

論文 締固めを必要とする高流動コンクリートの PCaPC 部材への適用に関する研究

河中 涼一*1・園田 強介*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨：本論文は、プレキャスト製品工場においてプレテンション方式で製造されるプレストレストコンクリート部材への締固めを必要とする高流動コンクリートの適用性について検討を行ったものである。プレストレストコンクリート部材の鋼材量であれば、一般的な土木構造物に適用される流動性と材料分離抵抗性を兼ね備えた高流動コンクリートを採用することで、十分な施工性と粗骨材の分離抵抗性が得られることを、1,100×700×22,400mmのプロトタイプの高流動コンクリート桁を製造して確認した。

キーワード：プレキャスト PC 部材, 間隙通過速度, 材料分離抵抗性, 施工性, 空気量

1. はじめに

生産年齢人口の減少や社会資本の老朽化が問題視される昨今、国土交通省が 2024 年 4 月に取りまとめた「i-Construction 2.0」では、2040 年度までに建設現場の生産性を 2023 年度比で 1.5 倍に向上させる目標が掲げられており、その施策の 1 つに Value for Money の考え方を取り入れたプレキャスト(以下、PCa)部材の活用推進による現場のオフサイト化が盛り込まれている¹⁾。プレストレストコンクリート(以下、PC)を用いた社会資本整備においても、橋梁の分野では生産性向上の取組みを「i-Bridge」と称し、部材のプレキャスト化が推進されている²⁾。

PCaPC 部材の製造においては、複雑な形状や鋼材量の多い部材に対しても、締固めを必要とする高流動コンクリートを用いれば、打込み間隔およびバイブレータの挿入間隔を拡げることができ、生産性の向上が期待できる。さらに、製造サイクルの観点から、材齢 18 時間で JIS A 5373 に定められるプレストレス導入時の圧縮強度 35N/mm²を下回らないことを自社目標とするプレテンション方式の PCaPC 部材には、粉体量が多い高流動コンクリートの配合を採用する条件が整っている。また、工場での PCa 部材製造は、コンクリートの運搬時間も短く、流動性を保持しなければならない時間の制約も小さいため、経済的にコンクリートの高流動化が可能である。

土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕では、締固めを必要とする高流動コンクリートのフレッシュ時の品質として、流動性と材料分離抵抗性の目標値を設定しており、材料分離抵抗性を粗骨材比率と間隙通過速度で評価している³⁾。また、一般的な土木構造物の構造条件を想定したタイプ 1 と、高密度配筋部を有する部材への適用を想定したタイプ 2 の二種類に対して、間隙通過

性と材料分離抵抗性の目標値の例が示されている。ただし、これらは例であって、設計で求められるコンクリートの品質を確保した上で、締固めを必要とする高流動コンクリートの適用による施工上の効果が得られれば、構造条件に基づき、施工方法とフレッシュコンクリートの品質の組合せは自由に設定してよいと記されている。

本研究では、プレテンション方式で製造される PCaPC 部材に用いられる品質を確保する目的で、空気量が少なくても高い凍結融解抵抗性が得られるよう、結合材の半分に高炉スラグ微粉末を、また、細骨材の全量に高炉スラグ細骨材を用いた。さらに、プレストレストコンクリートの製造過程で生じる CO₂の排出量を抑制するために、蒸気を用いることなく材齢 18 時間で 35N/mm²を下回らない圧縮強度が得られるよう、カルシウムシリケート水和物を主成分とする硬化促進剤を用いた。

本論文では、所要の品質を確保しながら生産性を向上できる締固めを必要とする高流動コンクリートに求められる流動性と材料分離抵抗性の目標値を実験室で設定し、それが適切であることを実機プラントで大型ブロックおよびプロトタイプの高流動コンクリート桁を製造して確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。配合 1 は、本検討で用いる締固めを必要とする高流動コンクリートのもので、結合材の 50%に高炉スラグ微粉末を、細骨材の全量に高炉スラグ細骨材を用いた。なお、プレストレスによる変形を抑えるために空気量を 2.0%に設定し、単位粗骨材量を確保した。配合 2 は、一般のプレテンション方式で製造される PCaPC 桁に用いられ

