

論文 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の開発

白井 達哉*1・宮原 茂禎*2・荻野 正貴*3・岸 利治*4

要旨: 養生によるコンクリートの高耐久化技術の開発を目的として、打込み直後にコンクリートから生じる余剰水や気泡を排出する透水型枠養生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方法を開発した。本研究では、壁高欄を模擬した大型部材の試験施工により標準的な施工方法を確立するとともに、耐久性試験を通して表層の透気係数の低減、中性化の抑制、塩分浸透の抑制などの養生効果を確認した。また、橋梁の壁高欄において試験適用を行い、現場施工においても十分な施工性が得られること、非破壊試験によりコンクリート表層の品質が向上していることを確認した。

キーワード: 耐久性, 養生システム, 表層品質, 透水型枠, 湿潤養生

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。

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¹⁾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。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。

著者らは、施工現場において水中養生に匹敵する効果を得ることができる養生方法を見出すことを目的として、これまでに、打込み初期の余剰水の排出と硬化後の給水を同一の型枠を用いて連続して行うことができる手法を考案し、基礎実験として小型の試験体を用いて空隙構造測定や各種の耐久性試験を行い、その効果を評価してき

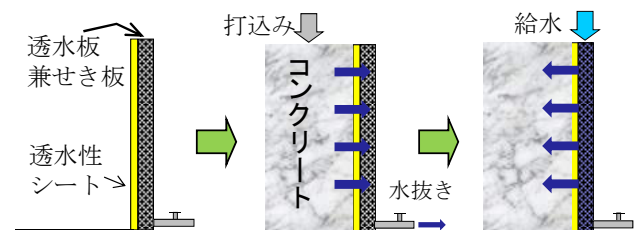
た^{3),4)}。本研究では、現場施工において標準的な施工方法を構築するために、壁高欄を想定した実大規模の部材を製作し、各種の耐久性試験を実施した。加えて、橋梁現場の壁高欄の一部へ試験適用し、その効果を非破壊試験により調査した。本報では、これらの結果について報告する。

2. 排水・湿潤連続養生の概要

本研究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



①型枠組立て ②打込み・初期排水 ③湿潤養生
図-1 排水・湿潤連続養生の概要

*1 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任 修(工)(正会員)

*2 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 課長代理 修(工)(正会員)

*3 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 修(工)(正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所 教授 人間・社会系部門 博(工)(正会員)

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。

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と考えた。本報では、この養生方法を排水・湿潤連続養生と呼ぶこととする。

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⁵⁾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

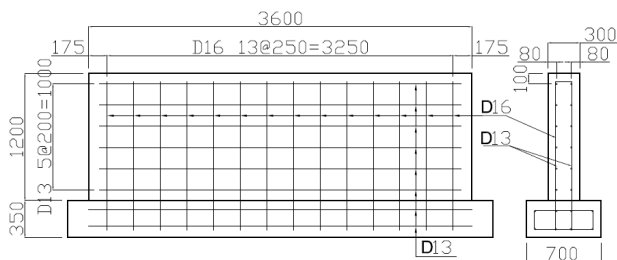


図-2 部材立面図

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⁵⁾。

(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。

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⁶⁾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

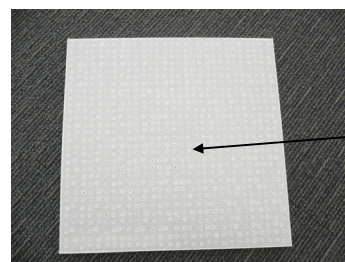


写真-1 透水板の外観



a. 型枠組立て状況

b. 型枠内部の状況

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%

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/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。

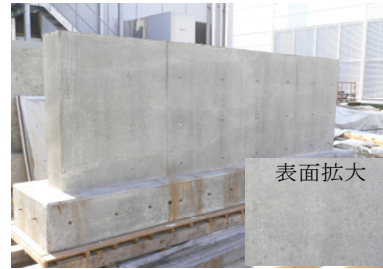
3.2 試験結果

(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い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⁷⁾。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。



