PCaPC 部材への適用を目指したポルトランドセメントを用いない高強度コンクリートの検討

Investigation of High-strength Concrete without Portland Cement as a Material for Precast Prestressed Concrete Members

R&D センター　佐々木　亘　WATARU　SASAKI
R&D センター　坂本　遼　RYO　SAKAMOTO
R&D センター　小宮　克仁　KATSUHITO　KOMIYA
R&D センター　篠崎　裕生　HIROO　SHINOZAKI

CO_2 排出量削減への取り組みの一つとして，混和材の置換率を高めたコンクリートの検討が進められており，筆者らもポルトランドセメントを用いない高強度コンクリートを開発している。本稿は，ポルトランドセメントを用いないコンクリートの PCaPC 部材への適用を目指し，使用材料や配(調)合条件がその特性に与える影響について報告するとともに，PCaPC 部材向けの条件として選定したコンクリートについて報告するものである。

キーワード：ポルトランドセメント不使用，高炉スラグ微粉末，高強度，蒸気養生

As one of the efforts to reduce CO_2 emissions, concrete containing high-volume mineral admixtures is being studied, and the authors are also developing high-strength concrete without Portland cement. This paper reports the results of the study on the effects of materials and mix proportions on the properties of concrete without Portland cement, with the aim of manufacturing Precast Prestressed Concrete members. The characteristics of the concrete selected for Precast Prestressed Concrete members are also reported.

Key Words: No Portland cement used, Ground granulated blast-furnace slag, High strength, Steam curing

１．はじめに

建設産業におけるカーボンニュートラルの実現に向けた取組みの一つとして，CO_2 排出量の少ない材料を結合材として用いたコンクリートの適用検討が進められている。多くの事例 [1), 2)]は無筋コンクリート構造物あるいは一般的な RC 構造物への適用を想定した強度域のコンクリートであるが，筆者らは，高い強度域のコンクリートを中心に産業副産物を大量に使用したコンクリートの検討を行っており，ポルトランドセメントを用いないコンクリートを使用したプレテンション・プレストレストコンクリート（以下，PC）桁の実証検討も行っている [3)]。

一方で，このコンクリートはポルトランドセメントを用いないことから強度発現が緩やかであり，やや特殊な蒸気養生により強度発現を促進させていた。20℃環境において脱型が可能となるまでの時間は通常のセメントコンクリートと比べると相当に長くなっており [4)]，適用範囲を拡大していくためには改善が必要と考えられた。特に PC 部材への適用を容易にするためには，初期強度の改善が重要である。

また，このコンクリートは高強度でありながら超低収縮性を有しているものであるが，その性能は常に要求されるわけではなく，適用部材，構造物に応じて必要性や要求性能の度合いは変化する。高強度かつ超低収縮性といった優れた性能は，使用材料の組合せや配(調)合条件によって付与されるものであるが，適用部材，構造物に応じて合理的な性能を発現する配(調)合条件を選定可能となれば，使用可能な材料も増やすことができ，ポルトランドセメントを用いないコンクリートの適用拡大に資するものと考えられる。

本稿は，ポルトランドセメントを用いないコンクリートの PCaPC 部材への適用拡大を目指し，使用材料や配(調)合条件がポルトランドセメントを用いない高強度コンクリートの特性に与える影響を検討するとともに，それらの結果を踏まえて選定した配(調)合のコンクリートについて報告するものである。

表-1　主な使用材料

材料		成分，物性等	記号	
粉体	高炉スラグ微粉末	4000 ブレーン，比表面積 4,540 cm^2/g，密度 2.88 g/cm^3，SO_3: 2.2%	B4	P
		6000 ブレーン，比表面積 5,790 cm^2/g，密度 2.87 g/cm^3，SO_3: 3.19%	B6	
	フライアッシュ	JIS I 種，比表面積 5,900 cm^2/g，密度 2.36g/cm^3，SiO_2: 65.3%，Ig.loss: 2.0%	F1	
		JIS II 種，比表面積 3,710 cm^2/g，密度 2.26g/cm^3，SiO_2: 65.1%，Ig.loss: 1.8%	F2	
	石灰石微粉末	比表面積 5,320 cm^2/g，密度 2.65 g/cm^3	LP	
	シリカフューム	BET 比表面積 18.4 m^2/g，密度 2.27 g/cm^3，SiO_2: 93.8%	SF	
	膨張材	石灰系，比表面積 5,050 cm^2/g，密度 3.17 g/cm^3	EX	
細骨材		フェロニッケルスラグ細骨材，吸水率 2.51%，表乾密度 2.92 g/cm^3	FNS	S
		佐野産石灰砕砂，表乾密度 2.72 g/cm^3	S1	
		多賀産石灰砕砂，表乾密度 2.67 g/cm^3	S2	
粗骨材		鹿沼産硬質砂岩砕石 2005，表乾密度 2.63 g/cm^3	G1	G
		大垣産硬質砂岩砕石 2005，表乾密度 2.64 g/cm^3	G2	

注）物性欄の数値は試験値の一例

表-2　配(調)合条件およびスランプフロー試験結果の一例

ID	配(調)合条件												スランプフロー	
	水粉体容積比 w/p	単位水量 [kg/m^3]	細骨材	粗骨材	単位粗骨材絶対容積 [m^3/m^3]	粉体の構成比率（容積比）							化学混和剤の使用量	フロー [mm]	フロー 500mm 到達時間 [s]
						B4	B6	F1	F2	LP	SF	EX	SP [P×%]		
B4F1-FNS	0.395	100	FNS	G1	0.300	52.5	-	30.0	-	-	15.0	2.5	1.75	675	22.4
B4F1			S1				-	30.0	-	-			1.75	695	17.1
B4F2							-	-	30.0	-			1.75	670	17.5
B4L							-	-	-	30.0			1.75	665	24.3
B4B6							30.0	-	-	-			2.05	615	34.4
B6F2						-	52.5	-	30.0	-			1.75	695	14.8
B4						82.5	-	-	-	-			1.85	600	43.0
B4-45	0.450	107				82.5	-	-	-	-			1.75	775	8.0
B6-45						-	82.5	-	-	-			1.60	800	6.4

