

論文 モルタル硬化体を用いた水溶性セルロースの遠心成形コンクリートへの適用に関する基礎的実験

木田 綺音^{*1}・山口 晋^{*2}

要旨：コンクリートパイル製造の際に用いるオートクレーブ養生は、環境負荷が大きいことが課題であったが、シリカフェュームの混和ならびに十分な前置き養生時間の確保により環境負荷低減を目的とした低温オートクレーブ養生方法を提案した。この技術を実用化するにあたっては、製造時に実施する遠心成形に伴う遠心作用による製品への影響、ならびに排出されるスラッジ水処理等が課題であった。そこで本研究では、水溶性セルロースであるメチルセルロースを用いて前述した課題解決を目的とした基礎実験を実施した。その結果、メチルセルロースを適量混和した場合、空隙率が低下し強度増加に寄与する結果が示された。

キーワード：メチルセルロース、シリカフェューム、コンクリートパイル、オートクレーブ養生

1. はじめに

近年、i-Construction の推進に伴い、建設現場での生産性向上のためにプレキャストコンクリートの積極的な利用が求められている¹⁾。また、実際の製品製造においては、これまでの高い品質を確保しつつ製造効率を高めるための経済性や環境負荷軽減といった観点から多くの研究余地が残されており、今後のさらなる利用普及率の拡大に向けた取り組みが必要である²⁾。このような背景の中、我々はこれまでにコンクリートパイルを対象とする高強度コンクリート二次製品の製造に着目した研究を行ってきた。これらの製造には、180°C-1MPa の高温高压蒸気養生のオートクレーブ養生と呼ばれる養生を実施する製造方法がある³⁾。この方法は、極短期間で高強度化を実現する一方で、ボイラーの燃焼による大量の重油を消費し、それに伴い多くの CO₂ を発生させることから、近年加速している脱炭素社会実現に対しては課題となっていた⁴⁾。そこで、十分な前置き養生時間の確保ならびにシリカフェュームの混和により、オートクレーブ養生温度を従来の 180°C から 30°C 低温化した 150°C の場合においても、180°C の場合とほぼ同等の高強度発現が可能であることを明らかにし、環境負荷を低減した低温オートクレーブ養生技術を提案した^{5) 6)}。しかし、この技術を実用化するにあたっては、以降で詳述するシリカフェュームの混和に伴う流動性向上により、PC 杭製造時の遠心成形が大きく影響する製品内面側の品質確保が課題と考えた。遠心成形は、遠心力を利用してコンクリートを締固めることで緻密化し、余剰水を脱水して水セメント比を低くすることで高強度化する成形方法⁷⁾である。しかし、前述した通り、低温オートクレーブ養生方法においては、高強度確保のためにシリカフェュームの混和が必須であり、混和によりコンクリートの流動性が向上する。このコン

クリートに対し遠心成形を実施すると、密度の小さいセメントやシリカフェュームの一部が内側にスラッジとして余剰水と一緒に排出される影響が大きくなる。このようにして内面に形成されたセメントペースト層は、脆弱層として強度に影響⁸⁾するほか、スラッジ水の処理等の課題が顕著となる。そのため低温オートクレーブ養生技術の実用化にはこれらの課題解決が必要である⁹⁾。

以上のことから、建設、化学分野で一般的に用いられている増粘作用を有する水溶性セルロースであるメチルセルロース^{10) 11)}を使用し、セメントの水和反応とオートクレーブ養生時における水熱反応に必要な水分量をコンクリート内に確保させると同時にスラッジ排出量の低減を目的とした研究を開始した。本研究は、このメチルセルロースの添加量ならびにシリカフェュームの添加量を変化させた場合のモルタルのフロー値や硬化後の圧縮強度および細孔空隙に関する基礎的実験を行ったものである。ここではまず、一般的なオートクレーブ養生温度 180°C の場合において、水溶性セルロース添加の効果の確認を目的とし、モルタル硬化体を用いた検討結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 使用材料

