報告　覆工コンクリート，トンネル坑門工への排水湿潤連続養生の適用

臼井　達哉[*1]・鈴木　修[*2]・森島　伸吾[*3]

要旨：寒冷地域では凍結抑制剤を散布するため凍害や塩害等，厳しい環境となるがトンネル構造物においてもタイヤによる引きずり，巻上げによって凍結抑制剤の影響を受けやすい。そこで本研究では，耐久性向上が求められる坑口壁面部，覆工コンクリートの SL 下部に排水湿潤連続養生を適用した。覆工コンクリートの SL 下部については，新たな型枠構造を考案し模擬部材の製作により施工性，品質向上効果を確認した上で実構造物へ適用した。実構造物については材齢初期に加え材齢 3 年における品質向上効果を非破壊試験により調査し長期材齢における養生効果の検証を行った。

キーワード：養生，耐久性，余剰水の排出，湿潤養生，表層品質

1. はじめに

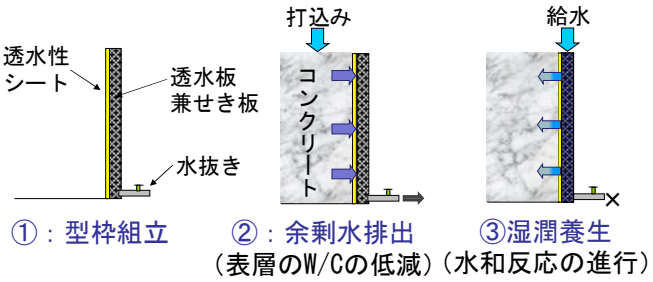
今後の社会資本の維持管理費用の増大が予測されることから，新設構造物には長期耐久性を有するコンクリートを施工し，将来のメンテナンスコストを抑制する施工技術が求められている。著者らは，材齢初期の養生によるコンクリートの耐久性向上を目的として特殊な樹脂製型枠および透水シートから構成される型枠構造を用い，打込み直後のブリーディング水等の余剰水の排出と脱型をせずに凝結終了後速やかにコンクリート表面に養生水を供給し湿潤養生を連続して行う排水湿潤養生技術を開発した [1)]。その養生効果は 2 つの作用の効果の単なる足し合わせに留まらず，両者の相乗効果が期待できるもので，耐久性の向上のみならず，乾燥収縮の低減，収縮ひび割れを低減できるものである [2)]。これまでに，給水方法の改良 [1)]等，現場条件にあわせた改良を行いながら橋梁の壁高欄や水利構造物の壁部材等に適用してきた。

一方，寒冷地域では道路の凍結対策として NaCl 等を主成分とした凍結抑制剤を散布するため，凍害や塩害などの複合劣化が生じる可能性が高く，コンクリート構造物には厳しい環境となることが知られている。トンネル構造物では，凍結抑制剤を直接散布することはないが，タイヤによる引きずり，巻上げによってトンネル坑口部壁面 [3)]，および坑口近郊の覆工コンクリートスプリングラインより下部（以降 SL 下部と記載）では凍結抑制剤の影響を受けやすく，耐久性の向上が求められている。

本研究では，覆工コンクリートの SL 下部に排水湿潤連続養生を適用するために新たな型枠構造を考案し，実規模部材を製作し，施工性，品質向上効果を確認した。実構造物への適用性を確認した後，覆工コンクリートの SL 下部とあわせて坑口部壁面に排水湿潤連続養生を適用した。加えて，本技術の適用効果として覆工コンクリートの SL 下部については，材齢 6 週と 3 年，坑門工壁面部については材齢 20 週における品質向上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 [1)]

排水湿潤連続養生の概要を図-1 に示す。排水湿潤連続養生では，断面内に水を供給することができる有孔透水板をせき板として使用する。使用する透水板は，コンクリート打込み面側のみに直径約 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。この透水板の打込み面側に透水性シートを設置してコンクリートの打込みを行う。打込み直後はコンクリートから出る余剰水や表面の気泡を除去することができ，凝結後に透水板へ水を供給することにより脱型せずにコンクリートを湿潤養生することができる(図－1)。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脱型をせずに連続して実施することができる。



