

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15063

研究課題名（和文）低温オートクレーブ養生による高強度コンクリート二次製品の創出

研究課題名（英文）Creation of high strength concrete secondary products by low temperature autoclave curing

研究代表者

山口 晋（YAMAGUCHI, Shin）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：60582468

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高強度コンクリート二次製品の製造に用いられている180℃のオートクレーブ養生を150℃に低温化した新しい養生技術の実用化を目的としたものである。これを実現可能とするシリカフュームの添加に伴う遠心成型時の材料分離抑制ならびにスラッジ発生量低減に着目した実験を行った。その結果、シリカフュームは2.5%、メチルセルロースは0.01%添加した場合において高い強度発現性が得られ、メチルセルロースによるスラッジ発生抑制や密度低下の効果が認められた。しかし、遠心成形後のオートクレーブ養生後の圧縮強度は大きく変動する結果となった。これは、メチルセルロースが分解前に高温履歴を受け影響と推察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高強度コンクリート二次製品の製造に用いられている180℃のオートクレーブ養生を150℃に低温化した新しい養生技術の実用化を目的としたものである。これを実現可能とするシリカフュームの添加に伴う遠心成型時の材料分離抑制ならびにスラッジ発生量低減に着目した実験を行った。その結果、シリカフュームは2.5%、メチルセルロースは0.01%添加した場合において高い強度発現性が得られたとともにメチルセルロースによるスラッジ発生抑制や密度低下の効果が認められた。しかし、遠心成形後のオートクレーブ養生後の圧縮強度はばらつく結果となった。これは、メチルセルロースが分解前に高温履歴を受けた影響と推察した。

研究成果の概要（英文）：Autoclave curing is usually performed at 180℃ for manufacturing high strength precast concrete products. The current research is aimed at establishing a new technique of autoclave curing at a reduced temperature of 150℃. In association with the addition of silica fume to enable the low temperature autoclave curing, an experimental study was performed with focus on suppression of material segregation and reduction of sludge generation during centrifugal molding. It was found that adding 2.5% silica fume and 0.01% methyl cellulose resulted in both high strength development and reduction in sludge generation and density by the effect of methyl cellulose. However, there was a large variation in the compressive strength of the specimens after autoclave curing following centrifugal molding. This was likely because methyl cellulose was exposed to high temperatures before it decomposed.

研究分野：土木材料

キーワード：オートクレーブ養生 遠心成形 シリカフューム メチルセルロース スラッジ 高強度コンクリート

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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。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。このような背景の中、研究代表者はこれまでに PC 杭や地中杭等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。PC 杭は製造時に 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。この方法は、極短時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 CO<sub>2</sub> 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。そこで、十分な前置き養生時間の確保ならびにシリカフ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。しかし、この技術を実用化するにあたっては、PC 杭製造時に行う遠心成形を考慮した製造条件等の導出が課題として残されていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、オートクレーブ養生温度を低温化した低温オートクレーブ養生技術を実用化するにあたり PC 杭製造時に行う遠心成形を考慮した製造条件等の導出である。ここで実施する遠心成形は、遠心力を利用してコンクリートを締め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であるが、低温オートクレーブ養生方法においては、シリカフュームの混和が必要であるため、その混和に伴い流動性が向上した状態のコンクリートに対し遠心成形を実施することで、密度の小さいセメントやシリカフ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ている可能性が考えられた。また、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するほか、アルカリ性であるスラッジ水の処理等の課題を考慮すれば、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った。そこで、水溶性の高分子凝集剤を使用し、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基礎的実験を行った。

### 3. 研究の方法

本研究においては、高分子凝集剤としてメチルセルロースを使用し、以下に示す通り、モルタル配合を用いたシリカフュームならびにメチルセルロースの添加量の違いに着目した検討とその結果を踏まえたコンクリート配合による遠心成形を考慮した場合の検討を行った。

