

排水・湿潤連続養生によるコンクリートの耐久性向上技術

大成建設 土木技術研究所 正会員 ○臼井 達哉

正会員 宮原 茂禎

正会員 坂本 淳

フェロー会員 丸屋 剛

東京大学生産技術研究所 教授 フェロー会員 岸 利治

1. はじめに

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・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、コンクリート本来の性能を発揮させる上で極めて重要な工程であり、①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¹⁾や、②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²⁾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。

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打込み翌日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。

以上の観点から、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排水・湿潤連続養生技術(Wキュアリング)を開発した。

2. 排水・湿潤連続養生の概要

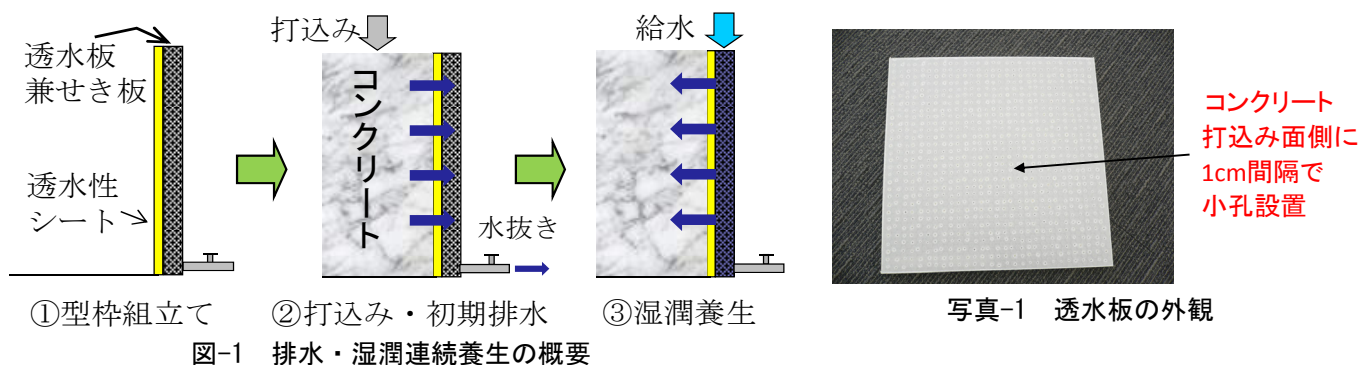
本技術開発で検討した型枠の構造と養生の手順を、図-1 とあわせて以下に示す。

- ①内部に水を供給することができる中空構造をもつ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。
- 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型枠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。
- 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。

使用する透水板は、強度が高く、コンクリート打込み面側のみに写真-1 に示すように直径約 1mm の小孔を 1cm 間隔で設け、透水性シートを介して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た。

キーワード コンクリート、養生、透水型枠、給水、表層透気係数

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 技術センター TEL 045-814-7228



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水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。

3. 壁高欄を模擬した部材による適用性検証実験

3. 1 実験方法

(1) 部材の概要

壁高欄を模擬した部材の形状および配筋を図-2 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。

(2) 部材の製作と養生方法

写真-2 に型枠組立て後の状況を示す。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てを行った。コンクリートは表-1 に示す 30-8-20N のレディーミクストコンクリートを使用した。コンクリートの打込みから仕上げまでは一般的なコンクリート施工方法³⁾に準じて実施した。排水・湿潤連続養生では、打込み開始から水抜きを通して余剰水を排出した。打込みの翌日に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状態を保持した。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³⁾。

(3) 養生効果の確認試験

養生による耐久性の向上効果を透気係数の測定と、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 20cm 下、下部はフーチング上面から 20cm 上の地点とした。