*1 ピーエス・コンストラクション(株) 大阪支店土木技術部 博(工) (正会員)

*2 ピーエス・コンストラクション(株) 大阪支店土木営業部

*3 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域准教授 博(工) (正会員)

*4 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域教授 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	GGBS/B (%)	s/a (%)	空気量 (設計値) (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (B×%)		
					W	B		S		G	高性能減水剤	AE剤	硬化促進剤
						C	GGBS	砕砂	BFS				
配合1	33.0	50.0	41.9	2.0	160	242	242	0	731	1,000	0.30	0.002	4.0
配合2	40.3	0.0	40.0	4.5	160	397	0	696	0	1,048	0.65	0.020	0.0

(GGBS:高炉スラグ微粉末, BFS:高炉スラグ細骨材)

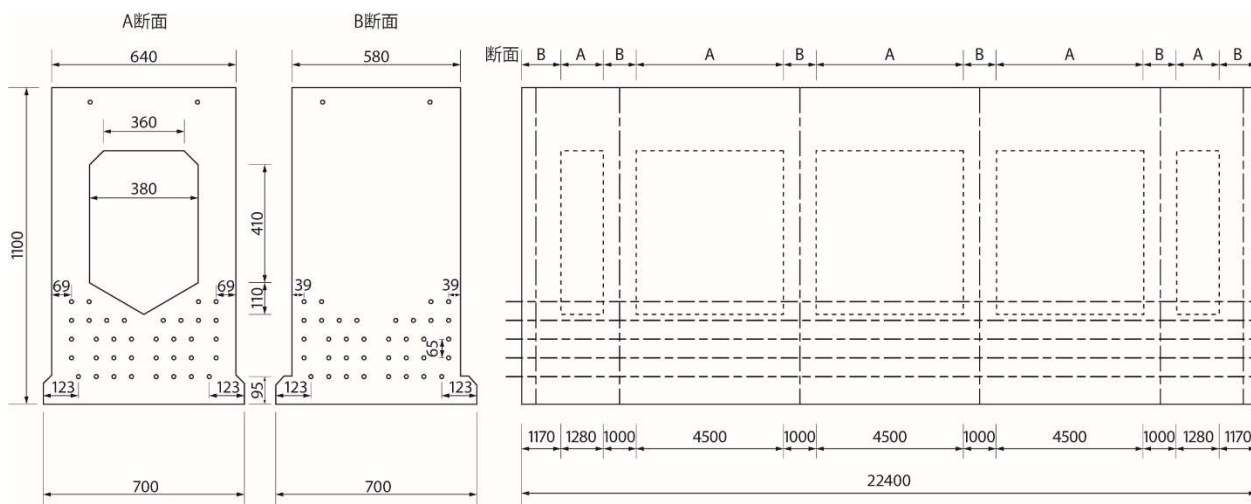


図-1 桁の詳細(単位: mm)

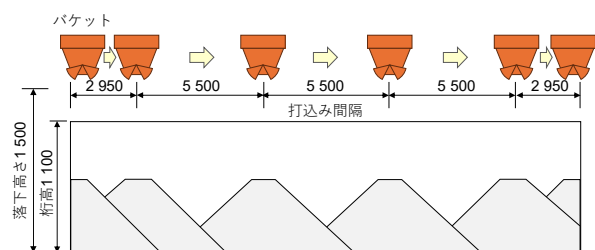


図-2 桁の打込み要領(単位: mm)

