工条件であっても最上部に設置した小型型枠への注水のみで湿潤養生を実施することができる。

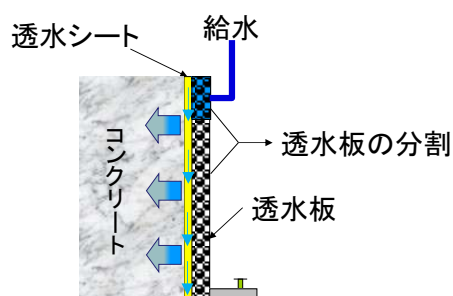
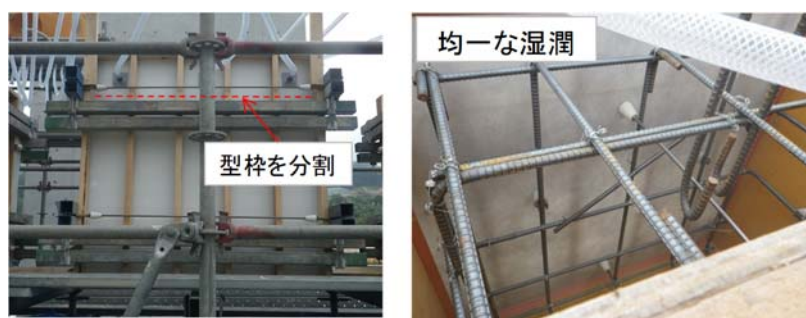


図 5.2.1 側壁，頂版を同時施工における給水方法の改良



(a) 改良前



(b) 改良後

写真 5.2.1 側壁，頂版を同時施工における給水方法の改良

5.2.3 模擬部材の作製と効果の検証

給水方法の改良の効果を確認するために幅1.0m×高さ1.2m×奥行0.6mの供試体を作成し、①排水湿潤連続養生（改良前）と②小型の透水型枠を設置した排水・湿潤連続養生（改良後）、比較対象として木製型枠を用いた3つの試験体を作製した。コンクリートの配合を表5.2.1に示す。コンクリートは、40-12-20H（W/C：40.2%）で実際の橋梁の上部工であるPC箱桁に用いた配合である。養生方法は、排水湿潤連続養生である①、②については、排水1日間、給水を4日間とし、③木製型枠については、コンクリート標準示方書[施工編]に準拠し、5日間の型枠存置²⁾とした。湿潤養生の実施状況を写真5.2.2に示す。透水型枠への注水は、貯水タンクを透水型枠よりも上部に設置しホース用いて行った。試験項目を表5.2.3に示す。品質確認試験としてリバウンドハンマーによる反発度およびトレント法による表層透気試験による透気係数の測定、部材から採取したコア供試体を用いて水銀圧入法による細孔径分布を測定した。コンクリートの反発度は、材齢28日、材齢7ヶ月においてJIS A 1155に準拠し実施した。表層透気係数は、材齢28日、材齢7ヶ月において測定開始圧制御型のTorrent法（測定開始圧設定値30mbar）による透気試験により測定し、あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため、電極間隔を50mmとした正負交替直流電流を用いたWenner法³⁾によって電気抵抗率の測定を行った。測定位置は、上部（天端から350mm）および下部（下端から150mm）とした。水銀圧入法による細孔径分布は、材齢28日にて下端から500-600mmの断面中央部における採取したコア供試体を用いた。水銀圧入法による細孔径分布は、材齢28日にて下端から500-600mmの断面中央部における採取したコア供試体を用いた。養生面から0-10mm、10-20mm深度から5×5×5mmの試料を多数切り出し、D-dry乾燥を7日間施したのち、水銀圧入式ポロシメータにより2nm-200μmの細孔径分布を測定した。

表 5.2.1 コンクリートの配合

配合名	SL (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	SP (C×%)
40-12-20H	12	4.5	40.2	41.7	153	381	744	1048	0.80



写真 5.2.2 湿潤養生の状況

表 5.2.2 養生条件

養生条件	材齢 [日]						
	1	2	3	4	5	6	
①排水湿潤連続養生(改良前)	打込み+排水	湿潤養生		型枠存置			脱型
②排水湿潤連続養生(改良後)							
③木製型枠存置	打込み	木製型枠存置 (水分逸散抑制)					

表 5.2.3 試験項目

試験項目	測定方法・規格	測定頻度
反発度	JIS A 1155	材齢 28 日, 材齢 7 ヶ月
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	材齢 28 日, 材齢 7 ヶ月
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータ	材齢 28 日 コア供試体採取 コンクリート表層から 0-10mm, 10-20mm を測定

材齢 28 日, 材齢 7 ヶ月における反発度の試験結果を図 5.2.2 に示す. 改良後の反発度の値は, 上部と下部が同程度の値であり, 木製型枠と比較して材齢 7 ヶ月では 10%程度増加しコンクリートの表層部分の硬度(強度)が向上した. 一方, 改良前では, 上部の反発度が下部の反発度と比較し低いことがわかる.

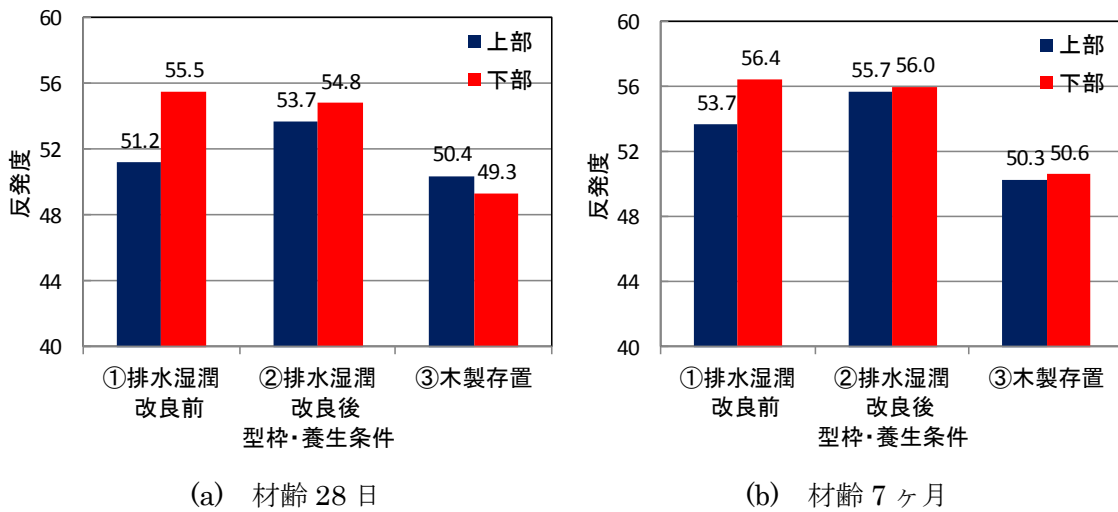


図 5.2.2 反発度の試験結果

次に、材齢 28 日、材齢 7 ヶ月における表層透気係数の試験結果を図 5.2.3 に示す。図 5.2.3 は、Torrent らが提案しているのはコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し、表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを 5 段階に区分評価したものである。改良後の表層透気係数は、木製型枠と比較して、材齢 28 日では、1/2-1/3、材齢 7 ヶ月では、1/10 程度の値となっておりコンクリート表面の品質が大きく向上していることが確認された。改良前では、材齢に関わらず上部の表層透気係数は下部の表層透気係数と比較し大きく、反発度の測定結果と同様に品質が低くなる傾向を示しており、上部では給水が不十分であったため、水和反応が進行せず表層品質が低下したと考えられる。以上の結果が示すように、小型の透水型枠を設置し給水することで均一な湿潤養生が可能となり、余剰水の排出の効果も相まってコンクリート全面の品質を一様に向上させることができることを確認した。