#### (1) モルタル配合による検討

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/cm<sup>3</sup>、比表面積:3370cm<sup>2</sup>/g)、シリカフュームはフェロシリコン系(密度:2.30g/cm<sup>3</sup>、SiO<sub>2</sub>:94.0%、BET 比表面積:19.1m<sup>2</sup>/g)を用いた。細骨材は埼玉県熊谷市産の洗砂(S)( $\rho_s=2.60\text{g/cm}^3$ 、吸水率 1.38%、粗粒率 F.M.=2.94)、ナフタレン系の高性能減水剤(SP)(PSR100、 $\rho_{sp}=1.14\text{g/cm}^3$ )、高分子凝集剤としてメチルセルロース(メトロース 90SH-100)を使用した。これらの材料を用いて、Table 1 に示す配合を用いて供試体を作製した。水セメント比は PC 杭の実製造に用いられている配合を参考とした水セメント比は 31.2% とし、シリカフュームの添加率は、セメント重量比で何 0%、C×2.5%、C×5.0% の 3 水準として、細骨材と置換した。次に、メチルセルロースの添加は、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、水溶液として混和したことから、固形分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、全 9 水準に関する検討を行った。

供試体は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱供試体とし、20°C-72 時間の湿空(前置き)養生後、脱型を目的とした 65°C-4 時間の常圧蒸気養生を行った後に、オートクレーブ養生装置を用いて 180°C-3 時間のオートクレーブ養生を実施した。

試験は、フロー試験、圧縮強度試験、細孔空隙測定の実験を実施した。まず、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て計測した。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、蒸気養生後ならびに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。次に、細孔空隙測定、水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した。測定試料は、各水準で作製したモ

Table 1 Mortar Proportion

SF addition rate (%)	W/C (%)	(kg/m <sup>3</sup> )				SP (C×%)	AD(M) (C×%)
		W	C	SF	S		
SF(F) 0	31.2	219	757	0	1362	2.2%	0%
SF(F) 2.5				19	1342		0.005%
SF(F) 5.0				38	1324		0.010%

ルタル硬化体の蒸気養生後ならびにオートクレーブ養生後の供試体から、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製作し、その細粒試料をアセトン中に30分間浸した後、直ちにD乾燥を実施したものとした。

## (2)コンクリート配合による検討

セメントならびにシリカフュームは前述した(1)モルタル配合による検討の場合と同様で、普通ポルトランドセメントならびにフェロシリコン系のシリカフュームを用いた。粗骨材は、埼玉県秩父産の碎石1505( $\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$ 、吸水率0.32%、粗粒率F.M.=6.67)を使用し、Table2に示す配合で検討した。供試体はFig.1に示す200×300mmの中空円筒供試体とし、遠心成形時間を5G[2min]、15G[1min]、35G[9min]として遠心成形を実施した。なお、打設後の前置き養生時間は、一般的な地中杭の製造条件から20の環境室内で3時間とし、脱型を目的とした65-4時間の常圧蒸気養生を行った後に180の3時間のオートクレーブ養生を実施した。



Fig.1 Concrete Formwork and Specimen

試験は、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した圧縮強度試験を実施した。なお、スラッジ性状の確認として遠心成形後の中空円筒供試体内面に生じたスラッジの重量ならびに体積を計測し密度を算出して評価した。

## 4. 研究成果

### (1)モルタル配合による検討結果

フロー試験の結果をFig.2に示す。この結果によればシリカフューム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、シリカフューム添加率が5.0%時においてメチルセルロースの添加率に関わらず高い流動性が認められた。これはシリカフューム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であると考えた。次に、メチルセルロースに注目すると、どのシリカフューム添加率の水準においても、メチルセルロース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、メチルセルロースの増粘作用、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るが、各シリカフュームの添加率におけるフロー値とメチルセルロースの添加率の関係はほぼ直線的ではあるものの、その傾きは異なることがわかった。

