

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実験的検討

松元 淳一^{*1}・堀口 賢一^{*1}・梁 俊^{*1}・丸屋 剛^{*1}・高木 宏彰^{*2}・福原 哲^{*3}

Keywords : slip-form construction, early de-molding, hardening accelerator, finisher, durability

スリップフォーム工法, 早期脱型, 硬化促進剤, 仕上げ, 耐久性

1. はじめに

スリップフォーム工法は、急速施工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⁾。

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^{2),3)}。コンクリートの要求性能を表-1に示す。配合の決定方法として、打込み時のスランブを $15 \pm 2.5\text{cm}$ 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 $16 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 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/cm^3 ）および高炉セメン

表-1 コンクリートの要求性能

Table 1 Request performance of concrete

| 項目 | 目標値 |
|-----------------------|--|
| 荷卸し時のスランブ (経時30分後) | $16 \pm 2.5\text{cm}$ |
| スランブの保持時間 | 練上がりから1.5時間 |
| 空気量 | $4.5 \pm 1.5\%$ |
| 許容打重ね時間 | 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 | 時間：打込み開始から5時間後 強度： 0.06N/mm^2 以上 |

表-2 使用材料

Table 2 Properties of materials

| | |
|--------------|--|
| 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 | 福岡県東谷鉾山産石灰石砕砂 (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 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室

*2 土木本部 土木設計部

*3 土木本部 土木技術部

表-3 コンクリートの配合

Table 3 Mix proportions

| | 荷卸し時 スランプ | 荷卸し時 空気量 | G _{max} (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 | | | | 52.0 | 47.5 | 170 | 327 | 257 | 600 | 558 | 373 | 0.525% | 0.25L/(C=100kg) |

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%）と福岡県東谷鉾山産石灰石砕砂（表乾密度 2.70g/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碎石（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を上回ることとした。