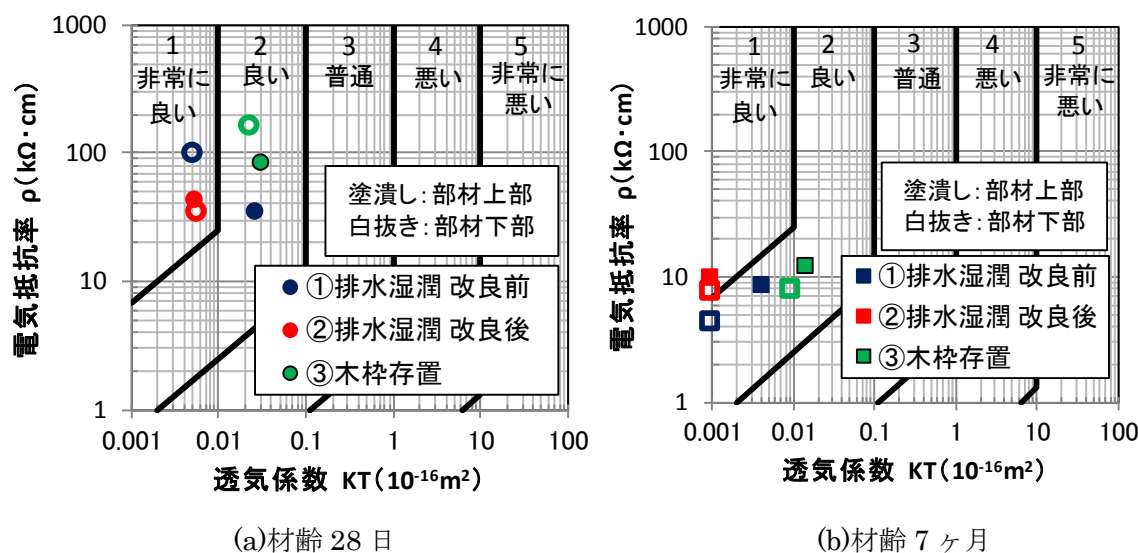


図 5.2.3 表層透気係数の試験結果

水銀圧入法による細孔径分布、累積空隙率を図 5.2.4、図 5.2.5 に示す。コンクリート表面から 0-10mm における排水湿潤連続養生の細孔径分布は、木製型枠の存置による養生よりも小さな値であり、養生の効果による空隙構造の緻密化を確認することができた。改良前と改良後を比較すると、改良前の方が 100-200 μ m の粗大な空隙があることがわかる。排水後の湿潤養生が不十分であると粗大な空隙が残りやすい結果であった。また、コンクリート表面から 10-20mm における細孔径分布においても、改良後の方が改良前よりも若干ではあるが 0.1-0.2 μ m の空隙が減少し、空隙構造が緻密化されており、給水方法を改良することで上部から下部まで均一な湿潤養生が可能となり、部材全体の品質向上を行うことができることを確認した。

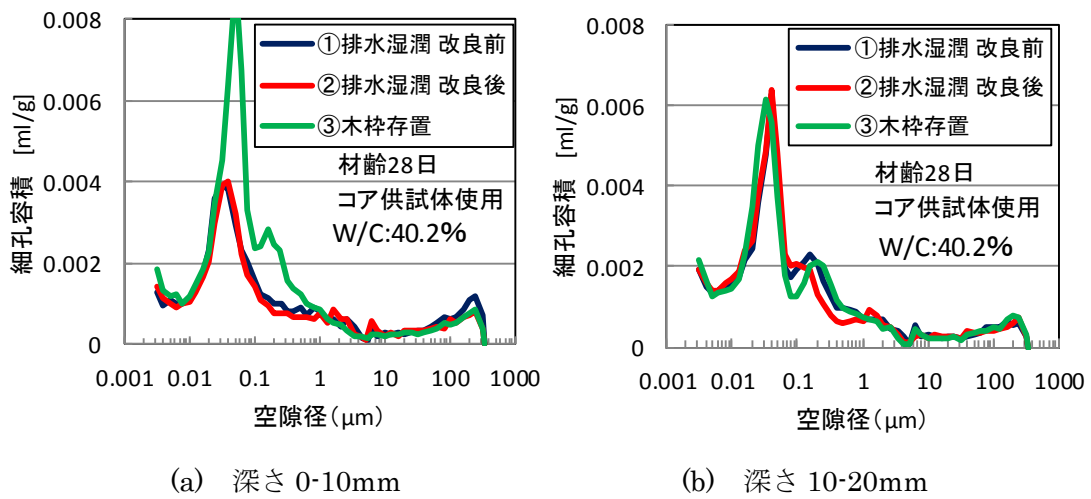


図 5.2.4 細孔径分布

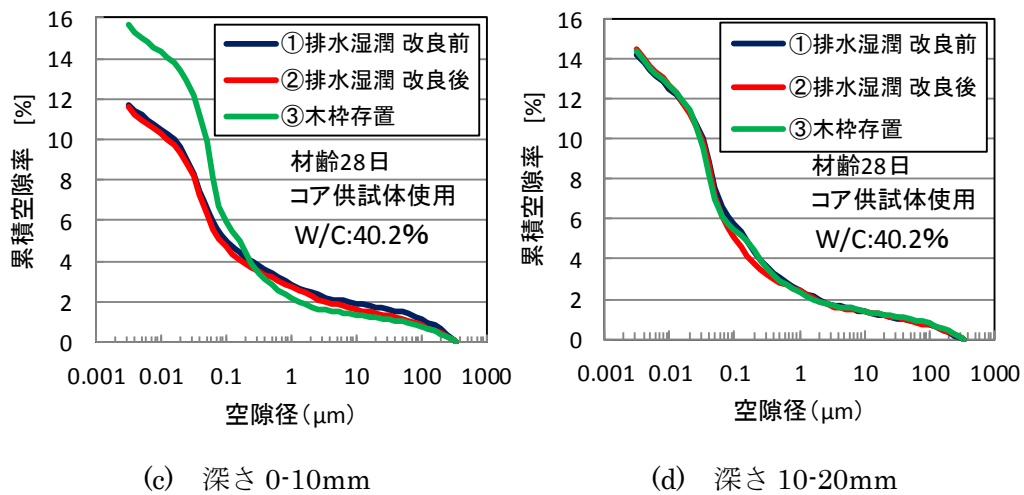


図 5.2.5 累積空隙率

天端からの注水ができない施工条件に対応した給水方法の改良を行い、その効果について確認することができた。これらの結果をもとに、これまでに、側壁、頂版を同時にコンクリートの打込みを行う PC 箱桁側壁⁴⁾や水利構造物の一部に改良した給水方法を用いた排水湿潤連続養生を適用している。

5.3 覆工コンクリートへの適用

5.3.1 改良の概要

寒冷地域では、道路の凍結対策として塩化ナトリウムや塩化カルシウムを主成分とした凍結抑制剤を散布するため、凍害や塩害などの観点でコンクリート構造物には過酷な環境である。トンネル内部では、凍結抑制剤を直接散布しないものの、トンネル坑口部では凍結抑制剤の影響を受ける。また、トンネル坑口部まで散布された凍結抑制剤がタイヤによる引きずりや巻き上げによってトンネル内部にも飛散している事が報告されている¹⁾。この凍結抑制剤は、道路からの巻き上げの影響が大きいので、SLより下の覆工コンクリートで影響を受けやすいと考えられる。また、SLより下の覆工コンクリートは、テーパーがついた断面形状でありコンクリート表面に気泡が残りやすい構造となっている。このように覆工コンクリートは特に寒冷地域において耐久性の向上が求められていることから、覆工コンクリートへの排水湿潤連続養生を適用するための改良を行った。

5.3.2 覆工コンクリート用の型枠構造

覆工コンクリートの施工では、セントルと呼ばれる移動式型枠をセットし、防水シートとの空間の30-50cm程度の狭小の空欄にコンクリートの打込み、締固めを行う。一般に山岳トンネルの覆工コンクリートは標準的に2日に1回の打設サイクルを行うため、材齢15-20時間程度で脱型し、セントルを移動させる。そのため、セントルの一部を排水湿潤連続養生用の透水板兼せき板、透水性シートに置き換えてしまうと、湿潤養生を連続的に行うことができない。このことから、透水板、透水性シートをセントルから切り離すことができる構造とし、セントルが移動後も透水板、透水性シートを残置できる型枠構造を考えた。

考案した覆工コンクリート用の型枠構造を図5.3.1に示す。SL下のセントルを内空間側にセットバックし、透水板、透水性シート等が一体となったユニットを設置する構造(図5.3.2)となっている。そうすることでセントルを移動後は型枠ユニットを残置することができ、型枠上部を湛水することで湿潤養生を脱型せずに連続して実施できる。加えて、SL下部が円弧状のテーパーとなっているため、透水板もその形状にあわせて設置する必要があった。そのため、型枠ユニットを製作する際には、加工しやすさを考慮し、これまで使用してきた透水板よりも厚さが薄く、剛性の低い透水板を使用した。さらに、セントルへの取付時の施工性を考慮し、木製型枠と一体化する構造とした。