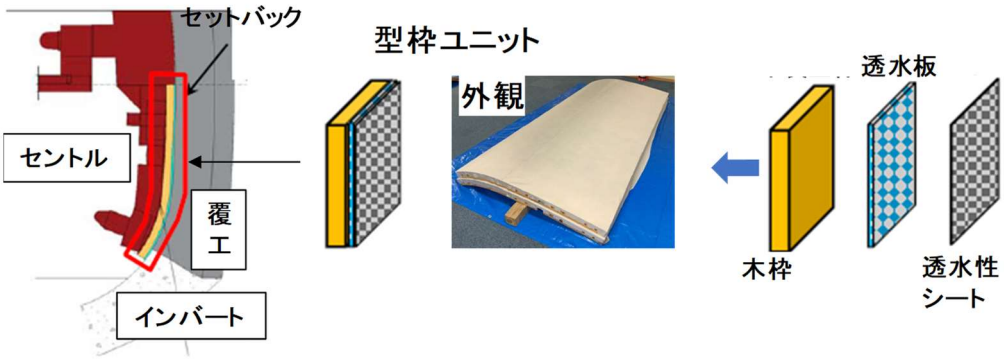
図－1　排水湿潤連続養生の概要

3. 型枠構造の改良

3.1 覆工コンクリート用の型枠構造

一般に山岳トンネルの覆工コンクリートは 2 日に 1 回

*1 大成建設　技術センター　社会基盤技術研究部　材工研究室　主任研究員　博（工）　(正会員)
*2 大成建設　九州支店　土木工事作業所
*3 大成建設　東北支店　土木工事作業所　修（工）　(正会員)



図－2　覆工コンクリートにおける排水湿潤連続養生用の型枠構造

のサイクルでコンクリートの打込みを行う。そのサイクルを維持するため，材齢 12-20 時間程度で覆工コンクリート用の移動式型枠（以降，セントル型枠と記載）を脱型し，次のブロックの打込みのために移動させ，組み立てを行う [4]。以上のような施工サイクルとなることから，セントル型枠の一部を完全に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固定してしまうと，セントル型枠の脱型ともに排水湿潤連続養生用の型枠も脱型されてしまうため，脱型をせずに余剰水の排出→湿潤養生を連続的に行う排水湿潤連続養生を行うことができなくなってしまう。

このことから，透水板，透水性シートをセントル型枠から切り離すことができる構造とし，セントル型枠が移動後も透水板，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における排水湿潤連続養生用の型枠構造を**図－2** に示す。まず，SL 下部のセントル型枠の一部を内空間側にセットバックさせる。その後，セットバックすることでできた空間に透水板，透水性シート等が一体となったユニットを設置する構造とした。そうすることでセントル型枠を移動後は排水湿潤連続養生用の型枠ユニットを残置することができ，型枠ユニット上部を湛水することで透水性シートを介して湿潤養生を脱型せずに連続して実施できると考えた。加えて，この型枠ユニットをあらかじめ数セット準備し，次の施工ブロックでは新たな型枠ユニットを設置，使用することで覆工コンクリートの施工サイクルに影響を与えることなく排水湿潤連続養生を適用することができる。型枠ユニットの構成材料についても検討した。覆工コンクリートの SL 下部は，円弧状のテーパーとなっており，透水板もその形状にあわせて設置する必要がある。覆工コンクリート 1 ブロックの施工延長は通常 10.5m-12.0m であることから，型枠ユニットを製作する際の透水板の加工しやすさを考慮し，これまで使用してきた透水板 [1]よりも厚さが薄く，剛性の低い透水板を使用することとした。さらに，通常よりも薄い透水板のみでは打設圧に対する剛性が不足するため，透水板，透水性シートを木製型枠と一体化する型枠構造とした。このような型枠ユニットとすることで，透水板の加工がしやすくかつユニットとして剛性が高くセントルに設置・取り外しが実施しやすい構造に改良することができた。