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³, 比表面積:3370cm²/g)、シリカフェュームはフェロシリコン系(密度:2.30g/cm³, SiO₂:94.0%, BET 比表面積:19.1m²/g, 以下 SF(F)と表記)を用いた。細骨材は埼玉県熊谷市産の洗砂(S)(ps=2.60g/cm³, 吸水率 1.38%, 粗粒率 F.M.=2.94)、ナフタレン系の高性能 AE 減水剤(SP)(PSR100, psp=1.14g/cm³)、水溶性セルロースとしてメチルセルロース(メトロゾ 90SH-100, 以下 AD(M)と表記)を使用した。

*1 日本大学 生産工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科准教授 (正会員)

2.2 配合

配合は **Table 1** に示す通りである。水セメント比は 31.2%とし、PC 杭の実製造に用いられている配合を参考とした。次に、SF(F)の添加率はセメント重量比で何も添加していない 0%を含め、C×2.5%、C×5.0%の 3 水準とした。なお、これらの SF(F)添加は細骨材として置換した。次に、AD(M)の添加は、セメント重量比でそれぞれ 0%、C×0.005%、C×0.010%の 3 水準とした。これらは従来の使用方法に準拠して 2.0%濃度の水溶液を作製して混和したことから、固形分である AD(M)を上記の添加率で計量し、溶媒は水に内割とした。以上より、SF(F)の添加率の 3 水準に対し、それぞれ AD(M)添加率を 3 水準とした全 9 水準について検討を行った。なお、混和剤として高性能 AE 減水剤を使用し、その添加量はセメント重量比で C×2.2%として水に内割とした。

2.3 供試体作製

(1) 練混ぜ

モルタルの練混ぜは、容量 5L のモルタルミキサーを使用した。その手順は、セメント、細骨材、シリカフェームを 30 秒間空練りした後、予め混和剤を混ぜた水道水を注水し、低速 3 分、高速 4 分間練り混ぜた。

練混ぜ後は、φ50×100mm の円柱型枠に 1/2 層ごとに流し込み、テーブルバイブレーターにより約 60 秒間の振動締めを行った。打設後は、打設面にラップを被せ、濡れウエスで覆い、ビニールで密閉し前置き養生を開始した。

(2) 養生方法

養生方法は、**Fig.1** に示す方法ならびに温度条件に基づき実施した。まず前置き養生は、20℃の室内で 72 時間の湿気養生を行い^{5), 9)}、その後脱型を目的とした 65℃・4 時間の蒸気養生を行った。この蒸気養生は恒温恒湿器を使用し、供試体を濡れウエスで覆い、ビニールで密封し加熱することで湿潤飽和状態を保った。次に、同図に示す一般的な温度勾配¹¹⁾⁻¹³⁾に基づいた 180℃・3 時間のオートクレーブ養生を実施した。なお、用いたオートクレーブ養生装置は **Fig.2** に示す通りである。オートクレーブ養生後は自然放冷し、翌日養生装置から取り出した。

2.4 フロー試験

フロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した 15 回の落下運動を与えたモルタルの広がり径が最大と認める方向とこれに直角な方向を測定し、2 回の試験の平均値をフロー値とした。

2.5 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、オートクレーブ養生後に圧縮強度を測定した。なお、試験は端面をダイヤモンド研磨機で平坦にした後に行い、3 本の平均値を試験結果とした。

2.6 細孔空隙測定

細孔空隙の測定は、水銀圧入式ポロシメータ(Auto Pore IV 9510)を用いて測定した。細孔径分布は、円筒形の細孔モデルを仮定し、水銀の表面張力を 485mN/m、水銀の接触角を 130°として算定した。また、細孔直径の測定範囲

Table 1 Mortar Proportion

No.	W/C (%)	(kg/m ³)				SP (C×%)	AD(M) (C×%)
		W	C	SF(F)	S		
SF(F) C×0%	31.2	219	757	0	1362	2.2%	0%
SF(F) C×2.5%				19	1342		0.005%
SF(F) C×5%				38	1324		0.010%

