

排水・湿潤連續養生によるコンクリートの耐久性向上技術 の開発

宮原 茂禎^{*1}・丸屋 剛^{*1}・久壽米木 義昭^{*2}・中田 慎一^{*2}

Keywords : concrete, improvement of durability, permeable form, underwater curing

コンクリート, 耐久性向上, 透水型枠, 湿潤養生

1. はじめに

これまでに構築し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、打設、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設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設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、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、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)}。本稿では、壁高欄を想定した実大規模の部材製作試験を通して標準的な施工方法を構築するとともに、各種の耐久性試験によって良好な養生効果が得られるこことを確認した。また、橋梁現場の壁高欄の一部へ適用し、その効果を非破壊で調査した。本報ではこれらの結果について報告する。

2. フレッシュ性状に関する検討

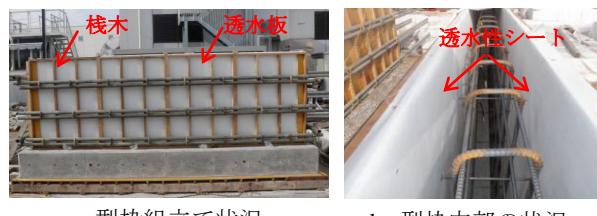
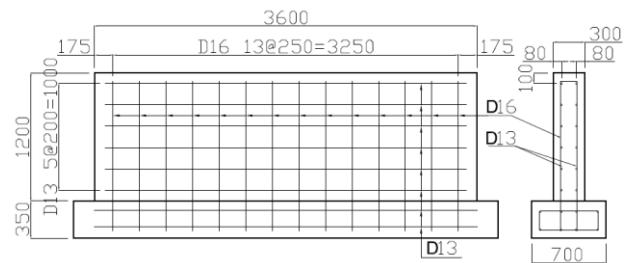
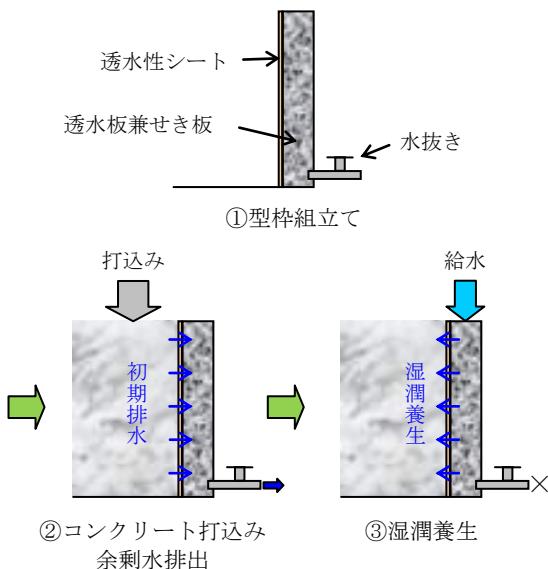
本研究で検討した型枠の構造と養生の手順を、図-1とあわせて以下に示す。

- 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の栓を開いて、コンクリート表層の余剰水や空気泡を排出する。
- ③凝結終了後に水抜きの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。

使用的透水板は、強度が高く、コンクリート打込み面側のみに図-2に示すような直径約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

*1 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室

*2 関西支店 土木部



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剩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の製作試験

3.1 実験方法

3.1.1 部材の概要

壁高欄の施工を想定した部材の形状および配筋を図3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-4 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は、上述の通り、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。透水板の背面は図に示すように桟木で補強して、コンクリート打込み時の側圧によるたわみを防止した。桟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を組み立てた。

3.1.2 部材の製作

コンクリートは普通セメントを使用した呼び強度 30N/mm^2 、スランプ 8cm、粗骨材最大寸法 20mm のレディーミキストコンクリートとした。配合を表-1 に示す。

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剩水を排出した。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。これはコンクリー

表-1 コンクリートの配合

Table 1 Mix proportion of concrete

配合の 呼び名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤*
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
30-8-20N	51.8	46.2	156	302	850	1002	C×0.8%

*混和剤：AE 減水剤 標準形（I種）

ト標準示方書⁵⁾に示される普通セメントを使用したコンクリートで気温 15°C以上の場合の湿潤養生期間の標準に準じたものである。

脱型後の両部材は屋外で保管し、次項に示す耐久性試験により養生の効果を検証した。

3.1.3 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、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を測定することにより検証した。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 式透気試験により測定した。細孔径分布は材齢 28 日で採取したコアを用いて、表面から 0~10, 10~20, 20~30mm の深さで測定した。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。中性化深さおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、同様に材齢 28 日で採取したコアを用いて、表面を暴露面とし、側面と底面はエポキシ樹脂でコーティングして試験した。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、表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は浸せき試験により測定した。表面を暴露面として、残りの面をコーティングしたコアを 3% の塩化ナトリウム水溶液へ 3 ヶ月間浸せきしたのち、ドライカッターで表面から 1cm ずつ 5cm まで、5 深度の平板を切り出し、JIS A 1154 に従い電位差滴定法により各深さの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 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験法（案）」に従って求めた。具体的には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)で回帰分析し、表面塩化物イオン濃度とともに最小二乗法で算出した。