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

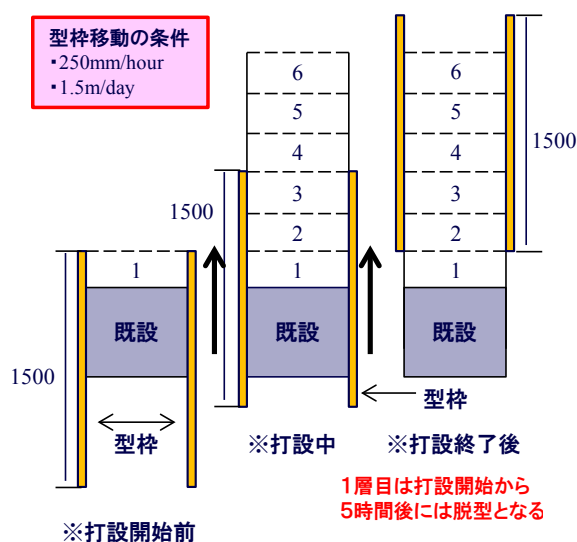


図-1 実験計画

Fig. 1 Experimental design

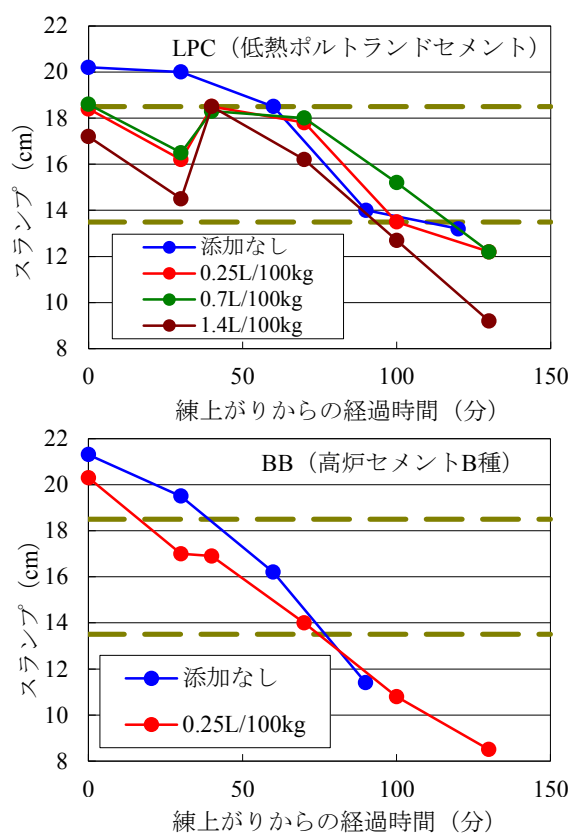


図-2 スランプの経時変化

Fig. 2 Concrete slump

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、練混ぜ時は、硬化促進剤の添加量分を練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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ 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、 $0.25\text{L}/(\text{C}:100\text{kg})$ 、 $0.70\text{L}/(\text{C}:100\text{kg})$ および $1.40\text{L}/(\text{C}:100\text{kg})$ 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っており、低熱ポルトランドセメントでは添加後スランプが大きくなる傾向 ($2 \sim 4.5\text{cm}$) 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 ($1.0 \sim 2.0 \text{ L}/\text{C}=100\text{kg}$) 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 $0.25\text{L}/(\text{C}=100\text{kg})$ 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。

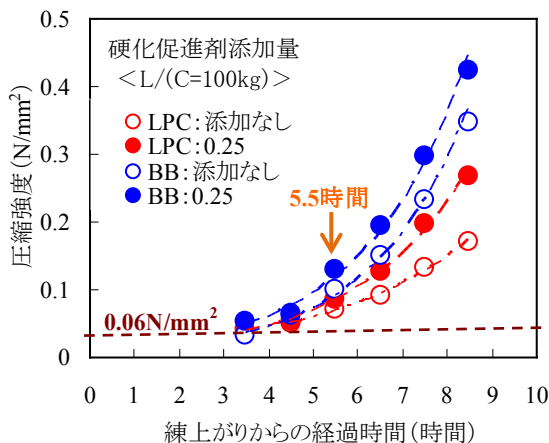


図-5 若材齢時の圧縮強度の経時変化
Fig. 5 Compressive strength of concrete

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 ($0.06\text{N}/\text{mm}^2$) 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、 $0.06\text{N}/\text{mm}^2$ 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。

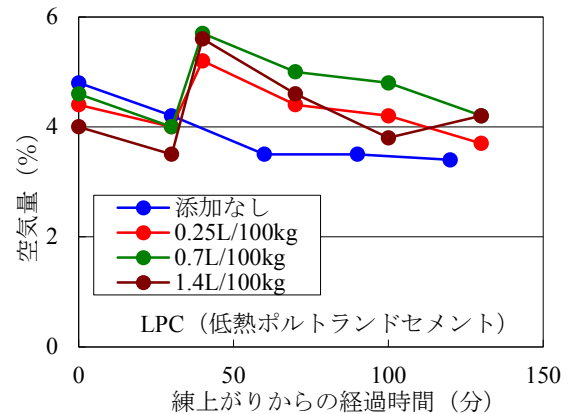


図-3 空気量の経時変化 (LPC)
Fig. 3 Concrete air using LPC

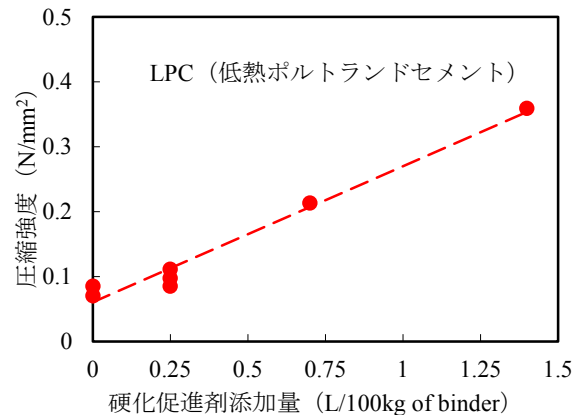


図-4 若材齢時の圧縮強度 (LPC)
Fig. 4 Compressive strength of concrete using LPC

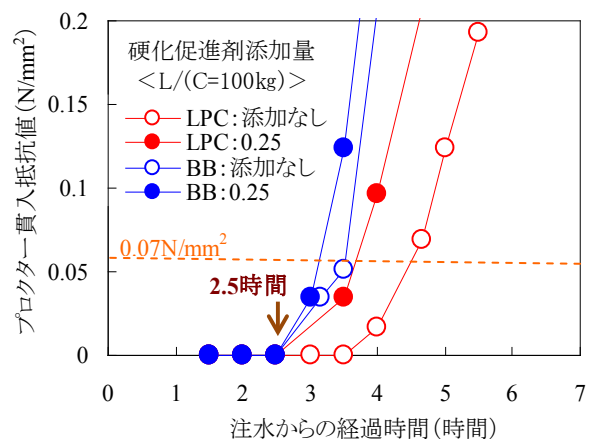


図-6 プロクター貫入抵抗値の経時変化
Fig. 6 Ohmic value of proctor needle

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（練上がりから）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。

