

論文 スリップフォーム工法におけるコンクリートの耐久性に関する検討

松元 淳一*1・堀口 賢一*2・高木 宏彰*3・丸屋 剛*4

要旨: スリップフォーム工法は、コンクリート強度が十分に発現する前に型枠を移動することによる表面の乱されやせん断力の影響によって、コンクリートの耐久性が懸念される。本研究では、スリップフォーム工法におけるコンクリートの耐久性の定量的評価を目的として実験的検討を行った。その結果、コンクリートに硬化促進剤を添加し、凝結や超若材齢時のコンクリートの強度を調整することで、スリップフォーム工法におけるコンクリートの品質改善効果を確認した。また、コンクリート表面を型枠脱型直後に仕上げ処理することで、美観だけではなく、耐久性も向上することが明らかとなった。

キーワード: スリップフォーム工法, 早期脱型, 硬化促進剤, 仕上げ処理, 耐久性

1. はじめに

スリップフォーム工法は、急速施工工事の代表的な工法であり、鋼製型枠内にコンクリートを投入し、内部で締固めを行うと同時に、型枠を上昇させることにより同一断面の構造物を連続的に構築していくコンクリート連続打設工法である^{1),2)}。

スリップフォーム工法によるコンクリート構造物の施工例としては、これまで、防護柵や円形水路などの限られた構造物であり、耐久性を殆ど必要としないものであった。しかしながら、近年、工期短縮やコスト削減の観点から、重要構造物にもスリップフォーム工法の適用が検討されており、スリップフォーム工法により施工したコンクリートの耐久性を定量的に評価することや耐久性向上のための品質改善手法を確立することなどが望まれている。

そこで本研究では、スリップフォーム工法におけるコンクリートの耐久性の定量的評価を目的として実験的検討を行った。実験は、大きく分けてスリップフォーム工法に適用するコンクリートのフレッシュ性状と耐久性の2項目とした。

2. フレッシュ性状に関する検討

2.1 検討概要

スリップフォーム工法に適用するコンクリートの配合選定に際し、幾つかの目標品質を設定した^{3),4)}。コンクリートの目標品質を表-1に示す。配合の決定方法として、打込み時のスランブを15±2.5cmと設定し、ここから、施工によるロス1cmを加えて、荷卸し時(コンクリート練上がりから30分後)のスランブは16±2.5cm、空気量4.5±1.5%を目標として配合を定めた。使用材料

は表-2に示すように、セメントは低熱ポルトランドセメント(密度3.24g/cm³)および高炉セメントB種(密度3.04g/cm³)の2種類、細骨材としては兵庫県西島産陸砂(表乾密度2.57g/cm³, 吸水率2.08%)と福岡県東谷鉦山

表-1 コンクリートの目標品質

項目	目標値
荷卸し時のスランブ	16±2.5cm
スランブの保持時間	練上がりから1.5時間
空気量	4.5±1.5%
打重ね時間	注水から2.5時間以上 (貫入抵抗値が0.07N/mm ² 以下)
脱型時間・脱型強度	脱型: 打込み開始から5時間後 (脱型強度: 0.06N/mm ² 以上)

表-2 使用材料

水	上水道水
セメント	低熱ポルトランドセメント(密度:3.24g/cm ³) 高炉セメントB種(密度:3.04g/cm ³)
細骨材①	兵庫県西島産陸砂 (表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率2.08%)
細骨材②	福岡県東谷鉦山産石灰石砕砂 (表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率0.67%)
粗骨材①	兵庫県西島産碎石(2010) (表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.38%)
粗骨材②	兵庫県西島産碎石(1505) (表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率0.82%)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系(密度1.01g/cm ³)
硬化促進剤	硬化促進剤(I種)(密度1.42g/cm ³)

*1 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 (正会員)

*2 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 課長 (正会員)

*3 大成建設株式会社 土木本部 土木設計部 陸上第一設計室 課長

*4 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 室長 (正会員)