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

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

3.2.1 脱型後のコンクリートの状況

脱型後の部材の状況を図-5 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、空気あばた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⁶⁾。以下で示すように、排水



a. 排水・湿潤連続養生部材



b. 木製型枠部材

図-5 脱型後の部材の表面状況

Fig.5 Surface condition of members after removing the formworks

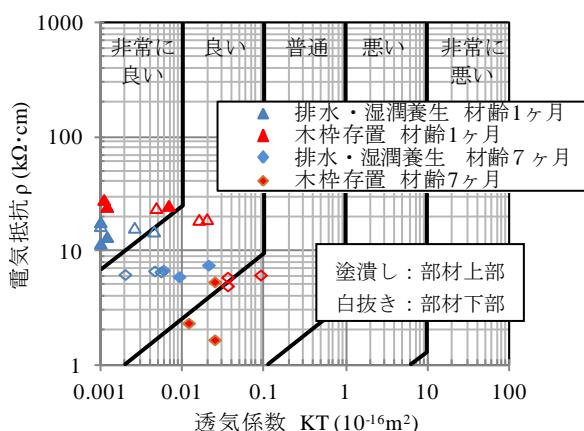


図-6 透気係数の測定結果

Fig.6 Results of measurement for air permeability

・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ることができる。

3.2.2 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-6に示す。塗潰した点は部材上部での測定値、白抜きの点は下部での測定値を示している。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、平均で木製型枠の場合の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-7および図-8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場合よりも、いずれの深さにおいても小さくなり養生の効果が現れた。特に表面部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、表面部10mmにおける排水・湿潤連続養生では木製型枠の存置と比較して1μm以下の空隙が大幅に減少し、緻密な空隙構造が形成されたことがわかる。表面からの深さ20~30mmにおいては養生方法による差が小さくなっていたが、0.01μm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図-9に示す。木製型枠の場合には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。

3%のNaCl水溶液へ13週間浸せきしたときの、各深さにおける塩化物イオン濃度を図-10に示す。図中の回

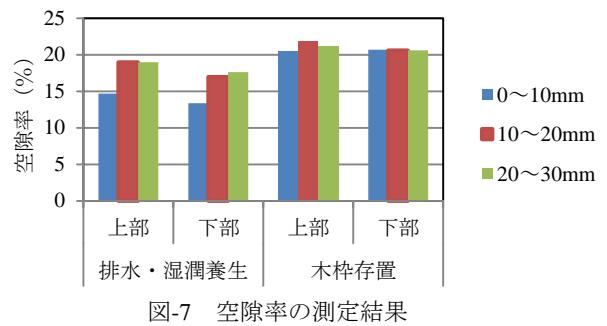
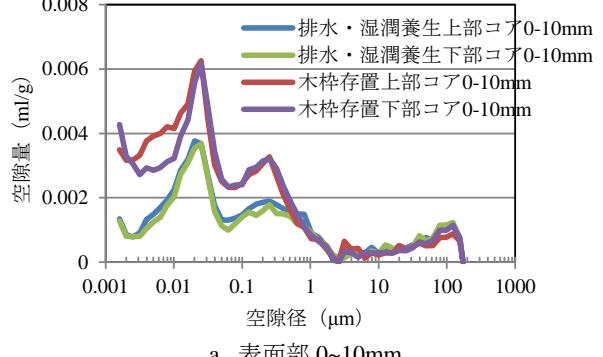
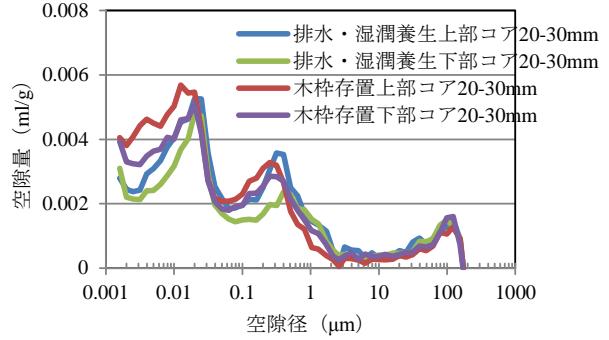