ている配合である。結合材には、早強ポルトランドセメント(密度: 3.14g/cm³, ブレーン値: 4,490cm²/g) および高炉スラグ微粉末 6000(密度: 2.91g/cm³, ブレーン値: 5,670cm²/g, 三酸化硫黄量: 3.02%)を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材(表乾密度: 2.69g/cm³, 吸水率: 1.51%, 粗粒率: 1.93) および安山岩砕砂(表乾密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 1.34%, 粗粒率: 2.90)を、粗骨材には、安山岩碎石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.61g/cm³, 吸水率: 0.82%)を用いた。混和剤には、高性能減水剤, AE剤およびカルシウムシリケート水和物を主成分とする硬化促進剤(固形分量: 24%)を用いた。空気量の調整は、AE剤の添加量により行った。

2.2 試験方法

(1) 間隙通過速度および粗骨材量比率

間隙通過速度および粗骨材量比率は、それぞれ、JSCE-F 701-2022「ボックス型容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)」附属書1(規定)「容器の仕切りゲートを開くと同時にバイブレータを始動させ

る場合の試験方法」および JSCE-F 702-2022「加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法(案)」に従い測定した。コンクリートの練混ぜには、実験室の強制練り二軸ミキサ(容量: 100L)を用いて行った。

(2) 硬化後の粗骨材分離抵抗性の確認

コンクリート硬化後の粗骨材分離抵抗性の確認は、実機プラントで製造したコンクリートで大型ブロック供試体を作製して鉛直方向にコアを採取し、粗骨材分布と圧縮強度の調査で行った。大型ブロック供試体の寸法は、高さ 900×幅 700×長さ 700mm である。この供試体から、材齢 28 日で直径 100mm, 高さ 900 mm のコアを 1 本採取し、底面から 250 mm, 450 mm, 650mm の位置で材齢 28 日における圧縮強度を測定した。

(3) プロトタイプ PC 桁を用いた施工性の確認

配合 1 のコンクリートの施工性を確認するために製造したプロトタイプ PC 桁の形状および寸法を図-1 に示す。PC 桁は、桁長 22.4m, 桁高 1.1m の中空部を有するスラブ橋桁である。両桁端部には橋軸方向長さ 1.17m の端支点横桁部が、支間部には 5.5m 毎に 1.0m の中間横桁部が計 4 箇所存在し、これらの横桁部は充実断面で、標準部よりかぶりが 30mm 小さくなっている。PC 鋼より線は、SWPR7BL 1S15.2 を 38 本配置し、最小あきは、より線の中心間隔 61.25mm から直径 15.2mm を減じた 46.05mm である。PC 鋼より線のあきおよび本数について、JIS S 5373:2016「プレキャストプレストレストコンクリート製品」の推奨仕様 B-1 道路橋用橋げたに定められ