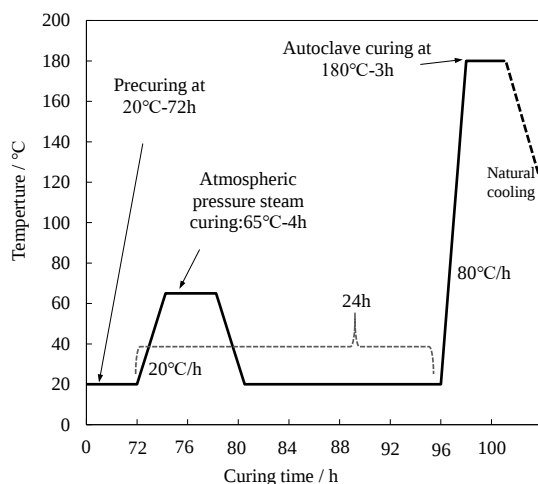


Fig.1 Curing pattern

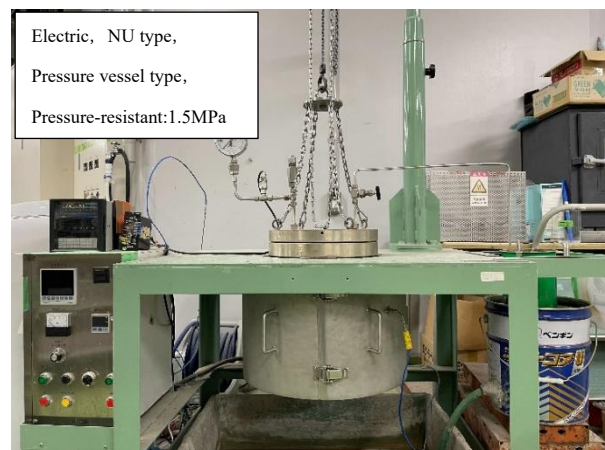


Fig.2 Autoclave Curing Equipment

は $3.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ - $10 \mu\text{m}$ とした。測定試料は、各水準で作製したオートクレープ養生後のモルタル供試体から、ダイヤモンドカッターを用いて 2.5 - 5.0mm 角に切り出した細粒試料を作製し、その細粒試料をアセトン中に 30 分間浸した後、直ちに D 乾燥法である水蒸気圧 $5 \times 10^{-4} \text{mmHg}$ 下で乾燥を実施したものとした¹⁴⁾。なお、空隙の測定範囲は、 3nm - $10 \mu\text{m}$ であり、既往の研究¹⁵⁾、¹⁶⁾に基づき、 3 - 6nm の空隙をゲル空隙、 6 - 50nm を毛細管空隙、 50 - 500nm を粗大毛細管空隙、それ以上の空隙を粗大空隙と定義して検討を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 フロー値に関する検討

フロー試験の結果を Fig.3, Fig.4 に示す。この結果によれば SF(F)の添加率を増加させるとフロー値も増加する傾向は明らかで、SF(F)添加率が 5.0%時において AD(M)の添加率に関わらず高い流動性が認められた。これは SF(F)の混和による一般的なマイクロファイラー効果による流動性向上による影響¹⁷⁾、¹⁸⁾であると考えた。次に、AD(M)に注目すると、どの SF(F)添加率の水準においても、AD(M)を添加することでフロー値は減少する傾向が認められた。これは、AD(M)の増粘作用、保水性作用により流動性が低下したためであることは明白であり、各 SF(F)の添加率におけるフロー値と AD(M)の添加率の関係は、線形関係にあると仮定した場合はほぼ直線的でその傾きは大きくなる傾向が確認できた。

3.2 圧縮強度に関する検討

Fig.5 に圧縮強度試験の結果を示す。この結果によると SF(F)の添加率に関わらず、AD(M)0.005%添加時の圧縮強度は増加し、AD(M)0.010%になると低下した。また、SF(F)2.5%AD(M)0.005%の場合には、 116.1N/mm^2 となり、本実験の範囲における最大圧縮強度となった。一方、SF(F)添加率が 5.0%の場合においては、SF(F)0%、SF(F)2.5%と比較して圧縮強度が低下する傾向が認められた。