図-7 空隙率の測定結果

Fig.7 Results of measurement for porosity



a. 表面部 0~10mm



b. 深さ 20~30mm

図-8 養生方法による細孔径分布の変化

Fig.8 Changes in pore size distribution by different curing methods

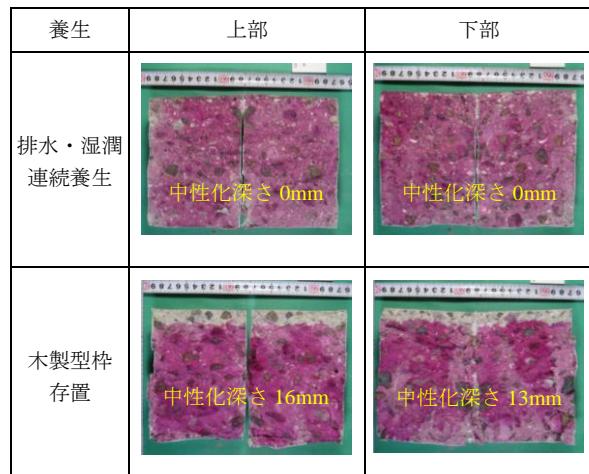


図-9 促進中性化試験結果

Fig.9 Results of accelerated carbonation test

帰線は3.1.3で述べた方法により解析したものである。計算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。図-10において実測値を見ると、排水・湿潤連続養生では、10mm以深への塩化物イオンの浸透が抑制された。表-2に示す通り、見掛けの拡散係数は木製型枠を存置した場合と比べて上部で1/2、下部で1/3程度となり、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】⁷⁾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。木製型枠の場合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

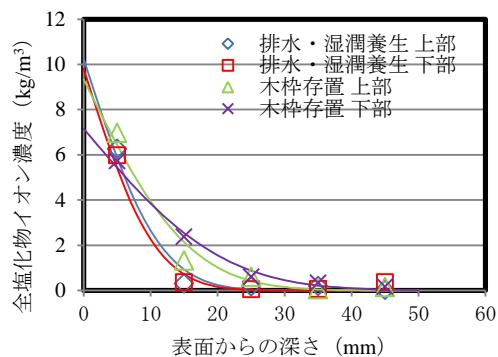


図-10 塩化物イオン濃度分布

Fig.10 Measured concentration of chloride ion and regression curve

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値

Table 2 Calculated concentrations of surface chloride ions and apparent diffusion coefficient of chloride ions

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

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。なお、過去の小型のテストピースを用いた基礎実験^{3),4)}においては、本養生方法は養生期間3日で、28日間の水中養生と同等以上の効果が得られており、大型の部材であっても十分な効果が期待できることが示された。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。

以上の部材の製作試験および耐久性試験を通して、排水・湿潤連続養生の標準的な施工方法を構築し、その効果を確認することができた。

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、そのような状況下においても所定の施工と性能が得ら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-11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-11 b.の青線部）に適用した。上下線の壁高欄のコンクリートを同日に打設したが、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。

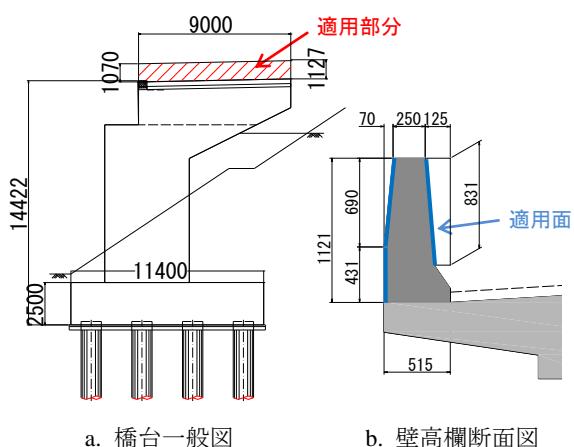


図-11 排水・湿潤連続養生の適用位置

Fig.11 Application of drainage and underwater curing

表-3 壁高欄コンクリートの配合

Table 3 Mix proportion of concrete for railing wall

配合の 呼び名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	膨張材*	細骨材	粗骨材
27-8-20N	53.0	47.7	165	291	20	868	967
							B×0.92%

*膨張材：エトリンガイト・石灰複合系、混和剤：AE 減水剤 標準形（I種）

4.2 施工方法

型枠の組立て状況を図-12に示す。透水板は部材の製作試験と同様にコンクリート面側を透水性シートで覆い、外面は桟木で補強して使用した。透水板の幅は1.8mとし、5枚をつなげて型枠を組み立てた。コンクリートは、表-3に示す27-8-20N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を行い、打込み開始から水抜きを通して余剰水の排水を行った。コンクリートの施工状況と打設時の余剰水の排出状況を図-13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、打設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打設後6週において、非破壊で試験可能なシュミットハンマによる反発度およびTorrent法による透気係数を測定した。