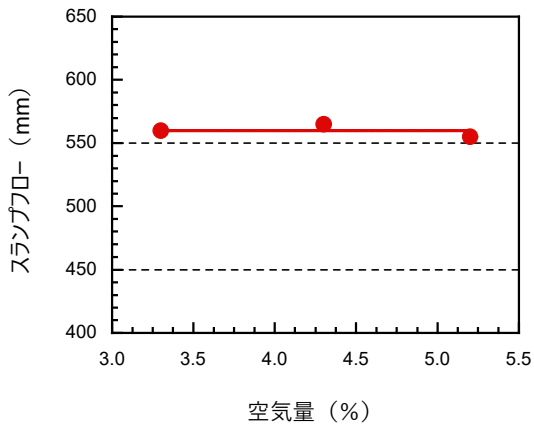


図-3 空気量がスランプフローに与える影響

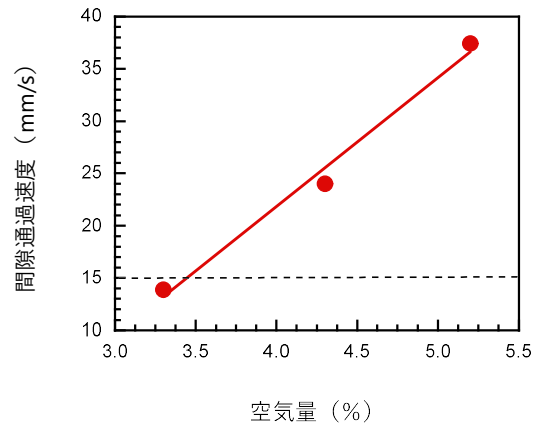


図-4 空気量が間隙通過性に与える影響

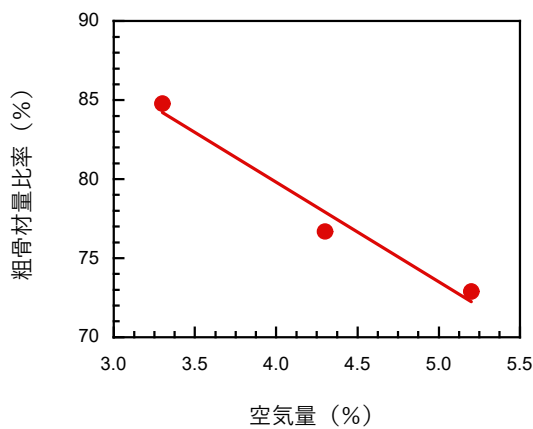


図-5 空気量が粗骨材量比率に与える影響

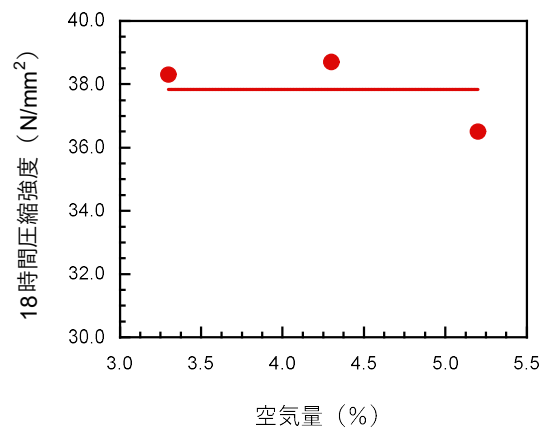


図-6 空気量が18時間圧縮強度に与える影響

るより線直径の3倍以上のあきは確保しているが、道路橋用プレストレストコンクリート橋桁の設計・製造便覧に示されるB活荷重対応の最長スラブ橋桁であるBS24の標準配筋図に示される本数⁴⁾の約1.6倍を配置しており、コンクリートの充填に対しては厳しい条件である。

コンクリートは、図-2に示すように、最大の自由落下高さを1.5mとし、打込みは両桁端部および支間部の5.5m毎に設けられた充実断面部から行った。締固めには高周波バイブレータと型枠バイブレータを併用した。高周波バイブレータは直径40mmで400mm以内に1箇所の間隔で約5秒挿入した。型枠バイブレータは約5.0m間隔で配置した。打込み時は、ファイバースコープを用いて型枠の底板部をモニタリングし、1層目のコンクリートの充填状況および流動する距離が5m以下になることを確認しながら、2層に分けて打込みを行った。桁側面の目粗し処理は、型枠に凝結遅延剤を塗布し、脱枠後に高圧洗浄機で洗い出す方法で行った。

(4) 圧縮強度試験および凍結融解抵抗性試験

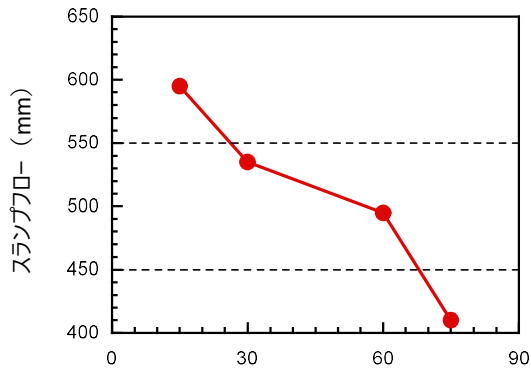
圧縮強度試験は、φ100×200mmの円柱供試体を用いて、JISA1108に準拠して行った。凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用いてJISA1148のA法