表－1　模擬部材，覆工に用いたコンクリートの配合

SL	Air	W/C	s/a	単位量(kg/m^3)				
cm	%	%	%	W	C	S	G	C×%
15	4.5	53.2	42.7	162	305	758	1024	1.0

C：高炉セメントB種

表－2　模擬部材の反発度と圧縮強度の測定結果

測定項目	排水湿潤	木枠存置
反発度	45.6	37.8
コア供試体 圧縮強度 [N/mm^2]	35.2	32.6

3.2 模擬部材による養生効果検証実験

実構造物への適用を前に覆工コンクリートを模擬した部材を製作し，型枠ユニットの組立，排水湿潤連続養生を適切に実施できる施工性の有無，品質向上効果の確認を行った。部材の形状は，覆工コンクリートの SL 下部を再現した高さ 1.3m，厚さ 0.3-0.5m とし，事前にインバート部を構築した上で模擬した覆工コンクリートの打込みを行った。部材は排水湿潤連続養生により製作するものと，比較用として木製型枠を用いて製作するものの 2 体とした。模擬部材のコンクリートの配合を**表－1** に示す。配合は，対象工事の覆工コンクリートで使用する W/C53.2%のレディーミクストコンクリートである。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 日まで余剰水を排出した。その後，透水型枠の上部に水を供給することで湿潤養生を材齢 7 日まで実施したのち，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 日まで型枠を残置したのちに脱型した。品質確認試験は，非破壊試験として，リバウンドハンマーの反発度（JIS A 1155），表層透気試験（トレント法）による表層透気係数 [5]，表面吸水速度 [6]の測定を行った。なお，表層透気係数，表面吸水速度を測定

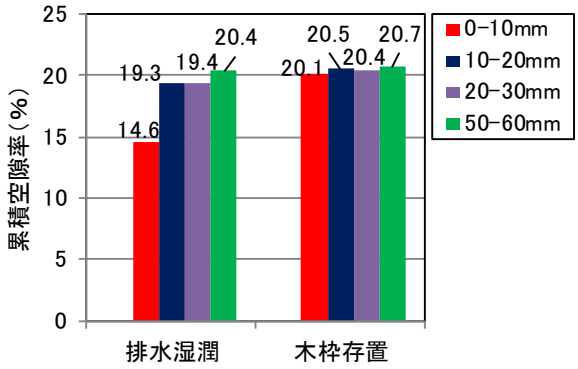
表－3　模擬部材の表層透気係数と表面吸水速度

測定項目	排水湿潤	木枠存置
表層透気係数 [$10^{-16}m^2$]	0.003	0.114
電気抵抗値 [kΩcm]	19.3	21.4
表面吸水速度P600 [$ml/m^2/s$]	0.015	0.05
含水率 [%]	4.9	5.3

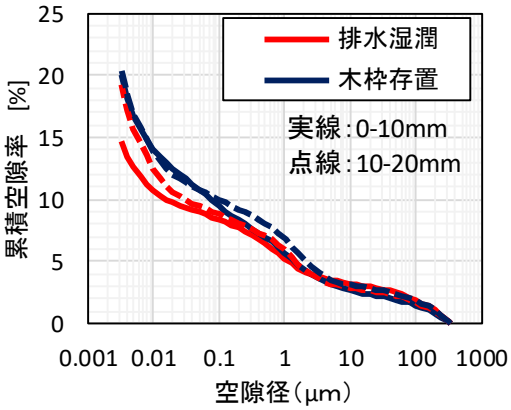
する前にコンクリートの含水率（T 社，CMEXⅡ）を測定した。非破壊試験は，材齢 98 日で測定を行った。非破壊試験終了後，上端から 600mm の位置においてφ100mm のコア供試体を採取した。採取したコア供試体を用いた試験として圧縮強度，水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った。圧縮強度は，JISA1107 に準拠し，材齢 105 日にて 3 体の試験を行った。コア供試体の成形は，φ100×200mm となるように背面側をカットし，養生の差が明確になるように表層側はカットせず研磨のみとした。水銀圧入法による細孔径分布は，コア供試体を用いて養生面から 0-30 mm の 10mm 毎と 50-60 mm の深度から 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。