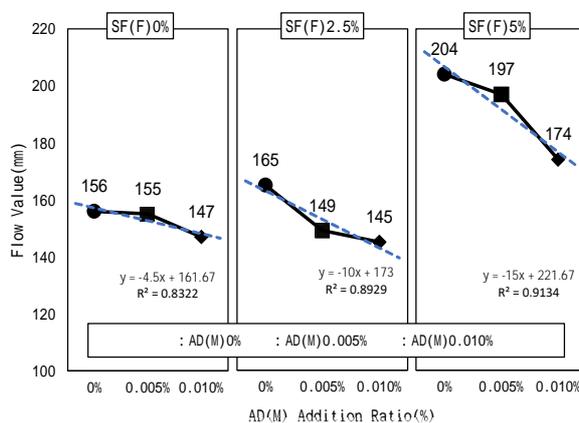


Fig. 2 Flow Value

Fig. 3に圧縮強度試験の結果を示す。この結果によれば、蒸気養生ならびにオートクレーブ養生の養生方法の違いに関わらず、どのシリカフューム添加率の場合においてもメチルセルロース0%の場合の強度に対し、0.005%の場合は圧縮強度が増加したものの、0.010%の場合は圧縮強度が低下する傾向であった。また、シリカフュームの添加率が2.5%でメチルセルロースの添加率0.005%のオートクレーブ養生を実施した場合において圧縮強度が116.1N/mm<sup>2</sup>となり、本実験の範囲で最大圧縮強度となった。一方、シリカフュームの添加率が5.0%の場合においては圧縮強度が低下する傾向が認められた。その要因はFig.2に示した通り、大幅な流動性の向上が認められたことから、材料分離傾向となり強度低下を起こしたためと推察した。次に、メチルセルロースの添加率に着目すると、添加率が0%から0.005%までは圧縮強度は増加し、0.010%の場合で圧縮強度が低下した要因は、メチルセルロースの添加率が0.005%の場合については、メチルセルロースの増粘作用による影響で強度が増進する一方で0.010%まで添加率が高くなると、流動性が低下することで供試体作製時の型枠充填性が低下し、供試体の密実性が低下したことからだと考えた。

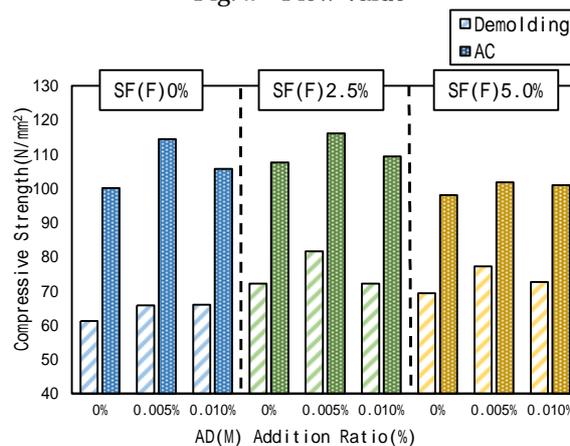


Fig. 3 Compressive Strength

次に、Fig. 4、Fig. 5 にそれぞれ蒸気養生後とオートクレーブ養生後の細孔空隙径分布を示す。この結果によれば、蒸気養生後、オートクレーブ養生後のそれぞれの場合における全てのシリカフェーム添加率の水準において、メチルセルロースの添加率が 0% から 0.005% 添加させたとき全空隙量は減少し、0.010% まで添加すると全空隙量は増加する傾向が見られた。Fig. 3 の圧縮強度試験結果と合わせて考察すると、メチルセルロースを 0% から 0.005% まで添加すると全空隙量が減少して圧縮強度は増加するが、0.010% まで添加すると全空隙量は増加し、圧縮強度は低下する傾向が認められた。この相関関係については、メチルセルロースを少量の添加であればその増粘作用による緻密化が強度発現性に寄与したものと考えられる。また、脱型時よりもオートクレーブ養生時の方が圧縮強度は高いが、全空隙量は Fig. 4 と Fig. 5 より、オートクレーブ養生時の方が全体的に多い傾向が認められた。

この要因については、Table 2 示す各細孔空隙径における空隙量を用いて考察することとする。この結果によれば、蒸気養生後とオートクレーブ養生後における 3-6nm のゲル空隙を比較すると、蒸気養生後に比べ、オートクレーブ養生後の方がほぼ全ての水準で増加していることが認められる。また、6-10nm の毛細管空隙も同様で、蒸気養生後からオートクレーブ養生後で 2 倍程度空隙量が増加していることがわかった。しかし、同じ毛細管空隙の中でも比較的大きい空隙に分類した 10-50nm の空隙においては、蒸気養生後からオートクレーブ養生後のほぼ全ての水準で、極微量ではあるが空隙量が減少する傾向が認められた。本実験結果では、一般的な傾向とは異なり、蒸気養生後よりもオートクレーブ養生後の方が全空隙は多い傾向となったが、空隙径ごとで観察すると、オートクレーブ養生後の場合は、ゲル空隙と微細な毛細管空隙である 6-10nm の空隙の割合が多く占めており、これが強度発現に寄与したものと考えた。

