

## 論文 遠心成形を利用した耐酸性に優れた硬化体に関する基礎的研究

畑 実<sup>\*1</sup>・杉本 克美<sup>\*2</sup>・林 悦朗<sup>\*3</sup>・井川 秀樹<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、ポルトランドセメントを全く使用しない産業副産物起源（主に、フライアッシュと高炉スラグ微粉末）の混合物を、遠心成形を利用した硬化体とし、高耐久性が要求されるコンクリート製品に適用するための検討を行ったものである。当該混合物の凝結時間は始発が14時間以上であるため、OPCモルタルよりも大幅に遅延することが判明した。そのため、蒸気養生を行うコンクリート製品には著しく不向きと考えられた。しかし、遠心成形を行うことで、振動成形よりも蒸気養生時間（前置時間）を短縮でき、硬化体の圧縮強度は材齢28日で40N/mm<sup>2</sup>以上が得られると共に、優れた耐硫酸性を有することを確認した。

**キーワード**：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、下水汚泥焼却灰、凝結時間、遠心成形、耐硫酸性

## 1. はじめに

遠心力によって製造される鉄筋コンクリート管（ヒューム管）は、国内における下水道の急速な発展に伴って普及し、重要なインフラ製品として国民生活を支えてきた。ヒューム管は、1910年にオーストラリアのヒューム兄弟によって考案され、1924年に日本に導入されたものであり、高強度、高緻密、高耐久なコンクリート製品を製造できることが特長である。ヒューム管の成形は、型枠を成形機の上で高速回転させ、遠心力を利用して、40Gに近い加速度でコンクリートを締固め、余剰水をスラッジ水として排出する成形方法である。著者らは、この遠心力による優れた成形技術を生かした、新しいコンクリート製品を長年に亘って探求して来た。

このような状況の中、近年では、耐用年数が50年を超えたヒューム管の補修や、維持更新が行われている。また、耐用年数が50年に満たないヒューム管であっても、管内が硫化水素によって腐食する「硫酸劣化」<sup>1)</sup>が深刻になっており、これが重度の場合には、道路陥没事故を引き起こした事例も報告されている。このため、耐用年数が100年を有する高耐久性の下水道管が要望され、新たな時代のニーズとして注目されるようになった。

一方、現代社会に目を向けると、地球温暖化対策が世界規模での共通課題として認識されるようになり、その深刻さが刻々と増している状況下にある。このため、各国では、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの削減に向けて本格的な取組みを既に始めている。これらの対策には産業副産物の有効活用<sup>2)</sup>が効果的で、著者らは、遠心力を利用して、優れた耐酸性を有する高耐久性のコンクリート製品を開発すると共に、エコロジカルな製品を開発すること

も目的として、本研究に着手した。これにより、地球環境に配慮し、CO<sub>2</sub>排出量の抑制に貢献することもできる。

本研究で使用した産業副産物は、火力発電所において石炭の微粉炭燃焼の集塵機で捕集される「フライアッシュ」と、銑鉄製造過程で副産される「高炉スラグ微粉末」を主成分とし、下水汚泥焼却灰を粒度調整した「粒度調整灰」<sup>3)</sup>も使用した。また、アーク式電気炉から排ガス中のダストとして集塵される「シリカフューム」を混合物の緻密化と強度向上を図る目的で使用した。更に、フライアッシュと高炉スラグ微粉末のアルカリ刺激剤として「水酸化カルシウム（消石灰）」を使用すると共に<sup>4)5)6)</sup>、収縮ひび割れを防止するために「膨張材」を添加した。従って、ポルトランドセメントは全く使用しない、計6成分の材料で構成された混合物（以下IBPM）を、本研究の対象とした。