表-3 コンクリートの配合

	荷卸し時 スランプ	荷卸し時 空気量	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							
						W	C	S1	S2	G1	G2	SP (C×)	硬化促進剤
LPC	16±2.5cm	4.5±1.5%	20	36.0	47.6	170	472	243	566	528	352	0.525%	0.25L/(C:100kg)
BB			20	52.0	47.5	170	327	257	600	558	373	0.525%	0.25L/(C:100kg)

産石灰石砕砂(表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 0.67%)を3:7(容積比)の割合で用いた。粗骨材には兵庫県西島産の砕石(骨材寸法 20~10mm:表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.38%, 骨材寸法 15~5mm:表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 0.82%)を使用した。また、混和剤として高性能 AE 減水剤(単位セメント量に対する割合:0.525%)および硬化促進剤を使用した。実験対象とするコンクリートの概要を図-1に示す。本実験では、打上がり高さ 1.5m を6層に分けて打込む計画とした(1層高さ:250mm)。また、1層の打込みにかかる時間は、型枠移動まで含めて1時間の計画とした。なお、型枠移動は1層目打込み終了直後から開始するため、型枠移動開始から5時間後には1層目のコンクリートが脱型され始めることになる。

コンクリートの打重ねについては、土木学会「コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策」に記載されている、コンシステンシーの低下から判断する場合のプロクター貫入抵抗値の閾値である、0.07N/mm²以下を打重ね可能時間とし、本実験では、少なくとも注水から2.5時間以上になるようにした。

一方、脱型時強度としては、想定される上載荷重以上の強度を有する必要があると考え、ここでは、0.06N/mm²以上とした。対象とした構造物は、型枠移動開始から5時間後に1層目が脱型されるため、1層目の打込み開始から5時間後には、0.06N/mm²を上回ることにした。

2.2 室内試験練り結果および考察

コンクリートの配合を表-3に示す。選定した配合の特徴としては、早期に強度が発現するように、無機系窒素化合物(亜硝酸塩, 硝酸塩)を主成分とした硬化促進剤を使用したことである。この硬化促進剤の使用方法は流動化コンクリートのように予め練り混ぜられたコンクリートに添加するものであり、今回の実験では、荷卸し時にプラントから運搬したコンクリートに硬化促進剤を添加することを想定し、練上がり30分後に添加を行った。なお、練り混ぜ時は、硬化促進剤の添加量分を練り混ぜ水から予め差し引くこととした。なお、室内試験練りは、温度 20±2℃, 湿度 60±5%の環境で実施した。

硬化促進剤の添加量を変化させたコンクリートのスランプの経時変化を図-2に示す。硬化促進剤の添加量は、添加なし, 0.25L/(C:100kg), 0.70L/(C:100kg)および1.40L/(C:100kg)の4ケースとした。硬化促進剤の添加によるスランプへの影響は、セメントの種類によって異な

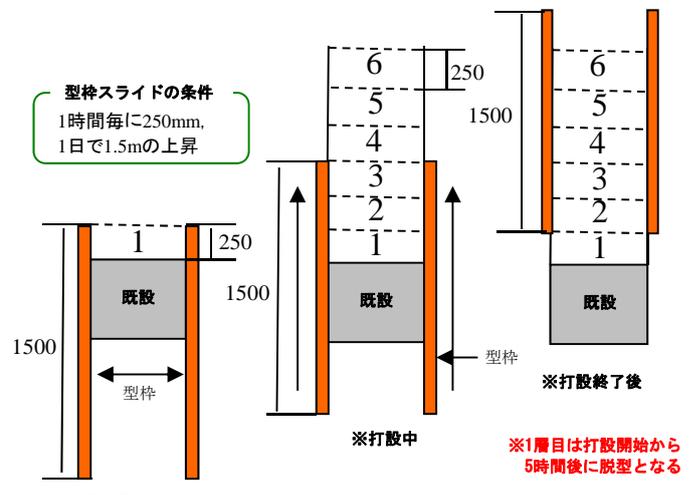
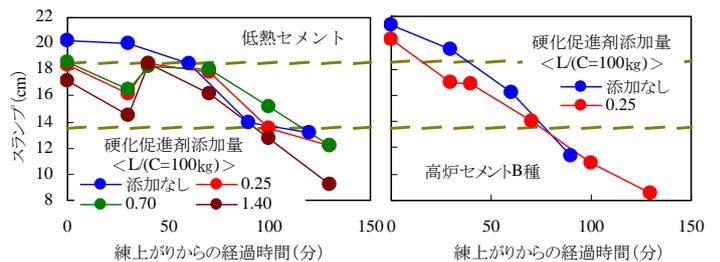