これらの要因については、Fig.6 に示すモルタルの単位体積質量の結果を用いて考察する。この単位体積質量の測定方法としては、まず供試体作製後のモルタル硬化体の直径ならびに高さを JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠してノギスを用いて測定し、その結果から体積を算出した。そして質量を測定し、体積の算出結果と合わせて単位体積質量を算出した。これらの結果から、SF(F)ならびに AD(M)の添加に伴い単位体積質量は小さくなる傾向を示した。AD(M)の添加量に着目すると、AD(M)0%と AD(M)0.005%の場合はほぼ同等または AD(M)0.005%の場合が若干高くなる傾向に対し、AD(M)0.010%まで添加すると極端に低くなる傾向が顕



Fig.3 Flow Tests

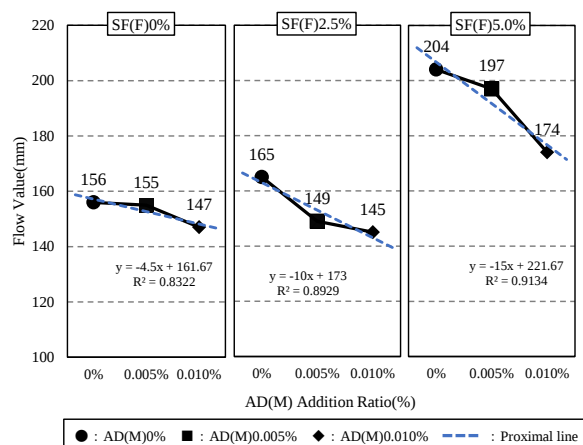


Fig.4 Flow Value

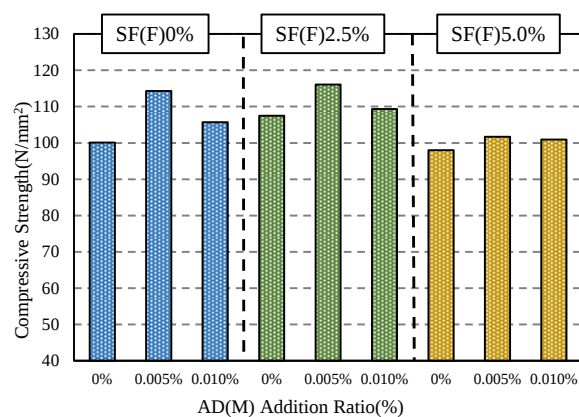


Fig.5 Compressive Strength

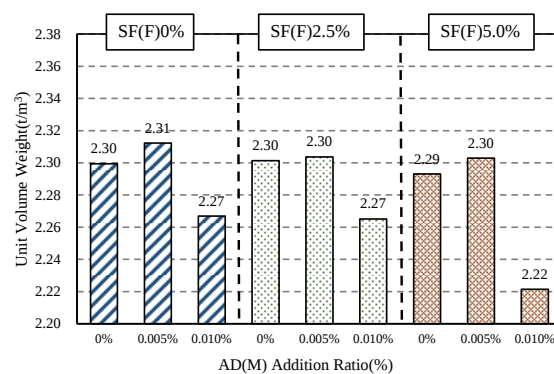


Fig.6 Unit Volume Weight

著であった。

以上より、圧縮強度の増減の挙動は、SF(F)による流動性向上と AD(M)の添加に伴う粘性作用増加による影響を大きく受けたことによる、モルタル硬化体作製時の充填性の低下が圧縮強度低下の原因のひとつであると考察した。

3.3 細孔空隙に関する検討

Table 2 に細孔空隙測定に関する検討結果を示す。これらは前述で定義したゲル空隙(3-6nm)、毛細管空隙(6-50nm)、粗大毛細管空隙(50-500nm)、粗大空隙(500nm-10 μ m)の4種類の各細孔空隙径における空隙量で整理した。なお、各欄の上段の値は各空隙径における空隙率を示し、下段に括弧付けで記載した値は全空隙量を1.000としたときの各空隙量の割合を示したものである。この結果によると、まずゲル空隙(3-6nm)ではAD(M)0%、0.010%添加時と比較するとAD(M)0.005%の場合に割合が高い傾向が確認された。次に粗大空隙(500nm-10 μ m)では、SF(F)全ての水準において、AD(M)の添加率を増加させるにつれて割合が増えることが示された。また、全空隙量についてはSF(F)すべての水準でAD(M)0.005%添加時に最も少なくなる傾向であった。