IBPMを用いて、遠心成形と振動成形により作製した硬化体（以下硬化体）では、蒸気養生条件を5水準に設定して、その強度発現性を確認した。また、フライアッシュはポゾラン反応、高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有しているため、セメントコンクリートに比べて、凝結時間が大幅に遅延する反面、化学抵抗性が向上することが想定された。このうち、凝結時間については、プロクター貫入抵抗試験によるモルタル凝結試験を行い、始発時間と終結時間を確認した。他方の化学抵抗性については、IBPMを振動成形したモルタル硬化体や、遠心成形した硬化体から採取した輪切り状の試験片を、5%濃度の硫酸水溶液に浸漬し、耐硫酸性を普通ポルトランドセメント（以下OPC）製試験片と比較した。

\*1 日本ヒューム（株） 技術研究所 課長 （正会員）

\*2 東京都下水道サービス（株） 技術部 技術開発課長

\*3 東京都下水道サービス（株） 技術部 技術開発課 課長代理

\*4 日本ヒューム（株） 技術研究所長 （正会員）

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究における使用材料の種類と品質は、表—1に示すとおりである。

使用材料は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、粒度調整灰、シリカフェームで構成される4種類の産業副産物と、アルカリ刺激剤として JIS R 9001 特号に該当する水酸化カルシウム（消石灰）、収縮ひび割れ防止用として JIS A 6202 該当する膨張材の計6種類である。これに、骨材（粗骨材、細骨材）、水、高性能減水剤を練混ぜて IBPM を構成した。

### 2.2 IBPM の配合

IBPM のフレッシュ性状は、写真—1に示すようにスランプフローが  $650 \pm 50 \text{mm}$  の高流動タイプとした。その理由は、遠心成形時における型枠内への充填性を高め、余剰水をスラッジ水として円滑に排水し、良好な締固め効果を得ることにある。このことによって、振動成形との違いが顕著に表れることを想定した。

また、IBPM の空気量は試験練りを繰返した結果、フレッシュ時に得られた空気量の実測値から、 $2.0 \pm 1.0\%$  を目標値として設定した。

IBPM の配合は、表—2に示すとおりであり、水粉体比 (W/P) 34.0%、細骨材率 41.0%とした。結合材の混合割合は、種々検討して決定したものである。なお、粒度調整灰は、総粉体量の5%に相当する量を細骨材と置換して用いた。

### 2.3 硬化体の成形方法

IBPM を練混ぜた後、遠心成形と振動成形に区分して硬化体を作製した。遠心成形では、遠心成形用の型枠 ( $\phi 200 \times 300 \text{mm}$ ) にフレッシュ状態の IBPM を充填し、表—3に示す加速度と成形時間で成形して、遠心硬化体を作製した。写真—2に、遠心硬化体の外観性状を示す。

写真—3に示す遠心成形では、加速度Gにより IBPM の余剰水がスラッジ水として円滑に排水された。その結果、遠心硬化体内面の脆弱層の厚さは 0mm で、良好な締固め性状が得られた。また、硬化体の外面は、遠心力によって非常に緻密な硬化体となった。

他方の振動成形では、フレッシュ状態の IBPM をブリキ製の円柱型枠 ( $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ ) に充填し、テーブルバイブレーターで振動を与えながら、2層に分けて締固め、円柱硬化体を作製した。

表—1 使用材料の種類と品質

材料名	略号	仕様
フライアッシュ	FA	密度: $2.20 \text{ g/cm}^3$ JIS A 6201 (II種)
高炉スラグ微粉末	BFS	密度: $2.91 \text{ g/cm}^3$ JIS A 6206 (粉末度4000)
粒度調整灰	SA	密度: $2.60 \text{ g/cm}^3$ 63 m (250mesh) 通過率90%以上
シリカフェーム	SF	密度: $2.30 \text{ g/cm}^3$ JIS A 6207
水酸化カルシウム (消石灰)	Ca(OH) <sub>2</sub>	密度: $2.21 \text{ g/cm}^3$ JIS R 9001 特号
膨張材	EX	密度: $3.01 \text{ g/cm}^3$ JIS A 6202 (石灰系)
細骨材	S	密度: $2.62 \text{ g/cm}^3$ JIS A 5005 砕砂 (硬質砂岩)
粗骨材	G	密度: $2.67 \text{ g/cm}^3$ JIS A 5005 砕石2005 (硬質砂岩)
高性能減水剤	Ad	密度: $1.00 \text{ g/cm}^3$ JIS A 6204 (ポリカルボン酸系)
水	W	密度: $1.00 \text{ g/cm}^3$ 水道水