図-1 実験対象とするコンクリートの概要



(練上り時のコンクリート温度: 18.5~21.0°C)
図-2 スランプの経時変化

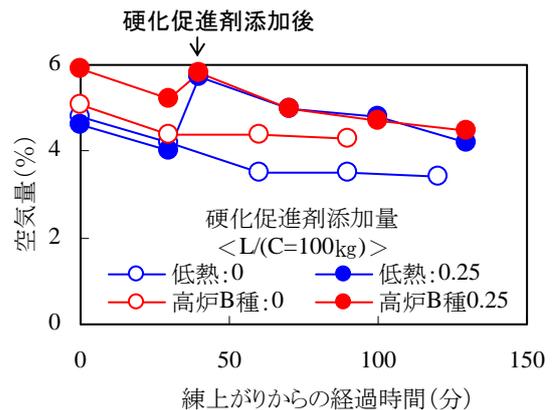


図-3 空気量の経時変化

っており、低熱ポルトランドセメントでは添加後でスランプが大きくなる傾向(2~4.5cm)が認められた。さらに、硬化促進剤の添加量が、通常の使用量(1.0~2.0 L/C=100kg)より少量のものは、スランプ保持性が幾分高まる傾向にあった。一方、高炉セメントB種の場合では、低熱ポルトランドセメントの硬化促進剤同一添加量[0.25L/(C:100kg)]と比べて、添加前後によるスランプ

の変化は小さく、その後のスランプロスも大きかった。セメントの種類によって性状が異なる要因として、低熱ポルトランドセメントの場合では、図-3に示すように、硬化促進剤を添加した直後に空気量が4%から5.7%に大幅に増加しており、このことがコンクリートの性状に直接影響していると推察される。

図-4に低熱ポルトランドセメントを用いた場合の硬化促進剤の添加量と型枠脱型時（練上がりから5.5時間後、硬化促進剤添加から5時間後）の圧縮強度の関係を示した。これより、硬化促進剤の添加量が多くなる従って圧縮強度は直線的に大きくなる傾向が認められ、添加量を制御することで脱型時の強度を調整することは可能であると考えられる。

図-5には、それぞれのセメントを用いた場合の超若材齢時における圧縮強度の経時変化を示す。硬化促進剤添加の有無の如何に拘らず、硬化促進剤添加から5.0時間後に目標値（0.06N/mm²）以上を示した。しかしながら、低熱ポルトランドセメントでは、硬化促進剤を添加しない場合、0.06N/mm²程度と小さい。したがって、施工時期によって、硬化促進剤の添加量を増減することで、スリップフォーム工法へ適用可能な配合が選定できると考えられる。

図-6にプロクター貫入抵抗値の経時変化を示す。硬化促進剤を添加することで、打重ね可能時間が短くなる状況が認められた。現状の配合を外気温が20℃の環境で使用した場合、打重ね可能時間（練上がりから）は、低熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種で、それぞれ3.5時間、3.0時間と判断できる。

以上のことから、コンクリートに硬化促進剤を添加し、凝結や超若材齢時のコンクリートの強度を調整することで、スリップフォーム工法におけるコンクリートの品質改善効果を得られると考えられた。

3. 実物大供試体の製作

製作する供試体は、図-7に示すような、□1600×700×750mm（3層250mm）の形状・寸法とした。供試体に埋設する内部鉄筋は、縦筋 D22@235mm、横筋 D41@200mmをかぶり30mm位置になるように配置した。供試体の要因と水準を表-4に示す。コンクリート配合は表-3の低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の2種類の配合において、練上がり30分後に硬化促進剤を添加し、スリップフォーム工法および比較用の通常型枠工法による打込みを行った。

