

7. 養生期間が構造体コンクリートの耐久性に及ぼす影響に関する実験

Experimental Study on the Effect of Concrete Curing on the Durability of Structural Concrete.

荒木 朗*¹

加藤 猛*²

要 旨

構造体コンクリート打込み後の初期養生（湿潤養生）は、表層コンクリートの品質および耐久性に大きく影響を与えるため優先して確保されるべきであるが、実施工において様々な制約から養生期間の確保が十分であるとはいえない。そこで実験室内でコンクリートの模擬壁試験体を作製し、日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS 5 に定められている養生期間よりも短い期間で湿潤養生を打ち切った場合の影響を確かめるための実験を行った。

今回の実験では、表層コンクリートの耐久性への影響を確認するため、打込み時期・せき板の存置期間・散水養生の有無をパラメータとして調査した。

その結果、規定よりも短い期間でせき板を取り外した場合は、圧縮強度への影響は小さいものの、表層部付近の十分な水和反応が阻害されることが想定されるため、中性化など外部からの劣化因子の侵入に対する抵抗性が低下する懸念があることが確認された。

キーワード：湿潤養生期間、圧縮強度、散水養生、表層コンクリート、中性化、細孔径分布、透気試験

1. はじめに

建設業は「スクラップ&ビルド」から「ストック&リフォーム」の時代へとと言われて久しい。コンクリート構造物は、圧縮強度を確保できていれば良い時代から、耐久性を担保すべき時代に変化している。

また、構造体コンクリートの一般的な劣化作用に対する抵抗性は、「コンクリートの水セメント比に支配されているところが多い。」¹⁾とされており、一般的に強度が高くなるほど耐久性は向上する。一方で、コンクリートの耐久性に関わる品質は材料、調合、施工、養生など様々な要因から大きな影響を受ける。

本研究では、主にコンクリートの表層部分の耐久性に関わる品質を大きく左右する初期養生について、打込み時期・せき板の存置期間・散水養生の有無をパラメータとした実験を、技術研究所内の実験室で行った。

2. 実験の概要

2.1 模擬壁の概要

(1) 模擬壁試験体

実験に用いた模擬壁は、寸法が 1,800×900×200mm の型枠を 4 組作製した。型枠にはパネコート処理のコン

パネを使用し、フィルムや透水型枠は用いていない。

コンクリート打込みに先立ち、フレッシュコンクリートの試験を行い、φ100×200mm の供試体（以下、円筒供試体と称す）および□-100×100×400mm の供試体（以下、角柱供試体と称す）を作製した。

打込み時は、天端を金ゴテ仕上げした後フィルムを張り水分の逸散を防止した。せき板取外し後は、側面および天端面にアルミテープを張付け、封かん処理を行った。

なお、実験室には換気扇を除く空調設備はないため、室温は外気温と同等であり、実験期間を通して雨がかりのない屋内に静置した。

(2) コンクリートの調合

実験に用いたコンクリートの調合は、水セメント比を 50%と 54%の 2 種類（呼び強度の強度値が 30 および 27 相当）とし、打込み時期に関わらず大阪府高槻市の一工場で製造した。どちらも JIS に標準化された配合である。

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント(C)、粗骨材は砕石(G1)（大阪府茨木産）、細骨材は砕砂（大阪府高槻産(S1)と大分県津久見産(S2)の容積比 60:40 混合）、混和剤は高性能 AE 減水剤(SP)である。使用したコンクリートの調合の詳細を表—1 に示す。

表—1 使用したコンクリートの調合の詳細

呼び強度	スラブ (cm)	細骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%) W/C	細骨材率 (%) S/A	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G1	混和剤 SP
							S1	S2		
24	18	20	57	51.6	180	316	556	370	880	5.88
30	21	20	50	52.5	185	370	548	364	834	6.74

*¹技術研究所 建築材料研究グループ

(3) コンクリートの打込み

コンクリートの打込みは、暑中期・標準期・寒中期それぞれで行った。打込み作業は、実験室内にアジテータ車を乗り入れ、シュートから直接型枠内に流し込んで打ち込むようにした。締固めは棒状バイブレーター（φ40mm）1本を使用し、全ての打込み日で同一人物が作業することで、施工によるばらつきを抑えた。