次に、Fig. 6 および Fig. 7 に、それぞれ蒸気養生後とオートクレーブ養生後の圧縮強度と空隙量の関係を示す。なお本結果は、全細孔空隙、6-50nm の毛細管空隙、50-500nm の粗大毛細管空隙で分類し考察した。まず、蒸気養生後とオートクレーブ養生時の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る相関関係が認められた。また養生方法に限らず、メチルセルロースの添加率が 0.005% > 0% > 0.010% の順で空隙量は多くなる傾向が認められた。次に、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、蒸気養生後ならびにオートクレーブ養生後の両場合とも、圧縮強度の増加に伴い空隙量が減少する傾向が認められた。またメチルセルロースの添加率における空隙量を比較すると、0.005% の添加の場合に最も空隙量が低くなる傾向が認められた。また、圧縮強度と 50-500nm の粗大毛細管空隙の関係に着目すると、得られた結果は蒸気養生後ならびにオートクレーブ養生後の両場合とも、全空隙量と毛細管空隙のような相関関係は認められなかった。しかし、0%、0.005% は空隙量がほぼ同じ空隙量を示しているのに対し、0.010% では空隙量が増加する傾向が確認できた。

以上のことから、メチルセルロース添加率 0.005% の場合には、空隙量が少なく、強度発現に寄与しているものの、0.010% の場合では粗大毛細管空隙が増加してしまうことにより、0.005% の場合に比べて強度は低下してしまうと推察した。

(2) コンクリート配合による検討結果

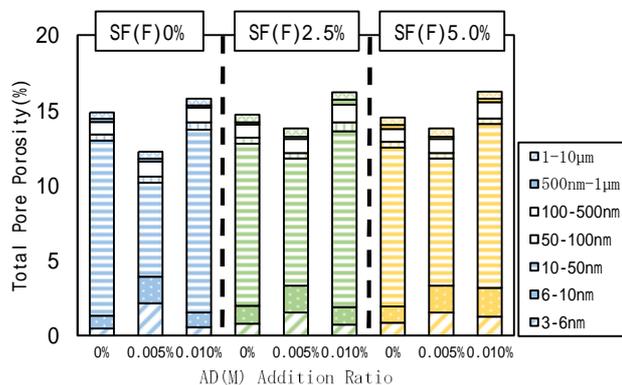


Fig. 4 Total Pore Porosity (Atmospheric pressure steam curing)

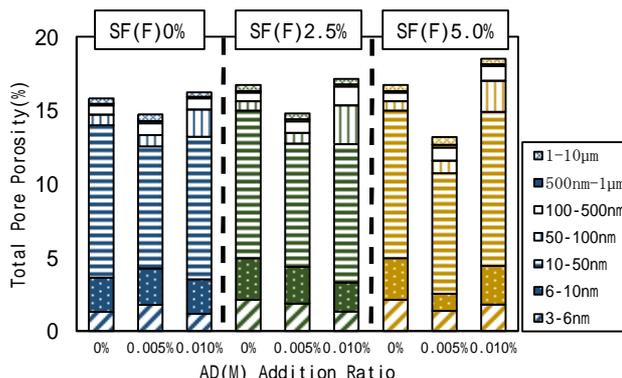


Fig. 5 Total Pore Porosity (Autoclave curing)

Table 2 Pore porosity(3-50nm)

	SF (F)	AD (M)	Pore Volume (%)			
			3-6nm	6-10nm	10-50nm	Total
Demolding	0%	0%	0.458	0.853	11.677	12.988
		0.005%	2.157	1.760	6.258	10.175
		0.010%	0.547	0.988	12.149	13.683
	2.5%	0%	0.782	1.207	10.784	12.773
		0.005%	1.525	1.795	8.477	11.797
		0.010%	0.714	1.184	11.700	13.597
	5.0%	0%	0.839	1.103	10.567	12.510
		0.005%	1.525	1.795	8.477	11.797
		0.010%	1.264	1.908	10.916	14.088
AC	0%	0%	1.311	2.311	10.355	13.976
		0.005%	1.772	2.479	8.320	12.571
		0.010%	1.169	2.340	9.682	13.190
	2.5%	0%	2.129	2.825	10.026	14.980
		0.005%	1.857	2.509	8.389	12.755
		0.010%	1.319	1.982	9.398	12.699
	5.0%	0%	2.129	2.825	10.026	14.980
		0.005%	1.353	1.183	8.203	10.739
		0.010%	1.796	2.646	10.462	14.904