2．使用材料

本検討における主な使用材料を**表-1** に示す。実証橋 [3] で用いたポルトランドセメントを用いない超低収縮高強度繊維補強コンクリートでは，高炉スラグ微粉末 4000（B4)，フライアッシュ I 種(F1)，シリカフューム(SF)，石灰系で比表面積の大きい膨張材（EX）およびフェロニッケルスラグ細骨材（FNS）を用いていた。当該部材は SMC プレコンクリート（株）栃木工場で製造しており，粗骨材は表中の G1（S1 および G1 が当該工場で使用している骨材）を使用している。また，この工場では表中の粉体のうち B4 を常備しており設備を有するが，その他の粉体は手投入が基本となる。

高炉スラグ微粉末 6000（B6）は三井住友建設（株）能登川工場で常備しており使用可能な材料である。また，表中の S2 および G2 は能登川工場で使用している骨材である。なお，三井住友建設（株）新居浜 PC 工場ではフライアッシュを常備しており使用可能であるが，本稿で対象としているポルトランドセメントを用いないコンクリートの結合材は高炉スラグ微粉末を主体としたものとなっている。

また，検討を行うコンクリートの条件は，水粉体容積比が 0.4 前後と非常に小さい領域を基本としているため，化学混和剤には，超高強度コンクリートで用いられている高性能減水剤（SP）と消泡剤（DF）を用いる。

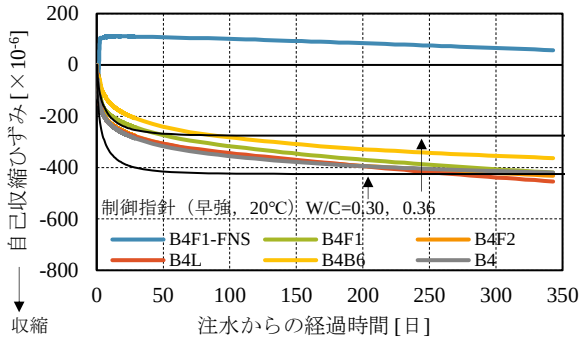


図-1　自己収縮ひずみの一例

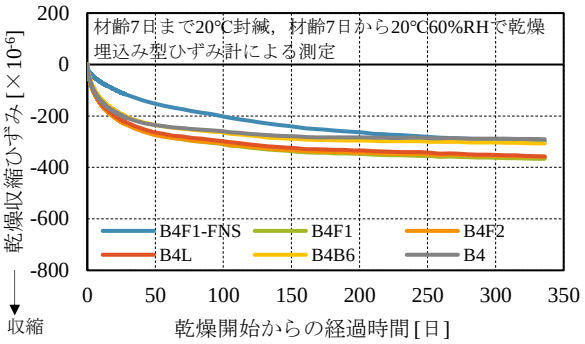


図-2　乾燥収縮ひずみの一例

3．材料や配(調)合条件がコンクリートの性状に与える影響

（1）流動性

表-2 に配(調)合条件およびスランプフロー試験結果の一例を示す。「B4F1-FNS」は前述の実証橋の配(調)合[3]を基に，水粉体容積比（w/p）を 0.395，単位粗骨材絶対容積を 0.300 m^3/m^3，単位水量を 100 kg/m^3，粉体の構成比率を容積比で B4 : F1 : SF : EX =52.5 : 30 : 15 : 2.5 としたものである。細骨材には比較的吸水率の高いフェロニッケルスラグ細骨材（FNS）を使用している。この配(調)合を基準に，細骨材を PCa 工場で使用している細骨材に置き換えるとともに，使用する粉体の構成を変化させたものである。なお，粉体のうち SF と EX は一定とした。

B4F1-FNS と B4F1 の比較から，スランプフローに与える細骨材の影響は小さいことがわかる。FNS は配(調)合条件によっては流動性を高める効果を有する[5]が，このようなポルトランドセメントを用いない条件ではスランプフローに差異は見られなかった。フライアッシュおよび石灰石微粉末を用いた場合の差異は小さいが，w/p を一定としたままフライアッシュや石灰石微粉末を用いずに大部分を高炉スラグ微粉末とした B4 や B4B6 では，SP を増加させてもスランプフローは小さく，フロー500 mm 到達時間は大きくなった。ただし，大部分を高炉スラグ微粉末とした条件であっても，B4-45 や B6-45 のように w/p を調整することで容易に高い流動性が得られる。

（2）収縮特性

図-1 に埋込み型ひずみ計によって測定した自己収縮ひずみの一例を示す。凡例記号は**表-2** 中の ID と対応している。FNS を用いている条件では，既報[6]と同様に膨張側で推移している。細骨材を工場で通常用いているもの（S1）とした条件では，自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末 6000 を用いた B4B6 で若干小さいが概ね同程度である。図中には，ひび割れ制御指針[7]に示される自己収縮ひずみの予測式を用いて，早強ポルトランドセメント，最高温度 20℃，W/C=0.30 または 0.36 として計算した値を併記している。この値との比較から，FNS を用いた条件を除く 5 つの配(調)合条件の自己収縮ひずみは，おおむね，早強ポルトランドセメントを用いた W/C=0.30～0.36 の自己収縮ひずみと同様な範囲にあることがわかる。すなわち，細骨材に FNS を用いなくとも，PC 部材に多く用いられるコンクリートと比べて，大きな自己収縮ひずみを生じるものではないと考えられる。