(4) コンクリートの養生期間および養生方法

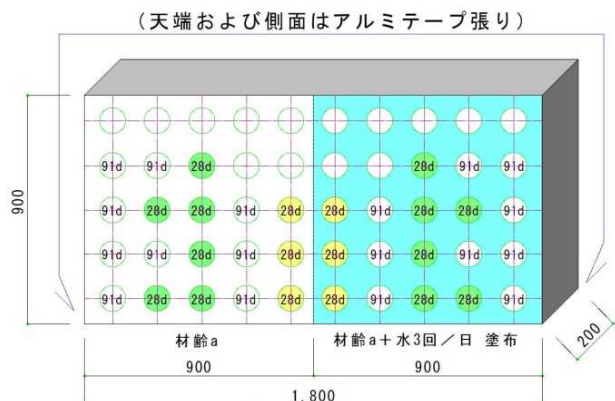
打込み後のせき板の存置期間（湿潤養生期間）は、打込み時期および圧縮強度に関わらず打込みの翌日（24時間経過後）以降材齢2日・3日・5日・7日とし、4週間（材齢28日）存置のものと比較できるように計画した。せき板を取外した直後、天端面および巾200mmの側面にアルミテープを張り、封かん状態とした。

また、同じ養生期間の模擬壁試験体の中で、散水養生の効果を確認するため、左右半分の片側のみ散水養生を実施した。散水は、せき板を取外した幅900×高900mmの表裏両面に、刷毛を用いて全面が塗れ色になるまで塗布した。実施回数は2～3時間の間隔を空けて3回/日とし、実施期間は、JASS 5に規定されている湿潤養生期間が確保されるまでの日数（5日間）とした。

模擬壁の寸法および測定位置と養生の範囲を図-1に、養生期間および方法を表-2に示す。コンクリート打込み後の状況を写真-1に、養生状況を写真-2に示す。

2.2 試験の概要

養生期間や養生方法の違いによる表層コンクリートの品質の差異を確認することを目的として、以下の試験を行った。



各試験体イメージ図
図-1 模擬壁の養生および試験位置

表-2 養生期間および方法の種別

養生条件	養生(せき板存置)日数	方法	表記例
放置	1日(24h経過)以降、2日(2d)、3日(3d)、5日(5d)、7日(7d)、28日(28d)	せき板取り外し後、真空中に静置	1d放置、2d放置など
	1日(24h経過)(1d)以降、2日(2d)、3日(3d)、5日(5d)、7日(7d)、28日(28d)	せき板取り外し後、3回(10時、13時、16時)/日の水塗布	1d散水、2d散水など

(1) フレッシュコンクリートの試験

実験室内でのコンクリート打込みに先立ち、受入れ時にフレッシュコンクリートの試験を行った。測定項目は、スランプおよびスランプフロー・空気量・コンクリート温度・外気温とし、同時に圧縮強度の確認を行うための円柱供試体作製と促進中性化試験に用いる角柱供試体の作製を行った。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

せき板の取外し（養生期間打ち切り）時の目安となる圧縮強度の推定のため表-2に示す材齢で円柱供試体により圧縮強度の試験を行った。また、材齢28日および91日の時点で、模擬壁よりφ110×200mm（実径103mm程度）の供試体（以下、コア供試体と称す）を養生条件ごとにそれぞれ3本採取し、構造体コンクリートの圧縮強度および静弾性係数の試験を実施した。

(3) コンクリート中の含水率測定

コンクリートの透気性の大小は、含水率に左右されることから、材齢28日および91日のコア供試体採取および各種試験実施に先立ち、コンクリート表層付近の含水



写真-1 模擬壁打込み完了状況



写真-2 模擬壁の養生状況（右半分散水実施）

率を実施した。測定には KETT 社の押し当て式のコンクリート・モルタル水分計 (HI-520) を用いた。測定モードはコンクリートモードの $t=40\text{mm}$ とした。