次に、**Fig.5** で示した圧縮強度試験結果と合わせて考察すると、まずSF(F)0%の場合は、強度が最も高かったAD(M)0.005%添加時のゲル空隙量の割合が最も多く、かつ全空隙量が最も少ない結果となった。また、SF(F)2.5%の場合では、ゲル空隙量はAD(M)0%と0.005%でほぼ同じ割合であったが、SF(F)0%の場合と同様に強度が発現したAD(M)0.005%添加時の全空隙量が最も少ない結果となった。一方、SF(F)5.0%ではAD(M)0%から

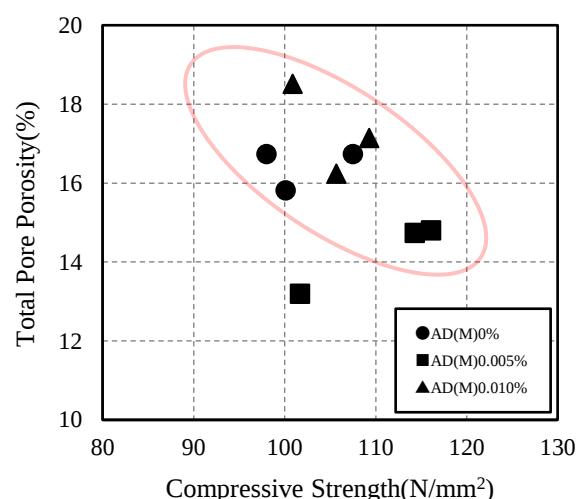


Fig.7 Relationship between Pore Porosity(Total Pore) and Compressive Strength

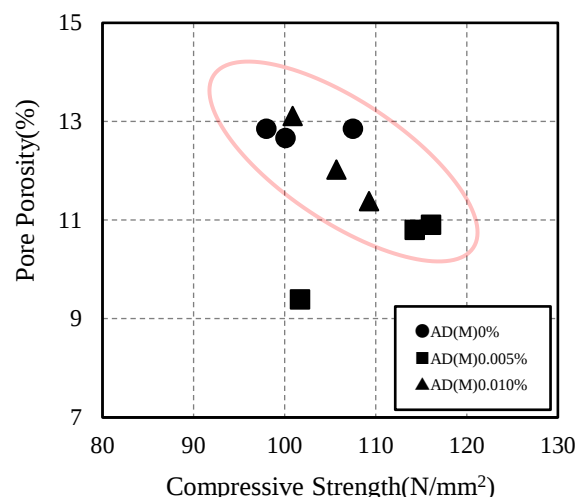


Fig.8 Relationship between Pore Porosity(6-50nm) and Compressive Strength

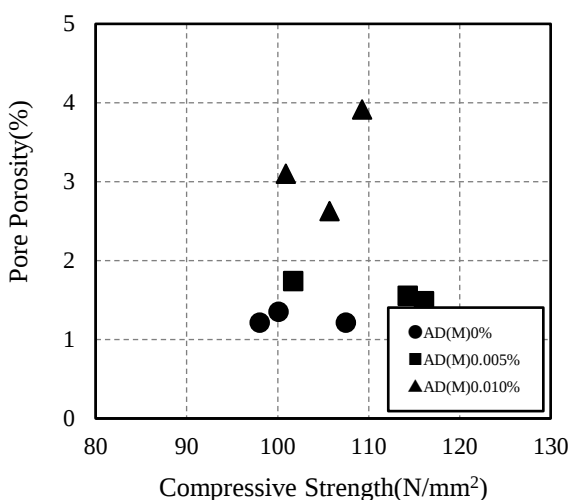


Fig.9 Relationship between Pore Porosity(50-500nm) and Compressive Strength

		Pore Volume(%)				
SF(F)	AD(M)	3-6nm	6-10nm	10-50nm	50nm-10 μ m	Total
AC	0%	1.311 (0.094)	2.311 (0.165)	10.355 (0.741)	1.833 (0.116)	15.810 (1.000)
		1.772 (0.120)	2.479 (0.168)	8.320 (0.565)	2.159 (0.147)	14.730 (1.000)
		1.169 (0.072)	2.340 (0.144)	9.682 (0.596)	3.048 (0.188)	16.238 (1.000)
	2.5%	2.129 (0.127)	2.825 (0.169)	10.026 (0.599)	1.751 (0.105)	16.732 (1.000)
		1.857 (0.125)	2.509 (0.170)	8.389 (0.567)	2.046 (0.138)	14.801 (1.000)
		1.319 (0.077)	1.982 (0.116)	9.398 (0.548)	4.441 (0.259)	17.140 (1.000)
	5.0%	2.129 (0.127)	2.825 (0.169)	10.026 (0.599)	1.751 (0.105)	16.732 (1.000)
		1.353 (0.103)	1.183 (0.090)	8.203 (0.622)	2.449 (0.186)	13.188 (1.000)
		1.796 (0.097)	2.646 (0.143)	10.466 (0.565)	3.613 (0.195)	18.516 (1.000)