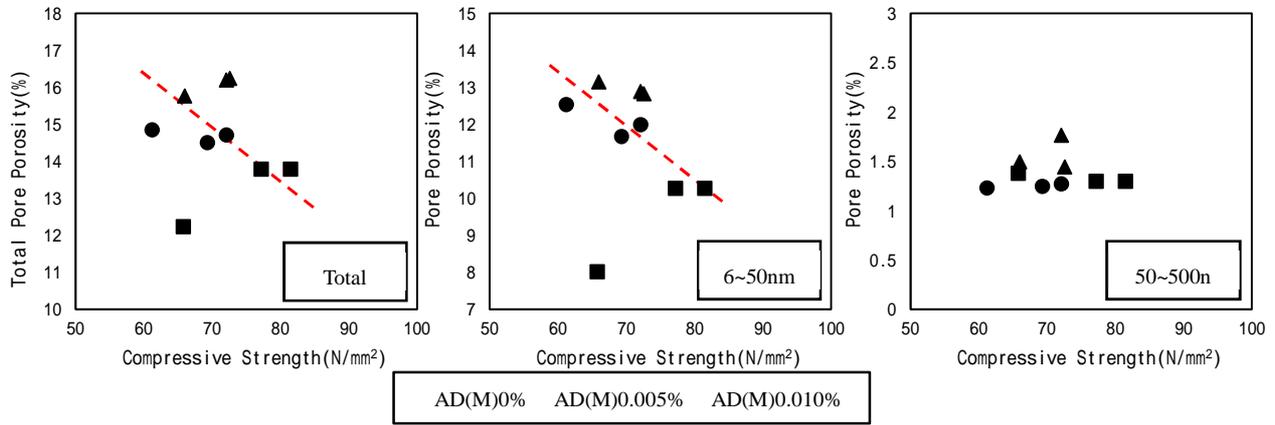


Fig. 6 Relationship between Pore Porosity and Compressive Strength (Atmospheric pressure steam curing)

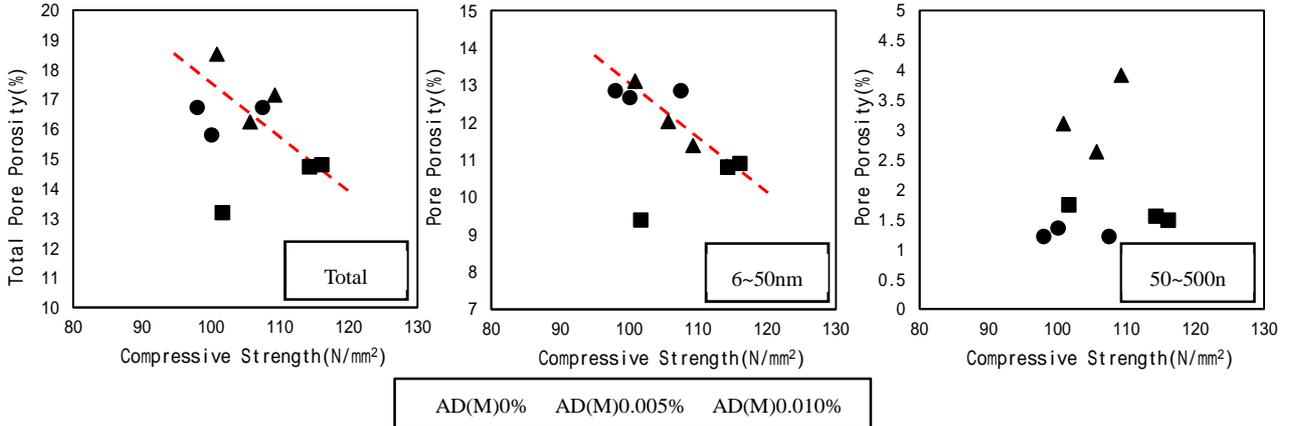


Fig. 7 Relationship between Pore Porosity and Compressive Strength (Autoclave curing)