打設スケジュールを表-5に、打設手順を図-8に示す。スリップフォーム工法の場合、1層目～3層目のコンクリートは、硬化促進剤添加後のフレッシュ性状を確認し、ホッパにて打込みを行った。打込み終了後からのメ

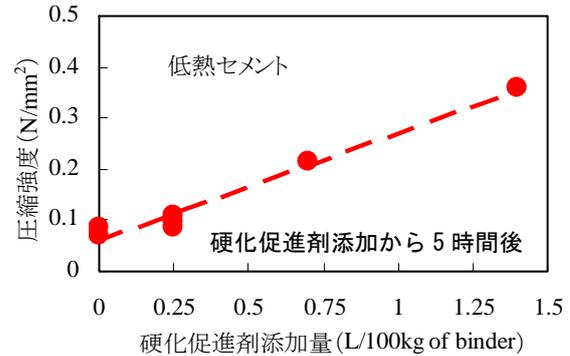


図-4 硬化促進剤の添加量と型枠脱型時強度の関係

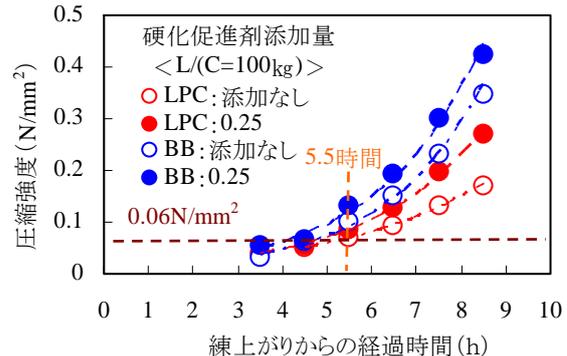


図-5 超若材齢時における圧縮強度の経時変化

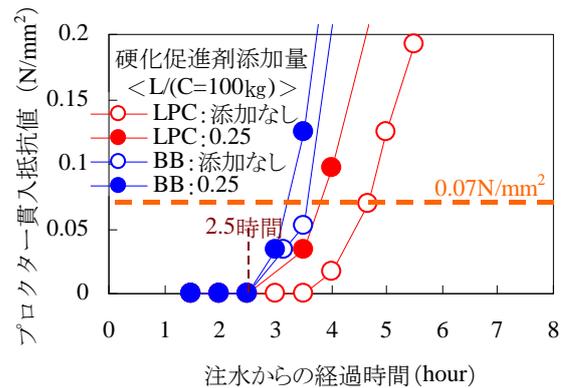


図-6 プロクター貫入抵抗値の経時変化

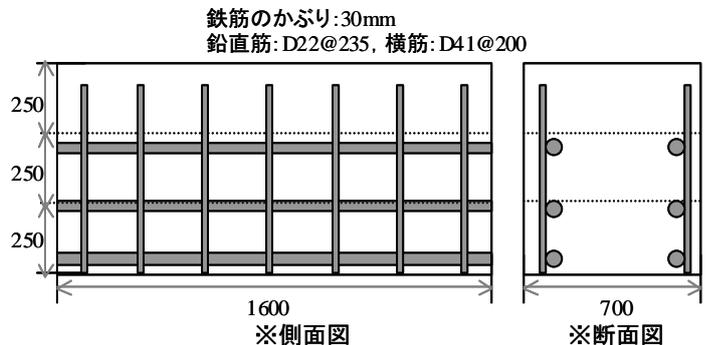


図-7 実物大供試体

表-4 供試体の要因と水準

要因	水準
コンクリート配合 (表-3)	低熱ポルトランドセメント 高炉セメントB種
製造方法	スリップフォーム工法 通常型枠工法

表-5 打設スケジュール

	スリップフォーム工法	通常型枠工法
1	打込み, 型枠移動1時間	打込み, 静置1時間
2	打込み, 型枠移動1時間	打込み, 静置1時間
3	打込み, 型枠移動1時間	打込み, 静置1時間
4	上載荷重設置, 型枠移動1時間	上載荷重設置, 静置1時間
5	上載荷重設置, 型枠移動1時間	上載荷重設置, 静置1時間
6	上載荷重設置, 型枠移動1時間	上載荷重設置, 静置1時間
脱型	1層目: 6層目型枠上昇時 2, 3層目: 翌日	1~3層目: 翌日

