

# 論文 産業副産物を活用した硬化体を下水道管に適用するための基礎研究

畑 実\*1・杉本 克美\*2・林 悦朗\*3・宮澤 伸吾\*4

**要旨：**本研究は、産業副産物（主にフライアッシュと高炉スラグ微粉末）を起源とする硬化体を用いた下水道管に求められる耐硫酸性と耐荷力、更に既存のヒューム管と同じ条件下で下水道管を製作した場合に必要な強度発現の検討を行ったものである。研究結果から、強度発現が蒸気養生で改善されること、遠心成形と蒸気養生で製作した下水道管の耐硫酸性がセメントを主成分とするヒューム管よりも優れていること、外圧試験でのひび割れ荷重と破壊荷重が規格値を満足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, 粒度調整灰, 蒸気養生, 耐硫酸性, 下水道管

## 1. はじめに

下水道管として用いられる鉄筋コンクリート管（以下ヒューム管）は、コンクリートが腐食することで劣化が急速に進行し、標準耐用年数である50年を経ずして下水道管としての機能を失うことが問題となっている。

ヒューム管の腐食は、管内で発生、滞留した硫化水素が微生物酸化で生成される硫酸によってコンクリートに激しい硫酸劣化<sup>1)</sup>が生じることに起因しているものである。腐食により劣化した管路は道路陥没事故等の原因となり、大きな社会問題になっている。下水道管を健全な状態で、維持、補修、更新するためには、高額の費用が必要となり、管理者の大きな負担となっている。そこで、維持管理費用の削減を目的に耐用年数が100年以上で高耐久性の下水道管の開発が求められている。

近年では地球環境の保全が重視されるようになり、例えば、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に関する研究<sup>2)</sup>や、フライアッシュと高炉スラグ微粉末、および二水石膏から成る粉体をセメント代替とした高強度硬化体<sup>3)</sup>に関する研究などが報告されるようになった。本研究では、下水道管の耐久性向上と製造時の環境負荷軽減を考慮し、産業副産物を有効活用した新しい材料を提案する。本研究で提案した硬化体（Industrial By-Product Materials：以下IBPM）は、火力発電所の集塵機で捕集される「フライアッシュ」、銑鉄製造過程で副産される「高炉スラグ微粉末」、下水汚泥焼却灰の粒度を調整した「粒度調整灰」、IBPMの緻密化と強度向上に有効なアーク式電気炉の排ガス中から集塵した「シリカフェーム」で構成されている。

このIBPMを用いて製造した下水道管の性能を確認する目的で硫酸浸漬試験と外圧試験等により検証した。

## 2. IBPMの特性

### 2.1 使用材料

IBPMの使用材料の構成は、表—1に示すとおりである。IBPMはフライアッシュと高炉スラグ微粉末を中心に、粒度調整下水汚泥焼却灰とシリカフェームを加えた4種類の産業副産物と、これにポゾラン反応促進用の水酸化カルシウム（消石灰）をアルカリ刺激剤として使用すると共に、硬化後の収縮抑制剤として膨張材を加えた6種類の材料に細骨材、粗骨材、高性能減水剤と水を加えた計10種類の材料で構成している<sup>4)</sup>。

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	JIS A 6201 (II種)
高炉スラグ微粉末	BFS	JIS A 6206 (粉末度4000)
粒度調整灰	SA	63μm (250mesh) 通過率90%以上
シリカフェーム	SF	JIS A 6207
水酸化カルシウム (消石灰)	Ca(OH) <sub>2</sub>	JIS R 9001 特号
膨張材	EX	JIS A 6202 (石灰系)
細骨材	S	JIS A 5005 砕砂
粗骨材	G	JIS A 5005 砕石2005
高性能減水剤	Sp	JIS A 6204 (ポリカルボン酸系)
水	W	水道水