(4) ダブルチャンバー法透気試験

コンクリートの表層品質の評価として物質移動抵抗性を確認するため、NDIS3436-2 に準じ、トレント法によるダブルチャンバー方式の表面透気試験機を用いて透気係数を測定した。試験を行ったコンクリートの材齢は、28 日および 91 日とした。

測定は、コア採取に先立ち、コア供試体を採取する位置から養生区分ごとに 5 箇所とし、全ての試験体で図-1 に示す配置で測定した。

また、透気係数は 5 箇所の計測結果の平均値を採用した。

(5) 促進中性化試験

フレッシュコンクリートの試験と同時に採取した $\square 100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いて、促進中性化試験を行った。促進中性化条件は、JIS A 1153 に準拠し、温度 20°C 、相対湿度 60% R. H.、炭酸ガス濃度 5% とし、促進期間は 26 週とした。促進期間終了後に、試験体を割裂した断面にフェノールフタレイン 1% エタノール溶液を噴霧して、中性化深さを測定した。

(6) 表層コンクリートの細孔径分布

模擬壁から採取したコア供試体を表層部 (壁表面から 0 ~ 7mm)、深さ 10mm (壁表面から 8 ~ 15mm)、30mm (壁表面から 28 ~ 35mm) の位置でカットし、モルタル部分を 5mm 角立方体に成形し、深さごとの細孔径分布を確認した。

3. 各種試験結果

各種試験は現時点で継続中であるため、本報では、最も重要であると考えられる表-3 の①、②に示す暑中期の模擬壁試験体における各種の試験結果を中心に述べる。

(1) フレッシュコンクリートの試験

表-3 に各打込み日のフレッシュコンクリートの試験結果を示す。生コン工場から実験室までの運搬時間は、各打込み日とも 20 分程度であった。

全ての打込み日で、分離など打込みや強度発現に支障が出るような不具合はなかった。また、打込み時や打込み完了後に過剰なブリーディングは見られなかった。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

表-4 ~ 表-7 に表-3 の①~④の各打込み日に採取した円柱供試体による圧縮強度試験の結果を示す。これ

らの結果は、フレッシュコンクリートの試験時に採取した供試体によるもので、せき板を取り外す際の目安としての圧縮強度の確認である。

暑中期の円柱供試体による圧縮強度は、材齢 1 日 (現場封かん養生: 1d) で 10N/mm^2 を超えていたが、標準期 (寒中期直前) および寒中期での円柱供試体による圧縮強度は、材齢 1 日 (1d) で 5N/mm^2 未満であった。

また、いずれの打込み時期においても材齢 7 日 (標準養生) で呼び強度程度、また材齢 28 日 (標準養生) では呼び強度の 1.5 倍程度の強度発現が確認できた。各模擬壁に打ち込んだ使用するコンクリートのポテンシャルは正常であったことが確認できた。

図-2 ~ 図-5 に、各模擬壁から採取した材齢 28 日・91 日のコア供試体による圧縮強度試験結果およびそれぞれのせき板の取外し材齢における JASS 5T-603 による円柱供試体の圧縮強度試験結果を示す。

図において、青はせき板の取外し時材齢における現場封かん養生円柱供試体で確認された圧縮強度である。赤はそれぞれの養生期間および方法の模擬壁から材齢 28 日で採取したコア供試体、緑は材齢 91 日で採取したコア供試体により確認された圧縮強度である。

JASS 5 に「普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの湿潤養生期間は 5 日間以上とする。」²⁾と規定されており、暑中期には別の養生方法を採用しない場合圧縮強度の確認によってせき板を取外すことが出来ない。

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

番号	打込み日	調査名	スラブ	スラブフロー	空気量	コンクリート温度	外気温	備考
①	8月3日	30-21-20N	20.5	35.0 × 34.5	5.9	34	32	暑中期
②	9月7日	24-18-20N	20.0	34.0 × 32.0	3.9	32	31	暑中期
③	11月25日	24-18-20N	19.0	31.0 × 30.0	2.5	15	13	標準期
④	12月22日	24-18-20N	19.5	34.0 × 33.0	5.4	10	5	寒中期