図-2 は乾燥収縮ひずみの測定結果の一例である。この図では，乾燥収縮ひずみはフライアッシュまたは石灰石微粉末を用いた B4F1，B4F2，B4L は同程度であり，大部分を高炉スラグ微粉末とした B4 および B4B6 は若干小さい。FNS を用いた B4F1-FNS の乾燥収縮ひずみの増加は緩やかであるが，乾燥開始から 250 日前後以降は B4 や B4B6 と同程度となっている。

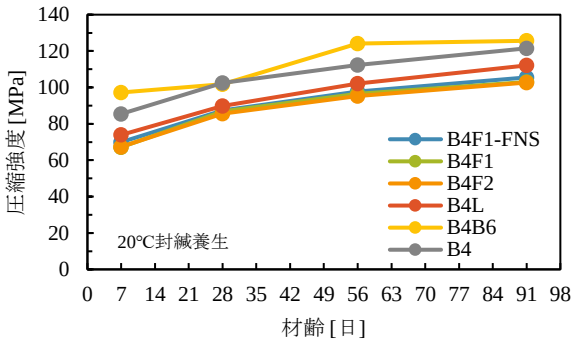


図-3　材齢と圧縮強度の関係

（3）圧縮強度

図-3 に 20℃封緘養生における材齢と圧縮強度の関係の一例を示す。B4F-FNS，B4F1，B4F2 の差異は小さく，FNS と S1 の差やフライアッシュの種類の影響は小さいことがわかる。B4L はこの 3 配(調)合よりやや大きい値

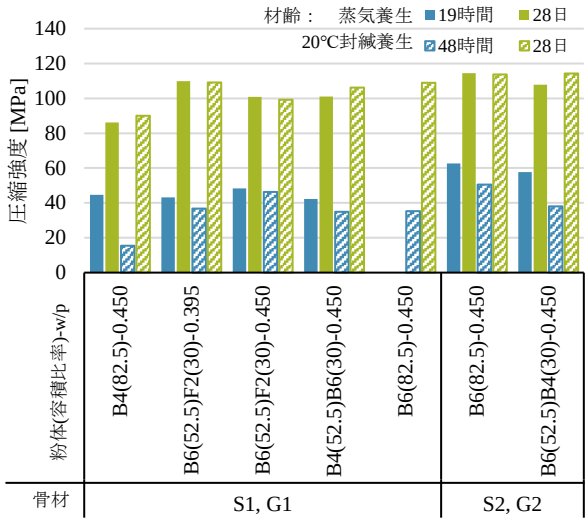


図-4　初期材齢の圧縮強度の例

で推移しており，材齢 91 日までの範囲では，フライアッシュより石灰石微粉末のほうが圧縮強度が高くなるようである。これらに対して，粉体の大部分を高炉スラグ微粉末とした B4B6 および B4 は明らかに圧縮強度が高く，高炉スラグ微粉末のほうがフライアッシュや石灰石微粉末より圧縮強度への寄与が大きいことが明らかである。材齢 91 日までの範囲において，高炉スラグ微粉末のほうがフライアッシュや石灰石微粉末より反応性の高いことが示唆される結果であるが，このことが，先に示したフレッシュコンクリートの流動性低下，粘性増大の原因にもなっていると推察される。

図-4 は PC 部材へのプレストレス導入に関わる初期強度を調べた結果の一例である。すなわち，50℃7 h の蒸気養生（前置きを注水から 4 h 程度，昇温速度 15℃/h，降温速度 10℃/h）の材齢 19 h および，20℃封緘養生 48 h での圧縮強度である。併せて材齢 28 日の圧縮強度も示している。なお，蒸気養生を行った供試体は，材齢 1 日で脱型した後，20℃60%RH の恒温恒湿室内で保管したものである。図より，蒸気養生を行った条件では，材齢 19 h 程度でいずれも 40 MPa を超える圧縮強度が得られている。20℃封緘養生では，B4 のみを用いた条件を除いた条件，すなわち，B6 を用いた条件において材齢 48 h 程度で 35 MPa 以上の圧縮強度が得られている。材齢 28 日の圧縮強度に着目すると，蒸気養生と 20℃封緘養生で大きな差は無く，前置き 4 h 程度で蒸気養生を行っても，その後の強度発現性が低下することはないということがわかる。

例えば，設計基準強度 50 MPa の PC 部材では，プレストレスを導入する際の圧縮強度の目標値として 35 MPa 程度が設定されることが多い。本実験結果は，材齢 28 日以降の圧縮強度は非常に高くなってしまうものの，ポルトランドセメントを用いないコンクリートでも，一般的な工程でプレストレスの導入を行うことができる可能性を示すものであるといえる。特に，高炉スラグ微粉末 6000 を使うことで初期強度の発現性が高まる。

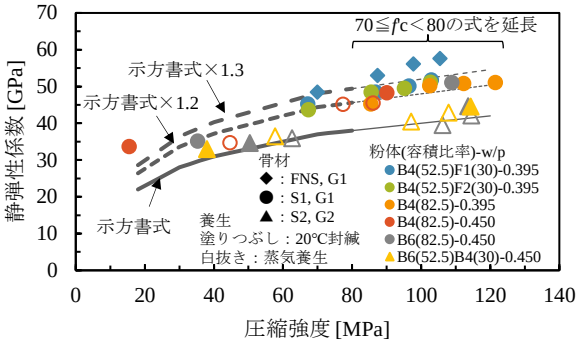


図-5　圧縮強度と静弾性係数の関係の一例

なお，粉体構成が同じで w/p の異なる 2 つの条件（”B6(52.5)F2(30)”）を比較すると，w/p が小さいほうが材齢 28 日の圧縮強度は大きいが，蒸気養生の材齢 19 h および 20℃封緘養生の材齢 48 h の圧縮強度は逆の傾向となっている。これは，一定の流動性を得るために w/p の小さいほうが SP の使用量が多くなっており，そのことが，初期の強度発現性に影響を与えているものと考えられる。