\*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

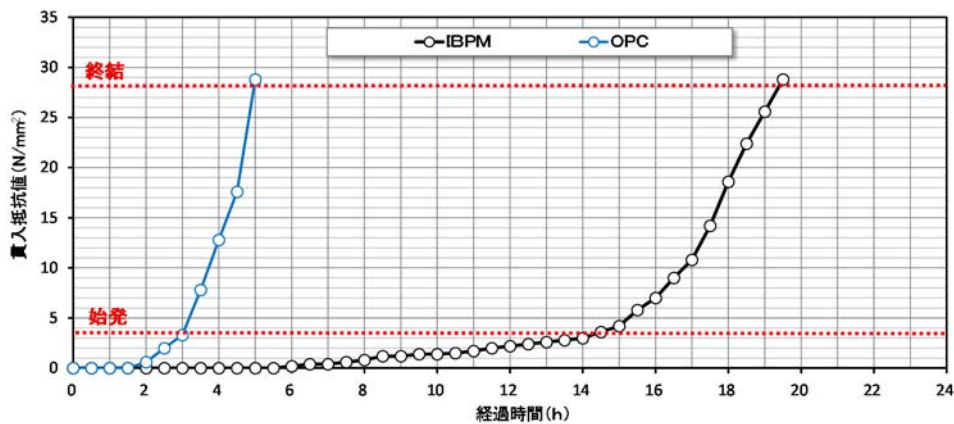
\*4 足利大学 工学部 創生工学科 教授 （正会員）

表—2 IBPM の配合例

Gmax (mm)	SLF (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
					W	FA	BFS	SA	SF	Ca(OH) <sub>2</sub>	EX	S	G	Sp
20	65 ±5	2 ±1.5	33	41	170	207	207	26	30	20	30	639	959	5.72

表—3 普通セメント (OPC) 製コンクリートの配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	OPC	S	G	Sp
20	6 ±2	2 ±1	31	41	147	470	746	1055	3.76



図—1 凝結試験結果

## 2. 2 IBPM の配合

IBPM の配合例を表—2 に示す。IBPM の配合は暫定的に、スランプフローが 650 ± 50mm の高流動タイプとした。これにより、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を目的とした。また、フライアッシュや高炉スラグ微粉末など、結合材の混合比率は、予めモルタル実験を行って決定したものであり、圧縮強度に加えて必要なワーカビリティとプラスティシティがあることを考慮して決定した。

表—2 に示す IBPM の配合は、ヒューム管などの遠心成形製品や、セグメントなどの振動成形製品のいずれの製品にも適用できるものである。当該配合を各製品に適用する場合は、W/B や s/a を製造の対象とする製品のフレッシュ性状 (SL など) に合わせて調整すれば対応可能である。なお、本研究では、IBPM の特性を普通ポルトランドセメント等の各種セメントと比較して検討している。その際に W/B をほぼ一定の条件で検討しているが、今後、同一の圧縮強度において比較するなどの検討が必要である。

## 2. 3 IBPM の凝結

IBPM の凝結時間は、コンクリートの凝結時間試験方

法に基づくプロクター貫入抵抗試験に準じて計測した。この試験では、表—2 の配合から粗骨材を取り除いた IBPM の凝結時間を計測すると共に、普通セメント製コンクリート (OPC) の凝結時間の違いを把握するために表—3 に示す配合 (粗骨材を除く) の凝結時間も併せて計測した。凝結試験の結果は図—1 に示すとおりであり、IBPM の始発は約 14 時間、終結は約 19 時間後であった。これに対して、OPC の凝結時間は始発が約 3 時間、終結は約 5 時間であった。この結果 IBPM の凝結時間は OPC に比較して始発で 4.5 倍、終結で 3.8 倍ほど遅延した。この理由は、IBPM の凝結がポゾラン反応 (フライアッシュ) と潜在水硬性 (高炉スラグ微粉末) に依存しているためであると推察された。このため凝結を水和反応に依存している OPC に比較して始発や終結が遅延したものとする。

なお、本凝結試験結果の一部は既に発表済である<sup>4)</sup>。

## 3. IBPM 製下水道管の製造

### 3. 1 蒸気養生による早期強度発現性

ポゾラン反応や潜在水硬性は、材料の養生温度に依存され、養生温度が高いほど強度発現までの時間が短縮されることが既に報告されている<sup>5)6)7)</sup>。