表-4 供試体の圧縮強度試験結果 (①暑中期 30N/mm²)

2020/8/3	30-21-20N	1d	2d	3d	5d	7d	28d	56d	91d
標準水中		10.3		26.7	34.5	37.7	46.7		52.4
現場水中				29.4	34.6	36.0	44.7		
現場封かん		19.4	24.9	27.2	32.2	34.3			46.8

表-5 供試体の圧縮強度試験結果 (②暑中期 24N/mm²)

2020/9/7	24-18-20N	1d	2d	3d	5d	7d	28d	56d	91d
標準水中a		5.9		18.4	22.9	25.8	34.3		40.7
現場水中d				19.2	23.7	27.6	33.0		
現場封かんf		10.8	16.3	19.2	23.5	25.6			40.6

表-6 供試体の圧縮強度試験結果 (③標準期 24N/mm²)

2020/11/25	24-18-20N	1d	2d	3d	5d	7d	28d	56d	91d
標準水中a		5.7		18.6	27.0	33.5	45.0		1
現場水中d				14.2	24.3	28.3	40.4		
現場封かんf		3.3	8.7	15.8	24.9	28.1			1

表-7 供試体の圧縮強度試験結果 (④寒中期 24N/mm²)

2020/12/22	24-18-20N	1d	2d	3d	5d	7d	28d	56d	91d
標準水中a		4.1		16.3	22.7	25.6	36.1		1
現場水中d				10.7	18.0	22.1	34.5		
現場封かんf		1.7	4.9	11.9	18.6	21.5			1

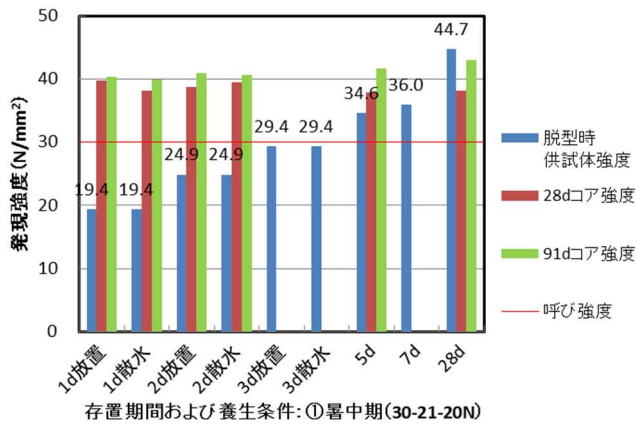


図-2 模擬壁コア圧縮強度発現 (①暑中期 30N/mm²)

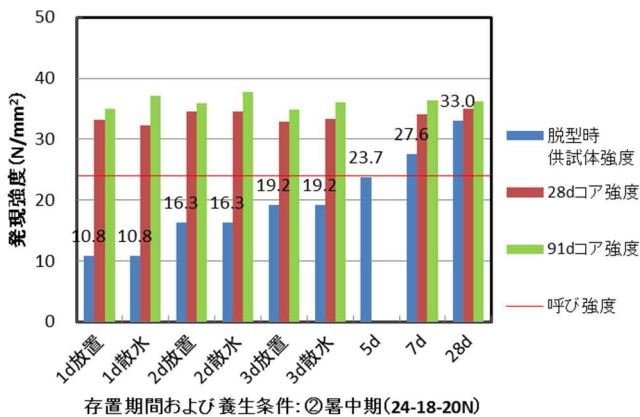


図-3 模擬壁コア圧縮強度発現 (②暑中期 24N/mm²)

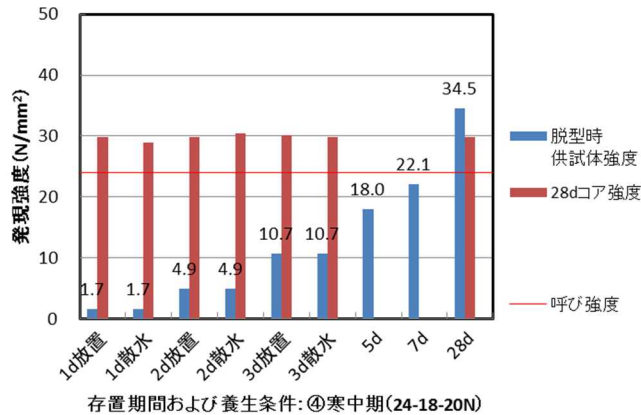


図-4 模擬壁コア圧縮強度発現 (③標準期 24N/mm²)