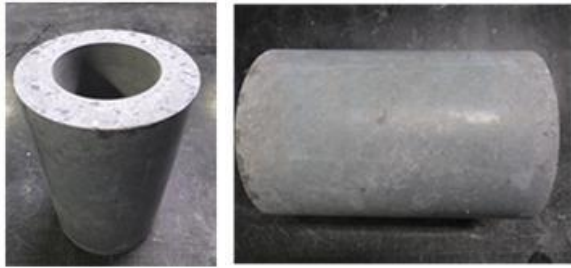
写真—1 混合物のスランプフロー

表—3 遠心成形の加速度と成形時間

成形順序	第1段階	第2段階	第3段階
加速度 (G)	5	15	35
遠心成形時間 (分)	1	1	7

表—2 IBPM の配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	SLFの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水粉体比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )									
					W	FA	BFS	SA	SF	Ca(OH) <sub>2</sub>	EX	S	G	Ad
20	650 ± 50	2.0 ± 1.0	34.0	41.0	170	207	207	26	30	20	30	639	959	5,434



写真—2 IBPMによる遠心成形硬化体の外観性状



写真—3 遠心成形の状況

## 2.4 凝結試験方法

IBPMの硬化反応は、フライアッシュはポゾラン反応、高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有しているため、セメントコンクリートに比べて、凝結時間が大幅に遅延することが想定された。このため、凝結試験を行って、硬化体の強度発現性に有効な蒸気養生条件（前置時間）を把握し、遠心成形と振動成形の違いを明確にすることを目的とした。

凝結試験は、プロクター貫入抵抗試験で実施し、始発時間と終結時間を確認した。本凝結試験に用いた混合物のモルタルは、表—2に示したIBPMの配合から、単に粗骨材を除いたものである。

## 2.5 蒸気養生条件

IBPMの凝結遅延を想定し、蒸気養生における前置時間がIBPMの強度発現性に及ぼす影響を確認した。

通常、プレキャストコンクリートの製造工場では、脱型までの時間を短縮して、生産効率を上げるために、蒸気養生を行っている。この場合、対象とする製品や配合条件などによって、蒸気養生条件（前置時間、上昇温度、最高温度、保持時間、除冷方法）に差異はあるが、本研究では、前置時間4時間、上昇温度20°C/h、最高温度

65°C、保持時間4時間、除冷は自然降温の条件で行った。

また、ここでは前置時間（注水から温度上昇を開始するまでの時間）に着目して、表—4に示す5水準に振り分けた。前置時間は、0.5時間（30分）、1.5時間、3.0時間、6.0時間、24.0時間であり、他の蒸気養生条件は同一条件で実施した。

表—4 蒸気養生条件

配合の種類	1	2	3	4	5
前置時間 (h)	0.5	1.5	3.0	6.0	24.0
上昇温度 (°C/h)	20.0				
最高温度 (°C)	65.0				
保持時間 (h)	4.0				
降温条件	自然降温				

## 2.6 振動成形によるモルタル硬化体の耐硫酸性試験

耐硫酸性試験では、前述した凝結試験と同様に、表—2に示したIBPMの配合から、単に粗骨材を除いたモルタル配合を用いて、振動成形で硬化体（φ50×100mm）を作製した。この硬化体を「日本下水道事業団の断面修復用モルタルに関する品質試験方法」に準拠して、5%濃度の硫酸水溶液に28日間浸漬させ、質量変化や外観性状から耐硫酸性を評価した。この比較対象として、OPCによるモルタル供試体を作製し、IBPMによる硬化体と同様、5%濃度の硫酸水溶液に28日間浸漬した<sup>7)8)9)</sup>。このモルタルは表—5に示したコンクリート配合から、単に粗骨材を除いたものである。なお、5%濃度の硫酸水溶液量は、試験体1個当たり1.96とし、供試体の表面積と、液体の容積比率（個液比）を一定として、7日毎に新しい硫酸水溶液に全量を入れ換えた<sup>10)</sup>。

