

論文 流し込み打設による既製コンクリート杭に用いる圧縮強度 180N/mm²以上の超高強度コンクリート開発に関する実験

菅原 岳美*1・藤原 浩巳*2

要旨：本研究では、流し込み打設による超高強度既製コンクリート杭の開発をするために、普通ポルトランドセメントにシリカフュームおよび2種類の粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートにおいて、スランブフロー試験およびU形容器を用いての加振時の間隙通過試験を行い流動性を確認し、オートクレーブ養生後の強度発現性に与える影響について検討した。その結果、低水結合材比において高炉スラグ微粉末などの粉末度の高い材料を混和した場合、加振しない状態と加振した状態とで流動性の傾向が異なりモルタル分の降伏値と塑性粘度が影響することを確認した。

キーワード：超高強度コンクリート、既製コンクリート杭、シリカフューム、オートクレーブ、振動締固め

1. はじめに

近年の土木および建築構造物の杭基礎の設計において、大地震時に対する設計の必要性が高まりつつあり、様々な知見や研究成果^{1) 2)}が示されている。その中で、高い軸力比において変形性能が低下することなどが確認されており、コンクリートの高強度化や高い変形性能を有した杭材^{例えば 3)}および工法の開発が行われている。また、設計方法の高度化に伴い建築物の上部構造物が大スパン化し柱の数が減ったこと、パイルキャップを縮小させるために柱に対する杭本数が減ったことにより杭一本に作用する荷重が増加し、高支持力の杭工法が開発されている。そのため、既製コンクリート杭に使用されるコンクリートの高強度化が進んでいる。

日本の既製コンクリート杭の製造方法は、遠心力による締固めを用いており、昭和40年代に現行と殆ど変わらない技術が確立された。この製造方法のメリットは、硬練りのコンクリートであっても遠心力により余剰水や空隙が絞り出され密実なコンクリートにできること、中空円筒型のため鋼材の配置に対してコンクリート壁厚が薄くなりコンクリート使用量も抑えられ軽量にできることである。一方、デメリットは、ノロと呼ばれる固形分が非常に多いスラッジが発生し廃棄コストが掛かること、遠心成形用の型枠および遠心成型設備のコストが大きいことである。また、圧縮強度に関しても、遠心力によって外側から内側に向かってコンクリート層、モルタル層、スラッジ層と材料分離が発生し、粗骨材による圧縮強度への影響⁴⁾が大きくなること、外側と内側で収縮量に差が生じ⁵⁾ひび割れ等が発生することである。

著者らはこれまでに、遠心力によるノロの発生や骨材の材料分離が生じない流し込み打設による中空円筒型の超高強度既製コンクリート杭を開発するため、圧縮強度

がオートクレーブ養生(以下、AC養生)において180N/mm²以上となるコンクリート配合の検討を行い、W/B=12.5%で混和材に高炉スラグ微粉末の比表面積6000, 8000cm²/gおよびシリカフューム(以下、SF)を使用した配合において目標強度を達成することを確認した⁶⁾。

本研究では、混和材に使用する高炉スラグ微粉末を比表面積6000, 8000, 10000cm²/g(以下、BS6, BS8, BS10)から2種類づつ混合し、フレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を確認した。

2. 実験概要

2.1 実験項目

混和材に使用する2種類の高炉スラグ微粉末の組み合わせを変化させ、各組み合わせによる強度発現性およびフレッシュ性状に及ぼす影響を確認した。高炉スラグ微粉末の組み合わせは、BS6およびBS8, BS6およびBS10, BS8およびBS10の3水準とした。水結合材比(以下、W/B)は15.0%および12.5%とし、単位結合材量は1000kg/m³および1200kg/m³とした。試験はスランブフロー試験、空気量試験、圧縮強度試験を実施した。また、加振時における材料分離と流動性を確認する目的で、加振した状態でのU形容器による充填試験(以下、U形充填試験)、沈下量試験を実施した。

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。セメントは全てのシリーズで普通ポルトランドセメント(以下、C)を使用した。混和材には中国産のSF(比表面積200000cm²/gクラス)を1種類、高炉スラグ微粉末に比表面積が6000, 8000, 10000cm²/gクラスの3種類を使用した。細骨材には、東京都青梅市成木産硬質砂岩砕砂を使用した。粗骨材には東京都青梅市成木産硬質砂岩碎石の1505を使用した。

*1 (株)トーヨーアサノ 技術部 (正会員)