（４）静弾性係数

図-5 に圧縮強度と静弾性係数の関係の一例を示す。図中には，コンクリート標準示方書 [8]に示される圧縮強度とヤング係数の関係（図中では示方書式と表示），ならびに，示方書式から計算される値を 1.2 倍および 1.3 倍したものも示した。なお，示方書式の範囲は圧縮強度 80 MPa までであるが，圧縮強度 70～80 MPa の式を 120 MPa まで延長して記載した。

FNS を用いた条件では，既報 [6]と同様に圧縮強度に対する静弾性係数の値が大きく，示方書式の 1.3 倍を超える位置にプロットされている。骨材に S1 および G1 を用いた条件では粉体構成や養生方法によらずおおよそ示方書の 1.2 倍付近にあり，S2 および G2 を用いた条件では，やはり粉体構成や養生方法によらず示方書式付近にプロットされる。すなわち，ポルトランドセメントを用いないコンクリートであっても，圧縮強度と静弾性係数の関係は使用する骨材の影響が支配的であることがわかる。

（５）凍結融解抵抗性

高炉スラグ微粉末を結合材の主体としたポルトランドセメントを用いないコンクリートでは，凍結融解抵抗性が小さくなる傾向にあることが報告されている[例えば 9]。

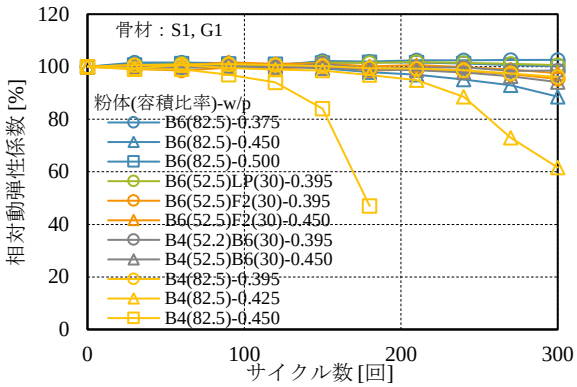


図-6　凍結融解試験結果の一例

表-4　CO_2 排出原単位の例

材料	原単位 [kg-CO_2/t]
ポルトランドセメント	762.7
高炉スラグ微粉末	26.5
シリカフューム	19.6※
膨張材	762.7※
細骨材	3.7
粗骨材	2.9
水	0.245

この表の値は，文献 10)に例示された値を基本とし，シリカフュームと膨張材については，文献 1)と同様に，それぞれフライアッシュおよびポルトランドセメントと同じ値としたもの

表-3　設定した PCaPC 向け配(調)合

	表-4 の CO_2 排出原単位を用いて計算した材料由来の CO_2 排出量 [kg-CO_2/m³]		配合指標					単位量 [上段：kg/m³，下段：L/m³]							
									P					S	G
			W/P	モルタル細骨材容積比 s/mor	細骨材率 s/a [%]	単位粗骨材絶対容積 [m³/m³]	空気量 [%]	W	(計)	EX	B6	SF	早強ポルトランドセメント	S2	G2
ゼロセメント	37.3	質量	0.161	-	-	-	-	107	665	20	563	82	-	854	792
		容積	0.450	0.481	51.6	0.300	3.5	107	238	6	196	36	-	320	300
早強 50MPa 例	323.9	質量	0.360	-	-	-	-	150	417	-	-	-	417	801	982
		容積	1.13	0.515	44.6	0.372	4.5	150	133	-	-	-	133	300	372

そこで本検討においても凍結融解抵抗性について確認した。**図-6** に凍結融解試験（JIS A 1148 A 法）の結果の一例を示す。粉体の 82.5%を高炉スラグ微粉末 4000 とし，w/p を 0.450 とした配合 B4(82.5)-0.450 では 180 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回ったが，その他の配合はいずれも 300 サイクルにおける相対動弾性係数 60%以上となった。300 サイクルで相対動弾性係数 60%以上となった配合のうち，粉体の 82.5%を高炉スラグ微粉末 4000 とし w/p を 0.425 とした B4(82.5)-0.425 を除いては，300 サイクルにおける相対動弾性係数が概ね 90%以上であり，高い凍結融解抵抗性を有していることが確認された。すなわち，本実験結果からは，粉体の 82.5%を高炉スラグ微粉末 4000 とした条件では凍結融解抵抗性が小さい傾向にあり，w/p を 0.425（W/P では約 0.15）より小さくしないと 300 サイクルにおいて相対動弾性係数 60%を満足できないとも言える。

粉体の 82.5%を高炉スラグ微粉末 6000 とした条件では 3 配合とも高い凍結融解抵抗性を示したことから，高炉スラグ微粉末 4000 に比べ，高炉スラグ微粉末 6000 のほうが，凍結融解抵抗性を付与しやすいことがわかった。粉体中に高炉スラグ微粉末 6000 を用いた条件では，石灰石微粉末，フライアッシュや高炉スラグ微粉末 4000 が併用されていても高い凍結融解抵抗性を示し，凍結融解抵抗性を低下させる可能性が指摘されているフライアッシュ [9]については明確な傾向は確認できなかった。

4．PCaPC 向けとして選定した配(調)合のコンクリートの特徴

（1）使用材料および配(調)合

前章で得た知見を基に設定した配(調)合を**表-3** に示す（表中の「ゼロセメント」）。各材料の記号は**表-1** に準じている。粉体は高炉スラグ微粉末 6000 を主体とし，シリカフューム (SF) と膨張材 (EX) を用いたものとした。SF および EX を除いて，能登川工場に常備されている材料であり，SF および EX は現状の設備上は手投入となるものの，いずれも同工場で使用実績のある材料である。また，**表-3** には同工場における，設計基準強度 50 MPa の PCaPC 部材に用いるコンクリートの配合例を併せて示した。**表-3** に示した両配(調)合について，たとえば，