4.3 試験結果

脱型後の壁高欄の仕上り状況を図-14示す。部材試験の場合と同様に、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、空気あばたもほとんどなく、良好な仕上がりであった。

打込みから6週後に壁高欄の道路側の面においてシュミットハンマーおよびTorrent式透気試験を実施した。調査位置を図-15に示す。測定は幅1.8mで5枚設置した透水板それぞれにおいて、上部、下部の位置で測定を行った。計測結果を表-4に示す。両養生ともに下部では上部よりも品質が良くなる傾向が現れた。排水・湿潤連続養生した壁高欄のシュミットハンマー反発度

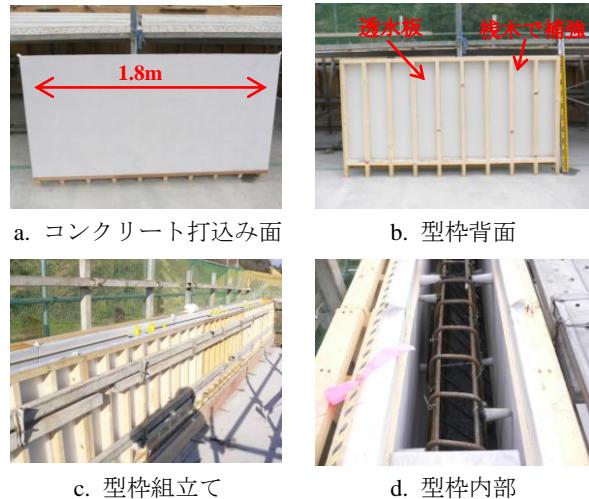


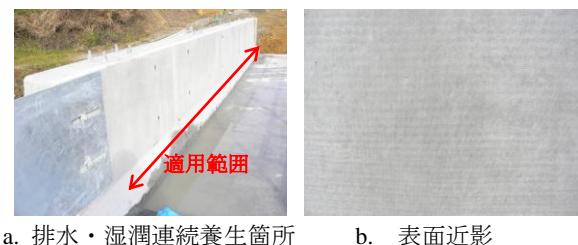
図-12 型枠の組立て状況

Fig.12 Appearance of arranged formwork



図-13 コンクリートの施工と初期排水状況

Fig.13 Concrete works and draining of excess water



a. 排水・湿潤連続養生箇所 b. 表面近影

図-14 脱型後のコンクリートの仕上がり状況

Fig.14 Appearance of concrete after removing formworks

は木製型枠の場合よりも顕著に大きな値を示した。上部は1.2倍、下部は1.3倍となり、表層部分の強度が大きく向上していることが示された。透気係数は、早期材齢で試験したこともあり、養生による差が反発度ほ

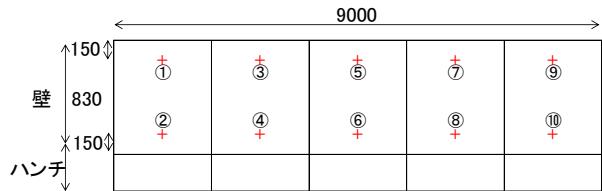


図-15 非破壊調査実施位置

Fig.15 Location of non-destructive tests

表-4 シュミットハンマによる反発度および透気係数の計測結果

Table 4 Results of measurement for rebound value of Schmidt Hammer and air permeability

測定位置	排水・水中養生		木製型枠	
	反発度	透気係数 $\times 10^{-16} \text{m}^2$	反発度	透気係数 $\times 10^{-16} \text{m}^2$
上部	①	42.3	0.002	—
	③	45.6	0.003	—
	⑤	43.3	0.015	35.0
	⑦	41.2	0.016	35.7
	⑨	43.2	0.019	—
	平均	43.1	0.011	35.4
下部	②	49.1	<0.001	—
	④	47.4	0.002	—
	⑥	49.0	0.001	35.3
	⑧	47.7	<0.001	36.4
	⑩	45.5	<0.001	—
	平均	47.7	0.0015**	35.9

*透気係数 $<0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ は測定下限値以下であるが、平均値は $0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ として計算

と顕著ではないが、排水・湿潤連続養生した場合は下部の半数が測定下限値以下となるなど、木製型枠と比べて向上している傾向が見られた。

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、打設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、中性化的抑制、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る。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したい。

参考文献

- 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、2004.
- 野乃目洋、月永洋一、高柳彰宏、藤井真之：吸水性ポリマー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.
- 宮原茂徳、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.
- 宮原茂徳、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.
- 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】、2008.3.
- 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.
- 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】、2008.3.