※ The ratio of each pore volume to "Total" is parentheses at the bottom

AD(M)0.005% 添加時にかけてゲル空隙量の割合は増加していないものの、AD(M)0.005%の際に全空隙量が最も少ない結果となり、わずかだが強度も増加する傾向が見られた。

このことから、ゲル空隙量の割合の増加や全空隙量の減少等、複合的な要因によって圧縮強度に寄与していると考えられる¹⁹⁾⁻²¹⁾。特に SF(F)5.0%では全空隙量が一番小さいにも関わらずゲル空隙の割合が増加していないため、大幅な強度増加には影響しなかったと推察した。一方で、AD(M)を 0.010%まで添加すると粗大空隙(50nm-10 μ m)の割合が増えることが確認され、圧縮強度は低下する傾向が認められた。以上より、AD(M)を適量添加することで、その増粘作用による緻密化が強度発現性に寄与するものと考えた。

次に、オートクレーブ養生後の圧縮強度と空隙量の相関関係を Fig.7, Fig.8, Fig.9 に示す。なお本結果は、Fig.7 に全細孔空隙量、Fig.8 に 6-50nm の毛細管空隙量、そして Fig.9 に 50-500nm の粗大毛細管空隙量で分類し考察した。まず、圧縮強度と全空隙量の関係によれば、圧縮強度の増加に伴い空隙量が減少する相関関係が認められた。また、AD(M)0.005%、AD(M)0%、AD(M)0.010%の順で空隙量は多くなる傾向であった。圧縮強度と 6-50nm の毛細管空隙の関係については、全空隙量の場合と同様に、圧縮強度の増加に伴い空隙量が減少する傾向であった。次に、AD(M)の添加率における空隙量を比較すると、AD(M)0.005%の添加の場合に最も空隙量が少なくなる傾向であった。同様に 50-500nm の粗大毛細管空隙の関係に着目すると、全空隙量と毛細管空隙で見られた相関関係は認められなかった。その一方で、AD(M)0%ならびに AD(M)0.005%の場合は、ほぼ同じ空隙量を示したのに対し、AD(M)0.010%では空隙量が増加する傾向が確認できた。

以上の細孔空隙径分布の結果から、AD(M)を 0.005%添加した場合が最も全空隙量は少なく、強度発現に寄与しているものの、AD(M)0.010%まで添加した場合は、粗大な毛細管空隙が増加すること、かつ単位体積質量の結果より、充填性が低下することから、AD(M)0.005%の場合に比べて強度は低下することを明らかにした。

4. まとめ

本実験で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 増粘作用、保水作用を持つメチルセルロース AD(M)を添加することにより、流動性は低下することが確認された。
- (2) メチルセルロース AD(M)を 0%から 0.005%添加すると強度は増加するが、0.010%まで添加率を上げると強度は低下した。