a. 排水・湿潤連続養生部材



b. 木製型枠部材

写真-3 脱型後の部材の表面状況

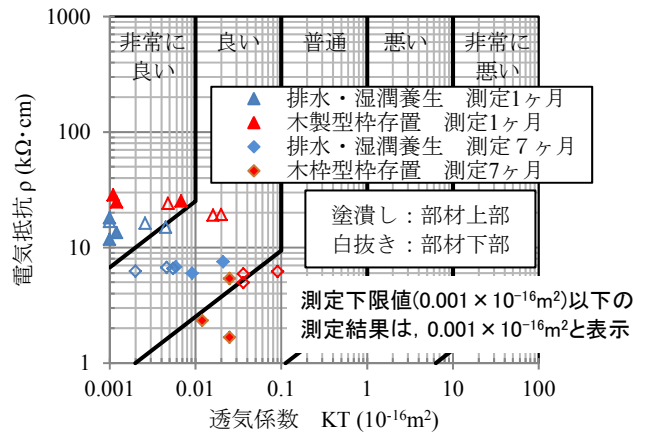


図-3 透気係数の測定結果

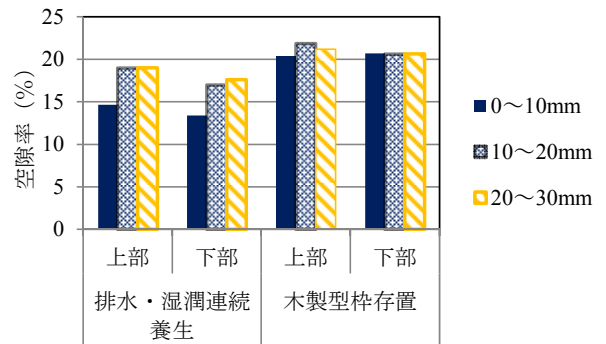
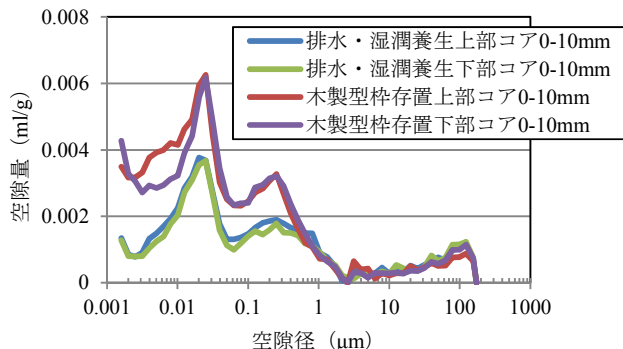
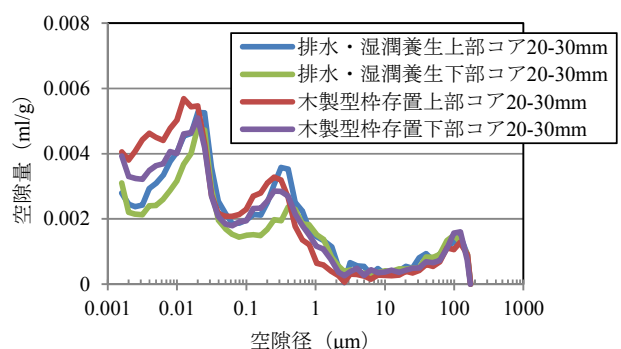


図-4 空隙率の測定結果



a. 表面部 0~10mm



b. 深さ 20~30mm

図-5 養生方法による細孔径分布の変化

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った。細孔径分布に関しては、型枠面部 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 $1\mu\text{m}$ 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 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、 $0.01\mu\text{m}$ 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表-2 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-3 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】⁸⁾ 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 $1.53\text{cm}^2/\text{年}$ 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、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。既往の小型供試体を用いた基礎実験^{3,4)}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。なお、本試験では壁の上下方向の品質の違いは大きくないようであった。

壁高欄を模擬した部材による適用性検証実験を通して、排水・湿潤連続養生の標準的な施工方法を構築し、その養生効果を確認することができた。

表-2 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

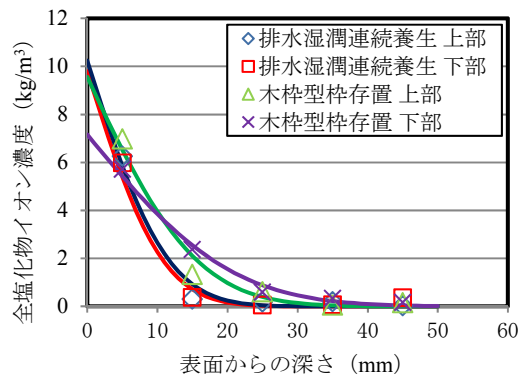


図-6 塩化物イオン濃度分布

表-3 見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の計算値

養生	コア採取位置	表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)	見掛けの拡散係数 (cm²/年)
排水・湿潤連続養生	上部	10.2	1.57
	下部	9.8	1.40
木製型枠存置	上部	9.6	2.99
	下部	7.2	5.25

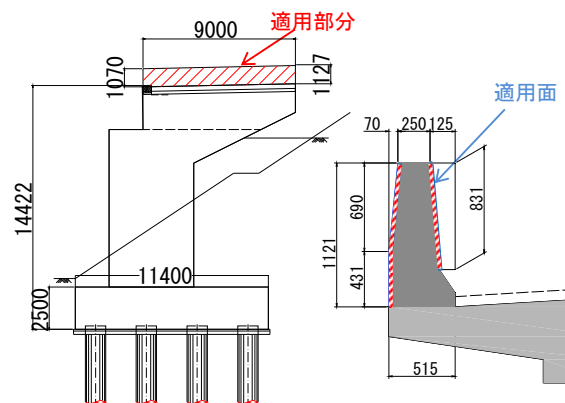


図-7 排水・湿潤連続養生の適用位置

4. 橋梁上部工壁高欄への試験施工

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

表-4 壁高欄に使用した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/B (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)					
						水(W)	結合材(B)		細骨材(S)	粗骨材(G)	AE減水剤 (Ad)
							普通セメント(C)	膨張材(Ex)			
27	8	4.5	20	53.0	47.7	165	291	20	868	967	2.86