## 2.7 遠心成形による硬化体の耐硫酸性試験

IBPMを遠心成形した硬化体から輪切り状の試験片を採取して、耐硫酸性を評価した。この時、表—5に示すコンクリート配合から成るOPC製の遠心供試体からも同様に試験片を採取し、並行して浸漬した。なお、この硫酸浸漬試験では、試験片の表面積と溶液との容積比率（個液比）を考慮せず、採取した試験片を5%濃度の硫酸水溶液中に28日間浸漬させたものである。

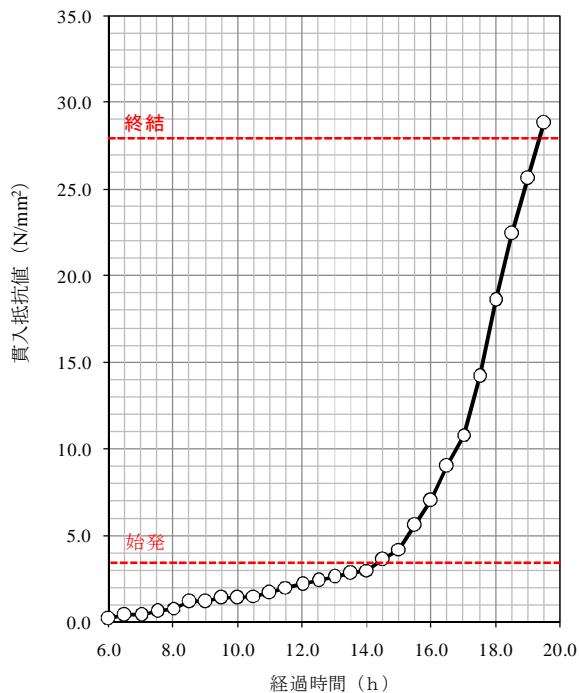
表—5 OPC製遠心供試体のコンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	SLの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	OPC	S	G	Ad
20	6.0 ± 2.0	2.0 ± 1.0	31.3	41.0	147	470	746	1055	1.84

### 3. 実験結果

#### 3.1 凝結時間

一般的に、OPC モルタルの凝結時間は、始発が4時間程度、終結が8時間程度である<sup>11)</sup>。これに対してIBPMの凝結時間は、図—1に示すように、始発が約14時間、終結が約19時間であった。これは前述のように、ポズラン反応と潜在水硬性によるものと考えられる。



図—1 IBPMの凝結時間（始発と終結）

#### 3.2 圧縮強度

硬化体の圧縮強度を、遠心成形と振動成形で区分し、前置時間と材齢ごとに示したものが表—6、図—2、図—3である。また、この結果を基に、遠心成形（100%）に対する振動成形の強度比率を、各々の条件で対比させたものが図—4である。

前置時間の影響を見ると、前置0.5時間は材齢14日までの初期材齢における圧縮強度が低く、特に振動成形の材齢1日では顕著である。これと同様な傾向にあるのが前置1.5時間と前置3.0時間であり、その差は僅少で、振動成形の材齢1日では圧縮強度が変動している。

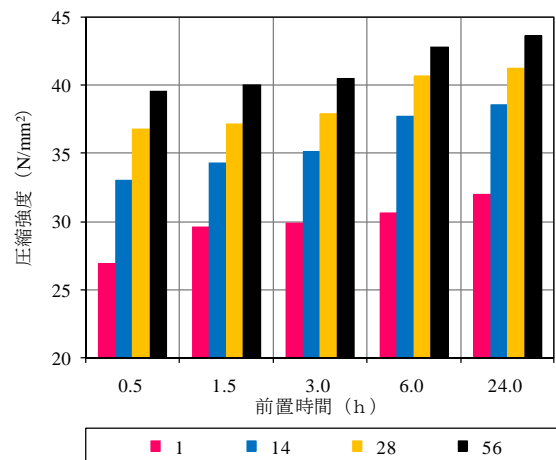
これに対して、前置時間が6.0時間になると、これよりも前置時間が短いものに比べて、圧縮強度は概ね堅調に推移し、遠心成形では材齢28日で40N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度が得られている。更に、前置時間が24.0時間では、圧縮強度が最も高いレベルにある。これは、前述した凝結試験の結果を踏まえれば、IBPMの始発時間である14時間よりも前置時間を長く、十分に確保したことの効果であると推察される。このように、遠心成形は振動成形ほど前置時間の影響を受けず、圧縮強度は振動成形より