*2 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科教授 工博(正会員)

化学混和剤には、ポリカルボン酸系化合物の高性能減水剤(以下、SP)およびポリアルキレングリコール誘導体を上水道水で1%に希釈した消泡剤(以下、DF)を使用した。

配合を表-2に示す。W/Bは15.0%および12.5%の2水準とし、SF混合率(以下、SF/B)は単位結合材量の12%とし、高炉スラグ微粉末の混合率(以下、BS/B)は22%とした。また、各高炉スラグ微粉末の混合率は、各組み合わせで細かい方を10.5%、粗い方を11.5%とした。No.5およびNo.6は、結合材の構成を同一とし、練り混ぜ時間を変更した。単位水量は150kg/m³とした。粗骨材の単位量は845~852kg/m³、単位粗骨材絶対容積(L/m³)を320~323とした。目標スランプフローを60±5cmとし、目標空気量は2.5%以下とした。DF(原液1%希釈)は結合材に対して一律1.00%とした。化学混和剤は固形分を含め練混ぜ水の一部とみなした。

2.3 練混ぜ手順

コンクリートの練混ぜには容量60Lの二軸強制練りミキサを使用した。半分程度の粗骨材および細骨材、結合材、残りの細骨材および粗骨材の順で投入し、30秒間空練りを行った後かき落としをし、次に上水道水にSPを入れた練混ぜ水とDFを加えて練混ぜた。練混ぜ時間は、W/B=15.0%が240秒間、W/B=12.5%が420秒間とし

た。ただし、高炉スラグ微粉末にBS8およびBS10を使用した配合の練り混ぜ時間は、12.5%が420秒および720秒とした。

2.4 試験方法および養生方法

フレッシュ性状試験は、ミキサから排出後直ちにコンクリートの温度(JIS A 1156)、空気量(JIS A 1128)、スランプフロー試験(JIS A 1150)を測定した。スランプフロー試験での試料の詰め方は、3層とし各層25回突き棒で突き固めた。スランプフローの測定の際に50cm到達時間を測定(JIS A 1150)した。加振した状態でのU型充填試験は、「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過試験方法(案)(JSCE-F 701-2022)」の試験方法と同様とし、充填装置に横打ちでの既製コンクリート杭製造を想定して底面にアールのついたU形容器を使用した。流動障害には、JSCE-F 511に規定されている障害R2を使用

表-1 使用材料				
材料	種類	記号	密度※ (g/cm ³)	ブレーン 比表面積 (cm ² /g)
水	上水道水	W	-	-
セメント	普通ポルトランドセメント	C	3.16	3340
混和材	中国産シリカフェーム	SF	2.25	200000
	高炉スラグ微粉末1	BS6	2.91	6000
	高炉スラグ微粉末2	BS8	2.91	8000
	高炉スラグ微粉末3	BS10	2.91	10000
細骨材	砕砂	S	2.63	-
粗骨材	砕石 1505	G	2.64	-
化学 混和剤	高性能減水剤	SP	-	-
	消泡剤	DF		