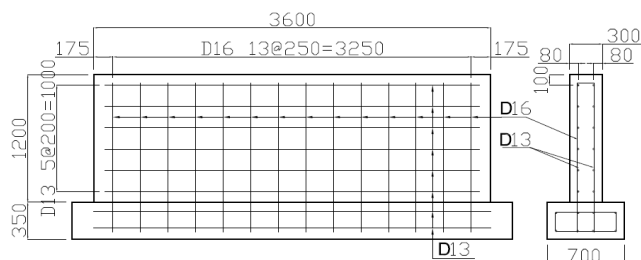


図-2 部材立面図

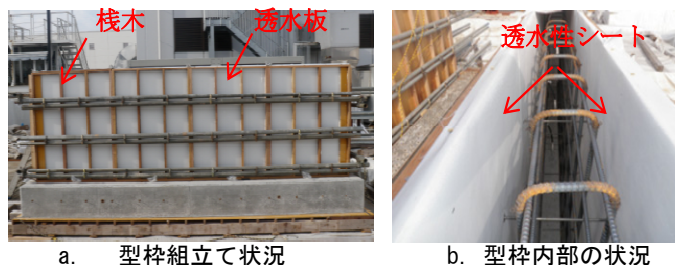


写真-2 型枠組立て状況

表-1 コンクリートの配合

呼び強度	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						水(W)	普通セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)	AE減水剤(Ad)
30	8	4.5	20	51.8	46.2	156	302	850	1002	C×0.8%

透気係数は、材齢 1 ヶ月および 7 ヶ月において Torrent 法による透気試験⁴⁾により測定した。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～200μm 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℃、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 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 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 2007 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(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。

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

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。

3. 2 試験結果

(1) 脱型後のコンクリートの状況

脱型後の部材の状況を写真-3 に示す。表面には、透水性シートの織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⁵⁾。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。

(2) 耐久性試験結果

材齢 1 ヶ月および 7 ヶ月における Torrent 法による透気係数の測定結果を図-3 に示す。材齢 1 ヶ月の測定では、両部材ともに小さな透気係数を示し、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透気しにくかったものと考えられる。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。