リバウンドハンマーの反発度とコア供試体の圧縮強度の測定結果を**表－2** 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。一方，コア供試体の圧縮強度では，排水湿潤連続養生は，木製型枠存置よりも約 8%の向上となっている。これは，養生による品質向上効果は表層に限定されコンクリート内部ほどその効果が小さくなるため，φ100×200mm のコア供試体を用いた圧縮強度では，養生による品質向上効果がリバウンドハンマーの反発度よりも相対的に減少したためであると考えられる。

表層透気係数，表面吸水速度の測定結果を**表－3** に示す。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，表面吸水速度については 1/3 以下となっており，コンクリート表面の品質が著しく向上していることが確認できた。水銀圧入法の測定により得られた細孔径分布を**図－3**，細孔径分布を累積して得られた空隙率を**図－4** に示す。排水湿潤連続養生の累積空隙率は，既往の研究結果 [1]と同様に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，養生の効果を確認することができた。特に，型枠面から 0-10mm において効果が顕著であり，その空隙構造は木製型枠存置の場合よりも著しく空隙構造も緻密化しており，これまで同様の品質向上効果を確認することができた。以上の結果から考案した施工方法により確実に



図－4　空隙率の測定結果



図－3　0-10mm，0-20mm の空隙分布

写真－1　覆工コンクリートにおける余剰水の排出

施工でき，既往の研究成果 [1]と同等の養生効果が得られることを確認した。

3.3 坑門工壁面部の型枠構造

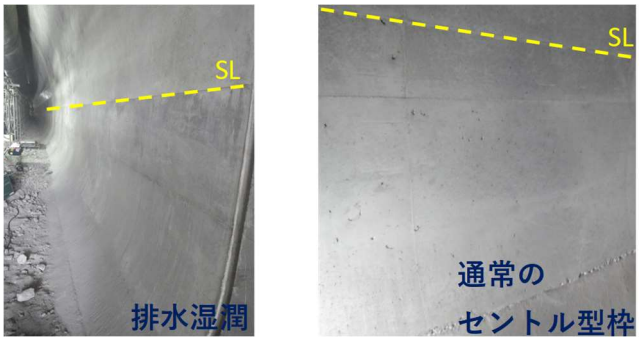
これまで高さ 5-6m 程度の壁構造物において，透水板をせき板として使用し施工した実績 [2]はあったが，坑門工壁面部は，通常，壁の高さ約 10m を連続してコンクリートの打込みを行う。そのため，透水板のみでは，型枠の強度不足による仕上がり面の平滑性の不良が懸念されたため，透水板をせき板と使用せずに透水板の背面を木製型枠による補強を行い，木製型枠をせき板として使用した排水湿潤連続養生の型枠とした。

4. 実構造物への適用

4.1　覆工コンクリートへの適用

起点側坑口から約 30m，終点側坑口から約 20mの区間について SL 下部の覆工コンクリートに排水湿潤連続養

写真－2　セントル型枠移動後の湿潤養生状況



写真－3　覆工コンクリートの SL 下部の外観

生を適用した。設計覆工コンクリートの厚さは 0.35-0.49m である。排水湿潤連続用の型枠ユニット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。コンクリートの配合を**表－1** に示す。余剰水の排出状況を**写真－1** に示す。余剰水の排出量は，2.59kg/m^2 であった。これは，壁高欄における余剰水の排出量 [1]約 1.0 kg/m^2 よりも多い量であった。その要因として，本工事における覆工ではインバートから天端までのコンクリート高さが 7.5m 程度あることから SL 下部には壁高欄よりも大きなコンクリートの自重が作用したためであると考えられる。コンクリート打込み翌日に，排水湿潤連続養生用型枠ユニットを残置する形で，セントル型枠のみを脱型し，次の施工ブロックに移動した。セントル型枠移動後の湿潤養生状況を**写真－2** 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，保水養生テープを用いて材齢 28 日まで封かん養生を行った。コンクリートの外観状況を確認したところ，SL 下部の曲面部は勾配がついているため，通常のセントル型枠のブロックでは空気泡が残っているが，本型枠構造を適用したブロックでは，空気泡は非常に少なく良好な仕上がりであった(**写真－3**)。