に準じて行った。ただし、凍結水には厳しい試験条件となるよう質量パーセント濃度10%の塩水を用いた⁵⁾。供試体はいずれも型枠に打込んだ後、材齢18時間まで大型ブロックに近接させて全体をシートで覆って養生し、材齢18時間で脱型した後、材齢7日まで散水養生を行った。圧縮強度試験の供試体は、材齢7日以降、屋内で気中養生を行った。凍結融解試験の供試体は合計で9本作製し、散水養生が終了した材齢7日で試験を開始した。

3. 実験結果および考察

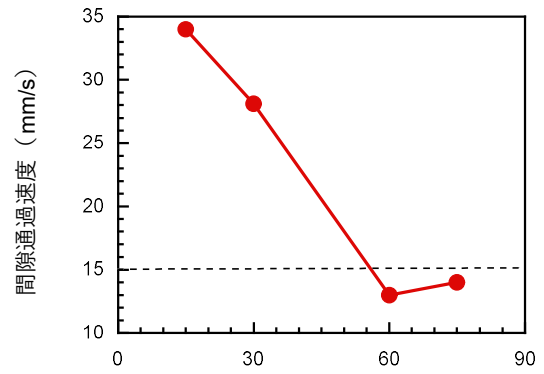
3.1 実験室における配合1の空気量の選定

図-3、図-4、図-5および図-6は、それぞれ、表-1に示す配合1でAE剤添加量を調整し空気量を変化させたコンクリートのスランプフロー、間隙通過速度、粗骨材量比率および材齢18時間における圧縮強度を示したものである。図-3より、空気量が増加しても、スランプフローはほぼ一定であることが分かる。図-4より、空気量が増加すると、間隙通過性は向上することが分かる。図-5より、空気量が増加すると、粗骨材量比率は低下することが分かる。図-6より、空気量が材齢18時間における圧縮強度に与える影響は小さいことが分かる。



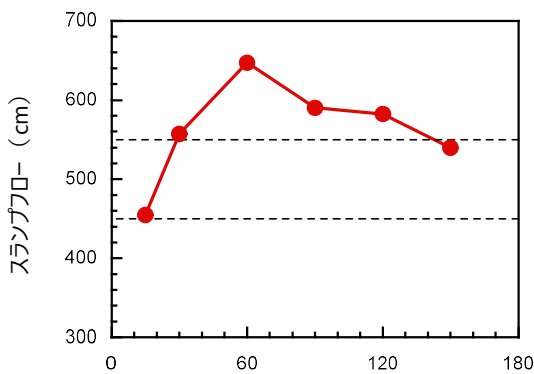
練混ぜ完了からの経過時間 (分)

図-7 スランプフローの経時変化



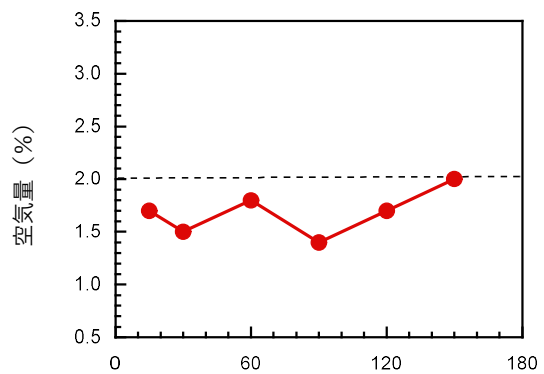
練混ぜ完了からの経過時間 (分)

図-8 間隙通過性の経時変化



練混ぜ完了からの経過時間 (分)

図-9 スランプの経時変化



練混ぜ完了からの経過時間 (分)

図-10 空気量の経時変化

以上のことから、空気量がスランプフローおよび材齢 18 時間における圧縮強度に与える影響は小さいが、空気量が多くなると、間隙通過速度は上がり粗骨材量比率が低下する。ただし、空気量が 3%程度であっても、一般的な土木構造物の施工を想定したコンクリートのタイプ 1 の例に示される間隙通過速度 15mm/s が得られている。