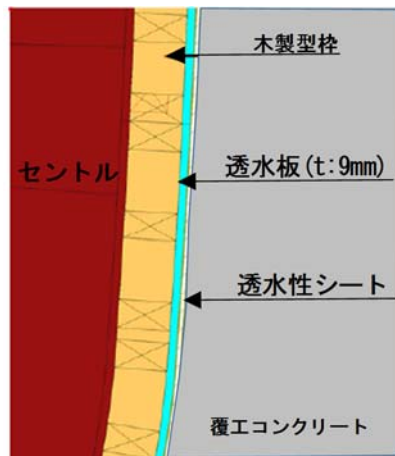


図 5.3.1 覆工コンクリート用の型枠構造

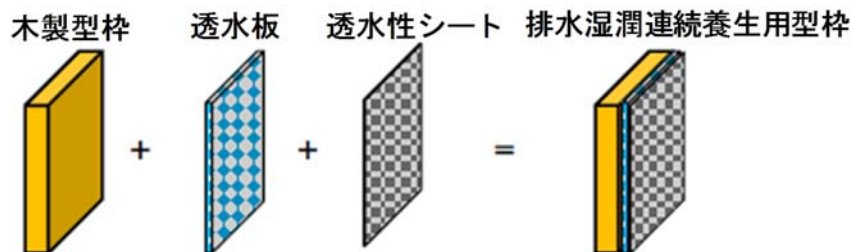


図 5.3.2 覆工コンクリートにおける排水湿潤連続養生用型枠ユニット

5.3.3 模擬部材の作製と効果の検証

覆工コンクリートを模擬した部材を製作し、排水湿潤連続用の型枠の組立、排水、湿潤を適切に実施することができるのか確認を行った。模擬部材の寸法を図 5.3.3 に示す。部材の形状は、覆工コンクリートの SL 下を再現したものとし、事前にインバート部を構築した。部材は排水湿潤連続養生により製作するものと、比較用として通常の木製の型枠を存置して製作するものの 2 体とした。コンクリートを表 5.3.1 に示す。コンクリートの配合は、21-15-25BB のレディーミクストコンクリートであり、実際の覆工コンクリートで使用した配合である。排水湿潤連続養生を適用した模擬部材では、コンクリート打込み後、材齢 1 日まで余剰水の排出した。その後、タンクから小型に分割した透水型枠に水を供給し湿潤養生を材齢 7 日行ったのち、脱型した。木製型枠を使用して製作した比較用の部材は、材齢 7 日まで型枠を存置したのちに脱型した。脱型後、模擬試験体は、屋外曝露とした。なお、反発度、表層透気係数、表面吸水速度(表 5.3.2)を測定する 2 週間前からコンクリートが雨などによってぬれないようにシート養生を行っている。

脱型後の外観状況を写真 5.3.1 に示す。曲面部は勾配がついているため、木製型枠では、空気泡が残っているが、排水湿潤連続養生では、空気泡は非常に少なく良好な仕上がりとなっており、美観が向上することを確認した。

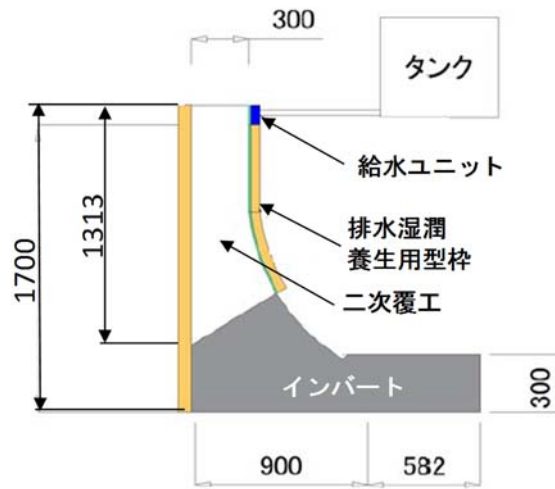


図 5.3.3 模擬部材の寸法

表 5.3.1 コンクリートの配合 (21-15-25BB)

配合名	SL (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S		G	AE C × %
							S1	S2		
21-15-25 BB	15	4.5	53.2	42.7	162	305	531	227	1024	1.0

表 5.3.2 養生条件

養生条件	材齢 [日]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
排水湿潤連続養生	打込み+排水	湿潤養生						脱型
木製型枠存置	打込み	木製型枠存置						



曲面部拡大



(a) 木製型枠存置



曲面部拡大



(b) 排水湿潤連続養生

写真 5.3.1 脱型後の外観

養生効果の確認として実施した試験項目を表 5.3.3 に示す。

コンクリートの反発度は、材齢 98 日において JIS A 1155 に準拠し実施した。表層透気係数は、材齢材齢 98 日において測定開始圧制御型の Torrent 法(測定開始圧設定値 30mbar)による透気試験により測定し、あわせてコンクリート表層の含水率を間接評価するため、電極間隔を 50mm とした正負交替直流電流を用いた Wenner 法³⁾によって電気抵抗率の測定を行った。表面吸水速度は、吸水カップをコンクリート表面に密着させ、吸水カップに水を満たし、コンクリート表面における吸水速度を、時々刻々算出する SWAT 法⁵⁾を用い、10 分時点での表面給水速度を算出した。

これらの非破壊試験の実施後、天端から 60cm 下の位置で、φ 110mm のコア供試体を採取し、細孔径分布の測定を行った。細孔径分布は、材齢 98 日で採取したコア供試体を用いて、型枠面から 0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 50-60 mm の各深度から 5×5×5mm の試料を多数切り出し、D-dry 乾燥を 7 日間施したのち、水銀圧入式ポロシメータにより 2nm-200 μ m の空隙量を測定した。

表 5.3.3 模擬部材の試験項目

測定項目	測定方法	測定内容
反発度	JIS A 1155	材齢 98 日で測定
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	3 点の平均値 材齢 98 日で測定
表面吸水速度	SWAT	2 点の平均値 材齢 98 日で測定
圧縮強度	JIS A 1107	材齢 128 日で測定 コア供試体 3 本の平均値
空隙分布	水銀圧入法	材齢 98 日コア供試体 D-dry 乾燥 7 日間実施 コンクリート表層から 0-10mm, 10-20mm, 20-30mm, 50-60mm を測定

模擬部材の材齢 98 日における反発度の測定結果を図 5.3.4 に示す。排水湿潤連続養生における反発度は、木製型枠の存置による養生よりも約 1.2 倍大きな値を示しており、表層部分の硬度(強度)が向上していることが確認できた。

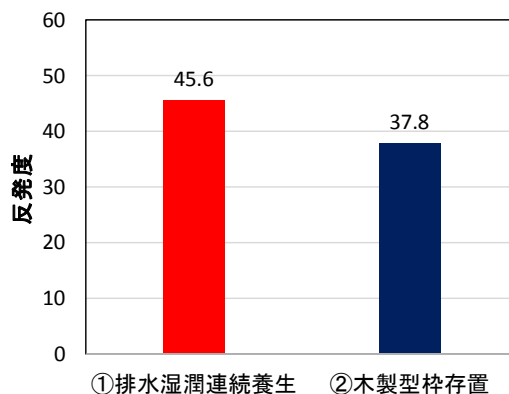


図 5.3.4 反発度の試験結果

表層透気係数の計測結果を図 5.3.5, 表 5.3.4 に示す。図 5.3.5 は、Torrent らが提案しているはコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し、表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを 5 段階に区分評価したものである。排水湿潤連続養生における表層透気係数は、木製型枠の存置による養生と比べて、約 1/40 となっており、コンクリート表面の品質が大きく向上していることが確認できる。

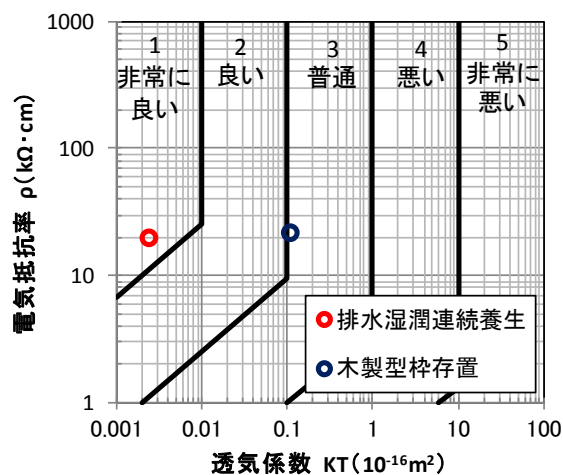


図 5.3.5 表層透気係数の試験結果

表 5.3.4 表層透気係数の試験結果

部材	透気係数 $[10^{-16}m^2]$	電気抵抗率 $[k\Omega \cdot cm]$	含水率[%]
排水湿潤連続養生	0.003	19.3	4.9
木製型枠存置	0.114	21.4	5.3

表面吸水試験の計測結果を図 5.3.6, 表 5.3.5 に示す. 図中には, 注水完了から 600 秒時点での吸水速度 P600 の評価グレード⁵⁾もあわせて記載している.

排水湿潤連続養生における表面吸水速度 P600 は, 木製型枠の存置による養生と比べて, 1/3 となっており, 表面吸水速度の測定結果からもコンクリート表面の品質が向上していることが確認できた.