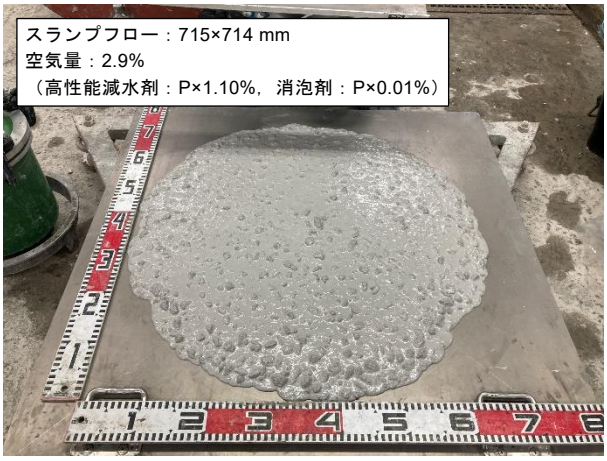


写真-1　フレッシュ性状の一例

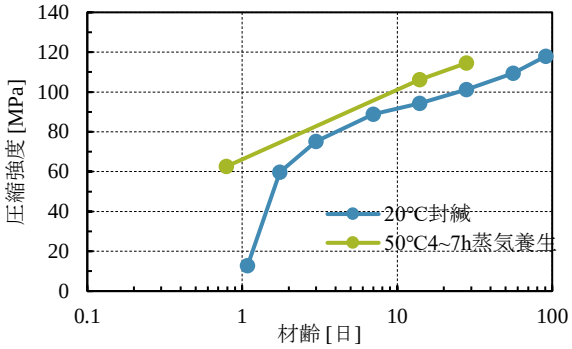


図-7　材齢および養生方法と圧縮強度の関係

表-4 に示した CO_2 排出原単位を用いて材料由来の CO_2 排出量を計算すると，ゼロセメントは 37.3 kg-CO_2/m^3，早強 50MPa 例は 323.9 kg-CO_2/m^3 となり，早強 50MPa 例に対して 88.5%低減される配(調)合条件となっている。

（２）フレッシュ性状

写真-1 にフレッシュ性状の一例を示す。この配(調)合は，**表-3** に示したように通常のコンクリートに比べて水粉体容積比と単位水量が非常に小さいが，モルタル細骨材容積比や単位粗骨材絶対容積は粉体系の高流動コンクリート[11]と同様の範囲にあり，フレッシュ性状も粉体系の高流動コンクリートと類似した性状を呈する。

（３）強度特性

ａ）圧縮強度

図-7 に圧縮強度の測定結果の例を材齢との関係として示す。一般の PCaPC 部材と同様の蒸気養生条件において，注水から 18 時間で 60 MPa 程度の圧縮強度が得られる。また，20℃条件であっても，材齢 2 日で同程度の圧縮強度を発現する。これまでに得られている材齢 28 日の圧縮強度の平均値は，20℃封緘および 50℃4h の蒸気養生のいずれも約 113 MPa である。

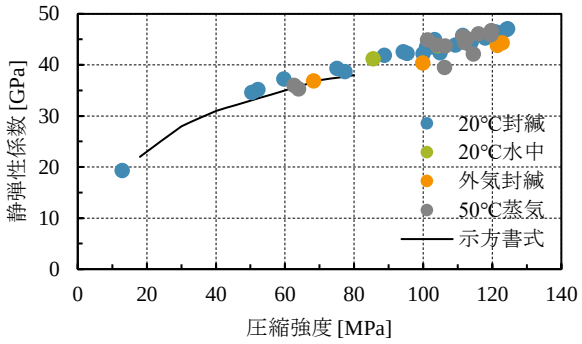


図-8　圧縮強度と静弾性係数の関係

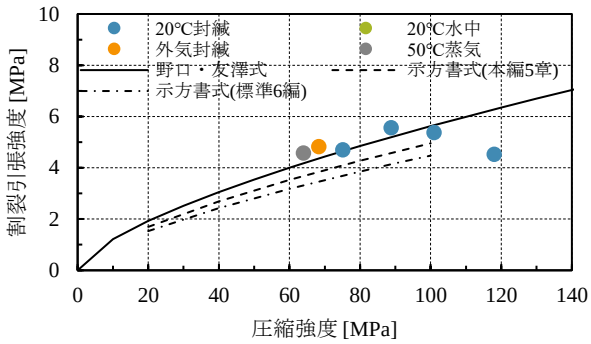


図-9　圧縮強度と割裂引張強度の関係

ｂ）静弾性係数

図-8 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図には複数の養生条件で得たデータをプロットしているが，養生方法が圧縮強度と静弾性係数の関係に与える影響は小さいことがわかる。**図-5** でも示した通り，圧縮強度と静弾性係数の関係は，コンクリート標準示方書に示される関係式およびその延長線上にプロットされている。

ｃ）割裂引張強度

図-9 に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。図には野口らの式[12]およびコンクリート標準示方書に示される式の値も併せて示している。測定値は，おおよそこれらの式から求められる値と同程度の範囲にある。すなわち，圧縮強度と割裂引張強度の関係は，通常のポルトランドセメントを用いたコンクリートと大きく変わるものではないと考えられる。

（４）収縮特性

図-10 に乾燥収縮ひずみの測定例を示す。図中には比較として，早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比 0.40 のコンクリートについて調べたデータ[13]を示している。この図より，乾燥収縮ひずみは W/C=0.40 のコンクリート（f'_{ck}=40～50 MPa）に比べて小さいことがわかる。