※骨材の密度は「表乾密度」である。

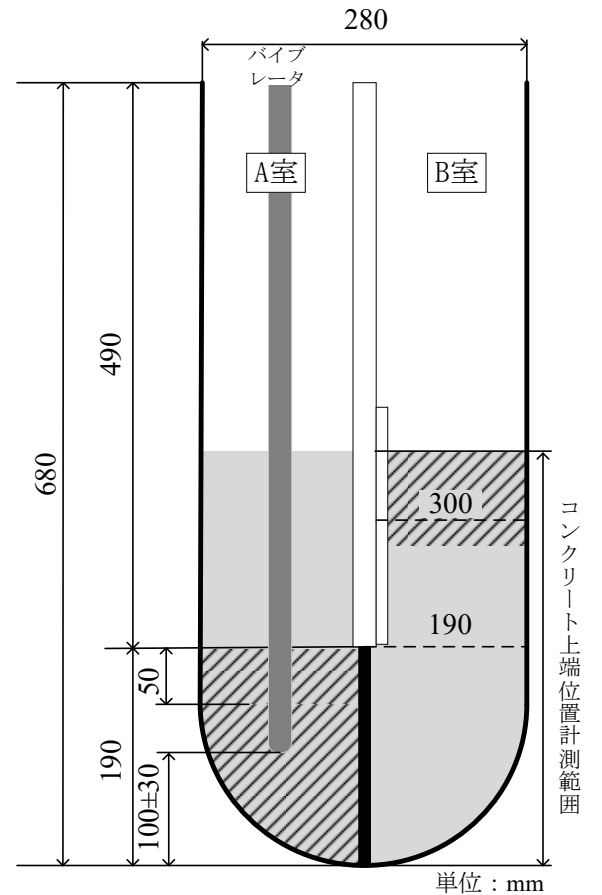


図-1 U形充填試験の試料採取位置

表-2 コンクリート配合

No.	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	混和材率 (%)	使用する BS の種類	単位量 (kg/m ³)					
						W	C	BS	SF	S	G
1	15.0	22.7	35.0	34.0	BS6,BS8	150	660	220	120	453	845
2	15.0	22.7	35.0	34.0	BS6,BS10	150	660	220	120	453	845
3	12.5	18.9	24.0	34.0	BS6,BS8	150	792	264	144	268	852
4	12.5	18.9	24.0	34.0	BS6,BS10	150	792	264	144	268	852
5,6	12.5	18.9	24.0	34.0	BS8,BS10	150	792	264	144	268	852

した。また、加振は仕切りゲート開放と同時に開始し、流動が停止するまで行い、流動停止後にB室のコンクリート上端位置を計測した。試料の採取位置は図-1の斜線部範囲より採取した。沈下量試験は、「加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法(案)(JSCE-F702-2022)」に準拠し、加振時間は10秒、容器には容量20Lのプラスチック製のペール缶を使用した。U形充填試験および沈下量試験ともにパイプレータには、振動体の呼び径28mm、振動数が200~250Hzを使用した。

養生方法は、蒸気養生後に20℃気中養生またはAC養生を行った。蒸気養生は打設後に蒸気養生槽内にて20℃で3時間以上の前置き、2.5時間かけて70℃まで昇温、70℃で5.5時間まで保持の後、5時間かけて20℃まで降温した。AC養生は、2時間以上かけて1.0MPaまで昇圧、5時間以上の1.0MPa下で約180℃の高压高温蒸気養生を行い、その後2時間以上かけて降圧を実施した。

圧縮強度試験は、φ100mm×h200mmの円柱供試体を用い、JIS A 1108に従って行った。圧縮強度試験の試験材齢は、蒸気養生後に20℃気中養生を行った供試体は材齢14日で、AC養生を行った供試体はAC養生後3日以内である。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状試験結果を表-3、U形充填試験および

沈下量試験の結果を表-4に示す。50cm到達時間および間隙通過速度を図-2、粗骨材量比率を図-3に示す。結合材にBS6とBS8を混合したNo.1およびNo.3と比較してBS6とBS10を混合したNo.2およびNo.4の方が、50cm到達時間が若干短くなったが、間隙通過速度は若干遅くなった。結合材にBS8とBS10を混合したNo.5およびNo.6は、50cm到達時間がNo.5で最も長くなっており、間隙通過速度はNo.3、4と比較して若干遅くなっている。これは結合材の粉末度が増加したことが影響していると考えられる。No.6はSPの添加率を減らした上で、No.4と比較しスランプフロー値が大きくなり50cm到達時間が同等であったことから、加振を伴わない状態での

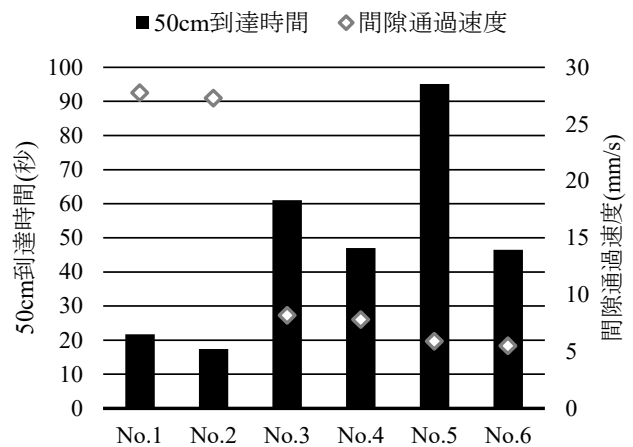


図-2 50cm 到達時間および間隙通過速度

表-3 フレッシュ性状試験結果

No.	W/B (%)	混和材率 (%)	使用する BS の種類	SP 添加率 (B×%)	練混ぜ時間 (秒)	スランプ フロー (cm)	50cm 到達 (秒)	空気量 (%)	温度 (℃)
1	15.0	34.0	BS6,BS8	1.10	240	64.0	21.7	1.8	29
2	15.0	34.0	BS6,BS10	1.10	240	60.0	17.4	2.4	29
3	12.5	34.0	BS6,BS8	2.00	420	57.0	61.0	1.3	25
4	12.5	34.0	BS6,BS10	2.00	420	64.0	47.0	1.8	25
5	12.5	34.0	BS8,BS10	2.00	420	58.5	95.1	1.2	29
6	12.5	34.0	BS8,BS10	1.76	720	66.5	46.5	2.3	27