も、総じて5N/mm<sup>2</sup>程度高いレベルが得られることを確認した。

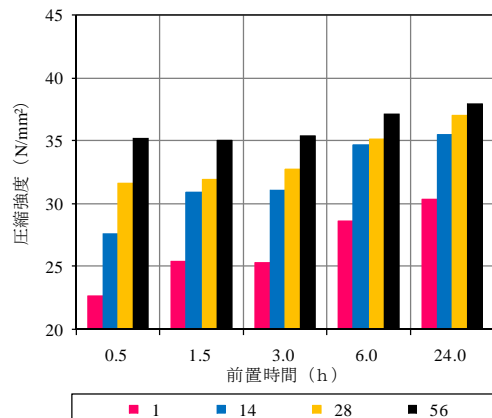
次に、遠心成形の圧縮強度を100%とした場合に対する振動成形の強度比率で見ると、振動成形では前置時間に硬化体の圧縮強度が鋭敏に反応しており、前置時間が0.5時間、1.5時間、3.0時間のように、短い前置時間の場合には、概ね85%を中心とした強度比率であった。これに対して、前置時間が6.0時間以上になると、材齢14日までの強度比率には90%を超えるものがあり、この段階までは遠心成形との差が幾分小さかったことが分かる。

表—6 硬化体の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

成形方法	前置時間 (h)	材齢 (日)			
		1	14	28	56
遠心成形	0.5	26.9	33.0	36.8	39.6
	1.5	29.6	34.3	37.2	40.0
	3.0	29.9	35.1	37.9	40.5
	6.0	30.6	37.7	40.7	42.8
	24.0	32.0	38.6	41.2	43.6
振動成形	0.5	22.7	27.6	31.6	35.2
	1.5	25.4	30.9	31.9	35.0
	3.0	25.3	31.1	32.7	35.4
	6.0	28.6	34.6	35.1	37.1
	24.0	30.3	35.5	37.0	37.9



図—2 遠心成形による硬化体の圧縮強度



図—3 振動成形による硬化体の圧縮強度



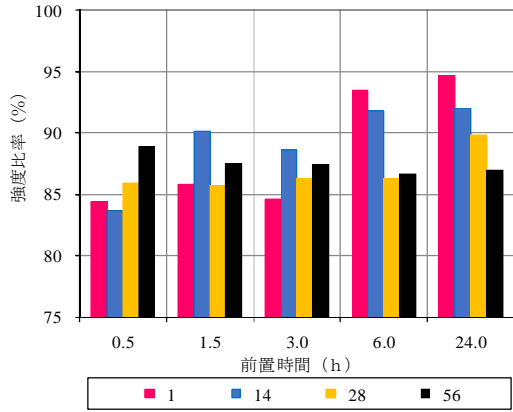
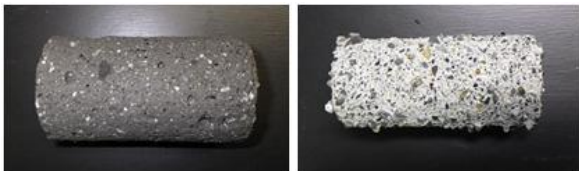


図-4 遠心成形に対する振動成形の強度比率

以上のことから、遠心成形は振動成形よりも、IBPMの前置時間を短縮することが可能であり、硬化体の圧縮強度は、振動成形よりも高いレベルにあることが確認できた。なお、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの反応率については、今後の課題である。