ここで、硬化促進剤の添加がコンクリートの長期強度発現性に影響を及ぼす可能性があることが示唆されたため、所定の材齢にてコンクリートの圧縮強度試験を行った。結果を図-7 に示す。これより、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント B 種のいずれも硬化促進剤の添加による強度低下は認められず、硬化促進剤を添加しない供試体と同程度の強度発現性であった。

3. 実物大供試体の製作

供試体は、図-8 に示すような□1600×700×750mm（1 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-9 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、ホッパーにて打込みを行った。打込み終了後からのメ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 ケ所）を用いて上昇させ

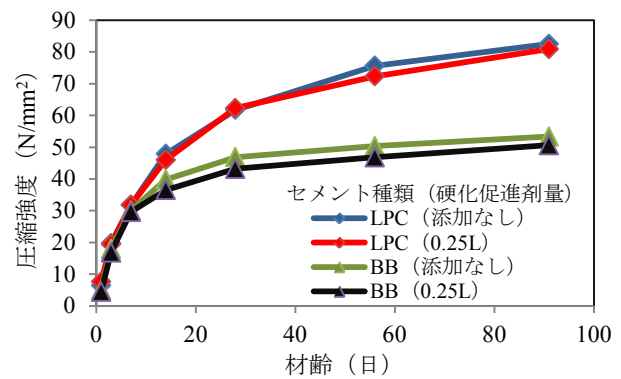


図-7 圧縮強度の経時変化

Fig. 7 Compressive strength of concrete

表-4 供試体の要因と水準

Table 4 Parameters and levels

| 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 |
| 製作方法 | 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

Table 5 Schedule of casting

| | 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 |

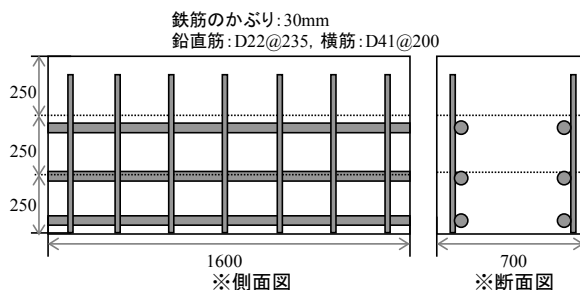


図-8 実験供試体

Fig. 8 Shape of specimen

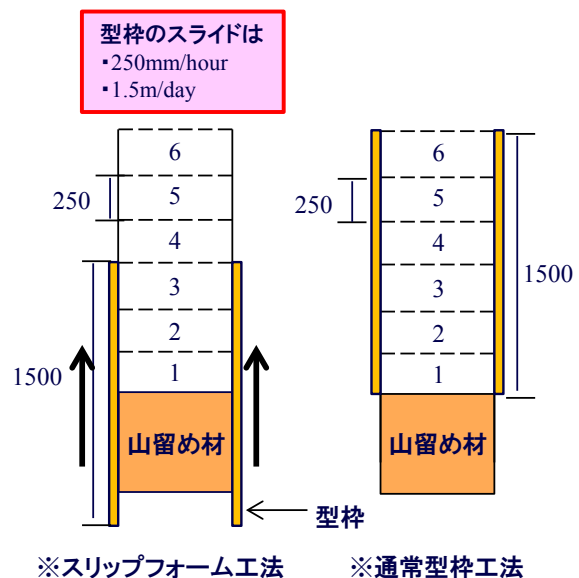


図-9 打設手順

Fig. 9 Setup of casting

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（ $5\text{m}^2/0$ ）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、気泡や皺が多く観察された。ただし、1層脱型後に仕上げを行うことで、コンクリート表面の気泡や皺は、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