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。

中谷川第一高架橋は、全長 249m、最大支間長 33m の 8 径間連続 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。

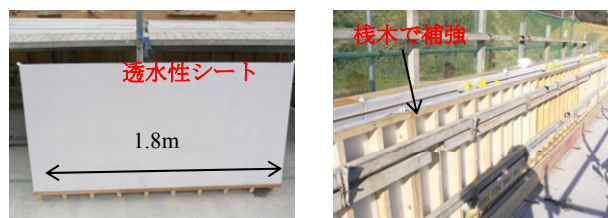
4.2 施工方法

型枠の組立て状況を写真-4 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-4 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を行った。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-5 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。

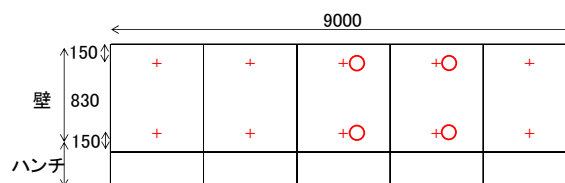
施工後の調査として、コンクリートの仕上がり面の目視確認を行った。その後、コンクリートの材齢 6 週、15 カ月において、非破壊で試験可能なシュミットハンマーによる反発度および Torrent 法による透気係数を測定した。測定位置を図-8 に示す。排水・湿潤連続養生では、幅 1.8m で 5 枚設置したそれぞれの透水板の上部、下部の各 5 カ所の位置、木製型枠の存置による養生では、上部、下部の各 2 カ所の位置で測定を行った。

4.3 試験結果

脱型後の壁高欄の仕上り状況を写真-6 に示す。部材



a. コンクリート打込み面 b. 型枠組立て
写真-4 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



a. コンクリート施工状況 b. 余剰水の排出
写真-5 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-6 脱型後のコンクリートの仕上がり状況

表-5 シュミットハンマハンマー反発度の測定結果

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

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。

シュミットハンマー反発度の計測結果を表-5 に示す。排水・湿潤連続養生におけるシュミットハンマー反発度

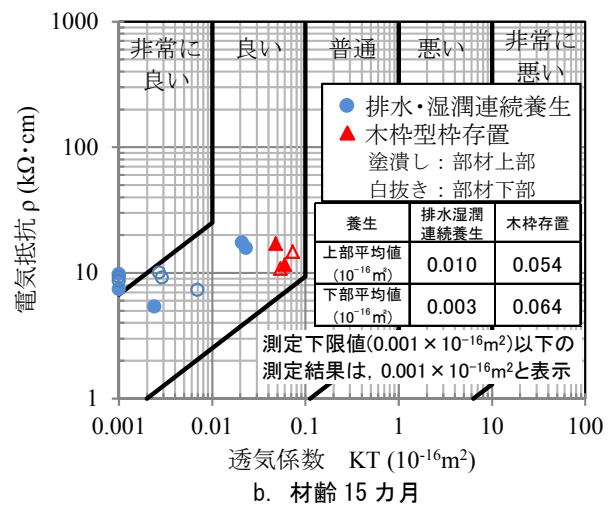
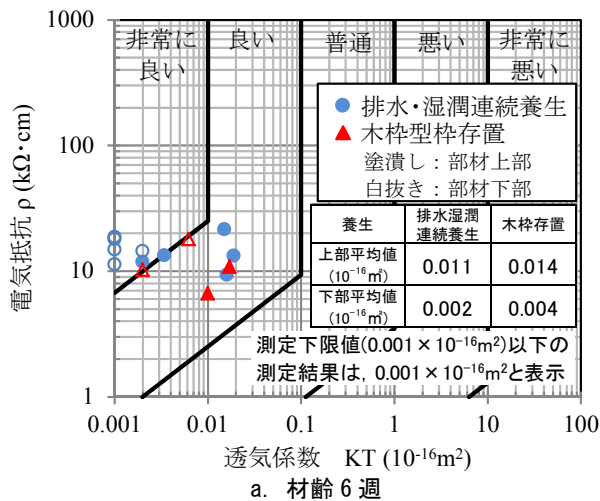


図-9 壁高欄における透気係数の測定結果

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 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して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、実用化検討を行った。得られた結果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考え、今後は工種や部材の条件等に合わせて施工方法を適宜改良していくことによ

り、より多くの構造物への適用を図ることとしたい。

謝辞

本技術の現場適用および公表にあたり、国土交通省近畿地方整備局に多大なるご協力を頂きました。ここに付記して感謝致します。

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) 宮原茂禎，丸屋剛，岸利治：排水・水中養生したコンクリートの耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.767-772，2011.7
- 4) 宮原茂禎，丸屋剛，岸利治：排水・水中養生によるコンクリートの耐久性向上効果の検討，大成建設技術センター報，No.44，2011.12
- 5) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3.
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3.