図-7および図-8は、表-1に示す配合 1 のコンクリートを用いて高性能減水剤添加量を調整し、練混ぜ直後におけるスランプフローおよび間隙通過速度を高め、スランプフローと間隙通過速度の経時変化を調べた結果である。練混ぜ後から 60 分までであれば、一般的な土木構造物の施工を想定したタイプ 1 の例に示されるスランプフロー 450mm と間隙通過速度 15mm/s が概ね確保されている。これらの結果から、配合 1 で設定した空気量の少ない配合でも施工性を確保できることを確認した。

3.2 フィニッシュビリティおよび材料分離抵抗性

図-9は、実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートのスランプフローの経時変化を示したものである。高性能減水剤の添加量は、実験室で採用した 0.3%から 1.4%に増加させて同じフレッシュ性状を得ることができるよう調整した。図-7で示した実験室で製造したコ



写真-1 大型ブロックの仕上げ状況

ンクリートは、練混ぜ完了後、時間の経過とともに線形的にスランプフローが減少したのに対し、実機プラントで製造したコンクリートは、練混ぜ完了から 150 分まで十分なスランプフローが確保できていることが分かる。図-10は、実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートの空気量の経時変化を示したものである。空気量も練混ぜ完了時から、150 分まではほぼ変化がなかった。

写真-1は、配合 1 のコンクリートを大型ブロック供試体の型枠に打ち込んだ後、金ごてで仕上げを行っている状況である。一般に、高流動コンクリートは材料分離抵抗性を高めるために粘性が高いことに加え、ブリーデ