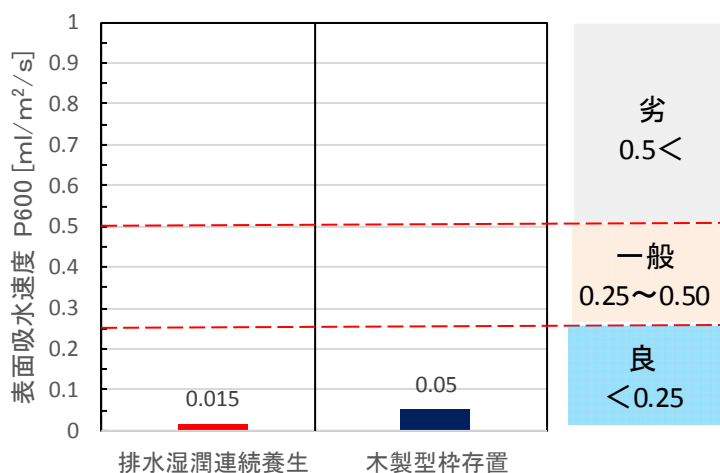


図 5.3.6 表面吸水試験 : SWAT の試験結果

表 5.3.5 表面吸水試験 : SWAT の試験結果

部材	測点	10 分時点での 表面吸水速度 P600 (ml/m ² /s)	P600 平均値 (ml/m ² /s)	累積 吸水量 (ml)	含水率 [%]
排水湿潤 連続養生	1	0.01	0.015	0.07	5.3
	2	0.02		0.07	5.3
木製型枠存置	1	0.04	0.05	0.66	5.1
	2	0.06		0.48	5.3

水銀圧入法によって計測された空隙量の結果を図 5.3.7, 細孔径分布, 累積空隙量を図 5.3.8, 図 5.3.9 に示す.

排水湿潤連続養生の累積空隙率は, 木製型枠存置による養生よりも, 0-30mm まで小さな値を示しており, 養生の効果が現れた. 特に, 型枠面から 0-10mm において効果が顕著であり, 木製型枠よりも 25%以上空隙率が低下していた.

細孔径分布に関しては, コンクリート表層 10mm において排水湿潤連続養生では木製型枠存置による養生と比較して $1\mu\text{m}$ 以下の空隙が大幅に減少し, 緻密な空隙構造が形成されていることがわかる. 型枠面からの深さ 10-20mm, 20-30mm における累積空隙量をみると, 養生方法による差が小さくなっているが $2\mu\text{m}$ 以下の空隙量が少ないことがわかる. この結果から, 排水湿潤連続養生による空隙構造の緻密化が確認できた.

また, 木製型枠存置において, 空隙率は深さ方向で変わらないが, コンクリート表面から 0-10mm の空隙分布は, 10mm 以深の空隙分布と比較すると $1\mu\text{m}$ 付近の空隙が減少し, $0.02\text{-}0.1\mu\text{m}$ の空隙が増加している. これは, 模擬試験体は材齢 7 日で脱型後は, 屋外曝露とし雨が降りがある条件であったことから, コンクリート表層から水分が供給されたため, 水和反応が進行した可能性がある.

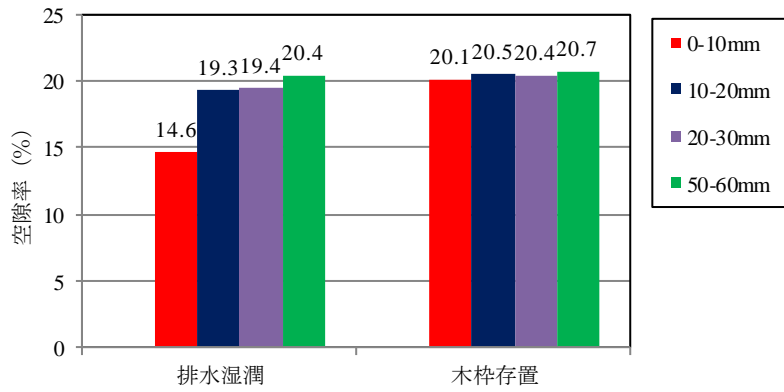
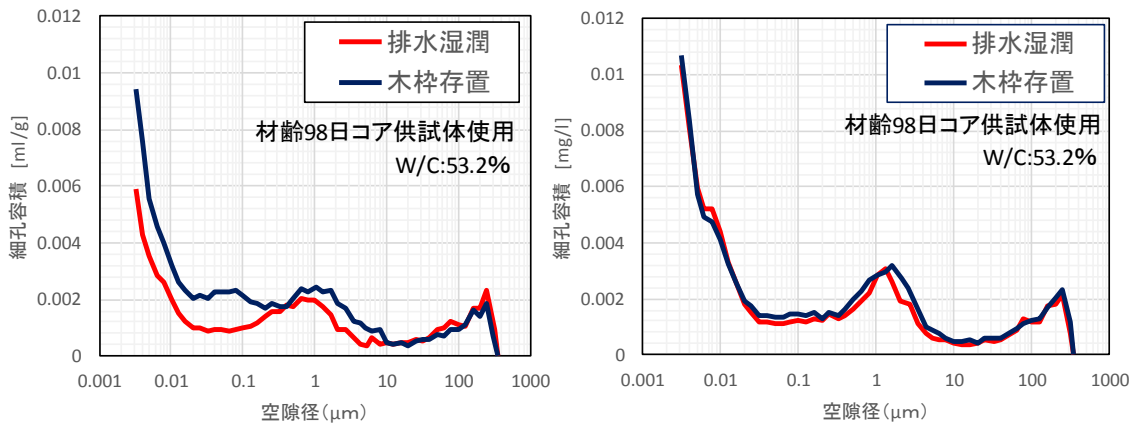
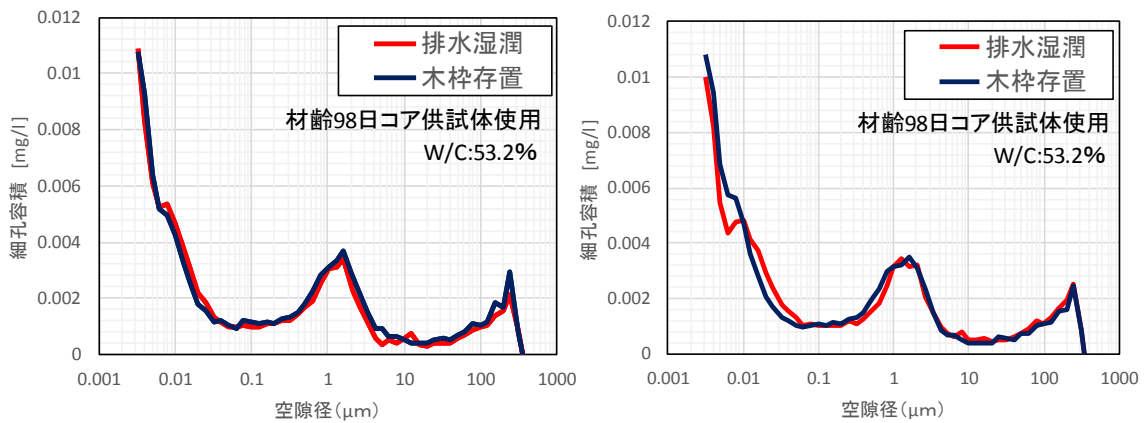