表-4 U形充填試験および沈下量試験の結果、圧縮強度試験結果

No.	W/B (%)	U 形充填試験					沈下量試験	圧縮強度試験結果	
		間隙通過速度 (mm/s)	流動停止後の B 室 コンクリート上端位置 (mm)	粗骨材量比率				蒸気養生後 材齢 14 日 (N/mm ²)	AC 養生後 (N/mm ²)
				A 室 (%)	B 室 (%)				
1	15.0	28	360	97	103	91	125	170	
2	15.0	27	340	94	103	95	129	172	
3	12.5	8.2	355	105	101	94	134	185	
4	12.5	7.8	350	107	103	88	130	183	
5	12.5	5.9	350	97	98	92	143	189	
6	12.5	5.5	330	91	102	91	149	186	

流動性が改善された。No.6 で 50cm 到達時間が短くなった要因として、練り混ぜ時間を増やしたことで高性能減水および結合材の分散が良くなったためと考えられる。No.5 は No.6 と比較して 50cm 到達時間が大幅に長いものの間隙通過速度には大きな差はなかった。No.1 と No.2、No.3 と No.4 をそれぞれ比較しても 50cm 到達時間が短くなっていても間隙通過速度は速くならず同等以下となった。

流動停止後の B 室のコンクリート上端位置は、330～360mm となった。A 室と B 室とでコンクリート上端位置が同一レベルになる理論値は約 360mm であり、理論値よりコンクリート上端位置が低くなった要因として、試料の粘性が高く U 形容器の A 室側面に試料が附着したためと考えられる。

粗骨材の材料分離については、無加振時は写真-1 のようにスランブフロー試験状況から確認しており、全ての配合で著しい材料分離は確認されなかった。加振時には、U 形充填試験および沈下量試験にて確認している。「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針(案)」⁷⁾ では、ボックス形容器において材料分離抵抗性の指標として間隙通過速度 40mm/s 以上としている。本検討では、U 形容器で充填試験を実施し、間隙通過速度が 40mm/s 以下となったが粗骨材量比率は概ね 90%以上であり、沈下量試験においても粗骨材量比率が概ね 90%以上であったことから、材料分離抵抗性は高いと考えられる。

3.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を表-4 および図-4 に示す。W/B=15.0%の No.1 と No.2 を比較して、BS6 および BS10 を混合した No.2 の方が蒸気養生後で 4N/mm²、AC 養生後で 2N/mm² 高くなり同等以上となった。W/B=12.5%においては、BS8 および BS10 を混合した No.5 と No.6 の蒸気養生後の圧縮強度が No.3 と比較して 10～15N/mm² ほど高くなった。ただし、AC 養生後の圧縮強度は、No.3 ～No.6 で 186±3N/mm² であり、蒸気養生後の強度差よりも、AC 養生後の強度差は小さくなった。

4. 結合材の粉体粒度特性による検討

結合材に使用する高炉スラグ微粉末の組合わせをすることで流動性に差が生じた。また、50cm 到達時間と間隙通過速度とで流動性の傾向が異なっていた。藤原らの研究⁸⁾では、粉体の粒度特性として Rosin-Rammler 式における n 値(以下、n 値)とブレーン比表面積がモルタルにおける降伏値および塑性粘度に与える影響を検討しており、n 値が 0.8 までは値が小さいほど降伏値が低下し、ブレーン比表面積が 4000cm²/g 以上では値が大きいほど塑性粘度が増加するとしている。