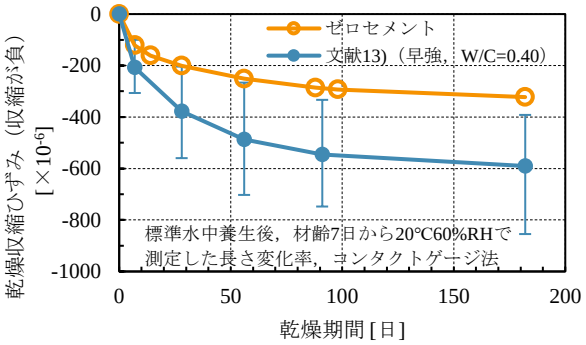


図-10　乾燥収縮ひずみの測定例

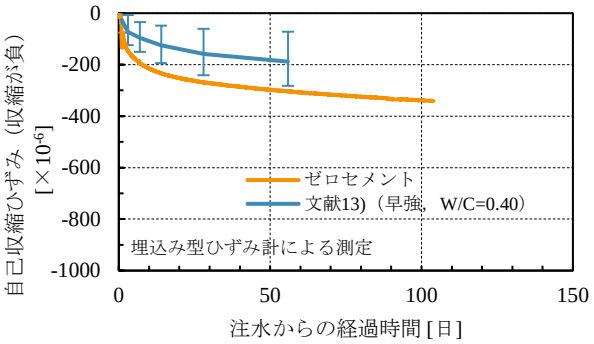


図-11　自己収縮ひずみ

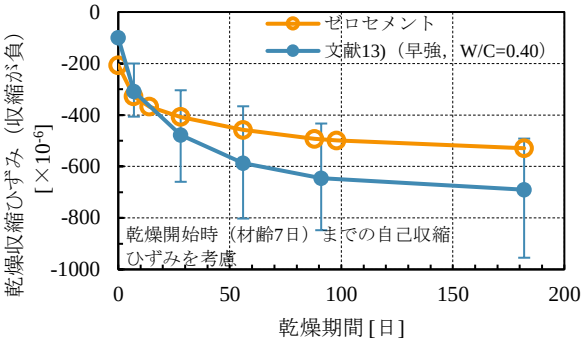


図-12　材齢 7 日までの自己収縮ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみ

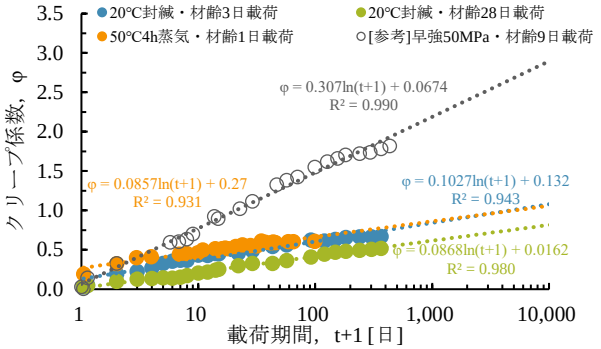


図-13　クリープ係数の測定例

図-10 に示した乾燥収縮ひずみは材齢 7 日を起点として測定したものである。図-11 に示すように，自己収縮ひずみは W/C=0.40 のコンクリートと比べると大きいものの，図-12 に示すように，材齢 7 日時点での自己収縮ひずみを起点とした乾燥収縮ひずみは W/C=0.40 のコンクリートと比べて小さく，自己収縮ひずみの影響は小さいことがわかる。

（５）クリープ

図-13 に圧縮クリープ試験によるクリープ係数の測定例を示す。圧縮クリープ試験は JIS A 1157 に準じて行った。載荷開始までの条件は 20℃封緘・材齢 3 日，20℃封緘・材齢 28 日および 50℃4h 蒸気養生・材齢 1 日の 3 水準である。図中には参考として，f'_{ck}=50 MPa のコンクリートの測定例も示した（載荷開始までは 20℃水中養生，材齢 9 日に載荷開始）。この図より，このコンクリートのクリープ係数は，通常のコンクリートに比べて相当に小さいことがわかる。

（６）凍結融解抵抗性

図-14 に凍結融解試験結果の一例を示す。試料コンクリートは能登川工場の実機ミキサで製造し，実際の製造ラインで 45～50℃4h の蒸気養生を行ったのち，材齢 28 日から凍結融解試験に供したものである。図より 300 サイクルまで相対動弾性係数に変化は見られず，十分な凍結融解抵抗性を有していることがわかる。

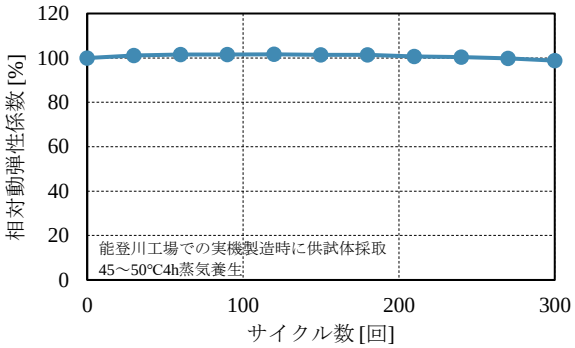


図-14　凍結融解試験におけるサイクル数と相対動弾性係数の関係

（７）鋼材を保護する性能

ａ）塩化物イオンの拡散係数

図-15 に非定常電気泳動試験 [14]を用いて算出した塩化物イオンの拡散係数を示す。図中には参考として，文献 14)に掲載されている W/B=0.35 のコンクリート（ポルトランドセメント単味，ならびに，高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材使用（GGBS+BFS））の測定値の例を併せて示した。図より塩化物イオンの拡散係数は，高炉スラグ微粉末を用いることで，ポルトランドセメント単