図 5.3.7 空隙率の試験結果



(a) 深さ 0-10mm

(b) 深さ 10-20mm



(c) 深さ 20-30mm

(d) 深さ 50-60mm

図 5.3.8 細孔径分布

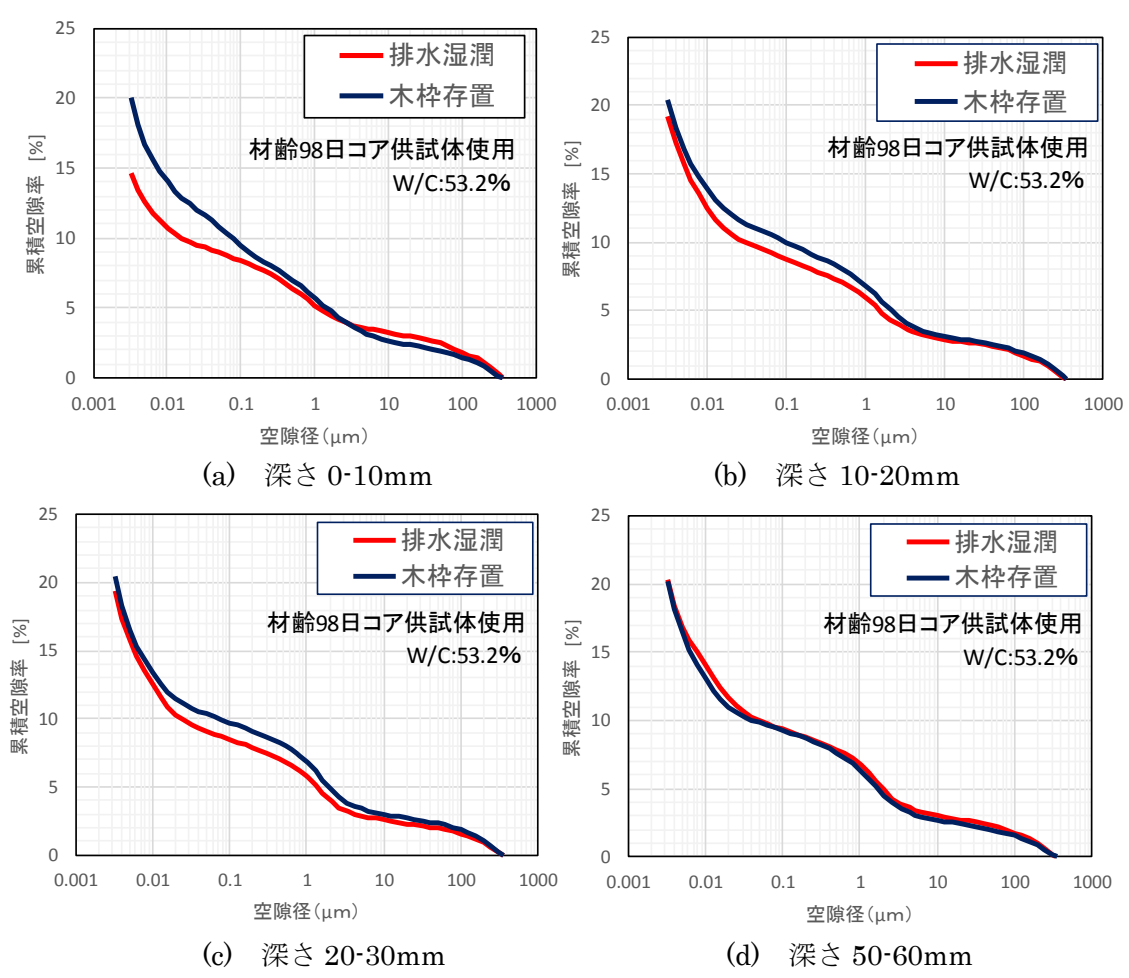


図 5.3.9 累積空隙率

5.3.4 実構造物への適用

坑口から約 32m の SL 下の覆工コンクリートに排水湿潤連続養生を適用した。型枠の設置概要、W キュアリングの型枠構造を図 5.3.10 に示す。図 5.3.10 に示す排水湿潤連続用の型枠をセントル型枠の内側に設置し、コンクリートの打込みを行い、材齢 1 日まで余剰水の排出を行った。余剰水の排出状況を写真 5.3.2 に示す。余剰水の排出量は、 2.59kg/m^2 であり、これまでに排水湿潤連続養生を適用した壁高欄における 1.0kg/m^2 よりも多量の余剰水が排出された。これは、SL までコンクリートの打ち込みが完了した時点では、全排水量の半分程度の排水であったことを確認していたことから天端までのコンクリートの自重が下部のコンクリート作用したためより多くの余剰水が排出されたためであると考えられる。その後、翌日の朝に排水湿潤連続養生用型枠を存置する形で、セントル(鋼製型枠)のみを脱型し、次の施工ブロックに移動した。湿潤養生の実施状況を写真 5.3.3 に示す。残置した排水湿潤連続養生用の型枠の上部に別途設置した水タンクから塩ビ管を通して水を供給することで材齢 7 日まで湿潤養生を行った。SL より上部の面は、保水養生テープ⁶⁾を用いて材齢 28 日まで封かん養生を行った。

覆工コンクリートの外観状況を写真 5.3.4 に示す。二次覆工の SL 下は、曲面となっており勾配がついている。そのため、坑口から 32m より坑内の鋼製型枠部では空気泡が残っているが、排水湿潤連続養生では、余剰水とともに空気も排出されるため、空気泡は非常に少なく良好な仕上がりであることがわかる。

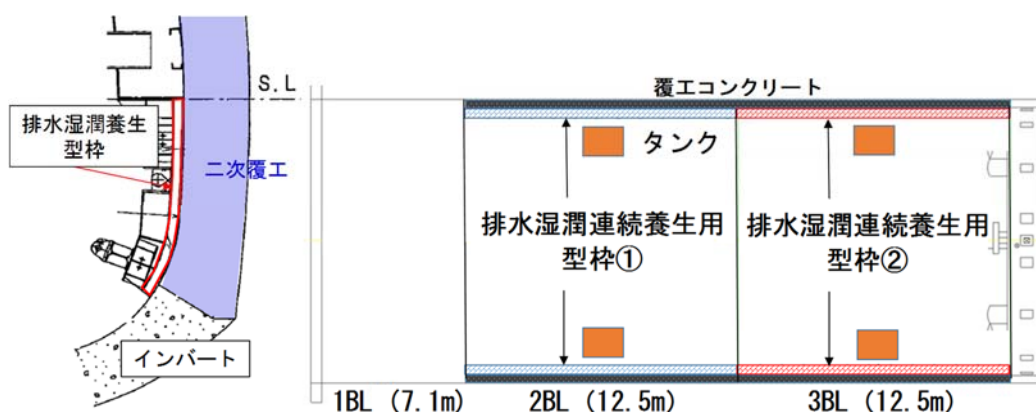


図 5.3.10 型枠の設置概要



写真 5.3.2 余剰水の排出状況 (排水量：2.59kg/m³)



写真 5.3.3 湿潤養生の実施状況



(a) 排水湿潤連続養生



(b) 鋼製型枠部

写真 5.3.4 コンクリートの外観状況

排水湿潤連続養生による品質向上効果を確認するため、養生による品質向上効果を非破壊試験として、材齢 42 日にて反発度、表層透気係数、表面吸水速度の測定を行った(表 5.3.6) 測定は、排水湿潤連続養生部、鋼製型枠部（封かん養生部）とした。測定位置は、ブロック中央、ブロック中央から坑内側 4m、ブロック中央から坑口側 4m の 3 箇所とし、排水湿潤連続養生部は、SL 下 400～750mm、鋼製型枠部は、SL 上 400～750mm の範囲で測定を行った。それぞれの測定位置は、重ならないように留意した。(写真 5.3.5)

表 5.3.6 試験項目

測定項目	測定方法・規格	測定箇所
反発度	JIS A 1155	材齢 42 日で測定
表層透気係数	トレント式表層透気係数試験	1 箇所当たり 3 点の測定 材齢 42 日で測定
表面吸水試験	SWAT	1 箇所当たり 2 点の測定 材齢 42 日で測定

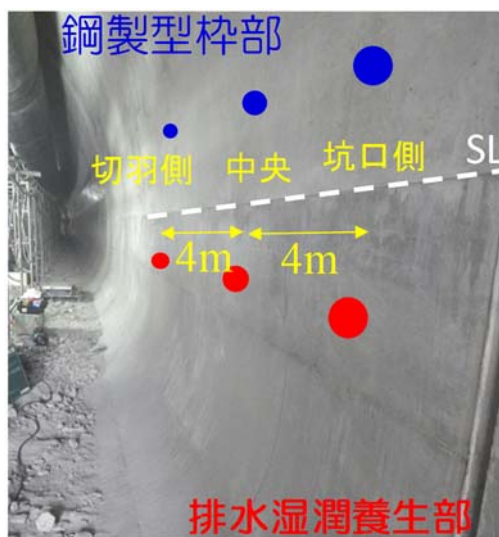


写真 5.3.5 非破壊試験測定位置

リバウンドハンマーの反発度の測定結果を図 5.3.11、表 5.3.7 に示す。排水湿潤連続養生における反発度は、鋼製型枠の箇所よりも、約 1.2~1.3 倍大きな値を示しており、表層部分の硬度(強度)が向上していることが確認できた。

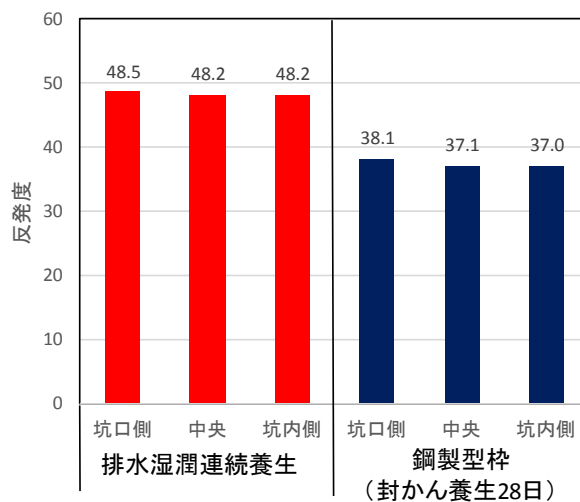


図 5.3.11 反発度の試験結果

表 5.3.7 反発度の試験結果

測定場所	①排水湿潤連続養生	②鋼製型枠	反発度の比①/②
坑口側	48.5	38.1	1.27
BL 中央	48.2	37.1	1.30
坑内側	48.2	37.0	1.30

表層透気係数の計測結果を図 5.3.12、表 5.3.8 に示す。排水湿潤連続養生における表層透気係数は、鋼製型枠の箇所と比べて、1/100 以下となっており、コンクリート表面の品質が大きく向上していることを確認した。