IBPM をプレキャスト製品工場で製造する場合、OPC に比べて脱型までの時間が長くなることが想定された。このため、蒸気養生による IBPM の強度発現性について確認を行った。

蒸気養生による強度発現性の確認は、表—2 の IBPM を振動成形で作製した円柱供試体（φ100×200mm）を用いて表—4 に示す蒸気養生条件で行った。その後、所定の材齢（1日、7日、14日、28日、56日）までの間は気温 20℃ 湿度 60% の恒温恒湿室内で養生し、圧縮強度試験を行った。この時、表—3 に示した普通セメント（OPC）製コンクリート配合の供試体も振動成形で作製し、同じ条件で養生後、圧縮強度試験を実施した。

図—2 に、IBPM と OPC 製コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。IBPM の圧縮強度は脱型時の材齢 1 日には 30N/mm<sup>2</sup> 以上が発現し、材齢 56 日には 42N/mm<sup>2</sup> まで強度増進が図られたことを確認した。蒸気養生を行わない場合、翌日（材齢 1 日）の脱型は困難であることから、蒸気養生によって IBPM の円滑な強度発現性が得られことが分かった。なお、図—2 に示した IBPM の圧縮強度は、ほぼ同一 W/B の OPC コンクリートと比べて大幅に小さくなっている。IBPM の圧縮強度と W/B の関係については今後検討する予定である。

### 3. 2 遠心成形による成形

IBPM を用いた下水道管の製造は、ヒューム管の製造工程で用いられる遠心成形を採用した。遠心成形は、表—5 に示すように適切に時間設定された低速、中速、高速の 3 段階の加速度で材料を締めて成形する工法である。この原理による遠心成形の利点は、遠心力で材料が鋼製外型枠に押しつけられることで、IBPM 中に含まれる余剰水がスラッジ水として管の内壁面側に絞り出され、IBPM が緻密化することである。このため、遠心成形を IBPM の成形に適用する場合もこの効果が期待できるため、IBPM 製下水道管の品質向上には効果的な成形法であると考えられる。

## 4. IBPM 製下水道管の性能

### 4. 1 耐硫酸性

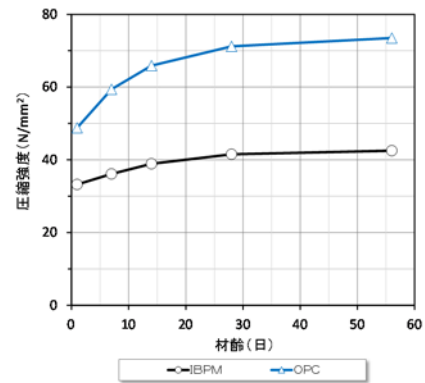
IBPM を用いて製造された IBPM 製下水道管を下水道施設に用いるためには、IBPM が下水道の環境に耐え得ることを確認する必要がある。特に、嫌気性微生物により生成されて管内に滞留する硫化水素は、好気性微生物の酸化によって硫酸となりコンクリートを腐食させる。このため、IBPM を用いて製造された下水道管には、硫酸に対する高い耐腐食性が求められる。

本研究では、IBPM を用いて製造した IBPM 製下水道管の耐腐食性の評価を目的として、硫酸への浸漬試験を実施した。浸漬試験に用いた IBPM は、遠心成形による

円筒形の供試体（外径 φ200mm×長さ 300mm）を蒸気養生した後、幅 50mm 程度にカットしたリング状の供試体を用いた。浸漬試験では、5%濃度の硫酸水溶液中に浸漬した際の質量変化率を 112 日間測定した。