- (3) 細孔空隙測定により、メチルセルロース AD(M)を 0%から 0.005%添加すると全空隙量が減り、0.010%まで添加すると全空隙量が増加することが明らかとなった。
- (4) AD(M)を 0.005%添加した際に強度が増加した(2)の要因として、(3)に記述した細孔空隙測定における全空隙量と 3-6nm のゲル空隙の割合が強度発現に寄与したと推察した。
- (5) AD(M)を 0.010%まで添加した際に強度が減少した要因については、50nm-10 μ m の粗大空隙の増加、また単位体積質量が著しく減少する傾向が見られたことによるものと推察した。

今後は、コンクリート配合により遠心成形を実施した場合の強度発現性やスラッジ性状について検討を実施し、低温オートクレーブ養生技術の実用化に向けた検討を進める予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費(若手研究, 19K15063, 研究代表者：山口晋)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献：

- 1) 谷口英武ほか：遠心成形による薄肉 PCa 柱を用いた倉庫の施工，コンクリート工学，Vol.30, No.5, pp.44-52, 1992
- 2) 那須将弘：プレキャストコンクリート製品の活用の現状と普及のための課題，コンクリート工学，Vol.55, No.9, pp.800-803, 2017
- 3) 西晴哉：オートクレーブ養生と超高強度コンクリート，コンクリート工学，Vol.18, No.5, pp.9-18(1980)
- 4) 柄澤英明：コンクリート二次製品における CO₂ 低減の取り組み，コンクリート工学，Vol.48, No.9, pp.102-105, 2010
- 5) 山口晋ほか：セメントモルタルを用いたオートクレーブ養生による高強度発現機構に関する基礎的研究，日本大学生産工学研究報告 A, No.53, Vol.2, pp.11-20, 2020
- 6) 山口晋ほか：水セメント比およびシリカフュームの添加率に着目した低温オートクレーブ養生に関する基礎的研究，材料，Vol.62, No.10, pp.615-620, 2013
- 7) 船本憲治ほか：遠心成形した高強度コンクリート製品の基本性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.1541-1546, 2006
- 8) 菅一雅，榊田佳寛：高強度コンクリートの遠心成形性に及ぼす調合の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.606, pp.29-34, 2006

- 9) 下山善秀:遠心力締固め製品製造時のスラッジ防止剤および低減剤の現状,コンクリート工学, Vol.34, No.5, pp.16-22, 1996
- 10) 加藤忠哉ほか:水溶性セルロース誘導体の混和によるセメントモルタルの改質,高分子論文集, Vol.44, No.3, pp.179-183, 1987
- 11) 岡村甫, 小沢一雅:コンクリート用混和剤 MC, 繊維と工業, Vol.48, No.10, pp.557-560, 1992
- 12) (公)日本コンクリート工学会:コンクリート技術の要点' 11, p.258, 2011
- 13) H. Hamada et al. : Influence of different curing methods on the compressive strength of ultra-high-performance concrete, Case studies in construction materials, Vol.17, No.e01390, pp.1-16, 2022
- 14) (社)セメント協会:C&C エンサイクロペディア, p.44, 2004
- 15) (社)セメント協会:わかりやすいセメント科学, p.81, 1997
- 16) 五十嵐心一, 西川友梨:水銀圧入法と画像解析により求めたセメントペーストの毛細管空隙構造の相関性,コンクリート工学論文集, Vol.24, No.3, pp.183-191, 2013
- 17) 米倉亜州夫:超微粒子シリカフュームのコンクリートへの利用, 粉体工学会誌, Vol.26, No.7, pp.512-519, 1989
- 18) (株)技術書院:コンクリート総覧, p.373, 1998
- 19) 鏡健太ほか:フライアッシュセメントの水和反応と細孔構造に及ぼす蒸気養生の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.586-591, 2012
- 20) 片岡峻大ほか:セメントペースト硬化体の空隙構造に及ぼす減水剤の種類および添加量の影響、日本大学理工学部学術講演会予稿集、pp.476-477, 2019
- 21) 羽原俊祐、沢木大介:硬化コンクリートの空隙構造とその物性、石膏と石灰、No.240、pp.314-323, 1992