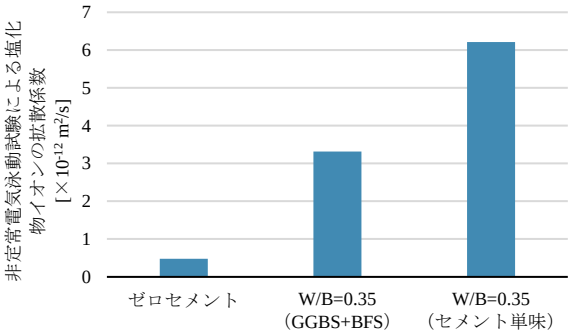


図-15　塩化物イオンの拡散係数

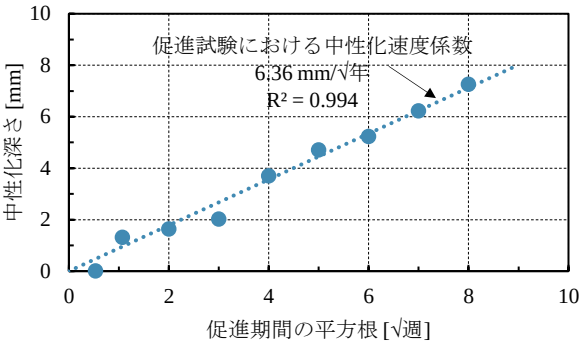


図-16　促進期間と中性化深さの関係

写真-2　水分浸透深さの確認状況（浸せき 150 h）

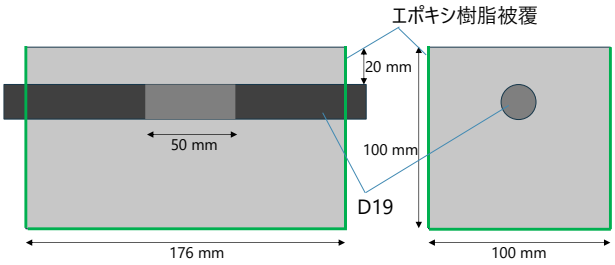


図-17　分極曲線を測定した供試体

写真-3　分極曲線の測定状況例

味のコンクリートに比べて 1/2 程度になるが，このコンクリートは 1/10 以下とさらに小さく，極めて高い遮塩性を有していることがわかる。

ｂ）水分浸透速度係数

JSCE-G 582 に準じて水分浸透速度係数の測定を試みた。供試体は材齢 28 日まで 20℃封緘養生を行ったのち，脱型して 20℃60%RH の恒温恒湿室内に 91 日間静置した後に試験に供した。浸せき時間を標準の 48 h から 150 h まで延長して試験を行ったが，水分の浸透は確認されなかった。浸せき 150h における水分浸透の確認状況を**写真-2** に示す。

ｃ）中性化速度係数

図-16 に促進中性化試験における促進期間と中性化深さの関係を示す。促進中性化試験は JIS A 1153 に準じて行った。ただし，材齢 28 日までは 20℃封緘養生とした。図より，通常のコンクリートと同様に，中性化の進行は促進期間の平方根と比例するものとして表現できることがわかる。また，その比例定数である中性化速度係数は，指針 [1]に示されている混和材を大量に使用したコンクリートの実験値と比べると 1/10 程度であった。さらに，指針に示される以下の式(1)を用いて実環境における二酸化炭素濃度に補正した中性化速度係数の推定値を求めると，0.57 mm/√年となる。

$$\alpha_p = \alpha_{acc} \cdot \sqrt{[CO_2] / [CO_2]_{acc}} \qquad (1)$$

ここに，

α_p：中性化速度係数の推定値 [mm/√年]

α_{acc}：促進試験結果に基づく中性化速度係数 [mm/√年]

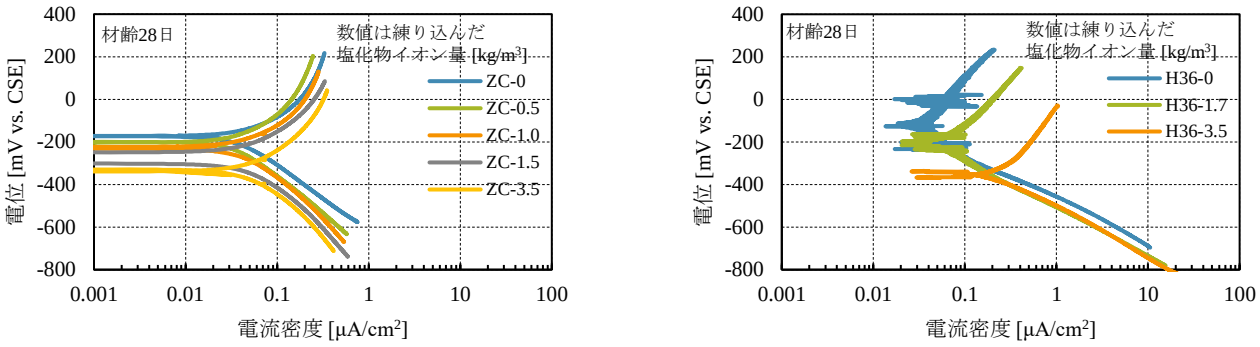
$[CO_2]$：環境の二酸化炭素濃度（= 0.04%）

$[CO_2]_{acc}$：促進中性化試験の二酸化炭素濃度（= 5%）

この値は，コンクリート標準示方書 [8]に示される中性化速度係数と W/C の関係式によると，W/C=0.45 のコンクリート相当の値である。

ｄ）内部鋼材の分極特性

図-17 に示した供試体を用いて，鉄筋の分極曲線を測定した。供試体は 100 × 100 × 176 mm の角柱供試体に



(a) ゼロセメント（ZC）　　(b) 早強 50MPa 例（H36）

図-18　分極曲線

D19 異形鉄筋をかぶり 20 mm で配置したものである。鉄筋は中央 50 mm を除いて熱収縮チューブで被覆し，供試体はかぶり面を除いた 5 面をエポキシ樹脂により被覆したものである。供試体は**表-3** に示した 2 配合それぞれの，粗骨材を除いたモルタルを用いて作製し，また，練混ぜ水に塩化ナトリウム水溶液を用いて塩化物イオン量を変化させた。供試体は材齢 7 日まで 20℃封緘養生とし，その後は 20℃60%RH の恒温恒湿室に静置した。