### 3.3 振動成形によるモルタル硬化体の耐硫酸性

28日間浸漬後の試験結果を、写真-4と図-5に示す。OPC製の供試体は、浸漬日数の進行に伴って質量が減少し、28日間で質量変化率は-32%に達している。これに対して、IBPMから成る硬化体は、微細なひび割れが僅かに生じていたものの、概ね健全な状態にあり、優れた耐酸性を示した。しかし、28日間浸漬後の質量変化率は約1%プラス側に転じており、硬化体には僅かな膨張が確認された。



(左：硬化体 右：OPC)

写真-4 浸漬後のモルタル硬化体の劣化状態

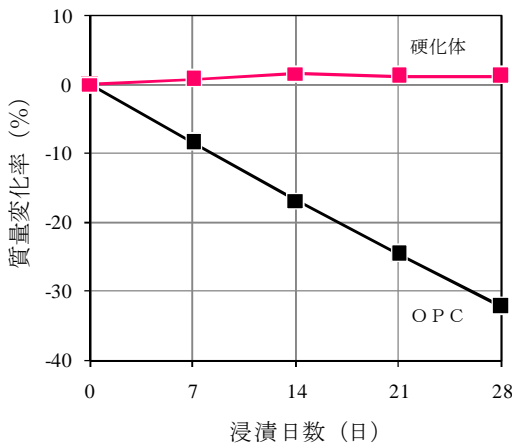


図-5 モルタル硬化体の硫酸浸漬日数と質量変化率

この結果を受けて、IBPMから成る硬化体についてX線回折法により、硬化体の膨張や質量増加に影響している鉱物を同定した。その結果は図-6に示すように、高炉スラグ微粉末から生成された二水石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) が主原因であることが、推定された<sup>12)</sup>。

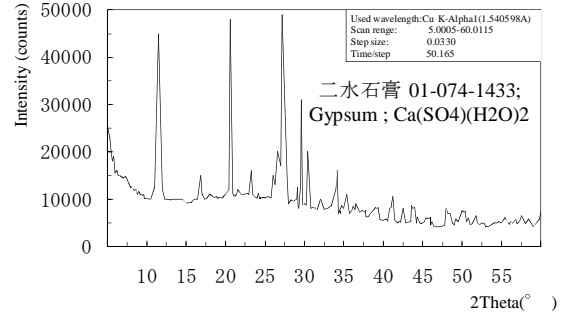


図-6 粉末X線回折測定結果

### 3.4 遠心成形による硬化体の耐硫酸性



(上段：硬化体片と側面 下段：OPC片と側面)

写真-5 浸漬後の遠心成形体の劣化状態

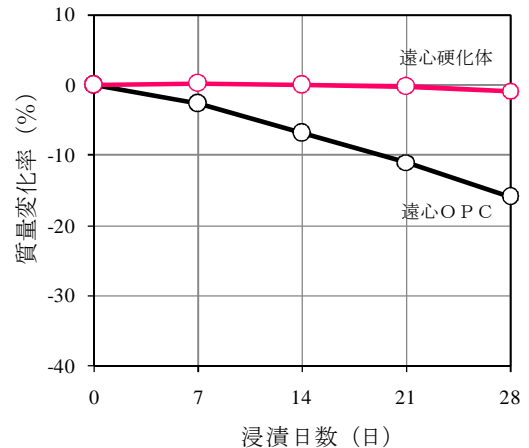


図-7 遠心成形体の硫酸浸漬日数と質量変化率

28日間浸漬後の試験結果は、写真—5と図—7に示すとおりであり、OPC製の遠心試験片では、浸漬28日間で-16%の質量減少と骨材の露出が確認され、激しい硫酸劣化が生じた。

一方、IBPM製の遠心試験片では、浸漬28日間で-0.8%の質量減少が認められたものの、試験片の外観性状には殆ど変化が認められず、健全な状態であった。また、振動成形で作製したモルタル硬化体に生じた、微細なひび割れや僅かな膨張は認められず、遠心成形で硬化体を締締固めることの有効性が実証された。