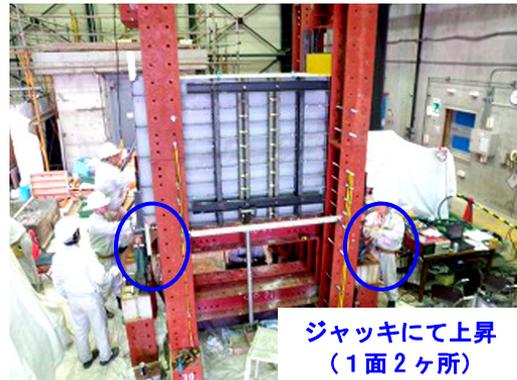


写真-1 打設状況 (型枠上昇)



写真-2 1層目脱型直後の状況

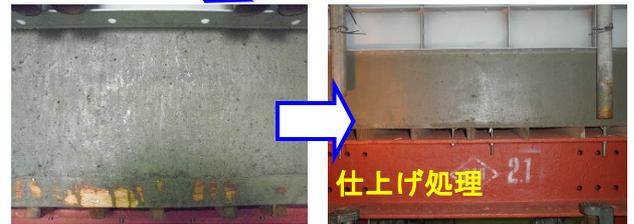


写真-3 コンクリート表面の状況

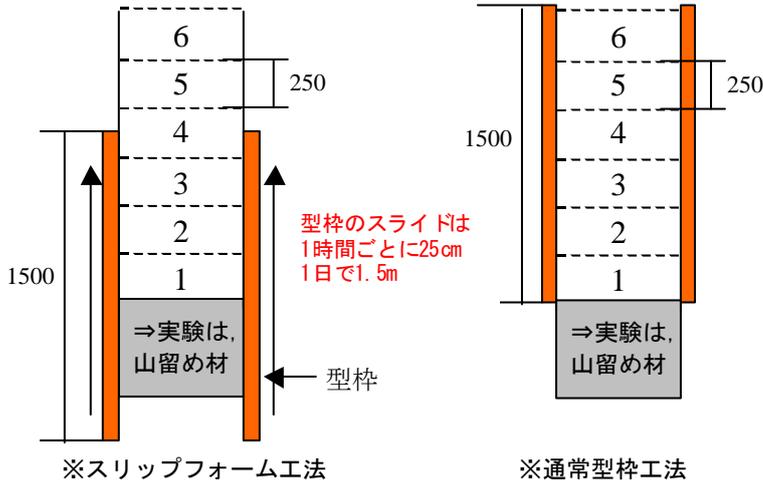


図-8 打設手順

タルフォーム型枠の上昇方法としては、写真-1に示すように、ジャッキ（1面2ヶ所）を用いて上昇させた。この際の上昇速度は、1時間で1層厚の250mmとした。4層目～6層目については、予め製作したコンクリート供試体（1層の形状：□1590×680×250mm）を各層上載荷重として設置した後に、ジャッキにてメタルフォーム型枠を1時間で250mm上昇させた。なお、6層目の上載荷重用コンクリートを設置してからの型枠の上昇の際には（1層目打込み開始から5時間後）、上昇に伴って1層目が脱型される状況となる。1層目脱型後はコンクリート表面の目視観察を行った後に金ごてによる仕上げ処理を行い、溶剤系アクリル樹脂が主成分である養生剤を規定量（5m²/l）塗布した。

一方、通常型枠工法の1層目～3層目のコンクリートは、スリップフォーム工法と同様に硬化促進剤を添加したコンクリートとした。スリップフォーム工法と異なり、型枠移動がないため、打込み終了から1時間静置した後に上位層のコンクリートを打設することとした。また、4層目～6層目については、予め製作したコンクリート供試体を上載荷重として設置した。コンクリートの脱型は打設翌日に行い、養生剤をコンクリート表面に塗布した。なお、いずれの工法においても各層の生コンクリートの締固めについては土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕に準拠して行った。