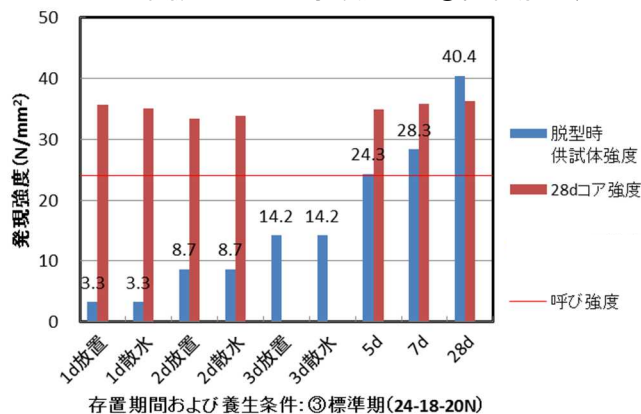


図-5 模擬壁コア圧縮強度発現 (④寒中期 24N/mm²)

その理由は「極早期に養生を終了させると表層部の組織がポーラスとなり、耐久性が損なわれる恐れがあるためである。」²⁾と記されている。

今回の実験では、あえて打込み翌日など極早期にせき板を取外すことによる影響を検証することとした。

まず、暑中期に打込んだコンクリートは、表-4および表-5より①②の両打込み日ともに翌日(1d:24h経過後)には、JASS 5T-603による円柱供試体(現場封かん養生)の圧縮強度が10N/mm²を上回っている。

次に、③標準期(寒中期直前)および④寒中期に打込んだコンクリートは、表-6および表-7よりどちらも打込み翌日(1d:24時間経過後)のJASS 5T-603による円柱供試体(現場封かん養生)の圧縮強度が5N/mm²を下回っている。

図-2～図-5に示す各模擬壁から採取したコア供試体による材齢28日(赤)および91日(緑)の構造体コンクリートの圧縮強度の試験結果を比較すると、打ち込み翌日(1d)など極早期の材齢でせき板を取り外した模擬壁から採取したコア供試体の圧縮強度が、28日間せき板を存置した模擬壁(28d)から採取したコア供試体の圧縮強度と同程度の強度発現をしていることが確認できた。また、その他の存置期間において模擬壁から採取したコア供試体の圧縮強度とも大きな差がないことから、せき板の存置期間による違いが構造体コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は大きくないと考える。

また同時に、せき板を取り外した後の鉛直面への散水養生は、同材齢でせき板を取り外した直後から気中に放置した模擬壁から採取したコア供試体による圧縮強度と同程度の強度発現となっており、散水養生の圧縮強度発現に対する効果はほとんど無いことが確認できた。

図-6に、養生条件ごとのコア供試体による材齢91日材齢28日の圧縮強度試験結果の比率を算出した「強度増進率」を示す。

養生条件ごとに、材齢91日と材齢28日の圧縮強度試験結果の比率を算出した「強度増進率」に着目すると、暑中期に打込んだ②(暑中期)の実験において、せき板を取り外した後に散水養生をした場合(散水)、同材齢で取り外した後に放置した場合(放置)と比べ「強度増進率」が大きくなっており、長期的な強度増進にわずかではあるが効果があったものと推察される。①(暑中期)よりも②(暑中期)の試験体において増進率が大きかったのは、低強度であるため組織中に散水された水分を吸収しやすかったものと推察される。今後、③(標準期)