写真-1 打設状況
Photo 1 Casting condition

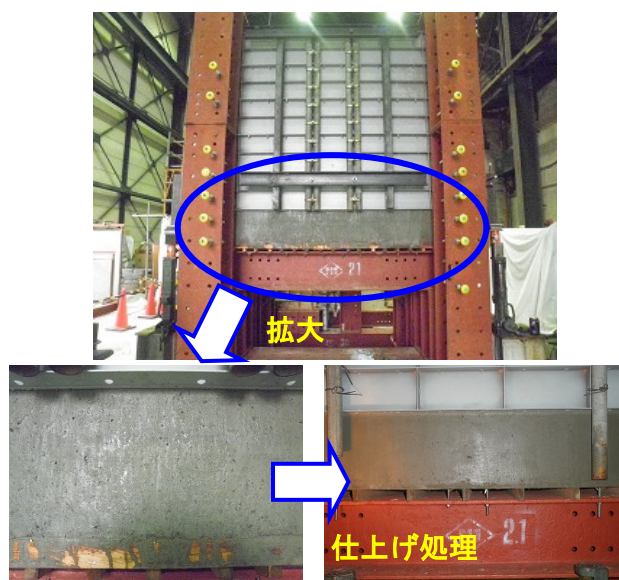


写真-2 1層目型枠脱型直後の状況
Photo 2 Concrete condition of after demolded of 1 lift



写真-3 コンクリート表面の状況
Photo 3 Concrete surface condition

体は、仕上げを行っている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、気泡や皺が多く認められた。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が必要であることは明らかであり、仕上げ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ついて行った。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-10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層目および2層目に対してトレント法にて評価した。

図-11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を行うことによって、通常型枠と同程度の透気性を確保できると考えられる。

4.3 透水性

図-12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

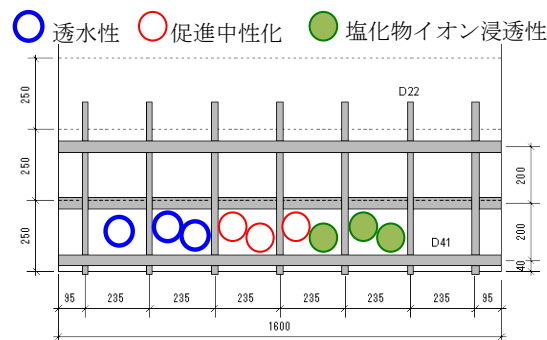


図-10 コア供試体の採取位置

Fig. 10 The extraction position of core

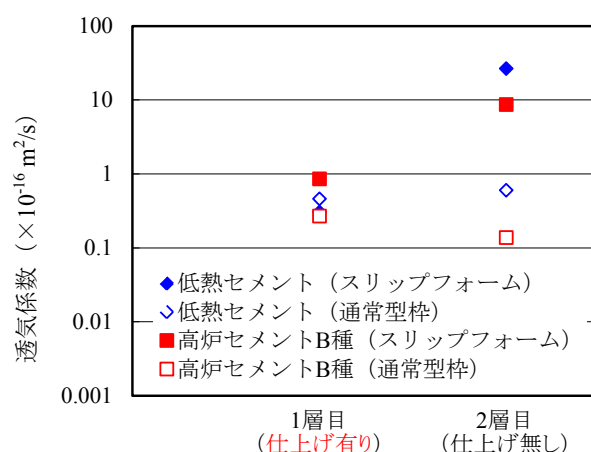


図-11 トレント法による透気係数

Fig. 11 Air permeability coefficient

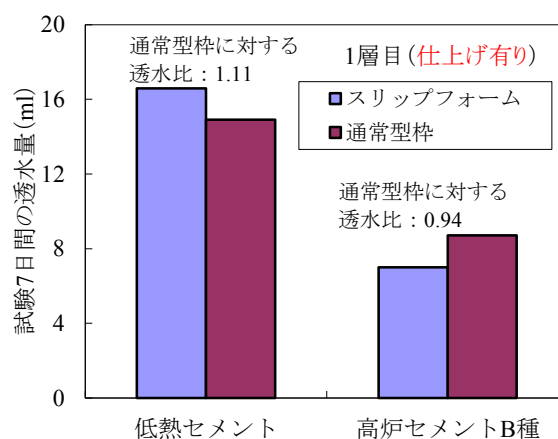


図-12 試験7日間の透水量

Fig. 12 percolation volume

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、仕上げを行うことで通常型枠工法と同程度になると考えられる。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 週行った後の中性化深さを図-13 に示す。実物大供試体の表層から深さ 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。