写真-2にスリップフォーム工法の1層目脱型直後の状況を示す。型枠近傍に存在した粗骨材が、型枠移動の

際に一緒に持ち上げられる状況が認められ、コンクリート表面には、気泡や皸が多く観察された。ただし、1層脱型後に仕上げ処理を行うことで、コンクリート表面の気泡や皸は、取り除くことができることを確認した。

4. 耐久性に関する検討

4.1 供試体表面の状況

実物大供試体それぞれの表面の状況を目視にて観察した。写真-3に供試体全面脱型後のコンクリート表面の状況を示す。スリップフォーム工法で製作した供試体は、仕上げ処理を行っている1層目のみコンクリート表面に変色が確認された。これに対して、仕上げ処理を行っていない、2層目および3層目は、通常型枠工法に比べて、気泡や皸が多く認められた。これより、スリップフォーム工法で製造するコンクリートは仕上げ処理が必要であることは明らかであり、仕上げ処理を施すことで品質改善効果が高まると考えられる。

スリップフォーム工法がコンクリートの耐久性に及ぼす影響の評価は、透気性、透水性、中性化性状および塩化物イオン浸透性にて行った。検討にあたっては、透気性はコンクリート表面から測定するトレント法による評価とした。一方、残りの項目については、図-9に示すように、1層目よりφ10cmのコアを採取して行った。

4.2 透気性

透気性は表面目視観察後の材齢2日時点で実物大供試体の1層目と2層目に対してトレント法にて評価した。

図-10にトレント法から得られた各層の透気係数を示す。なお、透気係数は、測定位置に関係なく、評価対象とする1層目および2層目のそれぞれ6点のデータを平均したものである。スリップフォーム工法で製作した供試体の透気係数は、測定位置の違いによるばらつきが大きく、特に、仕上げ処理を行っていない2層目で顕著であった。また、セメント種類の如何に拘らず、スリップフォーム工法の方が通常型枠工法よりも透気係数は大きくなる結果を示した。ただし、スリップフォーム脱型後に金ごて仕上げ処理を行った1層目は、通常型枠工法と同程度の透気係数を示していることから、スリップフォーム工法の場合においても脱型直後に仕上げ処理を行うことによって、通常型枠と同程度の透気性を確保することができると考えられる。

4.3 透水性

図-11には、材齢7日のコア供試体に対して透水量試験を7日間行った後の透水量および通常型枠工法に対する透水比を示した。試験方法は、表面含浸材の試験方法(案)JSCE-K571-2005に準拠した。ただし、試験中の供試体の条件を一定とするため、24時間水中浸せき、40℃環境で5時間乾燥の過程の後にコア採取面(実物大供試体表層)にメスピペットを取り付けて開始した。3体の平均から、通常型枠供試体に対するスリップフォーム供試体の透水比を求めると、低熱セメント、高炉セメントB種で、それぞれ1.11、0.94であり、スリップフォーム工法で施工したコンクリートの透水性は、仕上げ処理を行うことで通常型枠工法と同程度になると考えられ