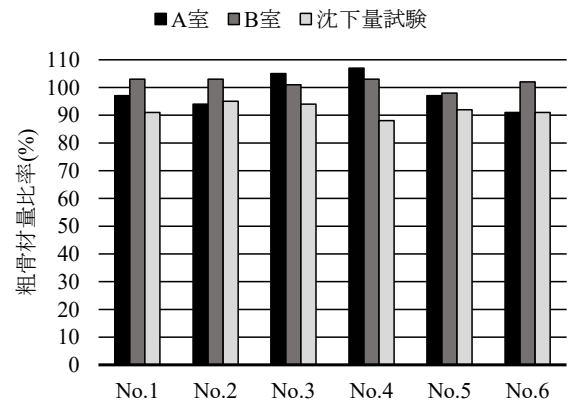


図-3 粗骨材量比率



写真-1 スランブフロー試験状況例 (No. 3)

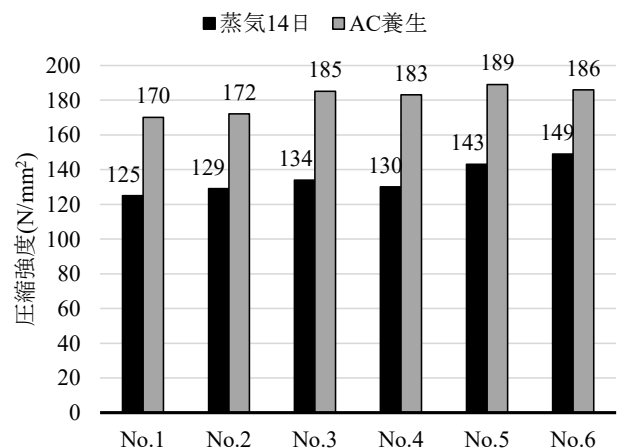


図-4 圧縮強度試験結果

表-5 各結合材構成における粉体特性値

No.	使用する BS の種類	n 値	BS 分計算比表面積
1,3	BS6,BS8	1.1	9080
2,4	BS6,BS10	1.0	11100
5,6	BS8,BS10	1.0	11900

ここでは、No.1～6 の各結合材構成における n 値と高炉スラグ微粉末分(以下、BS 分)の比表面積が流動性に与えた影響を検討する。各結合材構成における累積体積率を図-5、単一での各結合材および BS 分の累積体積率を図-6、各結合材構成における粉体の特性値を表-5 に示す。 n 値は式(1)および式(2)より求めた。また、 n 値は値が小さいほど粒度分布範囲が広がるものである。

$$Q(x) = 100(1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{x_e}\right)^n\right\}) \quad (1)$$

$$n = \ln(-\ln(1 - Q(x))/\ln\left(\frac{x}{x_e}\right)) \quad (2)$$

$Q(x)$: 累積体積率(%), x : 粒子径(μm),

x_e : 累積体積率 63.2%粒子径(μm)

BS 分の比表面積は、粉体が均一な球形粒子と仮定して粒度分布から式(3)を用いて算出した。

$$S_v = \frac{6}{x(50)} \quad (3)$$

S_v : 比表面積(cm^2/g),

$x(50)$: 累積体積率 50%粒子径(μm)

なお、粒度分布の測定には、レーザー回折式の粒度分布測定装置を使用し、分散媒にエタノールを用いた。

No.1, 3 と No.2, 4 の n 値を比較すると、 n 値が小さくなる No.2, 4 の方が 50cm 到達時間は早い結果となっている。また、No.5, 6 についても、練り混ぜ時間を延長し十分に材料が分散されたと考えられる No.6 であれば n 値が同程度の No.4 と同等の 50cm 到達時間となっている。このことより、50cm 到達時間と n 値にはある程度の相関性があると考えられる。

間隙通過速度に関しては、BS 分の比表面積が増加すると速度が低下する傾向を示し、 n 値との相関性は確認できなかった。西村らの研究⁹⁾では、振動締め固めにより降伏値または塑性粘度が低下するとしており、本研究で実施した配合においては加振状態での流動性には影響しない程度に降伏値が低下したと考えられる。

これらのことから、 $W/B=12.5\sim15.0\%$ 程度の低水結合材比において高炉スラグ微粉末などの粉末度の高い材料を混和した場合、加振しない状態での流動性にはモルタル分の降伏値が影響し、加振した状態ではモルタル分の降伏値の影響は少なく塑性粘度の影響が大きいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、水結合材比 12.5%および 15.0%において結合材に普通ポルトランドセメント、2 種の高炉スラグ