表—4 蒸気養生条件

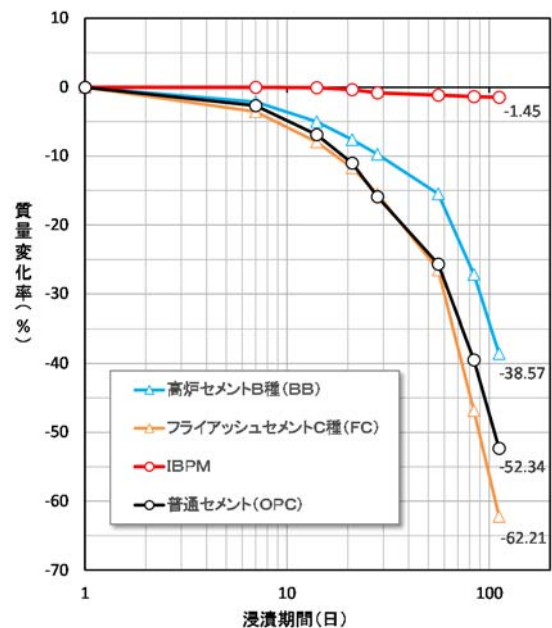
前置時間(h)	6.0
上昇温度(°C/h)	20.0
最高温度(°C)	65.0
最高温度の保持時間(h)	4.0
降温条件	自然降温



図—2 下水道管に用いた IBPM の圧縮強度

表—5 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
速度	低速	中速	高速
加速度	5G	15G	35G
成形時間	1分	1分	7分



図—3 5%濃度の硫酸水溶液に 112 日間浸漬後における各種供試体の質量変化率



IBPM



普通セメント (OPC)



高炉セメント B 種 (BB)



フライアッシュセメント C 種 (FC)

写真-1 硫酸浸漬試験における各種供試体の外観 (浸漬 112 日間)

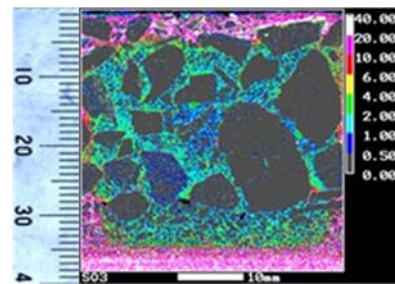
表-6 硫酸浸漬試験に用いた各種供試体の配合

種別	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	B	S	G	Sp
IBPM	31	161	520	665	977	4.16
OPC	31	147	470	735	1078	4.70
BB	31	147	470	728	1068	4.70
FC	31	147	470	718	1052	4.70

注) IBPM の結合材混入率は表-2 に準拠, BB は高炉スラグ微粉末を 50%, FC はフライアッシュを 25% 混入

また、浸漬試験では一般のセメントを用いたコンクリートの耐硫酸性を比較するために、IBPM と同じ W/B で練り混ぜ、遠心成形・蒸気養生を行った普通セメント (OPC)、高炉セメント B 種 (BB)、フライアッシュセメント C 種 (FC) を用いた供試体との比較を行った。表-6 に各種供試体の配合を示す。

浸漬試験の結果は図-3 に示すとおりである。IBPM を除く供試体では、浸漬 7 日以降に供試体表面からペーストが溶出し始め、質量減少が認められる。浸漬試験開始後 112 日までの供試体の質量変化率は、写真-1 から分かるように、FC が-62.2%、OPC が-52.3% で、BB については -38.6% であったが、内側は比較的健全な状態にあり、高炉スラグ微粉末の効果で硫酸腐食への抵抗性が高いことを改めて確認した。これに対して、IBPM の質量変化率は-1.5% と小さく、IBPM の硫酸に対する耐腐食性は他の材料と比較して高いことが確認された。



(赤色の部分が硫黄イオンの存在を示唆)

写真-2 EPMA 分析による硫黄イオン浸透深さ

また、IBPM に次いで質量変化率が小さい BB の供試体は、粗骨材 (最大粒径 20mm) が表面側から剥脱し、質量変化率が最大を示した FC においても、内側のモルタル層の周辺を除いて、表面から 25mm 程度まで粗骨材が剥脱していたことを目視で確認した。これは、硫酸に溶けやすいセメントの配合比率が、BB の供試体よりも FC の供試体の方が多いためであるものと考えられる<sup>8)9)10)</sup>。

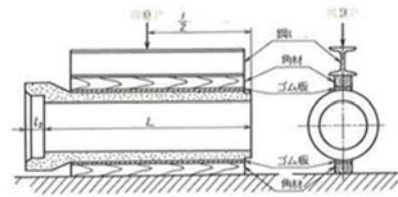
次に、腐食は供試体の表面から硫酸が侵入することで進行するため、浸漬試験を終えた IBPM から供試体 (リング部の厚さ 40mm) を採取して EPMA 分析を行い、IBPM に侵入した硫黄イオンの深さを測定した。