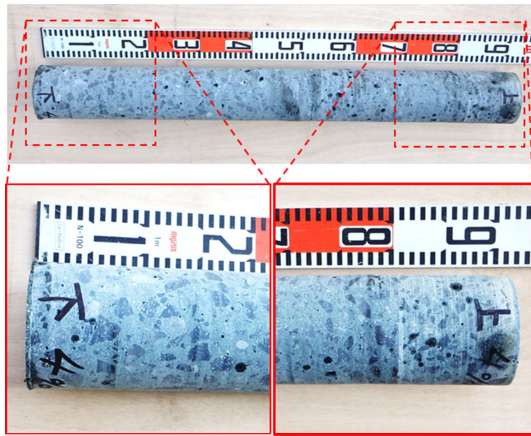


写真-2 大型ブロックから採取したコアの外観

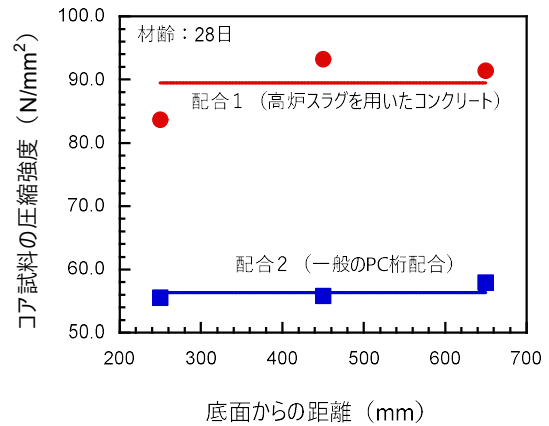


図-11 大型ブロックから採取したコアの圧縮強度

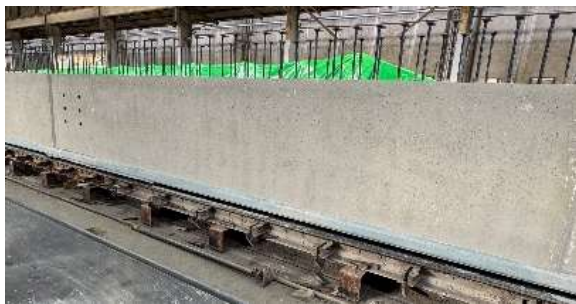


写真-3 プロトタイプ PC 桁の外観



写真-4 粗骨材の分布状況

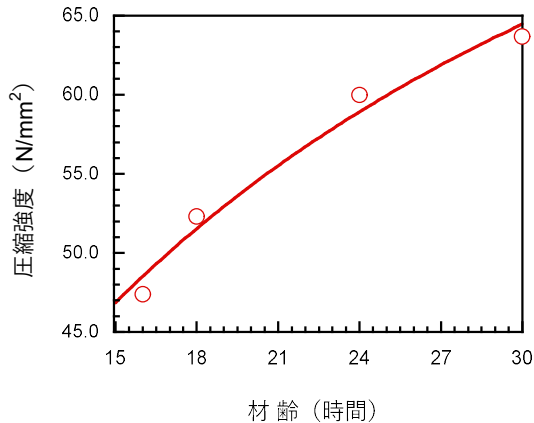


図-12 若材齢の圧縮強度の発現性

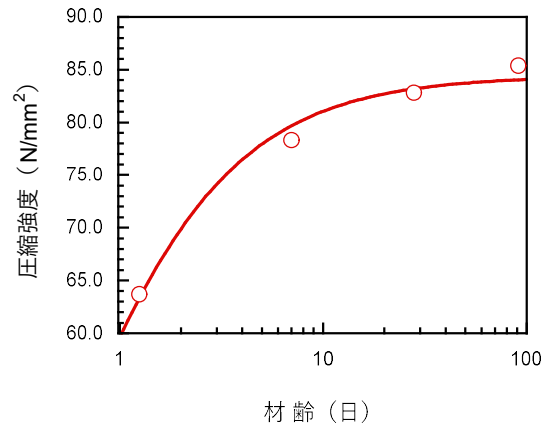


図-13 圧縮強度の経時変化

イングが少ないため⁹⁾、フィニッシュビリティーが課題となるが、本実験で製造した配合1を用いたコンクリートは、良好なフィニッシュビリティーを有していることを確認した。

写真-2は、配合1のコンクリートで製造した大型ブロックから採取したコアの外観である。上部200mm付近と下部200mm付近を拡大した写真で比較しても、採取したコア側面で確認できる粗骨材の分布は、ほぼ同じである。図-11は、配合1および配合2のコンクリートで製造した大型ブロックから採取したコア試料の圧縮強度を高さごとに示したものである。一般のPC桁で用い

られる配合2のコンクリートは、スランプが12cm程度であり、高さ毎の圧縮強度の差は大きくない。一方、高炉スラグを用いた配合1のコンクリートは、スランプフローが550mm程度であるが、配合2のコンクリートと同様に高さ毎の圧縮強度の差は大きくない。また、配合1のコンクリートは、配合2に比べて、水結合材比が7.3%小さいが、その圧縮強度の差は1.5倍以上と、結合材、細骨材、硬化促進剤等の影響によって水結合材比の影響以上に圧縮強度が高くなっている。