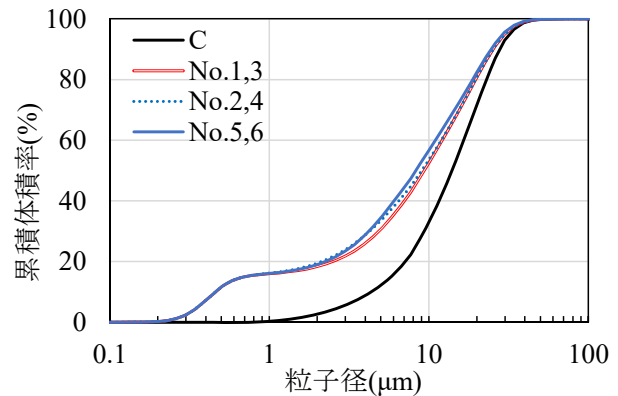


図-5 各結合材構成における累積体積率

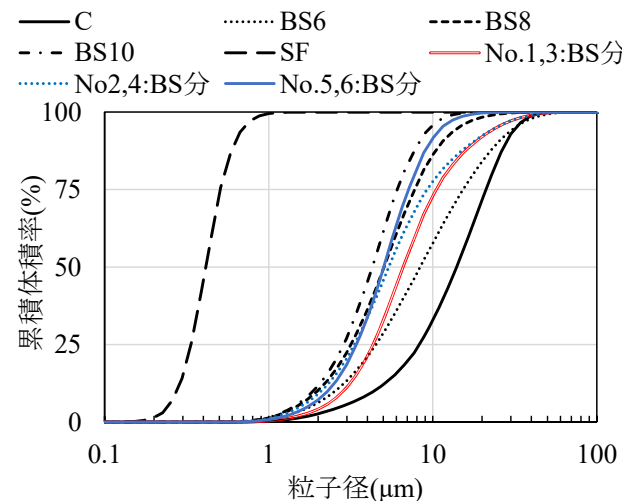


図-6 各結合材および BS 分の累積体積率

微粉末およびシリカフュームを使用し、2 種類の粉末度の違う高炉スラグ微粉末の組み合わせを変えたことによるフレッシュ性状および圧縮強度に与える影響を確認した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 今回実施した結合材構成においてオートクレーブ養生を施すことで、 $W/B=15.0\%$ では 170N/mm^2 以上、 $W/B=12.5\%$ では 180N/mm^2 以上の圧縮強度が得られる。
- (2) 低水結合材比において高炉スラグ微粉末などの粉末度の高い材料を混和し、スランブフロー値 67cm 以下となった本実験の範囲では、加振時においても高い材料分離抵抗性を示す。
- (3) 低水結合材比において高炉スラグ微粉末などの粉末度の高い材料を混和した場合、加振しない状態での流動性にはモルタル分の降伏値が影響し、加振した状態ではモルタル分の降伏値の影響は少なく塑性粘度の影響が大きいと考えられる。

本研究は目的とする流し込み打設による圧縮強度 180N/mm^2 以上の既製コンクリート杭の製造に対して、 $W/B=12.5\%$ において圧縮強度を満足し材料分離抵抗性

の高い配合を確認できた。しかし、 $W/B=12.5\%$ における間隙通過速度が遅く施工性や作業性については今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，日本建築学会，pp.178-283，第3版，2019.11
- 2) 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能，日本建築学会，pp.221-246，第1版，2022.3
- 3) 本間 裕介ほか：二重管方式を採用した高靱性型 SC 杭の変形性能，日本建築学会構造系論文集，第84巻，第760号，pp.819-829，2019.6
- 4) 柿崎 正義，枝広 英俊：粗骨材の品質が超高強度コンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，第4巻，第2号，pp.9-21，1993.7
- 5) 松井 淳史，伊藤 始，富田 真人，水谷 征治：遠心成形コンクリートの収縮特性と強度分布特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.526-531，2012
- 6) 菅原 岳美，藤原 浩巳，丸岡 正知：流し込み打設による既製コンクリート杭に用いる F_c180N/mm^2 の超高強度コンクリート開発に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.961-966，2024
- 7) 土木学会 コンクリート委員会：コンクリートライブラリー161 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針（案），土木学会，pp.6，第1版，2023.2
- 8) 藤原 浩巳，長瀧 重義，大即 信明，遠藤 秀紀：粉体の粒度特性が及ぼすモルタルの降伏値および塑性粘度への影響，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.151-158，1996.2
- 9) 西村 和朗，加藤 佳孝：振動締固めがフレッシュコンクリートのフロー速度に与える影響，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.76，No.4，pp.421-431，2020