EPMA 分析結果の画像を写真-2 に示す。画像から確認できる IBPM への硫黄イオンの侵入深さは、端面からの硫酸浸透の影響を受けて端部では 10mm 程度の浸透深さを示したが、平均的な浸透深さは約 5mm であ





写真一3 IBPMによる下水道管の外観



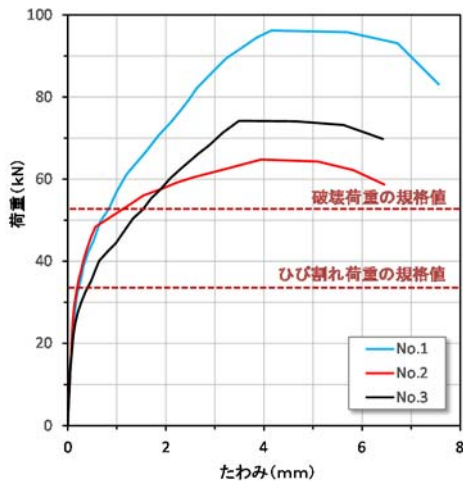
図一4 下水道管の外圧試験方法



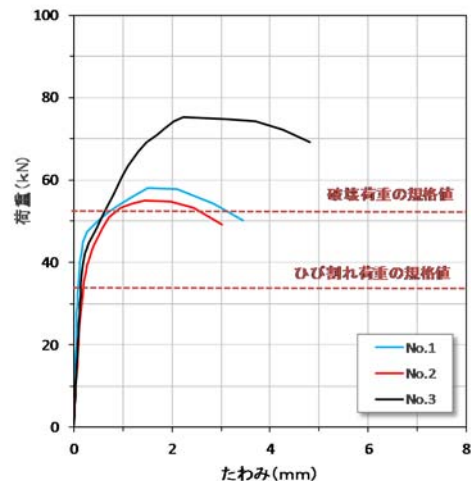
写真一4 外圧試験とひび割れの発生状況

表一7 下水道管の外圧荷重とコンクリートの圧縮強度

項目	ひび割れ荷重		破壊荷重		材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	kN/m	kN	kN/m	kN	
規格値	16.7	33.4	25.6	51.2	
IBPM	1	24.8	49.6	48.1	41.5
下水	2	24.2	48.4	32.4	
道管	3	22.2	44.4	37.1	
ヒューム管	1	19.5	39.0	29.0	71.2
	2	19.8	39.6	27.5	
	3	26.2	52.4	37.6	



IBPM 製下水道管



ヒューム管

図一5 下水道管の外圧試験結果

った。浸漬試験の結果から、セメント成分を混入していない IBPM の優れた耐硫酸性を確認した。また、コンクリートの耐硫酸性を改善するためにはセメントの配合比率を抑制することが効果的であることが分かった。このことは既往の研究報告と整合するものである<sup>11)</sup>。

#### 4. 2 外圧荷重

外圧強度は、地中深くに埋設される下水道管にとって重要な性能である。そのため、IBPM を用いて製造された下水道管の外圧荷重を評価することは、下水道管としての重要な性能を検証することになる。

本研究では、IBPM を用いて製造した下水道管の外圧試験を JIS A 5372 プレキャスト鉄筋コンクリート製品

に示されている図一4の外圧強度試験方法に準拠して行い、下水道管として必要な耐荷力が保持されていることを確認した。なお、外圧強度の比較を目的に、同じ製造設備と製造工程で製造した表一3に示す配合のヒューム管を用いた外圧試験も合わせて実施した。

プレキャスト製品工場ではヒューム管と同じ製造工程で製造した IBPM 製下水道管の外観は、写真一3に示す直径φ250mm×長さ2000mmであり、管の片側にソケット部を有する B 型管である。IBPM 製下水道管の配筋状態は、ヒューム管の仕様と同様のものであり、直径φ2.6mmの鉄筋がスパイラル状に52mm間隔で配置され、管の長さ方向には直径φ3.2mmのストレート筋