および④（寒中期）の試験結果と合わせて、詳細に検討する。

静弾性係数の試験結果について、存置期間および養生方法ごとのコア供試体による圧縮強度と静弾性係数の試験結果の関係を図-7に示す。

図-7からは、圧縮強度が高くなると静弾性係数が高くなる関係が認められるが、養生による明確な静弾性係数の増進効果や規則性は認められなかった。

(3) コンクリート中の含水率測定

特に透気性試験においては、コンクリート表層付近の含水率に大きく影響されることから、透気試験実施直前（材齢 28 日:28d および 91 日:91d）に含水率の測定を実施した。図-8 に打込み日毎の測定結果を示す。なお、せき板の存置期間が 28 日の試験体については、せき板の取外し後 24 時間経過後の材齢 29 日に含水率を測定した。

表面含水率は、せき板を取り外した翌日に 6% を超える試験体も見られたが、材齢 91 日の時点では 4.5~5.0% の間に落ち着く結果となっている。存置期間および養生方法の違いによる影響は認められなかった。

(4) ダブルチャンバー法透気試験

図-9 に透気性の測定結果を示す。それぞれの結果は、5 点計測した結果の平均値であり、養生期間および方法ごとにまとめて表示している。

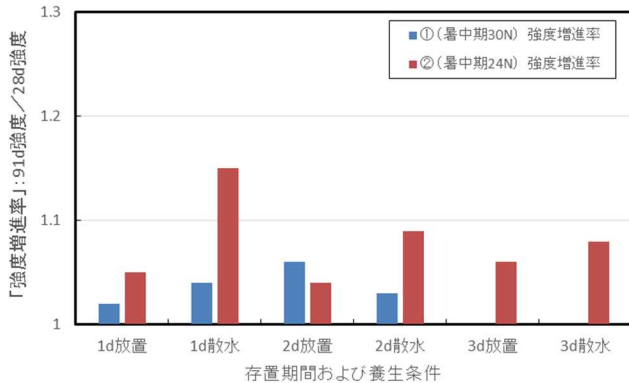


図-6 養生条件ごとの強度増進率

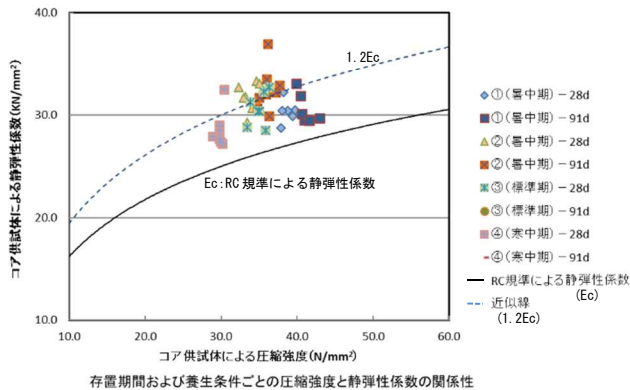


図-7 養生条件ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係

一般に、透気係数は表層部のコンクリート組織が緻密であるほど小さい結果となり、表-8に示すように5段階で評価される。³⁾

図-9からはせき板の存置期間が長くなるほど、透気係数が小さくなる傾向が見える。これには養生期間中および透気試験時の環境温度や湿度の影響のほか、表面気泡の影響も考えられるが、明確な相関性は見えない。今後もデータを蓄積し、より正確な評価としてまとめたいと考える。

(6) 表層付近の細孔径分布確認

図-10~図-11に模擬壁表面からの距離毎に、養生期間・方法で区分した累積細孔容積を示す。細孔径を4区分し、径の小さい区分から順番に積み上げて示している。

①および②の暑中期のみ示したが、壁表面からの距離が0mm (0~5mm) および10mm (10~15mm) の分布からは、せき板の存置期間が長くなるほど累積細孔容積が減少する傾向が認められる。特に細孔径が0.05~1μmの比較的大きな径の細孔量が減少する傾向が顕著に認められる。