試験に用いた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-14 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ものの、塩化物イオン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⁴⁾。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

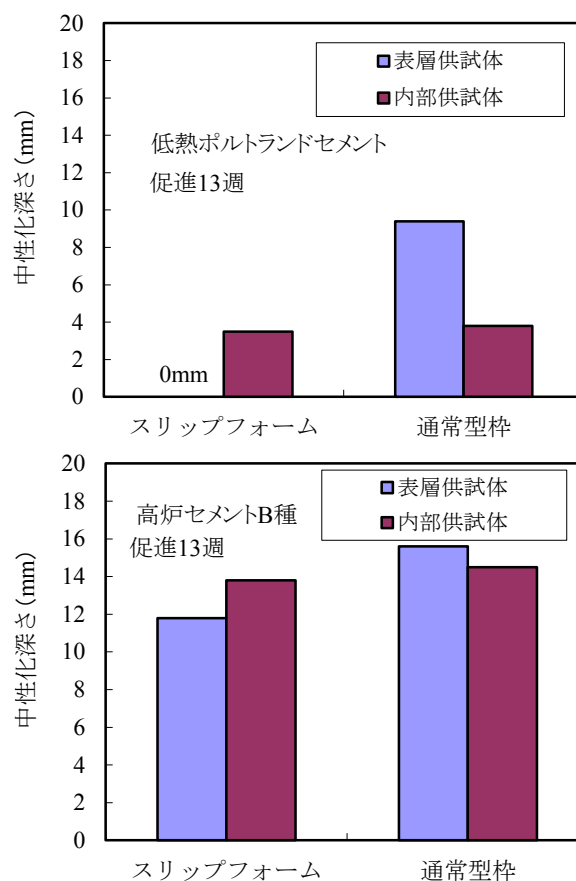


図-13 促進 13 週後の中性化深さ

Fig. 13 Neutralization depth

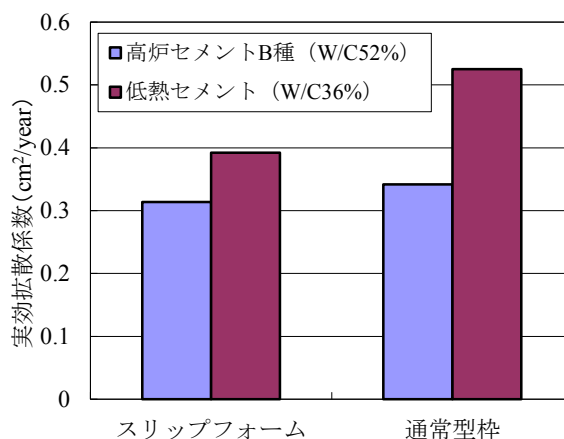


図-14 実効拡散係数

Fig. 14 Chloride effective diffusion coefficient

如何に拘らず、スリップフォーム工法で製造したコンクリートの方が通常施工の場合よりも塩化物イオン実効拡散係数は小さくなる結果を示し、促進試中性化試験同様、型枠脱型直後に実施する、仕上げの効果により、耐久性を通常施工と同等以上にすることが可能であることが確認できる。

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。

(1) スリップフォーム工法に使用するコンクリートは、コールドジョイントを発生させないコンシステンシーの確保と打込み数時間後に型枠脱型できる強度発現性、すなわち、コンクリートの凝結抑制と硬化促進の相反する要求性能がある。この要求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、配合を選定する必要がある。

(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、脱型直後に仕上げを施すことが必要である。

(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ることで、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。

以上のことから、コンクリートの凝結抑制や超若材齢時のコンクリートの強度促進を調整することによるコンクリートの品質改善効果、型枠脱型直後にコンクリート表面を仕上げることによる耐久性向上効果が明らかとなり、スリップフォーム工法の適用範囲の拡大が可能であると考えられる。

謝 辞

本実験の遂行にあたっては、BASFジャパン株式会社 大島正記 氏、土木本部プロジェクト部第三プロジェクト室 大友健 氏に多大なご協力・ご指導を頂きました。ここに謝意を表します。

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，pp49-55，2005
- 2) 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，pp40-44，2005
- 3) 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建造物の急速施工-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，pp46-52，2003
- 4) 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建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