が均等間隔で、円周に8本配置されている。

外圧荷重の結果を表—7に、荷重とたわみの関係をまとめた外圧試験結果を図—5に示す。外圧試験時におけるたわみの計測は、管内面の中央部にレーザー変位計を設置して、管頂部のたわみを計測したものである。また、IBPMとヒューム管の配合は、IBPMを表—2、ヒューム管を表—3に示すとおりである。

写真—4は外圧試験によってIBPM製下水道管に発生したひび割れの状況である。この結果、IBPM製下水道管のひび割れ荷重と破壊荷重は、JISの外圧荷重の規格値を満足するものであり、同時に製造したヒューム管と比較しても遜色のない値を示した。また、コンクリートが破壊に達した時点で荷重は減少に転じ、たわみが増加している。この時点で鉄筋には変形が認められるものの、破断には至っていない。

IBPM製下水道管は、破壊に至るまでのたわみがヒューム管に比較して大きい傾向にあることが確認された。この結果は、図—2に示した振動成形による円柱供試体の圧縮強度試験結果とは異なり、遠心成形によって高流動タイプのIBPMが締固められたことで、IBPMの緻密化が促進されたものと推察する。IBPM製下水道管の破壊荷重がヒューム管より大きくなったのは、ヒューム管(SL 6.0cm)に比べて高流動タイプの方がスラッジ水の排出量が大幅に増加し、型枠への充填性や管内面の締固め状態が向上することが顕著な為と考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、主にフライアッシュと高炉スラグ微粉末を起源とし、ポルトランドセメントの代わりにアルカリ刺激材として水酸化カルシウムを使用したIBPMについて、凝結時間、耐硫酸性、外圧荷重を評価した。その結果、得られた知見は以下のとおりである。

- 1) IBPMの凝結時間は、始発が14時間、終結が19時間であるが、蒸気養生を行うことで、IBPMの圧縮強度は材齢1日で30N/mm<sup>2</sup>以上が得られた。
- 2) 遠心成形で製造したIBPMによる下水道管の耐硫酸性を評価した結果、IBPMを用いた供試体の質量変化率は最も小さく、次いでBB、OPC、FCの順であった。更に、IBPMの硫酸イオンの浸透深さは僅かに5mm程度で、外観も概ね健全な状態であったことからIBPMの優れた耐硫酸性を確認した。
- 3) IBPMを用いて、ヒューム管と同じ製造施設、製造工程で製造した下水道管の耐荷性能を、外圧試験で評価した結果、ひび割れ荷重や破壊荷重は規格値を

満足した。また、本外圧試験の結果では、IBPM製下水道管はヒューム管に比べて破壊に至るまでのたわみが大きい傾向にあった。

以上の結果を踏まえて、今後はIBPMとコンクリートの表面性状の違いによる水の流れの差や、摩耗に対する抵抗性の違いを検証し、IBPM製下水道管の製品化に向けた研究開発を推進する所存である。

## 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) 鈴木 成、藤原浩巳、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、2014.6
- 3) 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
- 4) 畑 実、杉本克美、林 悦朗、井川秀樹：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、No.1、pp.1917-1922、2018.6
- 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、2012.6
- 6) 久我龍一郎、千葉裕人、久田真、岩城一郎：高炉セメントコンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響、コンクリート工学年次論文集 Vol.28、N01、pp.437-442、2006
- 7) 山城洋一林透、笠井秀男、齋藤敏雄：フライアッシュコンクリートの初期強度低下対策に関する研究、土木学会北海道支部論文集第61号、V-2、平成16年度
- 8) 松本匡司、米倉亜洲夫、伊藤秀敏：混和材混入による耐硫酸性モルタルの開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No1、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) 小川彰一、野崎隆人、山田一夫、坂井悦朗：フライアッシュ混合セメントの耐硫酸塩性に及ぼすフライアッシュの特性とSO<sub>3</sub>量および石灰石微粉末の効果、Cement Science and Concrete Technology、Vol.66、pp.414-421.2012