Fig.8 に遠心成形後の各シリカフューム添加率とメチルセルロース添加率における発生スラッジとその密度を示す。この結果によれば、シリカフュームの添加率の増加に伴い、スラッジ量およびスラッジ密度は増加した。これは、遠心成形による遠心締め固めにより、密度が小さい水とシリカフュームが中空供試体の内側に集まり、一部がスラッジとして排出されているためだと推察した。また、シリカフュームの添加率に関わらず、メチルセルロースの添加によってスラッジ量は増加するもののその密度は低下する傾向が認められた。この要因はメチルセルロースがコンクリート内の水分を保持したまま余剰水としてスラッジが排出されたためだと考えた。

次に、遠心成形後の蒸気養生後とオートクレーブ養生後の圧縮強度試験結果を Fig.9 に示す。この結果によれば、蒸気養生後はモルタル配合の際と同様に、シリカフュームの添加率が2.5%の場合かつメチルセルロースの添加率は0.005%の場合が最も圧縮強度は高くなったものの、オートクレーブ養生後の圧縮強度は変動が大きく、何も添加していない10%の場合の強度が最も高くなり、特にメチルセルロースの添加量が増えると圧縮強度は低下する傾向が認められた。この要因は、モルタル配合の場合とは異なり、コンクリート配合の場合においては、前置き養生時間を実製造に合わせて、3時間程度しか確保していなかったことが影響したと推察した。つまり、数時間の前置き養生で熱養生を実施することで、メチルセルロースが何らかの熱影響を受けることで、強度発現を阻害したのと考えた。本実験範囲では検討できなかったが、今後の課題として、前置き養生時間を十分に確保した場合の遠心成形後の強度発現性や細孔空隙の検討を実施する予定である。

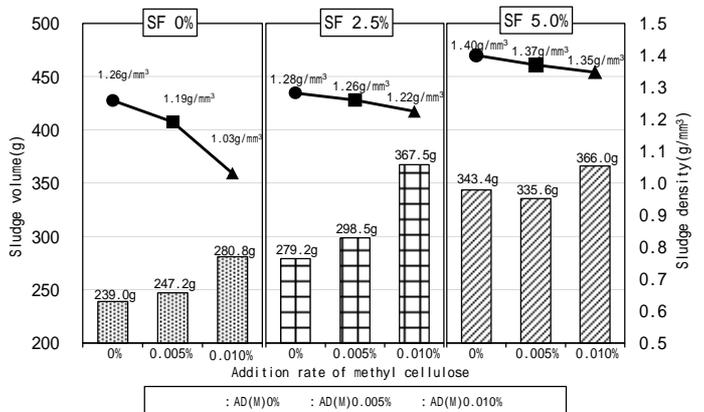


Fig. 8 Sludge density and Amount of Sludge

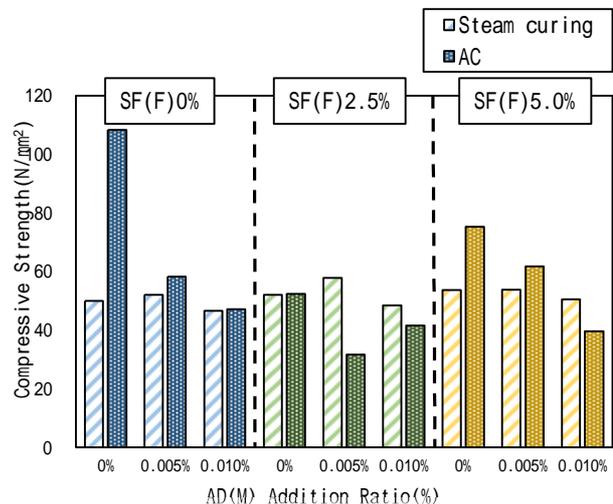


Fig. 9 Compressive Strength at centrifugal molding

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木田綺音、山口晋、鶴澤正美
2. 発表標題 保水性材料を用いた遠心成形による高強度コンクリートの製造とスラッジ発生抑制に関する実験
3. 学会等名 第55回日本大学生産工学部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木田綺音、山口晋、鶴澤正美
2. 発表標題 高分子凝集剤を用いた遠心成形コンクリートの強度発現性とスラッジ性状に関する基礎実験
3. 学会等名 第77回セメント技術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木田綺音、山口晋
2. 発表標題 モルタル硬化体と遠心成形コンクリートにおける高分子凝集剤の適用に関する基礎実験
3. 学会等名 土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鶴澤 正美  (UZAWA Masami)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木田 綺音  (KIDA Ayane)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関