4.2　坑門工壁面部への適用

高さ 9.5m，幅 25.5m，壁厚 0.5m の起点側，終点側の坑門工の壁面部に排水湿潤連続養生を適用した。コンクリートの配合を**表－4** に示す。コンクリートの打込み後，材齢 1 日まで余剰水の排出を行った。(**写真－4**)その後，天端への湛水および天端から高さ 4.5m 付近に設置してある排水孔から透水型枠に注水することで高さ 9.5m の壁部材に対して天端から下端まで均一な湿潤養生を材齢 7 日まで実施したのち，脱型した。坑門工壁面部のコンクリート外観を**写真－5** に示す。外観は余剰水排水の効果により空気泡が非常に少ない仕上がりであった。

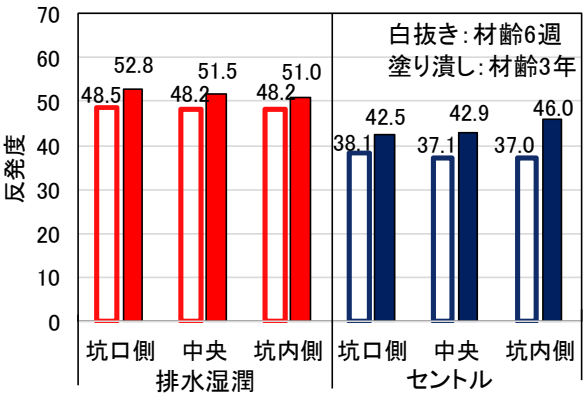
表－4　坑門工に用いたコンクリートの配合

SL	Air	W/C	s/a	単位量(kg/m^3)				
cm	%	%	%	W	C	S	G	C×%
18	4.5	48.9	42.0	168	344	725	1008	1.0

C：高炉セメントB種

写真－4　坑門工における余剰水の排出状

写真－5　坑門工の外観

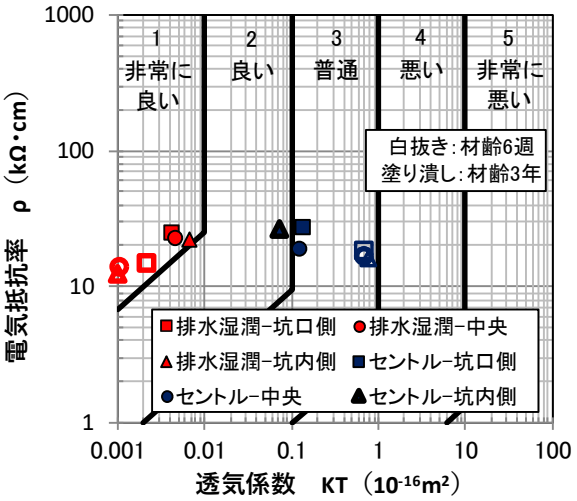


図－4　覆工におけるリバウンドハンマーの反発度

5. 実構造物における品質向上効果

5.1　覆工コンクリート

品質向上効果を確認するため，非破壊試験として，リバウンドハンマーの反発度（JIS A 1155），表層透気係数 [5]，表面吸水速度 [6]を測定した。表層透気係数，表面吸水



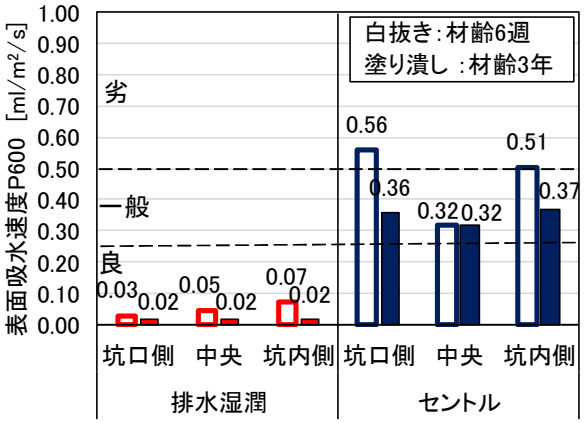
図－5　覆工コンクリートの表層透気係数

速度を測定する前にコンクリートの含水率（T 社，CMEX Ⅱ）を測定した。表層透気係数は各測定位置で 3 点，表面吸水速度は 2 点測定し，その平均値を測定結果とした。測定位置は，測定対象ブロック 12m の中央，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，SL 下部の排水湿潤連続養生部と SL 上部セントル型枠部にて行った。測定材齢は，6 週に加え 3 年にて行い，長期材齢における養生効果について検証した。