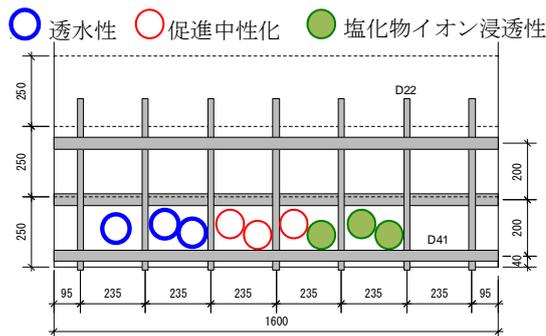


図-9 コア供試体の採取位置

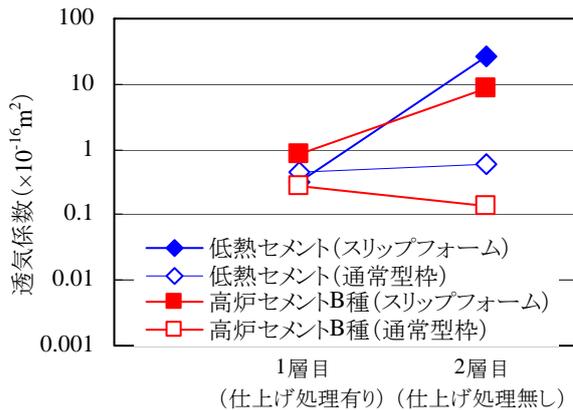


図-10 各供試体の透気係数

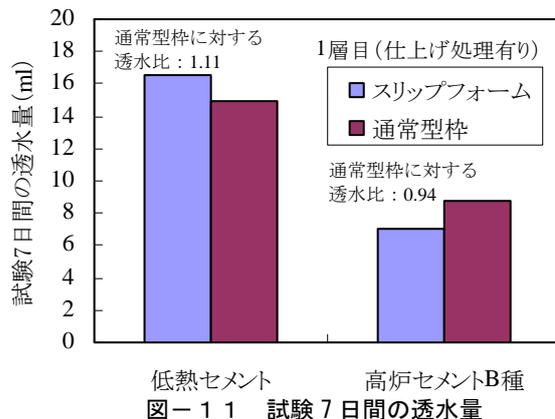


図-11 試験7日間の透水量

る。また、高炉セメントの方が低熱セメントよりも透水量が少なく、初期材齢においても緻密であることを改めて確認した。

4.4 促進中性化

試験に用いた供試体は、採取したコア供試体を表層から深さ10cmで切断した表層供試体および深さ10cm以降の内部供試体である。表層供試体は実物大供試体のコンクリート表層を試験面とし、他の側面および底面をエポキシ樹脂にて被覆した。内部供試体も試験面を除く他の面を同様に被覆した。試験は、JIS A 1153の促進中性化試験とし、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、 CO_2 濃度 $5 \pm 0.2\%$ の環境下で材齢10日後から13週間実施した。

低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の表層・内部供試体において「促進中性化試験」を13週間行った後の中性化深さを図-12に示す。実物大供試体の

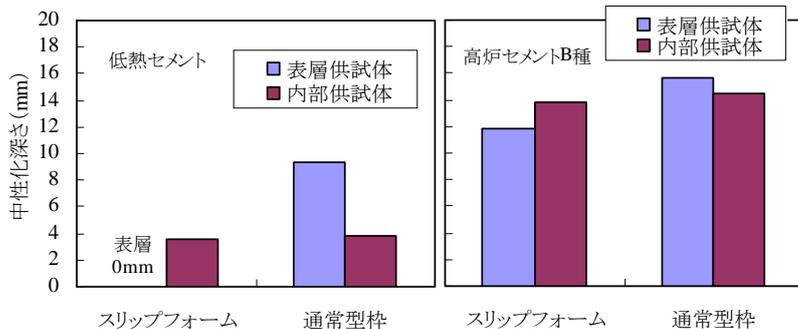


図-1 2 促進中性化試験を13週行った後の中性化深さ

表層から深さ10cm以降の内部供試体において、スリップフォーム工法と通常型枠工法を比較すると、セメント種類の如何に拘らず、スリップフォームと通常型枠はほぼ同程度であり、スリップフォーム工法が構造物内部へ及ぼす影響はないと考えられる。次に、スリップフォーム工法において、表層供試体と内部供試体を比べると、通常型枠工法とは逆に表層の方が内部よりも小さくなる傾向を示した。これは、スリップフォーム工法の1層目脱型直後に行った仕上げ処理が影響しており、型枠移動の際に発生した気泡や皺などの表層の乱れを押えることで、コンクリート表層がより密実になったものと考えられる。