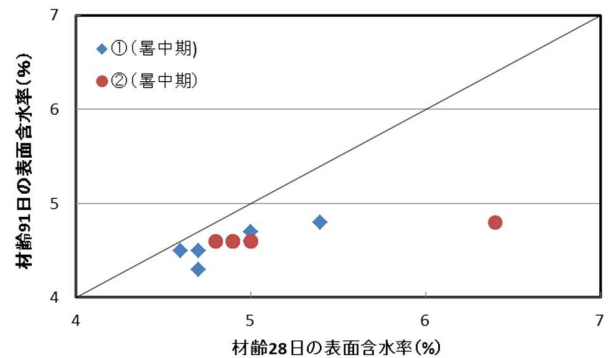


図-8 材齢 28 日および 91 日の表面含水率の関係

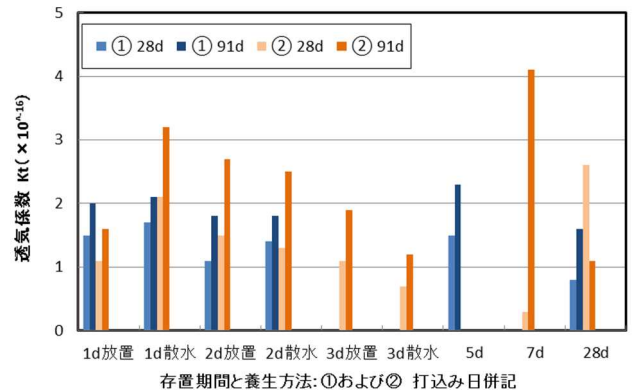


図-9 養生条件ごとの透気係数の比較

表-8 透気係数による表層品質のグレーディング³⁾

透気性グレード	1	2	3	4	5
透気係数 KT (×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.001~ 0.01	0.01~ 0.1	0.1~ 1	1~ 10	10~ 100
透気性評価	very good	good	normal	bad	very bad

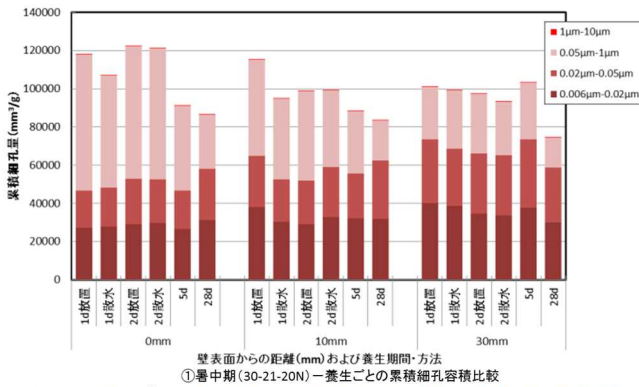


図-10 ①(暑中期)の養生条件ごとの累積細孔容積

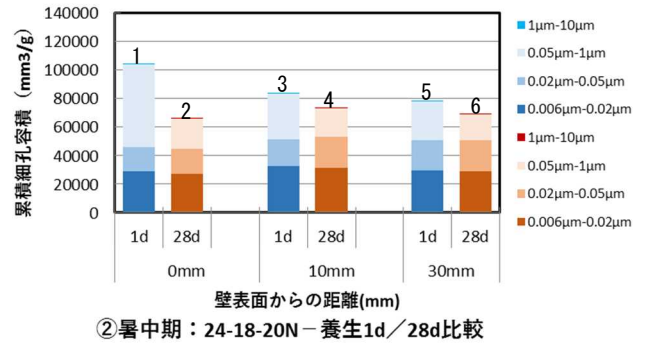


図-12 ②(暑中期)の表層部の細孔径分布比較

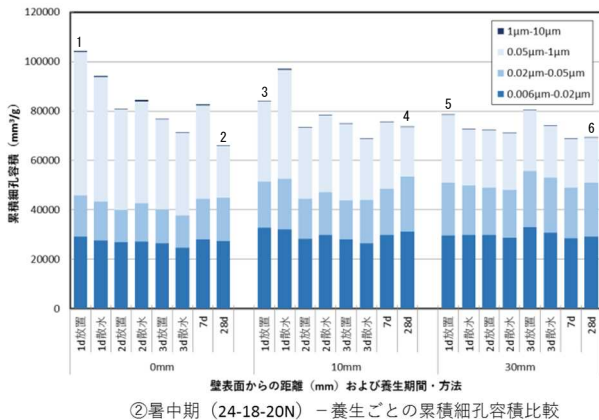


図-11 ②(暑中期)の養生条件ごとの累積細孔容積

①および②の両打込み日とも打込み後 24 時間経過時に確認した円柱供試体による圧縮強度は $10\text{N}/\text{mm}^2$ を超えていたが、せき板を JASS 5 に規定されている湿潤養生期間である材齢 5 日よりも早期にせき板を取り外す(湿潤養生を打ち切る)ことで、比較的大きな $0.05\sim 1\mu\text{m}$ の径の細孔量に影響を与えているものと推察される。