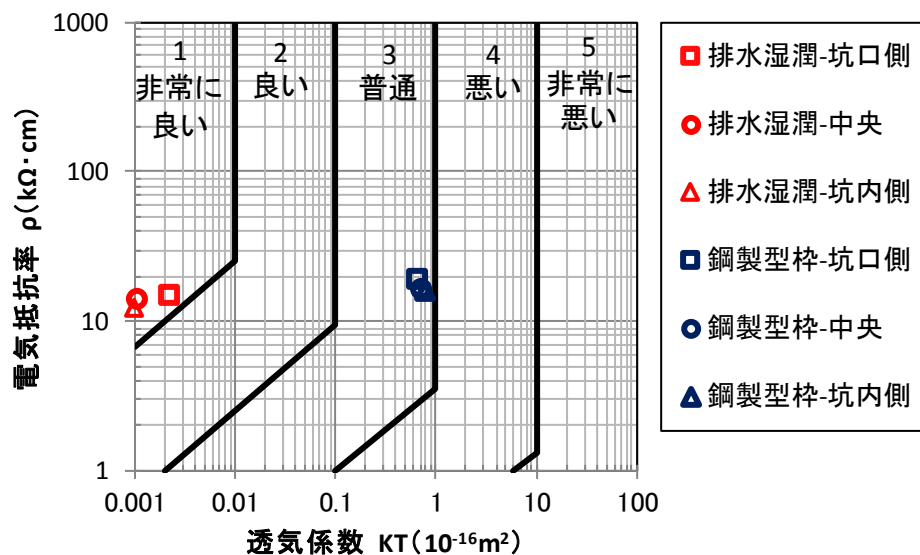


図 5.3.12 表層透気係数の試験結果

表 5.3.8 表層透気係数の試験結果

養生	測定場所	透気係数 $[10^{-16}m^2]$	電気抵抗率 $[k\Omega\cdot cm]$	含水率 $[\%]$
排水湿潤連続養生	坑口側	0.002	14.7	4.4
	BL 中央	0.001	13.5	4.4
	切羽側	0.001 以下	12.3	4.2
鋼製型枠 (封かん 28 日養生)	坑口側	0.69	18.5	5.1
	BL 中央	0.74	16.2	4.7
	切羽側	0.77	15.9	4.7

表面吸水試験の計測結果を図 5.3.13、表 5.3.9 に示す。図中には、注水完了から 600 秒時点での吸水速度 P600 の評価グレード⁵⁾をあわせて記載している。排水湿潤連続養生における表面吸水速度 P600 は、鋼製型枠の箇所と比べて、1/6 以下となっており、コンクリート表面の品質が向上していることが確認できた。

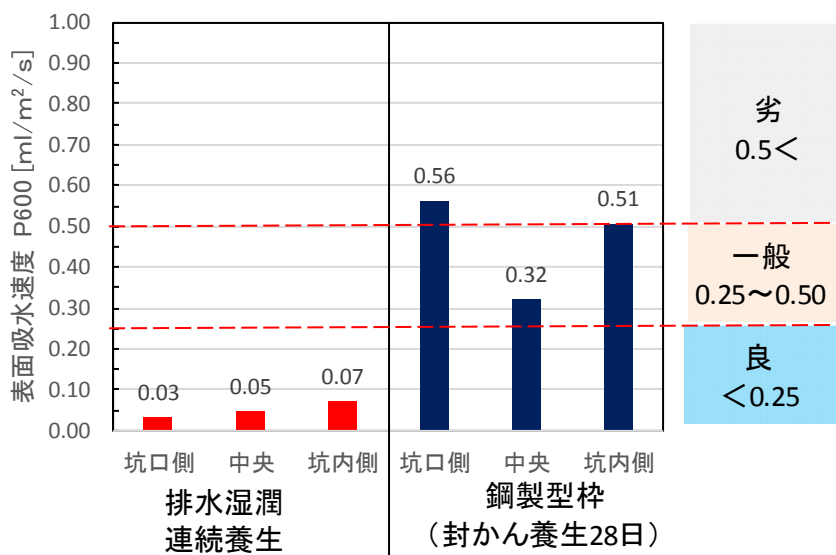


図 5.3.13 表面吸水試験：SWAT の試験結果

表 5.3.9 表面吸水試験：SWAT の試験結果

(a) 排水湿潤連続養生

測定場所	測点	10分時点での 表面吸水速度 P600 (ml/m ² /s)	P600 平均値 (ml/m ² /s)	累積 吸水量 (ml)	含水率 [%]
坑口側	1	0.04	0.03	0.10	4.8
	2	0.02		0.21	4.7
中央	1	0.05	0.05	0.25	4.7
	2	0.04		0.48	4.7
坑内側	1	0.05	0.07	0.12	4.5
	2	0.09		0.43	4.6

(b) 鋼製型枠

測定場所	測点	10分時点での 表面吸水速度 P600 (ml/m ² /s)	P600 平均値 (ml/m ² /s)	累積 吸水量 (ml)	含水率 [%]
坑口側	1	0.58	0.56	2.49	5.3
	2	0.54		2.46	5.0
中央	1	0.34	0.32	1.77	5.1
	2	0.3		1.75	5.3
坑内側	1	0.42	0.51	2.46	5.1
	2	0.59		2.19	5.1

以上に示すように模擬部材，実構造物ともに反発度，表層透気係数，表面吸水試験の試験結果から排水湿潤連続養生の適用効果により鋼製型枠の箇所や木製型枠存置もコンクリートの表層品質が大きく向上していることが確認できた．加えて，実構造物ではコンクリートの自重の作用が大きくなることで余剰水の排出量が多くなるため，室内試験よりも大きな品質向上効果が期待できる．

6. 結論

6.1 本研究の成果とまとめ

本研究では、打込み直後のコンクリートから生じるブリーディング水などの余剰水や気泡を排出する作用と凝結後の速やかな給水による湿潤養生を脱型せずに連続で行うことができる養生技術「排水湿潤連続養生 (W キュアリング)」を開発し、養生効果、コンクリートの適用範囲の検証、実構造物への適用へ適用することを主眼に各種検討を行った。

本章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文の結論とする。

第 1 章では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べた。これまでのコンクリートの養生は、透水性型枠等を使用し、打込み直後の余剰水や気泡の排出、脱型後のコンクリート表面に給水し湿潤状態を保つ湿潤養生が行われていた。しかし、単なる乾燥防止を上回る効果を狙った積極的な養生技術、養生方法を採用する場合でも、硬化前の余剰水の排水または硬化後の給水のどちらか一方を行う場合がほとんどであった。コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比を低減させた上で、コンクリート強度が脱型可能な強度に達していなくても、セメントの水和反応が活発な凝結終了後から速やかに湿潤養生を開始させることが実施できる養生方法があれば、コンクリート表層の空隙構造を著しく緻密化させて、耐久性を含むコンクリート表層品質の飛躍的な向上効果が期待できると考え、本研究では、打込み直後のコンクリートから生じるブリーディング水などの余剰水や気泡を排出する作用と凝結後の速やかな給水による湿潤養生を脱型せずに連続で行うことができる養生技術「排水湿潤連続養生 (W キュアリング)」の開発を行うこととした。

第 2 章では、初期の排水および給水・保水養生に関する既往の知見を整理した。まず、コンクリート標準示方書における養生の変遷の中で、養生に求められる機能、基準となる養生期間について整理した。現行のコンクリート標準示方書では、養生には、コンクリートが所要の性能を確保するため十分な水和反応が進行するように、①湿潤状態に保つこと②適切な温度制御、③有害な作用からの保護が求められている。この中で、湿潤状態に保つことについては、昭和 15 年制定の示方書から記載されている。昭和 61 年の示方書までは、養生は強度増進のためと記載されており、ここまではコンクリートの品質＝強度と考えられていたが、平成 3 年の示方書からは、強度に加えて、耐久性、水密性、収縮低減とコンクリートの品質を確保に向けた記載と変更となった。さらに、平成 3 年の示方書における特殊型わくおよび特殊支保工でにおいてコンクリートの表層の水セメント比の低減や気泡やあばたを減少させる技術として透水性型枠に関する記載が追加された。2002 年の改定以降は、工期短縮に伴う型枠の転用に伴う早期脱型する場合や、コンクリートの耐久性、水密性の観点から、型枠面についても脱型後において養生が必要であると考えられ始め、近年では、様々な養生工法が研究開発され、技術対案への適用等の実績を積んでいる状況

である。

次に、湿潤養生技術に関して近年開発されている脱型後に型枠面に実施する給水養生、保水養生技術、その品質向上効果についてまとめた。最後に、初期の排水に関する技術について整理した。初期の排水に関する技術では、コンクリートの脱水（排水）のメカニズムについて概説し、コンクリートの排水（脱水）方法、その品質向上効果に関するこれまでの研究成果についてまとめた。