#### 4. まとめ

本研究では、高耐久性のコンクリート製品を創出するために、主にフライアッシュと高炉スラグ微粉末によって構成される、ポルトランドセメントを全く使用しない産業副産物起源のIBPMを、遠心成形によって硬化体とした。その研究結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) IBPMの硬化反応は、ポゾラン反応と潜在水硬性によるものであり、凝結時間は、始発が14時間、終結が19時間と、OPCよりも大幅に遅延した。
- (2) 凝結時間の遅延により、振動成形では蒸気養生の前置時間が3.0時間以下の場合、6.0時間以上に比べて圧縮強度が低い水準にある。しかし、遠心成形で前置時間前が3.0時間以下と6.0時間以上を比較すると、圧縮強度の差は振動成形の場合よりも小さい。したがって、遠心成形を用いることにより、IBPMの凝結時間の遅延を相殺できる可能性がある。
- (3) 振動成形によるモルタル硬化体と、OPC製モルタル供試体を対象にした5%硫酸浸漬試験の結果、OPC製モルタル供試体は質量変化率が-32%であったのに対し、モルタル硬化体は僅かな膨張が認められたものの、ほぼ健全な状態であった。
- (4) 遠心成形で作製した遠心硬化体と、OPC製の遠心供試体を対象にした5%硫酸浸漬試験の結果、OPC製の遠心供試体は質量減少が-16%であったのに対し、遠心硬化体では-0.8%の質量減少に留まり、外観性状は概ね健全な状態であったことを確認した。

以上の結果を踏まえて、今後は、中性化や体積変化などに代表される耐久性の評価、実製品化、フィールド実験、高強度化、コストダウンなどに取組む予定である。

#### 参考文献

- 1) 下水道管路施設ストックマネージメントの手引き、公益社団法人日本下水道協会、2016年版、pp.2-2～

2-11、2016.12

- 2) 橋本紳一郎，橋本親典，堀井克章，渡辺 健：産業副産物をセメント代替として有効利用したコンクリートの基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.1401-1406, 2002.6
- 3) 前田正博，石井義章，井川秀樹，肥後康秀：改質した下水汚泥焼却灰のコンクリート利用の有効性について，コンクリート工学，Vol.42, No.7, pp.15-23. 2004.7
- 4) 三岩敬孝，天羽和夫，中本純次，戸川一夫：スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1449-1454, 2004.6
- 5) 佐藤正己，小泉公志郎，梅村靖弘：フライアッシュと水酸化カルシウムによるポゾラン反応に及ぼす養生温度の影響，Cement Science and Concrete Technology. Vol.70 pp.69-75
- 6) 三岩敬孝，天羽和夫，横井克則，中本純次：スラグ系材料を使用したポーラスコンクリートに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.1449-1454, 2006.6
- 7) 日本下水道事業団編著：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル，(財)下水道業務管理センター，平成19年7月
- 8) 松本匡司，米倉亜州夫，伊藤秀敏：混和材混入による耐酸性モルタルの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.883-888. 2005.6
- 9) 山本大介，松下博通，濱田秀則，沼田晋一：高炉フェームを用いたコンクリートの耐硫酸性能に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1865-1870. 2010.6
- 10) 日本下水道事業団編：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術および防食技術マニュアル，(一財)下水道事業支援センター発行，平成29年12月，
- 11) 井手野下敏明，鶴沢正美，山口晋，前田正博，井川秀樹，保坂成司：種々の養生条件による下水汚泥焼却灰混入モルタルの強度特性と微細構造変化，「材料」(Journal of Society of Materials Science, Japan), Vol.66, No.10, pp.752-757, Oct.2017
- 12) Paweena JARIYATHITIPONG, 細谷多慶，藤井隆 史，綾野克紀：高炉スラグ細骨材によるコンクリートの耐硫酸性改善に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.69, No.4, pp.337-347, 2013.10