また、図-9からは散水養生を実施することにより、比較的大きな細孔径である $0.05\sim 1\mu\text{m}$ の範囲の空隙量を減少させる効果が期待できることも認められる。

③(標準期)および④(寒中期)の測定結果と併せて今後の検討とする。

また、図-11 に示した②(暑中期)における各養生条件の内、1d 放置と 28d の累積細孔容積(図中、棒上の 1~6)のみを抽出して図-12 に示す。

図-12 からは、壁表面からの距離に関わらず、 $0.006\sim 0.02\mu\text{m}$ および $0.02\sim 0.05\mu\text{m}$ の径の小さい区分の累積細孔容量はほとんど変化していないが、 $0.05\sim 1\mu\text{m}$ という径の大きい区分の累積細孔容積は大きく変化している事が確認できる。せき板の存置による湿潤養生の効果で表層部組織の緻密化が進行したものと推察される。



写真-3 コア供試体採取と透気試験実施状況

このことから、JASS 5 に定められている通り、暑中期には JASS 5T-603 による構造体コンクリートの圧縮強度の推定のための供試体で確認された圧縮強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ を越えていても、規定の湿潤養生期間より早期にせき板を取り外すことで、乾燥により表層付近の細孔量が増加する場合があることが考えられる。

今後の中性化試験の結果とともに検証することとする。

4. まとめ

せき板の存置による湿潤養生期間、散水養生の有無をパラメータとして、構造体コンクリートの養生期間(せき板の存置期間)が耐久性に関わる品質に及ぼす影響を各種の実験により調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 暑中期に打込まれたコンクリートに対して、JASS5 に定められている湿潤養生期間である 5 日よりも早期にせき板を取り外して養生を打ち切った場合でも、構造体コンクリートの圧縮強度には明確な影響は認められない。
- (2) 寒中期に打込まれたコンクリートに対して、打込み翌日などにせき板を取り外した場合でも、外気温同等の室内環境にある場合には、構造体コンクリートの圧縮

強度の発現に遅れや発現不良などの影響は認められなかった。

- (3) せき板を取り外した後、鉛直面に散水養生を実施した場合でも、構造体コンクリートの圧縮強度の発現増進効果は見られなかった。
- (4) 透気性は、せき板の存置期間（湿潤養生期間）が長くなるほど、透気係数 kT が小さくなる傾向が確認できた。また、散水養生を施すことで、透気係数が小さくなる傾向が確認できた。
- (4) コンクリート表層部付近の累積細孔容積は、養生期間が長くなるに伴い、 $0.05 \sim 1 \mu m$ の大きい径の細孔量が減少する傾向が認められた。また、散水養生によっても同様に細孔量が減少する効果が伺えた。

以上のことから、せき板の存置期間（湿潤養生期間）の確保は、構造体コンクリートの耐久性に関わる品質に良い影響を与えることが確認された。また、湿潤養生もしくはせき板取外し後の散水養生は、構造体コンクリートの圧縮強度増進への効果は限定的であるものの、耐久性に関わる品質として劣化因子の外部からの侵入に対する抵抗性の指標となり得る、コンクリート表層部付近の細孔量の増加を抑える効果が有ることが確認された。

構造体コンクリートに要求される性能は、圧縮強度の確保のみではなく、耐久性に関わる品質の確保も求められており、改めて初期養生の重要性が確認できた。

今後も引き続き中性化に及ぼす影響を併せて検討し、より詳細な検証を行いたい。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2018, pp.179, 2018
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2018, pp.447-448, 2018
- 3) R.Torrent,G.Frenzer : A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, pp.989, 1995