図-4 および図-5 に水銀圧入法による空隙率および細孔径分布を示す。排水・湿潤連続養生の空隙率は、木製型枠の存置

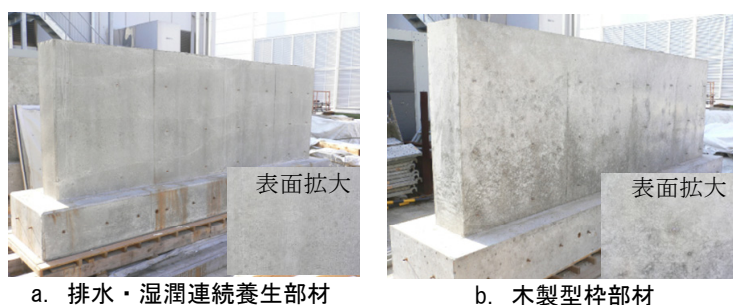


写真-3 脱型後の部材の表面状況

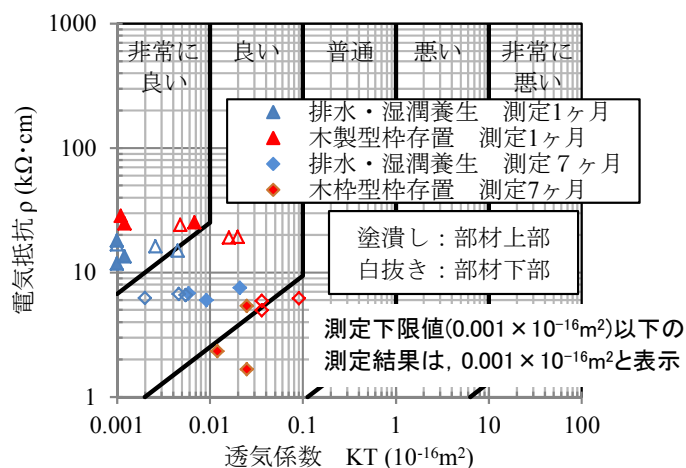


図-3 透気係数の測定結果

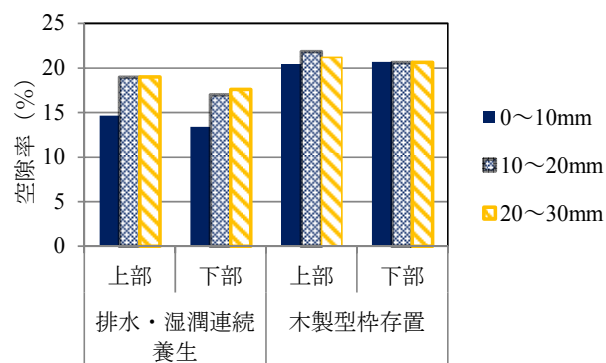


図-4 空隙率の測定結果

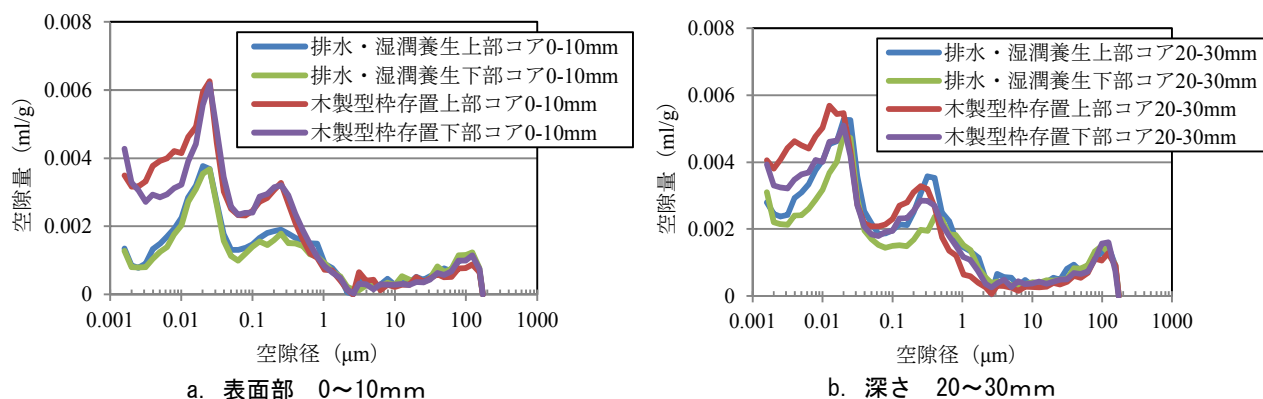


図-5 養生方法による細孔径分布の変化

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、養生の効果が表れた。特に、型枠面から 0～10mm において効果が顕著であった。細孔径分布に関しては、型枠面 10mm における排水・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 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たと考えられる。

促進中性化試験による 13 週間での中性化深さを写真-4 に示す。木製型枠の存置による養生では、10mm 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、顕著に抑制された結果であった。

3%の NaCl 水溶液へ 13 週間浸せきした時の各深さにおける全塩化物イオン濃度を図-6 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-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上部で 1/2、下部で 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る。なお、コンクリート標準示方書【設計編】⁶⁾において耐久性の照査に使用する塩化物イオンの拡散係数の予測値は、普通セメントを用いた水セメント比 51.8%のコンクリートでは 1.53cm²/年である。木製型枠の存置による養生では、これを大きく上回るが、排水・湿潤連続養生では、ほぼ同程度となる。

以上の結果から、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され 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ることが実証された。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が形成された効果である。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間隙が減少し、セメント粒子間隔が狭くなる。更に、脱型が可能な

写真-4 促進中性化試験結果

養生	上部	下部
排水・湿潤連続養生	中性化深さ0mm	中性化深さ0mm
木製型枠存置	中性化深さ16mm	中性化深さ13mm

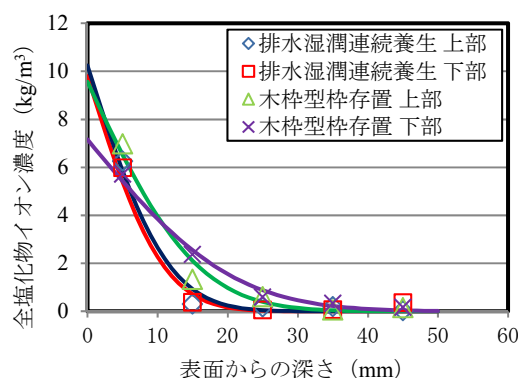


図-6 塩化物イオン濃度分布

表-2 見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の計算

養生	コア採取位置	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)
排水・湿潤連続養生	上部	10.2	1.57
	下部	9.8	1.40
木製型枠存置	上部	9.6	2.99
	下部	7.2	5.25

強度の発現を待つことなく、凝結終了後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。Wキュアリングの適用により、コンクリート表層では、セメント粒子間が養生期間中常に飽水した状態となり、セメント粒子間に粗大な空隙を残すことなく、コンクリート表層を効率的に緻密化すると考えられる。