第 3 章では、排水湿潤連続養生の型枠材料の選定、施工方法の確立、耐久性を主とした養生効果に関する検証、実構造物として壁高欄の一部への試験適用の検討を行った。まず、型枠材として内部に水を供給することができる中空構造をもつポリプロピレン製の透水板をせき板として使用することとした。この型枠材の表面に市販の透水性シートを設置する型枠構造を用いることで、初期の余剰水の排出と湿潤養生の連続養生が可能となる施工方法を構築した。次に、排水と湿潤を連続で行うことに相乗効果の検証として、排水と湿潤の個々の養生がコンクリートの表層に与える影響について、供試体を製作し、各種試験を実施した。その結果、初期の余剰水の排出のみを行った場合は、コンクリート表層から 10mm 程度まで緻密化するが、排水湿潤連続養生では 10-20mm においても緻密な空隙構造を形成しており、連続で行うことによる相乗効果があることを確認した。また、排水湿潤連続養生では、排水後の湿潤養生期間を 5 日間から 3 日間へ 2 日間短縮しても、コンクリートの表層品質の差はほとんどなく、一般的な湿潤養生 5 日間よりも大きな品質向上効果が得られることを確認した。そして、排水後の湿潤養生の開始材齢について検討した。給水の開始は、凝結始発に開始することが最適であり、最も品質向上効果が大きい結果であった。材齢 24 時間の給水開始でも、十分な品質向上効果を確認できたが、凝結始発よりも若材齢では、凝結始発、材齢 24 時間の給水開始よりも品質が低下しており、施工時には、凝結始発から材齢 24 時間までに湿潤養生を開始する必要があることを確認した。その後、現場施工において標準的な施工方法を構築するために、壁高欄を想定した実大規模の部材を製作し、各種の耐久性試験を実施した。壁高欄模擬部材の耐久性試験から排水湿潤連続養生の効果により、通常の木製型枠の存置による養生と比較して、透気係数の減少、空隙構造の緻密化、中性化の抑制、塩化物イオンの浸透抑制などの優れた効果が実証された。以上の検討を踏まえ、実構造物として壁高欄の一部への試験適用を行い、排水湿潤連続養生システムの施工性、および実構造物においても室内試験と同様の表層品質の向上効果があることを確認した。

第 4 章では、前章の結果を踏まえて、耐久性以外の品質向上効果とコンクリートの適用範囲について検証した。まず、コンクリートの水セメント比の適用範囲について把握することを目的に W/C40%、W/C30%のコンクリート供試体を製作し、各種試験を行った。その結果、排水湿潤連続養生により W/C40%におけるコンクリートでは、表層から 30mm 程

度までコンクリートの空隙構造が緻密化することができ、前章の W/C : 51.8%の壁高欄模擬部材と同等の品質向上効果が得られたが、W/C30%では、コンクリートの表層から 10mm 程度までしかコンクリートの空隙構造が緻密化しない。そのため、W/C40%以上のコンクリートを用いた場合と異なり、養生による品質向上効果が相対的に小さくなることが明らかになった。排水湿潤連続養生は、W/C40%以上のコンクリートに対して特に有効であることが示された。次に、自己収縮・乾燥収縮の低減効果、実構造物における乾燥収縮ひび割れの低減のメカニズムについて検証した。その結果、排水湿潤連続養生のコンクリート表層の緻密化により W/C40%までは自己収縮と乾燥収縮を含めたコンクリートの収縮ひずみが減少し、W/C30%では、排水湿潤連続養生を行わなくても、十分にコンクリートは緻密なため、排水湿潤連続養生の適用による収縮ひずみの低減効果は小さいことが明らかになった。また、実規模構造物では、コンクリート表層部の水分逸散抑制による乾燥収縮ひずみが低減、コンクリートの内部の水分の移動が抑制されることによって乾燥収縮が緩やかに進行すること、コンクリート表層からの吸水が少なく、乾湿繰り返しによる影響を受けにくいことといった 3 つの総合的な効果により乾燥収縮ひび割れを著しく抑制できることを示した。最後に、長期養生を行うほど塩分浸透抑制等の耐久性に効果的であるフライアッシュコンクリートへの適用効果について検討した。検討した結果、材齢 91 日までの長期の封かん養生よりも材齢 7 日までの排水湿潤連続養生のほうが内部まで空隙構造が緻密化しており、短い養生期間でも品質向上効果が高いことがわかった。

第 5 章では、各種構造物への適用に向けた改良として頂版を同時施工する際の給水方法、トンネルの覆工コンクリートの SL 下部への適用について検討した結果を示した。側壁、頂版を同時にコンクリートの打込みを行う施工条件では、透水型枠を分割し、最上部に 4 面シールした小型の透水型枠を設置する改良を行った。排水後に透水型枠内部をホース等で注水し型枠内部を満水にすることで、透水シートを通じてコンクリート上部から下部まで均一な湿潤養生とすることが可能となった。また、覆工コンクリートの SL 下への適用では、SL 下のセントルを内空間側にセットバックし、セットバックした空間に透水板、透水性シート等が一体となったユニットを設置する改良を行った。この改良によりセントルが移動後も透水板、透水性シートを残置することができるため、脱型をせずに湿潤養生ができ、トンネルの施工サイクルを保つことができることを確認した。

第 6 章は、本章であり、結論としてこれまでの章を総括し、得られた成果について述べた。

6.2 今後の展望

本研究で開発した排水湿潤連続養生は、コンクリート打込み直後の余剰水の「排水」とコンクリートが硬化してからの「給水」による湿潤養生を型枠を取り外すことなく連続して実施できる初めての養生技術である。木製型枠を使用するコンクリート構造物全般に適用可能であることから多種多様なコンクリート構造物への展開が可能な技術である。現在、市販の透水性シートを使用しているが、排水湿潤連続養生の更なる普及のために転用性等を改善した排水湿潤連続用の透水性シートの開発に取り組んでいるところである。また、排水湿潤連続による耐久性向上効果や収縮ひずみの低減効果についてより適切に評価するためには、数値シミュレーションが必要であると考えられる。

本開発技術は、少子高齢化、技能職人不足、ライフサイクルコスト視点の重要性、社会施設のさらなる安全性向上等が求められる世の中を迎え、養生技術により、コンクリート構造物の安全性や耐久性が大幅に向上できることから、これからの普及活動と更なる改良を継続することによって利用が広がることを切望する。

謝辞

本論文は、平成 20 年度から平成 29 年度にかけて大成建設技術センターにおいて行った研究成果をとりまとめたものです。

本研究の遂行および本論文を取りまとめるにあたり主査を引き受けて頂いた東京大学生産技術研究所 岸利治教授には、ご厚意のある詳細な御指導御鞭撻を賜りました。本技術の基本構想は先生から頂いたものであり、研究の方向性や実験の遂行、研究論文の作成に至るまでご教授頂きました。また、先生の「常識となった仮定を超える」といった柔軟な発想や実験結果に対する多角的な視点からの考察についてはいつも感銘を受けました。心より深く感謝を申し上げます。

東京大学石田哲也教授、北垣亮馬講師、高橋佑弥講師、酒井雄也講師には、ご多忙中にも関わらず副査を引き受けてくださり、論文審査では多くの貴重な御助言・御示唆を頂きました。心より感謝の意を申し上げます。

大成建設技術センター社会基盤技術研究部 丸屋剛部長には、本技術の開発、工事適用、論文とりまとめに際しまして、多大なる御理解と御配慮を頂きました。社会基盤技術研究部材工研究室 坂本淳室長、宮原茂禎課長には、共に研究開発を進める上で、貴重な御意見ならびにご指導を頂きました。また、本技術の構造物への適用にあたり、尽力して頂いた土木本部プロジェクト室の方々、本養生技術を苦勞して適用して下さった各支店の作業所の当社員の皆様からも様々な御助言・御意見を頂き現場適用に向けた改良を実施することができました。ここに記して、深甚の謝意を表します。

最後に、本論文をとりまとめ中には、私のことを暖かく見守り支え、応援してくれた両親、家内に感謝致します。

本論文は、社内・社外の多くの方々のご支援の結果、作成することができました。改めて心からの御礼の意を表し、謝辞と致します。

平成 30 年 7 月

臼井 達哉

[付録] 排水湿潤連続養生の適用による表層部の水セメント比の低減効果

A.1 概要

排水湿潤連続養生は、コンクリート打込み直後の余剰水の排出によりコンクリート表層部の水セメント比が低減した上に、脱型作業を経ずに硬化直後から速やかに湿潤養生を開始することによりコンクリート表層に緻密な空隙構造を形成し、品質が向上する養生技術である。ここでは、排水湿潤連続養生の適用による品質向上効果について、水セメント比ほどの程度の低減効果があるのかを定量的に評価すること検討した。

A.2 乾燥収縮測定における質量減少率をもとにした表層部の水セメント比の評価

乾燥によるコンクリートの質量減少は、主としてコンクリートの自由水の水分逸散であることから水セメント比が高いコンクリートほど空隙構造が粗となるため質量が減少しやすく、水セメント比が小さいほど空隙構造が緻密なため質量が減少しにくい¹⁾。そのため、単位水量がほぼ同じコンクリートでは、水分逸散量と水セメント比(セメント水比)との間には相関関係があると考えられる。本研究で実施した乾燥収縮試験に用いたコンクリートの配合、使用材料を表 A.1, 表 4.2 に示す。単位水量の差は 4kg/m^3 であり、その差はそれほど大きくないことから、本試験結果をもとに質量減少率(水分逸散量)と水セメント比(セメント水比)と相関関係について検討した。本研究で実施した乾燥収縮試験は、排水湿潤連続養生、木製型枠存置、水中養生の 3 つの異なる養生条件で行っている。初期のコンクリートの給水の有無によって、その後の水分逸散量(質量減少率)は大きく異なることから、初期にコンクリートの給水を行っている排水湿潤連続養生と水中養生の質量減少率と水セメント比の関係について検討した。