分極曲線の測定は，**写真-3** に示すように，飽和水酸化カルシウム水溶液を含ませたウエスを介してかぶり面に対極を設置して行った。測定は電位制御にて行い，電位の走査速度は 25 mV/min とした。また，コンクリート抵抗による IR ドロップは，同様の測定系により測定した交流インピーダンスの測定結果から鉄筋－対極間の抵抗を推定し差し引いた。

図-18 に測定した分極曲線を示す。図中の凡例においてゼロセメントは「ZC」，早強 50MPa 例は「H36」と表記し，練り込んだ塩化物イオン量を数値で記載している。なお塩化物イオン量は，想定したコンクリート配(調)合 1 m³ あたりの量で記載している。**図-18 (b)** より，通常のコンクリートでは，塩化物イオン量の増加に伴ってアノード分極曲線の電流密度が大きくなっていることが確認できる。カソード分極曲線は変化していないので，アノード分極曲線の電流密度増加側へのシフトに伴い腐食速度が増加する。

一方ゼロセメントでは，塩化物イオンを混入させない条件では通常のコンクリートと同様にアノード分極曲線の電流密度が小さく，鉄筋は不動態化していると推察される [15]。さらに，塩化物イオン量が増加してもアノード分極曲線の変化が小さい。加えて，ゼロセメントのカソード分極曲線は早強 50MPa 例に比べて電流密度が小さく，鉄筋への酸素あるいは水の供給が少なくなっていることが示唆される。また，塩化物イオン量が大きくなると，カソード分極曲線の電流密度がより小さくなっており，これは細孔溶液中で塩化物イオン濃度が大きくなることで溶存酸素量が減少している可能性が考えられる。以上のような挙動により，ゼロセメントでは，早強 50MPa 例でみられるような塩化物イオン量の増加に伴う腐食速度の増加が認められなかった。

５．まとめ

本稿では，ポルトランドセメントを用いないコンクリートの PCaPC 部材への適用拡大を目指し，使用材料や配(調)合条件がポルトランドセメントを用いない高強度コンクリートの特性に与える影響について検討を行い，その知見から選定した配(調)合のコンクリートの特性について報告したものである。得られた主な知見は以下のようである。

① 従来の条件から粉体の種類を減らし，高炉スラグ微粉末の割合を大きくすると，フレッシュ時の粘性は増大するが，圧縮強度は高くなる傾向にある。
② 水粉体容積比が 0.395 と小さい条件で，通常の細骨材を用いても，PCaPC 部材に一般に用いているコンクリートと比べて収縮が著しく大きくなることはない。
③ 圧縮強度と静弾性係数の関係に与える粉体や養生方法の影響は小さく，通常のコンクリートと同様に使用する骨材の影響が支配的である。
④ 高炉スラグ微粉末 6000 を用いることで，圧縮強度の発現性が高まり，また，凍結融解抵抗性の確保も容易になる。
⑤ 高炉スラグ微粉末 6000 を含め，使用材料の大半を PCaPC 工場に常備している材料で構成した配(調)合を選定した。この配(調)合は，初期強度の発現性に優れ，クリープ係数が小さく，高い耐久性を有していることを確認した。

参考文献

1) 土木学会:混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），2018. 9
2) 土木学会:コンクリートライブラリー165 コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて，2023. 10
3) 篠崎裕生，佐々木亘，三加崇，松田拓 : サスティナビリティを追求したPC橋梁の試み, コンクリート工学, Vol. 59，No. 6，pp. 511-518，2021. 6
4) 佐々木亘，松田拓，恩田陽介，墓哲義 : プレテンション部材へ適用可能な超低収縮高強度繊維補強コンクリートの開発，第 28 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 673-678，2019. 11
5) 佐々木亘，恩田陽介，松田拓 : 単位水量と自己収縮を大幅に低減した高強度繊維補強コンクリート，第 29 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 425-428，2020. 10
6) 松田拓，篠崎裕生，佐々木亘，野並優二 : 持続可能性に貢献する超低収縮・低炭素コンクリート，コンクリート工学，Vol. 58，No. 1，pp. 84-89，2020. 1
7) 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016，2016. 11
8) 土木学会 : 2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，2023. 3
9) 鈴木成，藤原浩己，丸岡正知，岩田正幸 : 各種アルカリ刺激材を用いた環境負荷低減コンクリートの基礎性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36，No. 1，pp. 628-633，2014. 7
10) 中日本高速道路 : 環境配慮型コンクリート設計・施工管理要領（低炭素型コンクリート編），2023. 11
11) 土木学会 : 高流動コンクリートの配合設計・施工指針［2012 年版］，2012. 6
12) 野口貴文, 友澤史紀 : 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号，pp. 11-16，1995. 6
13) 谷口秀明，樋口正典，藤田学，河野広隆 : 施工者によるレディーミクストコンクリートの品質評価, コンクリート工学，Vol. 48，No. 2，pp. 15-23，2010. 2
14) 日本コンクリート工学会:電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，2018. 9
15) 大即信明:海洋環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究，東京工業大学博士論文，1986. 12