リバウンドハンマーの反発度の計測結果を**図－4** に示す。排水湿潤連続養生における反発度は，材齢 6 週では約 1.2 倍，材齢 3 年では約 1.1-1.2 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。表層透気係数の計測結果を**図－5** に示す。排水湿潤連続養生における表層透気係数は，セントル型枠部と比較して材齢 6 週では，1/100 以下，材齢 3 年では，1/20 以下となっている。排水湿潤連続養生部では，材齢の経過とともに透気係数が増加しているが，セントル型枠部は，逆に表層透気係数が低下している。その要因としてコンクリートの含水率(**表－5**)に着目すると，セントル型枠部の材齢 3 年のコンクリートの含水率が 6.0%程度と測定時の含水率の上限 5.5%を超えており，排水湿潤連続養生部よりも 1.0%以上高い含水率となっていることがわかる。一般的には材齢の経過によるコンクリートの乾燥の進行により，表層透気係数が増加すると報告されている [7]が，セントル型枠部では，コンクリートの含水率が高いため材齢 3 年における表層透気係数が低下したと考えられる。しかしながら，同じ環境条件でも排水湿潤連続養生部では含水率が，セントル型枠部ほど高い値とはなっていない。これは，排水湿潤連続養生部では後述する表面吸水速度が非常に小さいことからも明らかなように養生効果によって表層が緻密化しているため，表面からの吸水が小さいためである。同じ環境条件でも表層品質によって含水率が異なり，緻密なものほど含水率が

表－5　覆工コンクリートの含水率（%）

測定位置	排水湿潤		セントル（封かん28日）	
	材齢6週	材齢3年	材齢6週	材齢3年
坑口側	4.4	4.7	5.1	5.9
中央	4.4	4.7	4.7	6.1
坑内側	4.2	4.8	4.7	6.1



図－6　覆工コンクリートの表面吸水速度

表－6　坑門工の反発度の測定結果

測定位置	排水湿潤	木枠存置
壁面下部	47.4	39.6
壁面中部	47.9	
壁面上部	49.4	

低くなり，見かけ上透気係数の差が小さくなる可能性が示された。長期材齢における計測を行う場合には含水率に留意が必要であり，計測結果の中には表層透気係数の値以上の差が潜在している場合があることも考えられる。表面吸水速度の計測結果を**図－6** に示す。排水湿潤連続養生における表面吸水速度は，セントル型枠と比べ材齢 6 週では 1/6 以下，材齢 3 年では 1/20 以下であり，長期材齢においても品質向上効果が保たれていることが確認された。また，セントル型枠部における測定結果が含水率により大きく変動していないことから，表面吸水速度の方が表層透気係数よりも含水率の影響を受けにくい結果であると推察される。

いずれの測定結果においても，排水湿潤連続養生の高い品質向上効果，その効果が持続していることが確認された。

5.2　坑門工壁面部

起点側の坑門工壁面部において，リバウンドハンマーの反発度（JIS A 1155），表層透気係数 [5]，表面吸水速度 [6] を測定した。表層透気係数，表面吸水速度を測定する前にコンクリートの含水率（T 社，CMEX Ⅱ）を測定した。表層透気係数は各測定位置で 3 点，表面吸水速度は 2 点測定し，その平均値を測定結果とした。測定位置について，排水湿潤連続養生部は，坑門工壁面上部（天端から

1.0-1.5m)，中部(天端から 3.5-4.0m)，下部(天端から 8.0-8.5m)の位置，木製型枠部は，坑門工壁面の背面側の天端から 0-0.5m の位置にて行った。測定材齢は 20 週とした。