4. 橋梁上部工壁高欄への適用

4.1 現場の概要

部材における耐久性の確認試験の結果を受けて、排水・湿潤連続養生を和歌山県に建設された中谷川第一高架橋、福島県に建設された長老沢3号橋の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。本報では、中谷川第一高架橋の適用事例について紹介する。

中谷川第一高架橋は、全長249m、最大支間長33mの8区間連続PC中空床板橋である。排水・湿潤連続養生は図-7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-7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。

4.2 施工方法

型枠の組立て状況を写真-5に示す。透水板は、適用性検証試験と同様にコンクリート面側を透水性シートで覆い、外面は桟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に示す27-8-20Nの水結合材比53.0%のレディ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-6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わかる。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透水

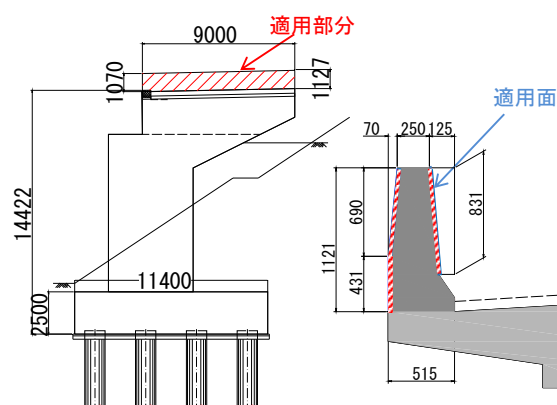
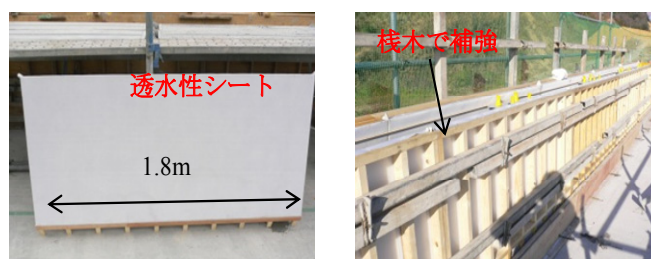
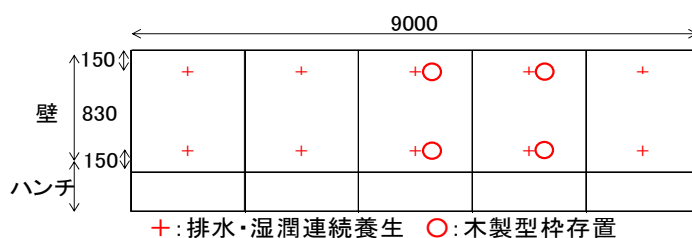


図-7 排水・湿潤連続養生の適用位置



a. コンクリート打込み面 b. 型枠組立て
写真-5 型枠の組立状況



+ : 排水・湿潤連続養生 O : 木製型枠存置
図-8 非破壊調査実施位置

表-3 壁高欄に使用したコンクリートの配合

板の水を排出したのち、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 6 週、15 カ月において、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 法による透気係数を測定した。測定位置を図-8 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 カ所の位置で測定を行った。

4.3 試験結果

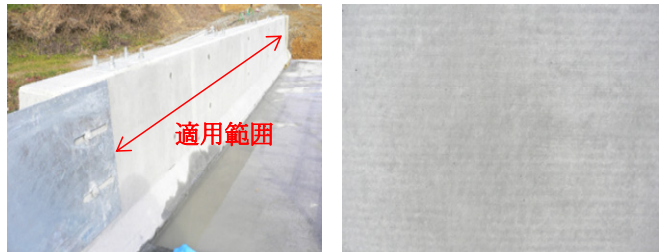
脱型後の壁高欄の仕上がり状況を写真-7 に示す。部材実験の場合と同様に、排水・湿潤連続養生したコンクリートは表面に透水シートの織布の網目が残るが、空気泡もほとんどなく、良好な仕上がりであった。リバウンドハンマー反発度の計測結果を表-4 に示す。排水・湿潤連続養生におけるリバウンドハンマーの反発度は、材齢、部位にかかわらず、木製型枠の存置による養生よりも大きく、材齢 15 カ月経過した時点でも、上部、下部ともに排水・湿潤連続養生の方が約 1.1 倍大きな値を示しており、表層部分の硬度(強度)が向上していることが確認できた。透気係数の計測結果を図-9 に示す。材齢 6 週では、早期材齢で試験したこともあり、養生による差が顕著ではないが、材齢 15 カ月では、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、上部の平均値で 1/5 以下、下部の平均値では 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。