表 A.1 乾燥収縮試験に用いたコンクリートの配合

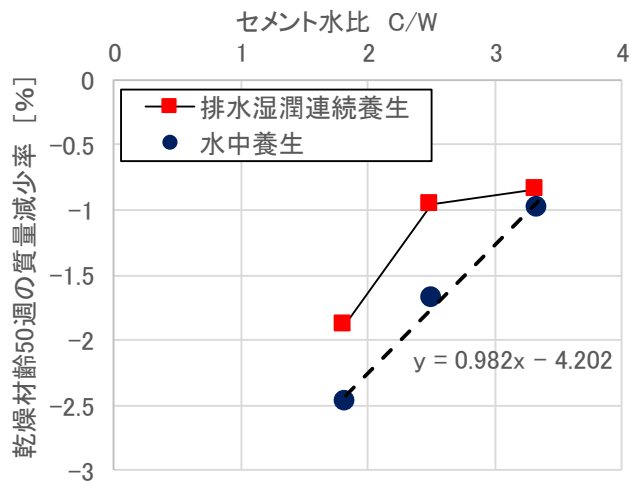
配合名	SL or SF (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					AE or SP C × %
					W	C	S	G		
								G1	G2	
N55	SL:15	4.5	55	47.7	166	302	870	385	578	AE:1.0%
N40	SL:18	4.5	40	44.7	170	435	759	382	573	AE:1.5%
N30	SF:60	4.5	30	45.5	170	567	719	350	526	SP:1.05%

表 A.2 使用材料

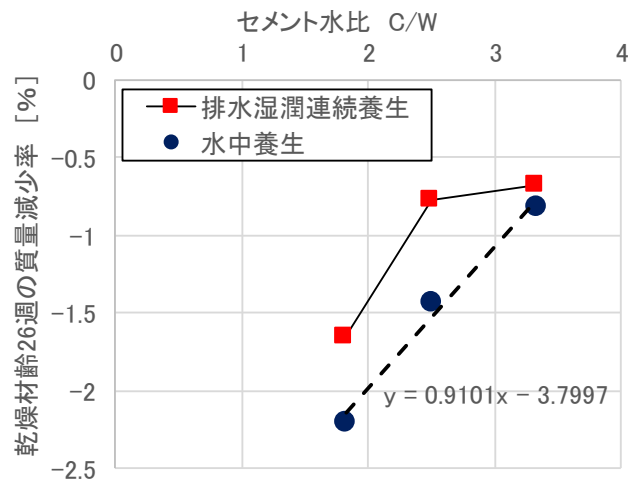
記号	材料名	メーカーまたは産地	品質
C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
S	細骨材	千葉県君津産	表乾密度 2.61g/cm ³
G1	粗骨材	東京都青梅産	砕石 5号 表乾密度 2.66g/cm ³
G2	粗骨材	東京都青梅産	砕石 6号 表乾密度 2.65g/cm ³
AE	AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターポゾリス No.70
SP	高性能 AE 減水剤(標準型)	BASF ジャパン	マスターグレンウム 8SV

乾燥材齢 13 週, 26 週, 50 週におけるセメント水比と質量減少率の関係を図 A.1 に示す.

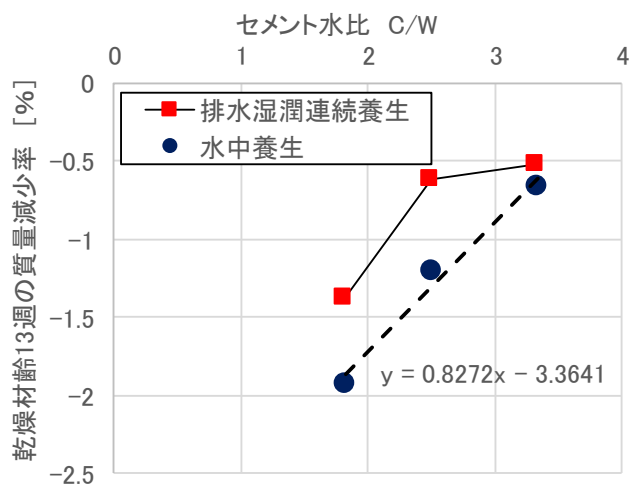
水中養生では, 乾燥材齢に関わらずセメント水比を質量減少率に高い線形関係が確認された. この関係式を用いて排水湿潤連続養生における質量減少率から, 水中養生における水セメント比を推定した結果を表 A.3 に示す. この結果から, W/C55%のコンクリートでは, 排水湿潤連続養生を適用することによって, 表層部の水セメント比が 42%程度と同等になり, 12-13%程度の水セメント比の低減効果があること, W/C40%のコンクリートでは, 表層部の水セメント比が 30%程度と同等になり, 10%程度の水セメント比の低減効果があることが明らかになった. 一方, W/C30%のコンクリートでは表層部の水セメント比が 29%程度と排水湿潤連続養生を適用してもほとんど変わらない結果となっており, 4.2 水セメント比の適用範囲における試験結果と同様の傾向を示すことを確認した. なお, 本研究における乾燥収縮試験は, □100×100×400mm を使用し, 側面 2 面を養生面, 乾燥面としている. そのため, 本試験結果から推定する水セメント比は表層から 50mm における平均水セメント比を示している.



(a) 乾燥材齢 50 週



(b) 乾燥材齢 26 週



(c) 乾燥材齢 13 週

図 A.1 質量減少率とセメント水比の関係

表 A.3 排水湿潤連続養生の適用による表層部の水セメント比の低減効果

(a) 乾燥材齢 50 週

水セメント比	排水湿潤連続養生後の 推定水セメント比	低減された 水セメント比
55%	42.2%	12.8%
40%	30.3%	9.7%
30%	29.2%	0.8%

(b) 乾燥材齢 26 週

水セメント比	排水湿潤連続養生後の 推定水セメント比	低減された 水セメント比
55%	42.5%	12.5%
40%	30.1%	9.9%
30%	29.1%	0.9%

(c) 乾燥材齢 13 週

水セメント比	排水湿潤連続養生後の 推定水セメント比	低減された 水セメント比
55%	41.7%	13.3%
40%	30.1%	9.9%
30%	29.1%	0.9%

A.4 表層部の水セメント比の低減が見掛けの塩化物イオンの拡散係数に与える影響

排水湿潤連続養生による表層部の水セメント比の低減効果が、見掛けの塩化物イオンの拡散係数に与える影響について検討した。見掛けの拡散係数の算出には、コンクリート標準示方書[設計編]²⁾に記載されている普通ポルトランドセメントを使用する場合の水セメント比と見掛けの拡散係数の関係式を用い、A.2で推定した水セメント比における見掛けの拡散係数を算出した。見掛けの拡散係数の算出結果を表A.4に示す。水セメント比40%以上では、1/2.0~1/2.4程度となっており、見掛けの拡散係数も大きく低減することがわかる。しかし、実際の塩分浸漬試験結果から算出した見掛けの拡散係数は、W/C:51.8%の条件で1/3程度(p78, 表3.5.7参照), W/C:40%の条件で1/5程度(p99, 表4.2.7参照)となっており、A.2で推定した水セメント比から算出した見掛けの拡散係数よりも低減効果が大きい結果である。これは、推定した水セメント比は乾燥収縮試験結果をもとにしているため実験条件から表層-50mmにおける平均の水セメント比であるのに対して、実際のコンクリートでは表層に近いほどコンクリートほど空隙構造が緻密化している。そのため、表層の0-10mmの遮塩効果が大きいことから、実際の塩分浸漬試験結果から算出した見掛けの拡散係数の方が小さな値となっていると考えられる。しかし、安全側の評価でありことから、養生効果として表層部の水セメント比の低減効果を考慮することで構造物の設計に反映することが可能であると評価できる。

表A.4 表層部の水セメント比の低減が見掛けの塩化物イオンの拡散係数に与える影響

水セメント比	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)		②/①
	①一般的な養生	②排水湿潤連続養生の適用による推定水セメント比	
55%	0.71	0.29	0.41 (1/2.4)
40%	0.25	0.13	0.51 (1/2.0)
30%	0.13	0.12	0.95 (1/1.1)

水セメント比55%は、排水湿潤連続養生の適用により、42.2%に水セメント比が低減したとして算出

水セメント比40%は、排水湿潤連続養生の適用により、30.3%に水セメント比が低減したとして算出

水セメント比30%は、排水湿潤連続養生の適用により、29.2%に水セメント比が低減したとして算出

付録の参考文献

- 1) 郭度連, 國府勝郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比および養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.1, pp743-748, 2003
- 2) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.3