リバウンドハンマーの反発度の計測結果を**表－6** に表層透気係数と表面吸水速度の測定結果を**図－7**，**図－8** に示す。排水湿潤連続養生における反発度は，木製型枠部よりも約 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。同様に表層透気係数のでは，1/40 以下，表面吸水速度は，1/5 以下となっており，表層品質の著しい向上を確認することができた。

6. まとめ

本研究では，覆工コンクリートの SL 下部に排水湿潤連続養生を適用するために新たな型枠構造を考案し，坑口部壁面とあわせて実構造物へ適用した。加えて，排水湿潤連続養生の適用効果として覆工コンクリートの SL 下部については，材齢 6 週と 3 年，坑門工壁面部については材齢 20 週における品質向上効果を非破壊試験により調査した。

得られた知見は以下のとおりである。

・SL 下部のセントル型枠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とすることで覆工コンクリートの施工サイクルに影響を与えることなく排水湿潤連続養生を実施することができる。

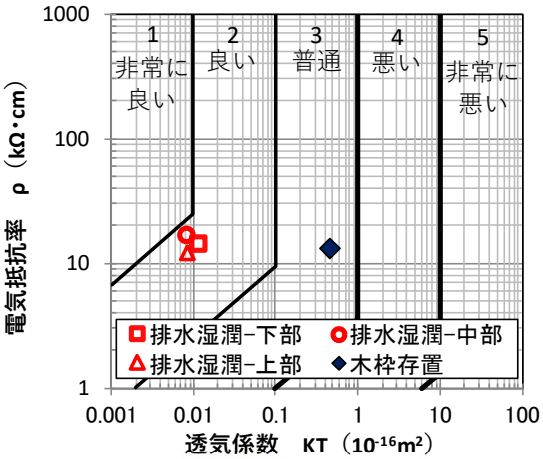
・排水湿潤連続養生を適用することによりセントル型枠部，木製型枠と比較してリバウンドハンマーの反発度の上昇，表層透気係数の減少，表面吸水速度の減少など表層品質が大きく向上していること，長期材齢においてもその品質向上効果が保たれていることが確認できた。

・同じ環境条件でも表層品質によってコンクリートの含水率が異なり，緻密なものほど含水率が低くなることから見かけ上表層透気係数の差が小さくなり，表層品質の差が確認しにくくなる可能性が示された。計測結果の中には表層透気係数の値以上の差が潜在していることも考えられる。

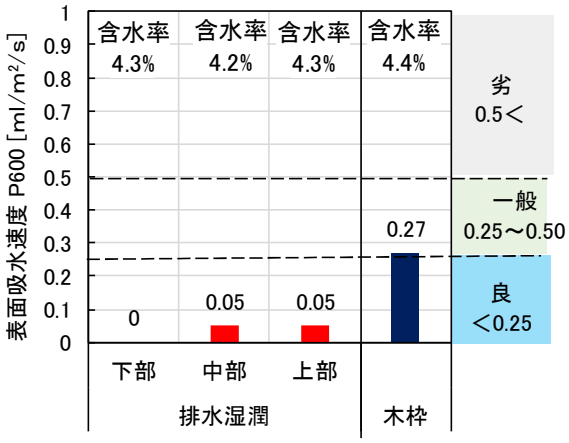
本稿においてトンネル構造物への適用について検討したが今後も工種や部材の条件等に合わせて施工方法を適宜改良していくことにより，より多くの構造物への適用を図ることとしたい。

謝辞

本技術の現場適用および公表にあたり，国土交通省東北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。



図－7 坑門工の表層透気係数



図－8 坑門工の表面吸水速度

参考文献

1) 臼井達哉，他：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，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol.53，No.10，2015.10

2) 臼井達哉：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，東京大学学位論文 2018.9

3) 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），2015.5

4) 土木学会：トンネルライブラリー第 12 号，山岳トンネル覆工の現状と対策，p58，2002

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) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.69，No.1，pp82-97，2013

7) 蔵重勲，他：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