4.5 塩化物イオン浸透性

塩化物イオン浸透性は電気泳動試験にて評価した。

実験供試体は採取したコア供試体を表層深さ5cmで切断したものである。実物大供試体におけるコンクリート表層を試験面とし、コア供試体の表面・底面を除いた側面のみをエポキシ樹脂にて被覆して、試験に供した。電気泳動試験は、JSCE-G571-2007に準拠し、実物大供試体でコンクリート表層であった方を陰極側とした。なお、いずれの供試体も材齢10日から試験を開始した。

図-1 3にスリップフォーム工法および通常型枠工法それぞれのコア供試体に対して行った電気泳動試験から算出した塩化物イオン実効拡散係数を示す。高炉セメントB種使用コンクリートの水セメント比は、低熱ポルトランドセメントよりも大きいですが、実効拡散係数はかえって小さくなっており、高炉セメントB種の塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は明らかに高いことを改めて確認した⁵⁾。スリップフォーム工法と通常型枠工法を比較すると、セメント種類の如何に拘らず、スリップフォーム工法の方が塩化物イオン実効拡散係数は小さくなる結果を示した。

5. まとめ

本研究では、スリップフォーム工法に適用するコンクリートのフレッシュ性状の把握およびスリップフォーム工法がコンクリートの耐久性に及ぼす影響を評価することを目的に実験的検討を行った。以下の結論を示す。

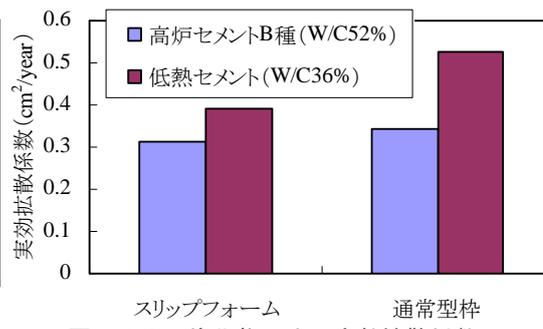


図-1 3 塩化物イオン実効拡散係数

(1) スリップフォーム工法に適用するコンクリートの配合選定では、超若材齢時の硬化促進と打重ね可能時間の相反する要求性能がある。この性能を満足するためには、硬化促進剤の添加量を調整し、超若材齢時の硬化特性、コンクリートの凝結特性のそれぞれを把握したうえで、配合を選定することが望ましい。

(2) 型枠近傍に存在した粗骨材が、型枠移動の際に一緒に持ち上げられる状況が認められ、コンクリート表面には、気泡や皺が多く観察された。この対策として、脱型直後に仕上げ処理を施すことが必要であると考えられた。

(3) スリップフォーム工法は表面の乱されやせん断力の影響によって、透気性の結果からも分かるように、コンクリートの耐久性が低下する。しかしながら、コンクリート表面を型枠脱型後に仕上げ処理を行うことで、美観だけではなく、耐久性(透気性、透水性、中性化および塩化物イオン浸透性)も向上することを確認した。

参考文献

- 1) 中江兼二, 河野好孝, 三浦裕一, 大友健: 低発熱収縮補償コンクリートによる高品質遮水壁の施工-苫田鞍部ダム・コンクリートフェイシングのスリップフォーム工法-, コンクリート工学, Vol.43, No.2, 2005
- 2) 宮口友延, 福島啓一, 安藤寿之介: 高炉スラグ粗骨材コンクリートの高所圧送によるサイロ構造物の急速施工-, コンクリート年次論文集, Vol.1, pp.241-244, 2003
- 3) 伊成哲雄, 小川安良, 秋山文生, 皿海康行: スリップフォーム工法による塔体施工-函館五稜郭タワー-, コンクリート工学, Vol.43, No.12, 2005
- 4) 高野良広, 榎田忠宏, 堀川祐毅, 大友健: 高炉スラグ粗骨材コンクリートの高所圧送によるサイロ構造物の急速施工-高炉スラグ微粉末貯蔵サイロ スリップフォーム工事-, コンクリート工学, Vol.41, No.8, 2003
- 5) 松元淳一, 武若耕司, 山口明伸, 梅木真理: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物の塩害と炭酸化の複合劣化機構に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.378-391, 2009