5. まとめ

本研究では養生によりコンクリートの耐久性を向上させることを目的として、打込み直後の余剰水の排出と凝結後の湿潤養生を脱型せずに連続で行うことができる排水・湿潤連続養生を考案し、大型部材の施工



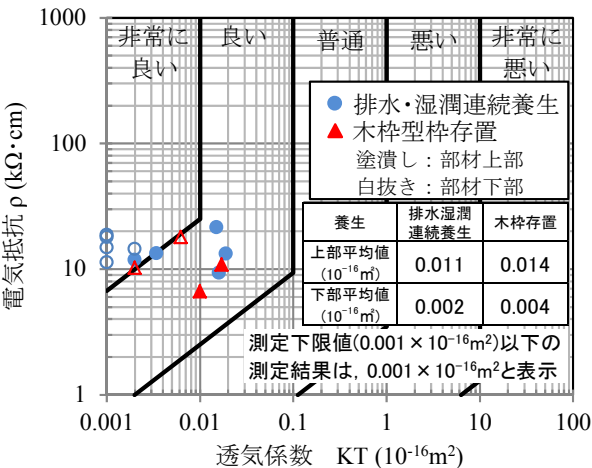
a. コンクリート施工状況 b. 余剰水の排出
写真-6 コンクリートの打込みと初期排水状況



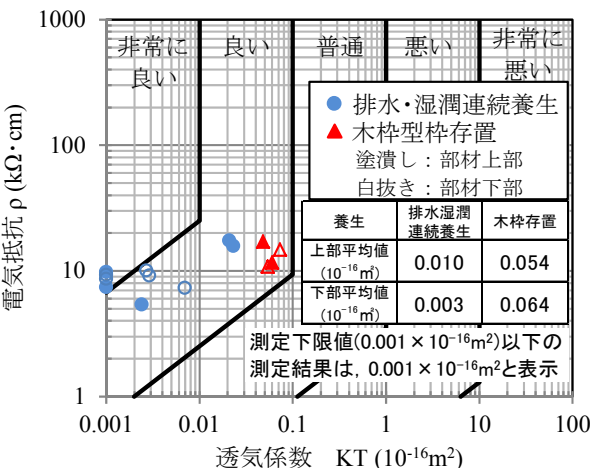
a. 排水・湿潤連続養生箇所 b. 表面近影
写真-7 脱型後のコンクリートの仕上がり状況

表-4 リバウンドハンマーによる反発度の測定結果

測定位置	排水・湿潤連続養生		木製型枠存置	
	材齢6週	材齢15ヶ月	材齢6週	材齢15ヶ月
高欄壁上部	平均: 43.1	平均: 46.1	平均: 35.4	平均: 42.6
	最大: 45.6	最大: 49.3	最大: 35.7	最大: 43.0
	最小: 41.2	最小: 44.4	最小: 35.3	最小: 42.1
高欄壁下部	平均: 47.7	平均: 49.1	平均: 35.9	平均: 43.1
	最大: 49.1	最大: 50.1	最大: 36.4	最大: 43.4
	最小: 45.5	最小: 46.9	最小: 35.3	最小: 42.8



a. 材齢 6 週



b. 材齢 15 カ月

図-9 壁高欄における透気係数の測定結果

および耐久性試験や橋梁の壁高欄における実工事へ試験適用を通して実用化の検討を行った。その養生効果は2つの効果の単なる足し合わせに留まらず、両者の相乗効果が期待できるものであることが明らかになった。得られた知見は以下のとおりである。

- ・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で、コンクリート表面の仕上がりも良好であった。
- ・初期の排水とその後の速やかな湿潤養生の効果により、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。
- ・実工事への試験施工により、本養生システムの施工性、および表層品質の向上効果が確認できた。

ここまでの検討で、排水・湿潤連続養生の標準的な施工方法は確立できたものとする。本技術を適用した部材は表層が緻密化し、耐久性が飛躍的に向上することが種々の実験および実構造物への適用結果から検証されていることから新設構造物の信頼性を大きく向上させるとともに、将来のメンテナンスコストを抑制することが可能な技術としてより多くの構造物への適用を図ることとしたい。

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) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3.
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3.