3.3 プロトタイプ PC 桁を用いた施工性の確認

写真-3は、配合1のコンクリートで製造した脱型直

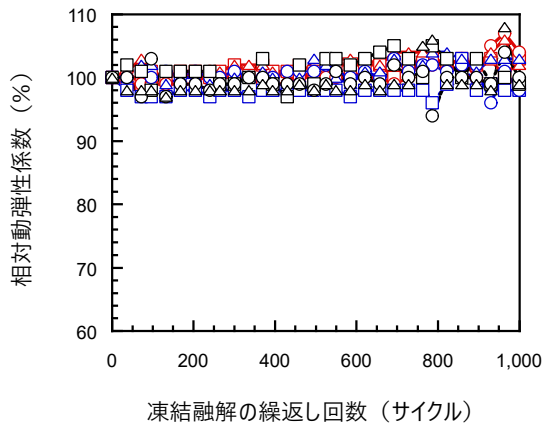


図-14 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

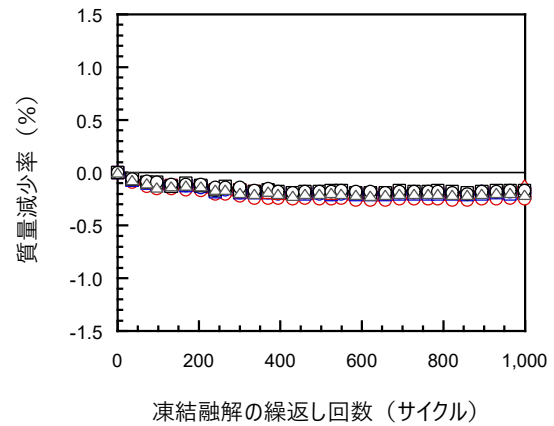


図-15 凍結融解試験結果（質量減少率）

後のプロトタイプ PC 桁の外観である。砂すじや大きな表面気泡は発生しておらず、充填不良もない良好な打ち上がりとなっている。写真-4 は、プロトタイプ PC 桁の目粗した側面の写真である。この写真から、粗骨材は桁高 1,100mm の底面から天端までの範囲で均一に分布しており、材料分離は生じていないことが確認できる。

3.4 強度発現性および凍結融解抵抗性

図-12 は、実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートの材齢 30 時間までの圧縮強度を示したものである。材齢 18 時間で圧縮強度が 35N/mm² を下回らないために、不良率を 0.13%，変動係数 V を 0.10 と想定すれば、材齢 18 時間における圧縮強度の目標値 f'_{cr} は、式(1)より 50.0N/mm² となる。

$$f'_{cr} = \frac{1}{1-3V} \cdot 35 = 50.0(\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

材齢 16 時間では 47.4N/mm²，材齢 18 時間では 52.3N/mm² の圧縮強度を発現しており、目標値を上回る強度を発現している。図-13 は、実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートの材齢 30 時間以降の圧縮強度を示したものである。材齢 7 日では、78.3N/mm² まで圧縮強度が増進し、その後も強度の増進が確認できる。

図-14 および図-15 は、実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートの凍結融解試験における相対動弾性係数および質量減少率の変化を示したものである。図には、大型ブロック製造時に採取した計 9 本の各供試体の結果を示している。練上がり直後の空気量は 2%程度であるが、凍結融解の繰返し回数が 1,000 サイクルでも相対動弾性係数は低下することはなく、質量も 0.3%程度の増加が生じた程度であった。写真-5 は、凍結融解の繰返し回数が 1,000 サイクルにおける供試体の外観であり、目立つ角欠けやスケーリングもない健全な状態であることが分かる。高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いることで、空気量が少ない配合であっても、高い凍結融解抵抗性が確保できていることが分かる。



写真-5 凍結融解 1,000 サイクル後の外観

4. おわりに

プレテンション方式の PCaPC 部材であれば、PC 鋼より線のあきが 46mm 程度でも、土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に示されるタイプ 2 の流動性は必要なく、タイプ 1 の例として示されている流動性の目標値が、想定される打込み完了時間まで保持されていれば、十分な施工性を有することが分かった。また、AE 剤によってエントレインドエアとして与えられる空気量は、流動性が確保されていれば、2%であっても、高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いることで、塩水環境下でも高い凍結融解抵抗性を確保できることを確認した。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～，p.34，2024.4
- 2) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：働き方改革に向けた基本方針，2024.4
- 3) (公社)土木学会：2023 制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.246-251，2023
- 4) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用プレストレストコンクリート橋桁 設計・製造便覧 JIS A 5373-2016，p.240，2020
- 5) 竹田宣典，十河茂幸：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 2，pp.427-432，2009.6
- 6) 和泉意登志：高流動コンクリートの施工，コンクリート工学，Vol. 32, No. 7，pp.79-84，1994.7